



- ปีการศึกษา 2538

การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ
DESIGN OF AN AIR-CORE SOLENOID INDUCTOR



โดย
นายปฏิพัทธ์ ธาดาจันทร์
นายสำเริงศักดิ์ ช่วยสกุล

วัน เดือน ปี..... 31 ก.ค. 2538
เลขทะเบียน..... 037031
เลขเรียกหนังสือ..... T 38124 2136 ก.

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชัยวุฒิ จัตราอุทัย

อ.วีระศักดิ์ วงศ์วิวัตติ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

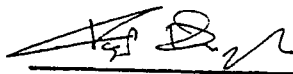
ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

ผู้จัดทำ





อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ชัยวุฒิ จัตราหทัย)



(อ. วีระศักดิ์ วงศ์วิวัต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	V
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ตัวเหนี่ยวนำ	3
2.1 ตัวเหนี่ยวนำ	3
2.2 ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่ผลต่อกระแสไฟฟ้า	4
2.3 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ	5
บทที่ 3 การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	9
3.1 รูปแบบของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	9
3.1.1 การหาค่าอินตีกแตนท์ที่อนุกรม	9
3.2 การกำหนดสูตรจากปัญหาของการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	11
3.3 การแก้ปัญหาโดยการวิเคราะห์เพื่อให้ค่าดีขึ้น	12
3.4 แสดงการหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปร a, b และ c	13
3.5 รูปแบบที่ใช้ในการออกแบบ	21
3.5.1 Welsby formular (ค.ศ. 1960)	21
3.5.2 Middendorf formular (ค.ศ. 1990)	23
บทที่ 4 การออกแบบโดยใช้วิธีนัมเมอร์ริคัลเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	25
4.1 หัวข้อในการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	25
4.1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมโดยทั่วไป	25
4.1.2 ลักษณะของเงื่อนไข	27
4.1.3 ข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสม	29
4.1.4 เกณฑ์ค่าที่จะนำมาใช้	32
4.2 การหาค่าโดยใช้เกรเดียนท์	33
4.2.1 ค่าประมาณของขอบเขตความแตกต่าง	34
4.2.2 การวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับความเร็ว	39
4.3 การใช้นัมเมอร์ริคัลหาค่าที่เหมาะสมในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข	41
4.3.1 การกำหนดทิศทางหรือแนวทางในการวิเคราะห์	
และขั้นตอนในการวิเคราะห์	42

4.3.1.1	แนวทางในการกำหนดวิธีการ	42
4.3.1.2	วิธีใช้คอนจุกของเกรเดียนท์	43
4.3.1.3	วิธีวัดค่าความเปลี่ยนแปลง	43
4.3.2	ตัวอย่างของนัมเมอร์ริคัล	45
4.4	วิธีการแปลงค่า	47
4.4.1	เทคนิคการจัดลำดับกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข	49
4.4.2	วิธีทำโทษค่าภายนอกของฟังก์ชัน	49
4.4.3	วิธีทำโทษค่าภายในของฟังก์ชัน	51
4.4.4	วิธีทำโทษค่าภายในที่เพิ่มขึ้นของฟังก์ชัน	52
4.4.5	ขั้นตอนโดยทั่วไปของ SMUT	53
4.4.6	วิธีการใช้ลากรังจ์เป็นตัวคูณ	54
บทที่ 5	ผลการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	57
5.1	ผลการคำนวณของโปรแกรม	57
5.2	แสดงพื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	60
5.3	ผลจากการทดสอบ	66
5.4	เปรียบเทียบผลจากการคำนวณของโปรแกรมกับผลการทดสอบ	70
5.5	การสร้างขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ	71
5.5.1	การทำบ็อบบิ้น	71
5.5.2	การพันขดลวด	73
5.5.3	การอาบน้ำยาวานิช	73
5.6	วิธีการทดสอบหาค่าขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ	74
5.6.1	การหาค่าความเหนี่ยวนำโดยวิธี โวลท์แอมป์	74
5.6.2	การหาค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้มิเตอร์	75
5.6.3	การหาค่าคงที่ของขดลวดเหนี่ยวนำ	76
บทที่ 6	สรุปและวิจารณ์	77
ภาคผนวก		
	- แสดงโปรแกรมหาค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด	
	- แสดงโปรแกรมหาค่าความยาวลวดที่น้อยที่สุด	
	กิตติกรรมประกาศ	
	เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบขดลวด โซลินอยด์แกนอากาศ

นายปฏิพัทธ์ ธาดาจันทร์
 นายสำเร็จศักดิ์ ช่วยสกุล
 อาจารย์ที่ปรึกษา
 ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย
 อ.วีระศักดิ์ วงศ์วิวัตติ
 ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบขดลวด โซลินอยด์แกนอากาศเพื่อให้มีค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด เมื่อกำหนดความยาวของขดลวดและพื้นที่หน้าตัดของขดลวดหรือถ้ากลับกันคือ กำหนดค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการและค่าพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่ารัศมีของคอยด์ (a), ความหนาของคอยด์ (b), ความหนาของคอยด์ (c) และจำนวนรอบของคอยด์ (N) โดยใช้วิธีการหาค่าจำนวนที่เหมาะสม (Numerical optimisation) โดยมีรูปแบบในการออกแบบ 2 รูปแบบคือ Welsby formular (ค.ศ. 1930) และ Middendorf formular (ค.ศ. 1990) ซึ่งในการออกแบบเพื่อต้องการที่จะสามารถนำขดลวดที่ได้จากการออกแบบ ไปใช้งานจริงได้และประหยัดที่สุด ซึ่งเมื่อได้ข้อมูลจากการคำนวณของโปรแกรมแล้วนำไปสร้างต้นแบบเพื่อจะเปรียบเทียบค่าที่ได้ ซึ่งผลที่ออกมาจะใกล้เคียงกันมากในส่วนที่แตกต่างกันนั้นอาจจะมาจากแฟลคเตอร์ต่างๆ และอีกอย่างคือสามารถนำหลักการนี้ไปพัฒนางานด้านอื่นต่อไป

Design of an Air-Core Solenoid Inductor

Padipat Tadajan

Samrengsak Chuaysakul

Dr.Chaiwut Chatuthai Advisor

Asse.Prof.Weerasak Wongwiwat Advisor

1996.

Abstract

This thesis is aims to presentation detailed about designing of air-core solenoid inductors proposed to have achives the maximum values of inductance, wherever the length and cross-section area of coil are given, or alternative way, if the desired values of inductance and cross-section area given. Due to provides the program computing the optimum dimention, namely, (a) the radius of coil, (b) the length of coils, (c) the thickness of coils, (N) turn of coils, by mean of Numerical Optimisation Technique wich having devided into two models for designing know well as "Welsby formular" (1930s) and "Middendorf formular" (1990s) in which the most of the designing are aimed tobe attains for the practically application and most of an economic. When we have achived data from computing program, and then, we used all of them bring to constructed the the protocol inductor., we have been verify comparisons values between its which we found that results were little bit different, for the reason may be cause of some other factors were associated, but not much affective. Once the most essentially proposal is to announce this principle for a great deal of further applications.

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	3
รูป 2.2 แสดงการเหนี่ยวนำไฟฟ้าจาก L_1 ไป L_2	4
รูป 2.3 สัญลักษณ์ของคอยล์แกนอากาศ	5
รูป 2.4 สัญลักษณ์ของคอยล์ที่มีค่าคงที่และปรับค่าได้	5
รูป 2.5 สัญลักษณ์ของคอยล์แกนอากาศในเครื่องรับวิทยุ	6
รูป 2.6 สัญลักษณ์ของไอเอฟคอยล์ในเครื่องรับวิทยุที่ใช้หลอดสูญญากาศ	6
รูป 2.7 แสดงสัญลักษณ์อินพุตกับเอาพุตทรานส์ฟอร์มเมอร์	6
รูป 2.8 สัญลักษณ์ของโซ๊ค	7
รูป 2.9 สัญลักษณ์ของอโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์	7
รูป 2.10 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงกำลัง	8
รูป 2.11 สัญลักษณ์ของลำโพง	8
รูป 3.1 แสดงแบบจำลองเลเซอร์โซลินอยด์	10
รูป 4.1 การหาค่าที่เหมาะสมโดยทั่วไป	27
รูป 4.2 สภาวะที่ใช้บังคับที่จุดออกแบบ a , b , c และ d	28
รูป 4.3 แสดงแนวทางการวิเคราะห์จุดที่นำไปใช้	29
รูป 4.4 ความสัมพันธ์ที่ดีของฟังก์ชันที่มีเงื่อนไข	30
รูป 4.5 การใช้เรขาคณิตแสดงข้อกำหนดตามกฎ Kuhn-Tucker	32
รูป 4.6 แสดงช่วงของขอบเขตความแตกต่าง	34
รูป 4.7 วิธีการสำหรับคำนวณหาค่า h	36
รูป 4.8 ค่าที่ถูกต้องโดยประมาณของค่าความแตกต่างจาก $\partial F / \partial x_1$ ในตารางที่ 4.2 เมื่อ $\partial F / \partial x_1$ มีค่ามาก	38
รูป 4.9 ค่าที่ถูกต้องโดยประมาณของค่าความแตกต่างจาก $\partial F / \partial x_1$ ในตารางที่ 4.2 เมื่อ $\partial F / \partial x_1$ มีค่าน้อย	38
รูป 4.10 ประเภทของวิธีการวิเคราะห์	42
รูป 4.11 ขั้นตอนต่างๆในการกำหนดวิธีการแก้ปัญหา	44
รูป 4.12 ฟังก์ชันของ Rosenbrock	45
รูป 4.13 วิธีการหาค่าของฟังก์ชัน Rosenbrock ในกรณีที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้น	46
รูป 4.14 ขบวนการวนลูปหรือทำซ้ำของการออกแบบค่าตัวแปรในกรณีที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้น	47
รูป 4.15 ประเภทของวิธีการแปลงค่า	48

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ วัฒนศิริกุล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.16 แสดงวิธีการทำโทษค่าภายนอกของฟังก์ชันซึ่งใช้ค่าต่ำสุดของตัวแปรของฟังก์ชัน 1 ตัวแปรเพื่อหาค่าที่มี 2 เงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน	50
รูป 4.17 แสดงวิธีการทำโทษค่าภายนอกของฟังก์ชันซึ่งใช้ค่าต่ำสุดของตัวแปรของฟังก์ชัน 1 ตัวแปรเพื่อหาค่าที่มี 2 เงื่อนไขที่เท่ากัน	50
รูป 4.18 แสดงวิธีการทำโทษค่าภายในของฟังก์ชัน	51
รูป 4.19 ขั้นตอนทั่วไปของ SMUT	54
รูป 4.20 ขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีการใช้ลากรังจ์เป็นตัวคูณ	55
รูป 5.1 แกนขดลวดโซลินอยด์	71
รูป 5.2 ฝาปิดหัวท้ายขดลวด	72
รูป 5.3 แสดงการยึดแผ่นไม้ยึดกับแกนทรงกระบอก	72
รูป 5.4 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ	73
รูป 5.5 แสดงวงจรการใช้วิธี โวลท์แอมป์	74
รูป 5.6 การใช้มิเตอร์หาค่าความเหนี่ยวนำ	75
รูป 6.1 แสดงขั้นตอนหาค่าความเหนี่ยวนำและขนาดรูปร่างของคอยล์	78
รูป 6.2 แสดงขั้นตอนหาค่าความยาวลวดที่น้อยที่สุดและขนาดรูปร่างของคอยล์	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.1 แสดงค่าความสัมพัทธ์ของตัวแปร	21
ตาราง 4.1 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $F(\mathbf{x}) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$	37
ตาราง 4.2 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - 0.8x_2x_3$	37
ตาราง 4.3 การใช้ Powell PR และ BFGS โดยนำไปใช้ร่วมกับฟังก์ชันของ Rosenbrock	46
ตาราง 5.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Welsby formular 2 ตัวแปร	58
ตาราง 5.2 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Middendorf formular 2 ตัวแปร	58
ตาราง 5.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Welsby formular 3 ตัวแปร	59
ตาราง 5.4 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Middendorf formular 3 ตัวแปร	59
ตาราง 5.5 ผลจากการทดสอบโดยนำค่าจากการคำนวณของโปรแกรมไปสร้างต้นแบบ	67
ตาราง 5.6 แสดงผลการคำนวณจากโปรแกรม	70
ตาราง 5.7 ผลจากการทดสอบ	70

บทที่ 1

บทนำ

ในยุคสมัยที่ผ่านมาในการออกแบบหาค่าความเหนียวนำสูงสุดของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศนั้นจะเป็นการอ้างอิงตามทฤษฎีของ Maxwell (ค.ศ. 1892) และ Brook (ค.ศ. 1930) ซึ่งทำได้โดยการแทนค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าลงในสมการของตัวแปรซึ่งตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ รัศมีเฉลี่ยของขดลวด (a) ความยาวของขดลวด (b) ความหนาของขดลวด (c) และสมการที่นิยมใช้กันมากคือ Welsby formular (ค.ศ.1960)และอีกสมการคือ Middendorf formular (ค.ศ.1990) และการที่จะให้ได้ค่าความเหนียวนำสูงสุดนั้นตามหลักทฤษฎีของ Maxwell คือ $b = c$ และ $2a = 2.74c$ ซึ่งผู้ออกแบบก็จะพยายามปรับแต่งตัวแปรให้ได้ตามความสัมพันธ์ที่กล่าวมาแต่ในการออกแบบของผู้จัดทำนี้โดยใช้นัมเมอร์ริคัลในการหาค่าที่เหมาะสม (Numerical optimisation) ในการออกแบบซึ่งจัดแบบฟอร์มการออกแบบได้ 2 แบบฟอร์ม Welsby formular ประกอบด้วยสมการ 2 ตัวแปร และ 3 ตัวแปร และ Middendorf formular ประกอบด้วยสมการ 2 ตัวแปร และ 3 ตัวแปรซึ่งจากการออกแบบเพียงแต่ป้อนค่าความยาวของขดลวด (l) พื้นที่หน้าตัดของขดลวด (t) และเงื่อนไขต่างๆ ลงในโปรแกรม โปรแกรมก็จะทำการคำนวณค่าต่างๆออกมาได้แก่ค่าความเหนียวนำสูงสุด ค่าขนาดของตัวแปร a, b และ c และจำนวนรอบของคอยล์ (N) ซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้องและเป็นจริงนำค่าเหล่านี้ไปทำการสร้างต้นแบบ (Model) เพื่อนำไปใช้งานจริงต่อไป

ซึ่งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบสร้างขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการหาขนาดของตัวแปร a, b และ c และรูปร่างของขดลวดที่หาได้ยากให้ง่ายลงตามความต้องการ และยังสามารถออกแบบให้ประหยัดต้นทุนคือการลดการสูญเสียของขดลวดทองแดงที่จะใช้สร้างขดลวดเหนียวนำเมื่อสามารถออกแบบขนาด และรูปร่างของขดลวดเหนียวนำได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2 จะกล่าวถึง ทฤษฎี และ ลักษณะของตัวเหนียวนำทั่วไป

บทที่ 3 เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศและแสดงการหาความสัมพันธ์ของตัวแปร a, b, c และ N

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบโดยวิธี Numerical optimisation ที่มีเงื่อนไข และไม่มีเงื่อนไข

บทที่ 5 ผลจากการหาคำนวนของ โปรแกรมและแสดงการเปรียบเทียบขนาดพื้นที่
หน้าตัดจากสมการที่ใช้ในการออกแบบ

บทที่ 6 บทสรุป และวิจารณ์จากผลของ โปรแกรม

ภาคผนวก

- แสดงตัวอย่าง โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อหาค่าความเหนียวนำสูงสุด
ของขดลวด โชลินอยด์ แกนอากาศ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำหวังว่าปริญญาบัตรเรื่องนี้คงเป็นประโยชน์แก่ท่านผู้อ่านบ้าง ไม่น่าก็น้อย และสำหรับท่านที่สนใจสามารถนำหลักการใช้นัมเมอร์ริคัลเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Numerical optimisation) ไปพัฒนางานด้านอื่นต่อไป และถ้ามีสิ่งหนึ่งสิ่งใดผิดพลาดผู้เรียบเรียงยินดีรับฟัง และพร้อมแก้ไขให้ถูกต้องต่อไป

นาย ปฏิพัทธ์ ธาดาจันทร์

นาย สำเร็จศักดิ์ ช่วยสกุล

ผู้เรียบเรียง

บทที่ 2

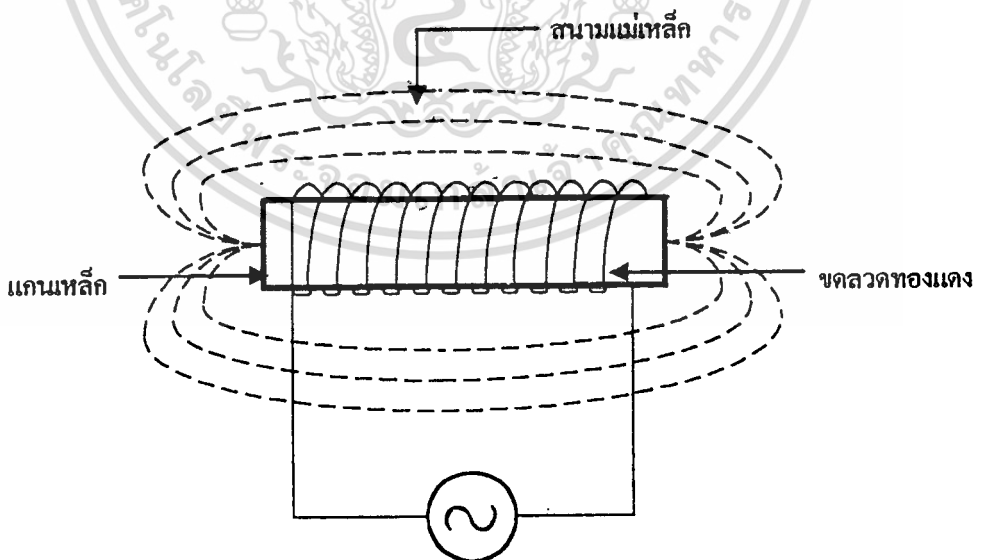
ตัวเหนี่ยวนำ

(INDUCTOR)

2.1 ตัวเหนี่ยวนำ

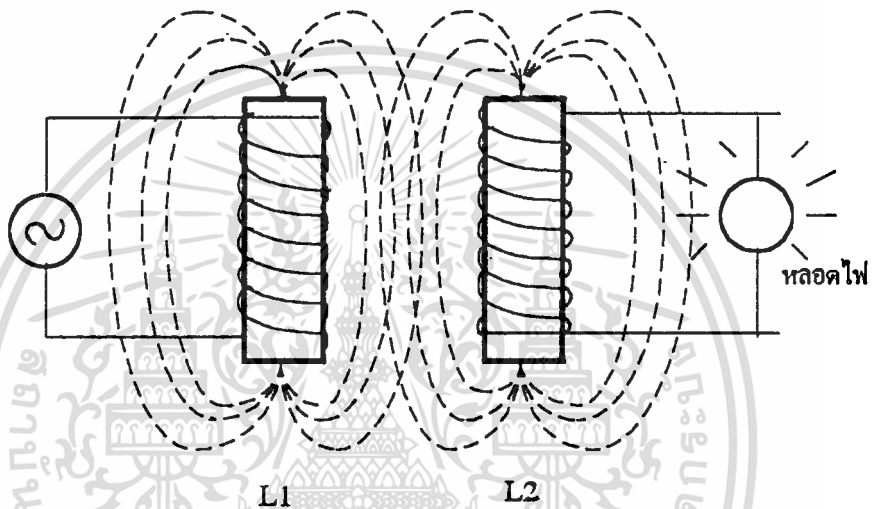
ตัวเหนี่ยวนำหรือเรียกกันทั่วไปว่า คอยล์ (coil) คือ ขดลวดทองแดงพันรอบแกนเหล็ก แกนผงเหล็ก หรือแกนอากาศ ซึ่งจะพบในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เช่น ลำโพงคอยล์อากาศ (Loud speaker air-core) ออสซิลเลเตอร์คอยล์ (Oscillator coil) ไอเอฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (IF transformer) หม้อแปลง (Transformer) ฯลฯ

หลักการของตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำหรือถ่ายทอดกำลัง คือเมื่อพันขดลวดทองแดงจำนวนหลายรอบให้อยู่บนแกนเหล็กหรือแกนอากาศ และปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวด ขดลวดจะแสดงพลังงานออกมาในรูปของสนามแม่เหล็กรอบๆขดลวดนั้นซึ่งเรียกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถดึงดูดสารจำพวกเหล็กได้เช่นเดียวกับแม่เหล็กถาวรแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ถ้านำขดลวดอีกชุดหนึ่งมาวางใกล้ๆหรือพันซ้อนบนแกนเดียวกันสนามแม่เหล็กจากชุดแรกจะตัดกับขดลวดชุดที่สองทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดชุดที่สอง ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำ แต่มีข้อแม้ว่าไฟฟ้าที่จ่ายเข้าขดลวดชุดแรกต้องเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แสดงดังรูปที่ 2.2 ขดลวด $L1$ กับ $L2$ วางอยู่ใกล้กันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้า $L1$ จะเกิดการขุดตัวของตัวของสนามแม่เหล็กรอบๆ $L1$ และไปตัดกับขดลวด $L2$ เหนี่ยวนำให้ $L2$ มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น จะเห็นว่าทิศทางกาลไหลของกระแสไฟฟ้าจะกลับทิศทางกัน



รูปที่ 2.2 แสดงการเหนี่ยวนำไฟฟ้าจาก $L1$ ไป $L2$

2.2 ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่มีต่อกระแสไฟฟ้า

ตัวเหนี่ยวนำมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า 3 ประการ คือ

1. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดจะเกิดแรงต้านหรือ หน่วงไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปได้ง่าย ๆ ค่าที่มันต้านหรือหน่วงการไหลของกระแสนี้เรียกว่า ค่าอินดักแตนซ์ (inductance) ใช้อักษรย่อ L มีหน่วยเป็น เฮนรี (Henry) แล้วยังมีหน่วยย่อยเล็กลงไปอีก ได้แก่ มิลลิเฮนรี (milli Henry) และ ไมโครเฮนรี (micro Henry)

$$1 \text{ มิลลิเฮนรี (mH) } = 1/1,000 \text{ H}$$

$$1 \text{ ไมโครเฮนรี (} \mu\text{H) } = 1/1,000,000 \text{ H}$$

2. เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำเหมือนกับค่าความต้านทานของตัวต้านทาน (resistor) มีหน่วยเป็นโอห์ม ค่าความต้านทานของคอยล์ในไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าน้อยมาก

3. เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรตัวเหนี่ยวนำจะเกิดความต้านทานในวงจรเรียกว่าค่า อินдукทีฟรีแอกแตนซ์ (inductive reactance) ใช้ตัวย่อ X_L มีหน่วยเป็นโอห์ม X_L นี้จะพบมากในวงจรเลือกความถี่ของเครื่องส่งวิทยุ ที่เรียกว่าวงจร แทงค์ (Tank circuit)

2.3 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

1. ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศคือ ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ขดลวดทองแดงพันบนกระดาษแข็งไฟเบอร์ แบคคาไลต์ พลาสติก ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศมักจะใช้ในงานทางด้านความถี่สูง เช่น ในภาครับวิทยุ และ ภาคออสซิลเลเตอร์ที่เรียกว่า Antenna coil และ Oscillator coil เป็นต้น



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของคอยล์แกนอากาศ

2. ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กหรือแกนเฟอร์ไรต์แกนแบบนี้ใช้ผงเหล็กมีทั้งชนิดค่าอินдукแตนซ์คงที่กับชนิดปรับค่าได้



ชนิดค่าคงที่

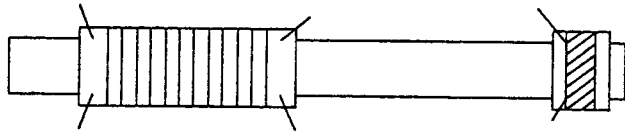
ชนิดปรับค่าได้

รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของคอยล์แกนอากาศ

ตัวอย่างของตัวเหนี่ยวนำชนิดของแกนผงเหล็กได้แก่

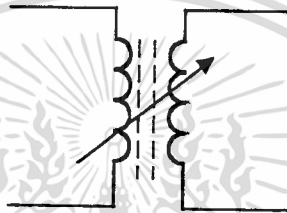
ก. คอยล์อากาศแกนเฟอร์ไรต์ (Antenna coil) จะพบได้จากภาครับคลื่นวิทยุของเครื่องรับวิทยุทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะและสัญลักษณ์ของคอยล์อากาศในเครื่องรับวิทยุ

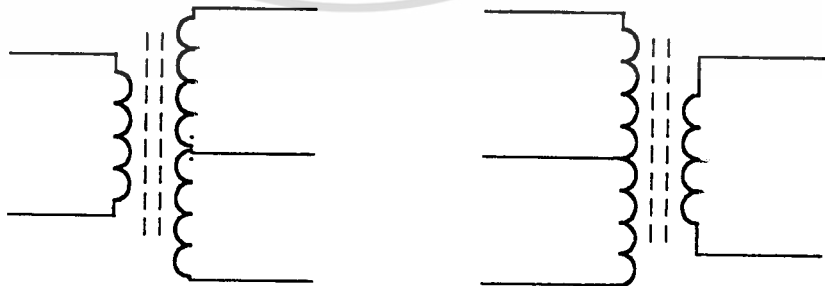
ข. ไอเอฟคอยล์หรือไอเอฟทรานสฟอร์มเมอร์ (IF transformer) และออสซิลเลเตอร์คอยล์ พวกนี้จะเป็นแกนผงเหล็กชนิดปรับค่าได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ไอเอฟคอยล์ในเครื่องรับวิทยุประเภทใช้หลอดสูญากาศ

3. ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ขดลวดทองแดงพันบนแกนเหล็ก ซึ่งใช้ในวงจรความถี่ต่ำ และภาคจ่ายไฟ (power supply) ทั่วไปได้แก่

ก. อินพุทและเอาต์พุททรานสฟอร์มเมอร์ (input and output transformer) ทำหน้าที่ส่งผ่าน สัญญาณความถี่ต่ำในภาคขยายเสียง



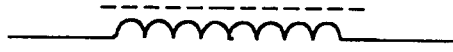
อินพุททรานสฟอร์มเมอร์

เอาต์พุททรานสฟอร์มเมอร์

รูปที่ 2.7 แสดงสัญลักษณ์ของอินพุทกับเอาต์พุททรานสฟอร์มเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการดำเนินงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้เอกสารนี้ต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งานด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

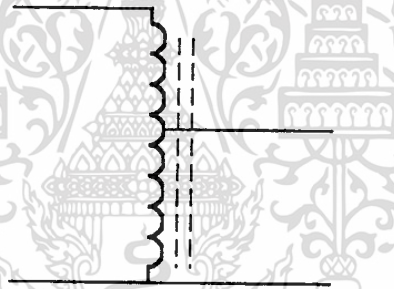
ข. โฉก (choke) ใช้ในวงจรกรองกระแสทำหน้าที่ร่วมกับคาปาซิเตอร์ในการกรองกระแสไฟให้เรียบ



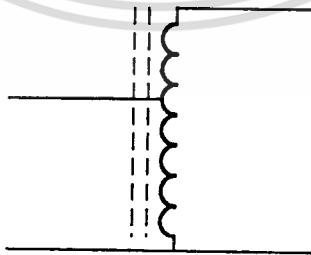
รูปที่ 2.8 สัญลักษณ์ของโฉก

ค. หม้อแปลง (Transformer) หม้อแปลงที่ใช้กันมากในภาคจ่ายไฟมี 2 ชนิด

1. ออโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Auto Transformer) เป็นหม้อแปลงที่มีขดลวดพันรอบแกนเหล็กเพียงชุดเดียวจะเป็นหม้อแปลงลงหรือแปลงขึ้นย่อมแล้วแต่การ แท็ป (tap) ปลายสายออกไปใช้งานส่วนมากใช้แปลงได้เฉพาะแรงดันเท่านั้นแปลงกระแสไม่ได้เนื่องจากมีขดลวดเพียงชุดเดียว



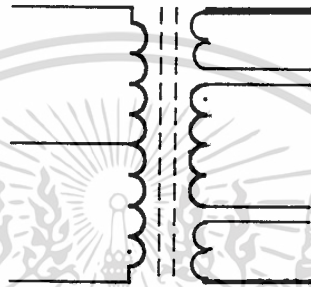
ก. สัญลักษณ์ของหม้อแปลงลงจะแท็ปสายซึ่งมีรอบจำนวนน้อยไปใช้งาน



ข. สัญลักษณ์ของหม้อแปลงขึ้นจำนวนรอบของขดลวดที่นำไปใช้งานมากกว่าขดลวดทางด้านไฟเข้า

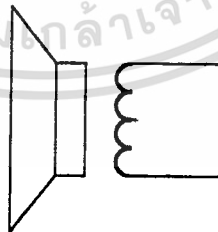
รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของหม้อแปลงออโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพาเวอร์ทรานสฟอร์มเมอร์ (Power Transformer) คือหม้อแปลงกำลังที่สามารถแปลงได้ทั้งกระแสและแรงดันอยู่ในตัวเดียวกัน ถ้าเส้นลวดทางขดทุติยภูมิโตกว่าขดลวดทางปฐมภูมิจะเป็นหม้อแปลงกระแส ก็จะได้กระแสสูงขึ้นส่วนการแปลงแรงดัน ขึ้นอยู่กับจำนวนของขดลวด ถ้าจำนวนรอบทางขดทุติยภูมิมากกว่าจำนวนรอบทางขดปฐมภูมิจะเป็นหม้อแปลงขึ้นได้แรงดันสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์ของหม้อแปลงกำลัง

ง. ลำโพง (Lound speaker) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าความถี่เสียงให้เป็นสัญญาณเสียงสัญญาณไฟฟ้าความถี่เสียงจะมีแรงดันทำให้ไดอะแฟรมหรือกรวยกระดาษเกิดการสั่นสะเทือน พร้อมกระนั้นก็จะทำให้อากาศที่อยู่ด้านหน้าเกิดการสั่นตามไปด้วยเป็นเสียงที่เราได้ยิน



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ของลำโพง

บทที่ 3

การออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

(Desing of an air-cored solenoid inductor)

สิ่งนี้ได้เป็นปัญหาในอดีตและสามารถแก้ไขได้โดย Maxwell ในปี ค.ศ.1892 คือ การที่จะทราบค่าจากคอยล์จะต้องทราบเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ของการเหนี่ยวนำด้วยตัวเองที่มีค่าสูงสุดค่า ความยาวรวมและความหนาของขดลวด ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของคอยล์ควรจะเป็น 3.7 เท่าของ ด้านพื้นที่หน้าตัดและ Brooks [1] ได้กล่าวไว้ในปี ค.ศ.1931 ว่าอัตราที่ดีคือด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัสต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดค่าที่เป็นจริงควรเป็น 2.967 แต่ค่าที่ตั้งไว้ตามจุดมุ่งหมายในทางปฏิบัติ คือ 3.0 ในตอนนี้โดยการใช้ نرمเมอริคัลเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Numerical optimisation Techniques) ต้องการที่จะประยุกต์ใช้เพื่อหาสภาพที่จะอำนวยความสะดวกประโยชน์หรือค่าที่เหมาะสมที่สุดของการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

3.1 รูปแบบของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

โดยทั่วไป ขดลวดโซลินอยด์สามารถจัดจำพวกได้ 2 ประเภท

- โซลินอยด์ที่มีชั้นเดียว (single layer solenoids)
- โซลินอยด์ที่มีหลายชั้น (multi layer solenoids)

- โซลินอยด์ที่มีชั้นเดียวสามารถพิจารณาในทางอุดมคติที่กว้างไกลซึ่งความหนาแน่นของ กระแสจะมีรูปร่างเป็นรูปแบบเดียวกันหมด ซึ่งจะไม่ทำให้พื้นผิวของขดลวดเสียหาย

3.1.1 การหาค่าของอินดักแตนซ์ที่อนุกรม (Series Inductance)

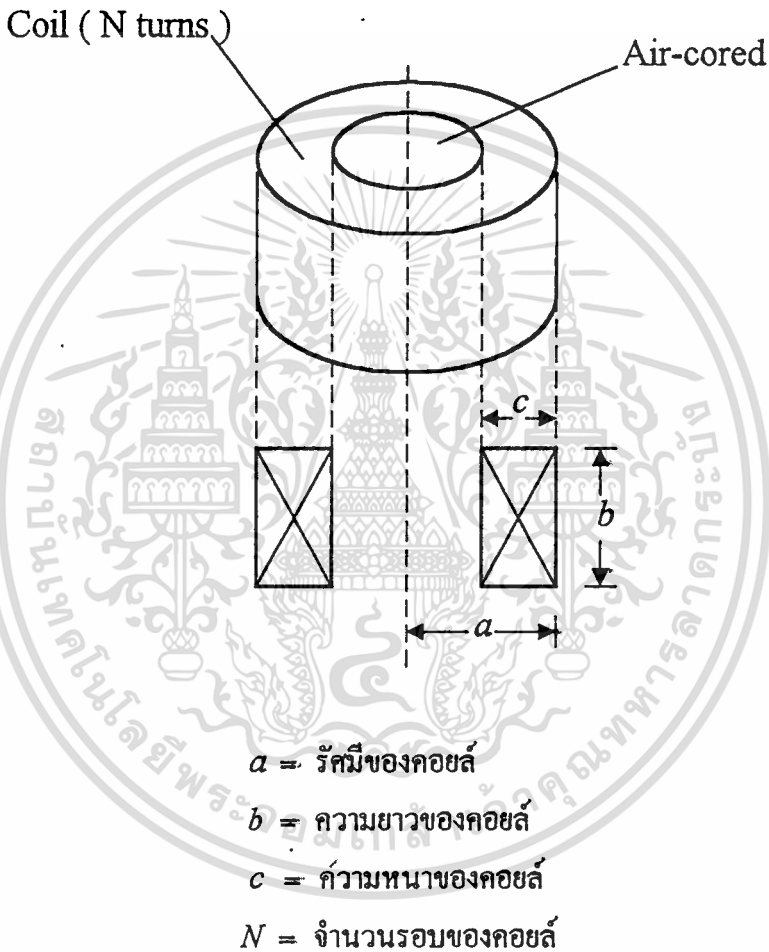
หาได้จากสมการ

$$L = \frac{4\pi^2 a_s^2 N_s^2 \times 10^{-7}}{b_s} \quad \text{Henry} \quad (3-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $N_s =$ จำนวนรอบของขดลวด
 $b_s =$ ความยาวของคอยล์ (เมตร)
 $a_s =$ รัศมีของลวดเมื่อหน้าตัดเป็นวงกลม (เมตร)
 $\pi a_s^2 =$ พื้นที่หน้าตัด



รูปที่ 3.1 แสดงแบบ โซลินอยด์ที่มีหลายชั้น

โดยสมมุติซึ่งเชื่อมกันเส้นลวดที่เราต้องการตามที่จะปรารถนาควรเป็นรูปทรงกระบอกและวัสดุไม่เป็นแม่เหล็กในทางอุดมคติเราสามารถที่จะพบในรูปแบบของตัวเหนี่ยวนำที่มีหลายชั้นที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากเพื่อให้โครงสร้างอำนวยความสะดวกประโยชน์ได้มากที่สุดและเหมาะสมที่สุด [2] และ Maxwell ได้กำหนดว่า $c = b$ และ $2a = 3.7c$ และ Brooks ได้ตั้งค่าเพื่อเป็นจุดมุ่งหมายสำหรับในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดควรเป็น $c = b$ และ $2a = 3c$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการสันนิษฐานว่าการที่ให้กระแสกระจายอย่างสม่ำเสมอที่รูปร่างพื้นที่หน้าตัด และ
 ฉนวนระหว่างรอบและชั้นของคอยล์เราไม่ควรสนใจมากนัก อย่างไรก็ตามความเป็นจริงค่าเหล่านี้
 นี้ก็มีอิทธิพลอยู่ที่อาจจากวัสดุที่เป็นฉนวนของการเหนี่ยวนำด้วยตัวเองสามารถกระทำประโยชน์ด้วย
 การแก้ไขให้ตัวประกอบเหล่านี้ดีขึ้น

ซึ่งมีหลายสูตรที่นำไปสู่การคำนวณที่ให้ค่าถูกต้องดีพอใช้ของการเหนี่ยวนำด้วยตัวเองถ้า
 เราใช้เรขาคณิตกับขดลวด โซลินอยด์และเราต้องทราบจำนวนรอบ เพื่อให้การวิเคราะห์จะได้ค่าที่
 ถูกต้องและเพื่อแก้ปัญหาของการเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ในเทอมของตัวแปร
 $x = (a, b, c, N)$

3.2 การกำหนดสูตรจากปัญหาของการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

แผนการในการแก้ปัญหาให้ดีขึ้นสามารถดำเนินไปตามเมื่อเราทราบแผนการออกแบบตัว
 แปร $x (a, b, c, N)$ ดังนั้นการเหนี่ยวนำของ $L(x)$ ที่มากที่สุดกำหนดให้ความยาว $l(x)$ และ
 พื้นที่หน้าตัด $t(x)$ ของขดลวดจากการออกแบบมีข้อบังคับ 2 ข้อบังคับแบ่งเป็น

$$l(x) = 2\pi aN \quad \text{เงื่อนไขความยาว (length constraints)} \quad (3-2)$$

$$t(x) = \frac{bc}{N} \quad \text{เงื่อนไขพื้นที่หน้าตัด (cross-section area constraints)} \quad (3-3)$$

เมื่อ $2\pi a$ เป็นความยาวของรอบขดลวด

การออกแบบ $L(x)$ คือ การวิเคราะห์ค่าที่ออกมาให้ถูกต้องและใกล้เคียงจากสมการตั้งนั้นโดยทั่วไป
 ไปรายละเอียดหรือข้อเท็จจริงของปัญหาสามารถแสดงได้เป็น

$$L(x) = \frac{315 a^2 N^2}{b \left(9 + 6 \frac{a}{b} + 10 \frac{c}{b} \right)} \quad \text{H} \quad (3-4)$$

โดยมีเงื่อนไข

$$2\pi aN - l = 0 \quad (3-5)$$

$$\frac{bc}{N} - t = 0 \quad (3-6)$$

3.3 การแก้ปัญหาโดยการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดและการเข้าใกล้

การแก้ปัญหาคตามข้อบังคับของการแมกซิไมเซชันของตัวเหนี่ยวนำทำได้โดยการวิเคราะห์การเข้าใกล้ด้วยวิธีของตัวคูณลากรังจ์ (Lagrange multipliers) สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่อยากจะเข้าใจการพิจารณาของเงื่อนไขที่เท่ากัน (equality constraint) จากสมการข้างบนถ้าความยาวและพื้นที่หน้าตัดของลวดที่กำหนดให้ ดังนั้นปริมาตรของวัสดุตัวนำ (lt) เป็นค่าคงที่ถ้าปัญหามีช่องว่างมากเกินไปซึ่งเราไม่สามารถไว้วางใจในรูปขนาดของขดลวดดังนั้น ปริมาตรของขดลวดที่มีค่าคงที่นับตั้งแต่การให้ความยาวรวมของขดลวดเป็นค่าคงที่ความยาวของรอบ ($2\pi a$) คูณด้วยจำนวนรอบที่สมมติให้เป็นค่าคงที่การพิจารณาที่กำหนดให้เพื่อให้เป็นค่าที่มาตรฐานกว่าโดยใช้สมการ

$$L(\mathbf{x}) = \frac{315 a^2 N^2}{(-9b + 6a + 10c)} \quad \text{Henry} \quad (3-7)$$

เมื่อมี 2 เงื่อนไข

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร (volume constrains)} \quad (3-8)$$

$$h_2 = 2\pi aN - l = 0 \quad \text{เงื่อนไขความยาว (length constrains)} \quad (3-9)$$

ดังนั้นจากสมการคือการแก้ปัญหาของ 4 ตัวแปรซึ่งมี 2 เงื่อนไข โดยวิธีของตัวคูณลากรังจ์

แสดงสมการได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial a} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial a} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial a} &= 0 \\
 \frac{\partial L}{\partial b} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial b} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial b} &= 0 \\
 \frac{\partial L}{\partial c} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial c} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial c} &= 0 \\
 \frac{\partial L}{\partial N} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial N} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial N} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3-10}$$

การแก้ปัญหาจากสมการเหล่านี้จะได้คำตอบออกมาเป็น $c = 0.9b$ และ $2a = 3c$ จากการวิเคราะห์การเข้าใกล้ และจากการพิจารณาการเหนี่ยวนำเพื่อให้ได้ค่ามากที่สุดเมื่อโครงร่างเป็นแบบโซลินอยด์แกนอากาศเป็น $c = 0.9b$ และ $2a = 3.33c$ จากการสังเกตการแก้ปัญหาซึ่งเพื่อให้ได้โครงร่างที่เหมาะสมและอำนวยความสะดวกประโยชน์สูงสุดด้วยปรากฏการณ์ของ Maxwell และ Brooks

3.4 แสดงการหาความสัมพันธ์ของตัวแปร a, b, c และ N

1) Welsby formular (1960)

$$L(x) = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} \text{ Henry} \tag{3-11}$$

เมื่อ

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร} \tag{3-12}$$

$$h_2 = 2\pi aN - l = 0 \quad \text{เงื่อนไขความยาว} \tag{3-13}$$

โดยใช้วิธีตัวคูณลากรังจ์ (3-10) แก่สมการดังนี้

แทนค่าลงในสมการ (3-10) แล้วทำการดิฟเฟอเรนเชียลทั้ง 4 สมการจะได้สมการใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับตัวแปร a จะได้

$$\frac{\partial \mu_0 \pi a^2 N^2}{\partial a (b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_1 \frac{\partial 2\pi abc - lt}{\partial a} + \lambda_2 \frac{\partial 2\pi aN - l}{\partial a} = 0$$

$$\frac{(\mu_0 2\pi a N^2)}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \left(\frac{\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi bc + \lambda_2 2\pi N \right) = 0 \quad (3-14)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับตัวแปร b จะได้

$$\frac{\partial \mu_0 \pi a^2 N^2}{\partial b (b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_1 \frac{\partial 2\pi abc - lt}{\partial b} + \lambda_2 \frac{\partial 2\pi aN - l}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial \mu_0 \pi a^2 N^2 (1 + 0.32 \frac{c}{a})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi ac = 0 \quad (3-15)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับตัวแปร c จะได้

$$\frac{\partial \mu_0 \pi a^2 N^2}{\partial c (b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_1 \frac{\partial 2\pi abc - lt}{\partial c} + \lambda_2 \frac{\partial 2\pi aN - l}{\partial c} = 0$$

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.32 \frac{b}{c} + 0.84)}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84)^2} + \lambda_1 2\pi ba = 0 \quad (3-16)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบตัวแปร N จะได้

$$\frac{\partial \mu_0 \pi a^2 N^2}{\partial N (b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_1 \frac{\partial 2abc - lt}{\partial N} + \lambda_2 \frac{\partial 2aN - l}{\partial N} = 0$$

$$\frac{\mu_0 2 a^2 N}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_2 2\pi a = 0 \quad (3-17)$$

จัดรูปสมการใหม่

นำ (3-15) * $(0.32 \frac{b}{a} + 0.84)$; จะได้

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (1 + 0.32 \frac{c}{a}) (0.32 \frac{b}{c} + 0.84)}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi ac (0.32 \frac{b}{a} + 0.84) = 0$$

$$\frac{\mu_0 \pi a^2 N^2 (1 + 0.32 \frac{c}{a}) (0.32 \frac{b}{a} + 0.84)}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 (0.32 \frac{b}{a} + 0.84) 2\pi ac = 0 \quad (3-18)$$

นำ สมการที่ (3-16) * $(1 + 0.32 \frac{c}{a})$; จะได้

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.32 \frac{b}{a} + 0.84) (1 + 0.32 \frac{c}{a})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi ba (1 + 0.32 \frac{c}{a}) = 0 \quad (3-19)$$

นำสมการที่ (3-18) - (3-19) จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \lambda_1 2\pi a (0.32 \frac{bc}{a} - 0.84c - b - 0.32 \frac{bc}{a}) &= 0 \\ 0.84c &= b \\ c &= 1.19b \quad (3-20) \end{aligned}$$

นำสมการที่ (3-17) * ($\frac{N}{a}$) ตลอดทั้งสมการจะได้

$$\frac{\mu_0 2\pi a N^2}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} + \lambda_2 2\pi N = 0 \quad (3-21)$$

นำสมการที่ (3-14) - (3-21) จะได้

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi bc = 0 \quad (3-22)$$

นำสมการที่ (3-16) * ($0.9 - 0.32 (\frac{bc}{a^2})$); จะได้

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.32 \frac{b}{a} + 0.84)(0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi ab (0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2}) = 0 \quad (3-23)$$

นำสมการที่ (3-22) * $(0.32 \frac{b}{a} + 0.84)$; จะได้

$$\frac{-\mu_0 \pi a^2 N^2 (0.32 \frac{b}{a} + 0.84)(0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2})}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)^2} + \lambda_1 2\pi bc (0.32 \frac{b}{c} + 0.84) = 0 \quad (3-24)$$

นำสมการที่ (3-23) - (3-24) จะได้

$$\lambda_1 2\pi ab (0.9 - 0.32 \frac{bc}{a^2}) - \lambda_1 2\pi bc (0.32 \frac{b}{a} + 0.84c) = 0 \quad (3-25)$$

$$\lambda_1 2\pi b (0.9a - 0.32 \frac{bc}{a} - 0.32 \frac{bc}{a} - 0.84c) = 0 \quad (3-26)$$

$$0.9a - 0.64 \frac{bc}{a} - 0.84c = 0 \quad (3-27)$$

$$\text{แทนค่า } b = 0.84c ; \quad 0.9a^2 - 0.84ac - 0.537c^2 = 0 \quad (3-28)$$

หาค่าความสัมพันธ์ของ a และ c จากสมการ

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = \frac{0.84c \pm \sqrt{(0.84c)^2 - 4(0.9)(-0.537c^2)}}{2 * 0.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ 2*0.9 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.84c \pm 1.625c}{18} \\
 a &= 1.37c \\
 2a &= 2.74c
 \end{aligned} \tag{3-29}$$

2) Middendorf formular (Middendorf 1990)

$$L(x) = \frac{31.5 a^2 N^2}{b \left(9 + 6 \frac{a}{b} + 10 \frac{c}{b} \right)} \mu H \tag{3-30}$$

จัดรูปสมการใหม่

$$L(x) = \frac{31.5 a^2 N^2}{(9b + 6a + 10c)} \mu H \tag{3-31}$$

ฟังก์ชันของเงื่อนไข

$$h_1 = 2\pi abc - l_1 = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร} \tag{3-32}$$

$$h_2 = 2\pi aN - l_2 = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร} \tag{3-33}$$

ใช้ตัวคูณลากรังจ์ (3-10) ในการแก้สมการ

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบตัวแปร a จะได้

$$\frac{31.5 * 2 a N^2}{(9b + 6a + 10c)} - \frac{31.5 * 6 a^2 N^2}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi bc + \lambda_2 2\pi N = 0 \tag{3-34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบตัวแปร b จะได้

$$-\frac{315 a^2 N^2 * 9}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi ac = 0 \quad (3-35)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบตัวแปร c จะได้

$$-\frac{315 a^2 N^2 * 10}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi ab = 0 \quad (3-36)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลเทียบตัวแปร N จะได้

$$\frac{315 * 2 a^2 N}{(9b + 6a + 10c)} + \lambda_2 2\pi a = 0 \quad (3-37)$$

จัดรูปสมการใหม่

นำ (3-35) * 10

$$\frac{-315 a^2 N^2 * 9 * 10}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi ac * 10 = 0 \quad (3-38)$$

นำ (3-36) * 9

$$\frac{-315 a^2 N^2 * 10 * 9}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi ab * 9 = 0 \quad (3-39)$$

นำ (3-38) - (3-39) จะได้

$$\lambda_1 2\pi a (10c - 9b) = 0$$

$$c = 0.9b \quad (3-40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

037031ไปใช้

นำสมการ (3-37) * $\left(\frac{N}{a}\right)$ จะได้

$$\frac{31.5 * 2 * a * N^2}{(9b + 6a + 10c)} + \lambda_2 2\pi N = 0 \quad (3-41)$$

นำสมการ (3-34) - (3-41)

$$\frac{-31.5 a^2 N^2 * 6}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi bc = 0 \quad (3-42)$$

นำสมการ (3-36) * 6

$$\frac{-31.5 a^2 N^2 * 6 * 10}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi ab * 6 = 0 \quad (3-43)$$

นำสมการ (3-42) * 10

$$\frac{-31.5 a^2 N^2 * 6 * 10}{(9b + 6a + 10c)^2} + \lambda_1 2\pi bc * 10 = 0 \quad (3-44)$$

นำ (3.2-9) - (3.2-10) จะได้

$$\lambda_1 2\pi b (6a - 10c) = 0$$

$$2a = 3.33c \quad (3-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะได้ค่าความเหนียวนำสูงสุดนั้นจะต้องได้ค่าอัตราส่วนดังนี้คือ

Welsby formular (1960)	$c = 1.19b$	$2a = 2.74c$
Middendorf formular (1990)	$c = 0.9b$	$2a = 3.33c$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของตัวแปร

3.5 รูปแบบที่ใช้ในการออกแบบ

รูปแบบที่ใช้ในการออกแบบเพื่อหาค่าความเหนียวนำสูงสุดของขดลวด โซลินอยด์นั้นสามารถจัดแบบฟอร์มการออกแบบ โดยใช้หลักการนัมเมอร์ริคัลในการหาค่าที่เหมาะสมได้ 2 รูปแบบคือ

- Welsby formular (1960) 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร
- Middendorf formular (1990) 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร

3.5.1 Welsby formular (1960)

$$L(x) = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{b \left(1 + 0.9 \frac{a}{b} + 0.32 \frac{c}{a} + 0.84 \frac{c}{b} \right)} \quad \text{Henry} \quad (3-46)$$

โดยมีฟังก์ชันของเงื่อนไข

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร} \quad (3-47)$$

$$h_2 = 2\pi aN - l = 0 \quad \text{เงื่อนไขความยาว} \quad (3-48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการ Welsby formular (1960) ที่มี 3 ตัวแปร

โดยกำหนดให้ตัดเงื่อนไขความยาวให้อยู่ในรูปตัวแปร (a, b, c, N)

$$N = \frac{l}{2\pi a} \quad (3-49)$$

จะได้สมการใหม่เป็น

$$L(x) = \frac{\mu_0 \pi a^2 \left(\frac{l}{2\pi a}\right)^2}{b\left(1 + 0.9\frac{a}{b} + 0.32\frac{c}{a} + 0.84\frac{c}{b}\right)} \quad \text{Henry} \quad (3-50)$$

โดยมีฟังก์ชันของเงื่อนไข

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เงื่อนไขปริมาตร} \quad (3-51)$$

- สมการ Welsby formular (1960) ที่มี 2 ตัวแปร

โดยตัดเงื่อนไขปริมาตรและเงื่อนไขความยาวให้อยู่ในรูปตัวแปร (a, b, c, N)

$$N = \frac{l}{2\pi a} \quad (3-52)$$

$$b = \frac{lt}{2\pi ac} \quad (3-53)$$

จะได้สมการใหม่เป็น

$$L(x) = \frac{\mu_0 \pi a^2 \left(\frac{l}{2\pi a}\right)^2}{\frac{lt}{2\pi ac} + 0.9a + 0.32\frac{c}{a} \left(\frac{lt}{2\pi ac}\right) + 0.84c} \quad \text{Henry} \quad (3-54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 Middendorf formular (1990)

$$L(x) = \frac{315 a^2 N^2}{b \left(9 + 6 \frac{a}{b} + 10 \frac{c}{b} \right)} \mu H \quad (3-55)$$

โดยมีฟังก์ชันของเส้นไข

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เส้นไขปริมาตร} \quad (3-56)$$

$$h_2 = 2\pi aN - l = 0 \quad \text{เส้นไขความยาว} \quad (3-57)$$

-สมการ Middendorf formular (1990) ที่มี 3 ตัวแปร

โดยตัดเส้นไขความยาวให้อยู่ในรูปตัวแปร (a, b, c, N)

$$N = \frac{l}{2\pi a} \quad (3-58)$$

จะได้สมการใหม่เป็น

$$L(x) = \frac{315 a^2 \left(\frac{l}{2\pi a} \right)^2}{b \left(9 + 6 \frac{a}{b} + 10 \frac{c}{b} \right)} \mu H \quad (3-59)$$

โดยมีฟังก์ชันของเส้นไข

$$h_1 = 2\pi abc - lt = 0 \quad \text{เส้นไขปริมาตร} \quad (3-60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-สมการ Middelorf formular ที่มี 2 ตัวแปร

โดยตัดเงื่อนไขปริมาตรและเงื่อนไขความยาวให้อยู่ในรูปตัวแปร (a, b, c, N)

$$N = \frac{l}{2\pi a} \quad (3-61)$$

$$b = \frac{lt}{2\pi ac} \quad (3-62)$$

จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$L(x) = \frac{315 a^2 \left(\frac{l}{2\pi a}\right)^2}{9\left(\frac{lt}{2\pi ac}\right) + 6a + 10c} \mu H \quad (3-63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบโดยใช้วิธีหาค่าจำนวนที่เหมาะสม (Numerical Optimisation Technique)

4.1 หัวข้อในการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

ซึ่งในการออกแบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะประกอบไปด้วยรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1.1 การหาค่าที่เหมาะสมโดยทั่วไป (General Optimisation Statement)

ในสถานการณ์การออกแบบปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมสามารถหาได้โดยสมการคณิตศาสตร์แก้ปัญหามีเงื่อนไข เพื่อหาที่เหมาะสมดำเนินตามต่อไปนี้ คือ

$$\text{โดย } F(x) \quad \text{ฟังก์ชันที่ใช้} \quad (4.1)$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{เงื่อนไขที่เท่ากัน} \quad (4.2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{เงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน} \quad (4.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{เงื่อนไขของขนาด} \quad (4.4)$$

ที่ $x = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรที่ออกแบบและเป็นเงื่อนไขของขนาดที่กำหนดขอบเขตบนการออกแบบของตัวแปร x และ x คือค่าต่ำลงและเพิ่มขึ้นตามข้อบังคับ

วัตถุประสงค์ของการกระทำและการกระทำตามข้อบังคับอาจจะเป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงของการออกแบบตัวแปร x การกระทำต้องชัดเจนหรือค่าที่เป็นนัยของ x และบางที่อาจใช้การคำนวณโดยการวิเคราะห์หรือใช้วิธีนัมเมอร์ริคัลจากค่าตัวเลขจากการพิจารณาควรแก่การ

สังเกตว่าถ้าเป็น m เงื่อนไขที่เท่ากันซึ่งข้อกำหนดของ x นั้นอาจจะเป็นไปเป็นเพื่อจะให้ตัวแปรในการออกแบบน้อยลง โดยจำนวน m ปัญหาในการทำให้ไม่มีเงื่อนไขซึ่งคือเราไม่รู้ค่า $n - m$ ในการออกแบบของตัวแปรจากเงื่อนไขของขนาด ในสมการที่ (4.4) คือการเริ่มต้นไปสู่การหาขอบเขตของการออกแบบตัวแปร เพื่อจะป้องกันจากการขยายของค่าที่ไม่เป็นทางกายภาพจากค่ากล่าวในสมการ (4.1) ถึง (4.4) คือจะไม่เหมือนกันดังเช่นตัวอย่างปัญหาในการหาค่าที่เพิ่มขึ้นตามข้อกำหนดโดยใช้ค่าน้อยสุดของสมการ (4.1) ขณะที่ $F(x)$ โดยมีเงื่อนไขว่า ต้องเป็นไปตามสมการ (4.2) ถึง (4.4)

การแก้ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขสามารถหาได้โดยการหาค่าต่ำสุดของ $F(x)$ ในสมการที่ (4.1) โดยไม่มีข้อกำหนดในการออกแบบตัวแปร x และการแก้ปัญหามีเงื่อนไขซึ่ง เงื่อนไขที่เท่ากันบางที่ควรเปลี่ยนไปเป็นแบบที่ไม่มีเงื่อนไข โดยการทำให้ตัวแปรในการออกแบบน้อยลงบางครั้งจากปัญหาของเงื่อนไขที่เท่ากันและ เงื่อนไขที่ไม่เท่ากันแก้ปัญหามีแบบไม่มีเงื่อนไขโดยใช้วิธีการแปลงซึ่งจะกล่าวในตอนหลัง ฉะนั้นควรทำความเข้าใจในการหาค่าที่เหมาะสมที่ไม่มีเงื่อนไขเสียก่อน

แสดงขั้นตอนทั่วไปสำหรับหาค่าที่เหมาะสมตามรูปที่ 4.1 ตามความเป็นจริงการหาค่าที่เหมาะสมประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

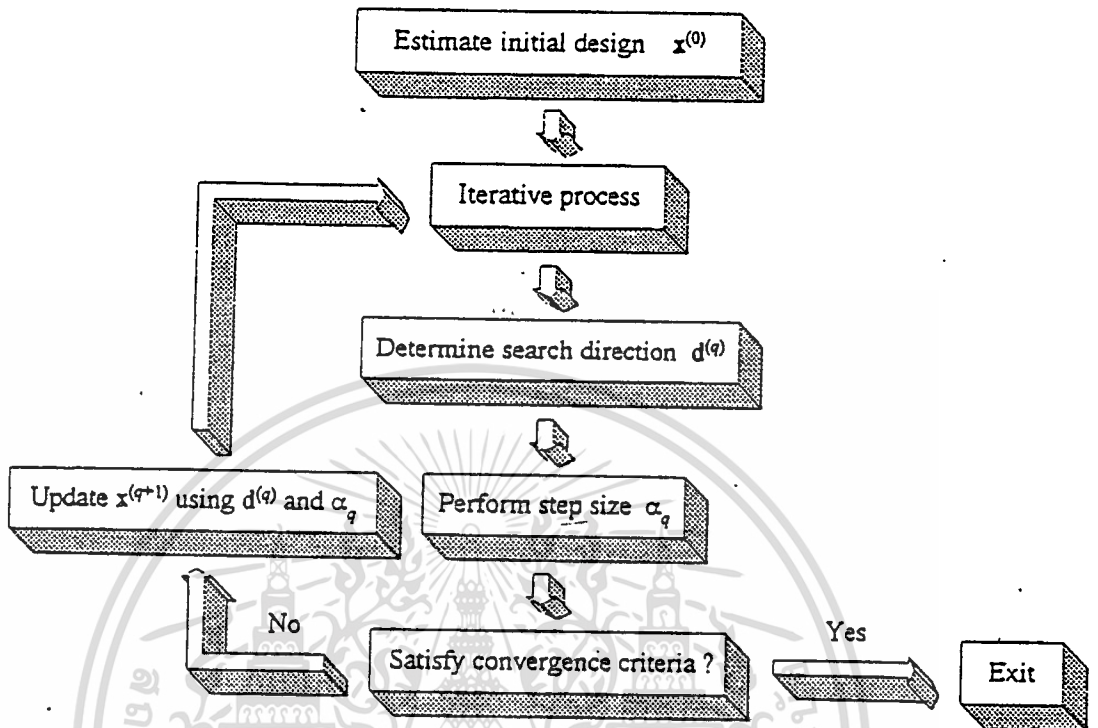
- 1) กำหนดขอบเขตของแนวทางในการวิเคราะห์ในการออกแบบ
- 2) ทำการวิเคราะห์เพื่อระบุค่า α_q เพื่อไปควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการ
- 3) จำกัดขอบเขตเมื่อกระบวนการลู่ออกได้ค่าที่พอใจ

สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบหาค่าที่สมชั้นแรกคือตั้งค่าการออกแบบของตัวแปร (x^0) ตามรายละเอียดจากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้นในการออกแบบและค่าที่เพิ่มขึ้นจากการทำงานวนซ้ำจากสมการ

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \quad (4.5)$$

ที่ค่า q คือ จำนวนครั้งของการวนลูปจากรูปแสดงการหาขอบเขตแนวทางในการวิเคราะห์และลำดับของขนาดที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การหาค่าที่เหมาะสมโดยทั่วๆ ไป

4.1.2 สถานะของเงื่อนไข (Status of Constrained)

การหาค่าที่เหมาะสมที่มีเงื่อนไขซึ่งจำกัดความของสภาพที่มีเงื่อนไขในการออกแบบ ต้องพิจารณาจากการใช้วิธีนัมเมอร์ริคัลจากการพิจารณาในรูปที่ 4.2 $g_k(x)$ คือเงื่อนไขที่ไม่เท่ากันซึ่งแบ่งขอบเขตการออกแบบที่เป็นไปได้และเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นสถานะของเงื่อนไขสามารถหาได้ดังนี้

1) เงื่อนไขที่กระทำได้

เมื่อเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ ซึ่งในการออกแบบที่จุด x คือการทำให้ได้ค่าที่พอใจ และต้องเท่ากับจุดนั้น $g_k(x) = 0$

2). เงื่อนไขที่กระทำไม่ได้

เมื่อเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ เป็นการบอกค่าที่กระทำได้ที่จุดออกแบบว่ามีค่าเป็นลบที่จุดนั้น $g_k(x^{(q)}) < 0$

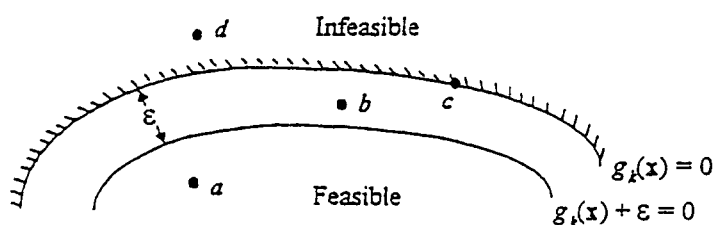
3). การฝ่าฝืนเงื่อนไข

เมื่อเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ เป็นการบอกว่าเลขจุดในการออกแบบ $x^{(q)}$ ถ้าค่าออกมาเป็นบวก $g_k(x) > 0$

4) เงื่อนไขที่กระทำได้ในช่วง ϵ

เมื่อเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ เป็นการบอกว่าที่ ϵ -active มีค่า $x^{(q)}$ ถ้า $g_k(x^{(q)}) < 0$ แต่ $g_k(x^{(q)}) + \epsilon \geq 0$ ที่ $\epsilon > 0$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก เป็นการแสดงว่าการออกแบบจะหยุดลง เมื่อได้ค่าตามข้อกำหนด

จากการอธิบายสถานะของเงื่อนไขพิจารณาที่ k th เงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน $g_k(x) \leq 0$ ในรูปที่ 4.2 อาจจะเป็นได้หรือเป็นไปไม่ได้จากที่มีเงื่อนไขเหมือนกันขอบเขตของ $g_k(x) + \epsilon \geq 0$ ซึ่งอาจจะกระทำได้ตามโครงสร้างภายในการพิจารณาการออกแบบจุด a ที่เงื่อนไข $g_k(x^{(q)})$ เป็นลบ และในขณะที่ $g_k(x) + \epsilon = 0$ ดังนั้นเงื่อนไขที่กระทำได้สำหรับการออกแบบที่จุด a , สำหรับการออกแบบที่จุด b , $g_k(x)$ ต้องน้อยกว่าศูนย์อย่างใดก็ได้ $g_k(x) + \epsilon < 0$ ดังนั้นเงื่อนไขเป็น ϵ -active ของการออกแบบที่จุด b , สำหรับการออกแบบที่จุด c , $g_k(x) + \epsilon = 0$ เพราะฉะนั้นเงื่อนไขที่กระทำได้จะเป็นการออกแบบที่จุด d , $g_k(x)$ มีค่ามากกว่าศูนย์ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ไม่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.2 สถานะที่ใช้บังคับที่จุดที่ออกแบบ a, b, c และ d ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสม

(The Necessary Condition for Constrained Optimisation)

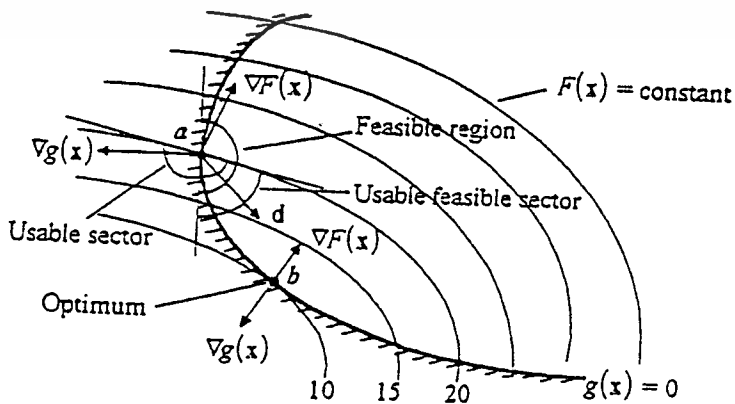
จากรูปที่ 4.3 คือการออกแบบที่ระบุจุด a ที่มีเงื่อนไขเป็นค่าที่กระทำได้ ซึ่งจะทำให้ดีขึ้นในการออกแบบซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมทิศทางในการวิเคราะห์ที่มีขอบเขตซึ่งต้องลดเงื่อนไขลงและไม่เป็นการฝ่าฝืนของเงื่อนไขที่กระทำได้ ขนาดที่เกิดขึ้นของทิศทางเวกเตอร์ d สามารถใช้ได้ส่วนหนึ่งซึ่งเกรเดียนต์(gradient)ของฟังก์ชันที่นำมาใช้ $\nabla F(x)$ ควรจะเป็นลบหรือศูนย์เสมอ การเปลี่ยนทิศทางสามารถใช้ได้ตามข้อกำหนดทางคณิตศาสตร์ ขณะที่

ทิศทางที่จะนำไปใช้
$$d^T \nabla F(x) \leq 0 \tag{4.6}$$

ยิ่งกว่านั้นขนาดของ d ซึ่งขึ้นหรือลงของเงื่อนไข $\nabla g(x)$ ที่เป็นลบหรือศูนย์ปัญหาที่พบในทางปฏิบัติของการหาค่าที่เหมาะสมอาจจะมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขที่จะกระทำได้ ซึ่งจะกำหนดเวลาในกระบวนการออกแบบเพราะฉะนั้นความต้องการที่จะเปลี่ยนทิศทางอาจจะกระทำได้ตามข้อกำหนดขณะที่

ทิศทางที่เป็นไปได้
$$d^T \nabla g_k(x) \leq 0 \text{ ซึ่ง } g_k(x) = 0 \tag{4.7}$$

ในสิ่งที่น่าสนใจที่ค่าน้อย ๆ เคลื่อนไปในทิศทางเกือบจะเข้าแทนเจนซ์ ไปสู่พื้นที่ของขอบที่เป็นไฮเปอร์ที่อาจจะเป็นไปได้ตามความประสงค์ของการฝ่าฝืนเงื่อนไข แต่ต้องลดเงื่อนไขลง เพื่อให้การทำงานเร็วขึ้น



รูปที่ 4.3 แสดงแนวทางการวิเคราะห์จุดที่นำไปใช้

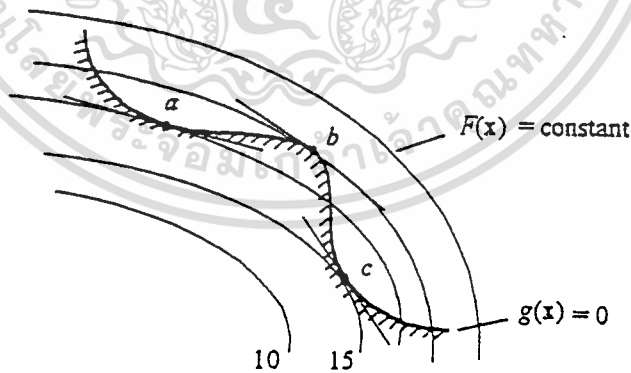
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่จุด b เป็นการออกแบบค่าที่เหมาะสมดังภาพประกอบที่ 4.1 เป็นการแสดง เกรเดียนต์ของเงื่อนไขและแทนเจนซ์ของเงื่อนไขอย่างชัดเจนไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นอาจ เป็นได้ที่เวกเตอร์ ∇F จะทำให้ได้ตามความประสงค์ของสภาพที่นำไปใช้ประโยชน์ได้และอาจกระทำ ได้เข้าใกล้แทนเจนซ์ทั้งคู่ตามขอบเขตของเงื่อนไขและตามลำดับวัตถุประสงค์และต้องมาจากมุม 90° และนี่คือ เงื่อนไขที่สามารถทำได้จากส่วนหนึ่งของคณิตศาสตร์

$$\nabla F(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.8)$$

$$\lambda_k \geq 0 ; \lambda_{1+j} \text{ restricted in sign}$$

ที่ λ คือ ตัวคูณลากรังจ์จากสมการ (4.8) มีการจำกัดขอบเขตสำหรับการออกแบบค่าที่เหมาะสมที่มีเงื่อนไขแต่ไม่ใช่เลยทีเดียวเพราะสามารถหาได้จากรูปที่ 4.4 จากจุด a , b , และ c เป็นจุดที่ พยายามข้อกำหนดของสมการ (4.8) เว้นเสียแต่ว่าจุด c เป็นค่าที่เหมาะสมทั้งหมด



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของฟังก์ชันที่มีเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนดของ Kuhn - Tucker

ถ้าเวกเตอร์ x^* เป็นค่าจำกัดขอบเขตในการหาค่าที่เหมาะสมต้องดำเนินการตามข้อกำหนด 3 ข้อคือ

1) x^* เป็นค่าอาจจะกระทำได้

เป็นความต้องการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขข้อกำหนด

$$2) \quad \lambda_k g_k(x^*) = 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \lambda_k \geq 0 \quad (4.10)$$

เป็นสิ่งที่ต้องการถ้าเงื่อนไข $g_k(x)$ ไม่เป็นที่น่าพอใจหรือ $g_k(x) < 0$ ซึ่งเป็นการสอดคล้องกับตัวคูณลากรังจ์ที่ต้องเป็นศูนย์

$$3) \quad \nabla F(x^*) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_{l+j} \nabla h_j(x^*) = 0$$

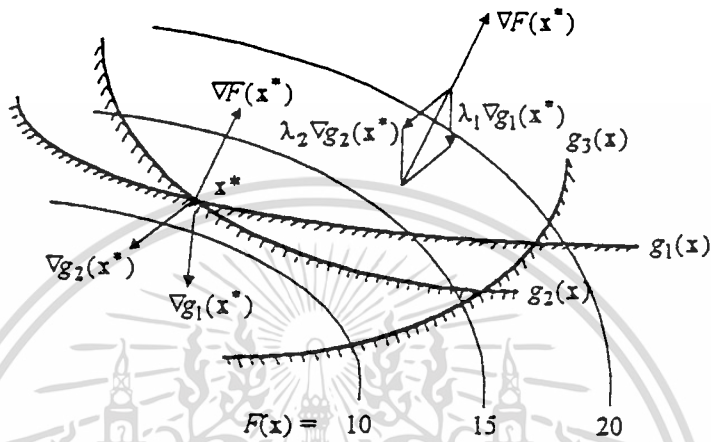
$$\lambda_k \geq 0 ; \quad \lambda_{l+j} \text{ unrestricted in sign} \quad (4.11)$$

ข้อกำหนดของ Kuhn-Tucker สามารถแสดงได้จากรูปที่ 4.5 ซึ่งกระทำให้เหลือ 2 ตัวแปร ซึ่งมี 3 เงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน ณ ค่าที่เหมาะสม (x^*) ซึ่งอาจจะกระทำได้ที่เงื่อนไข $g_3(x^*)$ จะเป็นการเพิ่มขึ้นโดยสอดคล้องกับค่าวิกฤตที่มีเงื่อนไข $g_1(x^*)$ และ $g_2(x^*)$ จะเป็นการเพิ่มขึ้นโดยสอดคล้องกับตัวคูณลากรังจ์ ผลของการรวมเวกเตอร์ต้องเท่ากับค่าลบของเกรเดียนท์ตามฟังก์ชันที่นำมาใช้ดังนั้นจากรูปที่ 4.5 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\nabla F(x^*) + \lambda_1 \nabla g_1(x^*) + \lambda_2 \nabla g_2(x^*) = 0 \quad (4.12)$$

$$\lambda_1 \geq 0 \quad \lambda_2 \geq 0$$

จากค่า $g_1(x^*) = 0$ และ $g_2(x^*) = 0$ จากข้อกำหนดข้อ 2 เป็นค่าที่ใช้ได้ ซึ่งตรงตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้นทุกช่วงของ thun - Tucker มีความจำเป็นเพื่อได้ตามความประสงค์



รูปที่ 4.5 การใช้เรขาคณิตแสดงข้อกำหนดตามกฎ Kuhn- Tucker

4.1.4 เกณฑ์ค่าที่จะนำมาใช้ (Convergence Criteria)

เป็นส่วนหนึ่งของการจำกัดขอบเขตของค่าที่เหมาะสมเมื่อค้นพบค่าที่เหมาะสม เกณฑ์การสิ้นสุดลงนี้ ควรเลือกเมื่อมีผลกระทบของประสิทธิภาพและเสถียรภาพของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมหลักเกณฑ์การรวมของคอนเวอร์เจนซ์มีค่าจำกัดความดังนี้

1) จำนวนครั้งสูงสุดในการวนลูป

ถ้าจำนวนของการวนซ้ำ q มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในข้างหน้า คือ q_{\max} ดังนั้นขบวนการทำงานจะหยุดเป็นการแน่นอนว่าถ้าการทำงานช้าเพราะว่าจากนัมเมอร์ริคัล หรือ อัลกอริทึม มีความผิดพลาดของโปรแกรมซึ่งไม่สามารถทำอย่างต่อเนื่องอย่างไม่จำกัดได้

2) ค่าสัมบูรณ์และการเปลี่ยนแปลงในฟังก์ชันที่นำมาใช้

เป็นการตัดสินใจถ้ากระบวนการลดความเร็วลงอย่างพอเพียงของการรวมกันของคอนเวอร์เจนซ์ลำดับที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบค่าจาก $F(\mathbf{x})$ บนการวนรอบอย่างต่อเนื่องเพราะฉะนั้นคอนเวอร์เจนซ์จะแสดงถ้า

$$| F(\mathbf{x}^{(q+1)}) - F(\mathbf{x}^{(q)}) | \quad (4.13)$$

เมื่อ ε_A เป็นการยอมรับตามค่าที่ระบุไว้ว่าจะเป็นค่าคงที่หรืออาจจะเป็นเศษส่วนจากค่าฟังก์ชันที่นำมาใช้ที่ \mathbf{x}^0 ดังตัวอย่างเช่น $\varepsilon_A = 0.001 |F(\mathbf{x}^0)|$ ลำดับที่ 2 เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ใน $F(\mathbf{x})$ ระหว่างการวนซ้ำอย่างต่อเนื่องในตอนนั้นคอนเวอร์เจนซ์จะบ่งชี้

$$\frac{2 | F(\mathbf{x}^{(q+1)}) - F(\mathbf{x}^{(q)}) |}{| F(\mathbf{x}^{(q+1)}) | - | F(\mathbf{x}^{(q)}) | + 10^{-10}} \leq \varepsilon_R \quad (4.14)$$

ที่ ε เป็นการแสดงในการเปลี่ยนเศษส่วนตามค่าที่ระบุการทำอย่างนี้บ่อยๆเป็นการกระทำที่ดีเพราะว่าเป็นทักษะอย่างหนึ่งที่ดีกว่าข้อกำหนดบางข้อของนัมเมอร์ริคัล

3) ข้อกำหนดของ Khum - Tucker

เป็นการทำให้เงื่อนไขเหลือน้อยที่สุดซึ่งอธิบายไว้ในตอนต้นแล้วสำหรับการทำให้เงื่อนไขเหลือน้อยนั้นคือต้องการที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ $F(\mathbf{x})$ ต้องตรวจสอบแต่ละส่วนประกอบของ $\nabla F(\mathbf{x}^{(q)})$ อย่างเพียงพอก่อนจะใกล้ศูนย์หรือขนาดน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ ε_K ($\varepsilon_K = 1.00E - 04$) เป็นค่าต่ำสุดที่ถูกสร้างขึ้น

4.2 การหาค่าโดยใช้เกรเดียนท์ (GRADIENT EVALUATION)

เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญในการกระทำสำหรับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ นัมเมอร์ริคัล ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงความจริงจากค่าที่ได้มาอาจจะง่ายในการใช้การคำนวณทางวิเคราะห์

เอกสาร (Calculate analytically) และการรวมจำนวนทำได้โดยใช้เกรเดียนท์หรือ Hessian ที่ต้องใช้ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

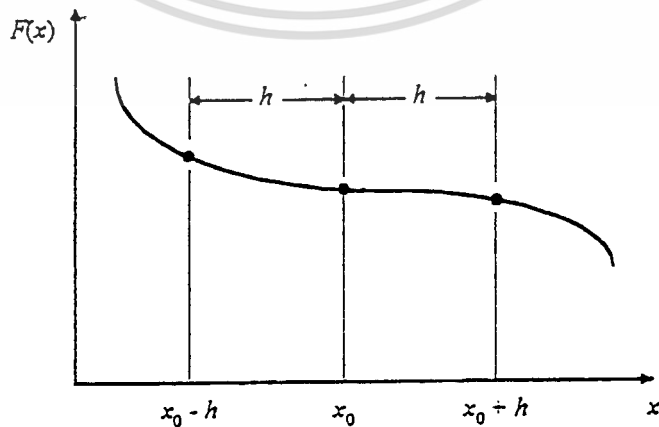
นัมเมอร์ริคัล อย่างไรก็ตามก็มีหลายวิธีที่นำไปสู่ความลำบากในการวิเคราะห์หรือยากมากในการคำนวณ ดังนั้นเป็นการสะดวกที่ใช้เทคนิคจากความแตกต่างที่มีขีดจำกัดในการหาค่าที่ใกล้เคียงจากค่าที่ได้มา มีหลายวิธีในการแก้ปัญหาที่บ่งชี้ระบบของการคำนวณเช่นการปฏิบัติการคำนวณที่นิยมใช้มากคือวิธีนัมเมอร์ริคัล เช่น จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคในการจำกัดความแตกต่างของค่า

4.2.1 ค่าประมาณของขอบเขตความแตกต่าง (Finite Difference Approximation)

เป็นผลมาจากการวิเคราะห์ที่มีค่ามาก ๆ เสมอ เมื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่มาจากทฤษฎีเทเลอร์ ซึ่งทฤษฎีบทนี้มีความสำคัญเพราะเป็นการแสดงว่าค่าการกระทำและค่าที่ออกมาเป็นจุดหนึ่งที่สามารถรู้ ดังนั้นจำนวนที่ใกล้เคียงในการกระทำหาได้จากค่าการคำนวณที่จุดหนึ่งจุดหนึ่งในย่านที่ใกล้เคียงจากรูปที่ 4.7 เป็นการพิจารณาของหนึ่งตัวแปรที่ง่ายขึ้น โดยการใช้อนุกรมเทเลอร์ของการกระทำค่า x_0 หาได้จากสมการ

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + \frac{1}{2}h^2 F''(x_0) + \dots + \frac{1}{(r-1)!} h^{(r-1)}(x_0) + \alpha(h^r) \quad (4.15)$$

ซึ่ง $| F^{(r)}(x_0) |$ เป็นขีดจำกัดในการหักช่วง $[x_0, x_0 + h]$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.6 แสดงช่วงของขอบเขตความแตกต่างนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการปฏิบัติการคำนวณเราต้องสนใจจำนวน 1 ใน 3 เทอมของการรวมจำนวนในพีชคณิต

$$F(x_0+h) = F(x_0) + hF'(x_0) + \frac{1}{2}h^2 F''(x_0) + \alpha(h^3) \quad (4.16)$$

การแก้ปัญหสำหรับ $F'(x_0)$ และค่าที่เกินเลขออกไปในแต่ละเทอมหาได้จาก

$$F'(x_0) \doteq \frac{F(x_0+h) - F(x_0)}{h} \quad (4.17)$$

ในแต่ละเทอมต้องได้ $\frac{1}{2}hF''(\xi)$, $x_0 \leq \xi \leq x_0+h$ คือเป็นค่าความแตกต่างฟอร์เวิร์ด ที่ได้ค่าออกมาและมีปริมาณ $\frac{1}{2}hF''(\xi)$ เป็นการตัดค่าที่ผิดพลาดออกจากเทอมของอนุกรมเทเลอร์ด้วยการขยายกำหนดให้ถอยหลังที่จุด x_0-h ดังนั้น

$$F(x_0-h) = F(x_0) - hF'(x_0) + \frac{1}{2}h^2 F''(x_0) + \alpha(h^3) \quad (4.18)$$

คือการขยายตัวที่นำหน้าไปสู่ ค่าความแตกต่างแบบแบ็คเวิร์ด

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0) - F(x_0-h)}{h} + \alpha(h^2) \quad (4.19)$$

เอาสมการ (4.18) ลบออกจาก (4.16) ทำให้ง่ายขึ้นและการแก้ปัญหสำหรับ $F'(x_0)$ จะได้เป็น

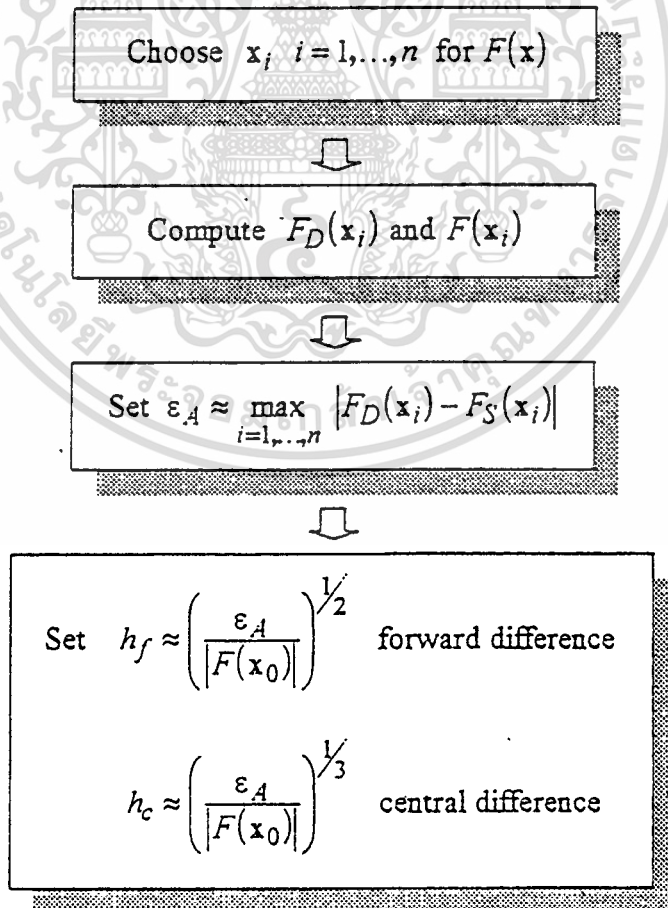
$$F'(x_0) = \frac{F(x_0+h) - F(x_0-h)}{2h} + \alpha(h^2) \quad (4.20)$$

ซึ่งในเทอมที่สำคัญเป็น $\frac{1}{6}h^2 F'''(\xi)$ ซึ่งเรียกว่าค่าความแตกต่างเซ็นทรัลในกระบวนการคำนวณที่มีขีดจำกัดความแตกต่าง และหลายค่าที่ผิดพลาดในการคำนวณจากการกระทำของตัวมันเองค่าที่ผิดพลาดตามปรกติเรียกว่า เป็นข้อกำหนดหรือเป็นการลบค่าผิดพลาดซึ่งเป็นสัดส่วนของ $\frac{1}{h}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นการรวมค่าที่ผิดพลาดในจำนวนที่ใกล้เคียงมี 2 เทอมการตัดค่าส่วนปลายโดยสัดส่วนของ h , และการลบค่า, โดยเศษส่วนของ $1/h$ สำหรับการคำนวณ h , จะดำเนินการตามในรูปที่ 4.7

จนถึงเวลานี้ความถูกต้องของค่าแตกต่างที่มีขีดจำกัดของอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากการทดสอบ 2 ฟังก์ชันของการคำนวณโดยการใช้การคำนวณทางการวิเคราะห์ และค่าขอบเขตความแตกต่าง (*GRAD-FD code*) การทดสอบครั้งที่ 1 เรียกว่า ฟังก์ชันของ Rosenbrock และอีกอย่างก็มาจากการใช้การแก้ปัญหาคือเป็นเส้นตรง ; Aroca [4] ซึ่งอธิบายไว้ในตอนท้ายแต่ละฟังก์ชันที่ทดสอบโดยมีความแตกต่าง 3 กลุ่มของ x จากตาราง 4.1 และ 4.2 แสดงค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งจาก 2 การทดสอบจะเป็นการทราบโดยทั่วไปว่าค่าความผิดพลาดของผลลัพธ์ ถ้าใช้ฟอร์เวิร์ดและค่าความแตกต่างเซ็นทรัลทำให้ได้ค่าที่พอใจในหลายๆ ค่าที่ออกมาอย่างไรก็ดีความผิดพลาดอาจจะแตกต่างกันจากความแตกต่างของฟังก์ชันและมีค่ามากจากฟังก์ชันที่ไม่เป็นลิเนียร์

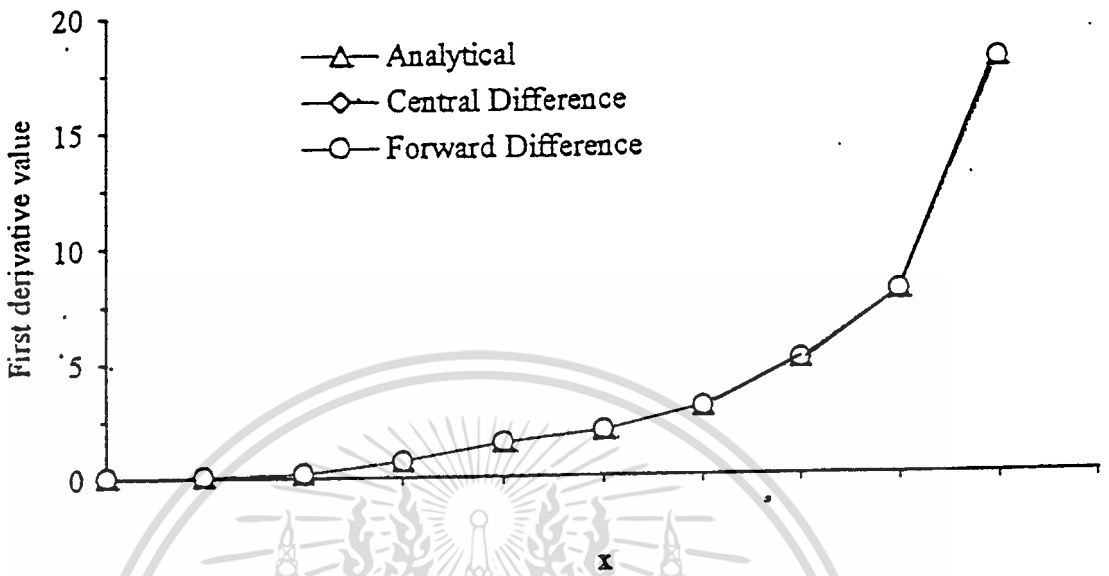


ตารางที่ 4.1 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $F(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$

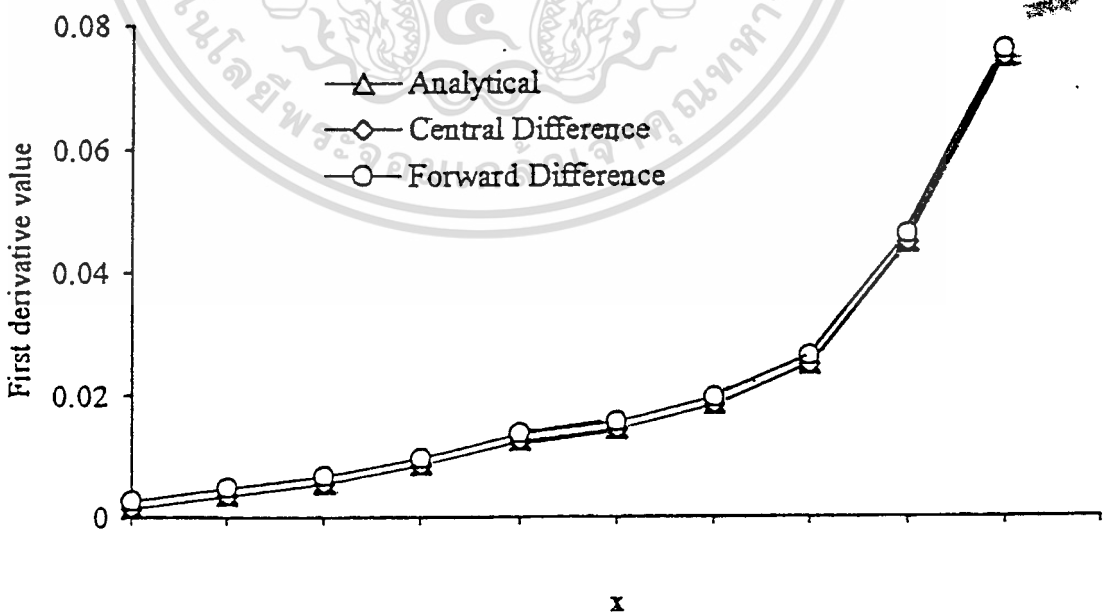
Test		I	II	III
Design	x_1	0.0005	0.5000	5.0000
variables	x_2	0.0005	0.5000	5.0000
	$F(x)$	0.9990	6.5000	40016.00
$\partial F/\partial x_1$	analytical	-1.9991	-51.0000	40008.00
	central	-1.9991	-50.9988	40008.01
	forward	-1.9990	-50.9938	40009.71
$\partial F/\partial x_2$	analytical	0.0999	50.0000	-4000.00
	central	0.0999	50.0000	-4000.00
	forward	0.1121	50.0122	-3999.98

ตารางที่ 4.2 อนุพันธ์อันดับหนึ่งของ $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - 0.8x_2x_3$

Test		I	II	III
Design	x_1	0.0005	-50.0000	500.0000
variables	x_2	0.0005	50.0000	500.0000
	x_3	0.0005	-50.0000	500.0000
	$F(x)$	1.3000E-06	7000.00	1.3000E06
$\partial F/\partial x_1$	analytical	2.5000E-03	-50.0000	2500.0000
	central	2.5000E-03	-50.0000	2500.0000
	forward	3.7529E-03	-49.9987	2500.0013
$\partial F/\partial x_2$	analytical	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	central	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	forward	3.8529E-03	140.0013	2600.0012
$\partial F/\partial x_3$	analytical	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	central	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	forward	7.2647E-04	-89.9994	100.0006



รูปที่ 4.8 ค่าที่ถูกต้องโดยประมาณของค่าความแตกต่างจาก $\partial F/\partial x_1$ ในตารางที่ 4.2 เมื่อ $\partial F/\partial x_1$ มีค่ามาก



รูปที่ 4.9 ค่าที่ถูกต้องโดยประมาณของค่าความแตกต่างจาก $\partial F/\partial x_1$ ในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อ $\partial F/\partial x_1$ มีค่าน้อย
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบการใช้ฟอร์เวิร์ดและค่าความแตกต่างเซ็นทรัลจากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เป็นการทำความเข้าใจของความแตกต่างแบบฟอร์เวิร์ดที่กระทำได้ตามความต้องการ (รูปที่ 4.8) จนกระทั่งค่าเกรเดียนต์ในกระบวนการมีค่าน้อย (รูปที่ 4.9) ดังนั้นอาจจะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อใกล้ค่าที่เหมาะสม เมื่อเกรเดียนต์ของฟังก์ชันมีค่าน้อยมากความต้องการที่ตรงที่ตรงที่ต้องการจะตามมาและค่าความแตกต่างเซ็นทรัลอาจจะใช้การแทนที่ ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบอย่างหนึ่งของการใช้ความแตกต่างเซ็นทรัลและในการรวมฟังก์ชันของการคำนวณต่อจำนวนการวนรอบที่ต้องการสำหรับค่าประมาณจากความแตกต่างเซ็นทรัล ซึ่งเป็นการต่อต้านอย่างหนึ่งสำหรับค่าประมาณจากค่าความแตกต่างฟอร์เวิร์ด ซึ่งเป็นปัญหาทางวิศวกรรมในภาคปฏิบัติที่ฟังก์ชันการคำนวณมีค่าสูง ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในรวมทุกอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ดีตามปรกติเป็นการดีที่ค่าความแตกต่างเซ็นทรัลซึ่งจำเป็นต้องใช้เมื่อมีการออกแบบ

4.2.2 การวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับความไว (Sensitivity Analysis)

ในระบบการหาค่าที่เหมาะสมสมัยใหม่คือต้องการคำนวณเกรเดียนต์ตามจุดประสงค์และตามเงื่อนไขเมื่อฟังก์ชันที่แสดงให้เห็นในการออกแบบตัวแปรเราต้องทำการพัฒนาและวิธีดำเนินการที่พิเศษสำหรับการคำนวณเกรเดียนต์วิธีการพัฒนาเรียกว่า พื้นฐานการวิเคราะห์ความไวบนส่วนประกอบของระบบที่มีขีดจำกัด จากรูปการแสดงกระบวนการซึ่งเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งให้ x แทนค่าส่วนประกอบเวกเตอร์ n ในการออกแบบระบบที่มีตัวแปรซึ่งอาจจะอยู่ในค่าพารามิเตอร์ ซึ่งอธิบายถึงขนาดของสนามแม่เหล็กถ้าให้ A แทนสถานะของตัวแปรเวกเตอร์ที่มี l เป็นส่วนประกอบที่แสดงการแก้ปัญหาของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีเวกเตอร์ของแมกเนติกอยู่ด้วยจากเรื่องในการคำนวณส่วนประกอบที่มีขีดจำกัดจากปัญหาต่างๆ จะได้สมการ ในเทอมของเวกเตอร์โพเทนเชียล A ขณะที่สถานะของตัวแปรเป็นการคำนวณจากสมการเมตริกซ์

$$K(x) A = R(x) \quad (4.21)$$

เมื่อ $K(x)$ มีขนาดเมตริกซ์ $l \times l$ ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์เมตริกซ์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเรขาคณิตและทางฟิสิกส์แห่งดุลพินิจของโครงร่างและ $R(x)$ เป็นผลจากส่วนประกอบของเวกเตอร์ l ที่มี (right hand side) สัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ $K(x)$ เป็นฟังก์ชันดิฟเฟอเรนเชียลที่เป็นผลแสดงการออกแบบตัวแปร ซึ่งสามารถพบได้ในการออกแบบ x ตามรายละเอียด, โพเทนเชียลของเวกเตอร์ A หาได้จากการคำนวณโดยใช้วิธี ระบบที่เป็นลิเนียร์จากสมการ (4.21) ซึ่งที่มีอยู่ทั่วไปซึ่ง

เอกซอสเตอร์ A หาได้จากการคำนวณโดยใช้วิธี ระบบที่เป็นลิเนียร์จากสมการ (4.21) ซึ่งที่มีอยู่ทั่วไปซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่าง x อาจจะมีค่าแตกต่างสำหรับโพเทนเชียลของเวกเตอร์ A ดังนั้น A จะเป็นฟังก์ชันของ x อย่างไรก็ตามดิฟเฟอเรนเชียลของฟังก์ชันไม่สามารถทำได้โดยตรงซึ่งแสดงว่า A เป็นตัวบ่งชี้การกระทำการออกแบบตัวแปร x ให้การสันนิษฐานว่าฟังก์ชันที่นำมาใช้เป็นการคำนวณโดยใช้โพเทนเชียลของเวกเตอร์ และ เอ็กพลิตฟังก์ชันของ A และ x ที่ $F(x, A)$ เริ่มจะเป็นอิมพลิตฟังก์ชันของการออกแบบตัวแปร x โดยการใช้ Chain rule จากความแตกต่างของจำนวนค่าที่ออกมาของ $F(x, A)$ ซึ่งจะเกี่ยวพันกับ i th ที่ออกแบบตัวแปร

$$\frac{dF(x, A)}{dx_i} = \frac{\partial F(x, A)}{\partial x_i} + \frac{\partial F(x, A)}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (4.22)$$

ที่

$$\frac{\partial F(x, A)}{\partial A} = \left[\frac{\partial F(x, A)}{\partial A_1} + \frac{\partial F(x, A)}{\partial A_2} \dots \frac{\partial F(x, A)}{\partial A_l} \right]^T \quad (4.23)$$

และ

$$\frac{\partial A}{\partial x_i} = \left[\frac{\partial A_1}{\partial x_i} \quad \frac{\partial A_2}{\partial x_i} \dots \frac{\partial A_l}{\partial x_i} \right]^T \quad (4.24)$$

เพราะฉะนั้นการคำนวณเกรเดียนท์ของฟังก์ชันต้องคำนวณจากพาร์เชียลดิฟเฟอเรนเชียล $\partial F(x, A)/\partial x_i$ และ $\partial F(x, A)/\partial A$ และจำนวนการดิฟเฟอเรนเชียล $\partial A/\partial x_i$ ซึ่งเป็นการดิฟ 2 ครั้งที่ง่ายต่อการคำนวณเมื่อใช้ฟังก์ชัน $F(x, A)$ แต่การคำนวณ $\partial A/\partial x_i$ จะสับสนขึ้นจากการพิจารณาสมการ(4.21) ถ้าให้สมการ เป็นดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งจะสัมพันธ์กับตัวแปรในการออกแบบ

$$\frac{\partial K(x)}{\partial x_i} A + K(x) \frac{\partial A}{\partial x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \quad (4.25)$$

จากสมการ (4.23) เขียนใหม่ได้เป็น

$$K(x) \frac{\partial A}{\partial x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} - \frac{\partial K(x)}{\partial x_i} A \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ $\partial A/\partial x_i$ สามารถจำกัดขอบเขตได้โดยการสังเกตพหุคูณเชิงเส้นของ $K(x)$ และ $R(x)$ ซึ่งเกี่ยวกับหลายตัวแปรในการออกแบบให้ง่ายขึ้น ถ้าเป็นการอาศัยจาก $K(x)$ และ $R(x)$ ที่ทราบค่า x อย่างหนึ่ง $\partial A/\partial x_i$ ที่ทราบเกรเดียนต์จากฟังก์ชัน $dF(x,A)/dx_i$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.22) สามารถดำเนินการสำหรับการคำนวณที่ได้มาจากอิมพลีซิฟฟังก์ชัน ซึ่งเกี่ยวกับการออกแบบตัวแปรที่มีการพัฒนาขึ้น, โดยเฉพาะในการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมของ อุปกรณ์สนามแม่เหล็ก

4.3 การใช้ نرمเมอร์ริคัลหาค่าที่เหมาะสมในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข

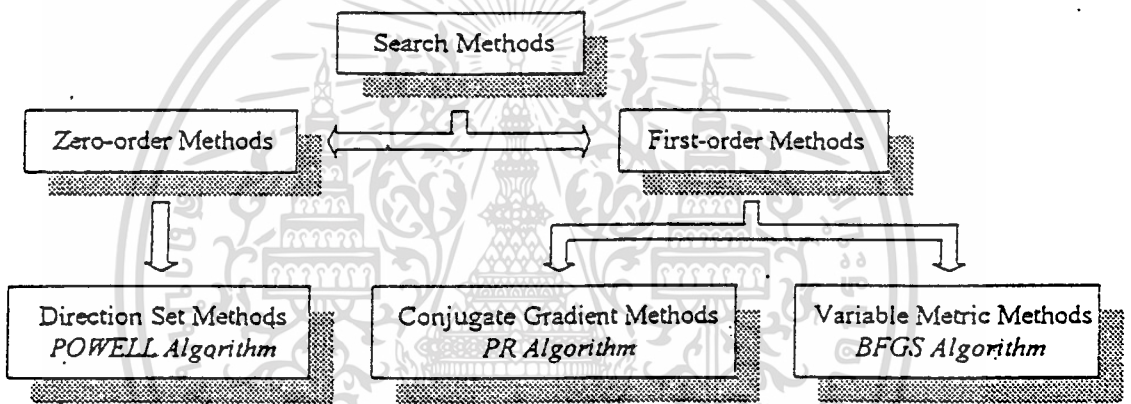
(UNCONSTRAINED NUMERICAL OPTIMISATION)

เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่ไม่มีเงื่อนไขในการทำงานของการวนรอบซ้ำตามสมการ (4.5) ตำแหน่งจะเพิ่มขึ้นตามการออกแบบสิ่งสำคัญในการหาค่าที่เหมาะสมนั้นแยกออกได้เป็น 2 ส่วนสำคัญด้วยกัน คือแนวทางและลำดับขั้นในการวิเคราะห์เพราะฉะนั้นขบวนการที่ต้องการควรพิจารณาที่ نرمเมอร์ริคัลที่ใช้แก้ปัญหาทั้ง 2 ส่วนสำหรับปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งมีหลายตัวแปรปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมซึ่งควรจะแก้ปัญหาเป็นอันดับหนึ่ง ดังนั้นค่าของขนาดคือควรพิจารณาค่าที่น้อยที่สุดของการนำฟังก์ชัน ไปใช้ในครั้งต่อไปของการกำหนดทิศทางในการออกแบบ ลำดับที่ 2 ที่ทำนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ที่เป็น 1 มิติ

หลังจากที่ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมถูกเปลี่ยนเป็นสูตรใหม่จะต้องเลือกระบบที่เหมาะสมจากระบบจะเห็นเทอมที่เหมาะสมซึ่งปัญหาที่พบบ่อยสามารถจัดจำพวกได้ตามคุณสมบัติของฟังก์ชันและหน้าที่ของเงื่อนไขยิ่งกว่านั้นระบบควรจะแปรผันตามผลของข้อมูล เช่น อนุพันธ์อันดับหนึ่งคือสามารถที่จะเรียกสิ่งที่เก็บไว้และเป็นการเปรียบเทียบปัญหาในการคำนวณค่าโดย arithmetic operations กระทำโดยอัลกอริทึมที่มีอำนาจมากกว่าการใช้แต่ละฟังก์ชันในการคำนวณเป็นไปได้ที่จะใช้การคำนวณจากอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่ไม่มี non-derivative method ในการเลือกยิ่งกว่านั้นถ้าการคำนวณอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่มีความยากในการออกแบบซึ่งควรจะรู้กระบวนการที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นและผลของเสถียรภาพจะลดลงเมื่อการใช้ อนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ไม่ได้มาจาก อัลกอริทึม

4.3.1 การกำหนดทิศทางหรือแนวทางในการวิเคราะห์และขั้นตอนในการวิเคราะห์

การกำหนดทิศทางหาได้จากการศึกษาของทั้ง 2 อย่างและจะไม่มีการคำนวณของอนุพันธ์อันดับหนึ่งซึ่งแสดงตามรูป (4.10) ซึ่งจะกล่าวสั้นๆ ในการพิจารณาที่ใช้แก้ปัญหาในการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมแบ่งออกเป็น 2 ลำดับจากอัลกอริทึมเพื่อหาทิศทางโดยการคำนวณจากอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากทั้ง 2 อย่างจะทำให้ปัญหาย่อยๆ ของขนาด 1 มิติเหลือน้อยลงลำดับที่ 1 เป็นการปรับปรุงค่าคอนจูเกตของเกรเดียนท์ ลำดับที่ 2 ประกอบด้วยหลายอย่างที่เรียกว่าเมตริกซ์ตัวแปร หรือวิธีของ quasi-Newton



รูปที่ 4.10 ประเภทของวิธีการวิเคราะห์

4.3.1.1 วิธีการในการกำหนดทิศทาง (Direction Set Methods)

ในตอนนี้จะพิจารณาถึงวิธีของแต่ละหัวข้อมากจากความถี่ความต้องการควบคุมความต่อเนื่องที่ไม่มีค่าออกมา วิธีง่ายเริ่มจากตั้งค่าของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย e_1, e_2, \dots, e_N ขณะที่ปรับตั้งทิศทาง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ Golden Section โดยทำไปเรื่อยๆ จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งจนค่าได้น้อยที่สุดถัดมาเป็นการทำไปข้างหน้าของแนวทางลำดับที่ 2 จนได้จำนวนน้อยที่สุดและทำไปเรื่อยๆ ซึ่งขบวนการจะกลายเป็นลูบตลอดไปของการปรับตั้งทิศทางซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลามากจนกระทั่งการกระทำจะหยุดลง ซึ่งเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่มีความจำเป็นของแนวทางในการกำหนดวิธีการที่จะพิจารณาซึ่งกันและกันระหว่าง N และคอนจูเกตของเกรเดียนท์ซึ่งเป็นระบบพื้นฐานจากหัวข้อของทิศทางของคอนจูเกตเมื่อ ทิศทางของเวกเตอร์ d^i และ d^j เป็นคอนจูเกตถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\mathbf{d}^i)^T \mathbf{S} \mathbf{d}^j = 0 \quad (4.27)$$

เมื่อ \mathbf{S} เป็นเมตริกซ์ซึ่งอยู่ในเทอมของเมตริกซ์หนึ่งหน่วย และ $\mathbf{d}^i, i = 1, \dots, n$ เป็นตำแหน่งของโคออร์ดิเนตจากค่าอัลกอริทึมของ Powell ที่ทำการปรับปรุงและจึงเป็นเทคนิคที่ดีที่มีอยู่ในขณะนี้ของแนวทางในการกำหนดวิธีการ (POWELL code)

4.3.1.2 วิธีใช้ค่าคอนจูเกตของเกรเดียนท์ (Conjugate Gradient Methods)

คอนจูเกตของเกรเดียนท์ที่ปรับปรุงขึ้นและมีความสำคัญมากคือ Fletcher-Reeves method และ Polak-Ribiere method (PR code) ซึ่งในการกำหนดวิธีการจำเป็นต้องมีผลมาจากค่าที่น้อยที่สุดของขนาด 1 มิติที่มีฟังก์ชันการคำนวณมากมายปัจจุบันการใช้การคำนวณจากเกรเดียนท์ซึ่งต้องหาคำตอบใหม่ที่สะดวกในการคำนวณของทิศทางและค่าของขนาดในการวนลูป

$$\mathbf{d}^{(q)} = -\nabla F(\mathbf{x}^{(q)}) + \beta_q \mathbf{d}^{(q-1)} \quad (4.28)$$

$$\beta_q = \frac{|\nabla F(\mathbf{x}^{(q)})|^2}{|\nabla F(\mathbf{x}^{(q-1)})|^2} \quad (4.29)$$

วิธีของ Polak-Ribiere (PR code) เป็นการกระทำในการเลือกคอนจูเกตของเกรเดียนท์

4.3.1.3 วิธีวัดค่าความเปลี่ยนแปลง (Variable Metric Methods)

ความมุ่งหมายของการวัดค่าความเปลี่ยนแปลง หรือบางครั้งเรียกว่าวิธี quasi - Newton คือไม่ได้มาจากวิธีคอนจูเกตของเกรเดียนท์คือการแทนที่จากการนำผลอย่างต่อเนื่องของอัตราส่วน β ที่เป็นผลไปเก็บไว้ในขนาด n มิติอย่างเป็นระเบียบการค้นหาทิศทางหรือแนวทางลำดับที่ q th หาได้จาก

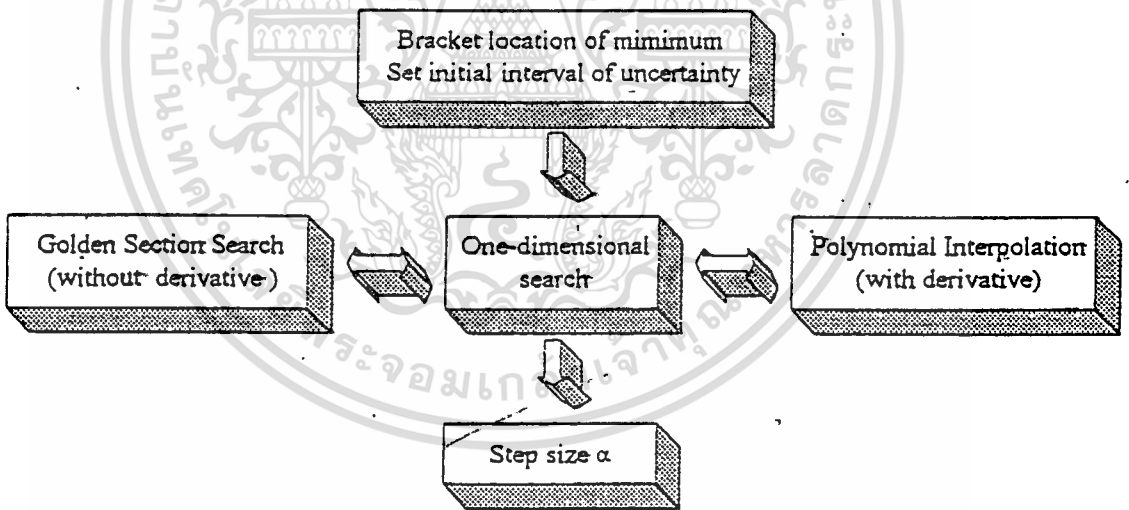
$$\mathbf{c}^{(q)} = \nabla F(\mathbf{x}^{(q)}) \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.31) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ H มีค่าใกล้เคียงกับ Hessian matrix ของฟังก์ชันที่นำมาใช้ ในระหว่างกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมการทำให้ค่าใกล้เคียง H โดยการใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งเพียงอย่างเดียวอย่างไรก็ดี ระบบนี้มีคุณสมบัติเป็นคอนเวอร์เจนซ์คล้ายกับหลายวิธีในการออกแบบขั้นตอนค่า H เมตริกซ์ที่อยู่ในเมตริกซ์หนึ่งหน่วย $H = I$ ดังนั้นที่จุดสุดท้ายของจำนวน q th การวนลูปเป็นเมตริกซ์ H ใหม่ที่เพิ่มขึ้นขณะที่

$$H^{(q+1)} = H^{(q)} + D^{(q)} + E^{(q)} \tag{4.32}$$

เมื่อ D และ E เป็นเมตริกซ์ที่ทำโทษให้ได้สัดส่วนขึ้น จากทั้ง 2 วิธีที่ทำให้เมตริกซ์เพิ่มขึ้นดังกล่าว เช่น Davidon-Fletcher-Powell (*DFP code*) และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno methods (*BFGS code*) ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างในบางรายละเอียด *BFGS* เป็นแผนการที่มีรายละเอียดดีกว่า



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนต่างๆ ในการใช้กำหนดการแก้ปัญหา

นับตั้งแต่การหาวิธีที่จะรวมเข้าด้วยกันของค่าที่น้อยที่สุดของขนาด 1 มิติ จะมีปัญหาย่อยคือการสร้างลำดับของค่าที่เพิ่มขึ้นและปัญหาของอัลกอริทึมซึ่งจะกล่าวไว้สั้นๆ ในการพิจารณาปัญหาปลีกย่อยซึ่งจะแสดงโดยการใช้หลายอัลกอริทึมดังแสดงในรูปที่ 4.11 หลักการพื้นฐานในการกำหนดขั้นตอนในการวิเคราะห์แบ่งได้ 2 ระดับคือระดับที่ 1 การแสวงหาค่าของตำแหน่งที่น้อยที่สุด

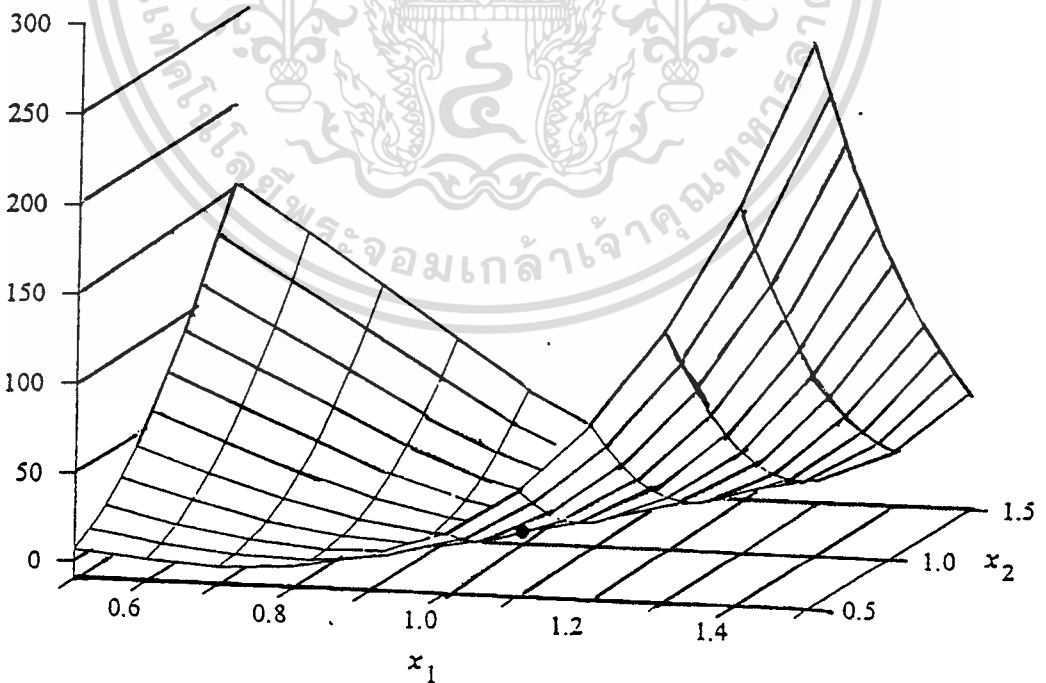
และมีเวลาหยุดในขณะที่ยังไม่แน่ใจในระยะขอบเขตที่กำหนด. ระดับที่ 2 ใช้เวลาในการกลั่นกรองการตัดทิ้งส่วนที่ไม่สามารถบรรลุค่าที่น้อยที่สุดได้ ซึ่งจะได้ค่าของขนาดที่เหมาะสมในขั้นตอนสุดท้าย

4.3.2 ตัวอย่างนับเมอริคัล (Numerical Example)

ตัวอย่างที่แสดงนี้เป็นการทดสอบไว้ในตอนต้นของฟังก์ชัน Rosenbrock (1985) เป็นการทดสอบเพื่อจะรู้ค่าฟังก์ชันที่ใช้นับเมอริคัลในการหาค่าที่เหมาะสมในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข

$$F(x) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \quad (4.33)$$

ในฟังก์ชันเป็นการลดมุมลงอย่างช้าๆซึ่งขนาดที่ชันขึ้นและด้านบนของเคอร์ฟเป็นรูปพาราโบลา การแก้ปัญหาของค่าต่ำสุดที่ไม่เท่ากันที่ตำแหน่ง $[1 \ 1]^T$, ซึ่งมีอยู่พื้นฐานจากรูป(4.12)เป็นรูป 3 มิติของกรณีที่ไม่มีเงื่อนไขซึ่งมีจุดเริ่มต้น $[0.6 \ 0.6]^T$



รูปที่ 4.12 ฟังก์ชันของ Rosenbrock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การใช้ *POWELL*, *PR* และ *BFGS* โดยนำไปใช้ร่วมกับฟังก์ชันของ Rosenbrock

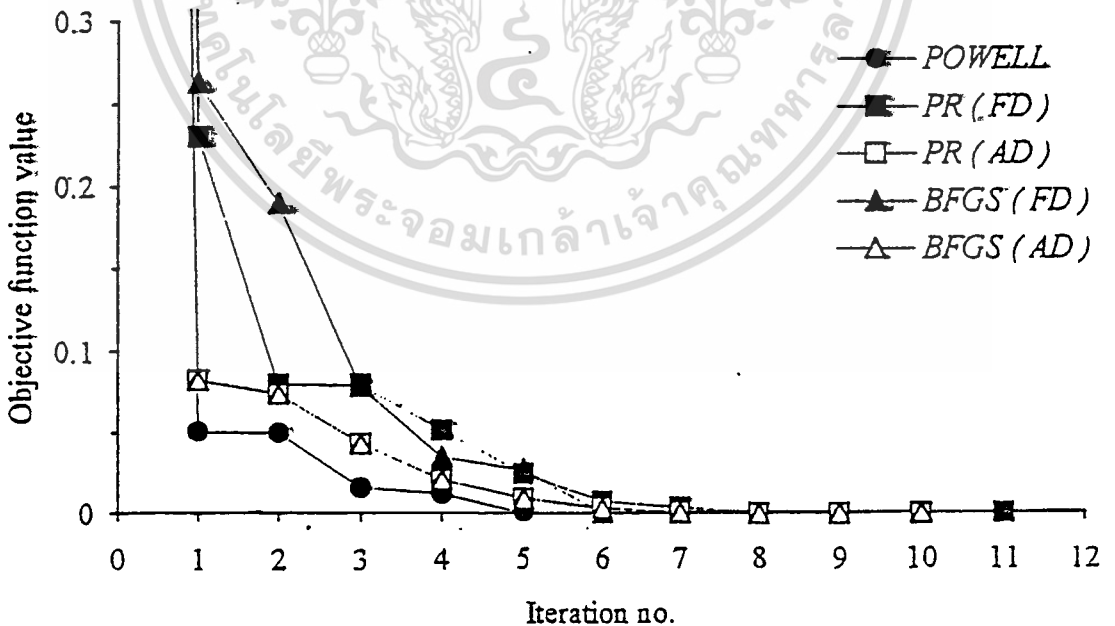
	Methods				
	<i>POWELL</i>	<i>PR (FD)</i>	<i>PR (AD)</i>	<i>BFGS (FD)</i>	<i>BFGS (AD)</i>
$F(x^{(0)})$	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200
$F(x^*)$	1.14E-07	1.06E-07	4.28E-09	1.94E-07	4.28E-09
x_1^*	0.99977	0.99969	0.99998	1.00003	0.99998
x_2^*	0.99957	0.99940	0.99995	1.00001	0.99995
N_f	230	343	113	245	128
N_i	7	11	10	8	10

FD : finite difference approximations

N_f : number of function evaluations

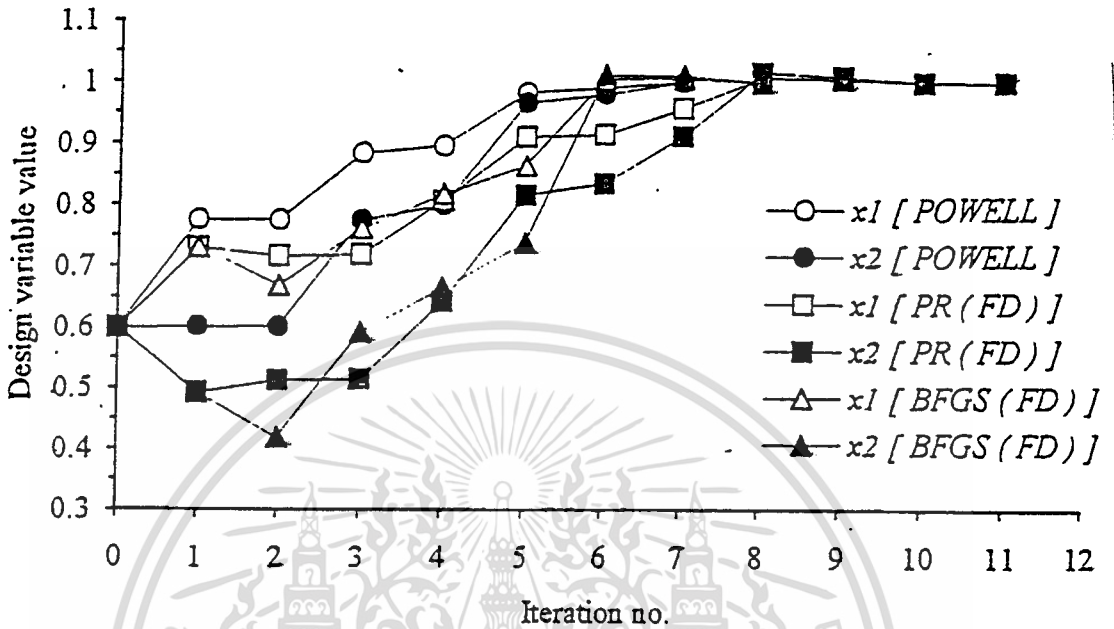
AD : analytical first derivatives

N_i : number of iterations



รูปที่ 4.13 วิธีการหาฟังก์ชันของ Rosenbrock .ในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กระบวนการวนรูปของการออกแบบค่าตัวแปรในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข

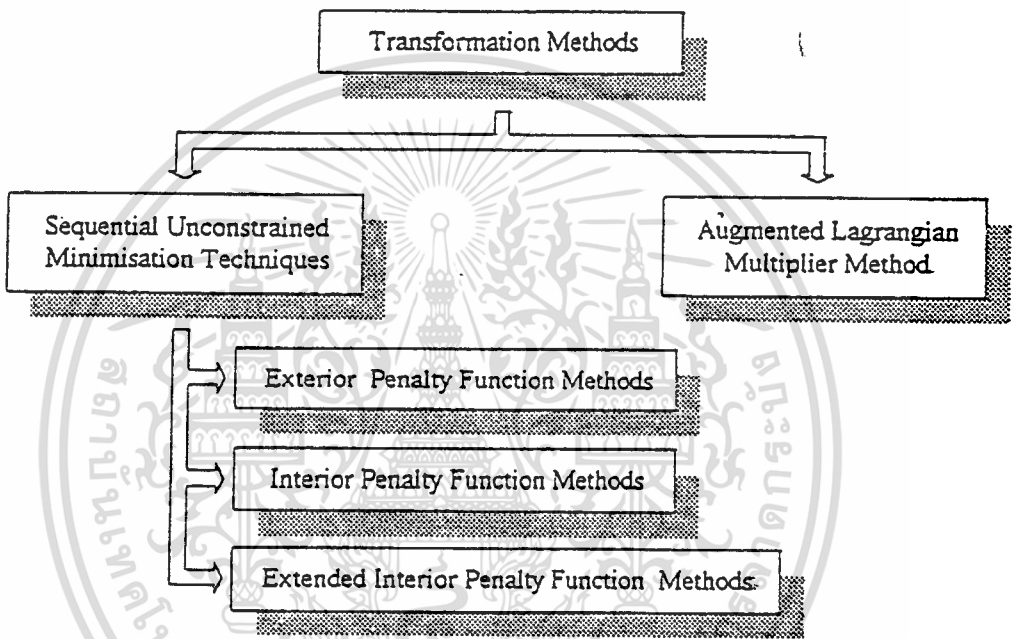
จากตาราง 4.3 เป็นการเปรียบเทียบการกระทำของ *POWELL*, *PR* และอัลกอริทึมของ *BFGS* จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เป็นเทคนิคในการหาส่วนที่เหมือนกันน้อยที่สุดของ *PR* และ *BFGS* ที่คล้ายกันมากดังนั้นผลของ *BFGS* ซึ่งมีความแตกต่างของขอบเขตที่จำกัดจะใช้แก้ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในเนื้อหาตอนต้น

4.4 วิธีการแปลงค่า (TRANSFORMATION METHODS)

ในตอนนี้จะกล่าวเกี่ยวข้องกับเทคนิคเพื่อแก้ปัญหาตามเงื่อนไขที่ไม่เป็นเส้นตรง และสิ่งที่เป็นปัญหาในการหาค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไขการเข้าใกล้ซึ่งสิ่งนี้เรียกว่า วิธีการแปลงค่าซึ่งเป็นเทคนิคที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงแก้ไขกับสิ่งภายนอกและการกระทำตามเงื่อนไข ดังนั้นการแก้ปัญหาที่เป็นของเดิมทำได้โดยการแก้ปัญหาจากที่ไม่มีเงื่อนไข ซึ่งเป็นความคิดขั้นต้นที่สร้างฟังก์ชัน pseudo - objective ซึ่งมีการกระทำเกี่ยวกับสิ่งภายนอกและกระทำตามเงื่อนไขระเบียบวิธีการแปลงสามารถจัดจำพวกได้ 2 จำพวก คือ

1) แสดงเกี่ยวกับสิ่งภายนอก (การทำโทษ) และระเบียบวิธีการกระทำส่วนซึ่งอยู่ภายใน ซึ่งจะกล่าวไปสู่การ *SUMT* (Sequential Unconstrained Minimization Technique)

2) การเปลี่ยนแปลงแก้ไขของฟังก์ชันลากรังจ์ซึ่งเรียกว่า *ALMM* (Augmented Lagrangian Multiplier Method) นอกจากนั้นวิธีนี้ยังใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบที่เกิดขึ้นระหว่างปี 1960-1970 เช่น Murray [3] และ Arora [4]



รูปที่ 3.15 ประเภทของวิธีการแปลงค่า

จากสมการ (4.1)-(4.4) เป็นระเบียบวิธีการแปลงที่ซ่อนหน้าที่ของการแก้ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข สำหรับฟังก์ชัน pseudo-objective เป็น

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = F(\mathbf{x}) + P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{r}] \quad (4.34)$$

เมื่อ \mathbf{r} คือเวกเตอร์ของการควบคุมค่าพารามิเตอร์และ $P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{r}]$ ซึ่งเป็นจำนวนจริงที่จะกระทำกำหนดหน้าที่ในการควบคุมการทำโทษที่มีขอบเขตโดย \mathbf{r} และค่าจาก P เป็นผลมาจากวิธีการใช้ซึ่งหน้าที่ $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{r})$ ที่มีเงื่อนไขน้อยสุดโดยรักษาให้ค่า \mathbf{r} คงที่ระหว่างที่ทำกรวนลูปค่าพารามิเตอร์ \mathbf{r} จะเพิ่มขึ้นและกระบวนการจะทวนซ้ำจนกระทั่งไม่ทำให้ค่าดีขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าที่เหมาะสมในการเลือกของ P และ r ควรใช้วิธีที่ไม่มีเงื่อนไขและจะแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงให้ดีขึ้น

4.4.1 เทคนิคการจัดลำดับกรณีที่ไม่มีเงื่อนไข

(Sequential unconstrained Minimisation Technique SUMT)

แบ่งออกได้ 2 วิธีภายใต้ระเบียบวิธีการตามลำดับ

1) เป็นการอธิบายโดยการแสดงคุณสมบัติของการรักษาให้คงสภาพตามเงื่อนไขตลอดเวลาทั้งนั้น การกระทำโทษส่วนซึ่งอยู่ภายในหรือการกระทำที่มีอุปสรรคจากความเหมาะสมของจุดการออกแบบนั้น ระเบียบวิธีการโดยทั่วไปเป็นการดีถ้าตัดสินใจไปสู่การใช้การทำโทษที่เข้าใกล้ขึ้นเพราะถึงแม้ว่าค่าทั้งหมดจะไม่ลู่อเข้าแต่จะลื่นสุดลงอย่างสงบ

2) ลำดับที่ไม่อาจกระทำได้และอาจกระทำได้ตามเงื่อนไขเพื่อให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด (ตลอดวิธีการสามารถกระทำได้ที่จุดหนึ่ง) คือการนำไปสู่การทำโทษของส่วนภายนอกหรือระเบียบวิธีการกระทำโทษซึ่งการรวมเข้าด้วยกันของจุดเดินของส่วนที่อยู่ภายในและภายนอกเป็นการเพิ่มเทคนิคที่เรียกว่าระเบียบวิธีการกระทำโทษส่วนซึ่งอยู่ภายในภายใต้ขอบเขตที่ต้องการ

4.4.2 วิธีการทำโทษค่าภายนอกของฟังก์ชัน (Exterior Penalty Function Methods)

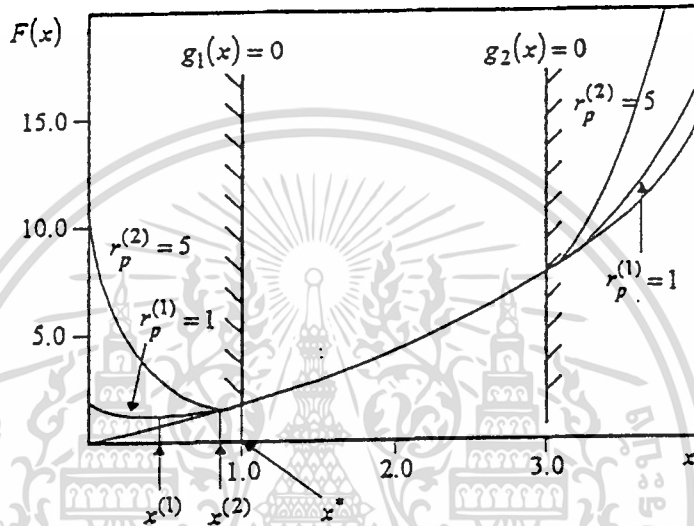
เป็นการง่ายของการรวมกันและนำไปสู่กระบวนการของการหาค่าที่เหมาะสมเพราะเป็นการทำโทษเกี่ยวกับความจริงเมื่อฝ่าฝืนเงื่อนไข วิธีดำเนินการอย่างนี้ทำได้โดยการพัฒนาของเงื่อนไขที่เท่ากัน และ เงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน ดังต่อไปนี้

$$P [\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), r_p] = r_p \left\{ \sum_{k=1}^l [\max\{0, g_k(\mathbf{x})\}]^2 + \sum_{j=1}^m [h_j(\mathbf{x})]^2 \right\} \quad (4.35)$$

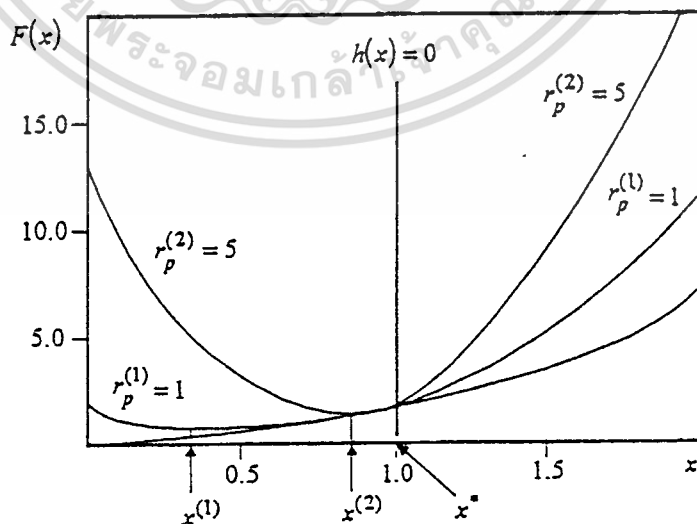
จากสมการเป็นการทำโทษที่ไม่ทำตามเงื่อนไข การที่จะทำให้ได้ค่าที่พอใจคือการทำโทษค่าพารามิเตอร์ r โดยการเลือกค่าเริ่มต้นที่เป็นค่าน้อย ($r_p=1$) และจะเพิ่มขึ้นโดยใช้ตัวประกอบการคูณคือ

γ ($\gamma > 1$) จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างถึงการพิสูจน์การกระทำโทษของเทคนิคนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันจะง่ายเมื่อใช้การสอดแทรกที่มีสองเทอม หรือมากกว่าแต่อยู่ที่ความเหมาะสมว่ามาจากบริเวณภายนอกที่อาจกระทำได้ ข้อควรสังเกตเมื่อ r เพิ่มขึ้นการกระทำจะเกิดขึ้นโดยเพิ่มขึ้นไม่เป็นเส้นตรงตั้งแต่การออกแบบการเข้าใกล้ที่เหมาะสมที่สุดของบริเวณที่จะกระทำได้เพราะฉะนั้นอาจจะเกิดความเสียหายได้ถ้ากระบวนการถูกหยุดก่อนกำหนดซึ่งเป็นการออกแบบที่ใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตามนี่ก็เป็นเทคนิคที่ช่วยในการออกแบบขั้นต้น



รูปที่ 4.16 แสดงวิธีการทำโทษส่วนภายนอกของฟังก์ชันซึ่งใช้ค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน 1 ตัวแปร เพื่อหาค่าใน 2 เส้นไขที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.17 แสดงวิธีการทำโทษส่วนภายนอกของฟังก์ชันซึ่งใช้ค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน 1 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

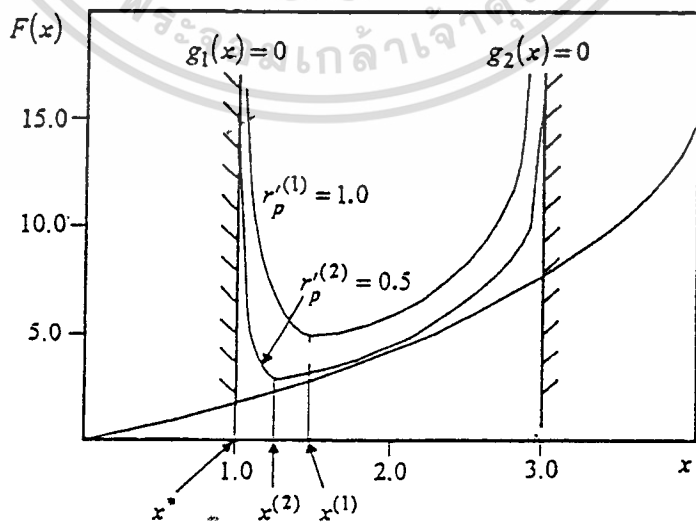
4.4.3 วิธีการทำโทษค่าภายในของฟังก์ชัน (Interior Penalty Function Methods)

ความคิดพื้นฐานของวิธีนี้เป็นการทำให้ดีขึ้นของบริเวณที่จะทำการออกแบบ โดยใช้ความแตกต่างจากการทำโทษมาประยุกต์กับเงื่อนไขที่ไม่เท่ากัน และรักษาความเสมอภาคตามเงื่อนไข การทำโทษค่าพารามิเตอร์ให้น้อยลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับเงื่อนไขที่เท่ากันเพราะไม่มีเสถียรภาพแต่อย่างไรก็ตาม x^* ก็เป็นที่พอใจของเงื่อนไขที่เท่ากัน

$$P [h(x), g(x), r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \left[-\frac{1}{g_k(x)} \right] \quad (4.36)$$

$$P [h(x), g(x), r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l -\log[-g_k(x)] \quad (4.37)$$

ในส่วนนี้ r'_p จะเริ่มต้นเกี่ยวข้องกับจำนวนบวกและลบน้อยลงที่ r'_p เป็นตัวคูณ โดย γ ($\gamma > 1$) ถึงเพียงนั้นสมการข้างบนสามารถใช้ได้เมื่อ $g_k(x)$ เป็นบวกหรือลบแต่สมการ (4.37) สามารถใช้ได้ เว้นเสียแต่ว่าเมื่อ $g_k(x)$ เป็นลบถ้าค่าเป็นอัลกอริทึมควรเปลี่ยนไปเป็นนัมเมอร์ริคัลเมื่อ $g_k(x) \rightarrow 0$ เพราะการทำโทษควรจะให้ใกล้เคียงค่าอนันต์ดังแสดงตามรูป ที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงวิธีการทำโทษค่าภายในของฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 วิธีการทำโทษค่าภายในที่เพิ่มขึ้นของฟังก์ชัน (Extended Interior Penalty Function Methods)

ความคิดจากเทคนิคนี้เป็นการรวมกันของจุดเด่นที่สุดของส่วนซึ่งอยู่ภายในและวิธีของส่วนภายนอกซึ่งมีอยู่ 2 เทคนิคที่นำไปสู่ความสำเร็จคือการกระทำโทษสำหรับเงื่อนไขที่เท่ากันที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นจากการทำโทษของเงื่อนไขที่ไม่เท่ากันจะได้กล่าวความแตกต่างดังต่อไปนี้

1) การปฏิบัติการทำโทษในขอบเขตที่เป็นเส้นตรง

$$P[h(x), g(x), r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \bar{g}_k(x) + r_p \sum_{j=1}^m [h_j(x)]^2 \quad (4.38)$$

$$\bar{g}_k(x) = -\frac{1}{g_k(x)} \quad \text{ถ้า } g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (4.39)$$

$$\bar{g}_k(x) = -\frac{2\varepsilon - g_k(x)}{\varepsilon_e^2} \quad \text{ถ้า } g_k(x) > \varepsilon_e \quad (4.40)$$

$$\varepsilon_e = -c_e(r'_p)^a \quad \frac{1}{3} \leq a_e \leq \frac{1}{2} \quad (4.41)$$

ที่ ε_e เป็นจำนวนทางด้านลบ การเปลี่ยนแปลงจะเป็นอีกอย่างของการทำโทษส่วนที่อยู่ภายในที่มีขอบเขตและ c เป็นค่าคงที่

2) การทำโทษในขอบเขตยกกำลังสอง

$$\bar{g}_k(x) = -\frac{1}{g_k(x)} \quad \text{ถ้า } g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{g}_k(\mathbf{x}) = -\frac{1}{\varepsilon_e} \left\{ \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right]^2 - 3 \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right] + 3 \right\} \quad \text{ถ้า } g_k(\mathbf{x}) > \varepsilon_e \quad (4.43)$$

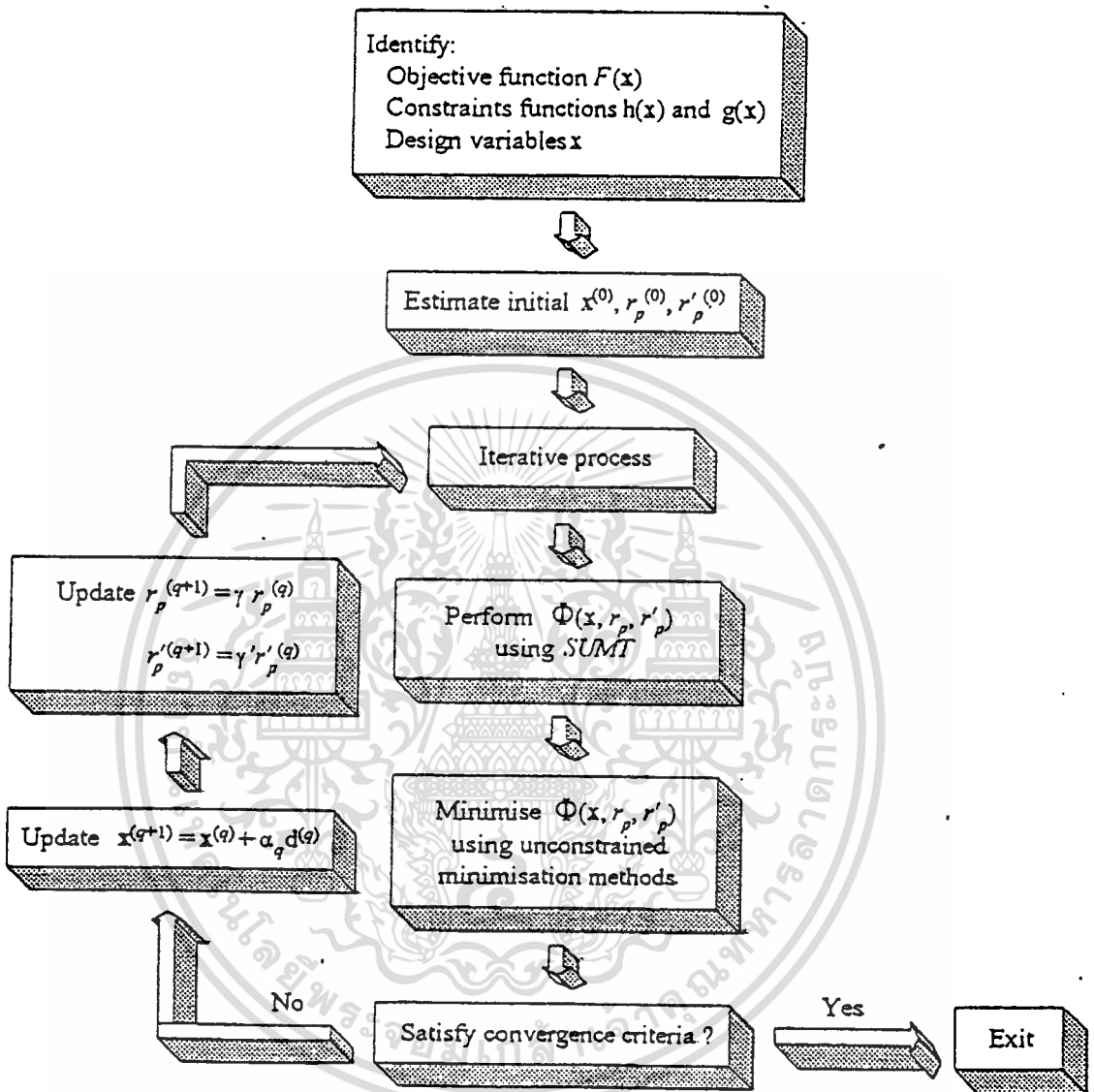
ในการทำโทษขอบเขตที่เป็นเส้นตรงที่ต่อเนื่องกันและมีสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง $g_k(\mathbf{x}) = \varepsilon_e$ แต่อย่างไรก็ดีสมการอนุพันธ์อันดับสองที่ไม่ต่อเนื่องกัน เพราะฉะนั้นถ้าวิธีการประมาณจากอันดับที่ 2 จะใช้สำหรับเมื่อไม่มีเงื่อนไข ดังนั้นวิธีการกระทำโทษในขอบเขตยกกำลังสองเป็นวิธีที่ดีซึ่งเทคนิคนี้ใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าที่มีปัญหา

4.4.5 ขั้นตอนโดยทั่วไปของ *SUMT* (General Procedure for the *SUMT*)

วิธีดำเนินการทั่วไป *SUMT* คือเทคนิคลำดับขั้นที่ไม่เงื่อนไขซึ่งตามคำอธิบายในรูปที่ 4.19 ขบวนการเริ่มต้นโดยการประมาณการในการออกแบบ $\mathbf{x}^{(0)}$ และ r ดังนั้นการกระทำที่แผ่ด้วย $\Phi(\mathbf{x}, r)$ เป็นการกระทำโดยการใช้หลายๆเทคนิคจาก *SUMT*. $\Phi(\mathbf{x}, r)$ เป็นเงื่อนไขที่มีน้อยที่สุดและค่าพารามิเตอร์ r เป็นการดำเนินการตามค่าคงที่ระหว่างการทวนดังนั้นการเพิ่มขึ้นโดยตัวคูณสำหรับการทวนกระบวนการครั้งต่อไป ขบวนการนี้จะซ้ำจนกระทั่งทำให้ได้ค่าที่พอใจคือการมารวมที่จุดเดียวกัน

ในขั้นต้นของการเลือกการกระทำโทษค่าพารามิเตอร์ r_p และ r'_p เป็นจุดสำคัญมากในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมบางครั้งการเลือกค่าของ $r_p^{(0)}$ และค่า $r'_p^{(0)}$ จะนำหน้ากระบวนการเมื่อจำนวนนับมีค่ามากขึ้นไปจะมีผลต่อการพยายามคำนวณในการแก้ปัญหาเพราะฉะนั้นสิ่งหนึ่งคือการเสียเปรียบในการใช้ *SUMT* ในทางคาร์ปฏิบัติ และ Vanderplassts [5] กล่าวว่า การเกิดปรากฏการณ์ คือมีค่าใกล้เคียงความเป็นหนึ่งเพื่อที่จะเลือกสำหรับการทำโทษค่าพารามิเตอร์ r_p สำหรับการทำโทษส่วนซึ่งอยู่ภายในได้เสนอค่าขั้นต้นของ r'_p หาได้จากการประมาณการขณะที่

$$r'_p^{(0)} = \frac{\beta F(\mathbf{x}^{(0)})}{P(\mathbf{x}^{(0)})} \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.44)$$

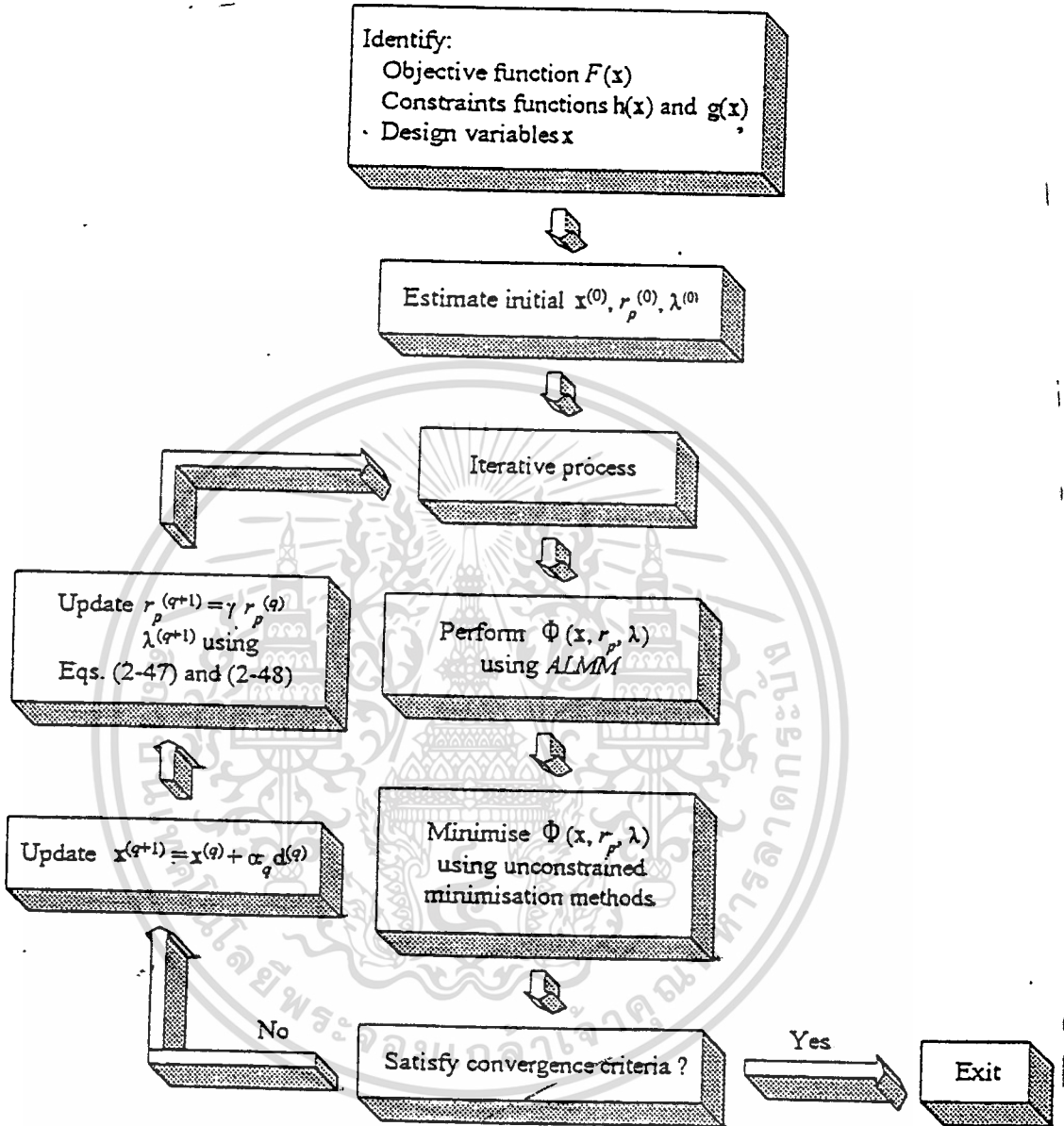


รูปที่ 4.19 ขั้นตอนโดยทั่วไปของ SUMT

4.4.6 วิธีการใช้ลากรังจ์เป็นตัวคูณ (Augmented Lagrangian Multiplier Method)

เป็นสิ่งที่ไม่ได้เลียดต่อการเปลี่ยนแปลงการทำให้ขอบแบบเก่าบางที่ควรหลีกเลี่ยงโดยการดำเนินการวิธีใหม่ๆ ซึ่งเทอมการทำให้ขอบจะเพิ่มขึ้นจากการกระทำของสิ่งภายนอกแต่มีปัญหาของการทำลากรังจ์ ซึ่งดำเนินการโดยการเพิ่มขึ้นของการประมาณค่าตัวคูณ λ และควรรู้ทั้งสองอย่างคือ

เอกสารที่การขยายของลากรังจ์ และการเพิ่มขึ้นของตัวคูณ ; Vanderplassts [5] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการใช้ลากรังจ์เป็นตัวคูณ

$$\Phi_A(x, \lambda, r_p) = F(x) + \sum_{k=1}^l (\lambda_k \Psi_k + r_p \Psi_k^2) + \sum_{j=1}^m \{ \lambda_{j+l} h_j(x) + r_p [h_j(x)]^2 \} \quad (4.45)$$

เมื่อ $\Psi_k = \max \left[g_k(x), -\frac{\lambda_k}{2r_p} \right] \quad (4.46)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการเพิ่มขึ้นของลากรังจ์

$$\lambda_k^{(q+1)} = 2r_p \left\{ \max \left[g_k(x), -\frac{\lambda_k^q}{2r_p} \right] \right\} \quad k = 1, \dots, l \quad (4.47)$$

$$\lambda_{j+1}^{(q+1)} = \lambda_{j+1}^{(q)} + 2r_p h_j(x) \quad j = 1, \dots, m \quad (4.48)$$

$$r_p^{(q+1)} = \gamma r_p^{(q)} \quad r_p \leq r_p^{\max} \quad (4.49)$$

วิธีการดำเนินทั่วไปของเทคนิคเหล่านี้จะคล้ายกับ *SUMT* แสดงตามรูปที่ 4.20 กระบวนการมีการตั้งค่าตัวคูณของ λ ซึ่งเป็นการเพิ่มโดยการใช้สมการใหม่คือ สมการ (4.47) , (4.48) การเพิ่มขึ้นของลากรังจ์เป็นมูลฐานหนึ่งที่กระทำการทำโทษส่วนภายนอกจะได้จากสมการ (4.35) โดยการเพิ่มขึ้นของลากรังจ์ในเทอมตัวคูณข้อควรสังเกต เมื่อ $\lambda = 0$ ดังนั้นสมการ (4.45) จะกลับสู่สภาพเดิมของวิธีการทำโทษ

ตลอดการคำนวณค่าของ λ จะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนที่ไม่ปรากฏในกระบวนการที่มีเงื่อนไขน้อยที่สุดแต่มีความสำคัญในการคำนวณซึ่งเป็นประโยชน์ที่จะได้รับที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการสัมผัสของค่า r_p จนเป็นค่าที่น่าพอใจสามารถทำให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวคูณลากรังจ์ ถ้าค่าไม่เท่ากับศูนย์ตัวคูณจะเป็นไปได้เองเพื่อให้เหมือนกันตลอดข้อบังคับที่ค่าเหมาะสมและกระบวนการต้องเริ่มต้นจากขั้นต้นของการออกแบบ

บทที่ 5

ผลการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

5.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรม

จากการออกแบบเพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศซึ่งใช้วิธีการ Numerical optimisation ซึ่งมีรูปแบบในการออกแบบ 2 รูปแบบ คือ Welsby formular (1960) ประกอบด้วยสมการที่มีตัวแปร 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปร และอีกรูปแบบคือ Middendorf formular (1990) ประกอบด้วยสมการที่มีตัวแปร 2 ตัวแปรและ 3 ตัวแปรเช่นเดียวกับสมการ Welsby formular จากผลการคำนวณของโปรแกรมแสดงได้ดังตารางที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4

รูปแบบที่ใช้ในการออกแบบจัดได้ 2 รูปแบบคือ

1) Welsby formular (1960)

$$L(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{(b + 0.9a + 0.32 \frac{bc}{a} + 0.84c)} \quad \text{Henry}$$

2) Middendorf formular (1990)

$$L(\mathbf{x}) = \frac{31.5 a^2 N^2}{b (9 + 6 \frac{a}{b} + 10 \frac{c}{b})} \quad \mu\text{H}$$

สาย AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	Maximum inductance (Micro Henry)
		a	b	c		
10	5.262	2.653	1.627	1.938	59	165.969
11	4.172	2.471	1.502	1.787	64	179.318
12	3.309	2.276	1.394	1.658	69	193.722
13	2.624	2.104	1.209	1.538	75	209.294
14	2.081	1.95	1.195	1.421	81	226.111
15	1.651	1.809	1.107	1.311	87	244.294
16	1.309	1.678	1.018	1.218	94	263.856
17	1.037	1.545	0.948	1.126	102	285.201
18	0.8226	1.433	0.875	1.072	110	308.091

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Welsby formular 2 ตัวแปร

สาย AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	Maximum inductance (Micro Henry)
		a	b	c		
10	5.265	2.762	1.8344	1.652	57	160.833
11	4.172	2.568	1.695	1.524	64	173.769
12	3.309	2.374	1.531	1.448	67	187.687
13	2.624	2.185	1.456	1.312	72	202.217
14	2.081	2.0217	1.349	1.214	78	219.113
15	1.651	1.8312	1.238	1.158	86	236.677
16	1.309	1.749	1.146	1.038	90	255.722
17	1.037	1.626	1.056	0.96	97	276.539
18	0.8226	1.507	0.888	0.888	105	298.538

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Middendorf formular 2 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	Maximum inductance (Micro Henry)
		a	b	c		
10	5.262	2.661	1.616	1.946	59	165.97
11	4.172	2.464	1.502	1.792	64	179.319
12	3.309	2.275	1.394	1.659	69	193.723
13	2.624	2.094	1.301	1.532	75	209.294
14	2.081	1.938	1.201	1.421	82	226.121
15	1.651	1.808	1.102	1.316	87	244.295
16	1.309	1.677	1.021	1.216	94	263.892
17	1.037	1.545	0.945	1.129	102	225.202
18	0.8226	1.441	0.8738	1.041	110	308.087

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Welsby formular 3 ตัวแปร

สาย AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	Maximum inductance (Micro Henry)
		a	b	c		
10	5.262	2.816	1.812	1.641	56	160.801
11	4.172	2.554	1.711	1.489	60	173.104
12	3.309	2.314	1.498	1.451	67	187.593
13	2.624	1.980	1.293	1.480	73	207.113
14	2.081	2.104	1.321	1.208	78	219.087
15	1.651	1.842	1.229	1.149	86	236.58
16	1.309	1.600	1.010	1.198	92	260.982
17	1.037	1.510	0.932	1.098	100	223.761
18	0.8226	1.43	0.801	1.026	107	305.023

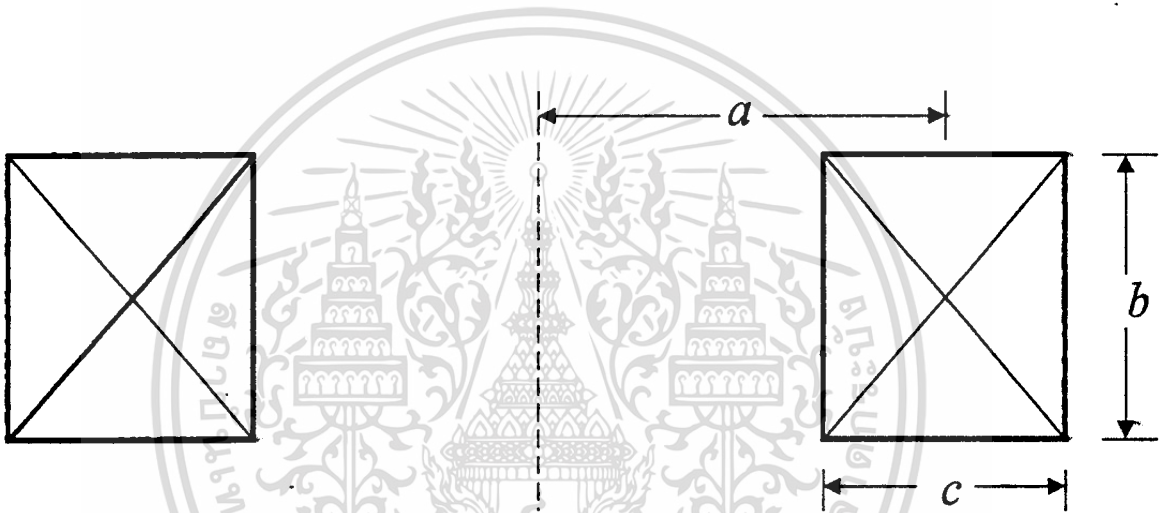
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณจากโปรแกรมของ Middendorf formular 3 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แสดงพื้นที่หน้าตัดจากผลการคำนวณของโปรแกรม

จากการออกแบบหาค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดของขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศโดยใช้วิธี Numerical optimisation ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบ 2 รูปแบบคือ Welsby formular (ค.ศ.1960) และ Middendorf formular (ค.ศ. 1990) ซึ่งค่าจากการคำนวณของโปรแกรมจะแสดงค่าขนาดของตัวแปร a, b, c ซึ่งสามารถแสดงภาพตัดได้ดังนี้

5.2.1 Middendorf formular 2 ตัวแปร



AWG #2. ϕ 39.6 mm²

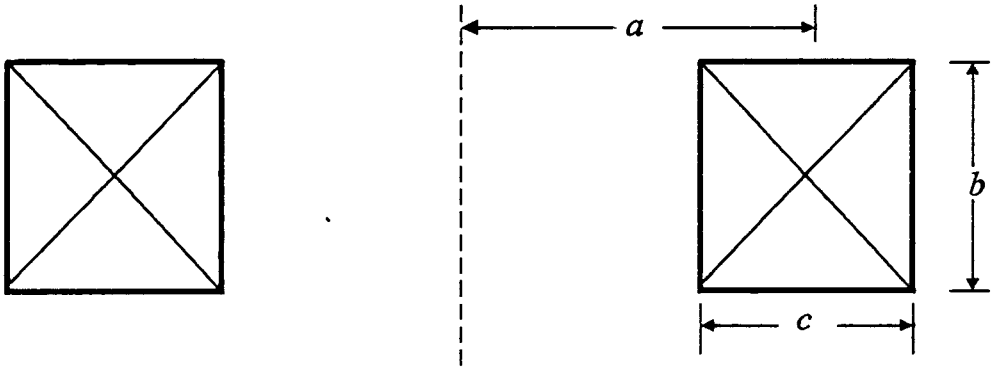
Maximum inductance = 82.0717 μ H

จำนวนรอบ = 29 รอบ

a = 5.401158 cm

b = 3.600744 cm

c = 3.240681 cm



AWG # 4 ϕ 27.27 mm²

Maximum inductance = 92.9387 μ H

จำนวนรอบ = 33 รอบ

a = 4.772419 cm

b = 3.178503 cm

c = 2.861173 cm



AWG # 6 ϕ 18.68 mm²

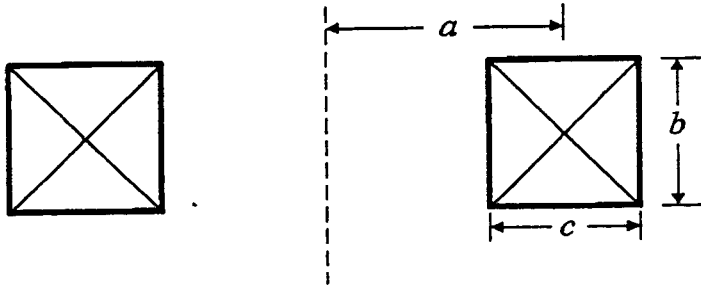
Maximum inductance = 105.430 μ H

จำนวนรอบ = 37 รอบ

a = 4.204955 cm

b = 2.801752 cm

c = 2.523515 cm



AWG # 8 ϕ 8.368 mm²

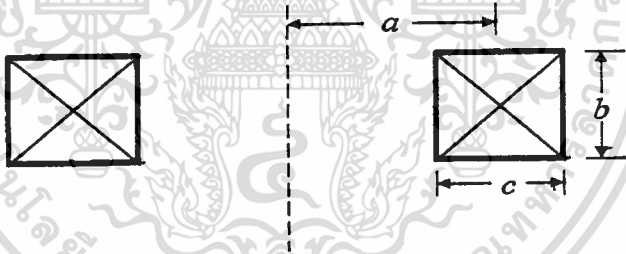
Maximum inductance = 137.790 μ H

จำนวนรอบ = 49 รอบ

$$a = 3.225765 \text{ cm}$$

$$b = 2.144350 \text{ cm}$$

$$c = 1.925366 \text{ cm}$$



AWG # 10 ϕ 5.262 mm²

Maximum inductance = 160.833 μ H

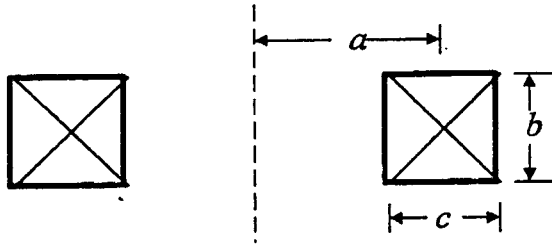
จำนวนรอบ = 57 รอบ

$$a = 2.753973 \text{ cm}$$

$$b = 1.838198 \text{ cm}$$

$$c = 1.654318 \text{ cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AWG # 12 ϕ 3.309 mm²

Maximum inductance = 187.727 μ H

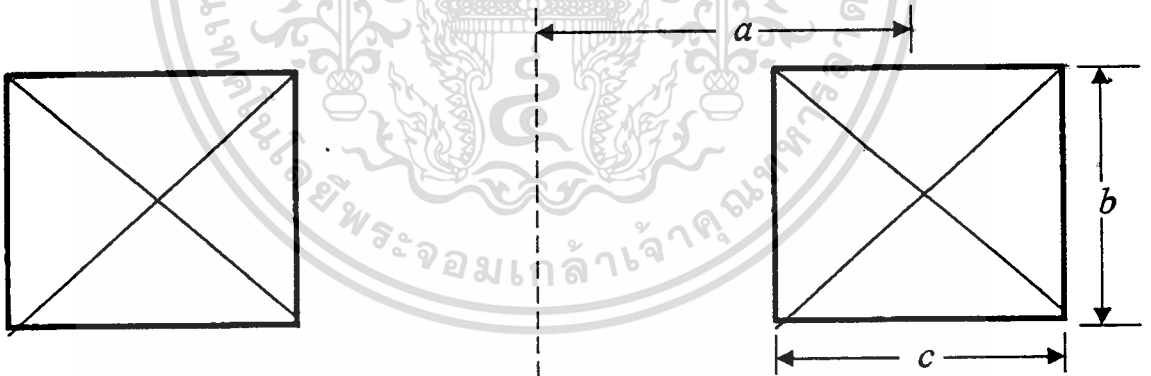
จำนวนรอบ = 67 รอบ

a = 2.362386 cm

b = 1.573676 cm

c = 1.416612 cm

5.2.2 Welsby formular 2 ตัวแปร



AWG # 2 ϕ 39.6 mm²

Maximum inductance = 84.6929 μ H

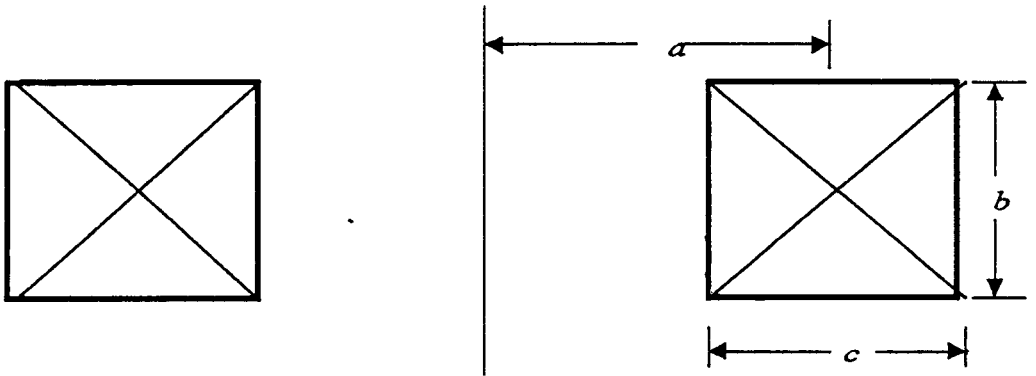
จำนวนรอบ = 30 รอบ

a = 5.204678 cm

b = 3.188197 cm

c = 3.798144 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AWG # 4 ϕ 27.27 mm²

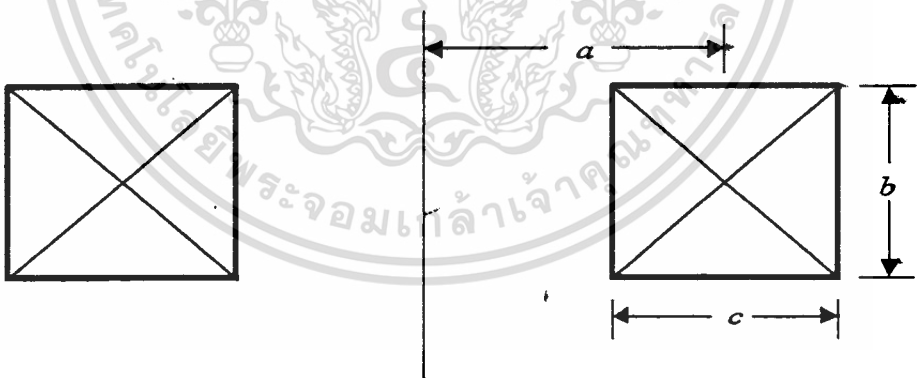
Maximum inductance = 95.9067 μ H

จำนวนรอบ = 34 รอบ

a = 4.60314 cm

b = 2.81454 cm

c = 3.34995 cm



AWG # 6 ϕ 18.68 mm²

Maximum inductance = 108.797 μ H

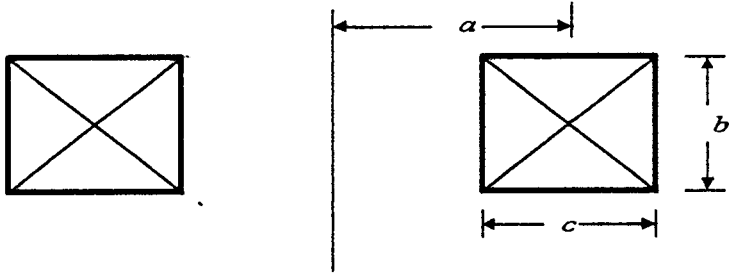
จำนวนรอบ = 39 รอบ

a = 4.047928 cm

b = 2.485149 cm

c = 2.955356 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AWG # 8 ϕ 8.368 mm²

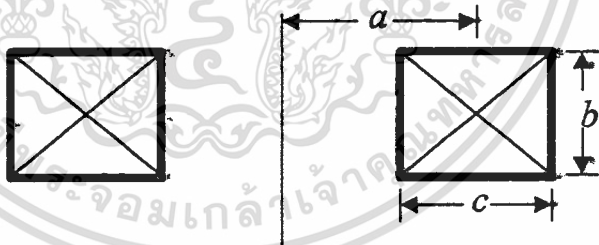
Maximum inductance = 142.190 μ H

จำนวนรอบ = 51 รอบ

a = 3.100689 cm

b = 1.899251 cm

c = 2.261524 cm



AWG # 10 ϕ 5.262 mm²

Maximum inductance = 165.969 μ H

จำนวนรอบ = 59 รอบ

a = 2.653446 cm

b = 1.627849 cm

$c c c$ = 1.938860 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลจากการทดสอบ

เป็นผลการทดสอบที่ได้จากการนำข้อมูลจากการคำนวณของ โปรแกรมไปทำการสร้างต้นแบบ(model) เพื่อจะดูว่าค่าที่ออกมาใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากโปรแกรมหรือไม่ ซึ่งค่าที่ได้มานี้เป็นตัวอย่งจากการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าต่างๆจากค่าที่ได้จากการทดสอบ

- วิธี V-I method

ค่าความเหนี่ยวนำจากการคำนวณของโปรแกรม 4 mH

ค่าความเหนี่ยวนำจาก LCR meter model KC-530 4.24 mH

ค่าความเหนี่ยวนำจาก Digital LCR meter Z 216 4.2 mH

ค่ากระแสที่พิกัด 3 แอมป์ แรงดัน 5.61 โวลท์

ค่าความต้านทาน 1.38 โอห์ม ค่าอิมพีแดนซ์ 1.87 โอห์ม

ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (power factor)

มุมระหว่างแรงดันกับกระแส

$$\begin{aligned}\cos\phi &= \frac{R}{Z} \\ &= \cos^{-1} \frac{1.38}{1.87} \\ &= 42.44^\circ\end{aligned}$$

หาค่ากำลังไฟรีแอคทีฟ (reactive power)

$$\begin{aligned}\text{VAR} &= VI \sin \phi \\ &= 5.61 \times 3 \times \sin 42.44 \\ &= 11.35 \text{ VAR}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Copper loss} &= I^2 R \\ &= (3)^2 \times 1.38 \\ &= 12.5 \text{ Watt}\end{aligned}$$

ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\text{Digital LCR meter model KC- 530} \quad \frac{4.2 - 4}{4.2} \times 100 = 4.76 \%$$

V-I method

$$\frac{4 - 3.535}{4} \times 100 = 16 \%$$

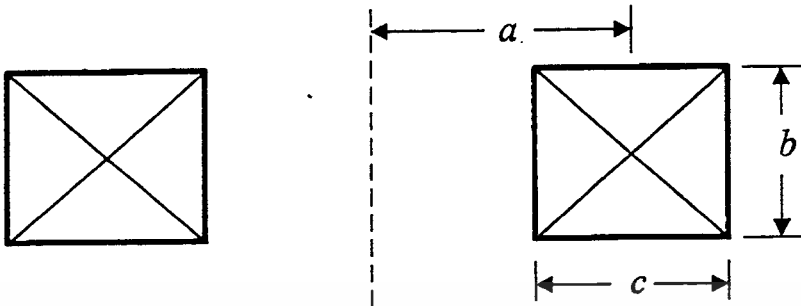
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้บวระเษนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาย AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size Constance			จำนวนรอบ (รอบ)	ความยาวลวด (เมตร)	ค่าความเหนียวนำสูงสุดจากเครื่องวัด (microhenry)		
		a (cm)	b (cm)	c (cm)			LCR meter model KC-530	LCR digital model Z-216	V-I method (Average)
13	4.486	3.52	2.28	2.57	94	20	516	510	464.73
16	2.269	2.72	1.73	1.815	118	20	670	664	466.31
16	2.269	2.982	1.98	1.815	156	30	1327	1310	996.85
19	0.916	2.68	1.73	1.73	299	50	4240	4240	3350

สาย AWG เบอร์	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)		มุมระหว่าง แรงดันกับกระแส (องศา)	reactive power (VAR)	copper loss (Watt)	ทดสอบที่พิกัด	
	LCR digital model Z-216	V-I method (Average)				แรงดัน(V)	กระแส(A)
13	0.35	9.2	51.75	37.1	30	3.15	15
16	3.45	27	19.46	26.23	75	5.25	15
16	2.17	21	45.27	86.31	87.5	8.1	15
19	0.916	16	42.44	11.35	12.5	5.61	3

ตารางที่ 5.5 ผลจากการทดสอบโดยนำค่าจากการคำนวณของโปรแกรมไปสร้างต้นแบบ

แสดงพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ได้จากการทดสอบ



AWG # 13 ϕ 4.486 mm²

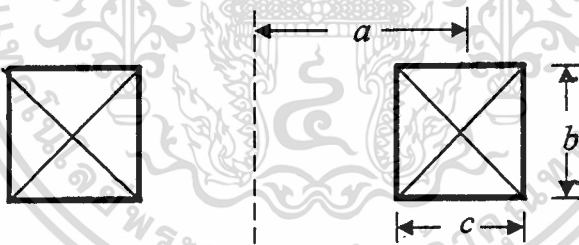
Maximum inductance = 509 μ H

จำนวนรอบ = 94 รอบ

a = 3.52 cm

b = 2.28 cm

c = 2.57 cm



AWG # 16 ϕ 2.269 mm²

Maximum inductance = 665 μ H

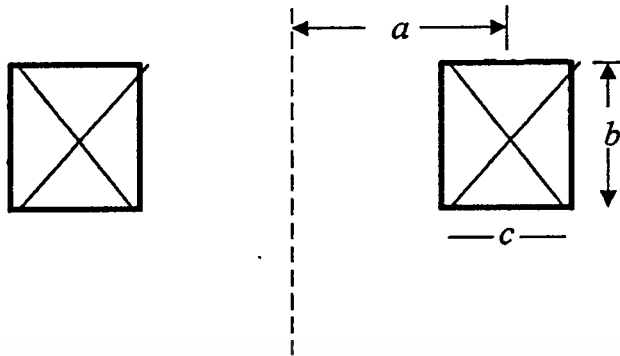
จำนวนรอบ = 118 รอบ

a = 2.72 cm

b = 1.73 cm

c = 1.815 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AWG # 16 ϕ 2.269 mm²

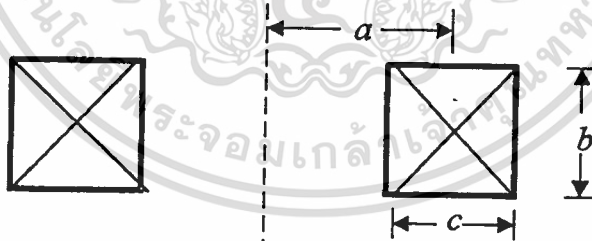
Maximum inductance = 1290 μ H

จำนวนรอบ = 156 รอบ

a = 2.982 cm

b = 1.98 cm

c = 1.815 cm



AWG # 19 ϕ 0.916 mm²

Maximum inductance = 4200 μ H

จำนวนรอบ = 299 รอบ

a = 2.68 cm

b = 1.73 cm

c = 1.73 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 เปรียบเทียบผลการการคำนวณจากโปรแกรมกับผลการทดสอบ

สาย AWG (เบอร์)	พื้นที่หน้าตัด (sq mm)	Size Constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	ความยาวลวด (เมตร)	ค่าความเหนียวสูงสุด (μH)
		a	b	c			
19	0.916	2.598	1.738	1.564	296	50	4002.79
16	2.269	2.622	1.701	1.57	116	20	642.416
16	2.269	3.07	1.909	1.792	149	30	1262.7
13	4.486	3.256	2.174	1.956	94	20	511.848

ตารางที่ 5.6 ผลจากการคำนวณของโปรแกรม

สาย AWG เบอร์	พื้นที่หน้าตัด (sq.mm)	Size Constance (cm)			จำนวนรอบ (รอบ)	ความยาวลวด (เมตร)	ค่าความเหนียวสูงสุดจากเครื่องวัด (microhenry)		
		a	b	c			LCR meter	LCR digital	VImathod(Average)
13	4.486	3.52	2.28	2.57	94	20	516	510	464.73
16	2.269	2.72	1.73	1.815	118	20	670	664	466.31
16	2.269	2.982	1.98	1.815	156	30	1327	1310	996.85
19	0.916	2.68	1.73	1.73	299	50	4240	4240	3350

ตารางที่ 5.7 ผลจากการทดสอบโดยนำค่าจากการคำนวณของโปรแกรมไปสร้างต้นแบบ

5.5 การสร้างขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

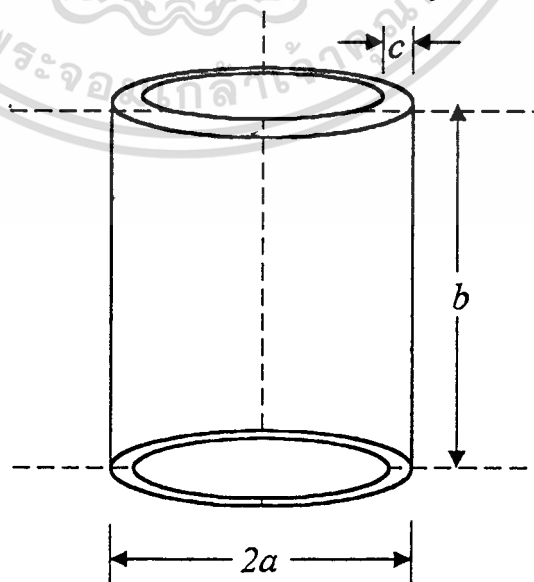
ในการพันขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศควรระวังเรื่องช่องว่างอากาศในขดลวด (Air-Gap) และรูปร่างของขดลวดให้มากที่สุด เพราะช่องว่างอากาศของขดลวดในแต่ละชั้นแต่ละรอบของขดลวดนั้นจะมีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก (flux density) ในขดลวด ซึ่งจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ของขดลวดเหนี่ยวนำเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการพันขดลวดจริงแตกต่างจากค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากผลการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.5.1 การทำบ็อบบิน (Bobbin)

- แกนขดลวด ขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ สิ่งสำคัญที่สุดคือแกนของขดลวดจะเป็นช่องอากาศวงกลม ขนาดของช่องอากาศจะต้องมีขนาดเท่ากับ หรือ ใกล้เคียงกับขนาดที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม เพราะช่องอากาศนี้มีผลมากต่อค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด เมื่อมีขนาดเปลี่ยนไป แกนขดลวดอาจใช้ท่อทรงกลมหรือใช้ไม้เนื้อแข็งกลึงเป็นทรงกระบอกให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังนี้

$$r = \left(a - \frac{c}{2} \right)$$

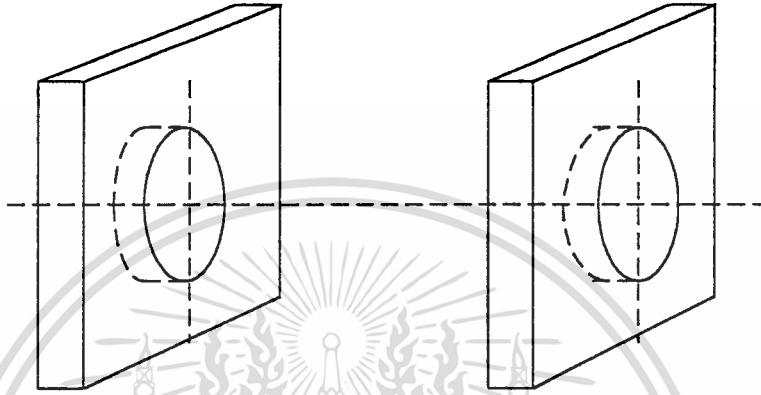
$$\phi = 2r$$



รูปที่ 5.1 แกนขดลวดเหนี่ยวนำ

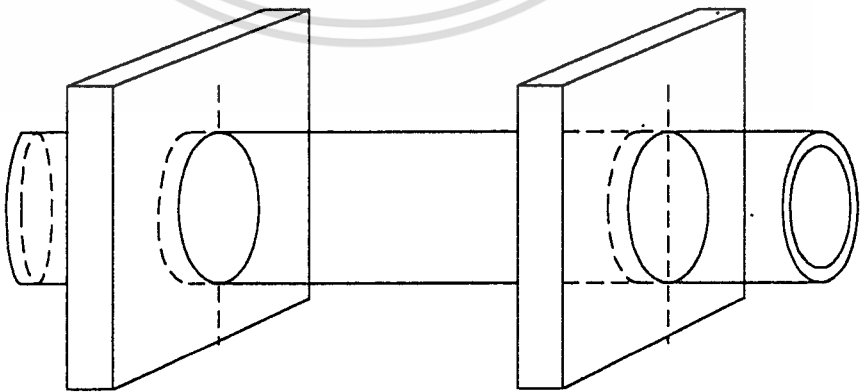
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฝาปิดหัวท้าย ฝาปิดหัวท้ายทำจากแผ่นพลาสติกหนาประมาณ 10 มิลลิเมตร หรือทำจากแผ่นไม้อัดหนา 10 มิลลิเมตร ก็ได้ โดยตัดให้แผ่นไม้อัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของขดลวดประมาณ 3 เซนติเมตรตรงกลางของแผ่นไม้อัดจะเจาะเป็นวงกลมโดยขนาดของรูวงกลมนั้นมีขนาดเท่ากับ พื้นที่หน้าตัดของแกนทรงกระบอก ของขดลวด



รูปที่ 5.2 ฝาปิดหัวท้ายขดลวด

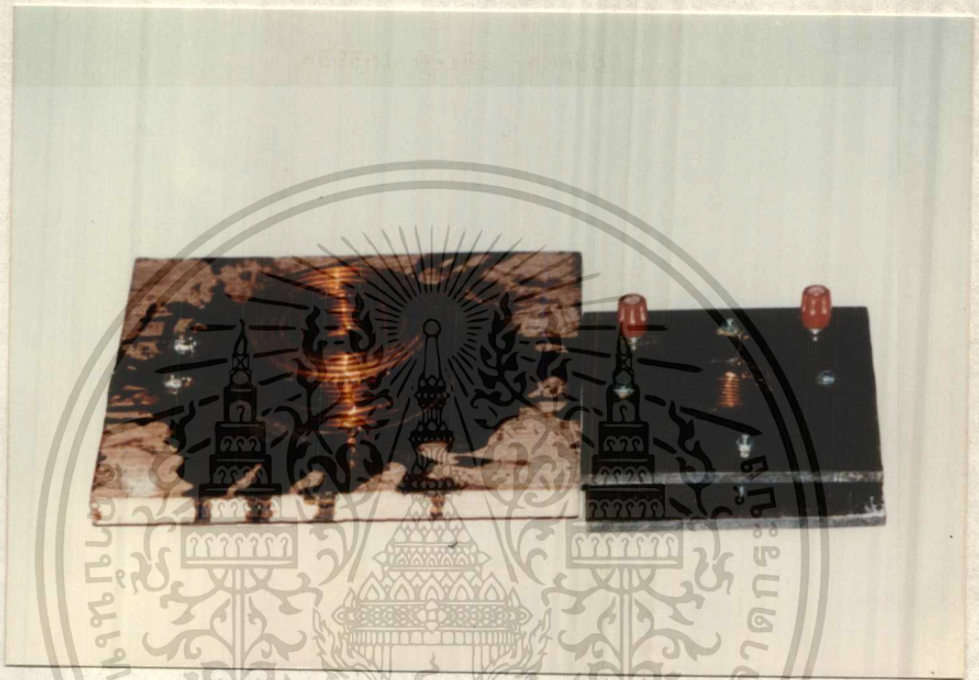
- ประกอบแกนและฝาปิดหัวท้าย เมื่อได้แกนทรงกระบอก และฝาปิดหัวท้ายของขดลวดนำมาประกอบกัน โดยให้ระยะห่างระหว่างหัวกับท้ายมีความกว้างเท่ากับ 6 และยึดแผ่นไม้อัดกับแกนทรงกระบอกเข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่ 5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 5.3 แสดงการยึดแผ่นไม้อัดกับแกนทรงกระบอกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.2 การพันขดลวด

ลักษณะการพันขดลวดจะพันเป็นชั้นๆ ทับกัน โดยแต่ละชั้นจะพันให้ชิดกัน เพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างอากาศระหว่างชั้นในขดลวด ขดลวดเหนียวนำเมื่อพันเสร็จแล้ว จะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 5.4 แสดงขดลวดเหนียวนำแกนอากาศ

5.5.3 การอาบน้ำวานิช

การอาบน้ำวานิชเพื่อต้องการที่จะให้ขดลวดแข็งตัวทรงรูปร่าง และขนาดเดิมและน้ำวานิชยังเป็นฉนวนเคลือบขดลวดในแต่ละชั้น เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดได้ ขดลวดเมื่อพันเสร็จจะยึดด้วยแคมป์ตัวซี เพื่อป้องกันไม่ให้ระยะ b ของขดลวดเปลี่ยนไป เมื่อถอดแกนทรงกระบอกออกจากขดลวดนำขดลวดที่ถอดแกนเข้าอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศา ใช้เวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้ขดลวดร้อนแล้วชุบน้ำวานิช วิธีนี้จะทำให้น้ำวานิชซึมเข้าขดลวดได้ดี นำขดลวดอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80-100 องศา ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง นำขดลวดออกจากตู้อบทิ้งให้เย็นตัว ขดลวดที่ได้จะมีลักษณะแข็งตัว สามารถที่จะนำมาทดสอบและนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 วิธีการทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ

การทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีหลายวิธี ในที่นี้ขอกล่าวเพียง 2 วิธี

5.6.1 การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโดยใช้โวลท์ แอมป์มิเตอร์

การใช้วิธีโวลท์ แอมป์มิเตอร์ หรือ V-I method โดยใช้ทฤษฎีกฎของโอห์ม ในการหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด สามารถทำได้ดังนี้

จาก $V / I = Z$ (ระบบ AC)

เมื่อ $Z = R + jX_L$

เนื่องจากขดลวดมีค่าความต้านทานน้อยมาก

$$R \approx 0$$

$$Z \approx X_L$$

เมื่อ $X_L = 2\pi f l$

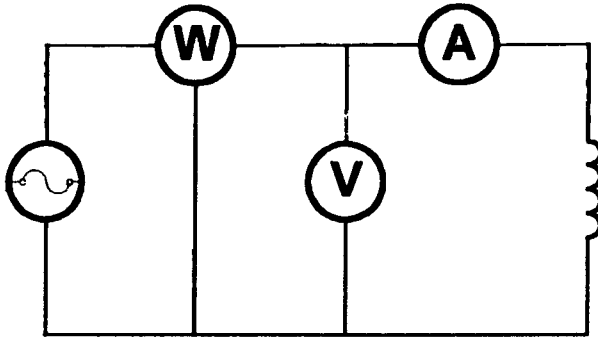
$$L = X_L / 2\pi f \quad \text{Henry}$$

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

- Varias 0-380 V, 15 A, 50 HZ, AC
- AC Volt meter 0-220 V.
- AC Amp meter 0-30 A.
- ฟิวส์ 15 A.
- หลักรต่อสาย
- สายต่อวงจร 20 เส้น

วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด แสดงดังรูปที่ 5.5 ค่าที่วัดได้จะได้ค่าแรงดัน และกระแส ทำการปรับแรงดันหลายๆ ค่า และอ่านค่ากระแส นำค่าที่ได้มาคำนวณและหาค่าเฉลี่ย เพื่อต้องการค่าที่ถูกต้องที่สุด

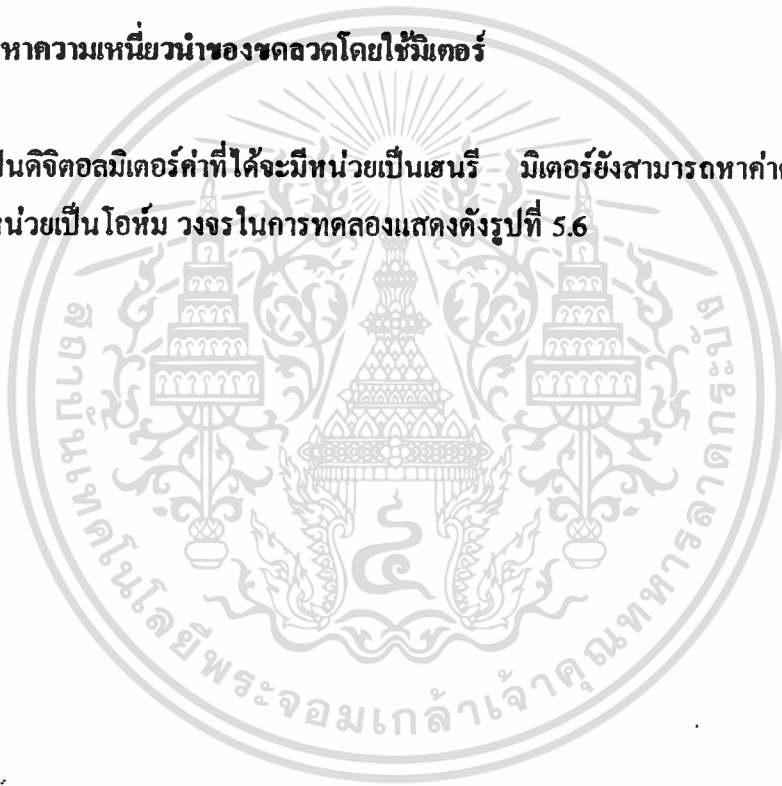
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงวงจรการใช้วิธีวัตต์แอมป์

5.6.2 การหาความเหนี่ยวนำของขดลวดโดยใช้มิเตอร์

เป็นดิจิตอลมิเตอร์ค่าที่ได้จะมีหน่วยเป็นเฮนรี มิเตอร์ยังสามารถหาค่าความต้านทานของขดลวดมีหน่วยเป็นโอห์ม วงจรในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การใช้มิเตอร์หาค่าความเหนี่ยวนำ

5.6.3 การหาค่าคงที่ของขดลวดเหนียวน้ำ (Winding Factor)

การหาค่าคงที่ของขดลวดเพื่อต้องการที่จะหาค่าคงที่ค่าหนึ่งที่จะใช้ปรับการคำนวณของโปรแกรมให้ผลการคำนวณที่ได้สามารถพันขดลวดเหนียวน้ำได้จริง เนื่องจากเมื่อโปรแกรมคำนวณขนาดของขดลวดออกมาจะยังไม่สามารถที่จะพันขดลวดลงในบ็อบบิ้นได้เต็มขดหรือเต็มระยะของลวดตัวนำที่กำหนดมา ซึ่งต้องมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อใช้ปรับผลที่ได้ในเชิงทฤษฎีให้ได้ในทางปฏิบัติ

การหาค่าคงที่ของขดลวดเหนียวน้ำ หาได้จากการทดลองพันขดลวดเหนียวน้ำเพื่อต้องการตรวจสอบดูจำนวนรอบ และความยาวของลวดตัวนำ นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม และหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสองซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะเป็นค่าคงที่ ที่จะนำไปปรับปรุงโปรแกรม

เพราะฉะนั้น การหาค่าคงที่ ที่ดีที่สุดนั้น จะต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญในการพันขดลวดหลายๆ ขด ซึ่งจากการทดลองหาค่าคงที่ของขดลวดนี้ ค่าที่ได้จะเป็นค่าคงที่ที่ปรับค่าได้ (Vary factor) มีค่าประมาณ 0.95 ถึง 0.97 ๐



บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศในอดีตจะใช้หลักการทดลองพันขดลวดและวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดจนกระทั่งพันได้ค่าความเหนี่ยวนำตามที่ต้องการและอีกวิธีหนึ่งคือการแทนค่าในสมการและพันขดลวดเหนี่ยวนำตามสมการที่คำนวณได้

แต่การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำในวิธีของผู้เรียบเรียงนี้เป็นการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศโดยใช้ลวดตัวนำที่ประหยัดที่สุดโดยใช้หลักการ Numerical optimisation เพื่อต้องการที่ประหยัดลวดตัวนำและยังสามารถลดขั้นตอนการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแบบเก่าๆ ทำให้ผู้ใช้สามารถใช้ได้สะดวกและรวดเร็ว

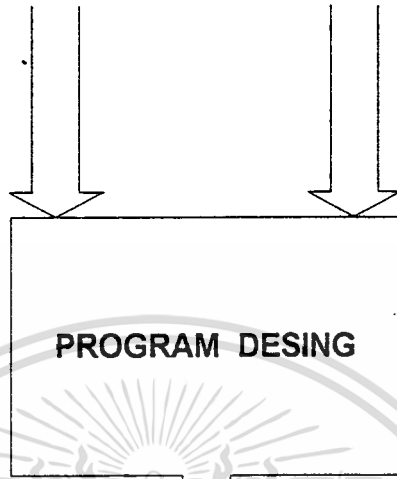
พื้นที่หน้าตัด (sq mm)	Numerical Optimisation Methoded				วิธีแทนค่าในสมการ			
	L (μH)	N (turn)	r (cm)	l (เมตร)	L (μH)	N (turn)	r(cm)	l(เมตร)
0.916	4002.79	296	1.82	50	4002.79	318	1.82	50.75
2.269	1262.70	149	1.711	30	1262.70	157	1.711	30.33
2.269	642.416	116	1.837	20	642.416	125	1.837	20.21
4.486	511.848	94	2.278	20	511.848	94	2.278	20.42

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศ

การใช้ทฤษฎี Numerical Optimisation ในการออกแบบขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศแบ่งเป็น 2 กรณี

- 1) เมื่อกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวของตัวนำให้หาค่า Maximum inductance ตามขนาดความยาวของลวดที่กำหนดให้

Area cross section (sq mm) Maximum Inductance



Miniimum Length
size a,b,c and N

รูปที่ 6.2 แสดงขั้นตอนเพื่อหาค่าความยาวลวดน้อยที่สุด

โดยเปรียบเทียบสมการที่ใช้เขียนโปรแกรมการออกแบบใหม่รูปแบบสมการจะเป็นการหา Minimum length รูปแบบสมการที่ให้แสดงได้ดังนี้.

$$N = \frac{l}{2\pi a}$$

$$c = \frac{lt}{2\pi ab}$$

$$l = \frac{\pi \left[10t L(x) + \sqrt{(10t L(x))^2 + L(x)(1134a^2b^3 + 756a^3b^2)} \right]}{ab f 31.5}$$

f = winding factor มีค่าระหว่าง 0.95-0.97

ผลการคำนวณของโปรแกรมทั้ง 2 กรณีจะให้ผลที่สอดคล้องกันดังนี้ กรณีที่ 1 ผลที่ได้คือค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดของลวดตัวนำที่ความยาวนั้นๆและกรณีที่ 2 ผลที่ได้คือค่าความยาวของลวดตัวนำที่น้อยที่สุดที่สามารถได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณทั้ง 2 กรณีจะให้ผลเหมือนกันซึ่งเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

	Maximum Inductance	Minimum length
L (μH)	511.848	510
N (turn)	94	94
l (เมตร)	20	19.987
a (cm)	3.256	3.241
b (cm)	2.174	2.162
c (cm)	1.956	1.977
A(sq mm)	4.486	4.486

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณที่ Maximum Inductance และ Minimum length

จะเห็นว่าการออกแบบในวิธีนี้มีประโยชน์ในการผลิตขดลวดเหนี่ยวนำแกนอากาศ ในปริมาณจำนวนมากๆที่เป็นงานอุตสาหกรรม เพราะในการผลิตการประหยัดลวดตัวนำที่ใช้ทำขดลวดโซลินอยด์สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างคุ้มค่าเกิดผลกำไรในกระบวนการนั้นๆ สำหรับทฤษฎี Numerical Optimisation ยังสามารถนำไปพัฒนาใช้ในการออกแบบงานด้านอื่นๆต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงโปรแกรมหาค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดและขนาดรูปร่างของขดลวดโซลินอยด์
(Maximum Inductance and Size of Solenoid Inductor)



Maximum 2

```

C=====
PROGRAM BB
C=====
C 17 JANUARY 1995
C THIS IS A PROGRAM FOR DESING OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR
C BY MIDDENDORF FORMULA.
C PROGRAM USING NUMERICAL OPTIMIZATION TECHNIQUES TO SOLVE
C CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES(first-order methods).
C USING SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES[SUMT] WITH
C AN EXTENDED INTERIOR PENALTY FUNCTION METHOD(THE QUADRATIC EXTENDED
C PENALTY FUNCTION.
C FOR UNCONSTRAINED FUNCTION USING VARIABLE METRIC METHODS(BROYDEN-
C FLETCHER-GOLDFARB-SHANNÓ) WITH PARABOLIC INTERPOLATION (BRENT'S
C METHOD) IN ONE-DIMENSION.
C USING FINITE DIFFERENCE METHOD TO CALCULATE THE DERIVATIVE OF THE
C OBJECTIVE FUNCTION.
C OPERATING FILES:
C SVANQUAT.FOR : MAIN PROGRAM
C=====

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
INTEGER NI, NP, NH, NG, ITER, NT
PARAMETER(NP=10, PI=3.14159265D0)
DIMENSION P(NP), TMI(NP), XTT(NP), EQUACON(NP), UINEQCON(NP)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG, ZY, ZX
COMMON/DELTA/HF, HC
COMMON/RPMUL/RPHMUL, RPGMUL
COMMON/NCOUNT/NCT
COMMON AXO, XXO
C=====

```

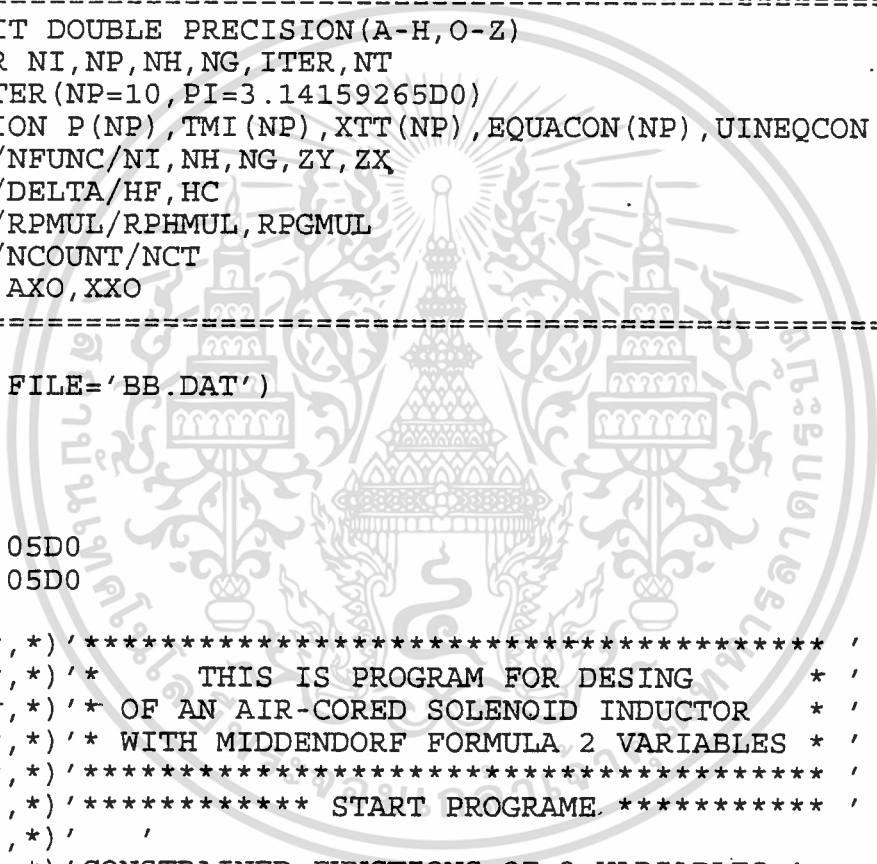
```

C=====
OPEN(1, FILE='BB.DAT')

NI=2
NH=0
NG=4
P(1)=0.05D0
P(2)=0.05D0

WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'* THIS IS PROGRAM FOR DESING *'
WRITE(*,*)'* OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR *'
WRITE(*,*)'* WITH MIDDENDORF FORMULA 2 VARIABLES *'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'***** START PROGRAME. *****'
WRITE(*,*)' '
WRITE(*,*)'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
WRITE(*,*)'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
WRITE(*,*)'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
WRITE(*,*)'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER THE LENGTH (CLEN):'
READ(5,*)ZY
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER CROSS-SECTION AREA OF THE WIRE (CSA):'
READ(5,*)ZX
WRITE(1,*)'LENGTH(m) AND CROSS-SECTION AREA OF THE WIRE(mm)"'
WRITE(1,*)'CLEEN: ',REAL(ZY),' CSA: ',REAL(ZX)
WRITE(*,*)'
WRITE(*,*)'OBJECTIVE FUNCTION:'
WRITE(*,*)' F(a,c)=(31.5(a**2)(CLEN/2PIa)**2)/
* (9(CLEN*CSA/2ac)+6a+10c)'
WRITE(*,*)'SIZE CONSTRAINED:'
WRITE(*,*)' 0.005 < a < 0.4'
WRITE(*,*)' 0.002 < c < 0.4'
WRITE(*,*)'*****'

```



C
C
C
C
C
C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่เอกลสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ให้ผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต และขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C WRITE(*,*)'ENTER STARTING POINTS a AND c : '
C READ(5,*) (P(J),J=1,NI)
WRITE(1,*)'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
WRITE(1,*)'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
WRITE(1,*)'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
WRITE(1,*)'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
WRITE(1,*)'OBJECTIVE FUNCTION:'
WRITE(1,*)' F(a,c)=(31.5(a**2)(CLEN/2PIa)**2)/
* (9(CLEN*CSA/2PIac)+6a+10c)'
WRITE(1,*)'SIZE CONSTRAINED:'
WRITE(1,*)' 0.005 < a < 0.4'
WRITE(1,*)' 0.002 < c < 0.4'
C WRITE(1,*)'ENTER STARTING POINTS a AND c : '
C WRITE(1,*)REAL(P(1)),REAL(P(2))
C WRITE(*,*)'ENTER CONVERGENCE TOLERANCE (FTOL):'
C READ(5,*)FTOL
FTOL=1E-4
C WRITE(*,*)'ENTER EQUALITY TOLERANCE (EQTOL):'
C READ(5,*)EQTOL
EQTOL=1E-4
C WRITE(*,*)'ENTER AX:'
C READ(5,*)AXO
AXO=0.00001
C WRITE(*,*)'ENTER XX:'
C READ(5,*)XXO
XXO=0.00002
WRITE(1,*)'AX: ',REAL(AXO),' XX: ',REAL(XXO)
WRITE(*,*)'***** PLEASE WAIT *****'

XMAX=0D0
YMAX=0D0

RPHMUL=1.25
RPGMUL=0.1
IP=1
ZX=ZX*10D-7
1 NCT=0
CLEN=ZY
CSA=ZX

C CALL CQUMDF(P,FRETMI,TMI,XTT,ITER,FTOL,IP,EQUACON,UINEQCON,FMIN,
C * EQTOL,CLEN,CSA)

C IF(TMI(1).EQ.0.0D0)THEN
C WRITE(*,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
C WRITE(1,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
C GO TO 101
C END IF
C IF(ABS(FMIN).LT.298.538D0) GO TO 201

C WRITE(*,*)' RPGMUL=',REAL(RPGMUL),' F=',REAL(ABS(FMIN))
C WRITE(1,*)' RPGMUL=',REAL(RPGMUL),' F=',REAL(ABS(FMIN))
C GO TO 101

30 IF (RPGMUL.LE.0.9) GO TO 10
GO TO 201

10 CALL CQUMDF(P,FRETMI,TMI,XTT,ITER,FTOL,IP,EQUACON,UINEQCON,FMIN,
* EQTOL,CLEN,CSA)

IF(TMI(1).EQ.0.0D0)THEN
WRITE(*,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
WRITE(1,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
GO TO 40

```

END IF

XMAX=ABS(FMIN)
IF(YMAX.GT.XMAX) GO TO 40
YMAX=XMAX
40 RPGMUL=RPGMUL+0.0125
RPHMUL=RPHMUL+0.02
GO TO 30

201 NT=(CLEN/(2*PI*TMI(1)))*0.97
DE=CLEN*CSA*0.97/(2*PI*TMI(1)*TMI(2))
WRITE(*,*)'RPGMUL:',REAL(ABS(RPGMUL))
WRITE(*,*)'TOLERANCE(FTOL):',REAL(FTOL)
C WRITE(*,*)'INEQUALITY CON:',REAL(UINEQCON(1)),REAL(UINEQCON(2))
C WRITE(*,*)'INEQUALITY CON:',REAL(UINEQCON(3)),REAL(UINEQCON(4))
WRITE(*,*)'MAXIMUM INDUCTANCE:',REAL(ABS(YMAX)), 'Microhenry'
WRITE(*,*)'NUMBER OF TURN:',(NT)
WRITE(*,*)'a:',REAL(TMI(1)), 'm'
WRITE(*,*)'b:',REAL(DE), 'm'
WRITE(*,*)'c:',REAL(TMI(2)), 'm'
WRITE(*,*)'NO.OF ITERATIONS:',ITER
WRITE(*,*)'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS:',NCT
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(1,*)'*****'
WRITE(1,*)'RPGMUL:',REAL(ABS(RPGMUL))
WRITE(1,*)'TOLERANCE(FTOL):',REAL(FTOL)
C WRITE(1,*)'INEQUALITY CON:',REAL(UINEQCON(1)),REAL(UINEQCON(2))
C WRITE(1,*)'INEQUALITY CON:',REAL(UINEQCON(3)),REAL(UINEQCON(4))
WRITE(1,*)'MAXIMUM INDUCTANCE:',REAL(ABS(YMAX)), 'Microhenry'
WRITE(1,*)'NUMBER OF TURN:',(NT)
WRITE(1,*)'a:',REAL(TMI(1)), 'm'
WRITE(1,*)'b:',REAL(DE), 'm'
WRITE(1,*)'c:',REAL(TMI(2)), 'm'
WRITE(1,*)'NO.OF ITERATIONS:',ITER
WRITE(1,*)'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS:',NCT
C101 IF(RPGMUL.LE.0.9) THEN
C101 RPGMUL=RPGMUL+0.0125
C RPHMUL=RPHMUL+0.02
C GO TO 1
C ENDIF

STOP
END

C=====

```
SUBROUTINE CQUMDF(P,FRETMI,TMI,XTT,ITER,FTOL,IP,SETEQUA,SETINEQ,  
*,FMIN,EQTOL,CLEN,CSA)
```

C=====

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)  
INTEGER NI,N,NP,ITER,ITERM,NT  
PARAMETER(NP=10,PI=3.141592654D0)  
PARAMETER(NMAX=20,ITMAX=200,EPS=1.D-10)  
PARAMETER(TOL=1.D-04)  
PARAMETER(ZEPS=1.D-10)  
PARAMETER(GOLD=1.618034D0,GLIMIT=100.D0,TINY=1.D-20)  
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG,ZY,ZX  
COMMON/DELTA/HF,HC  
COMMON/RPEX/RPH,RPG,ERO,CON  
COMMON/RPMUL/RPHMUL,RPGMUL  
DIMENSION P(NP),T(NMAX),TMI(NP),AT(NP),XT(NP),XTT(NP),EQUA(NP),  
*UINEQUA(NP),SETEQUA(NP),SETINEQ(NP),TO(NMAX)
```

C=====

N=NI

FRETMI=1.D14

DO 1 I=1,NH
SETEQUA(I)=0.D0
CONTINUE

DO 2 J=1,NG
SETINEQ(J)=0.D0
CONTINUE

DO 11 J=1,N
AT(J)=P(J)
TMI(J)=0.0D0
CONTINUE

DO 12 K=1,IP
DO 13 J=1,N
T(J)=AT(J)*K
XT(J)=T(J)
CONTINUE

ERO=-0.2D0

CALL FUNCFQU(T,FRF,CLEN,CSA)
CALL FUNCGQU(T,FRG)

RPH=1.D0
RPG=ABS(FRF)/FRG

IF(RPG.LT.1) THEN
RPG=1.D0
ENDIF

CON=- (ERO/(RPG)**0.5)

CALL DELTAFT(T)

CALL CQUDFP(T,N,FTOL,ITERM,DFRET,TO,TERM)

IF(TERM.EQ.1.0) THEN
WRITE(*,*)K,' *OVERFLOW ',DFRET
GO TO 12
ENDIF

FM=FUNF(T,CLEN,CSA)

WRITE(*,*)REAL(FM)
WRITE(1,*)REAL(FM)

DO 100 L=1,NG
UINEQUA(L)=FUNG(T,L)
WRITE(*,*)' INEQUALITY:',UINEQUA(L)
WRITE(1,*)' INEQUALITY:',UINEQUA(L)

IF(UINEQUA(L).GT.0) THEN

WRITE(*,*)' ***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***','G:',L
WRITE(1,*)' ***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***','G:',L
GO TO 12

ENDIF

CONTINUE

DO 200 M=1,NH
EQUA(M)=FUNH(T,M)
WRITE(*,*)' EQUALITY:',EQUA(M)
WRITE(1,*)' EQUALITY:',EQUA(M)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C      IF (ABS (EQUA (M) ) .GT. EQTOL) THEN
C          WRITE (*, *) '***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***'
          WRITE (1, *) '***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***'
          GO TO 12
      ENDIF
200    CONTINUE

      IF (FM.LT.FRETMI) THEN
          FRETMI=FM
          ITER=ITERM

          DO 300 MNH=1, NH
              SETEQUA (MNH) =EQUA (MNH)
300          CONTINUE

          DO 400 MNG=1, NG
              SETINEQ (MNG) =UINEQUA (MNG)
400          CONTINUE

          DO 15 J=1, N
              XTT (J) =XT (J)
              TMI (J) =T (J)
15          CONTINUE

          FMIN=FUNF (T, CLEN, CSA)

      ENDIF
12    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C=====
SUBROUTINE DELTAFT (X)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
REAL XTR (NMAX) , FR
DIMENSION X (NMAX) , XT (NMAX)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG
COMMON/DELTA/HF, HC
C=====

```

```
ERR=0.0D0
```

```

DO 11 I=1, 10
DO 12 J=1, NI
    XI=0.5D0
    XT (J) =XI*0.1D0*I
    XTR (J) =REAL (XT (J) )
12 CONTINUE

```

```
CALL FUNCTQU (XT, FX, FF, FH, FG)
```

```
FR=REAL (FX)
```

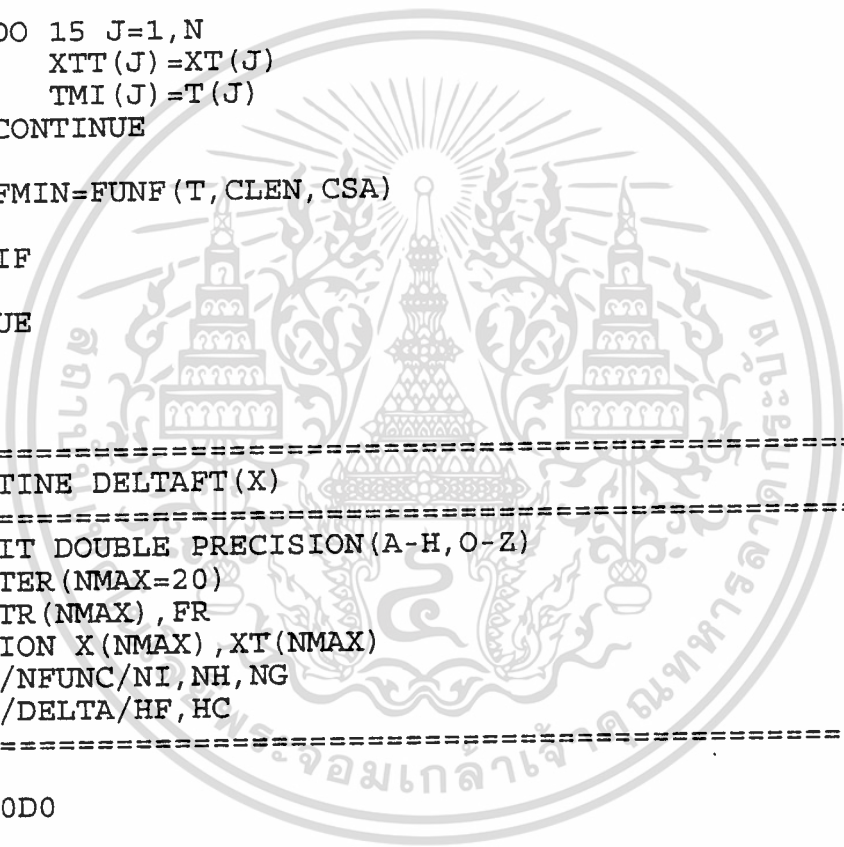
```
EA=ABS (FX) -ABS (FR)
```

```

IF (ABS (EA) .GE. ERR) THEN
    ERR=ABS (EA)
ENDIF

```

```
11 CONTINUE
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ED=ERR/ABS (FX)
HF=ED**0.5
HC=ED**0.333333D0

RETURN
END

C=====

SUBROUTINE FUNCTQU (X, F, FF, FH, FG)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

PARAMETER (NMAX=20)

DIMENSION X (NMAX)

COMMON/NFUNC/NI, NH, NG, ZY, ZX

COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON

C=====

F=0.D0

FF=0.D0

FG=0.D0

FH=0.D0

CLEN=ZY

CSA=ZX

CALL FUNCFQU (X, FF, CLEN, CSA)

IF (NG.EQ.0) GO TO 1

CALL FUNCGQU (X, FG)

1 IF (NH.EQ.0) GO TO 2

CALL FUNCHQU (X, FH)

2 F=FF+RPG*FG+RPH*FH

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCFQU (X, FF, CLEN, CSA)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

PARAMETER (NMAX=20)

DIMENSION X (NMAX)

C=====

FF=FUNF (X, CLEN, CSA)

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCHQU (X, FH)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)

PARAMETER (NMAX=20)

DIMENSION X (NMAX)

COMMON/NFUNC/NI, NH, NG

C=====

FH=0.D0

DO 11 K=1, NH

FUH=FUNH (X, K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ FH=0.D0 ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DO 11 K=1, NH

FUH=FUNH (X, K)

RETURN
END

C=====

SUBROUTINE FUNCQU(X,FG)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG
COMMON/RPEX/RPH,RPG,ERO,CON

C=====

FG=0.0
DO 11 J=1,NG
GJ=FUNG(X,J)
IF(GJ.EQ.0) THEN
FUG=0.0
GO TO 100
ENDIF
IF(GJ.LE.ERO) THEN
FUG=-1/GJ
ELSE
FGJ=GJ/ERO
FUG=(-1/ERO)*(FGJ**2-3*FGJ+3)
ENDIF
IF(FUG.GT.1.E06) THEN
FUG=1.E04
ENDIF
IF(FUG.LE.-1.E06) THEN
FUG=-1.E04
ENDIF
100 FG=FG+FUG
11 CONTINUE
RETURN
END

C=====

SUBROUTINE GRADFT(X,DF)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX),DF(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG
COMMON/DELTA/HF,HC

C=====

DO 11 J=1,NI
XT=X(J)
X(J)=XT+HC
CALL FUNCTQU(X,FXP,FXPF,FXPH,FXPG)
X(J)=XT-HC
CALL FUNCTQU(X,FXM,FXMF,FXMH,FXMG)
DF(J)=(FXP-FXM)/(2*HC)

X(J)=XT

11 CONTINUE

RETURN
END

```
C=====
SUBROUTINE CQUDFP (P,N,FTOL,ITER,FP,PO,TERM)
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20,ITMAX=200,EPS=1.D-10)
DIMENSION P(N),HESSIN(NMAX,NMAX),XI(NMAX),G(NMAX),DG(NMAX),HDG(NMA
*X),PO(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG
COMMON/RPEX/RPH,RPG,ERO,CON
COMMON/RPMUL/RPHMUL,RPGMUL
COMMON/NCOUNT/NCT
C=====
```

NCT=0

CALL FUNCTQU(P,FP,FPF,FPH,FPG)

CALL GRADFT(P,G)

```
DO 12 I=1,N
  DO 11 J=1,N
    HESSIN(I,J)=0.D0
```

CONTINUE

HESSIN(I,I)=1.D0

XI(I)=-G(I)

CONTINUE

ITER=0

DO 24 ITER=1,ITMAX

ERO=- (CON*RPG**0.5)

```
DO 25 I=1,N
  PO(I)=P(I)
```

CONTINUE

CALL LINMIN(P,XI,N,FRET,TERM)

IF (TERM.EQ.1.0) RETURN

```
DO 13 I=1,N
  DG(I)=G(I)
```

CONTINUE

IF (2.D0*ABS(FRET-FP).LE.FTOL*(ABS(FRET)+ABS(FP)+EPS)) THEN
RETURN

ENDIF

FP=FRET

CALL FUNCTQU(P,FRET,FRETF,FRETH,FRETG)

CALL GRADFT(P,G)

```
DO 14 I=1,N
```

DG(I)=G(I)-DG(I)

```

14      IF(DG(I).EQ.0.D0) RETURN
      CONTINUE

      DO 16 I=1,N
        HDG(I)=0.D0
        DO 15 J=1,N
          HDG(I)=HDG(I)+HESSIN(I,J)*DG(J)
15      CONTINUE
16      CONTINUE

      FAC=0.D0
      FAE=0.D0
      DO 17 I=1,N
        FAC=FAC+DG(I)*XI(I)
        FAE=FAE+DG(I)*HDG(I)
17      CONTINUE

      FAC=1.D0/FAC
      FAD=1.D0/FAE

      DO 18 I=1,N
        DG(I)=FAC*XI(I)-FAD*HDG(I)
18      CONTINUE

      DO 21 I=1,N
        DO 19 J=1,N
          HESSIN(I,J)=HESSIN(I,J)+FAC*XI(I)*XI(J)
          *      -FAD*HDG(I)*HDG(J)+FAE*DG(I)*DG(J)
C          WRITE(1,*)'H1:',HESSIN(I,J)
19      CONTINUE
21      CONTINUE

      DO 23 I=1,N
        XI(I)=0.D0
        DO 22 J=1,N
          XI(I)=XI(I)-HESSIN(I,J)*G(J)
22      CONTINUE
23      CONTINUE

      RPH=RPH*RPHMUL
      RPG=RPG*RPGMUL

      I
24      CONTINUE
C      PAUSE 'too many iterations in DFPMIN'
      RETURN
      END

```

```

C=====
SUBROUTINE LINMIN(P,XI,N,FRET,TERM)
C=====
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=20,TOL=1.D-4)
      EXTERNAL F1DIM,DF1DIM
      DIMENSION P(N),XI(N)
      COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
      COMMON AXO,XXO
C=====

```

NCOM=N

```

DO 11 J=1,N
  PCOM(J)=P(J)
  XICOM(J)=XI(J)
11 CONTINUE

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการเรียนการสอนหรือทำรายงานโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าหรือบริการโดยไม่ได้รับอนุญาต

AX=AXO
XX=XXO

CALL MNBRAK (AX, XX, BX, FA, FX, FB, F1DIM, TERM)

IF (TERM.EQ.1.0) RETURN

FRET=DBRENT (AX, XX, BX, F1DIM, DF1DIM, TOL, XMIN)

DO 12 J=1,N
XI (J) =XMIN*XI (J)
P (J) =P (J) +XI (J)

12 CONTINUE

RETURN
END

=====

FUNCTION F1DIM (X)

=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
COMMON /F1COM/ NCOM, PCOM (NMAX), XICOM (NMAX)
DIMENSION XT (NMAX)

=====

DO 11 J=1, NCOM
XT (J) =PCOM (J) +X*XICOM (J)

11 CONTINUE

CALL FUNCTQU (XT, F1DIM, F1DIMF, F1DIMH, F1DIMG)

RETURN
END

=====

FUNCTION DF1DIM (X)

=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
COMMON /F1COM/ NCOM, PCOM (NMAX), XICOM (NMAX)
DIMENSION XT (NMAX), DF (NMAX)

=====

DO 11 J=1, NCOM
XT (J) =PCOM (J) +X*XICOM (J)

11 CONTINUE

CALL GRADFT (XT, DF)

DF1DIM=0.D0

DO 12 J=1, NCOM
DF1DIM=DF1DIM+DF (J) *XICOM (J)

12 CONTINUE

RETURN
END

=====

SUBROUTINE MNBRAK (AX, BX, CX, FA, FB, FC, FUNC, TERM)

=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (GOLD=1.618034D0, GLIMIT=100.D0, TINY=1.D-20)

```

FA=FUNC (AX)
FB=FUNC (BX)
IF (FB.GT.FA) THEN
  DUM=AX
  AX=BX
  BX=DUM
  DUM=FB
  FB=FA
  FA=DUM

```

```

ENDIF
CX=BX+GOLD*(BX-AX)
FC=FUNC (CX)

```

```

1 IF (ABS (FB) .GT. 1.0E30) THEN
  TERM=1.0
  RETURN
ENDIF

```

```

IF (ABS (AX) .GT. 1.0E30) THEN
  TERM=1.0
  RETURN
ENDIF

```

```

IF (FB .GE. FC) THEN
  R= (BX-AX) * (FB-FC)
  Q= (BX-CX) * (FB-FA)
  U=BX- ((BX-CX)*Q- (BX-AX)*R) / (2.0*SIGN (MAX (ABS (Q-R) , TINY) , Q-R))
  ULIM=BX+GLIMIT*(CX-BX)
  IF ((BX-U) * (U-CX) .GT. 0) THEN
    FU=FUNC (U)
    IF (FU .LT. FC) THEN
      AX=BX
      FA=FB
      BX=U
      FB=FU
      GO TO 1
    ELSE IF (FU.GT.FB) THEN
      CX=U
      FC=FU
      GO TO 1
    ENDIF
    U=CX+GOLD*(CX-BX)
    FU=FUNC (U)
  ELSE IF ((CX-U) * (U-ULIM) .GT. 0) THEN
    FU=FUNC (U)
    IF (FU .LT. FC) THEN
      BX=CX
      CX=U
      U=CX+GOLD*(CX-BX)
      FB=FC
      FC=FU
      FU=FUNC (U)
    ENDIF
  ELSE IF ((U-ULIM) * (ULIM-CX) .GE. 0) THEN
    U=ULIM
    FU=FUNC (U)
  ELSE
    U=CX+GOLD*(CX-BX)
    FU=FUNC (U)
  ENDIF
  AX=BX
  BX=CX

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
CX=U
FA=FB
FB=FC
FC=FU
GO TO 1
```

```
ENDIF
RETURN
END
```

```
=====
FUNCTION DBRENT (AX, BX, CX, F, DF, TOL, XMIN)
=====
```

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (ITMAX=200, ZEPS=1.D-10)
LOGICAL OK1, OK2
=====
```

```
A=MIN (AX, CX)
B=MAX (AX, CX)
```

```
V=BX
```

```
W=V
```

```
X=V
```

```
E=0 .D0
```

```
FX=F (X)
```

```
FV=FX
```

```
FW=FX
```

```
DX=DF (X)
```

```
DV=DX
```

```
DW=DX
```

```
DO 11 ITER=1, ITMAX
```

```
XM=0.5D0*(A+B)
```

```
TOL1=TOL*ABS (X) + ZEPS
```

```
TOL2=2.*TOL1
```

```
IF (ABS (X-XM) .LE. (TOL2-0.5D0*(B-A))) GOTO 3
```

```
IF (ABS (E) .GT. TOL1) THEN
```

```
    D1=2.D0*(B-A)
```

```
    D2=D1
```

```
    IF (DW.NE.DX) D1=(W-X)*DX/(DX-DW)
```

```
    IF (DV.NE.DX) D2=(V-X)*DX/(DX-DV)
```

```
    U1=X+D1
```

```
    U2=X+D2
```

```
    OK1=((A-U1)*(U1-B).GT.0).AND.(DX*D1.LE.0)
```

```
    OK2=((A-U2)*(U2-B).GT.0).AND.(DX*D2.LE.0)
```

```
    OLDE=E
```

```
    E=D
```

```
    IF (.NOT. (OK1.OR.OK2)) THEN
```

```
        GO TO 1
```

```
    ELSE IF (OK1.AND.OK2) THEN
```

```
        IF (ABS (D1) .LT. ABS (D2)) THEN
```

```
            D=D1
```

```
        ELSE
```

```
            D=D2
```

```
        ENDIF
```

```
    ELSE IF (OK1) THEN
```

```
        D=D1
```

```
    ELSE
```

```
        D=D2
```

```
    ENDIF
```

```
    IF (ABS (D) .GT. ABS (0.5D0*OLDE)) GO TO 1
```

```
    U=X+D
```

```
    IF (U-A.LT.TOL2 .OR. B-U.LT.TOL2) D=SIGN (TOL1, XM-X)
```

```
    GOTO 2
```

```
ENDIF
```

```
IF (DX.GE.0) THEN
```

```
    E=A-X
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนวชิราวุฒวิทยาลัยสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
1 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม กรุณาแจ้งให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ELSE
  E=B-X
ENDIF
D=0.5D0*E
2 IF (ABS(D) .GE. TOL1) THEN
  U=X+D
  FU=F(U)
ELSE
  U=X+SIGN(TOL1,D)
  FU=F(U)
  IF(FU.GT.FX)GO TO 3
ENDIF
DU=DF(U)
IF(FU.LE.FX) THEN
  IF(U.GE.X) THEN
    A=X
  ELSE
    B=X
  ENDIF
V=W
FV=FW
DV=DW
W=X
FW=FX
DW=DX
X=U
FX=FU
DX=DU
ELSE
  IF(U.LT.X) THEN
    A=U
  ELSE
    B=U
  ENDIF
  IF(FU.LE.FW .OR. W.EQ.X) THEN
    V=W
    FV=FW
    DV=DW
    W=U
    FW=FU
    DW=DU
  ELSE IF(FU.LE.FV .OR. V.EQ.X .OR. V.EQ.W) THEN
    V=U
    FV=FU
    DV=DU
  ENDIF
ENDIF
11 CONTINUE
PAUSE 'DBRENT exceeded maximum iterations.'
3 XMIN=X
DBRENT=FX
RETURN
END

```

```

C=====
FUNCTION FUNF(X, CLEN, CSA)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
PARAMETER(PI=3.141592654D0)
DIMENSION X(NMAX)
COMMON/NCOUNT/NCT

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย
 หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NCT=NCT+1
AB=0D0
AC=0D0
AB=(CLEN/(2*PI*X(1)))*0.97
AC=(CLEN*CSA*0.97)/(2*PI*X(1)*X(2))
FUNF=- (31.5*(X(1)**2)*(AB**2)/(9*AC+6*X(1)+10*X(2)))
RETURN
END

```

```

=====
FUNCTION FUNH(X,K)
=====

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20,PI=3.141592654D0)
DIMENSION X(NMAX)
=====

```

```

GO TO(1,2,3,4,5,6,7)K

```

```

1 FUNH=X(1)
  RETURN
2 FUNH=0
  RETURN
3 FUNH=0
  RETURN
4 FUNH=0
  RETURN
5 FUNH=0
  RETURN
6 FUNH=0
  RETURN
7 FUNH=0
  RETURN
  END

```

```

=====
FUNCTION FUNG(X,J)
=====

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
PARAMETER (PI=3.141592654D0)
DIMENSION X(NMAX)
=====

```

```

GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8)J

```

```

1 FUNG= -(X(1)/0.005) + 1.0
  RETURN
2 FUNG= (X(1)/0.4) - 1.0
  RETURN
3 FUNG= -(X(2)/0.002) + 1.0
  RETURN
4 FUNG= (X(2)/0.4) - 1.0
  RETURN
5 FUNG= 0
  RETURN
6 FUNG= 0
  RETURN
7 FUNG= 0
  RETURN
8 FUNG= 0
  END

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C=====
PROGRAM CC
C=====
C 17 JANUARY 1995
C THIS IS A PROGRAM FOR DESING OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR
C BY MIDDENDORF FORMULA.
C PROGRAM USING NUMERICAL OPTIMIZATION TECHNIQUES TO SOLVE
C CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES(first-order methods).
C USING SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES[SUMT] WITH
C AN EXTENDED INTERIOR PENALTY FUNCTION METHOD(THE QUADRATIC EXTENDED
C PENALTY FUNCTION.
C FOR UNCONSTRAINED FUNCTION USING VARIABLE METRIC METHODS(BROYDEN-
C FLETCHER-GOLDFARB-SHANNO) WITH PARABOLIC INTERPOLATION (BRENT'S
C METHOD) IN ONE-DIMENSION.
C USING FINITE DIFFERENCE METHOD TO CALCULATE THE DERIVATIVE OF THE
C OBJECTIVE FUNCTION.
C OPERATING FILES:
C SVANQUAT.FOR : MAIN PROGRAM
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
INTEGER NI,NP,NH,NG,ITER,NT
PARAMETER(NP=10,PI=3.14159265D0)
DIMENSION P(NP),TMI(NP),XTT(NP),EQUACON(NP),UINEQCON(NP)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG,ZY,ZX
COMMON/DELTA/HF,HC
COMMON/RPMUL/RPHMUL,RPGMUL
COMMON/NCOUNT/NCT
COMMON AXO,XXO
C=====

OPEN(1,FILE='CC.DAT')

NI=2
NH=0
NG=4
P(1)=0.05D0
P(2)=0.05D0

WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'* THIS IS PROGRAM FOR DESING *'
WRITE(*,*)'* OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR *'
WRITE(*,*)'* BY MIDDENDORF FORMULA 2 VARIABLES *'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'***** START PROGRAME *****'
WRITE(*,*)'
WRITE(*,*)'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
WRITE(*,*)'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
WRITE(*,*)'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
WRITE(*,*)'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
WRITE(*,*)'*****'
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER THE INDUCTANCE VALUE (CLV):'
READ(5,*)ZY
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER THE CROSS-SECTION AREA OF WIRE (CSA):'
READ(5,*)ZX
WRITE(1,*)'INDUCTANCE (Microhenry) '
WRITE(1,*)'CROSS-SECTION AREA OF WIRE (mm")'
WRITE(1,*)'CLV: ',REAL(ZY),' CSA: ',REAL(ZX)
WRITE(*,*)'
WRITE(*,*)'OBJECTIVE FUNCTION:'
WRITE(*,*)' F(a,b)=(PI(10tL(x))+((10tL(x))**2+
* L(x)(1134a**2b**3+756a**3b**2))/abf13.5'
WRITE(*,*)'SIZE CONSTRAINED:'
WRITE(*,*)' 0.005 < a < 0.4'

```

```

WRITE(*,*)'          0.002 < b < 0.4'
WRITE(*,*)'*****'
C   WRITE(*,*)'ENTER STARTING POINTS a AND b : '
C   READ(5,*) (P(J),J=1,NI)
WRITE(1,*)'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
WRITE(1,*)'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
WRITE(1,*)'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
WRITE(1,*)'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
WRITE(1,*)'OBJECTIVE FUNCTION:'
WRITE(1,*)'    F(a,b)=(PI(10tL(x)+((10tL(x))**2+
* L(x)(1134a**2b**3+756a**3b**2))/ab13.5'
WRITE(1,*)'SIZE CONSTRAINED:'
WRITE(1,*)'          0.005 < a < 0.4'
WRITE(1,*)'          0.002 < b < 0.4'
WRITE(1,*)'ENTER STARTING POINTS a AND b : '
WRITE(1,*)REAL(P(1)),REAL(P(2))
C   WRITE(*,*)'ENTER CONVERGENCE TOLERANCE (FTOL): '
C   READ(5,*)FTOL
FTOL=1E-3
C   WRITE(*,*)'ENTER EQUALITY TOLERANCE (EQTOL): '
C   READ(5,*)EQTOL
EQTOL=1E-3
C   WRITE(*,*)'ENTER AX: '
C   READ(5,*)AXO
AXO=0.0002
C   WRITE(*,*)'ENTER XX: '
C   READ(5,*)XXO
XXO=0.0003
WRITE(1,*)'AX: ',REAL(AXO),' XX: ',REAL(XXO)
WRITE(*,*)'***** PLEASE WAIT *****'

RPHMUL=1.25
RPGMUL=0.1
IP=1
ZX=ZX*10D-7
1  NCT=0
   CLV=ZY
   CSA=ZX

CALL CQUMDF(P,FRETMI,TMI,XTT,ITER,FTOL,IP,EQUACON,UINEQCON,FMIN,
*      EQTOL,CLV,CSA)

IF(TMI(1).EQ.0.0D0) THEN
C   WRITE(*,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
C   WRITE(1,*)'***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
   GO TO 101
END IF
C   IF(ABS(FMIN).LT.298.538D0) GO TO 201

C   WRITE(*,*)' RPGMUL=',REAL(RPGMUL),' F=',REAL(ABS(FMIN))
C   WRITE(1,*)' RPGMUL=',REAL(RPGMUL),' F=',REAL(ABS(FMIN))
C   GO TO 101

201 DE=(FRETMI*CSA)/(2*PI*TMI(1)*TMI(2))
   NT=((FRETMI)/(2*PI*TMI(1)))*0.97
C   WRITE(*,*)' RPGMUL:',REAL(ABS(RPGMUL))
   WRITE(*,*)' TOLERANCE (FTOL): ',REAL(FTOL)
C   WRITE(*,*)' INEQUALITY CON : ',REAL(UINEQCON(1)),REAL(UINEQCON(2))
C   WRITE(*,*)' INEQUALITY CON : ',REAL(UINEQCON(3)),REAL(UINEQCON(4))
   WRITE(*,*)' MINIMUM LENGTH : ',REAL(FRETMI),' m'
   WRITE(*,*)' NUMBER OF TURN : ',REAL(NT),' TURN'
   WRITE(*,*)' a : ',REAL(TMI(1)),' m'
   WRITE(*,*)' b : ',REAL(DE),' m'

```

```

WRITE(*,*) 'c : ', REAL(TMI(2)) , 'm'
WRITE(*,*) 'NO.OF ITERATIONS : ', ITER
WRITE(*,*) 'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS : ', NCT
WRITE(*,*) '***** '
WRITE(1,*) '***** '
WRITE(1,*) 'RPGMUL:', REAL(ABS(RPGMUL))
WRITE(1,*) 'TOLERANCE (FTOL):', REAL(FTOL)
C   WRITE(1,*) 'INEQUALITY CON : ', REAL(UINEQCON(1)), REAL(UINEQCON(2))
C   WRITE(1,*) 'INEQUALITY CON : ', REAL(UINEQCON(3)), REAL(UINEQCON(4))
WRITE(1,*) 'MINIMUM LENGHT : ', REAL(FRETMI), 'm'
WRITE(1,*) 'NUMBER OF TURN : ', (NT), 'TURN'
WRITE(1,*) 'a : ', REAL(TMI(1)) , 'm'
WRITE(1,*) 'b : ', REAL(DE) , 'm'
WRITE(1,*) 'c : ', REAL(TMI(2)) , 'm'
WRITE(1,*) 'NO.OF ITERATIONS : ', ITER
WRITE(1,*) 'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS : ', NCT

```

```

101 IF(RPGMUL.LE.0.9) THEN
      RPGMUL=RPGMUL+0.0125
      RPHMUL=RPHMUL+0.02
      GO TO 1
ENDIF

```

```

STOP
END

```

```

C=====
C   SUBROUTINE CQUMDF(P, FRETMI, TMI, XTT, ITER, FTOL, IP, SETEQUA, SETINEQ,
C   *             FMIN, EQTOL, CLV, CSA)
C=====

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)
INTEGER NI, N, NP, ITER, ITERM, NT
PARAMETER(NP=10, PI=3.141592654D0)
PARAMETER(NMAX=20, ITMAX=200, EPS=1.D-10)
PARAMETER(TOL=1.D-04)
PARAMETER(ZEPS=1.D-10)
PARAMETER(GOLD=1.618034D0, GLIMIT=100.D0, TINY=1.D-20)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG, ZY, ZX
COMMON/DELTA/HF, HC
COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON
COMMON/RPMUL/RPHMUL, RPGMUL
DIMENSION P(NP), T(NMAX), TMI(NP), AT(NP), XT(NP), XTT(NP), EQUA(NP),
C   *       UINEQUA(NP), SETEQUA(NP), SETINEQ(NP), TO(NMAX)
C=====

```

```

N=NI
FRETMI=1.D14

```

```

DO 1 I=1, NH
      SETEQUA(I)=0.D0
1. CONTINUE

```

```

DO 2 J=1, NG
      SETINEQ(J)=0.D0
2. CONTINUE

```

```

DO 11 J=1, N
      AT(J)=P(J)
      TMI(J)=0.0D0
11 CONTINUE

```

```

DO 12 K=1, IP
DO 13 J=1, N
      T(J)=AT(J)*K
      XT(J)=T(J)
13 CONTINUE

```

```

13 CONTINUE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ T(J)=AT(J)*K หักตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ERO=-0.2D0

CALL FUNCFQU(T,FRF,CLV,CSA)
CALL FUNCGQU(T,FRG)

RPH=1.D0
RPG=ABS(FRF)/FRG

IF(RPG.LT.1) THEN
RPG=1.D0
ENDIF

CON=- (ERO/(RPG)**0.5)

CALL DELTAFT(T)

CALL CQUDFP(T,N,FTOL,ITERM,DFRET,TO,TERM)

IF(TERM.EQ.1.0) THEN
WRITE(*,*)K,' *OVERFLOW ',DFRET
GO TO 12
ENDIF

FM=FUNF(T,CLV,CSA)

WRITE(*,*)REAL(FM)
WRITE(1,*)REAL(FM)

DO 100 L=1,NG
UINEQUA(L)=FUNG(T,L)
WRITE(*,*)' INEQUALITY:',UINEQUA(L)
WRITE(1,*)' INEQUALITY:',UINEQUA(L)
IF(UINEQUA(L).GT.0) THEN
WRITE(*,*)'***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***','G:',L
WRITE(1,*)'***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***','G:',L
GO TO 12
ENDIF

100 CONTINUE

DO 200 M=1,NH
EQUA(M)=FUNH(T,M)
WRITE(*,*)' EQUALITY:',EQUA(M)
WRITE(1,*)' EQUALITY:',EQUA(M)
IF(ABS(EQUA(M)).GT.EQTOL) THEN
WRITE(*,*)'***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***'
WRITE(1,*)'***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION***'
GO TO 12
ENDIF

200 CONTINUE

IF(FM.LT.FRETMI) THEN
FRETMI=FM
ITER=ITERM

DO 300 MNH=1,NH
SETEQUA(MNH)=EQUA(MNH)
300 CONTINUE

DO 400 MNG=1,NG
SETINEQ(MNG)=UINEQUA(MNG)
400 CONTINUE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น SETINEQ(MNG)=UINEQUA(MNG) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DO 15 J=1,N
  XTT(J)=XT(J)
  TMI(J)=T(J)
CONTINUE

FMIN=FUNF(T,CLV,CSA)

ENDIF

```

```

12 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C=====
SUBROUTINE DELTAFT(X)
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
REAL XTR(NMAX),FR
DIMENSION X(NMAX),XT(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG
COMMON/DELTA/HF,HC
C=====

```

```

ERR=0.0D0

DO 11 I=1,10
  DO 12 J=1,NI
    XI=0.5D0
    XT(J)=XI*0.1D0*I
    XTR(J)=REAL(XT(J))
12 CONTINUE

CALL FUNCTQU(XT,FX,FF,FH,FG)

FR=REAL(FX)

EA=ABS(FX)-ABS(FR)

IF(ABS(EA).GE.ERR) THEN
  ERR=ABS(EA)
ENDIF

```

```

11 CONTINUE

ED=ERR/ABS(FX)
HF=ED**0.5
HC=ED**0.333333D0

RETURN
END

```

```

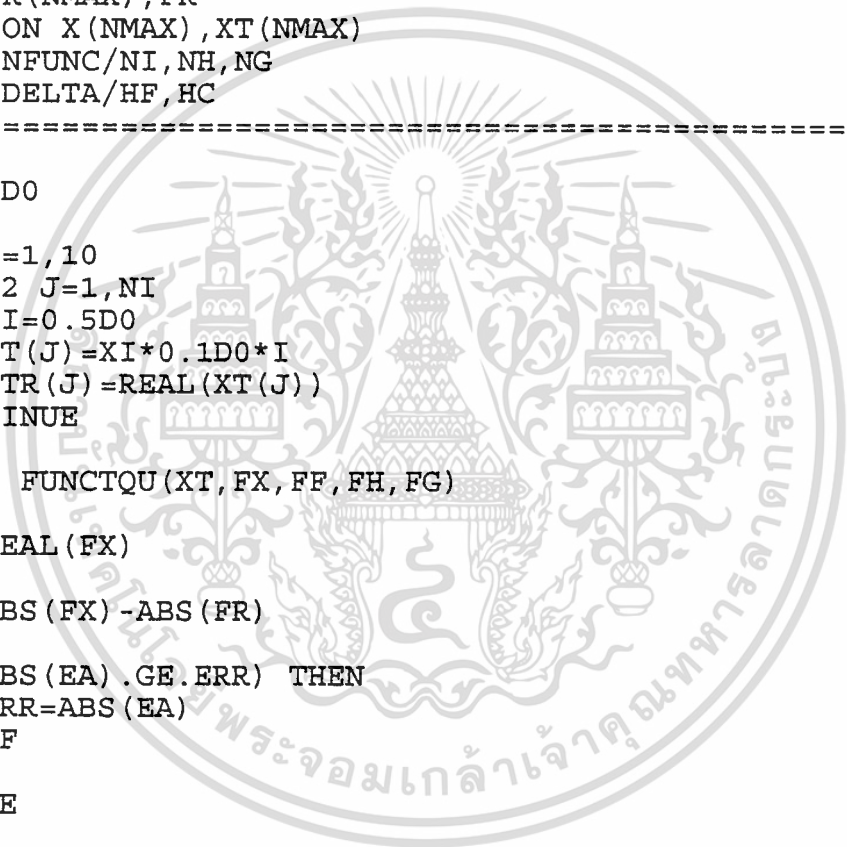
C=====
SUBROUTINE FUNCTQU(X,F,FF,FH,FG)
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG,ZY,ZX
COMMON/RPEX/RPH,RPG,ERO,CON
C=====

```

```

F=0.0D0
FF=0.0D0

```



```
FG=0.D0
FH=0.D0
CLV=ZY
CSA=ZX
```

```
CALL FUNCFQU(X, FF, CLV, CSA)
```

```
IF(NG.EQ.0) GO TO 1
```

```
CALL FUNCGQU(X, FG)
```

```
1 IF(NH.EQ.0) GO TO 2
```

```
CALL FUNCHQU(X, FH)
```

```
2 F=FF+RPG*FG+RPH*FH
```

```
RETURN
END
```

```
=====
SUBROUTINE FUNCFQU(X, FF, CLV, CSA)
```

```
=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX)
```

```
=====
FF=FUNF(X, CLV, CSA)
```

```
RETURN
END
```

```
=====
SUBROUTINE FUNCHQU(X, FH)
```

```
=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG
```

```
=====
FH=0.0
DO 11 K=1, NH
    FUH=FUNH(X, K)
    FH=FH+FUH**2
```

```
11 CONTINUE
```

```
RETURN
END
```

```
=====
SUBROUTINE FUNCGQU(X, FG)
```

```
=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H, O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
DIMENSION X(NMAX)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG
COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON
```

```
=====
FG=0.0
DO 11 J=1, NG
    GJ=FUNG(X, J)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ไม่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำออกให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF (GJ.EQ.0) THEN
    FUG=0.0
    GO TO 100
ENDIF
IF (GJ.LE.ERO) THEN
    FUG=-1/GJ
ELSE
    FGJ=GJ/ERO
    FUG=(-1/ERO)*(FGJ**2-3*FGJ+3)
ENDIF
IF (FUG.GT.1.E06) THEN
    FUG=1.E04
ENDIF
IF (FUG.LE.-1.E06) THEN
    FUG=-1.E04
ENDIF
100    FG=FG+FUG
11    CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

C=====
SUBROUTINE GRADFT (X, DF)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
DIMENSION X (NMAX), DF (NMAX)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG
COMMON/DELTA/HF, HC

```

```

C=====
DO 11 J=1, NI
    XT=X (J)
    X (J) =XT+HC
    CALL FUNCTQU (X, FXP, FXPF, FXPH, FXPG)
    X (J) =XT-HC
    CALL FUNCTQU (X, FXM, FXMF, FXMH, FXMG)
    DF (J) = (FXP-FXM) / (2*HC)
    X (J) =XT
11 CONTINUE
RETURN
END

```

```

C=====
SUBROUTINE CQUDFP (P, N, FTOL, ITER, FP, PO, TERM)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NMAX=20, ITMAX=200, EPS=1.D-10)
DIMENSION P (N), HESSIN (NMAX, NMAX), XI (NMAX), G (NMAX), DG (NMAX), HDG (NMA
*X), PO (NMAX)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG
COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON
COMMON/RPMUL/RPHMUL, RPGMUL
COMMON/NCOUNT/NCT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NCT=0

CALL FUNCTQU(P, FP, FPF, FPH, FPG)

CALL GRADFT(P, G)

DO 12 I=1, N

DO 11 J=1, N

HESSIN(I, J) = 0. D0

11 CONTINUE

HESSIN(I, I) = 1. D0

XI(I) = -G(I)

12 CONTINUE

ITER=0

DO 24 ITER=1, ITMAX

ERO = - (CON * RPG ** 0.5)

DO 25 I=1, N

PO(I) = P(I)

25 CONTINUE

CALL LINMIN(P, XI, N, FRET, TERM)

IF (TERM.EQ.1.0) RETURN

DO 13 I=1, N

DG(I) = G(I)

13 CONTINUE

IF (2. D0 * ABS (FRET - FP) . LE. FTOL * (ABS (FRET) + ABS (FP) + EPS)) THEN

RETURN

ENDIF

FP = FRET

CALL FUNCTQU(P, FRET, FRET F, FRET H, FRET G)

CALL GRADFT(P, G)

DO 14 I=1, N

DG(I) = G(I) - DG(I)

IF (DG(I) .EQ. 0. D0) RETURN

14 CONTINUE

DO 16 I=1, N

HDG(I) = 0. D0

DO 15 J=1, N

HDG(I) = HDG(I) + HESSIN(I, J) * DG(J)

CONTINUE

15

16 CONTINUE

FAC = 0. D0

FAE = 0. D0

DO 17 I=1, N

FAC = FAC + DG(I) * XI(I)

FAE = FAE + DG(I) * HDG(I)

17 CONTINUE

FAC = 1. D0 / FAC

FAD = 1. D0 / FAE

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้อ่านมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DO 18 I=1,N
  DG(I)=FAC*XI(I)-FAD*HDG(I)
18 CONTINUE

DO 21 I=1,N
  DO 19 J=1,N
    HESSIN(I,J)=HESSIN(I,J)+FAC*XI(I)*XI(J)
    * -FAD*HDG(I)*HDG(J)+FAE*DG(I)*DG(J)
C     WRITE(1,*)'H1:',HESSIN(I,J)
19 CONTINUE
21 CONTINUE

DO 23 I=1,N
  XI(I)=0.D0
  DO 22 J=1,N
    XI(I)=XI(I)-HESSIN(I,J)*G(J)
22 CONTINUE
23 CONTINUE

RPH=RPH*RPHMUL
RPG=RPG*RPGMUL

24 CONTINUE
C PAUSE 'too many iterations in DFPMIN'
RETURN
END
C=====
SUBROUTINE LINMIN(P,XI,N,FRET,TERM)
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20,TOL=1.D-4)
EXTERNAL F1DIM,DF1DIM
DIMENSION P(N),XI(N)
COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
COMMON AXO,XXO
C=====

NCOM=N

DO 11 J=1,N
  PCOM(J)=P(J)
  XICOM(J)=XI(J)
11 CONTINUE

AX=AXO
XX=XXO

CALL MNBRAK(AX,XX,BX,FA,FX,FB,F1DIM,TERM)

IF(TERM.EQ.1.0) RETURN

FRET=DBRENT(AX,XX,BX,F1DIM,DF1DIM,TOL,XMIN)

DO 12 J=1,N
  XI(J)=XMIN*XI(J)
  P(J)=P(J)+XI(J)
12 CONTINUE

RETURN
END
C=====
FUNCTION F1DIM(X)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามสืบ ผลิต ให้นำไปใช้ต่อโดยไม่ขออนุญาต และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUNCTION F1DIM(X)

```

=====
C-----
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=20)
      COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
      DIMENSION XT(NMAX)
C-----

      DO 11 J=1,NCOM
          XT(J)=PCOM(J)+X*XICOM(J)
11     CONTINUE

      CALL FUNCTQU(XT,F1DIM,F1DIMF,F1DIMH,F1DIMG)

      RETURN
      END

C-----
      FUNCTION DF1DIM(X)
C-----
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=20)
      COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
      DIMENSION XT(NMAX),DF(NMAX)
C-----

      DO 11 J=1,NCOM
          XT(J)=PCOM(J)+X*XICOM(J)
11     CONTINUE

      CALL GRADEF(XT,DF)

      DF1DIM=0.D0

      DO 12 J=1,NCOM
          DF1DIM=DF1DIM+DF(J)*XICOM(J)
12     CONTINUE

      RETURN
      END

C-----
      SUBROUTINE MNBRK(AX,BX,CX,FA,FB,FC,FUNC,TERM)
C-----
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (GOLD=1.618034D0, GLIMIT=100.D0, TINY=1.D-20)
C-----

      FA=FUNC(AX)
      FB=FUNC(BX)
      IF (FB.GT.FA) THEN
          DUM=AX
          AX=BX
          BX=DUM
          DUM=FB
          FB=FA
          FA=DUM
      ENDIF
      CX=BX+GOLD*(BX-AX)
      FC=FUNC(CX)
1     IF (ABS(FB).GT.1.0E30) THEN
          TERM=1.0
      RETURN
      ENDIF

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 1 ไม่ว่ากรณีใดก็ตามหากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
IF (ABS (AX) .GT. 1.0E30) THEN
```

```
  TERM=1.0
```

```
  RETURN
```

```
ENDIF
```

```
IF (FB .GE. FC) THEN
```

```
  R=(BX-AX) * (FB-FC)
```

```
  Q=(BX-CX) * (FB-FA)
```

```
  U=BX- ((BX-CX) * Q- (BX-AX) * R) / (2.0 * SIGN (MAX (ABS (Q-R) , TINY) , Q-R))
```

```
  ULIM=BX+GLIMIT * (CX-BX)
```

```
  IF ((BX-U) * (U-CX) .GT. 0) THEN
```

```
    FU=FUNC (U)
```

```
    IF (FU .LT. FC) THEN
```

```
      AX=BX
```

```
      FA=FB
```

```
      BX=U
```

```
      FB=FU
```

```
      GO TO 1
```

```
    ELSE IF (FU .GT. FB) THEN
```

```
      CX=U
```

```
      FC=FU
```

```
      GO TO 1
```

```
    ENDIF
```

```
    U=CX+GOLD * (CX-BX)
```

```
    FU=FUNC (U)
```

```
  ELSE IF ((CX-U) * (U-ULIM) .GT. 0) THEN
```

```
    FU=FUNC (U)
```

```
    IF (FU .LT. FC) THEN
```

```
      BX=CX
```

```
      CX=U
```

```
      U=CX+GOLD * (CX-BX)
```

```
      FB=FC
```

```
      FC=FU
```

```
      FU=FUNC (U)
```

```
    ENDIF
```

```
  ELSE IF ((U-ULIM) * (ULIM-CX) .GE. 0) THEN
```

```
    U=ULIM
```

```
    FU=FUNC (U)
```

```
  ELSE
```

```
    U=CX+GOLD * (CX-BX)
```

```
    FU=FUNC (U)
```

```
  ENDIF
```

```
  AX=BX
```

```
  BX=CX
```

```
  CX=U
```

```
  FA=FB
```

```
  FB=FC
```

```
  FC=FU
```

```
  GO TO 1
```

```
ENDIF
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
=====
FUNCTION DBRENT (AX, BX, CX, F, DF, TOL, XMIN)
```

```
=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
```

```
PARAMETER (ITMAX=200, ZEPS=1.D-10)
```

```
LOGICAL OK1, OK2
```

```
=====
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น  เมื่ออนุญาตเห็นาขอสงวนลิขสิทธิ์
```

```
ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
```

```
V=BX
```

```

W=V
X=V
E=0.D0
FX=F(X)
FV=FX
FW=FX
DX=DF(X)
DV=DX
DW=DX
DO 11 ITER=1, ITMAX
  XM=0.5D0*(A+B)
  TOL1=TOL*ABS(X)+ZEPS
  TOL2=2.*TOL1
  IF(ABS(X-XM).LE.(TOL2-0.5D0*(B-A))) GOTO 3
  IF(ABS(E).GT.TOL1) THEN
    D1=2.D0*(B-A)
    D2=D1
    IF(DW.NE.DX) D1=(W-X)*DX/(DX-DW)
    IF(DV.NE.DX) D2=(V-X)*DX/(DX-DV)
    U1=X+D1
    U2=X+D2
    OK1=((A-U1)*(U1-B).GT.0).AND.(DX*D1.LE.0)
    OK2=((A-U2)*(U2-B).GT.0).AND.(DX*D2.LE.0)
    OLDE=E
    E=D
    IF(.NOT.(OK1.OR.OK2)) THEN
      GO TO 1
    ELSE IF (OK1.AND.OK2) THEN
      IF(ABS(D1).LT.ABS(D2)) THEN
        D=D1
      ELSE
        D=D2
      ENDIF
    ELSE IF (OK1) THEN
      D=D1
    ELSE
      D=D2
    ENDIF
    IF(ABS(D).GT.ABS(0.5D0*OLDE)) GO TO 1
    U=X+D
    IF(U-A.LT.TOL2 .OR. B-U.LT.TOL2) D=SIGN(TOL1, XM-X)
    GOTO 2
  ENDIF
1 IF(DX.GE.0) THEN
  E=A-X
ELSE
  E=B-X
ENDIF
D=0.5D0*E
2 IF(ABS(D).GE.TOL1) THEN
  U=X+D
  FU=F(U)
ELSE
  U=X+SIGN(TOL1, D)
  FU=F(U)
  IF(FU.GT.FX) GO TO 3
ENDIF
DU=DF(U)
IF(FU.LE.FX) THEN
  IF(U.GE.X) THEN
    A=X
  ELSE
    B=X
  ENDIF

```

```

V=W
FV=FW
DV=DW
W=X
FW=FX
DW=DX
X=U
FX=FU
DX=DU
ELSE
  IF (U.LT.X) THEN
    A=U
  ELSE
    B=U
  ENDIF
  IF (FU.LE.FW .OR. W.EQ.X) THEN
    V=W
    FV=FW
    DV=DW
    W=U
    FW=FU
    DW=DU
  ELSE IF (FU.LE.FV .OR. V.EQ.X .OR. V.EQ.W) THEN
    V=U
    FV=FU
    DV=DU
  ENDIF
ENDIF
11 CONTINUE
   PAUSE 'DBRENT exceeded maximum iterations.'
3   XMIN=X
   DBRENT=FX
   RETURN
   END

```

```

C=====
C   FUNCTION FUNF (X, CLV, CSA)
C=====
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C   PARAMETER (NMAX=20)
C   PARAMETER (PI=3.141592654D0)
C   DIMENSION X (NMAX)
C   COMMON/NCOUNT/NCT
C=====

```

```

NCT=NCT+1
AB=0D0
AC=0D0
AD=0D0
AF=0D0
AB=CLV* ((1134*(X(1)**2)*(X(2)**3)) + (756*(X(1)**3)*(X(2)**2)))
AC=(10*(CLV**2)*(CSA**2))
AC=(AC+AB)
AD=SQRT(AC)
AF=(10*CLV*CSA)+AD
FUNF=(PI*AF)/(31.5*0.97*X(1)*X(2))
RETURN
END

```

```

C=====
C   FUNCTION FUNH (X, K)
C=====
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C   PARAMETER (NMAX=20, PI=3.141592654D0)

```

DIMENSION X(NMAX)

C=====

GO TO(1,2,3,4,5,6,7)K

```

1  FUNH=X(1)
   RETURN
2  FUNH=0
   RETURN
3  FUNH=0
   RETURN
4  FUNH=0
   RETURN
5  FUNH=0
   RETURN
6  FUNH=0
   RETURN
7  FUNH=0
   RETURN
   END
    
```

C=====

FUNCTION FUNG(X,J)

C=====

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
PARAMETER(PI=3.141592654D0)
DIMENSION X(NMAX)
    
```

C=====

GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8)J

```

1  FUNG= -(X(1)/0.005) + 1.0
   RETURN
2  FUNG= (X(1)/3) - 1.0
   RETURN
3  FUNG= -(X(2)/0.002) + 1.0
   RETURN
4  FUNG= (X(2)/3) - 1.0
   RETURN
5  FUNG= 0
   RETURN
6  FUNG= 0
   RETURN
7  FUNG= 0
   RETURN
8  FUNG= 0
   END
    
```

C=====

แสดงโปรแกรมหาค่าความยาวลวดที่น้อยที่สุดและขนาดรูปร่างของขดลวดโซลินอยด์
(**Minimum Length and Size of Solenoid Inductor**)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
C=====
PROGRAM AJ2
```

```
C 17 JANUARY 1995
```

```
C THIS IS A PROGRAM FOR DESING OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR
C BY MIDDENDORF FORMULA.
```

```
C PROGRAM USING NUMERICAL OPTIMIZATION TECHNIQUES TO SOLVE
C CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES(first-order methods).
C USING SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES[SUMT] WITH
C AN EXTENDED INTERIOR PENALTY FUNCTION METHOD(THE QUADRATIC EXTENDED
C PENALTY FUNCTION.
```

```
C FOR UNCONSTRAINED FUNCTION USING VARIABLE METRIC METHODS(BROYDEN-
C FLETCHER-GOLDFARB-SHANNO) WITH PARABOLIC INTERPOLATION (BRENT'S
C METHOD) IN ONE-DIMENSION.
```

```
C USING FINITE DIFFERENCE METHOD TO CALCULATE THE DERIVATIVE OF THE
C OBJECTIVE FUNCTION.
```

```
C OPERATING FILES:
```

```
C SVANQUAT.FOR : MAIN PROGRAM
```

```
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```
INTEGER NI,NP,NH,NG,ITER,NT
```

```
PARAMETER(NP=10,PI=3.14159265D0)
```

```
DIMENSION P(NP),TMI(NP),XTT(NP),EQUACON(NP),UINEQCON(NP)
```

```
COMMON/NFUNC/NI,NH,NG,ZY,ZX
```

```
COMMON/DELTA/HF,HC
```

```
COMMON/RPMUL/RPHMUL,RPGMUL
```

```
COMMON/NCOUNT/NCT
```

```
COMMON AXO,XXO
C=====
```

```
OPEN(1,FILE='AJ2-1.DAT')
```

```
NI=2
```

```
NH=0
```

```
NG=4
```

```
P(1)=0.05D0
```

```
P(2)=0.05D0
```

```
WRITE(*,*)'*****'
```

```
WRITE(*,*)'* THIS IS PROGRAM FOR DESING *'
```

```
WRITE(*,*)'* OF AN AIR-CORED SOLENOID INDUCTOR *'
```

```
WRITE(*,*)'* WITH MIDDENDORF FORMULA 2 VARIABLES *'
```

```
WRITE(*,*)'*****'
```

```
WRITE(*,*)'***** START PROGRAME *****'
```

```
WRITE(*,*)'
```

```
WRITE(*,*)'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
```

```
WRITE(*,*)'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
```

```
WRITE(*,*)'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
```

```
WRITE(*,*)'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
```

```
WRITE(*,*)'*****'
```

```
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER THE LENGTH (CLEN):'
```

```
READ(5,*)ZY
```

```
WRITE(*,*)'PLEASE ! ENTER CROSS-SECTION AREA OF THE WIRE (CSA):'
```

```
READ(5,*)ZX
```

```
WRITE(1,*)'LENGTH(m) AND CROSS-SECTION AREA OF THE WIRE(mm)'
```

```
WRITE(1,*)'CLEEN: ',REAL(ZY),', CSA: ',REAL(ZX)
```

```
WRITE(*,*)'
```

```
WRITE(*,*)'OBJECTIVE FUNCTION:'
```

```
WRITE(*,*)' F(a,c)=(31.5(a**2)(CLEN/2PIa)**2)/
```

```
(9(CLEN*CSA/2ac)+6a+10c)'
```

```
WRITE(*,*)'SIZE CONSTRAINED: การศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
```

```
WRITE(*,*)' 0.005 < a < 0.4'
```

```
WRITE(*,*)' และอีกทั้งห้ามมิให้ 0.002 < c < 0.4' ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
```

```
WRITE(*,*)'*****'
```

```

C      WRITE(*,*) 'ENTER STARTING POINTS a AND c : '
C      READ(5,*) (P(J),J=1,NI)
WRITE(1,*) 'CONSTRAINED FUNCTIONS OF 2 VARIABLES.'
WRITE(1,*) 'SEQUENTIAL UNCONSTRAINED MINIMIZATION TECHNIQUES.'
WRITE(1,*) 'QUADRATIC EXTENDED PENALTY FUNCTION METHOD.'
WRITE(1,*) 'THE MAXIMUM INDUCTANCE VALUE OF MIDDENDORF FORMULA.'
WRITE(1,*) 'OBJECTIVE FUNCTION:'
WRITE(1,*) '      F(a,c)=(31.5(a**2)(CLEN/2PIa)**2)/
*                                     (9(CLEN*CSA/2PIac)+6a+10c)'
WRITE(1,*) 'SIZE CONSTRAINED:'
WRITE(1,*) '      0.005 < a < 0.4'
WRITE(1,*) '      0.002 < c < 0.4'
C      WRITE(1,*) 'ENTER STARTING POINTS a AND c : '
WRITE(1,*) REAL(P(1)), REAL(P(2))
C      WRITE(*,*) 'ENTER CONVERGENCE TOLERANCE (FTOL) : '
C      READ(5,*) FTOL
FTOL=1E-4
C      WRITE(*,*) 'ENTER EQUALITY TOLERANCE (EQTOL) : '
C      READ(5,*) EQTOL
EQTOL=1E-4
C      WRITE(*,*) 'ENTER AX : '
C      READ(5,*) AXO
AXO=0.00001
C      WRITE(*,*) 'ENTER XX : '
C      READ(5,*) XXO
XXO=0.00002
WRITE(1,*) 'AX: ', REAL(AXO), ' XX: ', REAL(XXO)
WRITE(*,*) '***** PLEASE WAIT *****'

RPHMUL=1.25
RPGMUL=0.1
IP=1
ZX=ZX*10D-7
1  NCT=0
CLEN=ZY
CSA=ZX

CALL CQUMDF(P, FRETMI, TMI, XTT, ITER, FTOL, IP, EQUACON, UINEQCON, FMIN,
*      EQTOL, CLEN, CSA)

IF(TMI(1).EQ.0.0D0) THEN
C      WRITE(*,*) '***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
C      WRITE(1,*) '***NO OPTIMAL POINT*** TRY AGAIN!'
GO TO 101
END IF
C      IF(ABS(FMIN).LT.298.538D0) GO TO 201

C      WRITE(*,*) 'RPGMUL=', REAL(RPGMUL), ' F=', REAL(ABS(FMIN))
C      WRITE(1,*) 'RPGMUL=', REAL(RPGMUL), ' F=', REAL(ABS(FMIN))
C      GO TO 101

201  NT=(CLEN/(2*PI*TMI(1)))*0.97
DE=CLEN*CSA*0.97/(2*PI*TMI(1)*TMI(2))
WRITE(*,*) 'RPGMUL:', REAL(ABS(RPGMUL))
WRITE(*,*) 'TOLERANCE (FTOL) : ', REAL(FTOL)
C      WRITE(*,*) 'INEQUALITY CON : ', REAL(UINEQCON(1)), REAL(UINEQCON(2))
C      WRITE(*,*) 'INEQUALITY CON : ', REAL(UINEQCON(3)), REAL(UINEQCON(4))
WRITE(*,*) 'MAXIMUM INDUCTANCE : ', REAL(ABS(FRETMI)), 'Microhenry'
WRITE(*,*) 'NUMBER OF TURN : ', (NT)
WRITE(*,*) 'a : ', REAL(TMI(1)), 'm'
WRITE(*,*) 'b : ', REAL(DE), 'm'
WRITE(*,*) 'c : ', REAL(TMI(2)), 'm'
WRITE(*,*) 'NO.OF ITERATIONS : ', ITER
WRITE(*,*) 'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS : ', NCT

```

```

WRITE(*,*) '*****'
WRITE(1,*) '*****'
WRITE(1,*) 'RPGMUL:', REAL (ABS (RPGMUL) )
WRITE(1,*) 'TOLERANCE (FTOL) :', REAL (FTOL)
C   WRITE(1,*) 'INEQUALITY CON :', REAL (UINEQCON(1) ), REAL (UINEQCON(2) )
C   WRITE(1,*) 'INEQUALITY CON :', REAL (UINEQCON(3) ), REAL (UINEQCON(4) )
WRITE(1,*) 'MAXIMUM INDUCTANCE : ', REAL (ABS (FRETMI) ), 'Microhenry'
WRITE(1,*) 'NUMBER OF TURN :', (NT)
WRITE(1,*) 'a : ', REAL (TMI (1) ) , 'm'
WRITE(1,*) 'b : ', REAL (DE) , 'm'
WRITE(1,*) 'c : ', REAL (TMI (2) ) , 'm'
WRITE(1,*) 'NO.OF ITERATIONS : ', ITER
WRITE(1,*) 'NO.OF FUNCTION EVALUATIONS : ', NCT

```

```

101 IF (RPGMUL.LE.0.9) THEN
      RPGMUL=RPGMUL+0.0125
      RPHMUL=RPHMUL+0.02
      GO TO 1
ENDIF

```

```

STOP
END

```

```

C=====
* SUBROUTINE CQUMDF (P, FRETMI, TMI, XTT, ITER, FTOL, IP, SETEQUA, SETINEQ,
  FMIN, EQTOL, CLEN, CSA)
C=====

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
INTEGER NI, N, NP, ITER, ITERM, NT
PARAMETER (NP=10, PI=3.141592654D0)
PARAMETER (NMAX=20, ITMAX=200, EPS=1.D-10)
PARAMETER (TOL=1.D-04)
PARAMETER (ZEPS=1.D-10)
PARAMETER (GOLD=1.618034D0, GLIMIT=100.D0, TINY=1.D-20)
COMMON/NFUNC/NI, NH, NG, ZY, ZX
COMMON/DELTA/HF, HC
COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON
COMMON/RPMUL/RPHMUL, RPGMUL
DIMENSION P (NP), T (NMAX), TMI (NP), AT (NP), XT (NP), XTT (NP), EQUA (NP),
* UINEQUA (NP), SETEQUA (NP), SETINEQ (NP), TO (NMAX)

```

```

C=====
N=NI
FRETMI=1.D14

```

```

DO 1 I=1, NH
  SETEQUA (I) =0.D0
1 CONTINUE

```

```

DO 2 J=1, NG
  SETINEQ (J) =0.D0
2 CONTINUE

```

```

DO 11 J=1, N
  AT (J) =P (J)
  TMI (J) =0.0D0
11 CONTINUE

```

```

DO 12 K=1, IP
  DO 13 J=1, N
    T (J) =AT (J) *K
    XT (J) =T (J)
13 CONTINUE

```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าคุณคือใคร กำลังมองหาสิ่งที่มีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ERO=-0.2D0

```
CALL FUNCFQU (T, FRF, CLEN, CSA)
CALL FUNCGQU (T, FRG)
```

```
RPH=1.DO
RPG=ABS (FRF) /FRG
```

```
IF (RPG.LT.1) THEN
  RPG=1.DO
ENDIF
```

```
CON=- (ERO/ (RPG) **0.5)
```

```
CALL DELTAFT (T)
```

```
CALL CQUDFP (T, N, FTOL, ITERM, DFRET, TO, TERM)
```

```
IF (TERM.EQ.1.0) THEN
  WRITE (*, *) K, ' *OVERFLOW ', DFRET
  GO TO 12
ENDIF
```

```
FM=FUNF (T, CLEN, CSA)
```

```
C WRITE (*, *) REAL (FM)
C WRITE (1, *) REAL (FM)
```

```
DO 100 L=1, NG
  UINEQUA (L) =FUNG (T, L)
  C WRITE (*, *) ' INEQUALITY: ', UINEQUA (L)
  C WRITE (1, *) ' INEQUALITY: ', UINEQUA (L)
  IF (UINEQUA (L) .GT.0) THEN
  C WRITE (*, *) ' ***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION*** ', 'G:', L
  C WRITE (1, *) ' ***INEQUALITY CONSTRAINT VIOLATION*** ', 'G:', L
    GO TO 12
  ENDIF
```

```
100 CONTINUE
```

```
DO 200 M=1, NH
  EQUA (M) =FUNH (T, M)
  C WRITE (*, *) ' EQUALITY: ', EQUA (M)
  C WRITE (1, *) ' EQUALITY: ', EQUA (M)
  IF (ABS (EQUA (M)) .GT.EQTOL) THEN
  C WRITE (*, *) ' ***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION*** '
  C WRITE (1, *) ' ***EQUALITY CONSTRAINT VIOLATION*** '
    GO TO 12
  ENDIF
```

```
200 CONTINUE
```

```
IF (FM.LT.FRETMI) THEN
  FRETMI=FM
  ITERM=ITERM
```

```
DO 300 MNH=1, NH
  SETEQUA (MNH) =EQUA (MNH)
300 CONTINUE
```

```
DO 400 MNG=1, NG
  SETINEQ (MNG) =UINEQUA (MNG)
400 CONTINUE
```

```
DO 15 J=1, N
  XTT (J) =XT (J)
  TMI (J) =T (J)
```

FMIN=FUNF (T , CLEN , CSA)

ENDIF

12 CONTINUE
RETURN
END

C=====

SUBROUTINE DELTAFT (X)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A - H , O - Z)
PARAMETER (NMAX = 20)
REAL XTR (NMAX) , FR
DIMENSION X (NMAX) , XT (NMAX)
COMMON / NFUNC / NI , NH , NG
COMMON / DELTA / HF , HC

C=====

ERR = 0.0D0

DO 11 I = 1 , 10
DO 12 J = 1 , NI
XI = 0.5D0
XT (J) = XI * 0.1D0 * I
XTR (J) = REAL (XT (J))

12, CONTINUE

CALL FUNCTQU (XT , FX , FF , FH , FG)

FR = REAL (FX)

EA = ABS (FX) - ABS (FR)

IF (ABS (EA) .GE. ERR) THEN
ERR = ABS (EA)

ENDIF

11 CONTINUE

ED = ERR / ABS (FX)

HF = ED ** 0.5

HC = ED ** 0.333333D0

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCTQU (X , F , FF , FH , FG)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A - H , O - Z)
PARAMETER (NMAX = 20)
DIMENSION X (NMAX)
COMMON / NFUNC / NI , NH , NG , ZY , ZX
COMMON / RPEX / RPH , RPG , ERO , CON

C=====

F = 0.0D0

FF = 0.0D0

FG = 0.0D0

FH = 0.0D0

CLEN = ZY

เอกสารนี้เป็นสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CSA=ZX

CALL FUNCFQU(X, FF, CLEN, CSA)

IF(NG.EQ.0) GO TO 1

CALL FUNCGQU(X, FG)

1 IF(NH.EQ.0) GO TO 2

CALL FUNCHQU(X, FH)

2 F=FF+RPG*FG+RPH*FH

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCFQU(X, FF, CLEN, CSA)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

PARAMETER(NMAX=20)

DIMENSION X(NMAX)

C=====

FF=FUNF(X, CLEN, CSA)

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCHQU(X, FH)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

PARAMETER(NMAX=20)

DIMENSION X(NMAX)

COMMON/NFUNC/NI, NH, NG

C=====

FH=0.0

DO 11 K=1, NH

FUH=FUNH(X, K)

FH=FH+FUH**2

11 CONTINUE

RETURN

END

C=====

SUBROUTINE FUNCGQU(X, FG)

C=====

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

PARAMETER(NMAX=20)

DIMENSION X(NMAX)

COMMON/NFUNC/NI, NH, NG

COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON

C=====

FG=0.0

DO 11 J=1, NG

GJ=FUNG(X, J)

IF(GJ.EQ.0) THEN

FUG=0.0

GO TO 100

```

ENDIF
IF (GJ .LE. ERO) THEN
    FUG=-1/GJ
ELSE
    FGJ=GJ/ERO
    FUG= (-1/ERO) * (FGJ**2-3*FGJ+3)
ENDIF
IF (FUG.GT.1.E06) THEN
    FUG=1.E04
ENDIF
IF (FUG.LE.-1.E06) THEN
    FUG=-1.E04
ENDIF
100    FG=FG+FUG
11    CONTINUE
RETURN
END

```

```

C=====
SUBROUTINE GRADFT (X, DF)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
DIMENSION X (NMAX) , DF (NMAX)
COMMON/NFUNC/NI , NH, NG
COMMON/DELTA/HF, HC

```

```

C=====
DO 11 J=1, NI
    XT=X (J)
    X (J) =XT+HC
    CALL FUNCTQU (X, FXP, FXPF, FXPH, FXPG)
    X (J) =XT-HC
    CALL FUNCTQU (X, FXM, FXMF, FXMH, FXMG)
    DF (J) = (FXP-FXM) / (2*HC)
    X (J) =XT

```

```

11    CONTINUE

RETURN
END

```

```

C=====
SUBROUTINE CQUDFP (P, N, FTOL, ITER, FP, PO, TERM)

```

```

C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20, ITMAX=200, EPS=1.D-10)
DIMENSION P (N) , HESSIN (NMAX, NMAX) , XI (NMAX) , G (NMAX) , DG (NMAX) , HDG (NMA
*X) , PO (NMAX)
COMMON/NFUNC/NI , NH, NG
COMMON/RPEX/RPH, RPG, ERO, CON
COMMON/RPMUL/RPHMUL, RPGMUL
COMMON/NCOUNT/NCT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ห้ามการใช้นวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไปจนกว่าจะให้ไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 NCT=0

CALL FUNCTQU(P, FP, FPF, FPH, FPG)

CALL GRADFT(P, G)

DO 12 I=1, N
DO 11 J=1, N
HESSIN(I, J) = 0. D0
CONTINUE
HESSIN(I, I) = 1. D0
XI(I) = -G(I)

11

12

ITER=0

DO 24 ITER=1, ITMAX

ERO = - (CON * RPG ** 0.5)

DO 25 I=1, N
PO(I) = P(I)
CONTINUE

25

CALL LINMIN(P, XI, N, FRET, TERM)

IF (TERM.EQ.1.0) RETURN

DO 13 I=1, N
DG(I) = G(I)
CONTINUE

13

IF (2. D0 * ABS (FRET - FP) . LE. FTOL * (ABS (FRET) + ABS (FP) + EPS)) THEN
RETURN
ENDIF

FP = FRET

CALL FUNCTQU(P, FRET, FRET F, FRETH, FRET G)

CALL GRADFT(P, G)

DO 14 I=1, N
DG(I) = G(I) - DG(I)
IF (DG(I) .EQ. 0. D0) RETURN
CONTINUE

14

DO 16 I=1, N
HDG(I) = 0. D0
DO 15 J=1, N
HDG(I) = HDG(I) + HESSIN(I, J) * DG(J)
CONTINUE

15

16

CONTINUE

FAC = 0. D0
FAE = 0. D0

DO 17 I=1, N
FAC = FAC + DG(I) * XI(I)
FAE = FAE + DG(I) * HDG(I)

17

CONTINUE

FAC = 1. D0 / FAC
FAD = 1. D0 / FAE

DO 18 I=1, N
DG(I) = FAC * XI(I) - FAD * HDG(I)

```

18      CONTINUE

      DO 21 I=1,N
        DO 19 J=1,N
          HESSIN(I,J)=HESSIN(I,J)+FAC*XI(I)*XI(J)
          *      -FAD*HDG(I)*HDG(J)+FAE*DG(I)*DG(J)
C          WRITE(1,*)'H1:',HESSIN(I,J)
19      CONTINUE
21      CONTINUE

      DO 23 I=1,N
        XI(I)=0.D0
        DO 22 J=1,N
          XI(I)=XI(I)-HESSIN(I,J)*G(J)
22      CONTINUE
23;     CONTINUE

      RPH=RPH*RPHMUL
      RPG=RPG*RPGMUL

```

```

24      CONTINUE
C      PAUSE 'too many iterations in DFPMIN'
      RETURN
      END

```

```

C=====
SUBROUTINE LINMIN(P,XI,N,FRET,TERM)
C=====

```

```

      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=20,TOL=1.D-4)
      EXTERNAL F1DIM,DF1DIM
      DIMENSION P(N),XI(N)
      COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
      COMMON AXO,XXO
C=====

```

```

      NCOM=N

      DO 11 J=1,N
        PCOM(J)=P(J)
        XICOM(J)=XI(J)
11      CONTINUE

      AX=AXO
      XX=XXO

      CALL MNBRAK(AX,XX,BX,FA,FX,FB,F1DIM,TERM)

      IF(TERM.EQ.1.0) RETURN

      FRET=DBRENT(AX,XX,BX,F1DIM,DF1DIM,TOL,XMIN)

      DO 12 J=1,N
        XI(J)=XMIN*XI(J)
        P(J)=P(J)+XI(J)
12      CONTINUE

      RETURN
      END

```

```

C=====
      FUNCTION F1DIM(X)
C=====
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=20)

```

```
COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
DIMENSION XT(NMAX)
```

C=====

```
DO 11 J=1,NCOM
  XT(J)=PCOM(J)+X*XICOM(J)
11 CONTINUE
```

```
CALL FUNCTQU(XT,F1DIM,F1DIMF,F1DIMH,F1DIMG)
```

```
RETURN
END
```

C=====

```
FUNCTION DF1DIM(X)
```

C=====

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (NMAX=20)
COMMON /F1COM/ NCOM,PCOM(NMAX),XICOM(NMAX)
DIMENSION XT(NMAX),DF(NMAX)
```

C=====

```
DO 11 J=1,NCOM
  XT(J)=PCOM(J)+X*XICOM(J)
11 CONTINUE
```

```
CALL GRADFT(XT,DF)
```

```
DF1DIM=0.DO
```

```
DO 12 J=1,NCOM
  DF1DIM=DF1DIM+DF(J)*XICOM(J)
12 CONTINUE
```

```
RETURN
END
```

C=====

```
SUBROUTINE MNBRAK(AX,BX,CX,FA,FB,FC,FUNC,TERM)
```

C=====

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER (GOLD=1.618034D0, GLIMIT=100.DO, TINY=1.D-20)
```

C=====

```
FA=FUNC(AX)
FB=FUNC(BX)
IF (FB.GT.FA) THEN
  DUM=AX
  AX=BX
  BX=DUM
  DUM=FB
  FB=FA
  FA=DUM
ENDIF
CX=BX+GOLD*(BX-AX)
FC=FUNC(CX)
```

```
1 IF (ABS(FB).GT.1.0E30) THEN
  TERM=1.0
  RETURN
ENDIF
```

```
IF (ABS(AX).GT.1.0E30) THEN
  TERM=1.0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่การถือลิขสิทธิ์ คัดลอกหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
RETURN
ENDIF
```

```
IF (FB.GE.FC) THEN
  R=(BX-AX) * (FB-FC)
  Q=(BX-CX) * (FB-FA)
  U=BX - ( (BX-CX) *Q - (BX-AX) *R) / (2.D0*SIGN (MAX (ABS (Q-R) , TINY) , Q-R) )
  ULIM=BX+GLIMIT* (CX-BX)
  IF ( (BX-U) * (U-CX) .GT.0) THEN
    FU=FUNC (U)
    IF (FU.LT.FC) THEN
      AX=BX
      FA=FB
      BX=U
      FB=FU
      GO TO 1
    ELSE IF (FU.GT.FB) THEN
      CX=U
      FC=FU
      GO TO 1
    ENDIF
    U=CX+GOLD* (CX-BX)
    FU=FUNC (U)
  ELSE IF ( (CX-U) * (U-ULIM) .GT.0) THEN
    FU=FUNC (U)
    IF (FU.LT.FC) THEN
      BX=CX
      CX=U
      U=CX+GOLD* (CX-BX)
      FB=FC
      FC=FU
      FU=FUNC (U)
    ENDIF
  ELSE IF ( (U-ULIM) * (ULIM-CX) .GE.0) THEN
    U=ULIM
    FU=FUNC (U)
  ELSE
    U=CX+GOLD* (CX-BX)
    FU=FUNC (U)
  ENDIF
  AX=BX
  BX=CX
  CX=U
  FA=FB
  FB=FC
  FC=FU
  GO TO 1
ENDIF
RETURN
END
```

```
C=====
FUNCTION DBRENT (AX, BX, CX, F, DF, TOL, XMIN)
```

```
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (ITMAX=200, ZEPS=1.D-10)
LOGICAL OK1, OK2
```

```
C=====
A=MIN (AX, CX)
B=MAX (AX, CX)
V=BX
W=V
X=V
E=0.D0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

FX=F(X)
FV=FX
FW=FX
DX=DF(X)
DV=DX
DW=DX
DO 11 ITER=1,ITMAX
  XM=0.5D0*(A+B)
  TOL1=TOL*ABS(X)+ZEPS
  TOL2=2.*TOL1
  IF(ABS(X-XM).LE.(TOL2-0.5D0*(B-A))) GOTO 3
  IF(ABS(E).GT.TOL1) THEN
    D1=2.D0*(B-A)
    D2=D1
    IF(DW.NE.DX) D1=(W-X)*DX/(DX-DW)
    IF(DV.NE.DX) D2=(V-X)*DX/(DX-DV)
    U1=X+D1
    U2=X+D2
    OK1=((A-U1)*(U1-B).GT.0).AND.(DX*D1.LE.0)
    OK2=((A-U2)*(U2-B).GT.0).AND.(DX*D2.LE.0)
    OLDE=E
    E=D
    IF(.NOT.(OK1.OR.OK2)) THEN
      GO TO 1
    ELSE IF (OK1.AND.OK2) THEN
      IF(ABS(D1).LT.ABS(D2)) THEN
        D=D1
      ELSE
        D=D2
      ENDIF
    ELSE IF (OK1) THEN
      D=D1
    ELSE
      D=D2
    ENDIF
    IF(ABS(D).GT.ABS(0.5D0*OLDE)) GO TO 1
    U=X+D
    IF(U-A.LT.TOL2-.OR. B-U.LT.TOL2) D=SIGN(TOL1,XM-X)
    GOTO 2
  ENDIF
1 IF(DX.GE.0) THEN
  E=A-X
ELSE
  E=B-X
ENDIF
D=0.5D0*E
2 IF(ABS(D).GE.TOL1) THEN
  U=X+D
  FU=F(U)
ELSE
  U=X+SIGN(TOL1,D)
  FU=F(U)
  IF(FU.GT.FX) GO TO 3
ENDIF
DU=DF(U)
IF(FU.LE.FX) THEN
  IF(U.GE.X) THEN
    A=X
  ELSE
    B=X
  ENDIF
  V=W
  FW=FU
  DV=DU

```

```
W=X
FW=FX
DW=DX
X=U
FX=FU
DX=DU
```

```
ELSE
```

```
IF(U.LT.X) THEN
```

```
A=U
```

```
ELSE
```

```
B=U
```

```
ENDIF
```

```
IF(FU.LE.FW .OR. W.EQ.X) THEN
```

```
V=W
```

```
FV=FW
```

```
DV=DW
```

```
W=U
```

```
FW=FU
```

```
DW=DU
```

```
ELSE IF(FU.LE.FV .OR. V.EQ.X .OR. V.EQ.W) THEN
```

```
V=U
```

```
FV=FU
```

```
DV=DU
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
11 CONTINUE
```

```
PAUSE 'DBRENT exceeded maximum iterations.'
```

```
3 XMIN=X
```

```
DBRENT=FX
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
=====
FUNCTION FUNF(X, CLEN, CSA)
=====
```

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```
PARAMETER(NMAX=20)
```

```
PARAMETER(PI=3.141592654D0)
```

```
DIMENSION X(NMAX)
```

```
COMMON/NCOUNT/NCT
=====
```

```
NCT=NCT+1
```

```
AB=0D0
```

```
AC=0D0
```

```
AB=(CLEN/(2*PI*X(1)))*0.97
```

```
AC=(CLEN*CSA*0.97)/(2*PI*X(1)*X(2))
```

```
FUNF=- (31.5*(X(1)**2)*(AB**2)/(9*AC+6*X(1)+10*X(2)))
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
=====
FUNCTION FUNH(X, K)
=====
```

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```
PARAMETER(NMAX=20, PI=3.141592654D0)
```

```
DIMENSION X(NMAX)
=====
```

```
GO TO (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) K
```

```
1 FUNH=X(1) ลีน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
```

```
RETURN
```

```
2 FUNH=0
```

```
RETURN
3 FUNH=0
RETURN
4 FUNH=0
RETURN
5 FUNH=0
RETURN
6 FUNH=0
RETURN
7 FUNH=0
RETURN
END
```

```
C=====
FUNCTION FUNG(X,J)
```

```
C=====
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
PARAMETER(NMAX=20)
PARAMETER(PI=3.141592654D0)
DIMENSION X(NMAX)
```

```
C=====
GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8)J
```

```
1 FUNG= -(X(1)/0.005) + 1.0
```

```
RETURN
```

```
2 FUNG= (X(1)/0.4) - 1.0
```

```
RETURN
```

```
3 FUNG= -(X(2)/0.002) + 1.0
```

```
RETURN
```

```
4 FUNG= (X(2)/0.4) - 1.0
```

```
RETURN
```

```
5 FUNG= 0
```

```
RETURN
```

```
6 FUNG= 0
```

```
RETURN
```

```
7 FUNG= 0
```

```
RETURN
```

```
8 FUNG= 0
```

```
END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย และ อ.วีระศักดิ์ วงศ์วิวัต เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา
รวมทั้งแนะนำโครงการและให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน ซึ่งทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไป
ด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ 3W ทุกคนที่ช่วยเหลือโครงการและรายงานฉบับนี้เป็นอย่างมาก
สุดท้ายนี้ผู้เรียบเรียงขอแสดงความปรารถนาดีให้กับบุคคลดังกล่าวข้างต้นมา ณ. ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Murgatroyd, P.N.; The books inductor: a study of optimum solenoid cross section. IEE Proc., Vol. 133, No. 5 September, 1986
- [2] Di Barba, P.; Savini, A.; Rudnicki, M.; On the Optimum Design of Air-Core Inductor of Rectangular Cross-section. COMPEL, Vol 11, No. 1, March, 1992.
- [3] Murray, W.; Numerical Method for Unconstrained Optimisation. Academic Press, London, 1972
- [4] Aora, J.S.; Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill, New York, 1989
- [5] Vanderplaats, G.N.; Numerical Optimisation Techniques for Engineering Design with Applications. McGraw-Hill, New York, 1984