

變 壓 器 計 算

蘇聯 恩·伊·布爾佳可夫著

劉 孝 叔譯

瀋陽變壓器製造廠設計科審校

蘇聯電機製造工業部教育司批准
作為電機工業技術學校教材

電 工 出 版 社

目 錄

原 序.....	3
第一章 變壓器基本尺寸的決定.....	5
1-1 計算的題目和種類.....	5
1-2 計算原理簡述.....	7
1-3 計算步驟及例題.....	13
1-4 特殊情形.....	19
1-5 近似解法.....	21
第二章 變壓器的鐵心.....	25
2-1 關於結構型式一般的考慮.....	25
2-2 鐵心柱分級的理論.....	26
2-3 扼鐵截面的形狀.....	32
2-4 計算鐵損與空載電流的實用方法.....	35
2-5 變壓器鐵心計算的例題.....	40
第三章 變壓器的線捲.....	45
3-1 線捲匝數的決定.....	45
3-2 線捲的分類.....	49
3-3 圓筒式線捲.....	52
3-4 分段式線捲.....	60
3-5 多層式線捲.....	65
3-6 連續式線捲.....	66
3-7 螺旋式線捲.....	71
3-8 餅式線捲.....	77
3-9 變換電壓的出頭.....	79
第四章 線捲的絕緣.....	83
4-1 一般的說明.....	83
4-2 在 50 赫芝時 線捲絕緣的 電氣強度.....	83
4-3 絕緣材料的電氣強度.....	89

4-4 衝擊作用	92
4-5 電容計算	104
第五章 線捲的計算	116
5-1 線捲內有功損耗的計算	116
5-2 漏抗電壓計算	119
5-3 線捲內附加損耗的計算	126
5-4 機械力的計算	134
5-5 單位熱負荷和溫度的計算	146
第六章 計算例題	169
6-1 緒言	169
6-2 100 仟伏安變壓器的計算	169
6-3 1800 仟伏安變壓器的計算	177
6-4 15000 仟伏安變壓器的計算	183
計算單	186
PT-1 100 仟伏安變壓器計算單	186
PT-2 100 仟伏安變壓器計算單	192
PT-3 100 仟伏安變壓器計算單	198
PT-4 1800 仟伏安變壓器計算單	204
PT-5 1800 仟伏安變壓器計算單	210
PT-6 15000 仟伏安變壓器計算單	216
附 錄	224
附錄 I σ_m —鐵窗的空間係數	224
附錄 II 理論計算表和曲線	225
附錄 III 近似算法	233
附錄 IV 鐵心柱最大截面計算	236
附錄 V 變壓器矽鋼片, 單位損耗及磁化容量	238
附錄 VI 線捲的導線	241
附錄 VII 絕緣材料	243
附錄 VIII 漏抗電壓	253
附錄 IX 線餅導線中的附加損耗	258
附錄 X 機械力	263
附錄 XI 熱的計算	269
附錄 XII 線捲接線圖與連接組	275

原 序

按照蘇聯國家標準 ГОСТ-401-41 電力變壓器的容量大體是由 5 到 31 500 千伏安。按照標準，在此範圍內，變壓器的額定容量共有 26 種。除此以外，標準中又規定了雙捲變壓器每種容量有 10—12 種不同的電壓組合及接線方式組合。按照標準三捲變壓器能有 4 種不同的線捲容量組合，2 種不同的短路電壓組合，以及能有若干不同線捲的分接因而對於三捲變壓器不同的規格就更多了。

對這些電力變壓器不同條件的概述，可使我們想到關於變壓器結構型式及技術數據的多樣性。

除電力變壓器以外，我們知道有很多特殊型式的變壓器，它們是用來供給不同的工業設備——電爐，水銀整流器等等。這些工業設備對於變壓器有很多特殊的要求，因此後者在技術性能上及結構條件上和計算上都與電力變壓器不同。

最後，還有儀用互感器類（電流互感器，電壓互感器）。由於儀用互感器所提出的要求，就迫使這些互感器的計算與電力變壓器有所不同。

本書分析了最普遍的圓形線圈三相三柱鐵心和單相雙柱鐵心式電力變壓器的計算問題。

許多蘇聯學者研究電力變壓器理論計算的方法已有了顯著的成就。應用這些蘇聯學者的著作，本書作者擴大了理論計算的範圍，把許多不同的理論計算方法彼此統一起來，並得到了新的解答，同時並提供了多種特殊型式變壓器理論計算的途徑。

在這些工作的基礎上，作者在第一章中敘述了決定變壓器基本尺寸的各種方法。首先簡單地敘述了計算的理論基礎，並舉出這些計算的數字例題，然後又敘述了決定變壓器基本尺寸的近似

及簡化的方法。

接着用兩章的篇幅引述了變壓器的基本部份：鐵心與線捲。這裏講的是關於鐵心結構的細節和關於線捲在鐵心上配置的方法。必須注意，鐵心結構的細節——是件很複雜的工作，但它有很多的可能性來找出滿足於已知條件的解答。最後這些已知條件的問題是在於當磁通密度不超過預定數值的範圍時，空載電流及損耗也不超過預定數值。滿足這些條件的鐵心的尺寸及形狀可能極不一致。因此當實際計算時，大約地找出鐵心的基本尺寸之後，不是轉到它的結構細節，而是轉到線捲的配置，也就是決定線捲結構型式（第三章）、線捲的絕緣（第四章）、線捲在變壓器鐵窗中的配置（第三章）。至於技術數據的詳細計算通常是照第五章所講的次序進行。第六章中是這些計算的例題。完全可以理解，不能即刻得到符合已知條件或標準的技術解答是很可能的。因此有時需要把線捲在鐵窗內配置幾次，修改導線截面和修改鐵心尺寸。因此鐵心的詳細計算是在線捲已經得到完全可用的結果後進行之。

書後列有某些參考數據以供計算之參考。

著者應向斯大林獎金獲得者，技術科學博士 T. H. 別托洛夫教授和莫斯科變壓器製造廠結構主任工程師，C. H. 拉比洛維契工程師在計算理論工作及實用計算個別問題中給予寶貴的指正表示謝意。此外，著者還要感謝 M. M. 拉易斯基工程師，因為他計算了理論計算表。

恩·伊·布爾佳可夫

第一章 變壓器基本尺寸的決定

1-1. 計算的題目和種類

計算電力變壓器應該先指定：

P ——變壓器容量，千伏安；

φ ——相數；

f ——週率，赫芝；

U_1 和 U_2 ——一次及二次電壓，伏；此外，還應指出線捲的接線圖；

u_k ——短路電壓，%；

P_{cm} ——空載損耗（主要是鐵損）；

P_k ——短路損耗（主要是線捲導線中的銅損）；

i_0 ——空載電流，%；

變壓器的冷却方法；

負荷的狀況；

試驗電壓。

同時要求線捲及油的溫度不超過標準所規定的數值。至於鐵心，線捲及其他零件採用何種結構型式可能性的問題由設計人自行決定，但仍應以已知生產能力的一定水平為根據。

因此計算問題的任務實際上可分為兩部份。問題的第一部份是求出規定的變壓器結構的主要幾何尺寸和主要電磁負載——電流密度及鐵心內磁通密度，因而再求出關鍵材料的重量。問題的第二部份是如何使線捲配置在已求得的鐵心上，而能滿足任務的所有要求及符合標準的其他條件。除此之外，還必須使線捲的繞製在製造上是最簡單的。另一方面，則可根據計算本身的目的而分成三種型式——理論計算，工廠計算及教學計算。

理論計算僅限於解決計算任務的第一部份，又稱為「變壓器幾何學」。解決這種問題通常要求一個多元函數的最小值，也就

是求出一個滿足上述條件的變壓器的最低價值。理論計算，顧名思義，首先是指與一般電機設計有關的理論電工學的補充材料。實際上理論計算很適宜解決一般性的技術經濟問題，如擬定新標準或估計以一種材料代替另一種材料的可能性時，要決定變壓器的鐵損和銅損的某種標準，或如以 50 赫芝的週率變為其他週率及其他類似的問題時，估計其優點和缺點。在工廠的實際理論計算中祇要求得某些一般的標準，根據這種標準可以估計出計算的所有變數。

工廠計算本身可分為新的系列的設計及根據現有的系列型式依照不同的新的電壓組合及接線圖或為了適合其他某種特殊要求而重作計算。這種重新計算按計算而言是一種普通的工作。要正確的解決這種重算問題，很好的熟悉任何工廠中的生產特點是一個決定性的條件。

在新的系列設計時關於《變壓器幾何學》的第一個問題是由比較很多變數的方法來解決，這些計算的變數是利用舊有系列計算的全部經驗定出來的。計算問題的第二部份只要得出大概的答數，目的是為了說明何種計算變數是在現有機床，夾具，壓模，繞線模，浸漆鍋，乾燥室等設備條件下最適合生產的要求。同時在解決第一個問題時還要注意，應使每個計算的變數都要滿足一條條件，即同一型式的鐵心裝配可以用於幾種電壓組合，或者另一方面，不同電壓同一容量者會提出不同鐵心尺寸的計算變數，在新的系列設計時就可利用原有系列的資料。分析這些原有資料可以知道，在系列的個別型式的工廠計算中早已有了或多或少為大家所公認的幾何尺寸的變動範圍，在這範圍內可以找出未知的解答，逐步的改變基本尺寸就可促使每個計算變數都能適合生產的和技術經濟的要求。線捲的最後詳細的配置只是在已經選定的變數或是近似等值的變數上施行，詳細的配置對估計這些被比較的變數上有了新的數據。

教學計算的基本目的在於學生能正確選擇變壓器各部份結構型式的主要技術要求的實地經驗，及掌握變壓器一切技術數據的

計算方法。

對於教學計算重要的不僅是變壓器尺寸的數學運算，而且要說明已經獲得的幾何形狀所經受的電磁、熱負荷及在已知的技術情況下所需製造條件間的相互關係。根據這些考慮，平常教學計算的第一個題目不採用理論的解答，而是採用各種半經驗公式，這些公式立即可求出變壓器的基本尺寸，這些尺寸很有可能滿足絕大多數的技術條件，這些半經驗公式是較許多已有的系列數據得出的，在這基礎上求出某些係數或比值。依據這些係數或比值就可簡化那些用來解決理論計算第一部份的理論公式。半經驗公式導出的計算方法，只能用在當初導出這些公式的各種型式的範圍內。

但是在採用這些半經驗公式或用任何簡化或近似方法求出變壓器鐵心的基本尺寸，決不能立刻找到一個完全滿足一切要求的線捲配置。線捲的配置多半要修改好幾次，甚至當滿足任務的全部要求和製造條件的計算變數尚未得到時，連鐵心的基本尺寸也要修改。這種計算的修改是工作中最困難的部份。事實上，這可以說是計算的第三部份，顯然，求出的所有主要參數或多或少地能滿足任務的要求，但它們都須要修改。我們很難說出一個一般的規則，如何才能找出一個容易引導到所要求解答的途徑上去的修改計算的捷徑。通常，如果所有的結果彼此間能足夠的適合，這樣求得的最後結果就可作為指導計算的例子。在本書著者所列舉討論的例子，可以作為修改計算時的指南。

因為變壓器幾何學對教學計算的意義較小，所以著者不得不把計算原理寫得簡略些。上述變壓器基本尺寸的近似求法，最後就可得出一系列的特性曲線，根據這些曲線就可立刻得到標準型式變壓器基本尺寸的近似值。

1-2. 計算原理簡述

變壓器的幾何形狀很簡單。因此，有關理論計算問題的著作特別多，也就是說理論計算有很多種方法。所有這些著作的主要

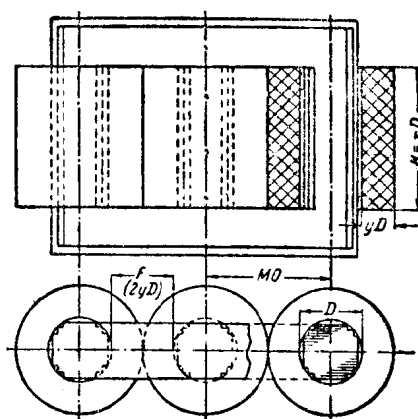
缺點是——缺少所需解答的數學分析，也就是說，究竟已知的解答是否是唯一的，或者可能還有另外的，或者還有別的類似的解法等問題都沒有解決。同時亦沒有指出各種解法之間有些什麼關係。

這些舊有的各自獨立的解法引起著者研究這種解法：一方面對於絕大多數的解法而言是有共同之處；但是另一方面，如有需要的話，又能創造新的解法。

這種計算原理可以簡單地敘述如下：

圓形線捲鐵心式變壓器的關鍵材料，銅與鐵的重量可以作為一個包含三個獨立的幾何尺寸的函數來選擇。

設 D 為鐵心柱的直徑， H ——其高度， F ——變壓器磁路的窗寬（以公分計）（圖 1-1）。假設我們已知兩個空間係數 σ_{cm} 及



σ_m 。鐵心截面的空間係數 σ_{cm} 表示鐵心有效截面和鐵心圓周所包圍面積之比。鐵窗的空間係數 σ_m 表示鐵窗中所有導線的截面和鐵窗總面積之比。

假定

$$\left. \begin{aligned} H &= xD, \\ F &= 2yD. \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

如果 φ ——為套有線捲的鐵心則線捲導線材料的重量等於

$$G_m = \varphi \pi \gamma_m \sigma_m x y (y + 1) D^3 \cdot 10^{-3} \text{ (公斤)}, \quad (1-2)$$

式中 γ_m ——比重（銅的比重 $\gamma_m = 8.9$ 公斤/立方公分，而鋁的比重 $\gamma_m = 2.7$ 公斤/立方公分）。直徑 D 是以公分計。在鐵軛有效截面等於鐵心柱有效截面的磁路所需矽鋼片的重量表於公式。

$$G_{cm} = \frac{\pi}{4} \gamma_{cm} \sigma_{cm} (hx + by + d) D^3 \cdot 10^{-3} \text{ (公斤)}. \quad (1-3)$$

式中 γ_{cm} ——變壓器矽鋼片的比重，等於7.55公斤/立方公寸，而係數 h, b, d 係決定於鐵心柱的數目（表 1-1），並且最後一係數 d 已考慮到磁路轉角地方矽鋼片的重量。

表 1-1

變壓器型式	τ 鐵心柱數	係 數 的 數 值		
		h	b	d
單 相	2	2	4	3, 6
三 相	3	3	8	5, 6

用 c_m 和 c_{cm} 表示 1 公斤成品關鍵材料的價值，則關鍵材料的總價 C 可用公式表示

$$C = (C_m \tau \pi \gamma_m \sigma_m x y (y + 1) + C_{cm} \frac{\pi}{4} \gamma_{cm} \sigma_{cm} (hx + by + d)) D^3 \cdot 10^{-3} \quad (1-4)$$

或簡寫為

$$C = \Phi(D, x, y). \quad (1-5)$$

價值 C ，作為一個包含三個變數 D, x, y 的函數，在 D, x, y ，有效數值的範圍內不可能有最小值，這很容易由 C 對每一個變數求微分來證明。此外，公式(1-4)有一個不重要的根，當 $D=0$ 時 $C=0$ ，即變壓器的尺寸等於零時，價值亦為零。因此，如果沒有其他限制，單靠公式(1-4)來確定最低價值的變壓器尺寸是不夠的。

這個結論的得來是因為我們沒有供給這些條件，即是這個估了某種空間 (D, x, y) 的變壓器應「具有」：容量 P ，銅損 P_m ，鐵損 P_{cm} ，電流密度 δ ，磁通密度 B ，漏抗電壓 U_p ，空載電流 I_0 ，線捲的單位熱負荷 q_m ，鐵心的單位熱負荷 q_{cm} 等等。

以上所列舉的技術參數可顯示出，在公式(1-5)中可以添加很多各種不同的關係。因此必須寫出很多方程式把變壓器的尺寸 D, x, y ，與某些技術參數聯繫起來。這些技術參數的值必須認為是

已知的，並作為幾何空間的〔物理限制〕，因此只有 D, x, y 是變數。

最簡單的辦法是從變壓器的容量公式來得出這些〔物理限制〕。

變壓器的容量公式為

$$P = 4.44 \varphi f Q I B n \cdot 10^{-11}, \quad (1-6)$$

式中 P ——容量，仟伏安；

f ——週率，赫芝；

φ ——套有線捲的鐵心柱數（見公式(1-2)及表1+1）；

Q ——鐵心柱的有效截面，平方公分；

I ——電流，安；

B ——磁通密度，高斯；

n ——匝數。

依靠下列簡單關係的幫助

$$I = \frac{1}{2n} xy \sigma_m \delta D^2 \cdot 10^2, \quad (1-7)$$

$$Q = 0.785 \sigma_{cm} D^2, \quad (1-8)$$

式中 δ ——電流密度安/平方公厘，而 σ_m 及 σ_{cm} ——鐵窗及鐵心截面的空間係數，公式(1-6)可化為

$$P = 2.22 \cdot 0.785 \varphi f \sigma_m \sigma_{cm} \delta B xy D^4 \cdot 10^{-9}. \quad (1-9)$$

如果我們將電流密度 δ 和磁通密度 B 作為已知數，則根據公式(1-9)變壓器容量就是三個變數 D, x, y 的函數。

如果現在來找公式(1-5)所規定價值 C 的最低值，即 C 與變數 D, x, y 的關係，但在計算變數 D, x, y 與(1-9)式本身的附加關係相關連，於是就容易得到最低價值的完全肯定的解答。但是這一方法並不是將容量 P 的公式(1-6)代入公式(1-5)作為〔物理限制〕時求最低價值的唯一方法。

在引入新的技術參數後，公式(1-9)還可變更幾次。如我們用 P_m 表示導線中銅損以瓦計及 P_{cm} 表示鐵損以瓦計則

$$P_m = \alpha_m \delta^2 G_m, \quad (1-10)$$

$$P_{cm} = \alpha_{cm} \beta^2 G_{cm}, \quad (1-11)$$

式中 G_M 及 G_{cm} ——導線的銅重量及鐵心的矽鋼片重量，公斤（見(1-2)及(1-3)）； δ ——電流密度，安/平方公厘，將 β 代替磁通密度 B ，其中

$$\beta = \frac{B}{10000},$$

最後 α_M 及 α_{cm} ——每1公斤的單位損耗，銅的導線在75°C時每1公斤銅導線的單位損耗等於

$$\alpha_M = \frac{\rho}{\gamma} [1 + \alpha(t-20)] \cdot 10^3 = \frac{0.0175}{8.9} (1 + 0.00395 \cdot 55) \cdot 10^3 \\ = 2.4 \text{ 瓦/公斤.}$$

矽鋼片中單位損耗 α_{cm} 可從表中查出，此表乃根據矽鋼片的試樣或已製成鐵心的試驗結果作成。

把公式(1-9)中的 δ 和 B 分別或同時用公式(1-10)及(1-11)中的 P_M 及 P_{cm} 來代替則可獲得4個公式，表明容量 P 和 δ 及 B (1-9)或 P_M 及 P_{cm} ，或 δ 及 P_{cm} ，或 P_M 及 B 的關係，即獲得4個不同的[物理限制]，因此最低價值 C 就有4個不同的解答，要看已知條件是 δ ， B ， P_M ， P_{cm} 4個參數中的那兩個技術參數而定。

和上述用公式(1-5)與公式(1-9)聯立起來求函數 C 的最低值一樣，在所有4種情況中，問題是在於決定 D ， x ， y 三個變數之值，因此在每一種情形下祇要在一切數學演變之後，得到三個包含 D ， x ， y 三個未知數的方程式，就可以認為解答已經求出來了。

由計算可知，這三個方程式中有一個是四種情形中公共的，而且僅僅在 x 與 y 之間產生關係。

$$x = \frac{y(4by + b + 3d)}{h(2y - 1)}. \quad (1-12)$$

如引入由下式所決定的參數 n

$$n = \frac{C_M \gamma_M \sigma_M}{C_{cm} \gamma_{cm} \sigma_{cm}}, \quad (1-13)$$

則當 δ 及 B 已知時，其餘兩個方程式為

$$4\varphi_m = \frac{3by + 3d - hx}{xy(y+1)}, \quad (1-14)$$

$$\varphi xy D^4 = \frac{11.5 P \cdot 10^2}{\sigma_m \sigma_{cm} \delta \beta} = Q_0 \quad (1-15)$$

或當已知損耗 P_m 及 P_{cm} 時

$$4\varphi_m = \frac{(hx + by + d)(3by + 3d - 2hx)}{xy(y+1)(2hx - by - d)}, \quad (1-16)$$

$$\sqrt{\frac{\varphi xy}{(y+1)(hx + by + d)}} D = \frac{14.7 P}{\sqrt{P_m P_{cm}}} \sqrt{\frac{\alpha_m \alpha_{cm}}{\sigma_m \sigma_{cm}}} = L_0, \quad (1-17)$$

第三種情形，當 δ 及 P_{cm} 為已知時，

$$4\varphi_m = \frac{2(hx + by + d)(3by + 3d - hx)}{xy(y+1)(2hx - by - d)}, \quad (1-18)$$

$$\frac{\varphi xy D^{3/2}}{\sqrt{hx + by + d}} = \frac{10^2}{3.11 \delta \sqrt{P_{cm}}} \frac{P}{\sigma_m \sqrt{\sigma_{cm}}} \sqrt{\frac{\alpha_{cm} \gamma_{cm}}{\sigma_m \sigma_{cm}}} = M_1. \quad (1-19)$$

最後，當 β 及 P_m 為已知時，

$$4\varphi_m = \frac{3by + 3d - 2hx}{2xy(y+1)}, \quad (1-20)$$

$$\sqrt{\frac{\varphi xy}{y+1}} D^{3/2} = \frac{10^2}{1.555 \beta \sqrt{P_m}} \frac{P}{\sigma_{cm} \sqrt{\sigma_m}} \sqrt{\frac{\alpha_m \gamma_m}{\sigma_m \sigma_{cm}}} = M_2. \quad (1-21)$$

在公式(1-15)，(1-17)與(1-19)，(1-21)中所有已知數都歸併在等式的右邊，這些等式藉 Q_0, L_0, M_1 及 M_2 表示。

更進一步的計算這四組方程式中的未知數就會引導到高次方程式，為了計算方便，將未知數作為參數 m 的函數[公式(1-13)]繪成曲線（見附錄Ⅱ第3頁）。

對這四種情形的分析，以下稱它們為絕對的最低值，常將 δ ， B ， P_m 及 P_{cm} 四個數中的二個做為已知數——其餘二個可從(1-10)與(1-11)中求出，但這4種解答應彼此獨立，而且算出的 D ， x ， y 亦各不相同。

例如，設 δ 及 B 為已知數。由(1-12)，(1-14)及(1-15)中解出函數最低值後，就可求出 D ， x 及 y 之值。因此從(1-2)中可知

導線的銅重 G_M 及從 (1-3) 可知矽鋼片重 G_{cm} ，於是由 (1-10) 及 (1-11) 可求出損耗 P_M 及 P_{cm} ，如果現在當已知損耗 P_M 和 P_{cm} 時用公式 (1-12) (1-16) 及 (1-17) 來求 D , x 與 y 之值，則求出 D , x 及 y 的新數值與剛才求出的 D , x , y 的值不同。同樣可知，所有四種情形都可得到不同的 D , x 和 y 的值，僅有一種獨立的情形，兩個絕對最低值可能重合。

在已知 δ 及 B 和已知 P_M 及 P_{cm} 時這重合的獲得，是當

$$m = 0.8124, x = 2.8803, y = 0.4302,$$

也就是適當的選擇公式 (1-15) 及 (1-17) 中常數 Q_0 和 L_0 的值。

在計算的課題中常要求變壓器能有已知的損耗 P_M 及 P_{cm} ，公式 (1-17) 說明，對於估計變壓器價值有實際意義的是 P_M 與 P_{cm} 的乘積，而不是 P_M 及 P_{cm} 二種損耗之和。因此如果要比較兩個計算，它們的效率及空間係數 σ_M 及 σ_{cm} 都相同，則損耗乘積較小的那個變壓器就要貴些。由公式 (1-17) 立刻可以估計出這變壓器是比另一變壓器要貴多少。

1-3. 計算步驟及例題

如上所述，變壓器鐵心的基本尺寸可以用理論計算或者用近似方法（見下文）來決定。理論計算的步驟對於上述的四種絕對最低值的情形是完全一樣的。因此，這裏講的是當已知 P_M 和 P_{cm} 的情形時，應用於絕對最低值的計算步驟，按公式 (1-13) 所規定的參數 m

$$m = \frac{C_M \gamma_M \sigma_M}{C_{cm} \gamma_{cm} \sigma_{cm}}.$$

1 公斤銅線與 1 公斤矽鋼片價值之比 $\frac{C_M}{C_{cm}}$ 是在 3 到 3.5 之間。

銅的比重是 $\gamma_M = 8.9$ 公斤/立方公寸，鋁的比重是 $\gamma_a = 2.7$ 公斤/立方公寸，矽鋼片的比重是 $\gamma_{cm} = 7.55$ 公斤/立方公寸。

鐵心截面的空間係數 σ_{cm} 常變化很少，從 0.73 到 0.79，在理論計算中常採用 0.75。

變壓器鐵窗的空間係數 σ_M 的變化與變壓器的容量，高壓線捲的電壓和線捲的結構型式有關。 σ_M 的近似值見附錄 I (第 1 頁)

知道 m 之後，則由附錄 II 第 1 頁與第 2 頁表中或由同一附錄中第 4 頁的曲線可查出 x 及 y 之值。這一表是由解方程式 (1-12) 及 (1-16) 得出。

然後由 (1-17) 求出 D 。這時首先要算出 L_0 ——(1-17) 的右邊部份，如上所述，1 公斤銅線的單位損耗 α_M 是 2.4，而對於 0.35 公厘的矽鋼片單位損耗可以採取 $\alpha_{cm} = 1.4$ 作為一次近似值。

在這樣的 α_{cm} 值時，單位損耗的曲線在常用的磁通密度 13 000—15 000 高斯範圍內可以足夠的縮寫成拋物線

$$\alpha_{cm} = 1.4\beta^2$$

式中 α_{cm} ——在磁通密度 $B = 10\,000$ 高斯時 1 公斤矽鋼片的損耗，鐵心柱直徑 D 可以不藉 (1-17) 計算，而可利用附錄 II (第 4 頁) 的曲線求得。

那麼，根據公式 (1-1) 就可求出鐵心的高度 H 及 F ——鐵窗寬。鐵心柱中心線間距離 MO 顯然等於

$$MO = D + F$$

最後，由附錄 II (第 7 頁) 的曲線求得輔助數量 f_M 及 f_{cm} 的 y 函數，等於

$$f_M = xy(y+1) \quad (1-23)$$

$$f_{cm} = hx + by + d \quad (1-24)$$

這二數值是求導線重量 G_M 和矽鋼片重量 G_{cm} 的公式 (1-2) 及 (1-3) 的因子。這二公式現在變成下列形式 (適用於銅導線的三相變壓器)：

$$G_M = 83.9 \sigma_M f_M D^3 \cdot 10^{-3} (\text{公斤}) \quad (1-25)$$

$$G_{cm} = 5.93 \sigma_{cm} f_{cm} D^3 \cdot 10^{-3} (\text{公斤}) \quad (1-26)$$

最後剩下的就是求出那兩個在開始計算時沒有給出的參數——電流密度 δ 及磁通密度 B 。為此可以利用公式 (1-10) 及 (1-11) 來求，

$$P_M = \alpha_M \delta^2 G_M,$$

$$P_{cm} = \alpha_{cm} \beta^2 G_{cm}.$$

變壓器基本尺寸的理論計算到這裏就可結束，如果已獲得的結果在分析後並不需要補充計算。因為上述的理論計算所費的時間很少，所以變數的補充校核常可供給一些有價值的指示。

表 1-2 中列出了四個計算實例的結果，在此表的上部是已知的數據——容量 P ，以仟伏安計，電壓，損耗 P_M 及 P_{cm} 。後者係取自蘇聯國家標準 ГОСТ 401-41，然而在計算時所用的銅損值比較小，僅為標準值的 95%，這一修正已考慮到高壓線捲中變換匝數 (5%) 必然要增加銅的重量，以及由於渦流所產生的附加損耗 (主要是低壓線捲) 在整個理論計算中，銅損僅按下式計算：

$$P_a = I^2 R.$$

表 1-2 的第二部份是各種係數和參數的數值，關於 $\alpha_M, \alpha_{cm}, \sigma_M, \sigma_{cm}$ 及參數 m 已在本章開始部份說明，因為這裏所有四個計算都是已知 P_M 及 P_{cm} ，所以可按公式 (1-17) 計算常數 L_0 的數值。

表的第三部份是從附錄 II (第 4 頁) 的曲線中查出的 x, y 和 D 的值，還有鐵心的其餘基本尺寸。

最後由附錄 II (第 7 頁) 的曲線中查出 j_M, j_{cm} ，再由公式 (1-2) 及 (1-3) 算出重量 G_M, G_{cm} ，最後算出以安/平方公厘計的電流密度 δ 及以高斯計的磁通密度 B 。

比較所得的結果，容易看出：1800 和 15000 仟伏安變壓器的磁通密度有不能採用的數值。最自然的解決辦法是改變損耗的數值，但這是不允許的，因為它們已在標準上規定了。尤其磁通密度 B 大於 14500—15000 高斯亦是不容許的，因為當磁通密度增大時，變壓器的激磁無功容量會過份的增高。因此發生了一個理論計算上的新問題，當已知數不是 2 個而是 3 個技術數據時

$$P_M, P_{cm}, B$$

這是一個特殊極端的情形；解法見下節。

對於 10 仟伏安的變壓器，求得磁通密度太低。在這磁通密度的範圍內 α_{cm} 用 1.3 的數值，下列的計算變數就容易得出。新的 L_0 值將等於

$$L'_0 = L_0 \sqrt{\frac{\alpha'_{cm}}{\alpha_{cm}}} = 3.9 \sqrt{\frac{1.3}{1.4}} = 3.77 \text{ 公分}$$

因為 m 不變，所以 x 和 y 也保持原值，可是新的 D' 值將等於

$$D' = \frac{D}{L_0} L'_0 = 2.68 \cdot 3.77 = 10.05 \text{ 公分} = 101 \text{ 公厘}.$$

所以

$$H' = H \frac{L'_0}{L_0} = 292 \frac{3.77}{3.9} = 282 \text{ 公厘}; F = 81.5 \text{ 公厘}; MO = 182.5$$

係數 α_M 及 j_{cm} 不變，因為它僅與 y 有關，因而矽鋼片重量將減少到

P 仟伏安	10	100
U_1/U_2 伏 接線方式及聯接組 損耗 $\left\{ \begin{array}{l} \text{ГОСТ 401-41} \\ \text{計算} \end{array} \right.$	$5000 \pm 5\% / 230$ Y/Y_0-12 $P_M=335$ 瓦 $P_{cm}=100$ 瓦 $P_M=318$ 瓦 $P_{cm}=100$ 瓦	$6000 \pm 5\% / 230$ Y/Y_0-12 $P_M=2400$ 瓦 $P_{cm}=600$ 瓦 $P_M=2280$ 瓦 $P_{cm}=600$ 瓦
單位損耗 空間係數 $m=3.5 \frac{\gamma_M}{\gamma_{cm}} \frac{\sigma_M}{\sigma_{cm}}$ $L_0 = \frac{14.7P}{\sqrt{P_M P_{cm}}} \sqrt{\frac{\alpha_M \alpha_{cm}}{\sigma_M \sigma_{cm}}}$	$\alpha_M=2.4; \alpha_{cm}=1.4$ $\sigma_M=0.2; \sigma_{cm}=0.75$ $m=3.5 \frac{8.9}{7.55} \cdot \frac{0.2}{0.75}=1.1$ $L_0 = \frac{14 \cdot 7 \cdot 10}{\sqrt{318 \cdot 100}} \times \sqrt{\frac{2.4 \cdot 1.4}{0.2 \cdot 0.75}} = 3.9$ 公分	$\alpha_M=2.4; \alpha_{cm}=1.4$ $\sigma_M=0.26; \sigma_{cm}=0.75$ $m=3.5 \frac{8.9}{7.55} \cdot \frac{0.26}{0.75}=1.43$ $L_0 = \frac{1.47 \cdot 100}{\sqrt{2280 \cdot 600}} \times \sqrt{\frac{2.4 \cdot 1.4}{0.26 \cdot 0.75}} = 5.21$ 公分
$x; y$ D/L_0 D $H; F; MO$ 公厘 D^3 立方公分	$x=2.79; y=0.4$ 2.68 $D=10.45$ 公分 ≈ 105 公厘 $H=292; F=84;$ $MO=189;$ $1.141 \cdot 10^3$	$x=2.59; y=0.37$ 2.79 $D=14.5$ 公分 $=145$ 公厘 $H=376; F=108;$ $MO=253$ $3.05 \cdot 10^3$
$f_M; f_{cm}$ $G_M; G_{cm}$ 公斤 δ, B	$f_M=1.56; f_{cm}=17.2$ $G_M=29.8; G_{cm}=87.2$ $\delta=2.11$ 安/平方公厘; $B=9050$ 高斯	$f_M=1.32; f_{cm}=16.4$ $G_M=87.7; G_{cm}=222$ $\delta=3.29$ 安/平方公厘; $B=13900$ 高斯