

變壓器設計解說

林剛漢編譯

002264

15-4

上海科學技術出版社

變壓器設計解說

林剛漢 編譯

上海科學技術出版社

內 容 提 要

本書主要部分系根据 И. М. 波斯尼可夫教授著的“电机設計”(苏联国家动力出版社, 1952年版)第七章“变压器”譯出。全文分別簡述变压器的分类、結構与設計基本定期; 詳細敘述設計变压器时决定鉄心直徑等主要尺寸, 繞組的选用、計算、絕緣与排列, 各种性能(损耗、漏抗、另載电流、調压率、效率)的計算, 主要零件的机械計算以及发热与油箱計算等的方法。本書將原文分段插进必要的解釋, 并給各公式誘导或証明, 对原書中所附計算举例也作了較詳細的說明, 在各段后則提出学习要求, 使讀者能較深入地体会原者的意图及掌握变压器計算的思想与方法。

書中除原著已有的数据或資料以外, 并从其他方面收集一小部分必要資料, 使初学設計的人对某些数据的选择能較快地作出决定, 書末附有附录, 將繞組銅線的漏流损耗系数, 用磁場能量方法計算变压器漏抗, 洛果夫斯基系数公式作了証明, 并对油管式油箱以及脹油筒(油枕)的計算方法举例說明。

本書可供作高等工业学校电机电器專業变压器設計的教学参考用書, 以及作为电力机械和电机設計兩課程的課程設計的参考資料, 也可作为中等电机專業学校教学参考以及厂矿技术人员业余进修之用。

变 压 器 設 計 解 說

林剛汉 編譯

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

开本 850×1168 1/32 印張 4 8/32 字數 144,000

(原大东、科技版共印 8,000 册 1955 年 11 月第 1 版)

1959 年 11 月新 1 版 1963 年 10 月第 5 次印刷

印數 18,001—22,500

統一書号: 15119 · 496

定 价: (十) 0.62 元

目 錄

| | |
|-------------------------------|----|
| § 1. 變壓器的型式 結構特徵..... | 1 |
| 1-1 變壓器的型式①..... | 1 |
| 第一段說明..... | 4 |
| 1-2 結構特徵..... | 5 |
| 第二段說明..... | 6 |
| § 2. 設計變壓器的基本定則..... | 19 |
| 第三段說明..... | 20 |
| § 3. 電力變壓器的計算..... | 25 |
| 3-1 計算的原始數據及損耗比, 比負荷值的選擇..... | 25 |
| 第四段說明..... | 27 |
| 3-2 計算變壓器主要尺寸的第一個方法..... | 29 |
| 第五段說明..... | 38 |
| 3-3 決定變壓器芯柱直徑的第二個和第三個方法..... | 38 |
| 第六段說明..... | 40 |
| 3-4 變壓器繞組的計算..... | 45 |
| 第七段說明..... | 47 |

① 原文僅 § 1, § 2, § 3, 但為說明方便起見, 把它分為若干小節, 並另加標題——譯者註。

| | |
|-------------------------------|-----|
| 3-5 變壓器繞組的絕緣 | 50 |
| 第八段說明 | 54 |
| 3-6 銅耗及短路電壓的計算 | 56 |
| 第九段說明 | 59 |
| 3-7 導磁體(鐵心)損耗、零載電流、效率及短路電流的計算 | 63 |
| 第十段說明 | 64 |
| 3-8 機械計算 | 68 |
| 第十一段說明 | 71 |
| 3-9 熱計算 | 78 |
| 第十二段說明 | 81 |
| 3-10 變壓器的計算舉例 | 85 |
| 附錄 I 油管式油箱計算舉例(包括脹油筒計算) | 115 |
| 附錄 II 漏抗公式的誘導——磁場能量法 | 119 |
| 附錄 III 繞組渦流損耗係數計算公式的誘導 | 121 |
| 附錄 IV 洛果夫斯基係數公式的誘導 | 126 |

§ 1. 變壓器的型式 結構特徵

1-1. 變壓器的型式

變壓器應用於極多種的技術領域中，就用途論，它可以分為下列各種型式：

1. 電力系統和配電網中的電力(升壓或降壓)變壓器；
2. 測定用的電流和電壓互感器；
3. 電鐸變壓器；
4. 電爐變壓器；
5. 試驗用的變壓器；
6. 各種特殊用途的變壓器。

在結構上，變壓器主要地包括由鋼片疊集的鐵心，和兩隻或兩隻以上沒有電氣聯接的繞組^①。

變壓器的一般形式，示於圖 1^②。

就相數論，變壓器分為單相和多相；就繞組與鐵心的相互位置關係論，則分為芯式與殼式。芯式變壓器中，繞組包圍着鐵心(圖 2)，殼式中繞組部分地被導磁鐵心所包住(圖 3)。芯式變壓器通常應用同心的繞組(圖 4)。低壓繞組(HH)放得靠近鐵心，高壓繞組(BH)是放在低壓繞組外面的一個同心圓筒(圖 2)。繞組這樣地相互放置，繞組跟導

① 自耦變壓器中的繞組，則有電氣的聯接。

② 原文為圖 191，此處為便利起見，改由圖 1 開始，希讀者注意——譯者註。

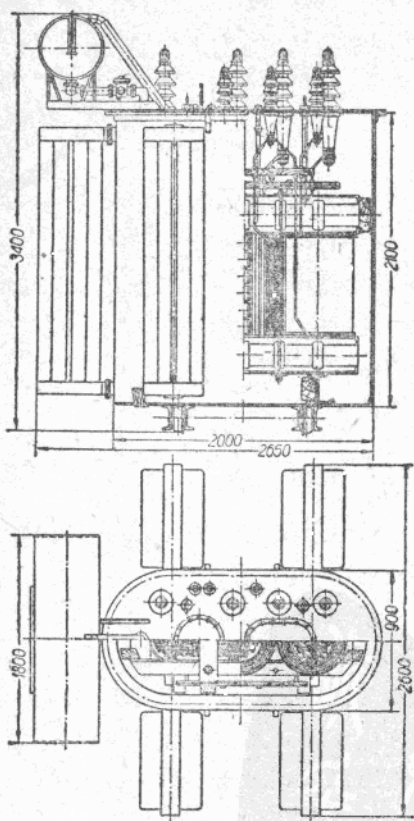


圖 1 芯式變壓器(3200 仟伏安, $\frac{35}{6}$ 仟伏)的結構

* 原文誤為 7500 仟伏安——譯者註

磁體，以及繞組彼此之間都可以可靠地絕緣。

具有同心繞組的芯式變壓器是目前電力變壓器的最流行的型式；但對於電流較大的低壓變壓器，或對於調壓範圍較大的變壓器，則較常應用沿軸向上高壓和低壓線圈依次交疊的餅式繞組。這種繞組，它的機械強度較高，不對稱性較少。殼式變壓器就採用這種繞組（圖3）。

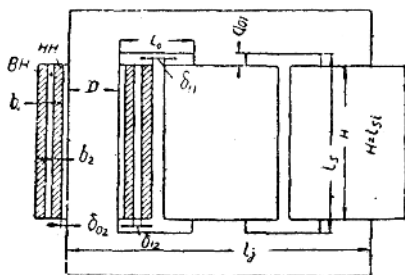


圖2 芯式變壓器的繞組與磁系的佈置圖

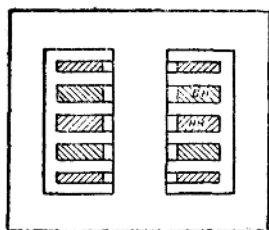


圖3 殼式變壓器的繞組與磁系的佈置圖

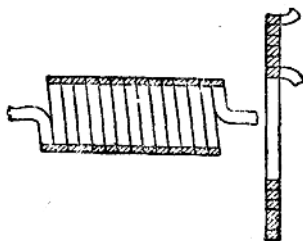


圖4 同心式繞組

就冷却方法說，變壓器分爲：

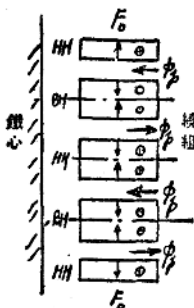
- a) 自然油冷式；
- b) 吹氣油冷式；
- в) 強迫油循環油冷式；
- г) 自然空氣冷却式。

【第一段說明】

以上說明了變壓器按用途、相數、按鐵心與繞組的相互位置、冷卻方式等而分為若干不同種類或型式。

變壓器是一個非常重要的電氣化的工具。每一千瓦發電能力約需 6 千伏安變壓器。由用途分類中，我們可以看到它的應用的廣泛程度。目前，小到可以放在手掌中的幾瓦的變壓器；大到需要占地一百多平方米和高达十米左右的電力變壓器。它們或擔任電網電壓的升降，或擔任電壓的調節（如自耦式變壓器與動圈式調壓器），或幫助儀表擴大測定範圍（互感器），或供給電焊所需的低壓強電流，或供給測驗介質的絕緣情況所需的高壓電源……。工業企業中要它，日常生活中有它，就因為它是這樣重要，因此我們要製造它；而要製造它，必須先設計它；要設計它，我們就得知它有那幾種型式，結構上有什么特徵。

解放以前，由於我國電機製造工業的半殖民地狀態，雖然由 1917 年就開始製造變壓器，但是單台的，容量很少超過 1,000 仟伏安。1937 年以前，也曾造過一台 2,000 仟伏安的，也做過一台 1,000 仟伏安電壓 33,000 伏的，但大部分仍依靠資本主義國家供給。解放以後，由於黨的正確領導，廣大職工的創造性勞動，我們已經製出如 31,500 仟伏安的巨型變壓器，單台 25 萬伏的高壓試驗變壓器，電壓高達 154,000 伏的電力變壓器（20,000 仟伏安），110 仟伏的電流互感器等；而在 1958 年工農業大躍進以來，40,500 和 60,000 仟伏安的巨型變壓器相繼製出。1959 年後則向 20~30 萬水平前進。至於電焊、電爐、動圈調壓，以及電機電用的各式大小變壓器，已無一不能找到國產出品了。



說明圖圖 1 壳式變壓器
機械力示意圖

F_0 —力(方向)

ϕ_0 —漏磁磁通的方向

⊕—表示電流方向進入

⊙—對示電流方向流出

HH—低壓(兩端的僅具有 $1/2$ 匝數)

BH—高壓

(注意：只畫出繞組的一邊剖面)

在結構上的兩種主要型式——芯式和壳式變壓器中，芯式的較多；因為它應用的絕緣較省，構造較簡單，修理較方便。但是壳式的繞組，一方面它受鐵心支持的部分較多；另一方面由於它的 BH、HH 繞組相間排列，各繞組中所受的力較小（見說明圖圖 1），它的機械強度好些（力的計算公式，見後面機械計算）。也因此，如果調壓的範圍大，也不至產生較大的、因不對稱而引起的機械力。所以電流較大的，如電爐、電焊用的，往往採用壳式結構（按原文將以芯式三相電力變壓器為主）。

至於我們所設計的變壓器究竟應該採用什么样的冷卻方式呢？這要看所設計變壓器的功率、電壓以及使用場合。一般說，除了為避免火險，除低壓的小功率變壓器以外，多採用各種油冷

式的(至於水冷的,因冷却效果未見得改善,而有其他一些缺點,極少使用)。至於干式變壓器,本來用得不多(因空氣絕緣能力與冷却能力都較差);但最近由於新絕緣材料,如矽有機漆、高溫熱固漆等的採用,有擴大使用的趨勢。目前各國都在研究蒸發冷却,並已製出7.5兆伏安,345千伏(加強迫風冷,可到10000千伏安)。油冷式的應用極廣,它又有平光式油箱、油管式油箱、散熱器油箱、吹氣或強迫循環式多種,各種的適用範圍將在後面的例題中說明。

- 本段學習要求: (1) 了解變壓器的重要性;
 (2) 掌握分類方式及其應用情況;
 (3) 我國變壓器生產的基本情況。

1-2. 結構特徵

磁導體是由特高矽的變壓器鋼片疊集而成的。鐵心斷面的形狀,可為矩形或接近於圓形的梯級形(圖5)。矩形線圈較難製造,並且在短路時也較不穩固。所以矩形鐵心和線圈只用於具有交疊繞組的壳式

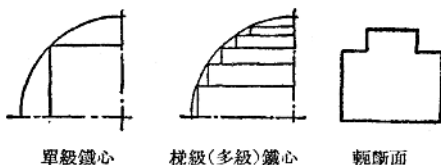


圖5 鐵心的斷面形狀

變壓器里,因為壳式變壓器里的短路徑向機械力不怎麼大。

如果採用了圓筒形繞組,那只在功率很小時才採用正方形斷面的鐵心,因為這時鐵心斷面積總共只等於繞組所包容的面積的 $\frac{2}{\pi}$;就是說,空間利用得差,因此變壓器的體型會較大。在同樣的繞組直徑下,梯級形鐵心的面積要大得多(圖5)。又為增加大功率的變壓器的鐵心冷却表面,裝配時可在鐵心中間開一個或幾個冷却通道。軛的斷面在中小型功率的變壓器中係做成矩形;大功率則做成梯級形,使能得到較

均勻的磁通密度。軛的斷面積可取等於芯柱的斷面積，或爲了降低導磁體中的損耗也可取得比芯柱大5~10%。軛和芯柱間或裝成對接，或交互錯接；惟目前錯接裝配法差不多已把對接裝配法排擠了。大功率的變壓器則應用組合鐵心。

繞組是用紙或棉絕緣的圓銅線或扁銅線製成的。就繞製方法論，可分別爲下列各式繞組：

1) 圓筒式 這一式繞組的軸向尺寸比徑向尺寸大，並且線匝是沿着軸向串繞起來的；就層數論，它又分爲單層、雙層和多層的（單層和雙層繞組一般用扁線繞製，多層則用圓線）。

2) 餅式 這種繞組的形狀是一盤平面形的螺線；它的線匝是沿徑向上串繞起來的。

3) 多列餅式 這種繞組的每一螺線層包含好幾根圓線。

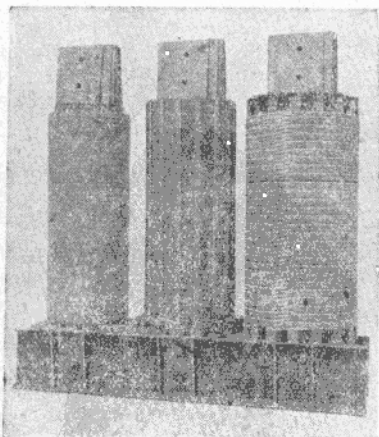
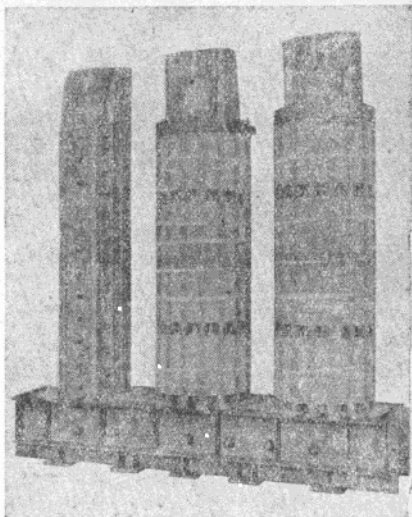
除了上述各基本元件以外，變壓器的構件還有：

1. 器架 這是繞組與鐵心支撐零件的總稱。
2. 外殼或油箱（如果是作爲裝油用的，就叫做油箱；如果是作爲防止碰觸到變壓器工作部分用的，則叫做外殼）。
3. 引線 是用以把電流引到繞組和分接頭開關的導線。
4. 絕緣套管 絕緣零件或機構，藉它而把電流送經箱蓋。
5. 其他附件 脹油筒，爆氣道等等。

【第二段說明】

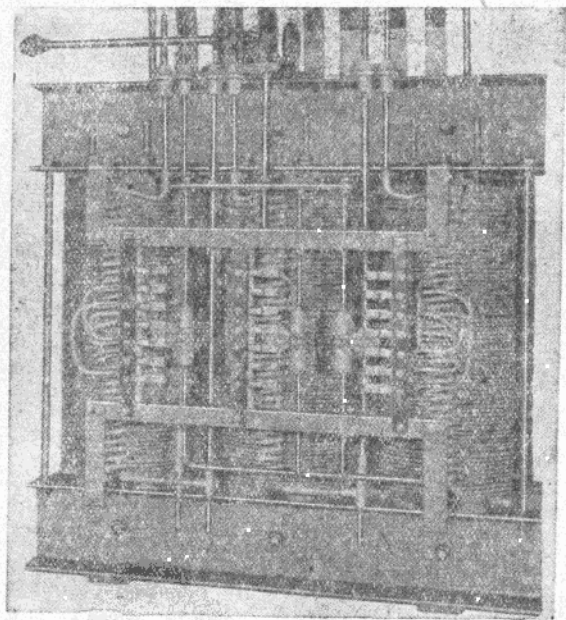
以上簡單地說明了變壓器的主要元件——鐵心和繞組的各種型式；至於其他元件，只是提了一下。但是爲了計算時方便起見，讀者應該把變壓器油箱內外的各元件名稱、相互位置、所用材料、作用等有個明晰的了解。這裏特附說明圖幾幅，幫助讀者解決一部分問題（說明圖圖2~5）。

- (甲) 左：鐵心夾好，等待上線圈，
鐵心中具有油道一。
- 中及右：已上妥低壓繞組(連續式)，可以看到撐條。
- 瓶：用鉲接結構。

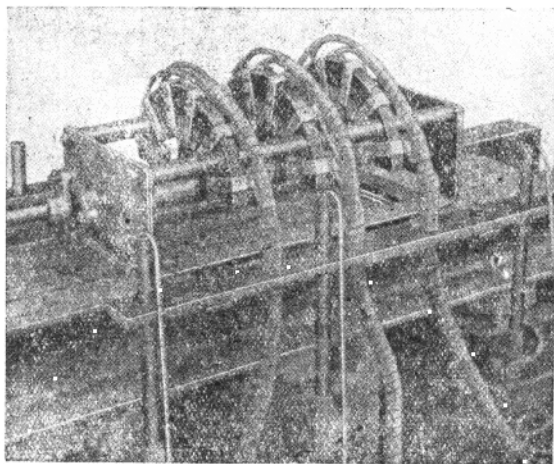


- (乙) 左柱：已套進低壓繞組(筒式)
- 中柱：已在低壓繞組外再套上絕緣筒，並放好撐條(撐開油道用)，及與下軛間的隔片絕緣(高度相當於 α_{01} ，見後)。
- 右柱：已上好高壓繞組(連續式)，並放好與上軛間絕緣，絕緣隔片上放一墊環，備壓緊繞組用(參看說明圖3)。

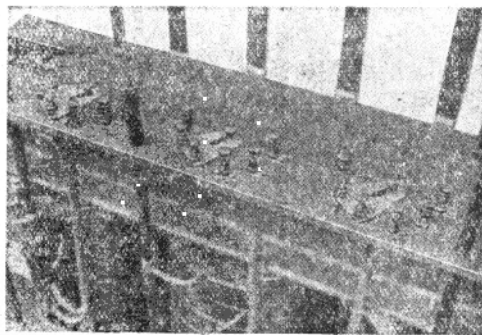
說明圖 2 變壓器器身裝配圖之一



說明圖 3 器身裝配圖之二——全部裝妥，可以看到高低壓引線、分接開關及其操作桿，器身吊攀，轆部夾緊螺絲，繞組壓緊裝置，上下轆槽鎖及夾件等

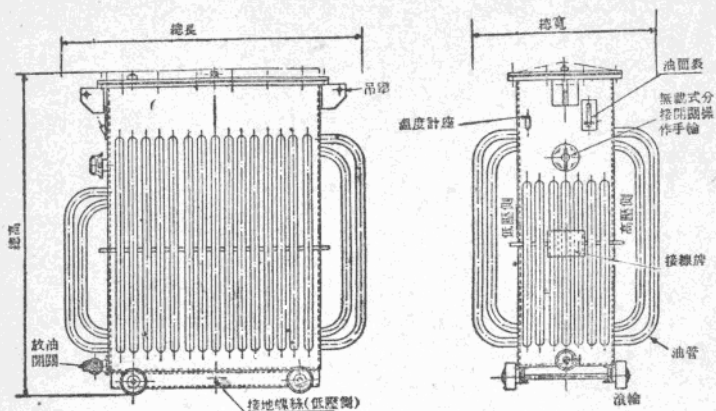


(甲)

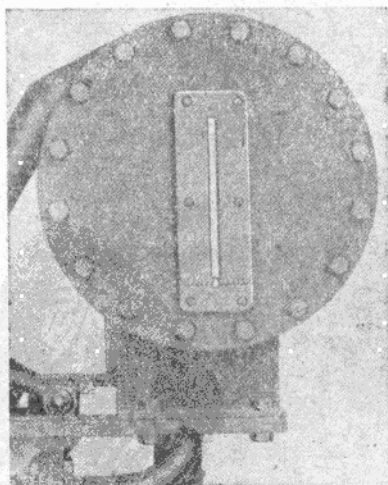


(乙)

說明圖圖 4 變壓器分接抽頭及開關接法——並看到分圓式筒形繞組，圓與圓間具有水平油道



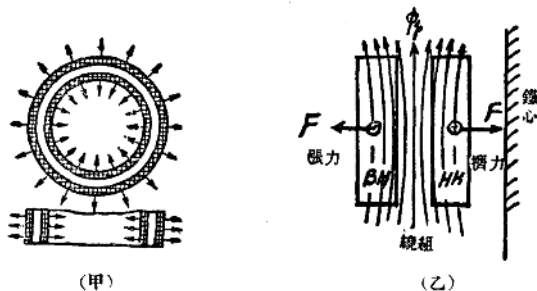
(甲)外形投影圖(不包括套管)



(乙)脹油筒(100 仟伏安以上或電壓在 6.3 仟伏以上)及爆氣道(1000 仟伏安以上)

說明圖圖 5 油箱外表零件圖

變壓器通常採用圓形繞組，矩形繞組較不穩固。爲什麼呢？這是因爲變壓器的原次兩繞組的電流方向相反（因繞組繞製方向相同，而由楞次定律可以證出其流向相反），它們所產生的磁場使得兩繞組的導體相互排斥（見說明圖圖 6，力的方向由左手定則判定），所以繞組（同心排列時）將有被漲（外）或擠（內）而變形的趨勢，至於圓形因周長已經最長，在沿徑向上處處受力相同的情況下，再不會變形（除非因溫度太高而變形，或被“漲破”）。



說明圖圖 6 同心排列的繞組的機械力示意圖

(注意：圖乙只畫出繞組的一邊)

因爲繞組最好做成圓形（殼式變壓器例外），那麼爲使繞組裏面的空間得到充分的利用，鐵心的斷面照理也該做成圓形；但這在製造上是困難且很不經濟的，因此一般做成梯級形狀，梯級內接於圓，它的形狀接近於圓。梯級各級的尺寸要怎樣才能得到最大的斷面積呢？這必須用微積分中求最大值的方法來決定。按照布爾佳可夫著“變壓器計算”（劉學叔譯，電力工業出版社出版）第 26 頁 § 2-2，列出了斷面積的一般方程式，分別取該方程式對各級含角的微分（導函數），並令等於零，因而獲得下列三角函數方程組（對某一角微分時，設其他各角爲常數）：

$$C_2 = \frac{C_1^2 - S_1^2}{C_1}, \quad C_3 = \frac{C_2^2 - S_2^2}{C_2} + S_1 T_2,$$

.....

$$C_n = \frac{C_{n-1}^2 - S_{n-1}^2}{C_{n-1}} + S_{n-2} T_{n-1},$$

$$S_n^2 - \frac{1}{2} S_{n-1} S_n - \frac{1}{2} = 0.$$

上述方程組中 S 、 C 、 T 各表示正弦、餘弦、正切（因令半徑等於單位長，所以它們也代表各級的相應長度），其腳標則指各級所含角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 。實際上，這一方程組可以用最後一式概

括；換句話說，最後一式為全方程組的普遍形式。例如，以單級鐵心論，此時只有 θ_1 ，因此最後一式寫成了：

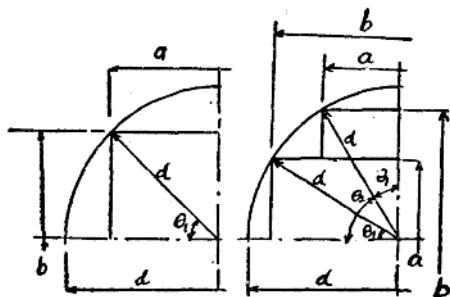
$$\sin^2 \theta_1 - \frac{1}{2} = 0, \text{ 或 } 2 \sin^2 \theta_1 - 1 = 0, \sin \theta_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \theta_1 = 45^\circ.$$

這也就是第一個式子中令 $C_2=0$ （因沒有 θ_2 ）的結果：

$$\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 = 0, \tan \theta_1 = 1, \theta_1 = 45^\circ.$$

由於 $\theta_1 = 45^\circ$ ，單級鐵心的兩邊（說明圖圖7），各等於：

$$a = b = d \cos \theta_1 = 0.707 d.$$



說明圖圖 7 單級及兩級鐵心尺寸證明用圖

即為一正方形，面積為 $ab = \frac{1}{2}d^2$ ，它與繞組所含的圓面積 $\frac{\pi}{4}d^2$ 的比率 k_ϕ （稱為鐵心斷面形狀係數，見後第五表）：

$$k_\phi = \frac{1}{2}d^2 : \frac{\pi}{4}d^2 = \frac{2}{\pi} = 0.637.$$

如果是兩級的，則由方程組的最後一式，我們得：

$$\sin^2 \theta_1 - \frac{1}{2} \sin \theta_2 \sin \theta_1 - \frac{1}{2} = 0;$$

或由第二個式子令 $C_3=0$ 而得的：

$$\begin{aligned} & \cos^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_2 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \tan \theta_2 \\ &= 1 - \sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_2 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \\ &= 1 - 2 \sin^2 \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 = 0 \end{aligned}$$

是相同的。此時（見說明圖圖7）： $\sin \theta_1 = \cos \theta_2$ ，我們不難解得：

$$\theta_1 = 31^\circ.75, \quad \theta_2 = 58^\circ.25.$$