

高等学校交流讲义

电机设计

上册

西安交通大学电机与电器制造教研组编译



中国工业出版社

11300

高等学校交流讲义



电机设计

上册

西安交通大学电机与电器制造教研组编译

中国工业出版社

本书分上下两册出版。上册为变压器設計，主要根据季霍米罗夫著变压器計算編譯而成；下册为旋轉电机設計，主要根据維諾格拉道夫等著电机設計編譯而成。上册中主要介紹了变压器設計的一些基本方法和內容，下册中主要介紹了异步电机、直流电机、凸极和隐极同步电机的設計方法和內容。

本书供高等学校电机电器专业或电机专业之交流讲义，亦可供电机制造厂工程技术人员参考之用。

电 机 設 計

上 册

西安交通大学电机与电器制造教研組編譯

*

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印張 $7 \frac{1}{4}$ · 字数 163,000

1961年7月北京第一版·1961年7月北京第一次印刷

印数 0001—3,533 · 定价(10-6) 0.90 元

統一书号: 15165 · 600 (机-111)

前 言

本书主要是为我国高等学校电机工程系电机电器专业或电机专业学生写的。书中首先介绍了变压器的设计，其中主要包括变压器的电磁计算、温升发热计算、机械计算等；然后介绍了旋转电机的设计，在编写旋转电机设计时，把电机设计的一些共同问题如电磁计算、通风发热计算、机械计算等先作介绍，然后分别介绍了异步电机、直流电机、凸极和隐极同步电机的设计特点。首先学习变压器设计，学生能便于掌握和熟悉设计的基本方法和内容，在这个基础上再深入探讨电机设计的共同问题，把变压器和旋转电机的设计问题统一起来，然后再研习各种主要旋转电机的设计特点。我们认为这样的编排次序是比较恰当的：内容由浅入深、由特殊到一般、再由一般到特殊，对于学生来讲，是较易于认识和掌握的。

本书分上下两册出版，上册为变压器设计，下册为旋转电机设计。前者主要根据季霍米罗夫著变压器计算编译而成；后者主要根据维诺格拉道夫等著电机设计（俄文1956年版）编译而成，其中电磁计算各章中均作了某些必要的补充，通风冷却计算方面补充了一些有关氢冷和液冷的资料，机械计算一章主要根据阿历克赛也夫著电机结构及苏联工厂机械计算资料重行改写的。此外又增添了隐极汽轮发电机计算一章。为了避免正文文体的过于繁复，一些理论公式的推导和证明编写在本书下册的附录中。学生作课程设计需用的一些数据、资料亦编写在附录中，变压器设计资料编入上册附录，旋转电机设计资料编入下册附录。

今年4月初在上海召开了教材选编会议，决定推荐原西安交通大学电机电器专业电机设计教学用讲义作为本书的主要素材，其中隐极汽轮发电机一章主要采自哈尔滨工业大学电机教研组编写的汽轮发电机课程设计指导书，下册附录X~XVII系由上海交通大学电机教研组编写的。本书最后由西安交通大学电机与电器制造教研组陈世坤、宋文谦、邱贤佩等同志根据会议精神加工整理而成。

教材选编会议

电机与电器制造专业组

1961年5月

目 次

前言	3	4-2 高压绕组的计算	38
绪论	5	4-3 短路损耗计算	43
第一章 变压器设计总论	10	4-4 短路电压的计算	47
1-1 变压器设计概论	10	4-5 变压器绕组中机械力的计算	49
1-2 变压器的给定数据	10	第五章 变压器磁路系统的最终计算	54
1-3 变压器设计的步骤	11	5-1 决定铁芯的几何尺寸	54
第二章 变压器主要尺寸的选择及磁路系统的初步计算	12	5-2 决定变压器的空载损耗及空载电流	56
2-1 决定变压器的基本电量	12	第六章 变压器的温升计算	61
2-2 铁芯的结构	13	6-1 变压器的散热过程	61
2-3 钢材牌号及片间绝缘的选择	15	6-2 变压器冷却系统概述	64
2-4 容量与直线尺寸间的一般定则	17	6-3 温升的标准	64
2-5 决定变压器主要尺寸的公式	18	6-4 绕组温升的验算	65
2-6 β 对于变压器价格及特性的影响	19	6-5 油箱的热计算	67
2-7 决定变压器的主要尺寸	21	6-6 绕组及油的温升最终计算	72
2-8 铁芯的初步计算	23	6-7 油重及储油柜的计算	72
第三章 变压器绕组	24	电机设计例题(变压器计算实例)	73
3-1 绕组的绝缘	24	附录 I 油浸变压器绕组间及绕组与铁芯间的绝缘距离	105
3-2 绕组的种类	25	附录 II 匝间绝缘	106
3-3 扁导线绕成的筒式绕组	26	附录 III 层间绝缘	106
3-4 螺旋式绕组	28	附录 IV 线卷间绝缘	106
3-5 多层筒式绕组	30	附录 V 调压线卷处的最小槽宽度 h_{kp}	107
3-6 分段多层筒式绕组	31	附录 VI 引入线卷的加强绝缘	107
3-7 连续盘式绕组	32	附录 VII 干式变压器绕组间及绕组与铁芯间的绝缘距离	103
3-8 绕组的选择	32	附录 VIII 引线之绝缘及绝缘距离	109
第四章 变压器绕组及短路特性的计算	34	附录 IX 油中的容许绝缘距离	110
4-1 低压绕组的计算	34	附录 X 符号表	111

緒 論

§1 我国电机制造业的发展

解放以前，在帝国主义、封建势力、官僚资本主义的掠夺和統治下，我国电机制造工业和其他制造工业一样是非常落后的。工厂的規模很小，产品的种类、数量及容量都很有有限，只能制造少量、小型、低压的电机，生产过的最大发电机不到200瓩，电动机最大不过300馬力，变压器不过2000仟伏安。并且，电机制造所用的材料如硅鋼片、絕緣材料、鋼材、銅綫等大都由国外輸入，加以关税不自主和外貨的傾銷，在解放之前我国的电机制造工业根本得不到发展。

1949年革命胜利之后，在共产党和毛主席的正确领导下，由于全体工作人員的热忱劳动和积极的創造并学习了兄弟国家的先进經驗，我国电机制造工业在短短的几年内获得了巨大的成就。若以1949年全国电机总产值为100，到了1957年第一个五年計劃期末，实际总产值增长了28倍，在1958年这一个大跃进的一年里，电机工业的总产值較之1957年又增长了一倍以上。

我国电机設計和制造的发展过程是由仿造設計过渡到自行設計的。通过仿制中各类任务书的編制，对各种設計的优缺点进行了分析比較，通过产品的鉴定試驗，取得了丰富的設計經驗，再通过在实践中一系列有关的专题試驗和現場安全运轉試驗，結合了我国的具体条件，电机設計的工作由局部修改国外产品設計进而走向全部自行設計。

在变压器制造領域，我国在1953年已制出了容量为13500仟伏安、电压为110仟伏的变压器，1957年已生产40500仟伏安、154仟伏的三相变压器及20000仟伏安、220仟伏的单相变压器，1958年已生产60000仟伏安、110仟伏的三相变压器及40000仟伏安220仟伏的单相变压器。目前正在設計和制造更大容量的高压变压器。

汽輪发电机的制造对我国來說才只有七年的历史。1953年开始了生产汽輪发电机的准备工作，1954年就制成了6000瓩的汽輪发电机，随后又制成12000瓩、25000瓩、和50000瓩的汽輪发电机。我国的水力資源是极其丰富的，并且具有水量大、落差高的优越条件。因此大力制造水輪发电机也是发展电力事业的重要的任务之一。1951年我国开始制成了800瓩的立式水輪发电机，1955年制成了10000瓩的水輪发电机，再经过一年又制成了15000瓩水輪发电机，特别是在大跃进的1958年，試制成了72500瓩的水輪发电机。

其他各种交直流电机及控制用微电机等在短短的几年里亦获得了巨大的发展。

在党的中央工业和地方工业、大型企业和中小型企业、洋法生产和土法生产等同时并举的一整套“两条腿走路”的方針指导下，全国各地迅速建立了各种类型的电机制造工厂，目前正在試制和生产不同容量和各种型号的电机来供应全国各方面的需要。全体职工同志在党的社会主义建設总路綫的光輝照耀下，破除迷信，解放思想，克服了材料缺乏、設備不足的困难，制造出了各种类型的土电机，取得了优异的成效。此外在科学研究机关、高等学校和中等技术学校，在科学研究为社会主义建設服务的原則、教育与劳动生产相結合

的方針的指導下建立了許多附屬的電機工廠或電機車間，目前亦正在試制和生產不同容量和各種型號的電機來滿足全國各方面的需要。隨着社會主義的建設需要，我國電機工業將得到更進一步的發展。

§2 近代電機製造發展的趨勢及目前製造水平

a) 減輕電機的重量

在這方面電機製造工業獲得了顯著的成就，下表明顯地表現出這一點。

年 份	容 量 瓩	轉速 轉/分	定子外徑 毫米	總 長 毫米	總重 公斤
1893	3.7	1500	450	600	150
1903	3.7	1500	430	550	105
1913~1926	4.0	1500	390	500	94
1926	4.0	1500	350	470	65
1932系列	4.0	1500	310	450	60
1937系列	4.0	1500	290	400	56

減輕重量的方法有二：

1) 減輕結構材料，要減少結構材料就必須確實知道材料中所受的應力，並應該會計算此種應力。例如，在計算關於有周期性變化負荷的電機的軸時就應考慮鋼材的疲勞效應。

2) 減少有效材料，有效材料的減少必然會引起負荷增加，損耗增加和效率下降，須要用特殊的方法來冷卻，並影響到電機的工作性能，不僅如此，損耗的增加也引起能量輸送的增加，因此加大了電力系統——自發電機到配電站——的容量，國家標準對電機各部分的溫升作了一定的限制，實際上這也就決定於電機的壽命，因此，溫升的決定與國家技術政策有密切關係。

6) 增加单机容量

目前機組容量不斷提高，因為大容量電機中每單位容量所需的材料和損耗較小容量電機中的為小，亦即機組容量愈大則效率愈高用材愈省，例如25萬瓩機組的效率比15萬瓩的高15%。再則機組容量愈大則所用機組較少，電站服務人員較少，所占廠房面積較小，可節省基建投資。

但是由於損耗與 L^2 成比例而散熱面積僅和 L 成比例，因此，容量愈大則散熱愈困難，要求加強通風，改善通風系統。

蘇聯1954年已製造世界上最大的古比雪夫水電站低速105000瓩水輪發電機，1960年制成了容量高達20萬瓩的水輪發電機，推力軸承荷重達3400噸，較英美大一倍。目前正在設計和製造更大容量的水輪發電機。蘇聯利用現代氣體動力學與熱工學的成就，提出改進現有巨型水輪發電機冷卻系統的方案，可使通風效果提高一倍。汽輪發電機方面蘇聯於1960年亦已制成30萬瓩的定子轉子氬內冷的汽輪發電機，目前正在設計和製造容量高達75萬瓩、定轉子都採用液內冷的汽輪發電機。由於採用了氬壓較高的內部直接氬冷或液冷方法，採用耐熱絕緣及導熱性能優良的薄絕緣材料如聚乙烯，硅素有機絕緣，優質硅鋼片，鋁合金的轉子導線以及改進工藝利用超音波探傷新技術並在大型電機中將短路比適當降低，都有可

能使容量大大提高。

根据苏联柯馬尔的意見，轉子极限直徑为 1.1 米，长度为 6.5 米，相当的极限容量为 20 万瓩，如用内部氩冷則为 40 万瓩，倘再降低短路比至 0.3，容量可达 45 万瓩 (50 周)。根据西德維德門的意見，目前轉子直徑为 1.18 米，长度为 6 米，容量可达 30 万仟伏安。由于熔接技术，超音波探伤及鋁导线的采用，直徑可达 1.3 米，若长度采用 7.5 米，則容量可达 50 万仟伏安 (50 周)。美国吉朋及荷萊的意見，定子繞組用油內冷，可制成 3600 轉、50 万瓩的汽輪发电机，并还有可能提高。目前氩压已采用 3 个表大气压轉子繞組可用康达尔鋁合金，50 万瓩容量是可以达到的。

假如定轉子都采用水內冷，則可获得更高容量的汽輪发电机。

容量发展的过程大致如下表所示：

年 代	冷 却 方 式	氩 压	容 量 极 限 (仟伏安)
1908~1928	氩 冷 式	0.35 表大气压	20,000
1929~1940	氩 冷 式	0.35 表大气压	100,000
1941~1947	氩 冷 式	1 表大气压	125,000
1948~1952	氩 內 冷 式	2 表大气压	187,500
1953~1956	氩 內 冷 式	3 表大气压	352,000

近 30 年来利用冲击波发生器及示波器，进行了对高压現象及电介质击穿問題的研究，苏联制出了 110~220 仟伏有补偿电容的不发生震蕩的防雷式变压器，1954 年制出 123 兆伏安，400 仟伏超高压变压器。1960 年制成了 135 兆伏安 500 仟伏的巨型变压器，相应的三相变压器組容量为 405 兆伏安。美国、西德、瑞典已制出 300~400 仟伏，100~250 兆伏安变压器。瑞士、德意志民主共和国和西德等一些国家还对巨型变压器改进了冷却系統、絕緣結構和机械結構，制出移动列車式变压器。超高压变压器目前要在高压側装有載分接开关。在超高压系統間互相連結上有使用自耦变压器的趨勢。西德已制出 200 兆伏安 245/10 仟伏，在 245 仟伏側装有 $\pm 11\%$ 的分接开关及 200 兆伏安 400/231 仟伏自耦变压器，并在 231 仟伏側装有 $\pm 18\%$ 有載分接开关。美国已制成 400 兆伏安 330 仟伏的自耦变压器。苏联已用低鉄耗的冷压硅鋼片制造大型变压器，可減輕重量 20%。并曾用六氟化硫 (SF_6) 为絕緣制出了 69 仟伏电力变压器，瑞士用特种可塑性树脂制出 380 仟伏干式电压互感器。

§ 3 国家标准的意义

国家标准对設計者有着重大的意义，因为国家标准对电机及变压器提出了一定的要求，规定了最基本的技术条件和試驗方法。如果設計出来的电机不符合国家标准，这种电机就不能允許投入生产。标准不仅总结了过去制造、設計和使用上的經驗而且提出了发展的方向，同时还應該符合国家的經濟政策。因此，标准的制定是极其慎重的。国家标准不是永远不变而应随着技术科学的进步不断修訂。由于各国的經濟及地理条件不同故其国家标准也不完全一样。例如按美国标准，电机的周圍温度定为 40°C ，而欧洲各国标准一般定为 35°C ，我国在电机基本标准草案中定为 40°C 。苏联及捷克汽輪发电机冷却器的进水温度为 33°C 而我国南方各省夏季气候炎热，往往进水温度达到 35°C ，故在盛暑时期不得不降低出力。又如水輪发电机的冷却水温度最高为 25°C 但是由于具体情况不同而冷却温度的制定也有

RDM 66/1

所不同。設計師不僅應該知道國家標準而且必須進一步了解制訂標準的理由，運用已掌握的知識在符合國家標準的情況下求出最經濟的方案。

我國因為原來工業基礎薄弱，所以過去沒有自己的標準，曾採用蘇聯的國家標準，以滿足當時各種企業發展的需要。1959年初，我國根據國內的具體條件陸續訂立了一些標準，均作為草案試行。如在電機基本標準〔電（D）32-59〕中，規定了電機術語的定義，各種電機的基本技術要求，試驗方法等。現將蘇聯電機方面的國家標準號碼例舉如下：

ГОСТ 183-55 基本標準；

ГОСТ 401-41 變壓器；

ГОСТ 5616-50 水輪發電機；

ГОСТ 533-51 汽輪發電機；

ГОСТ 186-52 异步機；

ГОСТ 184-53 直流機。

§ 4 本課程主要內容和其他課程的聯繫

本課程主要研究下列問題：

1. 主要尺寸的選擇；
2. 電磁負荷的選擇及電磁特性計算；
3. 發熱計算；
4. 通風計算；
5. 機械計算；
6. 經濟問題；
7. 結構設計。

在此以前主要學習了電機的性能，現在則是計算。和這門課關係最密切的是電機學，在此基礎上我們解決1，2，4問題；其次為材料力學和機械零件，利用這些基礎來解決5，7問題；其他如流體力學用於通風計算；電工材料用於絕緣及有效材料和結構材料等問題上；企業經濟組織則解決6問題；而機械制圖一課更是不可缺少的，因為圖紙就代表工程師的語言，如果圖紙有錯誤就會產生廢品，造成浪費。

§ 5 對設計師的要求

設計師除了上述的必要知識外，還要有國家經濟方面的知識，工藝和運行條件的知識。例如：

a) 一般的和具體的經濟法則，包括：

- 1) 社會主義工業發展的規律（水力工程的建設，汽輪機的製造，冶金工業等方面的发展）。
- 2) 運行經濟的條件和要求（使用期限，運行費用，可靠性，安全性，操作簡便，符合所給的運行特性等）。
- 3) 技術措施（如採用新材料，降低生產成本和單件劃一等等）。
- 4) 電機設計的經濟法則。

5) 根据鋼鉄价格的比例及其产量的多寡作为决定使用鋼鉄的比例。

6) 工艺的知識:

在任何工厂中有一定的具体条件, 設計师应考虑工厂的工艺及设备条件来作自己的設計。如果工厂沒有电焊条件, 那么即使电焊比鑄造好, 但設計中仍只能使用鑄造。

Б) 电力拖动和电力輸送的知識。

此外, 对电机的理論和計算方法, 也就是电的、通風的、溫升的、机械的計算, 設計者不仅應該善于利用現有的科学数据而且要創造某些設計方法。譬如說, 不能认为电机的結構型式不需改变, 也不能认为各种电机的計算方法已够滿意, 这类方法还有待于繼續的发展和总结。

必須注意, 結構工程师和設計工程师的区分只标志着工业部門中的劳动分工。但是, 在本质上来看, 电气計算和結構設計是有机地联系在一起的。因此, 設計工程师不关心机械設計問題是极端有害的, 优秀的机械設計者, 同时也应当是优秀的电气計算者。

第一章 变压器設計总論

1-1 变压器設計概論

变压器設計的总的要求是：所設計的变压器要符合所給定的容量、电压及特性；在电的方面和机械方面都要堅固耐用；而且要价錢便宜制造簡單。

变压器的設計須符合标准中所規定的要求，或者須符合特殊的技术要求，如短路电压及短路損耗、空載电流及空載損耗等。在实际的設計中，要达到这些要求，可以有各种不同的結果。換句話說，即使是設計同一个变压器，即使是所达到的要求亦相同，所設計出来的变压器的几何尺寸、电磁負載、有效材料的价格及重量、机械强度、繞組溫升等都可能有所不同。

变压器設計的第一个步驟应先初步决定变压器的主要尺寸：鉄芯的直徑、繞組的高度、及高低压繞組每匝的平均长度。因此，我們必須把欲达到的基本要求和变压器的主要尺寸联系起来。

1-2 变压器的給定数据

在設計变压器时，必須知道下列給定的数据：

- 1) 变压器的总容量 P [仟伏安]；
- 2) 相数 m ；
- 3) 頻率 f [赫]；
- 4) 原边繞組及副边繞組的額定綫电压 U_1 、 U_2 [伏]；
- 5) 繞組的接法；
- 6) 变压器的冷却方法；
- 7) 負載的性质。

除上述以外，通常尚給出变压器的主要特性数据：

- 8) 短路电压 U_k [%]；
- 9) 短路損耗 P_k [瓦]；
- 10) 空載損耗 P_x [瓦]；
- 11) 空載电流 i_0 [%]。

特性数据可直接給出或按照标准中的規定。此外，尚应知道变压器是安放在室内抑是放在室外。

所設計的变压器除了要达到上述的規定外，必須要能保証长时期的安全运用。其鉄芯、繞組、冷却油等都不可超过标准中所規定的溫升限度。

1-3 变压器设计的步骤

变压器设计的第一个步骤应是选择铁芯及绕组的式样。在苏联，电力变压器都是采用内铁变压器（即铁芯式变压器）。绕组则采用同心式的。所以在以后的计算中，以上述形式的变压器为主体。

变压器设计的步骤可分为：

- 1) 决定基本的电量：
 - a) 决定高压及低压绕组的线电流及相电流；
 - б) 决定绕组的试验电压。
- 2) 决定变压器的主要尺寸：
 - a) 选择铁芯的结构；
 - б) 选择硅钢片的牌号、厚度及片间绝缘，选择磁通密度；
 - в) 选择各主要尺寸间的比例（考虑到给定的短路电压 U_k 及短路损耗 P_k ）；
 - г) 决定铁芯的直径及绕组的高度，铁芯的初步计算。
- 3) 低压绕组及高压绕组的计算：
 - a) 决定绕组的主要绝缘距离；
 - б) 选择低压及高压绕组的型式；
 - в) 低压绕组的计算；
 - г) 高压绕组的计算。
- 4) 决定短路特性：
 - a) 决定短路损耗；
 - б) 决定短路电压；
 - в) 决定绕组中的机械力。
- 5) 磁路系统的最終计算及空载特性的决定：
 - a) 决定铁芯段的尺寸及铁芯和铁轭的有效截面；
 - б) 决定铁芯及铁轭的重量；
 - в) 决定空载损耗；
 - г) 决定空载电流。
- 6) 温升计算及冷却系统的计算：
 - a) 计算绕组的温升；
 - б) 冷却系统的计算；
 - в) 绕组温升及油温升的最終确定；
 - г) 决定油的重量及膨胀油箱的尺寸。

第二章 变压器主要尺寸的选择及

磁路系统的初步计算

2-1 决定变压器的基本电量

变压器计算的第一个步骤是决定基本电量——每相容量及每铁芯柱的容量，高压边及低压边的额定线电流，相电流及相电压。

变压器的每相容量

$$P_{\phi} = \frac{P}{m} \text{ [仟伏安]} \quad (2-1)$$

每一铁芯柱的容量

$$P'' = \frac{P}{c} \text{ [仟伏安]}, \quad (2-2)$$

这里 c —— 变压器铁芯柱的数目。

三相变压器高压 (BH) 边的额定线电流

$$I_2 = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U_2} \text{ [安]}. \quad (2-3)$$

三相变压器低压 (HH) 边的额定线电流

$$I_1 = \frac{P \times 10^3}{\sqrt{3} U_1} \text{ [安]}. \quad (2-3')$$

单相变压器的额定线电流 (即等于额定相电流):

$$I_2 = \frac{P \times 10^3}{U_2} \text{ [安]}. \quad (2-4)$$

$$I_1 = \frac{P \times 10^3}{U_1} \text{ [安]}. \quad (2-4')$$

三相变压器的相电流——每一个铁芯柱上绕组中的电流——可由下式决定:

$$I_{\phi} = I \text{ [安]}. \quad (\text{如绕组为星形接法}) \quad (2-5)$$

$$I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ [安]}. \quad (\text{如绕组为三角形接法}) \quad (2-5')$$

这里 I 按照公式 (2-3) 及 (2-3') 决定之。

三相变压器的相电压根据下式决定:

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ [伏]}. \quad (\text{如绕组为星形接法}) \quad (2-6)$$

$$U_{\phi} = U \text{ [伏]}. \quad (\text{如绕组为三角形接法}) \quad (2-6')$$

单相变压器的相电流及相电压等于其额定电压及额定电流。在单相变压器中每一铁芯柱上绕组的电流及电压决定于绕组的接法——串联抑并联。如为串联，则每一铁芯柱上绕组中的电流等于额定电流，而电压则为额定值的一半；如为并联，则每一铁芯柱上绕组中的电流为额定电流的一半，而电压则等于额定电压。在两种情况下，都假定每一铁芯柱上绕组的匝数是相等的。

变压器制造好后，通常要经过高压试验。高压试验的数据可参看表2-1。

表2-1 油浸电力变压器的試驗电压

电 压 級	3	6	10	15	20	35	110	154	220
最大工作电压, 仟伏	3.5	6.9	11.5	17.5	23.0	40.5	121	169	242
試驗电压 U_{ucn} , 仟伏	18	25	35	45	55	85	230	320	460

附注: 1. 工作电压小于1仟伏的油浸及干式变压器 $U_{ucn} = 5$ 仟伏。

2. 电压級小于10仟伏的干式变压器, 試驗电压等于表中数值的2/3。

3. 国内电器产品的絕緣耐压标准較表中所述的苏联标准平均降低15%。

2-2 鉄芯的結構

a) 鉄柱及鉄軛的构造: 鉄芯是变压器的主要組成部分之一。在設計时首先要考虑到: 鉄耗要尽可能小, 空载电流亦要尽可能小, 材料要节省, 填充系数要好。此外, 机械結構方面, 要牢固耐用。

鉄芯柱的截面通常成为对称的阶梯形(图2-1)。其外接圓的直径称为变压器鉄芯柱的直径, 是变压器的主要尺寸之一。鉄柱及鉄軛的純鉄截面称为鉄柱及鉄軛的有效截面。鉄柱的級数是根据每一象限中鉄柱的角数計算的, 如图2-2所示为3級鉄柱。級数的多寡視变压器的大小而有所不同。級数越多, 空間填充系数越好。但裁片及装配时比較費工。因此实际上采用的为2~3級到7~8級, 不大于9~10級。表2-2所示为近代油浸变压器采用的級数。

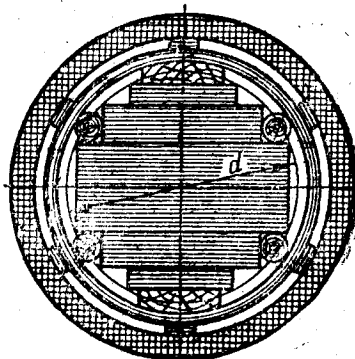


图2-1 用楔子紧夹鉄柱。

表2-2 近代油浸变压器的鉄柱級数

每柱容量 P_n , 仟伏安	5 以下	5~15	15~45	45~5000	5000~20000	20000 以上		
級 数	3	4	5	6	7	8	9	10
鉄柱直径, 厘米	8	8~12	12~16	16~51	51~79	79~86	86~94	94~100

为了鉄芯装配便利起見, 为了减少变换硅鋼片的尺寸, 亦为了支撑繞組方便起見, 鉄軛截面的形状通常比鉄芯柱截面較为簡單。

最常用的鉄軛截面形状如图2-2所示。

选择鉄軛截面形状时应注意: 如果鉄軛和鉄柱的截面面积相等, 則鉄軛和鉄柱每段的截面面积互不相等。鉄軛的边段面积較鉄柱边段面积为大, 中段面积較鉄柱中段面积为小, 如图2-3所示。

这样就引起鉄柱磁通密度和鉄軛磁通密度的不能均匀分布, 增加了附加損耗。为了减少損耗, 降低激磁电流, 变压器鉄軛的截面面积通常較鉄柱大5~15%。

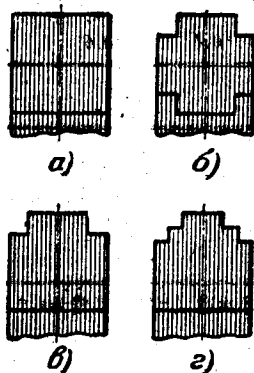


图2-2 鉄軛截面的形状。

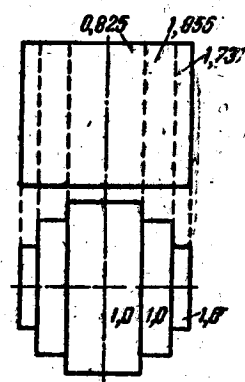


图2-3 鉄柱及鉄軛各段截面之比。

6) 铁柱及铁轭的紧夹: 铁柱的紧夹一般是利用夹紧螺杆, 如图 2-5 所示。铁轭的紧夹是用横梁置于两端面并用螺杆夹紧, 如图 2-4 所示。

当铁芯柱直径 $d < 25$ 厘米时, 铁芯的紧夹可利用楔子插入铁芯柱及低压绕组绝缘筒之间: 如图 2-1 所示。表 2-3 所示为苏联所采用的铁柱的紧夹方法。

表2-3 铁柱的紧夹方法

每柱容量 P'' , 仟伏安	铁柱直径 d , 厘米	低压绕组绝缘筒	铁柱紧夹方法
350以下	$d < 25$	软的或硬的	用楔子与低压绕组紧固
350~1000	$25 \leq d < 35$	硬的	用楔子与低压绕组紧固
350~1000	$25 \leq d < 35$	软的	螺杆
1000以上	$d > 35$	软的或硬的	螺杆

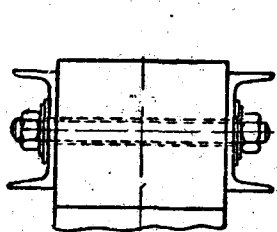


图2-4 用横梁紧夹的铁轭。

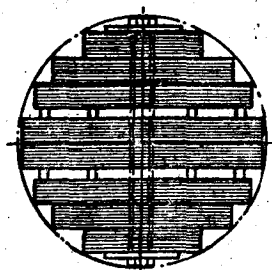


图2-5 用螺杆紧夹的铁柱。

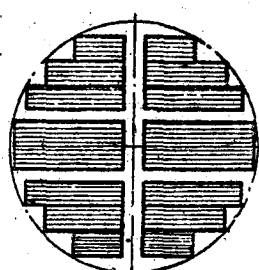


图2-6 铁柱截面。

B) 铁柱及铁轭的冷却油道: 直径小于 35 厘米的铁柱通常依靠其四周的冷却面散热。当直径大于 35 厘米时, 铁柱中间须加冷却油道以利散热。在近代变压器中冷却油道的宽度及数目示于表 2-4。

表2-4 近代变压器铁柱中的纵向冷却油道的宽度及数目

a) 油浸变压器

每柱容量 P'' , 仟伏安	1000以下	1000~1400	1400~3300	3300~6700	6700~10000	10000~20000	20000以上	
铁柱直径 d , 厘米	35以下	35~39	39~47	47~59	59~66	66~78	78~94	94~100
冷却油道数 n_k	—	1	2	3	4	5	6	7
油道宽 b_k , 厘米	—	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

6) 干式变压器

每柱容量 P'' , 仟伏安	60以下	60~200	200~300
铁柱直径 d , 厘米	20以下	20~25	25~30
油道数	—	—	2
油道宽 b_k , 厘米	—	2.0	2.0

附注: 假使铁柱中有一纵向冷却油道(其宽度通常为1.2厘米), 则根据上表找出的纵向冷却油道数 n_k 应减少一个。

在铁轭中亦有横向冷却油道。在铁柱中除横向油道外亦可设置纵向油道, 如图 2-6 所示, 但油道数通常不超过一个。

r) 空间填充系数: 由于设置了冷却油道, 并且由于须留出余地给螺母等以便夹紧铁

柱，鉄柱的空間填充系数 k_{kp} ，就减少了。空間填充系数等于梯阶形截面面积 Π_{ϕ} 和外接圓圓面积之比。

初步計算时，鉄柱的空間填充系数可參看表2-5。冷却油道对于空間填充系数的影响可參看表2-5中的附注。这只是初步的計算，真正的 k_{kp} 应按照实际尺寸計算之。

表2-5 鉄芯柱的空間填充系数 k_{kp}

級 数 k_{kp}	鉄 芯 柱 用 楔 子 紧 夹						鉄 芯 柱 用 螺 杆 紧 夹			
	1	2	3	4	5	6	6	7	8	9
	0.637	0.787	0.851	0.886	0.910	0.930	0.92	0.93	0.94	0.95

附注：1. 当設置冷却油道时，每一橫向油道使 k_{kp} 减少0.015，纵向油道使 k_{kp} 减少0.020。

2. 在干式变压器中， k_{kp} 的减少数值按公式 $0.015 \frac{b_{K.B}}{b_{K.M}}$ 或 $0.02 \frac{b_{K.B}}{b_{K.M}}$ 决定，这里 $b_{K.B}$ 及 $b_{K.M}$ 为相应的空气道及油道的寬度。

2-3 鋼材牌号及片間絕緣的选择

变压器鉄芯的材料一般都采用含硅量較高的硅鋼片。在苏联采用的有牌号为 $\Theta 41$ 及 $\Theta 42$ 的热軋鋼及牌号为 $\Theta 310$ 及 $\Theta 320$ 的冷軋鋼，此种鋼材的主要特性数据可參看表2-6。

表2-6 变压器用硅鋼片的基本性能

牌 号	硅鋼片厚度， 毫米	磁場强度为25安匝/ 厘米时，磁通密度 不小于，高斯	比 耗， 瓦/公斤		硅鋼片长及寬，毫 米×毫米
			$B = 10000$ 高斯	$B = 15000$ 高斯	
$\Theta 41$	0.35	14400	1.3	3.2	750×1500
	0.50	14400	1.6	3.6	750×1500
$\Theta 42$	0.35	14400	1.2	2.9	750×1500
	0.50	14400	1.45	3.3	750×1500
$\Theta 310$	0.35	17000	1.0	2.2	180—240×1500 及
	0.50	17000	1.25	2.85	
$\Theta 320$	0.35	18000	0.9	2.0	600×1500
	0.50	18000	1.2	2.65	

$\Theta 310$ 及 $\Theta 320$ 品质較优，但价格較貴。各种硅鋼片的价格比示于表2-7。表中以1公斤重的 $\Theta 42$ -0.5毫米的硅鋼片价格为单位（100%）。

表2-7 各种硅鋼片的价格比

牌 号	$\Theta 41$		$\Theta 42$		$\Theta 310$		$\Theta 320$	
	0.5	0.35	0.5	0.35	0.5	0.35	0.5	0.35
价格比	84.7	100.4	100	114	127	140.2	142	156.5

采用单价貴的硅鋼片并不足以說明設計出来的变压器一定价格昂貴，因为其重量較輕。反过来说，采用单价便宜的硅鋼片并不足以說明設計出来的变压器价格一定便宜。这可于表2-8中看到。

表2-8 当采用不同种类的硅鋼片时, 鋼鉄重量的比例、空載損耗的比例、及有效材料的价格比

牌 号	銅 重	鉄 重	空 載 損 耗	有效材料价格比
342-0.5毫米($B_c=14500$ 高斯)	100	100	100	100
310-0.5毫米($B_c=16500$ 高斯)	96.3	81.2	101.4	99.7
320-0.5毫米($B_c=16500$ 高斯)	94.7	82.5	95.9	106.5

采用厚度为0.35毫米的硅鋼片亦不能节省材料, 但空載損耗可显著减低, 价格則較貴(參看表2-10)。

設計者的任务就在于适当地選擇材料。当需要得出最便宜的变压器而不在乎其重量的輕重, 則应选用牌号 342 及 341。当需要得出空載損耗小、重量輕的变压器而不在乎其价格的貴賤, 則应选用牌号 310 及 320。

硅鋼片的絕緣通常采用特制的絕緣紙或絕緣漆, 絕緣漆的优点是: 絕緣层較薄, 填充系数較大, 較易导热, 耐溫較高, 但价格較貴。在苏联变压器功率 $P \geq 1800$ 仟伏安时, 一般采用絕緣漆作为片間絕緣。在小容量的变压器中, 一般采用紙絕緣。在国内一般都采用絕緣漆, 亦有采用瓷粉。

填充系数 $k_3 = \frac{\pi_c}{\pi_\phi}$ 等于鉄芯柱 (或鉄軛) 的純鉄截面面积 π_c 和阶梯形截面面积之比。所以

鉄軛或鉄柱的总填充系数

$$k_c = k_{\kappa p} k_{30} \quad (2-7)$$

k_3 的数值示于表 2-9。

表2-9 填充系数 k_3

硅鋼片厚度, 毫米	片 間 絕 緣	
	紙	漆
0.35	0.85	0.91
0.5	0.875	0.92

表2-10 $\delta = 0.5$ 毫米及 $\delta = 0.35$ 毫米的硅鋼片比較表

	牌 号	$B=15000$ 高斯的比耗 瓦/公斤	单 价 比	填充系数 k_3	硅鋼片張数 之 比	硅鋼片絕緣費 用 之 比
硅鋼片 $\delta = 0.35$ 毫 米	341	3.2	100.4	0.85~0.91	1.39	1.43
	342	2.9	114			
	310	2.2	140.2			
	320	2.0	156.5			
硅鋼片 $\delta = 0.5$ 毫 米	341	3.6	84.7	0.875~0.92	1.00	1.00
	342	3.3	100			
	310	2.85	127			
	320	2.65	142			