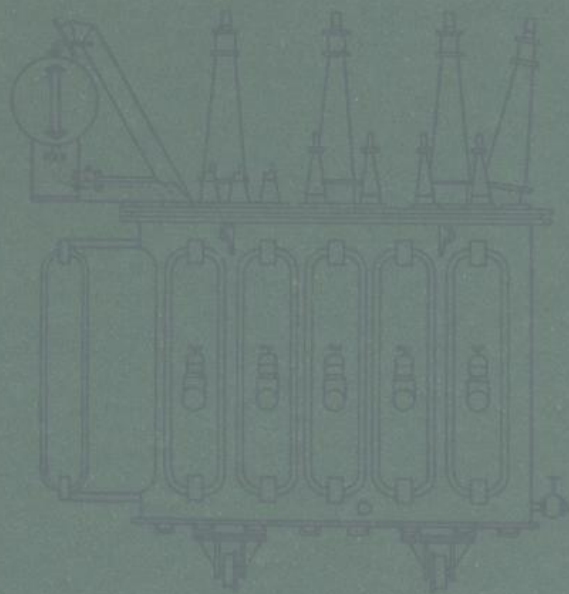


变压器结构设计

〔苏〕A·B·沙波日尼科夫著



机械工业出版社

73.26
242

变压器结构设计

〔苏〕A·B·沙波日尼科夫著

第一机械工业部变压器研究所译

24484/22

机械工业出版社

本书阐述了电力变压器结构设计原理，叙述了变压器部件、组件和零件的结构设计方法，介绍了不同容量、不同电压的现代变压器结构。书中列举了结构设计实例，并提供了结构设计所必需的参考资料。

本书主要的读者对象是工厂的工程技术人员。但是本书也可以作为高等院校和中等专业学校学生进行课程设计及毕业设计的参考书。

本书根据苏联动力出版社1959年第二版修订本译出。

А. В. Сапожников

КОНСТРУИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1959

(根据苏联国立动力出版社一九五九年第二版译出)

* * *

变 压 器 结 构 设 计

[苏]А·В·沙波日尼科夫著

第一机械工业部变压器研究所译

(根据中国工业出版社纸型重印)

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同 141 号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 21 · 插页 2 · 字数 485 千字

1965 年 11 月北京新一版 · 1965 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,500 · 定价(科六) 3.20 元

*

统一书号: 15033 · 3556

12190

序 言

“变压器結構設計”一书的第一版主要是作为教学参考书，供中等技术学校电工专业教学参考用的。为使它适用于生产，即服务于制造厂和运行部門，书的第一版中亦包括了一些篇幅不大的补充材料。

許多讀者，其中包括国外讀者(本书已在中华人民共和国出版)的反映說明，本书不仅广泛地应用在生产上，而且就作为参考书來說，也不仅限于中等技术学校电工专业使用，在高等学校也使用了。讀者們希望本书能够再版。考虑到这些情况，作者彻底的进行了改写工作。第二版主要的讀者对象是变压器制造厂以及运行部門的工程技术人员。但是，第二版亦可作为中等技术学校和高等院校电工专业学生进行課程設計和毕业設計的参考书。

本书中較充分的討論了6~110千伏級一般用途的电力变压器；关于更高电压的結構写的材料有限，主要是滿足教学的要求；在特种变压器方面列举了电炉变压器結構上的一些特种組件的数据。在这一版中对变比改变的綫卷討論还仅限在无載調压的变压器。至于有載調压問題还没有涉及到。

在工厂和教学實踐中，变压器計算和結構設計是有一定的区别。因此本书不来研究綫卷、鉄心和油箱温升的計算及綫卷纵絕緣的選擇。在本书第二版中对鉄心承受短路应力紧固件的計算論述得較詳細，而对綫卷元件的敘述較簡單。由于变压器計算参考文献中对綫卷結構闡述得不够清楚，因此对綫卷結構的敘述就多些。目前还没有变压器生产工艺的书籍，本书第二版中包括了一些研究結構設計問題时所必需的工艺方面的材料。

这本书是在对变压器正在进行結構改型，大大改进变压器技术經濟指标时写的。这里談的都是現有的情况，但也有許多地方談到結構有了很大改变的情况。現在改型的巨大工作尚未結束，新結構和工艺过程还不够完善，并且还没有在运行中經過足够的考驗，因此还需要考虑許多运行着的旧結構的变压器。根据这种情况，新旧結構都要研究。本书第二版中列举了旧結構組件的結構設計实例，这是完全合适的。书中也对苏联之外其他各国变压器制造业技术的先进經驗予以介紹。

作者根据苏联动力工业发展情况和苏联变压器的改进任务，对苏联变压器的新旧結構及国外变压器进行了評論。

在第一版中以某些旧結構圖紙和圖解來說明苏联变压器制造业的发展情况，在第二版中几乎全部略去，补充了新的資料。如果需要参考旧的結構，就必須参考本书的第一版。

本书的第一章討論了現代变压器結構改进的情况及其发展远景。这一章是概括性的材料，对各方面的問題都涉及到了。对变压器組件更詳細的討論分別在各个章节里敘述。在附录中除了变压器标准組件参考数据之外，也敘述了作者拟定的工厂初步設計和毕业設計时估算变压器重量、材料消耗和变压器成本的資料。

从第一版的反映意见当中，希望本书的材料再广泛一些，作者竭力考虑这些意见，但实现这些建议要大大地增加篇幅，所以这些意见还未能完全满足。

第一版所采用的关于变压器结构设计的术语，鉴于它本身的正确性，在第二版中几乎完全予以保留。

作者欢迎对本书提出批评和指正，以及改进的意见。

作 者

Y1480

目次

序言

緒 論

1. 在現代电力系統中變壓器的採用 1
2. 蘇聯的變壓器製造業 2
3. 結構設計師的任務 結構設計的步驟及方法 5
4. 採用材料 重量計算 螺栓連接 機械強度
計算 公差 塗漆 鍍層 8
5. 某些結構元件 13
6. 術語、符號及縮寫 14

第一章 變壓器的結構型式 蘇聯變 壓器結構的發展情況

- 1-1 變壓器的結構型式 15
- 1-2 變壓器結構的發展情況 16
- 1-3 殼式變壓器 27

第二章 鐵 心

- 2-1 概述 30
- 2-2 硅鋼片及其絕緣 30
- 2-3 鐵心結構 多框鐵心 32
- 2-4 心柱截面 37
- 2-5 鐵軛截面 40
- 2-6 迭片尺寸及迭片數量的計算 鐵心硅鋼片
的套裁及其重量計算 42
- 2-7 心柱的夾緊 44
- 2-8 鐵軛的夾緊 鐵軛夾件 綫卷軸向
夾緊裝置 48
- 2-9 鐵軛夾件和綫卷壓板機械強度的計算 55
- 2-10 器身的起吊及其在油箱中的安裝 63
- 2-11 鐵軛夾件的設計實例 66
- 2-12 鐵心絕緣 67
- 2-13 鐵心接地 69
- 2-14 關於鐵心製造工藝過程的概述 71
- 2-15 “卷”鐵心 73
- 2-16 輻射式鐵心 74

第三章 變壓器的絕緣

- 3-1 概述 76
- 3-2 變壓器綫卷綫端的過電壓 77
- 3-3 綫卷內的電磁振蕩 78
- 3-4 油浸變壓器內部絕緣的耐壓強度 86
- 3-5 外部(空氣)絕緣的耐壓強度 91
- 3-6 沖擊系數 92

- 3-7 絕緣的試驗 92
- 3-8 絕緣的計算 95

第四章 綫 卷

- 4-1 概述 97
- 4-2 綫匝的繞向 98
- 4-3 并聯導綫的換位 99
- 4-4 綫卷聯結圖 100
- 4-5 綫卷導綫 103
- 4-6 綫卷的型式及其製造 103
- 4-7 綫卷製造工藝的幾個問題 126
- 4-8 油隔板主絕緣 127
- 4-9 6~35千伏綫卷的主絕緣 130
- 4-10 110~150千伏綫卷的主絕緣 132
- 4-11 220 千伏綫卷的主絕緣 135
- 4-12 綫卷輻向緊固 135
- 4-13 綫卷軸向緊固 端絕緣零件 138
- 4-14 內部綫卷引出綫的引出 143
- 4-15 綫卷的機械強度計算 145
- 4-16 綫卷絕緣結構計算實例 146
- 4-17 關於絕緣件的製造
和綫卷在鐵心上裝配的簡述 147
- 4-18 自耦變壓器和大容量高壓變壓器的綫卷 148
- 4-19 高壓多層圓筒式綫卷的絕緣結構 149
- 4-20 電爐變壓器交錯式綫卷的主絕緣 150

第五章 分接開關

- 5-1 概述 152
- 5-2 分接開關的聯結圖 153
- 5-3 分接開關的觸頭 153
- 5-4 分接開關絕緣 157
- 5-5 分接開關的固定裝置和操動機構 158
- 5-6 1~3類變壓器分接開關 160
- 5-7 四類變壓器的分接開關 166
- 5-8 從前所採用的分接開關型式 172

第六章 引 綫

- 6-1 概述 173
- 6-2 引綫的型式及其應用 174
- 6-3 導綫截面的選擇 174
- 6-4 引綫的連接 176
- 6-5 引綫的電感 180
- 6-6 引綫絕緣 181
- 6-7 引綫的緊固 188

- 6-8 引綫的装配 器身在油箱中的布置 引綫
连接的結構 191
- 6-9 1~4类变压器的引綫 195

第七章 套管及其在箱盖上的布置

- 7-1 概述 197
- 7-2 套管的絕緣結構 197
- 7-3 套管的負載电流 35千伏級以下套管导电
杆的尺寸 200
- 7-4 套管电流的磁場 金属罩和法兰的材料
联合法兰的应用 200
- 7-5 35千伏級及以下套管的結構 202
- 7-6 110 千伏級及以上套管的結構 205
- 7-7 銅排式引出綫座及管式引出綫座 209
- 7-8 套管在变压器箱盖上的布置 空气絕緣
距离 210

第八章 变压器油箱及冷却装置

- 8-1 概述 214
- 8-2 油箱的截面形状和内部尺寸 216
- 8-3 油箱的主要部分: 箱壁 箱底 上箱沿
箱盖 217
- 8-4 小型变压器的油箱 221
- 8-5 管式油箱 222
- 8-6 具有散热器的油箱 224
- 8-7 散热器 229
- 8-8 部件在箱盖上的固定 233
- 8-9 滾輪小車 234
- 8-10 起吊装置 240
- 8-11 油箱的焊接 243
- 8-12 油箱机械强度的計算 246
- 8-13 “分节油箱” 256
- 8-14 散热器的吹风冷却 257
- 8-15 油的水冷却 260
- 8-16 装在油箱上的冷却器 264
- 8-17 輔助部分、附件与密封装置 265
- 8-18 油箱結構設計实例 269
- 8-19 波形油箱 271

第九章 儲油柜

- 9-1 儲油柜的用途及应用范围 273
- 9-2 儲油柜的容积 油面 273
- 9-3 儲油柜的結構 274
- 9-4 油面的檢查 279

- 9-5 儲油柜制造工艺的某些特点 282
- 9-6 完善的油保护装置 282

第十章 檢查和保护装置

- 10-1 装置的应用范围 284
- 10-2 測溫装置 284
- 10-3 气体继电器 285
- 10-4 安全气道(排气管) 287
- 10-5 击穿保險器 289

第十一章 变压器的运输 移动式变压器

- 11-1 概述 291
- 11-2 一般平車和运输車铁路允許外限 291
- 11-3 变压器的尺寸符合于铁路允許外限 293
- 11-4 油箱注油 运输重量 294
- 11-5 运输时变压器的固定装置 294
- 11-6 包装 打鉛印 297
- 11-7 移动式变压器 297

第十二章 干式电力变压器

- 12-1 概述 299
- 12-2 鉄心 300
- 12-3 綫卷 300
- 12-4 引綫和套管 303
- 12-5 外壳和变压器装置 305

附 录

- 1 油浸电力变压器采用的主要材料 307
- 2 螺栓和螺杆按螺紋內徑的計算截面 309
- 3 1~3类变压器鉄軛的紧固零件 310
- 4 吊运器身的吊环及吊螺杆 311
- 5 鉄心迭片尺寸公差 311
- 6 引綫一导綫截面的选择 312
- 7 35千伏級以下的套管 313
- 8 油箱零件 319
- 9 活門 油閥 閘門 油塞 321
- 10 吸湿器 低油面继电器 323
- 11 檢查及保护装置 323
- 12 变压器器身重量和体积、鉄心紧固件和絕緣
紙板重量的近似确定方法 325
- 13 电力变压器成本的估算 326
- 14 变压器組件的制造工时 326
- 15 电力变压器基本型号概述 327
- 16 現有系列电力变压器結構参考数据 328
- 参考文献 329

緒 論

1. 在現代電力系統中變壓器的採用

在1890年多里奧-多布羅沃爾斯基 (М. О. Доливо-Добровольский) 創造和採用了一台三相變壓器來輸送交流電能。這樣，才出現了變壓器的技術，並從那時開始才發展起來的。變壓器技術發展的特徵是單台電壓及容量的不斷提高。

1907年製造了一台110千伏電壓的變壓器，在1920年才掌握220千伏的變壓器生產。1952年，有一批380千伏電壓的變壓器在瑞典投入運轉。1956年4月裝有420千伏變壓器的以列寧命名的伏爾加水电站—莫斯科的輸電線路開始運行。1958年製造了500千伏工作電壓的變壓器。

1900年變壓器的單台最大容量為5000千伏安，電壓為60千伏。現已製造出三相雙卷大型變壓器，其容量為360兆伏安，電壓為138千伏。安裝在伏爾加水电站上的升壓三卷變壓器組，其電壓為13.8/121/420千伏，容量為 3×123.5 兆伏安。

現代變壓器製造業是電力工業很重要的部門。它在動力工業發展中起着很大的作用。

電力變壓器是作輸電和配電之用。通過它們可以將電壓升高到遠距離輸電所必需的110~500千伏電壓，將電壓逐級降到電能用戶所需的電壓，以及將網絡聯接起來。在現代動力系統中，變壓器的安裝總容量約等於電站發電機容量的六倍。在部分電力變壓器中，已實現了有載調壓(改變變壓比)，其中包括自動調壓。

在工業、交通運輸和基本建設等方面，採用着許許多多各種型式的特型電力變壓器。

如：電爐、水銀整流器、電焊接裝置供電用，以及大型電動機起動用等特型變壓器。

除一般的電力變壓器之外，還採用自耦變壓器——電力自耦變壓器、調壓自耦變壓器和其他自耦變壓器，以及串聯聯接的電力變壓器——叫做加壓變壓器。

測量電流和電壓使用儀用互感器。為了獲得高壓設備的試驗和研究所需要的高電壓採用試驗變壓器。

各種型式的電抗器：補償高壓輸電線路電容的限流電抗器、接地電抗器、消弧線卷及其他相似的设备，也都屬於變壓器製造業的範圍。

在變壓器製造業中，占主要地位的是一般用途的油浸電力變壓器，即輸配電網絡中所採用的油浸升壓和降壓變壓器。其產品種類包括有三相和單相、兩線卷和三線卷，容量由1個千伏安到幾萬或幾十萬千伏安，電壓由100伏到500千伏的各種型式變壓器。變壓器的整體結構、外形尺寸、單獨部件及零件都隨着變壓器容量、電壓、相數和線卷數及安裝條件等不同而有所改變。容量不大的變壓器，重量只有幾十和幾百公斤，而大型變壓器的重量却有100~200噸或更重一些。

高壓大型變壓器的結構很複雜，它具有強大的電磁場。其元件及組件要承受相當大的機械負荷和高電壓的作用。在鐵心和線卷中放出大量的熱，所以應該用油來強制冷卻。變壓器的結構也包括油冷卻裝置以及許多附加的電氣和機械零件和裝置。變壓器結構的運行可靠性，對不間斷的電力供應來說有着重要的意義。結構對運輸和安裝條件的適應程度決定着變壓器的安裝工作量和費用的大小。結構對維

护条件的适应程度影响着变压器的维护费用。

2. 苏联的变压器制造业

在1928年以古比雪夫命名的莫斯科变压器厂投入了生产。从此以后,变压器专业化生产就开始了。从这时起,苏联变压器制造业开始发

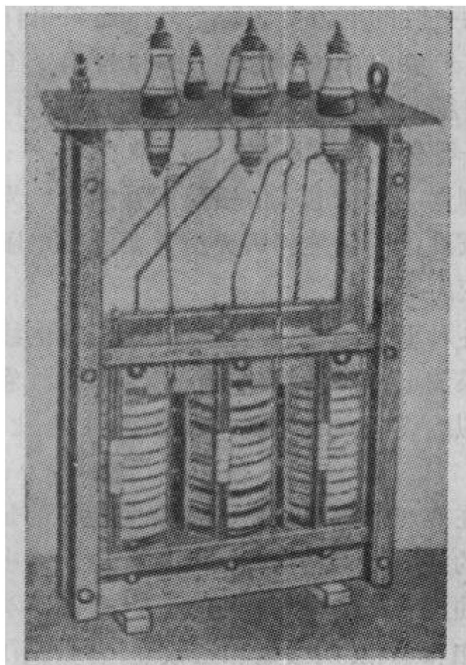


图 B-1 电压为 6 千伏, 容量为 100 千伏安变压器的器身——莫斯科变压器厂出产

展起来。经过一段时间, 莫斯科变压器厂在产量和质量指标方面都超过了“电力”、“狄那莫”及“哈尔科夫”等电机制造厂。从1928年起, 这些厂就不生产变压器了。在1931年莫斯科变压器厂生产了 110 千伏的电力变压器, 二年以后, 在1933年制造了 220 千伏的变压器。1955 年制造了电压为 400 千伏级到 500 千伏级的变压器, 它是供以列宁命名的伏尔加水电站—莫斯科输电线路应用的(见图 B-2, B-3, B-4)。

在战前时期达到的最大单位容量如下: 110 千伏, 容量为 31.5 兆伏安三相双线卷和三线卷变压器; 220 千伏, 容量为 40 兆伏安单相两线卷和三线卷的变压器。

三十年代初生产了特型变压器: 电炉、水银整流器用的及其他用途的特型变压器的生产。1934年采用了有载调压装置。现有这种有载调压装置, 在很大的容量和电压范围内得到了推广。

除电力变压器外, 各种型式电抗器的电压和容量也增加了。1955年生产了一批 400 千伏的电抗器, 用来补偿伏尔加水电站—莫斯科输电线路的电容电流。这些单相电抗器组合容量为 150 兆伏安。1958年又生产了 500 千伏的这种型式电抗器, 三相组合容量为 165 兆伏安。

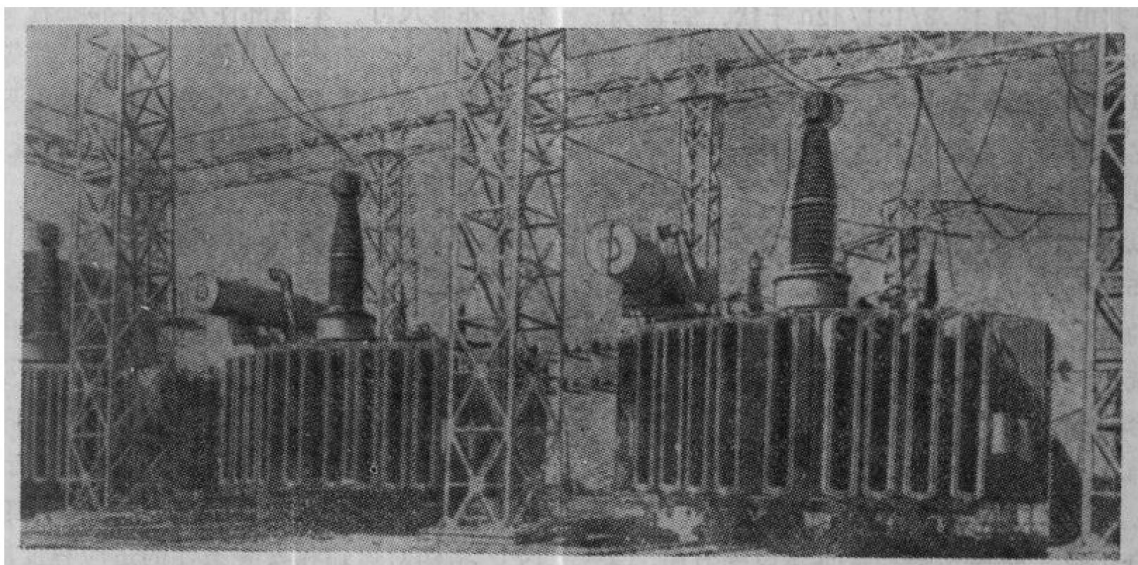


图 B-2 400 千伏变压器。1955 年 11 月安装在伏尔加水电站—莫斯科输电线路收端的容量为 3×90 兆伏安电压为 410/115/11 千伏的单相降压变压器组

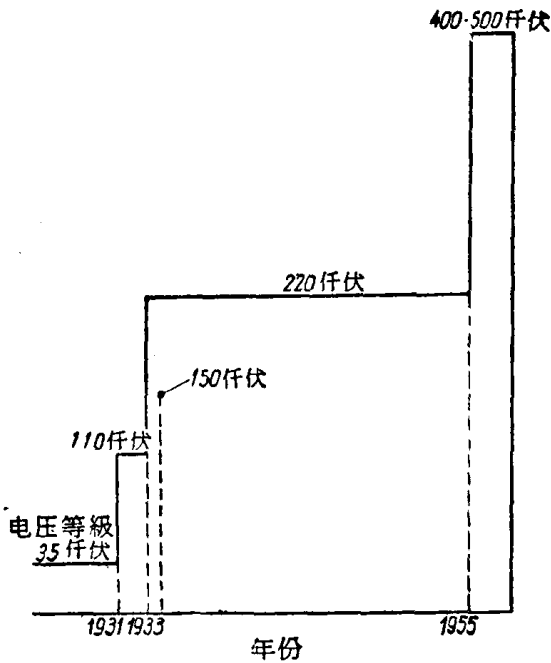


图 B-3 苏联变压器制造业的发展。电力变压器电压增长情况

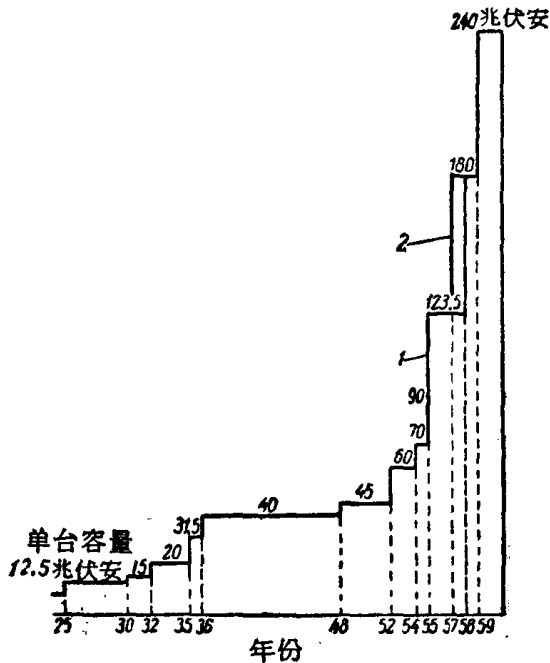


图 B-4 苏联变压器制造业的发展。电力变压器和自耦变压器的单台容量的增长情况
1—变压器；2—自耦变压器。

同时，还制造了一批作为 110 千伏线路电容补偿用的三相电抗器。单台容量为 90 兆伏安。

测量用电压互感器生产发展的特征是：

1933 年生产 110 千伏级的；1937 年为 220 千伏级；1955 年为 400 千伏级和 1958 年为 500 千伏级。

在 1928~1933 年，即第一个五年计划到第二个五年计划初的期间，变压器生产量的增长基本上满足了要求。220 千伏级变压器的生产，包括输电线路的全部电压范围。在这个时期建立了 6~110 千伏电压级的电力变压器的系列，这个系列，材料消耗量小，制造工时少。这都有助于完成变压器生产数量增长的任务。

在伟大卫国战争年代里，尽管当时条件非常困难，但变压器制造技术仍有一些进展。在战时的条件下，完成了在 110~220 千伏线卷上采用电容保护的措施，因而，提高了变压器的防雷性能。但技术发展总的速度急剧下降了，生产量也减少了。

在战后的第一个五年计划期间，苏联的变压器制造业在数量上已经达到了战前的水平，然后，更远远的超过了这个水平。同时，也提高了技术水平。如改进了大型变压器的线卷装配——采用了钢压板作为变压器的轴向压紧件、建立了 220 千伏电压级新的线卷型式、改善了油浸变压器的吹风冷却系统及其他。但是苏联变压器制造业技术的发展仍然落后于数量的增长。

机器制造业的缺点在颇大程度上是与变压器制造业有关的。不能不承认，我们在变压器单台极限容量(图 B-5)、重量指标、外形尺寸、效率、大型变压器沿铁路运输的适合性(变压器的大量拆卸工作都是为了适应铁路运输外限)以及发展有载调压等方面都是落后的。

苏联变压器制造业开展了改进现有型式和

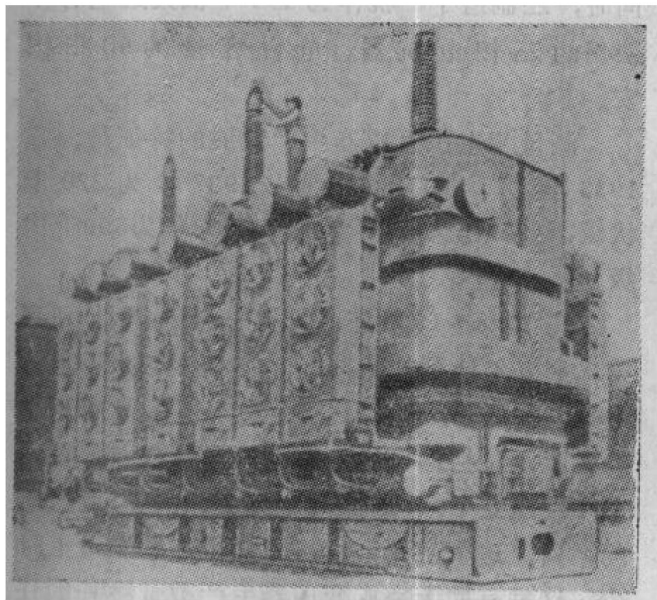


图 B-5 315兆伏安23/161千伏三相双卷升压
变压器(美国GE公司)

建立新型变压器的研究、设计和生产工作。

一般用途的变压器改型特点是下列技术指标和结构元件的改变:

1. 采用冷压硅钢片制做铁心, 可大大地提高磁通密度(从14~15到16~17千高斯)并且因此可以减少铁心的尺寸、器身的重量及降低损耗(总损耗降低20%~25%)。为了得到较好的技术经济指标, 应该采用厚为0.35毫米的成卷的冷压硅钢片; 铁心结构和它的工艺过程必须适合这种钢片的特点;

2. 对110~220千伏级线卷, 采用了比以前低的新的交流试验电压。试验电压的降低可以使铁心硅钢片重量和线卷铜重降低5%左右;

3. 在研究的基础上, 减小了110千伏以上电压的线卷到箱壁的绝缘距离以及其他的绝缘距离; 对于大型变压器采用了适形式油箱, 最大限度的缩小了箱壁到铁心、线卷和引线的距离。这就允许缩小油箱的尺寸、降低油重、变压器总重和运输重量。容易使变压器符合铁路外限尺寸, 因而减轻了运输时拆卸工作量; 能大大地增加变压器极限容量, 并使变压器能够

在本身油箱中带油进行运输等;

4. 由于线卷结构和制造工艺的改进, 提高了变压器的运行可靠性;

5. 改进了变压器的冷却系统: 在油箱上采用扁油管, 制造了比以前更紧凑的自然油冷却的散热器; 提高了散热器的吹风效率; 对于大型变压器, 采用了强油循环风冷式的新型散热器装置。因此大大地降低了油箱重量和油的重量, 也缩小了外型尺寸;

6. 对变压器器身采用了牢固的紧固方法。这样, 当变压运输到安装工地以后, 就不再需要进行吊心检查;

7. 减少变压器在安装地点的安装工作量(为准备投入运行所必需的), 可以缩小变电所里变压器修理间的尺寸并简化了修理间的设备;

8. 降低了油的温升, 改进了油的氧化防御措施及采取其他改善变压器运行条件的措施办法。使结构(下分节油箱、可拆卸套管)能在工厂外进行修理等等。

变压器厂设计和推行了6~10千伏级的1~2类新系列变压器。1958年制造了一台电压为110千伏, 容量为20000千伏安四类变压器新系列(图B-6)。设计工作包括35千伏级1~2类, 110, 150和220千伏级四类变压器新系列, 其中包括自耦变压器。设计了容量到240000千伏安电压为110和220千伏的新系列的电力变压器和自耦变压器。这系列中, 一部分电力变压器在1958年已经生产了。所生产的变压器在本身的油箱中进行运输(分节油箱)。对于500千伏级的变压器和自耦变压器也采用在工作油箱中运输的方式。例如, 中压线卷为110千伏的90000千伏安的单相降压自耦变压器和135000千伏安单相双线卷升压变压器就是如此。扩大了有载调压的范围; 三类变压器采用了有载调压, 推行自动调压; 设计110千伏绝缘级有载调压装置等。制造了第一批供电气化铁道备用的110千伏级移动式变压器。作出

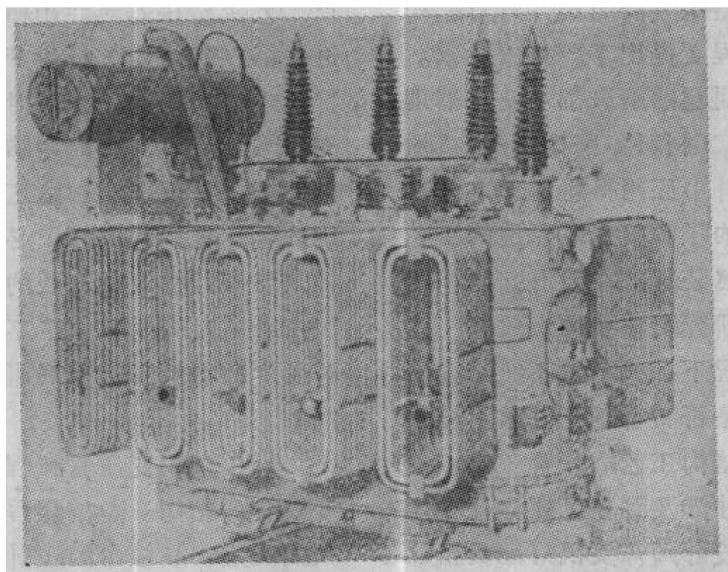


图 B-6 1958年出产的电压为110千伏，容量为20000千伏安
新系列三相三卷变压器模型

了供交流电机车用的25千伏特型变压器。设计了带有载调压装置的新系列大型电炉变压器。掌握了充不燃性液体——苏伏油的电力变压器及其他。

变压器制造者还必须提高变压器质量指标。电站发电机的单台容量应大大增加，同样个别变电站的容量也不断增长。因此必须最大程度的提高变压器单台极限容量；要制造容量到450000千伏安的三相变压器及组合容量到900000千伏安的单相自耦变压器等等。近几年内应该制造出一批330千伏级三相变压器和自耦变压器。建立500千伏变压器的产品系列，准备试制更高电压级约600~800千伏的产品。

电力系统和电网间连接的发展，要求广泛采用有载调压装置；特别是需要设计比现有容量更大、绝缘水平更高，到220千伏级的有载调压装置。大力发展不同用途的特型变压器在变压器生产量成倍增加的情况下，降低材料消耗、提高效率对提高变压器的经济性有着更大的意义。在这方面，最重要任务之一就是广泛采用冷压硅钢片。

在变压器制造业者面前的重大任务是，除

科学研究工作和与变压器计算方面有关的设计工作之外，起着重要作用的是发展和改进现有变压器的结构。

设计的研究工作很重要。在设计铁心结构时，要使结构适应于冷压硅钢片的特性，并要解决大型变压器整装运输的问题。变压器经济性的提高及运行指标的改善在颇大程度上决定于结构设计师的工作。

3. 結構設計師的任务 結構設計的步驟及方法

变压器结构设计任务的范围很广。结构应该完全根据变压器计算进行设计，以便实现计算中所确定的电磁、电气的性能和指标。在作结构设计时，必须保证变压器在短路时线卷的动稳定性、热稳定性、必需的电气绝缘强度和各个零部件的机械强度。变压器的整体结构质量高，才能保证整个变压器运行可靠。变压器所有部件的外形也同样应具有很高的质量。设计变压器时，应考虑尽可能减少安装工地上的装配工作量。变压器的组件和零件结构，必须设计得尽可能减少材料的消耗及制造的工时，以降低变压器的成本。

上述任务决定了結構設計的条件并对結構設計師的素养及熟練程度提出了严格的要求。

每一个結構設計問題的解决都与变压器理論及計算、高压技术、电工材料等密切相关。机械强度的計算在結構設計中应用得也頗为广泛。

設計師應該很好的了解变压器制造的工艺过程、工厂設備及附属装置。在設計新結構的过程中，需要仔細地研究所需要的有关新工艺装备問題。在个别情况下，又不得不通过样品的試制来檢查新結構是否符合工艺要求。結構設計師應該参加这种結構工艺的研究工作。

新結構的采用往往涉及到生产組織及生产經濟性。因此，結構設計師需要很好地具备这方面的知識。

結構設計師應該懂得变压器运输及安装条件及在这方面提出的要求。同时也應該了解变压器的維護条件，因为維護能否方便是取决于变压器某些部件和輔助裝置的結構。

改进現有結構及創造新結構在頗大程度上是以科学研究工作为基础的。結構設計問題的解决是与研究和应用在結構方面所取得的科学研究成果、解决为发展結構所必需的新的理論及实验研究課題分不开的。

为了使工厂結構設計師的工作更有效，結構設計師应同工艺师和生产工人密切合作；必須吸收工艺师来审查在設計前一阶段已拟定的新結構。在多数情况下，为更正确的解决工艺方面的問題，設計師應該征求車間工作人員的意見和研究先进生产者的經驗。

結構的改进和生产工艺的发展，其中包括变压器制造工艺的发展，是两个密切相关的技术发展方面。因此，結構設計師必須注意生产工艺的发展，同时还必須促进生产工艺的发展，以便使工艺发展与变压器改进相配合。

設計師應該很好地了解制造零件和組件的制造工时及变压器所采用的主要材料的价格。

* * *

經驗証明，在結構設計中不可能把所有生

产工艺及变压器零件和組件装配的特点都考虑进去。在新結構进行生产时常常会带来意外情况：或者对結構，或者对工艺过程作某些改变。經過生产实践的考驗，才可以最后判定各部件結構是否适合制造工艺的要求。为了更正确的判定結構的好坏，必須进行运轉試驗。这种試驗有时需要相当长的時間。常常有这样情况，看来对結構只作了不大的修改，但对变压器生产的順利和运行的可靠都起了很大作用。

* * *

学校中的变压器課程設計，是設計其最主要部分的結構。学校課程設計的工作量由教学大綱決定。学校中的設計是在教师的指导下进行。由教师确定設計工作量并向学生指明工作的程序。学生在毕业論文設計中的变压器設計內容，取决于設計題目。結構設計的工作量及程序，也隨其內容而有所改变。工作步驟由毕业論文指导人来規定。

在工厂的变压器結構設計中，要解决各种問題，其一是各种不同額定容量变压器的系列設計。这时要設計变压器各部分的結構，往往也需要建立个别新型的大容量变压器。有时，由于某种原因需要进行現有系列中的一部分产品改型設計。其他設計任务是——現有系列中的某一部分产品或其組件进行改型設計。例如，由于散热器結構改变，而重新設計油箱；或者由于采用了新的分接开关，而重新設計引綫等等。也常需要設計这样的变压器：即与早期生产的变压器有相同額定容量和絕緣等級，但是，需要另一种額定电压和綫卷的连接組等。在此情况下，結構設計就限于綫卷、引綫改变，套管及其他部件在油箱盖上的布置的改变；这时可以不經改变或少改变以前的圖紙来制造鉄心、带散热器油箱和其他有关部件。此外，在工厂設計中还需要解决一些其他問題。

工厂結構設計的程序及方法，是由任务的性质和規模、已完成設計所采用的材料以及現有設計工作的机构等决定的。在这里只能对这

個問題作一般性的說明。

結構的標準化在變壓器結構設計方法中占很重要的地位。工廠的標準化系統，包括大多數的變壓器零件、組件及部件。屬於“標準組件”的有鐵心柱及鐵心的夾緊裝置、散熱器與油箱的連接裝置、滾輪的固定裝置及儲油櫃在箱蓋上的布置等等。屬於“標準部件”的有套管、儲油櫃、安全氣道和所有附件等等。

標準組件和部件的結構設計，通常是與變壓器的其他組件和部件的結構設計分別進行。專業化的結構設計工作包括的不是一種組件，而是許多同類型的組件，例如，鐵心柱的夾緊裝置就適用於3~4類的所有變壓器（見SB-6）；同時，專業化的結構設計包括的也不是一個儲油櫃，而是包括裝在各種容量變壓器上的儲油櫃系列及其他等等。

變壓器零件、組件及部件的標準化，使工廠生產車間的產品品種減少。這樣就可以改善生產組織、減少生產裝備和提高勞動生產率。

學生進行課程設計時，只應該採用部分的結構設計標準。根據學習目的，有些在工廠中已採用的標準化的組件、零件及部件，亦應由學生自行設計。書中的參考材料，是工廠標準的一部分，學生在課程設計中可以採用。

結構設計方法的標準化是與結構的標準化緊密相關的。所謂結構設計方法的標準化，就是編著計算結構機械強度及設計絕緣結構等的結構設計手冊。在結構設計手冊中包括由機械強度決定尺寸的标准結構組件。對於這些組件擬出計算機械強度的方法，並編著出典型結構、計算公式和其他必須的說明。統一規定變壓器綫卷、引綫和空氣絕緣等絕緣結構方面的材料。對於標準元件，可在理論和試驗研究的基礎上，擬出選擇絕緣設計尺寸的标准。根據熱研究數據，確定選擇引綫、套管等導電部分尺寸的标准。

工廠標準包括在工作圖紙中尺寸配合公差。

變壓器的結構設計應與計算同時開始。計算參數決定的同時，還要決定主要部件的結構，譬如：鐵心、綫卷和油箱，在計算過程中必須利用很多的設計數據。學校中進行計算所需要的結構數據，主要是從工廠變壓器設計的參考資料中獲取。在工廠設計中變壓器的計算往往與初步的結構設計同時進行。

無論是課程設計或工廠設計，在計算開始時首先要擬定鐵心柱和鐵軛的結構。綫卷的電氣計算的大部分工作也是擬定它的結構。變壓器的熱計算應該根據油箱的初步結構進行，即根據油箱內部尺寸及許多結構元件進行。在設計大容量變壓器時，決定器身外形的鐵心基本尺寸的選擇取決於變壓器能否滿足鐵路運輸外限尺寸的要求。因此，在計算的同時須進行初步的變壓器運輸問題的研究。

在工廠中結構設計的擬定工作根據變壓器的主要部件劃分。結構設計包括綫卷、鐵心、引綫、油箱等的擬定。本書的章次是設計新型變壓器各部件結構的最合適的次序。不能把任一變壓器部件的結構設計，看作是孤立的問題，變壓器每一部件的設計，都是與某些其他部件的結構設計分不開的。本書在各章中已考慮到擬定變壓器各個部件時所需要的互相配合。

在工廠中設計新型大容量變壓器時，是用繪制所謂“布置圖”的方法（鉛稿）來進行。布置圖中以不大的比例繪制一個帶有引綫的器身投影圖，包括器身與油箱和套管的配合在內，此外，應繪制器身的截面圖，繪制鐵心的各個組件、綫卷、引綫、套管布置、油箱及其組件和有關部分等圖。利用布置圖能夠研究所有部件、零件和確定它們的尺寸。根據布置圖繪制變壓器所有的工作圖。

在工廠中設計中、小容量變壓器時，因其結構不太複雜，在某種程度上減少了預先擬定“布置圖”的工作量。部分組件及其配合處的說明簡圖是在擬制工作圖過程中完成的。簡單的組件圖可不依據說明圖，而按計算的尺寸繪

制出来。上面研究了变压器結構設計的一般方法問題。各个部件的設計方法，将在本书相应的各章中詳加叙述。

4. 采用材料 重量計算 螺栓連接 机械强度計算 公差 涂漆 鍍层

制造变压器所采用的材料

制造变压器所采用的主要材料是鉄心的硅鋼片和綫卷的銅綫或鋁綫，这就是所謂有效材料。此外，还有套管和引綫用的銅綫、結構鋼材、各种絕緣材料、木材及其他。

0.35和0.5毫米厚的高合金热轧或高合金冷轧的硅鋼片作变压器的鉄心。变压器綫卷的導綫可用圓銅綫和扁銅綫，而導綫的絕緣方法各有不同，基本上是用紙絕緣的。

結構材料用得最广的有：M12кп (MCT.2) 号鋼板及M18 (MCT.3) 号鋼板，M18号型钢(角鉄和槽鉄等)和紧固件用鋼；螺杆、螺釘和螺帽主要是用20、A12和M18号鋼制成。对机械强度要求很高的部件采用M21号鋼 (MCT.4) 制成。

为得到不透油的焊缝，宜采用M12кп号鋼板(油浸变压器的油箱、儲油柜和其他部件)；采用M18号鋼板时，可以得到不透油的更佳的高质焊缝。M21号鋼板不宜用来焊接。变压器油箱及冷却器鋼管用08кп或10号鋼制成，这二种鋼可以满足焊管及弯管技术上的要求。

对于变压器的分接开关、有載調压装置及其他許多輔助装置需要不同的特种牌号的鋼，甚至采用黃銅等等。

对于引綫(裸導綫、銅排、電纜)及套管导电部分，其中包括螺帽和墊圈均采用M1, MTT, MTM 号黃銅和 JC59-1、J62、JK80-3Л 号青銅制成。

变压器中的鑄件系采用鋼、鉄、黃銅、鋁及其他合金(其中包括冷焊及压鑄)。

絕緣材料中以絕緣紙板应用最广，油浸变压器系采用9MII纖維质紙板及布质9MT紙板。

絕緣紙系采用KTH電話紙，K 12電纜紙及“皺紋紙”。

变压器中采用的电木制品有各种尺寸的电木管(TB号和TB/II)、电木筒及A和B号的电木板(TB/II 电木管和B电木板有很高的层向电气强度)。

供油中使用的有A号胶布板及JXM 号耐油絕緣漆布。油浸变压器的螺紋联結处是用特殊抗油橡皮进行密封的。

变压器木件多用山毛榉制成，它在机械强度和耐压强度及其他的要求方面都很合适。对于不太重要的零件，例如器身的墊脚等可采用樺木。

变压器中与油接触的材料应该具有对油的化学惰性；它不应该在油作用下受到破坏，不应该引起油的分解和污垢。在油浸变压器中不允许采用不包絕緣层或不涂漆的銅质零件，因为銅是油氧化的最有效催化剂。油中不应该采用鉛质零件，因为鉛与油反应时，形成氧化鉛和鉛碱(殘渣)。同样也不能采用鋅质零件。一般的橡皮在油中会受到破坏。

对于干式变压器采用有各种不同的耐高温的絕緣材料：玻璃漆布、玻璃胶布板、作綫卷絕緣零件的瓷件及其他。

对在热带条件下工作的变压器所用材料，和充不燃性液体变压器所用材料有特殊的要求。

对于課程設計油浸电力变压器的主要材料种类列入附录1中，以供課程設計使用。在工厂里为了搞好材料供应及改进生产組織起見，有时需要适当地对某些种类加以限制，就是說，可以采用国家标准(ГОСТ)中所規定的一部分种类，而不是全部。例如：OCT10017-39包括下列几种型号的槽鋼：5, 6.5, 8, 10, 12, 14a, 14b, 16a, 16b, 18a, 18b, 20a, 20b, 22a, 22b, 24a, 24b, 24c, 27a, 27b, 27c, 30a, 30b, 30c等。然而在莫斯科变压器厂的标准中只規定上述以斜字体表示的几种。

假如,材料种类限制过严,必然会使材料消耗过分浪费;材料种类采用过多,必然会使材料供应困难、生产組織复杂。

重量計算 材料消耗的确定

結構設計包括变压器各零件、組件及部件的淨重計算。根据制造零件的工艺过程,确定毛坯尺寸。按毛坯尺寸并考虑廢料在內,計算材料必須的重量——毛重(廢料量按标准板料套裁求得)。根据毛重計算制造变压器所消耗的材料成本。在許多机械强度計算中,荷重是由变压器組件及部件的淨重来决定的。鉄心、綫卷、油箱和其他部件及組件的重量(淨重)、器身重及变压器的总重要适应工厂的起重装置。铁路运输平車或元宝車所必需的載重量由运输重量决定。变压器及其部件重量在設計变电站工程及選擇变电站上起重装置时也应该考虑。

决定淨重时,系取零件及标准型钢的名义尺寸、鋼板的名义厚度及平均比重來計算,而不考虑公差。这时所有体积計算方法的簡化及四舍五入的进位方法都該是使重量增加。在計算鉄心的重量时,不考虑迭片上的孔;为了便于計算,对于个别結構单件的計算形状可以較其实际形状簡單一些。小孔,小槽等可以不考虑。

在变压器計算时,鉄心硅鋼片的重量計算如下:即鉄心柱和鉄軛的迭片总体积乘上迭片系数及硅鋼片比重。当硅鋼片的名义厚度为

0.35毫米时,紙絕緣重量采用等于硅鋼片重的1.5%;而当硅鋼片厚为0.5毫米时,則为1%;迭片漆膜絕緣的重量分別相当于0.75%及0.5%。

为正确計算弯曲形状金属零件的重量必須考虑金属的伸长量;計算时需要取零件的展开长度。这个展开长度是用試驗方法对現有弯曲(冲压)工艺过程进行校驗得出的。

变压器中油的体积等于油箱、冷却管、散热器或者冷却器及儲油柜中油体积之和。油箱中的油量等于油箱內部的容积与器身体积之差。在工厂設計中变压器器身体积是根据組成器身的組件图紙明細表來計算。明細表指出零件重量。根据材料种类如:鋼材、銅、絕緣紙板等等求得每一材料的体积,然后相加,求得器身体积。在学校課程設計和工厂初步設計中变压器器身的重量和体积参照附录12所列数据求取近似值。

螺紋联結

在变压器結構中广泛的采用借助螺栓、螺杆、螺絲、木螺杆等可分开的螺紋联結,心柱、鉄軛的夹紧,其輔助零件的紧固,油箱与箱沿的結合,以及散热器与油箱的連接,儲油柜的安装等均采用鋼螺栓和其他有普通螺紋的紧固零件。为了增加大直徑的套管导电螺杆的接触表面,采用公制2号細牙螺紋。对于附件采用公制1和2号細牙螺紋。

不久以前,苏联的某些工厂对变压器的机

英制螺紋	1/2"	5/8"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	2 1/4"	2 1/2"	2 3/4"	3"
公制的基本螺紋	M12	M16	M20	M24	M30	M36	M42	M48	M56	M64	M72	M72
管螺紋	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	2 1/4"	2 1/2"
公制螺紋	1M10×1*	1M14×1.5*	1M16×1.5*	1M20×1.5*	2M27×1.5*	2M33×1.5**	2M42×2**	2M48×2**				

* 用于附件。

** 用于套管导电杆。

械固定零件还采用过英制螺紋，对附件和导电螺杆采用过管(英制)螺紋。在9頁的表中列举的是以前采用的英制螺紋及使用的公制螺紋。

激磁的变压器鉄心，由于过激磁而产生振动。这种振动又被傳到变压器其他的部件上。因此，所有螺紋連結都毫无例外地应防止松动。为此，就必须額外的用普通螺帽、扁螺帽、鎖紧垫圈、彈簧垫圈或鉚冲固定（用于心柱及鉄軛的夹紧螺杆）。

为了在那些不允許装設金属坚固零件的地方紧固引綫及分接开关，須采用木质螺杆和方形螺帽，它們是由山毛榉制成的，带有特殊螺紋(參見§6-7)。螺栓端用綫绳扎住，以防止木螺帽松扣。

机械强度計算

在本书的第一版中已經敘述了苏联变压器制造业所采用的变压器机械强度的計算方法。长期以来一直被广泛的应用着，沒有很大的改变。現在，在对油箱和其他的一部分組件計算方面作了新的考虑。主要是要采用在实验基础上的計算图和允許应力值。已經进行研究的結果表明，结构元件的实际变形，以及金属中实际的最大应力和它們的計算值之間存在有較大的偏差。試驗說明，对于变压器的某一个部件，可以允許很高的局部应力及由其产生的較大剩余变形。这譬如受外力作用的油箱壁（用加强鉄加强的）平面部分就是如此。对于較薄的鋼板(箱壁)具有較大的局部应力，产生剩余变形不是很危险的；在重复施加負荷时变形程度不会加大。因此，它不能作为结构机械强度不够的标志。在其他情况下，例如：对箱沿就必须很严格的限制其变形(撓度)。然而在保留某一变形值的标准时，必須根据那些闡明計算图的試驗研究結果改变某些計算公式。这种計算方法的改变，照例将降低材料消耗。但是在个别情况下，这种改变也会增加零件的尺寸。否則，正如研究結果指出的一样，会产生剩余

变形。在外力作用下，它主要与作用在大型变压器油箱的某些部件上的負荷有关。

为了得到更正确的变压器机械强度計算方法，需要有充分的时间；它取决于大量的試驗研究及理論分析工作。在写这本书的时候，仅仅作了部分的工作。問題的敘述会有某些不一致地方。有的是按旧方法，有的是按新方法。这一点尤其会使应力的允許值出現某些不一致的地方。因为按个别的旧公式得出金属应力值在某种程度上是有条件性的。

在根据允許应力計算时，对于M12及M12KH基本牌号的鋼來說，特性数据就是拉应力(压缩应力、弯曲应力)。对于能比較正确确定的不变的作用力，在新公式中相应取为1600和1400公斤/厘米²。

对于某些变压器及部件的起吊零件可采用較低的試驗应力。主要是考虑到用吊車吊起变压器及其部件时，速度不很大，因此作用在起吊装备上的負荷，实际上仅等于負載的重量。

受短路軸向力作用的鉄心的鋼夹件以及綫卷的夹件，其机械强度是根据下面的观点来考虑的。假設力不是急剧加在所計算的零件上而是“慢慢”的，也就是說不产生动力变形。这个假設符合于实际情况，鉄心的固定装置是用很多相当厚的絕緣紙板零件与綫卷分开的；絕緣紙板零件又放在綫卷单独綫段之間。綫卷电磁作用产生的机械力，由一个綫段傳到另一綫段，再由边缘綫段傳到夹件。傳遞的速度与絕緣零件的压力有关，同时需要有一定时间。

在計算鉄心及綫卷的夹件的短路机械力时，必須限制允許应力的增加，否則，常常会得到实际不能采用的部件尺寸。如果計算时取最大可能的短路力，那么 $[\sigma]_p$ 、 $[\sigma]_{c.k.}$ 及 $[\sigma]_a$ 可取变动的极限值。在此可以认为，施加在零件上的全部計算負荷就特別小。对于这种极限情况也可允許有不大的剩余变形。

允許剪应力，一般說来，取为拉（压缩、弯曲）应力容許值的60~65%。