

电源变压器和滤波阻流圈 典型计算参考資料

编制说明和试验报告

四机部变压器工作组

1970年

毛主席语录

我们是主张自力更生的。我们希望有外援，但是我们不能依赖它，我们依靠自己的努力，依靠全体军民的创造力。

一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。这就是马克思主义的认识论，就是辩证唯物论的认识论。

说 明

在毛主席“独立自主，自力更生”和“抓革命，促生产，促工作，促战备”的伟大方针指引下，我国电子工业迅速发展。为了适应这一形势，根据许多单位的要求，现将四机部变压器工作组一九六七年编写的C型铁心电源变压器和滤波阻流圈典型计算资料翻印出版，供有关单位参考使用。

原资料第一分册和第三分册是变压器和滤波阻流圈总技术条件（草案）及其编制说明，因需正式定稿，待主管部门批准后颁发实行，故未予翻印。

原资料第二分册是变压器和滤波阻流圈典型计算，翻印时作了部分修改，并增加了变压器Ⅱ，Ⅲ级品铁心的参数计算表格。

原资料第四分册是变压器和滤波阻流圈典型计算的编制说明，第五分册是试验总结报告，这次合成一册翻印。

由于我们的水平有限，经验不足，难免有错误和不妥之处，望提出宝贵意见，以便修正。

一九七〇年十二月

目 录

第一编 编制说明

第一章 C型铁心电源变压器典型计算编制说明

§ 1-1 概述	6
1. 适用范围	6
2. 对变压器的要求及其与电磁参量的关系	6
3. 变压器中支配电磁参量的主要矛盾分析	7
§ 1-2 各项技术指标计算基本公式推导	8
1. 变压器等效电路	8
2. 功率因数	9
3. 初级伏安	10
4. 初级功率	10
5. 初级磁化伏安	10
6. 铁心损耗	11
7. 铜阻降压与电压调整率	11
8. 线圈铜损耗	13
9. 输出功率	15
10. 效率	15
§ 1-3 三类变压器电磁参量计算公式推导及技术指标分析	15
1. B_m 、 j 全由温升支配的变压器	15
2. B_m 选择、 j 由温升决定的变压器	20
3. B_m 选择、 j 由电压调整率支配的变压器	23
§ 1-4 变压器计算参数表参量确定方法	32
1. 温升	32
2. 电压调整率	32
3. 铁心材料、质量等级与耐热等级	32
4. B_m 、 j 全由温升支配的变压器的计算步骤	33
5. B_m 选择、 j 由温升决定的变压器的计算步骤	34
6. B_m 选择、 j 由电压调整率决定的变压器的计算步骤	34
7. B_m 的确定	35
8. 本次制表计算公式的选用	36
9. 空载特性、线圈计算参量的计算	36
10. 其他基本参量的确定	36

第二章 C型铁心滤波阻流圈典型计算编制说明

§ 2-1 电磁参量计算公式的推导和分析	37
1. 适用范围	37
2. 设计时应考虑的因素	37
3. 电磁参量计算公式的推导和分析	38
§ 2-2 阻流圈设计的说明	47
1. 几个规定	47
2. 选择铁心的曲线的建立	48
3. 铁心的选择	49
4. B_m 不是 30 或 2000 高斯时铁心的选用	50
§ 2-3 几个问题的讨论	51
1. 阻流圈用铁心的检验	51
2. 阻流圈用铁心的型式	51
3. CD 型铁心的线包型式	51
4. 800 Hz 阻流圈铁心的材料	52
符号说明	54

第三章 变压器和阻流圈结构基础参量的确定方法

§ 3-1 线圈绕制因数	58
§ 3-2 平均匝长	58
§ 3-3 铁心和线圈的散热面积	59
§ 3-4 铜线占空系数、铜截面积和铜重	60

第四章 绝缘与防潮

§ 4-1 绝缘材料的选用	62
1. 选择绝缘的主要指标	62
2. 国内各种材料的比较	62
§ 4-2 导线的绝缘	68
1. 漆包线	68
2. 玻璃丝包线	68
§ 4-3 变压器和阻流圈的防潮及绝缘材料的选用	68
1. 防潮的目的	68
2. 防潮的方法	68
3. 几种防潮方法的比较	69
4. 防潮方式及绝缘材料的选用	70
5. 浸渍、灌注对寿命的影响	71

第二编 试 验 报 告

第一章 温升计算和测量

§ 1-1 温升计算	75
1. 中小功率电源变压器和滤波阻流圈温升计算的特点	75
2. 温升计算基本公式的推导	76
3. 气压、温升、环境温度对温升的影响	82
4. 温升计算步骤	82
5. 温升公式适用范围	84
6. 本文推荐的计算方法与其他计算方法的比较	84
7. 计算结果准确性的讨论	88
§ 1-2 温升测量	89
1. 线圈平均温升的测量	89
2. 最热点温升测量	96
3. 最热点温升与平均温升的差值	96
§ 1-3 附录	97
1. 线圈和铁心散热系数的测定	97
2. n 值的确定	106
3. 热电偶的原理、制作、校准	107
4. 温升电桥	109
5. 变压器工作台负荷与恒温箱负荷温升的差别	116
6. 线圈处理工艺对温升的影响	117
7. 变压器温升的降低	118
8. 线圈内温度的稳定时间	119
9. 对接法负荷	120

第二章 变压器和阻流圈的绝缘

§ 2-1 绝缘电量放电	123
1. 电量放电的原理及其对绝缘的危害	123
2. 电量放电探测和检查标准	124
3. 影响绝缘电量放电的因素	129
4. 从电量出发设计变压器绝缘结构存在的问题	132
§ 2-2 绝缘电阻	133
1. 影响绝缘电阻的因素	133
2. 测量方法	136
§ 2-3 绝缘强度	136
1. 概述	136

2. 对各种材料击穿强度的影响因素	137
§ 2-4 变压器絕緣老化討論	141
1. 变压器絕緣的热老化	141
2. 变压器絕緣的电老化	144
§ 2-5 安全因数	146
1. 安全因数的提出	146
2. 安全因数的定义及其計算	146
§ 2-6 爬电与飞弧	147
1. 爬电与飞弧的概念及其影响因素	147
2. 爬电与飞弧試驗的結果分析	149
§ 2-7 变压器絕緣結構設計	154
1. 各种材料性能的综合比較	154
2. 絕緣結構設計	155
3. 新材料介紹	162
附录	164

第三章 C型铁心的磁性能測量

§ 3-1 磁化曲綫的測量	171
1. 实用磁化曲綫	171
2. 交直流同时磁化时磁化曲綫的測量	174
§ 3-2 鉄損曲綫測量	177
1. 測量鉄心損耗的意义	177
2. 測量綫路	177
3. 測量結果	178
4. 測量結果分析	178
§ 3-3 导磁系数測量	179
1. 測量导磁系数的意义	179
2. μ_{Δ} 和 μ_e 的測量方法	180
3. 測量結果	184
4. 測量結果分析	184
附录	186

第四章 中小功率电源变压器的合閘电流

§ 4-1 变压器拉合閘試驗	204
§ 4-2 合閘冲击电流的計算	209
§ 4-3 熔断絲的选择	215

第五章 电感量的試驗方法

§ 5-1 几种測量方法在概念上的差別	223
---------------------	-----

1. 电感电桥法	223
2. 电阻比較法	223
§ 5-2 正确选择电感量的測量方法	224
§ 5-3 旧标准規定的电阻比較法存在的問題	225
§ 5-4 本文推荐的电阻比較法的試驗电路	226
1. 第一种电路	226
2. 第二种电路	227
§ 5-5 按本文推荐的試驗电路来代替电桥法的誤差分析	228
1. 电压表类型与測量誤差的关系	228
2. 鉄心的鉄損与測量誤差的关系	230
3. 电压表內阻与測量誤差的关系	232

第一編

編制說明

1. 编制本文件的目的是要求。

- 1) 总结出我国自己的, 具有先进水平的电源变压器和滤波阻流圈设计方法;
- 2) 按照本文件所设计的电源变压器和滤波阻流圈应能通过新制定的“电源变压器和滤波阻流圈总技术条件”所规定的各项环境试验、电气试验和寿命试验。

2. 编制本文件的几个基本原则。

- 1) 解决国内各兄弟单位各种产品中共性较大的电源变压器, 滤波阻流圈的设计, 而不是进行某些新产品研制(如高温、高频的变压器等)。
- 2) 料源立足于国内。所有试验均用国产材料进行, 推荐的设计标准也根据国产材料水平考虑。
- 3) 对工艺水平的要求。产品的先进性不仅由设计决定, 它必须有先进的工艺来保证。在使用本文件进行设计的同时, 必须在工艺上作出相应的努力, 才能保证产品符合新部标草案的各项要求。主要的工艺包括: 用环氧漆真空浸渍线圈; 用环氧树脂(或其它树脂)对线圈(或变压器)进行裹复、端封、灌注; C形铁心的制造等。
- 4) 对待质量要求、体积重量、成本之间的关系。首先是质量, 即全面满足电性能、环境试验及寿命等方面的明确要求, 在此前提下力求减轻产品重量(或减小体积), 在能满足质量和体积重量要求的几种设计方案中, 选用成本最低的方案。
- 5) 考虑产品发展方向, 只考虑C形铁心的电源变压器和滤波阻流圈。

3. 在提高产品可靠性方面采取的措施。

- 1) 保证产品的正常寿命。从设计上来保证变压器、阻流圈的寿命, 最根本的在于解决以下两个问题:

a. 正确地确定某一种绝缘材料的极限工作温度, 同时准确地计算和测量温升, 保证工作时不超过其极限温度。在采用新型绝缘材料时, 应通过变压器实样上的热老化寿命试验来确定其极限工作温度, 仅仅依据材料样本推荐的数字确定极限工作温度有时会得出不正确的结论。在编制本文件时, 进行了原材料和变压器的热老化寿命试验, 根据寿命试验结果, 从保证10万小时寿命出发, 选定了E级和B级绝缘用的材料。

b. 正确地确定某一种绝缘材料的工作电场强度。从绝缘材料技术条件中, 只能得到它们的一分钟击穿电压数据, 这个数据并不能全面反映它们的绝缘性能。从任何资料中都查不到各种绝缘材料的允许工作电场强度。某些设计标准中即使规定了 $\times\times$ 伏时用 $\times$ 层纸, 但未提出根据, 而且不同的资料往往相差很多。为了弄清工作电场强度和寿命的关系, 以及温度、频率、层数……等因素与击穿的关系, 我们进行了大量的试验, 初步摸清了影响绝缘寿命的各项因素, 并找出了主要关键——电量。我们从工作电压低于电量电压这一根本原则出发(此时能保证10万小时以上的寿命), 结合温度, 机械应力……等因素, 考虑适当的安全因数, 订出了各种绝缘材料允许的工作电压。

- 2) 保证产品的防潮能力, 从若干年来实践证明, 不少电源变压器和滤波阻流圈的故障是在受潮后发生, 例如受潮后热态绝缘电阻严重下降, 甚至发生绝缘击穿。通过试验, 受潮后热态绝缘电阻严重下降采取了预防措施, 并证明按本文件设计的产品经56天长期潮湿试

驗后抗电强度仍是正常的。

3) 保証产品的过負荷能力。由于电源电压往往在±10%范围内波动，因而变压器、阻流圈必須能經受电源电压增至10%而不損坏。

4) 在高空及恶劣气候条件下工作的可靠性。变压器采用良好的防潮措施后，綫圈内部受潮湿的影响較小。但其出头（焊片、螺釘）之間的絕緣是暴露在外面的，要受到气压、湿度等的影响。在确定出头絕緣距离时，應該从实际可能遇到的低气压、湿度、溫度……等条件出发考虑。为此，进行了相应的試驗。

4. 在減輕产品的重量方面采取的措施。

在減輕产品的重量方面，本文件从設計上采取了多方面的措施。

1) 提高变压器、阻流圈的工作溫度等級。从以前用的 A 級絕緣（+105℃）提高到 E 級絕緣（+120℃）和 B 級絕緣（+130℃）。

2) 选用新型的磁性材料（冷軋硅鋼片），并最合理地利用其特点，制成 C 形鉄心，大大提高磁通密度。

3) 根据不同情况，选用最合理的結構形式。例如，当从溫升出发計算变压器时，推荐用 CD 形鉄心，則变压器重量就比用 ED 形鉄心时为輕。本文件对此进行了分析。

4) 最合理地选择电磁参量。在上述前提决定之后，就应通过理論分析，确定最佳电磁参量。本編制說明内容主要着重在最佳电磁参量的分析方面。

采取了上述措施之后，变压器的重量減輕情况大致如表 0-1。表中以老式 A 級絕緣、热轧硅鋼片、壳式冲片鉄心产品重量与 B 級、E 級絕緣、冷軋硅鋼带、CD 型鉄心产品重量的比例來說明。

三种因素对变压器重量減輕的情况 表 0-1

线圈结构形式*				铁心		绝缘耐热等级**			
400 Hz		50 Hz				400 Hz		50 Hz	
Ⅲ 形	1.4	Ⅲ 形	1.2	热 轧, 冲 片	1.38	A 级	1.56	A 级	1.25
ED 形	1.4	ED 形	1.2	冷 轧, 冲 片	1.13	E 级	1.16	E 级	1.08
CD 形	1	CD 形	1	冷 轧, C 形	1	B 级	1	B 级	1

* 按 300 VA 变压器比較
** 按环境温度 = +55℃时比較

故 400 Hz、B 級、DG 310 硅鋼带制成的 CD 型鉄心的变压器的重量与老式产品重量的比例为

1: (1.4 × 1.38 × 1.56) = 1:3

而 50 Hz、B 級，D 310 硅鋼带制成的 CD 型鉄心的变压器重量与老式产品重量的比例为

1: (1.2 × 1.38 × 1.28) = 1:2.12

但 50 Hz、150 VA 以下的小变压器由于是从調整率出发來設計、CD 型結構散熱面大及提高絕緣耐热等級沒有作用，只有采用 C 型鉄心提高 B_L 值一个优点，故其重量为老式产品的 1/1.38。

最佳电磁参量的选择对減輕重量的影响,实际上在上表中已包括在“綫圈結構形式”和“鉄心”兩項因素中。

5. 在降低产品的成本方面采取的措施:

- 1) 防潮措施, 推荐环氧树脂(或其它树脂)灌封方法, 而不推荐金属罩密封工艺。
- 2) 絕緣材料的选用上, B 級采用乙酰化紙, E 級采用電纜紙, (均用 B 級漆浸漬), 而不采用聚脂薄膜。
- 3) 400 Hz 电源变压器用 C D 形鉄心, 而不用环形鉄心。
- 4) 由于产量重量大大降低, 原材料消耗大为减少, 因此成本也降低。

6. 使用本文件时应注意的问题。从編制本文件的要求來說, 它应当抓住“共性”。但不同单位、不同产品在技术要求、料源、主要工艺方法上又往往具有它的特殊性, 而这些特殊性又是本文件所不能反映的。例如磁性能曲綫是最佳电磁参量分析的基础, 而有的单位由于料源或工艺关系, 鉄心性能与本文件給出曲綫相差較大时, 就应该結合实际情况, 根据最佳电磁参量分析的原則, 另行确定电磁参量。此外, 新材料、新工艺是不断发展的, 本文件所推荐的材料和防潮方法是在目前国内先进水平上得到的結論, 因此它不可能反映今后可能出現的新材料或新工艺。但是, 本文件和新部标草案所提供的技术要求和选择新材料, 考驗新工艺的观点、方法等仍是有用的。

第一章 C 型铁心电源变压器典型计算编制说明

§ 1-1 概 述

1. 适用范围:

中小功率, 部标 C 型铁心。

工作频率为 50 Hz 及 400 Hz。

线圈绝缘耐热等级为 E 级、B 级。

线圈端封、裹复或灌注, 铁心直接暴露在空气中。

工作电压 3 KV 以下, 高压时适当降低铁心伏安数参考使用。

2. 对电源变压器的要求及其与电磁参量的关系:

1) 使用和生产对电源变压器的要求:

- a. 电指标方面要求: 一定的输出功率、电压调整率、效率和功率因数。
- b. 体积重量要求: 要求变压器体积小重量轻。这对军用无线电设备是一项重要指标。
- c. 寿命和可靠性要求: 要求变压器具有足够的寿命和高可靠性。
- d. 经济指标要求: 要求变压器成本低, 即希望施工方便, 原材料货源广而价廉, 通用性广因而产量大。

2) 变压器使用要求与其结构, 绝缘及电磁参量的关系:

- a. 从变压器功率、体积和重量要求, 研究和解决以下三方面的问题:
 - a) 提高变压器绝缘耐热等级, 这是缩小变压器体积, 减轻重量的重要方法之一。由后面的分析将可以看到, 在一定条件下, 变压器每伏安克数反比于温升。

$$\frac{G_c + G_m}{V A_1} = \lambda \frac{1}{\Delta \tau_m}$$

因此, 变压器绝缘等级的提高, 允许温升也就提高, 变压器的体积重量就可以减小。根据国内目前生产水平, 将变压器绝缘耐热等级由 A 级提高到 E 级、B 级。

b) 在变压器的体积重量、耐热等级一定的条件下, 如何选择电磁参量 B_m 、 j 才能使变压器输出功率最大, 这就要运用数学的方法寻找最佳电磁参量。

c) 选择合理的变压器结构。CD 型变压器可以制成双线圈与单线圈二种结构形式, 经计算, 单线圈时变压器容量能增大, 但铜重亦相应加大, 而每伏安克数比双线圈有增无减, 故单线圈结构对减轻变压器重量并不有利。

将变压器计算参数表中所列各类变压器的伏安数与每伏安的克数绘成如图 1-1 曲线, 从曲线上可以看出, 由电压调整率支配电磁参量的变压器 (400 Hz、30 VA 以下, 50 Hz、150 VA 以下) 使用 ED 型铁心对减轻变压器重量有利, 由温升支配电磁参量的变压器 (400 Hz、30 VA 以上, 50 Hz、150 VA 以上) 使用 CD 型铁心对减轻变压器重量有利, 容量越大效果越明显。因此, 在变压器计算参数表中对于容量较大的变压器建议不采用 ED 型铁心, 以“*”表示。

另外, 由图 1-1 看到, 50 Hz 变压器每伏安克数随变压器伏安数增大而减小; 400 Hz 变

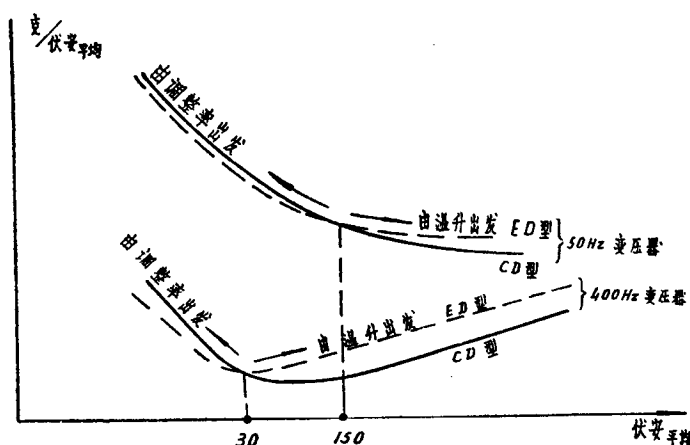


图 1-1

器每伏安克数随变压器伏安数增大而增大。因此，对于50Hz电源变压器多种功率合并后设计一个变压器对减小体积重量有利。对于400Hz变压器有时将多种功率分成二个变压器设计反而对减小体积重量有利。

由上分析看出，G型铁心变压器减轻重量缩小体积增大输出功率的主要方法是提高绝缘耐热等级，选择最佳电磁参量及正确的结构型式。

b. 从变压器寿命和可靠性要求来研究变压器的温升和绝缘结构。变压器工作温度每升高8~10°C，寿命减半；绝缘材料的抗电强度、耐电晕性、防潮能力及耐热性是决定变压器工作可靠性的重要因素。为了使变压器有足够的寿命和高可靠性，必须保证温升计算的准确性，变压器的最高工作温度不高于绝缘耐热等级规定的温度，变压器绝缘留有足够的安全因数。

c. 变压器电压调整率的要求反映在变压器设计上即限制线圈铜阻降压。变压器空载负载输出电压差值大小由铜阻降压引起，以电压调整率表示。铜阻降压大，调整率坏，整机工作不稳定，多绕组灯丝变压器当某一组或某几组不工作时，灯丝电压上升易损坏电子管，同时也不利于变压器的通用性。

d. 根据对变压器经济指标的要求，在典型计算中推荐了价廉的纸类材料作绝缘，在电气计算上推荐了电压调整率不大于10%。

3. 变压器中支配电磁参量的主要矛盾的分析

1) 变压器铁心尺寸、材料及绝缘耐热等级确定以后，剩下的关键问题就是变压器的电磁参量如何选择才能使变压器的输出功率最大，找出限制变压器输出功率的矛盾面。

变压器的功率

$$P_1 = 2.22 B_m j S_m S_c f \times 10^{-6} \cos \varphi$$

式中，线圈铜面积 S_m 、铁心截面积 S_c 。对于每种铁心来说是常数，要提高频率为 f 的变压器的输出功率，必须设法提高磁通密度 B_m 和电流密度 j 。能不能将 B_m 、 j 无限制的提高呢？不适当的提高会产生那些不良后果？

a. B_m 、 j 提高，铁损耗 P_c 铜耗 P_{mq} 加大，变压器的温升急剧上升， B_m 、 j 大于某一值

后, 变压器温升超出允许值。\$B_m\$ 工作于磁化曲线饱和区域时, 变压器磁化电压急剧上升, \$\cos \varphi\$ 急速下降, 在允许温升一定的条件下输出功率反而降低。当电源电压波动至上限时, 磁化电流激增和铁耗上升而烧坏变压器, 使变压器无过载能力。因此, 为了获得最大输出功率而提高 \$B_m\$、\$j\$ 与绝缘材料耐热等级所决定的允许温升之间有矛盾。提高功率和允许温升组成一对矛盾。

b. 电流密度 \$j\$ 提高, 铜阻降压加大, \$j\$ 大于某一值后, 变压器电压调整率变坏, 使整机工作不稳定, 电子管灯丝易烧坏, 并影响到变压器的通用性。因此, 变压器为了获得最大输出功率而提高 \$j\$ 与整机允许电压调整率之间有矛盾。提高功率与允许电压调整率组成了另一对矛盾。

由上分析看出, 磁通密度 \$B_m\$ 的选择受温升、\$\cos \varphi\$、过载能力等因素限制; 电流密度 \$j\$ 的选择受温升、电压调整率的限制。

上述二对矛盾, 在不同功率等级的变压器中对变压器电磁参量起支配作用的地位并不一样, 表现为主要矛盾和次要矛盾。而且, 随着条件的变化, 主要矛盾与次要矛盾互相转化。

2) 在 C 型铁心、E 级 B 级绝缘电源变压器中, 电磁参量 \$B_m\$、\$j\$ 的确定可分三种类型:

a. 变压器的磁通密度 \$B_m\$、电流密度 \$j\$ 全受温升支配。属于这一类的有 400 Hz 大号中号铁心变压器; 50 Hz 大号铁心变压器。这类变压器铁耗铜耗大, 铁耗铜耗所引起的温升是主要限制因素, 提高输出功率与允许温升之间这一对矛盾在起作用。由于温升的限制, \$B_m\$ 工作在磁化曲线的非饱和区域, 变压器能过载, \$\cos \varphi\$ 接近 1; 由于温升的限制, \$j\$ 较低, 铜阻降压小, 电压调整率小, 故提高功率与电压调整率之间的这一对矛盾处于服从地位。

b. \$B_m\$ 选择, 电流密度 \$j\$ 由允许温升决定。属于这一类的有 400 Hz 部分小号铁心变压器, 50 Hz 大号中号铁心变压器。这类变压器由温升决定的铜耗、铜阻降压不大, 电压调整率尚能满足要求, 故电流密度 \$j\$ 仍由温升支配。从温升出发确定的磁通密度 \$B_m\$ 已工作在磁化曲线饱和区域, \$B_m\$ 的选择要从满足过载能力、\$\cos \varphi\$、输出功率大等因素综合权衡后来确定。

c. \$B_m\$ 选择, 电流密度 \$j\$ 受电压调整率支配。属于这一类的有 400 Hz、50 Hz 小号铁心变压器。这类变压器铜重铁重小, 铜耗铁耗小, 散热能力比大中号铁心变压器强, 从温升出发确定的电流密度已使铜阻降压很大, 电压调整率已很坏, 提高输出功率与电压调整率之间的矛盾上升为主要矛盾。因此, 这类变压器的电流密度由电压调整率来支配。从温升出发确定的磁通密度 \$B_m\$ 已工作在磁化曲线饱和区域, \$B_m\$ 的选择要从过载能力、\$\cos \varphi\$ 及得到尽可能大的输出功率等因素综合决定。由于电压调整率的限制, 这类变压器温升较低。

§ 1-2 各项技术指标计算基本公式推导

1. 变压器等效电路

图 1-2(b) 中电流关系为

$$I_I = \sqrt{(I'_2 + I_c)^2 + I_\varphi^2} = \sqrt{I_1'^2 + I_\varphi^2} \quad (1-1)$$

式中 \$I_I\$ 变压器初级总电流

\$I'_2\$ 变压器次级反射到初级的有效电流

\$I_1 = I'_2 + I_c\$ 变压器初级电流有功分量

\$I_\varphi\$ 变压器初级磁化电流

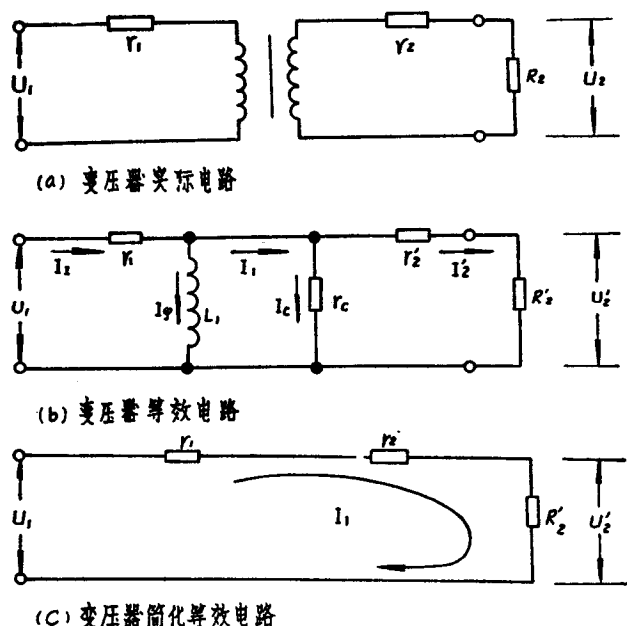


图 1-2 变压器等效电路

I_c 铁损耗电流

当变压器的磁化电流 I_φ 和铁损耗电流 I_c 在总电流中占比例不大时，变压器等效电路图 1-2 (a) 可以进一步简化为图 1-2 (c)。

此时

$$I_1 \approx I'_2 \approx I_I$$

$$\cos \varphi \approx 1$$

图 (b) 图 (c) 二等效电路参量之间的误差，随着变压器磁化电流与工作电流比例加大而加大。

表 1-1 表示了 $\cos \varphi$ 、初级电流、铜耗随 $\frac{I_\varphi}{I_1}$ 变化的情况

表 1-1

$\frac{I_\varphi}{I_1}$ 或 $\frac{VA_\varphi}{P_1}$	0	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
$\cos \varphi$	1	0.996	0.99	0.982	0.971	0.96	0.94	0.93	0.915	0.895
I_I/I_1	1	1.005	1.01	1.02	1.03	1.04	1.062	1.075	1.1	1.12
$P_{m\varphi}/P_m$	1	1	1.01	1.02	1.03	1.04	1.065	1.075	1.1	1.125

2. 功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{VA_1} = \frac{U_1 I_1}{U_1 I_I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\varphi}{I_1}\right)^2}} \quad (1-2)$$