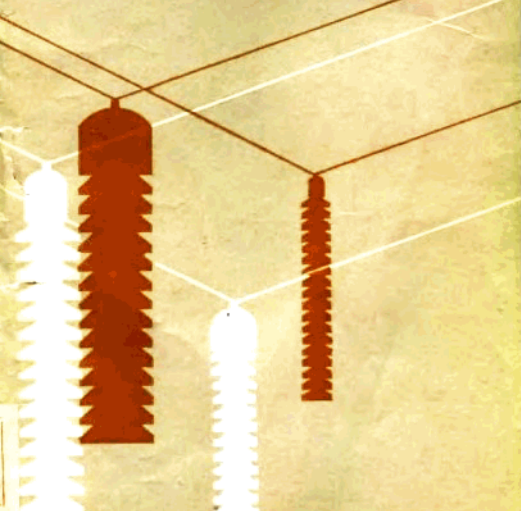


电能利用率与 电能平衡

杨明义 主编



中国农业机械出版社

前 言

能源是实现现代化的物质基础。随着国民经济的发展，节约能源的措施已被作为一项战略性的措施提上了议事日程。电力是宝贵的二次能源，在各行各业的生产和人们的生活中，得到了最广泛的应用。因此，节约用电尤为重要。但是，当前许多生产单位，由于管理不善等方面的原因，在用电方面不尽合理，还存有大量节电潜力，极待挖掘。

在逐台测算用电设备的电能利用率的基础上，开展企业的“电能平衡”工作，既是生产单位加强企业管理、提高经济效益的基础性工作，也是节能工作者借以分析电能耗用现状、查明浪费原因、提出改善措施、促进电能合理使用的重要依据。

诚然，电能的合理利用，是涉及多方面学科的综合性问题。它不仅与电气、热化、冶金、机械等理论有关，也与生产工艺、设备性能、生产管理等方面有关。因此，要提出一个系统而完善的解决办法，这是本书作者力所不及的。

为了推动节电工作的开展，我们根据国家有关规定和各地成熟的节电经验，并结合多年的工作实践，编写了这本书。在选材上，我们侧重于耗电量大、电加热、电熔炼、整流等设备以及在工农业生产上通用的变压器、电动机、风机、水泵等设备。为便于现场从事节能工作的广大干部、工人阅读，对上述设备的电能利用率的测量与计算，我们未作理论上的深入探讨，仅对有关原理和设备概况作了扼要说明，并收集了一些与能耗有关的参数作为附录，以便读者查阅。我们诚

IV

愿的希望这本书的出版，能对合理利用电能，节约用电的工作有所帮助。

本书是杨明义、朱耀琥、柳楠湖、王堪分工编写，并由杨明义主编和审核的。在编写和审核过程中曾多次征求了各有关方面的意见，得到了有关方面的帮助和支持，对此深表感谢。由于我们的水平有限，书内缺点和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

一九八二年五月

本书主要符号及其表示意义

- A**——能量。如 A 表示电能量； ΔA 表示损耗电量等。
- B**——磁通密度。如 B_m 表示铁芯最大磁通密度。
- C**——热能系数。如 C 表示物质比热； C_0 表示黑体辐射系数等。
- D**——直径。如 d_1, d_2 表示管子的直径。
- E**——电动势。如 E 。等。
- F**——电源频率 (f)；面积 (F) 等。
- G**——重量或系数。如物体重量或重量流量；
 g 表示对流换热系数，辐射换热系数，重力加速度等。
- H**——高度或时间系数。如扬程高度，炉门开启高度。 h 表示时间系数等。
- I**——电流。如 I_l 表示交流电流； I_d 表示直流电流； I_N 表示额定电流； I_{dN} 表示额定的直流电流或实测电流； I_k 表示短路试验电流； I_m 表示最大电流； i_0 表示空载电流， i_m 表示磁化电流等。
- K**——常数或倍数。如 K 表示变压器的变压比； K_i, K_v 表示电流互感器，电压互感器的变比； K_t 表示温度换算系数等。
- L**——长度。
- M**——转矩。
- N**——数量。如转数，只数，电缆芯数等。
- P**——功率与损耗功率。如 P_N 表示额定功率； P_s 表示短路试验时的功率； ΔP_0 表示空载损耗功率（铁损）； ΔP_k 表示铜损； ΔP_r 表示变压器的有功损耗等。
- Q**——热量或无功功率。如某物体的热量，辐射热量、蓄热等或无功功率。如 ΔQ_0 表示空载无功功率； ΔQ_k 表示满载时的漏磁无功功率等。
- R**——电阻， R 与 r 都表示电阻值。
- S**——变压器的视在功率或转数。

Ⅱ

T ——温度或时间。如 T_1, T_2 表示物体的绝对温度($^{\circ}\text{K}$)； t 表示温度($^{\circ}\text{C}$)； t 也用于表示时间如小时数等。

U ——电压。如 U_N 表示额定电压； U_1 表示变压器原边电压； U_2 表示变压器副边电压； U_k 表示阻抗电压等。

V ——速度。

W ——匝数或电器容量。

X ——电感。

Φ ——交流磁通。

β ——负载率。

η ——效率或电能利用率。

Σ ——实际物体黑度。

φ ——遮蔽系数。

γ ——重度或比重。

λ ——导热系数或摩擦系数。

τ ——时间，如小时数。

δ ——厚度。

ρ ——电阻系数。

目 录

第一章 变压器的效率	1
第一节 变压器的原理与分类	1
一、变压器的简单原理	1
二、变压器的分类	3
第二节 变压器损耗的一般概念	3
第三节 变压器损耗的测量和计算	5
一、空载损耗的测量	5
二、短路损耗的测量	8
第四节 变压器效率的计算	11
第五节 变压器的经济运行分析	14
一、变压器的最佳负载率	14
二、变压器的容量选择	15
三、两个单台变压器经济运行分界点	16
四、并联变压器的经济运行	17
五、无功功率的经济当量	22
第六节 提高变压器效率的措施	24
第二章 电动机的电能利用率	27
第一节 电动机的分类及与能耗有关的技术参数	27
一、直流电动机	27
二、交流电动机	28
三、控制电动机	29
第二节 与能耗有关的技术参数的测量、计算	30
一、参数的基本测量方法	30
二、与能耗有关的主要参数	31

三、绕组直流电阻和电机转速的测量方法	31
四、直流电动机能耗参数的测算	34
五、异步电动机能耗参数的测算	42
第三节 电动机的节能途径	49
第三章 整流设备的电能利用率	52
第一节 整流设备的分类	52
一、旋转式变流机组	53
二、水银整流器(汞弧整流器)	53
三、硅整流与可控硅整流设备	54
第二节 与能耗有关参数的测量、计算与分析	58
一、与能耗有关参数的定义和测量范围	58
二、整流设备的效率及有关参数的测量与计算	60
三、主要部件耗能的测量	66
四、整流设备损耗与效率的计算	69
第三节 提高整流设备效率的途径	74
第四章 电加热设备的电能利用率	77
第一节 电加热设备的分类及与能耗有关的技术参数	78
一、热处理设备(电炉)	78
二、锻造加热设备(加热炉)	87
三、电烘烤箱(炉)	87
四、专用感应加热设备	88
第二节 与能耗有关的技术参数的测量、计算与分析	90
一、设备空载损耗	91
二、冷炉升温耗能	100
三、工件需能计算	105
第三节 电加热设备的电能利用率	107
一、额定状态下设备电能利用率	108

二、实际使用条件下设备电能利用率	110
第五章 电熔炼设备的电能利用率	119
第一节 电熔炼设备的分类及与能耗有关的技术	
参数	120
一、无芯工频感应熔炼炉	121
二、有芯工频感应熔炼炉	126
三、中频感应熔炼炉	130
四、电阻熔炼炉	132
五、电弧熔炼炉	134
六、矿热炉	135
七、其他电熔炼炉	135
第二节 与能耗有关的技术参数的测量、计算与分析	137
一、炉料所需能量的计算	137
二、设备能耗测量与分析	138
三、炉料升温或保温的能耗测量与计算	144
四、熔炼炉设备的电能平衡	145
第三节 电熔炼设备的电能利用率	148
一、额定状态下的电能利用率	149
二、实际使用条件下的电能利用率	152
三、设备散热条件与电耗的关系	154
四、生产工艺与电耗的关系	155
五、操作与电耗的关系	156
六、熔炼炉单位产品耗电量的测量、计算	157
第六章 配电网路的电能损耗	159
第一节 概述	159
一、线路损失的组成	159
二、配电线路的分类	160
三、配电线路的接线方式	160

第二节	线路损失的基本定律	163
第三节	电能损耗的测算	166
一、	高压架空线路的损耗计算	166
二、	低压架空线路的损耗计算	178
三、	电缆线路的损耗计算	180
四、	车间配电线路的损耗计算	181
五、	配电线路的损耗测量	181
第四节	其他元件损耗的测算	184
一、	汇流排的损耗	184
二、	交流接触器、电气测量仪表、电容器、接户线的 损耗	186
三、	“短网”损耗的测算、分析	188
第五节	降低线路损耗的措施	193
第七章	水泵及管路耗能测量	199
第一节	水泵的性能参数和分类	199
一、	性能参数	199
二、	泵的分类	201
第二节	离心泵	201
一、	工作原理和分类	201
二、	性能曲线和特点	204
第三节	轴流泵	206
一、	工作原理和分类	206
二、	性能曲线和特点	207
第四节	往复泵	208
一、	工作原理和分类	208
二、	性能特点和应用	209
第五节	水泵的主要技术参数测定	211
一、	一般要求	211

二、流量的测定	211
三、扬程的测定	216
四、功率和效率	218
五、提高水泵电能利用率的措施	219
第八章 风机及管路耗能测量	220
第一节 风机的性能参数和分类	220
一、性能参数	220
二、分类	222
第二节 离心风机与轴流风机	222
一、离心风机	222
二、轴流风机	223
第三节 风机的技术参数测定与节能主要措施	225
一、风压	225
二、流量	227
三、功率和效率	228
四、风机的转速与其他各项参数的关系	229
五、提高风机电能利用率的主要措施	229
第九章 单位产品电耗定额的测算与制定	230
第一节 单位产品电耗定额	230
一、加强产品电耗定额管理的意义	230
二、产品耗电量包括的范围	230
三、电耗定额的种类及用途	231
第二节 单位产品耗电量的计算方法	233
一、基本要求	233
二、计算方法的一般内容	233
三、编制单耗的计算方法	236
第三节 单位产品电耗定额的制定和管理	237
一、电耗定额的计算和测定	237
二、电耗定额的可靠性	240

三、电耗定额的考核与管理	240
第十章 电能平衡	242
第一节 电能平衡的意义	242
一、电能的转换和利用	242
二、电能平衡简介	243
三、电能利用率和单耗的关系	244
四、电能利用率与企业生产的关系	248
第二节 电能平衡的测定和计算	248
一、电气设备与生产设备的电能利用率	248
二、生产工艺中的主要参数	250
三、生产效率	251
四、综合电能利用率	252
第三节 电能平衡表	253
一、电能平衡表的主要内容	253
二、用电量分解	254
三、电能平衡表参考表式	255
四、电能平衡举例	257
附录	273
一、变压器技术数据表	273
二、电动机技术数据表	277
三、整流器技术数据表	283
四、电加热设备技术数据表	291
五、电熔炼设备技术数据表	302
六、电焊机损耗、效率的测试方法	304

第一章 变压器的效率

变压器是电器设备中效率最高的设备之一。现代化的工业技术，已能使大容量变压器的效率达到98%以上，即使中小型变压器的效率，一般也能达到94%左右。但是，从节能的观点看，由于变压器对于用户是作“电源”用的设备，因此，不管负载的增减情况如何，它总是连续运行的，即使是很小一点损耗，一年的总损耗也就很可观了。

鉴于变压器的作用是变换电压的高低，而不象电动机、电热炉、电光源等设备是将电能转换为机械能、热能和光能。因此，通常不是用“电能利用率”，而是用“电能转换的效率”这个概念来研究其工作状况。

本章从分析变压器的效率与负载的关系入手，试图解决一些现场实际工作中经常遇到的问题，诸如：变压器损耗的测算，新增变压器的选择，并联运行的变压器怎样确定最经济的运行方式等，从而达到节约电能的目的。

第一节 变压器的原理与分类

为了以后探讨问题的方便，先简单介绍一下变压器的基本原理和分类。

一、变压器的简单原理

图1-1所示是变压器的原理图。

在变压器原边施以交变电压 U_1 ，则在线圈 W_1 中产生一交变电流 I_1 ，此电流在铁心中产生交变磁通 Φ 。当磁通 Φ 穿过次级线圈 W_2 时，根据电磁感应定律，变压器副边感应出

电压 U_2 ，并有以下关系：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = K$$

式中 U_1, U_2 ——原边和副边电压；

W_1, W_2 ——原边和副边线圈匝数；

K ——变比。

当变压器副边未接入负载，即 $I_2 = 0$ 时，原边线圈只流过一个很小的电流

i_0 ，此电流叫作空载电流。如果铁心没有损耗，则空载电流纯粹是一个无功电流，

其作用完全是为了

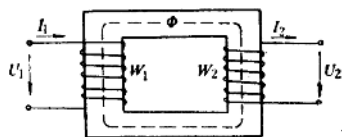


图1-1 变压器原理图

产生铁心中的磁通 ϕ 。实际上因为磁通 ϕ 是交变的，在铁心中就有磁滞损耗和涡流损耗，因而 i_0 包括两个分量，一个分量是纯粹的无功分量 i_{0r} ，用以产生磁场；另一分量是供给铁心损耗的有功分量 i_{0a} 。铁心损耗所需的功率，由变压器外接的电力网路供给。

当变压器副边带上负载后，则 W_2 上流过电流 I_2 。这时，变压器就把原边的电功率 $S_1 = U_1 I_1$ 传输到副边，其电功率 $S_2 = U_2 I_2$ 。

对于理想变压器（即无损耗变压器），则有：

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

实际上这是不可能的。因为任何一台变压器，不仅铁心中有涡流损耗和磁滞损耗，线圈中有电阻损耗，而且因激磁和漏磁等因素要消耗一定的无功功率，因此总是：

$$U_1 I_1 > U_2 I_2$$

其差额 $\Delta S_r = \Delta P_r + j\Delta Q_r$ ，即为变压器的总损耗。

式中 ΔS_r ——损耗容量的视在功率（伏安或千伏安）；

ΔP_r ——损耗的有功功率（瓦或千瓦）；

ΔQ_r ——损耗的无功功率（乏或千乏）。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，但就其工作原理而言，都是按照电磁感应原理制成的，且其主要电气参数项目大致相同。变压器如按用途来分，可划为两类：

（一）电力变压器

这是目前工农业中应用最广泛的变压器，是专为输电和配电所用。

（二）特殊用途变压器

它几乎包括除了电力变压器之外的所有变压器，如冶炼用的电炉变压器；电解用的整流变压器；焊接用的电焊变压器；供电气试验用的调压变压器等。由于这类产品种类繁多而应用面又大大小于电力变压器，所以下面将重点讨论配用电力变压器。

附表 1~6 分别列出了 SJL₁、SJ₁、电力变压器；电炉变压器；整流变压器；试验变压器的规格和性能数据。

第二节 变压器损耗的一般概念

变压器的损耗分为两类：一是与负荷无关，其值可以看作恒定的空载损耗，我们叫它为铁损 ΔP 。（实际上对于一台定型产品的变压器，它的铁损随电压、频率而变化。因为电力系统的电压和频率可看作恒定，所以认为铁损值不变）。另一类是由于变压器原副边绕组存在电阻，因而要产生与负荷

电流二次方成正比的负载损耗，叫它为铜损 ΔP_k 。

变压器铁损，又包括磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_f 。

$$\Delta P_0 = \Delta P_h + \Delta P_f = K_1 f B_m^2 + K_2 f^2 B_m^2$$

式中 K_1, K_2 ——常数；

f ——电源频率；

B_m ——铁心的最大磁通密度；

n ——磁滞系数，对于有方向性的硅钢片，一般采用 2.5~3.5。

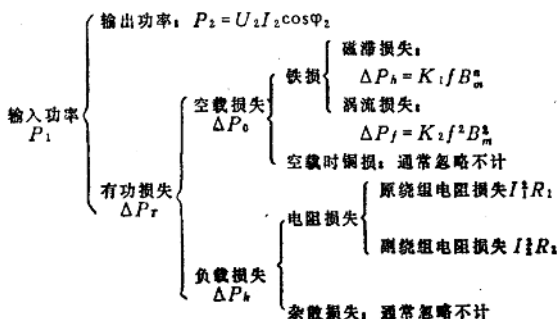
铜损 ΔP_k 是原、副边线圈电阻损耗之和，即：

$$\Delta P_k = \Delta P_{k_1} + \Delta P_{k_2} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2$$

式中 I_1, I_2 ——原、副边电流；

R_1, R_2 ——原、副边线圈电阻。

除了上述铁损和铜损之外，还有变压器绝缘介质中的损耗以及铁心夹件、外壳等铁件中的杂散损耗。因其测定困难且又微不足道，可忽略不计。变压器的输入功率、输出功率、损耗之间的关系如下：



以上所谈变压器铁损、铜损以及杂散损耗等，均指有功功率损耗而言。另外，变压器还有无功功率损耗，即空载时

的激磁功率 ΔQ_0 和满载时的漏磁功率 ΔQ_k 。应当指出，变压器漏磁功率 ΔQ_k 也是随负载的变化而变化的。

第三节 变压器损耗的测量和计算

变压器出厂时，铭牌（或说明书）上都标有电气特性的参数：铜损 ΔP_k 、铁损 ΔP_0 、短路电压 $U_k\%$ 、空载电流 $i_0\%$ 。根据 $U_k\%$ 、 $i_0\%$ ，可分别计算出空载无功损耗 ΔQ_0 （也叫激磁功率）和满载无功损耗 ΔQ_k （也叫漏磁功率）。下面介绍这些参数的测量和计算。

一、空载损耗的测量

变压器在出厂或大修之后，都必须进行空载试验。其目的是为了测量变压器的空载电流和铁心损耗，从而发现磁路中的局部和整体缺陷。一般来讲，使空载电流增大的原因主要有：硅钢片之间的绝缘不良；铁心中某一部分的硅钢片之间短路；穿心螺杆和压板的绝缘损坏；线圈匝间短路或并联支路短路；各并联匝数不相同等。另外，铁心的结构、制造工艺、硅钢片的厚度与质量等因素，都直接影响空载电流和空载损耗的高低。

空载损耗试验接线如图 1-2 所示

（一）试验方法

用三相电源时，可采用两只瓦特表法进行测量。

1. 将高压线圈开路，按图 1-2 a 接入低功率因数瓦特表和电流表。
2. 以很小的电压施加于试样上，注意仪表的指示是否正常，然后逐步升高电压。
3. 当电压升高到额定值后，测量各相电压是否平衡，并

进行记录。三相电压必须是实际的对称。

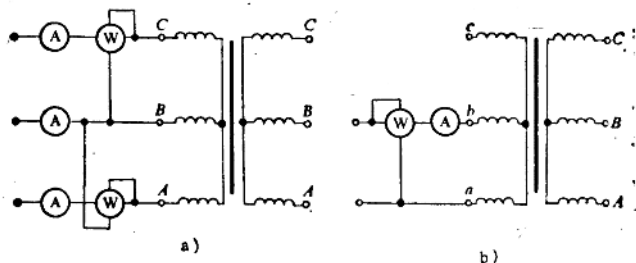


图1-2 变压器空载试验接线图

在三相变压器中，试验电压是以三相电压平均值计算，当三相电压之差不超过2%时，允许以a、c相的电压作为试验电压。

空载电流应采用三相电流的平均值，并以额定电流的百分数表示。

用两只瓦特表测量空载损耗按下式计算：

$$\Delta P_0 = K_{v1}K_{i1}P_1 - K_{v2}K_{i2}P_2$$

式中 K_{v1} 、 K_{v2} ——电压互感器倍数；

K_{i1} 、 K_{i2} ——电流互感器倍数；

P_1 、 P_2 ——瓦特表读数（瓦）。

空载电流按下式计算：

$$I_0\% = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3I_{2N}} \times 100\%$$

式中 I_{0a} 、 I_{0b} 、 I_{0c} ——三相线电流（安）；

I_{2N} ——低压线圈额定电流（安）。

用单相试验时，对Y形接线，电压分别加在低压三相的任意两端（如a、b端）。外加试验电压应为两相额定相电压