

徐
任
武

电

平

衡

测

试

技

术

D

D

河北科学

社

内 容 简 介

电平衡测试要涉及大量运行参数的测取,本书系统地介绍了这些参数在不影响生产正常进行的条件下的测取方法,测试误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

本书内容深入浅出,可作为广大工人、工程技术人员及大中专院校相应专业师生的参考用书。

电 平 衡 测 试 技 术

徐 任 武

河北科学技术出版社出版 (石家庄市北马路45号)
石家庄北方印刷厂印刷 河北省新华书店发行

787×1092毫米 1/32 15.25印张 271,700字 印数:1-10,700 1987年10月第1版
1987年10月第1次印刷 统一书号:15365·63 定价:2.45元
I S B N 7 - 5375 - 0018 - 5 / T M · 1

前 言

能源问题是世界各国共同瞩目的重大问题，能源短缺已成为经济发展的严重障碍。第二次能源危机以来，工业发达国家在致力于能源开发工作的同时，以很大的精力解决能源的浪费问题，在节能方面已取得了较大的实效和许多经验。

我国的节能工作，也取得很大的成绩。但是，由于生产工艺落后，设备陈旧，缺乏科学管理，能源的浪费仍然相当严重，节能潜力是十分巨大的。尤其是作为二次能源的电力更为宝贵，在国民经济各部门的能源构成中，占有突出的地位。目前，生产中运行的机电产品多为低效高费能型，加之其连续运行的工作方式及管理不善等原因，生产同样数量的产品，消耗的电力和工业发达国家相比，一般要高出一倍甚至两倍以上。我们所面临的现实是，到2000年能源生产只能增长一倍。为实现工农业总产值翻两番的宏伟目标，所需能源的一半以上要靠节约挖潜来解决。为此，我国制定了开发和节约并重，近期把节约放在优先地位的战略方针。目前各级政府已把节能工作提到了重要的议事日程，并普遍开展了热平衡测试工作。在此基础上，针对薄弱环节，采取了一系列重大措施，取得了较好的实效。

但是，节电工作仍是一个薄弱环节。企业的节电潜力在哪里？宝贵电力在物质生产过程中是否得到了充分有效的利

用？损耗浪费情况如何？应采取什么措施才能收回天天浪费着的宝贵资源？所有这些问题，只有通过企业电平衡测试，才能得到正确的答案。在我国，包括风、水、电、气在内的企业电平衡测试尚未普遍开展。究其原因，主要是这类设备量大、面广，长年连续运行，企业担心影响生产。编写《电平衡测试技术》一书，是为了解决这一问题。此书从理论和实测方法两个方面系统地介绍了如何开展企业电平衡测试工作，亦即在不影响生产正常进行的前提下，通过对重点耗电设备的逐台测算以及对运行资料 and 统计数据进行分析、计算、处理，来完成企业自身的用电监督。全面考核电能在本企业内的分布、流向、转换过程以及有效利用、损耗等情况，找到薄弱环节，查清节电潜力，对症下药，实施节电技术改造及设备更新换代，这是本书要介绍的主要内容。

尽管“电平衡测试”这一术语已出现多年，并已受到企业及其上级主管部门的高度重视，但在我国迄今为止尚未见到一本比较完善、系统、实用的关于电平衡测试的技术书籍。同时由于电气设备量大、面广，现场测试技术难度较大，企业电平衡测试工作尚处于刚刚起步的阶段。为推动企业节电工作的开展，需要给现场从事测试的广大工人、技术人员提供切实可行的方法。作者根据国家有关节能工作的方针、政策、法令和多年从事电平衡测试工作的实践经验，并参照各地的成熟资料，编写了《电平衡测试技术》一书，其中主要章节已被审定为省级企业标准。在选材上，侧重于企业电平衡方法及重点耗电设备电平衡测试。为便于现场从事测试的广大工人和技术人员阅读和使用，本书提供了若干经实践验

证了的经验公式和简便计算方法，在附表中列出了一系列与能耗有关的技术参数，供选用。

本书编写过程中参阅了清华大学、西安交通大学、华中工学院的有关资料和上海市、辽宁省、浙江省等单位 and 地区的测试资料，以及唐山钢铁公司、邢台造纸厂、邯郸钢铁厂的企业能量平衡测试报告。河北省能源办公室副主任鲁炳、王彤同志审阅了本书的主要章节，并提出了宝贵意见。全书最后由河北省能源办公室主任郭福奎同志主审定稿，在此一并表示感谢。

由于本人水平有限，缺点错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

目 录

第一章 测试误差和数据处理	(1)
第一节 误差概述	(2)
第二节 系统误差	(13)
第三节 随机误差	(23)
第四节 过失误差	(29)
第五节 间接测量的误差计算	(30)
第六节 测量结果的数据处理	(35)
第二章 企业电平衡	(39)
第一节 电平衡定义及基本概念、基本用语	(40)
第二节 企业电平衡方法	(59)
第三节 基本用电装置有效电量和损耗电量的 计算	(66)
第四节 管理损失电能	(88)
第五节 电平衡测试结果的表示方法	(92)
第三章 电气设备电平衡测试	(110)
第一节 电力变压器电平衡测试	(111)
第二节 输配电网络电平衡测试	(141)
第三节 异步电动机电平衡测试	(154)
第四节 直流电机电平衡测试	(185)
第五节 同步电动机电平衡测试	(196)

第六节 整流设备电平衡测试·····	(205)
第七节 焊接设备电平衡测试·····	(230)
第四章 流体机械电平衡测试·····	(233)
第一节 流体力学的基础知识·····	(233)
第二节 风机运行效率测试·····	(240)
第三节 水泵运行效率测试·····	(262)
第四节 空气压缩机电平衡测算方法·····	(283)
第五章 电加热设备电平衡测试·····	(300)
第一节 与电平衡测试有关的技术参数的测量、 计算方法·····	(300)
第二节 测试用仪器仪表及测试注意事项·····	(307)
第六章 电熔炼设备电平衡测试·····	(315)
第一节 有效电量和各项损耗电量的测试、计算·····	(315)
第二节 设备总输入电量及电熔炼炉电平衡·····	(324)
第七章 机械设备电平衡测试·····	(329)
第一节 机加工设备电平衡测试·····	(331)
第二节 通用机械设备电平衡测试·····	(335)
第三节 冲击性负荷的机械设备电平衡测试·····	(337)
第八章 产品单耗·····	(345)
第一节 产品单耗的测算·····	(345)
第二节 产品单耗和综合电能利用率的关系·····	(348)
附录·····	(352)
附录 1 电流互感器的允许误差·····	(352)
附录 2 电压互感器的允许误差·····	(353)
附录 3 SJ1、SJL ₁ 系列变压器技术数据表·····	(354)

附录 4	SJ 1 系列电力变压器技术数据表·····	(355)
附录 5 (1)	J ₁ 、JQ ₂ 系列三相异步电动机参数表·····	(356)
附录 5 (2)	JS、JR 系列三相异步电动机设计汇总表·····	(368)
附录 5 (3)	JZ ₂ 、JZR ₂ 系列三相异步电动机设计数据表·····	(384)
附录 6	ZSJ 与 ZSJL 系列整流变压器性能数据表·····	(385)
附录 7	ZSJK 整流变压器与能耗有关的技术数据表·····	(386)
附录 8	整流器常用联结主变压器的参数表·····	(387)
附录 9	不同温度下饱和水蒸气密度和饱和水蒸气压力·····	(390)
附录 10	几种金属元素的比重、熔点、比热、潜热表·····	(396)
附录 11	几种非金属元素的比重、熔点、比热、潜热表·····	(396)
附录 12	国产电炉变压器性能数据表·····	(397)
附录 13	物体黑度表·····	(398)
附录 14	熔铁无芯炉与能耗有关参数·····	(400)
附录 15	铁水保温 (升温) 无芯炉及与能耗有关参数·····	(400)
附录 16	熔铜无芯炉与能耗有关参数·····	(401)
附录 17	熔铝铁坩埚无芯炉与能耗有关参数·····	(401)
附录 18	熔铝非铁坩埚无芯炉与能耗有关参数·····	(402)

附录 19	熔炼镁、锌、铅无芯炉与能耗有关参数	(403)
附录 20	熔铁有芯炉与能耗有关参数.....	(404)
附录 21	铁水保温 (升温) 有芯炉与能耗有关 参数.....	(404)
附录 22	熔铜有芯炉与电耗有关参数.....	(405)
附录 23	熔铝有芯炉与电耗有关参数.....	(405)
附录 24	熔锌有芯炉与电耗有关参数.....	(406)
附录 25	镀锌用有芯工频感应熔锌炉与电耗有关 参数.....	(406)
附录 26	熔铝坩埚电阻炉与能耗有关参数.....	(407)
附录 27	熔镁坩埚电阻炉与能耗有关参数.....	(407)
附录 28	熔铝反射电阻炉与能耗有关参数.....	(408)
附录 29	GW 系列中频感应熔炼炉与能耗有关 参数.....	(408)
附录 30	ZG 系列中频真空感应熔炼炉与能耗有 关参数.....	(408)
附录 31	热轧硅钢片变压器技术参数表.....	(409)
附录 32	冷轧与热轧硅钢片变压器技术参数及参 考价格.....	(411)
附录 33	冷轧与热轧硅钢片变压器技术参数及参 考价格.....	(412)
附录 34	“节能型”变压器技术参数及参考价格	(413)
附录 35	“节能型”变压器技术参数及参考价格...	(414)

第一章 测试误差和数据处理

电平衡测试是在生产现场进行的工程测试，通过对大量测试数据和实例的分析，我们发现，尽管测试条件相同，选用的仪器、仪表相同，测量方法及测试程序相同，但是，对某一参数进行多次重复测量，所得测试数据，并不是同一值，而是波动在某一数值范围之内。因而要求出测定的最佳值，舍弃可疑数（粗值），判断并计算出误差或误差范围，从而得出最终值。

通过实测，我们得到了大量的测试数据。对这些数据，需进行加工处理。例如，测试所选用的仪器、仪表误差仅千分之几，有的也就百分之几，但是，将测试结果进行某些运算之后，数据的位数竟达五六位之多。这不仅增加了计算工作量，而且往往使人产生误解，以为数据的位数越多越精确。也有的测试人员采取另一种态度，往往把测试数据，特别是最终结果取得过小，以致不能正确反映测试精确度，这两种态度都是不科学的。因而，位数不能取得过多，否则，不但浪费时间，还往往会使人对测试结果产生怀疑；另一方面，若数据位数取得过少，也不能正确地反映测试结果。所以，正确合理地对测试数据进行加工处理，是一项十分重要的工作。

第一节 误差概述

一、测量的分类

所谓测量，就是通过实验的方法，把被测量与作为比较单位的标准量进行比较的全过程。

1. 直接测量和间接测量

(1) 直接测量

被测量和标准量直接进行比较称为直接测量。例如用电压表测量电压，秒表测时，用转矩转速仪测电动机轴功率等。

(2) 间接测量

有些量不能采用直接法测量，但是，这些量和其他一些可直接测量的量之间遵从一定的函数关系，例如导线损耗功率，它和导线电阻，流过的电流遵从下述函数关系，即：

$$W_{\text{线损}} = I^2 R$$

电流 I 和导线电阻均可直接测量。因而我们可先采用直接法测量电流值和导线电阻值，然后再利用上式计算出导线的损耗功率。

二、实验室测量和技术测量

在实用上，还可按对测量误差的要求，将测量分为实验室测量和技术测量。所谓实验室测量，是指这种测量需要考虑到测量误差的数值，例如测量某标准电阻的标称值，测量

结果 $R = 1 + 0.15$ 欧姆。所谓技术测量，是指只考虑误差的上限值，已满足实际要求。对于实验室测量，往往提出“误差等于多少”的问题；而对于技术测量，则只提出“误差不超过多少”即可满足要求。企业电平衡测试属于技术测试，对于单体耗电设备的运行效率测试，只提出测试误差不超过 $\pm 5\%$ ，并不要求误差值一定等于 3% 或 -2% 。

无论直接测量，还是间接测量，测试值都要由仪表读出，因而在测量方法上，又可分为直读法（偏位法）和零读法两类。所谓直读法，是以仪表指针的偏转或位移来定出被测量，如电流表、电压表、功率表等。所谓零读法，是在仪表中，用可调的已知量去抵消待测量，并使仪表归零，即仪表指针回零位。则此已知量就等于待测量的数值。例如用双臂电桥测量电阻，就属于零读法测量。

三、真值、算术平均值、误差

1. 真值与误差

一般说来，任何物理参数的真值是未知的。但是，任何物理量的真值都是客观存在的，只是无论我们采用多么精密的仪器仪表，试验方法多么完善，试验人员多么精心，都无法准确地测试出物理量的真值，因此，真值是未知的。严格地说，一切测试结果都有误差，误差自始至终存在于一切科学试验和工程测试之中，不同的，只是测试误差的大小而已。随着科学技术水平的提高，测试人员的经验、技巧、专业知识的丰富，误差可以被控制得越来越小，但是不可能使测试误差降低为零。下面我们给出真值和误差的定义。

真值——物理量客观存在的值称为该物理量的真值或准确值。

误差——物理量的测试值与真值之差称为测试误差。

尽管物理量的真值是不可测的，但我们可以采取完善的措施，尽一切努力，使测试误差控制在最小，使测试值更接近物理量的真值。

2. 算术平均值

由前所述，物理量的真值是客观存在的。但是，严格地讲，由于测量仪器、测量方法、环境条件、测试程序、人员素质及操作水平等限制，事实上，真值是无法测量到的。在实际测量当中，人们对真值赋予了这样的内容，即真值是测量次数无限增多时，求得的平均值。它的意思是，设测量次数无限多，在等精度测量条件下，由误差分布规律知道，正负误差出现的机会相等，将各测量值相加，再加以平均，正负误差抵消，可得到近似于真值的数值 a_x ，其数学表达式为：

$$a_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1-1-1)$$

a_x 又称作测定值的数学期望。

在实际测量中，任何物理量的测量次数都是有限的，故有限次等精度测量求出的平均值只能是近似真值或称为最佳值。

平均值有算术平均值、均方根值、几何平均值、中位值等，其中以算术平均值应用最广泛。用最小二乘法原理可以

证明，在一组等精度测试数据中，算术平均值是最可信赖的。

算术平均值的数学表达式如下：

$$a = \sum_{i=1}^n X_i / n \quad (1-1-2)$$

式中 X_i 为第 i 次实际测量值。

有的文献将第 i 次测试值与算术平均值之差定义为第 i 次测量的剩余误差。

四、绝对误差和相对误差

1. 绝对误差

绝对误差等于物理量的测试值（测得值）与它的真值之差。数学表达式为：

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1-3)$$

由于被测量的真值是未知的，所以在测试中，往往把标准表的读数当作被测量的真值 X_0 ，习惯上称这个读数为实际值，如某电路电流的实际值为 $5.55 A$ ，而测得值为 $5.53 A$ ，则绝对误差为 $5.53 A - 5.55 A = -0.02 A$ 。国家标准规定，高一级标准仪器的误差与低一级标准仪器或者普通仪器的误差相比，比值为 $1/5$ 时（或 $1/3 \sim 1/20$ ），则可以认为前者是后者的相对真值。所以，实际使用的仪表，要定期送往上一级标准计量部门进行校检，方可投入使用。在高精度仪表中，往往给出修正值或修正曲线。因而，当知道了测得值 X_0 （这里称作相对真值或实际值）， $(-C)$ 即为绝对误差。

修正值有时称作补值或更正值。修正值和绝对误差大小

相等，但符号相反。其计算公式如下：

$$C = -\Delta X = X_0 - X \quad (1-1-4)$$

2. 剩余误差

剩余误差有时又称为残差。需要说明的是，剩余误差和残差是两个实质内容相同的概念，在实际测试中应予以注意。

前面的内容曾定义了有限次测量值的算术平均值 a ，因为实际上不可能进行无限次测量，所以被测量的数学期望 a_r 未知。如用被测量的算术平均值 a 代替 a_r ，这时各测定值与算术平均值 a 之差定义为测定值的剩余误差或称之谓残差，其计算公式为： $U_i = X_i - a$ 。

剩余误差之和等于零，即：

$$\sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n (X_i - na) = 0$$

这一特性可用于验算算术平均值的计算是否正确。

3. 相对误差

绝对误差的表示方法有不足之处，因为它不能确切地反映测量的准确程度。例如，用万用电桥测量两个电容器，其中 $C_1 = 10\mu F$ ， $\Delta C_1 = 0.1\mu F$ ； $C_2 = 1000\mu F$ ， $\Delta C_2 = 1\mu F$ 。从表面上看 $\Delta C_1 < \Delta C_2$ ，但是不能由此得出电容器 C_1 的测量值比电容器 C_2 的测量值准确度高的结论，因为 ΔC_1 虽为 $0.1\mu F$ ，但它相对 C_1 来说，为 1%； ΔC_2 为 $1\mu F$ ，看起来 ΔC_2 是 ΔC_1 的 10 倍，但它相对 C_2 来说却仅为 0.1%，显然 C_2 的测量比 C_1 的测量准确得多。下面我们定义相对误差。

相对误差定义为绝对误差与真值之比，以 r 表示相对误差。

$$r = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

前面已经论及，物理量的真值是未知的，无法利用式 (1-1-5) 求相对误差。然而，在一般情况下，测得值 X 与其真值 X_0 相差很小，因而可以利用测得值 X 代替 X_0 求相对误差：

$$r = \frac{\Delta X}{X_0} \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-1-6)$$

例如，今有一块 0—5 伏的直流电压表，精度等级为 0.5 级。利用它测得某励磁回路的电压为 4.00 伏（电压表示值），则该电压的实际值（相对真值）为 4.00 伏 + (4.00 × 0.5%) 伏 = 4.02 伏。

绝对误差 $\Delta U = U - U_0 = 4.00 - 4.02 = -0.02$ 伏

下面用两种方法计算相对误差。

(1) 利用 $r = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\%$ 计算。

$$\Delta U = -0.02 \text{ 伏}$$

$$U_0 = 4.02 \text{ 伏}$$

$$\text{则 } r = \frac{-0.02}{4.02} \times 100\% = -0.498\%.$$

(2) 利用 $r = \frac{\Delta U}{U} \times 100\%$ 计算。

$$\Delta U = -0.02 \text{ 伏}$$

$$U = 4.00 \text{ 伏}$$

$$\text{则 } r = \frac{-0.02}{4.00} \times 100\% = -0.500\%.$$

方法（1）和方法（2）计算结果几乎相等，只差0.002%。

由上述可见，相对误差用以衡量测试准确度十分确切。相对误差越小，说明测试准确度越高。

相对误差是一个无量纲的量，通常采用百分数表示。而绝对误差是有量纲量，它和测试量量纲相同。

4. 引用误差（相对引用误差）

在电量指示仪表中，往往用相对引用误差（简称引用误差）来表示仪表的准确等级。在这类多档次、连续刻度的仪器仪表中，可测范围不是一个点，而是一个量程。若按（1-1-6）式计算相对误差，由于分母是一个变量，所以给计算带来许多麻烦。为了计算方便和划分仪表准确度等级，通常取该仪器仪表量程中的测量上限作为分母，由此引出定义：

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{满刻度值}} \times 100\%$$

$$\text{用符号表示：} \quad r_n = \frac{\Delta X}{X_N} \times 100\%$$

电工仪表的精度等级分0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七个等级，用%表示。如果说某电工仪表为α级，则仅仅说明该仪表的最大引用误差不超过α%，而不能认为它在各刻度点上的示值都有α%的准确度。清楚这一点，对恰当地选用仪表十分重要。