

第二版

电能 计量基础

张有顺 冯井岗 编著

中国计量出版社

电能计量基础

(第二版)

张有顺 冯井岗 编著

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

电能计量基础/张有顺,冯井岗编著.—2版.—北京:中国计量出版社,2002.7

ISBN 7-5026-1657-8

I.电… II.①张… ②冯… III.电能—电量测量 IV.TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 046426 号

内 容 提 要

电能表是使用最广泛、用量最大的一种电测仪表,而电能表的校验又是电能计量中量最大、最基础的工作。

本书介绍电能表时,以河南思达高科技股份有限公司生产的电子式电能计量仪器为例,兼顾国内其他典型产品,基本反映了国内电子式电能计量仪器的状况。全书共 9 章:前 4 章介绍测量误差、电工基础、电工测量及电能测量等基础知识;5~8 章介绍电子式安装电能表、电子式标准电能表、功率测试电源及电能表校验装置的工作原理、电路分析及使用方法等;第 9 章介绍电能计量仪表的生产工艺问题。

本书可作为电能计量的培训教材,也可供从事电能计量仪表制造、使用、维修和校验的技术人员阅读参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

E-mail jlfbx@263.net.cn

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 24.5 字数 585 千字

2002 年 8 月第 2 版 2002 年 8 月第 2 次印刷

*

印数 7 001-17 000 定价: 40.00 元

再版序言

《电能计量基础》本是为河南思达高科技股份有限公司（以下简称“思达公司”）编写的一本职工培训教材，但出版后得到电能计量行业的广泛使用，甚至有些电力技校或电能计量培训班也将其选作培训教材或参考书，这使我们受到莫大的鼓舞与鞭策。

近年来，科学技术迅速发展，电能计量仪器也日新月异地变化着。自推行“一户一表”政策和城乡电网改造以来，电测仪器的发展更为迅猛，各种类型的电子式电能表、准确度更高的标准表、输出功率更大且性能更稳定的测试电源以及功能更齐全的校验装置不断涌现。为适应新的形势，我们应出版社之约修订再版了《电能计量基础》一书。

这次修订再版，除改正第一版的一些错误外，又新增加了“电子式安装电能表”和“电能计量仪表主要生产工艺问题”2章，补充了开关放大功率测试电源和新的标准表以及新的检定装置。在这些新的仪器装置里采用了许多新的大规模集成电路。编写时仍本着由浅入深、通俗实用、便于自学的原则。

张有顺、冯井岗为本书的正副主编。参加编写的有：耿直（第1，2，9章）、付秋生（第3，4章）、邱求元和刘伟（第5，6章）、陈传岭（第7章）、李立堂（第8章）。张有顺负责全书的统稿，并参加第7，8章的编写；冯井岗审定了全书的内容。在编写过程中，参阅了思达公司许多内部资料，得到了丁岗山、刘宜龙、余秀利、孟耕、王学志、王新亚等许多技术人员的帮助，特别是吴建华、杨宪、申东晓、权绍建的帮助。他们提出了许多宝贵意见。郑桂云同志打印了全部文稿。在本书出版过程中，得到了中国计量出版社的大力支持。在此一并表示深深的谢意！

因我们水平所限，书中错误与不妥之处在所难免，恳请读者不吝指教。

编者

2002年6月

第一版前言

目前国内在电能测量中还以感应式电能表为主，在每年生产的诸多测试仪表中，电能表的产量居首位。因此，对电能表的校验就成为电能计量中最大量、最基础的工作。

自 JJG 307—1988《交流电能表检定规程》公布以来，我国的电能计量工作得到了迅速的发展。由于电子技术特别是计算机技术的发展，使电能表的校验工作发生了巨大的变化，由电子的测试电源、标准电能表逐步代替了原来的电工电源和机械标准表，减小了校验装置的体积，提高了校验的准确度和自动化程度，为电力计量从实验室转到生产现场，从单个计量器具转向计量系统，创造了良好的条件。

思达（集团）电子仪器公司多年来致力于电能计量仪表仪器的研制与生产，其产品在国内得到广泛应用。本书是在公司职工培训教材的基础上修改补充而成，主要介绍电子式测试电源、标准电能表和自动校验装置的知识，是一本实用性很强的书，可供从事电能计量仪表生产、使用和维修的技术人员参考。

本书编写时力求由浅入深、通俗易懂、便于自学。全书共分7章，前4章是基础部分，包括测量误差基本知识、电工基础知识、电力系统中的电工测量和电能测量；后3章主要介绍电子式测试电源、电子式标准电能表和自动校验装置的性能特点、工作原理（电路分析）和使用方法，是本书的重点部分。

本书是在公司的主持下，由张有顺、冯井岗同志编写的。在编写过程中，得到了电力计量行业许多专家的热情关心和支持，中国计量出版社给予了许多技术指导，公司的技术人员也提出了许多合理化建议，在此一并致谢。

由于我们学术水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1995年12月

目 录

第一章 测量误差的基本知识	(1)
第一节 计量学的基本概念	(1)
一、计量的概念与意义	(1)
二、常用电学单位	(1)
三、计量的基准和标准	(2)
四、电能量值传递(检定)系统	(3)
第二节 测量误差与电工仪表的准确度等级	(4)
一、测量方法	(4)
二、绝对误差与修正值	(5)
三、相对误差	(5)
四、引用误差与电工仪表的准确度	(6)
第三节 测量误差的性质和产生的原因	(8)
一、测量误差分类	(8)
二、系统误差	(8)
三、随机误差	(8)
四、粗大误差	(9)
第四节 误差的估算	(9)
一、单次测量的误差估算	(9)
二、多次测量的误差估算	(9)
三、系统误差和随机误差对测量结果的影响	(11)
第五节 误差的合成	(12)
一、被测量为两个量的和或差	(12)
二、被测量为两个量的积或商	(13)
三、仪表的基本误差和附加误差的合成	(14)
第六节 测量不确定度的基本概念	(14)
一、测量不确定度的基本概念	(15)
二、测量不确定度的分类及计算方法	(15)
第七节 测量结果的数据处理	(17)
一、有效数字的概念	(17)
二、数据修约	(17)

三、有效数字的运算	(18)
四、测量结果的数据处理	(19)
第二章 电工基础知识	(21)
第一节 正弦交流电	(21)
一、周期与频率	(21)
二、幅值与有效值	(22)
三、初相位及相位差	(23)
第二节 正弦电路的功率	(23)
一、瞬时功率	(23)
二、有功功率(平均功率)	(25)
三、无功功率	(25)
四、视在功率	(26)
五、功率因数	(26)
六、复功率	(27)
第三节 三相正弦交流电	(27)
一、对称三相交流电的特点	(27)
二、对称三相电的接法及三相四线制与三相三线制	(28)
三、负载的接法	(29)
四、三相电路的功率	(31)
第四节 非正弦周期信号	(33)
一、基波与谐波	(33)
二、非正弦周期信号的有效值、平均值与正弦波的失真度	(34)
三、波形因数、波顶因数及仪表测量值	(36)
四、真有效值与集成真有效值转换器 AD637	(37)
第三章 电力系统中的电工测量	(39)
第一节 我国电力工业的发展概况	(39)
一、电力系统的基本概念及电力生产特点	(39)
二、电力工业概况	(40)
三、电能质量的基本要求	(46)
第二节 发电厂与变电所电气部分概述	(46)
一、一次设备	(46)
二、二次设备	(47)
第三节 发电厂和变电所的电气测量仪表配置	(47)
第四节 电工常用指示仪表	(49)
一、指示仪表的分类	(49)
二、指示仪表的面板标记	(50)

三、电工指示仪表的型号	(51)
四、指示仪表的误差和准确度	(52)
第五节 互感器的基本概念	(52)
一、互感器的作用	(52)
二、互感器的种类	(53)
第六节 电流互感器	(54)
一、工作原理	(54)
二、电流互感器的工作状态	(55)
三、电流互感器的误差	(55)
四、对影响误差因素的分析	(58)
五、电流互感器的接线	(60)
第七节 电压互感器	(61)
一、电压互感器的工作原理及工作状态	(61)
二、电压互感器的误差	(61)
三、电压互感器的准确度等级及额定容量	(63)
四、电压互感器二次回路压降误差	(63)
五、电压互感器的接线	(64)
第八节 互感器的使用方法	(65)
第九节 有源补偿式电流互感器及感应分压器	(66)
一、有源补偿式电流互感器	(66)
二、感应分压器	(68)
第十节 电量变送器	(71)
一、什么是电量变送器	(71)
二、对电量变送器的一般技术要求	(71)
三、电量变送器的种类	(72)
第四章 电能的测量	(74)
第一节 功率的测量	(74)
一、电动式功率表	(74)
二、有功功率的测量	(75)
三、无功功率的测量	(77)
第二节 电能表的分类	(79)
一、电能表的分类	(79)
二、特种电能表	(80)
第三节 感应式电能表	(81)
一、工作原理和电能表常数	(81)
二、主要技术特性	(82)
三、电能表的使用	(83)

第四节 有功电能的测量	(84)
一、单相电路有功电能的测量	(84)
二、三相四线电路有功电能的测量	(84)
三、三相三线电路有功电能的测量	(85)
第五节 无功电能的测量	(86)
一、三相四线电路无功电能的测量	(86)
二、三相三线电路无功电能的测量	(88)
第六节 电能表的联合接线	(90)
第五章 电子式安装电能表	(91)
第一节 电能表用户概况	(91)
一、电能表的三类用户	(91)
二、电力系统用户概况	(91)
第二节 电子式电能表的工作原理	(96)
一、基本工作原理与技术指标	(96)
二、电路组成	(98)
三、乘法器	(98)
四、P/f 变换器	(100)
五、电能计量模块	(101)
第三节 电子式单相字轮计度器电能表 (DDS26 型)	(101)
一、ADE7755 电能计量集成电路	(101)
二、DDSY26 型电能表	(104)
三、电子式电能表的可靠性与抗干扰	(106)
四、DDS26 型电能表技术指标	(108)
第四节 单相预付费电能表 (DDSY23 型)	(108)
一、BL0932 电能计量集成电路	(109)
二、采样信号与电能计量脉冲	(110)
三、单片机 MC68HC05L5 简介	(111)
四、MC68HC05L5 在 DDSY23 型电能表的应用	(113)
五、供电电路	(116)
六、技术指标	(117)
第五节 单相复费率电能表 (DDSF111 型)	(118)
一、电能计量电路	(118)
二、时钟电路	(119)
三、微控制器及有关电路	(120)
四、电源电路	(124)
五、技术指标	(124)
第六节 三相三线多功能电能表 (DSSD111 型)	(124)

一、SA9604A 电能计量芯片及应用电路	(125)
二、数据处理单元 MC68HC05L16 及有关电路	(126)
三、电源电路	(129)
四、技术指标	(129)
第七节 电能表的自动抄表技术	(130)
一、近程抄表	(130)
二、远程抄表	(131)
第六章 电子式标准电能表	(133)
第一节 BDJ 系列功率电能表的基本工作原理	(133)
一、原理框图	(133)
二、工作原理	(134)
三、频率的功率当量及功率测量	(134)
四、脉冲的电能当量及电能测量	(135)
五、电表常数 C_0 及电能表校验	(136)
第二节 BDJ 系列标准功率电能表的电路分析	(137)
一、输入级	(137)
二、电流型时分割乘法器	(139)
三、 I/f 变换电路	(143)
四、微机控制部分	(145)
第三节 BDJ 系列功率电能表的主要性能	(152)
一、主要功能	(153)
二、技术性能	(153)
三、主要特点	(154)
第四节 BDJ 系列功率电能表的使用方法	(154)
一、仪表的加电和注意事项	(155)
二、预置参数	(156)
三、测量功率	(158)
四、测量电能	(158)
五、使用光电头校验电能表	(159)
六、使用启停开关校验电能表	(159)
七、打印机的使用	(160)
第五节 S-4303 标准功率电能表的特点	(161)
一、AD534 基本工作原理	(161)
二、S-4303 标准表工作原理	(163)
三、自校原理	(164)
第六节 CB₃ 功率电能表的特点	(165)
一、原理框图	(165)

二、特点	(166)
三、使用方法	(167)
第七节 ST-2000D 单相标准功率电能表	(170)
一、测量原理	(170)
二、测量电路	(173)
三、人机对话电路	(179)
四、技术指标	(180)
第八节 S-6502 三相标准功率电能表	(181)
一、测量原理	(181)
二、电路分析	(182)
三、技术指标	(190)
第九节 SB1300 三相宽量程多功能标准电能表	(190)
一、测量原理	(191)
二、采样电路	(194)
三、数字信号处理器 TMS320C3X	(197)
四、DSP 的应用	(200)
五、DSP 与工控机 ISA 总线的接口	(200)
六、技术指标	(202)
第十节 ST-9001TB 复费率电能表时间校验仪	(202)
一、测量原理	(203)
二、FPGA (现场可编程门阵列) XCS10	(204)
三、控制电路	(207)
四、技术指标	(209)
第七章 功率测试电源	(211)
第一节 JCD 系列电源的主要指标及产品	(211)
第二节 JCD 系列电源的基本工作原理	(212)
一、信号产生电路	(212)
二、功率放大与变换电路	(219)
三、输出控制电路	(231)
四、JCD 系列电源的输出	(235)
第三节 JCD3060B 电源的主要性能及使用方法	(239)
一、主要性能	(239)
二、使用方法	(240)
第四节 JCD 系列其他电源的特点及原理	(245)
一、JCD4060 三相谐波精密测试电源	(245)
二、JCD3022 三相交直流测试电源	(248)
第五节 开关放大功率测试电源	(252)

一、功率测试电源的基本组成	(252)
二、正弦脉宽调制器 SPWM	(253)
三、开关放大器	(255)
四、稳定电路	(256)
五、拍频问题	(256)
六、开关放大功率测试电源的特点及性能指标	(258)
第八章 电能表的校验装置	(260)
第一节 电能表校验的基本知识	(260)
一、检定与检定规程	(260)
二、检定周期	(260)
三、检定项目	(261)
四、检定方法	(262)
五、误差计算公式	(262)
六、检定装置的沿革	(264)
七、检定装置的准确度等级	(266)
八、计量中的三相三线制	(267)
九、电能表检定装置的发展趋势	(268)
第二节 ST-9001D1 系列三相电能表校验装置的主要性能	(270)
一、主要功能	(270)
二、主要特点	(271)
三、技术指标	(271)
四、其他技术性能	(272)
第三节 ST-9001D1 系列三相电能表校验装置的基本原理	(273)
一、原理框图	(273)
二、JCD3060L 程控电源	(274)
二、标准表	(276)
四、9001CH 切换箱	(276)
五、校验接线图	(276)
第四节 ST-9001D1 系列三相电能表校验装置的使用方法	(280)
一、键盘与显示	(280)
二、加电后初始状态	(280)
三、基本功能和使用方法	(281)
四、外接计算机	(286)
五、使用注意事项	(287)
六、应用举例	(289)
第五节 ST-9020D48A 型单相电能表检定走字装置	(291)
一、功能与特点	(291)

二、技术性能	(291)
三、工作原理	(292)
四、电路分析	(294)
第六节 ST-9001D5B 型三相多功能电能表检定装置	(298)
一、原理框图	(298)
二、主要功能	(299)
三、测试原理	(299)
四、电路分析	(300)
五、技术指标	(303)
第七节 SD-6300 三相电能表调试检定仪	(303)
一、主要功能及特点	(304)
二、技术性能	(304)
三、电路分析	(305)
第八节 电能表的现场校验	(309)
一、什么是现场校验	(309)
二、三相三线电能表的错误接线情况	(310)
三、检查电能表接线错误的方法	(312)
第九节 ST-9040C 电能表现场校验仪	(317)
一、功能和特点	(317)
二、主要技术指标	(317)
三、工作原理	(318)
四、电路分析	(319)
五、使用方法	(324)
六、本仪表电能检定方法	(330)
七、接口定义	(330)
第十节 ST-9040K 电能表现场校验仪	(331)
一、功能与特点	(331)
二、技术指标	(332)
三、电路原理	(332)
第十一节 ST-9040G 单相电能表检测仪	(334)
一、ST9040GA	(334)
二、ST9040GB	(336)
第十二节 ST-9010 电量变送器自动校验装置	(341)
一、校验装置的组成	(342)
二、校验原理	(342)
第九章 电能计量仪表主要生产工艺问题	(345)
第一节 元器件的可靠性筛选	(345)

一、什么是可靠性筛选	(345)
二、影响可靠性的因素	(345)
三、元器件的筛选方法	(346)
第二节 表面贴装技术	(347)
一、表面贴装元器件	(347)
二、表面贴装工艺	(348)
三、表面贴装的特点	(348)
第三节 静电防护问题	(349)
一、静电的产生	(349)
二、静电的危害	(349)
三、静电的防护	(351)
四、静电防护的技术标准	(351)
第四节 电磁兼容性问题	(352)
一、电磁兼容性的概念	(352)
二、电磁兼容性的标准	(352)
三、电磁兼容性试验	(353)

附录

附录 1 常用集成电路参考资料和索引	(358)
一、74 系列 TTL 及 HC-MOS 数字逻辑电路	(358)
二、4000 系列 CMOS 数字逻辑电路	(363)
三、计算机用及其他集成电路	(366)
四、集成电路索引 (按数字、字母顺序排列)	(368)
附录 2 阻容元件的标志方法	(370)
一、电阻器	(370)
二、电容器	(372)
参考资料	(374)

第一章

测量误差的基本知识

第一节 计量学的基本概念

一、计量的概念与意义

计量是测量的一种特殊形式，它是把被测量与国家计量部门作为基准或标准的单位进行比较，以确定合格与否，最后给出具有法律效力的《检定证书》，以保证单位的统一、量值的准确可靠。

计量学是研究测量、保证测量统一和准确的科学。它的研究对象是：计量单位及其基准、标准的建立、保存和使用；测量方法和器具；测量的准确度；观测者进行测量的能力以及计量法制和管理。计量学也研究物理常数和标准物质、材料特性的准确测量。

保证单位的统一和测量的准确可靠，对开展科学研究、发展国民经济、进行贸易活动、保障安全生产、改善人民生活具有重大意义。为此，我国于1985年9月6日颁布了《中华人民共和国计量法》，其主要内容包括确立我国法定计量单位制度；建立计量基准和量值溯源体系；监督计量器具的制造、销售、进口和使用；对贸易、健康、安全、环保所用的计量器具实施强制检定等。

二、常用电学单位

测量单位是确定一个被测量的标准。我国国务院于1984年2月27日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，明确规定我国采用国际单位制。

国际单位制是1960年第11届国际计量大会通过的，其国际代号为SI。SI单位包括了SI基本单位、SI导出单位和SI辅助单位3类。

SI基本单位共有7个，其名称及符号列于表1—1。

表 1—1 SI 基本单位

量	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s

续表

量	单位名称	单位符号
电流	安 [培]	A
热力学温度	开 [尔文]	K
物质的量	摩 [尔]	mol
发光强度	坎 [德拉]	cd

SI 导出单位是由 SI 基本单位按定义、定律或一定的关系式推导出来的单位。SI 辅助单位有两个，即平面角的单位弧度和立体角的单位球面度。

电工测量中常用的并具有专门名称的导出单位见表 1—2。

表 1—2 电工测量中具有专门名称的导出单位 (SI)

量	单位名称	单位符号
频率	赫 (兹)	Hz
能、功	焦 (耳)	J
功率	瓦 (特)	W
电位、电压 电势、电动势	伏 (特)	V
电容	法 (拉)	F
电阻	欧 (姆)	Ω
电感	亨 (利)	H
电导	西 (门子)	S
磁通 (量)	韦 (伯)	Wb
磁感应强度 磁通密度	特 (斯拉)	T

需要说明的是，工程测量中电能的单位常用“千瓦时” ($\text{kW}\cdot\text{h}$)，也称“度”，它不是 SI 单位。由于它很实用，所以在电能测量中，习惯上仍然常用。“千瓦时”与 SI 单位中能量“焦耳”的换算关系是： $1 \text{ kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

三、计量的基准和标准

1. 基准

基准是计量的原始依据和最高标准，按其作用和用途可以分为以下几个等级：

(1) 国家 [计量] 基准。在特定计量领域内复现和保存计量单位并具有最高计量学特性，经国家鉴定、批准作为统一全国量值最高依据的计量器具。

(2) 副 [计量] 基准。通过与国家基准比对或校准来确定其量值，并经国家鉴定、批准的计量器具。

副基准在国家检定系统中的位置仅在国家基准之下。

(3) 工作 [计量] 基准。通过与国家基准或副基准比对或校准, 用以检定计量标准的计量器具。

工作基准在国家计量检定系统表中的位置仅在国家基准和副基准之下。设立工作基准主要是为了不使国家基准和副基准由于使用频繁而丧失其应有的计量学特性或遭受损坏。

2. 标准

按国家计量检定系统表规定的准确度等级, 用于检定较低等级计量标准或工作计量器具的计量器具称为标准。

计量标准在国家计量检定系统表中的位置在工作基准之下, 工作计量器具之上。

具有一种或多种准确确定的特性值, 用以校准计量器具, 评价测量方法或给材料赋值, 并附有经批准的鉴定机构发给证书的物质或材料称为标准物质。

四、电能量值传递 (检定) 系统

有了多种精确度等级的基准和标准, 并不能保证量值的准确和统一, 还必须建立各级计量机构, 负责量值的传递、检定和督促工作, 凡是没有取得各种检定合格证的基准、标准和工作仪表, 就没有法定价值, 只能作参考而已。

所谓量值传递, 就是各地区或各部门所使用的计量标准器具和上级标准相比较, 若比较结果其误差在允许的范围内时, 这些标准器具就可作为地区或部门的计量器具的标准。再下一级的标准量具就以这些标准量具为标准进行比较, 若误差在允许范围内, 就可作为更下一级的标准器具。这样逐级比较, 逐级传递, 直至工作量具。这个过程就称为量值传递。对具体计量器具的比较就是计量检定。

当然, 量值传递的级数越多, 到工作量具的偏差就会越大。所以工作量具最好由国家最高标准检定。但是我国是如此之大, 难以设想数以千百万计的多种标准器具都定期由国家最高标准直接检定。所以量值传递是不可缺少的, 并且大多数情况下都是自上而下逐级传递, 这就需要制定一个合理而完善的计量检定系统, 以保证量值传递的准确和可靠。

各行各业都有自己的计量器具, 也都有自己的量值传递系统, 所以量值传递系统是一个庞大的系统。我国建立的计量科学研究基地, 研究和保存国家计量基准共 10 大类 147 项, 建立了拥有 800 多种一级有证标准物质信息库。它们与国际保持一致, 也是国内量值溯源的基础。所谓量值溯源, 就是自下而上的追踪计量标准的过程。

为了就近满足工业企业量值溯源和计量器具标准、检定的需要, 各级政府基本上都建立了可溯源至国家基准的各个等级的社会公用计量标准, 形成了以地区覆盖为主的多层次计量标准网和计量检定网。这是一个可基本上满足需求的、较完善的溯源体系 (等级图), 如图 1—1 所示。

电能量值传递系统仅是这个大系统中的一个子系统, 图 1—2 是原国家技术监督局于 1990 年 9 月公布的交流电能计量器具检定系统的简化系统*, 它是按照目前技术上可达到的水平, 按计量器具准确度的要求而设计的, 大体上可反映我国电力部门目前的计量传递情况。

* 详见 JJG 2074—1990 《交流电能计量器具检定系统》。