



普通高等教育“十三五”规划教材

电气与电子测量技术 (第2版)

◎ 罗利文 等编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材

电气与电子测量技术

(第2版)

罗利文 盛戈皞 李喆 张君 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共 8 章。第 1 章主要介绍测量系统的构成及其静态、动态特性；第 2 章介绍误差的基本理论；第 3 章重点介绍常用的传感器；第 4 章介绍测量系统中的调理电路；第 5 章重点介绍高电压测量、大电流测量、交流电各电气参数测量、电力设备绝缘参数测量、接地电阻测量等内容；第 6 章介绍现代数字化电气测量系统及其常用的算法；第 7 章介绍虚拟仪器及其开发语言——LabVIEW；第 8 章介绍电气测量中典型的干扰源及其抗干扰对策。

本书内容丰富，理论推导严谨，可作为高等学校电气工程及自动化或相关专业的教材，也可作为从事相关工作的科技人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气与电子测量技术 / 罗利文等编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.8
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-121-32518-2

I. ①电… II. ①罗… III. ①电气测量—高等学校—教材 ②电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 199345 号

责任编辑: 杨秋奎

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 407 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254694。

前 言

电气测量贯穿于电力生产和消费的每一个环节，如发电厂的有功调节、无功调节，电力系统的继电保护，电力设备的状态监测，用户端电费计量和电能质量的监测等，所有这些都离不开准确可靠的电气测量技术。“电气测量技术”是电气工程与自动化专业的一门专业核心课程。随着电子技术的发展和数字化技术的广泛应用，电气测量仪器已日益电子化和数字化。

在工程实践中，电气测量技术与电子技术日益交叉和融合，所以上海交通大学将“电气与电子测量技术”列入电气工程与自动化本科专业的专业基础课，2015年该课程被列入“上海市重点课程”，2017年被评为“上海市精品课程”。该课程的配套教材——《电气与电子测量技术》于2011年由电子工业出版社出版发行。2011年以来，电力工业的发展和智能电网的建设取得了重要进展，很多旧的标准和规程被废止，诞生了一批新的标准和规程。例如，《通用计量术语及定义》JJF 1001—1998被JJF 1001—2011取代，《测量不确定度的评定与表示》JJ 1059—1999被JJ 1059.1—2012取代，《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》已经更新到DL/T 866—2015。为了适应新的国家标准和行业规程，第1版教材中的相关内容迫切需要进行调整。

在本书的编写过程中，我们参阅了相关文献，对书中的内容做了科学合理的规划，在内容安排上有以下特点：

(1) 本书以现代数字化电气测量系统的构成为主线，内容上涵盖了传感器、调理电路、数据采集系统和电气测量常用算法。同时，也详细介绍了反映测量系统的静态特性和动态特性的技术指标。

(2) 第4章的编写中，摒弃简单重复模电课程的普遍现象，从实际的集成运算放大产品出发，用输入失调、CMRR、差模输入电阻、开环放大倍数、带宽、电压摆率、输入输出电压范围、共模阻塞电压等重要技术指标，来引导读者正确理解实际的集成运放产品究竟有多么“不理想”，让读者真正掌握从测量的实际出发，正确合理地选择和使用集成运放。

(3) 第8章详细阐述了电气测量中的抗干扰技术，并从干扰源、耦合途径、受扰对象、干扰的性质等诸多方面归纳总结了电气测量中的两种最典型的干扰模型，并提出了极富针对性的抗干扰对策。

(4) 在本次修订中，按照《测量不确定度的评定与表示》(JJ 1059.1—2012)推荐的方法来评估测量结果的不确定度。测量结果不确定度不仅包括多次测量所引入的A类不确定度分量，还包含由仪表误差所引入的B类不确定度分量，两者形成了合成不确定度。

(5) 在本次修订中,增加了保护用互感器方面的内容。电网在暂态过程中产生的过电压和短路电流,它们分别会给电磁式电压互感器和电磁式电流互感器带来过高的励磁;本书还介绍了非正弦稳态的暂态过励问题。所有这些过励磁叠加电磁式互感器的非线性励磁特性,会导致电流互感器二次电流的畸变和电压互感器的铁磁谐振等问题。

本书由上海交通大学电气与电子测量课程组教师共同完成。在再版编写过程中,获得了美国 Analog Device 公司大学计划的大力支持,本教材配套的实验也已被列入教育部产学协同协作共建项目。

由于作者水平所限,书中不足之处敬请读者批评指正。

编著者
2017年5月

第 1 版前言

电气测量在发电、输配电、用电及保护的各个环节都必不可少，其重要性不必赘言。而且大多数的电气测量仪表，特别是数字化测量系统，电子测量电路必然是其中的重要组成部分。作者在多年的电气与电子测量技术教学中，使用过数本关于电气测量方面的教材，发现在电子测量电路部分内容大多停留在“模拟电子电路”课程的水平上，未作进一步的拓展和深化；同时，有些章节内容过于教条，不够具体，学生的学习热情不高。于是，作者产生重新编写教材的想法。经过一年的努力，我和几位同事合作，一起完成了本书的初稿，以校内讲义的形式在上海交通大学电气工程及其自动化专业三年级本科生中试用 1 年，虽然讲义版教材中错误不少，但学生对本课程的学习热情有明显提高。这极大地鼓舞了我和我的同事。于是，我们对讲义做了大量的修订，形成本书。

本书在总体内容安排上，不能说有什么创新。如前两章介绍测量系统和误差理论，接下来介绍常用的传感器原理和调理电路，后续章节介绍数字化测量系统等，最后是抗干扰技术。但在具体章节的内容组织上，力求结合电气测量的实际，让设计目标更加具体，激发学生将已学知识充分发挥运用。如第 4 章中关于调理电路的设计，较全面地介绍了实际集成运算放大器产品的多样性和不同特性，让学生在模电课程中建立的理想集成运放回归到现实非理想的、多样性的集成运放。为了适应现代数字化电气测量系统的广泛应用，本书着重对几种模数转换器的原理做了详细的分析和介绍，从而让学生能在具体的应用中，能根据需要选择正确的模数转换器。

在第 8 章，重点对电气测量中常见的干扰源做了归纳总结，对干扰路径做了详细的讲解，并从最基本的原理——电磁感应原理出发，来阐述抗干扰的对策，通俗易懂，避免了过去很多教材教条式的罗列，学生普遍有所收获。

本书在编写过程中，上海交通大学电气工程系张彦教授、江秀臣教授对本书提出不少宝贵的意见；美国 Analogue Device 公司为相关电路设计提供了产品资料，在此一并表示感谢。

作者在高等学校从事电气及电子测量技术方面的教学工作近十年，期间也不断地从事相关的科研工作，对电气测量中常涉及的难点（如干扰、共模）有深刻的理解和体会，也力求能在本书中得到体现。由于时间仓促，错误或不足之处恐难免，敬请读者及同行批评指正。

罗利文
2011 年 11 月

目 录

第 1 章 测量和测量系统基础	1
1.1 测量及测量方法	1
1.1.1 直接测量法	1
1.1.2 间接测量法	2
1.1.3 组合测量法	2
1.2 现代数字化测量系统的基本构成	3
1.3 测量系统的静态特性	5
1.3.1 零位	6
1.3.2 灵敏度	6
1.3.3 线性度	6
1.3.4 回程误差	7
1.3.5 分辨力与分辨率	7
1.3.6 量程、测量范围和动态范围	7
1.4 测量系统的动态特性	8
1.4.1 一阶系统	8
1.4.2 二阶系统	9
1.4.3 动态性能指标	11
习题	12
第 2 章 误差的基本理论	14
2.1 测量误差的基本概念	14
2.1.1 测量误差的几个名词术语	14
2.1.2 测量误差的主要来源	16
2.2 表达误差的几种形式	16
2.2.1 绝对误差	17
2.2.2 相对误差	17
2.2.3 最大允许误差和最大引用误差	17
2.3 误差的性质及分类	19
2.3.1 系统误差	19
2.3.2 随机误差	19
2.3.3 粗大误差	20
2.3.4 三类误差的关系及其对测得值的影响	20
2.4 有效数字	20
2.4.1 有效数字的定义	21

2.4.2	四舍五入与偶数法则	21
2.4.3	数字的运算规则	21
2.5	系统误差的校正	22
2.5.1	系统误差产生的原因	22
2.5.2	系统误差的减小和消除	23
2.6	随机误差的统计学处理	23
2.6.1	随机误差的产生原因	23
2.6.2	随机误差的特性	24
2.6.3	随机误差的标准差和实验标准差	24
2.6.4	典型分布的置信度	25
2.7	粗大误差的剔出	29
2.7.1	判别粗大误差的准则	29
2.7.2	防止与消除粗大误差的方法	34
2.8	测量不确定度及其评定方法	34
2.8.1	测量不确定度	34
2.8.2	测量不确定度的评定方法	35
2.8.3	GUM法评定测量不确定度的一般步骤	36
2.8.4	输入量标准不确定度的评定	37
2.8.5	不确定度的合成	38
2.8.6	有效自由度的计算	39
	习题	43
第3章	传感器	45
3.1	传感器概述	45
3.1.1	传感器的定义	45
3.1.2	传感器的一般结构	46
3.1.3	变送器	46
3.1.4	传感器的分类	46
3.2	金属温度传感器	47
3.2.1	工作原理	47
3.2.2	金属热电阻	48
3.2.3	热电阻技术参数	49
3.2.4	测量电路举例	52
3.3	热电偶	53
3.3.1	热电效应	53
3.3.2	热电偶定理	55
3.3.3	热电偶技术参数	56
3.3.4	热电偶的冷端补偿	57
3.3.5	补偿导线	60

3.3.6	热电偶测温仪表的接线	61
3.4	热敏电阻	62
3.4.1	工作原理	62
3.4.2	热敏电阻的伏安特性	63
3.4.3	热敏电阻的特点	63
3.5	霍尔传感器	64
3.5.1	霍尔效应	64
3.5.2	霍尔效应传感器	65
3.5.3	霍尔电流传感器	68
3.6	磁敏式传感器	69
3.6.1	工作原理	69
3.6.2	磁阻元器件的主要特性	70
3.6.3	磁敏电阻的应用	71
3.7	电场测量探头	71
3.7.1	悬浮体型探头	71
3.7.2	地参考场强仪	72
3.7.3	光电场强仪	73
3.8	电涡流传感器	73
3.8.1	工作原理	73
3.8.2	电涡流传感器的基本特性	75
3.8.3	电涡流传感器的调理电路	76
3.8.4	电涡流传感器的应用	77
3.9	压电传感器	78
3.9.1	压电效应	78
3.9.2	压电传感器的等效电路	80
3.9.3	压电传感器的调理电路	81
3.9.4	压电传感器的应用举例	82
3.10	光电传感器	83
3.10.1	光电效应及其元器件	83
3.10.2	光电传感器的应用	84
3.10.3	光电传感器测量转速	85
3.11	电容式传感器	86
3.11.1	工作原理及其分类	87
3.11.2	调理电路举例	89
3.11.3	电容传感器的应用	92
3.12	电感式传感器	92
3.12.1	变间隙型自感传感器	93
3.12.2	变面积型自感传感器	94
3.12.3	螺管型电感传感器	95

3.13 差动传感器与测量电桥	95
3.13.1 差动测量系统	95
3.13.2 差动传感器	96
3.13.3 测量电桥	98
习题	104
第4章 测量系统中的调理电路	106
4.1 集成运算放大器	106
4.1.1 集成运算放大器概述	106
4.1.2 集成运算放大器的基本电路	108
4.2 集成运放的结构特点与主要技术参数	109
4.2.1 结构特点	109
4.2.2 集成运算放大器的主要技术参数	110
4.3 仪表放大器	114
4.3.1 仪表放大器的基本电路结构	114
4.3.2 集成仪表放大器	115
4.4 电气测量中的共模信号	118
4.4.1 电气测量中常见的共模信号	118
4.4.2 共模输入的危害	119
4.5 集成差分放大器	121
4.6 隔离放大器	122
4.7 集成乘法器的应用	123
4.7.1 集成乘法器的介绍	123
4.7.2 集成乘法器能完成的运算	123
4.7.3 集成乘法器用于调制和解调	124
习题	126
第5章 电气测量技术	127
5.1 高电压的测量	127
5.1.1 电磁式电压互感器	127
5.1.2 电容式互感器	134
5.1.3 光学电压传感器	136
5.2 大电流的测量	137
5.2.1 电磁式电流互感器	137
5.2.2 低功率电流互感器	148
5.2.3 罗哥夫斯基电流互感器	149
5.2.4 光学电流传感器	151
5.3 交流电的频率、周期、相位的测量	152
5.3.1 频率和周期的测量	152
5.3.2 相位的测量	155

5.4	交流电电压、电流、功率的测量	157
5.4.1	电压、电流的测量	157
5.4.2	功率的测量	159
5.5	电力设备绝缘参数的测量	162
5.5.1	绝缘电阻和吸收比的测量	163
5.5.2	介质损耗因数 $\tan\delta$ 的测量	166
5.6	接地电阻的测量	169
5.6.1	测量接地阻抗的基本原理	169
5.6.2	接地阻抗的测量试验	170
5.6.3	接地阻抗测量注意事项	171
5.6.4	电力设备接地引下线导通试验	171
5.7	局部放电的测试	172
5.7.1	局部放电的机理分析	172
5.7.2	局部放电的主要参数	173
5.7.3	局部放电测量的基本回路及检测阻抗的选择	174
	习题	175
第 6 章	数字化电气测量技术	177
6.1	数字化电气测量系统概述	177
6.1.1	数字化电气测量系统中的测量信号分类	177
6.1.2	数字化电气测量系统的结构	178
6.1.3	电气测量中常用的微处理器片上外设简介	179
6.2	A/D 转换器	182
6.2.1	名词术语	182
6.2.2	A/D 转换原理	183
6.2.3	常用 ADC 集成芯片及其与微处理器的接口设计	189
6.3	采样保持器 AD781	200
6.3.1	动态性能	201
6.3.2	AD781 与 AD674 的接口电路	201
6.4	并行数字 I/O 接口	202
6.4.1	MCU 和 DSP 的并行数字 I/O 接口	202
6.4.2	+5V 和+3.3V 数字 I/O 接口的互连	203
6.5	数字电表	204
6.5.1	数字电表的基本功能	204
6.5.2	数字化电能计量基础	204
6.5.3	集成三相多功能数字电能计量芯片 ADE7878	205
6.6	数字化测量常用算法	208
6.6.1	有效值的计算与数字积分	208
6.6.2	谐波分析和 DFT 变换	210

6.6.3 噪声抑制与数字滤波	218
习题	227
第7章 虚拟仪器及其开发语言	229
7.1 虚拟仪器	229
7.1.1 虚拟仪器的基本概念	229
7.1.2 虚拟仪器的特点	229
7.1.3 虚拟仪器的结构	231
7.2 虚拟仪器的开发语言——LabVIEW	232
7.2.1 LabVIEW 的优势	232
7.2.2 LabVIEW 的编辑界面	233
7.2.3 LabVIEW 的应用实例	234
7.3 虚拟仪器的开发语言——LabWindows/CVI	238
7.3.1 LabWindows/CVI 简介	238
7.3.2 LabWindows/CVI 特点	238
习题	239
第8章 电气测量中的抗干扰技术	240
8.1 电气测量干扰的三要素	240
8.1.1 干扰源	240
8.1.2 干扰耦合途径	240
8.1.3 受扰对象	241
8.2 电容耦合及其抗干扰对策	241
8.2.1 电容耦合	241
8.2.2 电容耦合的抗干扰措施	242
8.3 磁场耦合及其抗干扰对策	244
8.3.1 磁场耦合或互感耦合	244
8.3.2 防磁场(互感)耦合的措施	245
8.4 共阻抗耦合及其抗干扰对策	246
8.4.1 冲击负载电流通过电源内阻抗影响测量仪器的供电质量	246
8.4.2 测量仪器内部不同电路环节间通过直流稳压电源内阻抗的耦合	247
8.5 共模干扰及其抑制	248
8.5.1 共模信号及其对测量系统的干扰	248
8.5.2 共模干扰的抑制	250
8.6 测量系统输入级的接地与浮置	251
习题	252
参考文献	254

第 1 章 测量和测量系统基础

给我一个支点，我将撬起整个地球。

——阿基米德

本章首先给出了测量的定义，并对测量方法进行了分类；在此基础上，介绍现代电气测量系统的基本构成，重点阐述测量系统的静态特性及一阶、二阶测量系统的动态特性。

1.1 测量及测量方法

测量是人们认识客观事物，并用数量概念描述客观事物，进而达到逐步掌握事物的本质和揭示自然界规律的一种手段。牛津词典对于“测量”术语的解释为：“通过使用一个经过标准单位标定的仪器或设备，或者通过与一个已知规模大小的物体相比较来确定测量对象的大小、数量或程度”（“ascertain the size, amount or degree of (something) by using an instrument or device marked in standard units or by comparing it with an object of known size”, from the Latin mensurate - to measure）。

上面关于测量的定义中隐含了测量必备的三要素：测量对象、测量仪器或设备及测量方法。具体的测量方法是由被测量的参数类型、量值的大小、所要求的测量准确度、测量速度的快慢、进行测量所需要的条件以及其他一系列因素决定的。每个物理量都可以用具有不同特点的多种方法进行测量。

测量方法的分类形式很多，根据测量方法的不同属性来分类可以有不同的测量方法。例如，根据被测量在测量期间是否随时间的变化而变化，可分为静态测量和动态测量；根据测量条件是否发生变化，可分为等精度重复测量和非等精度重复测量；根据测量器具的敏感元件是否与被测物体接触，可分为接触测量和非接触测量；根据测量对象是否处于工作状态，可以分为在线测量和离线测量，等等。下面主要介绍直接测量法、间接测量法以及在这两种方法的基础上形成的组合测量法，因为采用间接测量法所得到的测量结果的误差或不确定度需要经过误差合成或不确定合成，而直接测量法中则不需要这种误差或不确定度的合成。

1.1.1 直接测量法

用预先按标准量标定好的仪器对被测量进行测量或用标准量直接与被测量进行比较，从而从仪器的指示结构的读数直接获得被测量之值的测量方法，叫作直接测量。采用这种测量方法，可以使用量具进行测量，也可以用预先按已知标准量标定好的直读式测量仪器或比较式仪器对被测量进行测量。例如，用电流表测量电流、电桥测量电阻等。这种方式的特点是测出的数据就是被测量本身的量，测量过程简单快捷，应用非常广泛。

直接测量法又可细分为直接比较测量法、替代测量法、微差测量法、零位测量法和符合测量法等。

(1) 直接比较测量法: 将被测量直接与已知其值的同类量相比较的测量方法。例如, 用刻度尺测量长度等。

(2) 替代测量法: 将选定的且已知其值的量替代被测的量, 使得在指示装置上有相同的效果, 从而确定被测量值。

(3) 微差测量法: 将被测量与它的量值只有微小差别的同类已知量相比较并测出这两个量值间的差值, 从而确定被测量值。

(4) 零位测量法: 通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的量, 用平衡的方法确定出被测量的值。零位测量法最典型的例子就是用电桥测电阻。

(5) 符合测量法: 通过对某些标记或信号的观察来测定被测量与做比较用的同类已知量值间微小差值的一种微差测量法。例如, 用游标卡尺测量物体的尺寸等。实现符合测量法的原理有游标原理、拍频原理、干涉原理和闪频原理等。

1.1.2 间接测量法

间接测量是通过对与被测量有函数关系的其他量的测量, 并通过计算得到被测量值的测量方法。例如, 用伏安法测电阻, 通过测量电阻器两端的电压和通过电阻器的电流, 根据欧姆定理, 可以计算出被测电阻器的电阻值。

该方法需要测量的量较多, 测量过程复杂费时, 手续繁多, 花费时间相对较长, 引起的误差因素也较多; 但如果对测量误差进行分析, 并选择和确定具体的优化测量方法以及在比较理想的条件下进行测量, 测量结果的准确度不一定低, 有的甚至有较高的准确度。所以, 一般情况下尽量采用直接测量, 只有在下列情况下才选择间接测量:

(1) 被测量不便于直接读出。

(2) 直接测量的条件不具备, 如直接测量该量的仪器不够准确或没有直接测量的仪器。

(3) 间接测量的结果比直接测量更准确。

1.1.3 组合测量法

在测量过程中, 当测量两个或两个以上相关的未知数时, 需要改变测量条件进行多次测量, 根据直接测量和间接测量的结果, 解联立方程组求出被测量, 称为组合测量。例如, 测量电阻 R 的温度系数 α 和 β , 根据电阻器在温度 t 时的电阻值与温度系数的关系式, 可先测出不同温度下该电阻器的电阻值 R_{t1} 和 R_{t2} , 再通过求解下述联立方程组求 α 和 β 。

$$R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]$$

$$R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]$$

组合测量法实质上仍然是一种间接测量法。组合测量法有两个明显的优点: 在准确度要求相同的情况下, 组合测量需要进行的测量次数较少; 系统误差出现的规律变为随机性质, 因而可使测量结果的准确度有所提高。组合测量的手续繁多, 较花费时间, 但容易达到较高的精度, 通常在实验室中使用。

测量方法的选择与仪器的选择同等重要,即使在同一种类的测量方法中,仍有很多具体的测量方法。因此,在实际测量时,要根据具体情况选择合适的测量方法。

1.2 现代数字化测量系统的基本构成

现代数字化测量系统可以分解成图 1-1 所示的传感器单元、信号调理单元、模数转换器单元、计算机单元、显示单元等,同时现代数字化测量系统也常常与控制保护系统一起构成测控系统。数字化测控系统的计算机需要输出控制信号给驱动单元和执行机构,如继电保护系统就是典型的测控保护系统,它基于对电网状态的测量和判断来控制各类继电器和断路器。

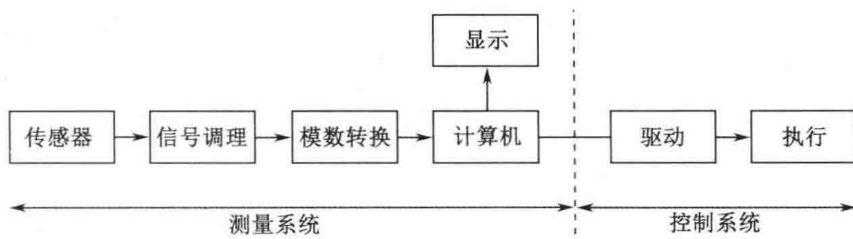


图 1-1 数字化测量控制系统的基本构成

传感器单元 (sensor) 产生可以连续表示被测对象的信号,并将信号转换成模拟信号。信号调理单元 (conditioner) 对传感器输出的电信号进行调节,使之适合 ADC 转换器的输入电压范围并由 ADC 转换成数字信号。计算机读取 ADC 的二进制转换结果并进行运算分析,最后得出测量结果,在各类显示器上显示测量结果。

现代电气测量系统是现代数字化测量系统在电气工程领域的应用实例,它主要测量电力系统中各种设备的状态信息。现代电气测量系统的基本结构从硬件平台结构来看可分为以下两种基本类型:

(1) 以 MCU、DSP 为核心的嵌入式系统。其特点是易制作成小型、专用化的测量系统,其结构框图如图 1-2 (a) 所示。

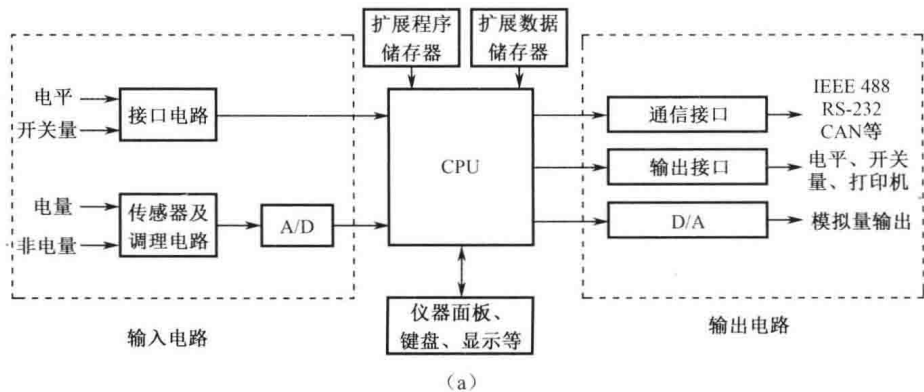
图 1-2 (a) 中输入通道中待测量信号经过传感器及调理电路,输入 A/D 转换器。由 A/D 转换器将模拟量转换为数字信号,再送入 CPU 系统进行分析处理。此外,输入通道通常还会包含电平信号和开关量,它们经相应的接口电路(通常为电平转换、隔离等功能单元)送入 CPU。

输出通道包括 IEEE 488、RS-232、CAN 现场总线等通信接口,以及 D/A 转换器等。

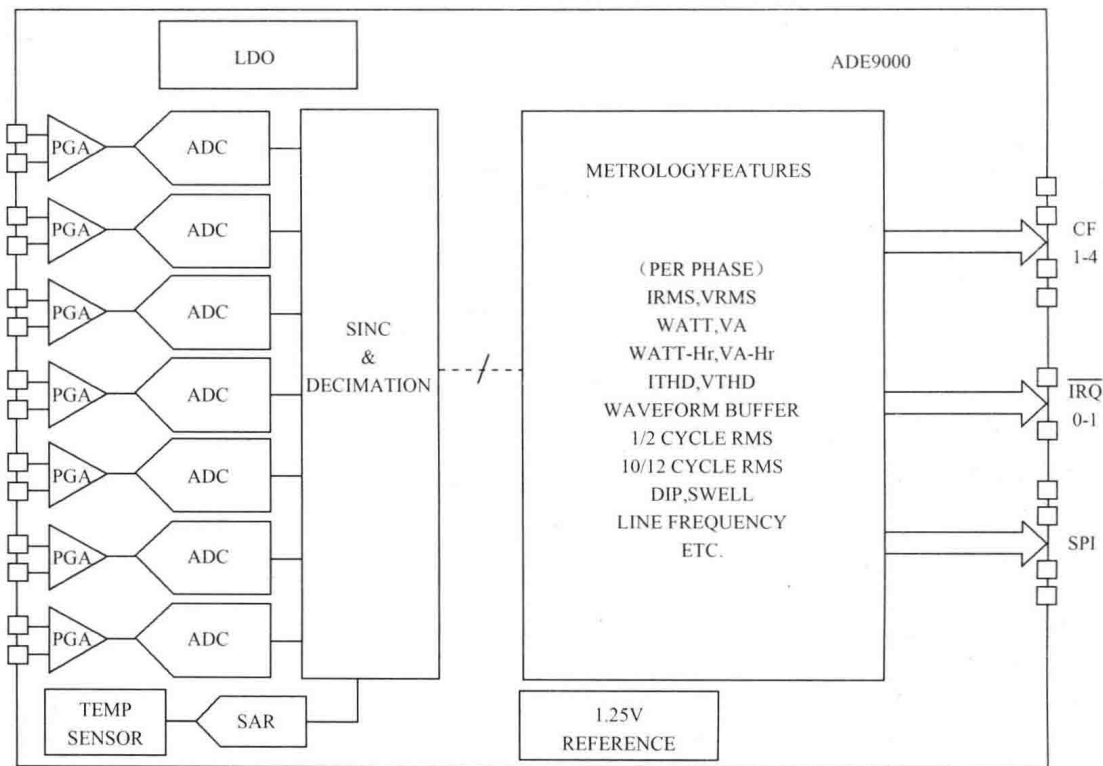
CPU 外围一般还包括输入键盘和输出显示、打印机接口、人机交互设备等,较复杂的系统还需要扩展程序存储器和数据存储器。

目前,一些最新的设计已经将图 1-2 (a) 的系统除传感器外的其他部分集成到一片 SoC 中,如美国亚德诺半导体公司 (ADI) 推出的高性能 (0.2 级,超低漂移,10000 倍的动态输

入范围) 三相电源计量及电能质量监测 AFE (Analogue Front End) 芯片 ADE9000 (图 1-2 (b)), 内置了 7 路 PGA+ADC 及 DSP, 用户只需通过该芯片的 SPI 串行口就可以读取三相电源的电压和电流的有效值、有功、无功、各次电流谐波、电压突变等数据, 大大加快了产品的开发速度, 降低了开发成本。



(a)



(b)

图 1-2 现代电气测量系统单机结构框图

(2) 以 PC 为核心的应用扩展电气测量系统, 其结构框图如图 1-3 所示。这种结构属于虚拟仪器的结构形式, 它充分利用了计算机的硬件平台通用、扩展性好、便于联网的特点, 结合特定功能的应用软件就可以实现不同的测量功能。目前, 国际上已有众多的公司为虚拟仪器提供硬件和软件服务, 如美国的 National Instrument 公司。

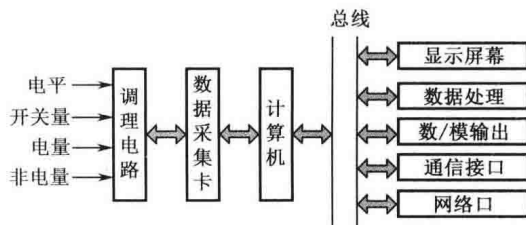


图 1-3 应用扩展型测量系统结构框图

1.3 测量系统的静态特性

测量系统的优劣与测量系统的特性密切相关。测量系统一般是指众多环节组成的对被测物理量进行检测、调理、变换、显示或记录的完整系统，但也可以是指测量系统中的某一单元（如传感器、调理电路、数据采集卡、测试仪表），甚至可以是更简单的环节，如放大器、电阻分压器、RC 滤波器等。所以，测量系统的特性可以是指一个包含众多环节单元的系统特性，也可以是指系统中的某个单元的特性。

测量系统的基本要求是输出不失真，即输出量与输入量之间是理想的线性函数，这是理想测量系统的输入输出特性。实际测量系统的输入输出特性情况可能很复杂，需要考虑的影响因素众多，特别是涉及时变、非线性参量的系统，任何情形下理想线性的输入输出特性很难实现。所幸的是，大多数测量系统都属于或接近线性时不变系统，并且线性时不变系统的在时域中的输入输出特性可以用通式（1-1）中的常系数线性微分方程来描述。

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-1)$$

测量系统的静态特性是指在静态输入情况下测量系统所表现出的与理想线性时不变系统的接近程度。此时，测量系统的输入量 $x(t)$ 和输出量 $y(t)$ 都是不随时间变化的常量（或变化极慢，在所观察的时间间隔内可以忽略其变化而视为常量），因此测量系统输入和输出各微分项均为零，那么测量系统的输入输出特性就变为

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = Sx \quad (1-2)$$

式（1-2）表明理想的测量系统的静态特性，其输出与输入之间呈单调、线性比例关系，即斜率 S 是常数，实质上， S 就是理想的灵敏度。

实际上，测量系统的静态特性有时很难完全符合式（1-2）。主要表现在灵敏度 S 在全量程范围并非常数，存在一定的非线性或在某些特定区域非线性比较突出；例如，Pt100 属于前者，其静态特性就需用线性多项式来拟合，但高次项的系数远小于一次项系数；而热敏电阻就属于后者，静态特性存在拐点。当然还存在如零点漂移、回程误差、数字化测量系统的分辨率不够高等问题，这些问题的严重程度如何，需要定义一些定量指标来表征实际的测量系统的静态特性。下面介绍几个测量系统常用的性能指标参数。