

 应用电子
Application Electronics

世纪新版 万用表实用技术丛书

万用表 功能扩展与应用

沙占友 沙莎 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

世纪新版

万用表实用技术丛书①

万用表功能扩展与应用

沙占友 沙 莎 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为“万用表实用技术丛书”的第一册。全书从实用角度出发,深入阐述了指针式万用表测试功能的扩展与应用技术。全书共5章。第1章概述选择万用表的原则,第2章讲述万用表整机电路的设计原理,第3章介绍万用表的使用注意事项,第4章介绍减小万用表测量误差的方法。第5章为本书重点,详细阐述了万用表的功能扩展与应用技术,共计88个典型实例。

本书具有科学性、实用性和创新性,题材新颖,内容丰富,深入浅出,可供电子与电工技术人员、仪器仪表及家用电器维修人员和电子爱好者阅读。

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

万用表功能扩展与应用/沙占友,沙莎著. —北京:电子工业出版社,2005.1
(世纪新版万用表实用技术丛书)

ISBN 7-121-00710-X

I. 万… II. ①沙… ②沙… III. 复用电表—基本知识 IV. TM938.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第133092号

责任编辑:魏永昌

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:14 字数:372千字

印 次:2005年1月第1次印刷

印 数:6000册 定价:20.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

指针式（亦称模拟式）万用表简称万用表，迄今已有近百年的发展历史。当今时代，尽管各种电子测量仪器、仪表日新月异，发展迅速，但就单台整机所具有的测试功能、使用灵活性及广泛性而言，非指针式万用表莫属。指针式万用表不仅功能齐全、操作简单、携带方便、价格低廉、容易维修，而且便于观察被测量的变化趋势及变化过程，长期以来成为电子测量及维修工作的必备仪表。近年来虽有数字万用表与之竞争，但指针式万用表仍是国内最普及、最常见的电测仪表。

万用表测量技术是电子测量的基础，也是电子技术人员应具备的基本技能。目前国内专门介绍指针式万用表实用技术（包括测试功能扩展与使用技巧）的书很少，而这正是广大电子界读者所期盼的。为此，作者曾于 1984 年撰写了《万用表妙用 100 例》一书，该书出版后深受广大读者欢迎。曾经过 10 次印刷，总发行量达 50 万册，1994 年荣获“全国优秀畅销书（科技类）”奖。1992 年作者撰写的《万用表测量技巧》，受到国内专家和广大读者的好评，该书累计发行量超过 4 万册，被评为电子版优秀图书。1994 年作者还荣获“电子版图书优秀著（译）者二等奖”。1993 年作者撰写的《最新万用表妙用 100 例》，总发行量也超过了 5.5 万册。

《万用表妙用 100 例》一书出版已经整整 20 年了，而《万用表测量技巧》一书也已出版了 12 年。进入 21 世纪以来，随着电子工业的迅猛发展和电子产品的日益普及，对万用表测量技术也提出了更高的要求。鉴于原书早已绝版且难以适应现代科技的发展，为了推广万用表应用领域的新技术，以满足广大读者的急需，我们在原著的基础上做了大量修改并补充了许多新内容，撰成“万用表实用技术丛书”献给广大读者。该丛书共三册，第一册为《万用表功能扩展与应用》，第二册为《万用表检测技术（上）》，第三册为《万用表检测技术（下）》。

本书具有以下特点：第一，内容丰富，系统性强。首先简述指针式万用表的性能特点、整机电路工作原理及使用注意事项，然后重点介绍了万用表测试功能的扩展及典型应用实例；第二，实用性强。所介绍的测试原理和方法均经过本书作者的实践验证，能为从事电子、电工、仪器仪表和家电维修工作的人员提供帮助，也便于读者举一反三，触类旁通，灵活运用；第三，内容深入浅出，通俗易懂；第四，各章节保持相对独立，读者既可阅读全书，亦可选读某一章节。

参加本书撰写工作的还有沙江、韩振廷、李学芝、魏跃平、张文清、宋怀文、王志刚、刘立新、张启明、刘东明、赵伟刚、宋廉波、刘建民、李志清、郑国辉、林志强同志。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，欢迎广大读者指正。

作 者

目 录

第 1 章 选择指针万用表的原则	(1)
1.1 选择指针万用表的原则	(1)
1.2 指针万用表典型产品的技术指标	(9)
第 2 章 指针万用表整机电路设计原理	(10)
2.1 500 型万用表的电路设计原理	(10)
2.1.1 500 型万用表的技术指标	(10)
2.1.2 500 型万用表的整机电路工作原理	(11)
2.2 MF30 型万用表的电路设计原理	(17)
2.2.1 MF30 型万用表的技术指标	(17)
2.2.2 MF30 型万用表的整机电路工作原理	(18)
第 3 章 指针万用表的使用注意事项	(26)
3.1 测量前的注意事项	(26)
3.2 测量电压、电流时的注意事项	(27)
3.3 测量电阻时的注意事项	(29)
3.4 其他使用注意事项	(31)
第 4 章 减小指针万用表测量误差的方法	(33)
4.1 减小电阻挡测量误差的方法	(33)
4.1.1 电阻挡测量误差的分析	(33)
4.1.2 减小电阻挡测量误差的方法	(39)
4.2 减小电容挡及电感挡测量误差的方法	(39)
4.2.1 测量电容、电感的原理	(39)
4.2.2 测量电容、电感的误差分析	(40)
4.2.3 减小电容挡、电感挡测量误差的方法	(42)
4.3 改善指针万用表频率特性的方法	(43)
4.3.1 测量万用表的频率特性	(43)
4.3.2 改善万用表频率特性的原理与方法	(44)
第 5 章 指针万用表的功能扩展与应用	(48)
5.1 利用电阻挡读取负载电流法	(48)
5.1.1 欧姆表的测量原理	(48)
5.1.2 读取负载电流法	(49)
5.2 利用电阻挡读取负载电压法	(50)

5.2.1	读取负载电压法	(50)
5.2.2	读取电流与电压时的注意事项	(51)
5.3	利用电阻挡读取负载功率法	(52)
5.4	给万用表增加 LI、LV 刻度线的方法	(55)
5.4.1	绘制 LI、LV 刻度线的方法	(55)
5.4.2	使用注意事项	(56)
5.5	利用万用表和兆欧表测量元器件的击穿电压	(56)
5.5.1	测量元器件击穿电压的原理及方法	(57)
5.5.2	注意事项	(59)
5.6	准确测量高内阻电源电压的方法	(60)
5.6.1	准确测量高内阻电源电压的方法	(60)
5.6.2	准确测量高内阻电源电压的简便方法	(61)
5.7	提高直流电压挡灵敏度的方法	(62)
5.7.1	利用 LM324 提高 DCV 挡灵敏度的方法	(62)
5.7.2	利用 ICL7650 提高 DCV 挡灵敏度的方法	(63)
5.8	利用 50 μ A 挡测量毫伏级直流电压的方法	(64)
5.8.1	测量毫伏级直流电压方法之一	(64)
5.8.2	测量毫伏级直流电压方法之二	(65)
5.9	利用低压挡测量高压的方法	(66)
5.9.1	利用低压挡测量高压的方法	(66)
5.9.2	利用低压挡测量高压的简便方法	(67)
5.10	展宽直流电压表刻度的方法	(68)
5.10.1	展宽直流电压表刻度方法之一	(68)
5.10.2	展宽直流电压表刻度方法之二	(68)
5.11	提高直流电压挡输入阻抗的方法	(70)
5.12	增加电池负载电压测试挡的方法	(70)
5.13	测量正弦波峰值电压及峰-峰值电压的方法	(71)
5.13.1	测量正弦波峰值电压	(71)
5.13.2	测量正弦波峰-峰值电压	(73)
5.14	测量周期性非正弦波电压的方法	(73)
5.15	测量叠加在直流上的交流电压的方法	(75)
5.16	测量真有效值电压的方法	(76)
5.16.1	真有效值数字仪表的基本原理	(76)
5.16.2	单片真有效值/直流转换器的产品分类	(78)
5.16.3	真有效值电压表的实用电路	(79)
5.17	分贝读数快速修正法	(81)

5.18	测量真有效值电平的方法	(82)
5.18.1	电平的测量	(82)
5.18.2	由 AD536A 构成的真有效值电平表	(83)
5.18.3	由 AD637 构成的真有效值数字电平表	(84)
5.19	测量纹波系数的方法	(84)
5.20	准确测量电流的方法	(85)
5.21	提高电流表灵敏度的方法	(87)
5.22	在线测量直流电流的方法	(89)
5.22.1	在线测量直流电流的原理	(89)
5.22.2	在线电流测量仪的电路设计	(90)
5.22.3	在线电流测量仪的应用实例	(91)
5.23	利用低电流挡测量大电流的方法	(91)
5.24	测量交、直流大电流的方法	(92)
5.24.1	交流电流的检测方法	(92)
5.24.2	配集成电流传感器测量交流大电流的方法	(93)
5.24.3	配集成电流传感器测量直流大电流的方法	(94)
5.25	精密电流/电压转换器	(97)
5.25.1	RCV420 的工作原理	(97)
5.25.2	RCV420 的典型应用	(98)
5.26	利用交流电压挡测量交流电流的方法	(98)
5.27	增设交流电流挡的方法	(100)
5.28	测量低电阻的附加装置	(101)
5.29	增加倒欧姆挡测量低电阻的方法	(102)
5.30	增设电子蜂鸣器挡检查线路通断的方法	(103)
5.31	利用直流电压挡测量电阻的方法	(104)
5.31.1	利用直流电压挡测量电阻方法之一	(104)
5.31.2	利用直流电压挡测量电阻方法之二	(105)
5.32	应急测量电阻的方法	(106)
5.33	在线测量电阻的方法	(107)
5.33.1	测量原理	(107)
5.33.2	在线电阻测量仪的电路设计	(108)
5.33.3	在线电阻测量仪的应用实例	(108)
5.34	扩展高阻测量范围的方法	(109)
5.34.1	扩展高阻测量范围方法之一	(109)
5.34.2	扩展高阻测量范围方法之二	(110)
5.35	自制线性欧姆表的方法	(111)

5.35.1	线性欧姆表电路之一	(111)
5.35.2	线性欧姆表电路之二	(113)
5.36	测量电功率的简便方法	(113)
5.37	测量音响设备最大不失真输出功率的方法	(114)
5.38	测量真有效值射频功率的方法	(115)
5.38.1	AD8362 的性能特点	(115)
5.38.2	AD8362 的工作原理	(116)
5.38.3	AD8362 的典型应用	(118)
5.39	增加极性转换开关或转换探头的方法	(120)
5.39.1	给表头增加极性转换开关	(120)
5.39.2	自制极性转换探头的方法	(120)
5.40	将表头改作零位指示计的方法	(121)
5.41	测量频率和转速的方法	(122)
5.41.1	模拟式市电频率计电路	(122)
5.41.2	测量频率的电路	(122)
5.41.3	测量频率和转速的电路	(124)
5.42	测量转速的方法	(129)
5.42.1	KMI15-1 型集成转速传感器的工作原理	(129)
5.42.2	KMI15/16 系列集成转速传感器的典型应用	(133)
5.43	测量加速度的方法	(134)
5.43.1	ADXL05 型单片加速度传感器的工作原理	(134)
5.43.2	ADXL05 型单片加速度传感器的典型应用	(136)
5.44	测量相位差的简便方法	(137)
5.45	准确测量相位差的方法	(141)
5.45.1	AD8302 的性能特点	(141)
5.45.2	AD8302 的工作原理	(142)
5.45.3	AD8302 的典型应用	(144)
5.46	测量温度的方法	(146)
5.46.1	由 AD590 构成的数字温度计	(146)
5.46.2	由 LM35 构成的温度计	(148)
5.47	测量温差的方法	(149)
5.48	测量平均温度的方法	(150)
5.49	测量相对湿度的方法	(151)
5.49.1	湿度传感器的性能特点及产品分类	(151)
5.49.2	基于湿敏电容的相对湿度测量仪	(151)
5.50	测量液位的方法	(156)

5.50.1	LM1042 型集成液位传感器的工作原理	(156)
5.50.2	LM1042 型集成液位传感器的典型应用	(160)
5.51	测量磁场的方法	(161)
5.51.1	AD22151 的性能特点	(161)
5.51.2	AD22151 的工作原理	(161)
5.51.3	AD22151 的典型应用	(164)
5.52	检测烟雾的方法	(165)
5.52.1	MC145010 的性能特点	(166)
5.52.2	MC145010 的工作原理	(166)
5.52.3	MC145010 的典型应用	(167)
5.53	检测可燃性气体的方法	(170)
5.53.1	气敏元件的性能特点	(170)
5.53.2	酒气烟雾报警控制器	(170)
5.54	测量环境亮度的方法	(172)
5.54.1	LX1970 型可见光亮度传感器的性能特点	(173)
5.54.2	LX1970 的工作原理	(173)
5.54.3	LX1970 的典型应用	(174)
5.55	探测金属的方法	(178)
5.56	增加过载光报警器的方法	(178)
5.57	增加过载声、光报警器的方法	(179)
5.58	利用表内蜂鸣器做信号发生器	(180)
5.59	增加方波信号发生器	(181)
5.59.1	两级反相式阻容振荡器	(181)
5.59.2	频率连续可调的方波信号发生器	(183)
5.59.3	方波信号发生器的特殊应用	(183)
5.60	增加占空比可调的矩形波信号发生器	(184)
5.60.1	由门电路构成占空比可调的振荡器	(185)
5.60.2	由定时器构成占空比可调的振荡器	(185)
5.61	正弦波信号发生器及其特殊应用	(186)
5.61.1	文氏桥正弦波信号发生器	(186)
5.61.2	正弦波信号发生器的特殊应用	(187)
5.62	增加频率合成器	(188)
5.63	增加秒信号发生器	(190)
5.63.1	由 CD4060 构成的秒基准信号发生器	(190)
5.63.2	由石英钟表集成电路构成的秒基准信号发生器	(191)
5.64	增加函数波形发生器	(192)

5.65	增加精密函数波形发生器	(194)
5.65.1	ICL8038 型精密函数发生器的原理与应用	(194)
5.65.2	MAX038 型高频函数发生器的原理与应用	(198)
5.66	自制三态逻辑测试笔	(202)
5.66.1	三态逻辑测试笔电路之一	(203)
5.66.2	三态逻辑测试笔电路之二	(203)
5.66.3	三态逻辑测试笔电路之三	(204)
5.67	增加 U/f 、 f/U 转换器	(205)
5.67.1	AD650 的性能特点	(205)
5.67.2	U/f 转换器的原理与应用	(205)
5.67.3	f/U 转换器的原理与应用	(208)
5.68	增加精密 U/I 转换器	(209)
5.68.1	AD693 的工作原理	(209)
5.68.2	AD693 的典型应用	(210)
参考文献		(211)

第 1 章 选择指针万用表的原则

指针万用表的种类繁多, 型号各异, 目前仅国产型号就有几百种。本章专门介绍选择指针万用表的原则以及万用表典型产品的技术指标, 可供读者参考。

1.1 选择指针万用表的原则

指针万用表的英文缩写是 VOM (Volt-ohm Meter, 即“伏欧表”), 以下简称万用表。其主要特点是准确度较高, 测量项目较多, 操作简单, 价格低廉, 携带方便, 目前仍是国内最普及、最常用的一种电测仪表。

1. 准确度

万用表的精度一般用准确度表示。它反映了仪表基本误差的大小, 准确度愈高, 测量误差愈小。根据我国制定的国家标准“电测量指示仪表通用技术条件 (GB776-76)”, 仪表的准确度分七个等级: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。近年来随着仪表工业的迅速发展, 我国已能制造 0.05 级的指示仪表。

准确度等级反映了仪表基本误差的大小。基本误差亦称固有误差, 常用相对误差 γ_m 来表示。例如, 2.5 级准确度即表示基本误差为 $\pm 2.5\%$ 。二者的对应关系见表 1.1.1。国产 MF18 型万用表测量直流电压 (DCV)、直流电流 (DCA) 和电阻 (Ω) 的准确度都是 1.0 级, 可供实验室使用。目前仍被广泛使用的 500 型万用表则属于 2.5 级仪表。需要指出, 受分压器、分流器、整流器等电路的影响, 同一块万用表各挡的基本误差也不尽相同。

表 1.1.1 准确度等级与基本误差的关系

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 γ_m (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

万用表的基本误差有两种表示方法。对于直流和交流电压挡、电流挡, 是以刻度尺工作部分上限的百分数表示的, 这些挡的刻度呈线性或接近于线性。例如, 设电压挡的满刻度 (即满量程) 为 U_M , 将基本误差折合成绝对误差就是

$$\Delta = \gamma_m U_M \quad (1.1.1)$$

对于电阻挡, 因刻度呈非线性, 故改用刻度尺总弧长的百分数来表示基本误差。但需指出, 万用表说明书中或表盘上注明的电阻挡基本误差值, 仅对欧姆刻度尺的中心位置 (即欧姆中心) 适用, 其余刻度处的基本误差均大于此值 (详见第 4.1 节)。

万用表的基本误差范围见表 1.1.2, 具体数值可从万用表的表盘上查出。

表 1.1.2 万用表的基本误差范围

测 量 项 目	符 号	基 本 误 差 / (%)
直流电压	DCV	$\pm 1.0 \sim \pm 2.5$
直流电流	DCA	$\pm 1.0 \sim \pm 2.5$
交流电压	ACV	$\pm 1.5 \sim \pm 5.0$
交流电流	ACA	$\pm 1.5 \sim \pm 5.0$
电 阻	Ω	$\pm 1.5 \sim \pm 5.0$
电 平	DB	$\pm 2.5 \sim \pm 5.0$

万用表的基本误差 γ_m 只能反映仪表满刻度时的相对误差。当被测电压 $U < U_M$ 时,可改用下式计算最大允许测量误差:

$$\gamma_M = \frac{U_M}{U} \cdot \gamma_m \quad (1.1.2)$$

举例说明: 设 $U_M = 100V$, $\gamma_m = \pm 2.5\%$, 代入式(1.1.1)求出绝对误差 $\Delta = \pm 2.5V$, 这表明该挡存在 $\pm 2.5V$ 的固有误差。当被测电压 $U_M = 50V$ 时, 由式(1.1.2)求出最大允许测量误差 $\gamma_M = \pm 5\%$ 。表 1.1.3 给出了最大允许测量误差与被测电压的对应关系(γ_m 和 U_M 均为定值)。若对 γ_M 取绝对值, 即可绘出该电压挡的误差曲线, 如图 1.1.1 所示。由图可见, 被测电压愈接近 U_M (对应于指针偏转接近于满刻度), 测量误差愈小。当 $U = U_M$ 时(对应于指针大约偏转 90°), 测量误差为最小值, 等于基本误差。因此在测量电压或电流时应合理地选择量程, 尽量使指针偏转到满刻度位置, 以减小测量误差。

表 1.1.3 最大允许测量误差与被测电压的关系 ($\gamma_m = \pm 2.5\%$, $U_M = 100V$)

被 测 电 压 U/V	100	80	60	40	20	10	5
最大允许测量误差 $\gamma_M / (\%)$	± 2.5	± 3.1	± 4.2	± 6.25	± 12.5	± 25	± 50

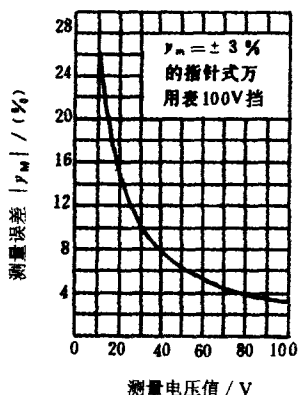


图 1.1.1 电压挡的误差曲线

国产 MF18 型万用表测量直流电压、直流电流和电阻的准确度均为 1.0 级, 测量交流电压、交流电流的准确度为 1.5 级。500 型万用表的 DCV、ACV 和 Ω 挡的准确度均为 2.5 级, ACV 挡为 5.0 级。

2. 灵敏度

万用表的灵敏度可分为表头灵敏度、电压灵敏度(含直流电压灵敏度和交流电压灵敏度)两个指标。

1) 表头灵敏度

万用表所用表头的满量程值 I_g (即满度电流), 称做表头灵敏度。 I_g 一般为 $9.2 \sim 200\mu A$, I_g 愈小, 说明表头灵敏度愈高。高灵敏度表头一般小于 $10\mu A$, 中灵敏度表头通常为 $30\mu A \sim 100\mu A$, 超过 $100\mu A$ 就属于低灵敏度表头。

表头灵敏度是设计万用表电路的依据,同时也决定着万用表的电压灵敏度。与表头灵敏度相关的两个参数分别为表头的内阻和线性度。表头的内阻是指针动圈与上、下两组游丝的电阻之和。线性度是指通过表头的电流与指针偏转角度的一致程度,它也是绘制表盘刻度的依据。

万用表大多选用磁电式表头。过去的表头属于外磁式,并且靠宝石轴尖支撑动圈,体积较大,抗震性差。某些新型万用表的表头已改成内磁式张丝结构。其优点是磁能利用率高,能减小表头的体积,而用张丝代替轴尖和游丝,还可消除摩擦误差,提高抗冲击、抗震动性,能使表头使用寿命超过 100 万次。

2) 电压灵敏度

万用表的电压灵敏度 S_V 等于电压挡的等效内阻 R_V 与满量程电压 U_M 的比值,有公式

$$S_V = \frac{R_V}{U_M} \quad (1.1.3)$$

其单位是 Ω/V 或 $k\Omega/V$, 简称每伏欧姆数。该数值一般标在仪表盘上。直流电压灵敏度是万用表的主要技术指标。交流电压灵敏度受整流电路的影响,一般低于直流电压灵敏度。例如,500 型万用表的直流电压灵敏度为 $20k\Omega/V$, 交流电压灵敏度则降低到 $4k\Omega/V$ 。电压灵敏度愈高,说明万用表的内阻(即仪表输入电阻)愈高,可以测量高内阻的信号电压。

电压灵敏度取决于表头灵敏度和灵敏度调整电路。如果不加灵敏度调整电路,万用表所能达到的最高电压灵敏度(S_{VH})等于表头灵敏度的倒数:

$$S_{VH} = 1/I_g \quad (1.1.4)$$

例如,用 $50\mu A$ 表头制成的万用表,最高电压灵敏度 $S_{VH} = 1/(50 \times 10^{-6} A) = 20k\Omega/V$ 。若采用 $10\mu A$ 表头, S_{VH} 就能达到 $100k\Omega/V$ 。

实际上表头灵敏度总会存在一定的误差,而且 I_g 也不一定是整数值,需要对表头灵敏度进行调整。调整电路包括分压电阻和分流电阻。因此,万用表的实际电压灵敏度 $S_V \leq S_{VH}$ 。用于电子测量的万用表,应具有较高的电压灵敏度,以获得较高的等效内阻。主要用于电工测量的万用表,对电压灵敏度要求不高,但必须能测量交流电流。

知道万用表的电压灵敏度之后,利用下式很容易求出各电压挡的等效内阻 R_V :

$$R_V = S_V U_M \quad (1.1.5)$$

这种计算等效内阻的方法非常简单,不必考虑万用表的内部结构和电压挡的实际电路,以及 R_V 值究竟是由哪些电阻串联、并联而成的。当满量程值一定时, R_V 与 S_V 成正比。

进行电子测量时,选择高灵敏度的万用表有以下三个显著优点:

第一,万用表测电压时与被测电路相并联,会产生分流作用。而电压灵敏度愈高,表明万用表的内阻(即仪表输入电阻)愈高。从被测电路上吸取的电流愈小,对被测电路工作状态的影响愈小。这样可减小测量高内阻电源电压时产生的误差。做电工测量时,因被测电源(如交流电源)的内阻很低,故可忽略万用表的分流作用,可选低灵敏度的万用表。

第二，电压灵敏度愈高，测电压时万用表所消耗的电功率 P_V 愈小。设被测电压为 U ，有关系式

$$P_V = \frac{U^2}{R_V} = \frac{U^2}{S_V U_M} \quad (1.1.6)$$

第三，便于设计高阻挡。因为电压灵敏度高，就意味着表头灵敏度高，很小的测试电流即可使指针作满刻度偏转，实现电阻挡的欧姆调零。在高阻挡也能采用较低的电池电压。

利用图 1.1.2 可分析万用表测量电压时的误差。设被测电压为 U ，其内阻（或等效内阻）为 r 。（b）图右边的虚线框内是电压挡的等效电路，其内阻为 R_V ， $\odot$ 表示内阻为零的指示计（下同）。将万用表并联在被测电路上，设万用表读数为 U_1 ，有关系式

$$U_1 = \frac{R_V}{r + R_V} \cdot U \quad (1.1.7)$$

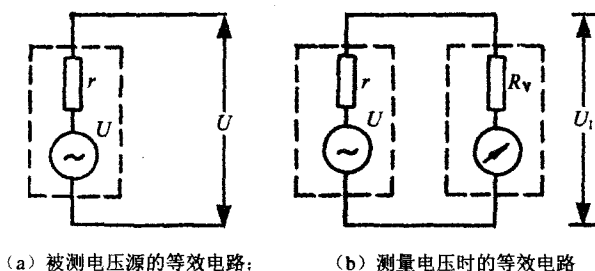


图 1.1.2 万用表测量电压时的电路

相对测量误差为

$$\begin{aligned} \gamma_V &= \frac{U_1 - U}{U} \cdot 100\% = \frac{\frac{R_V}{r + R_V} \cdot U - U}{U} \cdot 100\% = -\frac{r}{r + R_V} \cdot 100\% \\ &= -\frac{1}{1 + \frac{R_V}{r}} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

式 (1.1.8) 中的 $\gamma_V < 0$ ，表明 $U_1 < U$ ，即测量值比实际电压值偏低。随着比值 R_V/r 的增大，相对误差的绝对值 $|\gamma_V|$ 会减小。图 1.1.3 所示的相对误差曲线分别给出 $R_V/r=1$ 、10、100 这三种情况下的 γ_V 值。由图可见，当被测电源电压的内阻较低，满足 $R_V \geq 100r$ 之条件时， $|\gamma_V| < 1\%$ ，测量误差可忽略不计。但是当被测电路的内阻很高，可以与 R_V 相比时，会产生很大的测量误差。鉴于该项误差属于系统误差，可用第 5.6 节所介绍的方法加以消除。

由此可得出以下三条结论：

第一，若两块万用表所选择的量程相同而电压灵敏度不同，那么用它们分别测量同

一个高内阻电源电压时，电压灵敏度高的那块表测量误差较小。

第二，对同一块万用表而言，电压量程愈高，内阻愈大，所引起的测量误差就愈小。

举例说明。假定万用表直流电压灵敏度为 $20\text{k}\Omega/\text{V}$ ，被测直流电压 $U=10\text{V}$ ，内阻 $r=200\text{k}\Omega$ 。第一次测量选择 10V 挡， $R_V=200\text{k}\Omega$ 。代入式 (1.1.7) 得到 $U_1=U/2=5\text{V}$ ，再由式 (1.1.8) 求出 $\gamma_V=-50\%$ 。第二次测量改用 50V 挡，该挡内阻达 $1\text{M}\Omega$ ，由此可求出 $U_1=8.33\text{V}$ ， $\gamma_V=-16.7\%$ 。

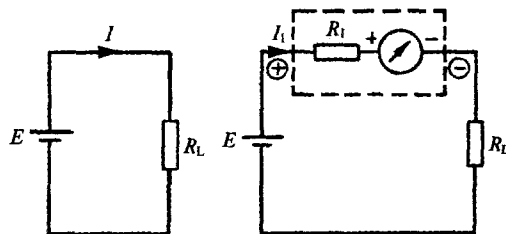
这表明，为了减小测量高内阻电源电压的误差，有时宁可选择较高的电压量程，以增大万用表的内电阻。当然量程也不宜选得过高，以免在测量低电压时因指针偏转角度太小而增加读数误差。对于低内阻的电源电压（例如 220V 交流电源），可选用电压灵敏度较低的万用表进行测量。换言之，高灵敏度万用表适合于电子测量，而低灵敏度万用表适合于电工测量。

第三，当万用表电压挡的内阻比被测电源的内阻大 100 倍以上时，就不必考虑万用表对被测电源的分流作用。

3. 电流挡的内阻

理想情况下，电流表的内阻 R_i 应等于零，但实际上却做不到。由于 R_i 的存在，使用万用表测量电流时必然有一定的电压降，从而产生测量误差。

利用图 1.1.4 可以分析万用表测量电流时产生的误差。设电源电压为 E ，其内阻可忽略不计， R_L 为负载电阻。(b) 图中的虚线框内为直流电流表的等效电路，其内阻为 R_i ， $\odot$ 表示内阻为零的指示计。 $\oplus$ 和 $\ominus$ 分别表示万用表的正、负极插孔（下同）。被测电流为



(a) 被测电流源的等效电路； (b) 测量电流时的等效电路

图 1.1.4 万用表测量电流时的电路

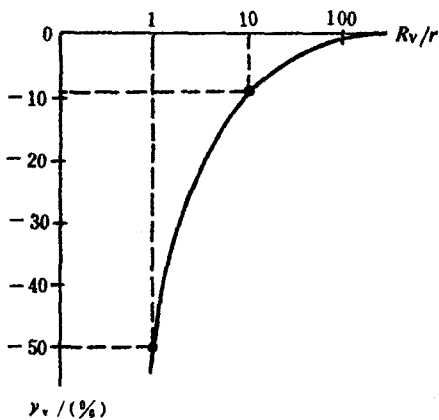


图 1.1.3 测量电压时相对误差曲线

$$I = \frac{E}{R_L} \quad (1.1.9)$$

接上电流表后电流变成 I_1 ，有关系式

$$I_1 = \frac{E}{R_L + R_I} \quad (1.1.10)$$

相对误差

$$\gamma_I = \frac{I_1 - I}{I} \cdot 100\% = \frac{\frac{E}{R_L + R_I} - \frac{E}{R_L}}{\frac{E}{R_L}} \cdot 100\% = -\frac{1}{1 + \frac{R_L}{R_I}} \cdot 100\% \quad (1.1.11)$$

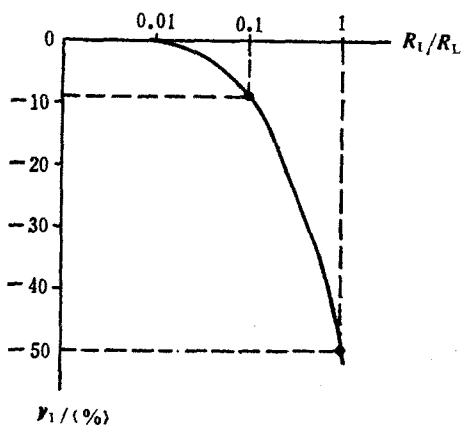


图 1.1.5 测量电流时的相对误差曲线

式 (1.1.11) 中的 $\gamma_I < 0$ ，表示 $I_1 < I$ ，即测量值比实际电流值偏低，而且 R_I 值愈小，相对误差的绝对值 $|\gamma_I|$ 也愈小。图 1.1.5 所示的误差曲线上分别给出 $R_I/R_L = 0.01, 0.1, 1$ 这三种情况下的相对误差值。由图可见。当电流挡的内阻很小，能满足 $R_I \leq 0.01R_L$ 之条件时， $|\gamma_I| < 1\%$ ，该项误差可忽略不计。但是当 R_I 与 R_L 比较接近时，就会产生很大的测量误差。采用本书第 5.20 节所介绍的方法能够消除此项测量误差。

进一步分析可知，电流挡的内阻愈小，测量电流时万用表所消耗的电功率 P_I 也愈低，有关系式

$$P_I = I^2 R_I \quad (1.1.12)$$

显然，当被测电流一定时， P_I 与 R_I 成正比。 R_I 值取决于电流挡的分流电阻值和表头的内阻。

从中亦可得出三条结论：

第一，在电流挡的量程 I_M 相同的情况下，万用表的内阻 R_I 愈小，其满度压降 U_M 就愈低，测量电流的误差也愈小，例如 500 型万用表在 500 mA 挡的内阻是 1.5Ω ，满度压降为

$$U_M = I_M R_I = 500 \times 10^{-3} \times 1.5 = 0.75 \text{ V}$$

而经过改进以后的 MF30 型新产品，在 500 mA 挡的内阻为 0.6Ω ，满度压降减小到 0.3 V，只相当于 500 型的 2/5，可减小测量误差。

通常设计新型万用表时，电流挡的满度压降应低于 0.5 V。对同一块万用表而言，各电流挡的满度压降值可以不相同。

第二, 对于同一块万用表, 电流量程越大, 内阻越小, 测量误差也越小。

举例说明, 用一节干电池做电源, $E=1.5\text{V}$, 其内阻可忽略不计。设负载电阻 $R_L=15\Omega$, 负载上的电流 $I=100\text{mA}$ 。若万用表 100mA 挡的内阻 $R_1=4\Omega$, 那么串入电路中测得的电流只有 78.9mA , 相对误差 $\gamma_1=-21\%$ 。如果改用 1A 挡测量, 该挡内阻为 0.4Ω , 此时测量值为 97.4mA , 相对误差降至 -2.6% 。

因此, 为了减小测量电流的误差, 有时宁可选择较高的电流量程。当然量程也不宜选得过高, 以免在测量小电流时读数误差明显增大。

第三, 当电流挡内阻约为被测电路总电阻的 1% 时, 不必考虑万用表压降对测量的影响。

最后需要指出, 若电源内阻 r 不容忽略, 式 (1.1.11) 应改为

$$\gamma_1 = -\frac{1}{1 + \frac{r+R_L}{R_1}} \quad (1.1.13)$$

4. 测量功能

普通万用表大多只能测量电压、电流和电阻, 因此亦称 $V-A-\Omega$ 三用表。近年来问世的新型万用表增加了许多新颖实用的测试功能, 例如测量电容、电感、晶体管参数、电池容量、音频功率、直流高压和交流高压, 检查线路通断 (蜂鸣器挡)。有的万用表还设计了信号发生器, 给维修人员提供了方便。下面给出万用表的测试功能及测量范围。其中, 电阻挡为有效量程, 括弧内的数值是少数万用表所能达到的指标。

(1) 基本功能

直流电压 (DCV): $0\sim 500\text{V}$ ($0\sim 2.5\text{kV}$, $0\sim 25\text{kV}$)

交流电压 (ACV): $0\sim 500\text{V}$ ($0\sim 2.5\text{kV}$)

直流电流 (DCA): $0\sim 500\text{mA}$ ($0\sim 5\text{A}$, $0\sim 10\text{A}$)

交流电流 (ACA): ($0\sim 5\text{A}$, $0\sim 10\text{A}$)

电阻 (Ω): $0\sim 20\text{M}\Omega$ ($0\sim 200\text{M}\Omega$)

音频电平 (dB): $-20\sim 0\sim +56\text{dB}$

(2) 扩展功能

电容 (C): $1000\text{pF}\sim 0.3\mu\text{F}$ ($0\sim 10000\mu\text{F}$)

电感 (L): $0\sim 1\text{H}$ ($20\sim 1000\text{H}$)

晶体管 (h_{FE}): $0\sim 200$ ($0\sim 300$, $0\sim 500$)

音频功率 (P): ($0.1\sim 12\text{W}$, 扬声器阻抗为 8Ω)

电池负载电压 (BATT): ($0.9\sim 1.5\text{V}$, 电池负载为 12Ω)

蜂鸣器 (BZ): (当被测线路电阻小于 30Ω 时蜂鸣器发声, 如 KT7244 型万用表)

交流大电流测量功能 (ACA): $6\text{A}/15\text{A}/60\text{A}/150\text{A}/300\text{A}$ (例如, 7010 型万用表)

5. 频率特性

万用表的工作频率较低, 频率范围窄。便携式万用表一般为 $45\sim 2000\text{Hz}$, 袖珍式