

高等院校教材

电机测试技术

王益全 张炳义 等 编著



科学出版社

www.sciencep.com

高等院校教材

电机测试技术

王益全 张炳义等 编著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书较全面地介绍了电机测试技术的原理及测试方法,包括测量与测量误差基础知识,电机中电量与非电量测量,电机噪声与振动测量,电机参数测定,电机性能测试,电机自动测试系统等。对现代电机测试技术的新概念、新理论和新方法以及可编程控制器在电机测试中的应用也作了较为系统的介绍。

在强调电机测试技术的基本理论和测试方法的同时,力求向读者展现该领域的最新成果与发展动向,以启发读者在这一领域的研究与创新。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业高年级学生及研究生的教材或教学参考书,也可供有关科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机测试技术/王益全,张炳义等编著. —北京:科学出版社,2004
(高等院校教材)

ISBN 7-03-012424-3

I. 电… II. ①王… ②张… III. 电机-测试技术-高等学校-教材
IV. TM301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 106944 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨
责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 1 月第一次印刷 印张: 14 3/4

印数: 1—5 000 字数: 278 000

定 价: 26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

在电机的生产、运行和科研过程中,需要对电机的性能、参数等进行必要的测试,以检验电机是否满足有关技术要求的规定,或寻求改进设计工艺的途径和方法。电机测试技术主要研究电机性能与电机参数的测试原理及测试方法。

电机测试技术的发展与电机技术及其他相关技术的发展是密不可分的。早期的电机测试中转矩测试是一个难题,随着各种测功机的问世,这一难题迎刃而解。在永磁电机设计和仿真技术的研究中,往往需要实测电机参数,而某些常规实验方法又无法应用,因此有关永磁电机参数测试的原理和试验方法的研究就显得十分重要。随着电力电子技术的发展,以正弦量定标的传统电工仪表已经无法满足非正弦电量的测试要求,非正弦电量的测量引起了人们的广泛关注。随着材料科学的发展,人们发现一些材料具有热敏、磁敏、力敏、光敏等特性,以及霍尔效应、压电效应等,进而据此制成的各种传感器为电机中各种电量与非电量的自动检测提供了可靠手段。

随着电子技术和计算机技术的发展,从20世纪70年代起,仪器仪表业发生了历史性的变革,仪器仪表产品的数字化和智能化,也使电机测试技术获得长足的进步。数字电压表、数字转矩转速仪、光电数字测速仪、智能型温控仪,以及数字存储示波器等一系列现代测试仪表的出现促进了电机自动测试技术的发展,解决了一系列过去难以解决的电机测试技术课题,测试系统的精度和可靠性也大大提高。

测试系统与自动控制系统一体化是现代电机测试技术的主要特征之一,交流伺服系统的无传感器位置检测技术、电机转矩在线测试技术以及可编程控制器在电机测试中的应用等就是典型的例证。无传感器位置检测技术利用电机的某些电气参数与转子位置的函数关系,解算出转子位置信息,并据此实现伺服系统的位置控制、速度控制和主电路电流换向控制。电机转矩在线测试技术利用电机学理论和自动控制理论,实现了电机电磁转矩的实时在线测试与控制,大大提高了自动控制系统的控制精度和可靠性。可编程控制器以其良好的可靠性、丰富的指令集、便捷的操作、强劲的通讯能力以及丰富的扩展模块,已广泛应用于各种电机的在线检测、监测及其自动控制。

本书是编者在多年教学经验和科研实践的基础上参考了大量有关文献编写而成的。全书共分九章,第1章介绍有关测量与测量误差的基础知识;第2章和第3章介绍电机中电量与非电量的测量;第4章介绍电机噪声与振动的测量;第5章和第6章为电机参数与电机性能的测试;第7章介绍现代电机测试技术的有关原理和方法;第8章为电机自动测试系统的原理与构成;第9章介绍可编程控制器及其在电机测试中的应用。全书在强调电机测试的基本理论和测试方法的同时,力求

向读者展现电机测试技术的最新成果和发展动向,以启发读者在这一工作领域的研究和创新。

参加本书编写的有王益全教授、张炳义教授、冯桂宏副教授和王笑平工程师。书稿执笔分工如下:王笑平编写第2章,冯桂宏编写第6章和第8章,张炳义编写第7章和第9章,王益全编写第1章、第3章、第4章和第5章,并完成了全书的定稿工作。

沈阳工业大学王成元教授对全书作了仔细的审校,提出了很多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

在编写本书过程中所参考的主要著作和论文已列入书后的参考文献,以便读者进一步查阅,对于这些文献作者对本书的贡献,编者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 测量与测量误差基础

- 1.1 测量的基础知识 1
 - 1.1.1 什么是测量 1
 - 1.1.2 单位与单位制 2
- 1.2 测量仪表 3
 - 1.2.1 测量仪表的分类 3
 - 1.2.2 指示式电工仪表的基本结构 4
- 1.3 测量误差的基本知识 6
 - 1.3.1 测量误差的来源与分类 6
 - 1.3.2 测量误差的表示方法 7
 - 1.3.3 有效数字 9

第 2 章 电机中电量的测量

- 2.1 电压与电流的测量 10
 - 2.1.1 指示式仪表 10
 - 2.1.2 示波器 12
 - 2.1.3 电压、电流变送器 15
- 2.2 电功率的测量 15
 - 2.2.1 直流机电功率的测量 15
 - 2.2.2 单相交流机电功率测量 16
 - 2.2.3 三相交流机电功率的测量 18
- 2.3 频率的测量 20
 - 2.3.1 数字频率表 20
 - 2.3.2 微分式频率表 21
 - 2.3.3 示波器 23
- 2.4 功率因数的测量 23
 - 2.4.1 数字相位计 23
 - 2.4.2 变送器式单相相位表 24
 - 2.4.3 示波器 25
- 2.5 非正弦电量的测量 27

- 2.5.1 谐波分析 27
- 2.5.2 非正弦电压与电流的测量 30
- 2.5.3 功率与功率因数的测量 34
- 2.5.4 谐波的测量 35

第3章 电机中非电量的测量

- 3.1 转速的测量 39
 - 3.1.1 日光灯法测速 40
 - 3.1.2 闪频法测速 41
 - 3.1.3 光电数字测速 42
 - 3.1.4 瞬时转速的测量 46
 - 3.1.5 转差率的测量 47
- 3.2 转矩的测量 48
 - 3.2.1 测功机法 49
 - 3.2.2 校正过的直流电机法 51
 - 3.2.3 转矩仪法 52
- 3.3 电机温度的测量 54
 - 3.3.1 概述 54
 - 3.3.2 电阻法 55
 - 3.3.3 埋置检温计法 56
 - 3.3.4 温度计法 61
 - 3.3.5 叠加法 62
- 3.4 电机磁场的测量 65
 - 3.4.1 探测线圈法 65
 - 3.4.2 霍尔效应法 67
 - 3.4.3 磁通计法 70

第4章 电机噪声与振动的测定

- 4.1 电机噪声的测定 73
 - 4.1.1 概述 73
 - 4.1.2 电机噪声的物理量度 74
 - 4.1.3 噪声测量仪器的基本原理 77
 - 4.1.4 电机噪声的测定方法 80
 - 4.1.5 电机的噪声限值 84
- 4.2 电机振动的测定 84

- 4.2.1 振动测定原理 85
- 4.2.2 测振传感器 86
- 4.2.3 测振仪 87
- 4.2.4 电机振动测定方法及限值 88

第5章 电机参数的测定

- 5.1 转动惯量和时间常数的测定 90
 - 5.1.1 电机转子转动惯量的测定 91
 - 5.1.2 电动机时间常数的测定 93
- 5.2 电机绕组电感和电抗的测定 93
 - 5.2.1 直流电机电枢回路电感的测定 93
 - 5.2.2 直流电机励磁绕组电感的测定 95
 - 5.2.3 交流电机绕组电抗的测定 97
- 5.3 同步电机参数的测定 99
 - 5.3.1 同步电机参数的测定方法 99
 - 5.3.2 同步电机瞬态参数的测定 101
 - 5.3.3 同步电机任意负载运行时功率角与同步电抗的测定 106
- 5.4 永磁同步电机参数的测定 107
 - 5.4.1 稳态参数测定的直接负载法 107
 - 5.4.2 稳态参数测定的电压积分法 108
 - 5.4.3 稳态和瞬态参数测定的直流衰减法 110

第6章 电机性能的测试

- 6.1 电机杂散损耗的测定 112
 - 6.1.1 概 述 112
 - 6.1.2 杂散损耗测定的测功机法 113
 - 6.1.3 杂散损耗测定的回馈法 114
 - 6.1.4 杂散损耗测定的反转法 115
- 6.2 电机效率的测定 117
 - 6.2.1 效率的直接测定法 117
 - 6.2.2 效率的间接测定法 119
- 6.3 电动机工作特性的测定 121
 - 6.3.1 工作特性测定的转矩仪法 123
 - 6.3.2 圆图法 124
 - 6.3.3 降低电压负载法 130

- 6.4 电动机转矩-转速特性的测定 132
 - 6.4.1 转矩-转速特性测定的加速法 132
 - 6.4.2 校正过的直流电机法 133
 - 6.4.3 永磁同步电动机转矩-转速特性的测定 136
- 6.5 电机的温升试验 138
 - 6.5.1 温升试验的直接负载法 138
 - 6.5.2 温升试验的等效负载法 139

第7章 现代电机测试技术

- 7.1 传感器技术及其在电机测试中的应用 142
 - 7.1.1 霍尔传感器 142
 - 7.1.2 转矩传感器 147
 - 7.1.3 数字温度传感器 149
 - 7.1.4 磁敏传感器 150
- 7.2 数字仪器 153
 - 7.2.1 数字电压表 153
 - 7.2.2 数字存储示波器 155
 - 7.2.3 虚拟仪器 159
- 7.3 红外测温技术 159
 - 7.3.1 红外测温原理 160
 - 7.3.2 红外探测器 161
 - 7.3.3 红外测温方法 161
- 7.4 电机位置检测技术 163
 - 7.4.1 传感器位置检测技术 163
 - 7.4.2 无传感器位置检测技术 168
- 7.5 电机转矩在线测试技术 170
 - 7.5.1 一种转矩在线测试的简易方法 170
 - 7.5.2 定子损耗分离法 171
 - 7.5.3 坐标变换法之一—— $\alpha\beta 0$ 变换法 172
 - 7.5.4 坐标变换法之二——MT0变换法 174
 - 7.5.5 转差频率法 176

第8章 电机自动测试系统

- 8.1 概述 178
- 8.2 试验电源与被试电机的负载 180

8.2.1	试验电源	180
8.2.2	被试电机的负载	181
8.3	电量与非电量的检测	181
8.3.1	电量变送器	182
8.3.2	非电量的检测	184
8.4	电机自动测试的数据采集系统	185
8.4.1	数据采集系统的构成	185
8.4.2	采样保持器	187
8.4.3	模拟多路开关	187
8.4.4	A/D 转换器	188
8.5	电机运行状态的自动控制	189
8.5.1	电机运行状态与控制方式	189
8.5.2	计算机控制的输出通道	191
8.6	电机自动测试系统软件	193
8.6.1	主程序的编制	193
8.6.2	子程序的编制	195

第 9 章 可编程控制器及其在电机测试中的应用

9.1	可编程控制器概述	198
9.1.1	定 义	198
9.1.2	特 点	198
9.1.3	分 类	199
9.1.4	基本组成	201
9.1.5	工作原理	202
9.2	电机测试中常用的微型可编程控制器	203
9.2.1	SIMATIC S7-200 系列可编程控制器的基本构成	204
9.2.2	S7-200 系列可编程控制器的内部资源	205
9.2.3	S7-200 系列可编程控制器的基本指令	207
9.3	可编程控制器在电机测试中的应用	214
9.3.1	三相感应电动机 PLC 综合测试系统	214
9.3.2	PLC 在电机转矩在线测试中的应用	216

参考文献	222
------	-----

第 1 章 测量与测量误差基础

简单地说,测试技术就是测量与试验技术,电机测试技术就是电机的测量与试验技术。在电机测试过程中,要针对不同类型电机的不同试验项目和试验要求,对电机中的各种电量与非电量进行测量,然后根据电机学的基本原理,利用测得的数据计算出电机的各种参数和特性,以便对电机产品或科研成果做出评价。电机测试时,要求测试人员严格地按照规定的条件和步骤进行,测试人员必须具备有关测量与试验的基本知识。本章简要介绍有关测量与测量误差的基础知识。

1.1 测量的基础知识

1.1.1 什么是测量

为了表示某物理量的数量,必须有一个与该物理量具有相同性质的标准量作为比较基准,这个标准量称为单位。求取某物理量是标准量单位的多少倍的操作称为测量。用来完成这种操作的装置称为测量器具(如仪器、仪表、量具等)。测量结果应由数值和单位两部分组成,没有单位的数值是没有物理意义的。

设被测量为 x , 单位量为 x_0 , 则测量结果的数值 A_x 为:

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1.1)$$

上式称为测量的基本方程。显然,对于同一个被测量,若选用的单位量不同,测量结果的数值也不相同。

以最高的精确度和稳定性建立起来的专门用以规定、保持和复现某种物理量单位的特殊量具或仪器称为基准器。基准器一般保存在国家级的权威研究机构中。根据基准复现的量值制成的不同等级的标准量具和仪器称为标准器。电量标准器主要有标准电池、标准电阻器、标准电容器及频率标准等。电量标准器的精确度很高,但使用起来不很方便。工程实际中,电量标准器往往采用标准电压、电流发生器或高精度的数字式多功能仪表来代替。指示式仪表校验时,也可用比该仪表高出 1~2 个准确度等级以上的仪表作为校验用标准器。

确定电量单位的实验称为绝对测量。图 1.1 示出了用电流天平进行电流绝对测量的示意图。当被测电流 I 流过线圈时,可动线圈产生向下的作用力 F , 用天平

测量该力并求得电流 I 。

努力维持由绝对测量求出的电量单位作为标准器的准确性,是每个国家的义务,并以此作为进行国际间比较的标准语言。

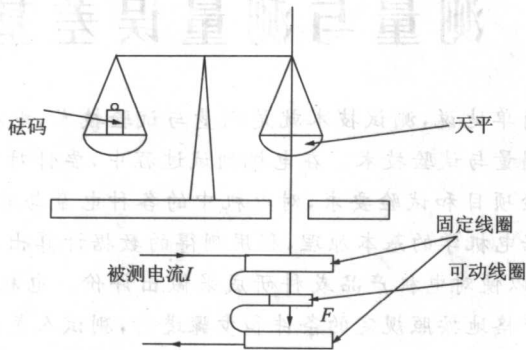


图 1.1 电流的绝对测量

1.1.2 单位与单位制

测量单位的确定和统一是非常重要的。要使同一个物理量在不同的时间、地点测量时有相同的结果,必须采用统一的、固定不变的单位。世界各国都以法律的形式来规定计量单位。国际上的单位统一是在国际计量大会上协商确定的。

根据 1971 年国际计量大会的规定,国际单位制(SI 单位制)中有 7 个基本单位(参见 1.1),2 个辅助单位(参见 1.2)以及若干具有专门名称的导出单位(参见 1.3)。同时规定了以 SI 单位制为基准的倍数及接头词(参见 1.4)。

表 1.1 国际单位制(SI)的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义	备 注
长度	米	m	在 $1/299\,792\,458$ 秒的时间内光在真空中传播的长度	1983 年修订
质量	千克 (公斤)	kg	与国际千克原器相等的质量	1989 年定义
时间	秒	s	铯 133 两个超精细能级跃迁所对应辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间	1967 年修订
电流	安[培]	A	在间隔 1m 的两无限长平行直导线内每米长度上产生 $2\times 10^{-7}\text{N}$ 的力的电流	1948 年修订
热力学温度	开[尔文]	K	是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$	1967 年修订
发光强度	坎[德拉]	cd	是光源在给定方向上的发光强度,该光源的 $540\times 10^{12}\text{Hz}$ 单色辐射的辐射强度为 $1/683\text{W/sr}$	1979 年修订
物质的量	摩[尔]	mol	系统中所包含物质质量的基本单元数等于 0.012kg 碳 12 所包含的原子数目	1971 年定义

表 1.2 国际单位制(SI)的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
[平面]角	弧度	rad	是一个圆内两条半径间的平面角,这两条半径在该圆周上截取的弧长与半径相等
立体角	球面度	sr	是一个立体角,其顶点位于球心,其在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积

表 1.3 国际单位制中具有专门名称的导出单位(节选)

量的名称	单位名称	单位符号	SI 表示式
频率	赫[兹]	Hz	—
力,重力	牛[顿]	N	—
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	J/s
电荷[量]	库[仑]	C	—
电压,电动势,电位	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	A/V
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	—
光通量	流[明]	lm	—
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2

表 1.4 SI 单位的倍数与接头词

单位的 倍数	接头词	
	名称	符号
10^{18}	艾[可萨]	E
10^{15}	拍[它]	P
10^{12}	太[拉]	T
10^9	吉[咖]	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳[诺]	n
10^{-12}	皮[可]	p
10^{-15}	飞[母托]	f
10^{-18}	阿[托]	a

1.2 测量仪表

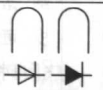
1.2.1 测量仪表的分类

在测量某物理量时,测量仪表对测量值的表示方法有两种,即模拟表示和数字表示,因此测量仪表也分为模拟式和数字式两类。模拟式仪表利用指针的运动或偏转角度来表示测量值,其优点是能够及时简洁地反映被测物理量的大小关系,其缺点是因测量者的经验不足或疏忽等原因,容易引起测量误差。

数字式仪表则是利用数码管或液晶显示器等直接用数字显示测量值。数字式仪表的优点是精确度高,缺点是当被测物理量变化时,其测量值难以瞬时读取。在测量精度方面,数字式仪表与模拟式仪表相比有着绝对的优势。目前,数字式仪表已经获得广泛应用。

用指针的偏转来表示电量的模拟式仪表称为指示式电工仪表。指示式电工仪表可按工作原理、准确度等级或用途等进行分类。国家标准 GB776 规定,指示式电工仪表的准确度等级可分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 等 7 级。表 1.5 示出了按工作原理的分类。

表 1.5 指示式电工仪表的分类与应用

分类	符号	最高准确度等级	应用电路	应用举例
磁电系		0.1	直流	电压表、电流表,电阻表,转速表,温度计,检流计,照度表,磁通计
电磁系		0.1	交(直)流	电压表,电流表,转速表
电动系		0.1	交(直)流	功率表,频率表,电压表,电流表,功率因数表
静电系		0.1	交(直)流	电压表
感应系		0.5	交流	电度表
热电系		0.2	交(直)流	电压表,电流表,功率表
整流系		1.0	交流	电压表,电流表,频率表

1.2.2 指示式电工仪表的基本结构

指示式电工仪表主要由以下几部分构成:使指针偏转的驱动部分,平衡驱动力矩的控制部分,抑制指针振荡的阻尼部分以及数据读取部分等。下面以指示式电工仪表中精确度及灵敏度较高,结构也比较简单的动圈式仪表为例加以说明。

图 1.2 示出了动圈式仪表的结构。在永磁体 N、S 上装有电工纯铁制成的极靴 P,动圈 C 绕制在矩形骨架上,骨架上下分别装有转轴、轴承和游丝,以及与转轴成直角的可以自由转动的指针等。

当被测电流 I 流过动圈时,将产生与电流 I 成正比例的驱动力矩 T_d ,使指针偏转。

$$T_d = k_1 I \quad (\text{单位: } \text{N} \cdot \text{m}, k_1 \text{ 为比例系数}) \quad (1.2)$$

指针偏转使游丝被拉紧并产生弹性控制力矩 T_c ,当 T_c 与 T_d 平衡时,指针将停止在与被测量相应的位置。这时,指针的偏转角度 θ 与驱动力矩 T_d 或控制力矩 T_c 的关系为

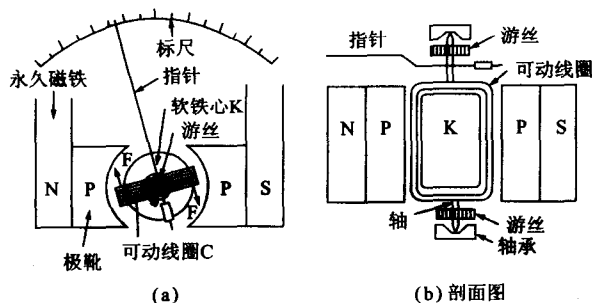


图 1.2 动圈式仪表的结构

$$T_d = T_c = k_2 \theta \quad (\text{单位: } N \cdot m, k_2 \text{ 为常数}) \quad (1.3)$$

由式(1.2)和式(1.3)可知,被测电流 I 与指针偏转角度 θ 成正比。因此,动圈式仪表的标尺分度是均匀的。

然而,在指针向平衡点摆动的过程中,在游丝弹性力的作用下会产生围绕平衡点的振荡,因此必须有一个使振荡快速停止的力,这就是阻尼力矩。在指示式仪表中产生阻尼力矩的方式主要有空气阻尼方式和电磁阻尼方式两种,如图 1.3 所示。

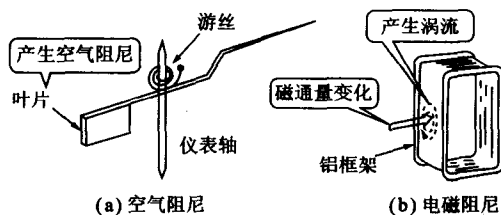


图 1.3 指示式仪表的阻尼方式

指示式电工仪表的数据读取部分俗称表盘,表盘上记载了如下事项:型号,量度标尺,准确度等级,应用电路符号,工作原理符号,仪表放置方式符号,被测量单位符号,制造厂及仪表编号等。

一种电机试验中常用的 D26-A 型电动式交、直流两用电流表的表盘如图 1.4 所示。

由图 1.4 中可以看出, D26-A 型电流表的准确度等级为 0.5 级,可用于直流电流和交流电流的测量,测量单位为安[培](A),该仪表为电动系仪表,使用时应水平放置。

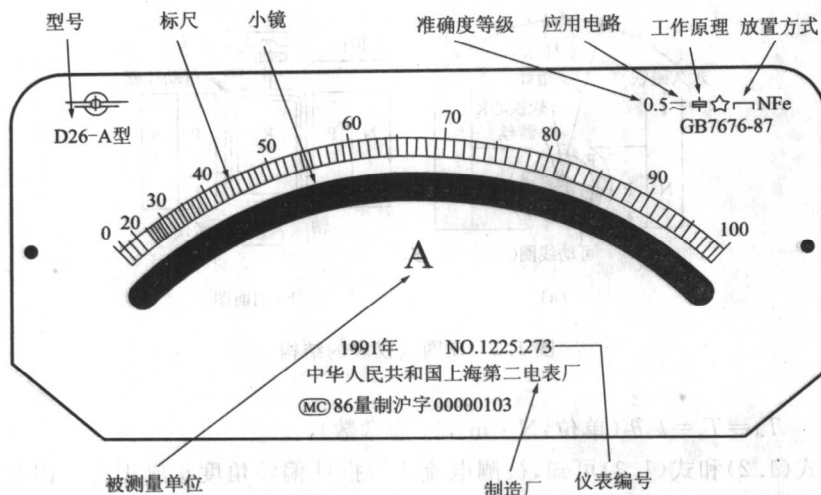


图 1.4 D26-A 型电流表的表盘

1.3 测量误差的基本知识

在科学研究和生产实践中,常常要进行各种各样的试验与测量。一般说来,试验与测量时所测得物理量的值并非其真实值。测量结果与被测量真值之间的差称为测量误差。一切试验和测量结果都有误差,误差自始至终存在于一切试验和测量的过程中。

1.3.1 测量误差的来源与分类

按照误差的性质,测量误差可分为系统误差、随机误差和疏忽误差三类。

- **系统误差** 在相同条件下多次测量同一物理量时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按某一确定规律变化的误差称为系统误差。引起系统误差的原因主要有以下几点:由于测量原理或方法不完善而引起的误差、仪器仪表本身的误差,以及实验人员操作的熟练程度和不良习惯引起的误差等。

系统误差表征了测量结果的准确度。

- **随机误差** 这是一种大小和符号都不确定且无一定变化规律的误差。随机误差产生的原因比较复杂,如电源电压的随机波动,测试环境(如温度,湿度,压力,风速等)的随机变化,电磁场干扰,大地震动等。

随机误差表征了测量结果的精密度。

- **疏忽误差** 也称为粗大误差。这是一种严重歪曲测量结果的误差。主要是由于测试者的粗心大意,如错误操作,读数错误,记录错误或计算错误等原因引起的误差。包含疏忽误差的数据称为坏值,应予剔除。

随机误差一般较小,工程上常忽略不计,只有在精密测量时需要考虑。工程上主要考虑的是系统误差。

1.3.2 测量误差的表示方法

测量误差可以用绝对误差来表示,也可以用相对误差来表示。在评价仪器仪表的准确度等级时则采用了引用误差。

• **绝对误差** 绝对误差 Δx 是指某量的测量值 x 与其真值 x_0 之差,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.4)$$

实际上,真值是未知的,因此常采用约定真值来代替。获得约定真值的方法主要有:

- ① 对物理量作足够多次测量,取算术平均值作为其约定真值;
- ② 用高一个或几个准确度等级的仪表测量,以其指示值作为被测值的真值。

• **相对误差** 相对误差 γ 定义为绝对误差 Δx 与真值 x_0 之比的百分值,即

$$\gamma = \Delta x / x_0 \times 100\% \quad (1.5)$$

工程上,为了使用上的方便,上式分母的真值 x_0 常用测量值来代替,这时求得的是相对误差的近似值,即

$$\gamma = \Delta x / x \times 100\% \quad (1.6)$$

常用相对误差来表征测量的准确度,相对误差愈小,测量的准确度愈高。

• **引用误差** 引用误差主要是用来评价仪器仪表的准确度等级。设仪表量程满度值为 x_m ,则绝对误差 Δx 与 x_m 之比的百分值定义为引用误差,即

$$\gamma_m = \Delta x / x_m \times 100\% \quad (1.7)$$

GB776 中规定的指示式电工仪表的 7 个准确度等级就是按引用误差定义的。例如,一块电工仪表的准确度等级为 1.0 级,表示这块仪表的最大引用误差不大于满度值 x_m 的 $\pm 1\%$ 。

• **数字仪表误差的表示方法** 数字仪表的误差(准确度)常用以下两种方法表示:

$$\Delta x = \pm a\%x \pm b\%x_m \quad (1.8)$$

$$\Delta x = \pm a\%x \pm n \text{ 个字} \quad (1.9)$$

式中, Δx 为绝对误差, a 为误差的相对项系数, x 为被测量的显示值, b 为误差的固定项系数, x_m 为仪表量程的满度值。

以上二式表明,数字仪表的绝对误差由两部分构成。一部分与被测量的相对误差有关,这部分误差与显示值 x 成正比,称为**读数误差**;另一部分不随显示值变化,当满度值 x_m 一定时,这部分误差是一个固定值,称为**满度误差**。

式(1.8)和式(1.9)中,满度误差的两种表示方法($\pm b\%x_m$ 和 $\pm n$ 个字)实质上是完全一致的,可举例说明如下:

一台最大读数为 49 999(4 1/2 位)的数字式多功能电子仪表,直流电压测量时,其 4V 量程的测量误差为 $\pm(0.07\%U_x + 2)$,即该量程的满度误差为 ± 2 个字。