

电机现代 测试技术

武建文 李德成 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电机现代测试技术

武建文 李德成 编著



机械工业出版社

本书系根据各种类型电机的最新国家标准规定的试验项目和试验方法,对电机中的基本物理量的测量、电机的参数测定和电机的性能测试作了全面系统的介绍。书中重点对电机的测试原理、常用的测试方法以及测试设备进行了详细的叙述。

本书可作为高等工科院校电机电器及其控制专业以及其他相关专业的教材或教学参考书,可供电机检测工程技术人员参考,也可作为电机试验工人的自学和培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机现代测试技术/武建文,李德成编著. —北京:机械工业出版社, 2005.11

ISBN 7-111-17835-1

I. 电... II. ①武...②李... III. 电机—测试技术 IV. TM301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 129208 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:牛新国 责任编辑:刘星宁 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 封面设计:陈沛 责任印制:石冉

北京中兴印刷有限公司印刷

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·17.5 印张·431 千字

0 001—4 000 册

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

电机是国民经济中应用最广泛的一种动力设备、发电设备和自动控制元件。随着工农业生产 and 国防事业的迅速发展、自动化程度的日益提高和家用电器的日趋普及，以及军事航空航天等特殊领域现代化的要求，电机的品种和产量日益增加，对电机的性能和质量指标提出了越来越高的要求。在电机的科学研究和新产品研制过程中，必须对模型和样机进行大量的试验验证，以探索改进的途径；在电机的研制和生产过程中，必须对样机和产品进行大量的检测，以确定其是否符合国家标准和产品技术条件的要求；在电机的运行过程中，还要对电机的运行状况进行监测，以确定电机的运行状态是否正常。

随着产品产量的增加，例行试验的工作量也随之增大，故必须改变传统人工记录、人工数据处理的低效率测试方法，以实现微机自动测试系统。综上所述，编写本书具有重要的实用意义，对于当前国家技术监督部门狠抓产品质量、提高检验人员的技术水平，具有重要的现实意义。

本书是作者在总结多年教学经验和科研工作基础上编写的，初稿曾多次为电机电器及其控制专业本科生、研究生讲授，还曾为技术监督检验部门以及电机制造厂的试验检验技术人员进行培训讲授。

全书共分三篇，第一篇阐述了电机中基本物理量的测量，包括电量、非电量和磁量的测量；第二篇阐述了电机参数的测定；第三篇阐述了电机性能的测试。本书虽多以异步电动机为典型实例，但其测试方法其他类型电机也都可以借鉴。

本书努力坚持理论联系实际，力图贯彻最新国家标准和反映电机测试方面的最新技术。在编写过程中，注意阐述基本原理、力求明确物理概念，注重生产实际和科研实际中的测试设备、测试仪器仪表和测试方法。

参加本书编写的有武建文教授、李德成教授。李琳助理研究员参加了本书的录入、校对等文稿工作。

本书由中国工程院院士沈阳工业大学唐任远教授仔细审阅，唐院士对全书编写体系、内容和写法提出了许多宝贵意见，对此作者表示衷心的感谢。作者对参考文献中提供样本和资料的个人和单位在此一并表示谢意。

由于作者水平有限，书中缺陷和错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

本书可作为高等工科院校电机电器及其控制专业以及其他相关专业的教材或教学参考书，可供电机检测工程技术人员参考，也可作为电机试验工人的自学和培训教材。

作 者

2005年11月

目 录

前言	
绪论	1
一、测试技术在电机科研和生产中的作用	1
二、电机测试的特点	1
三、误差基本概念和测量误差分析	3
第一篇 电机中基本物理量的测量	
第一章 电机中电量的测量	11
第一节 电量测量仪器仪表的种类	11
第二节 电压和电流的测量	13
一、指示式电压表和电流表	13
二、扩大量限装置	14
三、电压表和电流表的选择和使用	16
四、电子测量仪器	18
五、数字测量仪表	19
第三节 功率的测量	20
一、直流功率的测量	20
二、交流功率的测量	20
三、功率表的选择及使用	22
四、数字功率表	22
第四节 频率和相位的测量	23
一、频率表和相位表	23
二、电子示波器测量频率和相位	23
三、频率和相位的数字测量	23
第五节 电路参数的测量	26
一、电阻的测量	26
二、电感和电容的测量	29
第六节 介电强度试验	31
一、交流耐压试验	31
二、匝间绝缘冲击耐压试验	32
三、泄漏电流试验	33
第二章 电机中非电量的测量	34
第一节 转速的测量	34
一、常用转速表	34
二、光电数字测速	36
三、频闪测量转速	39
四、激光测量转速	40
五、电机瞬时转速的测量	40
六、转差率的测量	42
七、电动机离心开关断开转速的测量	43
第二节 转矩的测量	45
一、转矩测量原理	45
二、转矩测量仪器的分类	47
三、传递类转矩测量装置	48
四、平衡类转矩测量装置	56
五、能量转换类转矩测量法	63
第三节 温度、温升的测量	64
一、温升	64
二、基本测温方法	65
三、红外测温	70
四、光纤测温	72
五、交流定子绕组带电测温	73
六、交流电动机的热试验方法	77
第四节 电机噪声的测量	81
一、电机噪声的物理度量	81
二、噪声测量仪器的基本原理	84
三、电机噪声的测量方法及限值	89
四、电机噪声的分析与判别	92
第五节 电机振动的测定	95
一、测振传感器	96
二、测振仪	97
三、电机振动的测量和限值	98
第三章 电机中磁量的测量	100
第一节 霍尔效应法	101
一、基本原理	101
二、特斯拉计(高斯计)	102
第二节 感应法	104
第三节 冲击法	106
一、冲击检流计法	107
二、磁通计法	108
三、数字式磁通计	110

第四节 磁性材料的测量	110	三、主磁路时间常数的测定	138
一、直流磁特性的测量	111	四、励磁绕组电感的测定	138
二、交流磁特性的测量	112	第五节 整流电源供电时电动机的 轴电压测定	139
第四章 谐波的测量	115	第七章 同步电机的参数测定	140
第一节 谐波的分析	115	第一节 同步电机的基本方程式	140
一、谐波产生的原因	115	一、隐极同步电机的基本方程式	140
二、谐波的危害	116	二、凸极同步电机的基本方程式	141
三、谐波的傅里叶级数	116	第二节 同步电机的不对称运行	143
四、谐波畸变的度量方法	118	一、正序阻抗和等效电路	143
第二节 谐波的测量方法	122	二、负序阻抗和等效电路	144
一、谐波的时域测量	122	三、零序阻抗和等效电路	145
二、谐波的频域测量	123	第三节 同步电机的三相突然短路	145
第三节 非正弦电量的测量	124	一、无阻尼绕组同步电机三相突然短路 时的物理过程	145
第二篇 电机的参数测定		二、有阻尼绕组同步电机三相突然短路 时的物理过程	147
第五章 转动惯量和时间常数测量	126	三、同步电机中各电抗对应的等效 电路	148
第一节 转动惯量的测量	126	四、突然短路电流及其衰减时间 常数	150
一、悬挂转子摆动法	126	第四节 稳态参数的测定	151
二、辅助摆锤法(钟摆法)	127	一、同步电抗的测定	151
三、空载减速法	128	二、电枢漏抗的测定	154
四、重物自由降落法	128	三、零序电抗 x_0 的测定	156
第二节 时间常数的测量	129	四、负序电抗 x_- 的测定	157
一、电动机发电机对拖法	130	第五节 瞬态参数的测定	159
二、光电测速法	131	一、静测法测定超瞬态电抗 x_d'' 、 x_q''	159
第六章 直流电机的参数测定	132	二、三相突然短路法测定 x_d' 、 x_d'' 及 T_d' 、 T_d'' 、 T_a	161
第一节 电刷中性线位置的测定	132	三、电压恢复法测定 x_d' 、 x_d''	162
一、正反转发电机法	132	第六节 同步电机参数测定的总结	163
二、正反转电动机法	132	第八章 异步电动机的参数测定	167
三、感应法	132	第一节 空载试验	167
第二节 无火花换向区域的测定	133	第二节 短路(堵转)试验	168
一、换向电流馈电方式	133	第三篇 电机的性能测试	
二、试验步骤	133	第九章 电机中部分损耗的测定	172
第三节 整流电源供电时电机的电压、电流 纹波因数及电流波形因数的 测定	134	第一节 异步电机杂散损耗测定的 反转法	172
一、电压、电流纹波因数的计算	134		
二、电流波形因数的计算	135		
第四节 直流电机绕组电感的测量	136		
一、工频交流法测定	136		
二、整流电源供电时电枢电感的 测量	136		

一、基频杂耗的测量	173	二、由空载和短路试验数据作简化	
二、高频杂耗的测量	173	圆图	218
三、总杂耗的求取	175	三、由圆图求取异步电动机的运行	
第二节 异步电机杂散损耗测定的输入输		性能	219
出法	176	第八节 用 50Hz 电源试验 60Hz 异步	
一、测功机输入输出法	176	电动机	222
二、回馈法	176	一、试验方法	222
第三节 静止电力变频器供电直流电动机		二、试验数据处理	222
负载杂散损耗的测定	177	第十一章 电机转矩特性的测取	225
一、电动机纹波损耗的测定	177	第一节 异步电动机转矩转速曲线的	
二、效率的计算	178	测定	225
第十章 电机的性能试验	179	一、动态微分法	225
第一节 电机试验常用交流电源	179	二、稳态法	229
一、三相感应调压器	179	第二节 同步电机功角的测量	232
二、自耦调压器	183	一、闪光灯法	233
三、交流单频率发电机组	184	二、相位表法	233
四、交流变频发电机组 (简称变频		三、数字式功角测量仪	233
机组)	186	第十二章 电机性能的自动测试	236
五、变频器——交流变频电源	187	第一节 概述	236
第二节 电机试验常用直流电源	189	第二节 交直流电量变送器	238
一、直流发电机组电源	189	一、交流电压、电流平均值变送器	
二、整流电源	190	原理	238
第三节 电动机的试验负载	194	二、交流电压、电流有效值变送器	
一、由交流异步电动机转化成的交流		原理	241
发电机负载	194	三、交流功率变送器原理	244
二、磁粉制动器负载	196	第三节 数据采集系统	248
三、直流发电机负载	196	一、采样开关	248
四、由各种测功机组成的负载	197	二、采样-保持电路	249
五、“分析过的直流电机”负载	200	三、采样多路器	250
第四节 发电机的试验负载	201	四、采样控制器	251
一、纯电阻负载	201	第四节 A/D 转换器	253
二、纯电感负载	202	一、逐次逼近型电压 A/D 转换器	253
三、回馈电网负载	203	二、双积分型电压 A/D 转换器	254
第五节 电机的效率测定	205	三、A/D 转换器的应用	256
一、效率测定的直接法	206	第五节 试验数据的输出设备	256
二、效率测定的间接法	209	一、打印机	256
三、变频器供电异步电动机效率的		二、函数记录仪 (X—Y 记录仪)	257
测定	211	三、绘图机	258
第六节 电机工作特性的测取	214	第六节 曲线拟合	259
一、直接负载法求取工作特性	214	第七节 试验数据的微机处理	261
二、由参数计算出工作特性	215	一、数据转换	261
第七节 异步电动机的圆图	217	二、随机误差消除和坏值剔除	262
一、异步电动机的简化圆图	217	三、试验结果输出和数据保存	263

第八节 电动机出厂试验的自动测试系统	264	一、电动机自动测试系统的硬件	266
第九节 电动机特性自动测试系统	266	二、电动机自动测试系统的软件	266
		参考文献	271

绪 论

一、测试技术在电机科研和生产中的作用

在自然界中，对任何不同的研究对象，不仅要从物理方面对它进行认识，而且还要从数量方面对它进行评价，这种评价都是通过测试代表其特性的物理量来实现的，因此测试技术是人类认识自然和改造自然不可缺少的手段。

电机是一种进行能量转换或信号变换的电磁机械装置。电机分为发电机、电动机和控制电机等，在国民经济各部门应用非常广泛。随着工农业生产的迅速发展、自动化程度的日益提高、家用电器的日趋普及，以及军事航空航天等特殊领域现代化的要求，电机的品种和产量日益增加，对电机性能和质量等指标也提出了各种不同的要求。对电机性能和质量的评价都要应用测试技术：在电机的科学研究和新产品研制过程中，必须对模型和样机进行大量的试验验证，以探索改进的途径；在电机的生产过程中，必须对产品进行大量的检验，以确定其是否符合国家标准和产品技术条件的要求；在大型电机的运行过程中，还必须进行运行状况的现场监测。随着产品产量的不断增加，半成品和成品的例行试验工作量也随之增加，故为了提高生产效率，必须采用自动测试系统。可见，测试技术在电机科研、生产和运行中都具有十分重要的地位。

电机工业的发展也促进了电机测试技术的发展，近代电子技术和计算机技术给电机的测试提供了许多先进的测试手段，为提高电机的测试精度和效率，进行动态性能测试提供了可能性，对分析电机的性能提供了很大方便。微型计算机在电机测试中的应用，可以实现参数的自动测定、性能的自动测试、数据的快速采集和处理，改变了长期以来依靠传统人工读数、人工记录、人工分析数据的低效率传统测试方法，这无疑是电机测试技术的重要变革。

二、电机测试的特点

电机为了适应国民经济各部门的使用要求，在性能、结构形式、安装方法以及使用环境方面都有许多不同，其种类和品种是非常繁多的。与此相应，它的技术指标也是多种多样的，要对这些技术指标进行测试，相应地就要有各种测试方法以及试验设备和电源装置。

电机是一种进行能量转换或信号变换的电磁机械装置，这种电磁机械装置既有静止的和旋转的，又有角位移的和直线运动的形式，虽然形式种类很多，但其工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律。因此，其构造的一般原则是用导电材料和导磁材料构成能互相进行电磁感应的磁路和电路，以产生电磁功率和电磁转矩，达到转换能量、变换信号的目的。由此可见，在电机测试过程中，有电量、磁量和非电量的测量。

所谓测量，就是通过物理实验的方法，把被测量与其同种类的、已知的标准量进行比较，以求得被测量的值，达到定量的认识过程。实际上，简单地讲，测量就是将将被测量直接或间接地与作为测量单位的同类量进行比较的过程。电机中物理量的测量，主要包括以下三个方面：

- 1) 测量对象;
- 2) 测量方式和测量方法;
- 3) 测量设备, 其中包括测量仪器仪表与电源(负载)。

在测量工作过程中, 需要对一些术语有所了解, 常用的几个术语如下:

- 1) 准确度: 测量结果与被测量真实值之间相接近的程度。它是测量结果准确度的量度。
- 2) 精密度: 在测量中所测数值重复一致的程度。它是测量重复性的量度。
- 3) 灵敏度: 仪器仪表读数的变化量与相应的被测量的变化的比值。
- 4) 分辨率: 仪器仪表所能反映的被测量的最小变化值。
- 5) 量程(量限): 仪器仪表在规定的准确度下对应于某一测量范围内所能测量的最大值。
- 6) 误差: 测量结果对被测量真实值的偏离程度。

电机测试过程中, 除要确定合理的试验方法外, 测量仪器仪表和设备还必须满足测量准确度和速度的要求。在科学研究试验中, 应根据所制定的特殊试验项目选择仪器仪表的准确度。在工业试验中, 应根据国家有关标准的规定, 确定所采用仪器仪表的准确度和量程。例如在国家标准中规定, 采用的电气测量仪表的准确度应不低于 0.5 级(绝缘电阻表除外); 三相瓦特表的准确度应不低于 1.0 级; 互感器的准确度应不低于 0.2 级; 电量变送器的准确度应不低于 0.5% (检查试验时应不低于 1%); 数字式转速测量仪(包括十进频率仪)及转差率测量仪的准确度应不低于 $0.1\% \pm 1$ 个字; 转矩测量仪及测功机的准确度应不低于 1% (实测效率时应不低于 0.5%); 测力计的准确度应不低于 1.0 级; 温度计的误差在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

选择仪表量限时, 应使测量值位于 20% ~ 95% 仪表量程范围内。在用两瓦特表法测量三相功率时, 应尽量使被测电压及电流值分别不低于瓦特表的电压量程及电流量程的 20%。

电机试验按试验性质的分类如下:

1. 科研试验

科研试验是根据研究需要制订的特殊电机试验项目, 这一试验的目的极为不同, 一般可分为:

- 1) 为新技术应用或新研制样机获得原始数据而进行的试验;
- 2) 为改进现有设计公式和方法以及建立新的设计公式和方法而进行的试验;
- 3) 为新材料、新工艺、新结构的可行性而进行的试验;
- 4) 为产品的更新换代而进行的试验;
- 5) 为解决各种电机运行中存在的问题而进行的试验等等。

2. 工业试验

工业试验是由制造厂、产品测试检验站对电机产品按国家标准或技术条件规定的项目进行的试验, 一般分为型式试验和检查试验(出厂试验)。

1) 型式试验是按国家标准或技术条件规定的全部项目进行测试, 是对产品的全面考核, 以确定该产品是否可以投入生产。

2) 检查试验是按国家标准或技术条件规定的有关项目进行测试, 以检查该产品是否合格, 能否出厂。

电机测试都要贯彻国家标准, 这些方法在国家标准中做了详细规定。主要国家标准有:

- 1) GB755—2000 旋转电机 定额和性能
- 2) GB/T755.2—2003 旋转电机(牵引电机除外)确定损耗和效率的试验方法
- 3) GB18613—2002 中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价
- 4) GB10068—2000 轴中心高为56mm及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值
- 5) GB/T10069.1—1988 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声工程测定方法
- 6) GB/T10069.2—1988 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声简易测定方法
- 7) GB10069.3—1988 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声限值
- 8) GB/T1032—1985 三相异步电机试验方法
- 9) GB/T9651—1988 单相异步电动机试验方法
- 10) GB/T8916—1988 三相异步电动机负载率现场测试方法
- 11) GB/T12785—2002 潜水电泵 试验方法
- 12) GB/T1029—1993 三相同步电机试验方法
- 13) GB/T14481—1993 单相同步电机试验方法
- 14) GB/T13958—1992 无直流励磁绕组同步电动机试验方法
- 15) GB/T1311—1989 直流电机试验方法
- 16) JB/T9544—1999 小功率同步电动机 试验方法
- 17) JB/T9615.1—2000 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法

三、误差基本概念和测量误差分析

被测量的真实值就称为真值。在一定的时间和空间内,真值是一个客观存在的确定的数值。在测量过程中,即使选用准确度最高的测量器具、测量仪器和仪表,并且没有人为了的失误,要想测得真值也是不可能的。况且由于人类对客观事物认识的局限性、测量方法的不完善性以及测量工作中常有的各种失误等,更会不可避免地使测量结果与被测量的真值之间有差别,这种差别就称为测量误差。

1. 测量误差按性质和特点的分类

测量误差按其性质和特点,可分为系统误差、偶然误差(也称随机误差)和疏失误差三类,下面逐一说明。

(1) 系统误差

在相同的测量条件下,多次测量同一个量时,误差的数值(大小和符号)均保持不变或按某种确定性规律变化的误差称为系统误差。系统误差通常是由测量器具、测量仪器和仪表本身的误差产生的。此外,由于测量方法不完善以及测量者不正确的测量习惯等产生的测量误差也称为系统误差。系统误差的大小可以衡量测量数据与真值的偏离程度,即测量的准确度。系统误差越小,测量的结果就越准确。

由于系统误差具有一定的规律性,因此可以根据误差产生的原因,采取一定的措施,设法消除或加以修正。

(2) 偶然误差(随机误差)

在测量过程中,由于某些偶然因素引起的误差称为偶然误差。例如,电磁场的微变、温度的起伏、空气扰动、大地微震、测量人员的感觉器官无规律的微小变化等,这些互不相关

的独立因素产生的原因和规律无法掌握。因此，即使在完全相同的条件下进行多次测量，测量结果也不可能完全相同。如果测量结果完全相同，也只能说明仪器的灵敏度不够，不能说明偶然误差不存在。

大量测试结果表明，偶然误差是服从统计规律的。即误差相对小的出现概率大，而误差相对大的出现概率小，并且大小相等的正负误差出现的概率也基本相等。其概率分布曲线如图 0-1 所示。这种分布的曲线大体上呈正态分布。

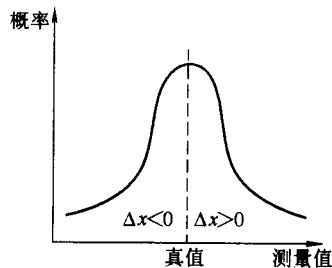


图 0-1 偶然误差的概率曲线

偶然误差说明了测量数据本身的离散程度，它可以反映测量的精密度。偶然误差越小，测量的精密度就越高。

显然，一次测量的偶然误差没有规律，但是多次测量产生的偶然误差服从统计规律。图 0-1 表明，如果测量的次数足够多，则偶然误差平均值的极限将趋于零。因此，如果想使测量结果有更大的可靠性，应把同一种测量重复做多次，取多次测量的平均值作为测量结果。

(3) 疏失误差

由于测量者的疏忽过失而造成的误差称为疏失误差。它的产生原因有两个：其一是实验者本身造成的；其二是由于测量条件造成的。在测量过程中，由于操作者的粗心或不正确操作，例如读数的错误、记录或计算的差错、操作方法不正确、测量方法不合理；或者使用有毛病的仪器仪表、出现不允许的干扰等都可能引起疏失误差的出现。就测量数值而言，疏失误差一般都明显地超过正常情况下的系统误差和偶然误差。凡确认含有疏失误差的测量数据常称其为“坏值”，不可采用，应该舍去。

(4) 三种误差的比较

上面介绍了三种测量误差。它们可归纳为：

测量误差	{	系统误差	测量误差（仪器仪表本身的误差）
			测量者误差（测量者不正确的测量习惯所引起的误差）
		偶然误差	（由某些偶然因素产生的误差，产生原因有时无法判定）
		疏失误差	（由测量者的疏忽失误造成的误差）

为了对这三种误差有一个更形象的认识，下面以打靶为例，将这三种误差对射击结果的影响画在图 0-2 中。其中图 0-2a 中的弹着点都密集于靶心，说明只有偶然误差而不存在系统误差；在靶角上的点是由疏失误差造成的。图 0-2b 中的弹着点偏于靶心的一边，这是由于存在系统误差的缘故。图 0-2c 中的弹着点的平均值也在靶心，这说明没有系统误差；但分布较分散，这说明其偶然误差比图 0-2a 的要大。

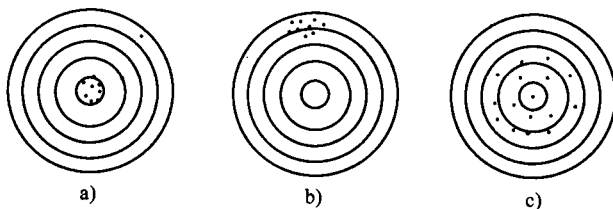


图 0-2 用打靶为例来说明三种误差

应当指出，在实际测量过程中，系统误差、偶然误差和疏失误差的划分并不是绝对的。在一定条件下的系统误差，在另外的条件下可能以偶然误差的形式出现，反之亦然。例如，

同是电源电压引起的误差，如果在测量过程中基本都偏高，则可视作系统误差；但如果在测量过程中有时高有时低，则应视为偶然误差。又例如，对于特别大的系统误差，有时也因为难以修正，或严重地改变了被测对象的工作状态，其相应的测量数据应作为“坏值”舍去。同样，对于离散性特别大、出现的次数又非常少的偶然误差，其相应的测量数据也可舍去。

上面说过，系统误差的大小可以衡量测量数据与真值的偏离程度，用以表征测量的准确度；而偶然误差说明了测量数据本身的离散程度，用它来表征测量的精密度。精密度的测量结果，其准确度不一定高；反之，准确度高的测量结果，其精密度不一定高。只有系统误差小，而测量数据的分布又集中的测量结果才是精密测量所追求的结果。作为某个测量质量综合指标的所谓“测量精度”，则是系统误差和偶然误差两者的综合。

2. 测量值的误差表示方法

上面从误差的性质和特点讨论了三种不同的误差。如果不讨论误差的性质和特点，而只讨论其具体的表示方式，则测量值的误差通常又可分为绝对误差和相对误差两种。

(1) 绝对误差

被测量的测得值 x (从测量仪器仪表直接测量得到或经过必要的计算得到的数据)，与其真值 A 之差，称为 x 的绝对误差。绝对误差用 Δx 表示，即

$$\Delta x = x - A \quad (0-1)$$

因为从测量的角度讲，真值是一个理想的概念，不可能真正获得。因此，式 (0-1) 中的真值 A 通常用准确测量的实际值 x_0 来代替，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (0-2)$$

式中 x_0 ——满足规定准确度，可以用来近似代替真值的测量值 (例如可以由高一等级标准测量仪器测量获得)。

一般情况下，式 (0-2) 表示的实际绝对误差通常就称作绝对误差，并用来计算被测量的绝对误差值。绝对误差具有大小、正负和量纲。

测量值及其误差常写成 $x \pm \Delta x$ 的形式。其中 x 是测量值； $\pm \Delta x$ 表示最大可能的绝对误差 (经常简称为绝对误差)。

在实际测量过程中，除了绝对误差外，还经常用到修正值的概念。它被定义为与绝对误差等值但符号相反，即

$$\epsilon = x_0 - x \quad (0-3)$$

知道了测量值 x 和修正值 ϵ ，由式 (0-3) 就可以求出被测量的实际值 x_0 。

例如用某电流表测量电流时，其读数为 10mA。该表在检定时给出 10.00mA 刻度处的修正值为 +0.03mA，则被测电流的实际值应为

$$i_0 = i + \epsilon = (10.00 + 0.03)\text{mA} = 10.03\text{mA}$$

(2) 相对误差

绝对误差只能表示某个测量值的近似程度。但是，两个大小不同的测量值，当它们的绝对误差相同时，准确程度并不相同。例如测量北京到上海的距离，如果绝对误差为 1m，则可以认为相当准确了；但如果测量飞机场跑道的长度时，绝对误差也是 1m，则认为准确度很差。为了更加符合习惯地衡量测量值的准确程度，引入了相对误差的概念。

绝对误差与被测量的真值之比 (用百分数表示)，称为测量值的相对误差。相对误差可

以表示为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (0-4)$$

式中 x_0 ——满足规定准确度的实际值。

一般情况下，相对误差是用式(0-4)中的后一个算式来计算的。相对误差是一个纯数的量，与被测量的单位无关。它是单位测量值的绝对误差，所以它符合人们对准确程度的一般习惯，也反映了误差的方向。在衡量测量结果的误差程度或评价测量结果的准确度时，一般都用相对误差来表示。

3. 仪表和仪器的误差及其准确度

绝对误差和相对误差是从误差的表示和测量的结果来反映某一测量值的误差情况，但不能用来评价测量仪表和测量仪器的准确度。例如，对于指针式仪表的某一量程来说，标度尺上各点的绝对误差尽管相近，但并不相同，某一个测量值的绝对误差并不能用来衡量整个仪表的准确度。另一方面，正因为各点的绝对误差相近，所以对于大小不同的测量值，其彼此间相对误差会差别很大，即相对误差更不能用来评价仪表的准确度。

当仪表在规定的正常条件下工作时，其示值的绝对误差 ΔA 与其量程 A_m (即满刻度值) 之比称为仪表的引用误差，用 γ_n 表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (0-5)$$

因为引用误差以量程 A_m 为比较对象，因此也称为基准误差。测量仪表在整个量程范围内所出现的最大引用误差，称为仪表的容许误差，即容许误差为

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta A_m}{A_m} \times 100\%$$

式中 ΔA_m ——所有可能的绝对误差中绝对值最大者。

根据以上定义，容许误差是单位测量值的最大可能绝对误差，它可以反映仪器仪表的准确度。通常，仪器仪表(包括量具)的技术说明书中标明的误差都是指容许误差。

对于指针式仪表，设容许误差的绝对值为

$$|\gamma_{mm}| = \frac{|\Delta A_m|}{A_m} \times 100\% \leq \alpha\% \quad (0-6)$$

式中 α ——仪表的准确度等级，它表明了仪表容许误差绝对值的大小。

指针式仪表的准确度等级与其容许误差的关系如表0-1所示。从表中可以看出，容许误差的绝对值 $\leq 0.1\%$ 的仪表即为0.1级表，容许误差的绝对值 $\leq 0.2\%$ 的仪表即为0.2级表等。由表可见，准确度等级的数值越小，容许误差越小，仪表的准确度越高。0.1级和0.2级仪表通常作为标准表用于校验其他仪表，实验室一般用0.5~1.0级仪表；工厂用作监视生产过程的仪表一般是1.0~5.0级。

表 0-1 仪表准确度等级

准确度等级指数 α	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
容许误差 (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

由式(0-6)可知，任一测量值的绝对误差的最大绝对值为

$$|\Delta A_m| \leq \alpha\% A_m \quad (0-7)$$

当仪表的指示值为 x 时, 可能产生的相对误差的最大绝对值为

$$|\gamma_m| = \frac{|\Delta A_m|}{x} \leq \alpha \% \frac{A_m}{x} \quad (0-8)$$

式中, A_m 为量程。

式 (0-8) 表明, 测量值 x 越接近于仪表的量程, 相对误差的绝对值越小。为了充分利用仪表的准确度, 应选择合适量程的仪表, 或选择仪表上合适的量程挡, 以使被测量的量值大于仪表量程的 $2/3$ 以上, 这时测量结果的相对误差约为 $(1 \sim 1.5)\alpha\%$ 。

例如: 用一个量程为 30mA 、准确度为 0.5 级的直流电流表, 测得某电路中的电流为 25.0mA , 则测量结果的最大绝对误差和最大相对误差计算如下:

由式 (0-7) 得测量值的最大绝对误差为

$$|\Delta A_m| \leq \alpha \% A_m = (0.5\% \times 30)\text{mA} = 0.15\text{mA}$$

由式 (0-8) 得可能出现的最大相对误差为

$$|\gamma_m| = \frac{|\Delta A_m|}{x} = \frac{0.15}{25.0} \times 100\% = 0.6\%$$

例如: 有两只毫安表, 量程分别为 100mA 、 50mA , 准确度均为 1.0 级。若用来测量 40mA 的电流, 则由式 (0-8) 可得, 量程分别为 100mA 、 50mA 的两只毫安表可能出现的最大相对误差分别为 $\pm 2.5\%$ 、 $\pm 1.25\%$ 。

例如: 电阻箱的准确度等级分为 0.01 、 0.02 、 0.05 、 0.1 、 0.2 、 0.5 六个级别, 在额定电流或额定电压范围内的最大绝对误差 ΔA_m 应符合

$$|\Delta A_m| = \alpha \% R + b \quad (0-9)$$

式中, α 为准确度等级; R 为电阻箱中使用的电阻值; b 为常数。 b 的取值为: 当 $\alpha = 0.01$ 、 0.02 、 0.05 时, $b = 0.002$; 当 $\alpha = 0.1$ 、 0.2 、 0.5 时, $b = 0.005$ 。

如果电阻箱的准确度 $\alpha = 0.2$, $b = 0.005$, 实验中使用的电阻箱的电阻 $R = 15.85\text{k}\Omega$, 则由式 (0-9) 得最大绝对误差 $\Delta A_m = \pm 31.71\Omega$ 。

在电子测量仪器中, 容许误差有时又分为基本误差和附加误差两种。仪表在确定准确度等级时所规定的温度、湿度等条件称为定标条件。基本误差是指仪器在定标条件下存在的容许误差。附加误差是指定标条件的一项或几项发生变化时, 仪器附加产生的最大误差。

4. 系统误差的消除和计算

由上可知, 对测量准确度影响最大的是系统误差, 因为疏失误差一般都明显地超过正常情况下的误差, 作为“坏值”, 可不采用而舍去; 对于偶然误差而言, 因为多次测量后, 它服从统计规律, 因此可通过统计学方法来估计和消除偶然误差的影响, 例如可以用滤波的方法滤除原始数据中的噪声, 最简单的处理方法是把同一种测量重复做多次, 取多次测量的平均值作为测量结果。

(1) 系统误差的消除

对于任何一个测量过程, 都应当根据测量要求对测量仪器、仪表和测试条件进行全面研究和分析。首要的任务是发现系统误差, 进行系统误差分析, 以将系统误差消除或减小到与测量误差要求相适应的程度, 这样就可以认为消除了系统误差的影响。

1) 消除由测量仪器和仪表所引起的误差: 设计用于测量的仪器 (包括量具)、仪表的依据是它们的技术条件。在制造过程中产生的误差是基本容许误差, 属于系统误差。基本容许

误差决定了仪器、仪表的准确度等级。在测量过程中，要根据测量准确度的要求选用不同准确度等级的仪器、仪表。

若仪器、仪表的使用条件偏离其出厂时规定的标准条件，则还将产生附加误差。附加误差与仪表的安装、调整及其使用环境有关，在测量前要进行认真的观察研究，针对具体问题予以解决或估量其影响的大小。

精密仪器、仪表还可使用校正公式、曲线、表格或修正值。例如，某个仪表如果已知绝对误差 Δ 等于测量值 x 与准确值 x_0 的差值，即 $\Delta = x - x_0$ ，则准确值可以用下式计算：

$$x_0 = x - \Delta = x + \epsilon$$

式中 ϵ ——误差修正值； $\epsilon = -\Delta$ 。

检查仪器、仪表是否在检定周期之内也是一项重要的工作，如超出检定周期，则应该进行检定。

2) 消除由测量方法或理论分析所引起的误差：在测量前没有充分考虑，但在测量中参与作用的一些因素所导致的误差，经常是由于理论分析不全面或者是由于采用了近似公式所引起的。例如，测量电路与被测对象之间的相互影响，测量线路中的漏电、引线及接触电阻，平衡电路中的示零指示器的误差，理想运算放大器与实际放大器之间的差异，数字与模拟量之间的转换，计算机的舍入误差等，都是产生误差的原因。这些情况应尽量设法避免。但由于这些因素很多，所以有时并不能完全消除，而只能估计其影响。

3) 消除由测量人员所引起的误差：由实验者的反应速度和固有习惯等生理特点所引起的误差属于人员误差。如记录一个信号时，观测者有超前或滞后读数的倾向，而且这种倾向因人而异，这必然导致误差。又如，当使用带有耳机的交流电桥测量电路参数时，实验者听觉灵敏度不同，也会导致不同结果。这些由实验者个人生理特点引起的系统误差，将反映到测量结果中去。目前，数字化仪器和仪表已经很普及，故由听觉、视觉差异所引起的这项误差也就随之消失。尽管如此，但由于多数实验还是靠人来直接操作，操作者带来的温度、静电等的影响有时也要考虑。

(2) 系统误差的计算

工程上的一般测量，其误差主要指系统误差。因为偶然误差对整个测量过程影响较小，一般可忽略不计。

1) 直接测量的误差计算：在直接测量的情况下，主要的系统误差即是所使用的仪器和仪表本身的容许误差。这时的误差一般可以根据测量仪表本身的准确度等级计算。例如仪表测量时的读数为 x ，仪表量程为 A_m ，仪表的准确度等级为 α ，则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \pm \alpha \% \frac{A_m}{x} \quad (0-10)$$

若测量条件不满足仪表的正常工作条件，则还须考虑附加误差。这时测量结果的最大误差应是仪表的基本容许误差和附加误差两者之和。关于附加误差的计算方法可查阅国家仪器仪表标准的有关规定。

2) 间接测量的误差计算：由于间接测量需要通过一次或多次测量，然后根据公式或物理定律计算出被测量的结果。间接测量时，每次测量的误差都将对最终的计算结果产生影响，设间接测量的被测量 y 与直接测量的各个量 x_1, x_2, \dots, x_n 之间的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (0-11)$$

令 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别表示直接测量的各个量 x_1, x_2, \dots, x_n 在测量时产生的绝对误差, Δy 表示 y 的间接测量的绝对误差。则由式 (0-11) 有

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \quad (0-12)$$

将式 (0-12) 的右边按泰勒级数展开, 并略去高阶导数项, 得

$$f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \approx f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (0-13)$$

将式 (0-11) 和式 (0-13) 同时代入式 (0-12), 得

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (0-14)$$

$$\text{令} \quad \Delta_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

它表示各直接被测量 x_1, x_2, \dots, x_n 的误差在间接测量结果中所引起的绝对误差。由式 (0-14) 有

$$\Delta y = \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad (0-15)$$

在最不利的条件下, 式 (0-15) 结果中的各项误差都是同号。因此, 可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta y_m = \pm \sum_{k=1}^n |\Delta_k| \quad (0-16)$$

最大相对误差为

$$y_m = \frac{\Delta y_m}{y} \quad (0-17)$$

下面以两种常见的函数为例, 说明间接测量误差的具体计算方法。

① 间接被测量 y 与各直接被测量 x_1, x_2, \dots, x_n 之间的函数关系为相加关系, 即

$$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

则

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n$$

最大绝对误差为

$$\Delta y_m = \pm \sum_{k=1}^n |\Delta x_k|$$

最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta y_m}{y} = \frac{\sum_{k=1}^n |\Delta x_k|}{x_1 + x_2 + \dots + x_n}$$

例如: 用电流表测得 $i_1 = 35.50\text{mA}$, 由准确度等级可算得绝对误差为 $\Delta i_1 = \pm 0.86\text{mA}$ 。用另一块电流表测得 $i_2 = 21.52\text{mA}$, 也可算得其绝对误差为 $\Delta i_2 = \pm 0.31\text{mA}$ 。若 $i = i_1 + i_2$, 试求 i 可能的最大绝对误差和最大相对误差。

由式 (0-16)、式 (0-17) 得最大绝对误差和最大相对误差分别为

$$\Delta i_m = \pm (|\Delta i_1| + |\Delta i_2|) = \pm (0.86 + 0.31)\text{mA} = \pm 1.17\text{mA}$$