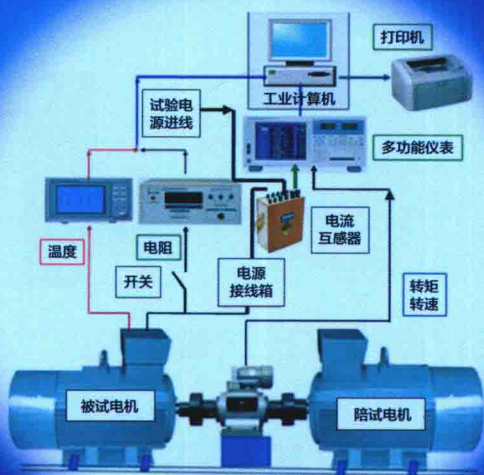


# 电机现代 测试技术

第2版

武建文 李德成 等编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 电机现代测试技术

第2版

武建文 李德成 等编著



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。

本书最适合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,也可作为电机检测工程技术人员参考资料和电机试验人员的自学和培训教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机现代测试技术/武建文等编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2015.10

ISBN 978-7-111-51462-6

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第203751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:刘星宁 责任编辑:刘星宁

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:马精明 责任印制:李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2015年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·507千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-51462-6

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

## 第2版前言

本书第1版于2005年11月开始发行，到目前已经过去整整10年了。10年中本书共重印4次，说明本书始终受到相关读者的关注，体现了它的使用价值。

10年来，我国电机行业在试验设备和试验技术方面，有了飞跃式的发展，最突出的一点是在很多方面应用了数字技术、微机技术，甚至于网络技术。有些技术——例如直流母线内回馈变频电源和用以太网传输测量数据等，堪称是革命性的。

在试验标准方面，大力采用国际和世界发达国家的标准，其中最具代表性的，也是本书所用的两个主要标准 GB 755—2008《旋转电机 定额和性能》和 GB/T 25442—2010《旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法》则分别等同采用了国际电工委员会（IEC）的同名标准 IEC 60034-1: 2004 和 IEC 60034-2-1: 2007；另一个主要标准 GB/T 1032—2012《三相异步电动机试验方法》则代替了曾经代替1985版的2005版，其中更改和新增的内容均来自 IEC 60034 和美国 IEEE 112 同类标准。这些变化体现了我国电机行业标准的国际化和先进性。

本书中所涉及的其他主要标准，例如同步电机和直流电机试验方法、噪声和振动测试方法和限值、安全通用要求、绕组匝间耐冲击电压试验方法等，也都进行了修订或换版升级（有些已换版2次，有些从行业标准升级为国家标准）。当然，其中的内容也有较大的变化。

了解了上述情况后，本书再版的意图则不言而喻了。

这次再版，仍沿用原版的格局，更新和增添了目前现行标准（截止到2015年8月）中与第1版所用标准相比不同或增加的内容，删除了部分已不常用（或者停产的）试验设备资料，增加了部分先进的试验设备资料。

本版除第1版作者外，才家刚高级工程师负责了大部分修订工作。

由于作者的技术水平和经验有限，书中难免有不准确甚至错误之处，望广大读者批评指正。

作者

# 第1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

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

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 .....	12
第一节 电量测量仪器仪表的种类 .....	12
第二节 电压和电流的测量 .....	14
一、指示式电压表和电流表 .....	14
二、扩大量程装置 .....	15
三、电压表和电流表的选择和使用 .....	17
四、电子测量仪器 .....	19
五、数字测量仪表 .....	20
第三节 功率的测量 .....	21
一、直流功率的测量 .....	21
二、交流功率的测量 .....	21
三、功率表的选择及使用 .....	23
四、指针式功率表不同测量接线方法所引起误差的修正 .....	23
五、数字功率表 .....	24
第四节 频率和相位的测量 .....	24
一、频率表和相位表 .....	24
二、电子示波器测量频率和相位 .....	25
三、频率和相位的数字测量 .....	25
第五节 电路参数的测量 .....	28
一、电阻的测量 .....	28
二、电感和电容的测量 .....	31
第六节 介电强度试验 .....	33
一、交流耐压试验 .....	33
二、匝间绝缘冲击耐压试验 .....	33
三、耐直流电压和泄漏电流试验 .....	35

第二章 电机中非电量的测量 .....	36
第一节 转速的测量 .....	36
一、常用转速表 .....	36
二、光电数字测速 .....	38
三、频闪测量转速 .....	41
四、激光测量转速 .....	42
五、电机瞬时转速的测量 .....	42
六、转差率的测量 .....	44
七、电动机离心开关断开转速的测量 .....	45
第二节 转矩的测量 .....	47
一、转矩测量原理 .....	48
二、转矩测量仪器的分类 .....	50
三、传递类转矩测量装置 .....	50
四、平衡类转矩测量装置 .....	58
五、能量转换类转矩测量法——校准直流电机法 .....	66
第三节 温度、温升的测量 .....	67
一、温升 .....	67
二、基本测温方法 .....	67
三、红外测温 .....	72
四、光纤测温 .....	74
五、交流定子绕组带电测温 .....	76
六、交流电动机的热试验方法 .....	79
第四节 电机振动的测定 .....	84
一、使用标准 .....	84
二、测量仪器 .....	84
三、测量辅助装置及安装要求 .....	87
四、振动测定方法 .....	90
五、测量结果的确定 .....	90
六、振动限值 .....	91
七、轴振动振幅与速度有效值的关系 .....	92
第五节 电机噪声的测定 .....	93
一、电机噪声的物理度量 .....	93
二、噪声测量仪器的基本原理 .....	96
三、电机噪声的测量方法 .....	101
四、试验结果的确定方法 .....	104

五、旋转电机噪声限值	106	一、正反转发电机法	147
六、电机噪声方向性指数的确定	108	二、正反转电动机法	147
七、电机噪声的分析与判别	109	三、感应法	147
<b>第三章 电机中磁量的测量</b>	113	第二节 无火花换向区域的测定	148
第一节 测量分类	113	一、换向电流馈电方式	148
一、磁场参数的测量	113	二、试验步骤	148
二、磁性材料磁性能的测量	113	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	149
第二节 霍尔效应法	114	一、电压、电流纹波因数的计算	149
一、基本原理	114	二、电流波形因数的计算	151
二、特斯拉计(高斯计)	115	第四节 直流电机绕组电感的测量	151
第三节 感应法	117	一、工频交流法测定	151
第四节 冲击法	120	二、整流电源供电时电枢电感的测量	152
一、冲击检流计法	120	三、主磁路时间常数的测定	153
二、磁通计法	122	四、励磁绕组电感的测定	153
三、数字式磁通计	123	第五节 整流电源供电时电动机的轴电压测定	154
第五节 磁性材料的测量	124	<b>第七章 同步电机的参数测定</b>	155
一、直流磁特性的测量	125	第一节 同步电机的基本方程式	155
二、交流磁特性的测量	126	一、隐极同步电机的基本方程式	155
<b>第四章 谐波的测量</b>	129	二、凸极同步电机的基本方程式	156
第一节 谐波分析	129	第二节 同步电机的不对称运行	158
一、谐波产生的原因	129	一、正序阻抗和等效电路	158
二、谐波的危害	130	二、负序阻抗和等效电路	159
三、谐波的傅里叶级数	130	三、零序阻抗和等效电路	160
四、谐波畸变的度量方法	132	第三节 同步电机的三相突然短路	160
第二节 谐波的测量方法	136	一、无阻尼绕组同步电机三相突然短路时的物理过程	160
一、谐波的时域测量	136	二、有阻尼绕组同步电机三相突然短路时的物理过程	162
二、谐波的频域测量	138	三、同步电机中各电抗对应的等效电路	163
第三节 非正弦电量的测量	139	四、突然短路电流及其衰减时间常数	164
<b>第二篇 电机的参数测定</b>		第四节 稳态参数的测定	165
<b>第五章 转动惯量和时间常数测量</b>	141	一、同步电抗的测定	165
第一节 转动惯量的测量	141	二、电枢漏抗的测定	169
一、悬挂转子摆动法	141	三、零序电抗 $x_0$ 的测定	170
二、辅助摆锤法(钟摆法)	142	四、负序电抗 $x_-$ 的测定	171
三、空载减速法	143	第五节 瞬态参数的测定	173
四、重物自由降落法	144	一、静测法测定超瞬态电抗 $x_d''$ 、 $x_q''$	173
第二节 时间常数的测量	144		
一、电动机发电机对拖法	145		
二、光电测速法	146		
<b>第六章 直流电机的参数测定</b>	147		
第一节 电刷中性线位置的测定	147		

二、三相突然短路法测定 $x_d'$ 、 $x_d''$ 及 $T_d'$ 、 $T_d''$ 、 $T_d$ .....	175	第十章 电机的性能试验 .....	206
三、电压恢复法测定 $x_d'$ 、 $x_d''$ .....	176	第一节 电机试验常用交流电源 .....	206
第六节 同步电机参数测定的总结 .....	177	一、三相感应调压器 .....	206
第七节 三相永磁同步电动机试验方法 .....	179	二、自耦调压器 .....	210
一、试验方法标准和试验项目 .....	179	三、交流单频率发电机组 .....	212
二、试验方法及相关要求 .....	180	四、交流变频发电机组 .....	213
<b>第八章 异步电动机的参数测定</b> .....	183	五、变频器——交流变频电源 .....	214
第一节 绕组直流电阻的测定 .....	183	六、对三相交流电源的质量要求 .....	216
一、绕组实际冷状态的定义和冷态温度的确定方法 .....	183	第二节 电机试验常用直流电源 .....	218
二、绕组冷态直流电阻的测定方法 .....	183	一、直流发电机组电源 .....	218
三、绕组冷态直流电阻的测定结果计算 .....	184	二、整流电源 .....	219
四、不同温度时导体直流电阻的换算 .....	185	三、对直流电源的质量要求 .....	223
第二节 堵转特性试验 .....	185	第三节 电动机的试验负载 .....	223
一、试验设备 .....	186	一、由交流异步电动机转化成的交流发电机负载 .....	224
二、试验步骤及注意事项 .....	189	二、磁粉制动器负载 .....	225
三、试验结果的计算 .....	190	三、直流发电机负载 .....	225
四、采用等效电路法或圆图计算法求取工作特性的附加堵转试验 .....	191	四、由各种测功机组成的负载 .....	226
五、求取电动机的电路参数 .....	192	五、“分析过的直流电机”负载 .....	230
第三节 空载特性试验 .....	193	第四节 发电机的试验负载 .....	230
一、试验过程 .....	194	一、纯电阻负载 .....	230
二、特性曲线和有关参数的求取 .....	195	二、纯电感负载 .....	231
<b>第三篇 电机的性能测试</b>		三、回馈电网负载 .....	232
<b>第九章 电机中杂散损耗的测定</b> .....	198	四、试验专用变频内回馈系统 .....	234
第一节 三相异步电动机杂散损耗的测定试验和有关规定 .....	198	第五节 电机的效率测定 .....	236
一、杂散损耗的定义、试验目的 .....	198	一、效率确定方法的分类 .....	236
二、基频杂散损耗的测定方法 .....	198	二、A法和B法负载试验过程 .....	237
三、高频杂散损耗的实测试验方法 .....	199	三、A法和B法效率的计算过程和相关规定 .....	240
四、间接求取负载杂散损耗的方法——剩余损耗线性回归法 .....	202	四、绕组规定温度和工作温度的确定方法 .....	243
五、推荐值法 .....	204	五、用转矩传感器直连时转矩显示值的修正 .....	244
第二节 静止电力变流器供电直流电动机负载杂散损耗的测定 .....	205	六、降低电压负载法(G和G1法)测定效率 .....	245
一、电动机纹波损耗的测定 .....	205	七、等效电路法(F和F1法)效率试验和计算 .....	247
二、效率的计算 .....	205	八、圆图计算法(H法)试验和求取效率 .....	249
		九、变频调速电动机效率试验 .....	252
		第六节 电机工作特性的测取 .....	257
		一、直接负载法求取工作特性 .....	257
		二、由参数计算出工作特性 .....	258



第七节 异步电动机的圆图	260	原理	287
一、异步电动机的简化圆图	260	二、交流电压、电流有效值变送器	
二、由空载和短路试验数据作简化圆图	261	原理	290
三、由圆图求取异步电动机的运行性能	262	三、交流功率变送器原理	293
第八节 用50Hz电源试验60Hz异步电动机	265	第三节 数据采样系统	296
一、试验方法	265	一、采样开关	297
二、试验数据处理	265	二、采样-保持电路	298
第十一章 电机转矩特性的测取	268	三、采样多路器	299
第一节 异步电动机转矩-转速曲线的测定	268	四、采样控制器	300
一、动态微分法	268	第四节 A-D转换器	301
二、稳态法	272	一、逐次逼近型电压A-D转换器	302
第二节 三相异步电动机最小、最大转矩的实测试验	275	二、双积分型电压A-D转换器	303
一、实测最大转矩试验	275	三、A-D转换器的应用	304
二、最大转矩的圆图算法	278	第五节 试验数据的输出设备	305
三、最小转矩测定方法	281	一、打印机	305
第三节 同步电机功角的测量	281	二、函数记录仪(X-Y记录仪)	305
一、闪光灯法	281	三、绘图机	307
二、相位表法	281	第六节 曲线拟合	308
三、数字式功角测量仪	282	第七节 试验数据的微机处理	310
第十二章 电机性能的自动测试	285	一、数据转换	310
第一节 概述	285	二、随机误差消除和坏值剔除	311
第二节 交直流电量变送器	287	三、试验结果输出和数据保存	312
一、交流电压、电流平均值变送器		第八节 电动机出厂试验的自动测试系统	313
		第九节 电动机特性自动测试系统	315
		一、电动机自动测试系统的硬件	315
		二、电动机自动测试系统的软件	315
		参考文献	319

# 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，简单地说，测量就是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); 三相功率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。在用两功率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功率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。

### 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) GB 755—2008 旋转电机 定额和性能
- 2) GB 14711—2013 中小型旋转电机通用安全要求
- 3) GB 12350—2009 小功率电动机的安全要求
- 4) GB/T 25442—2010 旋转电机(牵引电机除外) 确定损耗和效率的试验方法
- 5) GB 18613—2012 中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价
- 6) GB 10068—2008 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
- 7) GB/T 10069.1—2006 旋转电机噪声测定方法及限值 第 1 部分: 旋转电机噪声测定方法
- 8) GB 10069.3—2008 旋转电机噪声测定方法及限值 第 3 部分: 噪声限值
- 9) GB/T 1032—2012 三相异步电动机试验方法
- 10) GB/T 22670—2008 变频器供电三相笼型感应电动机试验方法
- 11) GB/T 8916—2008 三相异步电动机负载率现场测试方法
- 12) GB/T 9651—2008 单相异步电动机试验方法
- 13) GB/T 1029—2005 三相同步电机试验方法
- 14) GB/T 22669—2008 三相永磁同步电动机试验方法
- 15) JB/T 22672—2008 小功率同步电动机试验方法
- 16) GB/T 14481—2008 单相同步电机试验方法
- 17) GB/T 13958—2008 无直流励磁绕组同步电动机试验方法
- 18) GB/T 1311—2008 直流电机试验方法
- 19) JB/T 22719.1—2008 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 第 1 部分: 试验方法
- 20) JB/T 22719.2—2008 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 第 2 部分: 试验限值
- 21) GB/T 12785—2002 潜水电泵 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。

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。

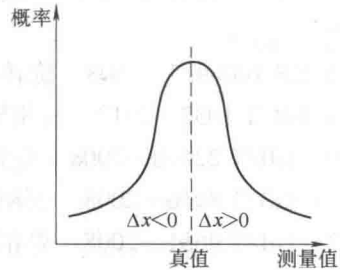


图 0-1 偶然误差的概率曲线

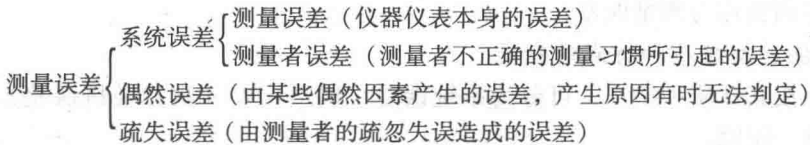
显然, 一次测量的偶然误差没有规律, 但是多次测量产生的偶然误差服从统计规律。图 0-1 表明, 如果测量的次数足够多, 则偶然误差平均值的极限将趋于零。因此, 如果想使测量结果有更大的可靠性, 应把同一种测量重复做多次, 取多次测量的平均值作为测量结果。

### (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造成疏失误差的出现。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:



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。

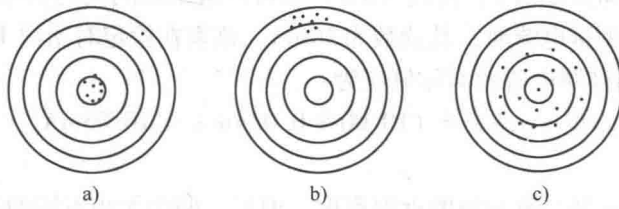


图 0-2 用打靶为例来说明三种误差

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,则可视为系统误差;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。精密度高的测量结果,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  $\Delta x$  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

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



知道了测量值  $x$  和修正值  $\varepsilon$ , 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

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

## (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  $\Delta A$  与其量程  $A_m$  (即满刻度值) 之比称为仪表的引用误差, 用  $\gamma_n$  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

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

式中  $\Delta A_m$ ——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

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

式中  $\alpha$ ——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 $\alpha$	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
容许误差 (%)	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$	$\pm 2.5$	$\pm 5.0$

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  $A_m$ ——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  $\Delta A_m$  应符合

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

式中  $\alpha$ ——准确度等级;

$R$ ——电阻箱中使用的电阻值;

$b$ ——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 $\Delta$ 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:

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

式中  $\varepsilon$ ——误差修正值,  $\varepsilon = -\Delta$ 。

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,