

高等学校理工科规划教材

动力机械测试技术

杨凤珍 编著

大连理工大学出版社

© 杨凤珍 图图缘

图书在版编目 (CIP)数据

动力机械测试技术 杨凤珍编著 大连 :大连理工大学出版社,
图图缘原

陈书 杨凤珍 图图缘

I 援助... II 援助... III 援助力机械—高等学校—教材 IV 援助图图缘

中国版本图书馆 援助数据核字 (图图缘)第 图图缘号

大连理工大学出版社出版

地址 大连市凌水河 邮政编码 图图缘

电话 图图缘 图图缘 图图缘 传真 图图缘 图图缘 图图缘 邮购 图图缘 图图缘 图图缘

图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘 图图缘

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸 图图缘 图图缘 图图缘 印张 图图缘 字数 图图缘千字

印数 图图缘 图图缘

图图缘年 图图缘月 第 图图缘版

图图缘年 图图缘月 第 图图缘次印刷

责任编辑 吴孝东

责任校对 高继巍

封面设计 宋 蕾

定 价 图图缘元

前 言

随着科学技术的迅速发展,特别是计算机技术、电子技术、传感技术与信息技术的不断更新,测试技术的水平也日新月异;新技术、新材料的不断发掘,新仪器、新测试方法的不断涌现,使得测试技术在科研、生产和国防事业中的作用越来越重要。相应的教材的更新也迫在眉睫,让学生懂得测试技术的基本原理,熟悉现代流行的测试技术手段,了解测试技术最新的发展趋势,是高等教育工作者义不容辞的责任。

动力机械广泛应用于石油、机械、化工、发电、钢铁冶炼、制冷、航空、舰船装置等占国民经济建设主导地位的各个领域,凡是有动力机械工作的地方,都要对其进行检测和监测,动力机械测试技术与动力机械的研究、发展更是相辅相成,它已成为相关专业理工科学生必须掌握的专业课程。

《动力机械测试技术》课程,是一门综合性与实践性很强的课程,教学内容、教学形式都应适合科学技术的飞速发展,从而加强对学生的创新思维、实践及工程能力的培养,以适应 21 世纪对人才培养的需求。

本书主要介绍动力机械测试技术的一般原理和常用方法,分为两部分,共计 11 章。第一部分(1~3 章),介绍测试系统的基本特性、误差与实验数据处理及试验方案设计等内容;第二部分(4~11 章)着重介绍各主要参数:温度、压力、流速、流量、

转速与功率、振动、应力和噪声等的测试原理与方法。介绍实验方法时以讲述基本原理为主,同时简要介绍最新的实验技术与实验方法,使学生能从中了解现代测试技术发展的趋势。书中内容较为系统全面,既有原理又有应用,深入浅出,通俗易懂,较少涉及与原理无关的数学推导,便于学生自学。

感谢大连理工大学动力工程系许锋教授主审了全书内容;感谢动力工程系黄钟岳教授对本书主要内容的编写提出了指导性建议;感谢热力涡轮机教研室王晓放教授、谢蓉副教授、王巍副教授、冀春俊副教授、孙涛博士等对本书编写工作的关心、支持和帮助;感谢硕士研究生李国庆、杨小贺校对了全书内容。

编写本书过程中参考了许多校、院、所等编写的教材及文献资料,在此也一并致谢。

由于本书内容涉及面广,编者水平有限,错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2005年2月

目 录

第 1 章 测试系统概述	1
1.1 测试系统简介	1
1.1.1 测试系统的组成	1
1.1.2 测量环节的功能	1
1.1.3 举例	3
1.2 测量的基础知识	4
1.2.1 测量分类	4
1.2.2 测量误差	5
1.3 测量系统分析	8
1.3.1 静态特性	8
1.3.2 动态特性	11
1.4 计算机数据采集系统简介	18
1.4.1 数据采集系统的基本组成	19
1.4.2 数据采集系统的结构形式	20
1.5 虚拟仪器	22
1.5.1 虚拟仪器概述	22
1.5.2 虚拟仪器的硬件结构	22
1.5.3 虚拟仪器的软件构成	23
1.5.4 虚拟仪器的应用	24
第 2 章 误差理论与数据处理	25
2.1 随机误差	25
2.1.1 随机误差的正态分布	25
2.1.2 正态分布的特性	26
2.1.3 随机误差的计算	26
2.2 正态分布的应用	28
2.2.1 正态分布用于阐述各种测量误差	28
2.2.2 正态分布与均方根误差的关系	28
2.2.3 正态分布用于估计数据分布的极限值	29
2.2.4 正态分布用于剔除可疑数据	29
2.3 测量结果的数据处理	31
2.3.1 直接测量中的误差处理	31
2.3.2 间接测量中的误差处理	33

2.4	试验数据的获取与整理	37
2.4.1	有效数字	37
2.4.2	试验数据的图示法	37
2.4.3	回归分析与经验公式	38
第3章	试验方案设计与论文书写	45
3.1	试验方案设计举例	45
3.1.1	问题的提出(试验目的)	45
3.1.2	试验方案的设计	46
3.1.3	试验方案的调整	48
3.2	测量信号的处理与干扰抑制方法	48
3.2.1	阻抗匹配电路	48
3.2.2	有源滤波器	49
3.2.3	测量电路的噪声与抑制	51
3.3	科技论文的书写	53
3.3.1	科技论文的表述	53
3.3.2	科技论文的分类	54
3.3.3	科技论文的一般格式	55
第4章	温度测量	58
4.1	概述	58
4.1.1	温标	58
4.1.2	测温方法及特点	59
4.2	接触式测温	60
4.2.1	膨胀式温度计	60
4.2.2	热电偶测温	61
4.2.3	热电阻测温	68
4.2.4	热敏电阻	70
4.2.5	高速流动气体的温度测量	70
4.2.6	测温元件的安装与温度测量误差	74
4.3	非接触式测温	76
4.3.1	热辐射的基本概念	76
4.3.2	辐射式测温仪表	78
4.3.3	红外测温仪表	81
4.3.4	红外热像仪	82
第5章	压力测量	85
5.1	基本概念	85
5.1.1	压力的表示方法	85
5.1.2	压力单位	85
5.1.3	压力的测量方法	85
5.2	液柱式测压仪表	86

5.2.1	U型管压力计	86
5.2.2	单管压力计	86
5.2.3	斜管微压计	87
5.2.4	液柱式压力计的测量误差	87
5.3	弹性测压仪表	88
5.3.1	弹簧管压力计	88
5.3.2	膜式压力计	88
5.3.3	弹性压力计的误差	89
5.4	测压传感器	90
5.4.1	压阻式压力传感器	90
5.4.2	压电式压力传感器	91
5.4.3	电容式差压传感器	93
5.5	气流压力的测量	93
5.5.1	基本概念	94
5.5.2	总压测量	95
5.5.3	静压测量	99
5.6	多点压力测量系统	102
5.6.1	多路传输器系统	102
5.6.2	机械式压力扫描阀	102
5.7	测压仪表的标定、安装和使用	103
5.7.1	校验	103
5.7.2	安装和使用	106
第6章	流速测量	107
6.1	皮托管测速	107
6.1.1	皮托管的结构特点	107
6.1.2	皮托管的测速原理	107
6.1.3	气流速度的测量	109
6.1.4	平面气流速度的测量	110
6.1.5	空间气流速度的测量	115
6.1.6	皮托管的标定	115
6.2	热线风速仪测速	116
6.2.1	基本构造	117
6.2.2	工作原理	117
6.2.3	平面气流的测量	118
6.3	激光多普勒流速仪测速	119
6.3.1	工作原理	119
6.3.2	激光多普勒流速仪的特点	121

6.4	粒子图像测速技术	121
第7章	流量测量	124
7.1	流量及其测量仪表概述	124
7.1.1	基本概念	124
7.1.2	流量计的类型	125
7.1.3	流量计的选用原则	125
7.2	流速法测流量	126
7.2.1	管道内速度分布	127
7.2.2	确定截面流速分布的方法	127
7.3	差压式流量计	129
7.3.1	测量原理与流量方程	129
7.3.2	标准节流装置	130
7.3.3	流量方程中有关系数的确定	131
7.3.4	差压式流量计测量结果的修正	132
7.3.5	进口流量管	133
7.4	转子流量计	135
7.4.1	工作原理	135
7.4.2	流量方程	136
7.4.3	转子流量计的量程选择和流量读数修正	137
7.5	涡轮流量计	138
7.5.1	构造与原理	138
7.5.2	涡轮流量计的特性及主要影响因素	139
7.6	容积式流量计	142
7.6.1	腰轮流量计	142
7.6.2	刮板流量计	143
7.6.3	容积流量计性能分析	143
7.7	超声波流量计	144
7.7.1	基本理论概述	144
7.7.2	时间差法超声波流量计	145
第8章	转速、转矩与功率测量	147
8.1	转速测量	147
8.1.1	转速传感器	147
8.1.2	转速测量方法	149
8.1.3	瞬时转速的测量	150
8.2	转矩测量	151
8.2.1	转矩的测量方法	151
8.2.2	常用的转矩测量仪器	152
8.3	功率测量	154
8.3.1	概述	154

8.3.2	电力测功机	155
8.3.3	水力测功机	159
8.3.4	磁粉测功机	160
第9章	振动测量	161
9.1	概 述	161
9.1.1	幅值表示法	161
9.1.2	频率表示法	163
9.1.3	相位表示法	164
9.1.4	振动信号分析方法	164
9.2	测振系统及其分类	165
9.2.1	振动测量的基本环节	165
9.2.2	测振仪	166
9.2.3	激振器	168
9.2.4	振动测量的实施	170
9.3	叶片、叶轮振动的测量.....	172
9.3.1	叶片振动测量	172
9.3.2	叶片振动疲劳试验	177
9.3.3	叶轮振动测量	177
9.4	旋转机械振动测量	178
9.4.1	旋转机械的常见振动	178
9.4.2	测量的基本参数	179
9.4.3	转子振动的测量	180
第10章	噪声测量	183
10.1	噪声测量中的声学概念.....	183
10.1.1	声场.....	183
10.1.2	声压级.....	183
10.1.3	声功率级.....	184
10.1.4	噪声级的计算.....	184
10.1.5	噪声的频谱.....	187
10.2	噪声的评价.....	189
10.2.1	响度级与等响曲线.....	189
10.2.2	计权声级.....	190
10.2.3	统计声级.....	191
10.2.4	等效声级.....	191
10.3	噪声测量仪器.....	191
10.3.1	声级计.....	191
10.3.2	频率分析仪.....	192
10.4	噪声测量方法与测量环境.....	193
10.4.1	测量方法的分类与选择.....	193

10.4.2	测量环境·····	194
10.4.3	测量表面和测点布置·····	195
10.4.4	测量结果处理·····	196
10.5	风机噪声分析·····	198
10.5.1	风机的空气动力性噪声产生的机理·····	198
10.5.2	风机噪声频谱特性分类·····	199
10.5.3	风机噪声特性的估算·····	199
10.6	噪声的化害为利·····	200
第 11 章	应力测量与分析 ·····	201
11.1	实验应力分析的电测法·····	201
11.1.1	电测法应力测量的特点·····	201
11.1.2	电阻应变片·····	201
11.1.3	应力状态与应力计算·····	203
11.1.4	影响测量的因素及其消除方法·····	205
11.1.5	电阻应变仪·····	207
11.2	实验应力分析的光测法·····	208
11.2.1	相关知识·····	208
11.2.2	光弹性仪·····	210
11.2.3	平面应力模型在偏振光场中的光学效应·····	211
11.2.4	典型图案·····	218
11.2.5	光弹性贴片法·····	219
参考文献	·····	221

第 1 章 测试系统概述

测试技术对自然科学和工程技术发展的重要性,越来越为人们所认识和重视,并已成为科学研究不可缺少的重要手段。许多新型传感技术的相继出现,加上智能化的二次仪表和计算机的应用,对动力机械从宏观过程的研究深入到微观、瞬变过程的研究,起到了极其重要的作用。正是由于对动力机械各种过程内在规律的深入研究,对过去的传统观念做出了新的解释,并有新的发现,从而大大促进了学科的发展。

在当前这个科学技术空前发展的信息社会,测试技术的发展与科学技术的进步是相辅相成的。测试技术也由于新材料、微电子技术和计算机技术的不断进步而不断更新。随着科学技术的进步,测试技术已逐步成为一门完整、独立的学科,是与传感技术、电子及计算机技术、应用数学及控制理论等相互交叉的学科。同时,它也是一门实践性很强的学科,我们不仅要了解基本原理,还要学会灵活应用。这一学科的发展,无疑将会大大促进动力机械工程领域科学研究和应用技术的发展。

1.1 测试系统简介

在科学研究与新产品的研制过程中,为了掌握事物的规律性,必须测试许多有关参数;在工业生产过程中,为了监视和控制生产过程,使设备能在正常或最佳状态下运行,也要检测各种相关的参数。那么,各种参数的测试是怎样进行的呢?

1.1.1 测试系统的组成

由于测量目的不同,测试系统的构成会有很大的差别,但不论是仅有一个测量仪表与被测对象构成的简单系统,还是由各种测量仪器及计算机采集与处理系统构成的庞大而复杂的系统,都是由若干具有一定基本功能的测量环节组成的。所谓环节是建立输出量与输入量之间某种函数关系的基本部件。

测试系统的测量设备一般由感受件(传感器)、中间件(变送器)和显示装置三大部分组成,如图 1-1 所示。

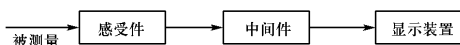


图 1-1 测试系统的测量设备

1.1.2 测量环节的功能

1. 感受件(传感器)

它是将被测量按一定规律转换成便于处理和传输的另一物理量的元件。因它与被测对象直接发生联系,也常称为一次仪表。传感器能否精确、快速地产生与被测量相应的信号,对

测量系统的测量质量有着决定性的影响。因此,一个理想的敏感元件应该满足如下几方面的要求:

①敏感元件输入与输出之间应该有稳定的单值函数关系;

②敏感元件应该只对被测量的变化敏感,而对其他一切可能的输入信号(包括噪声信号)不敏感;

③在测量过程中,敏感元件应该不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

实际上,一个完善的、理想的敏感元件是十分难得的。首先,要找到一个选择性很好的敏感元件并非易事。这时,只好限制无用信号在全部信号中的成分,并用试验的方法或理论计算的方法把它消除。其次,敏感元件总要从被测介质中取得能量,在绝大多数情况下,被测介质也总要被测量作用所干扰。一个良好的敏感元件,只能是尽量减少这种效应,但这种效应总会不同程度地存在着。

传感器的分类方法很多,主要有以下两种:

①按被测量分:如温度传感器、压力传感器、位移传感器等。这种分类方法比较明确地表达了传感器的用途,便于使用者根据用途选用。

②按工作原理分:如电学传感器、光电式传感器、电化学式传感器等。这种分类方法对于传感器的工作原理比较清楚,便于触类旁通。

2. 中间件(变送器)

中间件是将传感器输出信号变换成显示装置易于接收的信号的部分。这不仅要求它的性能稳定、精确度高,而且应使信息损失小。在多数情况下,传感器的输出信号在性质上与强度上总是与显示装置所接收的信号有差异,变送器将传感器的输出进行变换,以驱动显示装置。

现代显示装置接收的标准信号有电流信号 $0\sim 10\text{ mA}$, $4\sim 20\text{ mA}$;电压信号 $1\sim 5\text{ V}$, $0\sim 10\text{ V}$ 等。为此常将传感器的输出信号变换成标准电信号,这种变送器在自动检测和自动控制中应用广泛。

中间件还应包括传输通道,即将测试系统中各环节的输入与输出信号相连接的部分。传输通道是起“传递”作用的元件,例如电线、光导纤维、管路等,应根据具体要求选择和布置,否则会在传输过程中造成信号的损失、失真或引入干扰。

3. 显示装置

其作用是把被测信号所包含的信息显示出来。分为模拟显示、数字显示和图像显示三种。

(1) 模拟显示

常见的有指针显示仪表,如压力表、毫伏表等,具有结构简单、价格低廉、直观性强的特点,其缺点是容易产生读数误差(视差)。记录时以曲线形式给出数据。

(2) 数字显示

数字显示是以数字形式给出被测值,不会产生视差,但直观性不如模拟显示好,且存在量化误差,其大小取决于数模转换器的位数。记录时可打印输出数据。

(3) 图像显示

用屏幕以数字形式显示测量结果或被测参数的变化曲线,既形象又易于读数,且能显示大量数据以便于比较,是目前最先进的显示方式。

1.1.3 举 例

实际测试中,由于被测信号的大小、随时间变化的快慢不同和对测试结果的要求不同,组成的测试系统在繁简程度和中间环节的多少上是有很大差别的。按被测参量的不同,测试系统可分为压力测试系统、振动测试系统和噪声测试系统等;按信号的传输形式不同,测试系统又可分为模拟测试系统和数字测试系统。

【例 1-1】 如图 1-2,以测量某一容器内的压力为例,说明模拟和数字测量系统的基本组成。

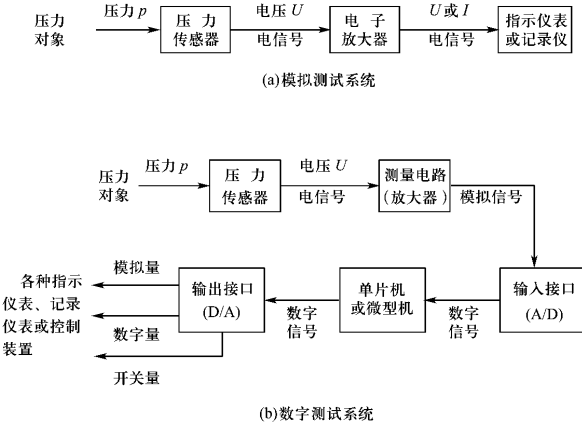


图 1-2 模拟和数字两种测试系统的基本组成

由图 1-2(a)、(b)可以看出两种测试系统的主要区别在于信号的处理,数字测试系统是将测试信号进行数字化处理,并以多种形式输出,以满足不同的需求。

【例 1-2】 全自动洗衣机的工作原理,如图 1-3 所示。

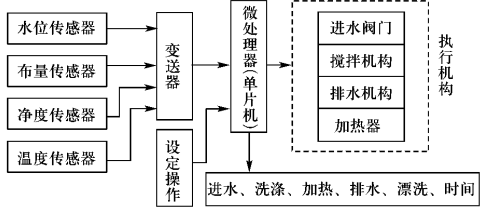


图 1-3 全自动洗衣机工作原理图

- ①水位传感器 光电元件组成,检测水位高度。
- ②布量传感器 根据电机负荷的电流变化,检测洗涤物的重量。
- ③净度传感器 装在排水口,检测洗涤净度,判断脱水情况等。根据光透率的变化,经微处理器控制完成各种操作。

1.2 测量的基础知识

测量是人类对自然界中客观事物取得数量观念的一种认识过程。它是用特定的工具和方法,通过试验手段将被测物理量与另一同名的单位物理量比较,以确定两者之间的比值。因此,测量过程实际上是确定一个数值未知的物理量的过程。

在动力机械工程中,被测的基础物理量有:温度、压力、流速、流量、功率和转速等。由于这些物理量的性质以及测量的目的和要求不同,其测量方法和所用的仪器也各不相同。

1.2.1 测量分类

1. 工程测量与精密测量

(1) 工程测量

指对测量结果不需要考虑测量误差的测量。

这种测量对所用仪器的灵敏度、精度及测量环境都没有什么特殊要求,被测量比较稳定。一般生产现场和一般科学实验中所进行的测量都属工程测量。

(2) 精密测量

指要精密估计测量误差的测量。

这种测量所用仪器设备具有一定的精度和灵敏度,对所测得的数据要按误差理论进行处理。这类测量一般指在符合一定测试条件的实验室内进行的科研试验。

2. 直接测量与间接测量

(1) 直接测量

将被测量与标准量比较而直接获得被测量的数值。

常用的有直读法、差值法、代替法和零值法等。

①直读法 用度量标准直接比较或从仪表上直接读出被测量的绝对值,如用刻度尺测量长度,用弹簧秤测定质量等。

②差值法 从仪表上直接读出两量之差值作为所求之量。如用U型液柱式差压计测量介质的差压。

③代替法 用已知量代替被测量,即调整已知量,使两者对仪表的影响相等,此时被测量即等于已知量。如用光学高温计测量温度。

④零值法 使被测量对仪表的影响被同类的已知量的影响相抵消,被测量就等于已知量。如用天平测定物质的质量,用电位计测量热电势。

(2) 间接测量

通过直接测量得到与被测量有一定函数关系的量,然后经过运算得到被测量。

在实际工作中,常采用组合测量方式求得未知的被测量,也就是说,根据直接与间接测量所得数据联立方程组求解,得到被测量。

3. 等精度测量与不等精度测量

(1) 等精度测量

在测量精度相同的条件下,对某一被测量进行重复测量。等精度测量所得数据可信度是相同的。

(2) 不等精度测量

由于测量条件的变化(设备、人员、时间和环境等),对某一被测量进行多次测量,所得数据的可信度是不相同的,应进行特殊的处理。

4. 静态测量与动态测量

(1) 静态测量

被测量在测量过程中可认为是固定不变的测量,静态测量可不考虑时间因素对测量的影响。

(2) 动态测量

被测量在测量过程中发生的变化是不可忽略的,即被测量是随时间变化的函数。

5. 模拟量测量与数字量测量

(1) 模拟量测量

测量过程是连续的,它能给出被测量的瞬时值。

(2) 数字量测量

测量过程是断续的,它给出的数值是被测量在一段时间内的平均值。

二者的区别在于模拟信号含有“仿真”的意思,理论上分辨率是无限的。而数字信号取有限个数值,按断续阶跃量表示连续信号,分辨率取决于增量的大小。

1.2.2 测量误差

测量技术的水平,测量工作的价值,全在于其精确度,也就是在于其误差的大小。因此,研究测量技术,离不开对测量误差的研究。

1. 误差的定义

(1) 绝对误差

绝对误差是某量值的给出值与其真值之差。设真值(指在一定时间和空间范围内被测量的真实大小)为 A ,给出值(包括测量值、示值、标称值和近似值等)为 l ,则绝对误差为

$$\Delta = l - A \quad (1-1)$$

例如,真值为 $30.2 \mu\text{A}$ 的电流,测得值为 $30.4 \mu\text{A}$,则微安表示值 $30.4 \mu\text{A}$ 的绝对误差为 $0.2 \mu\text{A}$ 。

由于真值 A 是未知的,所以在实际应用时,常用高一级的标准仪器示值 l_0 代表真值,即通常用 $\Delta = l - l_0$ 来代表绝对误差。

在实际测量中,还经常用到修正值这个名称,它的大小与绝对值相等,但符号相反,用符号 C 表示, $C = -\Delta = l_0 - l$ 。高精度的仪器仪表,常给出修正值,利用修正值可求出被测量的实际值:

$$l_0 = l + C \quad (1-2)$$

通常修正值给出的方式,不一定是具体的数值,可以是一条曲线、公式或数表。某些智能化仪器中,修正值预先被编制成相关的程序储存于仪器中,所得测量结果已被自动地对误差进行了修正。

(2) 相对误差

绝对误差的表示方法不能确切地反映出测量的准确程度。例如,测量两个电阻,其中 $R_1 = 10 \Omega$,测量的绝对误差 $\Delta_{R1} = 0.1 \Omega$; $R_2 = 1000 \Omega$,测量的绝对误差 $\Delta_{R2} = 1 \Omega$ 。尽管, $\Delta_{R1} <$

Δ_{R_2} ,但不能由此得出测量电阻 R_1 比测量电阻 R_2 的准确度要高的结论,因 $\Delta_{R_1}=0.1\ \Omega$,相对于 $10\ \Omega$ 来讲是 1% ,而 $\Delta_{R_2}=1\ \Omega$,相对于 $1000\ \Omega$ 来讲是 0.1% 。所以结论是 R_2 的测量比 R_1 的测量更准,因此,引出了相对误差的概念。

相对误差 δ 是绝对误差与真值之比,因测得值与真值接近,所以也可近似用绝对误差与测得值之比作为相对误差,通常用百分比表示:

$$\delta = \frac{\Delta}{l} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{I} \times 100\% \quad (1-3)$$

由于绝对误差可能为正值或负值,所以相对误差也可能出现正值或负值。相对误差通常用于衡量测量的准确度。

【例 1-3】 用最大绝对误差为 $\pm 5\ \text{C}$ 的测温仪表测温,一处显示值是 $800\ \text{C}$,另一处显示值是 $400\ \text{C}$,两处测量的相对误差各是多少?

解 每处测量值中可能出现的相对误差是

$$\delta_{800} = \frac{\Delta_{\max}}{l_{800}} \times 100\% = \frac{5}{800} \times 100\% = 0.63\%$$

$$\delta_{400} = \frac{\Delta_{\max}}{l_{400}} \times 100\% = \frac{5}{400} \times 100\% = 1.25\%$$

由此可见,同一块仪表在 $800\ \text{C}$ 与 $400\ \text{C}$ 两处测量的相对误差的差别是很大的。

(3) 引用误差(允许误差)

引用误差是一种简化和实用方便的相对误差,常有多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表可测范围不是一个点,而是一个量程,这时若按式(1-3)计算,由于分母是变量,随被测量的变化而改变,所以计算很麻烦。为了计算和划分准确度等级的方便,通常采用引用误差,即最大绝对误差 Δ_{\max} 与仪表的量程(常数)之比。因此引用误差为

$$\delta_j = \frac{\Delta_{\max}}{A_a - A_b} \times 100\% \quad (1-4a)$$

式中, A_a 为仪表量程的上限值; A_b 为仪表量程的下限值。

当 $A_b = 0$ 时,

$$\delta_j = \frac{\Delta_{\max}}{A_a} \times 100\% \quad (1-4b)$$

由引用误差的定义可知,对于某一确定的仪器仪表,它的最大引用误差值也是确定的,这就为仪器仪表划分准确度等级提供了方便。电工仪表就是按引用误差 δ_j 之值进行分级的。我国电工仪表共分 7 级: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。如果仪表为 S 级,则说明该仪表的最大引用误差不超过 $S\%$,即 $|\delta_j| \leq S\%$,但不能认为它在各刻度上的示值误差都具有 $S\%$ 的准确度。结合式(1-3)和式(1-4)可以看出,如果某仪表为 S 级,满刻度值为 $A_a - A_b$,测量点为 l_i ,则仪表在该测量点的最大相对误差 δ_i 可表示为

$$\delta_i = \frac{A_a - A_b}{l_i} \times S\% \quad (1-5)$$

因为 $l_i \leq A_a - A_b$,所以 l_i 越接近于 $A_a - A_b$,测量准确度越高。在使用这类仪表测量时,应选择使指针尽可能接近于满刻度值的量程,一般最好能工作在不小于满刻度值 $2/3$ 以上的区域。

【例 1-4】 待测压力约 $10\ \text{kg}$,现有 0.5 级,量程为 $0 \sim 30\ \text{kg}$,和 1.5 级,量程为 $0 \sim 10$

kg 两块表,问选用哪块表测量好?

解 用 0.5 级,量程为 0~30 kg 压力表测量时,最大相对误差:

$$\delta_{10} = \frac{A_a - A_b}{I_{10}} \times S\% = \frac{30}{10} \times 0.5\% = 1.5\%$$

用 1.5 级,量程为 0~10 kg 压力表测量时,最大相对误差:

$$\delta_{10} = \frac{A_a - A_b}{I_{10}} \times S\% = \frac{10}{10} \times 1.5\% = 1.5\%$$

由此可见,如果选择合适的量程,既使用 1.5 级仪表进行测量,也可能与 0.5 级仪表同样准确。

因此,在选用仪表时,应根据被测量的大小,兼顾仪表的级别和测量上限,合理地选择,不要单纯追求高等级的仪表。

2. 误差来源与分类

误差的来源是多方面的,例如测量用的工具(仪器、量具等)不完善(称工具误差);测试的设备和电路的安装、布置和调整不完善(称装置误差);测量方法本身的理论根据不完善(称方法误差);测量环境如温度、湿度、气压和电磁场等的变化(称环境误差);测量人员在最小分辨力和反应速度上的差异(称人员误差)等。在测量中,有时是几种误差来源共同起作用的,而对于一个具体的误差,往往既可归入这一类,也可归入另一类。

对于每一次测量结果,必须确定误差的范围,否则测量结果毫无价值,因此测量误差的分析是提高测试水平的重要环节。

根据误差的性质可分为系统误差、随机误差和粗差三类。

(1) 系统误差

在相同条件下,多次测量同一量时,所出现的误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,与某一个或几个因素成函数关系的有规律的误差,称为系统误差,简称系差。例如仪表的刻度误差和零位误差,应变片电阻值随温度的变化等都属于系统误差,它产生的主要原因是仪器仪表制造、安装或使用方法不正确,或是测量人员一些不良的读数习惯等因素造成的。

系统误差表明了一个测量结果偏离真值或实际值的程度。系差越小,测量就越准确,所以经常用来表征测量准确度的高低。

(2) 随机误差

服从统计规律的误差称为随机误差,简称随差,又称偶然误差。只要测试系统的灵敏度足够高,在相同条件下,重复测量某一量时,每次测量的数据或大或小,或正或负,不能预知。虽然单次测量的随差没有规律,但多次测量的总体却服从统计规律,通过对测量数据的统计处理,能在理论上估计随差对测量结果的影响。

随机误差是由很多复杂的因素,如电磁场的微变,零件的摩擦、间隙,热起伏,空气扰动,气压及湿度的变化,测量人员的变化等,对测量值的综合影响所造成的。它不能用修正或采取某种技术措施的办法来消除。

随机误差表明了测量结果的分散性,经常用来表征测量精密度的高低。随机误差愈小,精密程度愈高。如果一个测量结果的系统误差与随机误差都很小,则表明测量既精密又准确,简称精确。