


Measurement and Uncertainty
测量与不确定度

张小章 吴音 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为高等院校工科专业测量方面的基础教材。内容包括实验中测量的基本概念和测量数据的不确定度分析；温度、压力和真空、流速和流量、振动等量值测量中的物理基础和主要仪器；还给出了若干实验案例。本书也可以作为工程技术人员的参考书。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

测量与不确定度/张小章,吴音编著. —北京:清华大学出版社,2023.8
ISBN 978-7-302-64035-6

I. ①测… II. ①张… ②吴… III. ①测量—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 127611 号

责任编辑：李双双

封面设计：何凤霞

责任校对：欧 洋

责任印制：曹婉颖

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-83470000 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：大厂回族自治县彩虹印刷有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：170mm×240mm 印 张：11.5 字 数：232 千字

版 次：2023 年 8 月第 1 版 印 次：2023 年 8 月第 1 次印刷

定 价：49.00 元

产品编号：102178-01

前 言

本书的编写目的是为工科本科生提供一本入门性的测量方面的基础教材。它假定学生已经学完高等数学和普通物理。本书内容是为学生即将进入高年级专业学习提供实验方面的基础知识。课程主要讲授实验中测量的基本概念和测量数据的不确定度分析,同时讲述包括温度、压力和真空、流动和流量、振动等量值的相关测量中的物理基础和主要仪器的原理。根据以往教学经验,考虑到测量技术涉及面较广,教学过程中难以一一覆盖,课后问题除了巩固所教知识点之外,也作为内容的扩充。另外,本书增加了辅助阅读,供有兴趣的同学进行某一方面更深入的学习。

作为一门测量课程,增加实验经验是非常重要的环节。为此,本书最后编写了8个实验案例供选用,可以在一定程度上使学生得到一些感性认识。

书中提供了 Matlab 的一些相关计算语句和 Origin 绘图和数据分析软件介绍,以帮助读者掌握有用的软件工具。

与测量相关的名词众多且不统一,书中有些名词用法可能也与其他书籍不尽相同,请读者加以注意。书中最后给出所涉及的关键词检索,可供参考。

本书可用于一般工科学生测量技术基础课的教材或参考书,也可以供研究人员和工程师作为入门读物。

清华大学出版社的李双双老师作为责任编辑,为本书出版作了高效且细致的工作,在此谨表衷心感谢。由于作者能力有限,书中难免有不妥之处,谨请读者指正。

编著者

2023年8月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量的意义	1
1.2 常见的基准量	3
1.2.1 质量(mass)	3
1.2.2 时间(time)	3
1.2.3 长度(length)	4
1.2.4 温度(temperature)	4
1.3 量纲与单位	4
辅助阅读	5
习题	8
第 2 章 仪表的基本构成和特性	9
2.1 仪表的功能部件	9
2.2 标定(calibration)	11
2.3 仪表的静态特性 (static characteristics)	12
2.4 仪表的动态特性(dynamic characteristics)	15
2.4.1 动态特性	15
2.4.2 动态特性的数学模型	16
2.4.3 一阶仪表和二阶仪表对阶跃和正弦输入的响应	19
2.4.4 传递函数(transfer function)	20
2.4.5 相位移线性化	23
2.4.6 多变量输入和偶合系统	24
习题	24
第 3 章 测量数据分析	26
3.1 测量系统和数据的稳定性	26
3.2 测量数据的不确定性	29

3.2.1	测量结果的不确定性	29
3.2.2	相关定义	30
3.2.3	误差分类	31
3.2.4	测量不确定度	31
3.3	随机变量的概率分布	32
3.3.1	随机变量的数字特征	32
3.3.2	直方图	33
3.3.3	正态分布	35
3.3.4	均匀分布	35
3.3.5	反正弦分布	36
3.3.6	三角分布	36
3.4	测量数据处理步骤	36
3.4.1	系统偏差的修正	36
3.4.2	可疑值的剔除	37
3.4.3	子样均匀性检验	38
3.4.4	测量值和不确定度的表达	40
3.5	间接测量下不确定度的传递(propagation)	44
3.5.1	传统方法	44
3.5.2	相关系数	45
3.5.3	蒙特卡罗(M-C)法	46
3.6	关于 B 类不确定度	48
3.7	不确定度的合成	49
3.8	一些常见的问题	49
3.9	实验数据的曲线拟合	50
3.10	测量系统的 GR&R	52
3.10.1	GR&R 的目的	52
3.10.2	相关指标	53
3.10.3	GR&R 的具体做法	54
	习题	55
第 4 章	温度测量	57
4.1	温标	57
4.1.1	经验温标,热力学温标,国际实用温标	57
4.1.2	常见的几种温度单位	58

4.1.3	国际实用温标 IPTS-68	58
4.2	玻璃温度计	61
4.2.1	结构	61
4.2.2	测量原理	61
4.2.3	玻璃温度计的可能误差	62
4.3	电阻温度计	62
4.3.1	金属导体测温原理	63
4.3.2	半导体热敏电阻	67
4.3.3	电阻的测量方法	67
4.4	热电偶温度计	68
4.4.1	热电偶原理和热电势	69
4.4.2	标准和非标准热电偶	70
4.4.3	热电偶的构造	72
4.4.4	铠装热电偶	73
4.4.5	冷端补偿	73
4.4.6	热电势的测量	74
4.5	辐射温度计	74
4.5.1	概述	74
4.5.2	热辐射的理论基础	74
4.5.3	光学高温计	76
4.5.4	比色温度计	78
4.5.5	全辐射温度计	78
4.5.6	红外线测温	79
4.6	温度计的分度与标定	80
4.7	一些温度固定点的实现	80
	习题	82
第 5 章	压力和真空测量	84
5.1	压力的概述	84
5.1.1	压力	84
5.1.2	压强的单位	84
5.1.3	有关压强的一些名词	85
5.1.4	真空的概念	85
5.2	常见压力仪表的测量原理	86

5.2.1	U形管压力计	86
5.2.2	单管压力计和微压计	86
5.2.3	弹性元件压力表	88
5.2.4	其他形式的测压仪表	89
5.3	真空测量	89
5.3.1	热导式真空计	90
5.3.2	电离真空计	91
5.3.3	分压强测量(质谱仪)	92
5.4	压力信号的电变送	93
5.5	压力表的校验和真空的获得	94
5.5.1	压力仪表的校验	94
5.5.2	真空获得	94
	习题	95
第 6 章	流量和流速测量	97
6.1	流量测量的基础	97
6.1.1	流量(Flow rate)	97
6.1.2	流动的基本特性	97
6.2	流量测量仪表	101
6.2.1	容积式流量计	101
6.2.2	速度式流量计	101
6.3	电磁流量计专题	108
6.3.1	电磁流量计基本原理	108
6.3.2	电磁流量计理论的发展历史	109
6.3.3	基本方程	109
6.3.4	点电极下虚电势的求解	110
6.4	流量计的标定	111
	习题	113
第 7 章	振动测量和分析	114
7.1	振动的基本概念	114
7.1.1	简谐振动	114
7.1.2	质量、弹性恢复力和阻尼	114
7.1.3	欠阻尼、临界阻尼和过阻尼	115

7.1.4	强迫振动和共振	116
7.1.5	多自由度振动与模态	117
7.2	振动的主要测量仪器	117
7.2.1	加速度式振动仪器	117
7.2.2	速度式振动仪器	118
7.2.3	电涡流位移传感器	119
7.2.4	光电相位测量仪表	123
7.3	主要振动量的测量	123
7.3.1	相位差的测量	123
7.3.2	基频振动的测量	124
7.3.3	波德图和极坐标图	124
7.3.4	轴心轨迹	125
7.3.5	频谱图	125
	习题	126
第 8 章	实验案例	127
8.1	热电阻温度计时间常数的测定	127
8.2	气体种类对热导式真空计特性的影响	131
8.3	气体流量标准装置校正浮子流量计	134
8.4	压电陶瓷压电常数(d_{33})的测试	136
8.5	电涡流传感器标定精度研究	140
8.6	陶瓷材料弯曲强度测试	144
8.7	材料的密度及气孔率测试	147
8.8	两相流动下管道振动阻尼系数测量	153
	参考文献	156
	附录 A 相关表格	157
	附录 B Origin 介绍	161
	索引	171

绪 论

1.1 测量的意义

测量是人类活动的基本组成部分,而测量仪器可被视为人类感官的延长。

即使是在原始社会,人们也需要估计猎物的位置和奔跑速度,以及衡量分配猎物时是否公平。到了农耕时代,人们则需要对天气和水文等拥有更多知识。例如,古埃及人在利用尼罗河水灌溉作物时积累了很多关于河流测量的经验。

秦朝时度量衡制度的统一是对测量的重要贡献。在此之后的两千年,我们基本一直沿用该制度,直到1929年开始采用米制(见图1-1-1)。

秦朝度量衡单位与米制单位比较的估计值:

1尺=23.2 cm

1升=200 mL

1斤=256 g

我们今天涉及的测量是现代意义上的测量,其主要特征是定量化。

人类科学的发展,使社会不断走向定量化,因而,测量的地位也日益增高。当然,要完成现代化的测量需要使用精良的仪器。

那么,什么是测量呢? **测量是对某一量用基准量进行比较,用数值表示其结果的过程。**

这里的“某一量”是被测对象的某一特征量,称为被测量;用来实现这一过程的工具称为测量仪器;基准量是大家所公认的一种单位。

例如,用米尺(“基准量”)去测量一个人的身高(“某一量”),比较的结果表



图 1-1-1 中国古代作为重量的标准件

明,此人身高是米尺的 1.703 倍(20 世纪 80 年代末某一次统计的全国十大城市男子平均身高),这个过程是测量。注意,这里的“基准量”实际上是指国际标准的“米”,是观念上的,我们手中的米尺只是这一基准量的复现。

当然,这只是一个简单的例子,科学研究中的测量通常更加复杂和困难。例如,物理学中著名的光速测量问题:

在很久以前,人们就相信光的速度是有限的。但如何去证明它呢?实际上就是要找到一种办法去测量它。第一次在地球范围内测定光速的是斐索,他在 1849 年利用转动的齿轮作为光源的开关,去测定一次闪光通过长度为 $2 \times 8633 \text{ m}$ 的路程所需要的时间,最后计算得到了光速。

当时人们认为,光与声波一样是通过介质传播的。这种传播光的介质被称为“以太”,它与地球存在着相对运动。这样,地球的运动会导致光速的变化,但后来迈克耳逊-莫雷在 1887 年对于光速进行的更精确的测定结果说明:光速不因参考系的运动而变化。这一实验似乎搅乱了当时的物理学界,同时也导致爱因斯坦狭义相对论的产生,这是人们对时空观念的认知产生重大变革的原因之一。

从某种意义上讲,测量手段发展到什么程度,科学就发展到什么程度。诺贝尔奖获得者朱棣文说:“精确的测量是物理的核心,就我个人经历所言,新的物理领域产生于新的尺度。”例如,现代化的电镜已使人们有能力进入观察微米尺度的阶段,由此带来材料和生物等学科的巨大发展。

测量在科学发展中起到了关键性的作用。门捷列夫甚至说:“没有测量,就没有科学。”所以,千万不要只把测量当作“拿个仪表,要点数据”,这样的想法是非常错误的。

测量又是一门涉及知识很广的学问。首先,对于被测对象,如本课程中将要介绍的温度、压力、流量等,必须有深刻的了解,这些量存在于被测系统当中,当然也应熟悉被测系统。对于测量工具,即仪表的了解,又牵涉另外一些知识,如前置的传感部分需要用到一些物理原理,后置的电子部分则需要用到电工电子学、微处理器等知识。而对测量结果的分析则要求具备数学基础,如概率统计、不确定度和误差分析等方面的知识。所以,有关测量的课程有着“广博”的特点,这给学习带来了一定的困难。但测量本身又有自己的特色,即自始至终从测量的角度把以上提到的各科知识串通起来,同时形成自己特有的知识体系,这是我们学习这门课程时应该加以注意的。

每一门课程都应该给人们带来一些新的观点和思想,该课程将给大家展示的是科学研究和工程实践中的另外一面,即不确定性、多解性和逆向性。这也许是客观世界的本来面目,也是测量这门课程有别于我们学习传统的微积分、力学和经典物理学的地方。

1.2 常见的基准量

前面我们讲过,要完成一个测量过程,需要有大家公认的标准。组成标准量的更基本的部分称为基准量。下面介绍一些常见的基准量。

1.2.1 质量(mass)

在国际单位制(SI)中,质量以千克(公斤,kg)为单位。早期,1千克是大约4摄氏度下(密度最大)1升水的质量。之后很长时间里,1千克是指用铂-铱合金专门制成的国际千克原器的质量,它存放在法国巴黎郊外的国际计量局,以特殊条件加以维护。2019年5月20日“世界计量日”,根据普朗克常数($6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J·s)作为新标准重新定义的质量正式生效。图1-1-2为国际单位制中的千克原器和米原器。

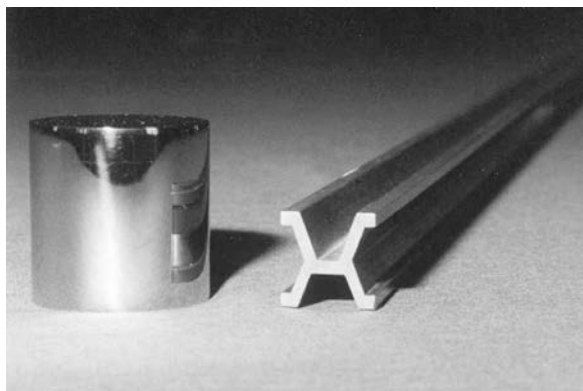


图 1-1-2 国际单位制中的千克原器和米原器

1.2.2 时间(time)

时间在SI制中以秒(s)为单位。1960年以前,国际计量大会把一个平均太阳日分成 24×3600 份作为1s,这是以地球自转为基础的。1960年又采用地球公转来定义秒。1967年第十三届世界计量大会上决定以同位素铯-133能级间跃迁射线的9 192 631 770个周期为1s。这一标准存放在巴黎,全世界的时间定期与该标准对时。据称到了2026年,又将可能采用光钟(如原子内部跃迁频率)来定义秒。

1.2.3 长度(length)

长度在 SI 制中以米(m)为单位,最初根据地球子午线 1/40 000 000 的长度作为标准米,并制成米原器存放在国际计量局(1792—1799 年,法国天文学家德朗布尔与梅尚花了整整 7 年的时间,测得了从敦刻尔克到巴塞罗那的子午线的弧长)。1983 年改为光在 1/299 792 458 s 内传播的距离(真空中传播)为标准米。

1.2.4 温度(temperature)

温度在 SI 制中以开尔文(K)为单位,1 K 等于水的三相点的 1/273.16,而水三相点规定为 273.16 K。实际应用中采用与热力学温标非常接近的温标,称为国际实用温标。

以上只列出与本课程相关的几种基准量,更全面的介绍在许多书籍中有所论述。值得一提的是,基准量的确立是不断发展的,每一次发展都代表了当时最好的测量水平。

最近十多年,随着科学的发展,基准量的定义也产生了重要变革。2018 年的第 26 届世界计量大会上通过了关于修订国际单位制的决议,其中,“千克”由普朗克常数、“安培”由基本电荷、“开尔文”由玻耳兹曼常数、“摩尔”由阿伏伽德罗常数定义;另外大会也对 3 个基本单位在定义的表述上作了相应调整。这样,基准量的定义走向量子化,实物基准逐步退出历史舞台。

关于基准量的研究引申出了“计量”的概念。计量或者计量学是一门关于测量的科学。简单地讲,它主要包括基准量和标准量的建立、维护和传递等,牵涉基础研究、应用及法律法规。国际间有国际计量局,我国有中国计量科学研究院(NIM),各省市有计量研究院、所,相关单位还有计量部门。国家之间采用“比对”等方法达成一致意见,从而得到标准。国家内部则采用法律法规建立标准并逐一往下传递。

可以看出,计量和测量之间应该是有共同点和差异的。

1.3 量纲与单位

量纲(dimension)是指被测量的物理特征,而**单位**(unit)是人们对被测量进行数值表达时赋予的标准。如长度是一量纲,而米、厘米、英寸都是单位。

由于单位是人们赋予的,因此历史上存在不同的单位制。前面我们提到的秦朝统一度量衡,就是一种曾经在我国长期使用的单位制,称为市制,以区别于

公制单位。英、美等国家还采用英制(如英国工程制)。19世纪英国提出厘米-克-秒制(CGS),1960年国际法定度量衡组织推行采用米-千克-秒(MKS)的国际单位制。以上这些单位制会在不同时期或地区出版的书籍和文献中出现,阅读时需要加以注意。本书中的附录表 A-1~表 A-4 收集了一些量的不同单位之间的转换,可供大家参考。

如果我们同时遇到不同的单位制,需要多加小心。有时候不同单位制之间的换算并非只是一个公式就能解决的,还存在着数字截尾引起的精度问题。例如,现在采用 $1 \text{ in(英寸)} = 25.4 \text{ mm}$,但之前美国采用 $1 \text{ m} = 39.37 \text{ in}$,则 1 in 为 $25.400\ 050\ 8 \text{ mm}$,这种差别在大距离或精密测量中是需要加以注意的。

有关数值结果的有效位数问题,在第3章中将会进一步讨论。

辅助阅读

1. 关于测量单位和标准的相关介绍

1875年5月20日(该日现被定为世界计量日),17个国家在法国巴黎成立了国际计量局(the Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)以协调国际间的测量。1960年,国际单位制 SI(Système International d'Unités)被采用作为推荐的实用测量单位,包括米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉,以及一些导出单位(如伏特、瓦特、牛顿、帕斯卡、焦耳等)。

另外还有一个与标准相关的重要组织是国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO),它于1926年成立,现有160多个成员国,总部设在瑞士日内瓦(见图 1-4-1)。ISO 颁布了很多标准,包括测量标准。



图 1-4-1 BIPM 标志和 ISO 标志

2. 质量在变迁

质量的基准难以确定,最本质的原因是人们对物体为什么会具有质量的原理并不了解。

理论物理学家介绍说,物理学上对物质为什么有质量的认知还不是很明

确。科学家对电子、夸克的质量认识已经比较清楚了,但是对于质子、中子的质量的认识仍然不太清楚。质子和中子里面分别有 3 个夸克,但它们自身的质量远远大于 3 个夸克的质量。

理论物理界普遍认为是希格斯粒子给夸克和电子等微粒以质量,但是希格斯粒子一直没有被发现,人们期待能够通过大型强子对撞机真正捕捉到希格斯粒子的“芳踪”,直到 2012 年欧洲粒子中心宣布发现了它。

3. 完美的硅球

科学家在长期的跟踪中发现了存放在巴黎的国际“千克原器”的质量发生了微小的变化,这意味着全世界作为依据的“千克”难以精确维持(见图 1-4-2)。

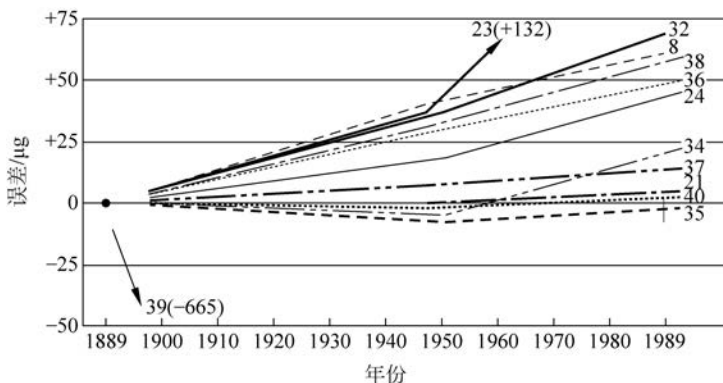


图 1-4-2 国际基准量千克原器复制品随时间的变化

折线后的数字为复制品编号

因此,科学家开展了一系列的研究,试图获得一种更加稳定的“千克”。其中,德、意、日、比、澳等国曾联合进行过“阿伏伽德罗计划”,它的目标就是制作一个“最完美的硅球”。

这个球由 99.99% 纯度的硅-28 制成。选择硅作为材料是因为这种元素的化学性质稳定,并且当代的半导体工业已经能够制造高纯度的硅晶体。科学家们利用激光干涉仪从球体表面随机选择了 60 000 个点,测量每个点彼此间的距离,以确保这个圆球体是世界上最完美、最精确的。同时,科学家们利用 X 射线晶体探测器来测量球体硅-28 原子之间的空间距离,确定在一些极端条件下该球体不发生明显的原子间距变化。这个球是如此完美,即使把它放大到地球那么大,表面上只能看到 12~15mm 的皱褶。

为什么要做得这么圆呢?因为这个圆球的体积是根据硅原子的质量算出来的。我们知道每个硅原子的质量,又知道单位体积内硅原子的数量,就可以

计算出 1kg 硅所占的体积,算出来的值是直径为 93.75mm。如果要制造出这样的球作为千克的标准,既要保证这个球体绝对的圆,直径绝对的准确,又要保证球里面的硅晶体没有缺陷。

硅原子的质量是怎样知道的呢?科学家精确地知道碳-12 原子的质量,而其他原子的质量可以根据碳-12 原子的质量推导出来。

4. 英制单位小传

英尺(foot)在英文中的本意是“脚”。实际上,一英尺就是一个成年男子一只脚的长度。由于脚的长度因人而异,在使用时有必要规定一个标准的脚长。

英制的单位比较复杂,1 英尺=12 英寸,1 码=3 英尺,1 英里=5280 英尺。公制系统起源于 17 世纪的法国,当时是为了制止不法人员利用度量的混乱扰乱市场。它因为使用了十进制,所以特别好记。法国在 19 世纪早期正式采用这个系统,其他国家随即跟进。以后的几百年,这个体系传遍全球。英国一开始还对此抵制,20 世纪 70 年代终于采用了公制。当时的口号是:“公制:十倍之好”(Metric: 10 times better)。

美国现在在很多领域还坚持使用英制单位,结果据称造成了 1999 年的一次“火星气候探测器”的失败。这个卫星于 1998 年 12 月 11 日发射,1999 年 9 月接近火星,但是进入火星大气层时被烧毁。这个项目的花销是 3.27 亿美元。据新闻报道,在随后的事故调查中,人们发现,原来是在制造探测器的两个部门里,一个用的是公制,另一个用的是英制。

5. 从铂棒到光速

1795 年,曾经为法国王室工作的珠宝商制作了一批铂棒。其中每一根的长度都为 1“临时米”、厚 4mm、宽 25.3mm,两端面平行。计量专家从中挑出 0°C 时长度最接近“1 米”的计算值,于 1799 年 6 月 22 日被放置在国家档案馆,便是众所周知的“米原器”。公制于 1799 年 12 月 10 日获得立法确认。1874 年,科学家们又用更加坚硬的铂铱合金制作了新的“1 米”长合金棒,这种合金后来被称为“1874 合金”。这个合金棒在 1889 年举行的第一届国际计量会议上被宣布为“国际米原器”(IPK)。

用铂棒定义米既不方便,也不稳妥。1960 年第 11 届国际度量衡会议的决议称,“国际米原型所定义的标准米的精度已不适合当今计量学的需要”。该决议对“米”进行了重新定义:“真空中氪-86 原子从 2p₁₀ 跃迁到 5d₅ 能级时所发出辐射波长的 1 650 763.73 倍”。

不久,科学家们对这一定义也产生了不满。他们开始考虑以光速作为“米”

的判断标准。1975年第15届CGPM确定光速的推荐值是 $299\,792\,458\text{m/s}$ 。所以,1983年第17届CGPM又以真空中的光速重新定义了米,即 1m 等于光在真空中于 $1/299\,792\,458\text{s}$ 时间间隔内所经路径的长度。

(部分内容摘自2008年《新京报》)

习题

1. 我们正在进入一个“一切皆有记录”的时代,请设想一种测量方法来定量记录日常活动。(例如,可以利用手机、计算机、日常用具等加以适当改造,也可以是全新的发明,只是要求可以或最终能够量化。)

2. 调查一下图书馆里有关测量方面的期刊,国内和国外各列出3~5种。每种浏览其中1~2篇文章。写出一篇简述,介绍每种期刊的读者人群、侧重领域和特点,以及所浏览文章的简要内容。

仪表的基本构成和特性

2.1 仪表的功能部件

被测对象特征量的测量过程需要借助仪表完成。测量仪表的种类很多,原理、结构也各不相同。如果要计算其数量的话,恐怕有上万种。但测量仪表有着一些共性,本章将介绍这些共性,包括仪表的基本功能、基本定义、静态特性和动态特性、标定等。

从功能作用来看,一台具体的测量仪表可以被划分为由 3 个基本功能组成。

1. 敏感件

英文名: sensor, detector, primary element。

敏感件是直接感受被测变量的部分,它使被测对象中一小部分能量转变为相应的信号,有时又称作敏感元件、一次元件等。

敏感件依照它们在工作中依据的物理原理又可以分为如下几种。

机械式: 弹性元件, 振动单元, 流体压强, 传热元件等。

电磁式: 电阻, 电压, 电感, 电容, 电荷, 压电等。

光电式: 激光, 光栅, 光纤, CCD 等。

声波式: 超声。

其他: 半导体, 化学, 生物。

要掌握任何一种测量仪表,都需要对相应的物理原理有所了解,甚至对某一点有深入的研究,因为测量仪表经常把某些物理特性应用到极致。测量本身要求物理量之间的数值关系是精确而且可重复的,而通常意义上的物理学主要强调揭示物理量之间的内在关系,不太注重这种量值关系有多么精确。

2. 显示件

英文名: display device, data presentation element, final element。

显示件是用于显示、指示、记录被测量的部分。例如,指针、数码管、记录纸和内存、屏幕,等等。

3. 信号调理件

英文名: the secondary element。

信号调理件也叫作中间件,它连接敏感件和显示件,并完成信号转换、运算、传输等功能,可以有以下几种。

(1) 变量转换(convert)

把信号从一种物理形式变成另一种物理形式,而不改变信号实质内容的部分。例如,通过变阻器把位移转换成电压。

(2) 运算元件(manipulator)

根据某些数学公式对信号进行处理而不改变变量本身物理性质的部分。最简单的处理如乘上一个放大系数。

(3) 数据传送元件(data transmission element)

把信号从某处输送到另一处的元件。

4. 说明

(1) 以上把一台仪表分为由3个“件”组成,实际上是按功能来分割的,并非硬件上的分割。对于简单的仪表,一个具体的元件可能包含了所有的功能部分,如用于体温测量的温度计;而对于复杂的设备,可能许多部分配合才完成一个功能,如大型同位素质谱仪。参见图 2-1-1。



图 2-1-1 体温表和大型仪器同样具有 3 个功能部分

(2) 任何测量过程中,敏感件总是从被测对象中摄取一部分能量。从这一角度讲,绝对不干扰对象的测量是不存在的。但人们还是常采用“无干扰”“非接触”“非侵入”等名词来说明一些测量方法的特点,实际上是指干扰在不同程度上是可以忽略的。

(3) 通常我们还可能遇到其他一些名词。

① 传感器(sensor, transducer),一般指借助敏感件来接受物理量的信息并按一定规律将其转换成同种或另一种物理量形式的信息的仪表(或部件)。

② 变送器(transmitter)通常是输出为标准信号的传感器或传感器的后面部分。

③ 一次仪表,常指变送器或功能少于变送器的部分。显然,它必须包括敏感件。

二次仪表,它是相对于一次仪表而言的。主要指带有电子线路、完成信号调理和显示功能的部分。

二次仪表基本依靠电子线路完成,而一次仪表则需要物理基础,这样的分割方法实际上区分了两类人员:一类以研究测量对象为出发点;而另一类熟悉各种电子仪表和线路。这两类人员各有所长。有意思的是,同时兼有两方面专长的人不多。

以上关于测量仪表的功能划分和常见名词的解释,事实上很难做到“确切”两字。许多教科书和工程手册就很难对此达到一致的说法。在具体翻阅资料或与工程技术人员交谈时,请记住首先要弄清各自的定义是否相同。

2.2 标定(calibration)

对于研制和使用中的仪表,我们可能对其中一些仪表原理的了解程度还停留在很基础的阶段,而对另一些仪表则已经建立了精确的物理模型。但是,无论对于它们的掌握程度如何,几乎所有的仪表在使用之前都需要标定。

标定是给指定的仪表系统加上已知的值,考察仪表系统的输出特性的过程。标定在有些文件中还称为校准。标定是消除仪表偏倚(bias)的主要手段。

该已知值称为标准(standard),可以是一个,也可以是适当覆盖测量范围的多个值,例如,在仪表最大测量值的20%、50%和80%三处提供标准值。标定时对每个加在仪表上的标准值作多次测量(一般3~5次)。而标定后的仪表应该在标定范围内使用,一般不进行外插。

作为标准的已知值其精度是已知的,而且它的精度必须比被标定仪表的要求精度高出适当程度。依据国家标准,这一精度比值与仪表的种类和使用要求

等有关,一般在 $1/10 \sim 1/2$ 。

标定过程与溯源有关,所谓可溯源性(traceability)是指量值最终可以用基本量(时间、质量、长度等)表示。例如,标定质量流量的方法,最后归结为密度和体积流量的测定,而密度测定归结为质量和体积(长度量纲)的测定,体积流量则归结为体积和时间的测定。而长度、质量和时间都是基本量,国家计量部门对其制定了唯一标准。

典型的标定结果是输入输出特性曲线,如图 2-2-1 所示,其中实心点是实验标定数据点,拟合曲线(实线)为 $y=f(x)$ 。根据标定曲线,我们能够了解仪表的一些特性。

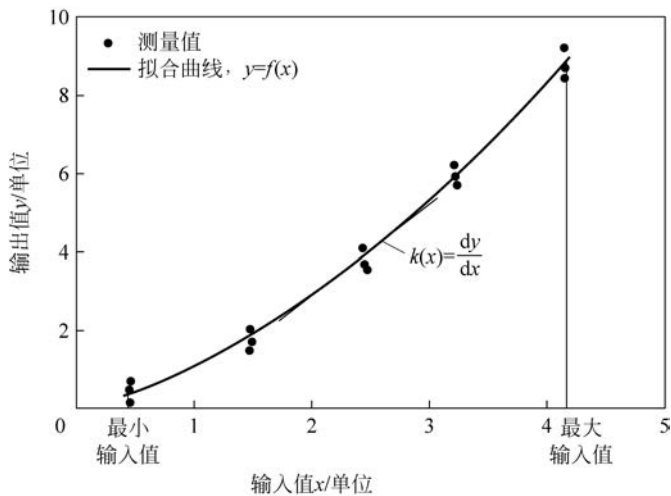


图 2-2-1 典型的标定曲线

有时候标定的结果就是一个仪表系数,即使用范围内仪表读数和被测量线性关系的比例系数。如对于涡轮流量计:

$$Q = Kf \quad (2-2-1)$$

其中, Q 是被测流体的体积流量; K 称为仪表系数或仪表常数,表示单位脉冲所对应的流量; f 是仪表输出的脉冲。式(2-2-1)只在一定的范围内成立。

测量仪表经过标定后才认为能够可靠地工作。工厂里的仪表还需要计量部门定期标定(称为检定)。

2.3 仪表的静态特性 (static characteristics)

仪表的静态特性是指仪表系统与时间无关或随时间变化很缓慢的那些特性。这时被测变量随时间不变化,如健康人的体温;或者,即使有变化,但读取

测量数据时间相比之下很短,如测量一天之内某一时刻的室外温度。

1. 量程(range)

量程指根据设计要求规定的仪表允许测量的最大值和最小值。几乎没有一种仪表的测量范围是无限的,特别是,有许多仪表的测量范围竟然不是从0开始。

$$\text{量程范围} = \text{最大值} - \text{最小值} \quad (2-3-1)$$

由于使用方便的原因,量程范围又分为输入范围和输出范围:

$$\text{输入范围} = \text{最大输入值} - \text{最小输入值} \quad (2-3-2)$$

$$\text{输出范围} = \text{最大输出值} - \text{最小输出值} \quad (2-3-3)$$

定义各种仪表误差时常用最大输出值 r_{FS} ,但也有时候会使用量程范围,或者直接使用被测值。阅读资料时需要加以注意。

量程比(turndown ratio):许多场合中为了反映仪表的性能,采用量程比的概念。所谓量程比是指测量的允许最大值和最小值之比,如10:1指的是仪表能测量的最大值是最小值的10倍。一般希望仪表的量程比大。

2. 准确度(accuracy)

准确度是表征仪表指示值接近被测真值的程度。仪表指示值与真值之间会存在误差:

$$\text{绝对误差} = \text{指示值} - \text{真值} \quad (2-3-4)$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{指示值} - \text{真值}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (2-3-5)$$

就仪表而言,经常会使用以下概念:

$$\text{引用误差} = \pm \frac{\text{仪表量程范围内最大绝对误差}}{\text{量程范围或最大量程}} \times 100\%$$

仪表的允许误差是指正常使用条件下引用误差的允许值。从允许误差中去掉百分号后的绝对值,在一定条件下产生仪表的**精度等级**。

国家规定的仪表精度等级有:0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4、5级精度,等等。

这样,知道了某一仪表的精度等级和量程范围,就能得到该仪表进行正常测量时所得结果的最大绝对误差。反过来,也可以根据测量要求的误差和量程来选择仪表。精度高的仪表意味着价格昂贵和维护困难,所以,合理地选择适当的仪表是很重要的。

在此指出准确度与精密度(precision)的关系是必要的。图示2-3-1说明了精密度高的仪表,其准确度也可能是差的(如图2-3-1(a)所示),精密度高仅表示多次测量的散差小,而准确度高则表示精密度高同时固有偏倚(bias)也小(如

图 2-3-1(b)所示)。去除偏倚(也称为偏移)主要依靠标定。

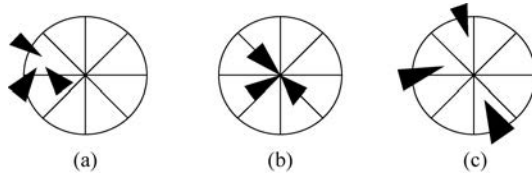


图 2-3-1 准确度和精密度图示

仪表的准确度是一种定性的说法。例如,一般不说准确度为 1%,而只是说准确度高或者低。但是,我们会说精密度为 1%。

3. 线性度 (linearity)

理论上具有输入-输出呈线性关系的仪表,最大偏离线性引起的误差与最大输出值之比的百分数称为线性度或线性误差,如图 2-3-2 所示。

线性度用公式表示为

$$e_L = (\Delta L_{\max} / r_{FS}) \times 100\% \quad (2-3-6)$$

仪表的输入-输出关系常采用线性拟合,拟合直线的斜率代表仪表常数,此时,线性度关系到仪表常数的误差。

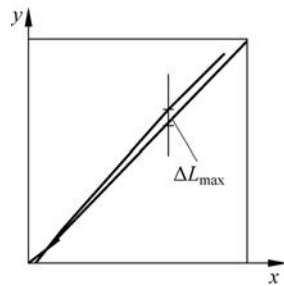


图 2-3-2 仪表的线性度

4. 重复性 (repeatability)

条件相同的情况下,输入按同一方向多次变动所得到的输入-输出曲线的不一致性即为重复性。 ΔR_{\max} 指量程范围内最大的输出差异。

重复性用公式表示为

$$e_R = (\Delta R_{\max} / r_{FS}) \times 100\% \quad (2-3-7)$$

有时候也指短时间内相同条件下对同一量值的多次测量结果的不一致性。这时候 ΔR_{\max} 指极差或者标准差。

在此顺便提及再现性 (reproducibility)。再现性或可再现性是指不同场地,或不同测量者,或不同测量仪器对同一量进行测量的结果一致性。

5. 分辨力 (resolution) 和 阈值 (threshold)

测量仪表能检测到的最小输入量的变化称为分辨力,有时也叫作分辨率。

例如,指针式仪表分辨力通常指最小刻度的 1/2; 数字仪表分辨力通常指所显示的最小有用读数。一般要求仪表的分辨力应在被测量允许误差的 1/10。

输入为 0 附近或最小量程处的分辨力为阈值。如零点附近严重的非线性、噪声等引起仪表需要在距离零点一段位置才能有效工作。不能引起输出变化的输入信号范围称为死区(dead zone)。

6. 稳定性(stability)

稳定性指输入不变的情况下,长期工作时仪表输出的变化,有时叫作零漂(zero-drift)。

稳定性问题常由温度、振动、湿度、电磁场等引起。

7. 灵敏度(sensitivity)

灵敏度指输出与输入两者微元变化之比,在输入-输出曲线中灵敏度表现为斜率:

$$k = \Delta y / \Delta x \quad (2-3-8)$$

敏感度误差:

$$\gamma_s = (\Delta k / k) \times 100\% \quad (2-3-9)$$

8. 迟滞误差(hysteresis error)

迟滞误差也叫变差,是仪表上行和下行的输入-输出曲线之间的最大偏差与最大输出值之比的百分数,如图 2-3-3 所示。

迟滞误差公式表示为

$$e_H = (\Delta H_{\max} / r_{FS}) \times 100\% \quad (2-3-10)$$

具有螺纹的正反行程,或铁磁元件等的仪表系统可能显现迟滞特性。

以上给出的指标不一定只用于描述仪表的静态特性,也不一定很全面,但在选择或使用仪表时应该对此有所了解。

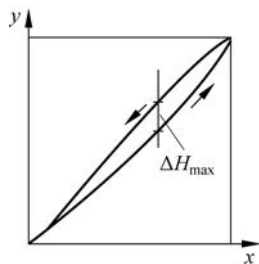


图 2-3-3 仪表的迟滞特性

2.4 仪表的动态特性(dynamic characteristics)

当仪表测量随时间变化的量时,还会表现出输出信号的变化与被测量的变化不一致,这种差别是仪表的动态误差造成的。下面介绍的是仪表动态特性的基本概念。

2.4.1 动态特性

仪表的动态特性是指测量仪表对随时间变化的输入量的响应特性。

动态输入包括周期、非周期、随机信号,等等。这些信号形式各异,但一般只采用正弦和阶跃两种输入来考察仪表的动态特性。

描述仪表动态特性的特征量包括:固有频率、时间常数、频率响应范围、稳定时间和阻尼比等。

2.4.2 动态特性的数学模型

在线性系统条件下,仪表的输入-输出关系可以用图 2-4-1 描述。

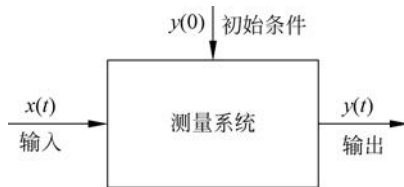


图 2-4-1 仪表的输入-输出框图

图 2-4-1 表示,在给定的初始条件下,测量仪表系统相当于一个转换器,它将输入量的变化转换为输出量。输出量 $y(t)$ 在仪表系统的工作点附近随时间的变化可用线性微分方程表示:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-4-1)$$

其中, x 为输入量; m 为输入量的阶数; y 为输出量; n 为输出量的阶数, $n \geq m$ 。当 $n=0$ 时,仪表为零阶,同理 $n=1$ 时为一阶, $n=2$ 时为二阶,以此类推。

通常我们会比较关心低阶仪表的特性,而高阶仪表可以分解成几个低阶仪表的组合。

1. 零阶(zero-order)仪表

微分方程:

$$a_0 y = F(t) \quad (2-4-2)$$

静态灵敏度:

$$k = \frac{1}{a_0} \quad (2-4-3)$$

零阶仪表的输出与输入总是成确定的比例关系。

考虑静态响应时所有仪表可看作零阶, k 是静态标定曲线在 x 处的斜率。

另外,响应很快的仪表也可以看作零阶的,如通过纯电阻的电流随电压的变化是瞬时完成的,则这时候纯电阻是零阶的。

2. 一阶(first-order)仪表

微分方程:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = F(t) \quad (2-4-4)$$

时间常数(time constant):

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2-4-5)$$

静态灵敏度:

$$k = \frac{1}{a_0} \quad (2-4-6)$$

具有惯性和能量存储的仪表属于一阶仪表。典型的一阶仪表有水银温度计(见图 2-4-2)。

如果对水银温度计感温包列出能量平衡方程(见图 2-4-3),则单位时间玻璃泡内虚线围成的感温包内能的上升等于热量的交换率(热力学第一定律):

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} \quad (2-4-7)$$



图 2-4-2 水银温度计结构

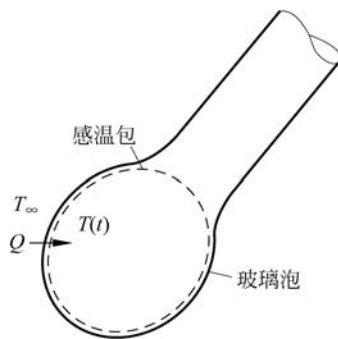


图 2-4-3 感温包内能量的平衡

式(2-4-7)中感温包内能的变化由给定质量的感温液的温度变化表示,而能量的交换由传热定律描述,所以,有

$$mc_V \frac{dT}{dt} = hA_s [T_\infty - T(t)] \quad (2-4-8)$$

整理得

$$\frac{mc_V}{hA_s} \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_\infty \quad (2-4-9)$$

所以

$$\tau = \frac{mc_V}{hA_s}, \quad k = 1 \quad (2-4-10)$$

其中, m 是感温液的质量; c_V 为比定容热容; h 是传热系数; A_s 是感温包表面积; T_∞ 为外界温度; $T(t)$ 为感温液在 t 时刻的温度。可以看到,整理后的方程

(2-4-9)是一阶的。

3. 二阶(second-order)仪表

二阶仪表的方程式为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = F(t) \quad (2-4-11)$$

时间常数 $\tau = \sqrt{a_2/a_0}$ ；固有角频率(natural frequency) $\omega_n = 1/\tau$ ；阻尼比(damping ratio) $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$ ；静态灵敏度 $k = 1/a_0$ 。

具有惯性和相当于弹性恢复力的仪表是二阶仪表。

地震仪是典型的二阶仪表,地震仪传感器部分原理示意图如图 2-4-4 所示。

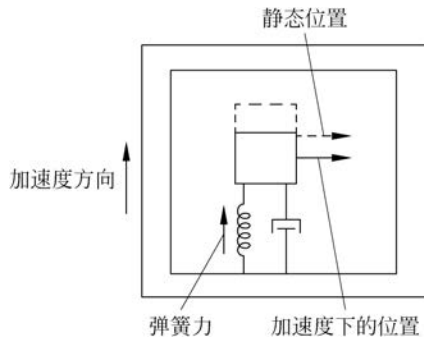


图 2-4-4 地震仪传感器部分原理示意图

图 2-4-4 所示的地震仪可以用与基座相对运动的质点振动方程描述：

$$m \frac{d^2 y_r}{dt^2} + c \frac{dy_r}{dt} + ky_r = A\omega^2 \sin(\omega t) \quad (2-4-12)$$

其中,基座的振动

$$y_h = A \sin(\omega t) \quad (2-4-13)$$

$$y_r = y - y_h \quad (2-4-14)$$

方程(2-4-12)中, y_r 是地震仪质量块相对外壳(地面)的振动幅值; y_h 是地面的振动幅值; ω 为地面振动的角频率。由于外壳随地面在振动,它是非惯性坐标系,所以对相对运动 y_r 列振动方程时增加了惯性力 $A\omega^2 \sin(\omega t)$ 项。

在电气系统中,一阶系统通常包含电容,二阶系统则包含电感。一阶电路见图 2-4-5。

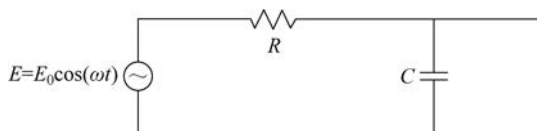


图 2-4-5 一阶电路

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = E_0 \cos(\Omega t) \quad (2-4-15)$$

二阶电气系统见图 2-4-6。

$$L \left(\frac{d^2 Q}{dt^2} \right) + R \left(\frac{dQ}{dt} \right) + \frac{Q}{C} = E_0 \cos(\Omega t) \quad (2-4-16)$$

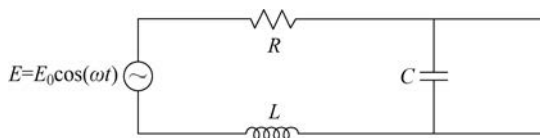


图 2-4-6 二阶电路

2.4.3 一阶仪表和二阶仪表对阶跃和正弦输入的响应

1. 阶跃输入

在时间域上的阶跃信号见图 2-4-7。

2. 一阶仪表对阶跃输入的响应

由于一阶仪表本身的惯性,其对于瞬时变化的阶跃信号表现出逐渐增长的响应,如图 2-4-8 所示。这种逐渐变化的快慢由仪表本身的时间常数 τ 决定。

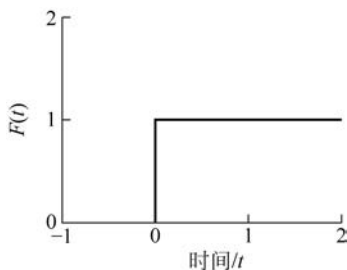


图 2-4-7 阶跃时间曲线

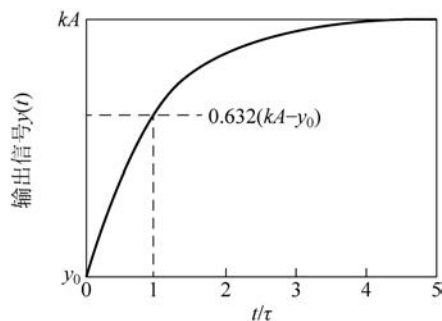


图 2-4-8 一阶仪表对阶跃输入的时间响应曲线

3. 一阶仪表对正弦输入的响应

正弦波信号是规则的周期性变化信号,其周期和最大振幅影响了仪表的输出。仪表一般表现为对不同频率输入的输出幅值不同,还有相位的滞后,或叫作相位移。图 2-4-9 中,实线表示输入的正弦信号,虚线表示输出响应。

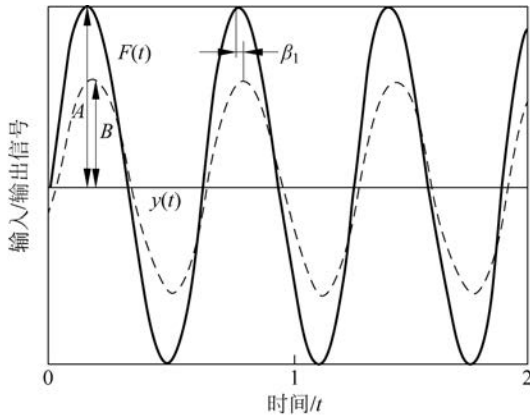


图 2-4-9 一阶仪表对正弦输入的时间响应曲线

4. 二阶仪表对阶跃输入的响应

二阶仪表的表现较一阶仪表复杂,在不同阻尼系数下对于阶跃信号的时间响应曲线见图 2-4-10,图中可以看到,阻尼由小到大,响应曲线先表现为振荡,在大阻尼时则表现为逐渐增长。

二阶仪表对于正弦输入信号的时间响应曲线类似于图 2-4-9(还应考虑阻尼影响),这里不再给出。

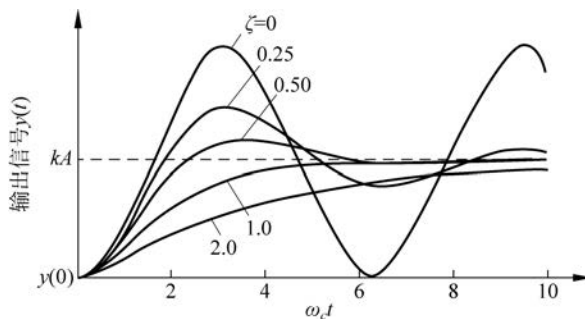


图 2-4-10 二阶仪表对于阶跃信号的时间响应曲线

2.4.4 传递函数 (transfer function)

事实上,在研究仪表的动态特性时,可以在频率的空间内进行,这就是传递函数法。

1. 像函数与原函数

对以时间为变量的函数 $x(t)$ 作拉普拉斯变换(Laplace transform):

$$X(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} x(t) dt \quad (2-4-17)$$

得到的 $X(s)$ 称为像函数, 而 $x(t)$ 则称为原函数。

由 $X(s)$ 得到 $x(t)$ 称为反变换, 通常由查表得到, 如表 2-4-1 所示。

表 2-4-1 常用函数的像

原 函 数	像 函 数
1	1/s
t^n	$n!/s^{(n+1)}$
$\sin(\omega t)$	$\omega/(s^2 + \omega^2)$
$\frac{d^n x(t)}{dt^n}$	$s^n X(s)$

2. 仪表的传递函数

设 $x(t), y(t)$ 的初始条件为 0, 重写式(2-4-1)如下:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-4-18)$$

经拉普拉斯变换后为

$$a_n s^n Y(s) + \dots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + \dots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \quad (2-4-19)$$

仪表的传递函数定义为

$$W(s) \equiv \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2-4-20)$$

令 $s = i\omega$, 然后分解 $W(s)$:

$$W(i\omega) = R_m + iI_m = kM(\omega)e^{i\varphi(\omega)} \quad (2-4-21)$$

$$M(\omega) = \sqrt{R_m^2 + I_m^2} / k \quad (2-4-22)$$

$$\tan\varphi(\omega) = I_m / R_m \quad (2-4-23)$$

其中, $M(\omega)$ 称为幅值比; $\varphi(\omega)$ 称为相位移; $i = \sqrt{-1}$ 是虚数。

3. 一阶仪表和二阶仪表的频率特性

(1) 一阶仪表

设一阶仪表微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (2-4-24)$$

定义时间常数 $\tau = a_1/a_0$, 静态灵敏度 $k = 1/a_0$, 并作拉普拉斯变换得到

$$(\tau s + 1)Y(s) = kX(s) \quad (2-4-25)$$

所以, 传递函数:

$$W(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2-4-26)$$

幅值比:

$$M(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\tau\omega)^2 + 1}} \quad (2-4-27)$$

相位移:

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\tau\omega) \quad (2-4-28)$$

采用时间常数 τ 和角频率 ω 的乘积作为变量, 画出一阶仪表的幅值比和相位移分别如图 2-4-11(a) 和 (b) 所示。

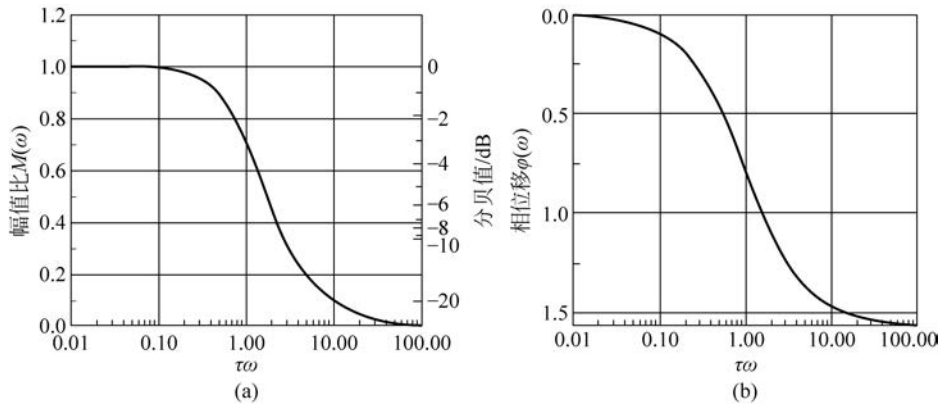


图 2-4-11 一阶仪表对于动态输入的频率特性

(a) 幅值响应; (b) 相位差响应

(2) 二阶仪表

二阶仪表经拉普拉斯变换后为

$$(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)Y(s) = kX(s) \quad (2-4-29)$$

得到

$$W(s) = k / (s^2 \tau^2 + 2\xi s \tau + 1) \quad (2-4-30)$$

$$M(\omega) = 1 / \sqrt{(1 - \omega^2 \tau^2)^2 + (2\xi \omega \tau)^2} \quad (2-4-31)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(2\xi \omega \tau / (1 - \omega^2 \tau^2)) \quad (2-4-32)$$

在图 2-4-12 的幅值响应曲线中,当阻尼比 ξ 较小时会出现共振现象,而在输入信号频率很大时响应幅值趋于很小。这两种情况对于仪表输出都是不利的,所以需要进一步定义仪表能正常工作的频率范围。

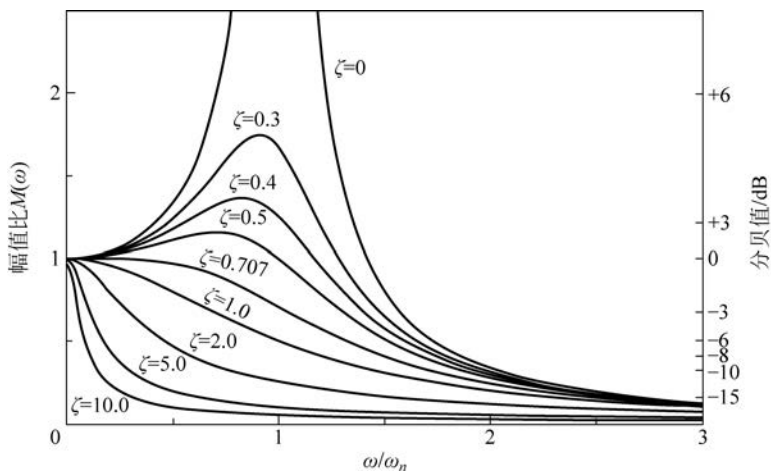


图 2-4-12 二阶仪表对于动态输入的频率特性(幅值响应曲线)

一般定义以下为通频带(transmission band):

$$0.707 \leq M(\omega) \leq 1.414$$

或

$$-3 \text{ dB} \leq M(\omega) \leq 3 \text{ dB}$$

其中,

$$N_{\text{dB}} = 20 \lg M(\omega)$$

当 $M(\omega) \geq 1.44$ 时的输入频率范围称为共振带(resonance band); 而 $M(\omega) \leq 0.707$ 时的频率范围称为过滤带(filter band)。

由于存在阻尼,因此仪表的输出对于输入会有相位上的滞后,这一特性用相位移表述,如图 2-4-13 所示。

2.4.5 相位移线性化

多数仪表设计在阻尼比 ξ 为 0.6~0.8,使得相位移与频率大致呈线性关

系,以保持波形变化最小。

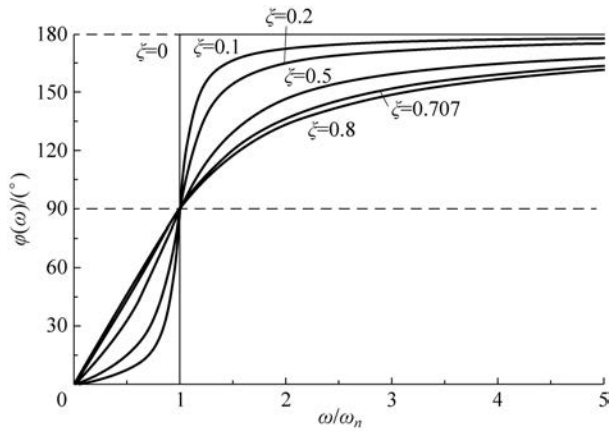


图 2-4-13 二阶仪表对于动态输入的频谱特性(相位移曲线)

2.4.6 多变量输入和偶合系统

对线性测量系统而言:如果输入变量为多个频率,则输出由每个输入响应的总和组成。如果多个仪表串联成一个测量系统,则系统总的传递函数等于每个仪表传递函数的乘积。

习题

1. 列举出两种常用的仪表,说出其功能部件。
2. 说明线性度、重复性、迟滞的区别。
3. 有一温度计,测量范围是 $0 \sim 1000^{\circ}\text{C}$,量程范围对应的指针转角差是 270° ,标称的精度等级为 0.5。对此温度计用标准表检验后得到如下数据:

标准表读数/ $^{\circ}\text{C}$	0	99	202	304	398	502	604	705	800	895	1000
被检表读数/ $^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

请问:

- (1) 读数的绝对误差和相对误差的最大值各是多少?
- (2) 此仪表是否满足标称的精度等级?
- (3) 此仪表的灵敏度为多少?

4. 某一测量系统可用以下模型来描述：

$$0.5 \frac{dy}{dt} + y = F(t)$$

如果输入信号 $F(t)$ 在 $t=0$ 时突然从 0 增加到 150 单位, 且 $y(0) = 100$ 单位。求：

- (1) 系统 y 的响应表达式；
- (2) 在同一图上画出输入信号曲线和系统幅值的时间响应曲线。