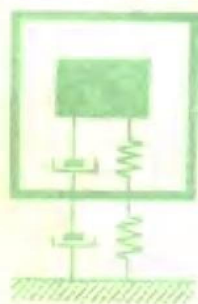


高等学校试用教材

非电量电测量

哈尔滨工业大学 郭振芹 主编



计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书以机械量的电测技术为主，以信息的变换与处理为编写体系。全书共十五章，可分为四部分。第一部分介绍非电量电测量技术的基本概念，测量误差的基本理论和测量传感器的静、动态特性。第二部分介绍各类变换器的变换原理、特性、测量电路及应用。第三部分介绍测量结果的显示与记录，以及信号的处理与分析。第四部分对传感器的标定方法作了介绍。

本书可作为高等院校电测技术与仪表制造专业的教材及有关专业的教学参考书，也可供从事非电量电测量工作的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

非 电 量 电 测 量

哈尔滨工业大学 郭振芹 主编

责任编辑 许宇凌

计量出版社出版
(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 32 1/2

字数 787千字 印数 1—13 000

1984年6月第一版 1984年6月第一次印刷

统一书号 15210·330

定价 4.60 元

前 言

本书是根据哈尔滨工业大学电测技术及仪表制造专业的《非电量的电测技术》教学大纲编写的。

由于非电量的电测技术在计量测试技术领域中的地位日益重要，许多学校都开设了类似的课程，有的侧重于设计，有的侧重于应用。但是系统地介绍这方面内容的书籍，目前国内还不多。我们在多年开设此课程经验的基础上，结合科研工作中的体会及利用国内有关产品的资料编写成此书。

非电量的电测技术是电测技术与仪表专业的必修课之一，内容十分广泛。根据近年来技术发展的趋势及生产应用的实际需要，我们打算以机械量的电测技术为主，以信息的变换与处理为系统来讲授此课程。限于篇幅，某些传感器如量子型的、光学的、核辐射、化学的传感器等本书不予介绍。

全书共15章，其内容可归结为四部分：第一部分介绍非电量电测量技术的基本概念，测量误差的基本理论和测量传感器的静、动态特性；第二部分介绍各类变换器的变换原理、特性、测量电路及应用；第三部分介绍测量结果的显示与记录，以及信号的处理及分析；第四部分简单介绍了传感器标定方法的若干实例。

这种体系的写法只是初步尝试，加之作者水平有限，经验不够，不妥之处在所难免，敬请读者给予指正，以便进一步修改。

本书可作为高等院校电磁测量技术及仪表制造专业的试用教材，也可供从事本专业工作的工程技术人员参考。

参加编写本书的有哈尔滨工业大学电测技术与仪表教研室郭振芹、张荣祥、赫继显、段尚枢、张玉忠、白俊山等同志，由郭振芹同志担任主编。审稿人尤德斐副教授对全书作了仔细的审阅，并提出了许多修改意见，对此表示深切的谢意。另外很多研究所和工厂为我们提供了丰富的资料，在此也一并感谢。

编 者

1983年3月

绪 论

测量是获得各种物理量和描述物理过程参数的唯一手段，所以工厂和研究单位在设计新的机械结构，改进某些装置，制定工艺过程中都需要测量许多物理量，以便研究它们的规律性，检验设计是否符合客观规律。在这些被测量中多数是非电量，例如：机械量（位移、振动加速度、速度、力、力矩、应变、应力等）；热工量（温度、压力、流量等）；化工量（浓度、成分、湿度、pH值等）。这些非电量早期多用非电的方法测量，例如用尺测量长度；用水银温度计测量温度。但是随着科学技术的发展，对测量的精确度、速度都提出了新的要求，尤其对动态变化的物理过程进行测量，以及对物理量的远距离测量，用非电的方法已经不能满足要求了，必须采用电测技术。用电测技术的方法对非电量进行测量，称为非电量的电测技术。其优点主要有：

1. 在很宽的被测振幅范围内能比较容易地改变仪器的灵敏度，并且具有较宽的全量限。
2. 电测装置有比较小的惯性，也就是有比较宽的频率范围。不仅能测量变化速度慢的物理量，也能测量变化速度快的物理量。
3. 非电量的电测技术是将非电量变成电信号后再进行测量的，而电信号又容易传送和控制，这就可以进行远距离的自动测量。
4. 对测量结果可用数字显示并进行数据处理，便于自动控制和分析。

非电量的电测技术首先应用在航空和机械制造业中，我国六十年代就已利用应变片测量飞机和机床的应变，为飞机和机床强度的计算提供必要的数据，对改进飞机和机床的结构发挥了很大的作用。当前又提出了动态特性测量问题，例如，当研究机床切削情况下的动态稳定性、自激现象和加工精度等问题时，利用压电式加速度计、力传感器或阻抗头测量刀架、床身等有关部位的加速度或点阻抗，从检验机床的动态特性，找出提高精度的薄弱环节。又如，通过测量切削力，可以研究金属切削机理，为制定切削用量，设计机床、夹具提供必要的切削力数据，也是评定刀架结构和刀具材料的重要依据。目前我国较多地采用应变式和压电式三向切削力传感器进行测量。此外还有采用压电式力传感器对切削力的大小和变化进行监视，检查刀具磨损，监测表面质量变化，防止机床过载，控制切削过程的平稳。有时还利用电容式或涡流式传感器测量轴承的油膜厚度，运动轨迹，以及主轴的挠度等等，其它就不一一列举了。

在动力工业中，为了保证大型电机和水轮机组的可靠运行，必须在运行过程中测量主轴的振动，以避免旋转部分和固定部分的碰撞。有时还要同时测量定子绕组和基座的振动，以便监视机组的工作，在超过允许值时发出报警信号。在设计过程中对主轴、转子、叶片等进行强度计算时，也需要测量它们的应变、振型、以及结构参数。

在国防工业中非电量的电测量技术应用更为广泛，一架飞机从设计开始，经过模型风洞试验，一直到样机的试飞都要经过严格的测试。为了研究飞机的静强度，要贴上数以百计的应变片。为了求得飞机的模态参数和各阶共振频率，需要对飞机进行多点激振和对所获信号进行分析。在试飞时还要测量发动机的转速、转矩；机上有关点的应力、振动、温度；管路内

的压力、流量、温度；油箱的液位、温度等。这些参数需要自动记录并送入计算机进行分析，为此这些参数的测量必须采用电测法。

在宇航技术中也大量地使用温度、压力、流量、压差、拉力、热流、流速、液位、线位移、角位移、加速度、振动、噪音、冲击、转速、攻角等传感器。它们的原理和民用的传感器基本一样，但在使用条件（安装、环境和测量范围）和精度要求以及相应的校准方法都在不同程度上与一般民用的有所不同，还有一个特点是要求体积小、重量轻、精度高、时间滞后小等，更重要的特点是可靠性要十分高。

在建筑、水利、化工、钢铁、石油开采、地震观测等部门也都广泛地应用非电量的电测技术。

非电量电测量技术的关键元件是传感器，传感器的发展直接影响它的水平。早期测量机械量的传感器主要是应变式、电感式、电容式等机械结构型传感器，它们利用机械结构的位移或变形来完成非电量到电量的变换，变换的精度和运动特性都满足不了要求。为了改善运动特性和提高精度，在六十年代前后出现了力平衡式传感器，精度可达0.05%，这种结构首先用在航空工业上，但是结构比较复杂，未能进一步发展。到了七十年代，由于新材料（低温度系数的材料，高磁能的磁钢等）、新工艺的出现，机械结构型传感器又得到了新的发展，传感器的稳定性和精度也有了新的提高，例如石英电容传感器、石英谐振式传感器等等。近年来，更多地发展了利用半导体、电介质、磁性体等固体元件构成的传感器。利用材料的压阻、湿敏、热敏、光敏、磁敏、气敏等效应把应变、湿度、温度等物理量变成电量的传感器称为物性型传感器。这类传感器向微型化，多用途，低成本的方向前进了一大步。

随着集成电路的发展，传感器配用的电路也小型化了，产生了将电路放在传感器内或放在半导体传感器的硅片上，并且在电路内进行传感器的温度补偿和非线性补偿等，从而使传感器的精度也得到新的提高。例如数字式硅压力传感器的非线性误差和滞后误差已达0.02%，最小的压阻式压力传感器最大外径只有2.74 mm，封装在一个螺钉中，使用时拧入飞行器的测压部位。

近两年来，由于大规模集成电路和微处理机的发展，有的国家又开始研制智能传感器，使高性能、低成本的微处理机和传感器整体化，智能化。这种结构可使大型实时处理系统由集中处理形式转换为分散处理形式。这是很有发展前途的传感器，它只要求传感器有好的重复性、稳定性，而传感器性能的改善，以及信号的进一步处理全依靠微处理机来完成。

综上所述，传感器正向高可靠、高精度、小型化、固体化、集成化、智能化方向发展。预计物性型传感器今后会大量生产，主要向低成本、小型化方向发展，并广泛用于家用电器、汽车、报警等方面。结构型传感器则向高精度方面发展，主要用在工业和科研部门。至于精密级的传感器虽然代表传感器的水平，但用量不会很大。

在编写本书过程中注意了下列几个特点：

1. 以非电量的测量系统为线索全面阐述各环节的组成，详细介绍各类变换器的原理、特性、线路和应用。对信号的显示、记录、分析处理和传感器的标定也作了相应的介绍。
2. 在讲述传感器时，以结构型的为主，物性型的为辅，并适当介绍一些新型结构，对有发展前途的频率式传感器作了较多的介绍。
3. 在讲述传感器时，以常用的应变式变换器为主，全面介绍了各个环节。其它变换器各章也自成体系，便于讲授时删减。

目 录

前 言

绪 论

第一章 非电量电测量的基本理论	(1)
§ 1—1 非电量电测量及测量仪器	(1)
§ 1—2 测量误差的基本理论	(6)
§ 1—3 机电模拟及双向传感器的统一理论	(19)
第二章 测量传感器的静态特性和动态特性	(35)
§ 2—1 传感器的静态特性	(35)
§ 2—2 传感器的动态特性	(44)
第三章 电阻式变换器	(69)
§ 3—1 电位器式变换器	(69)
§ 3—2 电阻应变片	(84)
§ 3—3 应变式传感器	(140)
§ 3—4 热电阻和热敏电阻	(162)
第四章 电容式变换器	(171)
§ 4—1 电容式变换器的工作原理及结构形式	(171)
§ 4—2 电容式变换器的灵敏度及非线性	(176)
§ 4—3 电容变换器的几个实际问题	(179)
§ 4—4 电容变换器配用的测量电路	(182)
§ 4—5 影响电容变换器精度的因素及提高精度的措施	(199)
§ 4—6 电容式变换器的应用	(202)
第五章 电感式变换器	(207)
§ 5—1 自感式变换器	(207)
§ 5—2 变压器式变换器	(220)
§ 5—3 电涡流式变换器	(236)
§ 5—4 压磁式变换器	(244)
第六章 磁电式变换器	(250)
§ 6—1 基本原理和结构	(250)
§ 6—2 基本参数的估算	(252)
§ 6—3 磁电式传感器的误差	(256)
§ 6—4 磁电式传感器的传递矩阵和频率响应特性	(259)
§ 6—5 磁电式振动速度传感器实例	(264)
§ 6—6 磁电式传感器的测量电路	(265)
第七章 压电式变换器	(271)

§ 7—1	石英晶体的压电效应	(271)
§ 7—2	压电材料	(277)
§ 7—3	压电式测力传感器	(280)
§ 7—4	压电式加速度传感器	(281)
§ 7—5	压电式传感器的测量电路	(288)
第八章	光电变换器	(293)
§ 8—1	光电效应	(293)
§ 8—2	光电管及光电倍增管	(294)
§ 8—3	光敏电阻	(297)
§ 8—4	光敏二极管及光敏三极管	(299)
§ 8—5	光电池	(301)
§ 8—6	光电变换器及其应用	(303)
第九章	热电偶变换器	(305)
§ 9—1	热电偶变换器的工作原理	(305)
§ 9—2	热电偶变换器的结构、材料及类型	(310)
§ 9—3	热电偶变换器的使用特性及误差	(316)
§ 9—4	热电偶测温线路	(326)
第十章	霍尔变换器	(329)
§ 10—1	霍尔效应及霍尔片的材料	(329)
§ 10—2	霍尔片的主要技术指标	(331)
§ 10—3	霍尔片的电路	(333)
§ 10—4	霍尔变换器及其应用	(335)
第十一章	频率式传感器	(337)
§ 11—1	振弦式传感器	(337)
§ 11—2	振筒式传感器	(346)
§ 11—3	振膜式传感器	(355)
§ 11—4	石英晶体谐振式传感器	(356)
§ 11—5	谐振梁式传感器	(364)
§ 11—6	数字式传感器	(366)
§ 11—7	非线性特性的线性化及温度补偿	(382)
第十二章	力平衡式传感器	(386)
§ 12—1	概述	(386)
§ 12—2	力平衡式传感器的工作原理	(388)
§ 12—3	力平衡式传感器的静态特性	(390)
§ 12—4	力平衡式传感器的动态特性	(392)
§ 12—5	力平衡式传感器开环增益的选择	(395)
§ 12—6	力平衡式传感器的校正电路	(398)
第十三章	测量结果的显示与记录装置	(401)
§ 13—1	X-Y 记录仪	(402)

§ 13—2 光线示波器	(403)
§ 13—3 磁带记录器	(415)
§ 3—4 记忆示波器	(426)
§ 13—5 有效值电压表	(428)
第十四章 信号处理及分析	(432)
§ 14—1 信号的分类与数学描述	(432)
§ 14—2 模拟分析法	(447)
§ 14—3 数字式分析仪	(466)
§ 14—4 谱窗和泄漏	(477)
第十五章 传感器的标定	(482)
§ 15—1 压电式振动传感器的校准	(482)
§ 15—2 力、压力标定装置	(491)
参考文献	(502)

第一章 非电量电测量的基本理论

§ 1—1 非电量电测量及测量仪器

一、测量的基本概念

人们在认识和改造自然界的过程中，总是要从各个方面，采用各种方法研究和观察事物的发展过程和规律，不可避免地需要采用测量手段获得研究对象在数量上的信息。测量是人们借助于专门的技术和设备，通过物理实验的方法取得某一客观事物量值的认识过程。测量是获得量值的唯一手段，它是将被测量与同性质的标准量通过一定的技术手段和方法进行比较，并取得被测量对标准量比值的比较过程。标准量是由计量部门通过量值传递获得一定精度的量。

测量结果一般可表示为

$$A = \frac{x}{X_0} \quad (1-1-1)$$

式中 x ——被测量； X_0 ——标准量； A ——比值。

可见，比值 A 的大小取决于标准量 X_0 的单位大小。因此在表示测量结果时，必须包含两个要素：一个是比值大小及符号（正或负）；另一个是说明比值 A 所采用的单位，不注明单位，测量结果将失去实际意义。

每一个测量过程都包括比较、示差、平衡和读数四个过程。例如用电流表测量电流，流过动圈的电流与磁场相互作用产生电磁力矩，它与游丝力矩（相当于标准量）相比较，比较结果产生的差值力矩驱使动圈转动，最后当两种力矩平衡时，指针停止不动，平衡过程结束，这时从仪表刻度盘上可以读出被测电流的大小，这样就完成了测量的全部过程。这里的标准电流值在出厂时已转化为游丝的标准力矩，并以电流值的形式刻在刻度盘上。

各种测量方法中，这四个测量过程并不都能那么明显区分，但深入分析这四个过程将有助于改善和简化测量仪器仪表的设计。

非电测量的对象是非电量。非电量是相对于电量而言的被测量。它在种类和数量上远比电量来得多而繁杂。在许多领域中需要测量的非电量，如机械量、热学量、化学量、光学量和声学量等等，都可以用非电的方法测量，但优越性远不如电测法。

非电量电测法具有如下优点：

(1) 极宽的测量范围。采用电子技术，用放大和衰减的办法很容易改变仪器的灵敏度，使测量仪器具有很宽的幅域。

(2) 电子测量仪器具有极小的惯性，因而既能测量缓慢变化的量，也可测量快速变化的量。采用电测技术将具有很宽的频域。

(3) 可实现远距离的非电量电测量。

(4) 有利于对信号进行各种运算和处理, 易于实现多种参数的自动巡回检测和生产的自动控制。若配用微处理机将能实现智能化测量。

二、非电测量仪器的组成

非电测量仪器是实现非电量电测量的物质基础。根据需要解决的测量任务的性质, 有必要区分下面三个术语。

(1) 测量对象: 测量对象是含有被测量的客观实体。由于内、外多种因素的影响, 测量对象赋予测量仪器的不仅是被测量, 而且还有其它多种干扰量。测量对象会表现出多种参量同时起作用的复杂现象和过程。测量的任务是排除诸干扰量的影响, 从中准确测量出被测量的量值。

(2) 被测量: 在测量对象的多种参数量中, 待测的单个参量, 称为被测量。

(3) 测量结果: 测量仪器最后给出的输出就是测量结果。它常以读数、曲线或参数的综合结果来表示。它的形式完全取决于测量任务的性质和测量者的具体要求。

分析非电测量仪器的构成, 了解各个环节的功能将有助于从整体上掌握和设计非电测量仪器。不论仪器多么复杂, 至少应将它看成是由以下三个基本部分组成的: 传感器、测量电路和输出电路, 如图 1-1-1 所示。

(一) 传感器

为实现非电量的电测量, 首先需要解决的是从非电量到电量的变换, 而这一变换主要靠传感器来完成。没有传感器, 应用电测技术测量非电量将是一句空话。

传感器又由两个基本环节组成, 见图 1-1-2



图 1-1-1



图 1-1-2

(1) 敏感元件(预变换器)。当具体完成非电量到电量的变换时, 并非所有的非电量都能利用现有的技术手段直接变换为电量, 必须进行预变换。就是说, 将被测非电量预先变换为另一种易于变换成电量的非电量, 然后再变换为电量。例如压力传感器中的膜片就是敏感元件。它首先将压力预变换为位移, 然后再将位移量变换为电容量。能完成预变换的器件称为敏感元件, 又称预变换器。此外, 在某些场合为了扩大现有变换器的应用, 也常采用敏感元件, 实现其它非电量到变换器输入端非电量的变换^①。例如应变片可以测量应变, 当采用应变筒作敏感元件时就可以将被测力预变换为应变, 再通过应变片就可以扩展到力的测量。

(2) 变换器(变换元件)。能将感受到的非电量直接变换为电量的器件称为变换器, 也称为变换元件。例如位移可直接变换为电容、电阻和电感的电容变换器、电阻变换器和电感变换器; 能直接把温度变换为电势的热电偶变换器。变换器是传感器重要的、不可缺少的组成部分。

因为有一些传感器并不包括敏感元件, 所以有时不加区别地把传感器称为变换器。

^①敏感元件也有输出电量的(例如热电偶、应变片), 此时就兼有变换元件的作用。

(二) 测量电路

传感器输出的电信号需要经测量电路进行加工和处理,如衰减、放大、调制和解调、滤波、运算和数字化等。

根据测量任务的难易程度、测量对象的复杂程度、被测量的种类和数量以及对测量结果提出的要求,有时可采用相当简单的测量电路制成简单的仪表,有时则要用相当复杂的电路,才能制成多种参数,多种功能的测量仪器和设备。

(三) 输出显示或记录设备

给出测量结果的是输出显示或记录设备。它能显示和记录数据和图形。由于测量任务不同,输出电路给出的测量结果的形式也不同,难易程度也不一样。最简单的显示方法是用表头指示。为了显示被测量的变化过程则常采用光线示波器、记录仪、屏幕显示器、打字机和磁带机等输出设备。

在划分非电测量仪器结构时,有的技术书籍和文献中也常把测量仪器的传感器部分称为一次仪表,而测量电路和输出电路部分合称为二次仪表。

在这两部分内,传感器占有极重要的地位。当测量环境比较复杂、要求测量精度高,特别是有些非电量难以有效地变换成电量时,传感器的设计和选用就成为能否完成非电测量任务的关键。

三、变换器的共同特性及分类

变换器是传感器不可少的重要组成部分,非电量到电量的变换是它的主要任务。变换器输出电量 y 与输入非电量 x 的函数关系称为变换函数 $y = f(x)$,也是灵敏度函数,它表示变换器输出-输入特性。变换器在实际应用时,输入作用量除了被测量 x 外,还有测量对象以及测量环境赋予变换器的许多其它影响参量,如气压、温度、湿度、声强、振动、辐射和电磁感应等,如图 1-1-3 所示。

因此,理想情况下变换函数应为一元函数。但实际上变换器的输出量受上述干扰因素的影响,因而实际上变换函数是多元函数 $y = f(x, \theta, P, A, \dots)$ 。这样,输出量 y 与被测量 x 将不能单值地对应,这是变换器所不希望的。所以设计测量变换器的重要任务是采用具有选择性能的变换元件。它们应具有抑制干扰,使干扰参量对输出量 y 的影响限制在最低水平的能力。因此,对于每一个变换器,应找出它的“固有输入量”,这就是说,在一切其它干扰因素存在的背景下,它能最好地感受输入量。各个因素变化量 dx 、 $d\theta$ 、 dP ...与所引起的输出量的变化 dy ,应存在下面的关系。

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial f}{\partial P} dP + \dots$$

上式中各增量 dx 、 $d\theta$ 、 dP ...的系数 $S_x = \partial f / \partial x$ 、 $S_\theta = \partial f / \partial \theta$ 、 $S_P = \partial f / \partial P$...分别为各影响量的灵敏度。具有最高灵敏度的影响量是变换器的固有输入量,其它影响量作为干扰参量。设计变换器时应把干扰量的灵敏度限制在相对最低的水平,使变换器的变换函数接近为固有输入

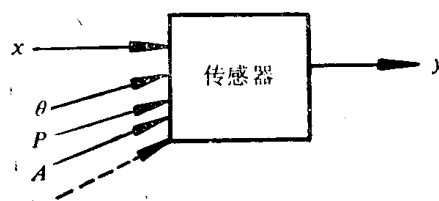


图 1-1-3

量的一元单值函数。例如热电偶变换器，它的输出电势对温度最敏感，而对其它如压力、振动等的灵敏度极低。又如压电加速度传感器应对轴向加速度灵敏度最高，而对横向振动加速度的灵敏度最低。

我们设计变换器时，还希望获得线性的变换函数 $y = S_x x$ ，因此，在寻求固有输入量时，还应使变换灵敏度 S_x 保持常数。

通过选择和改善变换器的固有变换特性，减小和控制干扰量（如恒温），采用线性化补偿等办法可以实现近似理想的一元一次线性变换函数。

在变换的输出过程中，变换器的输出量中也可能含有多种电参量的变化，如输出量为电阻，同时可能还有变化的电感量或电容量。同样在设计变换器时也应从中分离出一个“固有输出量”。这就是说输入量仅引起一种电参量的变化，不同时引起两种和两种以上输出量的变化。这在许多变换器中是比较容易实现的。在设计变换器时也需要注意这一点。

变换元件的物理特性、规律、定律是设计变换器的理论基础，寻求固有输入量必须从物理的基本原理入手。新的理论和物理特性是新型变换器研制的物理基础。

对变换器进行分类将帮助人们从总体上认识和掌握变换器。变换器可以有两种分类方法：按被测物理量和按输出量的性质来划分。

（一）按被测物理量分类

这是从方便使用者角度划分的，如加速度传感器、位移传感器、测温传感器……等。当需要测量某一非电量时，使用者从这种分类中选取一种，然后配上适当的电测电路就可以了。本书重点讲述的是测量机械量的传感器。按这种分类方法，可列出表1-1-1

表 1-1-1

基本物理量		派生的被测物理量	基本物理量		派生的被测物理量
位 移	线 位 移	长度、厚度、应变、振动	加 速 度	线加速度	振动、冲击、质量、应力、力
	角 位 移	偏 转 角		角加速度	角振动、角冲击、力矩
速 度	线 速 度	振动、流量、动量	力	压 力	重量、密度推力、力矩、应力
	角 速 度	转速、角振动、角动量			

这种分类方法只阐明了传感器的用途，然而把变换原理互不相同的变换器归为一类，这就很难看出每个变换器在变换原理上有什么共性和差异。这不利于从变换原理的物理基础上去认识变换器的内在规律。况且由于非电量种类繁多，按被测量的性质划分传感器将十分繁杂。从学习和设计的角度、不宜采用这种分类方法。

（二）按输出量的变换原理分类

这种分类能比较清楚地说明变换器的变换原理。它是按变换器输出电信号的性质划分的，从原理上说明了变换器如何实现从某一非电量到电量的变换，况且输出电参量为有限几种，如电压、电流、电荷、电阻、电容、电感、互感。这样的划分类别少，易于从原理上认识变换器

的变换特性，对于每一类变换器应配用的测量电路也基本相同，这样便于统一考虑和掌握变换器。若再配上适当的敏感元件还可以实现多种非电量的测量，这有利于扩大变换器的应用范围，使设计和应用更加灵活。如应变片变换器是属于电阻变换器的一种，它将应变变换为电阻变化，可以配用电阻测量电路，当加上弹性敏感元件可扩展到力、力矩、位移的测量。

这种分类方法列于表1-1-2。第一部分为电参数式变换器，变换器的输出量是电参数(电阻、电容、电感、互感)，这类变换器需要外附电源才能工作，因此它本身是无源的。第二部分为电量变换器，如电势、电荷等，一般它不需要外附电源，非电量可直接变换为电能，是有源的，又称为发电式变换器。

表 1-1-2

变换器分类	变换原理	变换器名称	典型应用
电参数式变换器	移动电位器触点改变电阻	电位器	位移、压力
	改变电阻丝或片的几何尺寸	电阻丝应变片 半导体应变片	位移、力 力矩、应变
	利用电阻的温度物理效应 (电阻温度系数)	热丝计	气流流速、液体流量
		电阻温度计	温度、辐射热
		热敏电阻	温度
	利用电阻的光敏物理效应	光敏电阻	光强
	利用电阻的湿度物理效应	电阻湿度计	湿度
	改变电容的几何尺寸	电容式压力计	位移、压力
		电容式微音器	声强
	改变电容介质的性质和含量	电容式液面计	液位、厚度
		含水量测量仪	含水量
	改变磁路几何尺寸、导磁体位置来 改变变换器电感	电感变换器	位移、压力
	利用压磁物理效应	压磁计	力、压力
	改变互感	差动变压器	位移、压力
	利用改变电的或机械的固有 参数来改变谐振频率	涡流传感器	位移、厚度
		振弦式压力传感器	压力
		振筒式气压传感器	气压
		石英晶体谐振式传感器	压力
电量变换器	电势	温差热电势	温度、热流
		热电堆	热辐射
		电磁感应	速度
		霍尔效应	磁通、电流
	电荷	光电效应	光强
		光致电子发射	光强、放射性
		辐射电离	离子计数、放射性
		压电效应	力、加速度

§ 1—2 测量误差的基本理论

一、测量误差的基本概念及表达方式

人们对客观世界的认识总是带有一定的局限性，与客观事物的本来面貌存在差异。测量是在一定的物质基础上进行的，因此，人们通过实践进行各种测量时，尽管被测量在理论上存在真值，但由于客观实验条件的限制，被测量的真值实际上是测不到的，因而测量结果只能是真值的近似值，这样就不可避免地存在着测量误差。

(一) 绝对误差

为了说明测量结果与被测量真值的近似程度，人们将测量结果的指示值与被测量的真值之间的差值称为绝对误差。它具有与被测量相同的量纲。可表示为：

$$\Delta_x = x - A_0$$

式中 x ——示值；

A_0 ——真值；

Δ_x ——绝对误差。

绝对误差越小说明测量结果越接近于被测量的真值。由于难以确切测出被测量的真值 A_0 ，所以实际上在应用上式时，总是用更精确的测量方法所测得的值来代替真值，我们称之为实际值 X_0 。上式则改为

$$\Delta_x = x - X_0$$

这时计算的误差值并不是客观的绝对误差，它具有一定的相对近似性，这在实际使用时，只带来误差的误差，因此与客观的绝对误差差别甚少。

在实验室和计量工作中，为了提高测量仪器的精确性，在测量结果中常常把已知的测量误差考虑进去，对测量结果进行修正。这样提出了修正值 α_c 的概念。

$$\alpha_c = X_0 - x$$

可见修正值 $\alpha_c = -\Delta_x$ 。

修正值可以在不同量程的各点上给出，或在同值的被测量的不同频率点上给出，形式可以是修正值表格或修正曲线。

(二) 相对误差

绝对误差可以说明被测量的测量结果与真值的接近程度，但不能说明不同值的测量精确程度。例如，用一种方法称 100 kg 的重物，绝对误差为 ± 0.1 kg；用另一方法称 10 kg 的重物，绝对误差也为 ± 0.1 kg。显然，前一种方法的测量精确度高于后者。为了表示和比较测量结果的精确程度，经常采用误差的相对表示形式。绝对误差与被测量真值的比值称为相对误差 γ_x ，它以无量纲的百分数表示。

$$\gamma_x = \frac{\Delta_x}{A_0} 100\%$$

在实际计算相对误差时，同样可用被测量的实际值来代替真值 A_0 。但这样在具体计算时仍不方便，因此一般取绝对误差 Δ_x 与示值 x 之比来计算相对误差。当测量误差很小时，这种近似方法所带来的误差可以忽略不计。

$$\gamma_x = \frac{\Delta_x}{x} 100\%$$

用测量的相对误差来评价上述两种称重方法是比较合理的。前一方法的测量相对误差为 $\pm 0.1\%$ ，后者为 $\pm 1\%$ ，显然前者测量准确度高。于后者。

(三) 引用误差

相对误差可用来比较两种测量结果的准确程度，但不能用来衡量不同仪表的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对测量误差不是定值，随着被测量的减小，相对误差也增大，当被测量接近于量程的起始零点时，相对误差趋于无限大。这样只用测量结果的相对误差来评价仪表的质量时会出现不合理的结论。如用满量程为50V的0.1级电压表测量5V电压，其绝对误差不超过 $\pm 0.05V$ ，而相对误差不超过 $\pm 1\%$ ；当改用满量程为5V的0.5级电压表测量同一被测量时，绝对误差不超过 $\pm 0.025V$ ，其相对误差则不超过 $\pm 0.5\%$ ，比较它们的测量结果，等级低的仪表测量结果的准确度反而高。为了更合理地评价仪表的测量质量，采用了引用误差的概念。人们将测量的绝对误差 Δ_x 与测量仪表的上量限（满度）值 X_m 的百分比定义为引用误差。

$$\gamma_0 = \frac{\Delta_x}{X_m} 100\%$$

电工仪表的精度等级就是用引用误差大小划分的。随着测量技术的发展及测量精度的提高，为了全面衡量测量精度，常常采用相对误差和引用误差（满量程误差）的综合表示法表达测量结果的准确程度。

二、误差的分类

研究测量误差的分类有利于从误差产生的原因、性质、规律去认识各类误差，提高仪器使用和设计者对各类误差的分析和处理的能力，提高仪器的设计和测量水平。

(一) 按误差产生的来源划分——工具误差和方法误差

1. 工具误差

工具误差是由测量设备中各个环节的不完善而产生的误差。诸如标准量具、元件、器件、附件等具体环节，由于它们所采用的材料、制造工艺、调整方法等方面不够完善，引起了各种物理参数的偏差，从而造成了测量的误差。例如仪表刻度不准、衰减器分压电阻调整误差、电容值随温度的变化，弹性元件的变形等。

2. 方法误差

方法误差是由于测量方法不完善或理论上的缺陷所引起的误差。例如，用一个质量不可忽视的加速度传感器去测量质量不大的被测对象的加速度，由于所采用的方法已改变了测量对象的状态，因而使被测量产生畸变。非线性特性在采用了线性化处理后所带来的误差也属于方法误差。

(二) 按误差出现的规律划分——系统误差、渐变误差、随机误差和粗大误差

1. 系统误差

系统误差是不随时间变化的、定值的或与某些参数成函数关系的、有规律的误差。系统误差的重要特点是可以采用修正值或补偿校正的办法几乎完全可以消除。例如，可用修正值消除刻度误差；零位误差也属于系统误差，只要在测量前调好仪器的零点即可消除。而那些与某

种因素成函数关系的、有规律的系统误差，只要人们认识它的规律就可以采用校正补偿的方法予以减小或消除。例如，磁电式传感器永久磁铁气隙中的磁感应强度随温度的变化，这是与温度有关的、有规律的系统误差，可以采用磁分流器的办法进行温度误差的校正。应变片电阻随温度的变化，可以用在电桥中加温度补偿片的办法进行补偿。对那些难以发现规律的系统误差，最好的校正方法是及时对仪器进行检定和校准。

工具误差和方法误差都属于系统误差，减小系统误差可以从每一个环节的元、器件带来的系统误差入手。但是过分追求高质量的元、器件，只能增加仪器的成本和制造难度。设计者的任务不应是全部选用高质量的元、器件，重要的是合理的设计和正确选择元、器件。设计和使用仪器和传感器时也应避免由于原理和方法上的不完善而带来的系统误差。但一台设计良好的仪器也会由于安装调试不当而带来系统误差。完善的安装调试设备和工艺水平是非常必要的。

2. 渐变误差

随着时间作缓慢变化的测量误差称为渐变误差。它们通常是由于仪表的某些零、部件和元、器件等在老化过程中，因物理特性发生变化而引起的。如机械零件内应力引起的变形，电阻和电容的老化引起的量值变化等。渐变误差的特点是单调的缓慢变化，而且往往难以掌握它们的变化规律，只能通过检定方法进行调整和校正。由于误差变化缓慢，经校正后可以在短期内保证测量精度。但经过一段使用时间后又会出现系统性的渐变误差，需要重新进行调整，这是与一般系统误差不同的地方。因此，针对渐变误差的特点必须对仪器和传感器作定期的检定。

3. 随机误差

随机误差是指服从统计规律的误差。在相同条件下，对同一未知量重复多次进行测量，在仪器灵敏度足够高的时候，每次测量的数据总不重复同一数值，测量数据的尾数彼此稍有差别。这是由于许多互不相关的独立因素的综合作用引起微量变化的结果。譬如零件的摩擦、间隙、各种干扰、热状态的微量波动、微弱的振动、操作者生理上查觉不出的变化等各种随机因素，使测量结果出现随机误差。就每次测量误差的个体而言，随机误差出现是没有规律的，不可预计它的大小和符号，而在多次重复测量时，测量结果的总体是遵从于统计规律的。

随机误差不能用实验的办法消除，但可以从理论上计算出它对测量结果的影响。随测量次数 n 的增加，随机误差 δ_i 的算术平均值 $\sum_{i=1}^n \delta_i / n$ 将逐渐减小，测量精度提高。

4. 粗大误差

它是一种由于某种过失引起的误差，它远远大于在具体条件下可能出现的测量误差。例如由于读数、记录和计算错误、不正确的操作、外界条件的突然变化等疏忽因素而带来的超出常规的误差。粗大误差为非正常条件下所得到的数据，是不可信的，在处理数据时，应从大量数据中剔除掉。

随机误差决定了测量的精度。如果测量结果被随机误差歪曲的程度越小，则测量结果就越精密。测量结果的精度以随机误差大小为准。如果测量的系统误差大，尽管测量数据的分散性不大，即精度高，但正确度差。只有系统误差小，而随机误差也小的测量，其测量结果可谓既精密又正确，即准确度高。准确度兼有精密度和正确度两种含义。

(三) 按使用条件划分——基本误差和附加误差

1. 基本误差

任何测量仪器和传感器都是在一定的环境条件下使用的。环境条件在变化, 测量误差也因环境条件(如温度、气压、湿度、电源电压和频率、振动等)的变化而改变。这样在对传感器和仪器进行检定和刻度时, 应把所有起影响作用的外界因素控制在变化较窄的条件内(例如, 温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 电源电压为 $220\text{V} \pm 5\%$, 湿度小于 80% ……)。此条件由国家标准或企业标准文件明确规定, 称为标准条件。仪器在标准条件下使用所具有的误差称为基本误差, 它属于系统误差。

不同等级的传感器和仪器的基本误差在国家或企业标准中都有明确规定。

2. 附加误差

当使用条件偏离标准条件后, 传感器和仪器必然在基本误差的基础上增加了新的系统误差, 称为附加误差。

不同等级的传感器和仪器在国家或企业标准中也规定了使用条件及所允许的附加误差。

(四) 按与被测量的关系划分——加和误差和倍率误差

1. 加和误差

它也称为零位误差。当被测量 x 为零、而输出量 y 不为零时, 则此误差称为零位误差。零位误差并不只是在输入量 $x = 0$ 时它才出现的误差, 而是与被测量 x 无关的恒定性误差。例如称重时, 测量前未调好零点。或者被测量中有局外物参与称重, 使测量结果中总是具有恒定的绝对误差。直流电路中的热电势、直流放大器未调好零点等无论输入量 x 为何值都给测量结果带来相等的绝对误差。如图1-2-1(a)所示的实际特性曲线2与理想特性曲线1偏差一个 Δ_0 值(图中为正偏差), 因此, 无论被测量 x 为何值, 总是有一个相等的 Δ_0 值叠加在

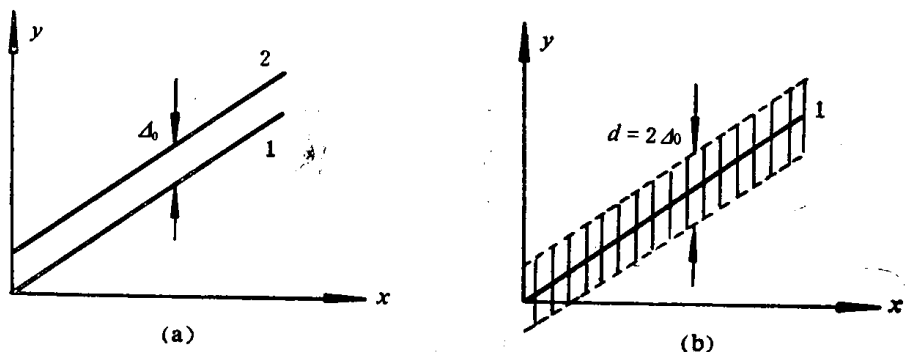


图 1-2-1

测量结果中, 所以它被称为加和误差。定值的加和误差是可以修正的。如在测量前, 可用机械的或电气的调零机构调好零位。零位误差也可具有随机性质, 如摩擦、绝缘漏电、记录笔的松动、不稳定的接触电阻等原因可带来随机变化的加和误差。这时, 实际的输出值 y 将在理想特性曲线1的两侧出现以 $\pm \Delta_0$ 为限的随机偏差, 形成了一条以理想特性曲线1为中心的误差带, 如图1-2-1(b)的阴影线所示。无论输入量为何值, 误差带具有相同的宽度 $d = 2\Delta_0$ 。随机加和误差是无法校正的, 设计和制造仪器时应尽可能降低这一项误差。

2. 倍率误差

它也称为灵敏度误差。变换器和装置的理想特性曲线通常是线性特性, 可用线性函数