



固体 火箭发动机 测试技术

黄俊 等编
范存杰

航空工业出版社

V435
1013

要 要 内

固体火箭发动机测试技术

黄 骏 范存杰 等编



30271230



航空工业出版社

1989

660191

内 容 提 要

本书是高等院校固体火箭发动机专业的教材。着重介绍测试技术的基本理论、常用测试仪表的基本原理和特性、以及一些基本参数的测量与处理方法等。全书共十章，主要包括：测量系统的特性；常用变换器和传感器；推力、压力及温度测量；常用记录仪器；微型计算机和数据采集系统；干扰及抑制方法；误差分析与数据处理等。

本书可作为高等院校相应专业的教材，也可作为从事动力、机械、测量等专业的科技人员的参考书。

固体火箭发动机测试技术

黄 骏 范存杰 等编

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)

邮政编码：100013

全国各地新华书店经售
北京市通县向阳印刷厂印刷

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

开本：787×1092毫米1/16 印张：13

印数：1-600 字数：309千字

ISBN 7-80046-132-7/V·020

定价：2.80元

前 言

本书是航空高等院校固体火箭发动机专业统编教材之一。由北京航空航天大学及西北工业大学合作编写。可作为从事动力、机械等专业技术人员的参考书。

测试技术近年来发展很快，且涉及到学科门类较多。限于篇幅，在编写过程中，省略了繁杂的数学推导和设计计算。着重介绍一些测试技术的基本理论、常用测试仪表的基本原理和特性，以及一些基本参数的测量与处理方法。为使读者对固体火箭发动机测试技术有较广泛的了解，在第一章中对一些先进的技术作了简略的介绍。

全书共十章，主要内容包括：测量系统的特性；常用变换器和传感器；推力、压力及温度测量；常用记录仪器；微型计算机数据采集系统；干扰及抑制方法；误差分析与数据处理等。

参加编写的有黄骏(第一、四、七章)、范存杰(第二、三、五章)，陈步学(第六、十章)、陈德新(第八、九章)。本书由北京航空航天大学黄骏主编，西北工业大学范存杰担任副主编。由北京理工大学周生国对书稿作了详细的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。此外，谨向为本书出版付出辛勤劳动的同志表示衷心感谢。

由于编者的水平和实践经验有限，错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1988年9月

目 录

前言	
第一章 概论	(1)
§1-1 测试技术在科学试验中的作用	(1)
§1-2 固体火箭发动机试验测量的特点	(2)
§1-3 固体火箭发动机试验测量的新技术	(3)
第二章 测量系统的特性	(6)
§2-1 测量系统的组成	(6)
§2-2 测量装置的静态特性	(7)
§2-3 测量装置的动态特性	(10)
第三章 常用变换器及传感器	(30)
§3-1 电阻应变式变换器	(30)
§3-2 电感式变换器	(42)
§3-3 电容式变换器	(44)
§3-4 压电式变换器	(48)
§3-5 几种变换器组成的传感器	(51)
第四章 固体火箭发动机试验技术	(60)
§4-1 推力和压力测量技术	(60)
§4-2 推力和压力测量系统静态标定	(64)
§4-3 压力测量系统的动态标定	(70)
§4-4 固体火箭发动机试验台	(75)
§4-5 推力和压力试验曲线的数据处理	(79)
第五章 温度测量	(81)
§5-1 温标	(81)
§5-2 热电偶	(83)
§5-3 电阻温度计	(97)
第六章 常用记录仪器	(101)
§6-1 光线示波器	(101)
§6-2 磁带记录仪	(110)
§6-3 数字信号处理机	(117)
§6-4 瞬态波形存贮器	(120)
§6-5 高速摄影	(124)
第七章 数据采集系统	(132)
§7-1 概述	(132)
§7-2 信号调节器	(133)

§7-3	放大器	(139)
§7-4	采样与模/数转换	(147)
第八章	微型计算机在测量中的应用	(156)
§8-1	微型计算机测试系统	(156)
§8-2	微型计算机测试系统软件介绍	(160)
第九章	测量系统的干扰及其抑制方法	(172)
§9-1	概述	(172)
§9-2	测量系统的噪声源及噪声的传输途径	(174)
§9-3	抑制干扰的措施	(176)
第十章	误差分析及数据处理	(181)
§10-1	误差的基本概念	(181)
§10-2	偶然误差	(183)
§10-3	间接测量的误差传递	(189)
§10-4	试验数据的处理	(192)
主要参考文献	.....	(199)
(1)	.....	1-12
(2)	.....	1-13
(3)	.....	1-18
(4)	.....	1-18
(5)	.....	1-28
(6)	.....	1-28
(7)	.....	1-28
(8)	.....	1-28
(9)	.....	1-28
(10)	.....	1-28
(11)	.....	1-28
(12)	.....	1-28
(13)	.....	1-28
(14)	.....	1-28
(15)	.....	1-28
(16)	.....	1-28
(17)	.....	1-28
(18)	.....	1-28
(19)	.....	1-28
(20)	.....	1-28
(21)	.....	1-28
(22)	.....	1-28
(23)	.....	1-28
(24)	.....	1-28
(25)	.....	1-28
(26)	.....	1-28
(27)	.....	1-28
(28)	.....	1-28
(29)	.....	1-28
(30)	.....	1-28
(31)	.....	1-28
(32)	.....	1-28
(33)	.....	1-28
(34)	.....	1-28
(35)	.....	1-28
(36)	.....	1-28
(37)	.....	1-28
(38)	.....	1-28
(39)	.....	1-28
(40)	.....	1-28
(41)	.....	1-28
(42)	.....	1-28
(43)	.....	1-28
(44)	.....	1-28
(45)	.....	1-28
(46)	.....	1-28
(47)	.....	1-28
(48)	.....	1-28
(49)	.....	1-28
(50)	.....	1-28
(51)	.....	1-28
(52)	.....	1-28
(53)	.....	1-28
(54)	.....	1-28
(55)	.....	1-28
(56)	.....	1-28
(57)	.....	1-28
(58)	.....	1-28
(59)	.....	1-28
(60)	.....	1-28
(61)	.....	1-28
(62)	.....	1-28
(63)	.....	1-28
(64)	.....	1-28
(65)	.....	1-28
(66)	.....	1-28
(67)	.....	1-28
(68)	.....	1-28
(69)	.....	1-28
(70)	.....	1-28
(71)	.....	1-28
(72)	.....	1-28
(73)	.....	1-28
(74)	.....	1-28
(75)	.....	1-28
(76)	.....	1-28
(77)	.....	1-28
(78)	.....	1-28
(79)	.....	1-28
(80)	.....	1-28
(81)	.....	1-28
(82)	.....	1-28
(83)	.....	1-28
(84)	.....	1-28
(85)	.....	1-28
(86)	.....	1-28
(87)	.....	1-28
(88)	.....	1-28
(89)	.....	1-28
(90)	.....	1-28
(91)	.....	1-28
(92)	.....	1-28
(93)	.....	1-28
(94)	.....	1-28
(95)	.....	1-28
(96)	.....	1-28
(97)	.....	1-28
(98)	.....	1-28
(99)	.....	1-28
(100)	.....	1-28

第一章 概论

§1-1 测试技术在科学试验中的作用

测量是科学工作者对客观事物所发生的现象取得数量观念的一种认识过程。这一过程可通过试验方法,借助于专门的试验设备和仪器,取得用测量单位表示的未知量的大小。现代科学技术的发展多建立在实验科学的基础上,而实验科学的结论又是对实验数据进行统计和推断的结果。所以在科学技术发展的过程中,试验与测量工作中所取得的实验数据,不仅是验证理论的客观标准,而且也是发现新问题,提出新理论的线索和依据。而测量与试验的水平又依赖于科学技术的进步,两者互相依存而发展。因此试验与测量技术的状况也就反映出科学技术的水平。

固体火箭发动机的发展过程也是与测试工作息息相关的。固体火箭发动机虽然结构简单,但是它在工作中的物理化学过程却十分复杂,因此对它的研究也是非常困难的,至今也没有完全清楚的掌握它的规律。当然也就不能单以理论计算来设计制造一个性能优良的发动机。几乎毫无例外地一个新型发动机的研制,都必须经过反复的试验,通过实验取得数据用以改进设计并以实验作为技术鉴定的手段。对大量测试工作取得的数据资料进行统计、总结从中寻求规律性的东西,依此不仅可以改进提高发动机的性能,并可完善和发展发动机的理论。比如,早期在使用双基推进剂的固体火箭发动机中出现反常燃烧的现象,当时由于测试手段比较落后,只能用铜柱测压器测量燃烧过程中燃烧室内的最大压力*值,而不能测出燃烧全过程的压力变化规律,因此无法揭露反常燃烧现象的本质。后来由于测量技术的发展,能够记录下燃烧室压力随时间的变化规律后,发现双基推进剂要维持正常的燃烧必须使燃烧室内的工作压力超过推进剂的临界压力值,因而得出了极限压力这一概念。发动机的工作是否正常只决定于极限压力是否高于推进剂的临界压力值,而与最大压力无关,从而确定了保证发动机正常工作的设计原则。又如,随着高能推进剂被广泛采用,不稳定燃烧的现象也越来越突出,要研究不稳定燃烧,没有动态测量的技术,就不能揭露它的本质。随着动态参数测量技术的发展,也就逐步揭示了不稳定燃烧的机理。

随着火箭技术的发展,实验科学也在不断进步,研究的对象和内容也愈加广泛和深入,因此对测试技术提出了越来越高的要求。测试技术是一门涉及学科领域很广泛的科学技术,它将涉及到力学、电子学、光学、机械学以及近代理论和边缘交叉的综合科学,而且又往往与被研究的对象紧密地结合在一起。

本课程将介绍一些有关固体火箭发动机测试工作中常用的测试系统,常用的设备和仪器,误差的基本理论和应用;介绍一些实验结果的分析 and 数据处理方法;介绍几种主要的发动机参数测量技术,以便读者在试验测量工作中能够合理地选用测量仪表,正确地设计试验

*为适应工程应用习惯,本书仍采用压力一词,未采用压强,请读者注意。

和处理实验结果，扩大有关测试技术的知识面，为今后独立开展试验研究和测量工作打下基础。

§1-2 固体火箭发动机试验测量的特点

在固体火箭发动机试验中，除了要观察试验过程中所表露出的各种现象外，更主要的是采用一定的测试手段，测量并记录下我们所关心的参数的数值和变化过程，作为定量分析的依据。这就要求除了掌握测试技术以外，还要对被测试对象的特征有所了解，以便正确地采用经济合理的测试手段。

在进行固体火箭发动机试验测量时，必须充分考虑固体火箭发动机的以下几个特点：

1. 固体推进剂火箭发动机在很短的工作时间内，固体推进剂在燃烧室内将释放出巨大的能量，这种高度集中的能量造成了高温、高压、高速燃气流动。燃气压力高达 $3 \sim 25 \text{ MPa}$ ，燃气温度 $2000 \text{ K} \sim 3000 \text{ K}$ ，喷管出口气流速度约为 2000 M/S ，这样严酷的条件，给测试工作带来极大的困难。因此，要求测试用的仪表能够承受压力冲击和振动、高温烧蚀和化学腐蚀等，以保证测试工作正常进行。

2. 固体推进剂火箭发动机的燃烧过程基本上是一种不可控的过程，其工作时间短而各种参数变化又非常快，一般没有较长的相对稳定阶段，有时有些参数还具有较高的频率。因此要求整个测量系统要惯性小，要有较宽的频率响应范围，要求测量系统能够自动记录试验的全过程，并能存储全部的信息以便试验后进行数据处理，或用计算机进行实时处理。

3. 发动机在工作时将伴随着强大的振动和噪声，有时还有毒性、腐蚀性和爆炸的危险，为了保证实验人员的安全和健康，保护贵重的仪器仪表，必须用远距离操纵和测量的方法。因此在固体火箭发动机试验测量中，均采用非电量电测法。这样不仅可以遥测，自动化测量，而且提高了精度。

目前由于国防和宇宙航行的日益发展，在火箭发动机上采用高能推进剂提高发动机的推进效率；正确分析和预估发动机性能；建立合理的推进剂燃烧模型等，都是当前迫切需要解决的重要课题。在新型固体火箭发动机研究过程中，除了需要对整个发动机进行试验外，还需要进行多种单项课题的实验研究。这些实验除具有发动机试验的全部特点外，尚有它本身独特的要求，如需要测量温度场、流场、密度场、燃烧产物的颗粒大小和燃气成份等等。

从目前固体火箭发动机试验研究的内容看，它所包含的测量内容非常广泛而特殊。根据不同实验内容的不同要求，所要测量的参数也各有差异，测量系统和测量方法也不相同，即使对同一种被测参数，其测量系统和测量方法也不尽相同。因此要求我们不仅要掌握课内介绍的有限的测量方法，而且还应更广泛的了解各种测量系统及测量方法的原理和特点，并与被研究的对象紧密的联系在一起，才能正确、可靠、经济、合理地设计出最佳实验方案以取得理想的试验结果和经济效益，这是我们做研究工作和科学实验工作所必备的技能。

* §1-3 固体火箭发动机试验测量的新技术

随着科学技术的发展,特别是70年代初,由于大规模集成电路和微型计算机的问世,测量技术和测量仪器仪表发生了重大的变革,因而推进了测量过程的自动化、测量数据的数字化和测量仪器的智能化。测量仪器很多都采用了以微型计算机为核心的采集、调整、控制、放大、处理等完整的系统。它不仅依靠硬件,而且越来越多地依靠软件来提高自动化程度,实现仪器的多功能和高精度优异性能。完全取代了人工判读、计算和数据处理,以至自动地将数据按要求造出各种表格和绘制各种特性图。这种新型的仪器大多属于专用,每一种仪器只适用于某一特定的参数测量和数据处理。在不具备新型测量系统的条件时,那些传统的常规的仪器和人工数据处理的手段,在科学试验中依然是占据很重要的地位,也是实验测量工作的基础。以后各章节将介绍这些常规的测量方法。本节简要介绍一些新发展的测量手段,用以开扩思路,扩大知识面。

一、新型传感器

在测量系统中,最重要的测量环节之一就是传感器。它具有实现信息检测、转换和传输的重要功能。传感器的不断更新和发展扩大了被测参数的范围,提高了测量精度,促进了试验测量工作的发展。由于半导体、微型计算机、光电子学、纤维光学、铁电体、声学 and 材料学的发展,新型传感器不断问世,其特点如下:

1. 传感器固态化 固体传感器大体有三类,即半导体、电介质体和强磁体。其中最重要的是半导体传感器,它的响应速度快、体型小、重量轻,便于实现传感器集成化和功能化。目前出现的许多新原理传感器是用压电体、热释电体、铁电体和强磁性体等材料制成。如力敏、热敏、光敏、磁敏和气敏等多种用途的传感器。

2. 传感器多功能化、集成化 现代传感器已向多功能化和集成化发展。所谓多功能化就是使传感器具有多种参数检测功能以及其它功能。而集成化是把传感器部分与信号处理或转换电路、放大电路部分用半导体集成技术制做在同一个基片上。目前已有集成压力传感器、集成温度传感器、多功能气体传感器等等。

3. 传感器图象化 传感器的研究使得传感器已不仅用作一个点的参数测量,而是制成多维图象传感器,现在已研究成各种二维的图象传感器,其中已有几种全固态化摄像器件取代摄像管,此外还有用压电元件,霍尔元件组成的图象传感器,它在测量、控制、信息处理等方面的用途很广泛。

4. 光纤传感器 目前各国都十分重视光纤传感器的应用与开发,光纤传感器是用光作信息载体的光测量。传感器技术具有很多突出的特点,可进行非接触测量和高灵敏度测量。随着微光电子技术的发展,光纤传感器的应用领域越来越广泛。光纤是采用化学性能稳定的玻璃、塑料等材料制成,具有耐热、耐水、耐腐蚀性,可在具有腐蚀的恶劣环境中可靠地使用。它的绝缘性好,不导电也不易受杂散电场的影响,还能避免环境光的干扰。已被开发的光纤传感器种类很多,其中用于检测的传感器种类也很多,如电流、磁场、声压、应变、温

*为开扩知识面,本节简要叙述一些与本专业有关的测试新技术,供学生学完全书后参阅。

度、振动、流速、浓度等多种类型。下面简要介绍几种光纤传感器的原理。

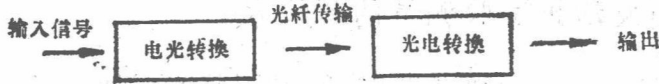


图 1-1 电-光直接转换型

(1) 电-光直接转换型 如图 1-1 所示。电流、电压信号经发光二极管(LED)等电-光变换器进行发光强度调制, 然后光信号经光纤

传输给光-电变换器, 再把光转换成电信号由记录仪器把模拟信号记录下来。由于光信号在光纤内传输, 可以避免环境杂散电磁场干扰, 因此可获得高质量的信号。

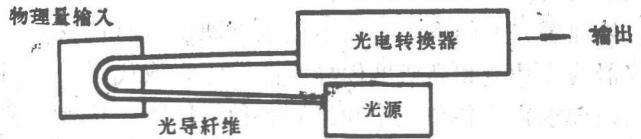


图 1-2 光纤直接调制型

(2) 光纤直接调制型 如图 1-2 所示。选用某些光纤在温度、压力、应变等作用下具有折射率、传输损耗或光纤长度变化等特点, 使光源发出的光随被测物理量的变化而变化, 再由光电转换器转换成电信号, 用其他记录仪表记录。

(3) 单端型 如图 1-3 所示。直接用光纤或特殊的光纤探头收集检测对象的信息导入光纤, 典型应用如辐射式光纤温度计。这种温度计是在光纤末端用铯和氧化铝的薄膜包覆, 形成一个能全部吸收辐射能的黑体腔。将其插入热气流时, 铯腔辐射一个由许多波长组成的非常强烈的光。光纤把铯腔的光送至远端的探测器或光电转换器, 再由记录仪表记录。

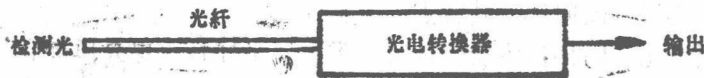


图 1-3 单端型

二、现代光学测量技术

现代科学技术的发展十分迅速, 就以固体推进剂火箭发动机的燃烧流场的测试来说, 用一般的传感器和测试方法已不能满足要求, 自从激光的问世, 开辟了光学测量技术的新纪元, 它与高分辨率的光谱技术、高灵敏度高频响的光电检测技术以及先进的电子信号处理系统相结合, 促进了非接触式的激光测量技术。

1. 激光多普勒测燃烧流场的流速 激光测流速有多种型式。根据工作原理不同, 可分为激光多普勒测速、激光双焦点测速和激光干涉仪测速等几种。目前普遍采用的是多普勒测速。多普勒测速的原理是利用光的多普勒效应。如图 1-4 所示, 由激光器发出的一束激光,

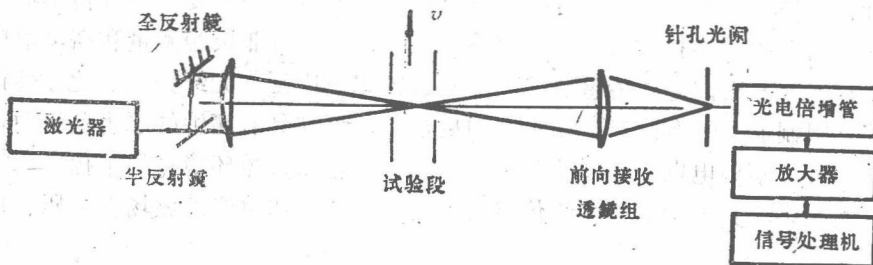


图 1-4 激光多普勒测速示意图

经分束器分为光强相等的两束相干光，再经发射透镜相交于测量点。流体中的运动粒子经过这两束光的相交区时，就会发出散射光。相对于光束Ⅰ和光束Ⅱ，运动粒子所分别发出的两种散射光波频率已不是激光器发出的初始频率，而是分别发生了第一次多普勒频移后的光波频率。粒子散射光由光电倍增管接收，并使两种相干的散射光发生混频。光电倍增管对两束光混频后的差频进行检测，并转变为电频信号，这一信号的大小正比例于流速。

激光测流速是一种非接触式测量方法，它不干扰流场特性，测流速的方向灵敏，精度高，平均采样体积小于0.1立方毫米，每点采样时间小于几毫秒，测量流速的范围宽从每秒几微米到每秒几千米。目前已有一维、二维、三维的激光多普勒测速仪用于科研工作。

2. 光学测温 燃烧流场的温度测量是长期未能很好解决的问题，而燃烧温度却又是表征燃烧过程的重要参量。热电偶虽然是一种很好的测量手段，但它已不能胜任燃烧流场的高温燃蚀和高速气流的冲刷，不能测微域和瞬时的温度，还会破坏流场。用以激光为光源的非接触测温方法可以克服上述测量上的困难。激光喇曼散射光谱测温法就是其中一种。

六十年代以前由于光源的限制，喇曼光谱的应用远不如红外吸收光谱的应用广泛。自从激光问世，喇曼光谱术得到了迅速的发展。激光喇曼散射光谱技术主要应用之一就是测量燃气温度。喇曼光谱测量原理是，喇曼散射功率正比于入射光的功率和原始能级上布居的散射分子的数量密度。当气体处于热平衡条件下，分子的数量与所处能级之间的关系应符合玻尔茨曼分布定律。当温度不变时，处于能级越高，分子数目越少。当温度升高时，布居在高能级的分子数就会增多，呈指数变化。因为喇曼光谱的光强正比于分子数，所以它也是气体温度的函数，分析喇曼光谱的变化就可以获得气体温度数据。

3. 全息技术 应用全息技术解决燃烧流场的测量问题是近几年发展起来的，全息术以它的非接触性和冻结的三维特性表现出优越的特点。全息照相可以测量固体推进剂燃烧流场中粒子的尺寸、数量密度和速度，流场的密度和温度梯度等。采用激光作全息照相的光源，可将全息术扩大到火焰测量上，使一些发光过程也能在感光底片上清晰地记录下来。用脉冲激光器可拍摄火焰中颗粒的全息图象。全息图象用自动颗粒处理系统作自动识别，自动识别的速度很快，可在0.1秒内扫描 2.5×10^6 个粒子，空间分辨率很高，但灰度识别力低于人的眼睛。

用二次曝光全息照相法，不仅可以定量分析颗粒尺寸和尺寸分布，也可以测量颗粒运动的速度。用不同方向的参考光束将不同瞬时粒子的两个成象用全息照相记录在同一张底片上，粒子的图象可分别再现。测量两次脉冲间隔中粒子跳动的距离，就可以计算出该粒子的运动速度和方向。两次脉冲间隔的全息图可测粒子速度范围从1厘米/秒~1000米/秒。

全息干涉系统可以用来测量采样区的密度和温度分布，通常用二次曝光法来获得全息干涉图象。流场未扰动时进行第一次曝光，流场扰动后(燃烧时)进行第二次曝光，两次曝光的全息图记录在同一张底片上。根据两次曝光所得的条纹对比，可以求出流场内各点条纹的位移数，再用计算方法算出密度和温度数据。

非接触测量方法省去了与被测参数场直接接触的传感器，省去了信号传递的传输线，但必须近距离测量，被测发动机或试验器还需留有透明窗口，给这些测量方法带来不方便和局限性。尽管如此，它还是具有不可比拟的优越性。由于这些新技术比较复杂，涉及的学科面广，本节仅介绍一些概况以扩大知识面，有关详细的工作原理和应用，请参阅有关书籍。

第二章 测量系统的特性

§2-1 测量系统的组成

测量系统是指能完成一定测量任务的、若干元部件和仪器的组合。用非电量电测法组成的测量系统，一般由传感器、中间调节部分、显示记录仪器和采集处理仪器等构成。见图 2-1。



图 2-1 测量系统框图

为了叙述方便，将传感器、测量与记录仪器或测量系统统称为测量装置。而将被测量（如压力、推力、温度等）统称为输入。将测量装置的指示值或记录称为输出或响应。

将被测物理量直接转换为相应电量的装置称为传感器。传感器往往主要由敏感元件和变换器两部分组成。敏感元件直接感受被测量并将其变为另一种形式的物理量。变换器则是将敏感元件转换成的物理量变为相应的电量。例如用电阻应变式荷重传感器测量发动机推力时，传感器中的敏感元件——应变筒将力变成形变（应变），而贴在应变筒上的电阻应变片则将应变转换为电阻值。有时敏感元件和变换器成为一体，如用来测温的热电偶，它既直接感受温度，同时又将温度转换为电势。

中间调节部分通常包括测量电桥、调制、放大、解调、积分、微分、模数转换等电路。其作用是将传感器输出的信号调整为合适的电压、电流或其他适当的形式，然后传输到下一个环节。

常用的显示和记录仪器有：指针式仪表、电子示波器、光线示波器、磁带记录仪、瞬态波形记录仪、记忆示波器，高速摄影机等。

通过测量系统把被测参数记录下来，就测量过程本身来说已经结束。但所记录下来的只是一些原始数据，它往往还不能作为最终结果提供使用。为此还必须把这些数据经过判读、整理、计算以符合试验任务所要求的形式，通常把这一过程称为数据处理。在过去的模拟测试系统中数据处理是人工完成的。电子计算机及带有微处理机的数据处理仪器的出现与应用，使得数据采集及数据处理的工作完全可由计算机或专门仪器来完成。事实证明，电子计算机被应用于测量系统使测量技术发生了一个飞跃性的发展，它不仅自动地对试验数据进行采集与分析处理，并以人工处理无法比拟的速度直接给出高精度的最终试验结果，节省了大量时间。电子计算机作为测量系统的一个环节其作用还不仅于此。在整个测量过程中它

还可以按照人们的意志控制过程的进行,成为整个测量系统的指挥中心。

根据测量系统的输出形式,可将测量系统分为模拟测量系统和数字测量系统两类。通常被测的物理量都是随时间连续变化的量,这些被测量经过测量系统的各种变换与处理之后,输出的是连续变化的电量(如电压或电流),这种测量系统称为模拟测量系统。如用传感器测量发动机燃烧室的压力,传感器的输出经放大后送入光线示波器记录,其结果是一条反映压力变化过程的模拟曲线。若被测量经过测量系统以后是以数字形式输出的,则叫做数字测量系统。如同样是用传感器测量发动机燃烧室的压力,其输出信号经放大后送入数字电压表(内含模/数转换器),用数字打印机记录,其结果是一批有序的反映压力变化的数字。采用数字计算机或微型计算机做数据采集和数据处理,则是高效能的数字测量与处理系统。

模拟测量系统的优点是价格便宜,形象直观,灵活简便,但突出的缺点是精度低。一般模拟指示或记录装置的输出精度都比较低,人工判读还带来人为的误差。数字测量系统的精度高,特别是采用计算机可以很方便地实现多路测量及某些试验过程的自动控制和数据处理的自动化。

测量装置能否胜任预定的测量任务,是由它们的特性所决定的。为了正确地选择和使用测量装置,达到技术上合理,经济上节约,需要讨论测量装置的若干性质。

在被测物理量不随时间变化或变化很缓慢的情况下,可以用代数方程来表示输出量与输入量之间的关系。与测量装置有关的参数称为静态参数,静态参数表征测量装置的静态特性。当被测物理量随时间迅速变化时,需要用测量装置的运动微分方程来描述其输入与输出间的动态关系,基于这种动态关系上的特性参数,称为动态参数,动态参数表征测量装置的动态特性。本章着重研究模拟测量系统的有关性质。关于数字测量系统,将在第七章予以介绍。

§2-2 测量装置的静态特性

当测量静态的物理参数时,测量的质量主要受测量装置如下几方面性能的影响。

一、量程

测量装置所能测量的最大被测量的值称为测量上限,最小被测量的值称为测量下限。规定用测量上限和下限表示的被测量的区间称为测量装置的量程。

二、精度(精确度)

表示精度的指标有三个:精密度,准确度和精确度。

(一)精密度 τ 它表示测量装置指示值的分散性,即对某一稳定的被测量用同一测量装置在短时间内连续重复测量多次,其测量结果(示值)的分散程度。测量所得数据彼此越接近,精密度越高(τ 值越小)。而不管它们是否符合该被测数据的真实值。

(二)准确度 ε 它表示测量装置示值误差的大小,即示值有规则偏离真实值(真值)的程度。

(三)精确度 δ^* 它是精密度与准确度两者综合的结果。表示测量结果与真实值之间的差别。在最简单的情况下可取两者的代数和,即 $\delta^* = \tau + \varepsilon$ 。通常都是以精度来表示测量装

置的优劣。而精度最终往往又是以测量误差的相对值来表示的。

在工程应用中,为了简单地表示测量装置测量结果的可靠程度,引入一个测量装置精度等级的概念,其精度等级是用引用相对误差 γ_m 的数值表示的。

$$\gamma_m = \pm \frac{\delta_{max}}{M_{max} - M_{min}} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 δ_{max} ——测量装置在测量范围内的最大绝对误差;

M_{max}, M_{min} ——测量装置测量范围的上限及下限值。

测量装置的精度等级是以 γ_m 的一系列标准百分比数值进行分档的,精度等级有0.001; 0.005; 0.02; 0.05; 0.1; ...; 1.5; 2.5; 5级等,它们的容许引用相对误差的最大值分别为 $\pm 0.001\%$; 0.005% ; ...; $\pm 5\%$ 。

绝对误差 δ ,是指被测量的真值与仪表的示值之差,在实际工作中,真值无法求得。通常是用上一级或更高精度等级的标准仪器的测量结果作为真值,虽然这两者并不相等,但上一级或更高精度等级的标准仪器的示值要比工作仪器测量的结果更接近于真值。

应当注意,由于测量装置的精度与引用相对误差有关,因此在使用以引用相对误差表示精度的仪器仪表时,应尽量避免在接近测量下限的1/3量程范围内工作,以免产生较大的误差。

三、重复性

由于测量装置中的某些随机性变动、周期性变动、漂移和环境条件(如室温、气压、振动等)、工作条件(如电源电压、频率等)的变化,使得在一定测量条件下,对同一数值的被测量进行重复测量时,其测量结果不完全相同。若在全量程范围内最大的重复性差值为 ΔR_{max} ,则重复性误差 R_n 定义为:

$$R_n = \frac{\Delta R_{max}}{M_{max} - M_{min}} \times 100\% \quad (2-2)$$

重复性还可以用来表示在一段相当长的时间内,测量装置维持其输出特性恒定不变的性能。因此,测量装置的重复性和稳定性具有同样的含意。

四、分辨力

分辨力是指测量装置可能检测到的输入信号的最小变化量的能力,或者说是使输出量产生变化时输入量的最小变化量。

五、灵敏度

灵敏度是指测量装置在稳态下输出变化对输入变化的比值,用 S 表示,即 $S = dy/dx$ 。它是测量装置静态特性曲线(测量装置在稳态下输入输出的关系)上各点的斜率,见图2-2。具有线性特性(如图中 a 线)的测量装置的灵敏度是常数。而在具有非线性特性(如图中 b 线)的测量装置中灵敏度在整个量程内不是常数。

测定灵敏度的方法称为标定或校准。首先用人为的方法产生数值不同的被测参数 x_1, x_2, x_3, \dots ,然后由测量装置输出相应的输出量 y_1, y_2, y_3, \dots ,并制成表格或绘成曲线,该曲线称为标定曲线。曲线上各点的斜率就是各点的灵敏度。

六、滞后量

在输入量增加和减少的过程中，同一输入量将得到不同的输出值，在减少过程中的输出值要比增加过程的输出值大一些，这种现象称为滞后效应，如图 2-3 所示。在测量范围内，这种差别的最大值称为滞后量，以 ΔH_{max} 表示。滞后量与测量范围之比称为迟滞误差，用 Hr 表示，即

$$Hr = \frac{\Delta H_{max}}{M_{max} - M_{min}} \times 100\% \quad (2-3)$$

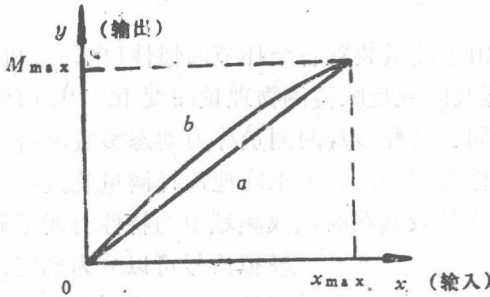


图 2-2 静态特性曲线

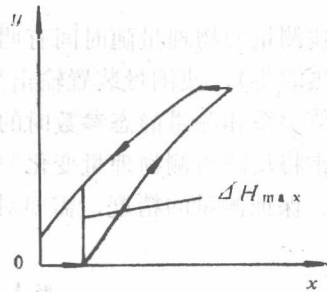


图 2-3 滞后效应曲线

滞后效应主要是由于运动部件的外摩擦，变形材料的内摩擦等造成的。为了减小滞后效应，应尽量减少摩擦面，并对变形零件进行热处理和多次反复加载的老化处理。

七、线性度(非线性误差)

测量装置的静态特性曲线，往往不是严格地服从直线关系，在实际工作中，为了简化起见，对于与直线关系偏离不大的特性曲线，可以用一条参考直线来代替，两者之间的偏差程度可用非线性误差 L_n 来表示

$$L_n = \frac{\Delta L_{max}}{M_{max} - M_{min}} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中 ΔL_{max} ——在测量范围内实际特性曲线与参考直线间的最大偏差(见图 2-4)。

参考直线可以有多种作法。常见的一种是连接特性曲线的始点和端点作一直线，如图 2-4 所示；另一种是根据测量的结果用最小二乘法(见第十章)作近似直线，如图 2-5 所示。

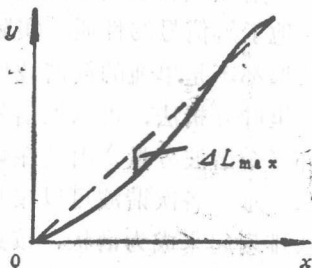


图 2-4 参考直线(一)

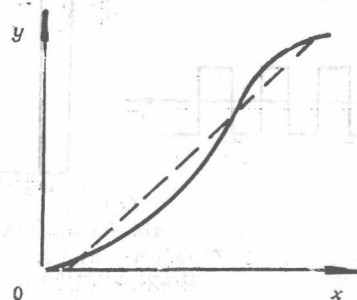


图 2-5 参考直线(二)

八、漂移

漂移是指输入量不变时输出量的变化。它是由于温度变化或测量装置内部元件的不稳定所引起的，也是衡量测量装置静态稳定性的重要指标。由温度变化引起的漂移称为温漂。测量装置长期工作，由其他原因造成的漂移叫做时漂。

§2-3 测量装置的动态特性

一、动态信号的分类及信号的频谱概念

当被测量的物理量随时间有明显变化时，由于测量装置各个环节的惯性(电的、机械的、磁的和热的等)，使测量装置输出量的变化不能及时地反映被测物理量的变化，因而它们之间的数值关系和测量静态参数时的测量过程不同。这种参数的测量称为动态参数测量。

通常将反映被测物理量变化的连续模拟量称为信号。为了正确地选择测量装置及估计动态误差、保证测量的精度，需要对模拟信号的分类及其在时域或频域中的特性有所了解。

模拟信号可以分为确定性信号和随机信号两大类。如果在每一瞬时，信号都有一个完全确定的数值，即信号能够用明确的数学关系式描述，这种信号称为确定性信号，如周期振动，瞬态过程产生的信号。如果信号不是一个确定的时间函数，即不可能确切地求出某一瞬时信号的大小，这种信号称为随机信号。

信号波形除了所用时间坐标来描述其变化特性(称为时间域表示法)外，还可用频率坐标描述其信号的特性(称为频率域或频域表示法)。

用频域表示法描述信号能更有效地了解信号的性质。实际的信号波形都不是单纯的简谐波，按照付里叶分析法，可以把信号分解为许多个谐波分量，由其振幅和相位来表示。各次谐波可以按其频率高低排列起来成为谱状，按这样排列的各次谐波的全体称为频谱。各次

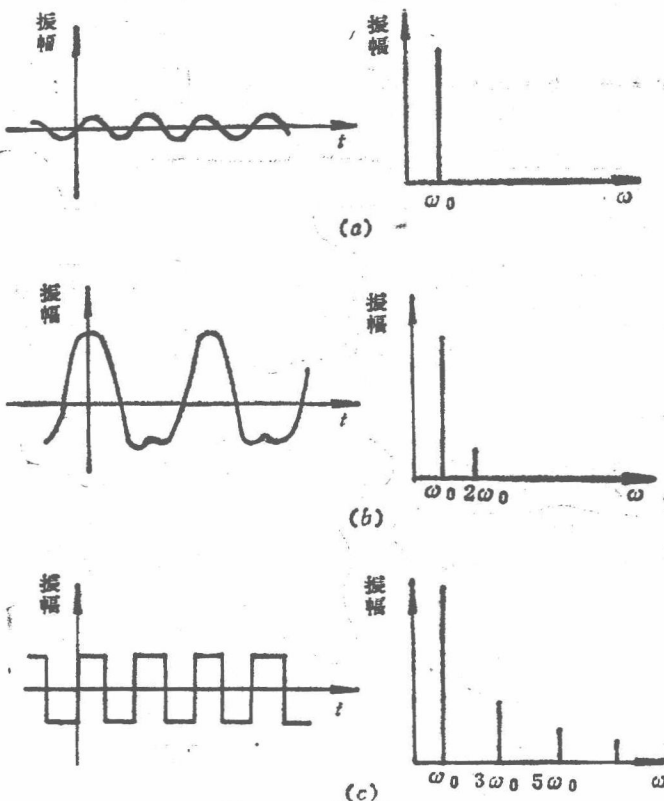


图 2-6 周期信号频谱曲线

- (a)表示正弦波，在 ω_0 处有一条谱线；
- (b)简单复合波，有两条不同振幅的谱线；
- (c)周期方波，由许多不同振幅的谱线组成。

谐波振幅的全体称为振幅频谱(或称为幅值谱)；各次谐波相位的全体称为相位频谱，而各次

谐波能量的全体则称为能量频谱。通常如不加以说明，频谱一词指的是幅值谱。

(一) 周期信号的频谱

我们知道，周期信号可以用付里叶级数展开，看成是许多正弦和余弦波叠加的结果，即

$$x(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots$$

这些正弦(或余弦)波的频率为一个基本频率的整数倍，这个具有基本频率的正弦(或余弦)波称为基波，等于基波频率 2、3、4……倍频率的正弦(或余弦)波称为谐波，当级数成分越多时，该级数就越加接近于原始波形。

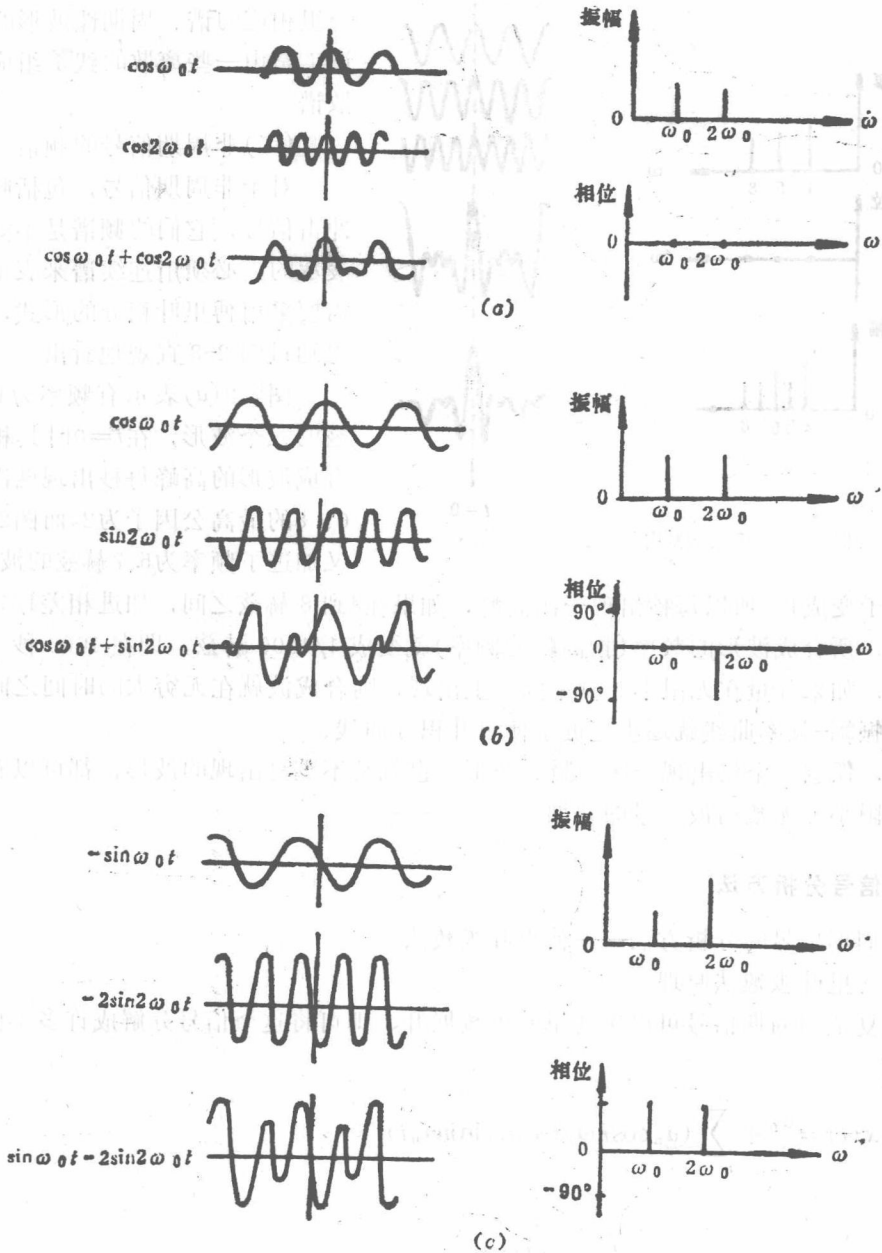


图 2-7 几种典型的合成波形及其幅值、相位谱示意图