

光学仪器信号转换技术

王惠民 编

北京理工大学出版社

(京)新登字 149 号

内 容 简 介

本书由机电信号转换技术, 光电信号转换技术, 模拟与数字转换技术以及信号的数字显示篇章组成。在内容上从光学仪器自动化和数字化的应用技术角度出发, 较为系统地讨论和分析了光电仪器中常用的各类信号转换的基本原理, 工作特性, 误差分析和主要设计方法与参数的选择。

本书可作为高等院校光学仪器专业的本科生教材或参考书, 也可供从事光学仪器设计、制造和光学检测技术的工程技术人员参考。

光学仪器信号转换技术

王惠民 编

*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

清华大学印刷厂印装

*

787×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 462 千字

1993 年 5 月第 1 版 1993 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 7-81013-645-3/TN·36

印数: 1~5000 册 定价: 4.85 元

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵工教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组，以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵工教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由戴炳明主审，经兵器工业总公司光学技术专业教学指导委员会复查，兵工教材编审室审定。

鉴于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1991年8月

前 言

本书系根据兵工类光学仪器专业的特点和教学大纲的要求编写的,是一本适用于光学仪器专业的教材。

在现代光学仪器的总体设计和部件系统的设计中,需要采用信号转换技术,实现光、机、电、算各系统之间的信号接口和相互匹配,为光学仪器的自动化和数字化提供模拟与数字转换信号,以及考虑转换信号的自动检测和数字显示。

本书共分三篇,第一篇包括五章,属于机电信号转换技术,主要讨论和分析光学精密仪器的机械位移信号与电信号的模拟转换原理和方法,为仪器的自动工作、自动控制,数据的自动传输和检测,提供机电转换信号。第二篇包括四章,属于光电信号转换技术,主要讨论和分析光学电子仪器的光信号量与电信号量之间的转换原理和方法,为光学仪器的自动检测,光电控制,光电跟踪,光电数字显示与存贮等提供光电转换信号。第三篇包括四章,前三章属于模拟与数字转换技术,主要讨论光电仪器在数字测量、数字计算、数字控制等方面的物理模拟量信号与数字量信号的相互转换原理和方法,为数字控制仪器、数字测量仪器及专用微处理机提供模数与数模接口信号;最后一章介绍信号的数字显示原理和方法,以便合理地选择光电仪器的终端显示设备。

本教材按 72 学时编写,重点放在机电信号转换技术和光电信号转换技术方面,着重阐述现代光学仪器设计中的机电信号和光电信号的接口匹配问题,同时兼顾到光学仪器数字化的发展需要,适当反映了数字化技术的应用。从总的内容来看,第一、二篇合计占 75% 左右,第三篇占 25% 左右。

军械工程学院戴炳明副教授担任本书主审,他对送审稿进行了非常认真地审阅,写出了详尽的审稿意见,给了编者很大的帮助。在本书的编写过程中,曾得到许多同志的支持和帮助。在此谨向他们致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中的缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1992 年 3 月于北京

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 机电信号转换技术

第一章 精密电位器	4
§ 1-1 精密电位器的类型和工作原理	4
§ 1-2 计算电路和信号传感器中的精密电位器	11
§ 1-3 线性电位器的电路工作原理和负载误差	14
§ 1-4 减小电位器负载误差的方法	17
§ 1-5 补偿电位器负载误差的方法	21
§ 1-6 精密线绕电位器设计方法	23
§ 1-7 精密线绕电位器的误差分析	31
第二章 电感传感器	35
§ 2-1 电感传感器的工作原理	35
§ 2-2 电感传感器的类型和主要特性	37
§ 2-3 电感传感器的转换电路	44
§ 2-4 电感传感器的参数选择	49
§ 2-5 电动量仪中的电感传感器	51
第三章 互感传感器	53
§ 3-1 互感传感器的工作原理	53
§ 3-2 互感传感器的类型和转换特性	54
§ 3-3 互感传感器的转换电路	56
§ 3-4 角位移式微动同步器	58
第四章 电容传感器	61
§ 4-1 电容传感器的工作原理及结构型式	61
§ 4-2 电容传感器的主要特性	63
§ 4-3 电容传感器的转换电路	68
§ 4-4 电容传感器的参数选择	76
§ 4-5 电容传感器的温度误差	78
§ 4-6 电动测微仪中的电容传感器	81
第五章 模拟信号测量电路	83
§ 5-1 放大电路	83
§ 5-2 滤波电路	92
§ 5-3 解调电路	101
§ 5-4 鉴频电路	105

第二篇 光电信号转换技术

第六章 光电传感器	109
§ 6-1 光源	110

§ 6-2 光电接收器	122
§ 6-3 光电传感器的基本原理	154
§ 6-4 光电传感器的转换电路	157
§ 6-5 自动跟踪系统的光电传感器	161
第七章 光栅与读数装置	164
§ 7-1 光栅的类型	164
§ 7-2 莫尔条纹原理	165
§ 7-3 光栅的零位系统	174
§ 7-4 光栅参数的选择	175
§ 7-5 光栅的误差	178
§ 7-6 光栅的固定和调整方法	179
§ 7-7 光栅的光电读数	180
§ 7-8 光栅读数头	185
§ 7-9 光栅读数头主要光电参数的选择	190
第八章 光学编码器	195
§ 8-1 光学码盘与编码	195
§ 8-2 循环码及其转换	197
§ 8-3 光学码盘的参数选择	200
第九章 光栅信号电子细分技术	203
§ 9-1 光栅的测微与细分	203
§ 9-2 电子细分的原理和方法	204
§ 9-3 非调制信号细分法	206
§ 9-4 调制信号细分法	216
§ 9-5 锁相细分法	219
§ 9-6 光栅信号质量对电子细分的影响	220

第三篇 模拟与数字转换技术

第十章 并行数字-模拟转换器	221
§10-1 并行 D/A 转换器的基本原理	224
§10-2 权电阻解码网络	226
§10-3 T 形电阻解码网络	229
§10-4 电流相加式解码网络	233
第十一章 串行数字-模拟转换器	237
§11-1 串行 D/A 转换器的基本原理	237
§11-2 步进电动机	238
§11-3 步进电机的控制电路	243
第十二章 模拟-数字转换器	254
§12-1 A/D 转换器的类型和基本性能	254
§12-2 时间数字转换器	256
§12-3 逐位比较型电压数字转换器	259
§12-4 V-T 型电压数字转换器	262
§12-5 V-F 型电压数字转换器	272

第十三章 数字显示器	277
§13-1 荧光数字管显示	278
§13-2 发光二极管显示	279
§13-3 液晶显示	284
§13-4 投影显示和边光显示	287
参考文献	289

绪 论

随着科学技术的进步,现代光学仪器已从单纯的光学机械结构形式,发展成为光、机、电、算一体化设计的光电精密机械仪器。图 0-1 为典型光电精密机械仪器的组成原理方框图。这类光学仪器通常由光学系统,精密机械系统,测量控制电路系统,微机处理系统,信号转换与接口装置,以及测量数据的显示、打印、记录等终端设备组成。特别是在传统的目视光学仪器中,作为光信息接收的人眼,已经逐步地从仪器中解放出来,由指示、记录等模拟输出装置或数字、数符、图形等显示和打印设备,代替人眼对光信息的接收。

为了适应现代光学仪器的工作自动化、数字化和智能化发展的特点,在研究和设计光学仪器时,除需要光学系统设计、仪器结构设计和电路设计等专业知识外,还需要从光学仪器总体设计和部件设计的角度出发,考虑和解决光、机、电、算各系统之间信号的相互匹配和信号转换的方法等技术问题。

光学仪器信号转换技术是指组成光电精密机械仪器的光学系统、精密机械系统与测量控制电路系统之间的信号接口技术,以及光学仪器实现数字测量、数字计算和数字控制中的信号接口技术。前者是光电信号、机电信号转换技术,通过非电物理量的电测原理,采用各类传感器,为光学仪器的自动工作和光电检测提供机电、光电模拟转换信号;后者是模拟与数字信号转换技术,通过模拟与数字转换原理,采用模拟数字(A/D)转换器和数字模拟(D/A)转换器,为光学仪器的数字化和智能化提供模拟与数字转换信号。例如为了实现仪器的自动工作和自动检测,就需要把光信号和机械位移信号通过光电转换和机电转换的方法,由光电传感器和机械位移传感器转换成便于自动传输、自动测量和自动控制的电信号;又如为了实现信号检测的数字化,就需要把连续变化的光电模拟信号和机电模拟信号,通过模拟与数字转换的方法,由模拟数字 A/D 转换器转换成数字计算、数字测量和数字显示或打印的数字量信号;再如为了实现仪器的数字控制,还需要把微机数据处理系统输出的数字信号,由数字模拟 D/A 转换器转换成仪器自动工作的模拟电信号或直接执行数字信号而控制仪器自动工作。由此可见,光学仪器信

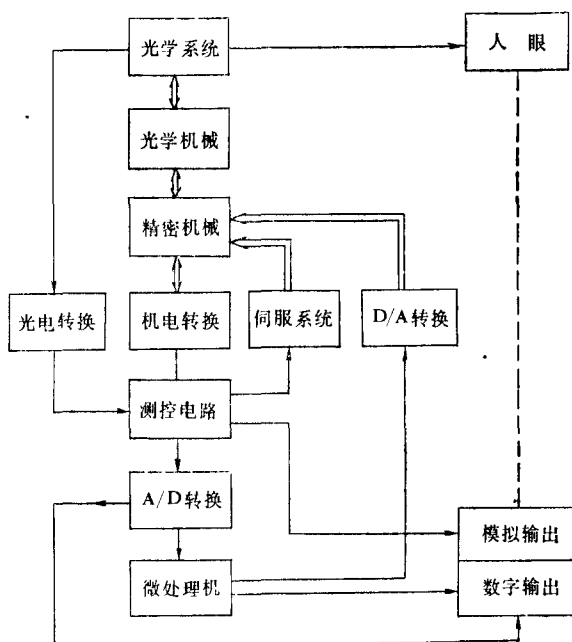


图 0-1 光电精密机械仪器组成原理方框图

号转换技术在现代光学仪器的组成中是极为重要的环节。

光电信号和机电信号的模拟转换，可由传感器来实现。传感器是一种将感受的非电物理量信号转换成便于自动传递、自动检测和自动控制的电信号装置。它具有很高的灵敏度，能感受非电物理量的微小变化，输出较大的电信号量，并且转换精度也很高。因此在国民经济的各个领域内，广泛使用传感器技术。

传感器犹如人的五官，在这瞬息万变的信息社会中，为人类敏感地检测出形形色色的有用信息。它充当电子计算机、智能机器人、自动化设备和自动控制装置的“感觉器官”。也有人称它为自动设备与仪器的“电五官”。近 10 年来工业发达国家，如日本、美国、德国都竞相把传感器技术列为本国诸重点新技术之首，投以巨资，着力研制并形成产业。例如，1980 年美国传感器产值为 7.6 亿美元，而 1987 年超过了 13.66 亿美元；1980 年全世界传感器产值达 50 亿美元，而 1990 年达 100 亿美元。国内在传感器技术的研究与开发方面，也越来越为人们所重视。

传感器通常由受感部件和转换电路两部分组成。图 0-2 为传感器的组成原理图。

传感器的种类繁多，它的功能是感受被测非电物理量的微小变化，并能精确地转换成如电阻、电感、电容等电参量的变化，或者直接转换成电压、电流、电荷和频率等电量的变化。前者属于参量式传感器，电参量经转换电路的预处理后才能变换成电信号输出；后者属于发电式传感器，它能直接发送出电信号。

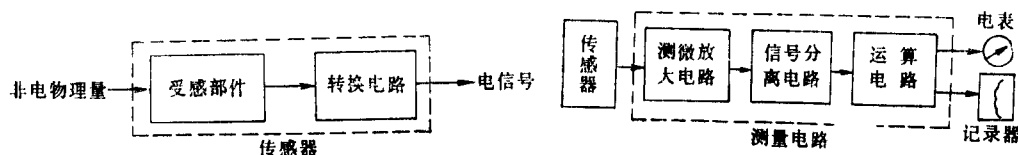


图 0-2 传感器的组成原理图

图 0-3 模拟式电动测微仪原理方框图

传感器在仪器仪表设备中也是将空间域信号转换成时间域信号的装置，以便实现光、机、电、算各系统之间的信号匹配。

各种类型的传感器配备测量电路和指示仪表可以单独构成检测仪器。图 0-3 为模拟式电动测微仪的组成原理方框图。它由传感器、测量电路和测量值显示设备组成。传感器将被测非电物理量的微小变化转换成电信号输出，经测微放大电路进行信号放大，然后由信号分离电路对放大信号进行纯化，从中分离出有用信号的幅值和相位，再经运算电路对被测信号的非线性转换信号等进行修正运算，可以获得与被测非电物理量成正比的模拟电信号，最后由电表或记录器等进行测量值的指示或记录。当被测物理量为机械位移信号时，测量值的指示成为位移长度的变化量。如采用电感式参量传感器，其位移分辨率可达 $0.01\mu\text{m}$ ；如采用光纤传感器，其位移分辨率可达 0.1nm 。上述的信号转换技术，广泛应用于小位移或微小位移的高精度测量。

当图 0-3 中采用光电传感器时，被测光信号由传感器转换成光电流，测量电路将输出与光辐射源的照度或亮度成比例的光电信号。这种光电转换系统的原理方案，可应用于日照度变化的测量，热辐射源的测量，以及光谱分析等很多方面。

图 0-4 为数字式光电测微仪的方框原理图。传感器由光栅读数装置组成。当两块计

量光栅相对移动时，光栅传感器将输出莫尔条纹的正余弦光电信号。光电信号经测量电路的放大整形器获得方波信号，该信号由细分电路进行电子细分，得到对应于光栅移动量的计数脉冲信号。放大整形器的方波信号又由判向电路输出判向信号，用于判别光栅移动的正反测量方向。可逆计数器根据被测位移量的运动方向 and 对应于位移量的计数脉冲进行可逆计数，最后由输出装置进行译码显示或打印输出被测值的数字量。

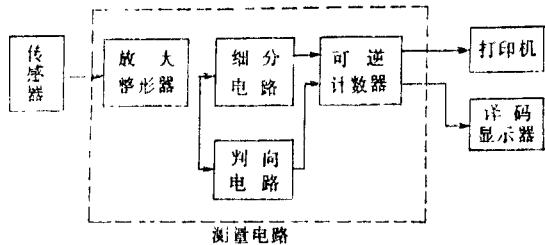


图 0-4 数字式光电测微仪方框原理图

在光栅传感器中，当采用长计量光栅时，可用于长度的计量。这种光电信号转换技术已应用于数字控制机床，提高了零件的加工精度，其位移分辨率一般为 $1\mu\text{m}$ ，也可高达 $0.1\mu\text{m}$ 。当采用圆计量光栅时，可用于角度的计量。目前已用于光电分度仪及光电经纬仪。在光电经纬仪中，其角度分辨率一般为角秒级，可高达 $0.1''$ 。

数字式光电测角测长（测距）仪器，不仅在民用方面，在国防现代化的军事装备中，也已成为研究和发展的方向。

采用信号转换技术的传感器，A/D 转换器，D/A 转换器，可应用于微机的数据采集系统和实时控制系统。图 0-5 为微机多路数据采集与实时控制的方框原理图，可实现过程控制计算机管理。

代表控制对象的多路非电物理量输入信号首先由各路的传感器转换成电压模拟信号，然后通过多路转换开关分时地传送到采样保持器、数字模拟 A/D 转换器。在微机中央处理器 CPU 的指令下，多个通道的 A/D 转换数据由微机的输入输出 I/O 口采集到内存单元中，并可通过译码显示或打印输出，监视控制对象的状态。对于多路采集到内存中的数据，还可由微机进行综合

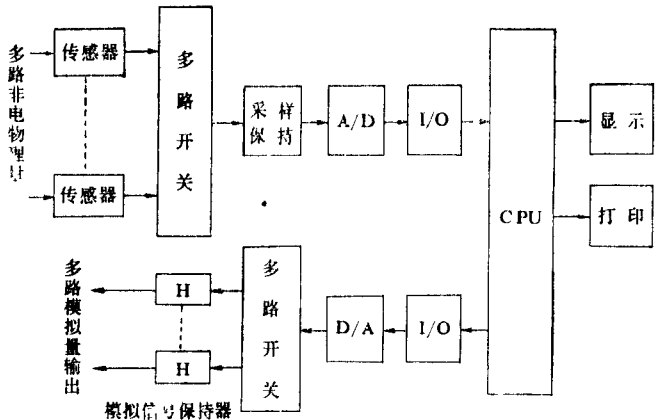


图 0-5 多路数据采集与实时控制方框原理图

运算等数据处理，然后再通过 I/O 口传送到数字模拟 D/A 转换器，经多路转换开关的分时控制，可在模拟信号保持器中获得多路模拟输出信号，以便对受控对象进行实时控制。这种实时控制的方案，不但在生产流程的自动控制中得到广泛的应用，而且还应用于光学仪器自动稳像与跟踪系统，在自动跟踪的条件下获得稳定而清晰的光学图像。

综上所述，信号转换技术在自动控制和自动检测的各个领域中已得到了广泛的应用。随着微电子技术和新型光电探测器件的发展，光学仪器信号转换技术在光电精密机械仪器的研制和发展中也将发挥更大的作用。

第一篇 机电信号转换技术

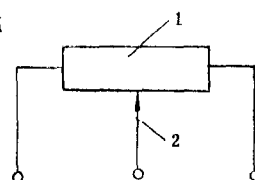
机电信号转换技术，主要讨论和分析光学机电仪器的机械位移信号与电信号的模拟转换原理和方法。为仪器的自动工作、自动控制，数据的自动传输和检测，提供机电转换信号。

第一章 精密电位器

精密电位器由于它具有结构简单，输出信号大，线性度和分辨率高，能在直流或低频交流供电下工作等优点，在自动化技术中得到广泛的应用。精密电位器配合敏感元件，能组成各类信号传感器，进行非电物理量的自动传送和检测。在模拟计算中它能组成计算电路，完成多种数学运算等功能。因此，精密电位器是机电仪器和仪表的重要机电转换和计算元件之一。

§ 1-1 精密电位器的类型和工作原理

精密电位器在电路中的符号如图 1-1 所示。它的基本构造由电阻元件 1 和电刷 2 组成。根据电阻元件的形式和工作方式，精密电位器可分为精密线绕电位器，薄膜电位器和光电电位器等。



一、精密线绕电位器

1. 线绕电位器的构造和工作原理

在机电转换和信号传感器中应用的精密电位器，大多是精密线绕电位器。它的结构简图如图 1-2 所示。电位器的电阻元件即绕组 1，由漆包电阻丝整齐地绕制在骨架上构成。绕组的工作端面用打磨和抛光的方法去掉漆层，以便与电刷头 2 有良好的电接触。骨架由胶木等绝缘体或表面覆有绝缘层的金属骨架构成。根据工作需要绕组骨架可以做成不同的形状。当分段或连续改变骨架的高度以及连续改变绕线排列的疏密程度时，都可以得到非线性的函数电位器绕组。电位器的电刷由电刷头 2 和电刷臂 3 组成。电刷头焊接在电刷臂上，它们被绝缘固定在电位器的转轴 4 上。电位器的电刷经游丝或导电环 5 的结构，引出绕组的输出端。当电位器的转轴转动或刷臂移动时，电刷在绕组上滑动接触，在工作电压的作用下，电位器输出与转轴转动量或刷臂移动量成一定关系的电信号量，以实现机电信号的转换。

图 1-1 电位器的符号和基本构造
1—电阻元件；
2—电刷

精密线绕电位器的输出线性度，一般能达到 0.1% 或更高。它对电阻丝、电刷和

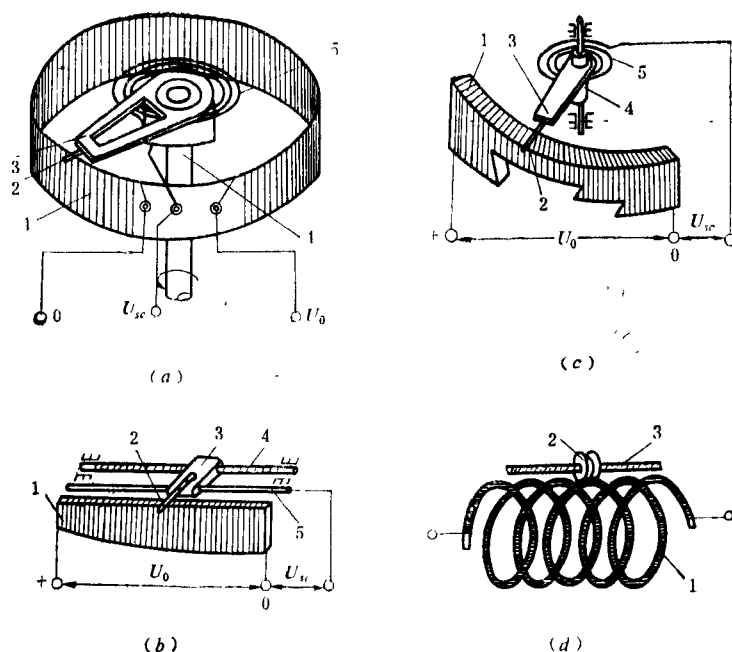


图 1-2 线绕电位器的结构简图

1—电位器绕组； 2—电刷头； 3—电刷臂； 4—电位器转轴； 5—导电环

骨架都有很高的要求。

(1) 电阻丝。

线绕电位器绕组的电阻丝,是保证电位器性能的关键材料。它应具有高的电阻系数,很小的电阻温度系数,足够的机械强度和良好的抗蚀性与耐磨性。在非贵金属合金中,最常用的电阻丝材料为康铜、镍铬和卡玛丝。康铜丝的电阻温度系数最小,焊接性能最好。锰铜丝的电阻温度系数虽然更小,但它易于氧化,不宜用在电位器中。卡玛丝国内牌号为 6J22 和 6J33,它的主要成分为镍铬,但加入了适量的铁和铝,因此电阻系数最高,并且电阻温度系数也很低,抗蚀性和耐磨性都好,所以目前正在推广应用中。卡玛丝的缺点是接触电阻大,要求电刷有大的接触压力,故不适用于敏感元件推动力小的传感器中。

在推动力矩很小的仪表与传感器中的精密电位器,大多使用贵金属为基础的电阻丝。它们的优点是化学稳定性好,耐磨耐腐蚀,能在高温高湿等恶劣环境下正常工作。并能在较小的接触压力下保证电刷与绕组之间良好地导电,这就减少了电位器的噪声,增加了可靠性和寿命。贵金属合金的电阻系数较小,但因其延展性好,可以拉制成细达直径 0.01mm 的丝材,所以绕组的总匝数可绕得很多,既保证了绕组的阻值也提高了电位器的分辨率。

精密线绕电位器使用的电阻丝公称直径即裸线直径 d 一般在 0.02~0.10mm 之间。常用电阻丝的主要参数如表 1-1 所示。

表 1-1 常用电阻丝性能表

名 称	成 分	电阻率 ρ ($10^{-4}\Omega\cdot\text{mm}$)	电阻温度系数 $\alpha(10^{-4}/^{\circ}\text{C})$
卡 玛 丝	Ni76; Cr20; 其余为 Fe, Al	13.3~13.7	0.05~1.5
镍 铬 丝	Ni55~80; Cr14~20; Fe14~18; Mn1~2	11	-2
康 铜 丝	Cu54~67; Ni30~45; Mn1~3	5	-0.2~-0.5
金基合金丝	AuNiCrGd7-0.5-0.5	2.3	3
金基合金丝	AuAgCuMnGd33.5-3-2.5-0.5	2.2	2.1
金基合金丝	AuNiCr7-0.66	2.35	3.2
金基合金丝	AuNiCr5-2	4.2	
金基合金丝	AuNiFeZr5-1.5-0.3	4.5	2.6
银基合金丝	AgMnSnSbCe8-6-1-0.2	4.9	
银基合金丝	AgMnSnCuCe8-6-3-0.2	4.9	
铂铱合金丝	Pt90 $\pm$ 0.4; Ir10 $\pm$ 0.6	2.3	12
铂铱合金丝	Pt75 $\pm$ 0.5; Ir25 $\pm$ 1	3.15	9.5

成分举例: AuNiFeZr5-1.5-0.3 即含 Ni5%; Fe1.5%; Zr0.3%; 其余都为 Au。

(2) 电刷。

电刷是电位器引出电信号的关键零件之一,它由电刷头和电刷臂组成。对电刷头材料的要求大体上与对电阻丝的要求相同。由于电刷头的材料用量很少,一般都采用贵金属。电刷臂用磷青铜等弹性材料组成。图 1-3 为几种常用的电刷结构示意图。

传感器中的电位器电刷头很简单,用一根贵金属丝弯成适当的形状即可,一般弯曲成圆角半径约为五倍电阻丝的直径值,以保证电刷头工作时只短路绕组的二至三匝电阻丝。

贵金属丝的电刷头直径一般很细,约 0.1~0.2mm,有时为了可靠,同一电刷头可用二至三根电刷丝并排构成多指电刷。各电刷丝长短稍有不同,它们的自振频率各异,在某一振动频率下,不会同时产生谐振,因而保证接触可靠。采用多指电刷后,可形成多条接触道,在保证总的接触压力不变的情况下,每一电刷丝的接触压力可降低,绕组的磨损较为均匀,有利于提高电位器的寿命。

为了保持电刷与绕组之间的可靠接触,电刷必须有一定的接触压力,通常由电刷的弹性变形产生。接触压力对电位器的工作可靠性和寿命有很大的影响。接触压力大,接触可靠稳定,遇到振动过载时不易脱开,但摩擦力矩和磨损增加,使电位器寿命降低,传感器的误差增加,因此要根据具体情况合理地选择。对于电刷由推动力较小的敏感元件来带动,且电阻丝直径 $d < 0.1\text{mm}$ 的电位器,接触压力可在 1~20mN 之间;对于作用在电刷上的推动力较大,如由伺服电机带动,且电阻丝直径 $d > 0.1\text{mm}$ 的电位器,接触压力可选在 50~150mN 左右或者更大。

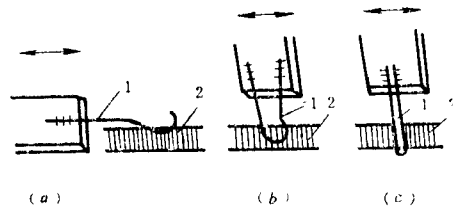


图 1-3 常用电刷结构示意图

1—电刷; 2—电阻元件

在计算电位器的摩擦力矩时，通常可取干摩擦系数 $\mu = 0.25 \sim 0.5$ 。为了减小摩擦力矩，可在绕组与电刷的接触面上采用适当的润滑措施。如采用粉末状固体润滑剂二硒化铌 (NbSe_2) 能大大降低摩擦和磨损，但不能用普通润滑油，否则会破坏良好的电接触。

(3) 骨架。

电位器绕组的骨架，应绝缘性能好，具有足够的强度和刚度；加工性好，以便制成所需的形状和尺寸精度；良好的抗湿性和耐热性，在温度和湿度变化时不致发生变形。

一般精度的电位器骨架材料，大多采用塑料、夹布胶木等制成。这些材料易于加工，但抗湿性耐热性不够好，并容易变形。塑料骨架易于分解出有机气体而污染电刷和绕组，故一般不用来制造高精度的电位器。

在高精度的电位器中，目前都采用金属骨架，为了骨架表面有良好的绝缘性能，通常在铝合金或铝镁合金骨架的外表，通过阳极化处理等方法形成一层绝缘薄膜。金属骨架强度大，尺寸制造精度高，遇潮不易变形歪曲；导热性好，能使电位器绕组中的热量便于散发，因此可以提高绕组电阻丝通过的电流密度。对于塑料、胶木等骨架的电位器绕组，电流密度以不大于 $5\text{A}/\text{mm}^2$ 为好；对于金属骨架的电位器绕组，电流密度以不大于 $10\text{A}/\text{mm}^2$ 为宜。

骨架的高度通常应大于 3mm ，骨架的厚度应不小于 $4d$ ，圆角半径不小于 $2d$ (d 为电阻丝公称直径)。

非线性函数电位器的骨架，可以做成函数状的连续变高度骨架，也可做成阶梯状的分段变高度骨架，如图 1-2(b)、(c) 所示的绕组骨架形状。

非线性电位器的函数关系，还可以采用变线距来获得。变线距函数电位器的优点是骨架制造容易，可采用线性电位器的等高度骨架，但它只适用于输出特性曲线斜率变化率不大的场合，通常输出特性曲线的最大斜率与最小斜率之比应不大于 3 为宜，否则绕组的线距变化太大，使电刷在最大线距处不能与电阻丝接触而无法工作。

2. 线绕电位器的分辨率

线绕电位器的绕组由漆包电阻丝一匝一匝地在骨架上绕制而成。电刷移动过程中输出的电阻和电压值，也以一匝为增量而跳跃变化。图 1-4 为线绕线性电位器的输出特性曲线。

在电位器总行程 L_0 上均匀地绕制着 N 匝电阻丝，其总电阻为 R_w 。绕组上相邻两电阻丝之间的线距为 t 。当工作电压 U_0 施加于绕组的两端时，电位器的机械位移输入量 L 与电刷的输出电压 U_s 或输出端电阻 R 之间，呈现出阶梯状的线性关系。因此，电位器的最小位移输入增量 ΔL 和输出电压增量 ΔU ，标志着精密线绕电位器可能达到的精

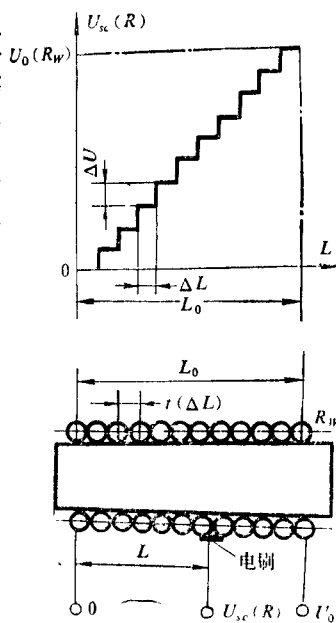


图 1-4 线绕线性电位器的输出特性曲线图

密程度，称为电位器的分辨率。线绕电位器的分辨率有行程分辨率和电压分辨率。

(1) 电位器的行程分辨率。

在电位器的行程工作范围内，能使电位器产生一个可测出输出变化的最小电刷行程即 ΔL ，它与总行程 L_0 相比的百分数，称为行程分辨率。当电阻丝均匀密绕时，线距 $t = \Delta L$ 。因此电位器理论的行程分辨率 Δ_L 可表示为

$$\Delta_L = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{t}{L_0} = \frac{L_0/N}{L_0} = \frac{1}{N} \cdot 100\% \quad (1-1)$$

式中 N ——电位器绕组的总绕线匝数。

(2) 电位器的电压分辨率。

在电刷的工作行程内，电位器输出电压阶梯的最大值 ΔU 与工作电压 U_0 之比值的百分数，称为电压分辨率。电位器理论的电压分辨率 Δ_V 可表示为

$$\Delta_V = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0/N}{U_0} = \frac{1}{N} \cdot 100\% \quad (1-2)$$

由此可知，线绕线性电位器的分辨率取决于绕组总匝数的多少。总绕线匝数愈多，电位器的行程分辨率和电压分辨率愈高。所以精密线绕电位器都是采用很细的电阻丝绕制电阻元件，或者采用图 1-2 (d) 所示的多圈螺旋电位器，以提高电位器的分辨率。

二、薄膜电位器

薄膜电位器的最大特点是组成电位器的电阻元件是连续的，因此分辨率极高，在某些场合下，能代替线绕电位器而获得应用。图 1-5 是薄膜电位器的结构原理图。它与精密线绕电位器大致相仿，由基体、电阻膜带、电刷、转轴和导电环等组成。

薄膜电位器的基体 1 通常用胶木片、陶瓷片和玻璃等绝缘材料制成。在基体 1 上喷涂或蒸镀具有一定形状的电阻膜带 2，组成电位器的电阻元件，它起着线绕电位器绕组的功能。

当电阻膜带由石墨、碳黑、树脂等材料配制而喷涂时，这类电位器称为合成膜电位器。

当电阻膜带由铱锗、铂铜、铂铱、铂铱锰等合金材料高温蒸镀和电镀时，这类电位器称为金属膜电位器。

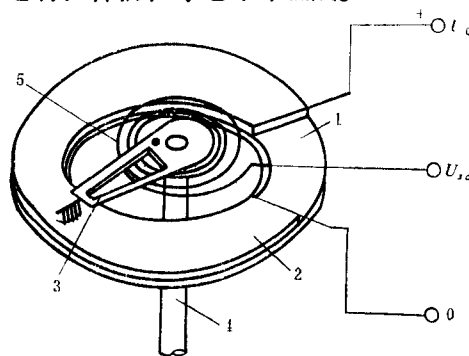


图 1-5 薄膜电位器的结构原理图

1—基体；2—电阻膜带；3—电刷；4—转轴；
5—导电环

合成膜电位器的阻值范围广，耐磨性好，工艺简单成本低。它的线性度一般在 1% 左右，电阻膜带经修刻后可提高到 0.1% 左右。但它的接触电阻大，抗潮性差，电位器的噪声较大。

金属膜位器的摩擦力矩小,电阻温度系数较小,可达 $0.5 \sim 1.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, 因此能在 150°C 以上的温度条件下正常工作。但它的耐磨性差,阻值较低,总阻值一般在 $1 \sim 2\text{k}\Omega$ 左右。

薄膜电位器的电刷通常都采用多指电刷,以减小接触电阻,提高工作的稳定性。

目前,薄膜电位器在高精度传感器和机电转换装置中,应用得不如精密线绕电位器那样广泛。

三、光电电位器

光电电位器是一种无接触式电位器,以光束代替常用的电刷。图 1-6 为光电电位器的结构示意图。它由薄膜电阻带、光电导层和导电电极等主要部分组成。在基体 1 上沉积一层硫化镉(CdS)或硒化镉(CdSe)的光电导层 2,然后在光导层上又分别沉积薄膜电阻带 3 和金属导电电极 4,并使电阻带与导电电极间有一很小的间隔。金属导电电极相当于普通电位器的导电环,作为电位器的输出端而输出信号电压。

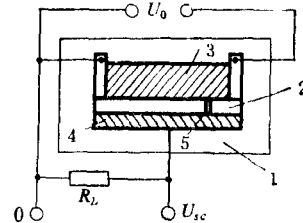


图 1-6 光电电位器的结构示意图
1—基体; 2—光电导层; 3—薄膜电阻带; 4—导电电极; 5—窄光束

半导体光电导材料,在无光照情况下,它的暗电阻很大,相当于绝缘体;当受一定强度的光照时,它的明电阻很小,相当于良导体;暗电阻与明电阻之比可达 $10^5 \sim 10^8$ 。因此,当无光束照射于光电导层材料上时,电阻带与导电电极绝缘,负载电阻 R_L 上没有输出电压。当有一束经过聚焦的窄光束 5 照射于光电导层上时,该处的明电阻就变得很小,这相当于电刷头与电阻元件相接触,使金属导电电极输出与光束位置相应的电阻带电压。如果光束位置移动,就相当于电刷位置移动,输出电压也相应变化。

光电电位器的优点是完全无摩擦,不存在磨损,也就不会使仪表和传感器系统附加任何有害的摩擦力矩,所以可提高仪表和传感器的精度。光电电位器的寿命、可靠性和分辨率都很高,并且能实现 7m/s 的快速工作。这些都是一般电位器所不及的。目前光电电位器已在某些高精度陀螺传感器中获得应用。光电电位器需要照明光源和光学系统,因而体积和重量较大,且线性度尚不易做得很高。

四、精密电位器的输出特性

按输入与输出的关系,精密电位器可分为线性电位器、函数电位器和变阻器。

1. 线性电位器

线性电位器的电刷行程 L 与输出电压 U_{sc} 的特性曲线,理论上严格呈线性关系,如图 1-7 所示。这种线性关系通过等骨架高度和等线距的线绕电阻元件或等厚等宽度的电阻膜带元件来实现。

当电刷的行程为 L 时,其输出端的电阻 R 和输出电压 U_{sc} 分别为

$$R = \frac{R_0}{L_0} L \quad (1-3)$$

$$U_{so} = \frac{U_0}{R_0} R = \frac{U_0}{L_0} L \quad (1-4)$$

式中 R_0 ——电位器的总电阻；

L_0 ——电位器的总行程；

U_0 ——电位器的工作电压。

线性电位器的灵敏度，用单位电刷位移量所引起输出量的变化值来表示。电位器的电阻灵敏度 K_R 和电压灵敏度 K_V 分别表示为

$$K_R = \frac{R}{L} = \frac{R_0}{L_0} \quad (1-5)$$

$$K_V = \frac{U_{so}}{L} = \frac{U_0}{L_0} \quad (1-6)$$

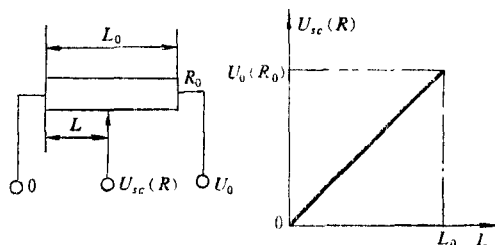


图 1-7 线性电位器的输出特性曲线

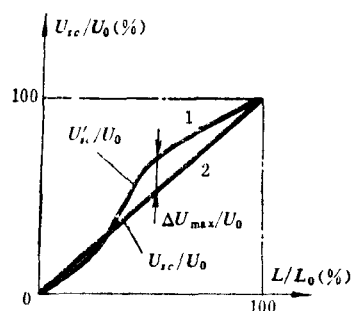


图 1-8 电位器的线性误差曲线
1—实际特性曲线；2—理论直线

由以上公式看出，线性电位器的灵敏度为常数，所以在传感器和机电转换装置中的精密电位器，通常都使用线性电位器。

由于原理和制造等方面的原因，线性电位器的实际输出特性并不是严格线性的，它与理论直线之间存在着一定的偏差，如图 1-8 所示。电位器的实际特性曲线对理论直线的符合程度，称为电位器的线性度。线性度是线性电位器的重要精度指标，它以电刷行程范围内输出电压最大偏差相对值表示为

$$e_f = \left(\frac{U_{so} - U'_{so}}{U_0} \right)_{\max} \times 100\% = \frac{\Delta U_{\max}}{U_0} 100\% \quad (1-7)$$

式中 $\Delta U_{\max} = (U_{so} - U'_{so})_{\max}$

2. 函数电位器

函数电位器在电路中的符号如图 1-9(a) 所示。电位器的电刷行程 L 与输出端电阻 R 和输出电压 U_{so} 的关系，可以根据需要得到预定的函数关系，如图 1-9(b) 所示。这种电位器，在函数变换和电位器负载补偿电路中得到广泛的应用。

函数电位器可用变骨架高度或等骨架高度变线距的线绕电阻元件来获得，也可采用变宽度或分段改变电阻膜带材料的电阻元件来得到。函数电位器的电阻灵敏度和电压灵