

铁道车辆动态检测技术

主 编 \ 王 婷 赵柏阳

副主编 \ 陶丹丹 赵连刚

主 审 \ 施一宁

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

前 言

随着铁路的飞速发展，铁路运输安全压力日益增加，针对铁路车辆的检测与监控工作也越来越重要，这就需要先进的技术装备来支撑，以保障铁路运输的安全。

本书根据高职铁道车辆专业培养目标，重点阐述车辆无损检测技术和动态检测技术。无损检测技术是在工件无损的条件下，检查工件宏观缺陷或测量工件特征的各种技术方法的统称。无损检测的意义在于保障零件、组件的安全使用，节约材料，在零件无损的条件下检测零件、部件、组件、设备、材料和大型工程项目，使之安全有效地生产和工作。无损检测技术在铁路运输部门发挥着重要的作用，用于对重要的钢制零部件进行定期检查，以发现使用中所产生的疲劳裂纹等缺陷，防止设备在继续使用中发生灾害性事故。无损检测方法以磁粉探伤和超声波探伤最为广泛，书中无损检测技术部分，主要介绍这两种常见探伤方式的相关内容。车辆动态检测技术简称为 5T 系统：车辆轴温智能探测系统（THDS）、车辆运行品质轨边动态监测系统（TPDS）、车辆滚动轴承故障轨边声学诊断系统（TADS）、货车运行故障动态图像检测系统（TFDS）、客车运行状态安全监测系统（TCDS）。如今，5T 系统还扩充出动车组运行故障图像检测系统（TEDS）、客车运行故障轨边图像检测系统（TVDS）、轮对尺寸动态检测系统（TWDS）等。车辆动态检测技术部分重点阐述 5T 系统的功能、原理、设备、运用管理、设备检修等内容。为了铺垫书中的两大重点内容，编者将相关基础知识——传感器技术以言简意赅、够用为度的方式编入此书，帮助读者更加全面深入地理解相关内容。

本书由辽宁铁道职业技术学院王婷、赵柏阳主编，辽宁铁道职业技术学院陶丹丹、中国铁路沈阳局集团有限公司锦州车辆段赵连刚担任副主编，辽宁铁道职业技术学院任莉莉、辽宁轨道交通职业学院谢禄济、吉林铁道职业技术学院包丽静参与编写了本书，中国铁路沈阳局集团有限公司通辽车辆段施一宁担任主审。其中，王婷编写了项目三；赵柏阳编写了项目五、项目六任务 6-2、6-3、项目九任务 9-2；陶丹丹编写了项目二、项目四、项目七任务 7-2、7-3；赵连刚编写了项目八；任莉莉编写了项目一；辽宁轨道交通职业学院谢禄济编写了项目六任务 6-1、项目七任务 7-1；吉林铁道职业技术学院包丽静编写了项目九任务 9-1。在编写过程中，还得到了中国铁路沈阳局集团有限公司锦州车辆段乔鑫路、闫非，以及沈阳动车段安剑等同志的大力支持，编者在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2020 年 10 月



数字化资源包

目 录

第一篇 传感器技术	1
项目一 传感器技术	2
任务 1-1 认知传感器	2
任务 1-2 压电式传感器	5
任务 1-3 磁敏式传感器	9
任务 1-4 热电式传感器	17
任务 1-5 光电式传感器	28
任务 1-6 超声波传感器	38
第二篇 无损检测技术	41
项目二 磁粉探伤	43
任务 2-1 认知磁粉探伤技术	43
任务 2-2 轮轴/轮对磁粉探伤	51
任务 2-3 车辆配件表面探伤	62
项目三 超声波探伤	73
任务 3-1 认知超声波探伤技术	73
任务 3-2 货车轮轴超声波探伤	124
任务 3-3 动车组车轮超声波探伤	138
任务 3-4 动车组空心轴超声波探伤	144
项目四 渗透检测	153
任务 4-1 认知渗透检测技术	153
任务 4-2 罐车卡带连接杆渗透探伤	160
第三篇 车辆动态监控技术	167
项目五 货车运行故障动态图像检测系统	168
任务 5-1 认知 TFDS	168
任务 5-2 TFDS 运用与管理	176
任务 5-3 TFDS 设备检修	213

项目六 车辆运行品质轨边动态监测系统 (TPDS)	219
任务 6-1 认知 TPDS	220
任务 6-2 TPDS 运用与管理	231
任务 6-3 TPDS 设备检修	243
项目七 车辆滚动轴承故障轨边声学诊断系统 (TADS)	251
任务 7-1 认知 TADS	252
任务 7-2 TADS 运用与管理	266
任务 7-3 TADS 设备检修	279
项目八 车辆轴温智能探测系统	288
任务 8-1 认知 THDS	289
任务 8-2 THDS 运用与管理	306
任务 8-3 THDS 设备检修	311
项目九 客车及动车组动态监测系统	319
任务 9-1 客车运行状态安全监测系统 (TCDS)	320
任务 9-2 动车组运行故障动态图像检测系统 (TEDS)	338
参考文献	353

第一篇 传感器技术

人类从外界获取信息必须要借助于感觉器官。而在研究自然现象、规律以及生产活动中人类自身感觉器官的功能远远不够，为适应这种情况，就需要传感器。可以说，传感器是人类五官的延伸，又称之为“电五官”。



随着新技术革命的到来，世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中，首先要解决的就是获取信息的准确性，而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多的优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。

在基础学科研究中，传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展，进入了许多新领域，例如在宏观上要观察上千光年外的茫茫宇宙，微观上要观察小到飞米（fm）的粒子世界，纵向上既要观察长达数十万年的天体演化也要观察短到秒（s）的瞬间反应。此外，还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然，要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有与之相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍首先就在于对象信息的获取存在困难，而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现，往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展，往往是一些边缘学科开发的先驱。

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，从茫茫的太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。

由此可见，传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的，世界各国都十分重视这一领域的发展。相信在不久的将来，传感器技术将会出现一个飞跃，达到与其重要地位相称的新水平。

项目一 传感器技术

任务 1-1 认知传感器

任务书

任务编号	1-1	任务名称	认知传感器
任务目标			
【知识目标】 掌握传感器的定义和作用； 掌握传感器的组成和分类； 掌握传感器的一般要求和特性。			
【技能目标】 具备传感器的应用能力。			
【素质目标】 培养学生严谨认真的工作作风			
任务描述			
本次任务是为了全面了解传感器的相关基础知识，以小组为单位汇报传感器的定义、作用、组成、分类、一般要求和特性，为后续任务的实施奠定理论基础			
实施说明			
(1) 以小组为单位认真学习任务 1-1 的引导材料，做好知识准备； (2) 结合知识准备和小组汇报情况，教师填写“任务检查单”			

引导材料

一、传感器的定义

国家标准对传感器下的定义是能感受规定的被测量，并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置。

二、传感器的作用

传感器的作用是来自外界的各种信号转换成电信号。

传感器所检测的信号近来显著地增加，因而其品种也极其繁多。为了对各种各样的信号进行检测、控制，就必须获得尽量简单、易于处理的信号，这样的要求只有电信号能够满足。电信号能较容易地进行放大、反馈、滤波、微分、存储、远距离操作等。因此，作为一种功能模块的传感器也可狭义地定义为“将外界的输入信号变换为电信号的一类元件”。

传感器的功能常常与人类 5 大感觉器官相比拟：

- ① 光敏传感器——视觉；
- ② 声敏传感器——听觉；
- ③ 气敏传感器——嗅觉；
- ④ 化学传感器——味觉；
- ⑤ 流体传感器——触觉。

三、传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 个部分组成，如图 1-1-1 所示。

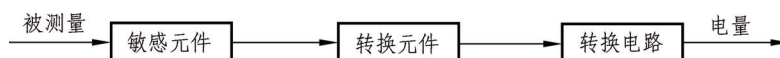


图 1-1-1 传感器的组成

- (1) 敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- (2) 转换元件：以敏感元件的输出为输入，把输入转换成电路参数的元件。
- (3) 转换电路：将电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

实际上，有些传感器结构比较简单，仅由一个敏感元件组成，它感受被测量时直接输出电量，例如后续项目会学习到的热电偶；而有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有转换电路；还有些传感器，转换元件不只一个，要经过若干次转换。

四、传感器的分类

传感器的分类方法很多，主要有如下几种：

(1) 按被测量内容分类，可分为力学量、光学量、磁学量、几何学量、运动学量、流速与流量、热学量、化学量、生物量传感器等。这种分类有利于选择和应用传感器。

(2) 按照工作原理分类，可分为电阻式、电容式、电感式、光电式、光栅式、热电式、压电式、红外线、光纤、超声波、激光传感器等。这种分类有利于研究、设计传感器，有利于对传感器的工作原理进行阐述。

(3) 按敏感元件的材料分类，可分为半导体传感器、陶瓷传感器、石英传感器、光导纤维传感器、金属传感器、有机材料传感器、高分子材料传感器等。

传感器中敏感元件可根据其基本感知功能分为热敏元件、光敏元件、气敏元件、力敏元件、磁敏元件、湿敏元件、声敏元件、放射线敏感元件、色敏元件和味敏元件等 10 大类型。

(4) 按照传感器输出量的性质分类，可分为模拟传感器和数字传感器。其中，数字传感器便于与计算机联用，且抗干扰性较强，例如脉冲盘式角度数字传感器、光栅传感器等。传感器数字化是今后的发展趋势。

(5) 按照应用场合分类，可分为工业用、农用、军用、医用、科研用、环保用和家用电器用传感器等。若按具体使用场合还可分为汽车用、舰船用、飞机用、宇宙飞船用、防灾用传感器等。

(6) 按照使用目的分类，可分为计测用、监视用、位查用、诊断用、控制用和分析用传感器等。

五、传感器的一般要求

由于各种传感器的原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，其技术指标也不可能相同，但是有些一般要求却基本上相同：

(1) 足够的容量。传感器的工作范围或量程足够大，具有一定的过载能力。

(2) 灵敏度高，精度适当。即要求其输出信号与被测信号成确定的关系（通常为线性），且比值要大，传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。

(3) 响应速度快，工作稳定，可靠性好。

(4) 使用性和适应性强。体积小，质量轻，动作能量小，对被测对象的状态影响小；内部噪声小而又不易受外界干扰的影响；其输出力求采用通用或标准形式，以便于系统对接。

(5) 使用经济。成本低，寿命长，且便于使用、维修和校准。

当然，能完全满足上述性能要求的传感器是很少的，我们应根据应用的目的、使用环境、被测对象状况、精度要求和原理等具体条件作全面综合考虑。

六、传感器的特性

传感器的特性主要是指传感器输入与输出之间的关系，包括静态特性和动态特性。

1. 静态特性

传感器的静态特性是指测量静态信号时，传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时输入量和输出量都和时间无关，所以它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、重复性、分辨力、迟滞、漂移和阈值。

(1) 线性度。

线性度是指传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离拟合直线的程度。其定义为在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值与满量程输出值之比。

(2) 灵敏度。

灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标。其定义为输出量的增量与引起该增量的相应输入量增量之比。

(3) 重复性。

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度。

(4) 分辨力。

当传感器的输入从非零值缓慢增加时，在超过某一增量后输出发生可观测的变化，这个输入增量称为传感器的分辨力，即最小输入增量。

(5) 迟滞。

传感器在输入量由小到大（正行程）及输入量由大到小（反行程）变化期间其输入输出特性曲线不重合的现象称为迟滞。对于同一大小的输入信号，传感器的正反行程输出信号大小不相等，这个差值称为迟滞差值。

(6) 漂移。

漂移是指在一定时间间隔内，传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。产生漂移的原因有两个方面：一是传感器自身结构参数；二是周围环境（如温度、湿度等）。

(7) 阈值。

当传感器的输入从零值开始缓慢增加时，在达到某一值后输出发生可观测的变化，这个输入值称为传感器的阈值。

2. 动态特性

动态特性是指传感器测量动态信号时，输出对输入的响应特性。传感器测量静态信号时，由于被测量不随时间变化，测量和记录过程不受时间限制。而实际中大量的被测量是随时间变化的动态信号，传感器的输出不仅需要精确地显示被测量的大小，还要显示被测量随时间变换的规律，即被测量的波形。传感器测量动态信号的能力用动态特性表示。

最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种，所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

■ 任务检查单

任务编号	1-1	任务名称	认知传感器		
序号	检查内容			是	否
1	掌握传感器的定义和作用				
2	掌握传感器的组成和分类				
3	掌握传感器的一般要求和特性				
评语					
评分					

任务 1-2 压电式传感器

■ 任务书

任务编号	1-2	任务名称	压电式传感器		
任务目标					
【知识目标】 掌握压电效应的基本原理； 掌握压电材料的应用； 掌握压电传感器的应用。					
【技能目标】 具备压电传感器的应用能力。					
【素质目标】 培养学生严谨认真的工作作风					

任务描述
本次任务是为了全面了解压电式传感器的相关基础知识，以小组为单位汇报压电传感器的原理和基本应用，为后续任务的实施奠定理论基础
实施说明
(1) 以小组为单位认真学习任务 1-2 的引导材料，做好知识准备； (2) 结合知识准备和小组汇报情况，教师填写“任务检查单”

■ 引导材料

压电式传感器是基于压电效应的传感器，是一种自发电式和机电转换式传感器。它的敏感元件由压电材料制成，压电材料受力后表面产生电荷，此电荷经电荷放大器与测量电路放大并变换阻抗后就成为正比于所受外力的电量输出。

压电式传感器可以测量最终转换为力的非电物理量，例如动态力、动态压力、振动加速度等。

它的优点是频带宽、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠和质量轻等；缺点是某些压电材料需要采取防潮措施，而且输出的直流响应差，需要采用高输入阻抗电路或电荷放大器来克服这一缺陷。

一、压电效应

压电效应可分为正压电效应和逆压电效应。

正压电效应是指当晶体受到某固定方向外力的作用时，内部产生电极化现象，同时在其两个表面上产生符号相反的电荷；当外力撤去后，晶体又恢复到不带电的状态；当外力作用方向改变时，电荷的极性也随之改变；晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。压电式传感器大多是利用正压电效应制成的。

逆压电效应是指对晶体施加交变电场引起晶体机械变形的现象，又称电致伸缩效应。用逆压电效应制造的变送器可用于电声和超声工程。压电敏感元件的受力变形有厚度变形型、长度变形型、体积变形型、厚度切变型、平面切变型 5 种基本形式。压电晶体是各向异性的，并非所有晶体都能在这 5 种状态下产生压电效应。例如石英晶体就没有体积变形压电效应，但具有良好的厚度变形和长度变形压电效应。

压电效应是压电传感器的主要工作原理，由于外力作用，在压电元件上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存，这实际上是不可能的，因此压电式传感器不能用于静态测量。压电元件在交变力的作用下，电荷可以不断补充，可以供给测量回路一定的电流，故只适用于动态测量。

二、压电材料

压电材料可分为压电单晶、压电多晶和有机压电材料。压电式传感器中用得最多的是属于压电多晶的各类压电陶瓷和压电单晶中的石英晶体。其他压电单晶还有适用于高温辐射环境的铌酸锂以及钽酸锂、镓酸锂、锆酸铋等。压电陶瓷包括属于二元系的钛酸钡陶瓷、

锆钛酸铅系列陶瓷、铌酸盐系列陶瓷和属于三元系的铈镁酸铅陶瓷。压电陶瓷的优点是烧制方便、易成型、耐湿、耐高温；缺点是具有热释电性，会对力学量测量造成干扰。

有机压电材料有聚二氟乙烯、聚氟乙烯、尼龙等 10 余种高分子材料。有机压电材料可大量生产和制成较大的面积，它与空气的声阻匹配具有独特的优越性，是很有发展潜力的新型电声材料。

20 世纪 60 年代发现了同时具有半导体特性和压电特性的晶体，如硫化锌、氧化锌、硫化钙等，利用这种材料可以制成集敏感元件和电子线路于一体的新型压电式传感器，很有发展前景。

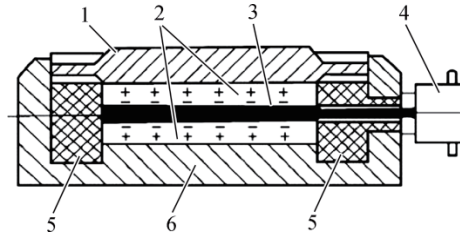
三、压电式传感器的应用

1. 压电式测力传感器

压电式测力传感器是利用压电元件直接实现力电转换的传感器，在拉、压场合通常采用双片或多片石英晶片作压电元件，它刚度大，测量范围宽，线性及稳定性高，动态特性好。当采用大时间常数的电荷放大器时，可测量准静态力。

按测力状态分，有单向、双向和三向传感器，它们在结构上基本一样。

压电式测力传感器是利用压电材料所具有的压电效应制成的，如图 1-2-1 所示为压电式测力传感器的基本结构。由于压电材料的电荷量是一定的，所以在连接时要特别注意，避免漏电。

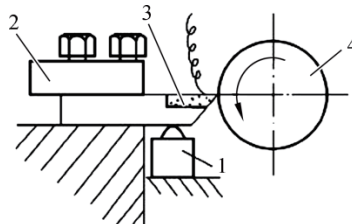


1—传力上盖；2—压电片；3—电极；4—电极引出插头；5—绝缘材料；6—底座。

图 1-2-1 压电式测力传感器

压电式测力传感器的优点是具有自生信号，输出信号大，较高的频率响应，体积小，结构坚固；其缺点是只能用于动能测量，需要特殊电缆，在受到突然振动或过大压力时，自我恢复较慢。

如图 1-2-2 所示为利用压电式陶瓷传感器测量刀具切削力的示意图。金属切削时，刀具切入工件，使被加工材料发生变形而产生切削力。



1—压电式传感器；2—刀架；3—车刀；4—工件。

图 1-2-2 压电式陶瓷传感器

由于压电陶瓷元件的自振频率高，特别适合测量变化剧烈的载荷。图中压电式传感器位于刀具前部的下方，当进行切削加工时，切削力通过刀具传给压电式传感器，压电式传感器将切削力大小转换为电信号输出，记录下电信号的变化便可测得切削力的变化。

2. 玻璃打碎报警装置

将高分子压电测振薄膜粘贴在玻璃上，可以感受到玻璃破碎时发出的振动，并将电压信号传送给集中报警系统。

将探测器贴在门窗玻璃上，上下表面分别用导线连接到控制电路上，一旦玻璃被重力打击或破裂，压电效应产生，经控制电路处理，报警器将产生声光报警。另外，汽车经过、人走路、刮风等引起的振动需要进行排除，只有打击玻璃才会报警。这样就减少了大量的误报警。

3. 压电式加速度传感器

如图 1-2-3 所示为压缩式压电加速度传感器的结构原理，压电元件一般由两片压电片组成。在压电片的两个表面上镀银层，并在银层上焊接输出引线，或在两个压电片之间夹一片金属，引线就焊接在金属片上，输出端的另一根引线直接与传感器基座相连。在压电片上放置一个密度较大的质量块，然后用一个硬弹簧或螺栓、螺帽对质量块预加载荷。整个组件装在一个厚基座的金属壳体中，为了隔离试件的任何应变传递到压电元件上去，避免产生假信号输出，所以一般要加厚基座或选用刚度较大的材料来制造。

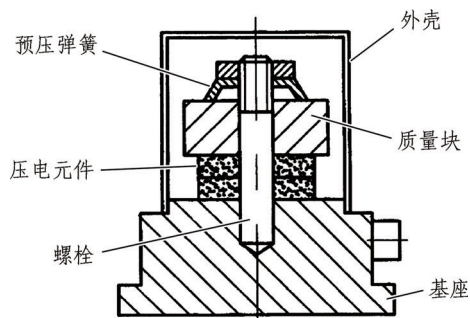


图 1-2-3 压缩式压电加速度传感器

测量时，将传感器基座与试件刚性固定在一起。当传感器感受到振动时，由于弹簧的刚度相当大，而质量块的质量相对较小，所以惯性很小，因此质量块感受到与传感器基座相同的振动，并受到与加速度方向相反的惯性力作用。这样，质量块就有一正比于加速度的交变力作用在压电片上。由于压电片具有压电效应，因此在它的两个表面上就产生了交变电荷（电压），当振动频率远低于传感器固有频率时，传感器的输出电荷（电压）与作用力成正比，即与试件的加速度成正比。输出电量由传感器输出端引出，输入到前置放大器后就可以用普通的测量器测出试件的加速度，如在放大器中加进适当的积分电路，就可以测出试件的振动加速度或位移。

压电式加速度传感器是一种常用的加速度计，它具有结构简单、体积小、质量轻、使用寿命长等优点。压电式加速度传感器在飞机、汽车、船舶、桥梁和建筑的振动和冲击测量中已经得到了广泛的使用，特别是在航空和宇航领域中更具有特殊地位。压电式传感器

也可以用来测量发动机内部燃烧压力与真空度，也可以用于军事工业，例如测量枪炮子弹在膛中击发的一瞬间的膛压变化和炮口冲击波压力。它既可以用来测量大的压力，也可以用来测量微小的压力。

■ 任务检查单

任务编号	1-2	任务名称	压电式传感器		
序号	检查内容			是	否
1	掌握压电效应的基本原理				
2	掌握压电材料的应用				
3	掌握压电式传感器的应用				
评语					
评分					

任务 1-3 磁敏式传感器

■ 任务书

任务编号	1-3	任务名称	磁敏式传感器		
任务目标					
<p>【知识目标】</p> <p>掌握磁电式传感器的基本原理；</p> <p>掌握磁电式传感器的应用；</p> <p>掌握霍尔效应的原理；</p> <p>掌握霍尔传感器的应用。</p> <p>【技能目标】</p> <p>具备磁敏式传感器的应用能力。</p> <p>【素质目标】</p> <p>培养学生严谨认真的工作作风</p>					
任务描述					
<p>本次任务是为了全面了解磁敏式传感器的相关基础知识，以小组为单位汇报磁敏传感器的原理和基本应用，为后续任务的实施奠定理论基础</p>					
实施说明					
<p>(1) 以小组为单位认真学习任务 1-3 的引导材料，做好知识准备；</p> <p>(2) 结合知识准备和小组汇报情况，教师填写“任务检查单”</p>					

■ 引导材料

磁敏式传感器是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换成电信号的一种传感器。磁敏式传感器种类不同，其原理也不完全相同，因此各有各的特点和应用范围。

一、磁电感应式传感器

1. 工作原理

磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动产生电动势的，因此它不需要辅助电源就能把被测对象的机械量转换成易于测量的电信号。

磁电感应式传感器输出功率大，性能稳定，具有一定的工作带宽（10~1000 Hz），因此应用较为普遍。

根据电磁感应定律，当 w 匝线圈在恒定磁场内运动时，如果穿过线圈的磁通为 Φ ，则线圈内的感应电动势 E 与磁通变化率 $d\Phi/dt$ 有如下关系：

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-3-1)$$

根据这一原理，可以设计成两种不同结构的磁电传感器，即变磁通式和恒磁通式磁电传感器。

变磁通式磁电传感器可以用来测量旋转物体的角速度。如图 1-3-1 (a) 所示为开磁路变磁通式磁电传感器，线圈、磁铁静止不动，测量齿轮安装在被测旋转体上，随之一起转动。每转动一个齿，齿的凹凸引起磁路磁阻变化一次，磁通也就变化一次，线圈中产生感应电动势，其变化频率等于被测转速与测量齿轮齿数的乘积。这种传感器结构简单，但输出信号较小，但因高速轴上加装齿轮较危险而不宜测量高转速。

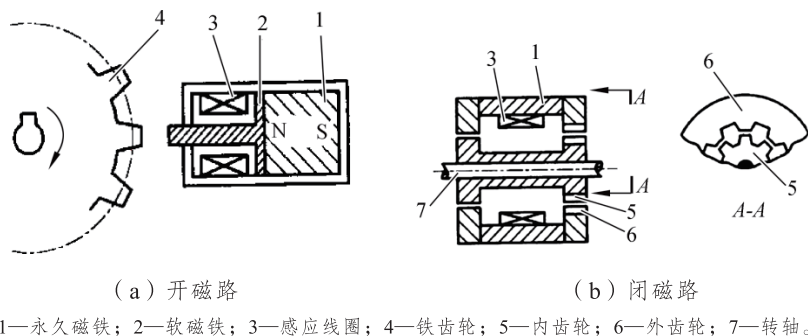


图 1-3-1 变磁通式磁电传感器

如图 1-3-1 (b) 所示为闭磁路变磁通式磁电传感器，它由装在转轴上的内齿轮、外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成，内、外齿轮齿数相同。当转轴连接到被测转轴上时，外齿轮不动，内齿轮随被测轴转动，内、外齿轮的相对转动使气隙磁阻产生周期性变化，从而引起磁路中磁通的变化，使线圈内产生周期性变化的感生电动势。显然，感应电动势的频率与被测转速成正比。

如图 1-3-2 所示为恒定磁通式磁电传感器结构图。它由永久磁铁、线圈、弹簧、金属骨

架等组成。磁路系统产生恒定的直流磁场，磁路中的工作气隙固定不变，因而气隙中磁通也是恒定不变的。其运动部件可以是线圈（动圈式），也可以是磁铁（动铁式），动圈式如图 1-3-2（a）所示，动铁式如图 1-3-2（b）所示，两者的工作原理是完全相同的。当壳体随被测振动体振动时，由于弹簧较软，运动部件质量相对较大，振动频率足够高时，运动部件惯性很大，来不及随振动体一起振动，近乎静止不动，振动能量几乎全被弹簧吸收，永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近于振动体振动速度，磁铁与线圈的相对运动切割磁力线，从而产生感应电动势。

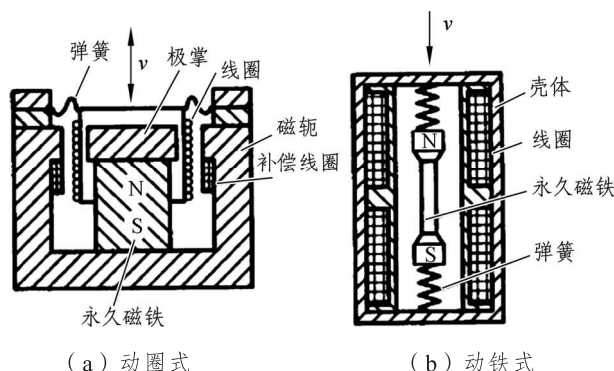
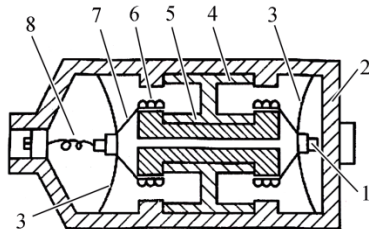


图 1-3-2 恒定磁通式磁电传感器

2. 磁电感应式传感器的应用

(1) 动圈式振动速度传感器。

如图 1-3-3 所示为动圈式振动速度传感器。其结构的主要特点：钢制圆形外壳，里面用铝支架将圆柱形永久磁铁与外壳固定成一体，永久磁铁中间有一小孔，穿过小孔的芯轴两端架起线圈和阻尼环，芯轴两端通过圆形膜片支撑架空且与外壳相连。工作时，传感器与被测物体刚性连接，当物体振动时，传感器外壳和永久磁铁随之振动，而架空的芯轴、线圈和阻尼环因惯性而不随之振动。因此，磁路气隙中的线圈切割磁力线而产生正比于振动速度的感应电动势，线圈的输出通过引线输出到测量电路。该传感器测量的是振动速度参数，若在测量电路中接入积分电路，则输出电势与位移成正比；若在测量电路中接入微分电路，则其输出与加速度成正比。



1—芯轴；2—外壳；3—弹簧片；4—铝支架；5—永久磁铁；6—线圈；7—阻尼环；8—引线。

图 1-3-3 动圈式振动速度传感器

(2) 磁电式扭矩传感器。

如图 1-3-4 所示为磁电式扭矩传感器的工作原理图。在驱动源和负载之间的扭转轴的两

侧安装有齿形圆盘，在它们旁边装有相应的两个磁电传感器。

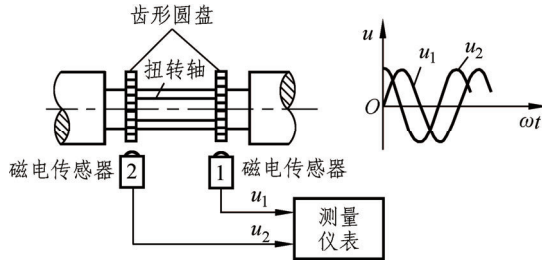


图 1-3-4 磁电式扭矩传感器

磁电式扭矩传感器的结构如图 1-3-5 所示。传感器的检测元件部分由永久磁铁、感应线圈和铁心组成。永久磁铁产生的磁力线与齿形圆盘交接。当齿形圆盘旋转时，圆盘齿凸凹引起磁路气隙的变化，于是磁通量也发生变化，在线圈中感应出交流电压，其频率在数值上等于圆盘上齿数与转数的乘积。当扭矩作用在扭转轴上时，两个磁电传感器输出的感应电压 U_1 和 U_2 存在相位差，这个相位差与扭转轴的扭转角成正比。这样，传感器就可以把扭矩引起的扭转角转换成相位差的电信号。

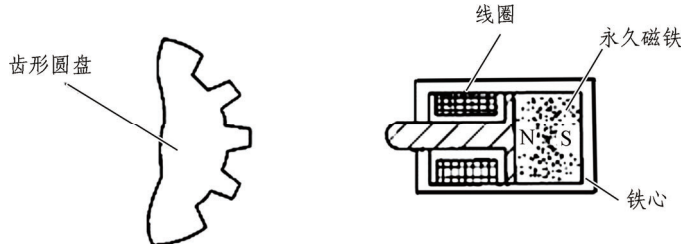


图 1-3-5 磁电式扭矩传感器结构图

二、霍尔传感器

霍尔传感器是基于霍尔效应工作的传感器。随着半导体技术的发展，逐渐开始使用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到应用和发展。

霍尔传感器广泛用于电流、磁场、压力、加速度、振动等方面的测量。

1. 霍尔效应及霍尔元件

置于磁场中的静止载流导体，当它的电流方向与磁场方向不一致时，载流导体上平行于电流和磁场方向上的两个面之间产生电动势，这种现象称为霍尔效应，该电势称为霍尔电势，半导体薄片称为霍尔元件。

如图 1-3-6 所示，在垂直于外磁场 B 的方向上放置一个导电板，导电板通以电流 I 。导电板中的电流使金属中自由电子在电场作用下做定向运动，此时，每个电子受洛伦兹力 f_1 的作用， f_1 的大小为

$$f_1 = eBv \tag{1-3-2}$$

式中 e ——电子电荷；

B ——磁场的磁感应强度；

v ——电子运动平均速度。

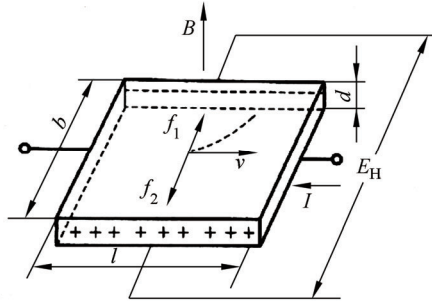


图 1-3-6 霍尔效应原理图

f_1 的方向在图 1-3-6 中是向内的，此时电子除了沿电流反方向作定向运动外，还在 f_1 的作用下漂移（漂移指在一定时间间隔内，传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化），结果使金属导电板内侧面面积累电子，而外侧面面积累正电荷，从而形成了附加内电场 E_H ，称为霍尔电场，该电场强度为

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (1-3-3)$$

式中 U_H ——电位差。

霍尔电场使定向运动的电子除了受洛伦兹力作用外，还受到霍尔电场力的作用，其力的大小为 eE_H ，此力阻止电荷继续积累。随着内、外侧面面积累电荷的增加，霍尔电场增大，电子受到的霍尔电场力也增大，当电子所受洛伦兹力与霍尔电场作用力大小相等方向相反时，即

$$eE_H = eBv \quad (1-3-4)$$

则有

$$E_H = Bv \quad (1-3-5)$$

此时，电荷不再向两侧面积累，达到平衡状态。

若金属导电板单位体积内电子数为 n ，电子定向运动平均速度为 v ，则激励电流 $I = nevbd$ ，即

$$v = \frac{1}{nebd} \quad (1-3-6)$$

将式 (1-3-6) 代入式 (1-3-5) 得

$$E_H = \frac{IB}{nebd} \quad (1-3-7)$$

将式 (1-3-7) 代入式 (1-3-3) 得

$$U_H = \frac{IB}{ned} \quad (1-3-8)$$

式中，令 $R_H = 1/ne$ ，称之为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，则

$$U_H = \frac{R_H IB}{d} = K_H IB \quad (1-3-9)$$

式中， $K_H = R_H/d$ ，称之为霍尔片的灵敏度。

由式(1-3-9)可见,霍尔电势正比于激励电流和磁感应强度,其灵敏度与霍尔系数 R_H 成正比,与霍尔片厚度 d 成反比。为了提高灵敏度,霍尔元件通常制成薄片形状。霍尔元件激励极间电阻 $R=\rho l/(bd)$,同时, $R=U/I=El/I=vl(\mu nevbd)$ (因为 $\mu=v/E$, μ 为电子迁移率),则

$$\frac{\rho l}{bd} = \frac{1}{\mu nevbd} \quad (1-3-10)$$

得

$$R_H = \mu\rho \quad (1-3-11)$$

从式(1-3-11)中可知,霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率的乘积。若要霍尔效应强,则希望有较大的霍尔系数 R_H ,因此,要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高,但电阻率很小;而绝缘材料电阻率极高,但载流子迁移率极低,故只有半导体材料才适合制造霍尔片。目前,常用的霍尔元件材料有锗、硅、砷化钢、铋化钢等半导体材料。其中N型锗易于加工制造,其霍尔系数、温度性能和线性度都很好。N型硅的线性度最好,其霍尔系数、温度性能同N型锗相似。铋化钢对温度最敏感,尤其在低温范围内温度系数大,但在室温时其霍尔系数较大。砷化钢的霍尔系数较小,温度系数也较小,输出特性线性度好。

如图1-3-7(a)所示为霍尔元件。霍尔元件的结构很简单,它由霍尔片、4根引线和壳体组成。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片,引出的4根引线:1、1'两根引线加激励电压或电流,称为激励电极(控制电极);2、2'两根引线为霍尔输出引线,称为霍尔电极。霍尔元件的壳体是用非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装的。在电路中,霍尔元件一般可用两种符号表示,如图1-3-7(b)所示。

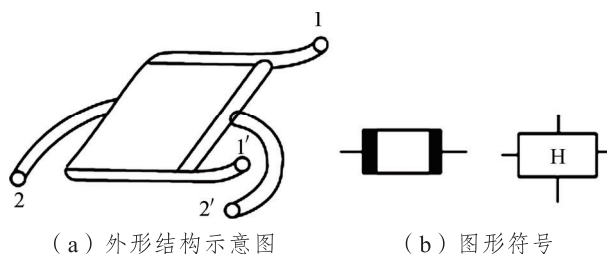


图 1-3-7 霍尔元件

2. 霍尔传感器的应用

按被测对象的性质可将它们的应用分为直接应用和间接应用。前者是直接检测受检对象本身的磁场或磁特性,后者是检测受检对象上人为设置的磁场,这个磁场是被检测信息的载体,通过它,将许多非电、非磁的物理量,例如速度、加速度、角度、角速度、转数、转速以及工作状态发生变化的时间等,转变成电学量来进行检测。

(1) 线性型霍尔传感器。

线性型霍尔传感器主要用于一些物理量的测量。

① 电流测量。

由于通电螺线管内部存在磁场,其大小与导线中的电流成正比,故可以利用霍尔传感器测量出磁场,从而确定导线中电流的大小。利用这一原理可以设计制成霍尔电流传感器。

其优点是不与被测电路发生电接触，不影响被测电路，不消耗被测电源的功率，特别适合于大电流传感器。

霍尔电流传感器工作原理如图 1-3-8 所示，标准圆环铁心有一个缺口，将霍尔传感器插入缺口中，圆环上绕有线圈，当电流通过线圈时产生磁场，则霍尔传感器有信号输出。

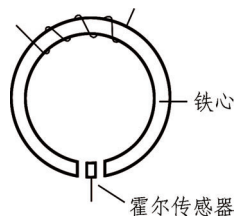


图 1-3-8 电流传感器

② 位移测量。

如图 1-3-9 所示，两块永久磁铁同极性相对放置，将线性型霍尔传感器置于中间，其磁感应强度为零，这个点可作为位移的零点，当霍尔传感器在 Z 轴上做 ΔZ 位移时，传感器有一个电压输出，电压大小与位移大小成正比。

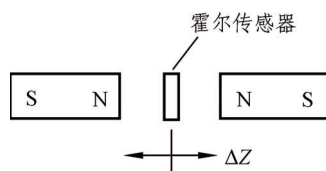


图 1-3-9 电流传感器

如果把拉力、压力等参数变成位移，便可测出拉力及压力的大小。如图 1-3-10 所示，是按照这一原理制成的力传感器。

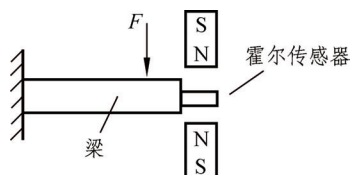


图 1-3-10 力传感器

(2) 开关型霍尔传感器。

开关型霍尔传感器主要用于测转数、转速、风速、流速、接近开关、关门告知器、报警器等。

① 测转速或转数。

如图 1-3-11 所示，在非磁性材料的圆盘边上粘一块磁铁，霍尔传感器放在靠近圆盘边缘处，圆盘旋转一周，霍尔传感器就输出一个脉冲，从而可测出转数（计数器），若接入频率计，便可测出转速。

如果把开关型霍尔传感器按预定位置有规律地布置在轨道上，当装在运动车辆上的永磁体经过它时，可以从测量电路上测得脉冲信号。根据脉冲信号的分布可以测出车辆的运动速度。

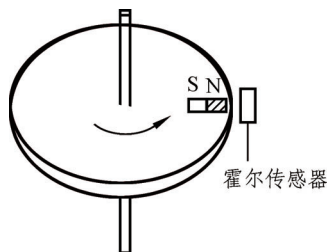


图 1-3-11 测转速传感器

② 各种实用电路。

开关型霍尔传感器尺寸小，工作电压范围宽，工作可靠，价格便宜，因此获得了广泛的应用。下面列举两个实用电路加以说明。

电路 1：防盗报警器。

如图 1-3-12 所示，将小磁铁固定在门的边缘上，将霍尔传感器固定在门框的边缘上，让两者靠近，即门处于关闭状态时，磁铁靠近霍尔传感器，输出端 3 为低电平，当门被非法撬开时，霍尔传感器输出端 3 为高电平，非门输出端 Y 为低电平，继电器 J 吸合，J_a 闭合，蜂鸣器通电后发出报警。

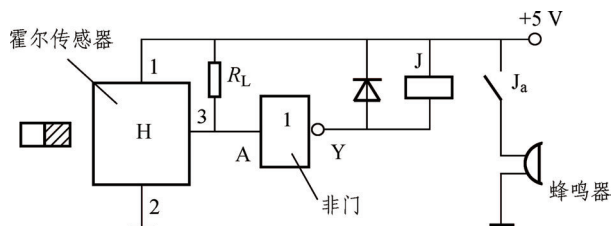


图 1-3-12 防盗报警器

电路 2：公共汽车车门状态显示器。

使用霍尔传感器，只要再配置一小块永久磁铁就很容易做成车门是否关好的指示器，例如公共汽车的 3 个门必须关闭，司机才可开车。电路如图 1-3-13 所示，3 片开关型霍尔传感器分别装在汽车的 3 个门框上，在车门适当位置各固定 1 块磁钢，当车门开着时，磁钢远离霍尔开关，输出端为高电平。若 3 个门中有 1 个未关好，则或非门输出为低电平，红灯亮，表示还有门未关好；若 3 个门都关好，则或非门输出为高电平，绿灯亮，表示车门已关好，司机可放心开车。

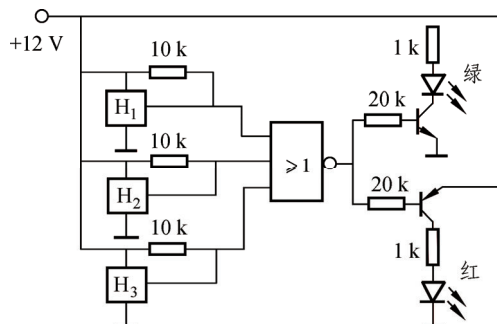


图 1-3-13 车门状态显示器

任务检查单

任务编号	1-3	任务名称	磁敏式传感器		
序号	检查内容			是	否
1	掌握磁电式传感器的基本原理				
2	掌握磁电式传感器的应用				
3	掌握霍尔效应的原理				
4	掌握霍尔传感器的应用				
评语					
评分					

任务 1-4 热电式传感器

任务书

任务编号	1-4	任务名称	热电式传感器		
任务目标					
<p>【知识目标】</p> <p>掌握热电偶传感器的基本原理；</p> <p>掌握热电偶传感器的冷端补偿方法；</p> <p>掌握热电阻传感器的原理；</p> <p>掌握热电阻传感器分类和应用。</p> <p>【技能目标】</p> <p>具备热电式传感器的应用能力。</p> <p>【素质目标】</p> <p>培养学生严谨认真的工作作风</p>					
任务描述					
本次任务是为了全面了解热电式传感器的相关基础知识，以小组为单位汇报热电式传感器的原理和基本应用，为后续任务的实施奠定理论基础					
实施说明					
<p>(1) 以小组为单位认真学习任务 1-4 的引导材料，做好知识准备；</p> <p>(2) 结合知识准备和小组汇报情况，教师填写“任务检查单”</p>					

引导材料

热电式传感器是将温度变化转换为电量变化的装置，它是利用某些材料或元件的性能随温度变化的特性来进行测量的。例如将温度变化转换为电阻、热电动势、热膨胀、磁导

率等变化，再通过适当的测量电路达到检测温度的目的。

把温度变化转换为电势的热电式传感器称为热电偶，把温度变化转换为电阻值的热电式传感器称为热电阻。

一、热电偶传感器

热电偶是温度测量仪表中常用的测温元件，它直接测量温度，并把温度信号转换成热电动势信号，通过电气仪表（二次仪表）转换成被测介质的温度。各种热电偶的外形常因需要而不相同，但是它们的基本结构却大致相同，一般由热电极、绝缘套保护管和接线盒等主要部分组成，通常和显示仪表、记录仪表及电子调节器配套使用。

在工业生产过程中，温度是需要测量和控制的重要参数之一。在温度测量中，热电偶的应用极为广泛，它具有结构简单、制造方便、测量范围广、精度高、惯性小和输出信号便于远传等诸多优点。另外，由于热电偶是一种有源传感器，测量时不需外加电源，使用十分方便，所以常被用作测量炉子、管道内的气体或液体的温度及固体的表面温度。

1. 热电偶工作原理

1821 年，德国物理学家塞贝克将两种不同金属组成闭合回路，并用酒精灯加热其中一个接触点（称为结点），发现放在回路中的电流表指针发生偏转。如果用两盏酒精灯对两个结点同时加热，指针的偏转角反而减小。显然，指针的偏转说明回路中有电动势产生并有电流在回路中流动，电流的强弱与两个结点的温差有关。

据此，塞贝克发现和证明了将两种不同性质的导体 A、B 组成闭合回路，如图 1-4-1 所示，若结点 1、2 处于不同的温度，即 $T \neq T_0$ ，两者之间将产生一热电势，在回路中形成一定大小的电流，这种现象称为热电效应。

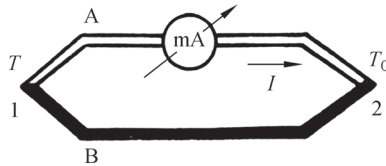


图 1-4-1 热电效应示意图

两种不同材料的导体所组成的回路称为热电偶，组成热电偶的导体称为热电极，热电偶所产生的电动势称为热电势。热电偶的两个结点中，置于温度为 T 的被测对象中的结点称为测量端，又称为工作端或热端；而置于参考温度 T_0 的结点称为参考端，又称自由端或冷端。

热电偶回路有以下性质：

- (1) 用两种相同材料组成的热电偶，无论两个结点温度如何，热电偶回路中电势均为零。
- (2) 热电偶两结点温度相同时，无论热电偶电极材料是否相同，热电偶回路中电势均为零。
- (3) 热电偶所产生的热电势的大小与热电偶电极的几何形状（如长短、粗细等）均无关，与热电极中间温度分布也无关。

2. 热电偶的类型及结构

(1) 热电偶的类型。

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。所谓标准热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差，并有统一标准分度表的热电偶。标准热电偶有与其配套的显示仪表可供选用。非标准热电偶在使用范围和数量级上均不及标准热电偶，一般也没有统一的分度表，主要用于某些特殊场合的测量。

我国从 1991 年开始采用国际计量委员会规定的“1990 年国际温标”（简称 TIS-90）的新标准。按此标准，共有 8 种标准化了的通用热电偶，如表 1-4-1 所示。表中所列热电偶中，写在前面的热极为正极，写在后面的为负极。对于每一种热电偶，还制订了相应的分度表，并且有相应的线性化集成电路与之对应。国际电工委员会向世界各国推荐 8 种热电偶作为标准化热电偶。

表 1-4-1 8 种国际通用热电偶特性表

名称	分度号	测温范围/°C	100 °C 时的 热电势/mV	1 000 °C 时的 热电势/mV	特点
铂铑 30- 铂铑 6	B	50 ~ 1 820	0.033	4.834	熔点高，测温上限高，性能稳定，精度高，价格高昂，热电势小，线性差；只适用于高温域的测量
铂铑 13-铂	R	-50 ~ 1 768	0.647	10.506	性能稳定，复现性好；但热电势较小，不能在金属蒸气和还原性气氛中使用，多用于精密测量
铂铑 10-铂	S	-50 ~ 1 768	0.646	9.587	优点同上；但性能不如 R 热电偶；长期以来曾经作为国际温标的法定标准热电偶
镍铬-镍硅	K	-270 ~ 1 370	4.096	41.276	热电势大，线性好，稳定性好，价格低廉；多用于工业测量
镍铬硅-镍硅	N	-270 ~ 1 300	2.744	36.256	是一种新型热电偶，各项性能均比 K 热电偶好，适用于工业测量
镍铬-铜镍 (康铜)	E	-270 ~ 800	6.319	—	线性好，耐高湿度，价格低廉；但不能用于还原性气氛；多用于工业测量
铁-铜镍 (康铜)	J	-210 ~ 760	5.269	—	价格低廉，在还原性气体中较稳定；但纯铁易被腐蚀和氧化；多用于工业测量
铜-铜镍 (康铜)	T	-270 ~ 400	4.279	—	价格低廉，加工性能好，离散性小，性能稳定；线性好，精度高；多用于低温域测量

我国标准化热电偶也有 8 种，分别是铂铑 10-铂 (S)、铂铑 13-铂 (R)、铂铑 30-铂铑 6 (B)、镍铬-镍硅 (K)、镍铬-康铜 (E)、铁-康铜 (J)、铜-康铜 (T) 和镍铬硅-镍硅 (N)。

下面介绍几种常用热电偶。

① 铂铑 10-铂热电偶。

组成：由直径 0.5 mm 的纯铂丝和直径相同的铂铑丝制成，分度号为 S。铂铑丝为正极，纯铂丝为负极。

特点：热电性能好，抗氧化性强，适合在氧化性、惰性气体中连续使用。长期适用的温度为 1 400 °C，超过此温度时，即使在空气中纯铂丝也将再结晶而使晶粒增大。短期使用温度为 1 600 °C。在所有的热电偶中，它的准确度等级最高，通常用作标准或测量高温的热电偶，其使用温度范围广，均质性及互换性好。缺点是价格昂贵，热电势较小，需配灵敏度高的显示仪表。

② 镍铬-镍硅（镍铝）热电偶。

组成：镍铬为正极，镍硅为负极，分度号为 K。

特点：使用温度范围宽，高温下性能较稳定，热电动势和温度的关系近似为线性，价格便宜，因此是目前工矿企业用量最大的一种热电偶。它适用于在氧化性和惰性气体中连续使用，短期使用温度为 1 200 °C，长期使用温度为 1 000 °C。

③ 镍铬-康铜热电偶。

组成：镍铬为正极，康铜为负极，分度号为 E。

特点：最大特点为在常用热电偶中热电动势最大，即灵敏度最高，适宜在 50 ~ 870 °C 范围内的氧化性或惰性气体中使用，尤其适宜在 0 °C 以下使用。在湿度大的情况下，较其他热电偶耐腐蚀。

（2）热电偶的结构。

热电偶的基本结构包括热电极、绝缘材料和保护管。热电偶按其结构不同可分为装配式热电偶、铠装式热电偶和特殊形式热电偶；按使用环境可细分为耐高温热电偶、耐磨热电偶、耐腐蚀热电偶、耐高压热电偶、隔爆热电偶、铝液测温用热电偶、循环流化床用热电偶、水泥回转窑炉用热电偶、阳极焙烧炉用热电偶、高温热风炉用热电偶、汽化炉用热电偶、渗碳炉用热电偶、高温盐熔炉用热电偶、铜铁及钢水用热电偶、抗氧化钨铼热电偶、真空炉用热电偶、铂铑热电偶等。

工业热电偶作为测量温度的传感器，通常与显示仪表、记录仪表或计算机等配套使用，可以直接测量各种生产过程中气体、液体、熔体以及固体表面的温度。

如图 1-4-2 所示为普通工业装配式热电偶结构图，它由热电极、绝缘套管、保护管、接线盒、接线盒盖等几个主要部分组成。

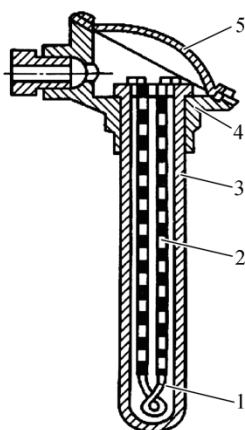
① 热电极。

热电极也称为偶丝，它是热电偶的基本组成部分。普通金属制成的偶丝，其直径一般为 0.5 ~ 3.2 mm，贵金属制成的偶丝，直径一般为 0.3 ~ 0.6 mm。偶丝的长度则由使用情况、安装条件以及工作端在被测介质中插入的深度来决定，通常为 300 ~ 1 000 mm，常用的长度为 350 mm。

② 绝缘管。

绝缘管是用于热电极之间及热电极与保护管之间进行绝缘保护的零件。形状一般为圆形或椭圆形，中间开有 2 个、4 个或 6 个孔，偶丝穿孔而过。材料为黏土质、高铝质、刚玉

质等，材料选用根据使用的热电偶而定。在室温下，绝缘管的绝缘电阻应在 $5\text{ M}\Omega$ 以上。



1—热电极；2—绝缘套管；3—保护管；4—接线盒；5—接线盒盖。

图 1-4-2 普通工业装配式热电偶结构图

③ 保护套管。

保护套管是用来保护热电偶感温元件免受被测介质化学腐蚀和机械损伤的装置。保护套管应具有耐高温、耐腐蚀的性能，要求导热性能好、气密性好。材料有金属、非金属以及金属陶瓷 3 大类。保护套管的材料选择主要依据被测介质和使用的环境条件。金属材料有铝、黄铜、碳钢、不锈钢等。

④ 接线盒。

根据被测量温度的对象及现场环境条件不同，接线盒设计有普通式、防溅式、防水式和接插座式等结构形式，用来固定接线座和作为连接补偿导线的装置。

普通式接线盒无盖，仅由箱体构成，其接线座用螺钉固定在箱体上，适用于环境条件良好、无腐蚀性气体的现场。防溅式、防水式接线盒有盖，且盖与箱体是由密封圈压紧密封，适用于雨水能溅到的现场或露天设备现场。插座式接线盒结构简单，安装所占空间小，接线方便，适用于需要快速拆卸的环境。

3. 热电偶的冷端补偿

热电偶测量温度时只有使其冷端的温度保持不变，其热电势大小才与测量温度呈一定的比例关系。若测量时，冷端的（环境）温度变化，将严重影响测量的准确性。在冷端采取一定措施补偿，避免由于冷端温度变化造成的测量不准确称为热电偶的冷端补偿。

（1）冰点槽法。

冰点槽法是把热电偶的冷端放入冰水混合物容器里，使 $T_0=0\text{ }^\circ\text{C}$ 。这种办法仅限于在科学实验中使用。为了避免冰水导电引起两个连接点短路，必须把连接点分别置于两个玻璃试管里，浸入同一冰点槽，使相互绝缘。

（2）计算修正法。

热电偶分度表是以冷端温度 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 为基础而制成的，所以，如果想要直接利用分度表根据显示仪表的读数求得温度必须使冷端温度保持为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 。如果冷端温度不为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ，则必须

对仪表指示值进行修正，例如冷端温度恒定在 $T_0 > 0^\circ\text{C}$ 时，则测得的热电势将小于该热电偶的分度值，因此为了求得所测的真实温度，可利用 $E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$ 进行修正。

(3) 修正系数法。

把冷端实际温度 T_H 乘上系数 k ，加到由 $E(T, T_H)$ 查分度表所得的温度上，成为被测温度 T 。用公式表达即

$$T = T' + k \times T_H \quad (1-4-1)$$

式中 T ——未知的被测温度；

T' ——参考端在室温下热电偶电势与分度表上对应的某个温度；

T_H ——室温；

k ——修正系数。

(4) 零点迁移法。

零点迁移法的应用领域一般为冷端不是 0°C ，但十分稳定的场所，如恒温车间或有空调的场所。

实质：在测量结果中人为地加一个恒定值，因为冷端温度稳定不变，电动势 $E(T_H, 0)$ 是常数，利用指示仪表上调整零点的办法，加大某个适当的值而实现补偿。

(5) 补偿器法。

利用不平衡电桥产生热电势补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势的变化。

(6) 软件处理法。

对于计算机系统，不必全靠硬件进行热电偶冷端处理。例如冷端温度恒定但不为 0°C 的情况，只需在采样后加一个与冷端温度对应的常数即可。

二、热电阻

热电阻是利用导体的电阻随温度变化而变化的特性测量温度的。热电阻传感器可分为金属热电阻式和半导体热电阻式两大类，前者简称热电阻，后者简称热敏电阻。

1. 热电阻

热电阻是基于电阻的热效应进行温度测量的，即电阻体的阻值随温度的变化而变化的特性。因此，只要测量出感温热电阻的阻值变化，就可以测量出温度，它是中低温区 ($-200 \sim 500^\circ\text{C}$) 最常用的一种温度传感器。作为测温用的热电阻具有以下特点：

- ① 电阻值与温度变化具有良好的线性关系。
- ② 电阻温度系数大，以便对温度变化敏感，便于精确测量。
- ③ 电阻率高，热容量小，从而具有较快的响应速度。
- ④ 在测量范围内具有稳定的物理、化学性质。
- ⑤ 容易加工，价格尽量便宜。

热电阻大都由纯金属材料制成，目前应用最多的是铂和铜，其中铂热电阻的测量精确度最高，它不仅广泛应用于工业测温，而且被制成标准的测温仪。

(1) 铂热电阻。

铂热电阻主要作为标准电阻温度计，被广泛应用于温度基准、标准的传递。铂热电阻是利用铂丝的电阻值随着温度的变化而变化这一基本原理设计和制作的，按 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值 R 的大小分为 $10\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 等，测温范围均为 $-200\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 $10\ \Omega$ 铂热电阻的感温元件是用较粗的铂丝绕制而成，耐温性能优于 $100\ \Omega$ 的铂热电阻，主要用于 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的温度测量； $100\ \Omega$ 铂热电阻主要用于 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的温度测量。

铂热电阻的优点是在氧化性介质中，甚至在高温下，其物理、化学性能稳定，电阻率大，精确度高，可以耐较高温度。铂是一种贵金属，很容易提纯，复现性好，具有良好的工艺性，可制成很细的铂丝或极薄的箔片。与其他材料相比，铂具有较高的电阻率，因此，普遍认为铂是一种较好的热电阻材料。铂电阻的缺点是电阻温度系数比较小，价格昂贵。常见的铂热电阻如图 1-4-3 所示。



图 1-4-3 铂热电阻

(2) 铜热电阻。

铂热电阻虽然优点多，但是价格昂贵，在测量精度要求不高且温度较低场合，铜热电阻得到广泛应用。如图 1-4-4 所示为铜热电阻外形图。



图 1-4-4 铜热电阻

在 $-50\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围，铜热电阻与温度呈近似线性关系。铜热电阻的优点是电阻温度系数较大、线性好、价格便宜。缺点是电阻率较低、热惯性较大、稳定性较差、电阻体的体积较大，在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时容易氧化，因此，只能用于低温及没有侵蚀性的介质中。

(3) 热电阻的结构。

金属热电阻由电阻体、保护套管和接线盒等部件组成，如图 1-4-5 (a) 所示。金属热电

阻丝绕在骨架上，骨架采用石英、云母、陶瓷或塑料等材料制成，可根据需要将骨架制成不同的外形。为了防止电阻体出现电感，热电阻丝通常采用双线并绕法，如图 1-4-5 (b) 所示。

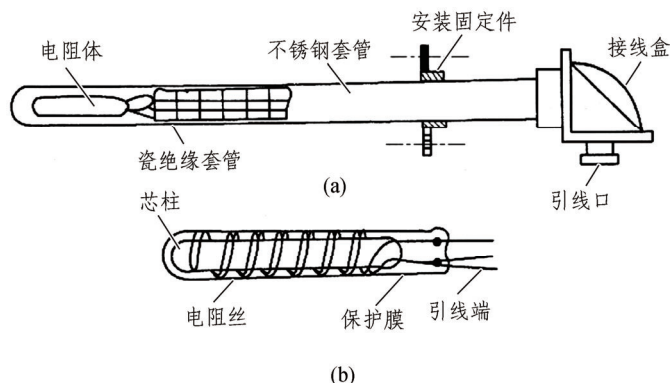


图 1-4-5 热电阻结构图

(4) 热电阻的选用原则。

① 根据测量的范围和对象，选择适当的工业热电阻型号以及保护管材料，热电阻的“最高使用”压力不可超过在该工作温度下保护管所能承受的压力。

② 选用工业热电阻的分度号必须与显示仪表的分度号一致。

(5) 热电阻的安装要求。

① 工业热电阻的安装地点，应避免安装在炉门旁边和避免与加热物体距离过近之处。

② 工业热电阻的接线盒不可碰到被测介质的容器壁，接线盒的温度不宜超过 100 °C，并尽可能地保持稳定不变。

③ 工业热电阻浸入被测介质中的长度应不小于保护管外径的 10 倍。

(6) 热电阻使用注意事项。

① 连接导线应采用绝缘（最好是屏蔽）铜线，截面面积视工业热电阻与显示仪表间的距离而定，但一般不得小于 1.5 mm²。导线的电阻值应按显示仪表技术条件规定的数据配备，导线的电阻值可用惠斯顿电桥来调整。

② 增加被测介质的循环，使工业热电阻与被测介质间的对流传热增加。

③ 当工业热电阻用来测量变化的温度场时，常有动态误差的存在，要注意选用具有适当热响应时间的工业热电阻，因为热响应时间的大小是决定动态误差大小的主要因素，并与之成正比，它对温度的自动调节和控制起着相当重要的作用。

④ 在安装使用工业热电阻之前，应保存在不受振动和碰撞的地方，最合适的存放场所条件为环境温度 -20 ~ 40 °C，相对湿度不大于 80% 的通风室内，且不含有对工业热电阻起腐蚀作用的有害杂质。

2. 热敏电阻

热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度显著变化这一特性制成的一种热敏元件，其特点是电阻率随温度显著变化。它是由某些金属氧化物，采用不同比例配方，经高温烧结而