

普通高等教育“十二五”规划教材

材料成形检测与控制

杭争翔 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

材料成形检测与控制

主 编 杭争翔
参 编 曲迎东 常云龙 黄宏军
主 审 夏家宽



机械工业出版社

本书从材料成形检测与控制的基本理论及应用角度出发,按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则,系统地介绍了材料成形检测与控制的基础知识;常用传感器及测量电路的工作原理;各种测量显示仪表的原理、特点与使用;温度检测技术;应力应变测量技术;继电接触式控制技术、直流伺服电动机与步进电动机的原理及其驱动控制技术;自动控制理论基础;自动控制系统分析技术;液压传动元器件及液压基本回路等。

本书可作为材料成形及控制工程专业的教材,也可供材料成形领域工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形检测与控制/杭争翔主编. —北京:机械工业出版社, 2010.9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-31582-7

I. ①材… II. ①杭… III. ①工程材料-成型-检测-高等学校-教材②工程材料-成型-控制-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158467 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 丁昕祯
版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽
封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京京丰印刷厂印刷
2010 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·17.25 印张·424 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-31582-7
定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

材料成形检测与控制是研究材料成形工程技术领域有关参量的检测原理与控制技术的一门学科。检测是人们认识客观事物的重要手段,通过检测可以揭露事物的内在联系和变化规律;从而帮助人们认识和利用它;控制是实现某种客观事物的重要手段,通过控制可以实现某种运动规律,推动科学技术的不断进步。从科学技术发展的过程来看,很多新的发明和发现都和检测与控制技术分不开,同时科学技术的发展,又大大促进了检测与控制技术的发展,为检测与控制技术提供更新的方法和设备。

“材料成形检测与控制”是材料成形与控制工程专业的一门技术基础课,通过本课程的学习,使读者能够建立材料成形检测与控制的基本概念,了解各种物理量或参量的测量原理和控制技术,为以后进行科学试验和生产过程的检测与控制打下基础。

本书从应用角度出发,按照由浅入深、从理论到实践、先分析后综合的原则,把全书内容分为8章。第1章介绍了材料成形检测与控制的重要性,以及材料成形中经常检测与控制的物理量。第2章介绍了材料成形及控制工程中常用传感器的结构及其工作原理、应用基础,包括热电式传感器、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、霍尔传感器、光电式传感器及传感器的信号处理和适用原则。第3章介绍了材料成形及控制工程中常用的检测及显示技术,包括测温用磁电动圈式仪表、电位差计、温度的测量、电阻应变仪的工作原理及应用技术、应力和应变的测量、数字式仪表的构成及工作原理。第4章介绍了继电器接触器控制技术、直流伺服电动机与步进电动机的工作原理及其驱动控制技术。第5章介绍了自动控制理论基础,包括自动控制系统的构成及建立数学模型的方法、传递函数、自动控制系统框图及其变换。第6章介绍了自动控制系统的基于时域的分析方法;典型输入信号及一阶系统、二阶系统的输出响应;自动控制系统稳定性及稳定判据、稳态误差分析;速度控制系统、弧长控制系统的分析技术。第7章介绍了在铸造、焊接、锻压领域常用的液压传动基础,主要介绍液压泵动力元件、液压缸执行元件、液压阀控制元件、液压辅助元件等构造、工作原理及其应用技术。第8章介绍了在铸造、焊接、锻压领域常用的液压基本控制回路的构成及其工作原理,具体介绍压力控制回路、速度控制回路、多缸工作回路以及其他控制回路。

本书可作为材料成形及控制工程专业的教材,也可供材料加工及成形领域的工程技术人员参考使用。

本书由沈阳工业大学杭争翔教授主编,曲迎东教授、常云龙教授、黄宏军教授参加编写,夏家宽教授主审。第1、3、4、6章由杭争翔编写;第2章由黄宏军编写;第5章由常云龙编写;第7、8章由曲迎东编写;杭争翔负责全书统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 材料成形检测与控制的重要性 1

1.2 材料成形中经常检测与控制的物理量 1

1.3 本书的主要内容 2

第2章 材料成形及控制工程中常用的传感器 3

2.1 传感器的基本概念 3

2.1.1 传感器的定义与组成 3

2.1.2 传感器的分类 4

2.2 热电式传感器 5

2.2.1 热电偶 5

2.2.2 金属热电阻 10

2.2.3 热敏电阻 11

2.3 电阻式传感器 13

2.3.1 电位器式电阻传感器 13

2.3.2 应变式电阻传感器 15

2.4 电感式传感器 17

2.4.1 变磁阻式传感器 17

2.4.2 互感式传感器 19

2.4.3 电涡流式传感器 21

2.5 电容式传感器 22

2.5.1 基本工作原理 22

2.5.2 变间隙型电容式传感器 22

2.5.3 变极板面积型电容式传感器 23

2.5.4 变介质型电容式传感器 24

2.5.5 电容式传感器等效电路 24

2.6 压电式传感器 25

2.6.1 压电效应和压电材料 25

2.6.2 石英晶体的压电特性 26

2.6.3 压电陶瓷的压电现象 28

2.6.4 压电式传感器等效电路和测量电路 29

2.6.5 压电式传感器的应用 30

2.7 霍尔传感器 31

2.7.1 霍尔效应 31

2.7.2 霍尔元件的主要技术参数 33

2.7.3 霍尔传感器的应用 34

2.8 光电式传感器 34

2.8.1 光电效应传感器 35

2.8.2 CCD (电荷耦合器件) 图像传感器 40

2.9 传感器的信号处理 42

2.10 传感器的适用原则 47

复习思考题 48

第3章 材料成形及控制工程中常用检测及显示技术 49

3.1 磁电动圈式仪表 49

3.1.1 磁电动圈式仪表的特点及分类 49

3.1.2 磁电动圈式仪表的结构及工作原理 49

3.1.3 磁电动圈式仪表的测量电路 53

3.1.4 磁电动圈式温度指示调节仪表的断偶保护电路 54

3.2 电位差计 55

3.2.1 手动平衡直流电位差计 56

3.2.2 自动平衡电子电位差计 59

3.3 温度的测量 62

3.3.1 测温方法的分类 62

3.3.2 热电偶测温 63

3.3.3 热电阻测温 71

3.4 电阻应变仪 77

3.4.1 电阻应变仪的分类 77

3.4.2 电阻应变仪的工作原理 78

3.4.3 电阻应变仪主要组成部分的作用及性能 79

3.4.4 常用电阻应变仪介绍 81

3.5 应力和应变的测量 83

3.5.1 应用应变片测量应力和应变 83

3.5.2 应变片的工作特性及其主要性能参数 84

3.5.3 应变片粘贴工艺 85

3.5.4 应用电阻应变片测试应力和应变	86	5.1.3 按系统的特性来分类	140
3.5.5 测点选择、布片和选片原则	90	5.1.4 按系统参数是否随时间而变化来分类	141
3.6 数字式仪表	92	5.1.5 按系统信号的形式来分类	141
3.6.1 数字式仪表的特点及构成	92	5.2 开环和闭环控制系统	142
3.6.2 数字式仪表构成环节的工作原理	93	5.3 控制系统的组成及对控制系统的要求	143
3.6.3 虚拟仪器简介	96	5.4 数学模型的分类及建立	145
复习思考题	97	5.4.1 数学模型的分类	145
第4章 材料成形及控制工程中常用的驱动控制技术	98	5.4.2 数学模型的建立	146
4.1 继电接触式控制系统	98	5.5 拉普拉斯变换及传递函数的概念	147
4.1.1 电气控制线路的图形符号和文字符号	98	5.5.1 拉普拉斯变换	147
4.1.2 电气原理图画法	101	5.5.2 传递函数的概念	151
4.1.3 笼型电动机的起动控制线路	101	5.6 典型环节及其传递函数	155
4.1.4 电气控制线路设计基础	103	5.6.1 典型环节及其传递函数	155
4.1.5 电气控制线路设计的基本规律	105	5.6.2 机电系统	160
4.2 直流伺服电动机及其驱动控制技术	110	5.7 自动控制系统的框图及其变换	162
4.2.1 直流伺服电动机的分类及其结构	111	复习思考题	167
4.2.2 直流伺服电动机的特性	115	第6章 自动控制系统分析	170
4.2.3 直流伺服电动机的转速控制方式	118	6.1 自动控制系统时域分析	170
4.2.4 直流伺服电动机的驱动及调速	119	6.2 时域性能指标	172
4.2.5 直流伺服电动机的选用	122	6.3 一阶系统分析	173
4.3 步进电动机及其驱动控制技术	123	6.3.1 一阶系统的数学模型	173
4.3.1 反应式步进电动机的构造和工作原理	123	6.3.2 一阶系统的单位阶跃响应	173
4.3.2 步进电动机的基本特性	127	6.4 二阶系统分析	176
4.3.3 步进电动机的驱动电源	133	6.4.1 二阶系统的数学模型	176
4.3.4 步进电动机的选用	136	6.4.2 二阶系统的单位阶跃响应	179
复习思考题	138	6.5 稳定性与代数判据	183
第5章 自动控制理论基础	139	6.6 稳态误差分析	188
5.1 自动控制系统的分类	139	6.6.1 误差及稳态误差的定义	188
5.1.1 按控制系统的工作原理来分类	139	6.6.2 典型外作用下系统的稳态误差分析	189
5.1.2 按输入信号的变化规律来分类	140	6.6.3 稳态误差与开环放大系数的关系	192
		6.7 速度控制系统分析	193
		6.7.1 开环调速系统	193
		6.7.2 转速负反馈闭环调速系统	194
		6.7.3 电压负反馈直流调速系统	196
		6.7.4 电流正反馈和补偿控制规律	197
		6.7.5 电流补偿控制直流调速系统的数学模型和稳定条件	200
		6.8 焊接电弧控制系统分析	201
		6.8.1 等速送丝焊接电弧控制系统	201

6.8.2 均匀调节电弧控制系统	204	7.8.1 溢流阀	234
复习思考题	206	7.8.2 减压阀	237
第7章 液压传动元器件	208	7.8.3 顺序阀	238
7.1 液压传动的工作原理、系统组成	208	7.8.4 平衡阀	239
7.2 液压泵的工作原理、分类以及 主要性能参数	210	7.8.5 卸荷阀	240
7.2.1 液压泵的工作原理和分类	210	7.8.6 压力继电器	241
7.2.2 液压泵的性能参数	211	7.9 流量控制阀	241
7.2.3 液压泵的实际工作压力	212	7.9.1 节流口的形式	241
7.3 齿轮泵、叶片泵、柱塞泵	213	7.9.2 节流口的流量特性	243
7.3.1 齿轮泵	213	7.9.3 调速阀	244
7.3.2 叶片泵	215	复习思考题	245
7.3.3 柱塞泵	217	第8章 液压基本回路	247
7.4 双作用单、双活塞杆式液压缸	218	8.1 压力控制回路	247
7.4.1 双作用单杆活塞液压缸的工作原理 及特点	220	8.1.1 调压回路	247
7.4.2 双作用双杆活塞液压缸	221	8.1.2 保压回路	249
7.4.3 柱塞液压缸	221	8.1.3 增压回路	250
7.5 单、双叶片式摆动液压缸及增压 液压缸	222	8.1.4 减压回路	250
7.5.1 单叶片摆动液压缸	222	8.1.5 卸荷回路	251
7.5.2 双叶片摆动液压缸	222	8.2 速度控制回路	253
7.5.3 增压液压缸	223	8.2.1 调速回路	253
7.6 液压阀的分类	224	8.2.2 增速回路	258
7.7 方向控制阀	224	8.2.3 速度换接回路	260
7.7.1 单向阀	225	8.3 多缸工作回路	261
7.7.2 换向阀	226	8.3.1 同步回路	261
7.8 压力控制阀	234	8.3.2 顺序动作回路	263
		8.3.3 其他多缸回路	265
		复习思考题	267
		参考文献	268

第1章 绪 论

材料成形工艺主要包括铸造、焊接和锻压。材料成形检测与控制技术是一门专门研究如何保证铸造、焊接和锻压产品质量的学科。本章介绍材料成形检测与控制的重要性、材料成形中经常检测与控制的物理量，简要介绍了本书的主要内容。

1.1 材料成形检测与控制的重要性

在材料成形工艺过程中，有很多参量需要检测及显示，例如在铸造、焊接和锻压热加工过程中的温度参数，经常需要检测及显示，有时还需要对该参量进行控制，使之参量按照一定规律变化，所以检测与控制决定热加工的工艺过程。

材料成形检测与控制这门课程主要介绍铸造、焊接和锻压领域中各种物理量的检测与控制的基本原理及基本方法，它是进行科学试验和生产过程参量测量与控制必不可少的理论基础。检测是人们认识客观事物的重要手段，通过检测可以揭露事物的内在联系和变化规律，从而帮助人们认识和利用它；控制是实现某种客观事物的重要手段，通过控制可以实现某种运动规律，推动科学技术的不断进步。从科学技术发展的过程来看，很多新的发明和发现都和检测与控制技术分不开，同时科学技术的发展，又大大促进了检测与控制技术的发展，为检测与控制技术提供更新的方法和设备。

检测技术是自动控制的基础，通常是在检测的基础上进行控制。随着自动控制生产系统的广泛应用，为了保证系统高效率地运行，必须对生产流程中的有关参数进行测试采集，以准确地对系统实现自动控制。

1.2 材料成形中经常检测与控制的物理量

铸造、焊接和锻压生产中，经常需要检测及控制的物理量和有关主要参数概括如下：

(1) 温度的检测与控制 温度是铸造、焊接和锻压生产中的重要工艺参数，金属材料的成形基本上都是在高温状态下进行的，因此只有准确地检测及控制温度的变化，才能正确控制材料加工工艺，从而获得高质量的产品。

(2) 位移、速度及加速度的检测与控制 这是铸造、焊接和锻压生产过程中的基本参量，准确地检测及控制位移、速度及加速度是实现高质量生产过程的基础。

(3) 应力与应变的测量 在研究构件的强度与变形、焊接结构的应力应变、铸造应力及锻压塑性变形时，都涉及到应力、应变的测量。

(4) 力学性能 如抗拉强度、屈服极限、伸长率、断面收缩率、冲击韧度、显微硬度、布氏硬度等。

(5) 电流、电压等工艺参数的检测与控制 例如焊接过程中的焊接电流、电弧电压决定焊接质量，焊接过程中需要很好地检测与控制这些参数。

(6) 位置检测及运动控制 例如焊接过程中焊接到哪个位置需要进行检测; 焊接工艺运动过程需要电动机驱动控制; 铸造及锻压工艺过程的机械动作需要液压驱动及控制; 焊接、铸造及锻压工艺动作过程的程序过程需要程序控制。

这里列举的只是铸造、焊接和锻压生产中的一些常见工艺参数。事实上生产过程是复杂的, 涉及到的物理量还有很多。

1.3 本书的主要内容

本书主要介绍材料成形工艺过程中涉及的检测与控制的基本原理。材料成形检测与控制课程是材料成形及控制工程专业的技术基础课, 其主要内容是学习测量与控制各种参量的原理和方法。根据材料成形及控制工程专业的特点, 本课程重点介绍检测与控制的基本概念, 材料成形及控制工程中常用的检测及显示技术, 继电器、接触器及程序控制技术, 拖动及其驱动控制技术, 自动控制理论基础, 材料成形领域常用的速度控制系统、焊接电弧控制系统, 在焊接、铸造、锻压领域常用的液压传动基础、常用的液压基本控制回路的构成及其工作原理、压力控制回路、速度控制回路、多缸工作回路以及其他控制回路。

材料成形检测与控制涉及知识面较广, 为学好这门课需要掌握数学、力学、电工学、物理学、物理化学和金属学等多方面的内容。因此在学习的过程中, 要掌握检测与控制的基本原理和方法, 侧重灵活运用这些知识解决实际问题。另外材料成形检测与控制是一门实践性很强的技术, 它在动手试验能力方面要求较高, 侧重实际测量与控制技能的培养。

第2章 材料成形及控制工程中常用 的传感器

检测技术在材料科学与工程学科中占有重要的地位，检测分析技术的完善和发展推动着现代材料科学技术的进步。同时，检测技术的发展又得益于其他科学技术的研究成果。在材料科学实验和工程制备工艺中所涉及的检测参数主要是非电量的过程参数和机械参数等，因此对其检测主要是对非电量的检测，其中关键是选用适当的传感器，由它将被测参数转换成电参数，再由测量电路完成被测量的显示和记录。

传感器是一种能够感受外界信息，如力、热、声、磁、光、色、味、位移、尺寸等信息变化，并按一定规律将其转换成电信号的装置。在非电量测量中，必须通过传感器将其转换成电量，然后再用电测装置进行信号处理，最终获得被测量。在现代科学技术发展过程中，非电量（压力、应变、速度、加速度、温度、流量、液位、浓度、成分、pH值、反应速率、血压、脉搏等）检测技术已经应用于国民生产的各个领域，是测量技术中的关键环节，一切与测量相关的技术均以传感器为核心展开。此外，随着自动化技术在国民经济中应用范围的不断扩大，传感器成为自动控制系统中不可缺少的组成部分，利用传感器提供的准确数据，是任何控制系统中实现反馈控制的前提条件。

2.1 传感器的基本概念

2.1.1 传感器的定义与组成

在非电量测量中，传感器是将被测非电量信号转换为与之有确定对应关系电量输出的器件或装置。传感器也称变换器、换能器、探测器和检测器。

传感器一般利用某种材料所具有的物理、化学和生物效应或原理按照一定的加工工艺制备出来的电器元件，由于传感器原理存在差异之处，故传感器的组成也不同。一般情况下，传感器可以抽象出由敏感元件、传感元件、信号转换和调节电路、其他辅助元件组成的辅助电路，如图2-1所示。

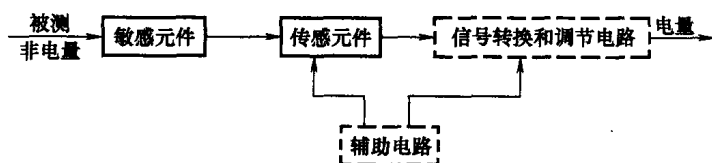


图 2-1 传感器组成

敏感元件是直接感受被测非电量，将被测量转换成与之有确定关系的其他量（一般为非电量）的元件。如在电感式传感器中，当铁心和衔铁距离变化时，两者的磁阻也发生改变，位移和磁阻间建立了一定关系，因此衔铁是位移敏感元件。

传感元件又称变换器,是将敏感元件感受到的非电量直接转换成电信号的器件,这些电信号包括电压、电量、电阻、电感、电容、频率等。在前面的例子中,铁心上连接线圈后,当磁阻变化时,线圈感知了磁阻的变化并使自身的电感也随之发生相应的变化,因此,线圈起到传感元件的功能。

传感器都包含敏感元件与传感元件,分别完成感知被测量和将被测量转换成电量的过程。但在有些传感器中,敏感和传感元件区别不是很明显。如果敏感元件直接输出电量,它就同时兼为传感元件;如果传感元件能直接感受被测非电量而输出与之成确定关系的电量,它同时兼为敏感元件。可见,敏感元件和传感元件两者合二为一的例子在传感器中也很常见,例如压电晶体、热电偶、热敏电阻等。

信号转换和调节电路是位于传感器和终端之间的各种元件的总称,其作用是将传感器输出的信号转换为便于显示、记录、处理和控制的信号,常用的信号处理电路包括放大、滤波、调制、A/D 和 D/A 转换等。

辅助电路通常指电源,包括直流电源和交流电源,由传感器类型而定。由于交流电源不需要额外的转换电路,在传感器辅助电路中应用最广泛。此外,有些传感器系统也常用电池供电。

传感器技术包括传感器原理、传感器设计、传感器开发和应用等多项综合技术,正朝着高精度、智能化、微型化和集成化的方向发展,新材料的开发和加工工艺技术水平的提高是传感器技术发展的基础。

2.1.2 传感器的分类

各生产领域中所涉及的被测对象千差万别,采用的传感器也不同,可见被测量的差异性决定了传感器种类的多样性,一般传感器可分为如下几类:

1. 按输入物理量分类

这种方法是根据输入量的性质进行分类,每一类物理量又可抽象为基本物理量和派生物理量两大类。例如力可视为基本物理量,而压力、拉力、重量、应力、力矩、电磁力等为派生物理量,对上述物理量的测量,只要采用力传感器就可以完成。现将常见的基本物理量和派生物理量列于表 2-1。

表 2-1 基本物理量和派生物理量

基本物理量	派生物理量
位移(线、角位移)	长度,厚度,高度,应变,振动,磨损,不平度,旋转角,偏转角,角振动等
速度(线、角速度)	速度,振动,流量,动量,转速,角振动等
加速度(线、角加速度)	振动,冲击,质量,角振动,扭矩,转动惯量等
力(压力、拉力)	重量,应力,力矩,电磁力等
时间(频率)	周期,计数,统计分布等
温度	热容量,气体速度,涡流等
光	光通量与密度,光谱分布等

以输入量性质不同分类传感器,其优点是比较明确地表达了传感器的检测对象,便于使

用者根据具体的使用用途选用传感器。但是,对于同一个物理量可以采用不同的传感器进行检测,故以输入量分类传感器的方法并不能体现传感器的工作原理,每种传感器在工作机理上的共性和差异难以被区分。所以,这种分类方法不利于初学者学习传感器的一些基本原理及分析方法。

2. 按测量时传感器与被测对象接触与否进行分类

测量时与被测对象接触的传感器称为接触式传感器;而与被测对象无直接接触的传感器,则称之为非接触式传感器,如超声波传感器、光传感器、热辐射传感器等均为非接触式传感器。由于非接触式传感器不接触被测对象,故传感器和被测对象间不会产生交互影响。

3. 按工作原理分类

根据物理、化学等学科的各种原理、规律和效应,可将传感器分为压电式、热电式、光电式等传感器。这种分类法的优点是传感器的工作原理明确,有利于初学者掌握传感器的各种工作原理,本书将按这种分类法介绍各种传感器。

4. 按输出信号的性质分类

可将传感器分为模拟式和数字式传感器。数字式传感器便于与计算机联用,抗干扰性较强,近些年发展较为迅速。传感器还有其他分类方法,这里不过多讨论。

2.2 热电式传感器

热加工领域中几乎所有的加工对象都涉及到温度,例如合金的熔炼和浇注、焊接熔池的温度、锻造过程中的始锻温度和终锻温度等,对温度的测量和控制是实现各种加工对象质量控制的一个有效途径,因此温度测量在热加工领域中有重要意义。本节主要介绍接触式的热电式传感器。

热电式传感器是一种可将温度转化为电阻、磁导或电动势等电量的元件。在各类热电式传感器中,以把温度转换为电动势和电阻的方法最为普遍。将温度转换为电动势的热电式传感器叫热电偶;将温度转换为金属电阻的热电式传感器叫热电阻,其中半导体热电阻式传感器简称热敏电阻。

2.2.1 热电偶

1. 热电效应

把两种不同的金属 A 和 B 连接成闭合回路,如图 2-2 所示,其中一个接点的温度为 T ,而另一端温度为 T_0 ,则在回路中有电流产生,这一现象称为热电效应,由赛贝克(Seebeck)于 1823 年发现。如果在回路中接入电流计,就可以看到电流计指针的偏转。在这种情况下产生的电动势叫热电动势,用 $E_{AB}(T, T_0)$ 来表示。

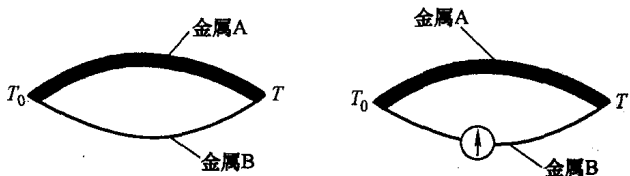


图 2-2 热电效应原理图

通常把两种不同金属的这种组合称为热电偶, A 和 B 称为热电极, 温度高的接点称为热端(或称工作端), 温度低的接点称为冷端(或称自由端、参考端)。利用热电偶把被测温度转换为热电动势, 通过仪表测出电动势大小, 便可计算出被测量的温度。由物理学可知, 热电

电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 由接触电动势和温差电动势两部分组成。

(1) 接触电动势产生的原因 所有金属都具有自由电子, 金属种类的不同, 自由电子的浓度也不同。因此, 当两种不同金属 A 和 B 接触时, 因电子浓度不同而使接触处发生电子扩散。若金属 A 的自由电子浓度大于金属 B 的自由电子浓度, 则在同一瞬间由金属 A 扩散到金属 B 中的电子将比由金属 B 扩散到 A 中去的电子多, 因而金属 A 因失去电子而带正电荷, 金属 B 因获得电子而带负电荷。由于正、负电荷的存在, 在接触处便产生电场, 该电场将力图阻碍扩散的进行。上述过程的发展, 直至扩散作用和阻碍扩散的作用达到动态平衡, 即由金属 A 扩散到金属 B 的自由电子与由金属 B 扩散到金属 A 中的自由电子 (形成漂移电流) 相等, 由此 A 和 B 两金属之间便产生了接触电动势, 它的数值取决于两种金属的性质和接触点的温度, 而与金属的形状及尺寸无关。

由物理学可知, 接触电动势可表达为:

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (2-1)$$

式中, k 为波耳兹曼常数 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为热力学温度; n_A, n_B 分别为材料 A、B 的自由电子密度; e 为电子电荷 ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

(2) 温差电动势产生的原因 对于同一种金属, 当它两端温度不同时, 两端的自由电子浓度也不同。温度高的一端浓度大, 具有较大的动能; 温度低的一端浓度小, 动能也小。因此, 由高温端向低温端扩散的净自由电子数目多, 高温端失去电子而带正电, 低温端得到电子而带负电, 金属导体两端形成电场, 阻碍自由电子的扩散。与接触电动势相同, 自由电子的扩散最终在金属两端要达到动态平衡, 从而在两端形成温差电动势, 又称汤姆森电动势。

综上所述, 两种不同金属组成的闭合回路所产生的热电动势应等于接触电动势和温差电动势的代数和。

1) 金属 A 和金属 B 的两个接点在温度为 T, T_0 时, 产生的接触电动势为 $E_{AB}(T, T_0)$, 即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) \quad (2-2)$$

式中下标 A、B 的顺序代表电位差的方向。当下标顺序变更时, $E_{AB}(T, T_0)$ 的正负号也需要变更。

2) 金属 A 两端温度为 T, T_0 时, 形成的温差电动势为 $E_A(T, T_0)$ 。

3) 金属 B 两端温度为 T, T_0 时, 形成的温差电动势为 $E_B(T, T_0)$ 。

因此, 整个闭合回路总的热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 为

$$E_{AB}(T, T_0) = [E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)] + [E_B(T, T_0) - E_A(T, T_0)] \quad (2-3)$$

应该指出的是, 在金属中自由电子数目很多, 以致温度不能显著地改变它的自由电子浓度, 所以在同一种金属内的温差电动势极小, 可以忽略。因此, 在一个热电偶回路中起决定作用的是两个接点处产生的与材料性质和该点所处温度有关的接触电动势, 故式 (2-3) 可简化为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = \frac{k}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (2-4)$$

从式 (2-4) 中可以看出, 回路的总热电动势随 T 和 T_0 变化, 即总电动势为 T 和 T_0 差的函数。由于在实际使用中很不方便, 为此, 在标定热电偶时, 使 T_0 为常数, 则有

$$E_{AB}(T, T_0) = K_c(T - T_0) \quad (2-5)$$

式中, K_c 为一系数 (非常数), 与电子密度有关, 不随温度而变化。可见, 当热电偶回路的冷端温度保持不变时, 则热电偶回路的总电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ 只随热端的温度变化, 即回路中的总电动势仅为 T 的函数, 这给工程中使用热电偶测量温度带来极大的方便。对于不同的热电偶, 温度与热电动势之间有着不同的函数关系, 一般用试验确定这种关系, 并将所测得的结果绘成曲线, 或列成表格 (称为热电偶分度表), 供使用时查阅。

2. 热电偶基本定律

1) 只有化学成分不同的两种金属材料组成的热电偶, 且两端点间的温度不同时, 热电动势才会产生。热电动势的大小与材料的性质及其两端点的温度有关, 而与形状、大小无关。

2) 化学成分相同的材料组成的热电偶, 即使两个接点的温度不同, 回路的总热电动势也等于零。应用这一定律可以判断两种金属是否相同。

3) 化学成分不同的两种材料组成的热电偶, 若两个接点的温度相同, 回路中的总热电动势也等于零。

4) 在热电偶中插入第三种材料, 只要插入材料两端点的温度相同, 对热电偶的总热电动势没有影响。

这一定律对工程实际具有特别重要的意义。因为利用热电偶来测量温度时, 必须在热电偶回路中接入电气测量仪表, 也就相当于接入第三种材料, 如图 2-3 所示。图 2-3a 是将热电偶的一个接点分开, 接入第三种材料 C。设接点 2 和接点 3 的温度相同 (T_0), 这时热电偶回路总的热电动势为

$$E = E_{AB}(T) + E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) \quad (2-6)$$

由前面介绍可知, 如果热电偶回路各接点温度相同, 回路中总的热电动势为零。所以, 当接点 1、2 和 3 的温度都为 T_0 时, 有: $E = E_{AB}(T_0) + E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) = 0$, 经变换后得 $E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) = -E_{AB}(T_0)$, 将该式代入式 (2-6) 中得: $E = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)$, 该式和式 (2-4) 完全相同。

如果按照图 2-3b 的方式接入第三种材料, 则回路总热电动势为

$$E = E_{AB}(T) + E_{BC}(T_1) + E_{CB}(T_1) + E_{BA}(T_0) \quad (2-7)$$

因为 $E_{CB}(T_1) = -E_{BC}(T_1)$, 将其带入式 (2-4) 得: $E = E_{AB}(T) + E_{BA}(T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)$, 证毕。

可见, 热电偶回路中的热电动势, 绝不会因为在其电路中接入第三种两端点温度相同的材料而有所改变。热电偶的这一特性, 不但可以允许在其回路中接入电气测量仪表, 而且也允许采用焊接方法来焊接热电偶。但是, 如果接入第三种材料的两端温度不等, 热电偶回路的总热电动势将会发生变化, 其变化取决于材料的性质和接点的温度。对于图 2-3b 来说,

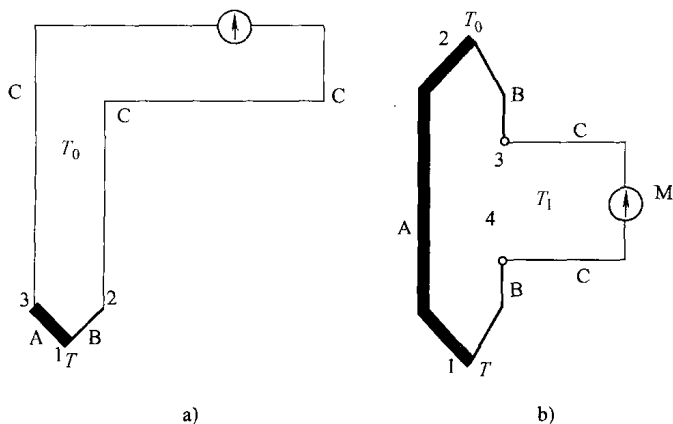


图 2-3 热电偶中加入第三种材料

a) 从冷端接入 b) 从某一热电极中间接入

改变值相当于 B 与 C 组成的附加热电偶的热电动势。因此, 接入第三种材料不宜采用与热电极的热电性质相差很远的材料, 否则, 热电偶测量精度将受到影响。

5) 如果两种导体分别与第三种导体组成的热电偶所产生的热电动势已知, 则此两种导体组成热电偶的热电动势也已知, 如图 2-4 所示。

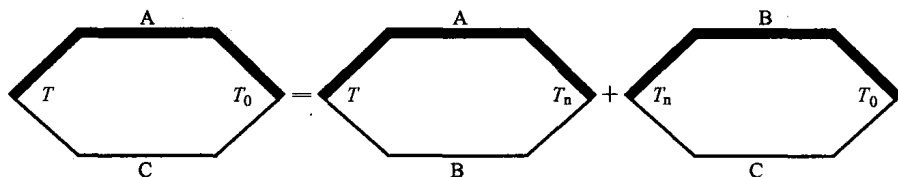


图 2-4 热电偶的中间导体定律

如图 2-4 所示, AC、AB 和 BC 三个热电偶, 其接点温度一端都为 T , 另一端为 T_0 , 则有

$$E_{AC}(T, T_0) = E_{AC}(T) - E_{AC}(T_0), E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0)$$

两式相减得:

$$E_{AC}(T, T_0) - E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T) - E_{AB}(T) - [E_{AC}(T_0) - E_{AB}(T_0)]$$

根据热电偶基本定律 4) 可知: $E_{AC}(T) - E_{AB}(T) = E_{BC}(T)$, $E_{AC}(T_0) - E_{AB}(T_0) = E_{BC}(T_0)$, 因此

$$E_{AC}(T, T_0) - E_{AB}(T, T_0) = E_{BC}(T) - E_{BC}(T_0) = E_{BC}(T, T_0) \quad (2-8)$$

可见, 当任一电极 B、C、D... 与一标准电极 A 组成热电偶产生热电动势为已知时, 就可以利用式 (2-8) 求出这些热电极组成的热电偶的热电动势, 通常采用铂作为标准电极。

3. 热电偶实用测量电路

(1) 单点温度的测温线路 基本测量电路如图 2-5 所示, A、B 为热电偶, C、D 为补偿导线, 冷端温度为 T_0 , E 为铜导线 (实际使用时, 可把补偿导线延伸到配用仪表的接线端子, 这时冷端温度即为仪表接线端子所处的环境温度), M 为毫伏计或数字仪表。此时回路中总热电动势为 $E_{AB}(T, T_0)$, 流过毫伏计的电流为

$$I = \frac{E_{AB}(T, T_0)}{R_Z + R_C + R_M} \quad (2-9)$$

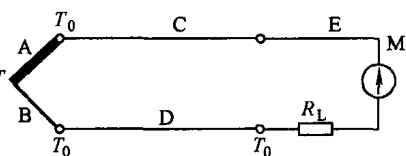


图 2-5 基本测量电路

式中, R_Z 、 R_C 、 R_M 分别为热电偶、导线 (包括铜导线、补偿导线、平衡电阻) 和仪表的内阻 (包含负载电阻 R_L)。

(2) 测量两点之间温差的测温线路 测量温差的线路如图 2-6 所示, 这是测量两个温度 T_1 和 T_2 差的一种连接方式。用两只同型号的热电偶, 配用相同的补偿导线, 这时可测得 T_1 和 T_2 的温差。证明如下。

回路内的总电动势为

$$E_r = E_{AB}(T_1) + E_{BD}(T_0) + E_{DB}(T_0) + E_{BA}(T_2) + E_{AC}(T_0) + E_{CA}(T_0) \quad (2-10)$$

因为 C、D 为补偿导线, 其热电性质分别与 A、B 材料性质相同, 所以有: $E_{BD}(T_0) = 0$ (同一材料不产生热电动势)。同理可知

$$E_{DB}(T_0) = 0, E_{AC}(T_0) = 0, E_{CA}(T_0) = 0 \quad (2-11)$$

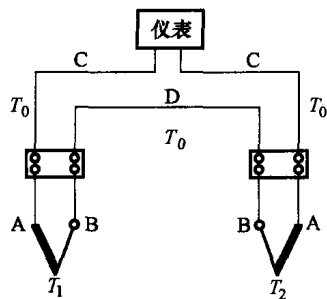


图 2-6 测量温差的线路

将式 (2-11) 代入式 (2-10) 中得

$$E_r = E_{AB}(T_1) + E_{BA}(T_2) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2) \quad (2-12)$$

如果连接导线用普通铜导线, 必须保证两热电偶的冷端温度相等, 否则测量的结果不准确。

(3) 测量平均温度的测温线路 通常用几只同型号的热电偶并联在一起测量平均温度, 如图 2-7 所示, 要求三只热电偶都工作在线性段, 此时仪表中指示的电动势值为三只热电偶的平均电动势。在每一只热电偶线路中, 分别串接均衡电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 , 它们的作用是为了在 T_1 、 T_2 和 T_3 不相等时, 使每一只热电偶线路中流过的电流免受电阻不相等的影响, 与每一只热电偶的电阻变化相比, R_1 、 R_2 和 R_3 的阻值必须很大。

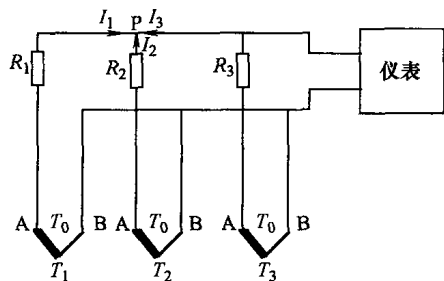


图 2-7 测量平均温度的线路

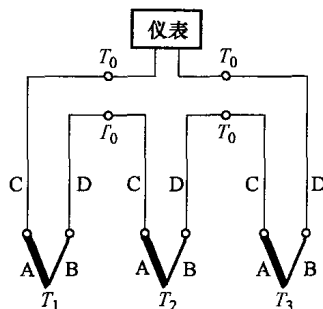


图 2-8 求温度和的电路

(4) 测量几点温度之和的测温线路 利用同类型的热电偶串联, 可以测量几点温度之和, 也可以测量几点的平均温度。图 2-8 所示为求温度和的电路。这种线路可以避免并联线路的缺点。当有一只热电偶烧断时, 总的热电动势消失, 可以立即知道有热电偶烧断。同时由于总热电动势为各热电偶热电动势之和, 故可以测量微小的温度变化, 图中 C、D 为补偿导线, 回路的总热电动势为

$$E_T = E_{AB}(T_1) + E_{DC}(T_0) + E_{AB}(T_2) + E_{DC}(T_0) + E_{AB}(T_3) + E_{DC}(T_0) \quad (2-13)$$

因为 C、D 为 A、B 的补偿导线, 与 A、B 的热电性质相同, 即

$$E_{DC}(T_0) = E_{BA}(T_0) = -E_{AB}(T_0) \quad (2-14)$$

将其代入式 (2-13) 中得

$$\begin{aligned} E_T &= E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_0) + E_{AB}(T_2) - E_{AB}(T_0) + E_{AB}(T_3) - E_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T_1, T_0) + E_{AB}(T_2, T_0) + E_{AB}(T_3, T_0) \end{aligned} \quad (2-15)$$

即回路的总热电动势为各热电偶的热电动势之和。

辐射高温计中的热电动势就是根据这个道理将几个同类型的热电偶串接在一起的。

(5) 若干只热电偶共用一台仪表的测量线路 在多点温度测量时, 为了节省显示仪表, 若干只热电偶通过模拟式切换开关共同连接在一台测量仪表上, 如图 2-9 所示, 各热电偶的型号相同, 测量范围均在显示仪表的量程内。在生产现场中, 如大量测量点不需要连续测量, 只需要定时测量时, 就可以把若干只热电偶通过手动或自动切换开关接至一台测量仪表上, 以轮流或按要求显示各测量点的被测数值。切换开关的触点有十几对到数百对, 这样可以大量节省显示仪表数目, 也可以减小仪表箱的尺寸, 达到多点温度检测的目的。

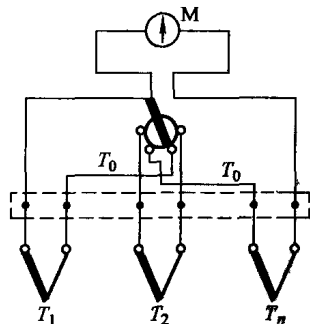


图 2-9 多点温度测量电路

2.2.2 金属热电阻

金属热电阻作为一种感温材料,是利用其电阻随温度而变化的特性对温度进行测量的。因此,要求热电阻材料必须具备以下特点:电阻温度系数要尽可能大、稳定,电阻率高,电阻与温度之间呈线性关系,并且在较宽的测量范围内具有稳定的物理和化学性质。目前应用得较多的热电阻材料有铂、铜和镍。

热电阻由电阻体、保护套接线盒、内引线等部件组成。其结构可根据实际需要制作成多种形状,通常是将双线电阻丝绕在用石英、云母陶瓷和塑料等材料制成的骨架上,其测温范围大部分在 $-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 。常用热电阻如下所示。

(1) 铂热电阻 由于铂电阻物理、化学性能在高温和氧化性介质中很稳定,它可作为工业测温元件和温度标准。按国际温标 ITS—1990 规定,在 $-259.34 \sim 630.74^{\circ}\text{C}$ 温域内,以铂电阻温度计作基准器。

铂电阻与温度的关系,在 $0 \sim 630.74^{\circ}\text{C}$ 以内为

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (2-16)$$

在 $-190 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 以内为

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad (2-17)$$

式中, R_T 、 R_0 分别为温度为 T 和 0°C 时的电阻值; A 、 B 、 C 为分度系数: $A = 3.9687 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, $B = -5.84 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$, $C = -4.22 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^4$ 。

(2) 铜热电阻 在测量精度不高、测温范围不大的情况下,可以采用铜电阻来代替铂电阻,用以降低成本,同时也能达到精度要求。工业用铜电阻一般在 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内使用,此时电阻与温度近似呈线性关系

$$R_T = R_0(1 + aT) \quad (2-18)$$

式中, R_T 为温度为 T 时的电阻值; R_0 为温度为 0°C 时的电阻值; a 为温度系数。

铜电阻的缺点是电阻率低,热惯性大,在 100°C 以上易氧化,因此只能用于低温以及无侵蚀性的介质中。通常用直径 0.1mm 的漆包线或丝包线双线绕制,然后浸以酚醛树脂成为一个铜电阻体,再用镀银铜线作引出线,穿过绝缘套管。

(3) 镍热电阻 镍电阻的温度系数较大,约为铂热电阻的1.5倍,故用纯镍制成的镍热电阻比铂和铜热电阻更灵敏、体积更小、电阻率更大,其缺点是误差比较大、非线性严重、不易提纯。正因为纯镍的提炼有困难,至今没有国际上公认的阻值与温度的分度表,使用起来很不方便。镍热电阻的测温范围为 $-50 \sim 300^{\circ}\text{C}$,但由于在 200°C 左右存在奇异点,所以一般用以测量 150°C 以下的温度。镍电阻与温度关系可表示为

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^4) \quad (2-19)$$

式中, $A = 5.485 \times 10^{-1}/^{\circ}\text{C}$, $B = 6.65 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}^2$, $C = 2.805 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}^4$ 。

(4) 其他热电阻 铂、铜、镍热电阻均是标准热电阻,在低温和超低温测量时性能不理想,而铟、锰、碳等热电阻材料却是测量低温和超低温的理想材料。铟电阻用99.999%高纯度铟丝绕成电阻,可在室温 $\sim 4.2\text{K}$ 温度范围内使用,实验证明,在 $-268.8 \sim -259^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,铟电阻灵敏度比铂高10倍,其缺点是材料软,复制性差;锰电阻在 $-271 \sim -260^{\circ}\text{C}$ 测温时,电阻随温度变化大,灵敏度高,缺点是材料脆,难拉丝;碳电阻在 $-273 \sim$