

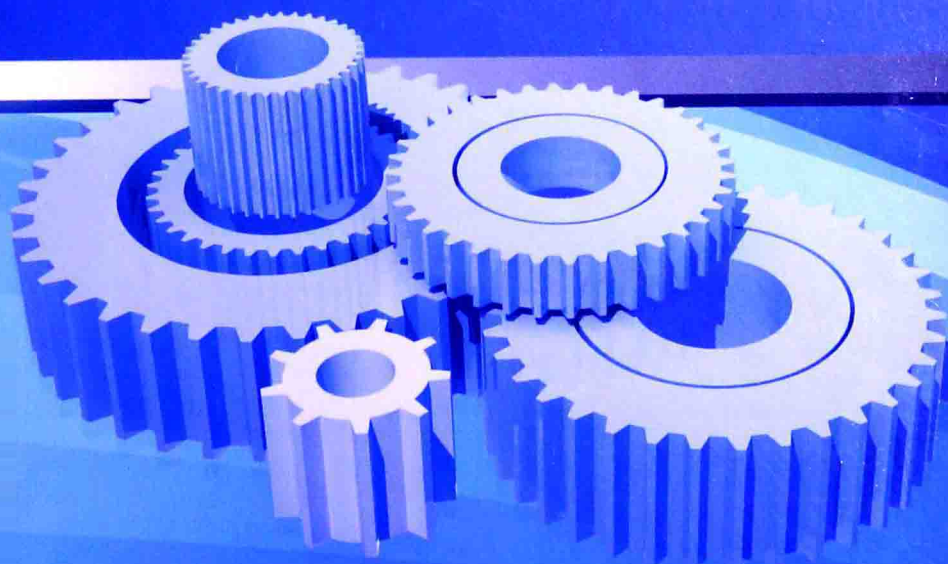


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

工程设备设计基础

申勇峰 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

工程设备设计基础

申勇峰 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

本书系统介绍了与材料科学与工程设备设计及应用过程密切相关的温度测量与控制原理、热力学原理与应用、流体力学、传热学、耐热材料、耐火材料等内容。本书还根据材料工程设备近年来的快速发展,对一些近年来出现的新型材料设备相关基础知识进行了较详细的介绍。此外,由于现代材料设备中越来越多地采用压力控制技术,本书还介绍了真空系统与液压系统等相关基础知识,针对本科生教学的特点,编写了大量的例题及材料工程设备的设计实例。

本书可供材料科学与工程专业及相关专业师生参考阅读,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程设备设计基础/申勇峰编著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6456-1

I. ①工… II. ①申… III. ①工程设备—设计—高等学校—教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第013025号



出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6456-1

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京印刷一厂印刷

2014年2月第1版, 2014年2月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 18.75印张; 450千字; 287页

39.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书针对材料科学与工程专业的学生编写而成，书中内容涉及学生所从事本专业研究和生产的实际工作中常见的工程设备的建造、使用及维护的基础知识，系统介绍了与材料科学工程设备设计及应用过程密切相关的温度测量与控制原理、热力学原理与应用、流体力学、传热学、耐热材料、耐火材料等内容。根据材料工程设备近年来的快速发展，对一些近年来出现的新型材料设备的相关基础知识进行了较详细的介绍。此外，由于现代材料设备中越来越多地采用压力控制技术，本书简单介绍了真空系统与液压系统等相关基础知识。同时，针对本科生教学的特点，编写了大量的例题及材料工程设备的设计实例。

流体力学是用理论分析和实验研究相结合的方法来研究流体平衡和运动规律的科学。冶金、材料制备、化工生产等过程中很多都是在流体中进行的。如散装物料的干燥、焙烧、熔炼、燃料的输送与燃烧、浸出、萃取与蒸馏等，无一不是与流体流动发生密切关系。因此深入了解和掌握流体力学的基本理论和基本知识对于解决冶金炉和化工设备的设计、计算和操作等方面的问题，都具有十分重要的意义。由于流体包括液体和气体，因而流体力学也就包括水力学和气体力学。

金属的提取及材料的合成制备过程与热力学过程密切相关。材料制备过程化学反应焓变的计算实际上是冶金热化学的主要内容。冶金反应的特点是高温、多相。为了获得高温，依赖于物理热和化学热。高炉炼铁以及电炉、闪速炉熔炼铜铕为半自热熔炼，其热量来源既有物理热，又有化学热；电炉炼钢则需要电能转变为热能，而转炉炼钢、吹炼铜铕、镍铕则为自热熔炼，主要热源是化学热。总之，金属的提取过程一般都伴有吸热或放热现象。因此，计算化学反应焓变意义重大。

传热学是研究热能传递规律的一门科学。物体相互之间或同一物体的两部分间存在温度差是产生传热现象的必要条件，只要有温度差存在，热量总有从高温向低温传递的趋势。温度差普遍存在于自然界里，所以传热是普通的自然现象。传热是加热炉内一个重要的物理过程，应用传热原理解决的实际问题不

外乎两类：一类是力求增强传热过程，另一类是力求削弱传热中的热交换，提高废热的回收率和空气的预热温度；提高炉子某些水冷部件的冷却效果，延长设备的寿命等。后者如减少炉子砌体的热损失，对炉子实行保温措施，以提高热的利用率，节约能源；防止炉内某些部件过热，采取必要的隔热保护措施等。因此，传热学的研究及应用与绝热保温材料与耐火材料密切相关。

设计在工程中起主宰作用，是国家基本建设的关键性环节，非常重要。在设计中要充分考虑提高劳动生产率，提高经济效益，经济有效地利用资源及能源。设计工作必须重视调查研究，不断总结经验，勇于创新，及时把可靠的科研成果用于生产，采用新工艺、新设备、新技术、新材料，体现现代化技术水平。第一，设计人员必须自觉地学习党的方针、政策和国家有关法令法规。设计应该从我国的国情出发，考虑我国的具体情况，坚持勤俭办企业的精神。第二，必须高度认识到技术引进是社会经济发展的客观要求，也是科学技术进步的客观要求。技术引进是迅速发展本国经济的重要途径，也是增强自力更生能力的重要手段，可以避免走弯路，缩短技术试验研究的时间和节省经费。在继承中发展，在借鉴中创新。第三，设计者的创造能力，是设计活动中最重要的因素。创造性，敏锐的观察力、透彻的分析力和对创造性设想的识别能力，是大多数成功的设计师所具有的特征。因此要坚持发展创新，鼓励设计拥有独立自主知识产权、符合国情及企业实际情况的设备，同时要考虑节能、环保等因素。设计工作是关系到能否实现最大经济效益的关键环节。技术工艺流程是否先进可靠，生产组织是否科学严谨，能否以较少的投资取得产量多，质量好，劳动生产率高，成本低，利润高的综合效果，在很大程度上取决于设计质量和设计水平。必须以严肃科学的态度从技术上、经济上以及生产实践需要方面，来分析其对生产效益的影响。

本书可以作为材料科学与工程专业本科生的教材，也可作为相关专业工程技术人员参考书。

感谢邱从怀、徐天帅、马天彪等12位研究生在本书编写过程中所提供的协助。由于编写者学识水平局限性，书中若有不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

编者

2013年8月28日

目 录

1 温度测量仪表	1
1.1 世界仪表技术发展回顾	1
1.2 温度测量仪表	3
1.2.1 测温仪表的分类	3
1.2.2 压力式温度计使用及注意事项	4
1.3 温度测量原理	4
1.3.1 热电偶测温原理	4
1.3.2 温差电势及中间温度定律	5
1.3.3 热电偶类型及温度补偿	6
1.3.4 热电阻测温原理及类型	7
1.4 红外测温仪	8
1.4.1 红外测温仪工作原理	8
1.4.2 红外测温的理论基础	8
1.4.3 黑体辐射定律	8
1.4.4 红外系统	8
1.4.5 红外测温仪性能	9
1.4.6 红外测温仪正确选择	9
2 温度控制原理	11
2.1 自动化仪表分类	11
2.2 自动化仪表控制原理	11
2.2.1 比例控制 (P)	12
2.2.2 比例积分 (PI) 调节器原理	12
2.2.3 PID 调节器原理	12
2.3 测温与自动调温	13
2.3.1 炉温位式调节规律	14
2.3.2 XCT 型动圈式温度位式调节仪表	14
3 流体力学基础	17
3.1 流体的主要物理性质	17
3.1.1 流体及连续介质	18
3.1.2 流体的主要物理性质	18

3.2 流体静力学基础	21
3.2.1 作用在流体上的力	21
3.2.2 流体静压力	21
3.2.3 流体静压平衡方程	22
3.2.4 气体的静压头与几何压头	24
4 流体动力学基础	26
4.1 稳定流动与非稳定流动	26
4.2 连续性方程	27
4.2.1 连续性微分方程	27
4.2.2 总流的连续性方程	28
4.2.3 理想流体的运动微分方程	29
4.3 流体的伯努利方程	30
4.3.1 理想流体的伯努利方程	30
4.3.2 理想流体管流的伯努利方程	31
4.3.3 实际流体的伯努利方程	32
4.3.4 应用伯努利方程的实例	33
5 材料制备热力学基础	38
5.1 材料制备化学反应焓变计算	38
5.1.1 纯物质焓变的计算方法	38
5.1.2 化学反应焓变的计算	39
5.1.3 化学反应焓变的计算在材料制备及冶炼过程中的应用实例	41
5.2 化学反应及标准自由能与温度的关系	46
5.2.1 吉布斯自由能 - 温度关系图	47
5.2.2 氧势图的特点及其应用	47
5.2.3 标准吉布斯自由能的计算及其应用实例	50
5.3 化学反应热力学计算在冶炼过程中的应用实例	53
5.3.1 氧化物的还原——C 的燃烧反应	53
5.3.2 氧化物的还原——H - O 系和 C - H - O 系燃烧反应	56
5.3.3 氧化物的还原——金属氧化物用 CO 气体还原剂还原	57
5.3.4 氧化物的还原——金属氧化物用固体还原剂 C 还原	58
6 传热学基础	60
6.1 稳定态传导传热	61
6.1.1 基本概念和定律	61
6.1.2 导热的基本定律与导热系数	62
6.1.3 一维稳定态导热	63
6.2 对流换热	68

6.3 辐射换热	69
6.3.1 热辐射的基本概念	69
6.3.2 物体对热辐射的吸收、发射和透过	70
6.3.3 热辐射的基本定律	71
6.3.4 物体表面间的辐射换热	74
6.3.5 气体辐射	78
6.4 稳态综合传热	82
6.4.1 综合传热过程的分析 and 计算	82
6.4.2 通过平壁的传热	82
6.4.3 通过圆筒壁的传热	84
6.5 非稳态导热	85
6.5.1 数学分析解法及单值条件	86
6.5.2 第一类边界条件下的加热	87
6.5.3 第二类边界条件下的加热	89
6.5.4 第三类边界条件下的加热	90
7 耐火材料及保温材料	93
7.1 耐火材料简述	93
7.1.1 耐火材料	93
7.1.2 耐火材料分类	93
7.2 耐火材料的作用与发展趋势	94
7.3 耐火材料的性质	95
7.3.1 耐火材料的物理性质	95
7.3.2 耐火材料的力学性质	96
7.3.3 耐火材料的热学性质	97
7.3.4 耐火材料的工作性能	98
7.3.5 工业炉用耐火材料的性能要求	101
7.4 耐火材料的分类	101
7.4.1 根据耐火度的高低分类	101
7.4.2 依据制品形状及尺寸的不同分类	102
7.4.3 按制造方法分类	102
7.4.4 按材料的化学属性分类	102
7.4.5 按耐火度分类	104
7.4.6 按化学矿物质组成进行分类	104
7.4.7 按不定型耐火材料分类	107
7.5 耐火砖按形状及尺寸的分类	108
7.6 保温材料	111
7.6.1 保温材料的发展与应用	111
7.6.2 保温材料的分类	112

8 真空系统	132
8.1 真空的计量单位	133
8.2 真空技术的物理基础	134
8.2.1 理想气体定律及其状态方程	134
8.2.2 气体分子运动论 (Kinetic Theory of Gases) 基础	136
8.2.3 真空系统中的气体流动	138
8.3 真空测量	140
8.3.1 概述	140
8.3.2 压缩式真空计	141
8.3.3 热传导式真空计	142
8.3.4 普通热阴极电离真空计	143
8.4 组成真空系统的零部件	145
8.4.1 真空阀	145
8.4.2 捕集器 (阱)	146
8.4.3 除尘器	147
8.5 真空获得设备	148
8.5.1 真空泵的性能指标	149
8.5.2 真空泵的分类	150
8.5.3 旋片式机械真空泵	150
8.5.4 水环真空泵	151
8.5.5 罗茨真空泵	153
8.5.6 扩散泵	154
8.5.7 油增压泵	154
8.5.8 液压传动的工作原理	155
8.5.9 液压系统的组成	156
8.6 液压泵	156
8.6.1 液压泵 (能源装置) 的工作原理及分类	156
8.6.2 齿轮泵	157
8.6.3 叶片泵	158
8.6.4 柱塞泵与活塞泵	159
8.7 液压系统的执行元件	162
8.7.1 液压缸	162
8.7.2 液压马达	164
8.8 液压控制元件	167
8.8.1 液压控制元件	167
8.8.2 顺序阀	169
8.9 辅助装置	170
8.9.1 蓄能器	170

8.9.2 其他蓄能器	172
8.9.3 滤油器	172
8.9.4 热交换器	175
8.10 液压基本回路	175
8.10.1 速度控制回路	176
8.10.2 容积调速回路	179
8.10.3 调速回路的比较和选用	182
9 真空热处理炉的设计	184
9.1 真空系统的现状和展望	184
9.2 设计 PFTH800/1700 型油淬真空炉	188
9.2.1 技术参数	188
9.2.2 工作条件	188
9.2.3 电热元件的选择和计算	194
9.2.4 其他部件的设计计算	199
9.2.5 炉子热平衡计算	200
9.2.6 冷却系统的设计	206
9.2.7 真空热处理炉真空系统的设计	210
9.2.8 炉型设计图	214
10 箱式电阻炉设计	216
10.1 热处理及电阻炉简述	216
10.1.1 热处理电阻加热炉	216
10.1.2 电阻炉的发展历史	217
10.1.3 箱式电阻炉的应用及分类	218
10.2 热处理电阻炉设计	219
10.2.1 设计任务	219
10.2.2 选择炉型及确定炉体结构和尺寸	219
10.2.3 砌体平均表面积计算	224
10.2.4 计算炉子功率	224
10.2.5 炉子热效率计算	230
10.2.6 炉子空载功率计算	231
10.2.7 空炉升温时间计算	231
10.2.8 功率的分配与接线	232
10.2.9 电热元件材料选择及计算	233
10.2.10 箱式电阻炉安全技术操作规程	235
10.2.11 炉型图	236

11 转炉冶炼与转炉设计	237
11.1 转炉简介	237
11.1.1 转炉分类及发展史	237
11.1.2 转炉的特点	239
11.2 转炉炼钢工艺流程	240
11.2.1 转炉炼钢的基本冶炼过程	240
11.2.2 温度制度	241
11.2.3 脱氧及合金化	243
11.3 炼钢任务与钢的分类	243
11.3.1 炼钢的任务	243
11.3.2 钢的分类	247
11.4 炼钢过程的物料平衡与热平衡计算	248
11.4.1 物料平衡	248
11.4.2 热平衡计算	248
11.5 转炉吹炼过程工艺计算与设计	250
11.5.1 设计任务与原始数据	250
11.5.2 铜钨合理成分的计算	250
11.5.3 石英熔剂合理成分的计算	251
11.5.4 确定转炉渣的成分	252
11.5.5 冷料数量与成分的计算	253
11.5.6 第一期工艺过程计算	254
11.5.7 第二期工艺过程计算	257
11.5.8 吹炼过程总物料平衡计算	258
11.5.9 转炉计算	259
11.5.10 铜钨吹炼过程热平衡计算	261
11.5.11 主要技术经济指标与主要设备规格	266
12 纳米薄膜材料制备技术	267
12.1 纳米材料简介	267
12.1.1 纳米材料定义	267
12.1.2 纳米晶体材料的制备方法	267
12.1.3 纳米晶体材料的结构特征	270
12.2 气相沉积装置	272
12.2.1 化学气相沉积装置	272
12.2.2 等离子体化学气相沉积装置	273
12.2.3 物理气相沉积	274
12.3 真空蒸发镀	274
12.4 离子镀装置	276

12.4.1 辉光放电型离子镀膜装置	276
12.4.2 弧光放电型离子装置	277
12.4.3 空心阴极离子镀技术	277
12.4.4 热丝弧等离子体枪型离子镀膜机	278
12.4.5 电弧离子镀装置	279
12.5 磁控溅射镀膜装置	281
12.6 物理气相沉积技术的发展	284
12.7 沉积金刚石薄膜的技术	285
参考文献	287

1 温度测量仪表

1.1 世界仪表技术发展回顾

动圈式仪表也称为磁电式仪表。自电磁感应现象被发现以来,各种动圈式仪表的开发和改进一直是主导着仪表行业的进步,直到20世纪50年代初期,出现了采用数码管的各种数字仪器。这种数字化显示技术把模拟仪器的准确度、分辨率与测量速度提高了几个数量级,同时也为后来计算机技术广泛应用于测试自动化领域奠定了基础。60年代中期,计算机被引入仪表。计算机使测量仪器的功能发生了质的变化,从个别电量的测量转变成测量整个系统的特征参数,从单纯的接收、显示转变为兼有控制、分析、处理、计算与显示输出多种功能于一身,从用单个仪器进行测量转变成用测量系统进行测量。70年代,计算机技术进一步渗透进入仪器仪表应用领域中。由于计算机在各类仪表中的大量使用,使电子仪器在传统的时域(Time Domain)与频域(Frequency Domain)测试之外,又出现了数据域(Data Domain)测试。80年代,由于微处理器被用到仪器仪表中,仪器前面板开始朝键盘化方向发展,过去直观的用于调节时基(Time Base)或幅度的旋转度盘,选择电压电流等量程或功能的滑动开关,通、断开关逐渐消失。机柜形式成为测量系统的主要模式,全部通过IEEE-488总线送到一个控制器上。不同于传统独立仪器模式的个性化仪器已经得到了发展,可以借助丰富的BASIC语言程序来进行高速测试。90年代,仪器仪表与测量科学进步取得了更大的突破性进展。这个进展的主要标志是仪器仪表智能化程度的提高。突出表现在以下几个方面:微电子技术的进步将更深刻地影响仪器仪表的设计;DSP(Digital Signal Processor)芯片的大量问世,使仪器仪表数字信号处理功能大大加强;微型机的发展,使仪器仪表具有更强的数据处理能力;图像处理功能的增加十分普遍。

仪器仪表发展的特点:

(1) 新技术的应用。国际上大的仪表制造厂商目前普遍采用了EDA(电子设计自动化)、CAM(计算机辅助制造)、CAT(计算机辅助测试)、DSP(数字信号处理)、ASIC(专用集成电路)及SMT(表面贴装技术)等。

(2) 产品结构变化。更加注重性能价格比。在重视高档仪器开发的同时,注重高新技术开发和用量大、适用面广的产品开发与生产。

注重系统集成,不仅着眼于单机,更注重系统化、系列化产品。现在的产品进一步软件化,随着各类仪器装上了CPU,实现了数字化后,在软件方面投入日益增大。已经有人指出,今后仪器可归纳成公式:

$$\text{仪器} = \text{AD/DA} + \text{CPU} + \text{软件}$$

AD芯片将模拟信号变成数字信号,再经过软件处理变换后用DA输出。

(3) 新产品开发的准则发生了变化。新产品开发从技术驱动转为市场驱动,从一味追求开发高精尖产品,转为开发“恰到好处”。总之开发一项成功产品的准则应该是:1) 用户有明确的需求;2) 能用最短的开发时间投放市场;3) 功能与性能要恰到好处。产品开发准则的另一变化是收缩方向,集中优势。

(4) 生产技术注重专业生产,摒弃盲目的大而全。生产过程采用自动测试系统。目前多以 GP-IB 仪器组建自动测试系统。在这样的生产线上都是一个个大的测试柜,快速地进行自动测试、统计、分析、打印出结果。

随着信息技术革命的深入和计算机技术的飞速发展,数字信号处理技术已经逐渐发展成为一门关键的技术学科。DSP 芯片,即数字信号处理器,是专门为快速实现各种数字信号处理算法而设计的、具有特殊结构的微处理器,其处理速度已高达 2000MIPS,比最快的 CPU 还快 10~50 倍。目前,在微电子技术发展的带动下,DSP 芯片的发展日新月异,DSP 的功能日益强大,性能价格比不断上升,开发手段不断改进。在当今的数字化时代背景下,DSP 已成为通信、计算机、消费类电子产品等领域的基础器件,被誉为信息社会革命的旗手。同时 DSP 已成为集成电路中发展最快的电子产品,并成为电子产品更新换代的决定因素。在国外,DSP 芯片已经被广泛地应用于当今技术革命的各个领域;在我国,DSP 技术也正以极快的速度被应用在通信、电子系统、信号处理系统、自动控制、雷达、军事、航空航天、医疗、家用电器、电力系统等许多领域中,而且新的应用领域在不断地被发掘。因此基于 DSP 技术的开发应用正成为数字时代的应用技术潮流。DSP 与 CPU 是芯片工业中的两大核心技术,DSP 负责数字信号处理,CPU 是负责计算功能。

在广义的理解中,DSP 被译为数字信号处理 (Digital Signal Processing)。信号 (Signal) 的分析或更改 (Processing) 是经由一个顺序分开,以代表此讯号的数字化 (Digital) 格式的信号进行的,通常此类的处理过程需要大量的数学运算。DSP 芯片的特点是通过硬件的设计使一般数字讯号处理的运算速度加快,并提升程序化的方便程度。与一般计算机 CPU 最大的差异在于 DSP 对数学运算较擅长。工业自动化控制仪表主要包括变送器、调节器、调节阀等,控制仪表从基地式调节器 (变送、指示、调节一体化的仪表) 开始,经历了气动、电动单元组合仪表到计算机控制系统 (DDC),直到今日广泛使用的分散控制系统 DCS (Distributed Control System)。分散系统也称为集散型控制系统。DCS 经历了初创 (1975~1980)、成熟 (1980~1985)、扩展 (1985 年以后) 几个发展时期,在完善控制功能、增强信息处理能力、加快速度及组态软件等方面取得令人瞩目的成就,已经成为计算机控制系统的主流。DCS 是能将管理和显示功能集中一体的自动化高技术产品,适合在模拟量回路控制较多的地方使用堤防,它能够尽量将控制所造成的危险性分散。DCS 一般由五部分组成:(1) 控制器;(2) I/O 板;(3) 操作站;(4) 通讯网络;(5) 图形及编程软件。DCS 经历了几十年的发展历程,现在它以其高度的可靠性、方便的组态软件、丰富的控制算法、开放的联网能力等优点,得到人们的认可,并迅速发展成为计算机工业控制系统的主流之一。与之相比,PLC (Program Logic Control) 以其结构紧凑、功能简单、速度快、可靠性高、价格低等优点获得广泛应用,并成为与 DCS 并驾齐驱的另一主流工业控制系统。DCS 与 PLC 两大主流控制系统在竞争中并没有两败俱伤,也没有互相吞并,而是互相补充、互相促进,都获得了成功。目前以 PLC 为基础的 DCS 发展很快,PLC 与 DCS 相互融合、已成为当前工业控制系统新的发展趋势,所以现在的 DCS 和 PLC 之间并不存

在严格的界限。

1.2 温度测量仪表

1.2.1 测温仪表的分类

测温仪表的分类如下：

(1) 按测量原理：膨胀式、压力式、电阻式温度计、热电偶高温计、辐射式高温计等。

(2) 按测量方法：接触式、非接触式（例如辐射式高温计）。

(3) 按测温范围：可以分为一般温度计和高温计（温度计 $< 600^{\circ}\text{C}$ ，高温计 $\geq 600^{\circ}\text{C}$ ）。

1.2.1.1 接触式测温

接触式测温的特点是感温元件直接与被测对象相接触，两者之间进行充分的热交换，直到最终达到热平衡，这时候感温元件的某一物理参数的量值就代表了被测对象的温度值。

优点：直观可靠。

缺点：感温元件影响被测温度场的分布，接触不良等会带来测量误差，另外温度太高和高温下的腐蚀性介质对感温元件的性能和寿命都会产生不利的影响。

1.2.1.2 非接触式测温

非接触式测温的特点是感温元件不与被测对象相接触，而是通过辐射进行热交换，故可避免接触式测温法的缺点，并具有较高的测温上限。此外，非接触式测温法热惯性小，可达千分之一秒，因此便于测量运动物体的温度和快速变化的温度。

非接触式温度计又可分为辐射温度计、亮度温度计和比色温度计等，由于它们的测温原理都是以光辐射为基础，因此也被统称为辐射温度计。

1.2.1.3 液体膨胀式温度计

液体膨胀式温度计（又称为玻璃管液体温度计）：这是应用最早而且当前使用最广泛的一种温度计，它由液体储存器、毛细管和标尺组成。液体玻璃温度计的测温上限取决于所用液体气化点的温度，下限受液体凝固温度的限制。为了防止毛细管中的液柱出现断续现象，并提高测温液体的沸点温度，常在毛细管中液体上部充以一定压力的气体。典型如酒精温度计、水银体温计等。

(1) 有机液体温度计：测温范围 $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 。例如常见的酒精温度计。

(2) 工业水银温度计：测温范围 $-30 \sim +500^{\circ}\text{C}$ ，但也有测温可高达 1200°C 的高温水银温度计。工业用的液体膨胀式温度计为保护温度计玻璃管，并且通常其外面还罩有金属保护管。

1.2.1.4 杆式温度计

杆式温度计（Solid - Stem Calorimeter Thermometers）：外套大膨胀系数的金属（如黄铜或不锈钢）测温管，内设小温度膨胀系数材料（如铟钢或石英）的传递杆（杆芯）。测温杆插入被测空间，例如炉内，杆式温度计的基座一般紧密固定在炉体上。利用制造测温管外套和杆芯的两种膨胀系数不同材料在温度变化中的线胀差异，拉动仪表指针测量

温度。

1.2.1.5 双金属温度计

双金属温度计 (Bi - Metal Thermometer): 将两片温度膨胀系数不同的金属叠焊在一起, 受热后因两侧膨胀不同, 双金属片将发生弯曲。双金属温度计就是利用这种现象, 将这种双金属片绕成螺旋状, 一端固定, 另一端与指针相连, 在温度变化时温度计内的双金属片产生旋转, 带动指针指示所测的温度值。

1.2.1.6 压力式温度计

压力式温度计: 测量端部温度感应包为装有液体或气体的密闭的容器, 当气体或液体的饱和蒸汽受热膨胀, 压力变化通过导管带动表头中的弹簧管, 驱动仪表指针指示温度。温包、毛细管和弹簧管三者的内腔构成一个封闭容器, 其中充满工作物质 (如气体常为氮气), 工作物质的压力经毛细管传递给弹簧管, 使弹簧管变形, 并由传动机构带动指针, 指示出被测温度的数值。根据装入测温系统内的感温介质的不同, 压力式温度计可分为 3 类: (1) 气体压力式温度计: 测温系统中全部充满气体感温介质的压力式温度计, 这种温度计是等分刻度的, 但温包体积较大, 故热惯性大。(2) 液体压力式温度计: 测温系统中全部充满液体感温介质的压力式温度计。这种温度计也是等分刻度, 温包的体积较小, 热惯性也较小。(3) 蒸汽压力式温度计: 测温系统中, 部分充有低沸点蒸发液体感温介质的压力式温度计。这种温度计是利用低沸点蒸发液体的饱和蒸汽压随温度变化不同而变化来测温的, 所以其饱和蒸汽压随温度变化是非线的, 这也就决定了这种温度计的刻度是非线性的。

1.2.2 压力式温度计使用及注意事项

使用压力式温度计时, 应注意以下几点: (1) 温度计的浸入深度。压力式温度计的温包与玻璃液体温度计的感温包作用相似, 所以必须将温包全部浸入到被测介质中。(2) 使用温度计时, 弹簧管和毛细管所处的环境温度的变化对温度计示值将会产生影响, 因为在弹簧管与毛细管内所充的也是感温介质, 故所处的环境温度与分度时不同, 就会对示值造成一定的误差。关于这一点, 充气式的影响最大, 充液式的次之, 蒸汽式的无影响。仪表周围的环境温度不得超过 50°C 。(3) 安装温度计时必须注意弹簧管和温包尽量处于同一高度, 否则对蒸汽和液体压力式温度计的示值将带来误差。温包高时示值比实际值大, 温包低时示值比实际值小。对于气体压力式温度计的影响则可以忽略不计。(4) 大气压力的变化对蒸汽压力式温度计的示值也会造成影响, 因为弹簧管本身所反映的压力实际上是内部压力与大气压力之差值, 即相对压力。所以在环境压力有较大改变时必将对示值产生影响。这种影响, 对气体和液体压力式温度计可在制造时采用加压灌装感温介质的方法使其大为减少。

1.3 温度测量原理

1.3.1 热电偶测温原理

1.3.1.1 热电偶

热电偶一般用于测量 500°C 以上的高温, 如电厂生产过程中的主蒸汽温度, 过热器壁

管温度, 高温烟气温度等。普通热电偶的测温上限可达 1300°C (长期用时) 至 1600°C (短期用时), 特殊材料制成的热电偶可测量 $2000 \sim 2800^{\circ}\text{C}$ 的高温。热电偶是一种发电型传感器, 它将温度信号转换成电势 (mV) 信号, 配以测量毫伏信号的仪表或变送器, 便可以实现温度的测量或温度信号的变换。

将两根不同性质的金属丝或合金丝 A 和 B, 焊接组成一个闭合回路称为热电偶。A、B 称为热偶丝, 也称为热电极。放置在被测温度的介质中的接头, 称为测量端, 一般都是高热端, 所以又称为热端。另一接头则称为参比端, 在使用时, 这端并不焊接, 而是接入测量仪表, 其温度通常是环境温度或某一恒定温度, 所以通常被称为冷端。当热电偶两端温度 $t \neq t_1$ 时, 回路中有电流, 把这电流称为热电流, 产生热电流的电动势称为热电势, 并把这种物理现象称为热电现象。

1.3.1.2 热电效应

热电效应是将铜丝和铁丝两头相连成闭合回路, 把其中一头加热, 回路中将有电流产生。实际任何两种导体或半导体材料构成的闭合回路都能见到类似现象。这种有热转变成电的现象称热电效应 (Thermoelectric Effect)。热电偶就是根据这种热电现象制成的测温单元。热电偶被测区所加热的一端称为热端 (Hot Junction) 或工作端、测量端 (Measuring Junction), 另一端处于参照温度下, 称为冷端 (Cold Junction) 或自由端、参考端 (Reference Junction)。

1.3.2 温差电势及中间温度定律

1.3.2.1 热电势

在古典电子理论中, 热电势由温差电势和接触电势两部分构成。

温差电势是由均质导体的两端温度差引起的。如果某均质导体的两端温度分别为 T 和 T_0 , 则导体两端之间的温差电势为:

$$e(T, T_0) = \int \delta(t) dT \quad (1-1)$$

接触电势是当两种不同的导体 A 与 B 接触时, 因两者的自由电子密度不同, 在接触点产生电子扩散, 而形成的电势。接触电势是温度 t 的函数, 即: $e_{AB}(t)$ 。

1.3.2.2 测量端与参考端的电势计算

将两种导体构成如图 1-1 所示回路, 而两导体相接的结点 (Junction) 分别处于温度 T 、 T_0 时, 导体 A 与 B 之间的电势是温差电势和接触电势的代数和, 但考虑到回路中的温差电势远小于接触电势, 可以忽略不计, 因此测量端与参考端的电势可用下式求出:

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (1-2)$$

1.3.2.3 中间导体定律

在热电偶回路中, 接入另一导体后, 只要此导体两端温度相同, 回路的总电势就不变。这样就可以把导体 A 和 B 的接点 T_0 端打开, 接入导体 C, 引向电势测量仪表。容易证明, 仪表指示值

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0) \quad (1-3)$$

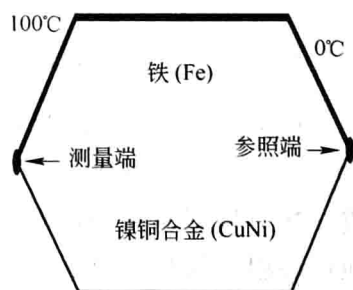


图 1-1 两种导体构成的热电偶回路