

普通高等院校能源动力类精品教材



# 制冷与低温工程实验技术

ZHILENG YU DIWEN GONGCHENG SHIYAN JISHU

舒水明 丁国忠 编著  
胡兴华 张晓青

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

# 制冷与低温工程实验技术

舒水明 丁国忠 胡兴华 张晓青 编著

华中科技大学出版社  
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

制冷与低温工程实验技术/舒水明 丁国忠等 编著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2009年2月

ISBN 978-7-5609-4991-8

I. 制… II. ①舒… ②丁… III. ①制冷工程-实验-高等学校-教材 ②低温工程-实验-高等学校-教材 IV. TB6-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 180038 号

制冷与低温工程实验技术

舒水明 丁国忠等 编著

责任编辑:姚 幸

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉星明图文制作有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:850mm×1065mm 1/16

印张:15

字数:329 000

版次:2009年2月第1版

印次:2009年2月第1次印刷

定价:25.00元

ISBN 978-7-5609-4991-8/TB·107

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

# 前 言

随着科技进步和人们生活水平的提高,对制冷与低温工程专门人才的需求量与日俱增。扩大知识面、鼓励创新和加强实践能力培养是人才培养的发展方向。作者希望本教材能让读者比较全面地了解制冷与低温工程专业领域;掌握制冷与低温工程实验技术的基本理论与方法;跟踪学科前沿动态;提高综合实践能力。

全书共分为 13 章,涵盖了制冷与低温工程学科的主要实验技术。将制冷与低温工程实验中涉及的温度、压力、流量及控制指标等共性测量技术基础放在前面,希望读者关注专业领域中的主要特性参数;随后分别介绍了基础与共性技术、实验(包括计算机模拟实验)原理与方法;最后介绍了制冷与低温技术中热点问题的实验研究。从工程技术角度出发,就是要解决主要参数(量)的测控问题,这是除了原理外技术进步的基础,并且也是检验新的理论的唯一途径。

读者可根据学时和实验室条件,对授课和实验内容进行取舍。

本书包含了专业实验室师生的研究成果,得到了华中科技大学教材基金的支持,多名研究生完成了书中的大量插图,在此一并表示谢意。

由于编者的水平和时间所限,疏漏之处在所难免,殷切希望得到广大读者的指正。

舒水明

2008 年 10 月于喻园

# 目 录

<b>第 1 章 制冷与低温系统实验、监控的评价参数和性能指标</b> .....	(1)
1.1 温度及其测量方法 .....	(1)
1.1.1 温度的基本概念 .....	(1)
1.1.2 温度测量方法 .....	(2)
1.2 压力及其测量方法 .....	(11)
1.2.1 压力的基本概念 .....	(11)
1.2.2 稳态压力的测量 .....	(12)
1.2.3 动态压力的测量 .....	(14)
1.3 能耗指标及其测量技术 .....	(15)
1.3.1 功率及其测量方法 .....	(15)
1.3.2 耗热量及其测量方法 .....	(17)
1.4 制冷量及其测量方法 .....	(19)
1.5 能效比 .....	(21)
1.6 液化系数及其他参数 .....	(22)
参考文献 .....	(23)
<b>第 2 章 制冷与低温工质的性能与实验</b> .....	(24)
2.1 制冷剂概述 .....	(24)
2.1.1 制冷剂的选用准则 .....	(24)
2.1.2 环境影响指标 .....	(24)
2.1.3 热力性质及其对循环的影响 .....	(25)
2.1.4 粘度和导热性 .....	(27)
2.1.5 制冷剂与润滑油的溶解性 .....	(27)
2.1.6 其他物理、化学性质 .....	(28)
2.1.7 替代 CFCs 的单一制冷剂 .....	(29)
2.1.8 混合制冷剂 .....	(32)
2.2 制冷剂制冷性能评价 .....	(34)
2.3 低温工质或低温液态产品及其应用 .....	(35)
2.3.1 液氮 .....	(35)
2.3.2 液氦 .....	(36)

2.3.3	液氢	(39)
2.3.4	液氧	(39)
2.3.5	液化空气	(40)
2.3.6	液氮	(40)
2.3.7	应用注意事项	(40)
2.4	实验 混合工质制冷实验原理与方法	(40)
	参考文献	(43)
<b>第3章</b>	<b>制冷系统及设备的实验</b>	<b>(44)</b>
3.1	实验1 单级蒸气压缩制冷系统的循环实验原理与方法	(44)
3.2	实验2 活塞式制冷压缩机的性能实验原理与方法	(45)
3.3	实验3 涡旋式制冷压缩机性能实验原理与方法	(48)
3.4	实验4 风冷式冷凝器性能实验原理与方法	(50)
3.5	实验5 水冷式冷凝器性能实验原理与方法	(52)
3.6	实验6 螺旋管型热管传热实验原理与方法	(54)
3.7	制冷综合实验的目的及要求	(56)
<b>第4章</b>	<b>空调系统的实验</b>	<b>(57)</b>
4.1	实验1 空调系统的性能与节能实验	(57)
4.2	实验2 空调系统的控制原理与实验	(59)
	参考文献	(60)
<b>第5章</b>	<b>低温系统及其应用</b>	<b>(61)</b>
5.1	氮液化器	(61)
5.2	脉冲强磁场低温系统	(63)
5.3	超流氮制冷	(65)
5.4	$^3\text{He}$ 制冷机	(65)
5.4.1	$^3\text{He}$ 负压制冷	(65)
5.4.2	$^3\text{He}$ 压缩制冷	(65)
5.5	$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 稀释制冷机	(66)
5.5.1	工作原理	(66)
5.5.2	$^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 稀释制冷机	(67)
5.6	液氮驱动系统	(68)
5.6.1	LN2000 液氮驱动系统	(69)
5.6.2	新型循环系统	(70)
5.6.3	液氮驱动系统小结	(74)
	参考文献	(74)

<b>第 6 章 虚拟实验技术</b> .....	(75)
6.1 虚拟实验平台 .....	(75)
6.1.1 硬件 .....	(77)
6.1.2 软件 .....	(77)
6.2 虚拟仪器在制冷空调实验中的应用实例 .....	(78)
6.3 空分装置的虚拟实验 .....	(79)
6.3.1 空分装置的模拟计算 .....	(79)
6.3.2 空分装置流程简介 .....	(80)
6.3.3 KDONAr-50000/20000/1600 型空分装置的模拟计算 .....	(82)
6.4 填料间壁式低温换热器计算机模拟 .....	(84)
6.4.1 模拟条件及模拟程序 .....	(85)
6.4.2 模拟分析 .....	(85)
6.4.3 结论 .....	(88)
6.5 CPL 计算机模拟 .....	(88)
6.5.1 CPL 系统工作原理 .....	(88)
6.5.2 CPL 系统试验装置研发与数值模拟 .....	(89)
6.6 计算机模拟太阳能溴化锂吸收空调的控制系统 .....	(95)
6.6.1 实验平台 .....	(95)
6.6.2 实验过程 .....	(95)
6.6.3 实验结果 .....	(96)
6.7 计算机模拟低温两相流 .....	(97)
6.7.1 常压下低温液体-水传热、传质数学模型分析 .....	(97)
6.7.2 数学模型 .....	(97)
6.7.3 数值模拟及结果分析 .....	(98)
6.8 计算机模拟溴化锂吸收式制冷机 .....	(100)
参考文献 .....	(102)
<b>第 7 章 低温液体的输送与传热实验</b> .....	(104)
7.1 液体氮的输送和实验室杜瓦瓶的灌注 .....	(104)
7.1.1 输液管 .....	(104)
7.1.2 对实验液氮杜瓦瓶灌注液氮 .....	(105)
7.2 液氮水下排放实验 .....	(106)
7.3 液-固两相传热实验的模拟 .....	(114)
7.3.1 数值模拟思想 .....	(115)
7.3.2 低温液体温度的模拟模型 .....	(117)

参考文献	(119)
<b>第 8 章 实验用低温容器及其计算</b>	(120)
8.1 实验用低温容器的种类	(120)
8.1.1 玻璃杜瓦瓶	(120)
8.1.2 金属杜瓦瓶	(121)
8.2 实验用金属杜瓦瓶结构	(122)
8.3 实验用金属杜瓦瓶的强度及稳定性	(124)
8.3.1 概述	(124)
8.3.2 内胆的壁厚	(124)
8.3.3 外筒的壁厚	(125)
8.3.4 平板胆底	(126)
8.4 实验用金属杜瓦瓶的漏热	(126)
8.4.1 剩余气体导热	(126)
8.4.2 绝热结构的传热	(126)
8.4.3 内胆颈管传热	(127)
8.4.4 颈管孔口的辐射传热	(128)
8.4.5 磁体励磁电流引线的漏热	(128)
8.5 辐射屏温度选择	(129)
8.6 杜瓦瓶的日蒸发率	(129)
8.7 有效导热系数对低温容器日蒸发率的影响	(130)
参考文献	(131)
<b>第 9 章 真空技术</b>	(132)
9.1 概述	(132)
9.2 真空的获得	(133)
9.2.1 近代获得真空的方法	(133)
9.2.2 油封旋转式真空泵	(134)
9.2.3 扩散泵	(135)
9.2.4 低温泵	(136)
9.3 真空系统	(137)
9.3.1 基本方程	(137)
9.3.2 流导和导管的几何尺寸	(139)
9.3.3 抽气时间的计算	(140)
9.4 真空测量	(141)
9.5 真空检漏	(142)



9.6 真空密封、焊接及清洁度	(144)
9.6.1 真空密封	(144)
9.6.2 真空焊接	(145)
9.6.3 真空清洁度	(146)
9.7 真空系统集成与实验装置	(147)
参考文献	(148)
<b>第 10 章 低温材料的物理性质与界面热阻实验</b>	(149)
10.1 比热	(149)
10.2 热膨胀	(152)
10.3 电阻率	(153)
10.4 导热系数	(154)
10.5 力学性能	(156)
10.6 接触界面热阻实验	(158)
10.6.1 接触界面热阻研究概况	(158)
10.6.2 氮化铝与无氧铜低温界面热阻的实验研究	(160)
参考文献	(163)
<b>第 11 章 超导技术的低温应用</b>	(165)
11.1 低温超导材料	(165)
11.1.1 超导体	(165)
11.1.2 超导态的临界参数	(166)
11.1.3 超导体的分类	(166)
11.2 低温超导磁体的稳定性	(167)
11.2.1 问题和对策	(168)
11.2.2 冷冻稳定——低温全稳定	(168)
11.3 小型低温超导磁体	(169)
11.3.1 磁体供电和电流引线	(169)
11.3.2 磁体的保护	(170)
11.4 低温技术在高温超导接收机前端中的应用	(173)
11.5 超导磁体用低温容器	(174)
参考文献	(175)
<b>第 12 章 热声热机的实验</b>	(176)
12.1 热声热机的结构	(176)
12.2 热声热机实验原理与方法	(178)
12.2.1 热声热机实验原理与方法	(178)

12.2.2	热声热机的频率特性实验	(181)
12.2.3	扬声器驱动的热声制冷机实验	(182)
12.2.4	回热器实验台设计与填料实验	(187)
12.2.5	高频热声斯特林热机的性能实验	(191)
12.3	热声斯特林混合热机实验	(191)
12.3.1	实验简介	(191)
12.3.2	热声驱动器	(197)
12.3.3	真空系统	(200)
12.3.4	动态数据测量及采集系统	(200)
12.3.5	高频斯特林热声发动机实验步骤	(202)
12.4	实验	(203)
12.4.1	起振过程	(203)
12.4.2	系统稳定后的压力波分布及频谱图	(205)
12.4.3	结构参数对系统性能的影响	(205)
12.4.4	运行参数对系统性能的影响	(211)
12.4.5	系统优化以后的性能指标	(213)
	参考文献	(214)
<b>第 13 章</b>	<b>低温生物及医学中的相关实验</b>	<b>(217)</b>
13.1	冻结实验原理与方法	(217)
13.2	冷冻干燥实验原理与方法	(218)
13.3	冷冻医疗方法	(219)
13.4	冻结实验	(223)
13.4.1	实验内容	(223)
13.4.2	实验设备和材料	(223)
13.4.3	实验过程	(224)
13.4.4	实验结果和分析	(225)
	参考文献	(228)

# 第 1 章 制冷与低温系统实验、监控 的评价参数和性能指标

## 1.1 温度及其测量方法

### 1.1.1 温度的基本概念

温度是一个基本物理量。

从宏观上来看,温度是冷热程度的表现,或者说,互为热平衡的两物体,其温度相等。处于热平衡状态的所有热力学系统具有共同的宏观性质,这一宏观特性用温度表示,即一切互为热平衡的系统具有相同的温度。

从微观上来看,温度是分子运动平均强度的表现。分子运动越激烈,温度越高。

在自然界中,几乎所有的物理、化学过程都与温度紧密相关。因此,温度是工农业生产、科学试验及日常生活中需要测量和控制的一个重要物理量。

由于不同物质的不同物理特性与温度有着不同的关系,因此,即使用同一物质的不同特性,或者不同物质的同一种特性对同一个温度进行测量,也会得出不同的量值,这就需要建立统一的温度标准单位,简称为温标。

温标有两种:经验温标和热力学温标。

#### 1. 经验温标

经验温标是利用物质体膨胀与温度的关系,认为在两个易于实现且稳定的温度点之间所选定的测温物质体积的变化与温度的变化呈线性关系。把在两温度之间测温物质体积的总变化分为若干等份,并把引起体积变化 1 份的温度定义为 1 度。经验温标与测温物质有关,有多少种测温物质就有多少个温标。按照这个原则建立的有摄氏温标、华氏温标。

##### 1) 摄氏温标

所用标准仪器是水银玻璃温度计(简称水银温度计)。分度方法是:在标准大气压力下,水的冰点为 0 度,沸点为 100 度,水银体积膨胀被分为 100 等份,对应每份的温度为 1 摄氏度,记为“°C”。

##### 2) 华氏温标

所用标准仪器是水银温度计。选取氯化铵和冰水混合物的温度为 0 度,沸点为 100 度。水银体积膨胀被等分为 100 份,对应每份的温度为 1 华氏度,记为“°F”。按照华氏温标,水的冰点为 32 °F,沸点是 212 °F。摄氏温度和华氏温度的关系为

$$\text{华氏温度}(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} \times \text{摄氏温度}(^{\circ}\text{C}) + 32$$

或

$$\text{摄氏温度}(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} \times \text{华氏温度}(^{\circ}\text{F}) - 32$$

## 2. 热力学温标

热力学温标也称为开氏温标,它是英国物理学家开尔文(Kelvin)于1848年以热力学第二定律为基础引出的与测温物质无关的温标。热力学温标是以卡诺循环为基础确定温度的。卡诺定律指出,一个工作在恒温热源与恒温冷源之间的可逆热机,其效率只与热源和冷源的温度有关。假设热机从温度为 $T_2$ 的热源获得的热量为 $Q_2$ ,释放给温度为 $T_1$ 的冷源的热量为 $Q_1$ ,则有

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-1)$$

开尔文引出此温标的概念后,于1854年建议用一个固定点来确定此温标。人们发现水的三相点(273.16 K)的稳定性能长期维持在0.1 mK范围内,因此,在1954年第10届国际计量大会上,决定采用水的三相点作为热力学温标的基本固定点。此温标的表达式为

$$T = \frac{Q_2}{Q_1} \times 273.16(\text{K}) \quad (1-2)$$

这种温标的最大特点是与选用的测温物质性质无关,克服了经验温标随测温物质而变的缺陷,故称为科学温标或绝对热力学温标,由此而得的温度称为热力学温度。从此所有的温度测量都以热力学温标作为基准。

### 1.1.2 温度测量方法

#### 1. 热电偶测温技术

##### 1) 热电偶的测温原理与基本定律

热电偶是当前测温中普遍使用的一种感温元件,它的工作原理是基于热电效应。

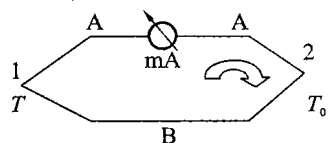


图 1-1 热 - 电效应示意图

两种不同材料的金属丝,两端牢靠地接触在一起,组成如图 1-1 所示的闭合回路。当两个接触点(称为接点)温度 $T_0$ 和 $T$ 不相同,回路中会产生电势(也称为热电势),并有电流流通。这种把热能转换成电能的现象称为热 - 电效应(著名的塞贝克温差电动势)。导体 A、B 称为热电极,接点 1 通常焊接在一起,

置于被测温场所;接点 2 要求恒定在某一温度下,称为参考端。这种结构构成了一种换能器,能将热能转化成电能,利用产生的电势来测量温度。

实验证明,当热电极材料选定后,热电偶的热电势仅与两个接点的温度有关;当 $T_0$ 恒定不变时,热电偶所产生的热电势只随测量端温度的变化而变化。

热电偶产生的电势是由温差电势和接触电势组成的。在使用热电偶测温时,还需要应用热电偶的三条基本定律,这些定律已在实验中得到证实。

(1) 均质导体定律 任何一种均质导体组成的闭合回路,不论各处的截面积如何,不论是否存在温度梯度,都不可能产生热电势。

利用此定律可检验热电极材料的均匀性。

(2) 中间导体定律 由几种不同材料组成闭合回路,当同种材料的两端接触点的温度相同时,此回路的热电势为零。

如图 1-2 所示,将 A、B 构成的热电偶的 $T_0$ 端断开,接入导体 C,只要保持导体 C 两端温度

相同,则对回路总电动势无影响。

中间导体定律有以下两个重要推论。

① 在热电偶回路中接入第三种材料,只要它的两端温度相同,则对回路的热电势没有影响。这就可以利用开路热电偶(热端不需要焊接在一起)来测量液态金属和金属壁面的温度,此时液态金属和金属壁面就相当于接入热电偶回路的第三种

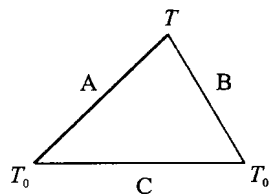


图 1-2 三种导体的热电偶回路

导体。② 任意两种均质导体 A、B 分别与均质材料 C 组成热电偶时,若热电势分别为  $E_{AC(T, T_0)}$  和  $E_{CB(T, T_0)}$ , 则导体 A、B 组成的热电偶的热电势为

$$E_{AB(T, T_0)} = E_{AC(T, T_0)} + E_{CB(T, T_0)} \quad (1-3)$$

中间导体定律的推论方便了热电偶的选配工作。导体 C 作为参考电极(亦称标准电极),常用复现性和稳定性好的材料,如纯铂丝制作。导体 A、B 分别与第三种导体 C 组成热电偶,如果 A、C 和 B、C 热电偶的热电势已知,那么这两种导体 A、B 组成的热电偶产生的电动势可由式(1-3)求得,或者用实验得到由各种材料与铂丝 C 构成的热电偶的热电势后,由各导体材料之间构成的热电偶的热电势就可以按式(1-3)计算。

(3) 中间温度定律 当一支热电偶的接点温度分别为  $T_1$ 、 $T_2$  时,其热电势为  $E_{AB(T_1, T_2)}$ ; 在接点温度分别为  $T_2$  和  $T_3$  时,其热电势为  $E_{AB(T_2, T_3)}$ ; 则当接点温度为  $T_1$  和  $T_3$  时,该热电偶的热电势  $E_{AB(T_1, T_3)}$  为前二者之和,即

$$E_{AB(T_1, T_3)} = E_{AB(T_1, T_2)} + E_{AB(T_2, T_3)} \quad (1-4)$$

式(1-4)提供了冷端温度不是  $0^\circ\text{C}$  时如何应用热电偶分度表的方法。只要引入适当的修正值,即可利用现有的热电偶分度表(冷端温度为  $0^\circ\text{C}$ )求得在任一给定冷端温度下的热电偶的热电势。

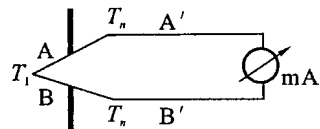


图 1-3 补偿导线在测量回路中的连接

中间温度定律说明,在原来热电偶回路中分别引入与材料 A、B 有同样热-电性质的材料 A'、B', 即引入补偿导线时,相当于将热电偶延长而不影响热电偶的热电势,如图 1-3 所示。

传递热电偶与测量仪表之间信号的元件称为补偿导线。它的作用是将热电偶的参考端延伸到温度恒定的场所,以便与测量仪表连接。

使用补偿导线的优点如下。

① 改善热电偶测温线路的力学性能和物理性能。采用多股或小直径补偿导线可提高线路的挠性,使接线方便,也可以调节线路的电阻或屏蔽外界干扰。

② 降低测量线路的成本。当热电偶与仪表的距离很远时,可用普通金属补偿导线来代替贵金属补偿导线。

## 2) 热电偶测量方法

根据热电偶测温原理,热电势只在参考端(冷端)温度为恒定或已知时,才能反映测量端的温度。实际应用中,热电偶的冷端总是放置在温度波动的环境中,因此需要消除冷端温度对测量的影响。通常采用以下方法。

(1) 补偿导线法 补偿导线是指用热电性质与热电偶相近的材料制成的导线,用它将热

电偶的参考端延长到需要的地方,而且不会对热电偶回路引入超出允许的附加测温误差。根据中间温度定律,补偿导线的热电性质必须与所取代的热电偶丝的性质相同,它的引入并不会影响热电偶的热电势。

补偿导线分为延伸型和补偿型两种。延伸型补偿导线的材料与对应的热电偶的材料相同,补偿型补偿导线的材料与对应的热电偶的材料不同,但它们的作用一样,使用补偿导线来加长热电偶,其主要优点是节约制作热电偶的贵金属材料。要注意的是,使用的补偿导线应与热电偶配套;对于补偿型补偿导线,还要保证它与热电偶相接的两个接点温度一致,补偿导线的温度范围应在  $0 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

随着热电偶的标准化,补偿导线形成了标准系列。国际电工委员会制定了相关国际标准,适合于标准化热电偶使用。补偿导线的型号与配用热电偶分度号如表 1-1 所示。

表 1-1 补偿导线的型号与分度号

补偿导线型号	配用热电偶的分度号	补偿导线合金丝		补偿导线颜色	
		正极	负极	正极	负极
SC	S(铂铑-铂)	SPC(铜)	SNC(铜镍)	红	绿
KC	K(镍铬-镍硅)	KPC(铜)	KNC(铜镍)	红	蓝
KX	K(镍铬-镍硅)	KPX(镍铬)	KNX(镍硅)	红	黑
EX	E(镍铬-铜镍)	EPX(镍铬)	ENX(铜镍)	红	棕
JX	J(铁-铜镍)	JPX(铁)	JNX(铜镍)	红	紫
TX	T(铜-铜镍)	TPX(铜)	TNX(铜镍)	红	白

(2) 计算修正法 当热电偶参考端的温度不为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,需对测量值加以修正,这是因为热电偶的温度-电动势关系及分度表是在参考端为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时得到的。修正公式为

$$E_{(T,0)} = E_{(T,T_0)} + E_{(T_0,0)} \quad (1-5)$$

式中: $E_{(T,0)}$  是冷端为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  而热端为  $T\text{ }(^{\circ}\text{C})$  时的热电势; $E_{(T,T_0)}$  是冷端为  $T_0\text{ }(^{\circ}\text{C})$  而热端为  $T\text{ }(^{\circ}\text{C})$  时的热电势,即实测值; $E_{(T_0,0)}$  是冷端为  $T_0\text{ }(^{\circ}\text{C})$  应加的校正值,该值可以从热电偶分度表中查得。

然后用  $E_{(T,0)}$  从分度表中查得温度  $T$ ,  $T$  就是通过计算法补偿了冷端温度不在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  所产生的电势变化后得到的热端温度。

(3) 冰点法 这种方法是将热电偶的参考端保持在稳定的  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境(冰点瓶)中进行测量的方法。

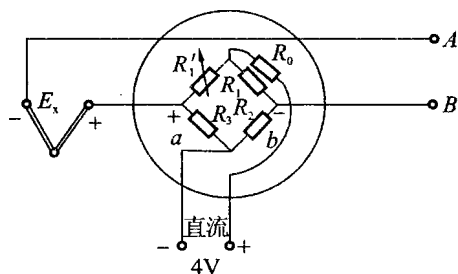


图 1-4 电桥补偿法测量电路

(4) 参考端温度补偿器 虽然可用补偿导线将参考端移到温度比较稳定的地方,但不能维持其温度不变,用计算修正法和冰点法又嫌太麻烦。为了解决这个问题,可采用参考端温度补偿器的方法。热电偶参考端温度补偿器是利用不平衡电桥产生的电压来补偿热电偶参考端温度变化而引起的热电势变化的一种电路。补偿器电路如图 1-4 所示。

桥臂电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的阻值为  $1\ \Omega$ ,用锰铜丝绕

制,电阻值不随温度变化而变化;可调电阻  $R'_1$  用铜线绕制,阻值随温度变化而变化,当温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $R'_1 = 1\ \Omega$ ;  $R_0$  为用不同分度号的热电偶作为调整补偿器时调节供电电压用的电阻;桥路供电电压为直流  $4\text{ V}$ 。当温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $R_1 = R_2 = R_3 = R'_1$ ,电桥平衡, $a$ 、 $b$  两端无不平衡电压输出。当参考端温度升高时,  $R'_1$  和参考端处于相同的温度下,  $R'_1$  随之增大, $a$ 、 $b$  两端就有不平衡电压  $U_{ab}$  输出,而热电偶的热电势  $E_x$  就随之减小。如果  $U_{ab}$  的增加量等于  $E_x$  的减少量,则测量值就不随参考端温度变化而变化,测量的数值就是被测物质的温度。如电桥平衡时的温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,则在使用时与其配接的测量仪表的零点的温度应调至  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(5) 多点冷端温度补偿法 利用多点切换开关可把几支甚至几十支同一型号的热电偶接到一个测量点上,这时只需要一个公共的冷端补偿器即可。另一种方法是把所有热电偶的冷端接到一个接线盒子里,在这个盒子里放置着补偿热电偶的热端,补偿热电偶可以是一支测温热电偶,也可以是用测温热电偶的补偿导线制成的热电偶。

### 3) 热电偶测温的基本电路

热电偶测温电路由热电偶、补偿导线、普通导线和直流测量仪表等组成,一般还有参考端温度处理装置。实际使用中常见以下三种应用方式。

(1) 多支热电偶共用一台测量仪表 条件是多支热电偶的型号相同,测温范围均在测量仪表的量程内,所有主热电偶可以共用一根辅助热电偶来进行参考端温度补偿。

(2) 一支热电偶配用两台仪表。

(3) 热电偶的并联、串联和反接 热电偶并联时,测量仪表反映的是测量端温度的平均值,适当选择测点,可直接反映测量对象某区域的平均温度,但某支热电偶断线时不易发现。热电偶串联测量时可以得到较大的热电势,可提高测温灵敏度,测量仪表反映的是多支热电偶测量端温度的总和。将两支同型号热电偶反向连接测量温度热电势的线路,称为反向串联线路,此线路常用来测量两处的温度差。

### 4) 几种常用的热电偶及其性能

热电偶按温度 - 电动势关系分为标准化和非标准化热电偶两类;按电极材料分为金属、半导体和非金属热电偶三类;按电极材料价格分为贵金属和普通金属热电偶两类;按使用的温度范围分为高温热电偶和低温热电偶两类。

标准化热电偶具有统一的分度表,并规定了热电极材料及化学成分、热电性质和允许偏差。常用的有铂铑 10-铂热电偶,铂铑 13-铂热电偶,铂铑 30-铂铑 6 热电偶,镍铬 - 镍硅(镍铝)热电偶,镍铬 - 铜镍热电偶,铜 - 铜镍(康铜)热电偶等。

铠装热电偶在我国是 20 世纪 60 年代发展起来的新品种。由于它具有许多优点,因而受到用户欢迎。它的主要优点如下。

(1) 动态响应快 它的时间常数可达  $0.01\text{ s}$ ,而普通热电偶的时间常数为  $10 \sim 180\text{ s}$ 。

(2) 惯性小 热电偶丝细、质量轻、热容量小,对被测对象的影响小。

(3) 挠性好 热电偶经退火后有良好的柔性,弯曲半径仅为其直径的 2 倍,适于安装在构造复杂的部位。

(4) 结构合理 因为它是实体,故具有良好的防爆结构。

(5) 品种多 根据需要可以制成不同长度、不同直径的铠装热电偶,最长可达  $100\text{ m}$ ,最

细可达 0.25 mm,还可制成双芯、多芯,能够同时测量 6 个不同部位的温度,使用十分方便。

在热电偶的实际使用中,应该根据被测物质的温度、压力、物质性质、测温时间长短来选择热电偶和保护套管。安装位置要有代表性,安装方法要正确。通常要求将热电偶安装在管道的中心线位置上,并使热电偶的测量端面向流体,以便热端与被测物质充分接触,提高测量的准确度,尽可能测得物质的真实温度。热电偶要定期校验,校验的方法是用标准热电偶与被校验热电偶在同一校验炉或恒温水槽中进行对比。

#### 5) 热电偶测温误差分析

在实际使用中,热电偶的测量误差体现在以下几个方面。

(1) 热电偶的非均匀性分度误差 因热电偶导线粗细不均匀或材料不纯等原因,会使热电偶的温度-电动势关系与统一的分度表存在一定误差,此误差不应超过有关标准。

(2) 因冰水不纯,致使热电偶冷端(即参考端)达不到真正的冰点( $0^{\circ}\text{C}$ )引起的误差。对于精密测量,要求用纯净水制成的冰水。

(3) 热电偶长期处于高温环境会氧化变质,致使其温度 - 电动势关系发生变化而引起误差。

(4) 热电偶的两极间、电偶对之间,以及与大地间不良的绝缘或测量仪表精度不高,都会造成热电势的损失,影响测量的精确性。

(5) 插入深度引起的误差。

(6) 热辐射引起的误差。

(7) 高速气流引起的误差。

还有标准热电偶的传递误差、测温仪器的基本误差、视觉引起的误差等。

#### 6) 热电偶测温技术小结

热电偶回路的热电势只与组成热电偶的材料及两端温度有关,而与热电偶的长短、粗细无关。

只有不同性质的两种导体才能组成热电偶,并且只有在两端温度不同时才会产生热电势。

材料确定后,热电势只与热电偶两端的温度有关;如果固定参考端温度,则回路热电势就只与测量温度  $T$  有关,而且是  $T$  的单值函数,这也就是利用热电偶测温的原理。

在实际测温时,必须在热电偶测温回路内引入连接导线与测量仪表。因此,要想用热电偶准确地测量温度,不仅需要了解热电偶测温原理,而且还要掌握热电偶的基本规律。

### 2. 热电阻测温技术

热电偶在  $500^{\circ}\text{C}$  以下工作时灵敏度较低。目前在测量  $-200 \sim 600^{\circ}\text{C}$  范围的温度时多采用电阻温度计。尤其在低温测量中,电阻温度计用得较为普遍。

#### 1) 电阻测温原理

利用导体和半导体的电阻值随温度变化而变化的这一性质做成的温度计称为电阻温度计。大多数金属在温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  时,电阻值将增加  $0.4\% \sim 0.6\%$ 。半导体电阻值一般随温度升高而减小,其灵敏度比金属高,温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ,电阻值减小  $2\% \sim 6\%$ 。

当采用热电阻温度计测量温度时,被测温度发生变化,热电阻的电阻值也会随之变化,并将变化的阻值转换为电信号输送给测量仪表,在仪表中可显示出温度的变化值,这就是电阻温



度计的测温原理。

热电阻材料应满足以下几个方面的要求。

(1) 电阻温度系数  $\alpha$  尽可能大 这有利于提高传感器的灵敏度和准确度,对于纯金属材料, $\alpha$  为  $0.35\% \sim 0.65\% \text{ K}^{-1}$ ;对于半导体材料, $\alpha$  为  $2\% \sim 8\% \text{ K}^{-1}$ 。 $\alpha$  随温度变化的变化尽可能小(越接近常数越好),以便给测量仪表的分度带来方便。

(2) 电阻率应尽可能大 这样可使电阻的体积减小,因而热惯性也较小,这样对温度变化的响应就快。

(3) 合适的材料 选择在测温范围内化学和物理性能稳定、价格低廉、容易提纯、复现性好的材料。

目前由纯金属制造热电阻的主要材料是铂、铜和镍,它们已得到广泛的应用。近年来,在低温和超低温测量方面,开始采用一些新颖的热电阻,如钢、锰、碳等材料制造的热电阻等。

## 2) 金属热电阻温度计

金属热电阻值随温度变化而变化的特性常用电阻温度系数来描述,即用温度变化  $1\text{ }^\circ\text{C}$  时,金属热电阻值的相对变化量来描述,用  $\alpha$  表示,单位为  $1/^\circ\text{C}$ ,则有

$$\alpha = \frac{dR/R}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (1-6)$$

金属导体的电阻值一般是随温度的升高而升高的。大多数金属导体当温度升高  $1\text{ }^\circ\text{C}$  时,其阻值增加  $0.4\% \sim 0.6\%$ ,其电阻温度系数为正。但同一金属材料的  $\alpha$  可以不相同,其值大小与该金属的纯度有关,纯度越高, $\alpha$  值越大,所以一般纯金属的  $\alpha$  比合金的要大。半导体热敏电阻的  $\alpha$  与材料及制造工艺有关。

金属热电阻的纯度常用  $R_{100}/R_0$  表示。 $R_{100}$  表示  $100\text{ }^\circ\text{C}$  时的金属热电阻的阻值, $R_0$  表示  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时的阻值, $R_{100}/R_0$  越大,纯度越高。

(1) 铂电阻 铂电阻是使用最广泛的一种热电阻,其特点是物理、化学性能稳定,准确度高,稳定性好,性能可靠。铂电阻使用温度范围是  $-200 \sim 850\text{ }^\circ\text{C}$ ,其电阻与温度关系为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (0\text{ }^\circ\text{C} < t < 850\text{ }^\circ\text{C}) \quad (1-7)$$

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (-200\text{ }^\circ\text{C} < t < 0\text{ }^\circ\text{C}) \quad (1-8)$$

式中: $R_t$  为铂电阻温度为  $t\text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻值; $R_0$  为铂电阻温度为  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻值; $A = 3.908\ 02 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ; $B = -5.802 \times 10^{-7}/(^\circ\text{C})^2$ , $C = -4.2735 \times 10^{-12}/(^\circ\text{C})^4$ 。

我国工业上使用的铂电阻规定: $R_{100}/R_0 = 1.391$  和  $\text{Pt}_{50}(R_0 = 50\ \Omega)$ 、 $\text{Pt}_{100}(R_0 = 100\ \Omega)$ 、 $\text{Pt}_{300}(R_0 = 300\ \Omega)$ 。

标准铂电阻温度计的电阻值与温度的关系,除与其纯度有关外,还要受其结构、丝材的机械变形、加工后的热处理及环境的影响。因此,标准铂电阻温度计所用的铂丝,必须经严格的清洗和充分的退火。在骨架上绕制时,应采用无感绕制方法,尽可能减少电阻中的电感值。

(2) 铜电阻 在测量精度要求和温度较低场合,一般普遍使用铜电阻。它可用来测量  $-50 \sim +150\text{ }^\circ\text{C}$  的温度。在这个温度范围内,铜电阻和温度呈线性关系,即

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (1-9)$$

式中: $R_t$  为铜电阻温度为  $t\text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻值; $R_0$  为铜电阻温度为  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻值; $A =$