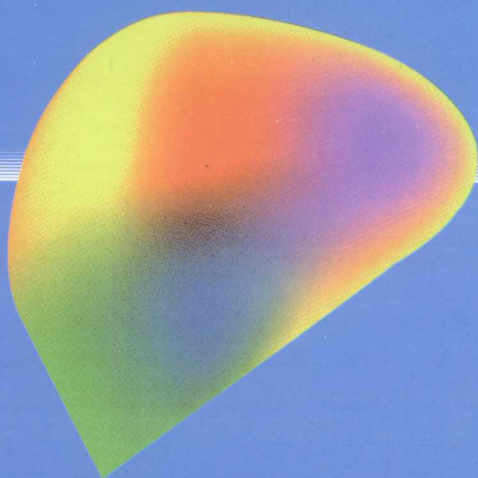


线性测温技术

刘希民 李 聪 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

线性测温技术

刘希民 李 聪 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

线性测温技术/刘希民,李聪著. —北京:
国防工业出版社,2012.1

ISBN 978-7-118-07877-0

I. ①线... II. ①刘... ②李... III. ①测
温学 IV. ①0551.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 258850 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 4 $\frac{3}{8}$ 字数 110 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

多年来,作者一直从事生产过程参数检测与变换的教学和科研工作,积累了较多的信号测量处理方法和经验,尤其是温度测量,作了大量详实的研究,一直想把它们总结出版,以对需要的人有所帮助。本书把温度测量的一些研究内容总结编写成章,以便于与同行交流、学习,只要能为参数测量领域做出微薄贡献、为同行提供一点有价值的方法和见解,就足以让作者感到欣慰,也实现了作者多年来的愿望。

本书在简单介绍热电阻、热电偶测温原理和线性测温技术发展过程的基础上,分别给出了热电阻、热电偶的线性化测温方法。对于热电阻,分析了两种电阻测量方法,比较了各自的特点,建立了基于电流法的电阻测量模型,实现了电阻的精确测量,在此基础上,采用查分度表的方法实现了全分度范围的线性温度测量。对于热电偶,在考虑低温测量时的负热电势和冷端温度补偿的前提下,建立了热电势测量模型,在此基础上,采用查分度表的方法实现了全分度范围的线性温度测量。书中对线路设计、参数确定、程序编写、误差分析等环节作了较详实的论述,对智能仪器的开发设计具有一定的参考价值。

本书的研究和出版,得益于母校济南大学的奖励和校基金的资助,在此深表感谢并将此书作为礼物献给母校。希望本书能对在校的研究生、本科生和从事自动检测与自动化及相关研究的工程技术人员有所帮助。由于作者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

符 号 说 明

T	热力学温度,单位为开尔文(K)
K	热力学温度的单位符号,即开尔文的符号,或 K 型热电偶
t	摄氏温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)
T_{90}	ITS-90 规定的国际开尔文温度
t_{90}	ITS-90 规定的国际摄氏温度
Pt10	10Ω 标准铂热电阻分度号
Pt100	100Ω 标准铂热电阻分度号
Pt500	500Ω 标准铂热电阻分度号
Pt1000	1000Ω 标准铂热电阻分度号
R_t	温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的铂热电阻值
R_0	温度为 0°C 时的铂热电阻值
$R(t)$	表示热电阻与温度之间的函数关系,常用于分度表
$S(t)$	热电势率与温度之间的关系,即 $\text{d}E/\text{d}t$
$E(t_{90}, 0)$	ITS-90 规定的热端温度为 $t_{90}^{\circ}\text{C}$ 、冷端温度为 0°C 时热电偶的热电势
E	热电势
$E(t)$	表示热电势 E 与温度 t 的函数关系
E_t	热电偶热电势,即 $E_t(t, t_0)$
$E_t(t)$	热电偶分度表
$E(t, 0)$	冷端温度为 0°C 时的热电势
c_i	分度函数多项式的系数

c_i'	逆分度函数多项式的系数
α_0, α_1	K 型热电偶指数表达式的系数
$t(E)$	表示温度 t 与热电势 E 的逆函数关系,或热电偶逆分度表
I	恒流源输出电流
S	是赛贝克系数,即热电势率 dE/dt
K, K_1, K_2, K_3	放大系数
k_1, k_2	放大器的放大倍数
S_1	U_1 对应的 AD 采样值,程序注释中用 S_1 表示
S_2	U_2 对应的 AD 采样值,程序注释中用 S_2 表示
U_0	精密电压源的输出电压,放大器的输出电压
u	不确定度
u_c	合成不确定度
S_3	U_3 对应的 AD 采样值,程序注释中用 S_3 表示
S_4	U_4 对应的 AD 采样值,程序注释中用 S_4 表示
S_t	$E_t + U_3$ 对应的 AD 采样值
r	引线电阻
U	扩展不确定度
t_z	整分度点温度值
Δt	温度值的小数部分
A	分度表相对地址

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 温标和温度的单位	1
1.2 铂热电阻的测温原理及特性	4
1.3 热电偶的测温原理及特性	6
第 2 章 铂热电阻线性测温方法	15
2.1 电阻的测量方法.....	16
2.1.1 电流法	16
2.1.2 电压法	18
2.1.3 电流法与电压法的比较	21
2.2 基于铂热电阻分度表的线性测温装置.....	25
2.2.1 AD590 的特性	25
2.2.2 铂热电阻温度测量装置结构	29
2.2.3 信号调理单元	30
2.2.4 放大单元	31
2.2.5 数据采集及处理单元	34
2.2.6 软件设计	37
2.3 误差分析及测试结果.....	43
2.3.1 误差分析	43
2.3.2 结论	46
第 3 章 热电偶线性测温方法	47
3.1 整机结构及工作过程.....	47
3.1.1 AD590	47
3.1.2 冷端温度补偿及信号处理单元	50
3.1.3 放大单元	53

3.1.4 数据采集及处理单元	54
3.2 测量原理.....	55
3.2.1 热电势测量计算模型	55
3.2.2 基于分度表的热电势—温度转换方法	58
3.2.3 基于逆分度表的热电势—温度转换方法	61
3.3 软件设计.....	63
3.3.1 基于分度表的程序设计	63
3.3.2 基于逆分度表的程序设计	65
3.4 误差分析及测试结果.....	68
3.4.1 误差分析	68
3.4.2 测试结果	71
第4章 铂热电阻线性测温装置程序	73
附录1	117
附录2	121
附录3	122
参考文献.....	128

第 1 章 概 述

温度是国际单位制(SI)中的七个基本物理量之一,在物理学单位制中占有重要的地位。在自然界中,许多物质的特征参数与温度密切相关。在工业生产中,诸多的生产过程或产品质量与温度有直接或间接的关系;在科学研究中,温度往往是需要精确测量的最重要的参数之一;在日常生活中,温度与我们生活中的各个环节息息相关。因而温度测量在工业生产、科学研究和日常生活中得到了最广泛应用。热电阻、热电偶是温度测量中使用最广泛的两种测温传感器,测量范围大、性能稳定、测量精度高、复现性好、互换性好、结构简单、安装使用方便、信号便于远传、自动记录和集中监控是它们的主要特点,但其非线性特性也给用热电阻、热电偶实现精确测温带来麻烦,因此,一直以来热电阻、热电偶的线性测温方法是国内外学者研究的热门课题。

1.1 温标和温度的单位

为了保证温度量值的统一和准确,需要建立一个衡量温度的标准尺度,这个标准尺度就是温标,温标规定了温度读数的起点,也就是零点,还规定了测量温度的基本单位,这样各种温度测量仪表的刻度值均由温标来统一确定,温标的科学性和准确性直接关系到温度测量的精确度,影响着我们的科学研究、工业生产和日常生活。随着科学技术的发展,温标也经历了不断发展和完善的过程,从经验温标、热力学温标到国际温标,深深地印证了科学技术发展对温标的影响,也使温度测量更科学、更准确。目前使用的是 90 国际温标(ITS-90)和经验温标中的华氏温标和摄氏温标等。

华氏温标和摄氏温标是在历史上影响比较大的两个温标。

常用的温度单位有热力学温度、华氏温度、摄氏温度三种。热力学温度是热力学温标和国际温标的温度单位,华氏温度和摄氏温度是华氏温标和摄氏温标的温度单位,摄氏温度也用于热力学温标和国际温标。

1714 年德国人华氏 (Fahrenheit) 把氯化铵和冰的混合物的温度定为零度,冰、水混合物的温度定为 32 度,水的沸点的温度定为 212 度,在冰点和沸点之间等分 180 份,每份为 1 华氏度,即 1°F ,建立了华氏温标。1742 年瑞典人摄氏 (Celsius) 规定冰的熔点为零度,水的沸点为 100 度,在两固定点之间等分 100 份,每份为 1 摄氏度,即 1°C ,建立了摄氏温标。由于摄氏温标是百分度,更符合人类的生活习惯,较其他温标更合理、更方便、更科学,所以应用十分广泛。华氏温标和摄氏温标是经验温标,经验温标有很大的局限性和随意性。水的成分(纯度)会影响 0°C 温度的准确性,气压会影响水的沸点导致难以准确地复现固定点 100°C ,固定点太少再加之测温仪表在高温下的非线性,致使按原间隔分度^①高温区温度时产生较大的分度误差,这将使经验温标确定的温度值不准确,难以统一温度量值。

1848 年开尔文建议,利用卡诺定理及其推论,建立一个与工质无关的温标,即热力学温标。热力学温标所确定的温度值称为热力学温度。热力学温标解决了经验温标的局限性和随意性两个缺点,使得温度测量和任何物质的性质无关。但是卡诺热机是不存在的,只好用与卡诺热机等效的理想气体状态方程来复现热力学温度,当用实际气体代替理想气体时,由于它们之间的差异,总要对温度值进行修正,再加上气体温度计十分复杂庞大,使用条件

① 分度是指在规定条件下,为确定被测量与测量仪器示值之间关系的一组操作。对于热电阻和热电偶,分度后得到的与温度对应的示值被称为分度值,把分度值与对应温度作成的表格称为分度表。对于标准铂热电阻, $R(0^{\circ}\text{C}) = 10\Omega$ 和 $R(100^{\circ}\text{C}) = 100\Omega$ 的分度值是不一样的,相差 10 倍,用不同的分度号 Pt10、Pt100 来区分。

苛刻,气体温标的建立相当繁杂,因此,热力学温标是不实用的,是不便于用在日常实际温度测温中的。

国际温标是热力学温标的实用替代,是用来复现热力学温标的温标,自1927年建立以来已经过多次修改,它用热力学温标(定容气体温度计)确定一些能被准确地复现的固定点的热力学温度值,称为定义固定点,再用这些定义固定点来分度一些标准温度计,用标准温度计在这些定义固定点上反复实验获得大量的实验数据,对这些数据处理并回归出准确的计算公式,用这些公式来测量计算固定点间的任意温度值,也称为内插计算,使所测得的温度最接近热力学温度。国际温标规定了一些定义固定点及其热力学温度值,规定了在不同温区使用的内插标准仪器、内插计算公式,以及一些具体的复现、计算方法。它是与热力学温标最近似的温标,比任何一个经验温标都更准确、更科学,有更宽的测温范围,能统一国际的温度测量。

热力学温度是基本的物理量,符号为 T , 其单位为开尔文, 单位符号为 K 。定义水三相点的热力学温度为 $273.16K$, 定义 $1K$ 等于 $1/273.16$ 。国际温标规定比水的三相点低 $0.01K$ 的温度值为摄氏零度, 摄氏温度与热力学温度的关系定义为

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

式中 t ——摄氏温度, $^{\circ}C$;

T ——热力学温度, K 。

热力学温度的起点为绝对零度, 它没有负值, 水的冰点是 $273.15K$, 沸点是 $373.15K$ 。用摄氏温度表示时, 水的三相点是 $0.01^{\circ}C$, 最低温度是 $-273.15^{\circ}C$, 与绝对零度对应。

根据式(1-1)的定义, 摄氏温度与热力学温度的起点不同, 尽管单位不同, 摄氏温度和热力学温度的量值相等, 也就是热力学温度和摄氏温度的间隔或温差是相同的, 都可以用开尔文 K 或摄氏度 $^{\circ}C$ 表示, 这给使用带来了极大的方便。摄氏温度在我国普遍使用, 热力学温度的使用也已普及开来。

华氏温标在英国和美国普遍使用, 单位为华氏度, 符号为 $^{\circ}F$,

可以通过下式把摄氏温度转换成华氏温度

$$n^{\circ}\text{C} = (1.8n + 32)^{\circ}\text{F} \quad (1-2)$$

从上式可以看出来,同样的温度,华氏温度在数值上比摄氏温度和开尔文温度大得多,这给使用带来诸多不便。

1990 年国际温标(ITS-90)同时定义了国际开尔文温度(符号为 T_{90})和国际摄氏温度(符号为 t_{90})。 T_{90} 和 t_{90} 之间的关系与 T 和 t 一样,即

$$t_{90} = T_{90} - 273.15 \quad (1-3)$$

物理量 T_{90} 的单位为开尔文,符号为 K,而 t_{90} 的单位为摄氏度,符号为 $^{\circ}\text{C}$,与热力学温度和摄氏温度一样。

1.2 铂热电阻的测温原理及特性

热电阻温度计是基于金属导体或半导体的体电阻与温度呈一定函数关系的原理实现温度测量的。这种函数关系就是热电阻的特性,也叫参考函数或分度函数。

铂热电阻(常被简称为铂电阻)是最常用的热电阻,测温范围为 $-200^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$,按 0°C 时的电阻值 $R(0^{\circ}\text{C})$ 的大小国标规定的标准铂电阻有 10Ω (分度号为 Pt10)和 100Ω (分度号为 Pt100)两种,在 $-200^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ 测温范围内对应的电阻变化范围分别为 $1.852\Omega \sim 39.048\Omega$ 和 $18.52\Omega \sim 390.48\Omega$,铂热电阻由铂丝绕制而成,Pt10 采用较粗铂丝绕成,而 Pt100 采用较细铂丝绕成,Pt10 耐高温性能优于 Pt100,主要用于 650°C 以上的温区。与 Pt10 相比,Pt100 电阻分辨率大 10 倍,对二次仪表的要求相应低一个数量级,因此,在 650°C 以下温区尽量选用 Pt100。国外还有 500Ω (Pt500)和 1000Ω (Pt1000)薄膜式铂热电阻以提高测温灵敏度,在国内也广泛应用。铂热电阻的参考函数在 0°C 上、下温区各不相同,但参考函数系数相同,其参考函数的多项式形式为在 $-200^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 温区内

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (1-4)$$

在 $0^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$ 温区内

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-5)$$

式中 R_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值;

R_0 ——温度为 0°C 时的电阻值,对于标准热电阻, $R_0 = 10\Omega$ 或 $R_0 = 100\Omega$;

$$A = 3.9083 \times 10^{-3}/^\circ\text{C};$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2;$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^4。$$

铂电阻特性曲线见图 1-1,从图 1-1 和式(1-4)、式(1-5)可见,铂热电阻的电阻值和温度之间是非线性关系,如果选择一条最佳直线,使正、负误差相等来近似铂热电阻的特性,最大时误差可达 $\pm 23.2^\circ\text{C}$ 。根据式(1-4)和式(1-5)可计算出 Pt10 和 Pt100 的热电阻与温度函数关系的 $R(t)$ 分度表, Pt100 的 $R(t)$ 分度表见附录 1, Pt100 的电阻率 $S(t) = dR/dt$ 表见附录 2。从铂热电阻分度表可以看出,两整数分度点之间的电阻差值从 -200°C 时的 0.43Ω 逐渐减小到 850°C 时的 0.29Ω ,也说明了铂热电阻的严重非线性,因此,用铂热电阻精密测温时需进行线性化处理。按照在温度 $t^\circ\text{C}$ 时铂电阻值与分度值偏差大小的不同,把铂电阻的允许偏差等级分为 A、B 两级,见表 1-1。

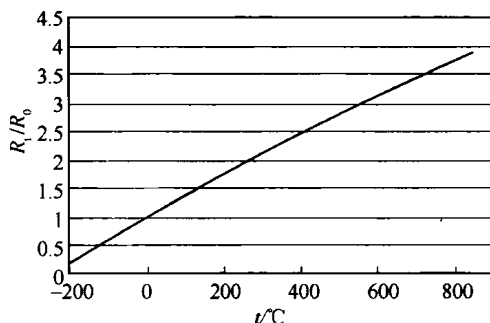


图 1-1 铂热电阻特性曲线

表 1-1 铂热电阻不同等级允许偏差

等 级	允许偏差/ $^{\circ}\text{C}$	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$
A	$\pm (0.15 + 0.002 t)$	-200 ~ 650
B	$\pm (0.30 + 0.005 t)$	-200 ~ 850

1.3 热电偶的测温原理及特性

热电偶的测温原理是基于 1821 年塞贝克 (Thomas Johann Seebeck) 发现的热电现象。将两种不同的导体或半导体 A、B 连接成如图 1-2 所示的闭合回路, 如果两个接点的温度不同 ($t > t_0$), 则在该回路内就会产生热电动势 (简称热电势, 是毫伏级的电压信号), 这种物理现象称为塞贝克 (Seebeck) 热电效应, 所产生的热电势也叫塞贝克热电势。热电偶回路中的热电势是由温差电势, 也称为汤姆逊 (W. Thomson) 电势和接触电势, 也称珀尔帖 (J. C. Peltier) 电势两部分组成的, 但热电偶的热电势主要取决于高温端的接触电势, 且与两端的温度差成非线性的正变关系。这种函数关系即为热电偶的特性。因为由一对导体组成, 所以称为热电偶。导体 A 和 B 都被称为热电极, 一般 A 表示正极, B 表示负极。在实际使用时, 高温端采用焊接或绞接的方式连接在一起, 见图 1-3(a), 置于被测温度环境中感受被测温度, 称为热电偶的热端或工作端; 低温端通过补偿导线与显示仪表相连, 一般置于室温环境中, 称为热电偶的冷端或自由端; 显示仪表采用按温度刻度的毫伏级电压表直接指示温度值, 见图 1-3(b)。

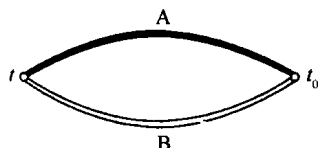


图 1-2 热电偶回路

目前国际上已有八种标准化的热电偶, 型号标志分别为 S、R、

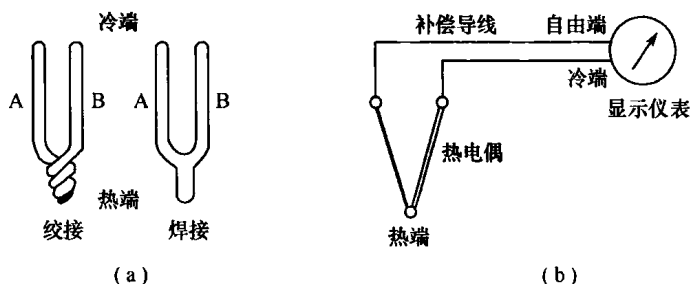


图 1-3 热电偶及测温示意图

B、K、N、E、J、T, 标准化热电偶的组分和字母说明及测温范围见表 1-2。我国还有四种专业热电偶。1990 年我国引入 ITS-90 后, 八种国际标准化热电偶的基础参考函数(也称为分度公式或分度函数, 即热电偶的特性), 除 K 型热电偶外在形式上都是一样的, 其表达式为多项式形式

$$E(t_{90}, 0) = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i \quad (1-6)$$

式中 $E(t_{90}, 0)$ ——热端温度为 $t_{90}^{\circ}\text{C}$ 、冷端温度为 0°C 时热电偶的热电势, mV;

t_{90} ——ITS-90 的摄氏温度, 以下用 t 表示, $^{\circ}\text{C}$;

c_i ——系数, $\text{mV}/^{\circ}\text{C}^i$;

i ——多项式的幂级数。

表 1-2 标准化热电偶的组分和字母标识说明

型号标志	材 料	测温范围/ $^{\circ}\text{C}$
S	铂铑 10-铂	-50 ~ 1768
R	铂铑 13-铂	-50 ~ 1768
B	铂铑 30-铂铑 6	0 ~ 1820
K	镍铬-镍硅	-270 ~ 1372
N	镍铬硅-镍硅	-270 ~ 1300
E	镍铬-铜镍合金(康铜)	-270 ~ 1000
J	铁-铜镍合金(康铜)	-210 ~ 1200
T	铜-铜镍合金(康铜)	-270 ~ 400

只是不同型号的热电偶,在不同的温度分区内,其系数 c_i 不一样,不同型号的热电偶其多项式的最高幂级数 n 也不一样。八种标准化热电偶热电势与温度之间的关系曲线见图 1-4。在此给出 S 型热电偶参考函数的系数,以更详细地理解式(1-6)的形式,见表 1-3。可以看出,对于 S 型热电偶,幂级数 $n=8$,从 $-50^{\circ}\text{C} \sim 1768.1^{\circ}\text{C}$ 的全部分度范围内分了 $-50^{\circ}\text{C} \sim 1064.18^{\circ}\text{C}$ 、 $1064.18^{\circ}\text{C} \sim 1664.5^{\circ}\text{C}$ 和 $1664.5^{\circ}\text{C} \sim 1768.1^{\circ}\text{C}$ 三个温区,在每个温区中系数 c_i 的个数和数值不尽相同。根据式(1-6)可以计算得到不同型号标准热电偶的热电势 E 作为温度 t 的函数的 $E(t)$ 分度表,也就是常用的热电偶分度表(也叫参考表),分度表以列表的形式给出了热电偶输出热电势 E 与被测温度 t 之间的关系。分度表适用于用温度值查热电势,它的最小温度间隔为 1°C ,热电势以毫伏为单位。也可以用热电势值反向查出温度值。分度函数和分度表是用来描述热电偶特性的两种不同形式。

表 1-3 S 型热电偶参考函数系数表

$-50^{\circ}\text{C} \sim 1064.18^{\circ}\text{C}$	$1064.18^{\circ}\text{C} \sim 1664.5^{\circ}\text{C}$	$1664.5^{\circ}\text{C} \sim 1768.1^{\circ}\text{C}$
$c_0 = 0.0000000000$	1. 32900444085	$1.46628232636 \times 10^2$
$c_1 = 5.40313308631 \times 10^{-3}$	$3.34509311344 \times 10^{-3}$	$-2.58430516752 \times 10^{-1}$
$c_2 = 1.25934289740 \times 10^{-5}$	$6.54805192818 \times 10^{-6}$	$1.63693574641 \times 10^{-4}$
$c_3 = -2.32477968689 \times 10^{-8}$	$-1.64856259209 \times 10^{-9}$	$-3.30439046987 \times 10^{-8}$
$c_4 = 3.22028823036 \times 10^{-11}$	$1.29989605174 \times 10^{-14}$	$-9.43223690612 \times 10^{-15}$
$c_5 = -3.31465196389 \times 10^{-14}$		
$c_6 = 2.55744251786 \times 10^{-17}$		
$c_7 = -1.25068871393 \times 10^{-20}$		
$c_8 = 2.71443176145 \times 10^{-24}$		

对于 K 型热电偶,其测温范围为 $-270^{\circ}\text{C} \sim 1372^{\circ}\text{C}$,在 $0^{\circ}\text{C} \sim 1372^{\circ}\text{C}$ 温区内,其参考函数的多项式形式为

$$E(t, 0) = \sum_{i=0}^n c_i(t)^i + \alpha_0 e^{\alpha_1(t-126.9686)^2} \quad (1-7)$$

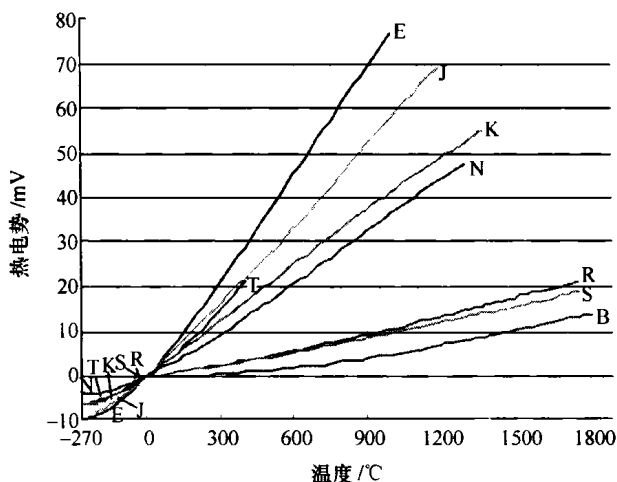


图 1-4 八种标准化热电偶的热电势与温度特性曲线

式中 $E(t, 0)$ ——热端温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 、冷端温度为 0°C 时的热电偶的热电势, mV ;

t ——ITS-90 的摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$;

c_i ——9 次方多项式的系数, $\text{mV}/^{\circ}\text{C}^{-i}$;

i ——多项式的幂级数;

α_0 ——指数表达式的有关系数, mV 。

α_1 ——指数表达式的有关系数, $1/^{\circ}\text{C}^2$ 。

在 $-270^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 温区的分度函数为

$$E(t, 0) = \sum_{i=0}^n c_i(t)^i \quad (1-8)$$

表 1-4 给出了 K 型热电偶参考函数系数 c_i 和 α_0 、 α_1 。

K 型热电偶的分度表 $E(t)$ 见附录 3。

对于八种标准热电偶, 还给出了式 (1-6) 参考函数的逆函数, 称为逆分度函数 (或逆参考函数), 其多项式形式为

$$t = \sum_{i=0}^n c'_i [E(t, 0)]^i \quad (1-9)$$

式中 t ——ITS-90 的摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$;