

传感器及 传感技术应用

丁镇生 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
URL: <http://www.phei.com.cn>

传感器及传感技术应用

丁镇生 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书介绍了各种传感器的原理、性能,详细地论述了常用传感器的具体应用技术、测控电路设计和调试方法,理论与实践结合紧密。本书内容丰富,以数字技术为重点,介绍了各种A/D转换器、先进电路和元器件的巧妙应用,通俗易懂、深入浅出,读者学了即可应用。本书适用于科技工程人员,仪器仪表设计制作人员,大中专师生和电子爱好者阅读。

书 名: 传感器及传感技术应用

编 著 者: 丁镇生

责任编辑: 魏永昌

印 刷 者: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社出版、发行 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话: 68214070

经 销: 各地新华书店经销

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 插页: 2 字数: 420 千字

版 次: 1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4800-0
TN·1159

定 价: 24.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

前 言

在现代测量与控制技术中,非电量测量与探测占很大一部分,对非电量测量与探测都要用传感器将各种不同的信号转换成电量。目前非电量测量的各种书籍,大都着重于理论论述,缺乏实践指导原则。

本书根据国内外的大量资料和实践,提炼并推出测量各种常用非电量参数的具体电路和方法,其中包括对温度、压力、流量、液位、速度、转速、长度、距离、高度、深度、重量、载荷、转矩、振动、湿度、水分、酸度等参数的测量以及对健身、健康的检测,各种探测与报警装置。

各章节均有对传感器的原理或型号的介绍、详细论述测量电路的原理,既有定性分析,又有定量计算,对各种测量与探测电路都给出元器件的具体型号或参数,并给出电路的调试方法。

每篇文章相对独立,便于选择任一章节阅读。文中既有理论叙述,又有实践指导。相当一部分测量与探测电路采用国内外最新元件与方法,具有一定的先进性。

书中大部分电路采用数字显示技术,对各种常用 A/D 转换器的具体应用给予详细的介绍,这些 A/D 转换器大部分是 $3\frac{1}{2}$ 位,但也有 $2\frac{1}{2}$ 位和 $3\frac{3}{4}$ 位的。本书对各种常用 A/D 转换器提供了详尽的电路与方法。

这是一部理论与实践并重,二者有机结合的科技书籍,适用于科技工作者,仪器仪表工作者、大中专相关专业的师生和电子爱好者阅读。

附录中给出了在检测与仪表设计中非常有用的资料。

在本书编写工作中,唐福深、何开茂、何纪波、马腾、艾起兰、周宏昌、王瑞林、曲清、魏永昌等同志给予了大力支持并作了部分编务整理工作,在此表示衷心感谢!

由于作者水平所限,书中的错误缺点在所难免,敬请读者批评指正。

作者

1997. 10.

本书由

中共大连市委、大连市人民政府资助出版

The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government

大连市学术专著资助出版评审委员会

名誉主任 楼南泉 林纪方

主任 司玉琢

副主任 高春武 吴厚福 何杰

委员 梁宗巨 王子臣 李寿山 王逢寿 汪榕培

夏德仁 罗均炎

工程技术专家评审组

组长 袁一(大连理工大学 博导、教授)

副组长 刘人杰(大连海事大学 博导、教授)

成员 王承遇(大连轻工学院 博导、教授)

吴迪镛(中科院大连化学物理研究所 博导、研究员)

陈朝贵(铁道部大连内燃机车研究所 高级工程师)

郭东明(大连理工大学 博导、教授)

戚正风(大连铁道学院 教授)

蒋志凯(大连水产学院 教授)

目 录

第一章	温度的测量	(1)
第一节	具有线性校正的铂电阻温度计	(1)
第二节	高精度 K 型热电偶数字温度计	(4)
第三节	高精度 J 型热电偶温度计	(8)
第四节	高精度物体表面温度数显仪	(10)
第五节	电桥式数字温度计	(13)
第六节	数字式固态温度计	(19)
第七节	温度测量数显/控制仪	(21)
第八节	精密温差温度计	(24)
第九节	集成传感器数字温度计接口	(25)
第十节	80 点粮库巡回检测仪	(27)
第十一节	宽温域数字温度表	(30)
第十二节	新颖的三点定标数字温度计	(34)
第十三节	红外热辐射温度计	(37)
第二章	压力测量	(40)
第一节	不用 A/D 的数字压力表	(43)
第二节	电子气压表	(46)
第三节	压力测量仪	(50)
第四节	数字压力测量仪	(55)
第五节	巴图(Bar Graph)压力计	(59)
第六节	4~20mA 压力变送器	(64)
第七节	压力传感器的长距离接口	(66)
第八节	压力传感器的频率输出接口	(69)
第九节	高压数字式压力表	(72)
第三章	流量、液位的测量	(77)
第一节	数控流量计	(77)
第二节	光纤涡轮流量计	(79)
第三节	使用 A/D 转换器的液位测量/控制器	(84)
第四节	温差液体流量计	(88)
第五节	导电液体液位测量的转换电路	(90)
第四章	转速、速度的测量	(91)
第一节	磁电式传感器数字转速仪	(92)

第二节	霍尔传感流速测量仪	(95)
第三节	利用 A/D 转换的速度计	(99)
第四节	霍尔转速测量装置	(102)
第五节	热线风速计	(103)
第六节	差动变压器测速装置	(106)
第七节	炸药爆炸速度测试装置	(111)
第五章	长度、距离、高度、深度、斜度的测量	(114)
第一节	电阻式位移测量仪	(114)
第二节	红外线织物测长仪	(119)
第三节	光纤微位移测量仪	(123)
第四节	超声探测仪	(126)
第五节	超声数字测距仪	(132)
第六节	数字高度仪	(135)
第七节	数字倾斜度仪	(138)
第八节	简易水深测量仪	(141)
第六章	重量、载荷、转矩、振动加速度的测量	(143)
第一节	起重机吊钩电子秤	(143)
第二节	数字载荷仪	(146)
第三节	磁电式数字扭矩测量仪	(148)
第四节	振动测试仪	(151)
第五节	微振动测试仪	(154)
第六节	单片 IC 加速度测试仪	(156)
第七节	手提式电子秤	(159)
第八节	数字式电子秤	(162)
第七章	湿度、水份、酸度的测量	(165)
第一节	数字湿度计	(165)
第二节	室内湿度检测仪	(168)
第三节	绝对湿度测量仪	(170)
第四节	土壤湿度计	(172)
第五节	快速土壤水份测量仪	(174)
第六节	粮食水份测量仪	(175)
第七节	2½位数字 pH 计	(178)
第八节	酸雨检测计	(179)
第八章	健康、健身的检测	(182)
第一节	数字脉搏仪	(182)
第二节	袖珍式数字血压计	(186)
第三节	数字血压计	(187)
第四节	氧气测量与报警仪	(190)

第五节	紫外线测量仪	(192)
第六节	辐射剂量率计	(195)
第七节	数字照度计	(196)
第八节	电子计步器	(198)
第九节	人体平衡测试仪	(201)
第九章	探测与报警	(205)
第一节	CO 探测报警器	(205)
第二节	家用有毒气体探测报警器	(208)
第三节	易燃气体报警器	(209)
第四节	超声波检漏仪	(211)
第五节	超声波汽车尾部防撞探测器	(213)
第六节	汽车倒车超声波防撞报警器	(219)
第七节	人体探测/防盗报警器	(222)
第八节	集成红外探测报警器	(227)
第九节	15 路巡回红外探测器	(230)
第十节	移动人(物)体多普勒探测报警器	(232)
第十章	其它检测	(235)
第一节	植物生长测试仪	(235)
第二节	数字高斯计	(238)
第三节	球墨铸铁数字检测系统	(241)
附录		(245)
附录一	运算放大器的调零方法	(245)
附录二	伯特瓦兹(Butterwoth)低通滤波器设计方法	(246)
附录三	数字测量仪表(数字电压表)功能的检测方法	(250)
附录四	常用 A/D 转换器电源供电电路	(251)
附录五	运算放大器输入端保护环	(253)
附录六	摩托罗拉部分 MPX 压力传感器封装外型	(254)
参考资料		(255)

第一章 温度的测量

温度是表征物体冷热程度的物理量,在工农业生产、科研、生活领域是一个重要的测量参数,它对产品的设计、产品的质量、生产效率、节约能源、生产安全、人体健康起着非常重要的作用。温度测量与控制应用范围十分广泛,温度传感器的数量在各种传感器中占据首位,约占 50%。

温度的测量都是根据传感器或敏感元件进行的,常用的测温方法利用下列的效应或变化:

(1) 利用铜电阻($-50\sim+150^{\circ}\text{C}$)、铂电阻($200\sim+600^{\circ}\text{C}$),热敏电阻(低温 $-200\sim 0^{\circ}\text{C}$,一般温度 $-50\sim 30^{\circ}\text{C}$,中温 $0\sim 700^{\circ}\text{C}$)的电阻值的变化,特别是利用铂电阻阻值随温度的变化测量温度,在工业科研领域应用十分广泛,例如本章的第一节、第四节、第五节、第七节、第十一节等章节的测温仪表或电路均是利用铂电阻作为传感器的。

(2) 利用镍铬-考铜($-200\sim 800^{\circ}\text{C}$)、镍铬-镍硅(铝)($-200\sim 1250^{\circ}\text{C}$)、铂铑₃₀-铂铑($100\sim 1900^{\circ}\text{C}$)等热电偶的热电效应。例如本章中的第二节,第三节等章节均是使用热电偶作为测温传感元件的。

(3) 利用半导体 PN 结电压随温度的变化。例如本章中的第六节所述。

(4) 利用晶体管特性的变化,制成的集成温度传感器,例如 AN6701、AD590、LM134 等均属此类传感器。本章的第八节,第九节,第十节均采用 AD590 作为测温元件。

(5) 利用物体的热辐射测温。如本章的第十三节所述。

第一节 具有线性校正的铂电阻温度计

利用铂电阻测温的电路很多。本文介绍的测温电路,具有线性校正环节,电路简单,有足够的测量精度。文内利用两种电路进行比较、分析,对初学者具有较高的参考价值。

一、传感器

传感器采用铂电阻 TRRA102B 型的 R1000 的感温元件(电路图上的 R_t),传感器在 0°C 时其阻值为 1000 欧,当然亦可使用 R100, R_{40} 铂电阻,但线性校正电位器应适当选择。

二、测量电路

这里给出两种测温电路,即无线性校正环节的测温电路和有线性校正测温电路,以便读者进行对比。

1. 无线性校正的测温电路

无线性校正环节的测温电路如图 1.1.1 所示。在图 1.1.1 中, V_{REF} 是 A/D 转换器的基准电压, V_{IN} 是 A/D 转换器的输入电压

$$V_{\text{REF}} = V^+ R_1 / (R_1 + R_2 + R_t)$$

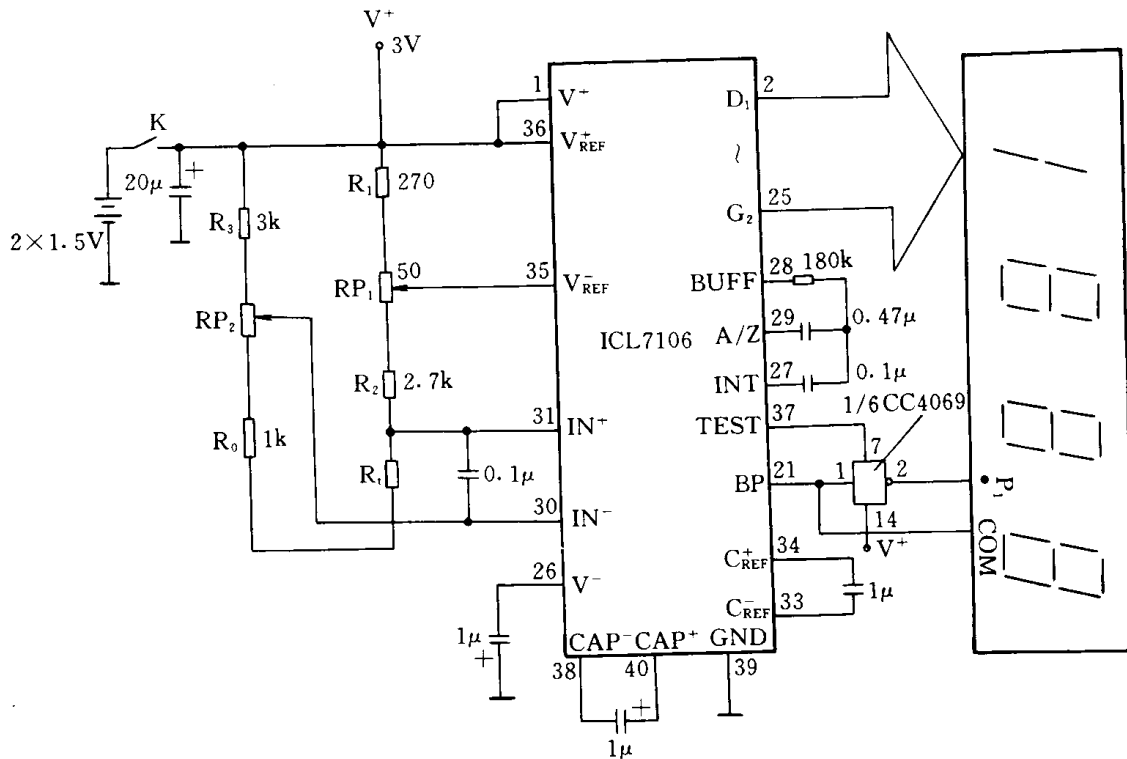


图 1.1.1 非线性校正的测温电路

取

$$R_1 + R_2 \approx R_3 \quad (1.1.1)$$

则

$$V_{REF} = V^+ R_1 / (R_3 + R_1)$$

$$V_{IN} = V^+ [R_t / (R_1 + R_2 + R_t) - R_0 / (R_1 + R_2 + R_0)] \quad (1.1.2)$$

$$= V^+ R_3 (R_t - R_0) / [(R_3 + R_1)(R_3 + R_0)]$$

A/D 转换器输出的显示值为

$$N = \frac{V_{IN}}{V_{REF}} \times 1000 \quad (1.1.3)$$

将(1.1.1)和(1.1.2)式代入(1.1.3)式,得

$$N = \frac{R_3 (R_t - R_0)}{R_1 (R_3 + R_0)} \times 1000 \quad (1.1.4)$$

由(1.1.4)式可以看出:

(1) 当 R_1, R_3, R_0 固定后,显示值

$$N \propto (R_t - R_0)$$

(2) 显示精度与电源电压无关(但必须有足够的电压,保证 A/D 正常工作),显示精度只由电阻决定,这可称为按比例工作。

该电路温度显示的分辨能力可达 0.1°C ,但测量误差较大,在 100°C 的范围内约有 $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}$ 的非线性误差,在 200°C 范围内约有 2°C 的非线性误差。

2. 具有线性校正的测温电路

图 1.1.2 是铂电阻的线性校正电路,由图可知

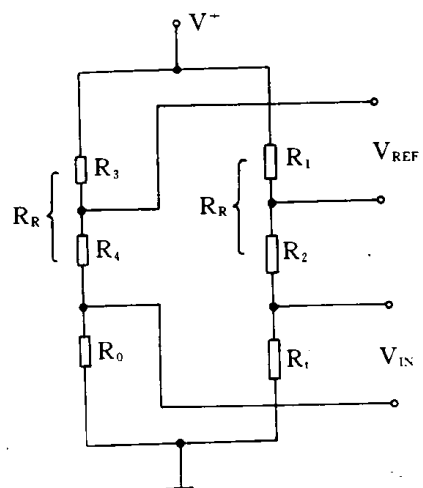


图 1.1.2 传感器的线性校正电路

$$V_{REF} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_t} V^+ - \frac{R_3}{R_3 + R_4 + R_0} V^+ \quad (1.1.5)$$

$$V_{IN} = \frac{R_t}{R_1 + R_2 + R_t} V^+ - \frac{R_0}{R_3 + R_4 + R_0} V^+ \quad (1.1.6)$$

令 $R_1 + R_2 = R_3 + R_4 = R_R$, 则

$$V_{REF} = \frac{R_1(R_R + R_0) - R_3(R_R + R_t)}{(R_R + R_t)(R_R + R_0)} V^+ \quad (1.1.7)$$

$$V_{IN} = \frac{R_R(R_t - R_0)}{(R_R + R_t)(R_R + R_0)} V^+ \quad (1.1.8)$$

将(1.1.7), (1.1.8)代入(1.1.3)式得

$$N = \frac{R_R(R_t - R_0)}{R_1(R_R + R_0) - R_3(R_R + R_t)} \times 1000 \quad (1.1.9)$$

(1.1.9)式分母中的第二项 $R_3(R_R + R_t)$ 即为非线性校正项。这样使测温的非线性误差大大降低。

该电路在 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 温度范围内的测量精度可达 0.1°C , 在 $0 \sim -100^\circ\text{C}$ 温度范围内可达 0.2°C 的测量精度。

完整的具有线性校正的铂电阻测温电路如图 1.1.3 所示。

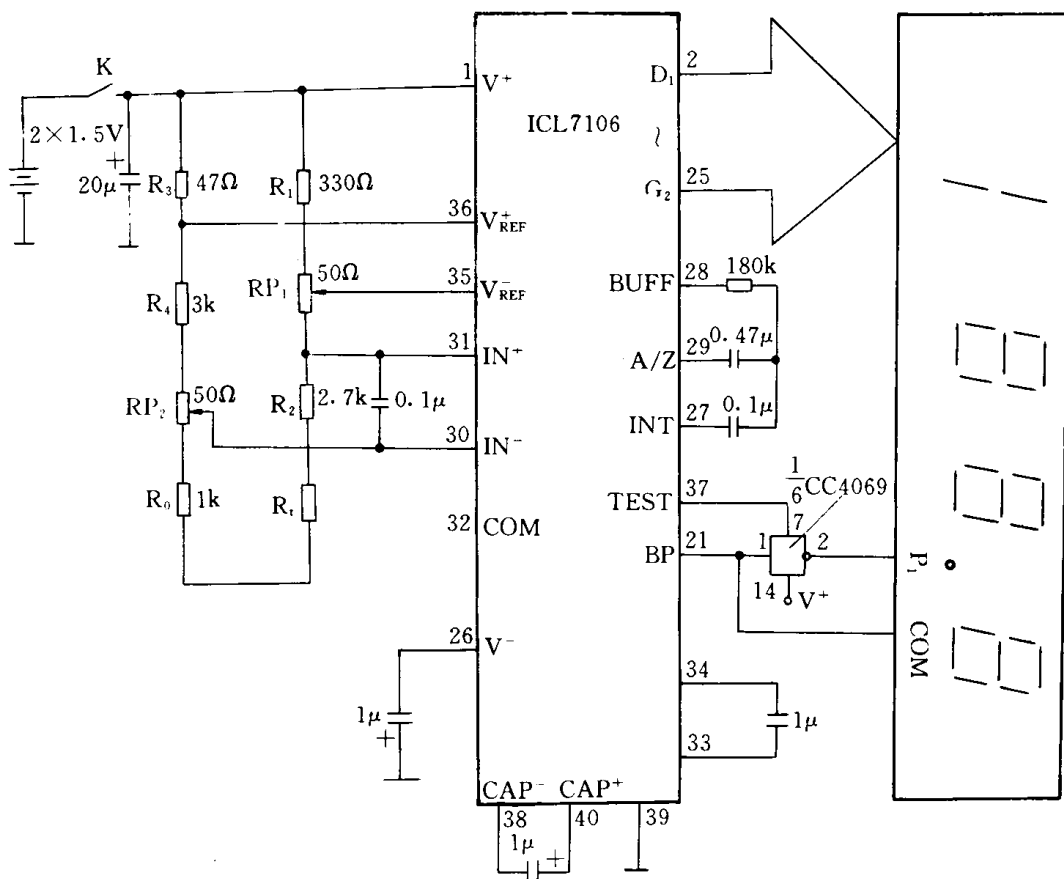


图 1.1.3 具有线性校正的铂电阻测温电路

两种电路的测温特性如图 1.1.4 所示。

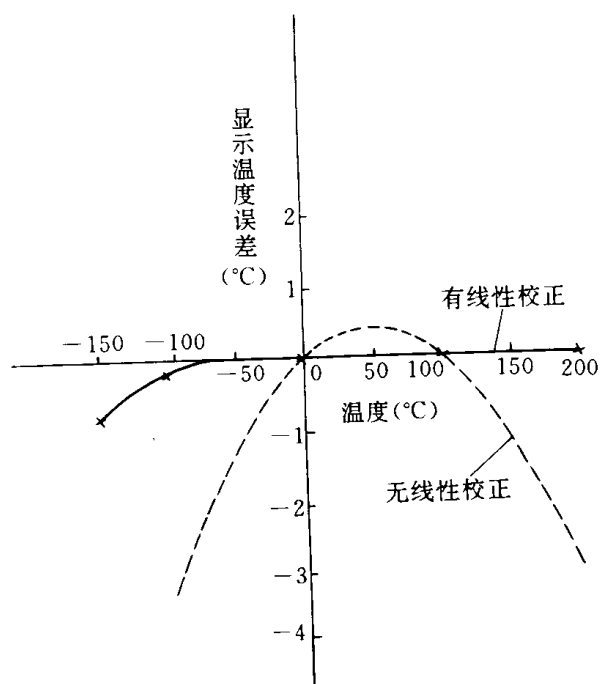


图 1.1.4 两种电路的温度特性

三、调试

本铂电阻测温仪应按图 1.1.3 电路制作,图中的电位器 RP_1, RP_2 应选多圈电位器。电路装成以后按以下顺序调试:

- (1) 接上替代传感器的 $1k\Omega$ (传感器 0°C 的电阻) 电阻, 调节 RP_2 , 使数字显示为 0.00;
- (2) 接上 $1.385k\Omega$ (传感器 100°C 的电阻) 电阻, 调节 RP_1 , 使数字显示为 100.0;
- (3) 最后联接传感器。

第二节 高精度 K 型热电偶数字温度计

这里阐述的数字测温仪表是采用 K 型热电偶作为传感器的。电路采用近几年生产的先进器件,所用的元器件少,性能优良,精度高,具有先进水平,测温范围为 $0\sim 1200^\circ\text{C}$ 。

一、传感器

传感器采用 K 型热电偶,它的精度分为三级:

0.4 级 在 $0\sim 1000^\circ\text{C}$ 之间,其误差为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$,为测量温度的 0.4%。

0.75 级 在 $0\sim 1200^\circ\text{C}$ 之间,其误差为 $\pm 2.5^\circ\text{C}$,为测量温度的 0.75%。

1.5 级 在 $-200\sim 0^\circ\text{C}$ 之间,其误差为 $\pm 2.5^\circ\text{C}$,为测量温度的 1.5%。

本电路采用 0.75 级 K 型热电偶。

二、测量电路

热电偶的输出电压很小,每度只有数十微伏的输出,这就需要运算放大器的漂移必须很小。

另外,热电偶都有非线性误差,这就要求有非线性校正电路。

1. 基准接点补偿和放大电路

实验室测温可将热电偶的高温端置于被测温度处,低度置于 0℃,但这给许多应用带来不便。需要将低温端进行基准接点补偿,再将微小的热电动势进行放大。

用于 K 型热电偶零点补偿和放大的电路已研制成为集成电路,如 AD595。AD595 中又分为几种类型,其中有校准误差为 ±1℃(max)的高精度 IC,如 AD595C 就是一种。

AD595 是美国模拟器件公司的产品,它的两个输入端子 +IN, -IN 通过插座 CN 接入 K 型热电偶,对热电动势进行零点温度补偿和放大,AD595 还具有热偶断线报警的功能,当热电偶断线时,晶体管 VT 导通,发光二极管点燃。

基准接点补偿和放大电路如图 1.2.2 左侧所示。

2. 非线性校正电路

热电偶的热电动势和温度不成线性关系,一般可用

$$E = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n \quad (1.2.1)$$

表示

其中 T 为温度;E 为热电动势; a_0, a_1, \dots, a_n 为系数。

根据热电偶的热电动势分度表可由最小二乘法或计算机程序计算出 a_0, a_1, \dots, a_n 。

K 型热电偶热电动势经 AD595 放大后其输出电压为

$$V_0 = (-11.4 + 1.009534V_a - 5.506 \times 10^{-6}V_a^2) \text{mV} \quad (0 \sim 600^\circ\text{C}) \quad (1.2.2)$$

$$V_0 = (745.2 + 0.772808V_a + 13.134656 \times 10^{-6}V_a^2) \text{mV} \quad (600 \sim 1200^\circ\text{C}) \quad (1.2.3)$$

式中 $V_a = 249.952V_{in} \quad (1.2.4)$

V_{in} 为 AD595 的输入电压即热电偶的输出电动势。

由于线性化电路只取 V_a 的最高幂次为 2,故(1.2.2)和(1.2.3)式还是比较近似的。尽管这样,在 0~1000℃范围内,仍可以将原来的较大误差校正为 1~2℃的误差,相当于(0.1~0.2%)的相对精度。

由(1.2.2)和(1.2.3)式可知,还需要一个平方电路和加法电路

3. 平方电路

平方电路使用专用集成电路 AD538,该集成电路有三个输入端子 V_x, V_y, V_z ,而且有下面的函数关系:

$$V_{OUT} = V_Y (V_Z / V_X)^m \quad (1.2.5)$$
$$m = 0.2 \sim 5$$

它作为平方电路不需要再加任何元件,最适合用于线性校正电路。AD538 内部有基准电压电路,它能提供 +10V(4脚)和 +2V(5脚)的基准电压,它可以为自身或外电路提供电压源。

在电路图 1.2.1 中, V_z, V_y 短接后接 AD595AD 的输出 V_0 (9脚),即

$$V_z = V_y = V_a$$

V_x 端(15脚)与 10V 端(4脚)相接,即

$$V_x = 10V$$

由于 B(7 脚)与 C(12 脚)相联,故

$$m=1$$

因此 $V_0 = V_a^2 / 10000 \text{mV}$

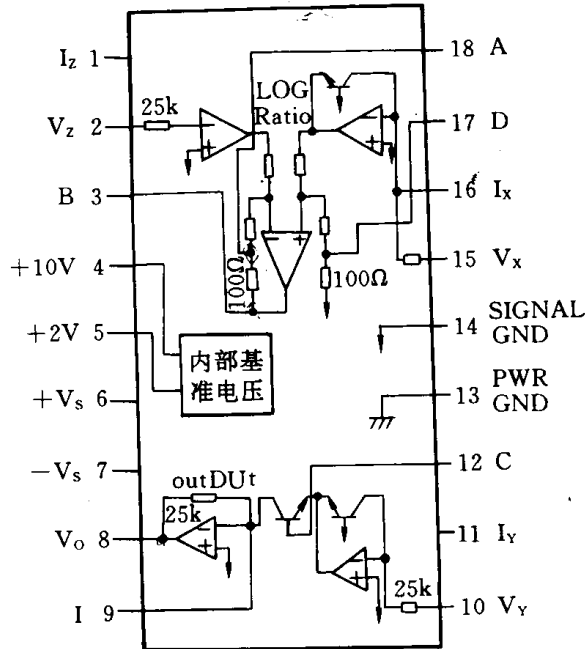


图 1.2.1 AD538 内部框图

4. 反相加法器

现在介绍满足以下公式的电路设计方法:

$$V_{\text{OUT}} = (-11.4 + 1.009534V_a - 5.506 \times 10^{-6}V_a^2) \text{mV} \quad (1.2.2)$$

前述已经得到了 V_a 和 V_a^2

显然满足(1.2.2)式的电路为一个加法电路。这个加法器是 A_2 组成的运放电路。

V_a 的一次系数 1.009534 是由运放电路 A_1 提供的,即 A_1 的输出电压为

$$V_{o1} = -\frac{R_2}{R_1 + W_1} V_a$$

调整十圈电位器 RP_1 可使 $V_{o1} \approx -1.0095V_a$ 。因此 A_1 是一个一次系数放大器;

A_2 是一个反相加法放大电路; R_6 与 R_3 组成一个系数为(-1)的支路。

$$R_6/R_3 = 1$$

它将 $V_{o1} = -1.0095V_a$ 转换成 $V'_{o2} = 1.0095V_a$

R_6 与 R_4 组成 V_a 的二次系数放大支路,即

$$R_6/R_4 = 0.0555$$

所以 $V''_{o2} = -555 \times 10^{-6}V_a^2$

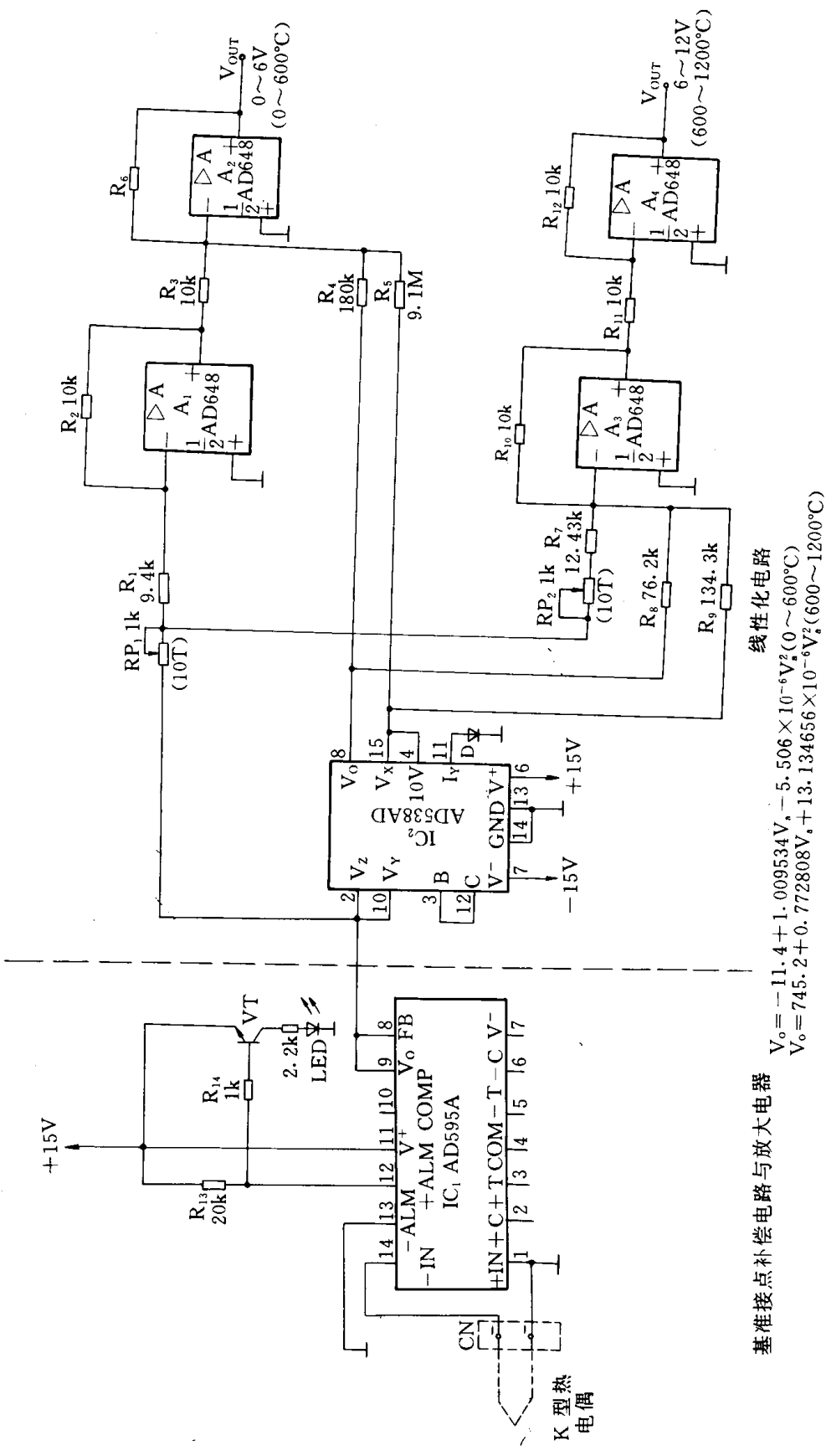
R_6 与 R_5 组成常系数-11.4 的偏置电路,该支路的放大分量为

$$V^*_{o2} = -10V R_6/R_5 = -11\text{mV}$$

由迭加原理得

$$V_{\text{OUT}} = (-11 + 1.0095V_a - 5.55 \times 10^{-6}V_a^2) \text{mV} \quad (1.2.3)$$

和(1.2.2)式大体相当。



基准接点补偿电路与放大电路

线性化电路

图 1.2.2 K 型热电偶零点补偿—放大与线性校正电路

当然可以把设计的电路参数使 V_{OUT} 完全满足(1.2.2)式

同理满足(1.2.3)式的电路由运放 A_3 和 A_4 完成,常数项由 $10VR_{10}/R_1=744.6$ 完成,一次项由 $R_{10}/R_7+RP_2=0.7728$ 完成,二次项由 $R_{10}/R_8=0.1312$ 完成。

该测温电路无论 $0\sim 600^\circ\text{C}$, 还是 $600\sim 1200^\circ\text{C}$, 大约都具有 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度,其输出电压和温度具有良好的线性关系。

三、调试

由电路图 1.2.2 可知, IC_1 AD595 和 IC_2 AD538AD 除热电偶断线报警电路 VT 外,都未外接元件,因此 IC_1 和 IC_2 无需调整,这是因为大量的调试工作已由集成电路技术完成。

需作调试的是 $A_1\sim A_4$ 。主要是闭环放大倍数的调整。图 1.2.2 中的 R_1, R_7, R_8, R_9 均为非标称电阻,它们可由两个标称电阻串联组成。

RP_1 的调整要满足

$$R_2/(R_1+RP_1)=1.0095$$

同样, RP_2 的调整要满足

$$R_{10}/(R_7+RP_2)=0.7728$$

整个的调试工作均要满足(1.2.2)和(1.2.3)式。

四、A/D 转换

将 $0\sim 6\text{V}$ 和 $6\sim 12\text{V}$ 的输出电压通过转换开关输入到 A/D 转换器进行数字显示。

比较简化的方法是,将模拟电路(图 1.2.2)组装完后,将输出电压输入到数字电压表,可由数字电压表读取温度值。

第三节 高精度 J 型热电偶温度计

使用 J 型热电偶测温,这里把量程分为两档: $0\sim 300^\circ\text{C}$ 和 $300\sim 600^\circ\text{C}$ 。J 型热电偶三次以上的温度系数还很大,用二次线性校正不能精确覆盖 $0\sim 600^\circ\text{C}$ 。分两档量程即可满足精度要求。

AD594 也是 J 型热电偶专用集成电路,可完成温差电势的放大和基准接点温度的补偿,而且还装有热电偶断线检测电路。AD594 没有线性校正电路。在使用时应增加这部分电路。

AD594 的输出电压可表示为:

$$V_o=(\text{J 型热电偶的温差电势}+16\mu\text{V})\times 193.4 \quad (1.3.1)$$

从(1.3.1)式可知,电路在 J 型热电偶的温差电势上加上了一个 $16\mu\text{V}$,这是为了使 AD594 在 $+25^\circ\text{C}$ 时误差为最小。

线性校正电路和断线检测电路:

热电偶的非线性带来相当大的误差。其非线性校正由两部分电路完成。

1. $0\sim 300^\circ\text{C}$ 非线性校正

在 $0\sim 300^\circ\text{C}$ 时,AD594 的输出电压为

$$V_o=3.724+0.98195V_a-11.203725\times 10^{-6}V_a^2 \quad (1.3.2)$$