




FENWAL  ELECTRONICS

NTC/PTC 热敏电阻



目 录

	页数
公司	1
产品	1
市场与应用	2
产品质量与保证	3
定义	4
应用注释:	6
1 传感器比较	7
2 电阻率	11
3 斜率(α)和电阻偏差	15
4 热敏电阻与 STEINHART-HART 公式.....	19
5 稳定性和老化	22
6 测试内容	25
7 桥电路	28
8 液位检测	34
9 线性化	37
10 气体流量测量	40
分立热敏电阻	44
玻璃封装的芯片系列	45
表面安装, 端部焊接的芯片	46
无引线的标准芯片系列	47
芯片系列: 无涂层或环氧涂层	48
UNI-CURVE®系列.....	49
线性热敏电阻 NETWORK-LTN®.....	50
圆片形	51
标准珠形	52
小珠形	53
玻璃探头	54
ISO-CURVE 系列	55
E-I 配对的珠子	56
PTC 热敏电阻/POSI-CHIP™ 系列	57
Micro-Mini(微型)片	58
ICL™ 涌入电流限制器	59
热敏电阻封装	60
设计与结构需要考虑事项	61
表面传感型外壳	63
空气/气体传感型外壳	70
浸没传感型外壳	74
设计审查/订货信息一览表	79
电阻温度换算表	封底/折叠插页

公 司

FENWAL 电子设备公司是一家全球可信赖的公司

Fenwal 电子设备公司是世界上领先的精密负温度系数热敏电阻(NTC)和正温度系数热敏电阻(PTC)的制造商，它自 1955 年起就确立了其信誉。公司首创了在范围广泛的应用中如汽车、工业、医药、电信、办公自动化/数据处理和军用/航空航天，使用通用的温度传感器。Fenwal 电子设备公司还为那些具有独特要求的公司设计产品，从而不断地满足了每个客户对新产品的实际要求。

我们高度自动化的制造设备可证明我们决定生产的 NTC/PTC 热敏电阻具有最好的质量和可靠性。Fenwal 电子设备公司采用先进的制造技术，例如全

面质量管理(TQM)，以及即时服务与交货，从而始终维持高质量。我们杰出的制造设备已接受美国军队和 NASA(美国国家航空和宇宙航行局)所有部门的检查。检查结果表明我们的能力能满足和超出严格的高可靠性设计要求。Fenwal 电子设备公司正式参与到主要的军事和航空航天项目中。我们的质量控制设施完全符合 MIL-I-45208 标准要求。我们积极在的 Milford, Massachusetts 工厂开展 ISO 9001 质量标准认证工作。ISO 9001 是综合性的国际质量标准，它包括产品的设计、制造和服务，是供货商编写的质量体系的一部分。

产 品

热敏电阻工作原理

热敏电阻的基本电气特性是它们随其温度变化而改变电阻。它们不整定,也不产生信号,热敏电阻温度会随周围温度或电流通过热敏电阻而导致的自热而改变。大多数应用,例如温度测量与控制或铜线圈补偿都要求热敏电阻中的功率维持在最小,免得引起自热。其它应用完全取决于自热效应。当周围温度保持不变时,热敏电阻的阻值,很大程度上是热敏电阻的功率的函数,将其温度升高到高于环

境温度。

在这些工作条件下,温度可升高 100°C-200°C,电阻可降至低电流条件下电阻值的千分之一,这自身加热特性使各个领域都可使用热敏电阻。在自热状态下,热敏电阻对改变热敏电阻的热传导率的任何条件都是热敏感的。如果排热速率可理想地固定不变,则热敏电阻对功率输入是敏感的,因而,热敏电阻适合于电压电平或功率电平控制场合。

市场与应用

热敏电阻的应用

Fenwal 电子设备可在各类市场多种不同的应用场合见到。这些应用要求一般是客户具体规定的。有些客户使用的是我们标准的分立热敏电阻，或他们利用我们有便宜的封装能力。在以下市场应用中可使用圆片和探头组合件。

医疗应用一般需在数字式温度计、培养(恒温)箱、皮肤传感器、导尿管、透析设备和呼吸器里使用 Fenwal 的 Uni-curve®或 Micro-Mini(超小型)探头来监测温度、血流或气流。

家电应用一般使用以各种包装的玻璃封装薄片来监测和控制烘箱、微波炉、洗衣机和烘干机、洗碗机和小家电-烤面包机、拌和器、干发器、卷发钳、淋浴器、空调器、炉子、冰箱、制冷机的温度和监控可充电镍铬电池和 NiMH 电池上的温度，对无绳电动工具和器具、可携式摄像机、手提式 CD 播放机/收音机进行充电控制。

汽车应用一般使用圆片、玻璃封装薄片或 Uni-Curve®产品用于温度监测和控制气流及浸没

应用。这些设备通常被用作进气传感器、电池、发动机和传动温度传感器、空调和内/外环境温度传感器，以及油和煤气液位传感器。

办公自动化/数据处理的应用一般使用 Fenwal 的玻璃封装薄片或玻璃珠来进行捆扎机、高架投影机、彩色打印机、复印机、中央处理机(主机)、电源的温度监测与控制，以及膝上型计算机、个人管理器和其它电池供电的便携式设备所用可充电 NiCad 和 NiMH 电池的充电控制。

电信应用一般使用 Fenwal 的裸薄片来进行温度补偿或使用玻璃封装薄片来进行温度监测与控制。典型应用包括开关设备，以及无绳电话、收音机、呼机上的可充电 NiCad 和 NiMH 电池，用于充电控制。

军事/航空航天的应用要求使用精密薄片或玻璃珠组合件来监测飞机、卫星、地面雷达、载人轨道飞行器和深空探空火箭的温度。

产品质量与保证

质量加上客户满意等于成功

我们对质量和使客户满意的承诺始终被认为是成功的基础,这承诺通过我们推行 ISO 9001 认证的国际认可可是最好的证明,这认证的通过要求我们全体员工特别的努力。

Fenwal 电子设备公司将其作为世界级的热敏电阻产品供应商而出现在市场上,它承诺将满足客户需求作为其战策方针。我们具有资源、知识和技能可帮助每位客户满足其对质量、价值、交货和服务等方面的特殊要求。我们提出全体员工协同工作的要求,从而使每个员工都有为公司成功而贡献一切的机会。

除了我们推行 ISO 9001 认证以外,我们在美国,MA, Milford 的制造厂已获得各方面组织的检查和认可,其能力能满足并超过严格的高可靠性设计要求,使 Fenwal 电子设备公司能参与到每一项主要的军事和航空航天项目中,包括空间站。

我们基本质量系统符合 MIL-I-45208 “检验系统要求”和 MIL-STD-45662 “校准系统的要求的军用标准”中规定的要求。

Fenwal 电子设备公司对生产高可靠性产品进程中需要进行的各种测试,或者在自己的主要工厂中进行,或者通过公认的实验室机械进行。测试一般按约定的 MIL-R-23648 “绝缘热敏电阻一般技术要求”标准进行。

MIL-R-23648 环境数据测试极限值				
环境条件	测试方法符合 MIL-R-23648	典型技术数据要求		可接受的机械要求
		25°C 时零功率电阻下可接受的电气值变化		
		薄片 圆片	珠子与探针	
短时间负载	4 , 6 , 5 节	≤2.0%	≤0.35%	无烧熔、焦化或开路的迹象
低温贮存	4 , 6 , 8 节	≤2.0%	≤0.5%	无机械损坏的迹象
高温贮存	4 , 6 , 9 节	≤1.0%	≤0.35%	
热冲击	4 , 6 , 14 节 (MIL-STD-202; 方法 107; 试验条件 B 或 C)	≤2.0%	≤0.35%	无机械损坏的迹象
钎焊时的耐热性	4 , 6 , 15 节 (MIL-STD-202; 方法 210;用 60%Sn/40%Pb 钎 焊在 300°C时 2 秒)	24 小时后 ≤1.0%	24 小时后 ≤0.5%	无机械损坏的迹象
耐湿性	4 , 6 , 16 节 (MIL-STD-202; 方法 106)	≤5.0%	≤0.5%	无电气损坏破裂或接线端松动的迹象。100VDC 下 24 小时后的绝缘电阻应大于 100 兆欧
使用寿命	4 , 6 , 17 节 (MIL-STD-202; 方法 108; 试验条件 D))	≤5.0%	≤5.0%	无腐蚀或其它机械损坏迹象
高温暴露	4 , 6 , 18 节	100 小时后 ≤1.0% 1000 小时后 ≤2.0%	100 小时后 ≤0.35% 1000 小时后 ≤0.5%	
振动 高频率	4 , 6 , 19 节 (MIL-STD-202; 方法 204; 条件 D)	≤2.0%	≤0.35%	无机械损坏的迹象
冲击 规定脉冲	4 , 6 , 20 节 (MIL-STD-202; 方法 213; 条件 A)	≤2.0%	≤0.35%	无机械和电气损坏迹象
浸没	4 , 6 , 21 节 (MIL-STD-202; 方法 104; 条件 B)	≤3.0%	≤0.35%	无机械和电气损坏迹象

定 义

[α] 热敏电阻在温度变化时电阻变化的灵敏度。其单位是欧姆/ $^{\circ}\text{C}$ ，欧姆值，但常被写成%变化/ $^{\circ}\text{C}$ (每度变化百分比)，还被称作为温度系数。

轴向引脚 电子元件的引线，指向类似轴线的相反方向。

[β] 一个常数，用在数字表达式中，表示与绝对温度相对应的电阻。当 β 本身随温度变化时，不适合在宽的温度范围内变化。Fenwal 使用 0°C 和 50°C 来计算 β 值。

电桥 一种简易的电阻网络，用来比较未知元件的阻值和标准电阻的阻值，也被称作为惠斯顿电桥。

陶瓷 一种硬质致密的材料，通过混合金属氧化物，并将其放在高温炉中锻烧而成。

薄片 热敏电阻的一种结构形式，通过将较大的平整方形热敏电阻坯切割成小片而成。

系数 在公式中乘数的术语

常数 公式中的固定值

圆片 热敏电阻的一种以药片状的结构形式

分立元件 一种没有封装的热敏电阻

耗散常数 (D, C) 提高或降低电子元件温度 1°C 所需的功率。单位是瓦特/ $^{\circ}\text{C}$ 或毫瓦/ $^{\circ}\text{C}$ 。

玻璃封装薄片 一种薄片形热敏电阻，它使用玻璃二极管技术，为轴向引线封装结构形式。

玻璃珠 一种热敏电阻结构形式，它由小珠状的热敏电阻材料构成，配有 2 根用玻璃涂层埋入的铂丝。

玻璃探头 一种封装在长玻璃套管中的珠状热敏电阻，它使用杜美合金的引线加长段。

ICLTM(启动) 冲击电流限制器，一流功率使用热敏电阻，在与诸如钨丝灯泡这类部件串联安装时或安装在 DC 电源的整流器和滤波电容器之间时，用来限制初始启动时的电流。

互换性 当更换热敏电阻时所指示的温度最大变化。

ISO-ChipTM Fenwal 电子设备公司用于薄片热敏电阻的商标。

ISO-Curve[®] Fenwal 电子设备公司用于可互换玻璃珠或玻璃探头热敏电阻的商标。发货时需选择成对的热敏电阻，这样它们的组合电阻可在规定的温度范围内精确地与已建立的电阻温度曲线相匹配。

线性 能紧密追随直线电阻温度功能的能力。

LTN[®] 线性热敏电阻网络组合了串联/并联的固定电阻和热敏电阻，可在规定的温度范围内产生直线的电阻温度功能。

Micro-mini(超小型)薄片 一种小型快速反应的可互换热敏电阻片。它被封装在最大直径为 0.020 英寸的套管中, 常用在医疗电子器件中。

NTC 负温度系数。表示为负的斜率或热敏电阻随温度的升高其电阻降低

欧姆(Ω) 电阻的单位

Posi-Chip™ 一种电阻温度传感器, 它由整体硅片组成, 具有正的斜率。

探头组(合)件 一种用热敏电阻外壳, 延长引线, 有时还用了一个接头组合而成的成品热敏电阻组(合)件。

R₀ 热敏电阻在规定温度时零功率下的电阻

R-T 曲线 热敏电阻与温度表或曲线图

径向曲线 电子元件的引线, 它以一直线从中央引至边缘引出元件本体。引线彼此平行地继续向外引。

比率, 0 至 50 将热敏电阻在 0°C 时的电阻除以其 50°C 时的电阻所得的数(比率), 它可用斜率表示并有利于进行比较。

电阻 电气设备的特性, 它阻挠电流流动。

电阻偏差 与指定的标称电阻温度曲线相比, 由于斜率改变而带来的额外容差。加在 25°C 容差上, 为此提供了一个图表(见封底的折叠插页)

电阻率 当减小到标准单位形状时材料体电阻的性质, 标准形状被取作 1 立方厘米, 测量单位是欧姆-厘米。它有利于在已知电阻率及其尺寸情况下预测热敏电阻的实际电阻。

响应时间 热敏电阻指示温度步进变化到规定数量范围所需的时间

自热 由于热敏电阻内的功率耗散而使自身温度上升。

斜率 在规定温度范围时电阻温度曲线的陡度。通常被指定为每°C 欧姆变化或每°C %(值)变化(也被称为 α)。

热敏电阻 (热变电阻)一种温度敏感的陶瓷电阻器。

时间常数 (T.C.)热敏电阻指示温度步进变化到 63%时所需的时间。

Uni-Curve® 一种可互换的薄片热敏电阻。

瓦特数 电气元件消耗或耗散功率的计量单位

应用注释

	页
1 传感器比较	7
2 电阻率	11
3 斜率和电阻偏差	15
4 热敏电阻与 Steinhart-Hart 公式	19
5 稳定性与老化	22
6 测试考虑事项	25
7 桥电路	28
8 液位检测	34
9 线性化	37
10 气体流量测量	40

应用注释 1

传感器比较

采用各种不同与温度有关的材料特性，可提供多种温度测量系统。最常用的温度传感器有：

NTC(负温度系数)热敏电阻

热电偶

铂电阻

整体硅器件

若论“哪种传感器最好？”，通常谈不上最好，热敏电阻的应用范围最广，灵敏度最高。其它传感器则有其自己的适当位置，例如热电偶用于最高温度区域。铂电阻线性度好，尺寸大，且昂贵。硅类则价格低，接近线性，但具有相对较窄的温度范围。

4 种类型各不相同，难以比较，以下依次予以说明。

NTC(负温度系数)热敏电阻

它们通常由 2 或 3 种金属氧化物组成，混合在类似流行的粘土中，并在高温炉内锻烧成致密的烧结陶瓷。氧连结金属往往会提供自由电子。陶瓷通常是极好的绝缘体。但只有在理论上，当温度接近绝对零度时，热敏电阻型陶瓷才是这种情况。但是，当温度增加至较常见的范围时，热激发会抛出越来越多的自由电子。随着许多电子载流通过陶瓷，有效阻值则降低。

电阻随温度的变化极为灵敏。典型变化为每摄氏度减少(-)7%至 3%。这时适合宽温度范围内使用的任何传感器来说是最灵敏的。

额定室温电阻取决于基本材料的电阻率，大小和几何形状，以及电极的接触面积。厚而窄的热敏电阻具有相对高的电阻，而形状是薄而宽的则具有较低电阻。实际尺寸也十分灵活，它们可小至.010 英寸或很小的直径。最大尺寸几乎没有限制，但通常适用半英寸以下。

铂电阻

金属随温度变化的电阻特性正好与热敏电阻相反。在绝对零度时，所有金属都是良好的导体。通过金属晶格的电子是无电阻的。当温度上升时，原子的热激发(振动)逐步破坏了电子平稳的流动。更高温度会产生更高的热激发状态，对电流产生较大电阻。

随温度变化的电阻增加是接近线性的增加。除了其它因素如物理膨胀施加小的影响外，相互关系基本上是理想的。这造成比直线比率有略快的增加。

所有金属随温度的变化遵循大致相同的相互关系。若线绕电阻由铜制成，其变化率约在每摄氏度 0.33 欧姆。此数字来自电阻变化除以温度变化。当电阻从 25°C 时的 100 欧姆改变至绝对零度(-273°C)时的零欧姆时，表达式成为：

$$\frac{100-0}{25-(-273)} = \frac{100}{298} = .336$$

铁、镍、银等 100 欧姆的线绕电阻器都具有相同的性能。选择铂是由于其化学稳定性和所需要的物理性质，例如低的内应力。但是，物理性质造成略高的实际斜率: .39%/C°

制作 100 欧姆的线绕铂电阻存在一些困难，线必须拉制成十分长而细以取得平均 100 欧姆相对较高的电阻。然后将细线绕在配有一些连接引线手段的绝缘陶瓷杆或管上。100 欧姆值最常见，很少有更高值。通常为降低成本可在 20 或 50 欧姆值范围内提供某些值。

在将铂电阻连接至电路中时，互连引线的电阻往往是个问题。1/3 欧姆的引线电阻会导致等于 1 摄氏度的温度误差。于是必须使用 3 或 4 线配置，以补偿或平衡不需要的电阻。

为了提供较高电阻值，如 500 或 1000 欧姆，现已研制出金属膜电阻器。铂通过蒸汽沉积在绝缘陶瓷基片上。其附加优点是尺寸小。

热电偶

热电偶采用与上述电阻器完全不同的原理。热电偶由 2 种不同的金属线组成，它们在每一端都连接在一起，以形成一环路。当连接接头经历不同温度时，电流会与温差成比例。若 1 根线被切断并接入一台电压表，所指示的电压会与温差成比例。

使用时将线对的 1 个接头置于被测点上，而另一接头保持在已知的基准温度上。传统基准温度设定在零度，而实际上是融化的冰。现行技术是让“冷接点”按照室温，但需对 0°C 以上的差进行电子补偿。有趣的是冷接点补偿网络本身需要某种与温度有关的其它器件。

可用的电压十分小，典型值在 40 微伏/°C 范围内并要求仔细地进行信号调节。从传感点至仪器的连线通常要求相同的金属成份。长引线的电阻可能成为问题。有可能使用铜加长引线，但会丧失对冷接点的控制。

有若干标准热电偶金属组合可供使用。在同一种类型中它们是可互换的。

尽管存在低信号和引线问题，但是它们的简单和耐用性，特别是高温能力，因而它们仍获得普遍的使用。实际上它们是唯一适合直接插入到火焰中或在灼热温度下运行的窑炉中的器件。其上限几乎达到金属熔化点。

尺寸非常灵活。除了特殊要求的金属市场上的可获性外，不存在对最大尺寸的限制。在小尺寸方面，又只受到生产和加工细线操作性方面的限制。可提供的某些细线达到几千分之一英寸。

硅

硅制成的传感器利用基本金属的体电阻而不是 2 个不同掺杂区的接点电阻。它具有将近 2 倍于金属线的正温度系数。线性良好。但具有略微向上的曲线。

特别当其被封装成玻璃二极管型(如 DO-35)时，它在本质上属于低成本器件。虽然其温度范围仅在 -55°C 至 150°C ，其高的灵敏度、相对高的电阻和接近线性的电阻曲线使它成为许多应用场合的理想器件。结合基本温度控制和指示，它常常直接被组装在许多印刷电路板中，获得各种温度补偿功能。

提要

热敏电阻最灵敏，具有最宽广的电阻和尺寸选择范围，但属于非线性，具有负温度系数。

热电偶可在赤热及以上的温度范围内工作，但其输出低，因而要求特别的调节，包括冷接点补偿。

铂传感器是最线性的，但局限于低的电阻值。

硅传感器具有正温度系数，其 α 值 2 倍于铂类传感器，但是电阻值较高。温度上限为 150°C 。

比较表

上述各种传感器当然不能构成完整的表格，但它们是最常用的。下表列出 4 种基本类型及其重要补偿参数。它旨在促进某些讨论而不是绝对限定性工作。通常器件不能满足所列出的所有最大值和最小值，因为这些值取自各自类别整个范围内的变型。

传感器比较表

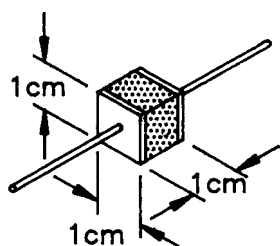
特性	热敏电阻	热电偶	铂丝电阻， 线绕	铂丝电阻， 薄膜	硅
基准	NTC (负温度系数)	TC (温度系数)	RTD (电阻式温度检测)	RTD (电阻式温度检测)	Posi-chip (正温度系数-薄片)
材料	陶瓷 (金属氧化物)	两种不同金属	铂丝线绕	铂薄膜	硅(主体)
相对成本	低至中	低	高	中	低
温度范围	-100°C 至 500°C	-200°C 至 2300°C	-200°C 至 600°C	-150°C 至 500°C	-55°C 至 150°C
激活性	波动	自产生	波动	波动	波动
灵敏度	-4%/°C	40 微伏/°C	.39%/°C	.39%/°C	.81%/°C
相对灵敏度	极高	极低	极低	极低	低
线性度	对数	线性	线性	线性	线性
斜率	负	正	正	正	正
噪声敏感性	低	高	低	低	低
引线电阻误差	低	高	低	低	低
典型最小尺寸(裸片装)	.008×.012	.016 直径	.125 直径	.020×.100	无
最小探头直径	.018	.125	.187	.125	.080
特殊要求		冷接点补偿			

应用注释 2

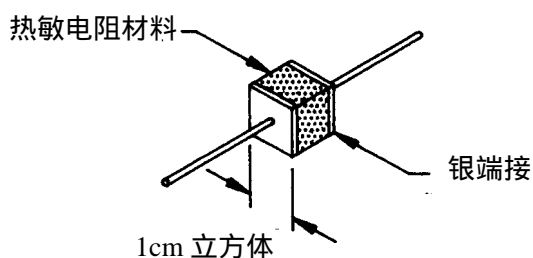
电阻率

热敏电阻的实际尺寸取决于电阻和特定的热敏电阻材料。举例来说，一个具有曲线 16, L 和 10 千欧公称圆片将是.200 英寸的直径和.050(英寸)厚度。若同样材料用于.200 直径 1 兆欧热敏电阻，则厚度将是 25 英寸！虽然有点荒谬，但这是可能的。实际解决办法是使用具有较高体电阻的材料。

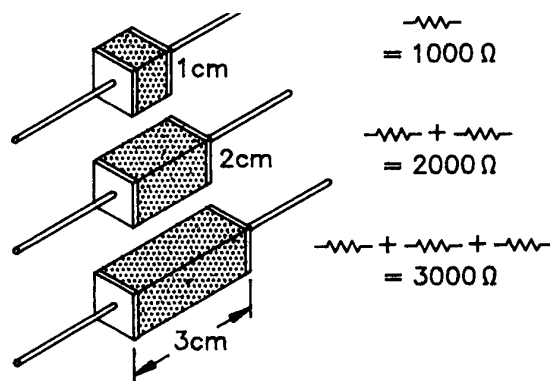
为了比较各种材料体的电阻，样品切成标准件形状。所取的形状是 1 厘米立方体，测量相对两个面之间的电阻。当按此方法确定电阻时，应用的术语是电阻率，单位是欧姆-厘米。电阻率与电阻不同。它类似于每单位体积重量(质量)的密度概念，密度与重量不同。



几何形状和尺寸如何影响实际电阻？假定具有下列尺寸的 1000 欧姆热敏电阻：

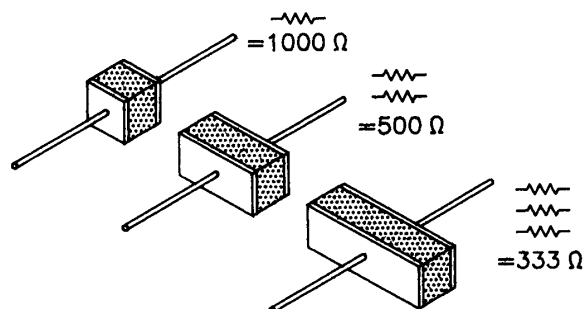


注意当电阻为 1000 欧姆时，电阻率也是 1000 欧姆-厘米，因为它恰巧是 1 厘米立方体。要了解随着尺寸变化时电阻如何变化，应考虑 2 倍和 3 倍长度的影响。



当长度增加时，电阻线性地增加。这对串联电阻器都一样，只要简单地进行算术相加。

再从 1 厘米立方体开始，当宽度增加时会发生什么情况？



电阻的变化与并联电阻器相同。宽度改变了横截面积，等于增加并联电阻器。这类似于为载流能力确定铜线的规格尺寸，此处截面积(线粗细)是关键。电阻与截面积成反比变化。

结合长度与截面积概念产生下列简单公式:

$$\text{电阻} = \rho \left(\frac{\text{长度}}{\text{面积}} \right)$$

式中: 电阻, 以欧姆计

ρ 是材料电阻率, 以欧姆-厘米计

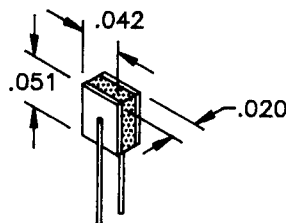
长度, 以厘米计

截面积, 以平方厘米计

希腊字母 ρ 被指定表示电阻率。每种热敏电阻材料都具有相关的电阻率。大多数材料的电阻率范围在几百至 2 万欧姆-厘米之间。

在制造过程中最大程度地使用公式和概念可满足特定的要求。那些将热敏电阻用在狭窄空间而需要小型器件的用户或需要较大器件用于较大功率消耗的用户将对此感兴趣。对所需的规格尺寸可通过查找产品目录向制造厂咨询, 可进行某些推算。

通常出版物中不提供电阻率, 但可根据实际器件计算。例如: 25°C 时电阻为 9850 欧姆情况下, 薄片热敏电阻的电阻率是多少?



$$9850 = \frac{\rho(.020/.3937)}{(.042/.3937)(.051/.3937)}$$

$$P = 2680 \text{ 欧姆-厘米}$$

注意每种尺寸都要转算成厘米。1 厘米等于 .3937 英寸。当所有尺寸单位都为英寸时, 公式可简化为:

$$\text{电阻} = \rho \left(\frac{L * 3937}{A} \right)$$

若现在只要求 .042 长度的尺寸变为 .030 英寸, 其它尺寸须是多少? 厚度 .020 通常会保持不变, 因为这是铸造带材尺寸。 .042 和 .051 可容易地进行调节, 因为它们可在进行锯切作业时设定。

$$9850 = 2680 \left(\frac{.020 * 3937}{.030 * X} \right)$$

$$X = .071 \text{ 英寸}$$

须注意若面积保持不变，则当一尺寸减少时，其它尺寸必须以同样比例增加。

$$0.51 \left(\frac{.042}{.030} \right) = .071$$

陶瓷加工

如何让材料产生需要的曲线和电阻率？热敏电阻材料是尖晶石陶瓷氧化物。制造过程类似于典型陶瓷从混合粉末原料至高温炉烧结的加工全过程。需要附加的步骤是加上引线。

作为一般基础知识，值得列出加工的主要步骤。但是，实际配方和加工细节属于专利。以下首先说明薄片型热敏电阻。

成品热敏电阻是金属氧化物的组合。过程开始是按要求比例称量各金属氧化物粉末。最常用的 2 种是镍和锰。其它可包括铜、铁、钛、铬、钴。通常将 2 或 3 种氧化物粉末混合在一起，但组合是无止境的。

原料粉末首先在 V 形混合机中干混合，然后放入滚磨罐中。添加陶瓷滚磨介质。还要添加少量水，滚磨罐以水平放置在动力驱动的辊子上数小时。

原料粉末被混合在一起，然后将混合的粉末放入陶瓷器皿中，置于摄氏数百度的加热炉中，但远低于最终烧结温度。

热量让不同氧化物反应或化合，但只形成小晶体。它虽然有点成块但仍保持粉末状。

煅烧过的粉末重新放入滚磨罐中，同时添加滚磨介质和溶剂。此步骤称为球磨，继续进行一段时间以降低颗粒大小及混匀混合物。部分通过球磨循环后，添加粘结剂形成蜂蜜稠度的浆料。

浆料现在供浇铸带材用。随着聚酯薄膜带材连续被拉出，一面按照要控制的厚度浇灌浆料。溶剂被驱除后，粘结剂将粉末粘合成似皮革状带。带材此刻可以搬运并被切割成几英寸的方块。

将方块排列在平陶瓷板上并放入烧结炉中。烧结过程烧去有机粘结剂，让晶粒生长。随着晶粒生长会出现一些收缩，材料实际上会变得十分致密。此刻就成了硬陶瓷，其厚度通常在.010 至.030 英寸。

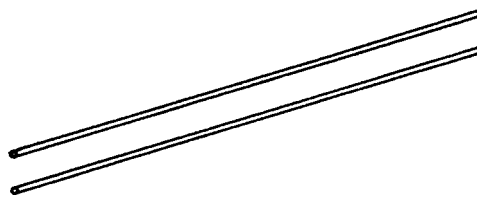
引线不可直接附加在陶瓷表面上。通过用喷、涂或丝网印制的方法给 2 个平坦表面涂上银膏，置于摄氏数百度的加热炉煅烧。

镀银后，用镶金钢石锯将方块切割成小片。小片尺寸范围从约.010×.020 至.100×.100 等。然后将镀铜引线钎焊在银上。最后的操作是环氧树脂浸涂。当然还有加工过程中的控制和最终测试。

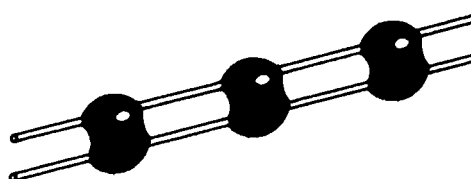
虽然最初混合、煅烧和球磨是类似的，但圆片的加工有些不同。球磨后，将浆料进行喷洒干燥。喷洒干燥炉由圆形不锈钢加热室组成。在中心有一个喷嘴通过它喷浆料。喷洒通过喷出小液滴而不是雾。当液滴遇到热空气时，挥发性溶剂几乎立即闪蒸出。产生的微小球则落到底部，经过漏斗进入贮斗中。重要的是要记住它们是由用蜡状粘结剂粘在一起的疏松颗粒组成。这样制备的粉末可像干砂一样倾注和流动。

下一步加工类似于挤压阿司匹灵。将制备的粉末注入浅筒形模槽中注至齐平，用配对凸模挤压。然后挤出压实圆片。然后进行常规的烧结、镀银和引线连接。

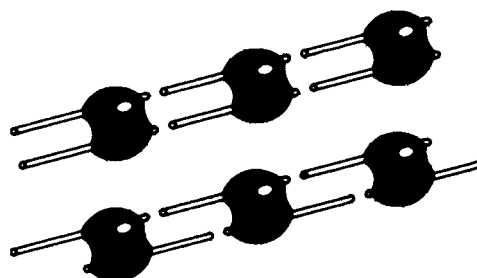
在制作珠形热敏电阻时，浆料制备类似于小批量的薄片状热敏电阻的制作。珠粒十分小，只需要很少材料。引线是.001 至.005 英寸直径的铂线。将 1 根线引伸穿过大的金属框架。第 2 根线与第 1 根线平行放置，控制间隙约.005 英寸至.030 英寸。珠粒电阻是线粗细、线间隙、所沉积热敏电阻材料质量和形状的函数。



于是将 1 滴浆料涂在线上，形成桥接 2 线的小珠粒。每隔半英寸或就沿着线涂若干珠粒。干燥后，珠粒放在小窑炉中烧结。



线切成轴向或径向引线的长度并涂一层玻璃涂层。它们可涂玻璃料或用玻璃套管覆盖。任一情况下，玻璃都要在炉中融化到热敏电阻玻璃珠粒上。玻璃成为密封件并增强了引线引出的强度及提供与外界潮气/化学品的隔离屏障。

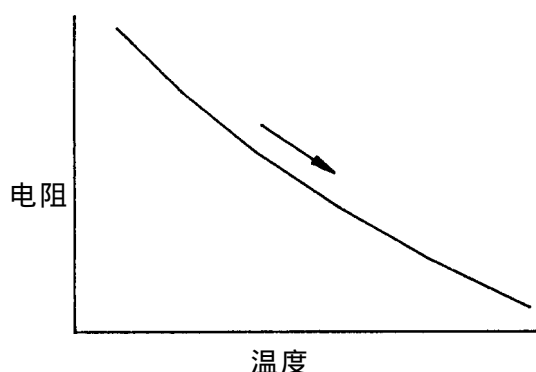


选择铂丝有若干理由。它提供与周围热敏电阻材料理想的接触，容易在烧结温度下存在，温度膨胀系数几乎完全与派勒克斯型耐热玻璃匹配。

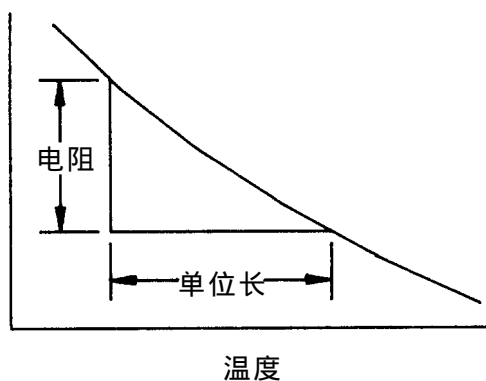
应用注释 3

斜率(α)和电阻偏差

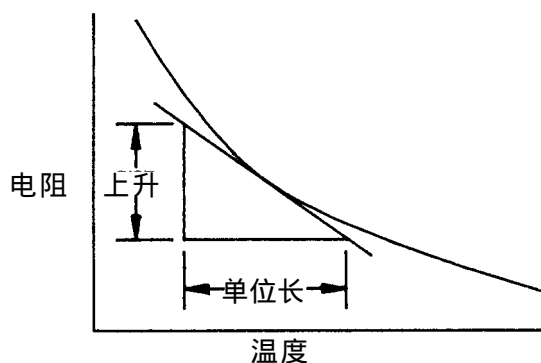
NTC(负温度系数)热敏电阻是一般应用时最灵敏的温度传感器。NTC 热敏电阻会随着温度升高而电阻减小。有若干方法可对此进行定量和定义。所有都与曲线标绘时电阻-温度曲线的斜度有关。



曲线的斜度通常都称为斜率。根据分析几何，图形上 1 点的斜率是“上升单位长”的关系。



若图形十分弯曲，所划直线是曲线有关点的切线。还须注意线斜率“下倾”表示负斜率。



在实际应用中，很少数据按此方式作图和进行几何分析。要先取得特定热敏电阻的足够数据，然后用结果作图太费时间。在 2 个相距很大的温度点取电阻数据及取其电阻比率比较容易。

基准温度被认为是 25°C，几乎所有热敏电阻都具有这里所说的标称电阻。为了计算该点的斜率，电阻可取自 24.5°C 和 25.5°C 并对其进行比较。但是，困难立即出现，因为在各点的温度测量偏差了 .1°C 会产生最高 20% 的误差。

标准做法是比较 0°C 和 50°C 时的(电阻)值。对于一个 10,000 欧姆的热敏电阻曲线 16, L，电阻值将是：

温度	电阻
0°C	32,650
50°C	3603

$$\text{比率} = \frac{32,650}{3603} = 9.06$$

其它热敏电阻材料的比率范围大致从 5 至 15。产品目录中提供有“0 对 50”比率及“25 对 125”比率，后者可用于额定温度较高的热敏电阻。具有较高电阻的材料往往具有较陡的斜率，因此也具有较高比率。

比率是有用的概念，应用工程师常需要特定温度实际斜率或者甚至是大温度范围内的每度实际斜率。分析几何会建议斜率单位采用每摄氏度的欧姆变化。这听起来正确但忽略了实际电阻点。实际电阻变化与该电阻有关。10K 曲线 16, L 热敏电阻在 25°C 时具有 440 欧姆/°C 斜率，但 1K 热敏电阻在同一点仅具有 44 欧姆/°C 变化。

较严密的概念是欧姆/欧姆/°C。按此符号表示法，典型斜率将是 $.044\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$ ，尽管这有点别扭。每欧姆的欧姆变化的百分比值会产生每摄氏度的欧姆变化，它通常被称作 α 。

$$\text{斜率} = \alpha = \% \Delta/^{\circ}\text{C}$$

例 1:

斜率是 $-4.4\%/^{\circ}\text{C}$ 时，10K 热敏电阻在 25°C 的变化会多快？

$$10,000 \text{ 欧姆的 } 4.4\% = 440\Omega$$

因此，热敏电阻加热刚通过 25°C 时每度将失去 440 欧姆。26°C 时电阻将是 9560 欧姆。注意在下一度时，下降只有 420 欧姆(956 的 4.4%)。

例 2:

使用同一曲线 16.L，若电阻是 9854 欧姆，而此刻是 10,152 欧姆，则温度变化是多少？

$$\text{欧姆变化是 } 10,152 - 9854 = 298 \text{ 欧姆}$$

$$\alpha = 4.4\%/^{\circ}\text{C}$$

$$10\text{K 的 } 4.4\% = 440 \text{ 欧姆}/^{\circ}\text{C}$$

若 440 欧姆代表 1 度，298 欧姆代表多少度？

$$298/440 = .68^{\circ}\text{C 变化}$$

例 3:

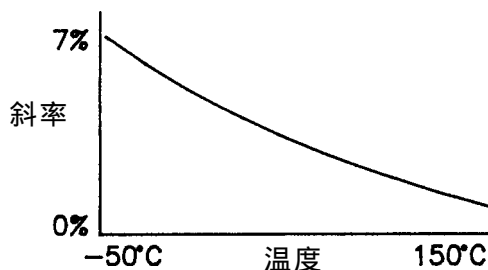
若热敏电阻规定为 10K，曲线 16, L 具有公差 5%，以度计的等值公差是多少？

可使用简单比例:

相对于 1 度是 4.4% 的 α ，则 5% 是相对于多少度？

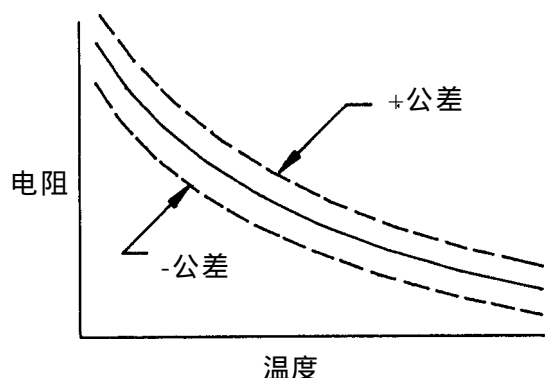
$$5/4.4 = 1.14^{\circ}\text{C}，\text{所以电阻 5\% 的公差与 } 1.14^{\circ}\text{C 温度公差是一样的。}$$

若斜率在整个温度范围内是恒定不变的将会很方便，但斜率在温度量程的冷端较陡、热端较平坦。例如，在 -40°C 斜率通常为 $6\%/^{\circ}\text{C}$ ，而在 100°C 斜率下降至约 $3\%/^{\circ}\text{C}$ 。

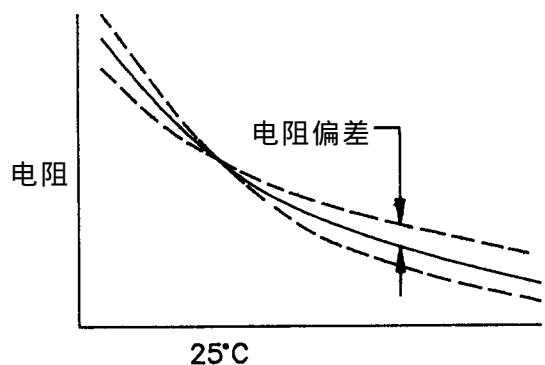


例如求取 75°C 点斜率的实际方法是使用 Steinhart-Hart 公式, 求取 74°C 和 76°C 的电阻。取电阻差值并除以 2。若需要温度范围每度的斜率, 在计算机电子数据表上求取最方便。

斜率具有其自己的公差并影响规定温度范围内的电阻公差。以下举几个例来说明。可对一个规定为 5% 的热敏电阻进行作图, 当 2 条曲线平行于标称值时显示公差极限。

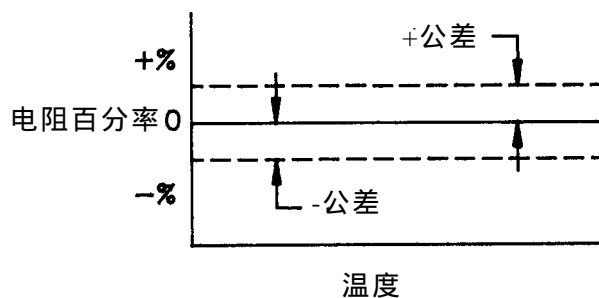


对实际在标称值(25°C 时 0%)但显示斜率变化的热敏电阻作图, 显示出偏差线。它像标称曲线一样在 25°C 点附近旋转。

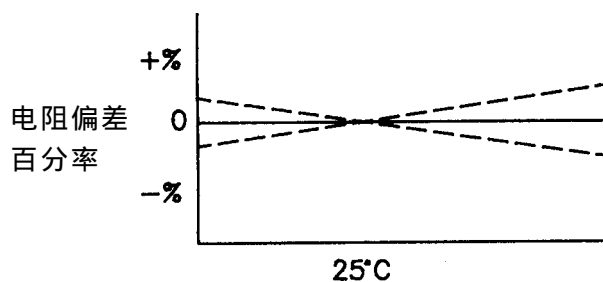


离开标称温度值 25°C 愈远, 偏差度愈宽。实际偏差量被称作“电阻偏差”, 并规定为百分率。

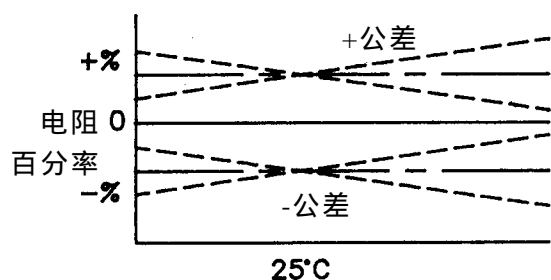
为了更仔细地观察此情况, 只有电阻公差和电阻偏差公差百分率需要作图。电阻公差作为温度的函数应是直线。



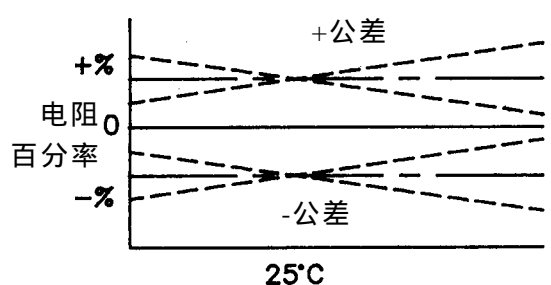
电阻偏差百分率也可作图。结果在 25°C 点是一条水平“V”形虚线。随着温度升高 V 形更加张开, 镜像渐趋更冷。具有比标称值更陡曲线的热敏电阻产生向右下方的线。向上指的线由具有较平坦曲线的热敏电阻产生。



将电阻偏差叠加在+电阻公差上，再叠加在-电阻公差上产生：



当然，2个公差会相互帮助或妨碍，但只要看一下最坏情况，图形会是：



此类图像象是一个与标称规范温度节点相连的弓，通常在 25°C 但也不一定。此点的公差恰好是标称电阻公差。要求取任何其它温度点的公差，必须加上电阻偏差公差。

例 1:

对于 25°C 时具有标称公差的曲线 16 ,L 热敏电阻，70°C 时最坏情况时的公差是多少？

从电阻温度换算表上(参阅折叠插页)，查得电阻偏差在 70°C 时是 2.5。此 2.5% 加上 5% 产生 70°C 时的总公差 7.5%。

与 7.5% 电阻公差相当的温度公差是多少？

产品目录显示了此热敏电阻的 α 在 70°C 是 3.4%/°C。

$$\frac{7.5\%}{3.4\%/^{\circ}\text{C}} = 2.2^{\circ}\text{C}$$

总公差 = $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$

例 2:

若在 50°C 要求 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的温度精度，25°C 时需要多少电阻公差？

对于曲线 16 L，50°C 的 α 是 3.8%/°C

$$1^{\circ}\text{C} \times 3.8\%/^{\circ}\text{C} = 3.8\%$$

在 50°C 时电阻偏差是 1.5% (根据电阻温度换算表)。

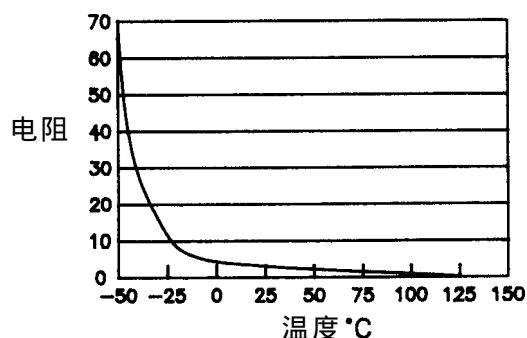
$$\text{用减法: } 3.8\% - 1.5\% = 2.3\%$$

25°C 时要求 2.3% 电阻公差。

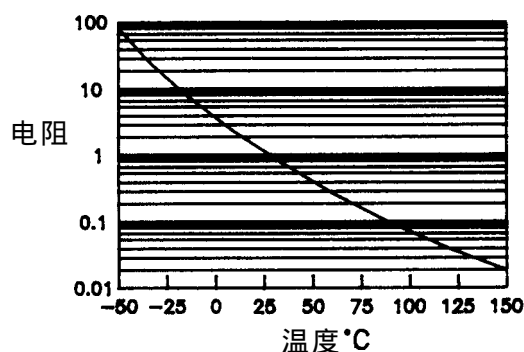
热敏电阻和 STEINHART-HART 公式

热敏电阻是十分迅速随温度而变化的电阻器。用于温度传感的热敏电阻由结合的金属氧化物组成，这些金属氧化物既不是十分优良的绝缘体又不是十分优良的导体。实际上热敏电阻的电阻范围由于易受到多种温度的影响可从数欧直至兆欧。电阻随温度向冷偏移而增高，当温度升高时电阻则减小。这种电阻性能被认为具有负斜率或负温度系数，热敏电阻常被称为“NTC”(负温度系数)热敏电阻。

当电阻随温度增加而下降时，它远离线性。从 25°C 室温开始，冷却至 15°C 乃至 10°C 时电阻约加倍。但从 15°C 上升至 40°C 时电阻减小略超过一半。从 -50°C 至 +150°C 量程范围内，电阻产生的变化是 10,000 至 1。将电阻值作为温度的函数作图则得出下列曲线：



注意曲线在冷端太陡、在热端太平坦，使研究它很难。将同样数据(只是指电阻)换算成对数作图会产生较有用的曲线：



出现的问题是曲线是否适合任何十分简化的公式。若上图在半对数格式上呈一条，则公式会很简化：

$$\frac{R_o}{R_n} = e^{\beta(1/T_o - 1/T_n)}$$

式中：

- R_o 指原始温度时的电阻。
- R_n 指新温度时的未知电阻。
- T_o 指原始温度，以 $^{\circ}\text{C}$ 计(在摄氏温度上加 273)
- T_n 指温度。
- $e=2.718$
- β 是根据 2 点的电阻温度数据用公式求得的常数。

这是便于使用的传统公式，但受到温度范围和精度的限制。 β “常数”本身随温度而变化，不构成全部曲率量。

最佳公式似乎是被称为 “Steinhart-Hart” 的公式，它由麻省科德角伍德修尔海洋学研究所工作的 2 名海洋学家推导得出。他们从事海水取样的工作，包括使用 Fenwal 热敏电阻测得取样深度处的温度。从 3 点比 2 点 β 公式能更好地确定曲线这一前提出发，他们着手建立更好的公式。通过累试法加上数字直觉，他们得出：

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

式中：

- T 指温度、以 $^{\circ}\text{C}$ 计。
- A、B、C 是常数。
- \ln 是自然对数。
- R 指 T 温度时的热敏电阻器电阻。

A、B、C、系数必须先根据 3 个校准点确定。它们是在有关温度量程低端、中点、高端的电阻值。将每对电阻-温度值都插入到公式中，产生一组 3 联立方程式：

$$\frac{1}{T_l} = A + B(\ln R_l) + C(\ln R_l)^3 \quad \{\text{方程 1}\}$$

$$\frac{1}{T_m} = A + B(\ln R_m) + C(\ln R_m)^3 \quad \{\text{方程 2}\}$$

$$\frac{1}{T_h} = A + B(\ln R_h) + C(\ln R_h)^3 \quad \{\text{方程 3}\}$$

式中：

- T_l 是低温度点，以 $^{\circ}\text{C}$ 计(摄氏度+273)。
- T_m 是中间温度点。
- T_h 是高温点。
- R_l 是低温度电阻。
- R_m 是中间低温度电阻。
- R_h 是高温点电阻。

若数据被标准化，可在 1 个温度点产生 1 欧姆，数学作了某种简化。由于 1 的自然对数($\ln 1$)是零， $R=1$ 项被略去。这剩下具有 2 个未知数的 2 个方程式，可用直接方式求解。

例如：

A. 给出下列 3 个温度点的电阻数据：

温度 $^{\circ}\text{C}$	电阻 (Ω)
0	6530
50	720.6
100	136.0

B. 降低电阻至最低温度点的单位比率

	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$	电阻比
LO(低)	0	273	1
MID(中间)	50	323	.110352
HI(高)	100	373	.020827

C 注意 Steinhart-Hart 公式

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

式中:

- T 指开氏度数。
- \ln 是自然对数。
- R 是在温度 T 时的电阻或电阻比。
- A、B、C 是要确定的系数。

D 在 Steinhart-Hart 公式中用最低温度点的“标准化”数据计算“A”系数:

$$\frac{1}{T_1} = A + B(\ln 1) + C(\ln 1)^3$$

$$\ln 1 = 0$$

$$A = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{273}$$

E 常数 B 和 C 可按下式计算:

$$B = \frac{\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_1} \right) (\ln R_n)^3 \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_1} \right) (\ln R_m)^3}{(\ln R_m)(\ln R_h)^3 - (\ln R_h)(\ln R_m)^3}$$

$$C = \frac{(\ln R_m) \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_1} \right) - (\ln R_h) \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_1} \right)}{(\ln R_m)(\ln R_h)^3 - (\ln R_h)(\ln R_m)^3}$$

应用注释 5

稳定性和老化

热敏电阻随着温度而改变电阻，当然是可利用的特性。最低限度它们还受到其外部化学环境，内部应力和化学和晶体结构内部变化的影响。实际上这些变化一般很小，但在一些高要求的应用中必须考虑并降至最低限度。

在制造过程中，通常做法是在超过其额定温度值的某温度下加热处理成品热敏电阻，或有意使用若干天或星期。某些材料比其它材料显得更稳定。镍氧化物/锰氧化物陶瓷系统是最常用并可能最稳定。铜氧化物是其组成部分的其它系统可用为低阻抗的商业应用降低电阻，可参阅表的下部。

稳定性指承受特定温度和持续时间后电阻温度曲线很少偏移。偏移通常用电阻百分率变化或其在 25°C 相当的几分之一度表示。例如，相对大的变化 1% 只会是 25°C 相当的温度变化。

在许多商业应用中认为不重要的小变化在多数航空航天应用中必须认真对待。在经受高温数百甚至数千小时时，往往规定最大偏移为 2%。陶瓷氧化物系统、时间、温度、化学环境及设备预期使用寿命都纳入到是否适合于任务的决定中。

最稳定的热敏电阻组合件是玻璃珠。考虑其 3 个基本成份：第一是陶瓷本身。金属与氧化合形成本质稳定的化合物。按简单的观点是“金属要生锈，但它们不除锈”。在制造过程中，金属氧化物被研磨成细粉，在 1000°C 以上的窑炉中煅烧。经过如此高的温度成形，随后暴露在仅数百度的温度中相比较，这温度缓和了许多，所以热敏电阻可用很长时间。

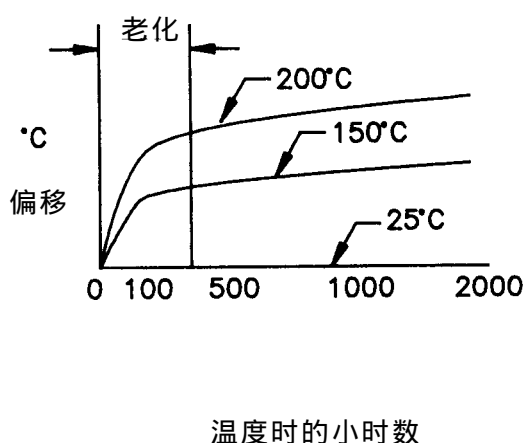
第二成份是铂丝，段烧前它直接被嵌入陶瓷混合物中。烧结过程中细粉聚结而变得十分致密。当陶瓷冷却出炉时，因温度膨胀系数相反作用产生少量收缩。这保证铂丝与陶瓷之间的完全紧密连接。铂丝有理由被看作是最贵重的金属，其本身的性质很稳定。

第三成份是玻璃涂层。这实际上是套在陶瓷和铂丝分组件上并在惰性气体炉中热熔的玻璃套管。玻璃是派热克斯型耐热玻璃，紧密配合于陶瓷和铂的热膨胀系数。玻璃的最大功能是防止发生与其安装环境的任何化学作用。它还隔离了易导致热敏电阻“短路”的离子污染物。

虽然 3 种成份本身很稳定并构成相互支持的稳定产品，但在制造过程中由于温度变化范围较大，会产生少量机械应力。为了获得最佳稳定性，必须通过长时间的暴露在数百度适度的高温中消除这些应力。

最大变化出现在最初暴露的几天中，它通常是按照几分之一度的顺序。被视作常规制造部分的这种热处理过程称为老化，并持续数天或数周。随着处理的持续偏移减小并且最终变得几乎不易觉察。最终安装面临的温度更低，所以未来的偏移将变得不重要。

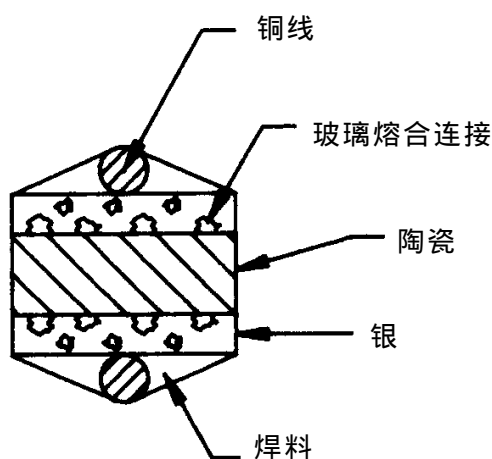
以下是在各种温度时有代表性的偏移对时间曲线图。注意最大变化出现在制造老化处理过程中。



可看到专门用于室温的热敏电阻稳定性要求测量设备的分辨率,达到数毫度或更小。在 150°C、1000 小时情况下,偏移达到.02°C 的数量级。在冷区域的暴露产生不易觉察的变化。

薄片热敏电阻其结构极为不同。虽然陶瓷加工理论相同，但实际生产加工与玻璃探头的加工完全不相关。薄片是由一种具有被烧给在相对 2 侧上银糊的大型薄片制成的。用金钢石锯切割成小薄片后，将引线钎焊在银上。镀锡铜引线用锡/铅焊料和中度的熔剂焊接。最终制造步骤还包括环氧树脂浸涂。

整个过程经调节以进行通过大量订货降低成本的批量生产。但也作出一些权衡选择。它们不是密封式的，并使用次费金属用于引线 and 引线连接区。从稳定性这一点出发，主要差别是在陶瓷/银接口(界面)。银仅形成与陶瓷的中度连接，这可通过银糊中加入少量细玻璃粉得以增强。在银烧结过程中，玻璃软化并形成陶瓷和银之间理想的连接。



加工十分有实效并产生优良结果，但它无法与密封型铂丝电热电阻相比。

面临的偏移是比玻璃珠大得多的数量级。但在高温下通过老化也能将其降至最低限度。使用的焊料具有的共熔点在 180°C 或以上范围内，所以老化温度必须低于此温度。老化温度通常在焊料共熔温度和最高工作温度之间选择。

某些典型技术规范可提供稳定性的参考，如下所述：

MILR-23648 列出：

圆片 2%，在 125°C，1000 小时后

珠粒，5%，在 200°C，1000 小时后

欧洲航天局列出：

2%，在 150°C，1000 小时后

医用热敏电阻：

.05°C，在 37°C，100 小时后

所有电子器件具有需要了解以便最好确定和应用的公差和特性。宇宙中的每一物体具有相关稳定性。热敏电阻的稳定性是要求科学研究的许多特性之一。相反，许多商业应用并不为它费心，只要它们保持在其基本电阻公差内。热敏电阻不会用旧，在其温度额定值内使用将提供多年甚至几十年的可靠使用。

6. 应用时的注意

测试内容

热敏电阻是受各种热能源影响的热敏感器件。它们受环境温度、自身热、传导热、热和太阳辐射等影响。正确的测试装置要围绕充分控制这些影响，定量或将这些影响降至最低程度这些方面作考虑。有 3 个基本有关方面——试验槽温度控制的稳定性，独立温度指示器的精度，试验本身对热敏电阻的干扰影响。

综 述

有关热敏电阻最基本问题是“在给定温度下其电阻是多少？”热敏电阻通常浸没在精确控制温度的液槽中，然后测量其电阻。通常不使用空气室，因为它们极难稳定和控制。如何精确保持(控制)槽的温度？

假定电阻被要求在 25°C、5% 热敏电阻的曲线 16, L 上。 α 是 4.4%/°C。5% 电阻公差被换算成相当的温度公差：

$$5\% \div 4.4\%/^{\circ}\text{C} = 1.2^{\circ}\text{C}$$

根据姆指法则，槽温误差须不大于其 1/10 或约 0.1°C。若热敏电阻规定具有温度公差如 0.2°C，则槽必须能有 0.02°C。

须注意恰好在 5% 极限的热敏电阻可能由于槽误差被误称为 5.5%。例如在 0.2°C，可能误称为 0.22°C。当然槽误差有时也可能使热敏电阻看上去更合适。若这不能接受的话，可进行 2 件事中的一件。或者将槽控制到更能接受精度，或者在测量时必须有一个实际槽温的校正系数。为了校正温度，须使用 α 将误差换算至相当的电阻及根据需要对原始电阻读数进行加或减。

温度的校正可能具有其自身的缺陷。所有受控系统里的温度往往倾于在被称为系统带宽的狭窄温度范围内漂移或循环。它还可被称作“槽漂移”。在试图将此影响降至最低时，操作员可等待到温度刚好达到实际要求温度，然后迅速读取该电阻读数。只要温度的漂移在 1 或 2 分钟内不快于 0.1°C，这方法才是有效方法。

但是有 2 点须注意。第 1，独立温度指示器和试验中的热敏电阻要具有相同的构造、尺寸、材料和热质量，否则 2 个器件就不会相互追随或跟踪。较大或较重的器件会落在温度后面。第 2 点是温点漂移往往会多少呈以所要求试验温度为平均中心的正弦曲线。很明显，结果是当在实际要求温度读取电阻读数时，它还是个以最快速度变化的循环点。作为参考，若允许在 1 个方向上漂移至其全范围(至系统带宽的 1 个边缘)，则那将是最稳定的点。事实上过了一會兒，变化速度实际为零，但它处于移开所要求温度最远的点。

液体介质

若试验中的热敏电阻和独立温度传感器都装在保护外壳中，则可使用水。若热敏电阻是裸件或具有外露的引线，则必须使用不导电液体，如矿物溶剂或油。

在高温区域，有一些须小心之处。油能产生烟和雾，须有通风柜和动力排气系统。它们可能会产生火花和燃烧，所以应在低于闪点时使用或按制造厂的建议使用。大量热油会对人员造成危险，所以必须预防飞溅和溢出或使用固定装置或防溅护罩将危险降至最低程度。

硅油也可用作槽介质，但通常避免存在于电气设备周围。油似乎会蔓延或作为蒸汽进入如开关和继电器触点等不希望有它的地方。当触点动作时通常会出现微小飞弧，分解油留下硅在触点表面上。这产生不导电的白色残留物，妨碍触点闭合并产生神秘的设备故障。

独立温度传感器

温度槽必须装有精确的温度指示器。工厂在客户测试点校准的热敏电阻往是最好的传感器。铂测温电阻器(RTD)也可使用，但必须进行校准。热敏电阻具有较高 α 和较多可供选择的所需高电阻值时，使用起来比较方便。具有较高电阻值的热敏电阻将引线误差降至最低程度。热敏电阻的高也十分重要。热敏电阻的.1%电阻读数误差相当于仅.05°C 温度误差。反之，铂测温电阻器的.1%读数误差相当于 3°C 温度误差。热电偶通常不具备作为参考所要求的精度和稳定性。

自身热

最好给研究中的热敏电阻施加“高”试验电压以便具有最高的信号。容许电压量取决于损耗常数和试验温度时的电阻。

例：

α 为 4.4%/°C、损耗常数为 1 毫瓦/°C 的 10K 热敏电阻被施加 2 伏电压时因自身热而产生的温升是多少？

$$W = E^2/R \quad \text{或}$$

$$mW = E^2/K\Omega$$

$$mW = 2^2/10 = .4mW$$

$$\text{温升} = \text{功率} / \text{损耗常数}$$

$$= .4/1 = .4^\circ\text{C 上升}$$

对大多数应用场合来说，这个误差太大。减少电压至 1 伏仍产生.1°C 误差。再减小至.5 伏，仅产生.025°C 误差，这对于多数场合将可以接受。注意当电压减小时，相应温升迅速下降。

从通用数字万用表(DMM)供给热敏电阻的电流可能很大。有关想要的表的范围，参考 DMM 制造商技术规格说明书。

例如：

若 100 微安(100 μ A)通过上述同一个 10K 热敏电阻，功率耗散和产生的温升将是多少？

$$W = I^2 * R$$

$$W = (100 * 10^{-6})^2 * (10,000) = .1 \text{ mW}$$

.1mW 相当于是 1°C 温升。这太多，必须寻求替代办法。数字万用表是十分方便和精确的仪器，以致不会迅速放弃。根据特殊订单，某些仪器制造商已能将电流设定到较低水平。在大型热敏电阻或探头组件上，损耗常数处于高数量级，因万用表电流引起的温升或许可忽略不计。

玻璃温度计

典型实验室玻璃温度计对热敏电阻试验槽通常所需的精度不适合。具有 10 英寸刻度的 0°C 至 200°C 温度计每 .050 英寸或小于 1/16 英寸为 1 度标记。半度标记将是约 1/32 英寸，实际上无法更小。可读性和精度不会好于 .5°C 或 .25°C。延伸刻度的温度计改善了一点可读性，但仍不能提供所需的精度和准确度。

常用的实验室温度计通常有 3 英寸浸没而精确型全部浸没(至少浸没至读取位置)。现今为了尽量减少槽中温度梯度的影响，试验中的热敏电阻和温度计球必须靠近。若温度计球为 10 英寸左右或还低于槽表面，这无论如何显得不方便。玻璃温度计还需要定期校准检查，因为若暴露在其温度上限时，特别是持续了较长时间，玻璃可能“冷流”。

温度梯度

为了使读数精度和重复性更好，必须将温度梯度和波动降至最小程度。由此较容易的是指出不良热系统(如电热板上的大烧杯)的问题所在。最热点将是远离冷却器侧的底面中央。最冷部

位将是接近边缘的顶面。这里有蒸发冷却，对流冷却以及液面上方烧杯边缘的吸热。

添加电动机驱动的搅拌器是重大改进，但应是螺旋桨式的，剧烈地搅动迫使获得最好的混合。

下一个重大改进来自隔热侧面及添加隔热罩。这很直观，因为它大大减少了蒸发和对流冷却，从而减少了冷却点。需要减少热量补充的优点并不明显。加热器本质上提供了最大的温度梯度。若加热器和槽液之间温差大，只能注入所需的热。较小的热需要量致使加热器和液体之间的温差低。这转化成较低的热点和较低的梯度。

须小心地选择温度指示传感器的方位。温度曲线可在垂直和水平面绘制以确定最稳定区。在几何形状中心则不需要。最有可能是十分远离加热器，多少是在螺旋桨下游，离开侧壁并往往距离顶面 3 英寸左右。试验中的热敏电阻不应只在同一区中，而应处在同指示温度传感器一样的确切深度并尽可能靠近它。

当寻求几百分之 1° 的温度梯度时，本土的设计通常令人失望。在槽几何形状、加热器几何形状和方位、隔热、油循环及温度控制等方面有太多的微妙之处，这些最好留给专业供应商解决。

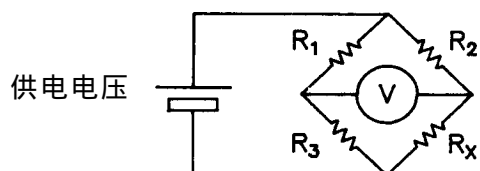
7. 应用时的注意事项

桥接电路

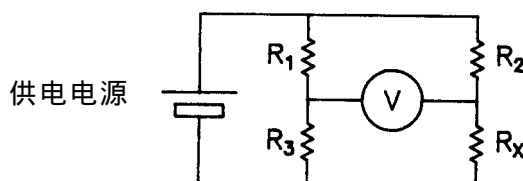
热敏电阻的阻值可用欧姆定律确定。须将热敏电阻接到电压源上，同时测定得到的电流。但是，电压必须是已知的精确值。同样，电流必须精确测定，在遇到极低值的情况下，电流测定将比较复杂。

较简单的方法是使用桥接电路，它完全对电压和电流的精确性没要求。它通过将未知热敏电阻的电阻和已知的标准电阻进行比较而实现的。标准电阻本身必须是精确的，但其作为物理项目，十分容易完成。实际做法是提供一套具有值如 1、2、3.....9; 10、20、30.....90; 100、200、300.....等的标准电阻。任何需要的标准值可按需要通过串联连接合适的“个位”电阻、“十位”电阻、“百位”电阻等立即得到。

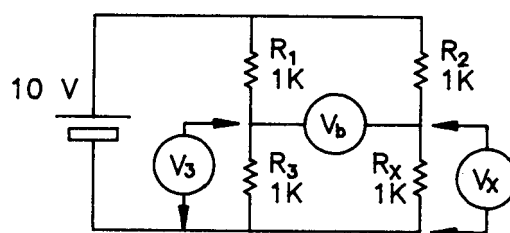
假定所需的任意值都能提供了，如何进行未知电阻的比较呢？传统电路是以早期实验者命名的惠斯通电桥，通常图形如下：



若重新画一下分析更容易，很明显 R_1 和 R_3 形成 1 个分压器， R_2 和 R_x 同样。

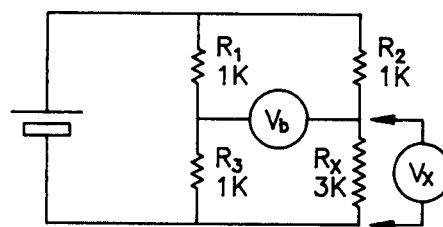


为了说明起见，假定了下列值：



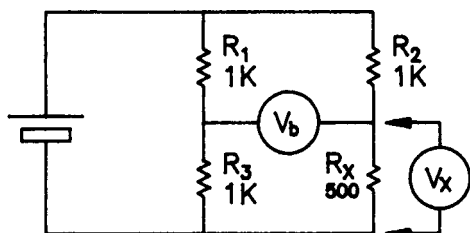
由于 R_1 和 R_3 相同，电压将平分， R_3 两端的电压表所示电压为 5 伏。同样 R_x 两端的电压为 5 伏。电压表 V_b 将读出两表之间的电压差值，在此情况下，是零和被称作是桥接 2 个分压器的桥接电压。

现在认为 R_x 等于 3K。



右分压器的总电阻为 4K，所以 3K 代表 3/4。 V_x 则是电源的 3/4 或 7.5 伏。右侧现在高于左侧， V_b 将读出 2.5 伏的差值。

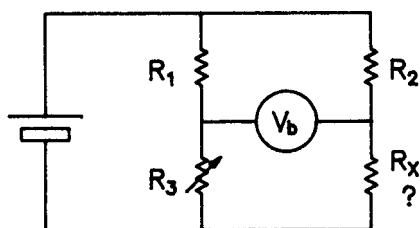
如此类推，若 R_X 等于 500 欧姆，电压是多少？



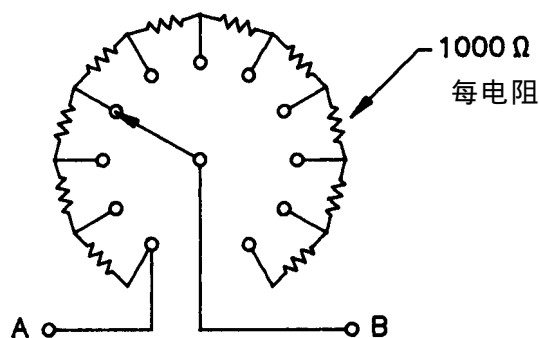
右分压器总电阻是 1500 欧姆，所以 500 欧姆是 $1/3$ 。10 伏电源的 $1/3$ 是 3.33 伏。电压表 V_b 将读出右侧 3.33 和左侧 5 之间的差值或 1.67 伏。

若 R_X 为 990 欧姆，情况如何？电压将非常接近但不真正是 5 伏， V_b 将读出该微小差值。当 R_3 等于 R_X 时，桥接(电压)表只读出零。

在正常使用时，未知电阻放在 R_X 位置。替换 R_3 的值直至 V_b 读出零。



R_3 通常是十进电阻箱形式。1000 欧姆的 10 个相同值的电阻排列在 10 位置旋转开关上，外加 1 个零欧姆的位置。



所示的开关设定在 3000 欧姆数值上。其它十进开关将具有 1000 欧姆、10 欧姆、1 欧姆、1 等数值，全部串联。将开关调节到 V_b 读出零。在该点， R_3 必须等于未知电阻，其值可简单从十进电阻箱开关设定值读出。

仪表本身不需要校准，作为唯一重要点是零或空值。事实上仪表通常称作零值检波器。

供电电压相对也不重要，因为无论实际电压是多少，都将达到零。唯一考虑事项是它须足够低，以便根据其耗损常数保持给未知电阻的功率在 .1 毫瓦范围。热敏电阻的自身热将产生误差。

2 台分压器不需要具有同样相关值。但比率必须相同。数学式采用：

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_X}$$

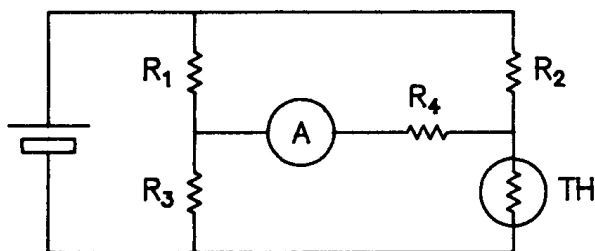
或者

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_X}$$

R_2 对 R_X 的比率通常保持接近 1，因为这是电桥工作最敏感区。

温度指示器电桥

不要将电桥的使用限制在零点。此处将考虑温度指示电路：

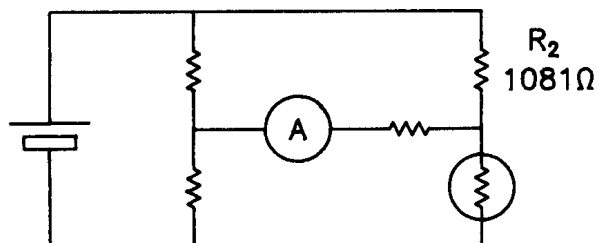


对于在指示范围冷端的热敏电阻，电桥将处于平衡，仪表将读出冷温度。当热敏电阻加热趋于范围高端时，其阻值将减小，产生很大的不平衡。当热敏电阻的阻值减小时，以度数校准的而不是伏或微安校准的仪表读数将增加。

电桥值确定可以直接方法进行。已知所需的范围是 0°C 至 100°C ，选择一种 3KUni-Curve® 热敏电阻(曲线 16，UL)。

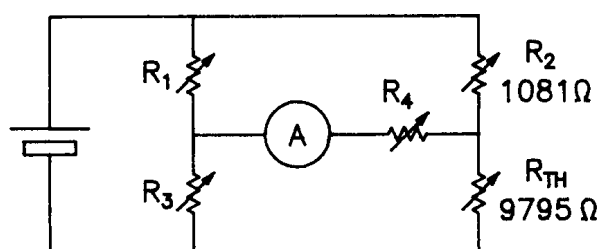
供参考：

温度	系数
0°C	9795Ω
25°C	3000Ω
50°C	1081Ω
100°C	204Ω



选择电阻 R_2 等于温度量程中点时的热敏电阻值或 1081 欧姆。考虑热敏电阻自身的热效应，选择供电电压在数伏范围内。可允许少量自身热，如 $.5^{\circ}\text{C}$ 或甚至 1°C ，因为可对它进行校准。仪表通常在 0 至 50 微安之间移动。其余电阻值可进行计算，但若用累试法进行可更容地看到其过程。

使用十进电阻箱 R_1 ， R_2 ， R_3 及 R_4 还有 1 个电阻调试好电路，以模拟热敏电阻。

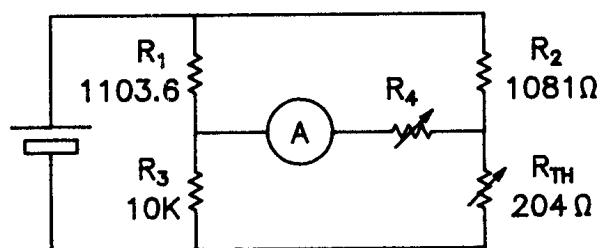


设定热敏电阻十进电阻箱至低温度值 9795。现在可为 R_1 和 R_3 设定任何方便值使其比例等于 R_2 比 R_{TH} 。

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{1081}{9795}$$

选 R_3 为舍入整数 10,000，它使 R_1 得出 1103.6。电桥现在以仪表读数零在低温端平衡。

热敏电阻十进电阻箱现在设定高温值 204 欧姆。



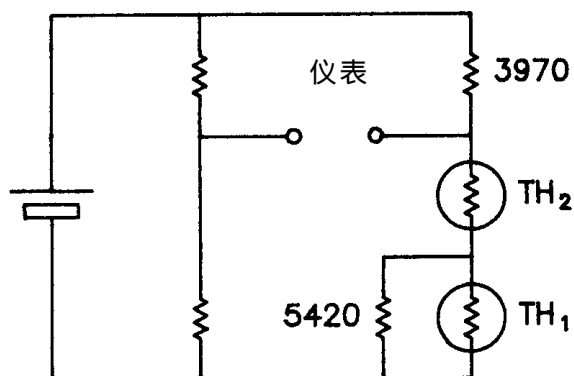
电桥此刻很不平衡调节十进电阻箱 R_4 让微安表读出相应于高温点 100°C 的全刻度。

此刻可设定 R_{th} 至相应于 50°C 的 1081 欧姆检查中心。若不在中心，可上、下调节 R_2 若干百分值，重新设定零和全刻度调节。这样反复进行直至进入中点。

为了产生仪表刻度，将 R_{th} 按 1° 增量设定至相应于各温度的电阻。记录微安读数，寄给仪表制造商以便产生按温度而非微安标准的仪表刻度。

对于小于 50°C 的狭窄范围，刻度将十分线性。在宽范围上，低端和高端会有些压缩，而中部区还显示有些扩张。

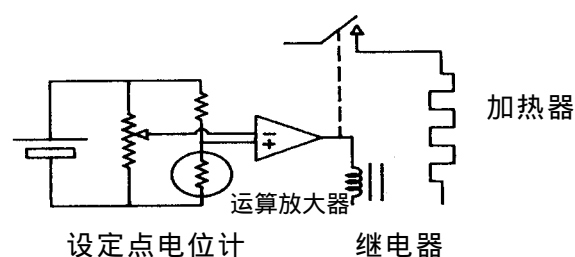
线性热敏电阻网络(LTN®)可现成取得类似上述电桥的优点。如其名称所示，在推荐温度范围响应是线性的。以下是设计供 0°C 至 100°C 线性输出、LTN®产品目录号 137-292ZFT-D01 产品值和位置。



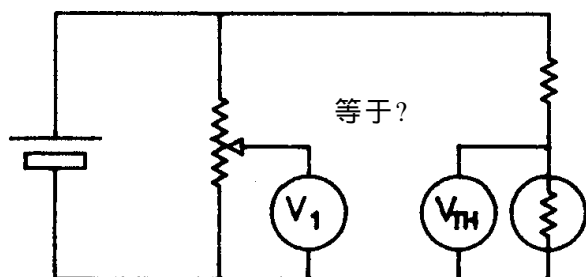
选择电阻 R_1 和 R_3 以便电桥平衡在 0°C 。线性方程表明采用 1 伏供电电压，在 0°C 可提供 862.9 毫伏，在 100°C 提供 323.0 毫伏。总变化是 539.9 毫伏。若电源增加至 1.852 伏，则变化将增加 1000 毫伏。这可便于用数字表在 1 伏设定值直接指示温度。

其它 2 产品目录 LTN®的 -5°C 至 45°C 和 -30°C 至 50°C 可按同样方式进行，除了电桥在 0°C 点调零，而非在极冷端 -5°C 或 -45°C ，数字表会为负温度读出负电压。

温度控制电桥

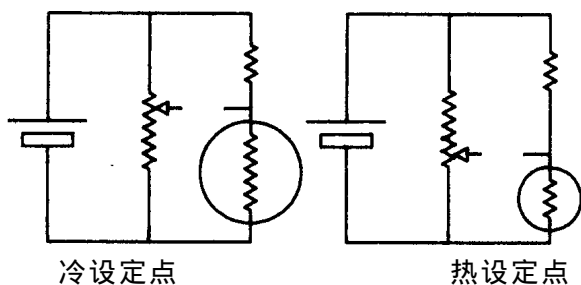


零检测表或指示表可用作比较器的动算放大器代替。



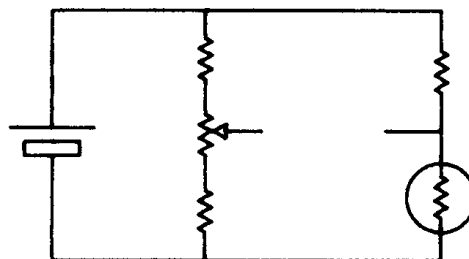
若热敏电阻太冷(高电阻), 则 V_{th} 将大于 V_1 及运算放大器会接通。继电器被激励给加热器供电。当系统变热时, 热敏电阻会逐步降低电阻促使电桥趋向平衡。当电桥通过零点时, 放大器会关断, 切断加热器。加热器将保持关断直至热敏电阻冷却及电桥反方向通过零点。在该点热量会重新施加, 继续围绕零点进行关断的接通切换。

电位器 R_1 的位置设定温度。



通常选择 R_2 的值等于控制范围中点的热敏电阻。电位计的值是任选的, 但往往在 1K 至 10K 范围。电位计上可提供温度校准盘。

须注意若电位计设定在其最大值, “完全往上调足”, 热敏电阻将会进入零平衡电桥, 加热器将保持接通, 不能操纵。因此, 在电位计每侧添加限流电阻器。



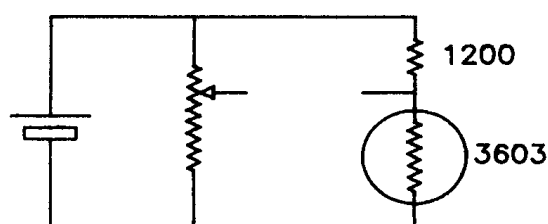
除了 5K 电位计, 1K 电位计可用 2 个 1K 电阻器代替。实际值可进行计算。

例如: 使用 10K、曲线 16, L 热敏电阻选择 50°C 至 110°C 极限范围的值。

作为参考:

温度	电阻
50°C	3603
80°C	1258
110°C	511

R_2 选择等于 1258 欧姆或 1200 欧姆的工业用值。



计算作为百分率的爱特计设定值:

$$\text{冷端} = \frac{3603}{3603+1200} \times 75.0\%$$

$$\text{热端} = \frac{511}{511+1200} \times 29.9\%$$

因此爱特计必须是 75.0%-29.9% 或 45.1%。任意给爱特计选 2K 值。现在可设立正比率计算冷端限流电阻:

$$\frac{45\%}{2000} = \frac{25\%}{R_C} = 1111\Omega$$

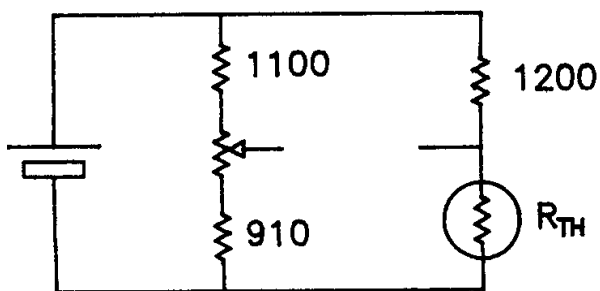
热端限流电阻:

$$\frac{45\%}{2000} = \frac{25\%}{R_h} = 1328\Omega$$

考虑公差, 选择工业用值 20% 或较低值。

910Ω用 1111

1100Ω用 1328



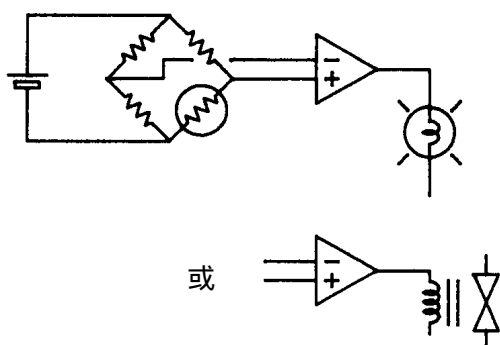
然后可检查最坏情况公差, 保证电路不“越出爱特计”。

8. 应用注意事项

液位探测

在探测液位高于或低于其安装位置状况方面热敏电阻可能十分有用。热敏电阻安装在液罐的所需液位。当处于液体上方的气体中时，它以足够的电力自然大幅升高其温度。由于在液体中损耗常数大于高于气体中，当液体上升浸没它时，热敏电阻温度会下降。

热敏电阻通常连接具有运算放大器(比较器)的桥接电路。放大器输出可启动报警指示灯或接通电磁阀重新建立所需液位。当液位上升时，热敏电阻会重新浸没在消耗自身热及升高电阻高于电桥零点。



以下各列举计算电桥值的一种可能方法并说明其原理:

1. 假定 1/2 英寸长玻璃热敏电阻传感器在 25°C 为 250 欧姆额定电阻，其电阻温度曲线 9, C。此器件的损耗常数在油中为 7mW/°C，在空气中 1mW/°C。数字代表会提高热敏电阻温度 1 摄氏度的功率(单位毫瓦)

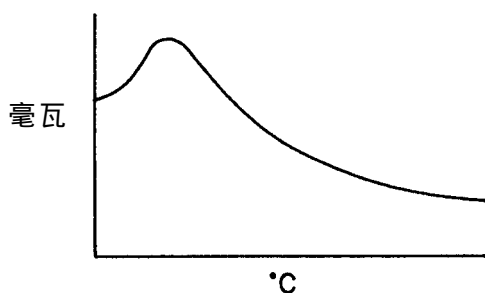
2. 规定液体温度为 25°C。
3. 假定处于液体上方空气或气体中热敏电阻浸升 50°C。此数字是任选的，但选得足够高以便在液体中冷却时提供大的温降及将液体温度本身变化影响降至最低。
4. 检查在 25°C 液体温度时热敏电阻的电阻，并设定热敏电阻串联电阻 (R_S) 至该值加 50% 左右。这保证峰值功率在低于液体温度的温度出现。250 欧姆的室温值 + 50% = 375 欧姆。选择 430 欧姆电阻作为普通工业用值。
5. 选择电桥供电电压 (E_{bs})，让电力供热敏电阻在空气中产生 30 至 50°C 温升。在此温度热敏电阻约 75 欧姆。12 伏电源将产生所需的下列功率:

$$\frac{E^2}{R} = \frac{\left\{ 12 * \left(\frac{75}{430+75} \right) \right\}^2}{75} = 42 \text{ mW}$$

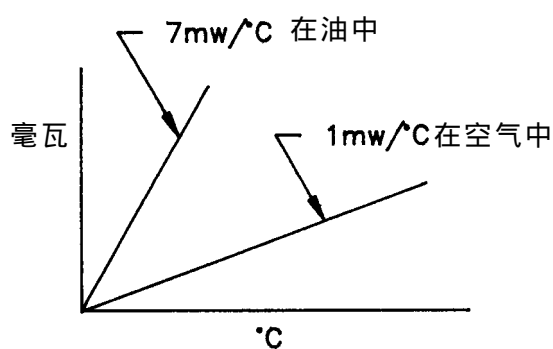
此功率乘以损耗常数 1mW/°C 等于 42°C 温升，它属于所需范围。若计算的温升太低，可增加供电电压。若温升太高，可增加串联电阻。

6 作为从 25°C 至有最高温度热敏电阻函数计算提供给热敏电阻的功率。在此情况下 25°C 加 42°C , 或 67°C 。须注意提供给热敏电阻的最大功率点出现在热敏电阻等于串联电阻时。高于此点, 功率下降, 表现为防止热敏电阻热散失温度的函数。

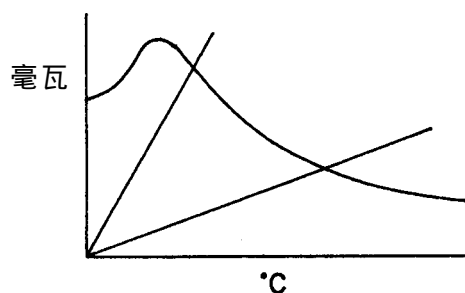
7 可不作为电阻函数, 而作为相应热敏电阻温度函数提供功率曲线图。



8 以下是要求取得自热温升对温度的功率曲线图。这是其原点在额定液温的直线, 斜率等于损耗常数。

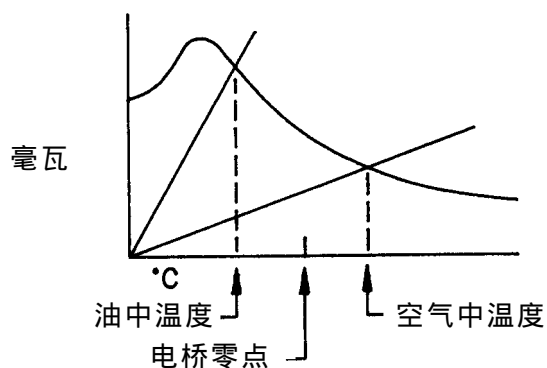


9 叠加 2 曲线图。

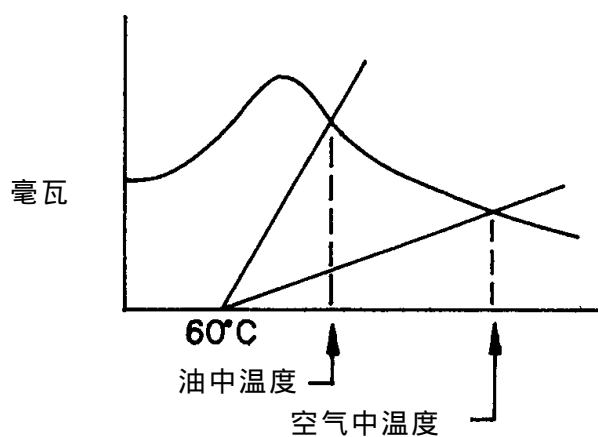


10 注意损耗直线与功率曲线的相交。低于(较冷)此点有大于所需的提供功率供取得该温度, 并且它会继续上升。高于(较热)此点, 提供不足功率, 于是它会冷却。相交处是稳定点, 降至水平轴的线将是实际取得温度。热敏电阻露出或浸入液体时会从一稳定点跳跃至另一稳定点。参阅第 11 小节。

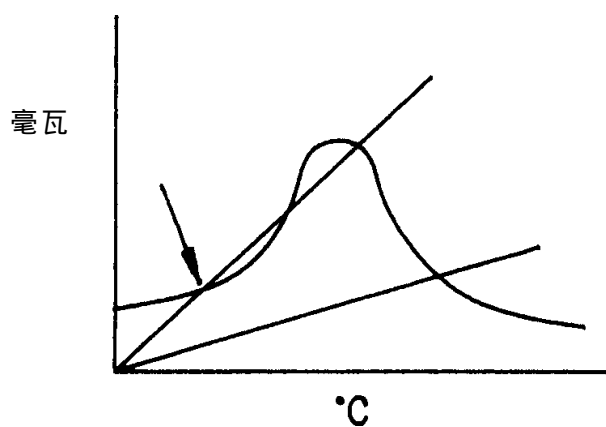
11 设定左半电桥的中心, 提供两者中间的零点。查找相应此中点温度的电阻。左半电阻的比率将等于中点热敏电阻上的串联电阻。



- 12 若液体温度不是 25°C 而是例如 60°C ,产生的图可能如下:



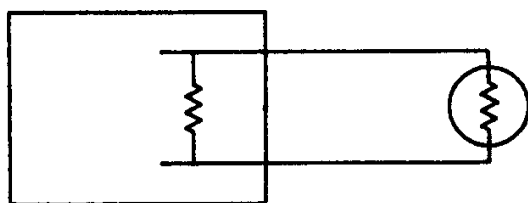
- 13 可能的问题。若供电电压太低或串联电阻太高,可能在较低温度遇上第二稳定点。结果是热敏电阻将不正常自热。



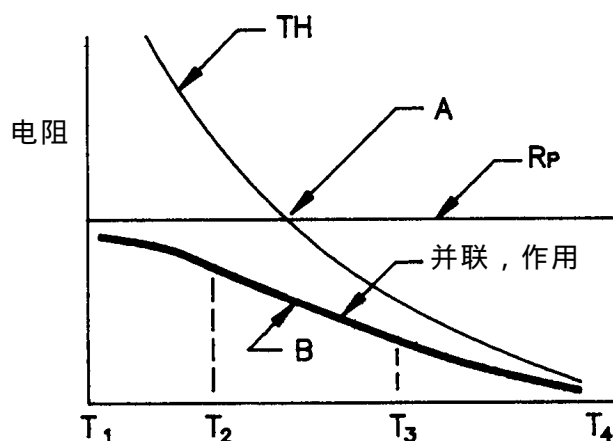
9. 应用注意事项

线性化

热敏电阻常用于主要关心在所需温度电桥平衡的桥接电路中。当用于温度指示高于 50°C 或 100°C 时,要求更加注意非线性。一简单而有效的处理是使用并联电阻。它具有将热敏电阻曲线冷端“下弯”的作用。



热敏电阻电路



图表示热敏电阻本身(TH)的宽曲线。并联电阻画成水平直线,因为它不随温度变化。在每一温度的并联计算作积比和。

$$R_{\text{comb}} = \frac{(R_{\text{th}} * R_p)}{(R_{\text{th}} + R_p)}$$

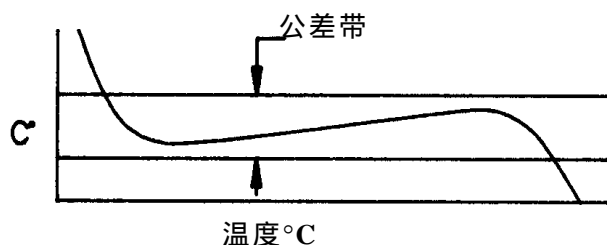
参照图,须注意下列各点:

- 在任何并联中,较低值具有最大影响。当 2 个电阻相同时,结果是 1 个值的 50%。
- 在冷端(T_1 至 T_2),热敏电阻相对高,并联电阻值起主要作用。通常,当它变冷时,并联值变得平坦并渐近于该电阻。
- 在热端(T_3 至 T_4),热敏电阻相对于该电阻值较低,因此,热敏电阻起主要作用。
- 在中心(T_2 至 T_3),有十分线性区。
- 任何微小非线性趋向于类似很浅的“S”曲线,屈折点接近中间“B”点。

热敏电阻通常受电子接口(界面)和其最适合热敏电阻范围需要支配。若随着要求的线性公差提供热敏电阻,则选择等于在中间温度热敏电阻的并联电阻。最好由这里将资料放入计算机电子数据表。以下各栏标题可能最有帮助:

温度(每°C)
热敏电阻的电阻
要求电阻
实际并联电阻
电阻误差
温度误差

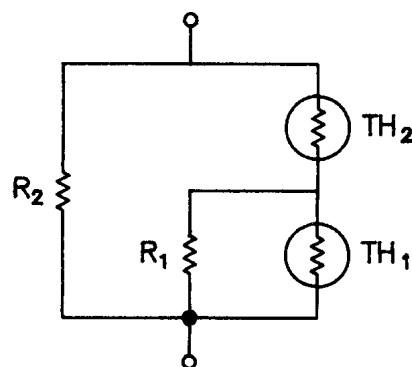
数据更换时，某些电子数据表可用更新数据更新嵌入图。若温度偏差作为温度的函数作图，可取得透彻理解。以下是典型曲线。



现在可看到熟悉的“S”形，但更重要须注意在正常温度量程外误差增加十分大。在冷端的这种区域，并联电阻低于所需，它表明比实际热。超过正常上限，逆转成为现实。并联电阻高于所需，它表明比实际冷。

在热敏电阻和并联电阻的全公差极限内须重复。热敏电阻通常是具有公差。2, .5 或 1.0°C 的 Uni-Curve®型；并联电阻通常是 1%工业用值。使用电子数据表的优点是若曲线不属于要求极限，很容易尝试新的并联电阻并随即看到作用。还可观察公差，迅速将值变成最配合公差带内。最好使用提供 1%增量的工业有标准电阻。

可期望 25°C 至 40°C 的有用温度范围。若需要更宽的量程，可串联使用这样 2 个热敏电阻-电阻器并联以便达到 100°C 范围，电子数据表的协助在此也很有用，虽然 4 个元件的并联看来似乎无穷尽。因此可从 Fenwal 产品目录提供若干标准型。它们称作线性热敏电阻网络或 LTN®。标准排列如下：



例如：137-292ZFT-D01 的电阻是 3425.66 欧姆，斜率为 -21.4364 欧姆/°C。作为线性的非常公式，可用 $Y=mx+b$ 的形式。使用常用热敏电阻符号，形式成为：

$$R_Z = mT + b$$

这里： R_Z 是总电阻

m 是斜率，单位欧姆/°C

T 是摄氏温度

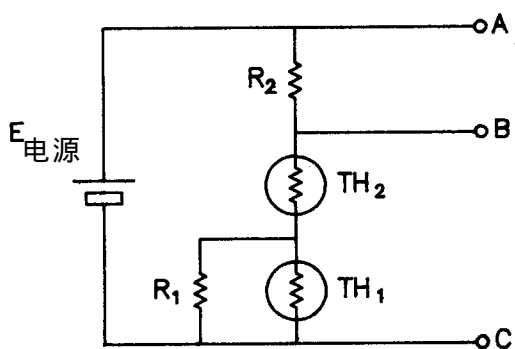
b 是在 0°C 的电阻

作为举例，要求取得 70°C 的电阻，公式变成：

$$\begin{aligned} R_Z &= -21.4364 \times 70 + 3425.66 \\ &= 1925.32 \text{ 欧姆} \end{aligned}$$

若此 LTN®现在放入恒流环路(例如.2MA) ,产生的电压将与温度成线性关系。

同样的器件可以略微重新排列用于 1 或 2VDC 范围的恒压电源。



从端子 B 到 C 的电压将随温度线性增加。取端子 A 和 B 的电压会提供随温度线性增加的电压。在此情况下，LTN®会反过来保持 R_Z 和端子 A 与电源低侧一样。

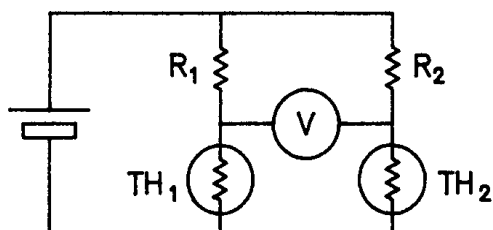
可看到用非常简单的办法，可让使用温度范围上的电阻温度曲率变得十分线性。

10. 应用注意事项

气体流量测定

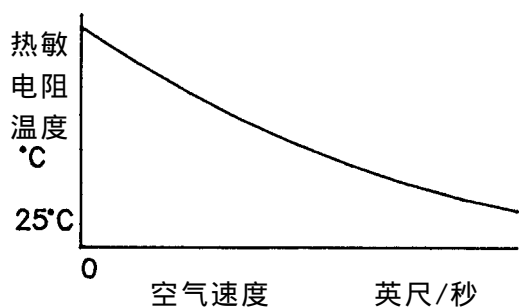
热敏电阻最常用于功率保持在最小值的温度测定和控制用途。但是有意采用 100 度左右自热的热敏电阻可用作气体流量探测器。当气体速度增加时，热敏电阻会冷却产生较高电阻。电阻的变化容易在桥电路中进行探测。

热敏电阻用作惠斯通电桥一元件。



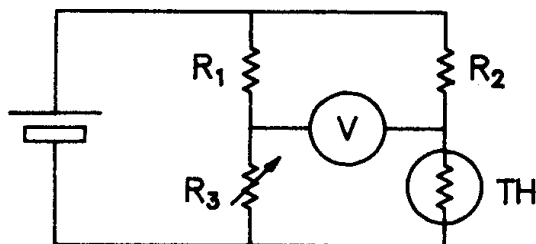
在仪表静态条件下，电阻 R_3 调节至零。当热敏电阻因运动气体冷却时，电桥会变得不平衡。速度越高则越冷，电桥越不平衡。变化由伏特表读取，可校准至相应单位，如英尺或米/秒。

冷却量对速度的变化类似下列曲线：



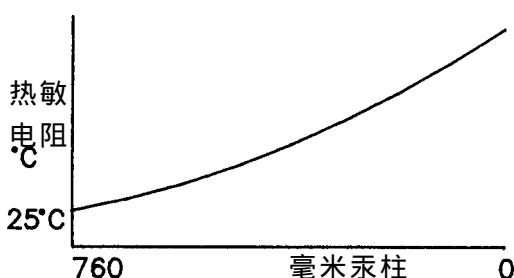
曲线接近线性部分最接近通常使用的原点。

热敏电阻还会受到实际气体温度的影响。补偿热敏电阻 TH_1 通常加入供此用途。



补偿热敏电阻设置看上去在同一温度同一气体中，但是在停滞在终端腔中。2 个热敏电阻会相互追踪，在气体温度变化是保持电桥平衡。补偿热敏电阻还称作基准热敏电阻。

对于真空测定可使用类似安排。传感热敏电阻放置在真空腔或相关真空管道中。补偿热敏电阻保持在大气压力外但屏蔽开杂散气流。当 2 个热敏电阻处于大气压力下时电桥平衡。当传感热敏电阻上抽真空时，它周围较少空气消耗热量，其温度将上升。



温度上升的热敏电阻会呈现电阻减少。电桥会变得不平衡，伏特表会指向上部刻度。仪表可校准在所需单位如英寸或毫米汞柱。

同样的安排还可用于气体色谱法，这里不同气体改变不同量的热敏电阻自热温度。

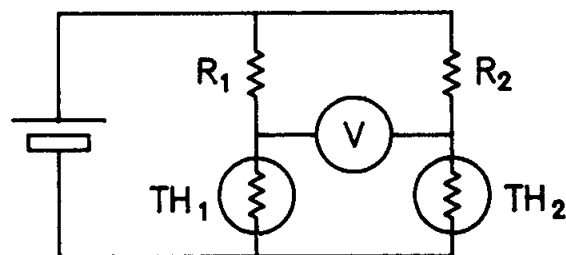
为了让热敏电阻提供理想灵敏度，尽量减少环境温度影响，自热温度上升需要十分高。温度常常上升 100°C 至 200°C。若将热敏电阻直接接通恒压电源，热敏电阻会变热。当它变热时，电阻减少，从而流过更多电流。增加的功率会造成更热和电阻下降。不久出现热击穿的损坏结果。

有两种常用方法限制功率和增益控制。第 1 是使用恒流源。功率行于电流平方乘电阻。由于电流平方 I^2 是常数，当电阻因温度而下降时，功率会下降。第 2 种方法是使用带有串联电阻的恒压。以下用实例对后者详细说明。

假定采用下列数据：

环境温度	25°C
气体	空气
压力	1 大气压
热敏电阻	8K 珠粒，曲线 11，E， p/n115-802EDJ-80
损耗常数	.16mW/°C，在空气中
自热	125°C 温升

桥接电路



1. 设定 R_1 和 R_2 等于略小于一半自热温升温度时热敏电阻的电阻。

$$125^\circ\text{C 的 } 1/2 = 62.5^\circ\text{C}$$

$$62.5^\circ + 25^\circ\text{C} = 87.5^\circ\text{C}$$

选择 80°C

在 80°C 的电阻 = 1275Ω

选择 1200Ω 电阻器

2. 计算实际自热温度

$$25^\circ\text{C} + 125^\circ\text{C 温升} = 150^\circ\text{C}$$

3. 使用电阻温度曲线 11，E，查找在 150°C 自热温度热敏电阻的电阻：

$$234.6\Omega$$

4. 计算产生需要的 125°C 温升所需功率

$$.16\text{mW}/^\circ\text{C} \times 125^\circ\text{C} = 20 \text{ 毫瓦}$$

5. 计算热敏电阻等于 234.6 欧姆及串联电阻等于 1200 欧姆时产生 20 毫瓦所需电阻电压。

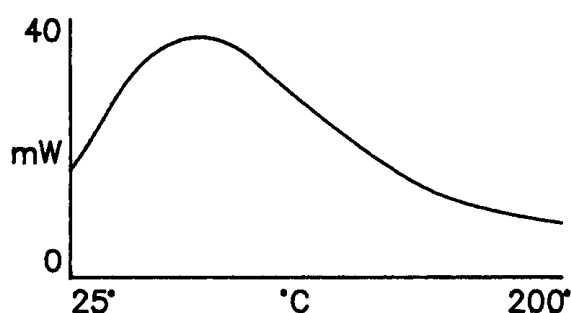
$$W = \frac{E^2}{R}$$

$$.02 = \frac{\left\{ E_s \left(\frac{234.6}{1200 + 234.6} \right) \right\}^2}{234.6}$$

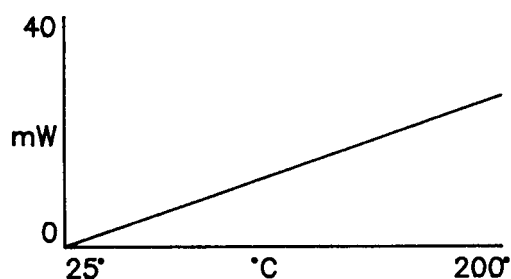
$$E_s(\text{供电电压}) = 13.25 \text{ 伏}$$

6. 作为高于 150°C 然后是 200°C 自热温度、从 25°C 至 50°C 热敏电阻函数，计算提供给热敏电阻功率。注意最大功率点出现在热敏电阻等于串联电阻(1200)时。高于此类，功率作为温度函数下降，防止热敏电阻热击穿。

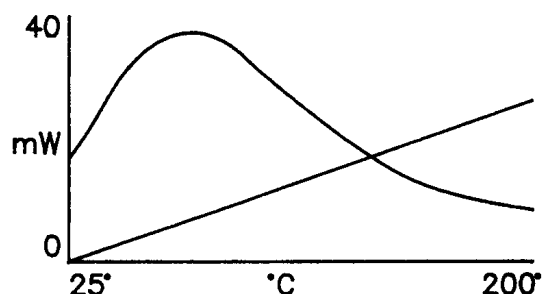
7. 不作为电阻函数，而作为相应热敏电阻温度函数进行提供功率的作图。



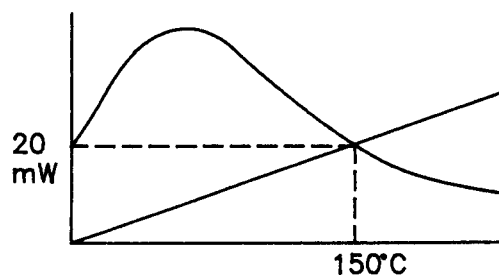
8. 要求取得自热温升对温度变化的功率图。这是原点在 25°C 的直线，斜率等于损耗常数 $.16\text{mW}/^{\circ}\text{C}$ 。



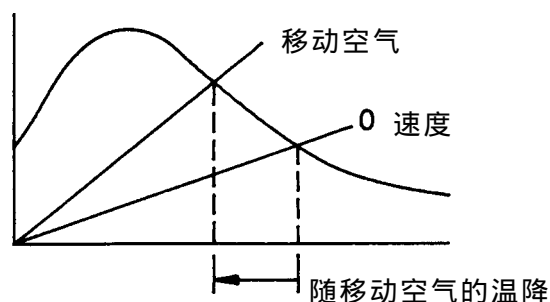
9. 叠加此 2 图



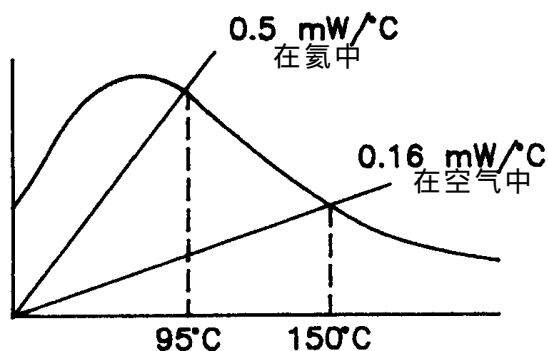
10. 注意曲线相交点。此点在 150°C 和 20 毫瓦。低于此点(较冷)，提供比取得该温度所需更大功率，于是温度继续上升。高于此点(较热)，提供不是功率，它将会冷却。曲线相交点是预示的稳定点。



11a. 若此刻空气速度增加至某稳定值，自热热敏电阻温度会下降。增加的空气速度影响增加损耗常数。



- 11b. 较轻的气体如氦比空气更好吸收和散发热。同一热敏电阻在氦中具有损耗常数 .5 毫瓦/ $^{\circ}\text{C}$ 。当此曲线在同一图上画出时，相交点表示新温度。注意它代表在 55°C 的温降。各种不同分子量气体将产生不同损耗常数和显示不同温度。这是气体分析开发的原理之一。



12. 在宽范围上通常缺少充足的损耗常数数据点。但若在 2 极端和有关范围的中点计算损耗常数，则有关灵敏度和性能可作出某种非常真实的预测。它将有助于将这些计算放入具有制图能力的电子数据表程序，作为提供工作数字模型的途径。

- 11C. 若气体类型如空气保持不变，其压力下降，损耗常数也下降。在较低压力(较高真空)下，相同量功率会产生较高自热温度。热敏电阻温度的此变化象征真空状态。

