

# 机械工程手册

## 第 52 篇 热工测量与控制技术

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册 编辑委员会



机械工业出版社

本篇主要介绍热工测量中温度、压力、流量、物位、显示、调节仪表和执行器，并着重介绍了冲天炉、加热炉及冷热加工的测量和控制。适用于从事热工测量技术的人员参考使用。

## 机 械 工 程 手 册

### 第52篇 热工测量与控制技术

(试 用 本)

上海工业自动化仪表研究所 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $8 \frac{1}{2}$  · 字数 231 千字

1980年9月北京第一版·1980年9月北京第一次印刷

印数 00,001—21,200 · 定价0.66元

\*

统一书号: 15033 · 4660

## 编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来, 机械工业在毛主席的革命路线指引下, 贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针, 取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验, 同时采用国外先进技术, 加强机械工业科学技术的基础建设, 适应实现“四个现代化”的需要, 我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用, 也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书, 着重介绍各专业的理论基础, 常用计算公式, 数据、资料, 关键问题以及发展趋向。在编写中, 力求做到立足全局, 勾划概貌, 反映共性, 突出重点。在内容和表达方式上, 力求做到深入浅出, 简明扼要, 直观易懂, 归类便查。读者在综合研究和处理技术问题, 《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成, 构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分, 共七十九篇; 《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分, 共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本篇是《机械工程手册》第52篇，由上海工业自动化仪表研究所主编，参加编写的有第一汽车制造厂、上海机床厂、一机部铸造研究所、沈阳重型机器厂。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册  
电机工程手册 编辑委员会编辑组

# 目 录

编辑说明

常用符号表

## 第1章 概 述

- 1 热工测量与控制的意义.....52-1
  - 1.1 内容与作用 .....52-1
  - 1.2 应用与发展 .....52-1
- 2 测量方法.....52-2
- 3 测量误差.....52-2
  - 3.1 误差的种类 .....52-2
  - 3.2 误差的表示方法 .....52-3
- 4 测量和控制仪表的分类.....52-3
- 5 仪表的质量指标.....52-3

## 第2章 温度测量

- 1 温度和温度仪表.....52-4
  - 1.1 温度和温标 .....52-4
  - 1.2 测量温度的方法 .....52-4
  - 1.3 温度仪表测温的范围 .....52-5
  - 1.4 温度仪表的分类与性能 .....52-6
- 2 双金属温度计.....52-7
  - 2.1 工作原理 .....52-7
  - 2.2 分类和用途 .....52-7
- 3 压力式温度计.....52-7
- 4 玻璃液体温度计.....52-8
- 5 热电阻.....52-8
  - 5.1 分类和工作原理 .....52-8
  - 5.2 金属导体热电阻 .....52-8
  - 5.3 半导体热敏电阻 .....52-9
  - 5.4 热电阻的安装 .....52-9
- 6 热电偶 .....52-10
  - 6.1 工作原理.....52-10
  - 6.2 构造分类.....52-10
  - 6.3 主要技术性能和用途.....52-11
  - 6.4 保护管材料.....52-12
  - 6.5 补偿导线.....52-13

- 6.6 使用注意事项.....52-13
- 7 光学高温计 .....52-16
  - 7.1 工作原理.....52-16
  - 7.2 主要技术性能.....52-16
  - 7.3 使用注意事项.....52-17
- 8 辐射温度计 .....52-17
  - 8.1 工作原理.....52-17
  - 8.2 结构与分类.....52-18
  - 8.3 使用注意事项.....52-18
- 9 部分辐射温度计 .....52-19
  - 9.1 工作原理.....52-19
  - 9.2 主要技术性能.....52-20
- 10 比色温度计.....52-20
  - 10.1 工作原理 .....52-20
  - 10.2 主要技术性能 .....52-20

## 第3章 压力测量

- 1 压力与压力仪表 .....52-21
  - 1.1 压力的概念.....52-21
  - 1.2 压力的单位.....52-21
  - 1.3 压力仪表的分类与性能.....52-22
- 2 液柱式压力计 .....52-23
  - 2.1 结构和性能.....52-23
  - 2.2 常用工作液.....52-23
  - 2.3 安装使用注意事项.....52-24
- 3 活塞式压力计 .....52-24
  - 3.1 工作原理.....52-24
  - 3.2 结构与分类.....52-24
  - 3.3 安装使用注意事项.....52-24
- 4 弹性式压力表 .....52-25
  - 4.1 工作原理.....52-25
  - 4.2 主要技术性能.....52-25
  - 4.3 安装使用注意事项.....52-27
- 5 压力传感器 .....52-27
  - 5.1 主要技术性能.....52-27
  - 5.2 电位器式压力传感器.....52-27
  - 5.3 应变式压力传感器.....52-27

## 52-VI 目 录

|              |       |
|--------------|-------|
| 5.4 压阻式压力传感器 | 52-28 |
| 5.5 霍尔式压力传感器 | 52-28 |
| 5.6 电感式压力传感器 | 52-28 |
| 5.7 振频式压力传感器 | 52-28 |
| 5.8 压电式压力传感器 | 52-29 |
| 5.9 电容式压力传感器 | 52-29 |

### 第4章 流量测量

|                |       |
|----------------|-------|
| 1 流量和流量仪表      | 52-29 |
| 1.1 流量、平均流量和总量 | 52-29 |
| 1.2 管流和雷诺数     | 52-30 |
| 1.3 流量仪表的分类与性能 | 52-30 |
| 2 节流装置         | 52-30 |
| 2.1 工作原理       | 52-30 |
| 2.2 结构型式       | 52-31 |
| 2.3 选用原则       | 52-32 |
| 2.4 安装使用注意事项   | 52-34 |
| 2.5 测量误差       | 52-35 |
| 2.6 特殊情况下的流量测量 | 52-35 |
| 3 差压计          | 52-35 |
| 3.1 分类         | 52-36 |
| 3.2 环称差压计      | 52-36 |
| 3.3 差动膜片差压计    | 52-37 |
| 3.4 双波纹管差压计    | 52-37 |
| 4 转子流量计        | 52-38 |
| 4.1 工作原理       | 52-38 |
| 4.2 基本结构       | 52-38 |
| 4.3 主要技术性能     | 52-39 |
| 4.4 特点         | 52-39 |
| 4.5 安装使用注意事项   | 52-39 |
| 4.6 刻度值的换算     | 52-39 |
| 5 速度式流量计       | 52-40 |
| 5.1 水表         | 52-40 |
| 5.2 涡轮流量计      | 52-41 |
| 6 容积式流量计       | 52-42 |
| 6.1 椭圆齿轮流量计    | 52-42 |
| 6.2 腰轮式流量计     | 52-42 |
| 6.3 圆盘流量计      | 52-42 |
| 6.4 湿式气体流量计    | 52-42 |
| 7 电磁流量计        | 52-43 |
| 7.1 工作原理       | 52-43 |

|              |       |
|--------------|-------|
| 7.2 主要技术性能   | 52-44 |
| 7.3 特点       | 52-44 |
| 8 靶式流量计      | 52-44 |
| 8.1 工作原理     | 52-44 |
| 8.2 气动靶式流量计  | 52-44 |
| 8.3 电动靶式流量计  | 52-44 |
| 8.4 主要技术性能   | 52-45 |
| 9 旋进型旋涡流量计   | 52-45 |
| 9.1 工作原理     | 52-45 |
| 9.2 主要技术性能   | 52-45 |
| 9.3 特点       | 52-45 |
| 10 其他流量计     | 52-46 |
| 10.1 热式流量计   | 52-46 |
| 10.2 电导率式流量计 | 52-46 |
| 10.3 激光流速计   | 52-47 |
| 10.4 固体颗粒流量计 | 52-47 |
| 10.5 超声波流量计  | 52-47 |
| 10.6 动压测定管   | 52-47 |

### 第5章 物位测量

|              |       |
|--------------|-------|
| 1 直读式液位仪表    | 52-48 |
| 2 浮力式液位仪表    | 52-51 |
| 3 差压式物位仪表    | 52-51 |
| 3.1 原理和特点    | 52-51 |
| 3.2 安装使用注意事项 | 52-52 |
| 4 电学式物位仪表    | 52-52 |
| 4.1 电阻式物位仪表  | 52-52 |
| 4.2 电容式物位仪表  | 52-53 |
| 4.3 电感式物位仪表  | 52-54 |
| 5 声波式物位仪表    | 52-54 |
| 6 核辐射式物位仪表   | 52-54 |
| 7 其他物位仪表     | 52-56 |
| 7.1 射流式液位仪表  | 52-56 |
| 7.2 光学式物位仪表  | 52-56 |
| 7.3 微波式物位仪表  | 52-56 |
| 7.4 重锤式料位仪表  | 52-57 |

### 第6章 显示、调节仪表和执行器

|            |       |
|------------|-------|
| 1 显示仪表     | 52-57 |
| 1.1 动圈指示仪表 | 52-57 |

|                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| 1.2 自动平衡显示仪表.....52-60  | 1.1 一般温度的测量方法.....52-97         |
| 1.3 数字显示仪表.....52-64    | 1.2 盐浴炉温度的测量方法.....52-97        |
| 1.4 图象字符显示器.....52-64   | 1.3 高频感应加热工件温度的测量方法.....52-97   |
| 2 调节仪表.....52-66        | 1.4 离子氮化炉热处理工件温度的测量方法.....52-98 |
| 2.1 自力式调节阀.....52-66    | 2 压力、流量和气体成分的测量方法.....52-98     |
| 2.2 气动基地式调节仪表.....52-67 | 2.1 压力的测量.....52-98             |
| 2.3 气动单元组合仪表.....52-67  | 2.2 流量的测量.....52-99             |
| 2.4 简易电动调节仪表.....52-68  | 2.3 气体成分的测量.....52-99           |
| 2.5 电动单元组合仪表.....52-69  | 3 自动调节系统.....52-99              |
| 2.6 组装式电子控制装置.....52-72 | 3.1 电加热炉温度调节系统.....52-99        |
| 3 执行器.....52-72         | 3.2 煤气加热炉自动调节系统.....52-101      |
| 3.1 气动执行器.....52-73     | 3.3 天然气加热炉自动调节系统.....52-102     |
| 3.2 电动执行器.....52-75     | 3.4 燃料油加热炉自动调节系统.....52-104     |

## 第7章 仪表、调节系统的选用 和调节器参数整定

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| 1 选用仪表的方法.....52-77           | 4 仪表的安装.....52-106 |
| 1.1 温度测量仪表的选用.....52-77       |                    |
| 1.2 压力测量仪表的选用.....52-78       |                    |
| 1.3 流量测量仪表的选用.....52-79       |                    |
| 1.4 物位测量仪表的选用.....52-80       |                    |
| 1.5 显示仪表的选用.....52-81         |                    |
| 1.6 调节仪表的选用.....52-82         |                    |
| 1.7 执行器的选用.....52-83          |                    |
| 2 调节阀的选择和计算.....52-84         |                    |
| 2.1 流量特性的选择.....52-84         |                    |
| 2.2 流通能力的计算.....52-86         |                    |
| 2.3 调节阀口径的计算.....52-87        |                    |
| 2.4 气关、气开的选择.....52-87        |                    |
| 3 自动调节系统的组成及其选择方法.....52-88   |                    |
| 3.1 自动调节系统的组成.....52-88       |                    |
| 3.2 常用调节规律.....52-88          |                    |
| 3.3 复杂调节系统.....52-90          |                    |
| 3.4 调节系统的选择.....52-91         |                    |
| 4 调节器参数的工程整定.....52-92        |                    |
| 4.1 单参数单回路调节系统的工程整定.....52-93 |                    |
| 4.2 串级调节系统的工程整定.....52-96     |                    |

## 第8章 加热炉的测量和控制

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| 1 温度的测量方法.....52-97 | 1.1 一般温度的测量方法.....52-97 |
|---------------------|-------------------------|

## 第9章 冲天炉的测量与控制

|                                    |
|------------------------------------|
| 1 熔炼过程中需要检测和控制参数.....52-107        |
| 2 熔炼过程参数的检测方法.....52-107           |
| 2.1 炉料重量.....52-107                |
| 2.2 炉内料位.....52-108                |
| 2.3 加料批数.....52-108                |
| 2.4 送风压力和风量.....52-111             |
| 3 熔炼过程的自动控制.....52-113             |
| 3.1 风量的自动控制.....52-113             |
| 3.2 送风湿度的控制.....52-114             |
| 3.3 热风冲天炉的控制.....52-114            |
| 3.4 铁水温度的自动控制.....52-114           |
| 3.5 冲天炉的自动配料、加料、计数的集中控制.....52-116 |

## 第10章 冷热加工的测量和控制

|                            |
|----------------------------|
| 1 高温熔融金属液温度的测量.....52-117  |
| 2 金属凝固过程温度场的测定.....52-119  |
| 3 表面温度的测量.....52-120       |
| 3.1 热电偶测量表面温度.....52-120   |
| 3.2 运动物体表面温度的测量.....52-120 |
| 4 锻件的测量和控制.....52-121      |

|                       |        |                       |        |
|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| 4.1 锻件尺寸的测量和控制 .....  | 52-122 | 5.2 恒温室控制 .....       | 52-123 |
| 4.2 锻件温度的测量和控制 .....  | 52-122 | 6 木材干燥窑的温度与湿度调节 ..... | 52-125 |
| 5 恒温控制 .....          | 52-122 | 参考文献 .....            | 52-125 |
| 5.1 精密机床的局部恒温控制 ..... | 52-122 |                       |        |

## 常 用 符 号 表

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| $a$ ——真实值                      | $R$ ——可调比                         |
| $A$ ——面积、最大偏差                  | $Re_d$ ——雷诺数                      |
| $B$ ——磁感应强度                    | $S$ ——阻力系数、灵敏度                    |
| $BA$ ——铂热电阻分度号                 | $t$ ——时间                          |
| $c$ ——余差                       | $t_{88}$ ——1968年国际实用摄氏温标          |
| $C$ ——摄氏温标、比例系数、流通能力           | $T$ ——时间常数、绝对温度                   |
| $CK$ ——铜-康铜热电偶分度号              | $T_d$ ——微分时间                      |
| $D$ ——直径                       | $T_s$ ——亮度温度                      |
| $e$ ——偏差                       | $T_i$ ——积分时间                      |
| $EA$ ——镍铬-考铜热电偶分度号             | $T_{88}$ ——1968年国际实用温标            |
| $EU$ ——镍铬-镍硅热电偶分度号             | $V$ ——气体流速、流体体积、体积总数              |
| $f$ ——扰动                       | $W$ ——液体流速                        |
| $F$ ——华氏温标                     | $X$ ——测量值                         |
| $g$ ——重力加速度                    | $Y$ ——被调参数                        |
| $G$ ——铜热电阻分度号、重量、重量流量          | $Z$ ——压缩因数                        |
| $H$ ——物位                       | $\alpha$ ——流量系数                   |
| $I$ ——电流                       | $\gamma$ ——重度、相对误差                |
| $I_g$ ——控制电流                   | $\gamma_0$ ——诱导相对误差               |
| $K$ ——绝对温度、精度等级、校正系数、导热系数、放大系数 | $\delta$ ——比例度                    |
| $l$ ——长度                       | $\delta_K$ ——临界比例度                |
| $L_e$ ——辐射能量                   | $\varepsilon$ ——介电常数              |
| $LB$ ——铂铑-铂热电偶分度号              | $\varepsilon_T$ ——全辐射率            |
| $LL$ ——铂铑-铂铑热电偶分度号             | $\varepsilon_{\lambda T}$ ——光谱辐射率 |
| $m$ ——调节器输出                    | $\lambda$ ——光谱波长                  |
| $M$ ——质量流量                     | $\rho$ ——电阻率                      |
| $n$ ——转速                       | $\tau$ ——滞后时间                     |
| $P$ ——压力                       | $\tau_0$ ——纯滞后                    |
| $\Delta P$ ——压差                | $\tau_c$ ——容量滞后                   |
| $q$ ——功率                       | $\psi$ ——衰减度、粘度修正系数               |
| $Q$ ——瞬时流量、体积流量                | $D$ ——微分调节规律                      |
| $\bar{Q}$ ——平均流量               | $I$ ——积分调节规律                      |
|                                | $P$ ——比例调节规律                      |

# 第1章 概述

## 1 热工测量与控制的意义

### 1.1 内容与作用

在机械工业生产过程中，热工测量与控制技术主要是指有关物理量和化学量，如温度、压力、流量、物位、成分等参数值的测量仪表和控制方法。

通过测量和控制，可以按照工艺规程、质量标准、安全技术和经济核算的要求，了解材料、工件、设备或工作条件的状态以及有关的变化，其目的是保证产品的质量、数量和计划进度，保持设备的正常安全运行，降低生产成本，改善工作环境和劳动卫生条件。

自动控制一般是由测量、显示、调节、执行等部分和调节对象所组成。图 52·1-1 是一个燃油加热炉温度调节系统示意图，用调节油量的方法，以达到控制温度的目的。检测元件将炉内的温度数值感受、传送到变送器、显示仪表和调节仪表；调节仪表把测量值与给定值进行比较，发出调节信号；执行器接受来自调节仪表的信号，改变燃油的流量，

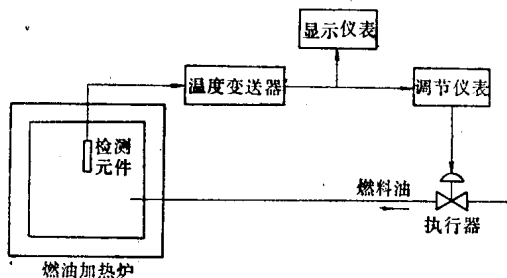


图 52·1-1 燃油加热炉温度调节系统

使炉温保持预定的温度值上。

### 1.2 应用与发展

在冶炼、铸造、锻造、热处理、焊接、机械加工等工艺过程中，很多工作的状况需要及时、准确地测量、记录和显示，部分需要调节和控制，连续地监视工件在温度、压力、流量物位、成分等方面的变化。这些作用是操作人员肉眼观察或手工操作所不能达到的。有些测量仪表可发出声、光或电的信号并报警，提醒操作人员采取紧急措施。热工测量和控制在生产过程中的应用见表 52·1-1。

化学成分的分析是热工测量的一部分，其内容是对生产过程或工作条件中的物质作定量和定性的分析，以便了解这些物质的成分对生产过程的影响，并进行必要的现场控制。化学成分分析的内容很多，属于化学测定范围，本篇不作介绍。

今后，随着机械工业的迅速发展，生产过程需要采用更多的热工测量和控制技术。在测量技术方面，需要向高精度发展，尽可能减小测量误差；研究和发展激光、超声、核辐射、红外线、集成电路、相关等新技术在热工测量方面的应用；研制新型测量仪表和各种附加装置。在控制技术方面，需要研究串级、均匀、比值、分程、前馈、超驰、极值、纯滞后、程序控制、时间最优、多参数等各种调节规律在机械工业中的应用；进一步发展功能组件、智能调节、巡回检测、数据处理、计算机控制等新型成套控制装置，以便将生产过程控制在预定的条件下，实现生产过程自动化。

表 52·1-1 热工测量和控制在生产过程中的应用

| 测量参数 | 主 要 用 途                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 温 度  | 1. 熔炼炉、加热炉、烧结炉、发生炉、干燥窑等各部位、各阶段炉温的测量、显示、记录与控制<br>2. 冷热加工过程中高温熔融金属液、铸锻件、焊接件温度的测量、记录与控制<br>3. 生产用附具、模具、工具、铸型、刀具等工艺温度的测量<br>4. 生产过程中流体燃料（如煤气、重油等）、流体动力介质（如蒸气、高压水等）、冷却介质（如冷却水、淬火油等）、润滑介质（如润滑油、乳化液等）、加热介质（如熔融盐液）、热空气以及炉气废气等温度的测量、显示、记录与控制<br>5. 空调、测冷与除湿系统中温度的测量、显示、记录与控制 |

(续)

| 测量参数 | 主 要 用 途                                                                                                                                                                                                                       |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 压 力  | 1. 冶炼炉、加热炉、煤气发生炉、烧结窑、干燥窑、锅炉等, 流体燃料 (如重油、煤气、煤粉等)、助燃介质 (空气、氧气等) 以及炉气和废气等压力的测量、显示、记录、调节和控制<br>2. 工业管路和容器中流体介质如高压水、循环水、冷却液、蒸气、压缩空气、煤气、氧气、二氧化碳气等压力的测量、记录与控制<br>3. 水爆清砂压力, 爆炸成型压力, 风力输送、液力输送设备与管路压力, 接触焊压力, 机械加工磨削和切削压力的测量、显示、记录和控制 |
| 流 量  | 1. 流体燃料、助燃介质流量的测定、计量与控制, 如煤气、石油气、乙炔、重油、空气、氧气等<br>2. 流体动力介质、冷却介质、保护气氛、润滑油等流量的测量、计量, 调节与控制, 如蒸气、高压水、压缩空气、润滑油、乳化液、冷却水、保护气体等<br>3. 散装物料流量的测定、计量、调节与控制, 如水泥、煤粉、粘土粉、原砂、型砂、铁丸、泥浆、砂浆、液力输送、风力输送和固态流送                                   |
| 物 位  | 1. 散装粉粒材料的贮料仓、中间料槽、封闭容器中料位的测定、计量、调节、高低位报警与控制, 如砂子、粘土、石灰石、焦炭、煤粉、型砂、铁矿石、铁丸等<br>2. 液体的贮槽容器, 液压设备的液位测量, 高低位报警与控制, 如油罐、水池、水槽、水箱、锅炉、水压机、蓄势器、水玻璃贮桶、淬火油池、沉砂池、泥浆池等<br>3. 冲天炉, 白云石竖窑、煤气发生料位的测量, 报警与控制                                   |
| 成分分析 | 熔炼炉和加热炉的炉气、废气、保护气体成分分析, 如化铁炉炉气、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$ 的分析, 热处理炉保护气体成分分析, 煤气发生炉煤气成分分析, 石灰窑炉气、 $\text{CO}_2$ 分析等                                                                                           |

在机械工厂中, 配备适当数量的仪表人员和电气人员、同工艺人员合作, 共同研究工艺情况, 是实现和发展热工测量与控制技术的一个重要保证。

## 2 测量方法

按如何进行测量可分为:

(1) 直接测量法 被测量物体直接与测量单位比较, 直接得出结果。如用玻璃管液位计测量锅炉水位。

(2) 间接测量法 通过某一物理或化学性能, 随被测量变化而变化的关系, 间接地反映出被测量的大小。如压力仪表由于压力的作用, 使弹性元件变形而产生位移, 间接测得压力。

(3) 组合测量法 先测出几个参数, 然后把所测得的数值组合起来进行数学运算, 最后得出被测结果。如测量冲天炉空气的流量, 须先测出管道中孔板两端的压差、管道的压力和空气的温度, 再进行运算。

按如何获得测量值可分为:

(1) 直读法 被测量结果直接从仪表的标尺上读出, 读法迅速、简便、直观。如用玻璃水银温度

计测量温度。

(2) 平衡法 将被测的量同一个已知量进行比较, 当达到平衡时, 中间联接的指示仪表或检流计为零, 这个已知量就是被测量的数值。这种方法又称补偿法或零读法, 读数快, 准确度高。如用电子电位差计显示被测参数。

(3) 微差法 当被测量尚未和已知量完全平衡时, 量出剩余偏差; 通过对已知量和剩余偏差的考查, 进而得到测量结果。测量精度高。如用不平衡电桥测量电阻值等。

## 3 测量误差

### 3.1 误差的种类

测量误差根据产生的原因与性质可分为:

a. 系统误差 又称规律误差, 大部分由仪表本身的指示或测量方法不正确引起, 也可能由外来影响引起, 如环境温度对仪表的影响。系统误差的数值与正副符号都比较固定或有规律, 可在测量值中加入适当的修正值, 予以修正。

b. 偶然误差 误差的大小和正副符号不是按一定的规律变化。在测量过程中, 对于同一个参数,

虽然测量条件相同,但重复多次测量的结果总是有所差异,这些差异是由一些偶然因素所引起的。

产生偶然误差的原因有:仪表的缺陷,如仪表有变形、摩擦、间隙等情况;测量条件有变动,如发生温度升降、外界干扰、振动、冲击等;测量者本人的主观因素。

c. **疏忽误差** 由于操作者的疏忽大意,引起测量错误或计算错误。此种误差的测量结果无效,应该去掉。

### 3.2 误差的表示方法

在工程上,上述误差的表示方法有如下几种:

a. **绝对误差** 即测量值和真实值之间的差,用公式表示如下:

$$\Delta = X - a$$

式中  $\Delta$ ——绝对误差

$X$ ——测量值

$a$ ——真实值

b. **相对误差** 即测量值的绝对误差与真实值之比:

$$\gamma = \frac{\Delta}{a} = \frac{X - a}{a} \times \%$$

式中  $\gamma$ ——相对误差

c. **诱导相对误差** 即测量中最大的绝对误差与仪表的流量量程范围之比。一般表示如下:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta_{\max}}{A_{\max} - A_{\min}} \times \%$$

式中  $\gamma_0$ ——诱导相对误差

$\Delta_{\max}$ ——最大绝对误差

$A_{\max}$ ——仪表测量上限

$A_{\min}$ ——仪表测量下限

## 4 测量和控制仪表的分类

根据信息的获得、传递、反映和处理的过程,测量和控制仪表共分成五类:

a. **检测仪表** 温度、压力、流量、物位、成分等参数值的测量仪表。

b. **显示仪表** 模拟量、数字量的电动、气动指示、记录和积算仪表,以及工业电视、图象字符显示器等。

c. **调节仪表** 电动、气动、液动的基地式调节仪表、单元组合式和组件组装式调节仪表等。

d. **集中控制装置** 巡回检测、巡回调节、程序控制、数据处理、工业控制计算机等。

e. **执行器** 电动、气动、液动执行机构、调节阀及自力式调节阀等。

## 5 仪表的质量指标

在工程上通常以下列指标衡量仪表的质量:

a. **基本误差** 指仪表出厂时,制造厂保证该仪表在正常工作条件下的最大误差。

b. **精度和精度等级** 仪表精度是在正常使用条件下,仪表测量结果的可靠程度。仪表的精度可以用均方根误差、极限误差或其他方法表示,误差越小,仪表精度越高。

在工业测量中,为了便于表示仪表的质量,并用以估计测量结果的可靠性,采用仪表精度等级的概念。仪表的精度等级( $K$ )以数字表示,数字的大小表示该仪表在规定的使用条件下,最大绝对误差相对于仪表测量范围的百分数,可以下式表示:

$$K = \frac{\Delta_{\max}}{A_{\max} - A_{\min}} \times \%$$

仪表的精度等级,实际上等于诱导相对误差。工程上的精度等级是一系列标准数值,一般用0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1、1.5、2.5、4表示。仪表精度等级是衡量仪表优劣的重要指标之一。

c. **复现性** 测量结果的复现性,是指仪表指示值在外界条件不变情况下的稳定程度。即同一操作人员,用同一仪表对同一物体进行多次测量,所得结果之间的接近程度。各次测量结果越接近,仪表的复现性越好。有时可用测量结果的复现性表示测量仪表的稳定程度。

d. **灵敏度** 指仪表输出量变化与被测量变化的比值。对于带指针指示的仪表来说,灵敏度是仪表指针的线位移或角位移与被测量变化的比值;在这种情况下,用下式表示:

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta A}$$

式中  $S$ ——仪表的灵敏度

$\Delta a$ ——仪表指针位移

$\Delta A$ ——被测量的变化值

e. **不灵敏区** 因外来或本身影响,仪表指针不发生变化的范围称为仪表的不灵敏区。

为了确定仪表的不灵敏区,可在仪表的某一位置上,逐渐增大或减小某输入值,记下能使指示机构开始动作的输入值,并求出输入值的最大差值,即表示仪表在该点的不灵敏区。各点中最大的差值,即为该仪表的不灵敏区。

f. 反应时间 用仪表测量时,要经过一段时间后,指示值才能准确的显示出来。这段时间称为仪表的反应时间。反应时间长的仪表,不能测量参数变化频繁的工况。

## 第2章 温度测量

### 1 温度和温度仪表

#### 1.1 温度和温标

表示物体冷热程度的物理量叫温度。用某一标尺的数值表示温度的方法叫温标。国际上现在应用最普遍的温标有:热力学温标、摄氏温标、华氏温标和国际实用温标。

a. 热力学温标 热力学温标是根据热力学定律得出的,又称开尔文温标。

热力学温标表示符号为 $T$ ,单位是开尔文,符号是 $K$ 。热力学温标规定:冰的熔点为 $273.15K$ ,水的沸点为 $373.15K$ ,开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。绝对温度就是用热力学温标表示的温度。热力学温标是基本温标。

b. 摄氏温标 摄氏温标规定:冰的熔点为 $0$ 度,水的沸点为 $100$ 度,中间划分成 $100$ 等分,每一等分称为摄氏一度。摄氏温度用 $t$ 表示,单位为摄氏度,符号是 $^{\circ}C$ 。

摄氏温标一度温差与热力学温标一度温差是一样的,它们之间区别就在于规定冰的熔点温度值不同。二者之间关系为:

$$t = T - T_0$$

式中  $T_0$ —— $273.15K$

工程上一般取近似值,

$$t = T - 273$$

c. 华氏温标 华氏温标规定:冰的熔点为 $32$ 度,水的沸点为 $212$ 度,中间划分为 $180$ 等分,每一等分称为华氏一度。华氏温度的单位为华氏度,符号是 $^{\circ}F$ 。

华氏温度与摄氏温度关系为:

$$F = \frac{9}{5}(C + 32)$$

或

$$C = \frac{5}{9}(F - 32)$$

式中  $F$ ——华氏温度

$C$ ——摄氏温度

d. 1968年国际实用温标 (IPTS-68) 国际实用温标是经国际协议而建立起来的一种温标,它具备下列条件:尽可能与热力学温标一致,复现精度高,所规定的标准仪器使用方便。根据国际实用温标确定的温度紧密接近于热力学的温标,其差值在测定精确的极限之内。

1968年国际实用温标在国际实用开尔文温度和国际实用摄氏温度之间,用符号 $T_{98}$ 和 $t_{98}$ 加以区别。 $T_{98}$ 和 $t_{98}$ 的单位仍为开尔文( $K$ )和摄氏度( $^{\circ}C$ )。水的三相点温度: $T_{98} = 273.16K$ , $t = 0.01^{\circ}C$ , $T_{98}$ 和 $t_{98}$ 关系仍然为:

$$t_{98} = T_{98} - 273.15$$

#### 1.2 测量温度的方法

温度测量仪表是利用物体的某些物理现象与温度有关的性质而设计的。常用的测量温度方法有:

1) 利用物体热胀冷缩的物理现象测量温度。如双金属温度计,液体温度计以及压力式温度计等。

2) 利用物体的热电效应测量温度,如热电偶。

3) 利用物体电阻随温度变化的物理现象测量温度,如热电阻、半导体电阻温度计。

4) 利用物体辐射强度随温度变化的物理现象测量温度,如光学高温计,辐射温度计,部分辐射温度计,比色高温计等。

## 1.3 温度仪表测温的范围

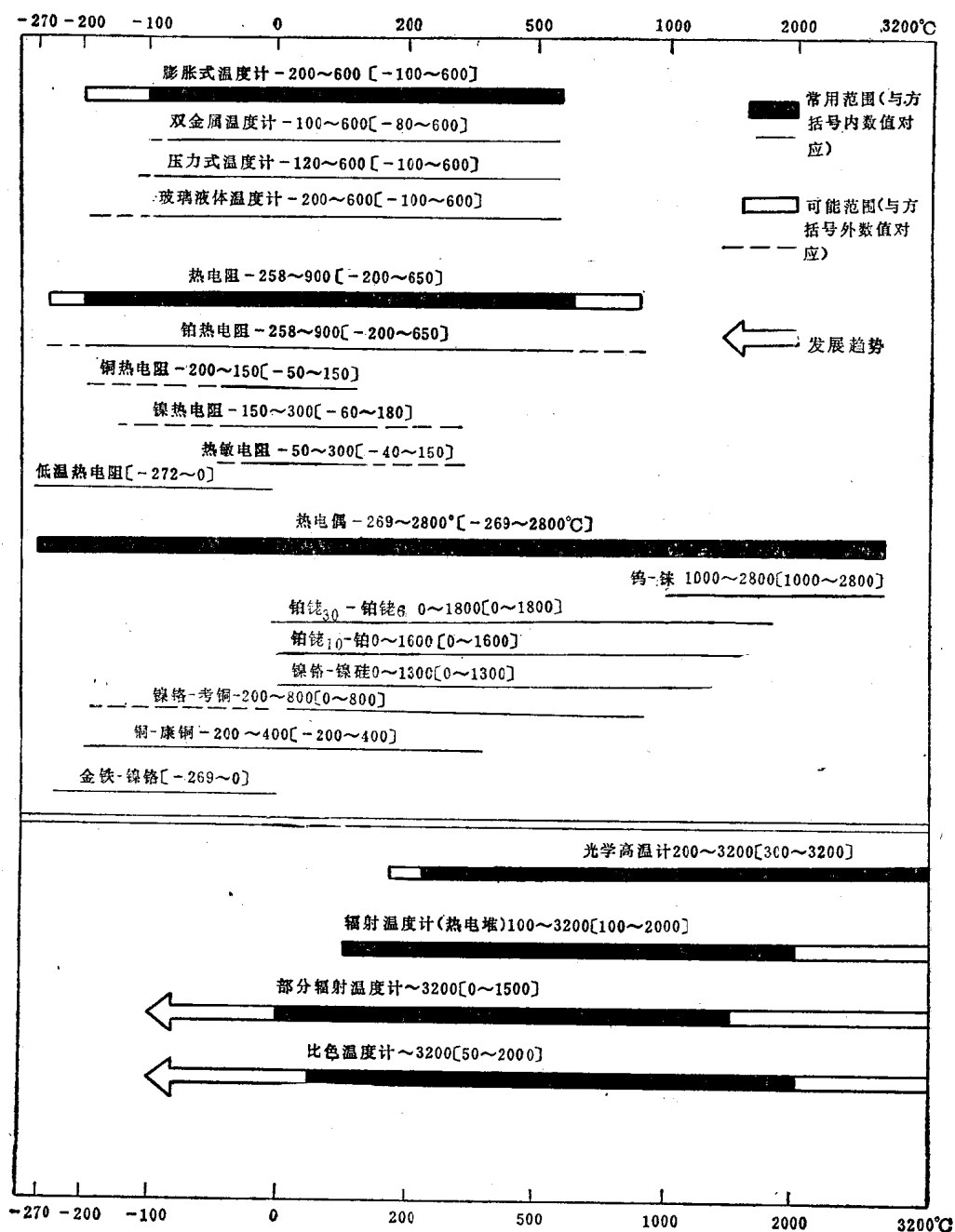


图52-2-1 工业温度测量仪表的测温范围

## 1.4 温度仪表的分类与性能 (表 52-2-1)

表52-2-1 温度仪表的分类与性能

| 测温方式    | 仪表名称    | 测温原理        |          | 精度等级        | 主要特点                                                                                              | 应用范围                                                                     |
|---------|---------|-------------|----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 接触式     | 双金属温度计  | 体积变化        | 固体热膨胀    | 1, 1.5, 2.5 | 结构简单、坚固、可小型化、指示清晰、容易维护、读数方便。精度比玻璃液体温度计低, 不能远距离测量                                                  | 为无汞仪表, 可部分代替水银温度计测量介质温度                                                  |
|         | 压力式温度计  |             | 气体、液体热膨胀 | 1, 1.5, 2.5 | 结构简单、防爆、防腐蚀、显示仪表可安装在远达20m处, 输出信号可用于自动记录、报警和控温。密封系统不易修理, 易产生附加误差。如温包高度不当, 可引起附加压力, 毛细管受环境温度影响可引起误差 | 防爆、防腐性能良好, 特别适用于生产过程中测量各种管道、容器、介质温度                                      |
|         | 玻璃液体温度计 |             | 液体热膨胀    | 0.5~2.5     | 结构简单、使用方便、价格便宜、精度较高。玻璃管易损坏, 水银温度计可能引起汞害, 测量结果不能远传和记录, 热惯性较大                                       | 一般用在实验室或现场管路上测量和控制蒸汽和空气的温度                                               |
|         | 热电阻     | 电阻变化        | 金属热电阻    | 0.5~3       | 较容易实现准确的测量, 输出信号可以远传、自动记录、报警和控温。需外接电源                                                             | 测量各种液体、气体和蒸汽介质温度, 低温热电阻的测温下限为1K左右, 可用于超导发电装置中测量极低温                       |
|         |         |             | 半导体热敏电阻  |             |                                                                                                   |                                                                          |
|         | 热电偶     | 热电效应        | 普通金属热电偶  | 0.5~1       | 测温范围较宽, 测量精度较高, 输出信号可以远传、自动记录、报警和控温。灵敏度比热电阻低                                                      | 测温范围为-269~2800℃, 除了用于一般介质测温外, 适用于测量难熔金属的高温 and 超导装置的极低温                  |
|         |         |             | 贵金属热电偶   |             |                                                                                                   |                                                                          |
|         |         |             | 难熔金属热电偶  |             |                                                                                                   |                                                                          |
|         |         |             | 非金属热电偶   |             |                                                                                                   |                                                                          |
|         | 非接触式    | 光学高温计       | 辐射测温     | 亮度法         | 1~1.5                                                                                             | 结构简单、轻巧便携、精度比较高, 光路上介质吸收及对象发射率的影响比辐射温度计小。人眼进行比较和判断容易有主观误差, 不能实现自动记录和控制温度 |
| 辐射温度计   |         | 全辐射法        |          | 1.5         | 结构简单、性能稳定、不需外接电源, 输出信号可自动记录、报警和控制温度。示值受光路上的介质吸收及对象表面发射率的影响较大, 刻度不均匀, 下限灵敏度较低                      | 测量运动物体或不宜安装热电偶的高、中温对象的表面温度, 如钢包子热温度、机械零件热处理温度及高温熔炉温度                     |
| 部分辐射温度计 |         | 利用某一波段辐射能量法 |          | 1~1.5       | 精度较高, 稳定性较好, 测温下限低, 输出信号可自动记录和控制温度。结构较复杂, 光路上介质吸收及对象表面发射率的影响比光学高温计大                               | 测量快速运动物体, 或温度瞬变的对象表面温度, 例如, 热轧钢板、镀锌铁板锻件、流动钢水铁水等                          |
| 比色温度计   |         | 比色法         |          | 1           | 测非黑体时, 发射率影响很小, 测得的温度接近真实温度。结构比较复杂, 在光路上若介质对波长有明显的吸收峰时, 反射光对示值影响较大                                | 测量在发射率较低、精度要求较高、或粉尘、烟雾较大的场所中各种对象表面温度                                     |

## 2 双金属温度计

### 2.1 工作原理

双金属温度计用两种不同膨胀系数的金属，彼此迭焊在一起作为感温元件(图 52·2-2)，当温度变化时，由于两金属片的膨胀系数不同而产生弯曲，通过指针轴，带动指针偏转，在刻度盘上直接显示出温度的变化值。

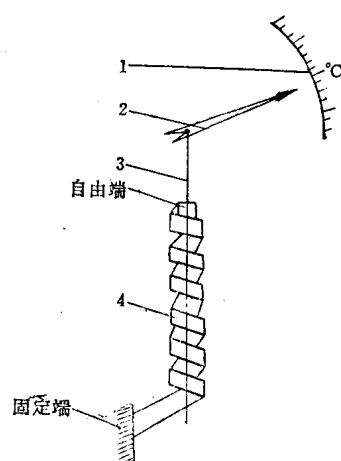


图52·2-2 双金属温度计作用原理  
1—刻度盘 2—指针 3—指针轴 4—双金属片

### 2.2 分类和用途

1) 按温度计刻度盘平面与保护管的连接方法分：

轴向型：刻度盘平面与保护管成垂直方向连接；

径向型：刻度盘平面与保护管成平行方向连接；

135°角型：刻度盘平面与保护管成135°角方向连接；

盒型：无保护管，感温元件通常为平螺旋，藏于仪表盒内。

2') 按感温元件被绕成的螺旋形状分：平螺旋形和直螺旋形。

3) 按安装固定的装置方式分：无固定装置，螺纹固定装置（活动螺纹固定装置、固定螺纹装置）和固定法兰。

## 3 压力式温度计

压力式温度计的工作原理如图52·2-3所示，当温度变化时，工作物质的体积发生变化；或在温度变化时，一定体积的工作物质的压力发生变化。测量时，温包插在被测介质中，被测温度变化时，密封在温包内的工作物质随温度变化，引起压力变化而使弹簧管变形，通过传动机构带动指针，直接在刻度盘上显示出温度变化值。

压力式温度计按照充灌的工作物质分为：

充气体——一般充氮气；

充低沸点液体——一般充氯甲烷，氯乙烷或丙酮；

充液体——一般充水银，二甲苯，甲醇，甘油。

按照显示部分的结构分为指示式和指示带电接点式两种。

压力式温度计的主要技术性能见表 52·2-2。

表52·2-2 压力式温度计主要技术性能

| 性 能     | 工 作 物 质  |          |          |
|---------|----------|----------|----------|
|         | 气 体      | 低沸点液体    | 液 体      |
| 测温范围 °C | -100~600 | -20~200  | -40~200  |
| 精度等级    | 1.5, 2.5 | 1.5, 2.5 | 1.0, 1.5 |
| 最小量程 °C | 100      | 20       | 30       |
| 最大量程 °C | 600      | 120      | 200      |
| 时间常数 s  | 80       | 30       | 40       |

压力式温度计测量对温包无腐蚀作用的液体、蒸汽或气体的温度。仪表离测温点距离较远时，仪表的滞后性较大。

指示带电接点的压力式温度计可以用作上下限信号报警以及两位调节。

小型的压力式温度计可以用作汽车、拖拉机和内燃机冷却水系统、润滑油系统的温度测量仪表。

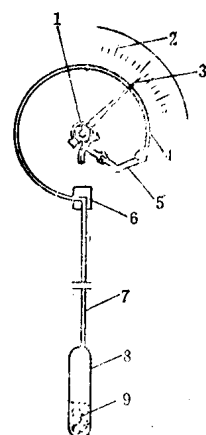


图52·2-3 压力式温度计  
1—传动机构 2—刻度盘 3—指针 4—弹簧 5—连杆 6—接头 7—毛细管 8—温包 9—工作物质

使用注意事项:

- 1) 在安装时,毛细管的最小弯曲半径不应小于 50 mm。
- 2) 在安装时应将温包全部插入被测的介质中,以减小因导热引起的误差。
- 3) 安装充液体的压力式温度计,温包与指示部分最好在同一水平面上,以减少由于液位差引起的误差。

#### 4 玻璃液体温度计

玻璃液位温度计是利用感温液体受热膨胀的原理。如图 52-2-4 所示,当温度变化时,感温液体开始膨胀或收缩,沿着毛细管上升或下降,在刻度标尺上直接显示温度的变化值。

玻璃温度计按照感温液体分为水银和有机液体两种。

按照用途结构分为工业玻璃温度计、实验室玻璃温度计、标准玻璃温度计和电接点玻璃温度计。

工业玻璃温度计有棒式的和内标尺式的。为了保护玻璃的安全使用,内标尺式玻璃温度计上可安装保护管。

电接点玻璃温度计有可调电接点和固定电接点两种。电接点玻璃温度计可以用作信号报警和两位调节。

#### 5 热电阻

##### 5.1 分类和工作原理

热电阻按材料可分为金属导体热电阻和半导体热电阻两类。

热电阻的特点是测量精度高,在  $-259.34 \sim 630.74^{\circ}\text{C}$  温度范围内用铂热电阻作为基准温度计,容易实现远距离传送。

热电阻的工作原理是利用导体或半导体的电阻

值与温度成一定函数关系的性能来测量温度。用导体或半导体制成的元件叫感温元件。当温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  时,大多数金属的电阻值增加  $0.4 \sim 0.6\%$ ,半导体减少  $3 \sim 6\%$ 。金属电阻值与温度的关系见图 52-2-5。当温度变化时,热电阻的电阻值随温度的升降而变化,将变化的电阻值作为信号输入显示仪表或调节器,即能测量或调节被测介质的温度。

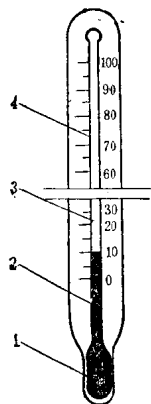


图 52-2-4 玻璃液体温度计

1—感温包 2—感温液体 3—毛细管 4—刻度标尺

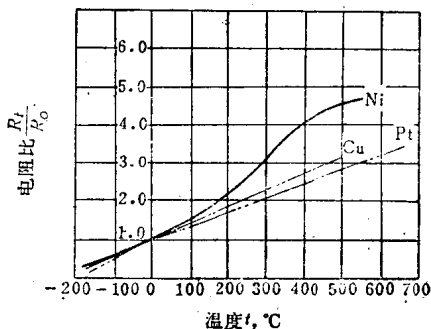


图 52-2-5 金属电阻值与温度的关系曲线

##### 5.2 金属导体热电阻

制造热电阻的材料有：铂、铜、镍和铁四种。常用的是铂热电阻和铜热电阻。根据电阻值与温度关系列表格叫分度表。在使用时,只要测量出电阻值,查表后即可知道被测温度值。热电阻的精度等级及技术指标见表 52-2-3。

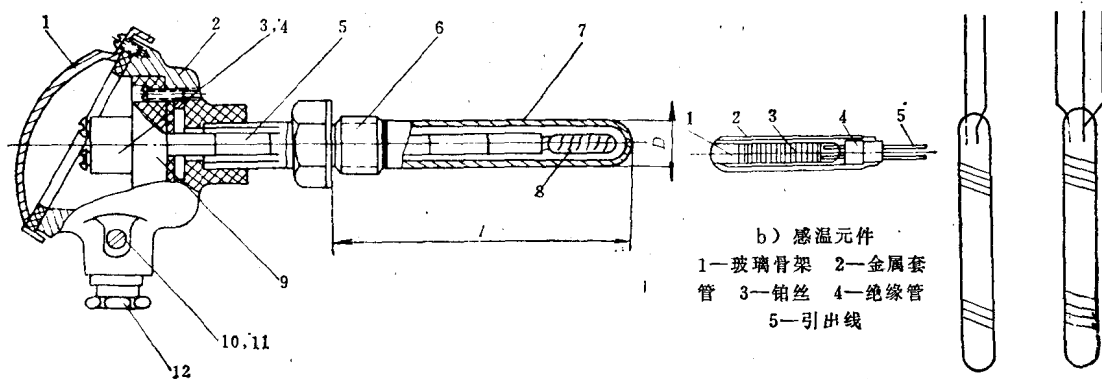
制造感温元件的骨架材料有云母,石英,玻璃,陶瓷和有机塑料。架子通常做成十字形,板形,螺旋形和圆柱形。图 52-2-6 为铂热电阻和感温元件的结构。感温元件以直径为  $0.07\text{mm}$  的纯铂丝,绕在锯齿形的云母架上,用两根直径约为  $0.5\text{mm}$  的银丝作为引出线,通过导线与显示仪表连接。

热电阻的引出线有二线制和三线制二种(图 52-2-7),供外接线时选择。

铠装热电阻将热电阻的感温元件封焊在耐酸不锈钢的金属保护管内。结构见图 52-4-8。其特点为:外径尺寸很小,热惯性小,反应快;有良好的机械性能;耐强烈的振动和冲击,可用于高压装置上测量  $800^{\circ}\text{C}$  以下液体、蒸汽或气体的温度。除了感温部分外,其他部分具有较大可挠性,不易受有害介质侵蚀,寿命长。

表52.2-3 热电阻精度等级及技术指标

| 名 称  | 测量范围<br>℃       | 分度号             | $R_0$<br>$\Omega$ | 精度<br>等级 | $R_{100}/R_0$       | $R_0$ 允许<br>误差% | 测量最大允许偏差                                                                                            |
|------|-----------------|-----------------|-------------------|----------|---------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 铂热电阻 | $-200 \sim 650$ | BA <sub>1</sub> | $46.00 \pm 0.023$ | I        | $1.3910 \pm 0.0007$ | $\pm 0.05$      | 对于 I 级精度: $-200 \sim 0^\circ\text{C}$                                                               |
|      |                 |                 |                   | II       | $1.3910 \pm 0.001$  | $\pm 0.01$      | $\pm (0.15 + 0.45 \times 10^{-3}t)$ , $0 \sim 600^\circ\text{C}$                                    |
|      |                 | BA <sub>2</sub> | $100.00 \pm 0.05$ | I        | $1.3910 \pm 0.0007$ | $\pm 0.05$      | $\pm (0.15 + 3.0 \times 10^{-3}t)$<br>对于 II 级精度: $-200 \sim 0^\circ\text{C}$                        |
|      |                 |                 |                   | II       | $1.3910 \pm 0.001$  | $\pm 0.01$      | $\pm (0.3 + 6.0 \times 10^{-3}t)$ , $0 \sim 600^\circ\text{C}$<br>$\pm (0.3 + 4.5 \times 10^{-3}t)$ |
| 铜热电阻 | $-50 \sim 150$  | G               | 53.00             | II       | $1.425 \pm 0.001$   | $\pm 0.1$       | $\pm (0.3 + 3.5 \times 10^{-3}t)$                                                                   |
|      |                 |                 | $\pm 0.053$       | III      | $1.425 \pm 0.002$   |                 | $\pm (0.3 + 6 \times 10^{-3}t)$                                                                     |



a) 热电阻  
1—接线盒盖 2—接线盒 3、4—接线块、螺钉 5—绝缘管 6—螺纹固定装置 7—保护管  
8—感温元件 9—接线座 10、11—链条和螺钉 12—出线孔螺栓

图52.2-6 热电阻和感温元件的结构

图52.2-7 二线制和三线制热电阻

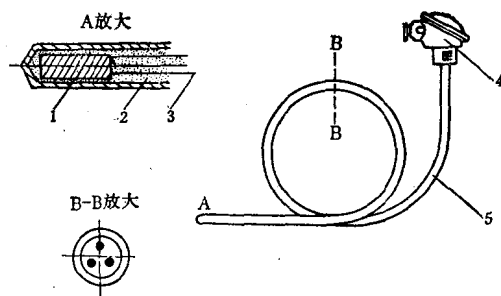


图52.2-8 铠装热电阻

1—感温元件 2—绝缘材料 3—金属导线  
4—接线盒 5—金属保护管

### 5.3 半导体热敏电阻

半导体材料的电阻值随温度的升高而降低, 具有负的温度系数, 利用这个原理可制成热敏电阻,

特点是: 电阻温度系数大, 灵敏度高, 比电阻  $\rho$  很大, 可以做成体积很小而电阻很大的电阻体, 因此连接导线电阻的变化而引起的影响可以忽略, 结构简单, 体积小, 可以测量点的温度, 热惯性小。不足之处是同一型号的热敏电阻, 互换性差, 非线性与测温误差较大。

常用的测量范围  $-100 \sim 300^\circ\text{C}$ , 测量误差  $\Delta t = \pm 2\% t$ 。

用半导体材料制成的点温度计, 可用来测量固体的表面温度和液体温度。如变压器、轴承、润滑油等的温度。

### 5.4 热电阻的安装

使用热电阻测量温度时, 需与被测介质接触, 故称接触式测温元件。由于测温的基本原理是感温元件与被测介质进行热交换。所以保证热交换的最