



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

# 高级测量仪器与计算机I/O 设计：精度界定和控制及其 工业应用（原书第2版）

**Advanced Instrumentation and Computer I/O  
Design: Defined Accuracy Decision and Control  
with Process Applications, Second Edition**

[美] Patrick H. Garrett 著  
胡子一 姜梅 黄利君 译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 高级测量仪器与计算机 I/O 设计：精度界定和 控制及其工业应用

(原书第 2 版)

[美] Patrick H. Garrett 著  
胡子一 姜 梅 黄利君 译



机械工业出版社

Copyright© 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Advanced Instrumentation and Computer I/O Design: Defined Accuracy Decision and Control with Process Applications, 2nd Edition >, ISBN: 978 - 1 - 118 - 31708 - 2, by Patrick H. Garrett, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2013 - 6379 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高级测量仪器与计算机 I/O 设计: 精度界定和控制及其工业应用: 原书第 2 版/ (美) 加勒特 (Garrett P. H.) 著; 胡子一, 姜梅, 黄利君译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Advanced instrumentation and computer I/O design

ISBN 978-7-111-48522-3

I. ①高… II. ①加…②胡…③姜…④黄… III. ①计算机应用 - 测量仪器 IV. ①TH761-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 265981 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.75 印张 · 275 千字

0 001—2 600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48522-3

定价: 65.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: (010)88361066 机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: (010)68326294 机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

(010)88379203 教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

本书主要介绍了测量仪器仪表的设计和应用。设计及理论部分介绍了仪器系统的基本功能模块，分别讲述了传感器、仪器放大器、模拟滤波器、信号调理系统、数据转换器和采样系统原理，并结合实际应用场景与要求给出了模块性能参数、信号调理方法、干扰抑制、噪声与失真的设计；应用部分将源于器件的仪器误差模型和传递函数整合到一个仪器分析套件中，并且讲述了测量仪器过程决策与控制方法和过程自动化的具体应用。应用和制造部分含有大量的实际研究案例。

本书专业性和理论性较强，不仅适用于测量仪器仪表设计岗位的工程师，还可作为测量仪器领域电路设计、器件设计或工艺开发等方面专题研究人员的参考书。本书还可以作为电子工程专业或通信工程专业相关方向研究生课程的辅助教材，如果作为模拟集成电路设计课程的高级部分内容，适合在半个学期内讲授。

# 译者序

测量仪器与仪表对世界科学技术的发展具有重要的推动作用，甚至是决定性的作用。伴随着传统产业的信息化改造和新兴信息产业的飞速发展，设计高精度测量仪器的复杂度日益提升，其包括的主要模块涉及传感器、放大器、滤波器、A-D/D-A 转换器、数字逻辑电路和计算机输入/输出 (I/O) 接口等。测量仪器的系统设计需要设计者（或设计团队）兼具信号处理、系统和电路、器件和工艺、材料和制造等方面的理论和经验，同时考虑数字和模拟两大领域的相关技术指标平衡。以提高精度、减小系统误差为主要目标，实现测量仪器仪表的系统设计是本书的核心内容。同时本书的一大特色是理论联系实际，书中给出了数十个实际案例作为辅助说明，这些案例均来自于真实的工业企业、实验室或航空航天系统设计部门。

本书作者 Patrick H. Garrett 博士是辛辛那提大学电气和计算机工程系的副教授，他的主要研究方向是控制理论的研究和测量仪器的设计。Garrett 博士曾在产业界、教育和科研单位参与多个项目和相关科研，丰富的实践经历使他的研究具有很强的实用性。在本书中尤其体现了这种面向应用的研究思路。书中涉及的应用领域案例十分广泛，包括从汽车、建筑领域镀锌钢带的铬酸盐涂层研究到航天应用中的二硫化钼摩擦润滑剂研究，从石灰石给料率的 pH 值调节方法到水文环境中利用双壳蛤闭合度来检测污染的方法。这些实践案例有力地支撑了他所提出的测量仪器设计和过程控制的方法。

本书内容主要分为 3 个部分。第 1 部分（第 1 章）是全书的向导和起点，从这里开始，作者带领读者步入测量仪器设计的旅程。作者在提纲挈领地介绍了“误差”、“精度”等贯穿整个设计流程的关键概念后，对测量仪器重要的组成部分——传感器进行分门别类地全面阐述。在解释温度传感器、机械传感器、量子传感器和分析传感器的机理时均辅以实际案例，其中一些案例还会在第 3 部分提到，体现了作者循序渐进的写作思路。

第 2 部分（第 2~6 章）是设计的理论部分，讲述了构成仪器系统的基本功能模块。其中第 2 章讲述了基本仪器放大器，这是所有仪器、控制系统的最基本单元。第 3 章讲述了模拟滤波器，分析了实际滤波器的误差，并给出了用于仪器的有源模拟滤波器的实用设计流程。第 4 章讲述了信号调理系统，给出了在传感器与数据转换器之间传递信号时如何抑制相干与随机干扰，从而确保信号质量。第 5 章讲述了数据转换器，介绍了各种 D-A 与 A-D 转换器的特性、性能参数与适用场合。第 6 章则着重讲述了采样系统原理、如何正确地采集数据以及如何高保真地实现信号恢复重建。总之，第 2 部分里介绍的功能模块，搭起了从传感器到复杂仪器与控

#### IV 高级测量仪器与计算机 I/O 设计：精度界定和控制及其工业应用

制系统的桥梁，而结合实际应用场景与要求而给出的模块性能参数、信号调理方法、干扰抑制、噪声与失真的设计，都具有现实指导意义。

第3部分（第7~9章）是应用和工艺制造部分，这一部分含有大量实际研究案例。第7章讲到了当前发展比较快的仪器分析套件，将源于器件的仪器误差模型和传递函数整合到一个仪器分析套件中，以用于 I/O 系统的设计，然后举了一个气流测量中误差传递的例子来介绍如何计算误差传递，最后介绍了传感器融合和接口方面的知识。第8章讲到了测量仪器过程决策和控制方面的知识，重点介绍了如何减少过程偏差，实现有效的过程控制。第9章介绍了过程自动化的具体应用，是对第8章内容的实践应用。

考虑到本书理论联系应用的特点，本书译者的选择也突出体现“产学研”结构。概论部分的原书前言、第1章和理论部分的第6章由胡子一（中国科学院微电子研究所）翻译，理论部分的第2~5章由姜梅（深圳大学信息工程学院）翻译，应用部分的第7~9章由黄利君（展讯通信有限公司）翻译。参加本书审阅和校对的还有中国科学院微电子研究所助理研究员王东和柳臻朝、国网电科院的陈奎林工程师、航天空间技术研究所的张旭工程师、中国移动设计院的李晨光高工等人，在此对他/她们的贡献表示诚挚的感谢。衷心感谢深圳大学信息工程学院朱明程教授在本书部分章节的翻译中给予的指导。最后感谢机械工业出版社的顾谦编辑在本书翻译过程中给予的大力帮助。

由于译者水平有限，译文中必定会存在一些不足或错误，请广大读者批评指正。

译者

# 原 书 前 言

借助先进的决策—控制方法论，测量方法的系统设计在航空航天、生物医药、商业和政府部门等领域存在广泛的需求。得益于界定精度的数据与工序自动化设计的结合，以及与测量有关的实现方法不断演进，工序自动化设计可以有效达到具有标称偏差的系统目标。本书对在现实世界中的测量应用进行了相应的研究，举例说明了科技企业的数十个研究案例，这些企业来自美国空军材料和制造局（Air Force Materials and Manufacturing Directorate）、通用电气航空公司（General Electric Aviation）、通用汽车公司技术中心（General Motors Technical Center）、固特异轮胎橡胶公司（Goodyear Tire & Rubber）、美国环境保护局（U. S. Environmental Protection Agency）和惠灵—匹兹堡钢铁公司（Wheel-Pittsburgh Steel Corporation）。

本书的前 60% 内容涵盖了从输入传感器信号调理到输出采样数据线性信号重构设计的研究，所关注的精度主要由电子器件的残留误差所限制。实时计算机 I/O 系统基于传统的电路设计。作为选择，界定精度的 I/O 设计采用第 1~6 章开发的器件和系统模型，正如第 7 章中个性化的测量分析套件手册集中展示的那样，其包括一个可修改的用户界面，用于操作选择器件数据和系统参数，从而评估端对端系统信号的精度。以上内容可以在 <http://booksupport.wiley.com> 页面下载。

本书剩余的 40% 内容继续研究过程设计方法，最终完成层次化的子过程控制结构。这包括一个顶层的前馈方案，该方案包含了具有产品特征的模型，输出了对中间级原位<sup>⊖</sup>子过程的参考引用，启动激活更明确的反馈控制，并与物理设备的控制管理分离。通过对关注的子过程解耦、传感器融合、可解释的数据属性、传感过程迁移控制方案重建模以及定量模型不完备时的计算智能推理，可以实现过程处理的有效性。每章后面的习题作为练习使用，带有单独的答案。

**Patrick H. Garrett**

辛辛那提大学自动化中心

---

⊖ 原位 (in-situ)，不同行业意义不同，本书中指实时的测量分析，将待测的目标置于原来的体系中进行测量，而不是单独地将某一目标分离出来使用单变量方式进行测定，或模拟条件体系进行测量。在本书翻译中使用“原位”一词。——译者注

# 目 录

译者序

原书前言

<b>第 1 章 热传感器、机械传感器、量子传感器和分析传感器</b> .....	1
1.0 简介 .....	1
1.1 测量仪器误差的阐述 .....	1
1.2 温度传感器 .....	3
1.3 机械传感器 .....	5
1.4 量子传感器 .....	10
1.5 分析传感器 .....	14
1.6 习题 .....	20
参考文献 .....	21
<b>第 2 章 仪器放大器和参数误差</b> .....	22
2.0 简介 .....	22
2.1 器件的温度特性 .....	22
2.2 差分放大器 .....	23
2.3 运算放大器 .....	26
2.4 仪器放大器 .....	29
2.5 放大器参数误差估算 .....	35
2.6 习题 .....	37
参考文献 .....	38
<b>第 3 章 测量仪器信号滤波器</b> .....	40
3.0 简介 .....	40
3.1 用于仪器的带限滤波器 .....	40
3.2 有源滤波器设计 .....	44
3.3 滤波器误差分析 .....	52
3.4 用于仪器的带通滤波器 .....	56
3.5 习题 .....	63
参考文献 .....	63



<b>第 4 章 信号调理系统的设计及误差分析</b> .....	65
4.0 简介 .....	65
4.1 小信号的采集 .....	65
4.2 相干干扰和随机干扰下的信号质量 .....	68
4.3 直流、正弦、与谐波信号调理 .....	72
4.4 模拟信号处理 .....	78
4.5 习题 .....	82
参考文献 .....	83
<b>第 5 章 数据转换器及其参数</b> .....	84
5.0 简介 .....	84
5.1 模拟乘法器 .....	84
5.2 采样保持电路 .....	86
5.3 D-A 转换器 .....	89
5.4 A-D 转换器 .....	94
5.5 习题 .....	105
参考文献 .....	106
<b>第 6 章 采样数据和采样间隔误差的重建</b> .....	107
6.0 简介 .....	107
6.1 采样数据理论 .....	107
6.2 信号与噪声的混叠 .....	111
6.3 采样数据的间隔采样与孔径误差 .....	115
6.4 输出信号插值函数 .....	121
6.5 视频采样和重建 .....	128
6.6 习题 .....	128
参考文献 .....	129
<b>第 7 章 仪器分析套件、误差传递、传感器融合和接口</b> .....	130
7.0 简介 .....	130
7.1 用分析套件设计航空领域计算机 I/O .....	130
7.2 气流测量中的误差传递 .....	141
7.3 同质和异质传感器融合 .....	144
7.4 仪器集成和接口 .....	149
7.5 习题 .....	155

7.6 附录 .....	157
参考文献 .....	159
<b>第 8 章 仪器过程决策与控制 .....</b>	<b>160</b>
8.0 简介 .....	160
8.1 过程设备控制器的偏差和校正 .....	160
8.2 自适应建模控制参考模型 .....	170
8.3 智能过程决策系统的实证 .....	178
8.4 习题 .....	186
参考文献 .....	189
<b>第 9 章 过程自动化应用 .....</b>	<b>191</b>
9.0 简介 .....	191
9.1 Ashby 图指导的等轴钛锻件 .....	191
9.2 脱层型纳米复合材料的光谱控制 z 拟合建模光谱控制 .....	193
9.3 自适应决策和控制下的超导体制造过程 .....	196
9.4 神经网络衰减的钢退火硬度偏差 .....	202
9.5 超线性分子束外延通量校正 .....	205
参考文献 .....	210

# 第 1 章 热传感器、机械传感器、量子传感器 和分析传感器

## 1.0 简介

针对自动化实验室系统、生产过程控制、分析测量仪器以及航空航天系统，如果没有采用多传感器信息体系的现代计算机集成数据系统，那么其性能就会降低。据此本章开发了配套的误差模型，以企业质量要求的集成兼容性为目标，为线性和数字测量仪器系统的设计与分析提供统一的性能评估。并且本章将这些方法作为一种量化体系，支持高性能的自动化系统设计。

本章具体介绍了前端电传感器器件从工业生产到科学测量的广泛应用。示例包含了检测温度、压强、水平度和流量的环境传感器；超出视觉度量边界的光学传感器，例如用于化学分析的分光仪；以及对材料成分测定和对生物医学活度测定的微波显微镜。值得注意的是，随着更高性能传感器的发展，它们会逐渐取代许多应用中的过程模型。

## 1.1 测量仪器误差的阐述

在以计算机为核心的测控系统中，本章结合测量仪器定量化端到端的性能描述，定义了对电子器件、电路和系统进行测量与建模的误差参数。利用总误差最小化的设计方法，可以实现系统的集成与优化。总误差如图 1-1 所示，并且由式 (1-1) 给出解析表达式，即总误差等于平均误差（式中带有横杠的项）加上系统以及随机不确定性的加和平方根（RSS）。因此总误差由基于传感器的测量结果与其绝对真值的偏差构成，该绝对真值可查询国家标准与技术研究所（NIST）制定的标准值。该误差通常用满幅的百分比 0 ~ 100% 来表示，即 % FS，其中 RSS 项表示标准偏差的置信区间，精度定义为总误差的余数（ $100\% - \varepsilon_{\text{total}}$ ）。图 1-2 描述了通用传感器器件，相关术语定义描述如下：

$$\varepsilon_{\text{total}} = \sum \overline{\varepsilon_{\text{mean}}} \% \text{FS} + \left[ \sum \varepsilon_{\text{systematic}}^2 + \sum \varepsilon_{\text{random}}^2 \right]^{1/2} \% \text{FS} 1\sigma \quad (1-1)$$

精度：使用某一测量方法时与被测物理量真实值的接近程度，通常表示为占满幅的百分比；

误差：测量值与被测物理量真实值的偏差，通常表示为占满幅的百分比；

容限：针对参考值所允许的偏差；

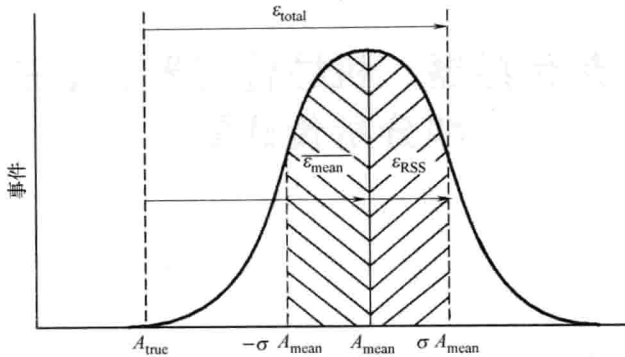


图 1-1 测量仪器误差解释



图 1-2 通用传感器器件

- 准确度：用测量值的有效位的数量来表示；
- 分辨率：能表示的最小量值；
- 跨度：任何两个边界之间测量范围的表达；
- 值域：所有测量值的范围的表达；
- 线性：在一个指定跨度内，测量值误差的变化；
- 可重复性：进行相同测试的测量值的变化；
- 稳定性：相对于一个指定的时间间隔的测量值的变化。

科技的进步显著地促进了传感器的发展。传感器的非线性是一种常见的误差源，可以通过多点校准方法进行最小化。实际应用往往需要线性传感器的合成来实现，以达到在关注的测量值域内对真实值的最佳渐近近似。

对于 J 型热电偶，在整个 700℃ 范围内，三次函数表达式，即式 (1-2) 都是一种有效的线性化方程，见表 1-1。在合理的温度间隔内，对系数  $A$  和  $B$  的方程解，可以定义出线性化方程，该方程还加入了 0℃。在热电偶以 100℃ 为间隔的线性化区间的求解得出了在 1℃ 真实温度范围内的计算温度值，典型情况下对应有 0.25% 的误差。用其表示在传感器范围内离散误差的平均值也是有用的，可以计算得到 J 型热电偶有 0.11% FS 的平均误差值。这个例子展示了贯穿本书的设计目标，建议对任何起作用的系统组件误差不应该超过 0.1%。扩展线性化多项式会进一步减少传感器的误差，但同时会增加计算负担，例如五阶方程可以有效地线性化至 0.1℃，相当于仅有 0.01% FS 的平均误差。

表 1-1 传感器三次线性化

$Y/^\circ\text{C}$	$X/\text{mV}$	$y/^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\% \text{FS}} =  (Y-y) 100\% / 700^\circ\text{C} $
0	0	0	0
100	5.269	98	0.27
200	10.779	200	0
300	16.327	302	0.25
400	21.848	401	0.23
500	27.393	500	0
600	33.102	599	0.17
700	39.132	700	0

$Y$  = 真实温度。

$X$  = J型热电偶信号。

$y$  = 线性化温度。

0.11% FS: 0 ~ 700°C之间满幅范围的平均误差结果。

$$y = AX + BX^3 + \text{截距} \quad (1-2)$$

在 10.779mV, 200°C时的系数:

$$200^\circ\text{C} = A(10.779\text{mV}) + B(10.779\text{mV}^3) + 0^\circ\text{C}$$

$$A = 18.5546 \frac{^\circ\text{C}}{\text{mV}} - B(116.186\text{mV}^2)$$

在 27.393mV, 500°C时的系数:

$$500^\circ\text{C} = 508.2662^\circ\text{C} - B(3182.68\text{mV}^3) + B(20555.0\text{mV}^3)$$

$$A = 18.6099$$

$$B = -0.000475 \frac{^\circ\text{C}}{\text{mV}^3}$$

## 1.2 温度传感器

由于具有耐用性和温度范围宽的特点, 热电偶广泛应用于温度传感器。在具有塞贝克效应的温度—电动势结使用两种不同的金属, 该结的转移关系曲线如图 1-3 所示。正确的使用方法是把热电偶基准结与测量结串联, 从而使电流方向极化, 并使测量电动势最大化。如果不用基准结, 由于缺乏与周围环境温度相适应的测量重复性, 则会产生明显的不确定性。

一个不需要独立供电的电子基准结可用如图 4-5 所示的模拟器件 AD590 温度传感器来实现。这个基准结通常连接到一个输入端隔离器, 这样可以跟踪热电偶到铜的电路连接的热量。误差信号参考表 1-2 的塞贝克系数 (单位是  $\text{mV}/^\circ\text{C}$ ), 并作为环境温度变化的补偿信号。在环境温度下的单点校准整理提供了十分之几摄氏度的温度测量精度。

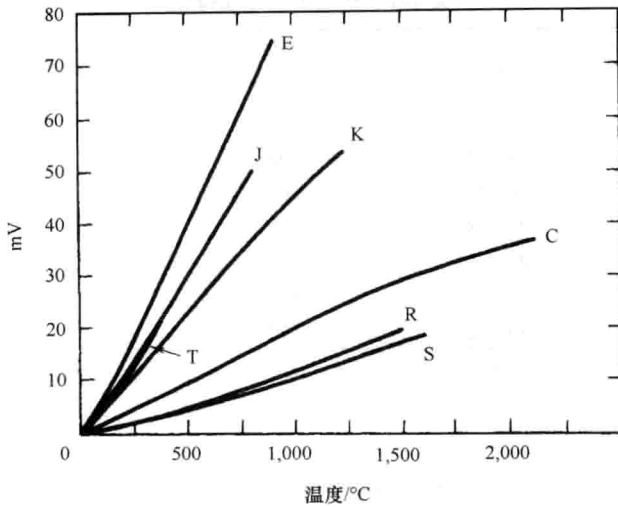


图 1-3 热电偶的温度—毫伏关系图 (Courtesy Omega Engineering, Inc., an Omega Group Company)

表 1-2 热电偶比较数据

类 型	器件, +/-	mV/°C	范围/°C	应 用
E	镍铬合金/铜镍合金	0.063	0 ~ 800	高输出
J	铁/铜镍合金	0.054	0 ~ 700	还原性气体
K	镍铬合金/镍合金	0.040	0 ~ 1200	氧化性气体
R 和 S	铂—铑/铂	0.010	0 ~ 1400	腐蚀性气体
T	铜/铜镍合金	0.040	-250 ~ 350	潮湿性气体
C	钨/铼	0.012	0 ~ 2000	高温

电阻温度计器件 (RTD) 比热电偶提供更高的分辨率和可重复性, 后者的分辨率通常限于约  $1^{\circ}\text{C}$ 。RTD 的工作原理是电阻值为温度的函数, 即电阻值随温度变化而变化, 并且电阻温度计的类型繁多。由于铂电阻温度计提供了机械和电气稳定性的精度, 因此经常在工业应用中使用。热敏电阻由多种金属氧化物采用陶瓷工艺烧结而成, 表现出显著的负温度系数。金属膜电阻比热敏电阻有更高的延展性和更宽的线性范围, 但热敏电阻的灵敏度要高 10 倍以上。RTD 通常需要使用恒流源来提供激励, 才能将随温度变化的电阻值变化转换为电压的变化。图 1-4 展示了常见的 RTD 传感器的温度—电阻特性。

当传感器与被测对象之间没有或者无法建立物理接触, 但可以通过光线感知时, 就可以使用光学高温计来实现非接触式温度测量。光学高温计仅可以测量处于其特定光谱响应范围内的光能量信号。将参考源和目标源之间的辐射度进行校准匹

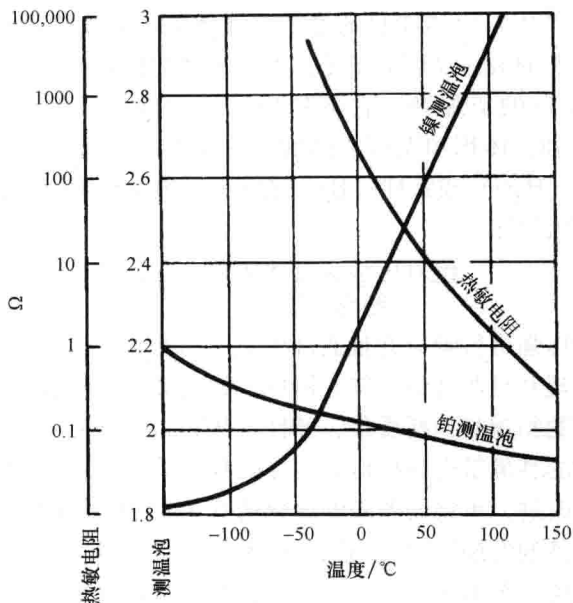


图 1-4 RTD

配后，对应不同温度就可以得到相应的电流。自动高温计采用伺服回路来实现这种平衡，如图 1-5 所示。操作环境可达  $5000^{\circ}\text{C}$ 。

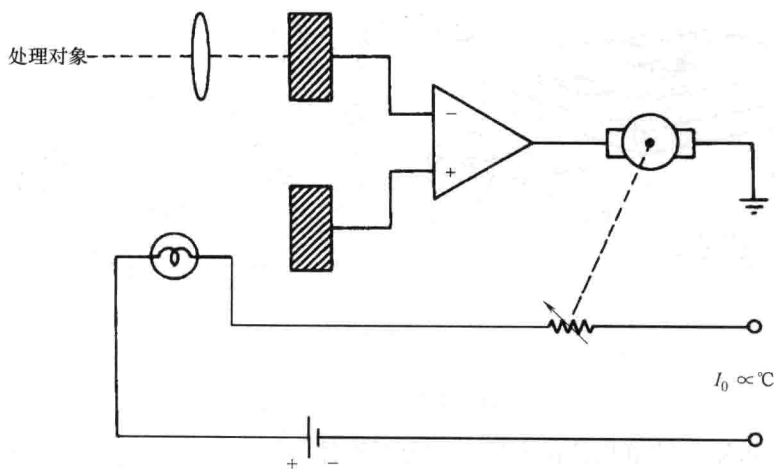


图 1-5 自动高温计

### 1.3 机械传感器

流体压强被定义为气体或者液体作用在容器界面单位面积上的压力。压强是液

压和气动（液体和气体）流体能量的度量。液体静压是指在流体内部任何一点的压强，其与该点以上的液体高度成正比，而与容器的形状无关。气体静压是指其做功的势能，由于气体的压缩性，它不随高度均匀变化。作为一般的气体定理，式（1-3）描述了压强、体积和温度之间的基本关系。压强通常用磅力每平方英寸（psi）或英寸水柱（H<sub>2</sub>O）或汞柱（Hg）表示<sup>○</sup>。绝对压强测量以真空为参照，而标准压强测量参照大气压。

$$\frac{\text{绝对压强} \times \text{气体体积}}{\text{绝对温度}} = \text{常量} \quad (1-3)$$

压强传感器对压强进行响应并且通过压力加和器件产生同比例的模拟信号。这通常由机械隔膜实现并且联动到电气元器件，如电势计、应变计或压敏电阻。压力加和传感器所关注的物理量包括质量、弹性系数和固有频率。电势计成本低、产量高，但它们对振动的高灵敏度和机械非线性限制了其性能。无粘结应变计在精度和稳定性方面做出了改进，可将误差降到满幅的 0.5%，但是其低输出信号需要前置放大器。压强传感器的发展现状是用积分技术来补偿各种误差来源，包括避免水晶薄膜的测量滞后现象。图 1-6 所示的是一个带微传感器电路的压力传感器，它的可靠性得到增强，其具有内部真空度参照、减少温度误差的芯片电热元件和用于片上信号调理的压敏电阻桥式传感器电路。

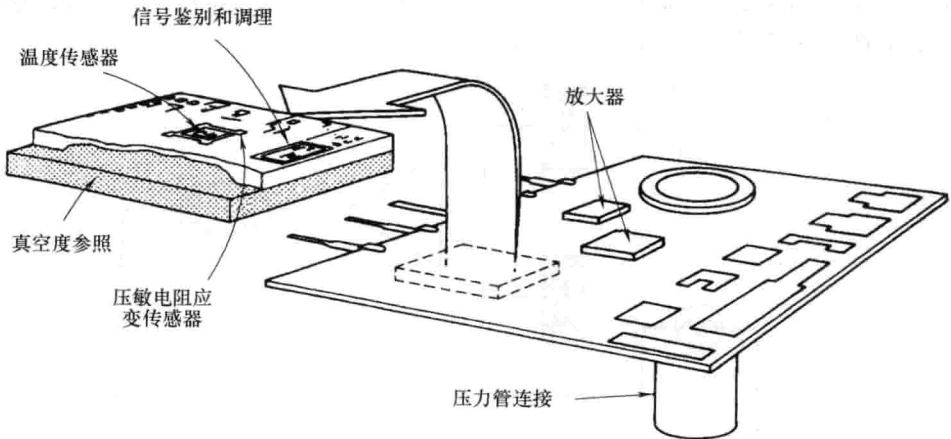


图 1-6 集成压力微传感器

通常在水箱、管道和其他容器中需要对液体水平度进行过程测量。感测的各种复杂的方法将被采用，包括浮子设备、压差、超声波和水准器。浮子设备能够简单地将各种方式的运动转换为水平读数。压差传感器在已知液体重量  $W$  和在容器表面和底部之间相接的  $\Delta P$  单元时能够测量液体的高度，高度由  $\Delta P/W$  的比值决定。

<sup>○</sup> 1 lbf/in<sup>2</sup> = 1 psi = 6.89476 kPa; 1 inH<sub>2</sub>O = 249.082 Pa; 1 inHg = 3386.39 Pa。——译者注



利用线性可变位移变压器 (LVDT) 可以准确感测位置、轴间角和线性位移。利用这种器件, 可变磁阻电路产生的交流激励通过可移动铁心在输出电路上产生感应信号, 可移动铁心决定了位移量。LVDT 的优点是承受过载能力强, 且对温度不敏感。在实际使用中, 它受限于其敏感度随激励频率的增加而增加。LVDT 的不同形式包括感应电位计、同步器、解析器和微动同步器。图 1-7 描述了一个带有交流和直流输出的基本 LVDT 电路。

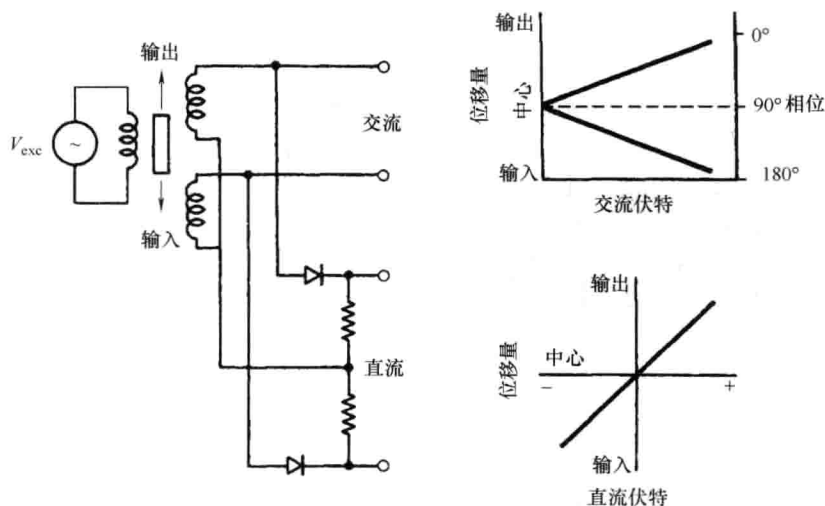


图 1-7 基本 LVDT

流体流量的测量通常是由压差或机械接触传感器来实现的。流率  $F$  是流体运动的速度, 通常以英尺<sup>⊖</sup>每秒为单位。体积流量  $Q$  是单位时间内流动的体积, 如每分钟若干加仑<sup>⊖</sup>。气体的质量流量  $M$  由每秒若干磅<sup>⊖</sup>来定义。差压流量传感元件也被称为可变压头流量计, 因为两个测量值  $\Delta P$  之间的压差等于重位压头。这相当于差压计的液柱高度。因此由式 (1-4) 和已知的万有引力常数  $g$  和压差, 就能够计算得到  $32\text{ft}/\text{s}^2$  的流量。明渠中液体流量是通过诸如水槽和堰的压头产生设备得到的。容积流量是由流体截面面积和堰上方流体的高度所获得的, 如图 1-8 和式 (1-5) 所示。

$$\text{流率} \quad F = \sqrt{2g\Delta P} \text{ ft/s} \quad (1-4)$$

$$\text{体积流量} \quad Q = \sqrt{2gL^2H^3} \text{ ft}^3/\text{s} \quad (1-5)$$

⊖ 1ft = 0.3048m。——译者注

⊖ 1gal = 3.78541dm<sup>3</sup>。——译者注

⊖ 1lb = 0.45359237kg。——译者注