



王惠龄 主编

制冷与低温 ● 测量技术

华中理工大学出版社



制冷与低温测量技术

王惠龄 主编

责任编辑 韩琰根

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.25 插页: 1 字数: 256 000

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数: 1—3 000

ISBN 7-5609-0106-9/TH·16

定价: 2.70 元

王惠龄 主编

制冷与低温 测量技术

Measurement in Refrigeration and Low Temperature

As a comprehensive and practical investigation, this book gives a systematic account of thermophysical parameters measured within the range from room temperature to 1 K. The dynamic characteristics in the process of refrigeration and that in a low temperature device as well as the principles and methods of quantitative description are presented.

This book is divided into 8 chapters and can either be used as a textbook on refrigeration and low temperature techniques or other relevant areas of study or as a reference book for interested scientists, engineers and technicians.

内 容 简 介

本书系统阐明从室温至 1 K 的低温范围内, 测量热物理参数, 揭示制冷与低温装置内部过程的动态特性及其定量描述的原理与方法。它以建立新体系为特色, 是一本内容较全面而又实用的书。

全书共八章。第一章以温度测量为中心, 论述各种低温温度计特性, 基本测量方法以及温度的量值传递。第二、三章以动态测量为中心, 介绍动态测量基础与动态压力测量系统。第四、五、六章论述制冷工程与低温工程所涉及的各种测量问题。第七章阐述误差分析与数据处理方法。第八章介绍实用测量记录仪表及微机在低温测量中的应用。书末由附录给出测量工作中常用的各种技术数据。

本书可供从事制冷与低温技术的科技工作者和高等院校有关专业的高年级学生、研究生及教师参考, 亦可供能源、化工、仪表、超导、宇航等有关的科技人员作为参考书。

序 言

本书是在我们历年来科学研究和测量教学实践的基础上编著的。其目的是认识低温测量中的特有规律，通过对制冷与低温测量技术的基本原理和测量方法的掌握，设计其所需的测量系统，以着力于增强科学实验的独立工作能力和培养解决实际问题的综合分析能力。

本书在内容上系统阐明从室温至绝对温度 1 K 的低温范围内，测量热物理参数及揭示制冷与低温装置（或系统）内部过程动态特性及其定量描述的原理及方法。在编写体系上，改变习惯以叙述仪表为中心的体系，确立以阐述制冷与低温工程的基本测量原理和方法、设计本专业所需的测量系统为线索的新体系。按照本书体系，可以较全面地熟悉低温测量技术，所含内容在一般工作中已够应用。

全书共八章。第一章以温度的电测方法为中心，从应用角度论述各种温度计的实用特性、基本测量原理与方法以及温度的量值传递。第二、三章以动态测量为中心，阐述动态测量基础及动态的压力测量系统。第四、五、六章论述制冷技术与低温工程所涉及的各种测量问题。其中，对流体流量、流速的测量，注意内容上的归纳、提炼，以着重建立从应用的角度来分析和解决问题的思路 and 基础。第七章阐述误差分析计算与数据处理方法。第八章介绍有关的实用测量、记录仪表及微型计算机在低温测量中的应用。在全书最后，编录了测量工作中常用的技术数据，以供查阅。

书中各章内容具有相对的独立性，若作为大学教学用书，可

以根据不同教学时数与重点，选学有关部分内容。

本书根据王惠龄提出的编写体系和大纲编著。郑正泉编写第六章（§6.2）及第八章，合写第二、三章，其余均由王惠龄编写并定稿。

在编写本书时，中国科学院学部委员洪朝生教授给予了支持。本书经中国计量科学研究院凌善康教授审阅，并提出了宝贵的指导性意见。在编写工作中，计量科学院张国权副研究员以及中国科学院低温技术实验中心张亮同志评阅了有关章节，并提出了很好的建议和意见；兄弟院校和华中理工大学低温教研室、制冷教研室许多同志对编写工作给予了支持。在此谨向他们致以诚挚的谢意。

由于本书内容涉及的领域较广，加之编者水平和时间所限，一定会有不少错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

于武汉 华中理工大学

目 录

| | |
|----------------------------|------|
| 绪论 | (1) |
| 第一章 温度的测量 | (1) |
| § 1.1 测温的热力学原理 | (5) |
| § 1.2 热电偶测温技术 | (6) |
| 1.2.1 热电偶的工作原理 | (6) |
| 1.2.2 常用热电偶特性 | (12) |
| 1.2.3 热电偶的制作 | (15) |
| 1.2.4 参考点温度的处理 | (16) |
| 1.2.5 热电偶测温误差的来源 | (20) |
| § 1.3 热电阻测温原理 | (20) |
| 1.3.1 铂电阻与铜电阻温度计 | (22) |
| 1.3.2 铱铁电阻温度计 | (25) |
| 1.3.3 碳电阻温度计特性 | (27) |
| 1.3.4 锗电阻温度计 | (30) |
| § 1.4 半导体二极管温度计及热敏电阻 | (32) |
| 1.4.1 $P-N$ 结二极管 | (32) |
| 1.4.2 热敏电阻 | (34) |
| § 1.5 温度的电测方法 | (36) |
| 1.5.1 热电偶电势的测量 | (36) |
| 1.5.2 电位差计的选择和正确使用 | (38) |
| 1.5.3 热电偶的连接线路 | (42) |
| 1.5.4 热电阻的测量 | (45) |
| § 1.6 气体温度计与蒸气压测温 | (48) |
| 1.6.1 气体温度计 | (48) |
| 1.6.2 用蒸气压测温 | (49) |

| | | |
|------------|--------------------------|-------------|
| § 1.7 | 超导固定点与 1 K 以下温度测量 | (53) |
| 1.7.1 | 超导转变温度 T_c 的测量 | (53) |
| 1.7.2 | 1 K 以下温度的测量 | (57) |
| § 1.8 | 磁场对温度计特性的影响 | (69) |
| 1.8.1 | 磁场对热电偶的影响 | (59) |
| 1.8.2 | 磁场对电阻温度计的影响 | (61) |
| § 1.9 | 温度计的选择与安装 | (62) |
| 1.9.1 | 低温温度计的选择 | (62) |
| 1.9.2 | 温度计的安装 | (65) |
| § 1.10 | 温标——温度的量值传递 | (69) |
| 1.10.1 | 热力学温标 | (69) |
| 1.10.2 | 国际实用温标 (IPTS-68) | (70) |
| 1.10.3 | 0.5~30 K 国际暂行温标 (EPT-76) | (71) |
| 1.10.4 | 实用制冷与低温范围温度的量值传递 | (73) |
| § 1.11 | 低温温度计的检定 | (74) |
| 1.11.1 | 检定装置与系统 | (47) |
| 1.11.2 | 铂电阻温度计的分度 | (76) |
| 1.11.3 | 铜-康铜热电偶的分度 (0~-200°C) | (78) |
| 第二章 | 动态测量基础 | (79) |
| § 2.1 | 基本概念 | (79) |
| 2.1.1 | 测量系统的特性 | (79) |
| 2.1.2 | 动态信号的形式 | (81) |
| § 2.2 | 测量系统的动态特性 | (83) |
| 2.2.1 | 测量系统的数学模型 | (83) |
| 2.2.2 | 测量系统的传递函数 | (85) |
| 2.2.3 | 一阶环节及其阶跃响应特性 | (86) |
| 2.2.4 | 二阶环节及其阶跃响应特性 | (88) |
| 2.2.5 | 测量系统的频率特性 | (92) |
| § 2.3 | 线性系统的方块图表示法 | (95) |
| 2.3.1 | 测量环节的联接 | (96) |
| 2.3.2 | 测量系统的动态特性分析举例 | (99) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 第三章 动态压力测量及真空测量 | (102) |
| § 3.1 压力传感器的原理 | (102) |
| 3.1.1 应变式压力传感器 | (102) |
| 3.1.2 电感式压力传感器工作原理 | (112) |
| 3.1.3 电容式压力传感器 | (116) |
| 3.1.4 压磁式压力传感器 | (118) |
| 3.1.5 压电传感器原理 | (119) |
| 3.1.6 霍尔元件 | (120) |
| § 3.2 动态压力测量系统 | (122) |
| 3.2.1 斯特林制冷机动态压力的测量 | (122) |
| 3.2.2 静态标定 | (123) |
| 3.2.3 动态标定 | (124) |
| § 3.3 动态压力测量系统的容腔效应 | (127) |
| § 3.4 真空测量 | (128) |
| 3.4.1 基本概念 | (128) |
| 3.4.2 低真空测量 | (129) |
| 3.4.3 高真空测量 | (130) |
| 3.4.4 其它类型的真空测量仪表 | (132) |
| 3.4.5 液氮减压降温中的压力测量 | (133) |
| 3.4.6 真空测量仪表的使用 | (134) |
| 第四章 流速、流量的测量 | (139) |
| § 4.1 概述 | (139) |
| § 4.2 管内的流动状态与速度分布 | (140) |
| § 4.3 动压测量管的工作原理 | (142) |
| § 4.4 热线法测量流速的原理 | (144) |
| § 4.5 标准节流装置 | (147) |
| 4.5.1 节流压差法的原理 | (147) |
| 4.5.2 标准节流装置 | (150) |
| 4.5.3 节流装置的设计计算 | (154) |
| § 4.6 转子流量计与湿式气体流量计 | (159) |
| 4.6.1 转子流量计原理 | (159) |

| | | |
|------------|----------------------------|--------------|
| 4.6.2 | 湿式气体流量计 | (161) |
| § 4.7 | 进口流量管的工作原理 | (162) |
| § 4.8 | 小流速测量及气体流量计的校验 | (165) |
| 4.8.1 | 小流速测量 | (165) |
| 4.8.2 | 小流速的校验 | (166) |
| 4.8.3 | 气体流量计的校验 | (169) |
| § 4.9 | 低温流体的流量测量 | (172) |
| 4.9.1 | 概述 | (172) |
| 4.9.2 | 涡街流量传感器原理 | (173) |
| 4.9.3 | 涡轮流量变送器 | (174) |
| 第五章 | 制冷与低温工程其它测量问题 | (177) |
| § 5.1 | 转速、频率和相位角的测量 | (177) |
| 5.1.1 | 转速的测量 | (177) |
| 5.1.2 | 由示波图确定频率和相位角 | (180) |
| § 5.2 | 压缩机示功图的测定 | (182) |
| 5.2.1 | 活塞式压缩机示功图的测定 | (183) |
| 5.2.2 | 示功图的整理与分析 | (185) |
| § 5.3 | 湿度的测量 | (186) |
| 5.3.1 | 湿度测量的基本概念 | (187) |
| 5.3.2 | 干湿球法测量湿度 | (188) |
| 5.3.3 | 露点法测量湿度 | (191) |
| 5.3.4 | 吸湿法测量湿度 | (193) |
| § 5.4 | 两相流测量概述 | (194) |
| § 5.5 | 低温超导技术在测量中的应用 | (196) |
| 第六章 | 低温液面测量与气体成分分析 | (199) |
| § 6.1 | 液面的测量方法 | (199) |
| 6.1.1 | 超导法测量液面 | (199) |
| 6.1.2 | 电阻法测量液面 | (201) |
| 6.1.3 | 电容式低温液面计 | (203) |
| 6.1.4 | 差压法低温液面测量原理 | (206) |
| § 6.2 | 气体成分分析 | (207) |

| | | |
|----------------------------|---------------------|--------------|
| 6.2.1 | 气相色谱法及其分离原理 | (207) |
| 6.2.2 | 色谱柱及色谱固定相 | (208) |
| 6.2.3 | 检测器 | (212) |
| 6.2.4 | 用色谱仪进行定性、定量分析 | (218) |
| 第七章 误差分析及数据处理 | | (224) |
| § 7.1 | 实验误差分析 | (224) |
| § 7.2 | 随机误差 | (226) |
| 7.2.1 | 正态分布 | (227) |
| 7.2.2 | 正态分布的统计性质 | (230) |
| § 7.3 | t 分布及其应用 | (236) |
| § 7.4 | 系统误差 | (239) |
| § 7.5 | 间接测量结果的误差 | (245) |
| § 7.6 | 仪表的误差计算 | (247) |
| § 7.7 | 综合误差的估算 | (248) |
| § 7.8 | 实验研究中误差的分配 | (250) |
| § 7.9 | 数据合理性判断 | (251) |
| § 7.10 | 曲线拟合 | (255) |
| 7.10.1 | 最小二乘法原理 | (255) |
| 7.10.2 | 切比雪夫多项式拟合 | (262) |
| 第八章 测量信号的显示记录及 | | |
| 微机在测量中的应用 | | (264) |
| § 8.1 | 概述 | (264) |
| § 8.2 | 阴极射线示波器 | (265) |
| 8.2.1 | 示波器的结构和原理 | (265) |
| 8.2.2 | 几种常用的示波器 | (268) |
| § 8.3 | 特种示波器 | (270) |
| 8.3.1 | 双迹示波器 | (270) |
| 8.3.2 | 储存示波器 | (272) |
| 8.3.3 | 取样示波器 | (274) |
| § 8.4 | 光线示波器 | (275) |

| | | |
|-------------|---------------------------|-------|
| 8.4.1 | 光线示波器的工作原理 | (275) |
| 8.4.2 | 振动子的工作原理和特性 | (276) |
| 8.4.3 | 光学系统 | (278) |
| § 8.5 | 磁带记录仪 | (280) |
| 8.5.1 | 磁带记录仪的工作原理 | (280) |
| 8.5.2 | 磁带记录仪的应用 | (282) |
| § 8.6 | 数字测量及显示 | (282) |
| 8.6.1 | 斜波式电压模-数转换 | (284) |
| 8.6.2 | 逐次比较型电压模-数转换 | (286) |
| 8.6.3 | 双斜率积分式电压模-数转换 | (287) |
| § 8.7 | 微机在自动测试系统中的应用 | (289) |
| 8.7.1 | 自动测试系统的工作原理 | (289) |
| 8.7.2 | 微机在自动测试系统中的应用 | (291) |
| 8.7.3 | 微机在测温控温中的应用 | (293) |
| 附录 | | (296) |
| I | 铜-康铜热电偶分度表 | (296) |
| II | 镍铬-金铁热电偶分度表 | (302) |
| III | 镍铬-铜铁热电偶参考表 | (306) |
| IV | 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表(K型) | (310) |
| V | 铂电阻温度计分度表 | (318) |
| VI | 铜电阻温度计分度表 | (322) |
| VII | 氮、氢、氮、氧饱和蒸气压与温度的关系 | (324) |
| VIII | 常用材料的比热 | (327) |
| IX | 常用材料的导热系数 | (328) |
| X | 制冷与低温工质的热物理性质 | (330) |
| XI | 常用金属材料的电阻率 | (334) |
| XII | 压力单位的换算 | (335) |
| 参考文献 | | (336) |

绪 论

测量技术的地位与意义

科学和技术的发展与测量技术有着密切的联系。测量是人们认识客观事物的重要方法。测量技术是指按照被测对象的特点,采用有效方法和仪器获取被测量数值的全过程。只有通过测量才能取得表征客观事物特征的定量信息。它的准确度、灵敏度和测量范围等在很大程度上决定了科学和技术发展的水平。测量技术达到的水平愈高,则科学的成就也愈为深广,技术水平也愈高。实践表明,测量结果可作为验证理论的客观标准,测量技术是推动科学发展的重要手段。

测量技术是现代科学技术工作者必须具备的基本技能,也是增强科学性、创造性和提高独立工作能力的重要环节之一。

研究对象及发展趋势

制冷与低温测量技术,主要研究能量传递过程中的热物理参数的测量,研究揭示制冷与低温装置内部过程的动态特性并给以定量描述的方法。

随着计算机和应用数学的发展,数学模拟方法得到了推广,但它并不能取代物理模拟方法。数学模拟的真实性还有待于实验测量的验证,而数学模型的建立过程也离不开实验测量提供的依据。无疑,模型和原型实验仍是获取数据的基本手段。一种低温设备装置的出现和完善,都伴随着广泛的实验模拟研究。对制冷机回热器中气流的交变流动过程,只用解析方法是难于研究清楚的,需要测量其中的气流速度、温度分布及随动压力等,并找出它们对整机特性的联系与影响。可见,制冷与低温技术装置的各种设计、各种低温物性的研究都需要结合实验进行。因此,根据

研究的目的是与任务，正确设计工作过程特性参数的测定系统、合理选择测量的方法与仪器并进行实验测量数据的处理和实验结果的误差分析等，是测量技术的基本内容。

制冷与低温的测量技术的发展趋势表现在：由一般整机性能测量发展到深入内部工作过程的测量。为了测量内部过程中的有关温度分布、速度变化、压力分布等，对传感器、测量系统和测量技术也就提出了更高的要求。

随着各种参数随时间变化（如上述气流的交变流动、脉动压力等）的瞬态测量需要，以及现代测量设备性能与测量技术水平的不断提高，动态测量正日益受到重视。

应用自控技术与计算机进行参数测量和实验数据处理的综合测量系统、低温温标向下的延伸、超低温范围温度的测量、超导量子干涉器件(SQUID)的应用等方面，正成为不断更新的十分活跃的研究领域。

测量的概念

测量是采用专门的技术手段，对客观事物的某种效应通过实验取得数值的描述。其目的是对研究对象的状态或特性获得数量的表征。

测量的结果可能表示为一定的数字、曲线或某种图形。把要测量的参数 X 与定义为计量单位的同类量 U_x 进行比较，求取两者比值 a ，即 $X/U_x \doteq a$ ，则测量过程完成赋予被测量以数量概念，即完成从计量单位到待测量的数值转移。所以被测参数的量值为

$$X \doteq aU_x \quad (*)$$

上式不用等号是为了考虑到测量结果 aU_x 有误差。从理论上说， aU_x 只能近似等于被测量 X 。通常称式(*)为测量的基本方程式。

由上述过程可以看出，进行测量要确定单位，选定实验方法

与测试设备，并估计出测量结果的误差。

基本物理量单位与检定

物理量的单位是以严格的科学理论为依据来定义的。国际单位制符号为SI。基本单位共有7个，即长度单位(米(m))；质量单位(千克(kg))；时间单位(秒(s))；电流单位(安培(A))；热力学温度单位(开尔文(K))；光强度单位(坎德拉(cd))和物质的单位(摩尔(mol))。基本单位是各自独立的，彼此无关的加以规定的。由基本单位通过定义、定律及其它函数关系派生出的单位称为导出单位。例如，由长度与时间单位可以导出速度的单位(米·秒⁻¹)。

为了保证量值的统一，需要通过各级基准、标准以及相应的辅助设备把某个物理量单位准确地传递。这种传递是以法定的形式规定相应的检定规程。其内容包括检定方法、设备、步骤以及被检仪器给出误差的方式等。检定规程的执行称为检定。

为了使测量达到一定的准确度，在实验前须对测量仪表按检定规程送交计量机构或有关部门进行检定。没有检定合格证或证书有效期已超过者，原有证书或检定记录上所标明的精度指标只能作为参考。

测量系统

以测量管内气流的压力为例，设此测量系统采用压电原理将压力信号变换为电信号，最后由光线示波器记录压力变化过程。这种系统就包含有：感受管内气体压力大小的弹性压力膜片，把压力变为电荷的压电晶体，将微弱的电荷信号变换为电压信号的电荷放大器和显示记录压力变化的光线示波器。例中压力膜片是与被测对象直接发生联系的部分，称为传感器或敏感元件，通常也称为一次仪表。压电晶体是信号变换元件，称为变换器。电荷放大器也是变换器。光线示波器是记录显示装置。变换器与显示装置通常又称为二次仪表。

由上可知，测量系统是指为完成某种测量任务而由多种测量设备组成的总和。测量系统可以是电气的、热力的、机械的、液压的，也可能是这些型式的组合。然而，不论测量系统的构成千变万化，其共同特征就是完成信号的传递和变换。

第一章 温度的测量

温度是最基本的热物理参数，也是热力学的一个重要的基本概念。在制冷与低温技术中，温度的测量是最基本的测量。

§ 1.1 测温的热力学原理

温度的概念是建立在热平衡基础上的。当两个不同的热力学系统处于同一个热平衡状态之下，它们则具有共同的宏观性质。表征系统热平衡的宏观性质的参数称为温度。即一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。这就是建立在热力学第零定律上的温度概念。

设有两个热力学系统，原来各自处于热平衡状态，当此两系统互相接触，并使它们之间仅能发生热交换，这时两个系统的状态都将发生变化。但只要经过足够长的时间，它们的状态便不再变化，说明两个系统达到了一个同一的热平衡状态。这称做热自动平衡原理。

根据热力学第零定律和热自动平衡原理，温度的测量过程的本质是利用在一个系统内两个或多个物体经若干时间以后，达到了热平衡，这时内部各部分的温度相等，整个物体的温度也必与系统内的周围物体的温度相等。那末，其中一个物体的温度就可反映另外物体的温度，并具有单值性。

原则上应用物质随温度而变化的某种属性，都可作为指示温度的温度计。但在测量中必须知道，由温度计测量温度，温度计指示的是制成温度计的物体本身的温度。根据热力学第零定律和热自动平衡原理，就可用温度计反映与之处于热平衡的其它物体