

清华大学 东南大学
天津大学 华中理工大学 编
朱德忠 主编

热物 理测 量技 术

清华大学出版社

339887

热物理测量技术

清华大学 东南大学
天津大学 华中理工大学 编

朱德忠 主编



清华大学出版社

内 容 简 介

本书着重介绍热物理过程实验研究中电测技术和光测技术的基本原理和测试方法。全书共八章，内容包括动态测量基础知识，动态压力测量技术，热线（膜）法测量气体流动参数，用接触式感温元件测量温度，激光测速技术，流体折射率场的显示技术，测量温度的辐射学方法，热流和热焓测量。本书内容相当全面，并引进了目前先进的测试技术，有助于读者掌握温度、压力、流速等基本物理量的测量仪表和先进测试技术。

本书系工程热物理专业教材委员会教材规划书目之一。并由委员会委托重庆大学雷亨顺同志审订。

本书可供工程热物理、热能工程、航天、航空、冶金、化工、石油等领域从事过程检测的科研、技术人员参考，也可作为高等院校有关专业研究生、大学生的教材。



☆
清华大学出版社出版
北京 清华园

北京京辉印刷厂印刷
新华书店总店科技发行所发行

☆
开本：787×1092 1/16 印张：17 字数：403千字
1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷
印数：0001-4000

ISBN 7-302-00477-3/TB·3

定价：3.45元

前 言

《热物理测量技术》课程教学大纲明确规定：《热物理测量技术》课程是工程热物理专业的主要专业课之一。它的教学目的与任务是：在《热工测量及仪表》课程的基础上，进一步学习有关热物理实验研究中电测技术和光测技术的基本原理和测试方法，并要求学生掌握一定程度的实验测试技能，熟悉实验数据的整理方法和测量误差的分析方法。同时对先进的测量技术有个初步的了解。本课程应为培养学生解决工程问题和科学实验研究能力打好基础。

《热物理测量技术》课程的基本要求是：

1. 掌握温度、压力、流速等热物理量电测法和光测法的基本原理。正确使用热物理实验研究中的测试仪表。
2. 测量技术是本课程的重点，应了解各种热物理过程研究对测量的要求以及为满足测量要求所采用的合理措施和提高测量准确度的方法。
3. 初步能运用动态测量的基础知识，进行热物理过程的动态性能测试和了解热物理量空间分布的测量方法。
4. 初步了解激光测量技术的应用。
5. 通过做一定量的实验，掌握应用的测试技能，学会误差分析方法，并能正确地处理实验数据。

《热物理测量技术》一书共八章。参加编写工作的同志有：清华大学朱德忠（第一、八章）；胡桅林（第四、七章）；李荣先（第五章）；东南大学金仁奎（第六章）；天津大学褚治德（第二章）；华中理工大学杨金宝（第三章）。全书由清华大学朱德忠主编。本书系工程热物理专业教材委员会教材规划书目之一，并由委员会委托重庆大学雷亨顺同志审订。

本书系工程热物理专业本科大学生的教材，也可供从事工程热物理实验研究工作的研究生、工程师、实验技术人员及工程技术人员参考。

一九八六年五月

目 录

前言

| | |
|--------------------------|----|
| 第一章 动态测量基础知识 | 1 |
| § 1-1 基本概念 | 1 |
| 1-1-1 稳态量和动态量 | 1 |
| 1-1-2 动态信号的形式 | 1 |
| 1-1-3 测量系统和测量环节 | 3 |
| § 1-2 测量系统的动态特性 | 4 |
| 1-2-1 测量系统的数学模型 | 4 |
| 1-2-2 传递函数, 动态响应特性 | 6 |
| 1-2-3 一阶测量环节动态特性 | 9 |
| 1-2-4 二阶测量环节动态特性 | 10 |
| 1-2-5 线性测量系统的动态特性 | 12 |
| § 1-3 测量系统的频率特性 | 16 |
| 1-3-1 频率特性 | 16 |
| 1-3-2 一阶测量环节频率特性 | 18 |
| 1-3-3 二阶测量环节频率特性 | 19 |
| 1-3-4 线性测量系统的频率特性 | 19 |
| 参考文献 | 20 |
| 第二章 动态压力测量技术 | 21 |
| § 2-1 概述 | 21 |
| § 2-2 电阻应变式压力传感器 | 21 |
| 2-2-1 金属电阻的应变效应 | 21 |
| 2-2-2 膜片-应变筒式压力传感器 | 23 |
| 2-2-3 膜片式应变压力传感器 | 25 |
| 2-2-4 桥式电路输出与温度补偿 | 27 |
| § 2-3 压阻式压力传感器 | 29 |
| 2-3-1 半导体的压阻效应 | 30 |
| 2-3-2 典型结构与计算 | 30 |
| 2-3-3 压阻压力传感器的温度补偿 | 31 |
| 2-3-4 压阻压力传感器的特点 | 32 |
| § 2-4 压电式压力传感器 | 33 |
| 2-4-1 压电效应与压电材料 | 33 |
| 2-4-2 压电压力传感器的结构 | 34 |
| 2-4-3 压电传感器的温度补偿 | 34 |
| 2-4-4 压电传感器的测量原理 | 35 |
| 2-4-5 压电式压力传感器的特点 | 37 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| § 2-5 电感式压力传感器 | 38 |
| 2-5-1 电感式压力传感器的工作原理 | 38 |
| 2-5-2 电感变换器的特性 | 38 |
| § 2-6 放大器与记录器 | 41 |
| 2-6-1 放大器 | 41 |
| 2-6-2 光线示波器 | 41 |
| § 2-7 数据采集系统简介 | 45 |
| 2-7-1 数据采集控制系统 | 45 |
| 2-7-2 微处理机测试系统 | 46 |
| § 2-8 静态与动态压力标定 | 47 |
| 2-8-1 静态标定 | 47 |
| 2-8-2 标定数据处理 | 47 |
| 2-8-3 动态标定 | 49 |
| § 2-9 动态压力测量系统的容腔效应 | 57 |
| 2-9-1 测压管道的物理模型 | 57 |
| 2-9-2 不可压缩流体二阶管道模型分析 | 58 |
| § 2-10 动态压力测量系统 | 60 |
| 2-10-1 测量条件与压力传感器的选择 | 61 |
| 2-10-2 电子测压系统 | 61 |
| 2-10-3 用微处理机测量动态压力 | 62 |
| 参考文献 | 65 |
| 第三章 热线(膜)法测量气体流动参数 | 66 |
| § 3-1 概述 | 66 |
| 3-1-1 基本原理 | 66 |
| 3-1-2 热线风速仪的发展史 | 67 |
| § 3-2 热线响应 | 68 |
| 3-2-1 探头及型式 | 68 |
| 3-2-2 稳定的热耗散规律和热线的静态响应 | 70 |
| 3-2-3 热线的动态响应 | 71 |
| § 3-3 热线的校准和修正 | 78 |
| 3-3-1 校准表达式和校准装置 | 78 |
| 3-3-2 热线的修正 | 81 |
| § 3-4 热线对各种参数的测量方法 | 86 |
| 3-4-1 紊流参数的测量 | 86 |
| 3-4-2 雷诺应力的测量 | 89 |
| 3-4-3 温度测量 | 90 |
| 参考文献 | 93 |
| 第四章 用接触式感温元件测量温度 | 94 |
| § 4-1 用接触式感温元件测量温度的一般问题 | 94 |
| 4-1-1 影响接触式温度测量的各种因素 | 94 |
| 4-1-2 一维问题的能量平衡方程 | 95 |
| 4-1-3 热电偶的对流换热系数 | 98 |

| | |
|--|------------|
| § 4-2 低速气流的温度测量 | 100 |
| 4-2-1 温度计的导热对测量的影响 | 100 |
| 4-2-2 温度计的辐射换热对测量的影响 | 106 |
| 4-2-3 同时考虑导热、对流、辐射时的分析方法 | 110 |
| § 4-3 高速气流的温度测量 | 112 |
| 4-3-1 速度误差及复温系数 | 112 |
| 4-3-2 减小速度误差的方法 | 116 |
| 4-3-3 复温系数的测定 | 117 |
| 4-3-4 同时考虑速度误差、导热误差与辐射误差时的处理方法 | 118 |
| § 4-4 动态温度的测量 | 119 |
| 4-4-1 温度传感器的动态响应 | 119 |
| 4-4-2 时间常数 | 122 |
| 4-4-3 导热和辐射对动态响应的影响 | 123 |
| 4-4-4 减小动态误差的方法 | 123 |
| § 4-5 介绍几种采取综合措施的测温装置——双屏抽气热偶、音速热偶和动态测温仪 | 124 |
| 4-5-1 双屏抽气热电偶 | 125 |
| 4-5-2 音速热电偶 | 125 |
| 4-5-3 动态测温仪 | 126 |
| § 4-6 超过热偶材料允许温度的气流温度测量 | 129 |
| 4-6-1 动态热偶法 | 129 |
| 4-6-2 气动高温计 | 131 |
| § 4-7 催化效应和火焰稳定效应对测温的影响 | 133 |
| 4-7-1 催化效应 | 133 |
| 4-7-2 火焰稳定效应 | 134 |
| § 4-8 固体壁面温度测量 | 134 |
| 4-8-1 固体壁面温度测量的分析 | 134 |
| 4-8-2 减小壁面温度测量误差的措施 | 138 |
| 符号表 | 139 |
| 参考文献 | 139 |
| 第五章 激光测速技术 | 141 |
| 引言 | 141 |
| § 5-1 激光多普勒测速的原理 | 142 |
| 5-1-1 多普勒效应 | 142 |
| 5-1-2 条纹模式 | 144 |
| 5-1-3 外差检测 | 147 |
| § 5-2 激光多普勒测速光路系统 | 149 |
| 5-2-1 基本光路 | 149 |
| 5-2-2 分光系统 | 153 |
| 5-2-3 聚焦发射系统 | 155 |
| 5-2-4 收集系统和光检测器 | 156 |
| 5-2-5 频移装置 | 157 |
| § 5-3 激光多普勒测速信号处理系统 | 160 |

| | |
|---|------------|
| 5-3-1 多普勒信号的特点 | 160 |
| 5-3-2 频率跟踪器 | 161 |
| 5-3-3 计数器 | 163 |
| § 5-4 激光多普勒测速的应用 | 164 |
| 5-4-1 粒子的散射和粒子的跟随性 | 164 |
| 5-4-2 粒子大小及其浓度的影响 | 166 |
| 5-4-3 测量结果的整理与分析 | 167 |
| § 5-5 激光双焦点测速技术简介 | 170 |
| 参考文献 | 172 |
| 第六章 流体折射率场的显示技术 | 173 |
| § 6-1 总述 | 173 |
| 6-1-1 折射率与密度和温度的关系 | 173 |
| 6-1-2 在非均匀介质中光线的偏转 | 175 |
| § 6-2 纹影仪 | 178 |
| 6-2-1 纹影仪的基本原理 | 178 |
| 6-2-2 纹影仪的光学结构形式 | 183 |
| 6-2-3 纹影仪的测试图像 | 185 |
| § 6-3 阴影仪 | 186 |
| 6-3-1 阴影仪的基本原理 | 186 |
| 6-3-2 阴影仪的光学结构 | 187 |
| 6-3-3 阴影仪的测试图像 | 188 |
| § 6-4 马赫-策恩德尔 (Mach-Zehnder) 光干涉仪 (简称M-Z) | 191 |
| 6-4-1 概述 | 191 |
| 6-4-2 M-Z的基本原理 | 192 |
| 6-4-3 M-Z的干涉图形及其有关的量测计算 | 196 |
| 6-4-4 M-Z的构造和设计 | 204 |
| 6-4-5 M-Z的调整 | 207 |
| 6-4-6 M-Z的误差及其校正 | 208 |
| § 6-5 几种其它的经典干涉仪 | 213 |
| 6-5-1 双镜激光干涉仪 | 213 |
| 6-5-2 迈克尔逊 (A. A. Michelson) 干涉仪 | 214 |
| 6-5-3 泰曼 (Twyman F.) 干涉仪 | 215 |
| § 6-6 纹影干涉仪 (又名差分干涉仪) | 215 |
| 6-6-1 沃拉斯顿棱镜 | 215 |
| 6-6-2 纹影干涉仪的基本原理 | 216 |
| 6-6-3 纹影干涉仪的干涉图形及其有关的量测计算 | 217 |
| 6-6-4 纹影干涉仪的光学结构 | 221 |
| 6-6-5 纹影干涉仪的灵敏度 | 221 |
| § 6-7 全息干涉仪 | 222 |
| 6-7-1 全息照相的基本原理 | 222 |
| 6-7-2 全息照相的实验技术 | 226 |
| 6-7-3 全息干涉仪的基本原理及其光学结构 | 228 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 6-7-4 用双激光全息干涉仪同时测量温度和浓度场 | 229 |
| 6-7-5 全息干涉仪在测量三维不对称场方面的应用 | 232 |
| 参考文献 | 235 |
| 第七章 测量温度的辐射学方法 | 236 |
| § 7-1 基本概念 | 236 |
| 7-1-1 温度辐射及辐射测温 | 236 |
| 7-1-2 辐射能测量中的有关量及其计量单位 | 237 |
| 7-1-3 辐射学基本定律 | 240 |
| § 7-2 测量固体表面温度的红外辐射方法 | 241 |
| 7-2-1 辐射高温计的分类 | 241 |
| 7-2-2 测量原理及真实温度的确定 | 243 |
| 7-2-3 发射率 | 245 |
| § 7-3 测量高温气体温度的辐射学方法 | 246 |
| 7-3-1 概述 | 246 |
| 7-3-2 单色辐射-吸收法 | 246 |
| 7-3-3 积分辐射-吸收法 | 249 |
| 7-3-4 谱线反转法 | 250 |
| 7-3-5 积分辐射反转法 | 251 |
| 符号表 | 252 |
| 参考文献 | 252 |
| 第八章 热流和热焓的测量 | 254 |
| § 8-1 热流测量 | 254 |
| 8-1-1 概述 | 254 |
| 8-1-2 传导热流测量 | 254 |
| 8-1-3 辐射热流测量 | 256 |
| § 8-2 气流总焓测量 | 258 |
| 8-2-1 量热式总焓探针的测量原理 | 259 |
| 8-2-2 水冷法总焓探针的结构型式和测量系统 | 261 |
| 参考文献 | 263 |

第一章 动态测量基础知识

§ 1-1 基本概念

在确定测量方法和选择测量系统时，必须对被测物理量的种类、性质有一定的了解，才能有目的、有根据地制定测试方案，准确地测量出被测物理量。被测物理量的分类方式是多种多样的，通常按被测物理量随时间变化的快慢来分，可以分为稳态量和动态量。这种分类方式很有实用价值，并且有通用性。

对于稳态量的测量，只需要根据测量系统的静态特性，即可从测量系统的输出量来确定输入量。但是，要测量动态量，必须先了解测量系统的动态特性，只有使测量系统的动态特性满足一定要求，才能使输出量如实地反映输入量。动态量的测量要求更高，必须把测量系统的动态特性分析清楚，才能知道此测量系统可以测量多宽范围的动态量，此范围往往是指测量信号的频率范围，即频带宽度。

在热物理测量技术中经常遇到的脉动压力、脉动速度、以及脉动温度的测量都是属于动态量的测量。

1-1-1 稳态量和动态量

稳态量是指在一定时间内不随时间变化、或变化很缓慢的物理量，例如室温、大气压力、湿度等都是 在一定时间内不随时间变化，或者在一昼夜内变化是十分缓慢的。这一类量都属于稳态量，可以直接从室温计，大气压力计，湿度计测量求得，在读数比较稳定的情况下，可以直接读数，不必快速记录。

对于稳态量可以不考虑过渡过程，认为测量系统测量稳态量时，输出量和输入量的变化是一致的，与时间无关。

动态量是指随时间变化很快的物理量。用测量系统测量动态量时，由于输入量变化很快，测量系统往往来不及达到平衡状态，而处于动态过渡过程之中。为了如实地测量和记录动态量，首先要研究动态量和测量系统的动态特性，然后再根据动态特性来选择测量系统，使测量系统和被测物理量相匹配，以便获得正确的测量结果。

1-1-2 动态信号的形式

实际测量中遇到的动态信号大致可分为三类：即周期性信号，过渡态信号和随机信号。

周期性信号是按固定时间间隔进行重复变化的时间函数，例如 50 Hz 的交流电压、内燃机内的压力变化都属于周期性信号。

过渡态信号是一种非周期信号，它只在一段时间内出现变化，然后趋向稳定。例如燃烧室内点火时温度的变化就是一种过渡态信号。

随机信号是连续的，而不是周期性的信号，它没有固定的幅值，亦没有固定的频率或周

期。信号的变化永远不会简单地重复。例如气流中的紊流脉动速度就是一种随机信号。

动态信号可以用时间的函数来表示，表现出信号随时间变化的特征，这种表示法称为时域表示法。

动态信号还可以经过变换用不同频率的正弦波相加来表示。不同的动态信号所包含的正弦波的频率成分亦不同。因此动态信号可表示为频率的函数。这种表示法可以表示信号的频率特征，故称为频域表示法。频域表示法对分析测量系统的动态特性有很大帮助。

1. 周期性信号

周期性信号完成一个循环所需要的时间称为周期。周期的倒数就是信号的基频。如令周期为 T ，则周期信号 $X(t)$ 符合下列关系：

$$X(t) = X(t + T) \quad (1-1)$$

周期性信号的时域表示法，可以通过傅立叶级数展开变换为频域表示的信号。对于函数 $X(t)$ ，可以用傅立叶级数展开为：

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{2\pi}{T} nt + b_n \sin \frac{2\pi}{T} nt) \quad (1-2)$$

式中 $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) dt$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) \cos \frac{2\pi}{T} nt dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) \sin \frac{2\pi}{T} nt dt$$

如果令 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ，则 $X(t)$ 可以用频域表示法表之。

$$X(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n) \quad (1-3)$$

式中 $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$

$$\varphi_n = -\text{tg}^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right)$$

由上式可以看出， $X(t)$ 是一系列正弦函数之和。系数 c_n 即代表不同频率正弦波的幅值，而 φ_n 即代表不同正弦波的相位。

2. 过渡态信号

过渡态信号的特点是在一定时间之内随时间变化，然后即趋于稳定。过渡态信号不是周期性信号，所以不能展开为傅立叶级数。但是可以用傅立叶变换将其变为频率的函数。如果此过渡态信号可用 $F(t)$ 表示，则其傅立叶变换为

$$f(\omega) = \int_0^{\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt \quad (0 \leq \omega \leq \infty) \quad (1-4)$$

因为 $e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$

所以 $f(\omega) = \int_0^{\infty} F(t) \cos \omega t dt - i \int_0^{\infty} F(t) \sin \omega t dt$ 。傅立叶变换可以将函数 $F(t)$ 由时间函数变为

频率函数 $f(\omega)$ ， $f(\omega)$ 亦称做 $F(t)$ 的频谱。而 $F(t)$ 为过渡态信号时， $f(\omega)$ 为连续频谱， $F(t)$

为周期性信号时, $f(\omega)$ 是分立频谱。

根据上述分析, 不论周期性函数或非周期性函数都可以表示为不同频率的正弦波的叠加。不过周期性函数的频谱是分立的, 而非周期性函数的频谱是连续的。

3. 随机信号

随机信号是连续的, 但又没有一定的周期。因此, 我们不能对信号观察一段时间后就能预测信号以后的数值。随机信号既不能用时间函数表示, 也不能用有限的参数来作全面的说明。于是, 只能用随机信号的统计特性来描述它。

1-1-3 测量系统和测量环节

测量系统是由测量环节构成的, 是通过测量环节之间的信号传递和转换来实现物理量的测量、显示和记录的。测量系统由传感器、测量线路(或称信号适调器)和显示记录仪器组成。信号适调器是起信号放大、信号变换的作用, 从而来改善信号的质量。例如热电阻测温系统包括热电阻(铂电阻或铜电阻)、测量电桥和指示仪表。其中热电阻即为传感器, 测量电桥为测量线路, 指示仪表为显示记录仪器。

要分析和研究测量系统, 首先要研究在被测物理量(通常称之为测量系统或环节的输入信号)作用下每个测量环节的输出信号是怎么变化的, 亦就是要研究测量环节的输入信号和输出信号之间的关系, 这关系称为测量环节的特性。测量环节的输入信号和输出信号处于平衡状态时(即稳定不变时)的关系称为静态特性, 它们在变动状态时的关系称为动态特性。无论是静态或动态特性都是测量环节的内在性质。

热电偶是一测量环节, 它的输入量是被测介质的温度 T , 输出量是热电偶的热电势 E 。在平衡状态时, 介质温度 T 等于热电偶热端的温度 T_e , 因此热电势 E 的数值反映了介质温度 T 的高低。在平衡状态时热电势 E 和介质温度 T 之间的关系称为此热电偶静态特性。当被测介质温度 T 变化时, 首先在介质和热电偶热端之间发生热交换过程, 使热端温度 T_e 亦随之发生变化, 而 T_e 的变化能随时由热电势 E 反映出来。

热电偶测温过程可用图 1-1 的方框图来表示。

热电偶可由三个更简单的环节构成:

环节 1 是介质与热电偶热端之间的温度差引起的热交换过程, 可用下列方程表示:

$$Q = \frac{1}{R} (T - T_e) \quad (1-5)$$

式中 Q 为介质与热电偶热端之间的热流量, R 为介质与热电偶热端之间传热热阻。

环节 2 是介质向热电偶传送热流量 Q 的变化引起热端温度 T_e 的变化, 可用下列方程表示:

$$T_e = \frac{1}{C_H} \int Q dt \quad (1-6)$$

式中, C_H 为热电偶热端的热容。

环节 3 是热电偶热端温度 T_e 的变化引起热电偶热电势 E 的变化, 即

$$E = r T_e \quad (1-7)$$

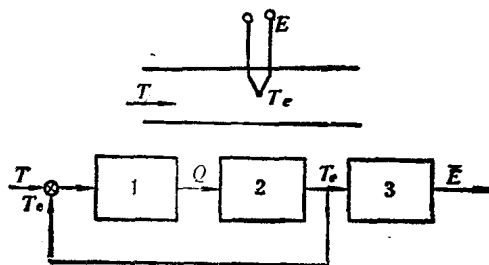


图 1-1 热电偶测温过程方框图

式中 r 为热电偶静态放大系数。

从式 (1-5)、(1-6)、(1-7) 中消去中间变量 Q 、 T_e 后即可得:

$$C_H R \frac{dE}{dt} + E = rT \quad (1-8a)$$

此一阶微分方程式 (1-8a) 表示了热电偶在输入量为 T , 输出量为 E 时的动态特性。由此可见动态特性是反映输入信号和输出信号在变动状态时的关系。由动态特性亦可求得静态特性。当输入信号和输出信号稳定不变时, 即 $\frac{dE}{dt} = 0$, 则式 (1-8a) 可以写成:

$$E = rT \quad (1-8b)$$

此式即为热电偶的静态特性。

§ 1-2 测量系统的动态特性

测量系统的动态特性将表示输入信号和输出信号在变动状态时的关系, 它通常用微分方程来描述。微分方程式是表达测量系统或测量环节动态特性的最基本型式。但是这种表达方式不便于分析测量系统的动态特性, 通常采用其它的表达方式, 其中有传递函数、脉冲响应特性、阶跃响应特性和频率特性等。

1-2-1 测量系统的数学模型

任何一个测量系统或者一个测量环节, 不管它的内部的物理过程是何种类型, 它的动态特性总可以用输入信号和输出信号之间的微分方程式来描述, 微分方程的一般形式为:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中, y 为输出信号; x 为输入信号; a 、 b 为各项的系数。

微分方程的阶次和各项系数的数值是由系统内部的结构和物理参数决定的, 对一个具体系统来说, 它某些项的系数也可能等于零。如果对微分方程求解, 就可获得输出信号 y 对输入信号 x 的响应。

要列出微分方程, 首先要找出输入信号和输出信号之间的内在联系。通常根据物理规律写出测量系统中每一环节或者是环节中的某一部分的原始方程式。然后再消去这些方程式中的中间变量, 就可获得测量系统或测量环节的微分方程, 它通常称之测量系统或测量环节的数学模型。

对于某些测量环节, 无论它们内部的物理过程有多大差别, 如果可以用同样的微分方程来表示输入信号和输出信号之间的动态关系, 那么从测量系统动态特性分析的角度来看, 它们是属于同类环节。以微分方程的型式来定义测量系统和测量环节的动态特性, 通常可分为线性测量系统和非线性测量系统, 对于测量环节亦是这样来区分的。如果测量环节中包含有非线性因素, 这时得到的测量环节的动态方程式将会是一个非线性微分方程。对于大多数测量环节多少都包含有非线性因素, 因此在分析测量环节的动态特性时, 应该考虑一下哪些非

线性因素可以忽略, 哪些可以近似线性化, 以便简化数学模型, 易于分析。

如果令微分方程中输入信号和输出信号对时间的各阶导数均等于零, 就得到了环节的静态特性方程式, 当然亦有一些例外。由于环节的平衡状态是变动状态的一种特殊情况, 一旦输入信号保持不变时, 稳定的测量环节其输出量最后必然趋向于某一数值, 达到平衡状态。因此测量环节的静态特性总是包括在动态特性之中。

构成测量系统的测量环节, 从具体结构上和性能上可能是多种多样的, 但是从它们的数学模型即动态特性来看只是有限的几种。这些典型的测量环节包括比例环节、一阶环节、微分环节、纯延迟环节等。

一、比例环节 (或称放大环节)

输出信号能按一定比例, 无延迟和无惯性地复现输入信号变化的环节称为比例环节。它的输入信号 $x(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 具有完全相同的函数形式。它的动态特性为:

$$y(t) = Kx(t) \quad (1-10)$$

式中 K 称为环节的放大系数。

具有比例环节特性的测量元件或测量线路是大量存在的, 例如:

1. 弹簧管压力表, 将气压 $p(t)$ 线性地转换为角位移 $\theta(t)$ 。
2. 测量放大器, 在一定频率范围内输出信号将正比于输入信号, 输出量能不失真地放大输入量。

二、一阶环节 (或称惯性环节, 非周期环节);

一阶环节的动态特性为

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (1-11)$$

式中 T_0 为惯性环节的时间常数, K 为静态放大系数。一阶惯性环节的数学模型是一个一阶微分方程, 它有反映此环节特性的两个特征量, 一为时间常数, 一为静态放大系数。实质上时间常数是反映环节的惯性大小, 静态放大系数是说明环节的静态特性。例如测量流体温度的热电偶, 测量线路中所采用的阻容滤波器等都是一阶惯性环节。

三、二阶环节

二阶环节的数学模型是一个二阶微分方程, 它的一般形式如下:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-12)$$

根据二阶微分方程的特征方程根的性质不同, 二阶环节可分为:

1. 二阶惯性环节 (二阶非周期环节)

二阶环节的特征方程根是两个负实根, 则它相当于两个一阶惯性环节的串联。

2. 二阶振荡环节

二阶环节的特征方程根是一对带负实部的共轭复根, 则为二阶振荡环节。当测量环节的输入信号为一阶跃信号时, 输出信号是一条衰减的正弦曲线。如果振荡环节的阻尼系数等于零, 则输出信号是一条等幅的振荡曲线。

四、微分环节

输出信号和输入信号的一阶导数成正比例的环节称为理想微分环节, 它的动态特性为

$$y(t) = T_d \frac{dx(t)}{dt} \quad (1-13)$$

式中 T_d 为理想微分环节的微分时间常数。

实际微分环节的动态特性为

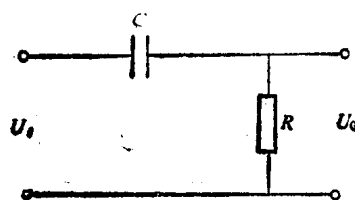
$$T_c \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T_D \frac{dx(t)}{dt} \quad (1-14)$$

式中 T_D 为实际微分环节的微分时间常数。

例如图 1-2 所示的 RC 微分电路，它的动态特性是一实际微分环节。RC 微分电路可以写成

$$RC \frac{dU_o}{dt} + U_o = RC \frac{dU_i}{dt} \quad (1-15)$$

五、纯延迟环节



输出信号的大小、波形与输入信号的大小波形完全相同，只是落后一段时间，这种环节称为纯延迟环节，它的动态特性为：

$$y(t) = x(t - \tau_0) \quad (1-16)$$

式中 τ_0 为纯延迟时间。

图 1-2 RC 微分电路

例如气体取样管，它的进口处的气体成分和出口处的气体成分之间的差异，就是在时间上有一纯延迟时间。

1-2-2 传递函数，动态响应特性

线性环节（或系统）的动态特性可用下述一般形式表示：

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-17)$$

（其中 $n \geq m$ ）

式 (1-17) 的初始条件为零，对方程两端进行拉普拉斯变换得：

$$\begin{aligned} a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \dots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) \\ = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \dots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} X(s) \\ &= W(s) \cdot X(s) \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中 s ——拉普拉斯变换的运算子符号；

$X(s)$ ——输入量 $x(t)$ 的拉普拉斯变换式，即 $X(s) = L[x(t)]$ ；

$Y(s)$ ——输出量 $y(t)$ 的拉普拉斯变换式，即 $Y(s) = L[y(t)]$ ；

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-19)$$

$(n \geq m)$

$W(s)$ 称为测量环节（或测量系统）的传递函数。因此环节（或系统）的传递函数 $W(s)$ 是初始条件为零时，输出量的拉普拉斯变换式和输入量的拉普拉斯变换式之比。

既然传递函数是由线性常系数微分方程通过变换得到的，因此它和微分方程一样也表达了环节（或系统）的动态特性。由于通过拉普拉斯变换把微分方程的特征（阶次和各项系数）与输入量，输出量分离开来，并且以环节（或系统）内部的结构和物理参数来表示输入量和输出量之间的关系，因此，从传递函数可更清楚地看出动态特性是环节（或系统）的固有特性，与输入量的具体形式无关。

热电偶作为一个测量环节，其动态特性 [见式(1-8a)]为

$$C_H R \frac{dE}{dt} + E = rT$$

若进行拉普拉斯变换后，就可以得到它的传递函数：

$$L[C_H R \frac{dE}{dt} + E] = L[rt]$$

$$C_H R s E(s) + E(s) = rt(s)$$

则传递函数为：

$$W(s) = \frac{E(s)}{t(s)} = \frac{r}{C_H R s + 1} \quad (1-20)$$

由此可见，用传递函数 $W(s)$ 表示测量环节的输入量和输出量之间的因果关系是十分明确的，如图1-3所示。传递函数能给出输入量和输出量之间的定量关系。

$$Y(s) = W(s) X(s) \quad (1-21)$$

$$y(t) = L^{-1}[W(s) X(s)] \quad (1-22)$$

利用传递函数可以把微积分运算简化为代数运算，这就大大地便于微分方程的求解。并且传递函数的分母式是微分方程的特征方程式。因此从传递函数就能方便地判断测量环节动态过程的基本特征。

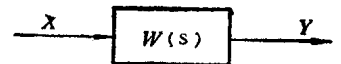


图 1-3 用传递函数表示测量环节

传递函数是测量环节的内在特性，与输入量的具体形式无关。这种内在的特性只有在输入量的作用下，使测量环节的状态发生变化时才能表现出来，而环节状态的变化通常是以输出量的变化反映出来的。因此，动态特性也可以通过输入量作用下输出量的变化来加以描述。

同一环节在不同形式的输入信号作用下，输出量的变化是不同的。通常选用几种典型的输入信号作为标准输入信号。目前用得比较多的标准输入信号有脉冲函数、阶跃函数和正弦函数等。在这些标准输入信号作用下，环节的输出响应分别称为脉冲响应特性、阶跃响应特性和频率响应特性。

脉冲响应特性和阶跃响应特性是在时间域内来描述动态特性的方法，频率响应特性是在频率域内来描述动态特性的方法。

一、脉冲响应特性

输入信号为单位脉冲函数 $\delta(t)$ ，即

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{当 } t = 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } t \neq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1-23)$$

$$\int_0^{\infty} x(t) dt = \int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1-24)$$

它的拉普拉斯变换式为

$$X(s) = L[x(t)] = L[\delta(t)] = 1 \quad (1-25)$$

若环节的传递函数为 $W(s)$ ，则它的脉冲响应特性为：

$$\begin{aligned} y(t) &= L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}[X(s)W(s)] \\ &= L^{-1}[W(s)] \end{aligned} \quad (1-26)$$

举例说明，热电偶的传递函数 [见式(1-20)] 为

$$W(s) = \frac{r}{C_H R s + 1}$$

脉冲响应特性为

$$\begin{aligned} E(t) &= L^{-1}[W(s)] \\ &= L^{-1}\left[\frac{r}{C_H R s + 1}\right] = \frac{r}{C_H R} \cdot e^{-\frac{t}{C_H R}} \end{aligned} \quad (1-27)$$

由此可见，测量环节的脉冲响应特性的拉普拉斯变换式就是它的传递函数。因此通过脉冲响应特性试验可以直接得到动态特性的全部信息。

二、阶跃响应特性

输入信号为单位阶跃函数 $1(t)$ ，即

$$x(t) = 1(t) = \begin{cases} 1 & \text{当 } t \geq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } t < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1-28)$$

它的拉普拉斯变换式为

$$x(s) = L[x(t)] = L[1(t)] = \frac{1}{s} \quad (1-29)$$

若环节的传递函数为 $W(s)$ ，则它的阶跃响应特性为

$$\begin{aligned} y(t) &= L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}[X(s)W(s)] \\ &= L^{-1}\left[\frac{W(s)}{s}\right] \end{aligned} \quad (1-30)$$

热电偶的阶跃响应特性为

$$\begin{aligned} E(t) &= L^{-1}\left[\frac{r}{s(C_H R s + 1)}\right] = rL^{-1}\left[\frac{1}{s} - \frac{C_H R}{C_H R s + 1}\right] \\ &= r(1 - e^{-\frac{t}{C_H R}}) \end{aligned} \quad (1-31)$$

热电偶的阶跃响应曲线为一指数曲线，如图 1-1 所示。

环节的阶跃响应特性和脉冲响应特性是有一定的关系。阶跃响应特性函数是脉冲响应特性函数的积分。反之脉冲响应特性函数是阶跃响应特性函数的微分。

为了测试测量环节或测量系统的动态特性经常采用阶跃响应试验。在测量环节（或系