



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

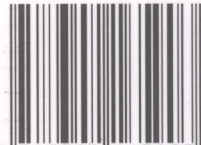
黄素逸 周怀春 等 编著

现代热物理测试技术

<http://www.tup.com.cn>

清华大学出版社

ISBN 978-7-302-16590-3



9 787302 165903 >

定价：45.00元

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

内容简介

本书共分5章，主要介绍热物理测试技术的基本原理、测试方法和测试系统。全书共分5章，第1章介绍热物理测试技术的基本原理，第2章介绍热物理测试技术的测试方法，第3章介绍热物理测试技术的测试系统，第4章介绍热物理测试技术的应用，第5章介绍热物理测试技术的未来发展。本书可作为高等院校工科专业及相关专业的教材，也可供从事热物理测试技术工作的工程技术人员参考。

现代热物理测试技术

黄素逸 周怀春 等 编著

清华大学出版社 地址：北京清华大学学研大厦A座 邮编：100084
http://www.tup.com.cn 电话：(010) 62770175

发行：清华大学出版社 电话：(010) 62770175
地址：北京清华大学学研大厦A座 邮编：100084

ISBN 978-7-302-16390-3
定价：48.00元

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

热物理测试技术是人们认识客观世界的一个重要手段,工业过程的控制、科学实验的实现、各种数学模型和数值计算结果的验证等都离不开测试技术。本书详细地介绍了现代热物理测试技术的各个方面,包括动态测量的基础、各种新的传感器、温度场的现代测试技术、激光测速技术、流动显示技术、烟气分析技术、热物性的测量、颗粒和液滴特性的测量、气液两相流的测试技术、数字图像处理及三维数据场的可视化。

本书由多个学校从事热物理测试技术的教师共同编写而成,取材新颖,内容丰富,既可作为全国动力工程领域工程硕士核心课程教材,以及高等学校相关学科研究生教材或教学参考书,也可供从事科学研究及测试工作的科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代热物理测试技术/黄素逸等编著. —北京:清华大学出版社,2008.3
(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)
ISBN 978-7-302-16590-3

I. 现… II. 黄… III. 热物理性质—测试技术—研究生—教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 189529 号

责任编辑:曾洁 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:北京市世界知识印刷厂

装订者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

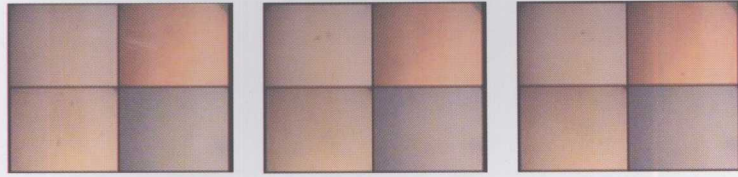
开 本:185×230 印 张:21.25 插 页:1 字 数:437 千字

版 次:2008年3月第1版 印 次:2008年3月第1次印刷

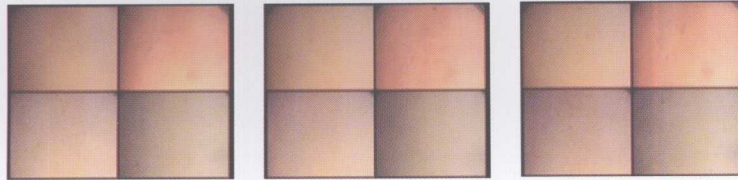
印 数:1~3000

定 价:45.00 元

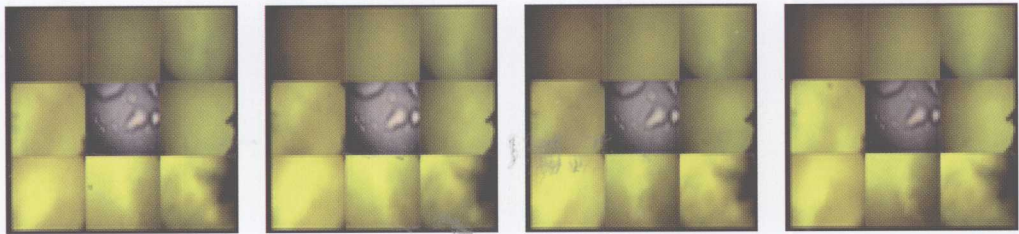
本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系
调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019623-01



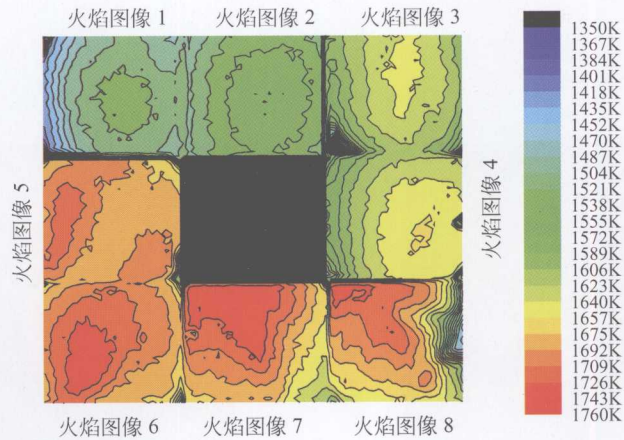
彩图 1



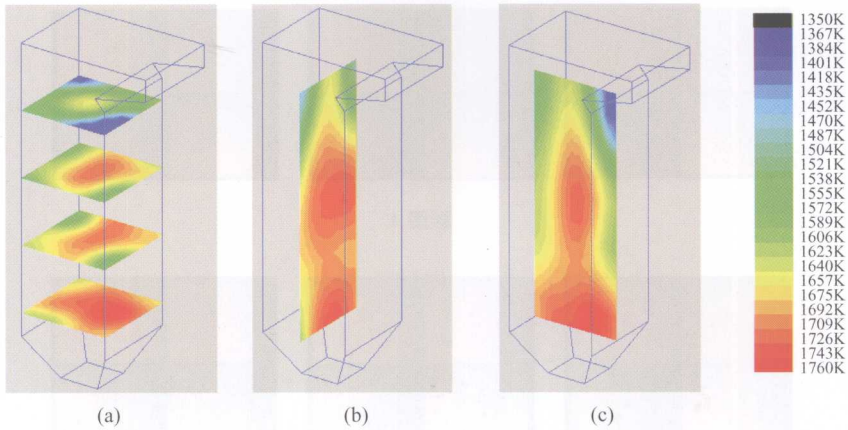
彩图 2



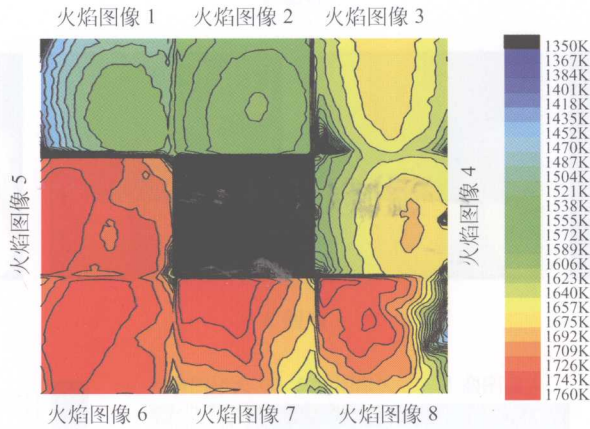
彩图 3



彩图 4



彩图 5



彩图 6



彩图 7



彩图 8

前言

进入 21 世纪,随着信息时代的来临,科学技术的发展更加迅速,热物理测试技术作为人们认识客观世界的一个重要手段也显得更加重要。不但工业过程要依靠各种先进的测量方法来实现自动控制,各种更为复杂的科学实验要通过测量提供可靠的数据,即使在计算机和计算科学迅猛发展的今天,各种数学模型和数值计算的结果也需要测量验证。

现代热物理测试技术的发展呈现以下特点:

(1) 在测试方法上,由接触测量向非接触测量发展。例如传统测温、测速方法都是接触式的,而近代的激光测速、激光测温都是非接触式的,这种非接触的测量方法,避免了传感器对被测物理量场的干扰,代表了当今测量技术的发展方向。

(2) 在测量的时间域上,由热物理量的静态测量发展为热物理量的动态测量。

(3) 在测量的空间域上,由被测物理量个别点的测量发展到整个热物理量场的测量。

(4) 在数据处理上,由被测数据的手工采集或仪表记录发展到计算机采集、储存与处理。

(5) 在测量的功能上,由单纯的测量发展到测量与控制相结合,又进一步发展为测量、控制、诊断及图像显示相结合。

由于计算机、激光、红外技术、系统分析技术、信号处理技术、图像处理技术大量应用于动力工程测试技术,为热物理量测试开辟了许多新的领域,注入了大量新的内容。因此,热物理测试技术已经突破了传统热工测试的模式,成为一个集热工测量、光学理论、信号分析、图像处理和计算机可视化等多学科交叉的综合技术。

本书详细地介绍了现代热物理测试技术的各个方面,包括动态测量的基础、各种新的传感器、温度场的现代测试技术、激光测速技术、流动显示技术、烟气分析技术、热物性的测量、颗粒和液滴特性的测量、气液两相流的测试技术、数字图像处理及三维数据场的可视化。

由于现代热物理测试技术涉及的面很广,本书是由多个学校从事热物理测试技术的教师共同编写而成。其取材新颖,内容丰富,作为全国工程硕士研究生教育核心教材建设工程的一部分。它既可作为全国动力工程领域工程硕士核心课程教材,以及高等学校相

Foreword

关学科研究生教材或教学参考书,也可供从事科学研究及测试工作的科技人员参考。

参加本书编写的有:华中科技大学黄素逸(第4章)、周怀春(第3章)、郑正泉(第1章)、吴刚(第5章)、黄晓明(第7章)、王晓墨(第8章)、龙妍(第10章);西安交通大学何茂刚(第2章);上海交通大学王德忠(第9章);中南民族大学王献(第6章)。全书由黄素逸统稿。

本书在编写过程中得到了全国工程硕士专业教育指导委员会及清华大学出版社的资助,在此表示衷心的感谢。

鉴于作者的学识和水平有限,不妥之处敬请指正。

黄素逸

2007年10月

目 录

第 1 章 动态测量基础	/1
1.1 测量系统的静态特性	1
1.2 测量系统的动态特性	4
1.3 测量系统的动态性能指标及其计算方法	8
1.4 测量系统的动态重复性与动态线性度	16
1.5 测量系统动态特性的标定	18
1.6 测量系统动态性能改进方法	21
1.7 动态误差及其修正方法	25
参考文献	26
第 2 章 现代传感器	/27
2.1 传感器基本知识	27
2.2 温度传感器	35
2.3 压力传感器	43
2.4 湿度传感器	51
2.5 气体传感器	57
2.6 流量传感器	63
2.7 转换器	70
参考文献	74
第 3 章 温度场测量技术	/75
3.1 温度测量概述	75
3.2 热成像技术	76

Contents

3.3	干涉测量技术	90
3.4	火焰图像处理测温技术	104
	参考文献	116
第4章 激光测速技术		/118
4.1	激光多普勒测速技术	119
4.2	激光双焦点测速技术	133
	参考文献	139
第5章 流动显示技术		/140
5.1	流动显示的基本理论	141
5.2	添加外来物的流动显示技术	145
5.3	流动的光学显示	156
5.4	附加热或能量的流动显示技术	162
	参考文献	167
第6章 烟气分析技术		/168
6.1	概述	168
6.2	色谱分析技术	173
6.3	质谱分析技术	183
6.4	红外光谱分析技术	193
6.5	烟气连续监测系统	200
	参考文献	205
第7章 热物理性质测试技术		/206
7.1	热物理性质测试技术概述	207
7.2	测量热物性的稳态法	212
7.3	测量热物性的非稳态法	219
7.4	量热计法测比热	233
7.5	实际气体 p - V - T 关系的测定	241
7.6	热物性测量技术新进展	244
	参考文献	248

第 8 章 气液两相流测试技术	/249
8.1 概述	249
8.2 气液两相流流型的识别	250
8.3 压降的测量	253
8.4 空泡率的测量	256
8.5 流量测量	259
8.6 管壁温度和临界热流工况的测量	266
8.7 管壁液膜厚度的测量	269
参考文献	272
第 9 章 颗粒和液滴特性的测量	/273
9.1 颗粒和液滴的特征	273
9.2 测量粒子特性的激光散射法	275
9.3 测量粒子的激光照相法	285
参考文献	293
第 10 章 数字图像处理与三维数据场的可视化	/294
10.1 数字图像处理基础	294
10.2 图像噪声	300
10.3 图像的采样和量化(整量)	307
10.4 彩色图像处理	312
10.5 科学计算可视化概述	317
10.6 三维数据场可视化的处理过程	322
10.7 温度场激光全息干涉层析的可视化	324
参考文献	332

第 1 章

动态测量基础

测量的质量在很大程度上取决于测量系统的特性,测量系统的特性通常可以分为静态特性和动态特性。在静态测量条件下,测量系统的输入量和输出量之间的对应关系称为系统的静态特性。测量系统的动态特性是在动态条件下,即输入信号为动态信号时,系统的响应特性,它是以测量动力学为基础的动态特性指标来衡量动态测量过程品质的。

实际上测量系统的静态特性也同样影响动态测量条件下的测量品质。然而,同时考虑静态特性的影响,将使描述测量系统动态关系的微分方程的求解变得非常复杂,因此在讨论测量系统的动态特性时,忽略摩擦、滞后、空隙等影响测量系统静态特性的因素,而测量系统的总的性能则由系统的静态特性和动态特性共同决定。

1.1 测量系统的静态特性

1.1.1 测量系统的基本静态特性

如果被测物理量是一个不随时间变化,或随时间变化缓慢的物理量,例如室温、大气压力、湿度等稳态量,则对于测量系统只需考虑其静态特性。

测量系统的基本静态特性,是指被测物理量和测量系统均处于稳定状态时,系统的输出量与输入量之间的函数关系。显然,如果该函数关系已知,则可由输出量求得被测的物理量(输入量)。通常对静态特性而言,输入量 x 和输出量 y 之间的关系可用下述代数方程来描述:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中,系数 a_0, a_1, \cdots, a_n 决定了测量系统输入-输出关系曲线的形状和位置,是决定测量

系统基本静态特性的参数。最理想的测量系统其静态特性曲线是线性的。

测量系统的基本静态特性可以通过对测量系统的静态标定来获得,即通过静态标定得到一组标定数据,然后通过曲线拟合的方法求得测量系统的基本静态特性曲线。

对于由若干测量设备组成的复杂测量系统,其基本静态特性则是诸测量设备静态特性的合成。例如对串联测量系统(见图 1-1),若各个设备的静态特性分别为: $y_1 = f(x)$, $y_2 = f(y_1)$, \dots , $y_n = f(y_{n-1})$, 则串联系统总的静态特性为

$$y_n = f_n \{ f_{n-1} \dots f_2 [f_1(x)] \} \quad (1-2)$$

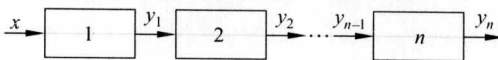


图 1-1 串联测量系统

若各测量设备均具有线性的静态特性,即 $y_1 = K_1 x$, $y_i = K_i y_{i-1}$, $i = 2, 3, \dots, n$, 则串联测量系统也具有线性静态特性:

$$y_n = \left(\prod_{i=1}^n K_i \right) x \quad (1-3)$$

依据同样的方法,对于并联测量系统、反馈测量系统等其他任何形式的测量系统,只要各组成部分的基本静态特性已知,就不难求得测量系统总的静态特性。

1.1.2 测量系统的静态性能指标

描述测量系统在静态测量条件下的测量品质的静态性能指标主要有如下几种。

1. 灵敏度

灵敏度是测量系统静态特性的一个基本参数。其定义为:当输入量变化很小时,测量系统输出量的变化 Δy 与引起这种变化的相应输入量的变化 Δx 之比。若用 S 表示灵敏度,则

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-4)$$

对于线性测量系统,其灵敏度是常量;而对于非线性测量系统,其灵敏度将随输入量的变化而变化。由于灵敏度对测量品质影响很大,所以一般测量系统或仪表均给出灵敏度值。

2. 分辨率

分辨率是与灵敏度有关的另一静态性能指标,它是指测量系统能够检测出被测量最小变化量的能力。在数字测量系统中,分辨率比灵敏度更为常用。

3. 量程

测量系统所能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围,称为该测量系统的量程。组成测量系统时正确选择仪表量程是十分重要的。通常使被测量落在系统量程的 $2/3 \sim 3/4$ 处为最佳。如果量程选择太小,被测量的值有可能超过测量量程而使系统因过载而受损;如果量程选择太大,则又会使测量精度下降。

4. 基本误差

测量系统的基本误差,是指在规定的标准条件下,用标准设备进行静态标定时,测量系统在全量程中所产生的最大绝对误差的绝对值与系统量程之比。如果用 R 表示基本误差,则

$$R = \frac{|\delta_{\max}|}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中, A 为系统量程; δ 为绝对误差。

5. 精确度

精确度表征某物理量的测定值与真实值的符合程度,简称精度。它反映测量时系统误差和随机误差的综合影响。一般常用基本误差不超过某一允许误差来表示精度,即允许误差去掉百分号之后的数值即为该测量系统或仪表的精度等级。

6. 迟滞误差

测量系统的输入量从量程下限增至量程上限的测量过程称为正行程;反之输入量从量程上限减至量程下限的测量过程称为反行程。理想测量系统的正、反行程的输入-输出关系曲线应是完全重合的。但实际测量系统对同一输入量,其正、反行程的输出量往往并不相等,这种现象称为迟滞。正、反行程造成的输出量之间的差值则称为迟滞差值。图 1-2 表示了这种迟滞现象和迟滞差值。全量程中的最大迟滞差值 ΔH_{\max} 与满量程输出值 Y_{\max} 之比,定义为测量系统的迟滞误差,记作

ξ_H ,即

$$\xi_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-6)$$

迟滞误差通常是由测量系统中的弹性元件、磁性元件等的滞后现象引起的,也可能起因于测量系统中存在的摩擦或间隙。迟滞误差又称为回差或变差。

7. 线性度

理想测量系统的输入-输出关系是线性的,但实际测量系统并非如此(见图 1-2)。测量系统的

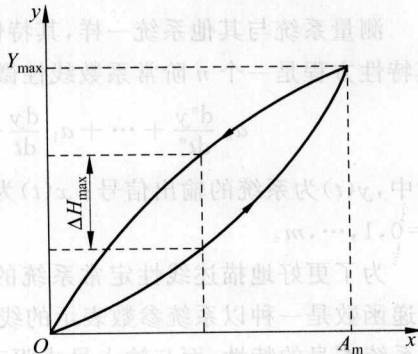


图 1-2 迟滞误差

线性度,是全程范围内的实际特性曲线与理想特性曲线之间的最大偏差值 ΔL_{\max} 与满量程输出值 Y_{\max} 之比,它反映实际特性曲线与理想特性曲线之间的符合程度。线性度也称为非线性误差,记作 ξ_L ,即

$$\xi_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-7)$$

8. 温度漂移

工作环境温度会对测量系统的特性产生影响。因环境温度变化所引起的测量系统输出量的变化称为温度漂移,通常用环境温度偏离标准温度(一般为 20°C)时的输出值与环境温度下的输出值之差,与温度变化率之比来表示,记作 ξ_t ,即

$$\xi_t = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

式中, Δt 为测量系统环境温度 t 与标准温度 (20°C) 之差值; y_t 为环境温度 t 时系统的输出; y_{20} 为标准温度 (20°C) 下系统的输出。

温度漂移对测量系统静态特性的影响主要表现为:

- (1) 使静态特性曲线平移,但斜率不变。这种影响称为热零点漂移或温度零点漂移。
- (2) 使静态特性曲线斜率变化。这种影响称为热灵敏度漂移或温度灵敏度漂移。

1.2 测量系统的动态特性

1.2.1 连续系统的特性方程及其响应

1. 连续系统数学模型及传递函数的一般表达式

测量系统与其他系统一样,其特性可用微分方程来描述。对于一个线性、定常系统,其特性方程是一个 n 阶常系数线性微分方程,其一般形式为

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

式中, $y(t)$ 为系统的输出信号; $x(t)$ 为系统的输入信号; a_i, b_j 为常数, $i=0, 1, \dots, n$, 而 $j=0, 1, \dots, m$ 。

为了更好地描述线性定常系统的输入与输出的关系,人们引入了传递函数的概念。传递函数是一种以系统参数表示的线性定常系统的输入量与输出量之间的关系,它表达了系统本身的特性,而与输入量或驱动函数无关。从数学上讲,传递函数定义为初始条件为零时,输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。因此对于上述线性定常系统,其传

递函数的一般表达式为

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0} \quad (1-10)$$

传递函数是研究线性系统动态特性的重要工具,利用这一工具可以大大简化系统动态性能的分析。例如,已知系统的传递函数 $W(S)$,则任意输入量的像函数乘上传递函数,就得到输出量的像函数,经查表求得拉氏反变换后,即可直接得出输出量。即由式(1-10)有

$$y(t) = L^{-1}[Y(S)] = L^{-1}[W(S)X(S)] \quad (1-11)$$

利用传递函数还有助于确定测量系统总的动态特性。通常测量系统总是由若干测量环节组成,各测量环节则按一定的信号传递方式联接。虽然各测量环节的信号联接方式多种多样,但其典型的联接方式只有串联、并联和反馈联接。掌握这几种典型联接方式下传递函数的综合求解方法,即可求得各种复杂系统的总传递函数,这对分析测量系统的动态特性是极为重要的。值得注意的是,这里所讲的环节联接是指环节之间的信号传递关系,而不是指各个测量元件之间结构上的联接。

2. 系统环节之间的信号传递关系

1) 环节的串联

环节的串联如图 1-3 所示。其特点是前一环节的输出信号是后一环节的输入信号,任何一个环节的输出信号均对以前各个环节无任何反作用。

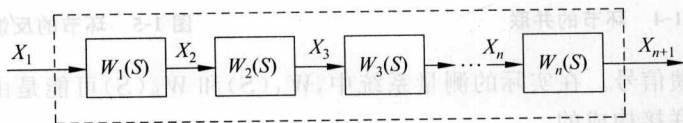


图 1-3 环节的串联

设各串联环节的传递函数分别为 $W_1(S), W_2(S), W_3(S), \dots, W_n(S)$,则整个串联环节的传递函数 $W(S)$ 应为

$$\begin{aligned} W(S) &= \frac{X_{n+1}(S)}{X_1(S)} = \frac{X_2(S)}{X_1(S)} \cdot \frac{X_3(S)}{X_2(S)} \cdot \frac{X_4(S)}{X_3(S)} \dots \frac{X_{n+1}(S)}{X_n(S)} \\ &= W_1(S)W_2(S)W_3(S) \dots W_n(S) \end{aligned} \quad (1-12)$$

因此,若干个环节串联后,总的传递函数等于各个环节传递函数之积。

2) 环节的并联

环节的并联如图 1-4 所示。其特点是一个信号 X 同时送入各环节的输入端,各个环节输出信号之和 Y 为总的输出信号。如果各个并联环节的传递函数分别为 $W_1(S), W_2(S), \dots, W_n(S)$,则总并联环节的传递函数为

$$\begin{aligned}
 W(S) &= \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{Y_1(S) + Y_2(S) + \cdots + Y_n(S)}{X(S)} \\
 &= W_1(S) + W_2(S) + \cdots + W_n(S)
 \end{aligned}
 \quad (1-13)$$

因此,若干个环节并联后,总的传递函数等于各个环节传递函数之和。

3) 环节的反馈联接

环节的反馈联接如图 1-5 所示。其特点是两个环节首尾互相联接形成一个闭合回路,其外部输入信号为 X_1 , 输出信号为 Y 。其中 $W_A(S)$ 为正向环节, 它接受输入信号 X_1 并产生输出信号 Y ; $W_B(S)$ 为反馈环节, 它以 Y 为输入信号并将输出信号 X_2 送至正向环节的输入端。

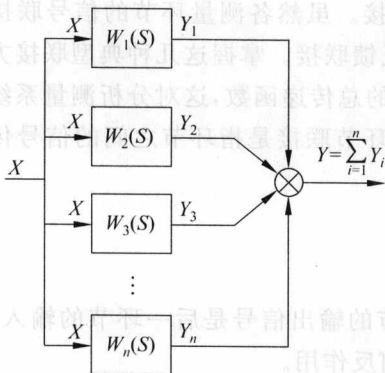


图 1-4 环节的并联

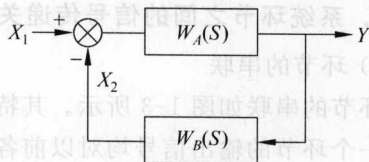


图 1-5 环节的反馈联接

X_2 称为反馈信号。在实际的测量系统中, $W_A(S)$ 和 $W_B(S)$ 可能是由若干个环节串联、并联或反馈联接构成的。

根据反馈信号 X_2 和输入信号 X_1 的叠加方式可将反馈联接分为正反馈和负反馈。正反馈是输入信号和反馈信号相加后再送入正向环节, 它对输入信号起放大作用; 负反馈是输入信号和反馈信号相减后再送入正向环节, 它对输入信号起抑制作用。

在负反馈的情况下, 很容易从图 1-5 中导出

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X_1(S)} = \frac{W_A(S)}{1 + W_A(S)W_B(S)} \quad (1-14)$$

对于正反馈则有

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X_1(S)} = \frac{W_A(S)}{1 - W_A(S)W_B(S)} \quad (1-15)$$

1.2.2 典型测量系统的动态特性

大多数测量系统的动态特性都可归属于零阶、一阶和二阶系统。尽管实际上存在着