

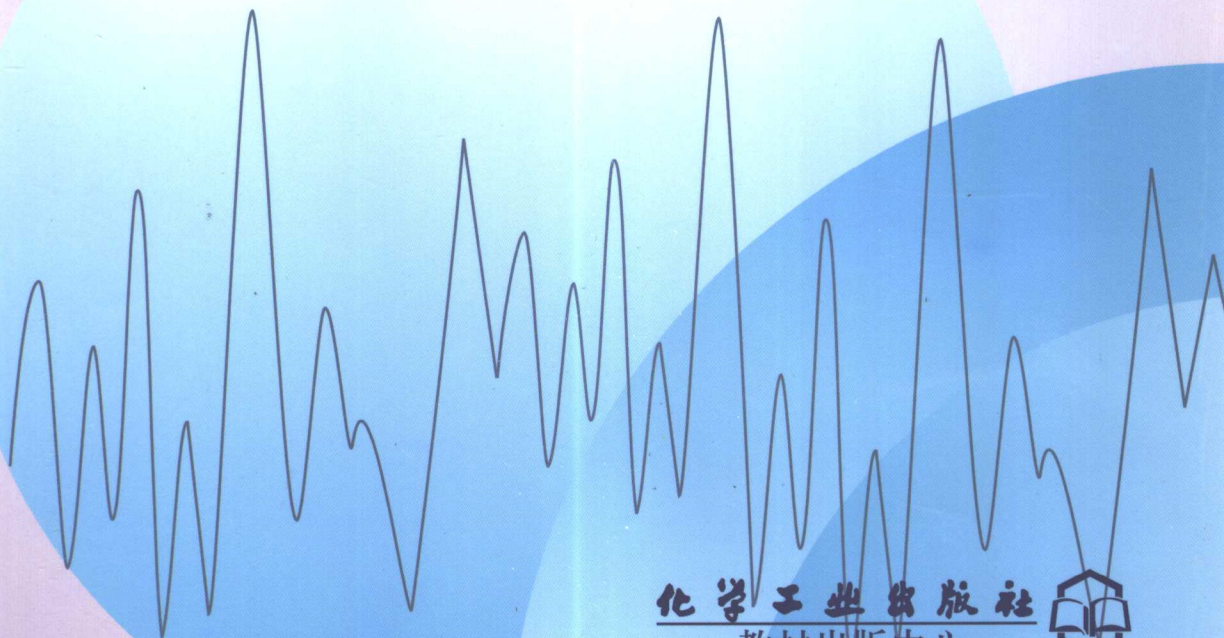


面向21世纪课程教材

# 自动检测技术及

# 仪表控制系统

张宝芬 张毅 曹丽 编著



化学工业出版社  
教材出版中心



面向 21 世纪课程教材

# 自动检测技术及 仪表控制系统

张宝芬 张毅 曹丽 编著

化学工业出版社  
教材出版中心  
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测技术及仪表控制系统/张宝芬, 张毅, 曹丽  
编著. —北京: 化学工业出版社, 2000.11  
面向 21 世纪课程教材  
ISBN 7-5025-2808-3

I. 自… II. ①张…②张…③曹… III. ①自动化仪  
表: 检测仪表-高等学校-教材②自动检测-高等学校-教材  
IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 75197 号

---

面向 21 世纪课程教材  
**自动检测技术及仪表控制系统**  
张宝芬 张毅 曹丽 编著  
责任编辑: 唐旭华  
责任校对: 顾淑云  
封面设计: 蒋艳君

\*  
化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982511  
<http://www.cip.com.cn>

\*  
新华书店北京发行所经销  
化学工业出版社印刷厂印刷  
三河市东柳装订厂装订  
开本 787×960 毫米 1/16 印张 20 1/4 字数 357 千字  
2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷  
印数: 1—4000  
ISBN 7-5025-2808-3/G·727  
定 价: 28.00 元

---

版权所有 违者必究  
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

本书是有关过程参数检测和自动化仪表系统的基础理论和应用技术的教材。

工业控制系统中的检测技术和仪表系统是实现自动控制的基础。随着新技术的不断涌现，特别是先进检测技术、现代传感器技术、计算机技术、网络技术和多媒体技术的出现，这给传统检测技术及仪表系统带来了新的变化，并由此引出许多发展，这些发展包括多传感器的复合检测、微机械量检测技术、检测信息的融合处理技术、智能传感器和仪表的发展、计算机多媒体化的虚拟仪表以及各种检测单元和仪表单元的网络化产品。

如何促进各种新技术发展所带来的检测技术和仪表系统的变化，以适应新技术的挑战，并适应当今自动化技术发展的需要，是目前亟待解决的关键问题。经过我们多年的教学发现，从一个新的角度，即从系统的角度出发，重新分析和组织过去相对独立的知识，并将新技术的发展系统地、有机地融合进去，将有利于过程检测和仪表系统的教学效果。

为此，本书从包含有参数检测和仪表控制的常规控制系统入手，总结出了具有一定代表意义的典型检测仪表控制系统，作为组织全书内容的线索，并在此基础上展开相关理论、技术和方法的分析和阐述。

与传统的分析方法、内容组织和理论体系相比，本书除继续强调检测技术和仪表系统中的常规理论、方法和应用外，在检测技术方面，还重点突出了对各种检测方法的系统性分析和总结，并结合新技术发展的需要，阐述了多元化检测技术和检测信息融合技术的应用；在仪表所构成的控制系统方面，重点从控制系统的角度出发，系统地分析了仪表系统的建模、时频域分析以及混合仪表系统的特性。此外，还以组成控制系统的基本单元即检测和仪表单元为基点，论述了由检测和仪表单元所构成的控制系统的整体性能，这些系统包括计算机仪表控制系统和近年来发展起来的现场总线控制系统。

综上所述，本书所具有的主要特点可概括为：

(1) 从控制系统的需求出发，突出系统的概念，论述检测技术和仪表系

统在整个控制系统中的原理和作用；

(2) 注重理论分析和实例解剖，强调功能解释，减弱实用电路描述，注意结合实际分析系统的性能和应用；

(3) 把检测技术和仪表系统模块化、模型化，并加上适当的数学分析，突出课程的理论体系；

(4) 在教材中注意引入新的科研成果，以适应当代技术发展趋势。

本教材可满足自动化及相关专业的本科生、研究生和相关的工程技术人员需要。

全书分为四篇。第一篇介绍检测和仪表的基本知识；第二篇介绍温度、压力、流量、物位、机械量、成分分析等过程参数检测技术；第三篇介绍并分析仪表系统中的变送、显示、调节和执行等单元；第四篇分析和讨论由仪表构成的计算机控制系统和现场总线控制系统的相关技术及其发展趋势。

本书由清华大学自动化系张宝芬教授、张毅副教授、曹丽副教授编著，金以慧教授、王俊杰教授主审。其中第一章及第三、四篇由张毅执笔；第二、三、八章由曹丽执笔；第四、五、六、七、九章由张宝芬执笔。

限于作者水平和能力，本书的不足或不妥之处希望得到读者的批评指正。

作者

2000年8月于清华园

## 内 容 提 要

本书是有关过程参数检测和自动化仪表系统的基础理论和应用技术教材。

全书分为四篇共 16 章。第一篇中第 1、2 章介绍检测和仪表的基本知识及误差分析方法；第二篇中第 3 章介绍检测技术基本方法，第 4 章至第 9 章分别介绍温度、压力、流量、物位、机械量、成分分析等参数的检测方法；第三篇中第 10 章介绍自动化仪表特性及发展，第 11 章至第 14 章分别介绍仪表系统中的变送、显示、调节和执行等单元；第四篇中第 15 章至第 16 章分析和讨论由仪表构成的计算机控制系统和现场总线控制系统的相关技术及其发展趋势。

本书作为高校自动化及相关专业的本科生教材，亦可满足相关研究生和工程技术人员的需要。

# 目 录

## 第一篇 基础知识引论

1. 绪论 .....	1
1.1. 检测仪表控制系统 .....	1
1.1.1. 典型检测仪表控制系统 .....	1
1.1.2. 检测仪表控制系统结构分析 .....	2
1.2. 基本概念 .....	4
1.2.1. 测量范围、上下限及量程 .....	4
1.2.2. 零点迁移和量程迁移 .....	4
1.2.3. 灵敏度和分辨率 .....	5
1.2.4. 误差 .....	5
1.2.5. 精确度 .....	6
1.2.6. 滞环、死区和回差 .....	7
1.2.7. 重复性和再现性 .....	8
1.2.8. 可靠性 .....	8
1.3. 检测仪表技术发展趋势 .....	9
思考题与习题 .....	9
2. 误差分析基础 .....	11
2.1. 检测精度 .....	11
2.2. 误差分析的基本概念 .....	11
2.2.1. 真值、测量值与误差的关系 .....	11
2.2.2. 几种误差的定义 .....	12
2.2.3. 测量的准确度与精密度 .....	12
2.3. 误差原因分析 .....	13
2.4. 误差分类 .....	13
2.5. 误差的统计处理 .....	14
2.5.1. 随机误差概率及概率密度函数的性质 .....	14
2.5.2. 正态分布函数及其特征点 .....	15
2.5.3. 置信区间与置信概率 .....	16

2.6. 误差传递法则 .....	17
2.6.1. 误差传递法则 .....	17
2.6.2. 不等精度测量的加权及其误差 .....	18
2.7. 误差估计 .....	19
2.7.1. 平均值的误差表示方法 .....	19
2.7.2. 平均值与标准偏差的无偏估计 .....	19
2.7.3. 测量次数少的误差估计 .....	20
2.8. 粗大误差检验 .....	20
2.9. 最小二乘法及其应用 .....	21
2.9.1. 最小二乘法原理 .....	21
2.9.2. 最小二乘法在多元间接检测中的应用 .....	21
2.9.3. 最小二乘法在曲线拟合中的应用 .....	23
思考题与习题 .....	24
<b>3. 检测技术及方法分析 .....</b>	<b>25</b>
3.1. 检测方法及其基本概念 .....	26
3.1.1. 开环型检测与闭环型检测 .....	26
3.1.2. 直接检测与间接检测 .....	26
3.1.3. 绝对检测与比较检测 .....	27
3.1.4. 偏差法与零位法 .....	27
3.1.5. 强度变量检测与容量变量检测 .....	27
3.1.6. 微差法 .....	28
3.1.7. 替换法 .....	28
3.1.8. 能量变换与能量控制型检测元件 .....	28
3.1.9. 主动探索与信息反馈型检测 .....	29
3.2. 检测系统模型与结构分析 .....	29
3.2.1. 检测系统的基本功能 .....	29
3.2.2. 信号转换模型与信号选择性 .....	29
3.2.3. 检测系统的结构分析 .....	30
3.3. 提高检测精度的方法 .....	33
3.3.1. 时域信号选择方法 .....	33
3.3.2. 频域信号选择方法 .....	33
3.4. 多元化检测技术 .....	35
3.4.1. 多元检测与检测方程式 .....	36
3.4.2. 多元复合检测 .....	36



3.4.3. 多元识别检测 .....	37
3.4.4. 多传感器融合的概念 .....	39
3.4.5. 构造化检测 .....	39
3.4.6. 多点时空检测 .....	39
思考题与习题 .....	41

## 第二篇 过程参数检测技术

<b>4. 温度检测</b> .....	42
4.1. 测温方法及温标 .....	42
4.1.1. 测温原理及方法 .....	42
4.1.2. 温标 .....	42
4.2. 接触式测温 .....	45
4.2.1. 热电偶测温 .....	45
4.2.2. 热电阻测温 .....	52
4.2.3. 集成温度传感器 .....	57
4.3. 非接触式测温 .....	57
4.3.1. 辐射测温原理 .....	58
4.3.2. 辐射测温仪表的基本组成及常用方法 .....	58
4.3.3. 辐射测温仪表 .....	59
4.3.4. 辐射测温仪表的表观温度 .....	61
4.4. 光纤温度传感器 .....	62
4.4.1. 液晶光纤温度传感器 .....	63
4.4.2. 荧光光纤温度传感器 .....	63
4.4.3. 半导体光纤温度传感器 .....	63
4.4.4. 光纤辐射温度计 .....	64
4.5. 测温实例 .....	64
4.5.1. 管道内流体温度的测量 .....	64
4.5.2. 烟道中烟气温度的测量 .....	65
4.5.3. 非接触法测量物体表面温度 .....	66
思考题与习题 .....	66
<b>5. 压力检测</b> .....	67
5.1. 压力单位及压力检测方法 .....	67
5.1.1. 压力的单位 .....	67
5.1.2. 压力的几种表示方法 .....	68

5.1.3. 压力检测的主要方法及分类 .....	68
5.2. 常用压力检测仪表 .....	69
5.2.1. 弹性压力计 .....	69
5.2.2. 力平衡式压力计 .....	73
5.2.3. 压力传感器 .....	74
5.3. 测压仪表的使用及压力检测系统 .....	79
5.3.1. 测压仪表的使用 .....	79
5.3.2. 压力检测系统 .....	80
思考题与习题 .....	82
<b>6. 流量检测</b> .....	<b>84</b>
6.1. 流量检测基本概念 .....	84
6.1.1. 流量的概念和单位 .....	84
6.1.2. 流量检测方法 & 流量计分类 .....	85
6.2. 体积流量检测方法 .....	86
6.2.1. 容积式流量计 .....	86
6.2.2. 差压式流量计 .....	89
6.2.3. 速度式流量计 .....	100
6.3. 质量流量检测方法 .....	105
6.3.1. 间接式质量流量测量方法 .....	106
6.3.2. 直接式质量流量计 .....	106
6.4. 流量标准装置 .....	110
6.4.1. 液体流量标准装置 .....	110
6.4.2. 气体流量标准装置 .....	112
思考题与习题 .....	112
<b>7. 物位检测</b> .....	<b>114</b>
7.1. 物位的定义及物位检测仪表的分类 .....	114
7.1.1. 物位的定义 .....	114
7.1.2. 物位检测仪表的分类 .....	114
7.2. 常用物位检测仪表 .....	115
7.2.1. 静压式液位检测仪表 .....	115
7.2.2. 浮力式物位检测仪表 .....	117
7.2.3. 其他物位测量仪表 .....	120
7.3. 影响物位测量的因素 .....	125
7.3.1. 液位测量的特点 .....	125

7.3.2. 料位测量的特点 .....	125
7.3.3. 界位测量的特点 .....	126
思考题与习题 .....	126
<b>8. 机械量检测 .....</b>	<b>127</b>
8.1. 模拟式位移检测 .....	127
8.1.1. 电容式位移检测方法 .....	127
8.1.2. 电感式位移检测方法 .....	129
8.1.3. 差动变压器位移检测方法 .....	130
8.1.4. 光纤位移检测方法 .....	131
8.2. 光学数字式位移检测 .....	131
8.2.1. 光栅标尺 .....	131
8.2.2. 莫尔条纹标尺 .....	132
8.2.3. 激光扫描测长与图像检测 .....	132
8.3. 转速检测 .....	133
8.3.1. 离心力检测法 .....	133
8.3.2. 光电码盘转速检测法 .....	134
8.3.3. 空间滤波器式检测法 .....	135
8.4. 力的检测方法 .....	136
8.4.1. 金属应变元件 .....	136
8.4.2. 半导体应变元件 .....	137
8.4.3. 压电效应 .....	138
8.4.4. 压敏导电橡胶 .....	138
8.5. 加速度与振动检测 .....	139
8.5.1. 加速度检测原理 .....	139
8.5.2. 动电型振动检测方法 .....	141
8.5.3. 微机械加速度传感元件 .....	142
思考题与习题 .....	143
<b>9. 成分分析仪表 .....</b>	<b>144</b>
9.1. 成分分析方法及分析系统的构成 .....	144
9.1.1. 成分分析方法及分类 .....	144
9.1.2. 自动分析系统的构成 .....	144
9.2. 几种工业用成分分析仪表 .....	145
9.2.1. 热导式气体分析器 .....	145
9.2.2. 红外线气体分析器 .....	147

9.2.3. 氧化锆氧分析器 .....	149
9.2.4. 气相色谱仪 .....	151
9.2.5. 半导体气敏传感器 .....	154
9.2.6. 工业酸度计 .....	158
9.3. 湿度的检测 .....	161
9.3.1. 湿度的表示方法及湿度检测的特点 .....	161
9.3.2. 干湿球湿度计 .....	161
9.3.3. 电解质系湿敏传感器 .....	162
9.3.4. 陶瓷湿敏传感器 .....	162
9.3.5. 高分子聚合物湿敏传感器 .....	163
思考题与习题 .....	164

### 第三篇 仪表系统分析

10. 仪表系统及其理论分析 .....	165
10.1. 仪表发展概况 .....	165
10.2. 常用仪表分类及特性 .....	166
10.2.1. 常用仪表分类 .....	166
10.2.2. 电动单元组合仪表及 DDZ-Ⅱ型和 DDZ-Ⅲ型仪表比较 .....	168
10.3. 仪表输入输出静态特性分析 .....	169
10.3.1. 输入输出特性分析 .....	169
10.3.2. 仪表特性线性化处理分析 .....	170
10.4. 仪表系统建模 .....	171
10.4.1. 时域模型 .....	172
10.4.2. 频域模型 .....	173
10.4.3. 离散模型 .....	174
10.5. 仪表系统时域分析 .....	175
10.5.1. 时域分析指标 .....	175
10.5.2. 阶跃扰动动态特性分析 .....	176
10.5.3. 等速扰动动态特性分析 .....	177
10.6. 仪表系统频域分析 .....	178
10.6.1. 正弦扰动动态特性分析 .....	178
10.6.2. 频率响应 Bode 图分析 .....	179
10.6.3. 频带分析 .....	180
10.7. 混合仪表系统浅析 .....	181

10.7.1. 混合仪表系统建模 .....	182
10.7.2. 时域分析 .....	183
10.7.3. 频域分析 .....	183
思考题与习题 .....	184
<b>11. 变送单元 .....</b>	<b>185</b>
11.1. 常用变送器工作原理 .....	185
11.1.1. 常用变送器结构分析 .....	185
11.1.2. 力矩平衡式原理 .....	186
11.1.3. 桥式电路原理 .....	187
11.1.4. 差动方式原理 .....	188
11.2. 典型差压变送器 .....	189
11.2.1. DDZ-Ⅱ型差压变送器 .....	189
11.2.2. DDZ-Ⅲ型差压变送器 .....	191
11.2.3. 差动电容式差压变送器 .....	194
11.3. 典型温度变送器 .....	196
11.3.1. DDZ-Ⅱ型温度变送器 .....	196
11.3.2. DDZ-Ⅲ型温度变送器 .....	199
11.4. 新型变送器浅析 .....	203
11.4.1. 新型变送器发展趋势 .....	203
11.4.2. 微电子式变送器 .....	204
11.4.3. 数字式变送器 .....	206
思考题与习题 .....	207
<b>12. 显示单元 .....</b>	<b>208</b>
12.1. 显示仪表工作原理 .....	208
12.1.1. 显示仪表结构分析 .....	208
12.1.2. 电位差计式自动平衡原理 .....	209
12.1.3. 电桥式自动平衡原理 .....	210
12.1.4. 差动变压器式自动平衡原理 .....	210
12.2. 传统显示及记录仪表 .....	211
12.2.1. 电位差计式自动平衡显示仪表 .....	211
12.2.2. 电桥式自动平衡显示仪表 .....	215
12.3. 数字式显示及记录仪表分析 .....	220
12.3.1. 数字模拟混合记录仪 .....	220
12.3.2. 全数字式记录仪 .....	222

12.4. 现代显示仪表浅析 .....	223
12.4.1. 现代显示仪表发展趋势 .....	223
12.4.2. 虚拟显示及记录仪表 .....	224
思考题与习题 .....	225
<b>13. 调节控制单元 .....</b>	<b>226</b>
13.1. 常规控制规律 .....	226
13.1.1. 典型控制系统 .....	226
13.1.2. 基本控制规律 .....	227
13.1.3. 常规控制规律 .....	229
13.1.4. 实用PID控制规律的构成 .....	231
13.2. 调节器控制规律的实现 .....	235
13.2.1. DDZ-Ⅱ型调节器PID控制规律的实现 .....	235
13.2.2. DDZ-Ⅲ型调节器PID控制规律的实现 .....	237
13.2.3. 数字式调节器控制规律的实现 .....	242
13.3. 常规调节器基本电路分析 .....	245
13.3.1. DDZ-Ⅱ型调节器基本电路分析 .....	245
13.3.2. DDZ-Ⅲ型调节器基本电路分析 .....	246
13.3.3. 数字式调节器基本电路分析 .....	247
13.4. 可编程序调节器 .....	250
13.4.1. 可编程序调节器的工作原理 .....	250
13.4.2. 程序控制规律的构成和实现 .....	252
13.5. 先进调节器浅析 .....	254
13.5.1. 增强型PID控制规律分析 .....	254
13.5.2. 改进型PID控制算法 .....	256
13.5.3. 虚拟调节仪表发展趋势 .....	258
思考题与习题 .....	259
<b>14. 执行单元 .....</b>	<b>261</b>
14.1. 执行器工作原理 .....	261
14.1.1. 执行器分类与比较 .....	261
14.1.2. 执行器基本构成及工作原理 .....	262
14.2. 气动执行器 .....	262
14.2.1. 气动执行器基本构成 .....	262
14.2.2. 阀门定位器 .....	264
14.3. 电动执行器 .....	265

14.4. 调节阀 .....	266
14.4.1. 调节阀工作原理 .....	266
14.4.2. 调节阀结构及分类 .....	267
14.4.3. 调节阀的流量特性 .....	270
14.4.4. 调节阀的流量系数 .....	271
思考题与习题 .....	272

#### 第四篇 系统控制技术

<b>15. 计算机仪表控制系统 .....</b>	<b>273</b>
15.1. 仪表控制系统 .....	273
15.1.1. 闭环回路控制系统 .....	273
15.1.2. 闭环回路连续特性分析 .....	274
15.1.3. 闭环回路数字化离散分析 .....	275
15.1.4. 闭环回路控制系统网络化分析 .....	276
15.2. 计算机控制系统 .....	278
15.2.1. 计算机控制系统的发展和评价 .....	278
15.2.2. 集中控制系统 .....	279
15.2.3. 集散控制系统 .....	280
15.2.4. 分布式控制系统 .....	281
15.3. 计算机控制系统发展趋势 .....	282
15.3.1. 控制系统的控制网络化 .....	282
15.3.2. 控制系统的系统扁平化 .....	284
思考题与习题 .....	286
<b>16. 现场总线控制系统 .....</b>	<b>287</b>
16.1. 现场总线控制系统的发展 .....	287
16.1.1. 现场总线的产生 .....	287
16.1.2. 现场总线系统的发展过程 .....	288
16.1.3. 底层总线系统 .....	289
16.1.4. 现场总线控制系统特征 .....	290
16.2. 主要现场总线系统 .....	291
16.2.1. CAN 总线系统 .....	291
16.2.2. LonWorks 总线系统 .....	293
16.2.3. ProfiBus 总线系统 .....	295
16.2.4. FF 总线系统 .....	297

16.3. 现场总线控制系统 .....	298
16.3.1. 现场总线单元设备 .....	298
16.3.2. 现场总线控制系统结构 .....	300
16.3.3. 现场总线系统集成与扩展 .....	302
16.4. 现场总线控制系统发展趋势 .....	305
16.4.1. 控制系统的组织重构化 .....	305
16.4.2. 控制系统的工作协调化 .....	306
思考题与习题 .....	307
参考文献 .....	308



# 第一篇 基础知识引论

## 1. 绪 论

任何一个工业控制系统都必然要应用一定的检测技术和相应的仪表单元，检测技术和仪表两部分是紧密相关和相辅相成的，它们是控制系统的重要基础。检测单元完成对各种过程参数的测量，并实现必要的数据处理；仪表单元则是实现各种控制作用的手段和条件，它将检测得到的数据进行运算处理，并通过相应的单元实现对被控变量的调节。新技术的不断出现，使传统的自动控制系统以及相关的检测和仪表技术都发生了很大变化。

据此，本书的编排以典型工业仪表控制系统为主线，阐述相关的理论和知识。围绕该主线，全书分别就检测技术和仪表系统两大部分进行讨论，并在此基础上分析了各种仪表系统控制技术。

本章从分析典型的工业检测仪表控制系统入手，给出了常规检测仪表控制系统的组成及结构，并介绍有关检测和仪表相关技术必需的基本概念和名词术语。

### 1.1. 检测仪表控制系统

#### 1.1.1. 典型检测仪表控制系统

典型的检测仪表控制系统，以化学工业中用天然气做原料生产合成氨的控制系统为例，此系统如图 1-1 所示为脱硫塔控制流程图。天然气在经过脱硫塔时，需要进行控制的参数分别为压力、液位和流量，这将构成 (PC)、(LC) 和 (FC) 三个单参数调节控制系统。

例如实现脱硫塔压力调节控制的单参数控制子系统 (PC)，该系统的结构框图如图 1-2 所示，进行压力参数检测

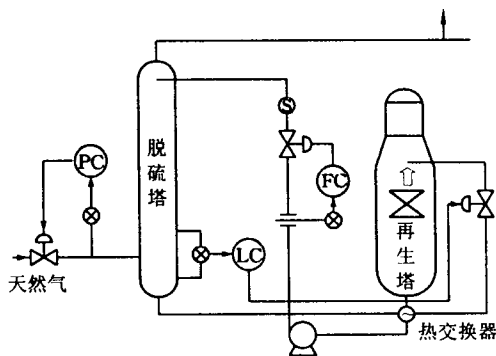


图 1-1 脱硫塔控制流程图