

化 学 工 业 信 息 化 丛 书

化工过程 控制系统

鲁明休 罗 安 主编



化学工业出版社

化 学 工 业 信 息 化 丛 书

化工过程 控制系统

鲁明休 罗 安 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是《化学工业信息化丛书》之一,分10章介绍过程控制形成简史、体系和控制系统各级的结构要素,在此基础上分别对DCS、PLC(包括安全仪表系统SIS)、现场总线FCS控制系统、基于PC机的控制系统和SCADA进行系统性说明,第10章阐述如何按照需要逐步实现具体工程项目的过程,具有实用性。

本书可供石化企业的信息化工作者、管理者以及企业领导者参考使用,也可兼作与信息化相关的管理及计算机专业的研究生、本科生的参考书,以及各类信息化认证考试的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程控制系统/鲁明休,罗安主编. —北京:化学工业出版社,2006.7

(化学工业信息化丛书)

ISBN 7-5025-9113-3

I. 化… II. ①鲁…②罗… III. 化工过程-过程控制-控制系统 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第083921号

化学工业信息化丛书

化工过程控制系统

鲁明休 罗安 主编

责任编辑:戴燕红

文字编辑:贾婷

责任校对:凌亚男

封面设计:关飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数520千字

2006年9月第1版 2006年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9113-3

定价:48.00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

化学工业信息化丛书编委会

- 名誉主编:** 成思危 全国人大常委会副委员长
- 主 编:** 曹湘洪 中国工程院院士、中国化工学会理事长
- 副主编:** 杨友麒 中国化工学会信息技术应用专业委员会秘书长 教授级高工
张志橦 中国石油化工股份公司信息管理部原副主任 教授级高工
- 编 委:** 陈丙珍 清华大学化工系 中国工程院院士、教授
麻德贤 北京化工大学 教授、博导
朱群雄 北京化工大学信息科学与技术学院院长 教授
韩方煜 青岛科技大学计算机与化工研究所所长 教授
温 浩 中科院过程工程研究所室主任 研究员
钱 宇 华南理工大学化工学院院长 教授
金以慧 清华大学自动化系 教授
黄德先 清华大学自动化系 研究员
郭锦标 中石化石油化工科学研究院副总工程师 教授级高工
李德芳 中国石油化工股份公司信息管理部主任 教授级高工
齐学忠 中国石油化工股份公司信息管理部主任 教授级高工
李剑峰 中国石化勘探开发研究院副总工兼南京石油物探研究所所长
教授级高工
- 古学进 中国石油天然气股份有限公司信息管理部副总经理 教授级高工
张 昆 中国石油天然气集团公司大庆石化总厂计算机开发公司总经理 高工
- 特邀编委:** 刘裔安教授 (美国 Virginia Tech 大学)
刘有鸿博士 (INVENSYS)
陶兴文博士 (Honeywell)
黄志明博士 (AspenTech)
张雪峰博士 (SAP)
陈 雷经理 (IBM 中国有限公司)
王立行教授级高工 (石化盈科)

总 序

在《化学工业信息化丛书》编委会、中国化工学会秘书处与信息技术应用专业委员会、化学工业出版社以及各位作者和有关部门的共同努力下,历时三年,该《丛书》问世了。我仅以中国化工学会和丛书编委会的名义,对丛书的出版问世表示热烈祝贺!

三年前,我们开始策划出版该套丛书。根据以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走新型工业发展道路的战略思想,中国化工学会信息技术应用专业委员会建议,利用专业委员会在化工信息技术应用领域的代表性和权威性,调动专业委员会内部力量与社会外部力量,尽快编写出一套化工信息化丛书。主要着眼点是总结国内外石油、石化、化工行业信息技术应用的经验,梳理其成长的轨迹,介绍其主流的技术,推荐其优秀的案例,展望其发展的未来,以满足广大石油、石化、化工领域技术工人、工程技术人员和领导干部从事信息化建设的需要,促进、推动在石油、石化、化工行业方兴未艾的企业信息化建设的科学、和谐与健康发展。

本丛书包括《企业信息化组织与管理》、《化工过程控制系统》、《化工过程模拟与优化》、《化工企业资源计划系统 ERP》、《化工生产执行系统 MES》、《化工过程先进控制》、《化工生产计划与调度优化》、《化工实验室信息管理系统 LIMS》和《数字油田》9 个分册。

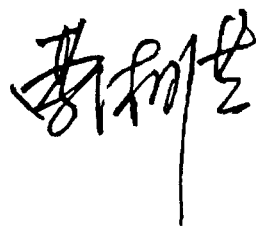
该套丛书的编写,采用了开放的模式,石油、石化、化工行业的信息技术应用专家、科研院所和高等院校的学者和教授,以及国外知名信息技术公司的高层技术主管“三结合”,参与书稿的讨论或撰写,达到了博采众长、兼收并蓄的效果。

该套丛书反映了石油、石化、化工行业信息技术的最新应用成果,具有前瞻性和先进性;同时又深入浅出,具有良好的实用性和可读性。丛书的编写原则是成系列而又不繁杂,选题新颖而又避免重复,突出行业特点而不是仅考虑通用性,重视实用而不仅偏重理论,也可以说是一套具有技术性、实用性、工具性、通俗性的高级科普读物或工具丛书。

在本书编写过程中,许多国内外石油、石化、化工行业的信息技术应用专家,高等院校、科研院所从事信息技术应用教学科研的教授、学者、化工出版社的领导和编辑,以及国内外许多 IT 公司的高级技术总监和顾问为本丛书的策划、组织、编写付出了大量心血,提供了大量资料甚至经费上的支持。在此,我谨代表中国化工学会暨信息技术应用专业委员会、代表丛书编委会向所有为丛书做出贡献的同志、朋友表示衷心的感谢!

社会在进步,科学在发展,技术在不断涌现。我希望这套丛书在知识经济条件下,能成为石油、石化、化工领域的各级管理人员、技术工人和工程技术专家在信息化建设的过程中爱看、经常看的工具书。

中 国 工 程 院 院 士
中 国 化 工 学 会 理 事 长
《化学工业信息化丛书》编委会主任



2006 年 1 月

前 言

《化工过程控制系统》是《化学工业信息化丛书》的分册之一。

本书通过对过程控制要素的解析和阐述为 DCS、PLC、FCS、SCADA 和工业 PC 机等过程控制系统建立起构件基础,随后对当今使用的各种控制系统进行系统说明,这样更便于工作在流程行业生产一线的广大技术人员对过程控制体系相关的基本概念及实现的意义和作用有更实质性的了解,并可作为应用和工程实践的指导。编写时既注意了对概念的准确定义,对原理的清晰叙述,对应用的原则指导,也介绍了当今国内外的先进技术,并力求表现出过程控制的现状和发展趋势。

本书第 1 章介绍自动控制产生的条件和发展历程以及过程控制的形成,涉及控制论的重要作用以及现代控制的数学和工程的双重特性,说明了“热工仪表”的来历和基本控制回路的构成和发展。该章还列出了过程控制编年大事记。

第 2 章阐述传统和当代过程控制系统的内容和特点,按照构成将控制系统分为现场、控制(监视)、操作(管理)等三级四极(检测、执行、控制、操作),控制处于中心位置,依靠气、电、光以模拟或数字方式传送信号。

第 3 章对这些相关内容做了原理性的阐述,以便于对各个系统的深入理解。

第 4~9 章对 DCS、PLC、FCS、SCADA 等系统的结构、特点、功能、应用展开全面的剖析。综合说明了 DCS 的模拟和离散控制的基本信号流处理部件的原理和结构,以及应用功能块的组成和连接实现。

对于用户的应用项目,第 10 章为整个过程控制工程的实施做了较全面的分析和阐述,包括从需求分析开始,控制方案和系统设计到最后的工程验收全过程各个阶段的具体工作内容和质量管理措施,对用户认识、实施和管理控制工程颇具指导价值。

参与本书编写的人员有:第 1、2、3、6、7、9 章由鲁明休、魏延方、刘伟、何林森执笔;第 4 章由史洪源执笔;第 5 章由施波、梁金华执笔;第 8 章由谢红兵执笔;第 10 章由吴光学执笔。

另外,孙红琦、朱端在书稿的整理、文字图形的编排、检查排错方面,庄芹仙在收集和整理厂家产品资料方面也做了大量工作,全书内容由编委张昆审定,特致诚挚谢意。

由于过程控制技术和设备的不断发展、更新和进步,并且涉猎极广,虽经编撰人员多方努力,也难免出现疏漏之处,敬请读者批评指正,不胜感激。

编 者

2005 年 10 月 12 日

目 录

第 1 章 过程控制简史	1
1.1 自动控制的开端与发展	1
1.1.1 自动控制沿革	1
1.1.2 工业革命与自动控制的兴起	2
1.1.3 控制论与微分方程	2
1.1.4 稳定性理论	2
1.1.5 系统科学	3
1.1.6 频域分析	3
1.1.7 世界大战与经典控制	3
1.1.8 空间/计算机时代和现代控制	4
1.1.9 数字控制与滤波理论	4
1.1.10 经典控制与现代控制	5
1.2 过程控制的形成	6
1.2.1 过程与过程控制	7
1.3 过程控制的发展	8
1.3.1 前经典时期的过程控制 (1900~1939)	8
1.3.2 经典时期的过程控制 (1940~1959)	10
1.4 现代过程控制系统	11
1.4.1 直接数字控制	11
1.4.2 数字控制的发展壮大	12
1.4.3 进入数字化及信息化时代	13
第 2 章 过程控制系统体系	16
2.1 传统过程控制系统体系	16
2.1.1 现场级	16
2.1.2 控制级	16
2.1.3 操作及过程管理级	16
2.2 发展了的过程控制系统体系	17
2.2.1 微处理器与过程控制	17
2.2.2 智能仪表及现场总线仪表	18
2.2.3 数字控制器	19
2.2.4 计算机 HMI 及管理系统	22
2.2.5 工业控制及管理网络	24
第 3 章 过程控制系统的结构要素	26
3.1 过程现场级结构要素	26
3.1.1 现场检测元件与变送器	26

3.1.2	压力测量	26
3.1.3	液位测量	29
3.1.4	温度测量	30
3.1.5	流量测量	33
3.1.6	大机组监测仪表	43
3.1.7	分析仪表	45
3.1.8	智能变送器与现场总线仪表	55
3.1.9	软传感器	56
3.1.10	调节阀	56
3.1.11	电动仪表的安全防爆	59
3.2	监视、控制级结构要素	60
3.2.1	模拟调节器	60
3.2.2	单元组合仪表	60
3.2.3	单、多回路数字调节器	61
3.2.4	DCS 控制站	61
3.2.5	现场监视站	61
3.2.6	PLC 与 ESD 站	61
3.3	操作、管理级结构要素	62
3.3.1	PC 机操作站	62
3.3.2	小型机组态、管理站	62
3.4	网络与通信	62
3.4.1	早期通信方式	63
3.4.2	网络基础	63
3.4.3	网络参考模型与通信栈	65
3.4.4	通信模型	67
3.4.5	数据传输方式	68
3.4.6	信息在旅途	69
3.4.7	过程控制常用的数据链路层协议	70
3.4.8	应用工业以太网	72
3.5	支持软件要素	74
3.5.1	系统软件	74
3.5.2	编程语言	80
3.5.3	基本应用软件	80
3.5.4	HMI 软件	81
3.5.5	组态软件	82
3.6	高层软件	82
3.6.1	先进控制软件	82
3.6.2	PID 参数自整定软件	82
3.6.3	CIMS、CIPS 和 MES	83
3.6.4	ERP	83

第 4 章 集散型控制系统 DCS	84
4.1 DCS 概述	84
4.1.1 现场控制站	85
4.1.2 工程师站	85
4.1.3 操作员站	86
4.1.4 系统服务器	86
4.1.5 系统网络	86
4.1.6 高层管理网络	86
4.1.7 其他功能站	87
4.2 主控制器 (MCU)	87
4.2.1 MCU 的基本组成	87
4.2.2 MCU 的冗余配置	88
4.2.3 MCU 的技术指标及试验方法	88
4.3 模拟量输入设备 (AI)	88
4.3.1 AI 设备的基本原理	88
4.3.2 AI 设备的技术指标及试验方法	89
4.4 模拟量输出设备 (AO)	94
4.4.1 AO 设备的基本原理	94
4.4.2 AO 设备的技术指标及试验方法	94
4.5 开关量输入设备 (DI)	95
4.5.1 DI 设备的基本原理	95
4.5.2 DI 设备的技术指标及试验方法	95
4.6 SOE 输入设备 (SOE)	96
4.6.1 SOE 设备的基本原理	96
4.6.2 SOE 设备的技术指标及试验方法	96
4.7 开关量输出设备 (DO)	96
4.7.1 DO 设备的基本原理	96
4.7.2 DO 设备的技术指标及试验方法	97
4.8 脉冲量输入设备 (PI)	97
4.8.1 PI 设备的基本原理	97
4.8.2 PI 设备的技术指标	97
4.9 电源设备	97
4.9.1 AC/DC 转换器	97
4.9.2 UPS	98
4.9.3 双路 AC 供电	98
4.9.4 电源的有关指标	98
4.10 组态维护与人机接口设备	99
4.10.1 显示设备	99
4.10.2 人机界面的输入设备	100
4.10.3 操作员站和工程师站主机	100

4.10.4	系统服务器	100
4.10.5	打印机	101
4.11	硬件系统的可靠性与环境适应性	101
4.11.1	可靠性基本概念和术语	101
4.11.2	环境适应性	105
4.11.3	电磁兼容性和抗干扰技术	109
4.11.4	防雷击	113
第5章	DCS 软件	116
5.1	DCS 主要功能的描述	116
5.1.1	DCS 最主要的功能——回路控制功能	116
5.1.2	DCS 的先进控制功能	116
5.1.3	DCS 的顺序控制和逻辑控制功能	117
5.1.4	DCS 的其他功能	117
5.2	DCS 控制站软件	117
5.2.1	DCS 控制站软件的功能及其工作过程	117
5.2.2	控制站实时数据组织和任务管理	119
5.2.3	控制站的信号输入/输出处理软件	121
5.2.4	控制器的功能执行软件	126
5.3	人机界面 (HMI) 软件	135
5.3.1	人机界面软件体系	135
5.3.2	操作系统	135
5.3.3	DCS 操作员站功能	136
5.4	DCS 管理服务器软件	139
5.4.1	I/O 服务器的功能	140
5.4.2	报警服务器的功能	140
5.4.3	事件服务器的功能	141
5.4.4	历史服务器的功能	142
5.4.5	计算服务器的功能	142
5.5	系统自诊断和故障切换	142
5.6	工程师站组态软件	143
5.6.1	图形页面组态功能设计	143
5.6.2	数据库组态	145
5.6.3	报表组态功能	145
5.6.4	控制算法组态	146
5.7	先进控制及高层应用软件	146
第6章	PLC 及 ESD 控制系统	149
6.1	PLC 的历史背景	149
6.2	PLC 的工作原理	150
6.2.1	扫描	150
6.2.2	时钟控制方式	151

6.2.3 中断控制方式	151
6.3 PLC 的结构与系统	151
6.4 PLC 智能组件	153
6.5 PLC 输入/输出组件	153
6.5.1 PLC 输入模块	153
6.5.2 PLC 输出模块	154
6.6 PLC 电源	155
6.7 PLC 通信	155
6.8 PLC 编程器及其他外围设备	156
6.8.1 PLC 编程器的发展	156
6.8.2 编程器的构成及功能	156
6.9 PLC 编程	157
6.9.1 PLC 编程语言	157
6.9.2 编程的基本概念	157
6.9.3 应用编程	161
6.10 IEC 61131 标准	161
6.10.1 概述	161
6.10.2 语言特点	162
6.10.3 语言类型	162
6.10.4 指令表	165
6.10.5 结构化文本	167
6.10.6 功能块图	168
6.10.7 顺序功能图	169
6.11 PLC 的冗余技术	172
6.11.1 双重化系统的功能和运行	172
6.11.2 同步运行期间 I/O 信号的处理	173
6.12 传统过程安全保护系统	173
6.12.1 沿革	173
6.12.2 安全与可用性要求	174
6.12.3 安全操作特性和失效分析	175
6.12.4 基于硬接线的系统	176
6.12.5 用 PLC 构建的 ESD 系统	177
6.13 安全仪表系统与功能安全	178
6.13.1 功能安全	180
6.13.2 安全系统性能参数	180
6.13.3 安全系统可靠性技术	182
6.13.4 容错方式的演进	184
6.14 基于比较表决的 TMR 安全控制系统	187
6.14.1 Tricon 安全控制系统	187
6.14.2 Tricon TMR 结构	187

6.15 基于自诊断的 QMR 安全控制系统	189
6.15.1 QMR 结构的性能	189
6.15.2 容错 QMR 系统的自诊断	189
第 7 章 现场总线控制系统	193
7.1 现场总线的定义	193
7.1.1 设备总线和传感器总线	193
7.1.2 现场总线网络的开放性	194
7.1.3 现场总线割据的形成	195
7.2 现场总线标准之争尘埃落定	195
7.3 现场总线基础	197
7.3.1 现场总线通信模型层次	197
7.3.2 现场总线术语	197
7.3.3 现场总线相关设备	199
7.3.4 现场总线的选择	199
7.4 工业以太网 e 网到底?	200
7.5 DCS 前途多变	201
7.6 走近基金会现场总线	202
7.7 基金会现场总线技术概述	202
7.7.1 基金会现场总线与 OSI 模型	202
7.7.2 物理层	203
7.7.3 高速以太网	205
7.7.4 通信栈	205
7.7.5 用户层	212
7.8 网络管理和系统管理	220
7.8.1 网络管理	220
7.8.2 系统管理	220
7.9 现场总线技术规范	224
7.9.1 设备描述	225
7.9.2 FF 通信模型类别	225
7.9.3 设备描述编译器	226
7.9.4 设备描述服务	226
7.10 基金会现场总线设备的互操作性	227
7.11 HSE 高速以太网及其通信栈	227
7.11.1 通信栈结构和网络拓扑	228
7.11.2 基金会现场总线的冗余技术	229
7.11.3 基于 PC 的基金会现场总线控制系统	229
7.12 系统组态	230
7.12.1 系统设计	230
7.12.2 离线组态	230
7.12.3 应用工程组态	230

7.13	现场应用调试	231
7.14	基金会现场总线的安全技术	231
7.15	Profibus	232
7.15.1	Profibus 拓扑结构	233
7.15.2	Profibus 协议结构	233
7.16	ControlNet	234
第 8 章	SCADA	236
8.1	SCADA 的起源及意义	236
8.2	SCADA 系统的结构	236
8.2.1	传统 SCADA 系统的结构	236
8.2.2	现代 SCADA 系统的结构	238
8.3	SCADA 系统配置和接口	240
8.3.1	SCADA 系统配置	240
8.3.2	SCADA 软件和设备接口	241
8.4	SCADA 功能及应用开发	242
8.4.1	基本功能性	242
8.4.2	系统功能	243
8.4.3	通用 SCADA 功能	245
8.4.4	SCADA 系统应用开发	248
8.5	SCADA 与 DCS 的区别	249
8.6	SCADA 的发展	251
第 9 章	OPC 技术	252
9.1	OPC 技术的定义	252
9.1.1	COM 和 DCOM	252
9.1.2	OPC 基金会	253
9.1.3	OPC 规范	253
9.1.4	OPC 的作用	254
9.2	OPC 对象与接口	255
9.3	OPC 客户/服务器模式简介	258
9.4	OPC DA	260
9.4.1	实时数据访问	260
9.4.2	数据访问方式	260
9.4.3	过程数据的组成	261
9.5	OPC AE	261
9.5.1	事件的类型	261
9.5.2	事件的通知	261
9.5.3	对象和接口	262
9.5.4	与 OPC 数据访问服务器的关系	262
9.6	OPC 应用说明	263
9.6.1	操作过程案例	263

9.6.2 现有设备情况	263
9.7 OPC HDA	263
9.8 OPC DX	264
9.9 OPC XML	266
9.10 现场总线与 OPC	267
第 10 章 过程控制工程	269
10.1 过程控制工程的含义及内容	269
10.1.1 过程控制工程的含义	269
10.1.2 过程控制工程的目的、任务和内容	269
10.1.3 过程控制工程计算机控制系统发展现状与趋势	270
10.2 应用控制系统分析	271
10.2.1 应用控制系统分类	271
10.2.2 化工行业生产过程的特点	272
10.2.3 化工生产过程对象的控制要求和特点	273
10.2.4 计算机集成制造系统	274
10.3 过程控制系统分析、控制方案设计和工程应用	275
10.3.1 单回路控制系统	275
10.3.2 串级控制系统	280
10.3.3 比值控制系统	281
10.3.4 均匀控制系统	283
10.3.5 前馈控制系统	284
10.3.6 选择性控制系统	287
10.3.7 分程控制系统	290
10.3.8 先进控制系统	291
10.4 应用控制系统的评价与优化	293
10.5 过程控制应用工程的实施与管理	294
10.6 过程控制应用水平的分析	294
参考文献	296
附录一 ABB 公司产品介绍	297
附录二 Foxboro 与 IPS	300
附录三 北京和利时产品介绍	304
附录四 欧姆龙与 IAB	308
附录五 Wonderware 产品介绍	312
附录六 横河电机 DCS 技术介绍	315
附录七 浙大中控产品介绍	318
附录八 霍尼韦尔公司产品介绍	322

第 1 章 过程控制简史

1.1 自动控制的开端与发展

无论是机械、电气，还是生物系统，控制尤其是反馈控制都是维持其动态平衡的基础。高级生命生存期内会经历各种苛刻的环境和条件，人体也要依靠反馈控制来保持动态平衡。常用的负反馈控制是针对系统变量测量值与期望值之差进行的，如汽车速度控制即负反馈控制的实例，它用实际速度与理想速度之差来调节加油量。由于是利用系统输出调节其系统输入，所以称为闭环负反馈控制系统。

1.1.1 自动控制沿革

从古至今，人类在生活和生产活动中一直运用和发展着“控制”方法。古人类用眼睛测量，通过大脑思维决策，以手工操作达到制造工具和获取猎物的目的，这实际就是控制的三项基本要素（检测、判断、执行）的具体结合。思量起来，任何简单的生产作业都蕴含着古朴自然的反馈和前馈原理。在生存、生产不断提出的新、高目标的激励下，人类不断创造出新的科技成就，自动控制技术不过是这种反馈式发展的一个侧面而已，因此，反馈控制是最常见也是最基本的控制系统。

我国古代的铜壶滴漏、指南车和中世纪欧洲的钟表和风磨控制装置等毫无联系的发明都对自动控制技术的形成与发展起到了推动和指导作用。

控制属于工程技术学科，其发展与人类历史各个时期要解决的实际问题息息相关。

在人类进化的历史长河中，影响反馈控制的重大事件有：

- a. 公元前 300~1200 年间，古希腊和阿拉伯人专注于精确计时研究；
- b. 起源于 16 世纪而在 18 世纪后期达到高潮的欧洲工业革命；
- c. 1910~1945 年，大话务量通信的兴起与两次世界大战；
- d. 1957 年开始的空间/计算机时代。

其间，J. C. 麦克斯韦利用数学语言严格分析了反馈控制系统，奠定了自动控制史前时期的里程碑。从 1868 年到 20 世纪初为自动控制的启蒙时期；此后至 1960 年公认为经典自动控制时期；自 1960 年迄今为现代自动控制时期。

古代反馈控制发展的原动力在于精确计时的需求，因此，公元前 270 年前后，希腊人发明了滴漏水钟使用的浮球调节器，其作用是维持上水槽中的水位不变，从而使槽底滴漏细管的水流恒定，以稳定的速度流入下方一个盛水器中，盛水器中的水位与度过的时间一一对应。上水槽水位下降时，阀门打开为其补水，这种调节器利用浮球调节阀门开闭，控制上水槽进水。浮球控制属于“ON/OFF”反馈控制。

1258 年，随着蒙古人攻陷巴格达，终结了循着原始思路的创造。14 世纪发明的机械钟废止了滴漏水钟及其反馈控制系统（机械钟原理不是反馈控制系统），此后直至欧洲工业革

命，浮球调节器的应用裹足不前。

古人类不仅关注计时问题，也思考生存活动中的方位。值得一提的是我们的先人在 12 世纪发明了指南车，车上立一木人，当车转弯时，附于车轮上的齿轮机构使木人反方向转动，保持其所指方向永远为南，使驾车人认准行走方向驱车，如果系统不计入驾车人的活动，它实质上是利用扰动补偿原理的开环定向调节系统，而不是真正的反馈系统。

1.1.2 工业革命与自动控制的兴起

1769 年，J. 瓦特发明了带自动控制设备的蒸汽机，进而出现了原动机、先进的磨谷机、加热炉，在欧洲掀起了以锅炉和蒸汽机发明为标志的工业革命。手动操作难以实现对这些设备的理想控制，于是包括浮子调节器、温度调节器、压力调节器和调速器的发明相继问世。

欧洲风磨设计师发明了许多反馈控制设备，其中有与风磨主风车成直角安装的尾翼小风车，以此保证主风车一直迎风而立；风磨的料斗可以根据磨碾转速调节谷物的流量。设计师们根据反馈调节系统的要求发明了若几种测量和包括自力式调控帆在内的风磨转速调节设备，这些技术后来有许多应用于蒸汽机控制中。

1624 年，荷兰人德莱拜尔发明了炼金炉自动温度控制系统；1771 年出现了控制炼钢和陶瓷生产窑炉温度的指示调温器；1777 年出现了供暖热水锅炉用的工业温控器。

1758 年 J. 布伦德雷获得以“蒸汽锅炉浮球供水阀调节器”命名的专利，从此它的应用逐渐流行起来；1775 年前后，蒸汽机锅炉和民用供水系统使用了浮球液位调节器。

1681 年，D. 帕品发明了压力锅使用的安全阀，后来它被用于控制蒸汽机的工作蒸汽压力；1803 年改良的压力调节器与浮球供水阀调节器一起用于波尔顿-瓦特企业生产的蒸汽机上。

世界上第一台蒸汽机输出的是往复运动，当时这种设备用于向煤矿井内通风注气。1783 年，第一台输出转动的 J. 瓦特式蒸汽机成为面粉厂的原动机，由此带来了蒸汽机输出的转速控制问题。1788 年，瓦特设计用飞锤式离心调速器来调节转速，它利用轴旋转产生的离心力使两只飞锤内外张合操纵蒸汽节流阀的开度，从而调节蒸汽机转速的快慢，达到自动维持转速恒定的目的。

飞锤式离心调速器的工作原理虽然简单，但是首次应用反馈控制的意义重在体现新的时代特征，因此，飞锤式离心调速器达到了当时工程发明的顶峰，但其不稳定性有待改进。

1.1.3 控制论与微分方程

反馈控制系统的工程设计是工业革命催化兴起的一门新技术。19 世纪中叶，第一次用数学方法分析了反馈控制系统的稳定性，从此，数学成为自动控制理论的形式语言，竖立起了控制论史前与经典时期的界碑。

1840 年，英国皇家格林尼治天文台的 G. B. 艾黎发明了一种反馈定位控制设备用来自动旋转天文望远镜以补偿地球的自转以便长时间观察某一星球，但由于反馈回路设计不当使系统激烈振荡，于是他首次使用微分方程分析了闭环系统的不稳定性。

1.1.4 稳定性理论

1868 年，J. C. 麦克斯韦利用微分方程分析了飞锤式离心调速器的稳定性，他通过对运

动微分方程线性化建立的系统特征方程来研究系统参数对稳定性的影响，并证明了稳定系统的特征方程的根有实数部分，从而为控制系统稳定性分析奠定了牢固的理论基础。1877年，E. J. 劳斯建立了判断特征方程根有实数部分的数值方法。

1893年，A. B. 斯托德拉用自己的方法研究了水力透平的调速问题，建立起执行机构的动力学模型，在分析中引入了执行机构的滞后，首次提出系统时间常数的概念。

1892~1898年间，英国工程师 O. 希威赛德采用运算微积分研究了系统的瞬态响应，引述了相当于传递函数（transfer function）的概念。

1.1.5 系统科学

控制的一大特点是它并不限于机械、电气、化工、航空及计算机等某一具体工程分支，而是寓于各个学科之中的一门十分重要的系统科学。

在人类知识结构中，反馈控制理论属于系统范畴，它是一个带有限输入输出，与其他相关因素紧密相连且又不断变化的实体，这种系统概念是进一步研究自动控制论的重要前提条件。

19世纪初，在 A. N. 怀特海德（1925）的哲学著作“有机原理”和 L. 范布特朗菲（1938）的有机体分层原理中都有关于“一般系统论”的论述，这一学说更推动了控制论的发展。

1.1.6 频域分析

以前控制系统的数学分析都是利用微分方程进行的时域分析。20世纪二三十年代，贝尔实验室开始在通信中使用频域分析法。

1927年，H. S. 布莱克验证了负反馈对降低中继放大器畸变的有效作用，提出将输出信号的一部分反馈到输入端，牺牲放大倍数以换取减小畸变和漂移。1932年，H. 奈奎斯特基于复变函数的极坐标图推导出自己的稳定性判据，提出了稳定放大器设计的反馈理论。1938年，H. W. 波德推出实变函数的幅值和相位频率响应图，利用增益和相位裕度分析闭环系统的稳定性。

1.1.7 世界大战与经典控制

大容量通信和快捷的交通使世界变小了，为争夺集团私利的战争给反馈控制系统的发展带来了机遇和挑战。1910年，E. A. 斯派瑞发明的陀螺仪用于舰船的稳定操舵，后来则用于飞机驾驶。N. 米诺斯基（1922）先行在船舶控制中引入了比例-积分-微分（PID）三作用调节器，同时分析了闭环系统中的非线性影响问题。

1934年，美国科学家 H. L. 海珍发表了“伺服理论”，开始用数学控制论求解，他在论文中创造性地使用了“伺服机构”一词，隐喻系统中存在的主/从关系。

1941年，A. C. 豪尔利用贝尔实验室发明的频域技术来克服噪声影响，开拓了机载雷达控制系统的设计前景，这一成功总结性地确立了频域技术在控制系统设计中的重要地位。

基于传递函数、方框图和频域分析技术，控制系统设计取得了巨大的成功，W. R. 伊文斯（1948）的根轨迹法为在 S-平面（稳定平面）确定闭环极点位置提供了直接的工具体。20世纪50年代，获得了以上升时间表征的理想闭环阶跃响应曲线、过冲等一大批成果。