

“十二五”  
国家重点图书

# 控制工程手册

上册

孙优贤 等编著

**Handbook of**  
**Control**  
**Engineering**



化学工业出版社

“十二五”  
国家重点图书

# 控制工程手册

上册

Handbook of  
Control  
Engineering

孙优贤 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《控制工程手册》分上、下两册，本书是上册，包括4篇内容。第1篇是自动检测仪表，内容包括测量技术基础，温度、压力、流量、物位测量仪表，在线分析仪表，机械量测量仪表，显示仪表，执行机构和控制阀，最后还介绍了防爆安全技术。第2篇是计算机控制系统，内容包括可编程控制器 PLC、集散控制系统 DCS、安全仪表系统 SIS、成套专用控制系统、监控软件、现场总线与工业以太网以及工业物联网。第3篇是控制工程方法，内容包括单回路控制器、先进控制、智能控制、伺服控制和间歇控制。第4篇是控制工程技术，内容包括信号处理和数据校正技术、系统建模技术、软测量技术、过程优化技术、性能评估技术、故障诊断技术、安全性技术。

本手册着力创新，突破了自动控制在流程工业中应用的限制，首次将装备自动化、企业能源管理、公用工程自动化纳入控制工程体系中。本手册注意发展，既有传统专业知识的介绍，更有在探索和研究中的新技术、新方法。

本手册是面向控制领域工程技术人员和高校师生的实用型手册，旨在启迪相关行业从业人员的创新思维。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

控制工程手册. 上册/孙优贤等编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 11

“十二五”国家重点图书

ISBN 978-7-122-22723-2

I. ①控… II. ①孙… III. ①自动控制理论-技术手册 IV. ①TP13-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 004002 号

---

责任编辑: 宋辉 刘哲

文字编辑: 孙科

责任校对: 王素芹

装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 78 字数 2073 千字 2016 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 288.00 元

版权所有 违者必究



# 《控制工程手册》

## 编写委员会

主任 孙优贤

副主任 桂卫华 钱锋

编委 (按姓氏音序排列)

曹一家 高福荣 桂卫华 韩璞 黄道平 黄文君

金建祥 李少远 刘飞 卢建刚 宁滨 钱锋

荣冈 邵惠鹤 苏宏业 孙彦广 孙优贤 谭民

田学民 王化祥 王文海 王耀南 阳春华 杨慧中

于海滨 俞金寿 袁景淇 张广明 张化光 周东华

朱群雄 朱学锋

# 《控制工程手册》(上册)

## 编写人员

绪论 孙优贤 邵惠鹤

### 第1篇

第1章 王化祥  
第2章 王化祥  
第3章 王化祥  
第4章 张 涛  
第5章 王化祥  
第6章 王化祥  
第7章 王化祥  
第8章 王化祥  
第9章 王化祥  
第10章 徐建平

### 第2篇

第1章 金建祥 赵鸿鸣 胡 斌 李洪伟 曾逢春  
第2章 黄文君 曾逢春  
第3章 金建祥 裘 坤 朱 杰 刘志勇 庞欣然  
第4章 王文海 张稳稳  
第5章 谭 彰 曾逢春 费振华  
第6章 于海斌 苑明哲 徐皑冬 魏剑菟  
第7章 于海斌 梁 炜 郑 萌 肖金超

### 第3篇

第1章 袁 微 叶 涛 朱学峰  
第2章 俞金寿 邵惠鹤 李大字 周靖林 赵 众  
第3章 张化光 杨 珺  
第4章 颜文俊 孟 藩 王维锐  
第5章 高福荣 杨 毅



第4篇

第1章 荣 冈

第2章 阳春华 朱红求 李 沛

第3章 杨慧中

第4章 钱 锋 杜文莉 祁荣宾 罗 娜 叶贞成

第5章 苏宏业 谢 磊

第6章 周东华 陈茂银

第7章 李宏光

# I 序 I

控制工程以控制论、信息论、系统论为基础，以工程领域为背景，主要研究工业控制系统的理论、方法、技术及装备，以及工业控制系统的工程实现方法与技术，其应用已遍及工业、农业、交通、环境、军事、生物、医学、经济、金融等社会各个行业，为实现安全、优质、高效、低耗和环保的生产过程提供了有效手段，对我国国民经济起着越来越重要的作用。

《控制工程手册》是我国第一套全面、系统、专门研究控制工程的专著。该书突破了流程工业的限制，统一将生产装备自动化、工程机械自动化、公用工程自动化、企业能源管理纳入到手册体系之中，包括数控系统、工业机器人、轨道交通、智能电网、智能楼宇、智能交通、智能矿山等与国民经济建设密切相关的行业，极大地丰富了手册的内容。这套手册着力创新、注重发展、体现特色，既有传统专业知识的介绍，更有应用和探索中的新技术、新方法，能够启迪相关行业从业人员的创新思维，可为运用工业控制技术推动我国信息化与工业化的深度融合做出重要贡献。

孙优贤院士是我国工业控制领域的著名专家，他在现代控制工程技术领域成就卓著，开创了我国第一个国家工程研究中心。此次他主编这部具有里程碑意义的《控制工程手册》，明显增强了整个手册的先进性和权威性。

这套手册的80余位编写人员均为相关领域的领军人物，可谓阵容强大。这些专家对控制工程理论和技术进行过系统深入的研究，积累有十分丰富的实践经验，故保证了这套手册不但结构严谨、文字流畅，而且具有较高的理论水平和学术价值。

这套手册的内容系统完整，包括自动检测仪表、计算机控制系统、控制工程方法、控制工程技术、工业过程控制、工业装备控制、企业能源管理、智能工程控制共8篇内容，详细介绍了集散控制系统、安全控制系统、专用控制系统、现场总线控制系统、工业以太网和物联网等常用与新型的控制系统，还介绍了先进控制、智能控制、伺服控制、间歇控制、信号处理技术、建模技术、软测量技术、过程优化技术、性能评估技术、故障诊断技术以及安全性技术等控制方法和前沿技术，为广大自控技术人员

学习新技术、新方法提供了系统的指导。其中性能评估技术、故障诊断技术以及安全性技术目前尚未形成系统的完整理论，该手册将这些技术涉及的方方面面进行了汇集和总结，给科研院所和院校的理论研究者提供了良好的参考平台。这些先进理论将促进我国控制理论的发展，应用到实际中，将会带来使工业生产更加安全、更加节能的技术创新。

这套手册立足于国内技术现状，突出新设备、新方法、新技术、新应用，提供国内外最新研究进展和成果，引用最新的标准和数据，因而具有更丰富的技术与知识内涵。

相信这套手册能够对读者全面了解控制工程并提升技术水平提供独特的帮助。



2015年10月



# 丨 前言 丨

工业控制系统是现代工业的神经中枢、运行中心和安全屏障，是确保重大工程和重大装备安全可靠和高效优化运行的根本保证，是实现各个工程领域节能、降耗、减排的有效手段。控制工程主要研究工程领域工业控制系统的理论、方法、技术及装备，以及工业控制系统的工程实现方法和技术，在工程科学技术领域具有十分重要的地位。

控制工程学科领域涉及现代数学方法，传感器与自动检测、人工智能与模式识别、自动测试与故障诊断、计算机应用与系统集成、自动控制理论与方法、计算机辅助设计与仿真、工业机器人与泛在网络等；应用领域涉及各种工业过程，数控装备、工程机械、轨道交通、工业机器人、企业能源管理，以及智能电网、智能交通、智能楼宇、智能矿山等公用工程；主要技术内容包括工业控制系统建模、控制、优化、调度、管理、故障诊断、远程维护等。

工业自动化技术如今已广泛应用于电力、化工、石化、冶金、建材、环保、机械、电子、建筑、交通、国防等领域，已成为提高劳动生产率、增加产量、提高质量、节约能源、降低能耗、减少排放、确保安全等的主要手段。控制工程主要技术手段包括先进检测技术、系统建模技术、软测量技术、先进控制技术、实时优化技术、故障诊断技术、仪器仪表技术、生产管理技术、优化调度技术、能源管理技术、生产制造执行系统等，这些技术对提升企业创新能力、提高综合经济效益、增强国际竞争力发挥着重要作用。

我国至今还没有一本涉及各个工程领域的控制工程手册。改革开放以来，我国国民经济健康快速发展，工业控制技术取得丰硕成果，工业控制系统在各个工程领域开花结果。为推动工业控制系统在现代工业生产中发挥更大的作用，我们编写了这套《控制工程手册》，它对于促进我国流程工业、装备制造业、国防工业的发展具有重要的指导意义。

我们提供给我国控制工程领域的高等院校、科研机构和工矿企业的广大专家学者、工程技术人员和研发人员的这套手册，不仅是一套具有实用性、指导性的手册，而且还是一套具有先进性、前瞻性的手册。纵览全书，其中涉及的工业控制系统全部在各个工业领域获得成功应用，显示出先进的技术经济指标，取得了重大的经济效益、社会效益和军事效益，具有很强的实用性。本手册的工程系统检测、建模、控制、优化、调度、管理、决策、诊断、运行等技术，系统、全面、先进，这些技术对其他领域的控制系统研究和应用具有重要的指导性。本手册还全面总结了三十多年来我国工业控制领域的最新研究成果，概括了最近我国工业自动化领域的 39 项国家技术发明奖和国家科学技术进步奖，彰显了手册的先进性。同时，本手册在所有篇章的最后，都指出了技术的发展趋势，预测了可能出现的技术突破，显示了其前瞻性。

本手册总体架构以自动检测仪表与执行器、计算机控制系统等自动化工具为基础，以控制工程方法和控制工程技术为核心，以各种工业生产过程和机器装备的控制系统设计、分析、综合、运行为特色，全书共 8 篇 59 章，包括：

第 1 篇 自动检测仪表，包括测量技术基础，温度、压力、流量、物位测量仪表，在线分析仪表，机械量测量仪表，显示仪表，执行机构和控制阀，最后还介绍了防爆安全仪表。

第 2 篇 计算机控制系统，包括可编程控制器 PLC、集散控制系统 DCS、安全仪表系统 SIS、成套专用控制系统、监控软件、现场总线与工业以太网以及工业物联网。

第 3 篇 控制工程方法，包括单回路控制器、先进控制、智能控制、伺服控制和间歇控制。

第 4 篇 控制工程技术，包括信号处理和数据校正技术、系统建模技术、软测量技术、过程优化技术、性能评估技术、故障诊断技术、安全性技术。

第 5 篇 工业过程控制，包括典型单元生产过程控制、炼油生产过程控制、石化生产过程控制、氯碱与化肥生产过程控制、煤化工过程自动控制、火力发电过程控制、新能源发电自动控制、钢铁生产过程控制、有色冶金生产过程控制、造纸生产自动控制、食品加工过程控制、生物制药过程自动控制、水泥生产过程自动控制、城市供水与污水处理过程自动控制。

第 6 篇 工业装备控制，包括数控系统、工业机器人、工程机械控制系统、轨道交通列车运行控制系统。

第 7 篇 企业能源管理，包括企业能源管理模式与能源管理系统、企业能源管理主要功能、企业能源管理关键技术、钢铁企业能源管理系统、石化企业能源管理系统、水泥企业能源管理系统、有色企业能源管理系统、电力企业能源管理系统。

第 8 篇 智能工程控制，包括智能电网、智能交通、智能建筑、智能矿山。

本套手册的编写，从 2011 年开始启动，集聚了我国控制工程领域 80 多位深孚众望的专家学者，历经 4 年时间，召开了 5 次编委会全体会议，确定了本书的架构及主要内容，总结了控制工程的主要方法和技术，汇集了工程领域 100 多个控制系统的成功应用案例，并将 39 个工业控制系统及装备的国家技术发明奖和国家科学技术进步奖的应用案例搜集其中，所以这套《控制工程手册》是我国工业控制技术几十年来的工作总结，是我国控制工程未来的展望，是一套中国工业自动化领域的百科全书。

在本手册的编写过程中，所有编委所在单位以及工程应用单位给予了大力帮助与支持，在此谨表示衷心的感谢。

书中不足之处在所难免，恳请批评指正。



2015 年 9 月

## 《控制工程手册》中涵盖的国家科学技术奖

序号	成果名称	单位	主要完成人	年份	奖项名称	等级
1	高端控制装备及系统的设计开发平台研究与应用	浙江大学等	孙优贤	2013	国家科学技术进步奖	一
2	立体视频重建与显示技术及装置	清华大学	戴琼海	2012	国家技术发明奖	一
3	炼油化工重大装备控制与优化一体化关键技术及应用	浙江大学	金建祥	2012	国家科学技术进步奖	二
4	大型精对苯二甲酸装置节能降耗的优化运行技术	华东理工大学	钱锋	2011	国家科学技术进步奖	二
5	面向节能的复杂配电网监测控制与故障诊断关键技术研发及应用	东北大学	张化光	2010	国家科学技术进步奖	二
6	铜冶炼生产全流程自动化关键技术及应用	中南大学	李贻煌	2010	国家科学技术进步奖	二
7	以国际标准为核心的自动化关键技术创新工程	浙江中控技术股份有限公司	金建祥	2010	国家科学技术进步奖	二
8	大型水电站泵站高效运行优化控制与成套自动化装备及应用	湖南大学	王耀南	2009	国家科学技术进步奖	二
9	大型乙烯装置优化运行技术与工业应用	中石化扬子公司	蒋勇	2009	国家科学技术进步奖	二
10	高速冷轧带钢多功能在线检测技术	宝山钢铁股份有限公司	王康健	2009	国家科学技术进步奖	二
11	冷带轧机高精度液压厚度自动控制系统关键技术	燕山大学	王益群	2009	国家科学技术进步奖	二
12	流程工业现场总线核心芯片、互操作技术及集成控制系统开发	中科院沈阳自动化所	于海斌	2009	国家科学技术进步奖	二
13	大型高强度铝合金构件置备重大装备智能控制技术及应用	中南大学	桂卫华	2007	国家科学技术进步奖	二
14	大规模复杂生产过程智能调度与优化技术	清华大学	刘民	2006	国家科学技术进步奖	二
15	混合智能优化控制技术及应用	东北大学	柴天佑	2006	国家科学技术进步奖	二
16	火电厂厂级运行性能在线诊断与优化控制系统	华北电力大学	刘吉臻	2006	国家科学技术进步奖	二
17	全集成新一代工业自动化系统	浙江大学	孙优贤	2006	国家科学技术进步奖	二
18	大型精对苯二甲酸生产过程智能建模、控制与优化技术	华东理工大学	钱锋	2005	国家科学技术进步奖	二
19	大型乙烯装置优化运行技术与工业应用	华东理工大学	钱锋	2002	国家科学技术进步奖	二
20	现场总线分布控制系统开发及应用	中科院沈阳自动化所	王天然	2002	国家科学技术进步奖	二



续表

序号	成果名称	单位	主要完成人	年份	奖项名称	等级
21	现场总线控制系统	浙江大学	金建祥	2002	国家科学技术进步奖	二
22	铝电解槽高效节能控制技术及其推广应用	中南大学	李劼	2014	国家科学技术进步奖	二
23	智能集成优化控制技术及其在锌电解和炼焦配煤过程中的应用	中南大学	桂卫华	2004	国家科学技术进步奖	二
24	金矿企业综合自动化系统	东北大学	柴天佑	2001	国家科学技术进步奖	二
25	高性能谐振式传感器关键技术及其应用	北京航空航天大学	樊尚春	2013	国家技术发明奖	二
26	耗能设备智能运行反馈控制技术	东北大学	柴天佑	2013	国家技术发明奖	二
27	基于异构信息融合的非线性动态系统估计技术及应用	西安交通大学	韩崇昭	2011	国家技术发明奖	二
28	基于神经网络逆的软测量与控制技术	东南大学	戴先中	2009	国家技术发明奖	二
29	新一代控制系统高性能现场总线EPA	浙江大学	金建祥	2009	国家技术发明奖	二
30	流体输送管道的实时数据采集分析方法和高精度泄漏检测定位技术	东北大学	张化光	2007	国家技术发明奖	二
31	耐高温压力传感器设计、制造关键技术及系列产品开发	西安交通大学	蒋庄德	2006	国家技术发明奖	二
32	黑体空腔钢水连续测量方法与传感器	东北大学	谢植	2005	国家技术发明奖	二
33	控制系统实时故障检测、分离与估计理论和方法	清华大学	周东华	2012	国家自然科学基金	二
34	离散事件动态系统的优化理论与方法	香港科技大学	曹希仁	2009	国家自然科学基金	二
35	电力大系统非线性控制学	清华大学	卢强	2008	国家自然科学基金	二
36	鲁棒控制系统设计参数化方法及应用	哈尔滨工业大学	段广仁	2008	国家自然科学基金	二
37	智能控制理论与方法的研究	中科院自动化所	王飞跃	2007	国家自然科学基金	二
38	离散与混合生产制造系统的优化理论与方法	西安交通大学	管晓宏	2005	国家自然科学基金	二
39	复杂非线性电力系统的稳定控制与智能优化理论与方法的研究	浙江大学	曹一家	2007	国家自然科学基金	二

# I 目录 I

绪论 .....	1
<b>第1篇 自动检测仪表 .....</b>	<b>011</b>
<b>第1章 测量技术基础 .....</b>	<b>12</b>
1.1 测量方法 .....	12
1.2 测量误差及测量不确定度 .....	12
<b>第2章 温度测量仪表 .....</b>	<b>15</b>
2.1 概述 .....	15
2.2 电接点温度计 .....	18
2.3 热电偶 .....	22
2.4 热电阻 .....	34
2.5 辐射式测温仪表 .....	38
2.6 红外测温仪表 .....	45
2.7 红外热像仪 .....	46
2.8 光导纤维红外测温仪 .....	47
参考文献 .....	49
<b>第3章 压力测量仪表 .....</b>	<b>50</b>
3.1 压力的概念及单位 .....	50
3.2 应变式压力(差压)变送器 .....	52
3.3 电容式压力(差压)变送器 .....	56
3.4 差动电感压力(差压)变送器 .....	60
3.5 振弦式压力(差压)变送器 .....	63
3.6 硅谐振式压力(差压)变送器 .....	65
3.7 压力开关 .....	68
3.8 压力(差压)变送器安装与维护 .....	70
参考文献 .....	73
<b>第4章 流量测量仪表 .....</b>	<b>74</b>
4.1 概论 .....	74
4.2 容积式流量计 .....	76
4.3 浮子流量计 .....	80
4.4 涡轮流量计 .....	83
4.5 旋涡流量计 .....	89
4.6 电磁流量计 .....	96
4.7 超声流量计 .....	101
4.8 节流式流量计 .....	107
4.9 质量流量计 .....	117
4.10 插入式流量计 .....	121
4.11 明渠流量计 .....	123
4.12 多相流测量 .....	127
参考文献 .....	139
<b>第5章 物位测量仪表 .....</b>	<b>141</b>
5.1 物位测量仪表及分类 .....	141
5.2 浮力式液位计 .....	141
5.3 差压式液位计 .....	146
5.4 电容式物位测量仪表 .....	149
5.5 超声波物位测量仪表 .....	151
5.6 射线式物位测量仪表 .....	153
5.7 雷达物位计 .....	155
参考文献 .....	159
<b>第6章 在线分析仪表 .....</b>	<b>160</b>
6.1 概述 .....	160
6.2 热导式气体分析仪 .....	161
6.3 红外气体分析仪 .....	165
6.4 氧化锆氧分析仪 .....	170
6.5 工业色谱分析仪 .....	174
6.6 质谱仪及色谱-质谱联用仪 .....	178
6.7 pH计 .....	186
6.8 工业电导率仪 .....	190
6.9 半导体激光气体分析仪 .....	194
参考文献 .....	201
<b>第7章 机械量测量仪表 .....</b>	<b>202</b>
7.1 位移与角度传感器 .....	202
7.2 速度测量仪表 .....	219
7.3 转矩检测仪表 .....	227
7.4 测力称重式仪表 .....	236
7.5 核辐射测厚仪表 .....	246
7.6 机器视觉 .....	250
7.7 陀螺经纬仪 .....	253
参考文献 .....	257
<b>第8章 显示仪表 .....</b>	<b>258</b>
8.1 概述 .....	258
8.2 模拟式显示仪表 .....	258
8.3 数字显示仪表 .....	264

8.4 智能显示仪表 .....	267
参考文献 .....	269
<b>第9章 执行机构和控制阀 .....</b>	<b>270</b>
9.1 执行器 .....	270
9.2 气动执行器结构及分类 .....	271
9.3 控制阀 .....	274
9.4 执行器的选型原则 .....	280
9.5 电动执行器 .....	282
9.6 智能式执行机构 .....	284

参考文献 .....	285
<b>第10章 防爆安全技术 .....</b>	<b>286</b>
10.1 防爆基础 .....	286
10.2 仪表防爆技术 .....	292
10.3 防爆仪表通用要求 .....	301
10.4 隔爆型仪表 .....	306
10.5 本质安全仪表 .....	309
10.6 本质安全仪表系统 .....	317
参考文献 .....	327

**第2篇 计算机控制系统 .....** 329

<b>第1章 可编程控制器 PLC .....</b>	<b>336</b>
1.1 概述 .....	336
1.2 PLC的硬件系统 .....	340
1.3 PLC软件配置 .....	350
1.4 PLC应用系统设计 .....	356
1.5 PLC应用系统软件设计 .....	365
1.6 大中型PLC工程应用实例 .....	369
1.7 PLC应用小程序实例 .....	374
参考文献 .....	376
<b>第2章 集散控制系统 DCS .....</b>	<b>377</b>
2.1 概述 .....	377
2.2 通信网络 .....	381
2.3 主要站点配置 .....	385
2.4 异构系统互联 .....	407
2.5 IEC 61131-3 标准编程语言 .....	413
2.6 高级应用 .....	421
2.7 DCS大规模网络设计 .....	429
2.8 国内外主要DCS产品 .....	434
2.9 系统选型 .....	444
2.10 工程应用 .....	446
2.11 DCS的抗干扰措施 .....	464
2.12 DCS应用案例 .....	466
参考文献 .....	478
<b>第3章 安全仪表系统 SIS .....</b>	<b>479</b>
3.1 概述 .....	479
3.2 功能安全概论 .....	484
3.3 安全仪表系统的硬件配置 .....	498
3.4 安全仪表系统的软件配置 .....	506
3.5 安全仪表系统的工程应用 .....	541
参考文献 .....	556

<b>第4章 成套专用控制系统 .....</b>	<b>557</b>
4.1 概述 .....	557
4.2 成套专用控制系统的硬件系统 .....	558
4.3 成套专用控制系统的软件系统 .....	563
4.4 造纸过程成套专用控制系统 .....	564
4.5 制药过程成套专用控制系统 .....	597
<b>第5章 监控软件 .....</b>	<b>617</b>
5.1 概述 .....	617
5.2 监控软件主要功能和主要组成 模块 .....	622
5.3 监控软件的典型应用示例 .....	655
5.4 监控软件的发展趋势 .....	662
5.5 国内外监控软件产品简介 .....	665
参考文献 .....	671
<b>第6章 现场总线与工业以太网 .....</b>	<b>672</b>
6.1 概述 .....	672
6.2 现场总线技术基础 .....	674
6.3 主流现场总线技术 .....	679
6.4 工业以太网 .....	725
6.5 基于现场总线的网络化控制系统 与互联技术 .....	746
6.6 现场设备管理系统 .....	750
6.7 现场总线的工程应用 .....	757
参考文献 .....	759
<b>第7章 工业物联网技术 .....</b>	<b>761</b>
7.1 概述 .....	761
7.2 工业物联网关键技术 .....	762
7.3 工业物联网相关标准 .....	766
7.4 工业物联网典型应用 .....	776
参考文献 .....	786



第1章 单回路控制器	788
1.1 传统PID控制方法	788
1.2 PID控制器的参数整定	793
1.3 新型PID控制方法	798
1.4 自抗扰控制器	805
参考文献	811
第2章 先进控制	813
2.1 复杂控制系统	813
2.2 模型预测控制	825
2.3 自适应控制系统	852
2.4 最优控制	862
2.5 解耦控制	869
参考文献	875
第3章 智能控制	877
3.1 智能控制基础	877
3.2 模糊控制	880

3.3 神经网络控制	905
3.4 专家控制	932
参考文献	956
第4章 伺服控制	958
4.1 伺服系统及控制技术简介	958
4.2 电动伺服控制	961
4.3 气动伺服控制	970
4.4 液压伺服控制	978
参考文献	990
第5章 间歇控制	991
5.1 间歇过程	991
5.2 间歇过程的控制	994
5.3 间歇过程控制实例——注塑成型过程控制	1016
参考文献	1037

第1章 信号处理和数据校正技术	1040
1.1 概述	1040
1.2 计算机数字信号处理	1041
1.3 过程数据校正	1045
参考文献	1052
第2章 系统建模技术	1054
2.1 概述	1054
2.2 机理建模技术	1054
2.3 系统辨识技术	1057
2.4 智能建模技术	1064
2.5 混合建模技术	1067
参考文献	1070
第3章 软测量技术	1072
3.1 软测量的基本概念	1072
3.2 基于机理分析的软测量建模技术	1073
3.3 基于回归分析的软测量建模技术	1082
3.4 基于状态估计的软测量技术	1087
3.5 基于支持向量机的软测量建模技术	1091
3.6 软测量系统的工程设计	1096
参考文献	1105
第4章 过程优化技术	1106
索引	1217

4.1 最优化问题的基本概念	1106
4.2 最优化方法	1108
4.3 典型过程优化的工业应用	1126
4.4 过程优化商业软件简介	1138
参考文献	1141
第5章 性能评估技术	1142
5.1 性能评估技术简介	1142
5.2 控制器性能评估流程	1144
5.3 控制器性能评估方法与技术	1146
5.4 控制器性能评估工业应用	1156
参考文献	1160
第6章 故障诊断技术	1162
6.1 控制系统故障诊断技术	1162
6.2 动设备故障诊断技术	1172
6.3 故障预测技术	1191
参考文献	1196
第7章 安全性技术	1198
7.1 概述	1198
7.2 功能安全	1198
7.3 控制系统网络安全	1211
参考文献	1216

# 绪论

人类文明发展的历程经历了原始化、农业化、工业化、信息化过程，而工业化的进程经历了几次工业革命（或称产业革命）。

第一次工业革命在 1775~1800 年始于英国，由以瓦特蒸汽机和纺织机为代表的机械技术带动，工厂机器生产取代了作坊手工制作。

第二次工业革命在 1870 年和 1913 年之间及 20 世纪初期开始于美国，由以福特等大规模生产线为代表的电气技术带动，开创了规模化生产的时代。

当前已进入以生态文明为目标，以数字计算机为代表的信息技术（包括数字化、网络化、智能化和自动化）的发展，并驱动未来经济发展的新阶段。

在工业化的进程中，人类不断地发明和引进先进的科学和技术，经历了机械化、电气化、自动化和信息化等不同的阶段，工业化的水平也不断提高。

工业自动化是机器设备或生产过程在不需人工直接干预的情况下，按预期的目标实现测量、操纵等信息处理和过程控制的统称。工业自动化技术就是探索和研究实现工业过程自动化的理论、方法和技术。它是涉及机械、电子、计算机、控制、人工智能、仪器仪表等技术领域的一门综合性技术。工业自动化技术促进了工业的进步，如今已经被广泛应用于化工、电力、机械、电子、冶金、交通、能源、环保、建筑、国防等领域，成为提高劳动生产率和改善环境的主要手段。

控制工程（Control Engineering）主要研究工程领域自动化控制系统、自动化控制设备、自动化控制仪表，内容涉及自动化控制系统理论、方法、技术及装备，以及自动化控制系统的工程实现方法与技术，包括自动化控制系统的建模、设计、分析、综合、仿真、安装、运行、检验、维护等过程。它是在电气工程和机械工程的基础上发展起来的。

控制工程技术作为 20 世纪现代制造领域中最重要的一项技术之一，主要解决现代企业的安全可靠和高效优化运行问题，以及工程领域节能、降耗、减排问题。无论是高速大批量制造企业，还是追求灵活、柔性的定制化企业，都必须依靠工业自动化技术的应用。工业自动化系统本身并不直接创造效益，但它对企业生产过程起着明显的提升作用：

- (1) 提高生产效率；
- (2) 提高产品质量；
- (3) 减少生产过程的原材料损耗和能源消耗；
- (4) 减少污染排放，保护环境；
- (5) 提高生产过程的安全性。

工业革命是工业自动化技术的助产士。正是由于工业革命的需要，工业自动化技术才冲破了卵壳，得到了蓬勃发展。下面将从控制工程所包含的几个方面来阐述其发展历程。

## 1 自动控制理论和方法

以工业化发展为背景，自动控制方法和理论的发展经历了经典控制、现代控制和智能控制几个阶段。经典控制是以系统稳定性为控制指标，以反馈作用为核心的控制方法与理论；现代控制（包括大系统理论）是以控制性能和经济指标为目标，以多变量最优控制、最优辨

识和最优滤波为核心的控制方法与理论；智能控制是以经济综合指标和对环境保护为目标，依据人的思维方式来处理控制问题的技巧。

### (1) 经典控制理论 (Classical Control Theory)

经典控制最早可追溯到 1788 年英国的瓦特 (J. Watt) 用离心式调速器控制蒸汽机的速度，这是最早的闭环自动控制装置。19 世纪 60 年代开始是经典控制系统理论与方法高速发展时期，很多学者对控制系统稳定性做出了很多贡献，而经典控制技术与理论基本建立并形成完整的自动控制体系是在 20 世纪 40 年代末。

1788 年英国的瓦特 (J. Watt) 用离心式调速器控制蒸汽机的速度，是最早的闭环自动控制装置；

1866 年英国的格雷 (J. M. Gray) 设计出第一艘自动蒸汽轮船东方号；

1868 年英国的麦克斯韦 (J. C. Maxell) 发表“论调节器”，导出了调节器的微分方程，给出基于微分方程描述的稳定性条件，从而开始反馈控制动力学问题的研究；

1877 年英国剑桥大学的劳斯 (E. J. Routh) 和 1895 年德国的赫尔维茨 (A. Hurwitz) 给出了高阶线性系统的稳定性判据；

1892 年俄国的李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 发表博士论文《论运动稳定性的一般问题》，给出了非线性系统的稳定性判据；

1922 年美国的米诺尔斯基 (N. Minorsky) 研制出用于船舶驾驶的伺服机构，给出位置控制系统的分析，提出 PID 控制方法，并对 PID 三作用控制给出控制规律公式；

1927 年美国的布莱克 (H. S. Black) 提出改善放大器性能的负反馈方法；

1932 年奈奎斯特 (Nyquist) 提出了负反馈控制系统频率域稳定性判据；

1937 年英国的图灵 (A. M. Turing) 提出图灵计算机的设想；

1938 年美国贝尔实验室的波德 (H. Bode) 和 1940 年奈奎斯特 (Nyquist) 在研究通信系统中提出对数频域响应方法；

1942 年美国泰勒 (Taylor) 仪器公司的齐格勒 (J. G. Zigler) 和尼科尔斯 (N. B. Nichols) 给出了 PID 控制器的最优参数整定法；

1942 年哈里斯 (H. Harris) 引入传递函数的概念，用方框图、环节、输入和输出等信息传输概念来描述系统的性能和关系，这样就可以把对具体物理系统如力学、电学等的描述，统一用传递函数频率响应等抽象概念来研究；

1942 年美国麻省理工学院 (MIT) 的维纳 (N. Wiener) 提出滤波理论，1948 年发表《控制论》一书，标志着控制论学科的诞生，成为控制论的奠基人；

1943 年霍尔 (A. C. Hall) 利用传递函数和方框图，将通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来；

1948 年伊文思 (W. Evans) 提出根轨迹方法，给出系统参数变换与时域性能之间的关系。

### (2) 现代控制理论 (Modern Control Theory)

现代控制 (包括大系统理论) 是在 20 世纪 50 年代中期，在航空、航天、导弹等空间技术和军事尖端技术及计算机技术的高速发展的推动下发展起来的。空间技术的发展迫切要求建立新的控制原理，以解决诸如把宇宙火箭和人造卫星用最少燃料或最短时间准确地发射到预定轨道一类的控制问题。这类控制问题十分复杂，采用经典控制理论难以解决。

1954 年美国学者贝尔曼 (R. Bellman) 创立了动态规划，并在 1956 年应用于控制过程。1958 年，苏联科学家庞特里亚金 (L. S. Pontryagin) 提出了名为极大值原理的综合控制系统的新方法。他们的研究成果解决了空间技术中出现的复杂控制问题，并开拓了最优控制理论这一新的领域。1960~1961 年，美国学者卡尔曼 (R. E. Kalman) 和布什 (R. S.