



北京市高等教育精品教材立项项目

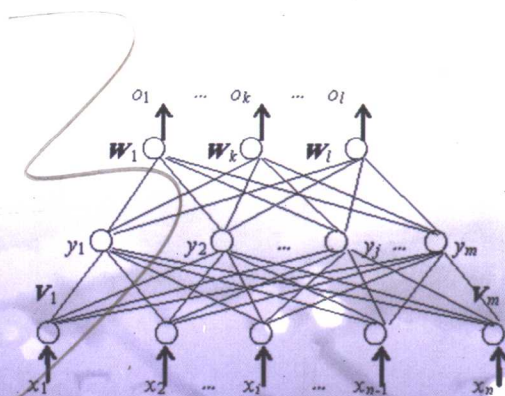


普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI  
XINXILEI

# 智能控制理论 及应用

■ 韩力群 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



TP273/468

2008

北京市高等教育精品教材立项项目  
普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

# 智能控制理论及应用

韩力群 主 编

王志新 叶 斌 参 编

机械工业出版社

本书在系统地阐述智能控制各主要分支领域理论的基础上,配有丰富的智能控制系统实例分析。主要内容有模糊控制、神经网络控制及应用、专家控制系统、仿人智能控制原理及控制系统、遗传算法及应用和实验指导。

本书目的是使学生了解智能控制前沿领域的常用理论和方法,拓宽知识面,提高设计先进控制系统的水平和能力。

本书面向控制类和机电类各专业高年级本科生和研究生,也可用于相关工程技术人员进修。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师索取,索取邮箱:wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

## 图书在版编目(CIP)数据

智能控制理论及应用/韩力群主编. —北京:机械工业出版社, 2007. 11

北京市高等教育精品教材立项项目. 普通高等教育  
“十一五”电气信息类规划教材  
ISBN 978-7-111-22788-5

I. 智… II. 韩… III. 智能控制-高等学校-教材  
IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第174727号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王保家 责任校对:程俊巧

封面设计:张静 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·19印张·468千字

标准书号:ISBN 978-7-111-22788-5

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

20 世纪 70 年代末, 控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展, 前者是控制理论在广度上的开拓, 后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点, 研究各种大系统的结构方案和总体设计中的分解方法及协调等问题的技术基础理论。而“智能控制”是在人工智能与自动控制等多学科基础上发展起来的新兴学科, 它通过研究与模拟人类智能活动及控制与信息传递过程的规律, 解决那些用传统方法难以解决的、复杂系统的控制问题。智能控制是对多种学科、多种技术和多种方法的高度综合集成, 擅长解决非线性、时变等复杂的控制问题, 是控制理论发展的高级阶段。

目前智能控制技术在国内外已有了较大的发展, 已进入工程化、实用化的阶段。随着人工智能技术、计算机技术的迅速发展, 智能控制必将迎来它的发展新时期。因此, 智能控制技术是各行业自动化工程技术人员急需掌握的专业知识与技术手段。为满足这一要求, 本书从大量介绍智能控制的文献书籍中筛选出智能控制中最常用的模糊控制、神经网络控制、专家控制和仿人控制等 4 种主要智能控制技术, 对其基本概念、基本原理和基本设计方法进行了提炼, 力求使内容少而精, 并分析了许多智能控制在各类系统的应用实例。

本书共 6 章, 第 1、3、5、6 章, 第 2 章的 2.6 节, 第 4 章的 4.3 节, 以及附录 A、B 由韩力群教授编写, 第 2 章的 2.1~2.5 及 2.7 节和附录 A 中的实验二由王志新老师编写, 第 4 章的 4.1、4.2 和 4.4 节由叶斌副教授编写。标有 \* 号的部分作为扩大知识面的内容。第 1 章介绍了智能控制的应用对象和主要特点、几种典型的智能控制系统的特点与结构, 以及智能控制的产生与发展。第 2 章讲述模糊控制的数学基础、模糊控制原理、基本模糊控制器的设计和模糊控制技术的特点, 介绍了其应用情况和常用开发平台。第 3 章讲述人工神经网络的基本概念、基本网络结构和主要学习算法, 在此基础上介绍了神经网络在系统辨识与控制方面解决问题的基本思路、应用方法和应用实例, 概要介绍了一般设计方法和常用开发工具。第 4 章介绍专家控制系统的基础知识、专家控制系统的基本组成结构与工作原理, 给出典型应用实例及主要应用开发工具。第 5 章介绍仿人智能控制的基本思路、主要类型、基本原理和应用实例。第 6 章介绍了遗传算法的基本思路与操作方法。附录 A、B 给出若干可选实验, 附录 C 给出了部分思考题与习题的参考解答。

本书配有电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师索取, 索取邮箱: [wbj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:wbj@mail.machineinfo.gov.cn)。

限于本书的篇幅和作者的学识, 书中疏漏不妥之处, 恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

- 1.1 智能控制概述 ..... 1
    - 1.1.1 传统控制和智能控制 ..... 1
    - 1.1.2 智能控制的应用对象 ..... 2
    - 1.1.3 智能控制的基本特点 ..... 2
  - 1.2 智能控制系统的主要类型 ..... 3
    - 1.2.1 模糊控制 ..... 3
    - 1.2.2 神经网络控制 ..... 4
    - 1.2.3 专家控制系统 ..... 5
    - 1.2.4 分层递阶智能控制 ..... 5
  - 1.3 智能控制的产生与发展 ..... 6
    - 1.3.1 自动控制理论的产生与发展过程 ..... 6
    - 1.3.2 智能控制的产生与发展过程 ..... 7
    - 1.3.3 智能控制的理论结构 ..... 9
  - 1.4 智能控制的主要应用领域 ..... 9
    - 1.4.1 在机器人系统中的应用 ..... 10
    - 1.4.2 在 CIMS 和 CIPS 中的应用 ..... 10
    - 1.4.3 在航天航空控制系统中的应用 ..... 11
    - 1.4.4 在社会经济管理系统中应用 ..... 11
    - 1.4.5 在交通运输系统中的应用 ..... 12
- 思考题与习题 ..... 13

## 第2章 模糊控制 ..... 14

- 2.1 引言 ..... 14
  - 2.1.1 模糊控制理论的产生及发展概况 ..... 14
  - 2.1.2 模糊控制的概念和特点 ..... 15
- 2.2 经典集合论 ..... 15
  - 2.2.1 经典集合及其运算 ..... 15
  - 2.2.2 关系与映射 ..... 18
- 2.3 模糊集合基础 ..... 21
  - 2.3.1 模糊集合及其运算 ..... 21

- 2.3.2 隶属度函数及其确定 ..... 25
  - 2.3.3 模糊关系 ..... 29
  - 2.3.4 模糊语言变量与模糊语句 ..... 35
  - 2.3.5 模糊推理 ..... 38
  - 2.4 模糊控制器的工作原理 ..... 44
    - 2.4.1 模糊控制与传统控制 ..... 44
    - 2.4.2 模糊控制系统的组成 ..... 45
    - 2.4.3 确定量的模糊化 ..... 46
    - 2.4.4 模糊控制算法的设计 ..... 48
    - 2.4.5 模糊推理 ..... 49
    - 2.4.6 输出信息的模糊判决 ..... 52
    - 2.4.7 基本模糊控制器的设计 ..... 53
    - 2.4.8 模糊模型的建立 ..... 58
  - 2.5 模糊控制仿真应用实例 ..... 66
    - 2.5.1 模糊控制系统的常用算法 ..... 66
    - 2.5.2 模糊控制系统控制器设计的仿真实例 ..... 67
  - 2.6 模糊控制系统设计及应用实例 ..... 78
    - 2.6.1 全自动洗衣机的模糊控制 ..... 78
    - 2.6.2 地铁机车的模糊控制 ..... 82
    - 2.6.3 模糊控制在交流伺服系统中的应用 ..... 85
  - 2.7 常用模糊逻辑控制实现软件 ..... 88
    - 2.7.1 FuzzyTECH 系统 ..... 89
    - 2.7.2 FIDE 系统 ..... 90
    - 2.7.3 MATLAB 模糊逻辑工具箱 ..... 91
    - 2.7.4 模糊控制系统开发工具包 FCDS ..... 93
- 思考题与习题 ..... 94

## 第3章 神经网络控制及应用 ..... 96

- 3.1 神经网络基础 ..... 96
  - 3.1.1 神经网络的基本特征与功能 ..... 96
  - 3.1.2 生物神经元及其信息处理机制 ..... 98
  - 3.1.3 人工神经元模型及神经网络模型 ..... 101

|                                                 |     |                                       |     |
|-------------------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 3.1.4 多层感知器与 BP 算法 .....                        | 105 | 4.2.4 直接式专家控制——专家<br>控制器 .....        | 203 |
| 3.1.5 径向基函数网络 .....                             | 114 | 4.2.5 间接式专家控制 .....                   | 205 |
| 3.1.6 反馈网络 .....                                | 119 | 4.3 专家控制系统的设计与应用实例 .....              | 206 |
| 3.1.7 递归网络 .....                                | 123 | 4.3.1 温室气候的专家控制 .....                 | 206 |
| 3.1.8 小脑模型神经网络 .....                            | 130 | 4.3.2 造纸过程的专家智能控制 .....               | 209 |
| 3.2 神经网络系统辨识 .....                              | 136 | 4.3.3 直流调速系统的专家<br>协调控制 .....         | 213 |
| 3.2.1 神经网络系统辨识原理 .....                          | 136 | 4.4 专家系统开发工具 .....                    | 218 |
| 3.2.2 系统模型的神经网络辨识 .....                         | 138 | 4.4.1 专家系统开发工具 Clips<br>简介 .....      | 218 |
| 3.3 神经网络控制 .....                                | 145 | 4.4.2 专家系统开发工具 Clips<br>的使用 .....     | 219 |
| 3.3.1 神经网络控制系统结构 .....                          | 146 | 思考题与习题 .....                          | 222 |
| 3.3.2 神经网络 PID 控制 .....                         | 149 |                                       |     |
| 3.3.3 神经网络内模控制 .....                            | 155 | <b>第 5 章 仿人智能控制原理及<br/>控制系统</b> ..... | 223 |
| 3.3.4 神经网络非线性预测控制 .....                         | 160 | 5.1 仿人智能控制原理 .....                    | 223 |
| 3.4 神经网络控制系统设计与<br>应用实例 .....                   | 163 | 5.1.1 仿人智能控制的基本思想 .....               | 223 |
| 3.4.1 BP 神经网络在冰柜温度控制中的<br>设计与应用 .....           | 163 | 5.1.2 仿人智能行为的特征变量 .....               | 224 |
| 3.4.2 神经网络模型参考自适应控制<br>在带材板形控制中的设计<br>与应用 ..... | 165 | 5.2 几种仿人智能控制系统 .....                  | 226 |
| 3.4.3 CMAC 网络在机器人手臂控制中的<br>设计与应用 .....          | 168 | 5.2.1 仿人智能开关控制 .....                  | 226 |
| 3.5 神经网络控制软件开发基础 .....                          | 169 | 5.2.2 仿人智能比例控制 .....                  | 228 |
| 3.5.1 神经网络设计基础 .....                            | 169 | 5.2.3 仿人智能积分控制 .....                  | 229 |
| 3.5.2 网络训练与测试 .....                             | 172 | 5.2.4 仿人分层递阶智能控制器 .....               | 231 |
| 3.5.3 神经网络软件运行调试 .....                          | 173 | 5.3 拟人脑智能控制器* .....                   | 232 |
| 3.5.4 MATLAB 神经网络工具箱 .....                      | 174 | 5.3.1 拟人脑智能控制器的<br>基本思想 .....         | 232 |
| 思考题与习题 .....                                    | 176 | 5.3.2 拟人脑智能控制器的结构<br>与功能 .....        | 233 |
| <b>第 4 章 专家控制系统</b> .....                       | 178 | 5.3.3 拟人脑智能控制器的技术<br>实现 .....         | 234 |
| 4.1 专家系统基础 .....                                | 178 | 5.4 仿人智能控制系统的设计与<br>应用实例 .....        | 236 |
| 4.1.1 专家系统概述 .....                              | 178 | 5.4.1 仿人智能温度控制器 .....                 | 236 |
| 4.1.2 专家系统的组成 .....                             | 179 | 5.4.2 仿人智能控制在摩托车底盘<br>测功机中的应用 .....   | 238 |
| 4.1.3 专家系统的特征及类型 .....                          | 180 | 思考题与习题 .....                          | 240 |
| 4.1.4 专家系统的知识表示 .....                           | 181 |                                       |     |
| 4.1.5 专家系统的推理机制 .....                           | 188 | <b>第 6 章 遗传算法及应用</b> .....            | 241 |
| 4.1.6 专家系统的知识获取 .....                           | 193 | 6.1 遗传算法的原理与特点 .....                  | 241 |
| 4.2 专家控制系统的结构与原理 .....                          | 197 | 6.1.1 遗传算法的基本原理 .....                 | 241 |
| 4.2.1 专家控制系统概述 .....                            | 197 |                                       |     |
| 4.2.2 专家控制系统的控制要求<br>与设计原则 .....                | 197 |                                       |     |
| 4.2.3 专家控制系统的典型结构<br>与原理 .....                  | 199 |                                       |     |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 6.1.2 遗传算法的特点 .....             | 241 |
| 6.2 遗传算法的基本操作与<br>模式理论 .....    | 242 |
| 6.2.1 遗传算法的基本操作 .....           | 242 |
| 6.2.2 遗传算法的模式理论 .....           | 245 |
| 6.3 遗传算法的实现与改进 .....            | 248 |
| 6.3.1 编码问题 .....                | 248 |
| 6.3.2 初始种群的产生 .....             | 248 |
| 6.3.3 适配度的设计 .....              | 248 |
| 6.3.4 遗传算法的操作步骤 .....           | 249 |
| 6.3.5 遗传算法中的参数选择 .....          | 250 |
| 6.3.6 遗传算法的改进 .....             | 250 |
| 6.4 遗传算法在智能控制中的应用 .....         | 251 |
| 6.4.1 引言 .....                  | 251 |
| 6.4.2 遗传算法用于控制系统<br>建模与设计 ..... | 252 |
| 6.4.3 遗传算法在神经网络优化中<br>的应用 ..... | 253 |
| 6.4.4 遗传算法在模糊控制中<br>的应用 .....   | 255 |

|              |     |
|--------------|-----|
| 思考题与习题 ..... | 256 |
|--------------|-----|

|          |     |
|----------|-----|
| 附录 ..... | 257 |
|----------|-----|

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 附录 A 模糊控制实验指导书 ..... | 257 |
|----------------------|-----|

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 实验一 洗衣机模糊控制系统<br>设计 ..... | 257 |
|---------------------------|-----|

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 实验二 基于 MATLAB 的水箱水位模糊<br>控制系统设计 ..... | 265 |
|---------------------------------------|-----|

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 附录 B 神经网络控制仿真实验<br>指导书 ..... | 276 |
|------------------------------|-----|

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 实验一 神经网络非线性动态系统逆<br>模型辨识 ..... | 276 |
|--------------------------------|-----|

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 实验二 神经网络内模控制 ..... | 276 |
|--------------------|-----|

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 实验三 利用 MATLAB 神经网络工具箱<br>编程实现 Hermit 多项式的<br>逼近问题 ..... | 279 |
|---------------------------------------------------------|-----|

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 附录 C 部分思考题与习题参考答案 ..... | 281 |
|-------------------------|-----|

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 295 |
|------------|-----|

# 第1章 绪 论

经典控制和现代控制理论统称为传统控制，其主要特征是基于模型的控制。随着工业生产的发展，被控对象越来越复杂，常表现为高度的非线性、强噪声干扰、动态突变性及分散的传感元件与执行元件、分层和分散的决策机构、复杂的信息结构等，这些复杂性都难以用微分方程或差分方程等精确的数学模型来描述。除了复杂性外，往往还存在着同样难以用精确数学模型描述的不确定性。显然，基于精确模型的传统控制难以解决上述复杂对象的控制问题。

智能控制是人工智能与控制理论交叉的产物，是传统控制理论发展的高级阶段。智能控制理论的创立和发展是对计算机科学、人工智能、知识工程、模式识别、系统论、信息论、控制论、模糊集合论、人工神经网络、进化论等多种前沿学科、先进技术和科学方法的高度综合集成。经过 20 多年的研究和发展，尤其是近 10 年来的研究成果表明，把人工智能的方法和控制理论相结合，解决复杂系统的控制难题是行之有效的。

本章从智能控制设计与应用的角度出发，简要介绍智能控制的基本概念、主要类型及智能控制的产生和发展。

## 1.1 智能控制概述

智能控制作为新兴的发展中的高技术学科，目前还没有统一的定义。G. N. 萨里迪斯曾提出一种较抽象的定义：通过驱动智能机器自主地实现其目标而无需操作人员干预的系统称为智能控制系统。所谓智能机器是指那些能够自主地或有人参与地在定形或不定形、熟悉或不熟悉的环境中执行拟人任务的机器。当一个具有较高智能的控制系统工作时，控制器完成任务的特点与人完成任务的特点十分相似。

### 1.1.1 传统控制和智能控制

传统控制和智能控制是自动控制发展的不同阶段。传统控制的理论体系比较完整，解决了系统的可观、可控和稳定性问题，但只适用于被控对象可用数学模型描述的线性定常系统。智能控制是针对系统的复杂性、非线性和不确定性而提出来的，因此对于这一类系统，其解决问题的能力水平明显高于传统控制。但智能控制作为一门发展中的新学科，还缺少比较适合的数学工具和理论体系来描述和处理智能控制问题。两者既有区别，又有密切关系。

#### 1.1.1.1 传统控制和智能控制的区别

传统控制和智能控制的区别主要表现在两个方面：

(1) 处理复杂性、不确定性问题的能力 传统控制方法在处理复杂化和不确定性问题方面能力很弱，有时甚至丧失了这种能力。相反，智能控制在处理复杂性、不确定性方面能力较强。这是因为智能控制系统具有仿人的智能，这种智能主要表现在智能决策上。智能控制系统的核心任务是控制具有复杂性和不确定性的系统，而控制的最有效途径就是采用仿人



智能控制决策。

(2) 对被控对象模型的依赖 传统控制是基于被控对象精确模型的控制方式,然而对大对被控对象很难建立精确的数学模型。为了控制必须建模,整个控制系统不得不置于不精确的模型框架下,缺乏灵活性和应变性,因此很难胜任对复杂系统的控制。而智能控制的核心是基于知识进行智能决策,采用灵活机动的决策方式迫使控制朝着期望的目标逼近。

#### 1.1.1.2 传统控制和智能控制的统一

智能控制擅长解决非线性、时变等复杂的控制问题,而传统控制适于解决线性、时不变等相对简单的控制问题,尽管这些问题用智能方法同样也可以解决,但传统控制的分析设计方法更成熟、简单。此外,智能控制的许多解决方案是在传统控制方案基础上的改进,因此,智能控制是对传统控制的扩充和发展,传统控制是智能控制的一个组成部分。在这个意义上,传统控制和智能控制可以统一在智能控制的框架下,而不是被智能控制所取代。

#### 1.1.2 智能控制的应用对象

综上所述,智能控制是控制理论发展的高级阶段。它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,例如智能机器人系统、计算机集成制造系统(CIMS)、复杂的工业过程控制系统、航天航空控制系统、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。概括起来,智能控制的应用对象具备以下一些特点:

(1) 不确定性的模型 传统的控制是基于模型的控制,这里的模型包括控制对象和干扰模型。对于传统控制,通常认为模型已知或者经过辨识可以得到,而智能控制的对象通常存在严重的不确定性。这里所说的模型不确定性包含两层意思:一是模型未知或知之甚少;二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。无论哪种情况,传统方法都难于对它们进行控制,而这正是智能控制所要研究解决的问题。

(2) 高度的非线性 传统控制理论中的线性系统理论比较成熟。对于具有高度非线性的控制对象,虽然也有一些非线性控制方法,但总的说来,非线性控制理论还很不成熟,而且方法比较复杂。采用智能控制的方法往往可以较好地解决非线性系统的控制问题。

(3) 复杂的任务要求 在传统的控制系统中,控制的任务或者是要求输出量为定值,或者是要求输出量跟随期望的运动轨迹,因此控制任务的要求比较单一。对于智能控制系统,任务的要求往往比较复杂。例如,要求系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力;要求除了实现对各被控物理量定值调节外,还要求实现整个系统的自动起停、故障的自动诊断,以及紧急情况的自动处理等功能。

#### 1.1.3 智能控制的基本特点

传统控制研究的主要目标是被控对象,而智能控制研究的主要目标是控制器本身。与传统控制器相比,智能控制器不再是纯粹的解析型数学模型,而是数学模型和知识系统相结合的广义模型。智能控制常具有以下一种或几种基本特点:

(1) 分层递阶的组织结构 智能控制系统的组织结构体现了“智能递增,精度递减”的原理,其协调层次越高,所体现的智能也越高。

(2) 多模态控制 智能控制系统常采用具有开、闭环控制结合、定性决策与定量控制结合、数学模型和非数学广义模型结合的多模态控制。

(3) 自学习能力 一个系统,如果能对一个过程或其环境的未知特征所固有的信息进行学习,并将得到的经验用于进一步的估计、分类、决策或控制,从而使系统的性能得到改

善,那么就称该系统为学习控制系统。学习控制系统是智能控制系统的一种,智能控制系统的学习功能可能有低有高,低层次的学习功能主要包括对控制对象参数的学习,高层次的学习则包括知识的更新和遗忘。

(4) 自适应能力 智能控制系统中的智能行为实质上是一种从输入到输出之间的映射关系。它可看成是不依赖模型的自适应估计,因此它具有很好的适应性能。当系统的输入不是已经学习过的例子时,由于系统具有插补功能,从而可给出合适的输出。甚至当系统中某些部分出现故障时,系统也能够正常的工作。如果系统具有更高程度的智能,它还能自动找出故障甚至具备自修复的功能,从而体现了更强的适应性。

(5) 自组织能力 具有自组织能力的智能控制系统对于复杂的任务和分散的传感信息具有自行组织和协调的功能。该组织功能也表现为系统具有相应的主动性和灵活性,即智能控制器可以在任务要求的范围内自行决策、主动地采取行动;而当出现多目标冲突时,在一定的限制下,控制器可有权自行裁决。

(6) 优化能力 智能控制系统能够通过不断优化控制参数和寻找最佳控制器结构实现整体最优的控制性能。

## 1.2 智能控制系统的主要类型

智能控制作为一门新兴学科和交叉学科,目前还未形成完整的理论体系。但智能控制系统的几个主要类型各有其较完整的体系,下面简要介绍。

### 1.2.1 模糊控制

模糊控制(Fuzzy Control)是智能控制的主要类型之一。现代计算机虽然有着极高的计算速度和极大的存储能力,但却不能完成一些人看起来十分简单的任务。一个很重要的原因是人具有模糊决策和推理的功能,模糊控制正是试图模仿人的这种功能。1965年,L. A. 扎德(L. A. Zadeh)教授创立了模糊集合理论,为模糊控制奠定了基础。20世纪70年代中期,以E. H. 曼德尼(E. H. Mamdani)为代表的一批学者提出了模糊控制的概念,标志着模糊控制的正式诞生,并在控制领域得到了较快的发展和实际的应用,成为智能控制领域中的一个重要分支。在其后的20年中,已有很多模糊控制在实际应用中获得成功的例子。

模糊控制的基本思想是把人类专家对特定的被控对象或过程的控制策略总结成一系列以“IF 条件 THEN 作用”形式表示的控制规则,通过模糊推理得到控制作用集,作用于被控对象或过程。模糊控制器的模糊算法包括:①定义模糊子集,建立模糊控制规则;②由基本论域转变为模糊集合论域;③模糊关系矩阵运算;④模糊推理合成,求出控制输出模糊子集;⑤进行逆模糊判决,得到精确控制量。模糊控制器的一般结构如图1-1所示。

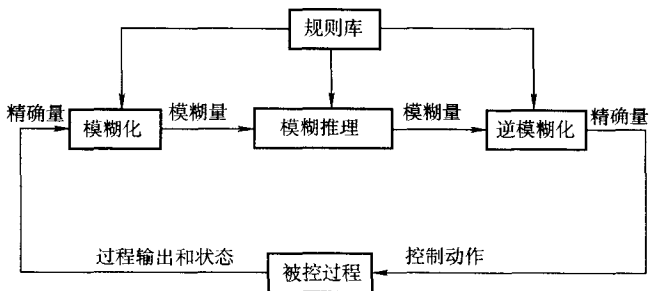


图 1-1 模糊控制器的一般结构

与常规控制方法相比,模糊控制

有以下特点：①模糊控制完全是在操作人员控制经验基础上实现对系统的控制，无需建立数学模型，是解决不确定性系统的一种有效途径；②模糊控制具有较强的鲁棒性，被控对象参数的变化对模糊控制的影响不明显，可用于非线性、时变、时滞系统的控制；③由离线计算得到控制查询表，提高了控制系统的实时性；④控制的机理符合人们对过程控制作用的直观描述和思维逻辑，为智能控制应用打下了基础。

模糊控制的理论和应用研究，主要有以下方面：模糊控制的稳定性研究，模糊模型及辨识，模糊最优控制，模糊自组织控制，模糊自适应控制，传统 PID 与模糊控制相结合的多模态模糊控制器。模糊控制理论 20 年来在理论和应用上已取得了引人瞩目的成果，成为控制理论及应用中的重要组成部分。

### 1.2.2 神经网络控制

近年来，神经网络的研究得到了越来越多的关注和重视。人工神经网络是在现代脑科学、神经生理学、心理学和计算机科学等众多学科发展的广阔科学背景下产生的。从信息处理的角度看，人脑是一个功能强大、结构异常复杂的并行信息处理系统，其巨大而奇妙的智能的物质基础是大脑中的数以千亿计的神经元及它们之间的广泛连接。为了部分地表现出人脑的某些智能特性，人们从结构模拟和信息处理机制模拟的角度建立了生物神经网络的模型，即人工神经网络。人工神经网络虽然反映了人脑功能的基本特性，但远不是自然神经网络的逼真描写，而只是它的某种简化、抽象和模拟。人工神经网络具有几个突出的特点：①可以充分逼近任意复杂的非线性关系；②所有定量或定性的信息都分布储存于网络内的各神经元的连接上，故有很强的鲁棒性和容错性；③采用并行分布处理方法，使得快速进行大量运算成为可能；④可自学习和自适应不确定或不确定的系统。

从 20 世纪 80 年代起，人工神经网络引起人们的极大关注，在人工智能、自动控制、机器人、信息处理等领域得到广泛应用。神经网络与控制相结合形成了智能控制领域的一个重要分支——神经网络控制 (Neural Network Control)。由于神经网络控制系统在许多方面呈现出人脑的智能特点，例如不依赖于精确的数学模型、具有自学习能力、对环境的变化具有自适应性等，因此其应用越来越广泛。目前，神经网络已在多种控制结构中得到应用，如自校正控制、模型跟踪自适应控制、预测控制、内膜控制等。图 1-2 给出神经网络控制的 3 种典型结构。

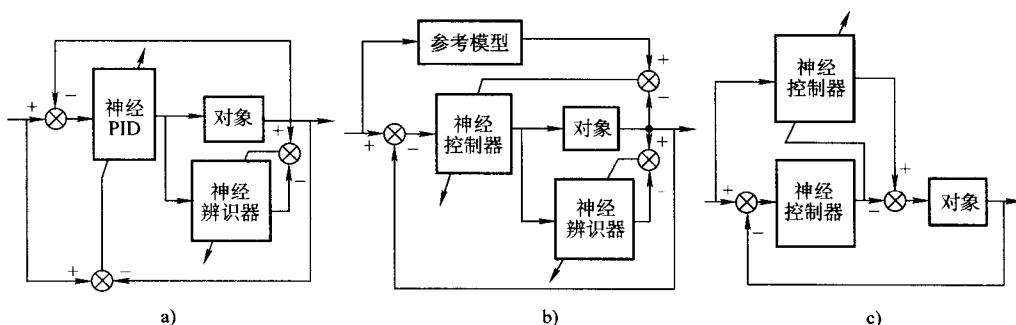


图 1-2 神经网络控制的 3 种典型结构

a) PID 控制 b) 模型参考自适应控制 c) 前馈反馈控制

### 1.2.3 专家控制系统

专家系统是人工智能应用领域最成功的分支之一，始于20世纪60年代中期。随着应用的不断成功，专家系统技术越来越受人们的重视。20世纪80年代专家系统的概念和方法被引入控制领域，促进了专家控制（Expert Control）系统的研究和应用，它在控制领域的应用已涉及控制系统辅助设计、分析和专家控制等方面。大多数专家系统主要由4部分组成：①知识库，包括事实、判断、规则、经验知识和数学模型；②推理机，首先把知识库中的专家知识及数据库中的有关事实，以一定的推理方式进行逻辑推理（匹配）以给出结论；③解释机制是专家系统区别于传统计算机程序的主要特征之一，它可以向用户回答如何导出推理的结论；④知识获取系统，主要完成机器学习。

专家控制系统的出现，改变了传统的控制系统设计中单纯依靠数学模型的局面，使知识模型与数学模型相结合，知识信息处理技术与控制技术相结合，它是人工智能与控制理论方法和技术相结合的典型产物。专家控制系统具有如下特点：①它在一定程度上模拟人的思维活动规律，能进行自动推理，善于应付各种变化，具有透明性和灵活性；②它可以不断监督生产过程，实现特定性能指标下的优化控制，能处理大量低层信息，可进行操作指导；③相对传统控制，扩展了许多功能，如复杂系统的高质量控制、故障诊断和容错控制、参数和算法的自动修改、不同算法的组合等；④深层知识的引入，可以弥补专家经验的不足，可以自动消除决策冲突。

目前应用在控制领域的专家控制系统的主要类型有：①控制系统辅助设计；②过程监控、在线诊断、故障分析与预测维护；③过程控制；④航天故障诊断与处理；⑤生产过程的决策与调度。

根据专家系统的方法和原理设计的控制器称为基于知识的控制器。按照基于知识的控制器在整个智能控制系统中的作用，又可分为直接专家控制、间接专家控制两种类型。图1-3给出了直接专家控制和间接专家控制两种系统的框图。

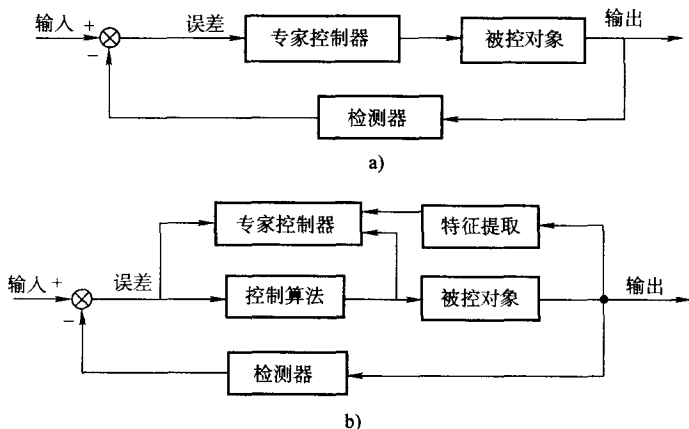


图 1-3 直接专家控制和间接专家控制系统框图

a) 直接专家控制系统框图 b) 间接专家控制系统框图

### 1.2.4 分层递阶智能控制

分层递阶智能控制（Hierarchical Intelligent Control）是在研究学习控制系统的基础上，

从工程控制出发, 总结人工智能与自适应控制、自学习控制及自组织控制的关系后逐渐形成的。G. N. 萨里迪斯 (G. N. Saridis) 最早提出了分层递阶智能控制, 其结构如图 1-4 所示, 该系统由组织级、协调级、执行级组成, 按照自上而下精确程度渐增、智能程度渐减的原则进行功能分配。因此在这类多层智能控制系统中, 智能主要体现在高层次上, 其主要作用是模仿人的功能实现规划、决策、学习和任务协调等任务。执行级仍然采用现有数学解析控制算法, 对数值进行操作和运算。分层递阶智能控制具有两个明显的特点: ①对控制来讲, 自上而下控制精度越来越高; ②对识别来讲, 自下而上信息回馈越来越粗略。

在智能控制系统的研究与应用中, 常将上述几种常用类型结合起来, 构成各种综合智能控制系统, 例如模糊神经网络智能控制系统、专家模糊智能控制系统、神经网络专家智能控制系统等。

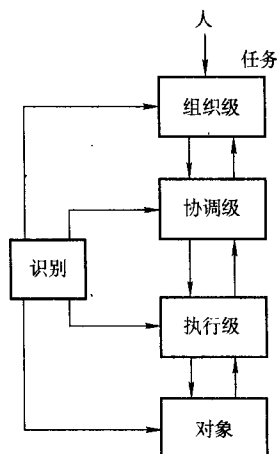


图 1-4 分层递阶智能控制结构

## 1.3 智能控制的产生与发展

### 1.3.1 自动控制理论的产生与发展过程

自动控制理论作为一门科学, 其产生可追溯到 18 世纪中叶英国的第一次技术革命。1765 年, 瓦特发明了蒸汽机, 进而应用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机。后来, 工程界用自动控制理论讨论调速系统的稳定性问题。1868 年发表的“关于调节器”一文中指出, 控制系统的品质可用微分方程来描述, 系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。1872 年和 1890 年, 劳斯和赫尔维茨先后找到了系统稳定性的代数判据, 即系统特征方程根具有负实部的充分必要条件。1892 年, 俄国学者李雅普诺夫提出了用适当的能量函数——李雅普诺夫函数的正定性及其导数的负定性来鉴别系统的稳定性准则, 从而总结和发展的系统的经典时域分析法。1932 年, 美国贝尔实验室工程师奈奎斯特发表了反馈放大器稳定性的著名论文, 给出了系统稳定性的奈奎斯特判据。后来, 前苏联学者米哈依洛夫又把奈奎斯特判据推广到条件稳定和开环不稳定系统的一般情况, 发展了以实验为基础的频率响应分析法。1948 年, 美国著名的控制论创始人维纳系统地总结了前人的成果, 发表了经典著作《控制论——或关于在动物和机器中控制和通信的科学》, 书中论述了控制理论的一般方法, 推广了反馈的概念, 为控制理论这门学科的产生奠定了基础。

控制理论的发展过程一般可分为 3 个阶段: 第一阶段时间 20 世纪 40 至 60 年代, 称为“古典控制理论”时期。古典控制理论主要是解决单输入单输出问题, 主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法。所研究的系统多是线性定常系统, 对非线性系统, 分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量。古典控制理论能够较好地解决生产过程中的单输入单输出问题。这一时期的主要代表人物有博德和伊文思。博德于 1945 年提出了简便而实用的博德图法。伊文思于 1948 年提出了直观而又形象的根轨迹法。第二阶段时间为 20 世纪 60 至 70 年代, 称为“现代控制理论”时期。这个时期, 计算机的飞速发展, 推动了空间技术的发展。古典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组, 用以描

述系统的动态过程,即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题,系统既可以是线性定常的,也可以是非线性时变的。这一时期的主要代表人物有庞特里亚金、贝尔曼及卡尔曼等人。1957年,贝尔曼提出了动态规则;1959年,卡尔曼和布西发表了关于线性滤波器和估计器的论文,即所谓著名的卡尔曼滤波;1961年,庞特里亚金发表了极大值原理。70年代初,瑞典的奥斯特隆姆和法国的朗道教授在自适应控制理论和应用方面作出了贡献。第三阶段时间为20世纪70年代末至今。70年代末,控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展,前者是控制理论在广度上的开拓,后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论。而“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及控制与信息传递过程的规律,研制具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。

### 1.3.2 智能控制的产生与发展过程

#### 1.3.2.1 产生与发展过程

(1) 启蒙期 从20世纪60年代起,自动控制理论和技术的发展已渐趋成熟,控制界学者为了提高控制系统的自学习能力,开始注意将人工智能技术与方法应用于控制系统。60年代初期,F. W. 史密斯提出采用性能模式识别器来学习最优控制方法的新思想,试图利用模式识别技术来解决复杂系统的控制问题。1965年,美国著名控制论专家扎德创立了模糊集合论,为解决复杂系统的控制问题提供了强有力的数学工具。1966年,J. M. 门德尔首先主张将人工智能用于空间飞行器的学习控制系统的设计,并提出了“人工智能控制”的概念。1971年,著名学者傅京孙从发展学习控制的角度首次正式提出智能控制这个新兴的学科领域。这些标志着智能控制的思想已经萌芽。

(2) 形成期 20世纪70年代可以看做是智能控制的形成期。从70年代初开始,傅京孙等人从控制论角度进一步总结了人工智能技术与自适应、自组织、自学习控制的关系,正式提出了智能控制就是人工智能技术与控制理论的交叉,并创立了人一机交互式分级递阶智能控制的系统结构。在核反应堆、城市交通等控制中成功地应用了智能控制系统。这些研究成果为分级递阶智能控制的形成奠定了基础。1974年,英国工程师曼德尼将模糊集合和模糊语言用于锅炉和蒸汽机的控制,创立了基于模糊语言描述控制规则的模糊控制器,取得良好的控制效果。1979年,他又成功地研制出自组织模糊控制器,使得模糊控制器具有了较高的智能。模糊控制的形成和发展,以及与人工智能中的产生式系统、专家系统思想的相互渗透,对智能控制理论的形成起了十分重要的推动作用。

(3) 发展期 进入20世纪80年代以来,由于微机的迅速发展及人工智能的重要领域——专家系统技术的逐渐成熟,使得智能控制和决策的研究及应用领域逐步扩大,并取得了一批应用成果。例如,1982年,Fox等人实现了加工车间调度专家系统;1983年,萨里迪斯把智能控制用于机器人系统;1984年,LISP公司研制成功用于分布式的实时过程控制专家系统;1986年,M. Lattlmer等人开发的混合专家系统控制器是一个实验型的基于知识的实时控制专家系统,用来处理军事和现代化工业中出现的控制问题。1987年4月,美国Foxboro公司公布了新一代的IA系列智能自动控制系统。这种系统体现了传感器技术、自动控制技术、计算机技术和过程知识在生产自动化应用方面的综合先进水平,标志着智能控制系统已由研制、开发阶段转向应用阶段。应该特别指出,80年代中后期,神经网络的研究获得了重要进展,神经网络理论和应用研究为智能控制的研究起到了重要的促进作用。

(4) 高潮期 进入 20 世纪 90 年代以来, 智能控制的研究势头异常迅猛, 每年都有各种以智能控制为专题的大型国际学术会议在世界各地召开, 各种智能控制杂志或专刊不断涌现, 来自各国政府和企业的专项科研经费不断增加。1994 年 6 月, IEEE 组织 (国际电气电子工程师协会) 在美国奥兰多召开的全球计算智能大会, 将研究智能控制的重要基础——模糊系统、神经网络、进化计算 3 个新学科的内容综合在一起, 引起了国际学术界的广泛关注。智能控制研究与应用涉及众多领域, 从高技术的航天飞机推力矢量的分级智能控制、空间资源处理设备的高自主控制, 到智能故障诊断及控制重新组合, 从轧钢机、汽车喷油系统的神经控制到家电产品的神经模糊控制。如果说智能控制在 20 世纪 80 年代的应用和研究主要是面向工业过程控制, 那么 20 世纪 90 年代, 智能控制的应用已经扩大到面向军事、高技术领域和日用家电产品等领域。

#### 1.3.2.2 主要代表人物及贡献

(1) 傅京孙 智能控制的思想最早来自著名美籍华裔科学家傅京孙, 他通过人一机控制器和机器人方面的研究, 首先提出把人工智能的直觉推理方法用于学习控制系统, 并将智能控制概括为自动控制与人工智能的结合。他指出, 在低层次控制中用常规的基本控制器, 而在智能决策的高层次, 应具有拟人化功能。他在著名论文“学习控制系统和智能控制系统: 人工智能与自动控制的交叉”中列举了 3 种智能控制系统的典型情况:

1) 人作为控制器的控制系统。由于人具有识别、决策、控制等功能, 因此对于不同的控制任务及不同的对象和环境情况, 它具有自学习、自适应和自组织的功能, 自动采用不同的控制策略以适应不同的情况。显然, 这样的控制系统属于智能控制系统。

2) 人机结合作为控制器的控制系统。在这样的控制系统中, 机器 (主要是计算机) 完成那些连续进行的需要快速计算的常规控制任务。人则主要完成任务分配、决策、监控等任务。它是另外一种类型的智能控制系统。

3) 无人参与的智能控制系统。人们最感兴趣的是如何将前面由人完成的那些功能变为由机器来完成, 从而设计出无人参与的智能控制系统。由于被控过程往往是一个复杂和不确定性的环境, 这时要建立被控过程的准确的数学模型, 并据此采用常规的控制方法是十分困难或几乎不可能的。

对于复杂的环境和复杂的任务, 如何将人工智能技术中较少依赖模型的问题求解方法与常规的控制方法相结合, 这正是智能控制所要解决的问题。

(2) G. N. 萨里迪斯 1977 年, 萨里迪斯出版了《随机系统的自组织控制》一书, 1979 年发表了综述文章“朝向智能控制的实现”, 对智能控制的发展做出了重要贡献。他首次提出了分层递阶的智能控制结构形式, 整个控制结构分成 3 个层次: ①语言组织级; ②协调级; ③自组织控制级。萨里迪斯等后来在分层递阶智能控制的理论和实践方面又做了大量的工作, 对智能控制系统的 3 级结构做了明确的分工和定义, 讨论了每一级的实现方法, 建造了一个智能机器人的实验系统。在理论上的一个重要贡献是定义了熵的概念, 并以熵作为整个智能控制系统的性能度量。对于组织级和协调级的实现, 又在原有的基础上进行了改进。萨里迪斯在分层递阶智能控制的理论和实践方面做了大量的工作, 目前分层递价智能控制理论已成为智能控制理论中一个比较成熟的重要分支。

(3) K. J. 奥斯特洛姆 在智能控制的发展过程中, 另一个具有重要贡献的著名学者是 K. J. 奥斯特洛姆。他在 1986 年发表的《专家控制》的著名文章中, 将人工智能中的专家系

统技术引入到控制系统中,组成了另外一种类型的智能控制系统。在实际的控制系统中,核心的控制算法只是其中的一部分,它还需要许多其他的逻辑控制。例如对于一个PID调节器来说,需要考虑操作员接口、手动与自动的平滑切换、参数突然改变所引起的过渡过程、执行部件的非线性影响、积分项引起的大摆动现象、上下限报警等问题。采用启发逻辑可用来解决这些问题。即使在控制算法部分,也可针对不同的情况采用不同的控制算法来获得更为满意的控制性能,这也需要启发逻辑来实现这样的转换。奥斯特洛姆所提出的专家控制将人工智能中的专家系统技术与传统的控制方法相结合,并吸取了这两者的长处,在实际中取得了明显的效果。专家控制作为智能控制的一种形式,有着非常广阔的应用前景。

### 1.3.3 智能控制的理论结构

智能控制的理论基础具有多学科(多元)交叉的结构特点。在智能控制的发展过程中,关于其理论结构有以下3种具有代表性的提法。智能控制的理论结构如图1-5所示。

(1) 二元结构 傅京孙指出,智能控制(IC)描述自动控制(AC)与人工智能(AI)交接的作用。这种交接作用可以用图1-5a所示的二元交集结构表示。

(2) 三元结构 萨里迪斯将运筹学(OR)的概念引入傅京孙的智能控制,从而将其扩展为图1-5b所示的三元结构。

(3) 四元结构 在研究了各种智能控制的结构和各相关学科的关系后,我国学者蔡自兴在三元结构的基础上增加了信息论(IT),提出了图1-5c所示的智能控制的四元结构。

可以看出,从智能控制的二元结构到四元结构,是一脉相承的继承与发展的关系。其中控制论与人工智能是智能控制的核心,而随着系统论与信息论的发展,运筹学和信息论已成为智能控制不可缺少的组成部分。

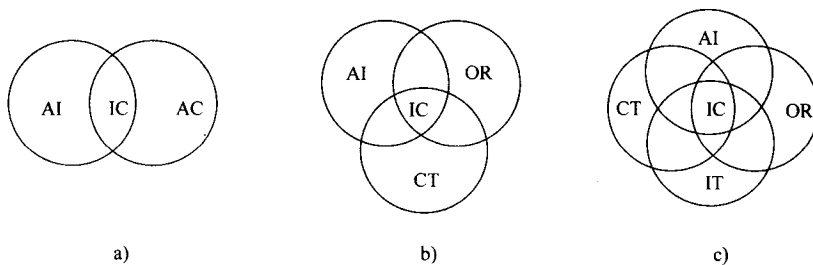


图1-5 智能控制的理论结构

a) 二元结构 b) 三元结构 c) 四元结构

## 1.4 智能控制的主要应用领域

智能控制主要用于用传统控制方法难以解决的复杂系统的控制问题。例如智能机器人系统,计算机集成制造系统(Computer-Integrated Manufacturing System, CIMS),复杂的工业过程控制系统(Computer-Integrated Processing System, CIPS),航天航空控制系统,交通物流、商务、建设作业、农业等非制造业中的控制系统,社会经济管理系统,环保及能源系统等。



### 1.4.1 在机器人系统中的应用

目前在工业上运行的机器人大都不具有智能,只是一些按预先编好的程序执行某些重复作业的自动化装置。智能控制在机器人系统中的应用形成了智能机器人分支,涉及机器视觉、触觉、听觉和力觉等多种感知系统,以及学习、控制、协调、决策等多种智能控制系统的研究。形形色色的智能机器人已在各领域获得越来越多的应用。

E. H. Mandan 于 20 世纪 80 年代初首次将模糊控制应用于机器人的操作臂控制。1997 年美国的探路者空间移动机器人完成了对火星表面实地探测,被誉为 20 世纪自动化技术的最高成就之一。

海洋机器人作为海洋考察与开发的重要工具,已广泛应用于海底隧道建筑、海底探矿和采矿等水下工程,搜救打捞和军事活动等方面。

微型智能机器人在精密机械加工、现代光学仪器、现代生物工程、医学和医疗等应用中将有广阔的应用前景。

智能机器人在体育、娱乐、家居及医疗领域也得到了广泛应用。例如,足球机器人、舞蹈机器人、机器宠物和家庭智能机器人等,在将科学技术与实际结合的同时还给人类带来极大的乐趣;智能医疗机器人在辅助外科手术及远程医疗服务方面已获得成功的应用。

### 1.4.2 在 CIMS 和 CIPS 中的应用

从 20 世纪 70 年代开始,随着工业生产过程规模的日益复杂化与大型化,现代化工业要求计算机系统不仅要完成直接面向过程的控制和优化任务,而且要在获取全部生产过程尽可能多的信息基础上,进行整个生产过程的信息综合、优化调度甚至生产管理、经营管理,因此必须引入人工智能技术。随着自动化技术、计算机技术、数据通信技术等的迅速发展,满足这些要求已不是梦想。能实现这些功能的系统有许多不同的名称,如全厂监督与控制系统(Plant wide Supervision and Control)、工厂综合自动化系统、计算机集成制造系统 CIMS 和计算机集成过程控制系统 CIPS 等计算机集成制造系统和过程控制系统的 5 级递阶结构如图 1-6 和图 1-7 所示。

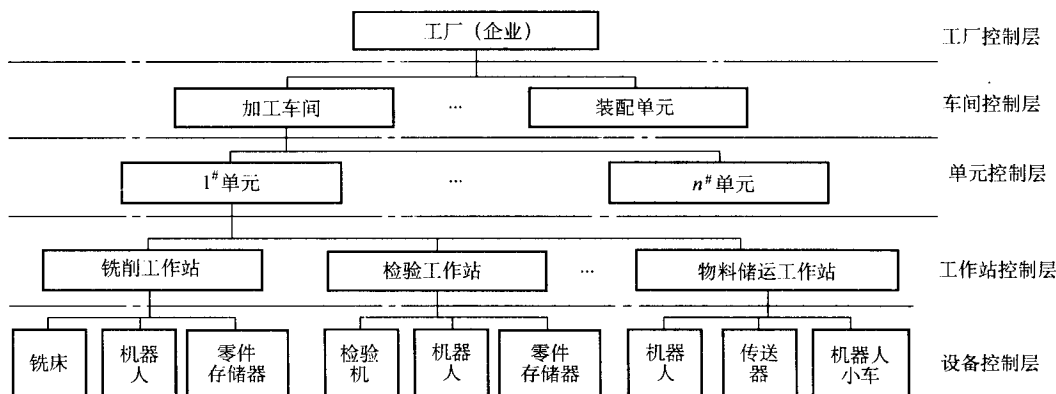


图 1-6 计算机集成制造系统的 5 级递阶结构

CIMS 系统概括了企业生产活动的全过程,由各子过程计算机控制、管理、决策集成,实现生产、管理、决策一体化的综合自动化系统。CIMS 的核心是信息的集成,即在正确的