

# 柔性智能控制

刘 丽 著

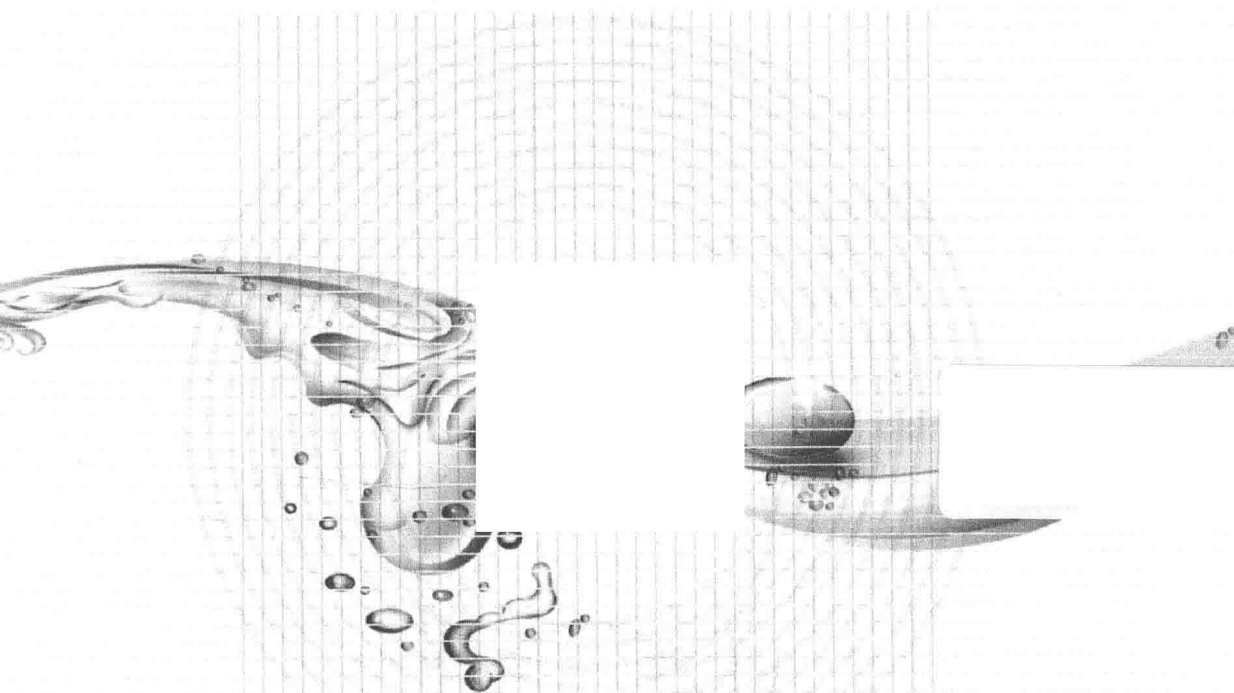


西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

本书由中中高校基本科研业务费专项资金资助 (2014MS128)

# 柔性智能控制

刘 丽 著



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内容简介

随着被控系统复杂程度以及对其控制要求的不断提高,具有认知和仿人功能、能适应不确定环境等特性的智能控制方法应运而生。智能控制是研究用计算机模拟人的智能,实现对复杂系统有效控制的理论、技术和方法,是自动控制技术不断发展的产物。本书从智能控制理论的逻辑基础入手,重点研究智能控制模型的柔性化问题,将具有广泛柔性特征的泛逻辑学引入智能控制中,提出了柔性智能控制模型 ICM-LG 和 ULICM,并对这两个模型的逻辑基础、基本原理、设计方法和应用进行了详细说明。

本书适用于大专以上文化水平,对逻辑学、数学、计算机、人工智能、自动控制、智能控制等感兴趣的读者,也可供相关研究方向的学者、教师和学生参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性智能控制 / 刘丽著. — 西安: 西安交通大学

出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5605-9218-3

I. ①柔… II. ①刘… III. ①柔性控制—智能控制

IV. ①TP24②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 291231 号

---

书 名 柔性智能控制

著 者 刘 丽

责任编辑 郭鹏飞

---

出版发行 西安交通大学出版社

(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>

电 话 (029) 82668357 82667874 (发行部)

(029) 82668315 (总编办)

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

---

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.5 字数 280 千字

版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5605-9218-3

定 价 68.00 元

---

读者购书、书店添货或发现印装质量问题,请与本社营销中心联系、调换。

订购热线: (029) 82665248 (029) 82665249

投稿热线: (029) 82669097

读者信箱: [lg\\_book@163.com](mailto:lg_book@163.com)

版权所有 侵权必究

# 前言

随着现代科学技术的迅速发展,生产系统的规模越来越大,复杂大系统逐渐出现,它由大量相互作用或相互分离的子系统结合在一起,具有不同优先级的各种可变化的子任务要同时满足或依次满足性能指标。这种系统的非线性的、混沌的或事先不确定的动态行为,导致了控制对象、控制器,以及控制任务和目的的日益复杂化。

复杂系统的复杂性不仅仅表现在其高维性上,更多的则表现在被控对象模型的不确定性、系统信息的模糊性、复杂的信息模式、高度非线性、输入信息的多样化、控制的多层次和多目标要求、计算复杂性、庞大的数据处理,以及严格的性能指标等方面。面对这些特性,无论是经典控制理论还是现代控制理论都受到了极大的挑战,于是,将人工智能理论与技术运用到复杂系统的控制问题中形成的智能控制方法和技术应运而生。

智能控制的本质就是通过分析、研究人进行控制的过程,并用机器模拟这个过程,使控制系统具有类似于人的智能。这种方法来源于人们的实践经验,不需要系统精确的数学模型,控制效果不依赖于简单的解析表达式,是最接近于人的思维方式的控制方法。

目前,各种智能控制方法已经在很多工业过程中取得了令人瞩目的成绩,如机器人、柔性 and 集成制造系统、智能通信系统等等,但它们的数学理论基础却具有一定的争议。现有常见智能控制方法主要是基于经典逻辑或者连续值逻辑(主要是模糊逻辑)的。经典逻辑适用于描述对立充分的二值世界,这种绝对化的观点不允许亦此亦彼的中间过渡状态存在,无法满足描述对立不充分的现实世界中各种柔性的需要,显然,采用经典逻辑作为智能控制方法的逻辑基础不是最佳选择。以模糊逻辑为理论基础的模糊控制方法,通过承认真值柔性,使得复杂系统的控制向柔性化的方向迈出了很大的一步,但是我们也注意到,真正的智能控制不仅要具有柔性的真值域,还要有柔性的连接词、柔性的量词和柔性的推理模式支撑,只有具备了这些特性,才能对复杂系统进行更为有效和细致的控制。

在探索已有逻辑一般规律的基础之上,我国学者何华灿教授提出了一种能包容各种逻辑形态和推理模式的数理逻辑学理论新构架——泛逻辑。泛逻辑理论的命题真值域建立在任意的多维超序空间上,使得命题真值具有了柔性特征;它通过广义相关系数  $h$ 、广义自相关系数  $k$ 、偏袒系数  $p$  来刻画命题之间关系的不确定性,使命题连接词具有了柔性特征;除了经典逻辑中的全称量词和存在量词之外,泛逻辑学还提出了阈元量词、位置量词、程度量词等,使得量词具有了柔性特征;由于以上这些柔性特征,使得泛逻辑具有了柔性的推理过程。由此可见,以泛逻辑学作为逻辑基础的智能控制理论,是实现复杂系统柔性控制的一个更好的解决方案。

泛逻辑学在从产生至今的二十年当中,除了在理论上的深入研究外,在实际应用中也

取得了一些成果,将泛逻辑作为智能控制的逻辑基础,不仅解决了智能控制模型的柔性化问题,而且也有利于促进泛逻辑学在更广泛的领域中发展。

本书重点探讨了智能控制模型的柔性化问题,从控制方法的逻辑基础入手,首先提出了一种智能控制模型 ICM-LG,并在此基础上进一步对智能控制的逻辑基础柔性化,提出了柔性泛逻辑智能控制模型 ULICM,本书的主要内容包括:

(1) 对自动控制的基本概念和方法进行了概括总结,对柔性泛逻辑学的基本原理进行了介绍,分析了智能控制理论的柔性化需求,提出了对智能控制模型进行柔性化的思路。

(2) 提出一种融合了线性二次型最优调节原理和遗传算法的智能控制模型 ICM-LG。ICM-LG 结合了线性二次型最优调节原理、拟人智能控制理论和遗传算法的优点,不依赖系统数学模型的精确性,不需要对系统物理特性和控制规律细致分析,避免了繁琐的控制参数预定和二次手工调节,其不等权的参数优化模块使控制过程更能反映各控制子目标优先级的不同,以及对控制快速性、稳定性要求侧重点的不同。

(3) 对 ICM-LG 的逻辑基础进一步柔性化,提出一种更符合被控对象特点的泛逻辑智能控制模型 ULICM。该方法不依赖系统数学模型的精确性,控制输出的决策考虑到被控量之间的相互关系和测量误差的影响,并允许决策门限连续可变,控制器的设计对被控对象的变化也不像其他智能控制器那样敏感和具有很强的针对性。对典型线性 and 非线性系统的成功控制证明了该模型的有效性和优越性。

(4) 为了进一步验证泛逻辑智能控制模型在解决复杂系统控制问题时的有效性和优越性,基于  $n$  级倒立摆系统的物理模型和数学模型,分别实现了一级倒立摆仿真和实物系统的自动起摆和泛逻辑稳定控制,二级倒立摆实物系统的 ULC\_I 型和 ULC\_II 型泛逻辑稳定控制、自动行走控制和抗干扰控制,以及三级倒立摆仿真系统的 ULC\_I 型泛逻辑稳定控制和抗干扰控制等。一系列的仿真和实物实验证明了泛逻辑控制理论具有控制精度高,控制快速和稳定的特点,且控制系统具有良好的抗干扰性和定位功能。

(5) 在上述关于泛逻辑控制模型的大量实验中,发现了  $h$  对控制系统性能有重要的调节作用。由于广义相关系数  $h$  是泛逻辑控制模型特有的,反映了控制器输入量之间的关系,因此,通过实验发现了如何在控制参数组确定之前根据控制目标之间的关系对  $h$  预设的基本方法,以及如何在控制参数组确定之后通过  $h$  对系统性能进行微调的基本规律。

本书是智能控制柔性化问题的阶段性研究成果,仍有许多方面需要深入研究,如将多元泛组合运算模型引入泛逻辑控制理论中、研究广义自相关系数  $k$  和决策门限  $e$  在实际应用中的物理意义等。

总的来看,作者的研究工作涉及较多的学科领域和专业知识,且由于知识水平和研究视角有限,书中不足之处在所难免,敬请各位专家和读者批评指正!

作者

2016年9月

# 目 录

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 第 1 章 | 智能控制概述 .....         | 1  |
| 1.1   | 自动控制及其发展 .....       | 1  |
| 1.1.1 | 自动控制的发展史 .....       | 1  |
| 1.1.2 | 自动控制的基本概念 .....      | 5  |
| 1.1.3 | 自动控制系统的分类 .....      | 8  |
| 1.1.4 | 自动控制系统的基本要求 .....    | 10 |
| 1.2   | 复杂系统对智能控制的需求 .....   | 11 |
| 1.2.1 | 智能控制的产生和发展 .....     | 11 |
| 1.2.2 | 复杂系统的主要特征 .....      | 13 |
| 1.2.3 | 复杂系统控制问题的主要解决途径..... | 14 |
| 1.3   | 智能控制对柔性逻辑学的需求 .....  | 15 |
| 1.3.1 | 智能控制的基本概念 .....      | 15 |
| 1.3.2 | 智能控制的数学理论基础 .....    | 17 |
| 1.3.3 | 泛逻辑学中的柔性和研究现状.....   | 18 |
| 1.4   | 几种典型的智能控制 .....      | 19 |
| 1.4.1 | 模糊逻辑控制 .....         | 20 |
| 1.4.2 | 仿人智能控制 .....         | 21 |
| 1.4.3 | 拟人智能控制 .....         | 22 |
| 1.4.4 | 神经网络控制 .....         | 23 |
| 1.4.5 | 递阶智能控制 .....         | 26 |
| 1.4.6 | 专家智能控制 .....         | 27 |
| 1.5   | 本章小结 .....           | 29 |
| 第 2 章 | 柔性泛逻辑智能控制的逻辑基础 ..... | 31 |
| 2.1   | 泛逻辑学产生的背景 .....      | 31 |
| 2.1.1 | 专家经验和常识推理需要柔性逻辑..... | 31 |

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 2.1.2 | 模糊逻辑等逻辑系统的不足 .....             | 32 |
| 2.2   | 泛逻辑学基本原理 .....                 | 33 |
| 2.2.1 | 泛逻辑学的研究内容 .....                | 33 |
| 2.2.2 | 泛逻辑学的分类 .....                  | 35 |
| 2.2.3 | 泛逻辑学中的关系柔性 .....               | 35 |
| 2.3   | 泛逻辑学中的命题连接词 .....              | 37 |
| 2.3.1 | 泛非命题连接词运算模型 .....              | 37 |
| 2.3.2 | 泛与命题连接词运算模型 .....              | 38 |
| 2.3.3 | 泛或命题连接词运算模型 .....              | 38 |
| 2.3.4 | 泛蕴含命题连接词运算模型 .....             | 39 |
| 2.3.5 | 泛等价命题连接词运算模型 .....             | 39 |
| 2.3.6 | 泛平均命题连接词运算模型 .....             | 40 |
| 2.3.7 | 泛组合命题连接词运算模型 .....             | 40 |
| 2.4   | 泛组合运算模型分析 .....                | 41 |
| 2.4.1 | 泛组合运算的性质 .....                 | 41 |
| 2.4.2 | $[0,1]$ 区间上的零级泛组合运算模型 .....    | 42 |
| 2.4.3 | 任意区间 $[a,b]$ 上的零级泛组合运算模型 ..... | 42 |
| 2.4.4 | 不等权的零级泛组合运算模型 .....            | 44 |
| 2.5   | 本章小结 .....                     | 51 |
| 第 3 章 | 智能控制模型 ICM-LG 及其应用 .....       | 53 |
| 3.1   | 线性二次型最优调节器 .....               | 53 |
| 3.1.1 | 线性二次型最优调节原理 .....              | 53 |
| 3.1.2 | 线性二次型最优状态调节器 .....             | 56 |
| 3.1.3 | 线性二次型最优输出调节器 .....             | 56 |
| 3.2   | 拟人智能控制器 .....                  | 57 |
| 3.2.1 | 广义归约 .....                     | 58 |
| 3.2.2 | 拟人设计控制律 .....                  | 58 |
| 3.2.3 | 控制经验获取 .....                   | 59 |
| 3.2.4 | 倒立摆系统的拟人智能控制 .....             | 60 |
| 3.3   | 智能控制模型 ICM-LG .....            | 62 |
| 3.3.1 | ICM-LG 的结构 .....               | 62 |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 3.3.2 | ICM-LG 的设计步骤 .....             | 63  |
| 3.3.3 | ICM-LG 的特点 .....               | 65  |
| 3.4   | ICM-LG 的应用 .....               | 66  |
| 3.4.1 | 倒立摆系统的数学模型 .....               | 66  |
| 3.4.2 | 一级倒立摆系统的 LQR 稳定控制.....         | 68  |
| 3.4.3 | 一级倒立摆系统的拟人智能稳定控制.....          | 68  |
| 3.4.4 | 一级倒立摆系统的 ICM-LG 稳定控制 .....     | 68  |
| 3.4.5 | 参数寻优模块采用不等权和等权形式的控制效果比较.....   | 70  |
| 3.4.6 | 二级倒立摆系统的稳定控制 .....             | 71  |
| 3.5   | 本章小结 .....                     | 72  |
| 第 4 章 | 智能控制模型 ULICM .....             | 74  |
| 4.1   | ULICM 的理论基础.....               | 74  |
| 4.1.1 | 泛逻辑控制是一种更具柔性的控制.....           | 74  |
| 4.1.2 | 泛组合运算模型的物理意义 .....             | 75  |
| 4.1.3 | 泛逻辑控制中的两种泛组合运算模型.....          | 79  |
| 4.2   | ULICM 的基本原理.....               | 81  |
| 4.2.1 | 泛逻辑控制系统的组成 .....               | 82  |
| 4.2.2 | 泛逻辑控制的基本原理 .....               | 83  |
| 4.2.3 | 泛逻辑控制的特点 .....                 | 86  |
| 4.3   | ULIC 的设计方法和步骤 .....            | 87  |
| 4.3.1 | 结构选择模块 .....                   | 87  |
| 4.3.2 | 泛化和逆泛化模块 .....                 | 94  |
| 4.3.3 | 不等权的参数优化模块 .....               | 96  |
| 4.4   | 本章小结 .....                     | 97  |
| 第 5 章 | 智能控制模型 ULICM 的应用 .....         | 98  |
| 5.1   | ULICM 对线性系统的控制.....            | 98  |
| 5.1.1 | 对某常规二阶系统的泛逻辑控制.....            | 98  |
| 5.1.2 | 对某常规三阶系统的泛逻辑控制.....            | 100 |
| 5.1.3 | 对某常规二阶系统的泛逻辑控制和 LQY 控制比较 ..... | 101 |
| 5.2   | 倒立摆系统的研究意义和现状 .....            | 102 |
| 5.2.1 | 倒立摆系统的分类 .....                 | 103 |

|                 |                             |     |
|-----------------|-----------------------------|-----|
| 5.2.2           | 倒立摆系统的特点 .....              | 104 |
| 5.2.3           | 倒立摆的控制问题及研究现状.....          | 104 |
| 5.3             | 倒立摆系统的数学模型 .....            | 106 |
| 5.3.1           | $n$ 级倒立摆系统的物理模型 .....       | 106 |
| 5.3.2           | $n$ 级倒立摆系统的数学模型 .....       | 107 |
| 5.3.3           | $n$ 级倒立摆在平衡点处的线性模型.....     | 113 |
| 5.4             | 基于 ULICM 的倒立摆系统控制.....      | 116 |
| 5.4.1           | 一级倒立摆的起摆和稳定控制.....          | 116 |
| 5.4.2           | 二级倒立摆的稳定控制 .....            | 120 |
| 5.4.3           | 二级倒立摆的泛逻辑控制和其他控制方法的比较.....  | 125 |
| 5.4.4           | 三级倒立摆的稳定控制 .....            | 130 |
| 5.5             | 本章小结 .....                  | 136 |
| 第 6 章           | ULICM 关键参数分析 .....          | 137 |
| 6.1             | 广义相关性的涵义 .....              | 137 |
| 6.2             | 广义相关系数 $h$ 的调节作用 .....      | 138 |
| 6.2.1           | 对 $h$ 预设的规律 .....           | 139 |
| 6.2.2           | 对 $h$ 微调的规律 .....           | 143 |
| 6.3             | 倒立摆控制系统中广义相关系数 $h$ 的分析..... | 146 |
| 6.3.1           | 三种类型泛逻辑控制系统中 $h$ 的分析.....   | 146 |
| 6.3.2           | 摆杆长度对 $h$ 的影响 .....         | 150 |
| 6.3.3           | 对 $h$ 微调的规律 .....           | 152 |
| 6.4             | 本章小结 .....                  | 156 |
| 第 7 章           | 总 结 .....                   | 158 |
| 附录: 主要缩写表 ..... |                             | 160 |
| 参考文献 .....      |                             | 161 |

# 第1章 智能控制概述

随着被控系统复杂程度以及对其控制要求的不断提高,传统的控制理论和方法亟需改进,具有认知和仿人功能、能适应不确定环境等特性的智能控制方法应运而生。然而,在面对由专家经验、常识推理等具有随机性、模糊性、近似性和不完全性的知识所引起的不确定性推理时,目前智能控制理论的逻辑基础还无法对其精确描述和研究。因此,智能控制理论还有很大的发展空间。

在讨论智能控制理论之前,有必要对自动控制理论的发展和相关概念等做一个简单的介绍。

## 1.1 自动控制及其发展

自从 20 世纪 40 年代美国科学家维纳(N.Wiener)创立“控制论”以来,控制科学在现代科学技术的诸多方面起着越来越重要的作用,被广泛应用于工业、农业、国防、日常生活和社会科学等领域<sup>[1-8]</sup>。

自动控制也被称为“控制工程”,从学科的角度也被称为“自动控制理论”,其核心内涵是研究如何通过能量转换和信息传递来满足人类生产生活的最佳需要,是一门各行各业都需要的横断学科。自动控制技术的广泛应用,有利于生产过程实现自动化、极大提高劳动生产率和产品质量,有助于改善劳动条件,帮助人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善物质生活。本节将对自动控制的基本概念、主要内容等做简单介绍。

### 1.1.1 自动控制的发展史

人类对自动化的追求,可以追溯到遥远的古代。例如:中国西晋时期的崔豹所著的《古今注》中提到的指南车,被黄帝用在与蚩尤的作战中,“蚩尤作大雾,兵士皆迷,于是作指南车以示四方,遂擒蚩尤而即帝位”,指南车(司南车),无论车身如何旋转,车上“仙人”的手臂总是指向预先设定的南方;又如公元 231 年~234 年间,三国时期蜀汉丞相诸葛亮发明的木牛流马,作为一种战略物资的运输工具,其载重量为“一岁粮”,大约四百斤以上,每日行程为“特行者数十里,群行三十里”,为蜀国十万大军提供粮食;类似的例子还有公元 1 世纪古埃及和希腊的发明家创造了一些机器人或机器动物来适应当时宗教活动的需要,如教堂庙门自动开启、铜祭司自动洒圣水、投币式圣水箱和教堂门口自动鸣

叫的青铜小鸟等装置。这些装置都可以看做是自动化设备的雏形，但由于相关的制作方法只是掌握在少数发明家手中，在当时没有形成相关的系统知识和理论为更多人掌握，所以逐渐失传，无法成为推动社会进步和发展的生产力。直到 20 世纪，人们才逐渐概括出控制理论的基本原理和方法，进而有意识地使用这些原理和方法创造出各种各样的自动化装置改善人类的生产生活状况，将人类从笨重、重复性的劳动中解放出来，从事更富有创造性的工作。

概括地说，控制理论的发展大致经历了经典控制理论、现代控制理论，以及大系统控制理论和智能控制理论三个阶段。

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

1765 年瓦特 (J.Watt) 发明了蒸汽机，到 1788 年他为了解决工业生产中提出的蒸汽机的速度控制问题，把离心式调速器与蒸汽机的阀门连接起来，构成蒸汽机转速调节系统，使蒸汽机变为既安全又实用的动力装置。瓦特的这项发明开创了自动调节装置的研究和应用，也使其后的学者逐渐意识到多数调速系统中出现的震荡问题，由而引发了人们对控制系统稳定性的研究。

1868 年英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 在其文章“论调速器”中解释了瓦特转速控制系统，并通过建立和分析线性微分方程，指出震荡现象与系统导出的一个代数方程的根的分布密切相关。1876 年俄国机械学家 Н.А.维什涅格拉茨基在法国科学院报上发表文章“论调节器的一般理论”，进一步总结了调节器的理论，并用摄动理论使调节问题大为简化。1877 年英国数学家劳斯 (E.J.Routh) 提出代数稳定判据，即著名的劳斯稳定判据。1895 年德国数学家胡尔维茨 (A.Hurwitz) 提出代数稳定判据的另一种形式，即著名的胡尔维茨稳定判据。劳斯和胡尔维茨各自独立建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则，即代数判据，也被称为 Routh-Hurwitz 判据，该判据简单易行，至今仍然广为使用。1892 年俄国数学力学专家李雅普诺夫 (A.M.Lyapunov) 发表博士论文“论运动稳定性的一般问题”，从数学方面给运动稳定性的概念下了严格的定义，并研究出解决稳定性问题的两种方法。李雅普诺夫第一法又称一次近似法，明确了用线性微分方程分析稳定性的确切适用范围。李雅普诺夫第二法又称直接法，不仅可以用来研究无穷小偏移时的稳定性（小范围内的稳定性），而且可以用来研究一定限度偏移下的稳定性（大范围内的稳定性）。李雅普诺夫稳定性理论至今仍然是分析系统稳定性的重要方法。

20 世纪以后，工业生产中广泛应用了各种自动调节装置，促进了对调节系统进行分析 and 综合的研究工作，1927 年美国贝尔电话实验室的电气工程师布莱克 (H.S.Bleck) 在解决电子管放大器失真问题时首先引入反馈的概念，为自动控制理论的形成奠定了理论基础。20 世纪 20~30 年代，美国开始在工业控制中采用 PID 模拟式调节器（比例—积分—微分

调节器),同时反馈放大器开始得到应用。1932年美国电信工程师奈奎斯特(H.Nyquist)提出了著名的奈奎斯特稳定判据,可以直接根据系统的传递函数来判定反馈系统的稳定性。1940年美国学者波德(H.Bode)引入对数坐标系,使频率法更适合工程应用。20世纪40年代初尼克尔斯(N.B.nichols)提出了PID参数正定方法,进一步发展了频域响应分析法。1948年伊文斯(W.R.Evans)提出了根轨迹法,说明如何通过改变系统中某些参数改善反馈系统的动态特性。这些成果都标志着作为自动化学科核心内容的控制科学正在形成,后人将这一时期的理论成果称为经典控制理论。

1948年,科学家维纳出版了《控制论》一书,标志着控制论的正式诞生,在书中,维纳将控制论定义为“关于在动物和机器中的控制和通信的科学”。控制论经过半个多世纪的发展,其研究内容和研究方法虽然都有了很大变化,但该书仍然被认为是一部影响深远的著作,是经典控制理论的总结。

经典控制理论阶段,着重研究单机自动化,解决单输入单输出(SISO, Single Input Single Output)系统的控制问题,其主要数学工具是微分方程、拉普拉斯变换和传递函数,主要研究方法是时域法、根轨迹法和频域法,主要问题是控制系统的稳定性、快速性及其精度。

## 2. 现代控制理论(Modern Control Theory)阶段

20世纪50年代后,世界进入了一个相对和平发展的时期,各国对空间技术的发展逐渐重视起来,为了解决诸如把火箭和人造卫星用最少燃料和最短时间准确发射到预定轨道这类复杂的控制问题,控制理论逐渐由经典控制理论向现代控制理论转变。

1957年9月,国际自动控制联合会(IFAC)在巴黎召开成立大会,会上通过了大会的章程和细则,选举美国自动控制专家切斯特纳(H.Chestnut)为IFAC第一届主席,规定每三年召开一次国际自动控制学术大会,并出版《自动学》、《IFAC 通讯》等期刊,IFAC的成立标志着自动控制这一学科已经成熟,通过国际合作来推动系统和控制领域的新发展。

1954年,中国学者钱学森在美国出版了《工程控制论》一书,该书被认为是由经典控制理论向现代控制理论发展的启蒙著作。1956年苏联数学家庞特里亚金(L.S.Pontryagin)提出极大值原理。同年,美国数学家贝尔曼(R.Bellman)提出用于寻求最优控制的动态规划法。极大值原理和动态规划法为最优控制提供了理论工具,动态规划还包含了决策最优化的基本原理,并发现了维数灾难问题。1959年美国数学家卡尔曼(R.E.Kalman)提出著名的卡尔曼滤波器,它是一种递推滤波器,可直接从信号模型出发,用递推的方法求最优线性滤波器的结构和最优增益,得到动态跟踪系统。卡尔曼滤波器适合于用电子计算机来实现,可用于解决随机最优控制问题。1960年卡尔曼提出能控性和能观测性两个结构概念,

揭示了线性系统许多属性间的内在联系。卡尔曼还引入状态空间法，提出具有二次型性能指标的线性状态反馈律，给出最优调节器的概念。这些学者将状态空间法系统地引入了控制理论，状态空间法对解释和认识控制系统的许多重要特性起到了关键作用，其中的能控性和能观测性尤为重要，是现代控制理论的两个最基本概念。在 1960 年召开的第一届全美联合自动控制会议上确认了现代控制理论这一学科。

现代控制理论的迅速发展引入了许多与状态空间相联系的新概念及许多新的数学方法。20 世纪 60 年代，时域法在空间技术上获得了卓有成效的应用，但在工业过程控制中却遇到了障碍，其主要原因是被控对象的精确数学模型难以得到，性能指标无法明确表示，直接采用最优控制和最优滤波的综合方法所得到的控制器往往结构过于复杂，甚至无法实现，于是一些学者采用了频域法。20 世纪 60 年代中期，卡尔曼就提出用频域法描述最优控制问题。1969 年英国曼彻斯特大学的教授罗森布罗克 (H.H.Rosenbrock) 发表著名论文“用逆奈奎斯特阵列法设计多变量控制系统”，开创了现代频域法的新纪元。1973 年英国曼彻斯特大学的教授梅恩 (D.Q.Mayne) 根据罗森布罗克的设计思想，结合波德的回差概念，提出了序列回差法 (SRD)，它不要求加预补偿器，进行对角优势处理，因而简便直观。1973 年英国学者欧文斯 (D.H.Owens) 把经典控制理论和状态空间法结合起来提出并矢展开法，并用这种方法成功地分析了核反应堆模型。1975 年英国曼彻斯特大学教授麦克法兰 (A.G.J.MacFarhae) 把经典控制理论中的波德-奈奎斯特法和状态空间法结合起来提出特征轨迹法。现代频域法已成功地运用于石油、化工、造纸、原子反应堆、飞机发动机和自动驾驶仪等设备中多变量系统的分析和设计上，取得了令人满意的结果。在控制系统计算机辅助设计程序包中现代频域法也占有重要地位。

现代控制理论在本质上是一种“时域法”，但并不是对经典频域法从频率域回到时间域的简单再回归，而是立足于新的分析方法，是有新目标的新理论。现代控制理论形成的主要标志是卡尔曼的滤波理论、庞特里亚金的极大值原理、贝尔曼的动态规划法等，其研究内容涉及多变量线性系统理论、最优控制理论以及最优估计与系统辨识理论。现代控制理论从理论上解决了系统的能动性、能观测性、稳定性以及许多复杂的系统控制问题，在航空、航天、导弹控制等实际系统中得到了成功应用，并逐渐应用在工业生产过程中。

现代控制理论阶段，着重解决机组自动化和生物系统的多输入多输出 (MIMO, Multi-Input Muti-Output) 系统的控制问题，主要数学工具是一次微分方程组、矩阵论、状态空间法等，主要方法是变分法、极大值原理、动态规划理论等，重点是最优控制、随机控制和自适应控制，核心控制装置是电子计算机。

### 3. 大系统控制理论 (Large Scale System Control Theory) 和智能控制理论 (Intelligent Control Theory) 阶段

随着生产的发展和科学技术的进步, 20 世纪 60 年代末出现许多诸如化工联合企业、钢铁联合企业、大电力系统、交通管制系统、环境保护系统、社会经济系统等大系统, 这些系统一般具有规模庞大、结构复杂、目标多样、影响因素众多、常带有随机性等特点。由于经典控制理论和现代控制理论都是建立在集中控制的基础上, 即认为整个系统的信息能集中到某一点, 经过处理, 再向系统各部分发送控制信号, 这些理论在处理大系统控制问题时遇到了系统庞大、信息难以集中、集中处理困难等问题, 因此针对大系统的建模与仿真、优化和控制、分析和综合、以及稳定性、能控性、能观测性和鲁棒性等研究的大系统控制理论应运而生。

1965 年莱夫科维茨 (I. Lefkowitz) 提出大系统多层结构的概念, 认为可以根据控制功能将大系统分解为若干层次。1965~1970 年, 梅萨罗维茨 (M. Mesarovic) 等人提出大系统多级结构的概念, 把大系统分解成若干子系统, 把总目标分解成许多子目标。1968 年提出大系统的分散控制方法用一组只有局部信息的控制器分别控制大系统的各个子系统, 实现大系统的次优控制, 以减少信息传输方面的困难和费用。1976 年国际自动控制联合会 (IFAC) 在意大利乌第纳召开了第一届大系统学术会议, 1982 年美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 在美国弗吉尼亚州弗吉尼亚海滩举行了一次国际大系统专题讨论会, 1980 年在荷兰正式出版国际性期刊《大系统——理论与应用》, 这些活动标志着大系统理论的诞生。

目前, 自动控制正处在大系统控制和智能控制的发展阶段, 相关学者提出了很多新的方法和理论, 如自适应控制理论与方法、鲁棒控制方法、预测控制方法、模糊控制、神经网络控制、拟人智能控制、仿人控制等, 关于智能控制理论的发展和基本原理, 后文会有详细介绍, 这里不做过多赘述。

大系统控制理论和智能控制理论阶段, 着重解决生物系统、社会系统这类具有众多变量的大系统的综合自动化问题, 方法是时域法为主, 重点是大系统多级递阶控制和智能控制等, 核心装置是网络化的电子计算机。其中, 大系统控制理论是自动控制在广度上的开拓, 而智能控制则是自动控制在深度上的挖掘。大系统控制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, 智能控制则是研究与模拟人类智能活动及其在控制与信息传递过程中的规律, 研究具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统。

### 1.1.2 自动控制的基本概念

自动控制是指在没有人直接参与的条件下, 利用适当的设备或装置 (称做控制装置或

控制器)使机器、设备或过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律变化,其本质在于无人干预。其中,过程是指一个具有一系列逐渐变化状态的被控过程,如化学过程、冶炼过程、生物过程等。

所谓系统,是指由相互制约的各个部分按一定的规律组成的、为达到一定目的、具有一定功能的整体。所谓自动控制系统,是为了完成自动控制任务,由被控对象、控制器及其他所需要的部件按照一定的方式连接起来构成的系统,它应该能够克服由于系统外部环境及内部参数变化而造成的各种扰动,使被控量满足一定的控制指标要求,稳定有效地工作。由此可见,系统是一个更为一般化的概念。

自动控制一般有开环和闭环两种基本工作方式。

开环控制系统如图 1-1 所示,一般由控制环节、执行环节和被控对象组成,控制器的控制作用由给定的输入决定,经过执行机构控制被控对象,而系统的输出不影响控制作用。



图 1-1 开环控制系统框图

开环控制的特点是设计实现简单,但当外界发生扰动或参数变化造成输出量偏离期望目标时,系统对于这种偏差没有调节能力,因此,开环控制一般用于动态控制性能要求比较低或扰动对系统性能影响不大的场合,例如电机顺序启动控制,交通信号、广告灯、电饭锅的顺序控制等。

开环控制系统的结构使得其难以满足环境复杂、存在多种扰动的工业控制要求,而且,在要求较高控制精度的场合,对控制系统的元件精度要求也比较高,因此系统成本上升。为了克服开环控制系统的弱点,现代自动控制系统主要采用了闭环控制方式,闭环控制系统的结构如图 1-2 所示,一般包括以下几个部分。

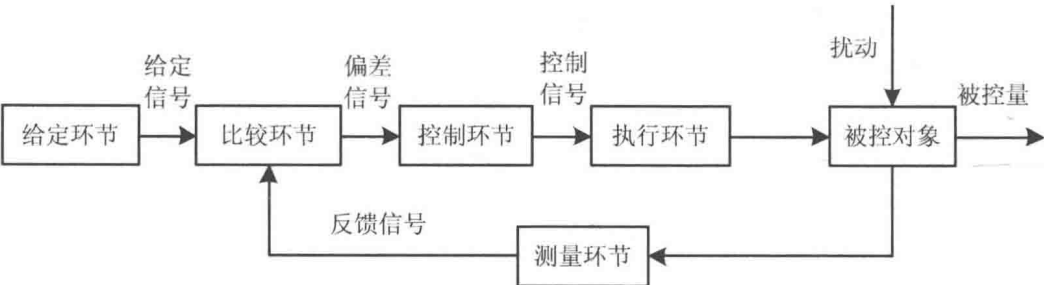


图 1-2 闭环控制系统框图

(1) 给定环节。产生给定的输入信号，体现事先设想的控制目标要求。给定值与期望输出值之间一般存在物理量纲转换关系，给定信号可以是常值，也可以是随时间变化的已知函数或未知函数。

(2) 比较环节。将给定信号和反馈信号进行比较，得到偏差（误差）信号。常见的比较环节有差动放大器、电桥和机械的差动装置等。

(3) 控制环节。也称控制器或调节器，根据偏差信号，按照一定的规律产生控制信号，实现控制的目标要求，是控制系统的核心组成部分。

(4) 执行环节。控制信号一般功率较小，不能直接作用于被控对象，需要有一些专门的装置将其进行功率放大，并作用于被控对象，使控制量发生期望的变化。

(5) 被控对象。控制系统实施控制作用的实体，如工作机械、装置或生产过程等，它接收控制量并输出被控量。一般需要控制的变量是被控对象的某个物理量或参量，是描述被控对象工作状态的、需要进行控制的物理量。被控对象工作时，随着外部环境和工作条件的变化，常常会有扰动作用于被控对象，使得被控量偏离预定的控制目标。

(6) 测量环节。通过测量环节可以获得反馈信号，测量环节将被控变量的变化状态提供给比较环节，用作进一步决策的依据。为了保证控制精度，要求测量装置应测量准确、牢固、可靠、受环境影响小。

(7) 反馈通道。从输出端到输入端的通路。

(8) 前向通道。从输入端到输出端的通路。

反馈是控制理论中的一个重要概念，所谓反馈是指通过一定的测量装置将输出量直接地或经过变换后，间接地全部或部分的返回系统输入端的过程。测量得到的与输出量具有确定关系的信号称为反馈信号。

反馈的概念最先应用于放大器，后来成为控制论的基本概念。自动控制理论中，反馈控制与闭环控制在本质上是一致的。根据反馈信号对输入信号的作用，反馈可以分为正反馈和负反馈。正反馈将输出信号反馈回来，叠加在输入信号上，通常加强系统输出偏离预定目标的行为，使系统输出与预定目标的偏差进一步加大，最终可能导致系统崩溃；负反馈从输入信号中减去反馈信号，并以其差值作为控制器输入信号，通常使系统输出与预定目标的偏差朝着减小的趋势变化，使系统运动趋于预定的目标。在实际控制中，为了保证系统的稳定运行，通常采用负反馈。

在经典控制中，常用的控制策略如下。

(1) 比例控制，即控制信号与偏差信号成正比。比例控制使系统输出偏离预定目标的发展趋势向减小的方向变化，但不能完全消除偏差，因为一旦偏差信号为零，控制信号也为零，执行环节将不起作用，此时，除非被控对象能自己保持被控输出不变，否则，会继续产生

偏差。

(2) 积分控制，即控制信号与偏差信号的积分成正比。偏差为零时，积分作用可以使控制器输出信号保持一个常量，执行环节按控制信号保持状态不变，从而维持被控对象输出不变，因此，积分控制可以完全消除偏差，但纯积分信号不利于系统稳定运行。

(3) 微分控制，即控制信号与偏差信号的微分成正比。微分控制使执行环节有一个超前动作的过程，使被控对象的输出变化向有利于减小偏差的方向运动，对于控制系统动态过程性能的改善有很大作用。

在实际工程控制中，通常是上述控制策略的组合，如利用 PD 控制（比例+微分控制）获得更好的动态性能，利用 PI 控制（比例+积分控制）实现对偏差控制的要求，利用 PID 控制（比例+积分+微分控制）获得良好的动态性能，并实现对偏差控制的要求。

在闭环控制系统中，由于引入了反馈的概念，可以通过控制器设计，使系统具有满意的动态性能和稳态性能，可以减少或部分消除各类干扰对控制系统的影响，可以减小系统参数变化造成的影响，但也正是因为引入了反馈的概念，使得控制系统的复杂度提高、成本增加。闭环控制一般广泛应用于各种具有较高动态及稳态性能指标的自动控制系统，如卫星姿态控制、机器人运动控制、温度控制、雷达天线位置控制等。

实际上，为了获得更好的控制性能，还可以将开环控制和闭环控制结合起来，以闭环控制作为基本控制方式，保证系统的基本性能，而开环控制以前馈控制的方式，用于补偿某些已知变化规律的扰动对系统的影响，或对输入进行前馈补偿，使控制系统对某些复杂变化规律的输入信号具有更好的跟踪性能，从而构成复合控制系统。

### 1.1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的形式多种多样，从不同的角度可以分成不同的类别，常见的有以下分类方式。

#### 1. 根据输入信号的特征分类

如果系统的输入信号是某个恒定的常值，要求系统能够克服各种干扰的影响，使被控量保持在一个常值附近，则这类控制系统被称为恒值控制系统（Fixed Set-Point Control System），也称为自动调节系统、自动镇定系统。恒值控制系统是一个能在各种干扰作用下进行自动调节的系统，能保证系统受到扰动后输出可以尽快恢复到期望数值上。

如果系统的输入信号是一个已知或未知的函数，要求被控量能精确地跟随输入信号变化，则这类控制系统被称为随动控制系统（Servo System），也称为伺服系统。随动控制系统面临的主要矛盾是被控对象和执行机构因惯性等的影响，使系统输出信号不能紧紧跟随