

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.003

现代主要控制方法的研究现状及展望

南英 陈昊翔 杨毅 吕开妮

(南京航空航天大学航天学院,南京,210016)

摘要:系统描述了控制问题的一般数学形式,针对现代控制理论各个研究领域,如最优控制、鲁棒控制、滑模控制、(人工)智能控制(包含容错控制,自适应控制,模糊控制,神经网络控制)和大系统控制等,分别系统总结了它们的构建思路、概念机理与发展现状,分析了它们的特性及不足,并对其发展趋势进行了论述。最后针对目前控制理论的研究状况,对未来控制理论及其特性进行了概括与展望。

关键词:现代控制理论;发展现状;未来控制理论;自然控制理论

中图分类号:TP13 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)06-0798-13

Primary Methodologies of Modern Control: Status and Prospect

Nan Ying, Chen Haoxiang, Yang Yi, Lü Kaini

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: This paper presents the general form of control theory problem. Regarding on all primary research fields of control theory, such as optimal control, robust control, sliding model control, (artificial) intelligent control (which includes faults-tolerant control, self-adaptive control, fuzzy control, neural control and so on) and control for large-scale system, the paper summarizes the concepts, principles and ways of construction, and analyzes their priorities and drawbacks, as well as their developing trends. Finally, the paper prospects the future control theory and its characters.

Key words: modern control theory; development status; future control theory; natural control theory

控制理论研究基本分为 3 阶段:经典控制,现代控制,大系统和智能控制理论。即从理想简化模型、简单小规模、单个系统、低可靠性、局部性、低精度……到客观存在的真实具体模型、复杂大规模、众多系统、高可靠性、全局性、高精度……的发展过程。

现代控制理论是以状态空间为基础的一种控制理论^[1],以线性代数和微分方程等为主要数学工具,分析与构建控制系统^[2-4]。该理论在 20 世纪 50 年代中期得到迅速兴起与发展。航天航空等工程科技需要建立能适合其特性的控制理论,以解决如将宇宙火箭和人造卫星发射入预定轨道并使燃料最少或时间最短等问题^[5]。因此,动态规划、极

大值原理和卡尔曼-布什滤波分别在 1954 年、1958 年、1961 年研究获得,这些成果扩大了控制理论的研究范围,包括了更为复杂的控制问题,标志着现代控制理论的成熟^[6-8];之后半个多世纪,控制理论不断出现新的、不同技术途径的研究领域,形成了大量控制理论的分支。

控制理论还将随着自然科学技术的进步、各类实际应用需求的日益广泛而不断发展,新发现-新概念-新原理-新检验-新……-新理论-新应用-新(控制理论)分支还将不断爆炸式增加,为了对未来未知的新控制理论的发展指明一个有效的研究技术途径,需要从问题的根源上、全面系统地总结现代控制理论的各主要分支,这对当代与未来控制理论

收稿日期:2015-10-12;修订日期:2015-11-15

作者简介:南英,男,1964 年生,教授,博士生导师。研究方向:飞行力学与控制,飞行器设计与飞行仿真等。

通信作者:南英,E-mail:nanying@nuaa.edu.cn。

继续在量与(概念)质上的飞跃式发展具有十分重要的理论和实际意义,即人类的未来控制理论可以实现从一个无任何简化的、无限大的、无穷尽复杂的、无奇不有的超巨型实际数学-物理-逻辑系统模型中寻找出第一理想的控制对策。

本文旨在总结现代控制理论的发展现状与特点,明确未来控制理论的基本特征,指出现代控制理论通向未来控制理论的发展技术途径。为此,本文将总结分析现代控制理论的主要分支的概念及其产生原因,发展现状,特点与发展趋势等。

1 控制问题的一般数学描述^[9]

一个自然客观存在大型随机控制系统包含 N 个[同类或(与)不同种类概念的]控制子系统 S_i (其中,第 i 子系统由 M_i 个子子系统构成,第 i 子系统的第 j 个子² 系统(2 为 2 次方)由众多子³ 系统构成……一直微小至物质基素单元^[9]),整个控制系统由以下非线性微分方程组描述

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = f_1[t, X(t), u_1(t), w_1(t), p_1, \Xi(t)] \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f_2[t, X(t), u_2(t), w_2(t), p_2, \Xi(t)] \\ \vdots \\ \frac{dx_N(t)}{dt} = f_N[t, X(t), u_N(t), w_N(t), p_N, \Xi(t)] \end{cases} \quad (1)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_S]$$

$$\Xi(t) = \begin{bmatrix} x_{S1} \\ x_{S2} \\ \vdots \\ x_{SN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{S1,1} & x_{S1,2} & \dots & x_{S1,M_1} \\ x_{S2,1} & x_{S2,2} & \dots & x_{S2,M_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{SN,1} & x_{SN,2} & \dots & x_{SN,M_N} \end{bmatrix}$$

$$x_{Si,j} = [x_{Si,j,1} \quad x_{Si,j,2} \quad \dots \quad x_{Si,j,\Phi_{i,j}}]$$

$$j = 1, 2, \dots, M_i$$

式中:时间 $t \in [t_{i0}, t_{if}]$, $i = 1, 2, \dots, N$; 状态变量 $x_i(t)$ 为第 i 个子系统的 n_i 维向量($x_i(t) \in \mathbf{R}^{n_i}$); 控制变量 $u_i(t) \in \mathbf{R}^{m_i}$ 为第 i 个子系统的独立变量; N 个控制子系统 S_i 之外不同种类物体的各种类概念运动状态(随机干扰) $w_i(t) \in \mathbf{R}^{l_i}$ 为作用在第 i 个子系统上的; $p_i \in \mathbf{R}^{q_i}$ 为第 i 个子系统(不随时间变化的)静态参数;第 i 子系统的第 j 个子子系统的状态变量为 $x_{Si,j}$; 全部各个子子系统的状态变量为 $\Xi(t)$; 各个子子系统分别具有 $\Phi_{i,j}$ 个状态变量 $x_{Si,j,k}$ (其中, $k = 1, 2, \dots, \Phi_{i,j}$), 而与 $x_i(t)$ 的分量类似, 每一个 $x_{Si,j,k}$ 分别由相应的非线性微分方程(其中包含了更微小更超大量的子³

系统(\mathcal{K} 次方, $\mathcal{K} > 10$ 的正数))确定; 非线性微分方程 $f_i(\dots)$ 为描述相互干扰作用下的各动态随机子系统的运动函数。

第 i 个子系统的时间 t_{i0} 时其初始条件如下

$$x_i(t_{i0}) = x_{i0} \quad u_i(t_{i0}) = u_{i0} \quad x_{Si}(t_{i0}) = x_{Si,0} \quad (2)$$

从该初始条件的起点 O (在时间 t_{if} 时)运动到多维状态的终点 F , 并需要满足以下终端约束

$$\begin{cases} N_1[t_{if}, x_i(t_{if}), u_i(t_{if}), x_{Si,f}] = 0 \\ N_2[t_{if}, x_i(t_{if}), u_i(t_{if}), x_{Si,f}] \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

同时受到以下过程约束

$$g_{i,Min} \leq g_i(t, x, u, w, \Xi(t)) \leq g_{i,Max} \quad (4)$$

式中: g_i 为 n_{g_i} 维向量函数; $w = [w_1, w_2, \dots, w_S]$; $u_i(t)$ 和 $a_i(t)$ 分别受到约束 Ω_U 和 Ω_P , 表述如下

$$u_{i,Min} \leq u_i(t) \leq u_{i,Max} \quad (5)$$

$$p_{i,Min} \leq p_i \leq p_{i,Max} \quad (6)$$

N 个控制子系统 S_i 之外不同种类物体的各种类概念运动状态(即作用在各子系统的随机干扰) $w_i(t)$ 按照以下的微分方程作演化运动

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = h[t, w(t), v_i(t), x(t), \Xi(t)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$w_i(t)$ 的起点为 $w_i(t_{i0}) = w_{i0}$, $v_i(t)$ 为随机干扰 $w_i(t)$ 的控制变量, 它可以是随机的, 也可以是有规划进行的。全部各个子子系统的 $\Phi_{i,j}$ 个状态变量 $x_{Si,j,k}$ 由以下非线性微分方程矩阵确定

$$\frac{dx_{Si}(t)}{dt} = \mathcal{F}[t, w(t), v_i(t), p_i, x(t), \Xi(t)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

该大系统的各个子系统追求的性能指标是

$$\min_{U(t) \in \Omega_i} J = \min \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_S \end{bmatrix}_{u_i(t)} = \min \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & \dots & J_{1,T+1} \\ J_{2,1} & J_{2,2} & \dots & J_{2,T+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{S,1} & J_{S,2} & \dots & J_{S,T+1} \end{bmatrix}_{u_i(t)} \quad (9)$$

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_S(t)]$$

值得指出, 在函数式(9)中如果其中一些性能指标 $J_{i,j}$ ($i \in [1, S], j \in [1, T+1]$) 需要最大化, 则最大化 $J_{i,j}$ 可以转化为最小化

$$J_{i,j} = -J_{i,j} \quad (10)$$

因此函数式(9)中, $S \times (T+1)$ 个性能指标 $J_{i,j}$ 是把分别求最大化与求最小化的问题任意混杂在一起。

函数式(9)中所包含的每个子系统在运动过程中有 T 个性能指标如下

$$J_{i,j}[\mathbf{u}_i(t)] = \int_{t_{i0}}^{t_{if}} L_{i,j}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{w}_i(t), \mathbf{p}_i, \Xi(t)] dt$$

$$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

式中 $[t_{i0}, t_{if}]$ 为第 i 个子系统的工作时段。其终端约束也表述为性能指标

$$J_{i,T+1}[\mathbf{u}_i(t)] = \Phi_i[\mathbf{x}_i(t_{if}), t_{if}] \quad (12)$$

式中 $\Phi_i[\mathbf{x}_i(t_{if}), t_{if}]$ 为在终端的代价函数。

因此,各个子系统需要寻找在任意可能条件下的理想控制,即具有以下宇宙自然界广泛客观存在的控制特性。

控制特性 1(最优性):最优控制问题是寻找输入的 $\mathbf{u}^*(t) = [\mathbf{u}_1^*(t), \mathbf{u}_2^*(t), \dots, \mathbf{u}_S^*(t)]$ 与 \mathbf{p}_i ,在时段 $[t_{i0}, t_{if}]$ 操纵 N 个受随机干扰式(7)作用的随机子系统,大型随机控制系统从初始起点条件式(2)运动到终端条件式(3),并满足过程约束式(4~6)条件,系统沿着状态 $\mathbf{x}^*(t) = [\mathbf{x}_1^*(t), \mathbf{x}_2^*(t), \dots, \mathbf{x}_S^*(t)]$ 运动,使得全部众多的性能指标式(9)全局最小。

控制特性 2(自适应性):在内外条件 $(\mathbf{x}, \mathbf{x}_S, \mathbf{w}_i(t))$ 改变了以后,其动态参数 $(\mathbf{x}(t), \mathbf{w}_i(t), \mathbf{p}_i, \Xi(t))$ 乃至模型的结构仍然可能发生变化,通过设计控制律 $\mathbf{u}_i(t)$ 的构成策略,使它能够自动地调整以补偿系统的变化;另外,性能指标式(9~12)、约束条件式(4~6)随着时间与环境状态的变化而在不断变化。因此,希望该系统决策时需要随环境状态改变的性能指标与约束条件而自动地调整。

控制特性 3(鲁棒镇定性):在外条件 $(\mathbf{x}, \mathbf{w}_i(t))$ 发生较大改变后,自身控制对策 $\mathbf{u}_i(t)$ 在其微小领域内 U_m 变化,且仍然保持满足全部约束条件并使性能指标式(9)全局最小。

控制特性 4(变结构性):①适应自身系统内部结构变化,该子系统内部结构在不断变化,主要体现在内部各个子子系统运动状态 $\Xi(t)$ 在进行不同概念的变化;②适应一些子系统重新组合构成一大系统,这些子系统重新组合后特性,主要体现在外部相关子系统运动状态 \mathbf{x} 在进行不同概念的变化,因此,无论情况①或/与②,均需要该子系统可采取相应控制对策 $\mathbf{u}_i(t)$ 满足全部约束条件并使性能指标式(9)全局最小。

控制特性 5(模糊识别性):在获取控制对策 $\mathbf{u}_i(t)$ 时,可以对系统特性的模糊辨识,全面、准确地获得该子系统内外的全部相关信息 $\mathbf{x}(t), \mathbf{w}_i(t), \Xi(t)$,等。

控制特性 6(人工智能性):针对系统特性与处理该系统的工程经验通过设计一个(人工)智能

的控制器,即使用一个经人工智能技术构建的经验库,对控制律 $\mathbf{u}_i(t)$ 使用该经验库进行调整,并满足全部约束条件并使性能指标式(9)全局最小。

控制特性 7(容错性):子子系统的状态变量 \mathbf{x}_S 发生故障时,系统可以通过调整控制律 $\mathbf{u}_i(t)$ 相关参数(动态或静态)使系统结构重新分配或提升应对故障的鲁棒性,使得故障不会干扰其他子子系统的运行,并在有限时间内排除故障。

控制特性 8(实时在线性):需要在有限时间内通过在线调整方式,获取控制律 $\mathbf{u}_i(t)$,并满足全部约束条件并使性能指标式(9)全局最小。

控制特性 9(并行-云-网络分布特性):需要同时考虑一个超大型系统,在这个超大型系统中包含了大量的(如式(1)所描述的)大型随机控制系统,其中各个子系统包含大型随机子控制系统……

控制特性 10(功能集成性):控制系统能够尽可能多地包含以上所述的各项控制特性,各种概念的控制特性混杂为一体。

……(现代自然科学无法观测、无法想象的大量控制特性)……

针对以上客观自然存在的控制问题,全世界的广大学者从不同的角度、不同的概念、不同的指标、不同的思路、不同的技术途径、不同的……进行了长期广泛的深入研究,对控制问题分解成不同的控制子问题,即提出以下概念与基本原理等:最优控制,鲁棒控制,滑模控制,(人工)智能控制(包含容错控制,自适应控制,模糊控制,神经网络控制,预测控制等),大系统理论,等。现在对以上控制子问题的研究现状进行系统总结,包括各控制子问题的基本概念与基本原理、算法、工程应用、特征(优点与不足之处)、以及未来的发展趋势。

2 最优控制

2.1 最优控制的概念及其产生原因

现代最优控制理论,又称为动态或过程最优化,它所研究的中心是^[10-11]:针对式(1)中的1个或2个子系统 S_i ,在满足各自各种类型式(2~6)(初始、过程、终端)约束条件下,寻找最优控制律(控制策略) $\mathbf{u}_i(t)$,使各子动态系统(受控对象)从初始状态转移到某种要求的终端状态,保证所规定的性能指标式(9)中的多个性能指标达到最小(大)值^[12-14]。

2.2 求解最优控制的主要方法^[15-17]

目前已形成的最优控制主要理论是:极值原理、动态规划、微分对策,等。

在最优问题的数学模型建立后,可以使用解析法和数值方法(直接法)。随着计算机技术的发展,使用计算机编程研究优化算法寻优,这成为最优控制的主要求解方法。

最优控制的数值方法主要有:梯度法、共轭梯度法、广义梯度法、投影恢复梯度法、改进的共轭梯度法、爬山法、变尺度法、直接迭代法、变分法、微分动态法、非线性规划法、多重打靶法、单纯形法和一种直接采用参数优化的方法、在线优化方法、局部参数最优化和整体最优化设计方法等。近些年来又发展了一些优化算法,例如:遗传算法(GA),模拟退火算法(SA),伪谱法(PM),蚁群算法(ACO),粒子群算法(PSO),自然(计算)算法(NIC)等。以上不同算法之间还可以相互交叉糅合,构成组合算法,如模拟退火-遗传算法,遗传-粒子群算法等。组合算法结合了不同算法的优点,避开了单一算法的局限性,提升了算法整体的性能和控制效果,可以解决更加复杂的最优控制问题。

2.3 最优控制特点与发展趋势

最优控制理论的应用领域十分广泛,已在各个专业领域,如航天、航空等实际工程中普遍应用,解决各种理论与工程科技问题,如能耗最小、时间最短、线性二次型指标最优、跟踪问题、调节问题和伺服机构问题等^[15]。但随着科技的发展,新的问题不断出现,控制对象也从单一变为多元,系统结构也从简单变为复杂,对最优控制理论提出了新的要求,使之能够解决一系列如高阶、多变量耦合及不确定性系统等问题。

考虑到未来最优控制理论与工程的发展,其数值算法需要实现以下功能:

(1) 能够对一个系统进行多目标函数的全局一体化优化,即在满足全部的各种约束式(1~6)条件下,综合使得全部的各种可能的性能指标式(9)均达到全局最优。

(2) 能够同时对众多系统群体对抗对策进行全局一体化优化,该群体协同-对抗优化设计是指协同-对抗多方均同时采用一体化全局最优的多维策略。

(3) 实时在线问题。众多控制系统全局一体化优化,可以在几秒或毫秒级之内完成,可以在该系统自带的计算机上实时使用,即需要具有(人工)智能特性、模糊特性和神经网络特性^[16-17],等。

(4) 高精度。能给出多自由度控制系统的优化数值仿真的结果以及相应各相关子系统的全部精确信息,并且时间节点很小,运动状态计算精度

极高。

(5) 能够考虑各种随时间与状态而未知的、不同概念的随机干扰的作用,即需要具有高度可靠性、自适应性、鲁棒性和滑模变结构特性,等。

(6) 同时综合具有以上全部功能的控制系统优化算法。

3 自适应控制

3.1 自适应控制概念及其产生原因

针对一个控制系统控制子系统 S_i 进行研究,通常现代控制理论把大型随机控制系统非线性微分方程组式(1)简化成一个拥有已知的和具有规律变化性的系统数学模型^[18]。但在实际工程中,被控对象或过程的数学模型事先基本都难以仅采用简单的数学模型来确定,即使在某一特定条件下确定的数学模型,在条件改变了以后,其动态参数乃至模型的结构仍然可能发生变化。为此,针对在大幅度简化式(1)后所形成的拥有已知的和预先规律变化性的系统数学模型,需要设计一种特殊的控制系统,它能够自动地补偿在模型阶次、参数和输入信号方面未知的变化,这就是自适应控制^[19]。

自适应控制的研究对象通常是具有一定程度不确定性的系统,这里所谓的“不确定性”是指描述被控对象及其环境的数学模型不是完全确定的,其中包含一些未知因素和随机因素^[19]。导致这些未知因素和随机因素的根源是简化包含全部可能因素的大型随机控制系统非线性微分方程组式(1),形成只针对主要矛盾、次要矛盾和微乎其微矛盾等因素,而不考虑可完全忽略不计矛盾等建立数学模型。

如果一个系统 S_i 在结构参数 p_i 和初始条件 $x_i(t_0)$ 发生变化或目标函数的极值点发生漂移时,能够自动调节并维持在最优工作状态,该系统具备3个主要功能:(1)决定控制应按何种法则进行修改;(2)在线调整控制器的可变参数;(3)在线测量性能指标或辨识对象的动态特性,这就是自适应控制系统。

3.2 自适应控制的发展现状

具体的自适应控制系统各有不同,但是自适应控制器的功能却是相同的。根据所参考的对象的情况,自适应控制可分为模型参考自适应控制(MRAC)和无模型自适应控制(MFAC)两类^[20]。

(1) 有模型参考的自适应控制系统(MRAC):针对结构已知,具体参数的受控对象,可考虑使用该模型,针对式(1)中子系统 S_i 数学模型,经过大规模简化,得到一个线性微分方程以及相应的自适

应闭环系统的反馈控制,该自适应控制律的设计准则就是运用已有数据进行在线调节,使之逐渐逼近预设值^[21-22],获得式(9)中的一些性能指标最佳,并满足各项约束条件。

(2) 无模型自适应控制(MFAC):无模型的控制定义为控制器的设计仅利用受控对象的输入输出数据,控制器不包含受控过程数学模型的任何信息的控制理论和方法^[23]。典型的无模型控制方法为PID类控制技术和相关的方法。传统的PID控制方法在实际生活中有广泛的应用,然而在处理非线性、时变及有周期扰动的系统控制问题时,其控制效果不理想,不具有学习能力,不具备对系统结构变化的适应能力。针对PID控制器的缺点,人们提出了许多解决方法,如基于神经网络的PID、自适应PID和非线性PID等^[24]。

3.3 自适应控制的特点与尚待解决的问题

(1) 自适应控制系统有3个显著特点^[24]:

① 控制器可调。相对于常规反馈控制器固定的结构和参数,自适应控制系统的控制器在控制的过程中一般是根据一定的自适应规则,不断更改或变动的。

② 增加了自适应回路。自适应控制系统在常规反馈控制系统基础上增加了自适应回路(或称自适应外环),它的主要作用就是根据系统运行情况,自动调整控制器,以适应被控对象特性的变化。

③ 适用对象。自适应控制适用于被控对象特性未知或扰动变化范围很大,同时又要求经常保持高性能指标的一类系统,不需要完全确定被控对象的数学模型便可设计。

由于以上特点自适应控制研究在今后一段时期内的研究热点将包括以下方面:①在保证自适应控制精度的前提下,研究快速收敛的算法;②研究鲁棒自适应控制方法,解决高频段的系统建模问题;③自适应控制方案的规范化,即提高其通用性和开放性;④研究组合自适应控制策略,主要有自适应PID控制和与容错控制、模糊控制等相结合(的人工智能自适应控制等方法^[25-26])。

(2) 自适应控制中尚待解决的问题及发展趋势

自适应控制中存在的一个明显问题是:自适应程度受到一定的限制。宇宙中全部不同层次级别、不同种类的物质体均在进行相互协同-对抗运动^[9],由此产生出(人类过去、现在与未来可以观测、或可以想象、或无法猜测无法想象的)无穷尽的物理现象与科学规律;在通过多次的一系列假设前提条件下,现代控制理论把超大型随机控制系统非

线性微分方程组式(1)简化成一个拥有已知的和具有科学变化规律性的大系统数学模型,这使得受控系统模型中隐含着许多未知的不确定性因素,自适应控制只能消除一些未知的、不确定因素的随机干扰影响,而不能消除全部未知的、不确定性干扰影响,例如,在地球上准确可靠无误的飞行器自适应飞控方案,到其他星球(如火星)上,飞行器自适应性明显下降,因为飞行环境(大气、引力等)模型发生了变化。因此,需要从根源上彻底解决自适应控制系统中存在的问题,建立一个超大型随机控制系统非线性微分方程组式(1),这不仅包含该受控系统模型和与受控系统相关的不同概念的系统模型,也包含这一系列模型相关的、更基底的模型,这将是自适应控制的发展趋势^[27]。

4 鲁棒控制

4.1 鲁棒控制概念及其产生原因^[28]

鲁棒控制是指:针对大型控制系统中一个控制子系统 S_i ,在外条件 $(x, w_i(t))$ 发生较大改变后,受控系统出现一定程度的不确定性及一定限度的非平衡动态运动现象,该闭环受控系统 S_i 自身控制对策 $u_i(t)$ 在其微小领域内 U_m 变化,保持自我稳定,满足全部各种约束条件,且性能指标式(9)仍然保持最优,即希望该子系统 S_i 是强壮的。

4.2 鲁棒控制的发展现状

在鲁棒控制理论中,将不确定性分为参数不确定性与未建模动态,前者不改变系统结构和阶次,只是使对象参数发生扰动,对系统影响发生在低频段;后者表现为高频不确定性,通常不能确定其结构和阶次^[29]。根据不确定性的不同划分,鲁棒控制理论产生了不同理论分支,如Kharitonov区间、结构奇异值(μ 理论)理论,求解鲁棒 L_2 干扰抑制问题,干扰近似解耦,和非线性 H_∞ 控制理论等,其中应用最广泛的是 H_∞ 控制理论^[30-31]。

近年来,对于 H_∞ 鲁棒控制问题,无论是在理论上还是算法上都已基本成熟,可以解决常规频域理论不适于MIMO系统设计及LQG理论不适于模型摄动两个问题^[32],其难点在于指标的设定和权函数的选取;由于无规律可循,主要依赖于设计者的经验。在飞行控制系统设计、导弹自动驾驶仪设计、飞行器气动辅助变轨、导弹制导律设计及航天器姿态控制等方面, H_∞ 鲁棒控制理论都有一定应用。

4.3 尚待解决的问题及新的研究热点

(1) 非标准 H_∞ 鲁棒控制、离散系统的 H_∞ 鲁

棒控制理论尚未成熟。

(2) 鲁棒控制现有许多算法,各有优缺点,有必要进一步全面了解控制系统本质性的结构,研究各种方法之间潜在的联系,进而提出分析和设计鲁棒控制器的更有效算法^[33]。

(3) 控制系统模型(大型随机控制系统的非线性微分方程组式(1))的降阶或简化问题也是一个重要的研究方向,降阶或简化式(1),有利于求解鲁棒控制律,但增加了系统的不确定性与未知因素。

(4) 近年来研究发现,许多鲁棒控制问题均与线性矩阵不等式(LMT)密切相关,可将系统的鲁棒控制问题转化为LMT来求解。因此,基于LMT的凸优化方法成为当今研究的热点之一,且将来在这方面的研究成果会越来越多^[34-36]。

5 滑模变结构控制

5.1 滑模变结构控制概念及其产生原因

滑模变结构控制在20世纪60年代初提出,它是一类不连续性的非线性控制,即用一种开关特性控制律 $u_i(t)$ 使系统结构(子系统状态 x_s)随时间发生变化,并可使这些子系统状态 x_s 与该系统状态 $x_i(t)$ 被限定在一流行上“滑动模态”运动^[37-38]。该滑动模态可人工设计,且与系统内部参数 p_i 摄动、外界扰动无关,具有良好的鲁棒性^[39]。因此,为使控制系统内部结构(子系统状态 x_s)发生变化,控制变量 $u_i(t)$ 需要做出相应对策,以使得系统运动满足全部约束条件并使性能指标式(9)全局最小,由此形成滑模变结构控制概念^[40]。

5.2 滑模变结构控制的发展现状

滑模变结构控制分为20个研究问题^[41]:滑模控制的消除抖振问题、准滑动模态控制、基于趋近律的滑模控制、离散系统滑模控制、自适应滑模控制、非匹配不确定性系统滑模控制、时滞系统滑模控制、非线性系统滑模控制、Terminal滑模控制、全鲁棒滑模控制、滑模观测器、神经网络滑模控制、模糊滑模控制、动态滑模控制、积分滑模控制和随机系统的滑模控制、滑模面设计和求解控制律的滑模到达条件(包括:滑模存在的充分条件,不等式到达条件,滑模趋近律等)以及如何消除滑模变结构的抖振问题等。以上滑模变结构控制问题的研究均已趋于成熟。并随着计算机、大型电子器件、大型电机和机器人技术的飞速发展,这些滑模变结构控制研究被广泛应用于飞行控制、大型电磁控制器设计、导弹制导律设计、智能电网设计、航天器姿态控制及机器人控制等领域中。

5.3 滑模变结构控制的特点与发展趋势

滑模变结构控制的一些特点:滑模变结构控制在系统设计时,由于滑动模态与受控对象参数扰动和系统内部参数摄动无关,使滑模变结构控制具有鲁棒性强、响应迅速、无需在线辨识和物理建模简单等特性。

近年来,随着数学与计算机理论的发展,大多数控制系统开始使用离散系统,离散滑模变结构控制成为了一个重要方向。针对离散系统,未来还需要解决这样一些问题:

(1) 为了使滑模变结构控制具有理想的滑动模态、良好的动态品质和较高的鲁棒性,需要选择适当的滑模面来实现,满足全部约束条件式(2~6)并使性能指标式(9)全局最小。

(2) 离散滑模控制的到达条件:滑模变结构控制不能像连续系统那样产生理想的滑动模态,而只能产生准滑模控制,因此连续滑模控制的滑模到达条件无法适用于离散系统,需要推出一种能够完全适应离散系统,且局限性较少的达到条件。

(3) 离散滑模控制的滑模面:今后离散时变滑模面的应用,将使系统更多地选择状态和时间变化相适应的滑模面是一个重要的研究方向。

(4) 离散滑模变结构控制的设计方法:利用智能、神经网络和自适应等理论的控制,与滑模控制理论相结合,有利于提高自身的学习能力与适应能力,减小系统抖振^[42]。

(5) 离散滑模控制的抖振研究:由于离散系统中使用的是准滑模控制,系统状态沿滑模面一个邻域内运动,有助于减少系统抖振,未来采用不同方法,在较大幅度地消除抖振、增强鲁棒性、提高性能这些方面有待进一步研究^[42-43]。

6 (人工)智能控制

6.1 现代智能控制概念及其产生原因

本来客观存在着一个受控系统及其相关系统(正确无误)的数学模型(如一个膨大的非线性微分方程组式(1)),如果建立该膨大的非线性数学模型,涉及到不同的学科领域、不同的概念与原理等,工作量与计算量十分巨大。因此,简化膨大的非线性数学模型,形成只考虑主要与次要因素的数学模型,将伴随着大量的不确定性、随机性及未知因素。

基于该简化的受控系统数学模型,随着近半个世纪以来各领域科学技术的发展,人们对大规模、复杂和不确定性系统控制的性能需求不断提高,而基于很简化的数学模型的传统控制理论已无法满

足要求。因此,从1965年以来,人工智能的直觉推理规则方法直接用于为控制系统寻找理想的控制律,这就产生智能控制概念。

6.2 智能控制的发展现状

经过半个多世纪的发展,(人工)智能控制已经演化出许多控制方法,其中主要有:模糊控制,容错控制,神经网络控制,等。下面将分别对这些方法(即智能控制的发展现状与特性)进行论述与总结^[44-46]。

(1) 模糊控制

模糊控制概念:模糊控制是以计算机模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的控制技术,它对系统的控制律 $u_i(t)$ 是以人的经验为依据的,其控制律 $u_i(t)$ 与运动状态 $x_i(t)$ 的范围与形式 R^{m_i} 与 R^{n_i} 不是一个精确的数值,而是“大”“中”“小”,或“对”“错”这类边界不明显的模糊变量^[47]。模糊控制系统的核心是模糊控制器的结构(包括:模糊规则、合成推理算法及模糊决策的方法等因素),把人类各个科技专业领域的专家知识库构造的语言文字信息,转化为控制策略的一种系统推理方法,能够解决许多复杂而无法建立精确的数学模型系统控制问题。

模糊控制的发展现状:近年来,模糊控制得以广泛发展,能够获得传统(非模糊)控制方法难以获得的效果^[48],如针对控制对象的模型不确定,而满足系统有复杂的非线性任务要求。现在模糊控制正在形成以下控制算法:模糊-PID复合控制,变结构模糊控制器,模糊 H_∞ 控制器,自适应模糊控制器,与神经网络相结合的模糊控制。

模糊控制的特点^[49]:①设计控制系统时不需要知道受控对象的精确模型,只需要建立相关操作人员的经验知识及相关数据;②模糊控制系统的鲁棒性较强;③容错能力强;④数学变量为特定的语言文字信息;⑤模糊控制的策略高度模拟人的思维,并借鉴了人在工程中积累的相关经验进行“不精确推理”。

模糊控制亟待解决的问题与发展趋势^[50-55]:①如何简洁地表示出模糊控制器的实质和工作机理,解决其系统的稳定性和鲁棒性理论分析的问题;②尽管很多应用和经验表明,模糊控制的鲁棒性优于传统控制策略,但模糊控制和常规控制的鲁棒性的对比关系如何尚待有系统、严谨的数学理论推导加以证明;③如何准确快速地获取模糊控制系统的规则和隶属度函数;④在多变量模糊控制中,如何对复杂系统进行解耦;⑤目前,模糊控制发展

趋势大致有:复合模糊控制器、与各种智能优化算法相结合的模糊控制、专家模糊控制及多变量模糊控制等。

(2) 容错控制

容错控制概念及其产生原因:由于式(1~12)所描述的一个大型非线性随机控制系统控制问题,是一个包含众多不同层次种类子子系统、集成化、大规模化、复杂化、多层次及多未知随机等因素,系统中的一些子子系统出现故障的概率是不可避免的,如大型随机控制系统中第 j 个子系统的第 k 个子子系统出现故障,即非线性微分方程组式(1)的运动状态 $x_{sj,k}$ 偏离正常的变化范围,因此,形成动态系统的故障诊断技术和容错控制的发展^[56]。通过容错控制技术(故障检测、隔离和诊断技术),可以使系统保持稳定,保持原有特性没有太大的变化,形成容错控制系统^[57-58]。

容错控制的研究现状:容错控制方法分主动容错控制和被动容错控制^[59-61]。①主动容错控制主要有3类方法:控制律重新设计、控制器重构设计与模型跟随重组控制,模型跟随重组控制主要是借鉴自适应控制的思想进行重组,控制律重构这一方法近年来较多地用在飞行控制中^[62];②被动控制技术主要有可靠镇定、完整性控制与联立镇定等,使得在传感器或某些执行器失效的情况下,仍能保持系统具有完整性。

容错控制的展望:容错控制近年来在控制工程中的作用不断增加,不断与其他学科交叉而形成混合控制方法,这提高了传统容错控制的性能。针对由式(1~12)所描述的一个大型非线性随机控制系统控制问题,需要发展容错控制为未来解决大规模、高维度复杂系统提供了一条途径。但由于传统建模困难,时间延迟,控制方法不够完善等问题,还有许多方面有待研究,如:鲁棒性容错控制、更好的控制律在线重组重构、容错控制的鲁棒性分析与快速 FDI 方法的完善,等^[62-63]。

(3) 神经网络控制

神经网络控制产生原因:由于神经网络数学工具具有以下功能:具有逼近任何非线性函数的能力,快速运算和高容错性,多输入多输出,多变量系统的控制,自适应和自学习;该函数系统模拟动物脑进行并行信息处理、学习、联想、模式识别、记忆等功能。神经网络作为数学工具而用于控制律设计,该基于神经网络的控制技术能够解决非线性、不确定性、未知复杂系统的控制问题,因此,形成神经网络智能控制^[64-65]。

神经网络控制的发展现状:可与控制理论交叉的神经网络而构成混合控制算法,例如:基于遗传算法的神经网络控制、自适应地神经网络控制,神经网络-模糊控制方法,基于 Hopfield 神经网络结构的 PID 控制,等。现在已经有很多种类神经网络模型算法,如前馈神经网络(自适应线性神经网络、单层感知器、多层感知器等),反馈神经网络(Hopfield 神经网络、海明神经网络、双向联想存储器等),自组织神经网络(对流神经网络模型、自组织映射神经网络模型等),多层反向传播算法(BP)学习算法(即 BP 算法^[66]),BP 学习算法主要由正向传播和反向传播组成,随机神经网络,等。并且,神经网络结构模型不断增多,如局部递归型神经网络、模拟人小脑的神经网络模型、带有再励的神经控制模型、径向函数神经网络模型(RBP 模型^[67])等,针对不同的控制系统都有良好的交叉效果。

神经网络控制发展趋势:尽管神经网络有其独到之处,在实际的工程中,仍需要解决以下问题^[68-74]:

- ① 神经网络控制的稳定性与收敛性问题;
- ② 神经网络的学习较慢,如何提升网络的学习速度,还有待研究;
- ③ 在对非线性函数逼近问题上,神经网络只解决了存在性问题,还需要进一步系统地探索;
- ④ 与其他非线性问题相结合的研究;
- ⑤ 研究不断增加的神经网络模型算法如何与控制理论相结合,解决某一类具体问题,将成为一个研究神经网络控制的发展趋势^[70-71]。

7 大系统理论

7.1 现代大系统控制理论概念及其产生原因^[74-75]

从控制问题的数学描述可以明显地看到:控制问题的数学描述的数学模型式(1~12)的规模很庞大,各子系统、子子系统、子 \mathcal{K} 系统(\mathcal{K} 次方, $\mathcal{K} > 10$ 的正数)等的结构复杂,在这个大型随机控制系统还与其之外的一些不同种类概念与不同级别的系统相互作用与影响,模型涉及到的变量众多,系统之间相互关联混杂一体严重,各个子系统所需要获得的其他子系统的信息不完备或未知,等。

基于整个大型随机控制系统的运动微分方程式(1),研究其中一个子系统或(与)一些子系统或(与)一些子子系统,如果只考虑该所研究的(子)受控系统,而不考虑相关的子系统或/与一些子系统或/与一些子子系统,这就会存在许多未知因素、不

确定性、随机和偶然性等。因此,需要考虑到与所研究的子系统相关的其他(子)系统,以及子子系统,建立这些系统运动微分方程等数学模型。

由于许多实际工程、社会等领域都一直需要考虑大型复杂系统集成与一体化控制^[73-75],如航空航天和国防科技领域的大型航天航空飞行器(导弹、飞机和宇宙飞船)、核电站的研制、数据复杂网络,等,随着计算机等工具的高速发展,广大工程领域中需要考虑在随机环境中大量子系统的大型复杂系统集成与全局一体化最优控制,就形成了考虑大量系统相互并-串联多维网络的现代大系统控制概念。

7.2 现代大系统控制理论的研究现状

现代大系统控制理论的研究主要集中在以下领域^[76-78]:

- (1) 大系统控制模型的建立(如:广义模型化、多层状态空间模型、多重广义算子模型、广义知识的表达、控制者模型以及智能化模型,等)。
- (2) 大系统复杂网络各种特性分析,如复杂大系统结构类型,结构变化与关联稳定性,系统结构与分解,结构与关联镇定,复杂大系统互联结构的处理,复杂网络的可控制性与可观性,网络结构识别,多层次复杂动态时空网络分析,网络的网络,复杂网络结构分解。

(3) 研究对复杂网络大系统方法,如:大系统多变量与大系统的协调控制、全局一体最优控制、大系统智能控制与管理,有机结构控制,具有分层系统的结构控制,分布参数及系统的识别与分散控制,基于大型专家知识库系统(人工智能)的复杂大系统结构的鲁棒控制、参数或系统辨识、故障检测-诊断与容错控制等,各个子系统之间存在相互协同与(或)相互对抗,各个子系统与其中的各个子子系统并行-云-多维网络的分散-全局一体的最优控制,对复杂大系统网络结构的牵制、指挥与协同控制,网络安全的攻防对抗,等。

7.3 现代大系统控制理论的特征与发展趋势^[79]

(1) 大系统控制理论的特点:基于现在计算机等系统仿真平台,虽然针对真实的大系统进行大规模人工简化,构成了考虑大量系统相互错综复杂的并-串联多维网络的大系统控制数学模型,该复杂大系统数学模型远复杂于传统的控制理论的模型,解决了传统控制理论未能完成的问题:①考虑大量子系统模型后消除了对所研究子系统形成的许多未知因素、随机性等;②可把大量子系统集成为一个大型复杂的系统,再对该大系统进行各种概念的

控制:如对该大系统进行全局一体化的静态参数+(动态参数)最优控制优化设计,或稳定性控制,或信息传播流通控制,等;③众多系统之间进行互相全局一体化协同-对抗,系统网络结构的各种控制问题;④大系统控制理论可以应用到工程、医学、自然探索、社会、军事、经济、农业、金融、以及日常生活等领域。

(2) 大系统控制理论的不足之处:尽管半个多世纪来,计算机飞速发展,但现在的计算机还是远远不能满足超大型系统(如 $999^{999^{999}}$ 个运动体协同-对抗)的系统仿真,就像是半个世纪前的计算机远不能满足现在天气预报等所进行的大规模流场气动仿真计算。因此,现代计算机设备性能的不足,现代只能仿真计算一个高度复杂的巨大型系统(其包含数以亿万计的众多变幻莫测的子系统与众多子系统等),再往更微小与更广阔更超大量的子^{*}系统,是不现实的。所以,各个专业的科技工作者均受到过去与现在计算机等系统仿真平台的限制,针对真实的大系统进行大规模人工简化,形成了考虑巨大量系统相互并-串联多维网络的现代大系统控制概念与原理。

由于对真实大系统进行大规模简化,使得建立的大系统控制模型只针对该系统的主要矛盾、次要矛盾、微乎其微矛盾等因素、而不考虑“可完全忽略不计的矛盾”等因素的数学模型,使得研究的结果是:许多实际系统的高维性及系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性给基于大规模简化的数学模型的控制理论以巨大的挑战;因为当研究者们发现新问题时,才惊讶地认识到那些经过长期广泛实践检验的“可完全忽略不计的矛盾”等因素对所研究的系统存在一定的影响,在一定条件下,起到关键性作用。

(3) 大系统控制理论的发展趋势:在现在计算机条件下(即基于并行-云-网络计算机技术平台),不要对真实的大系统进行大规模人工简化,尽量真实地建立所研究的大系统数学模型,即采用物质统一理论与物质普适性原始自然算法^[9],建立所需研究的、真实的大系统数学模型,进行超大系统协同-对抗控制的数值仿真,在满足全部约束式(1~8)条件下,实现超大量运动体系统的众多性能指标式(9)全局一体化的最优控制。

8 结 论

基于控制问题的一般数学描述,本文对控制理论进行了全面系统的总结。针对一个受控系统,现

在发展了一系列控制方法(如最优控制,鲁棒控制,滑模控制,(人工)智能控制(包含容错控制,自适应控制,模糊控制,神经网络控制),大系统控制,等),以分别满足该受控系统的理想控制中期望的各项控制特性。

关于近年来迅速发展形成的一系列控制理论,它们产生原因与概念-基理的构建思路均是:针对现实各科技领域发展中一系列受控系统的综合控制的具体特性问题,建立受控系统数学模型(即该控制问题的数学描述),为了满足全部不同概念的约束条件,并追求各种概念的性能指标,具体控制问题具体分析,导出不同种类、不同概念的控制方法,这就形成了本文中列出的各种类控制方法。在一定条件下,这些控制理论都是正确无误,均在许多领域得到广泛的应用与实践检验。

本文中列出的一系列控制方法,在建立其系统数学模型时,均针对其特性而对“控制问题的一般数学描述”进行简化而构成相应系统模型,这些模型均只针对主要因素、次要因素和微乎其微因素等,而不考虑可完全忽略不计的与无法想象或无法猜测的因素等。控制问题的数学描述,是研究该控制问题的根基,简化的控制问题数学描述,需要以后对该控制问题继续深入研究。因为:当环境条件超出了该“控制问题的数学描述”(极为广泛的)假设条件,针对该控制问题的控制理论就会失效;这导致控制理论需要不断新陈代谢地、不断进化地、无止境创新与突破地发展。

另外,现在发展出的各个控制方法,均没有对大量运动体系统的(各个运动体)众多控制变量在多维空间中进行全部可能区域的搜索,而是利用不同种类的方法获得其解,形成相应的控制理论,显然,这很可能失去全局最优解。

总结现有的控制理论(产生原因与概念、构建思路与基本原理、功能特点(优越性与不足之处)、发展前景等),需要建立一套未来控制理论(即自然控制理论),使其具有以下特点:

(1) 拥有一个统一的、全面完备的描述控制系统的数学表达方式;进行全局最优的控制律设计,该全局最优的控制律的概念是全局一体化地考虑控制律的全部特性。避免从某角度出发,只针对主要矛盾、次要矛盾、微乎其微矛盾等、而不考虑可完全忽略不计的、无法观测的及无法想象的矛盾因素等。

(2) 能够囊括现有控制学科的全部特性(鲁棒性,自适应性,非线性,容错性,预测性及连续拟合

性,等),这些特性的概念需要分别应用到各个性能指标、约束条件和控制律等。

(3) 提出新概念的控制指标,使之能够更好、更全面地描述(各种特性)控制算法的全部可能的特性;性能指标与约束条件等均随着运动体环境状态而不断变化(或数量上的变化、或消失掉、或产生新的、等)。

(4) 能够对众多系统的全部控制变量(概念上与数量上)进行多维全局全范围搜索,其控制对策结果会产生质(即概念-原理上)的变化,明显优越于基于全部各种类学科知识库(即全部可能的人工智能)的智能控制^[80]。

(5) 其下的各控制子学科能够相互高度交叉,融为一体,并满足各个子学科的全部设计要求;避免单一控制学科研究中的不足之处:顾此失彼,强调着重考虑一些控制特性,就可能丢失了其他的一些控制特性。

(6) 与新型大型计算设备的发展相适应(并行云计算、高速计算、集成化,简便化,在线化,等)。基于超大系统数学模型与超大规模系统并行云仿真的控制理论,完全可以解决实际大系统的高维性及系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性等;具备大规模与高度集成化(即希望具有全部各种类控制特性)、相互交叉化、高度智能化、在线实时化与高强度化等。

现代控制理论通向未来的自然控制理论的发展技术途径是^[9],首先需要一套受控系统的一般性数学-物理-逻辑模型,该超大型模型涵盖了全部可能的一切因素(以及与这些因素相关的一切可能因素,等),不留下任何可能的后患;然后,所含不同系统的种类与数量、各性能指标、各约束条件、各运动模型、各控制对策……均随着相关系统状态环境的变化而进行概念与数量的改变,需要对全部可能概念的控制量与不同概念指标进行一体化多维空间的全范围搜索,从中寻找到第一理想的控制对策。

相信不久的将来,控制理论的发展能够达到新的高度,形成自然控制理论,用一套或者一系列的算法能够彻底地、理想圆满地解决实际各领域研究中出现的各种可能的问题。

参考文献:

[1] 陈翰馥. 控制理论的现状及对它的期望[J]. 信息与控制, 1994, 21(1): 34-37.
Chen Hanfu. Control theory: Its current status and hopes on it[J]. Information and Control, 1994, 21

(1): 34-37.
[2] Zhu J H. A survey of advanced flight control theory and application [J]. Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference, 2006(1): 655-658.
[3] Wei W, Mei S W, Zhang X M. Review of advanced control theory and application in power system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 143-150.
[4] 谢克明. 现代控制理论[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
Xie Keming. Modern control theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
[5] 刘伟. 控制理论的发展及未来[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003(1): 10-12.
Liu Wei. The advancement of cybernetics and its prospects [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2013(1): 10-12.
[6] 张慧平, 李静, 张宁. 最优控制在过程工业中的应用与展望[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(8): 933-938.
Zhang Huiping, Li Jing, Zhang Ning. Application of optimal control in process industry and prospect [J]. Computers and Applied Chemistry, 2013, 30(8): 933-938.
[7] 张慧平, 戴波, 杨薇. 现代控制理论在过程工业中的应用和发展[J]. 北京石油化工学院学报, 2006, 14(3): 56-61.
Zhang Huiping, Dai Bo, Yang Wei. Application and development of modern control theory in process industry [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2006, 14(3): 56-61.
[8] 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2014.
Wang Jianhui, Gu Shusheng. Principles of automatic control [M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
[9] Nan Ying, Ding Quanxin, Chen Shaodong, et al. Global optimal design of trajectories for multiple flight vehicles based on natural numerical algorithm [J]. Science China, 2013, 43(6): 636-659.
[10] Wang D, Liu D, Wei Q, et al. Optimal control of unknown nonaffine nonlinear discrete-time systems based on adaptive dynamic programming [J]. Automatica, 2012, 48(8): 1825-1832.
[11] Miroslav F, Karol K. Optimal process control [C]// Carpathian Control Conference (ICCC). High Tatras, Slovakia; [s. n.], 2012: 153-172.
[12] 韦兰用. 最优控制问题研究综述[D]. 吉林:吉林大学, 2006.
Wei Lanyong. A survey on optimal control problems [D]. Jilin: Jilin University, 2006.
[13] Huang G Q, Lu Y P, Nan Y. A survey of numerical

- algorithms for trajectory optimization of flight vehicles[J]. *Sci China Tech Sci*, 2012, 42(9): 1016-1036.
- [14] Liu Junyao. Advance and prospect of the optimal control [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2000, 17(5): 4-6.
- [15] Nan Ying, Huang Guoqiang, Lu Yuping, et al. Global 4-D trajectory optimization for spacecraft[J]. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(8): 2097-2101.
- [16] Dierks T, Jagannathan S. Online optimal controls of affine non-linear discrete-time systems with unknown internal dynamics by using time-based policy update [J]. *IEEE Trans Neural Netw Learn Sys*, 2012, 23(7): 1118-1129.
- [17] Qu Zhihua, Wang Jing. Global-stabilizing near-optimal control design for nonholonomic chained systems [J]. *Automatic Control*, 2006, 51(9): 1440-1456.
- [18] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
Han Zengjin. Self-adaptive control [M]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [19] Liu Y J, Wang W. Adaptive output feedback control of uncertain nonlinear systems based on dynamic surface control technique [J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2012, 22(7): 945-958.
- [20] Filatov N M, Unbehauen H. Survey of adaptive dual control methods [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 147(1): 118-128.
- [21] Pathak K B, Adhyaru D M. Survey of model reference adaptive control [C] // *Engineering (NUiCONE)*, 2012 Nirma University International Conference. Ahmedabad, India: [s. n.], 2012: 1-6.
- [22] 张化光, 张欣, 罗艳红, 等. 自适应动态规划综述[J]. *自动化学报*, 2013, 39(4): 303-311.
Zhang Huaguang, Zhang Xin, Luo Yanhong, et al. An overview of research on adaptive dynamic programming[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 303-311.
- [23] Xia X N, Zhang T P. Adaptive output feedback dynamic surface control of nonlinear systems with unmodeled dynamics and unknown high-frequency gain sign [J]. *Neuro-Computing*, 2014, 143(1): 312-321.
- [24] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. *控制理论与应用*, 2006, 26(4): 586-592.
Hou Zhongsheng. On model-free adaptive control: The state of the art and perspective [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 26(4): 586-592.
- [25] Zhang T P, Chen J S, Xia X N. Output feedback adaptive control of systems with input and state unmodeled dynamics [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(10): 1847-1853.
- [26] Ye D, Yang G H. Adaptive reliable H_∞ control for lineartime-delay systems via memory state feedback [J]. *IEE Proc of Control Theory & Applications*, 2007, 1(3): 713-721.
- [27] Zhang Jingzhou, Yang Weijing, Zhang Anxiang. Research on fuzzy self-adaptive PID control and its emulation [J]. *Computer Simulation*, 2009(9): 132-135.
- [28] Zhou K M. *Essentials of robust control*[M]. Upper Saddle River: Prentice- Hall Inc, 1998.
- [29] Kurniawan E, Cao Zhenwei, Mahendra O, et al. A survey on robust repetitive control and applications [C] // *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, IEEE International Conference. Penang, Malaysia: IEEE, 2014: 524-529.
- [30] Li Hui, Bi Lan, Zhang Chunxi. Survey on robust H_∞ control for consensus problem of multi-agent systems [C] // *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2011 6th IEEE Conference. Beijing, China: IEEE, 2011: 794-798.
- [31] 胡寿松, 王源. 基于自组织模糊 CMAC 神经网络的不确定系统的 H_∞ 鲁棒自适应控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(6): 920-922.
Hu Shousong, Wang Yuan, H_∞ robust adaptive control for uncertain systems based on self-organizing fuzzy CMAC neural networks [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(6): 920-922.
- [32] Shao Keyong, Zhao Wanchun, Zhou Luanjie. Robust H_∞ control for linear uncertainty systems based on PI control laws [C] // *Machine Learning and Cybernetics*, 2004 IEEE Conference. Shanghai, China: IEEE, 2004(1): 648-652.
- [33] 袁国平. 航天器姿态系统的自适应鲁棒控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Yuan Guoping. Adaptive robust control for spacecraft attitude system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [34] Wai Rongjong. Robust control of linear ceramic motor drive with LLC resonant technique [J]. *Ul-trasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(7): 911-920.
- [35] 徐建省, 王永骥, 季海波. 鲁棒控制方法在导弹控制系统中的应用研究进展与展望[J]. *航天控制*, 2007, 25(1): 91-96.
Xu Jiansheng, Wang Yongji, Ji Haibo. The research and development of robust control to missile control system[J]. *Aerospace Control*, 2007, 25(1): 91-96.
- [36] 张强, 吴庆宪, 姜长生, 等. 基于 Backstepping 的近空间飞行器鲁棒自适应姿态控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(5): 590-598.
Zhang Qiang, Wu Qingxian, Jiang Changsheng, et al. Robust adaptive control for attitude system of near space vehicle via Backstepping method [J].

- Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(5): 590-598.
- [37] 张晓宇, 苏宏业. 滑模变结构控制理论进展综述[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(2): 1-8.
Zhang Xiaoyu, Su Hongye, Survey on the developments of sliding mode variable structure control theory [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2006, 33(2): 1-8.
- [38] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 93-103.
Liu Jinkun. Matlab simulation for sliding mode control [M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 93-103.
- [39] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 408-418.
Liu Jinkun, Sun Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 408-418.
- [40] Yu Xinghuo, Kaynak O. Sliding-mode control with soft computing: A survey [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions, 2009, 56(9): 3275-3285.
- [41] Zang Xiheng, Tang Shuo. Combined feedback linearization and sliding mode control for reusable launch vehicle reentry [C] // Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), International Conference. Guangzhou, China: [s. n.], 2012: 1175-1180.
- [42] Iqbal M, Bhatti A I, Khan Q. Dynamic sliding modes control of uncertain nonlinear MIMO three tank system [C] // International Multitopic Conference, INMIC 2009. Islamabad, Pakistan: [s. n.], 2009: 1-7.
- [43] Yang Jie, Wang Qinglin, Li Yuan. Sliding mode variable structure control theory: A survey [C] // Control Conference (CCC). Hefei, Anhui, China: [s. n.], 2012: 3197-3202.
- [44] 辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1831-1848.
Xin Bin, Chen Jie, Peng Zhihong. Intelligent optimized control: Overview and prospect [J]. ACTA Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1831-1848.
- [45] 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Cai Zixing. Intelligent control: Principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [46] 孙增圻, 邓志东, 张再兴. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
Sun Zengqi, Deng Zhidong, Zhang Zaixing. Intelligent control theory and technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [47] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版, 2003.
Wang Lixin. A course in fuzzy system and control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [48] Gang Feng. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems [J]. Fuzzy Systems, IEEE, 2006, 14(5): 676-697.
- [49] 蔚东晓, 贾霞彦. 模糊控制的现状与发展[J]. 自动化与仪器仪表, 2006, 26(6): 4-7.
Wei Dongxiao, Jia Xiayan. The status and developments of fuzzy control [J]. Automation & Instrumentation, 2006, 26(6): 4-7.
- [50] Tseng Chung-Shi, Chen Borsen. Robust fuzzy observer-based fuzzy control design for nonlinear discrete-time systems with persistent bounded disturbances [J]. Fuzzy Systems, 2009, 17(3): 711-723.
- [51] Yousef A H, Hamdy M. Observer-based adaptive fuzzy control for a class of nonlinear time-delay systems[J]. International Journal of Automation and Computing, 2013(4): 275-280.
- [52] Chen Mou, Chen Wenhua, Wu Qinxian. Adaptive fuzzy tracking control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems using disturbance observer [J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(1): 1-13.
- [53] Zhang Tianping, Yi Yang. Adaptive fuzzy control for a class of MIMO nonlinear systems with unknown dead-zones [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 32(1): 96-100.
- [54] Wang Huanqing, Chen Bing, Lin Chong. Approximation-based adaptive fuzzy control for a class of non-strict-feedback stochastic nonlinear systems [J]. Science China: Information Sciences, 2014, 57(3): 1-16.
- [55] Chen Z Z, Shan C H, Zhu H L. Adaptive fuzzy sliding mode control algorithm for a non-affine nonlinear system [J]. Industrial Informatics, 2007, 3(4): 302-311.
- [56] 张柯, 姜斌. 基于故障诊断观测器的输出反馈容错控制设计[J]. 自动化学报, 2010, 36(2): 274-281.
Zhang Ke, Jiang Bin. Fault diagnosis observer-based output feedback fault tolerant control design [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(2): 274-281.
- [57] Zhou D H, Ding X. Theory and applications of fault tolerant control [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(6): 788-797.
- [58] Jin Jiang. Fault-tolerant control systems—An introductory overview [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 161-174.
- [59] Zhou Donghua, Hu Yanyan. Fault diagnosis

- techniques for dynamic systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 748-758.
- [60] Sloth C, Esbensen T, Stoustrup J. Active and passive fault-tolerant LPV control of wind turbines [C] // *American Control Conference (ACC)*. Baltimore, Maryland, USA: [s. n.], 2010: 4640-4646.
- [61] Yu Xiang, Zhang Youmin. Design of passive fault-tolerant flight controller against actuator failures [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 180-190.
- [62] Ren Yuwei, Wang Aiping, Wang Hong. Fault diagnosis and tolerant control for discrete stochastic distribution collaborative control systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2015(3): 462-471.
- [63] Gao Z W, Ding Steven X. Fault reconstruction for lipschitz nonlinear descriptor systems via linear matrix inequality approach[J]. *Circuits Systems and Signal Processing*, 2008, 27(3): 295-308.
- [64] Chowdhury F N, Wahi P, Kaminedi S. A survey of neural networks applications in automatic control [C] // *IEEE Southeastern Symposium on System Theory*. Athens: IEEE, 2001: 349-353.
- [65] 孙富春, 李莉, 孙增圻. 非线性系统神经网络自适应控制的发展现状及展望[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(2): 254-260.
Sun Fuchun, Li Li, Sun Zengqi. Survey on adaptive control of nonlinear systems using neural networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 254-260.
- [66] Xue Yang, Ye Jianhua, Qian Hong, et al. The research of complex BP neural network PID control [C] // *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. Shanghai, China: [s. n.], 2009: 55-58.
- [67] Liu Jinkun, Lu Yu. Adaptive RBF neural network control of robot with actuator nonlinearities [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(2): 249-256.
- [68] Geng Ji. Adaptive neural network dynamic surface control for perturbed nonlinear time-delay systems [J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2012, 2(2): 135-141.
- [69] Hong Bin, Wang Mianliu. Design of robotic visual servo control based on neural network and genetic algorithm [J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2012(1): 24-29.
- [70] Reza A, Khayyat A A, Osgouie K G. Neural networks control of autonomous underwater vehicle [C] // *Int Conference on Mechanical and Electronics Engineering*. Tokyo, Japan: [s. n.], 2010: 117-121.
- [71] Liaw H C, Shirinzadeh B, Smith J. Robust neural network motion tracking control of piezoelectric actuation systems for micro/nanomanipulation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, 20(2): 356-367.
- [72] Wai R J, Huang Y C, Yang Z W, et al. Adaptive fuzzy-neural-network velocity sensorless control for robot manipulator position tracking [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 4(6): 1079-1093.
- [73] Tang Xiaoming, Ding Baocang. Design of networked control systems with bounded arbitrary time delays [J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2012, 2(2): 182-190.
- [74] Kan Zheng, Long Zhao, Jie Mei, et al. Survey of large-scale MIMO systems [J]. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2015, 17(3): 1738-1760.
- [75] Znati T. Challenges and future research directions in large-scale complex systems [C] // *Proc 28th ICDCS*. Beijing, China: [s. n.], 2008: 625-626.
- [76] Yurkovich T S, Wang J, Rizzoni G. Hybrid large scale system for a DC microgrid [C] // *American Control Conference (ACC)*. San Francisco, California, USA: [s. n.], 2011: 3899-3904.
- [77] Tang Gongyou, Sun Liang. Optimal control for nonlinear interconnected large-scale systems: A successive approximation approach [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(2): 248-254.
- [78] Tang Ruichun, Lü Xianmin, Zhai Yili, et al. Optimal tracking control for nonlinear large-scale systems with persistent disturbances [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2010, 8(4): 515-520.
- [79] Xi Yugeng, Li Dewei, Lin Shu. Model predictive control: Status and challenges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 223-236.
- [80] Nan Ying. Methodologies on scientific researches: an overview and future direction [J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2013, 13(6): 11-32.