

文章编号: 1001-0920(2003) 03-0343-05

基于 CMAC 的电液负载模拟器自学习控制

叶正茂, 李洪人, 王经甫

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过建立某飞行器舵机电液负载模拟器与操纵系统联动的数学模型, 分析了电液负载模拟器的多余力产生原理。提出了采用结构不变性原理设计补偿环节的基于 CMAC 神经网络的控制结构和算法。通过对系统的动态仿真表明, 该方法可有效地抑制多余力, 明显改善电液负载模拟器的动态加载性能。

关键词: 电液负载模拟器; CMAC 神经网络; 负载干扰; 多余力

中图分类号: TH137

文献标识码: A

CMAC-based self-learning control for the electrohydraulic load simulator

YE Zheng-mao, LI Hong-ren, WANG Jing-fu

(Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The dynamic model of the electrohydraulic load simulator combined with an aircraft steering electrohydraulic position servo system is established. The principle of the superfluous force of the electrohydraulic load simulator is analyzed. On the basis of using the structure invariance principle to design the compensation network, an adaptive self-learning control scheme based on CMAC neural network is proposed. Simulation results show that the proposed controller can effectively eliminate the superfluous force and fairly improve the dynamic loading performances of the electrohydraulic load simulator.

Key words: Electrohydraulic load simulator; CMAC neural network; Load disturbance; Superfluous force

1 引言

负载模拟器是模拟飞行器舵机所受空气动力负载或舰船舵机所受水动力负载的地面仿真设备, 其功能是在实验室条件下复现舵面所受各种负载, 考核操纵系统在实际负载条件下的性能指标和可靠性, 达到缩短研制周期, 节约研制经费, 提高可靠性和成功率的目的。

电液负载模拟器(简称加载系统)在加载的同时必须跟随舵机运动, 这个运动是作用在加载系统上

的干扰, 使其产生多余力。通常在不加任何抑制或补偿的情况下, 多余力所产生的误差非常大, 严重影响加载系统的动态加载精度, 因此如何抑制乃至消除多余力是电液负载模拟器必须解决的关键问题之一^[1,2]。通常采用结构不变性原理的方法抑制多余力, 但由于系统的结构刚度、时变特性、非线性等的影响, 采用该方法抑制多余力达不到理想效果。

小脑模型关联控制器(CMAC)是一种模仿人的小脑功能的神经网络^[3], 它是基于局部学习的神经

收稿日期: 2001-12-30; 修回日期: 2002-03-18。

作者简介: 叶正茂(1973—), 男, 四川乐至人, 博士生, 从事电液负载模拟器的多余力抑制和电流液伺服系统的智能控制研究; 李洪人(1937—), 男, 辽宁法库人, 教授, 博士生导师, 从事液压控制理论及电液伺服系统的应用、液压伺服系统的计算机控制等研究。

网络,即对于输入空间的某个局部区域,只有少数几个连接权影响网络的输出。CMAC 模拟非线性连续函数逼近精度高,学习速度快,适合应用于实时控制^[4,5]。文献[6]已将 CMAC 神经网络成功应用于电液位置伺服系统的负载干扰抑制。考虑到用结构不变性原理的方法抑制多余力的特点及 CMAC 神经网络抑制负载干扰的作用,本文提出了采用结构不变性原理设计补偿环节的基于 CMAC 神经网络的电液负载模拟器新型控制结构,并将其应用于加载系统控制中。

2 CMAC 结构原理与有关算法

m 维输入,一维输出的 CMAC 结构原理如图 1 所示。图中: $S(k)$ 为 k 时刻 m 维离散输入状态空间, A 为概念存储空间, A' 为物理存储空间, W_i 为物理存储空间地址对应的权值, $F(S(k))$ 为 k 时刻 CMAC 的输出, $F_d(k)$ 为 k 时刻的期望输出。

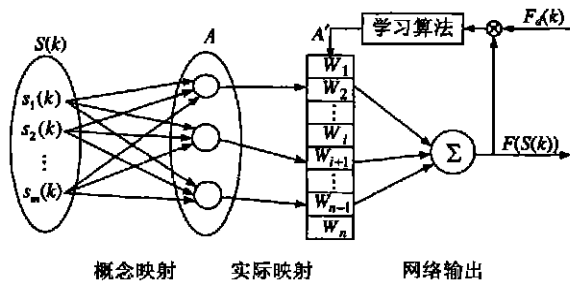


图 1 CMAC 结构原理

CMAC 具体工作过程如下:

2.1 输入向量的量化

实际输入向量通常是模拟量,CMAC 的输入是量化后的离散状态空间,因此需对输入向量进行量化。本文采用如

$$s_i = \text{round}\left(\frac{s_i - s_{i\min}}{s_{i\max} - s_{i\min}} R_i\right) \quad (1)$$

所示的量化算法。式中: s_i 为第 i 维输入的量化值; s_i 为第 i 维输入; $s_{i\min}$ 为第 i 维输入的最小值; $s_{i\max}$ 为第 i 维输入的最大值; R_i 为第 i 维输入的量化级数; round 为取整函数。

2.2 概念映射

概念映射是将输入状态空间 S 中向量 $s_1 \sim s_m$ 作为地址变量映射到空间 A 的映射过程。该映射通过滚动组合得到,具有局部泛化特性,即在输入空间中比较相近的向量,在输出空间中也比较相近。概念映射算法可由

$$A(S) = \sum_{i=1}^m C_{m_i} + \sum_{j=1}^{N_{s_j}} C_{m_j} N_{s_j} + K \quad (2)$$

$$m_{si} = \text{floor}\left(\frac{s_i - K + C}{C}\right) + K \quad (3)$$

$$N_{s_j} = \text{floor}\left(\frac{R_j - K + C - 1}{C}\right) + 1 \quad (4)$$

表示。式中: $A(S)$ 为输入向量在空间 A 的地址; $K = 1, 2, \dots, C$; C 为泛化参数,也称感受野; R_j 为第 j 维输入的量化级数; 函数 floor(x) 取不超过 x 的最大整数。

2.3 实际映射

实际映射是从空间 A 到空间 A' 的映射过程。如果输入矢量的维数较少,则空间 A 的虚地址可与空间 A' 的物理地址一一对应; 如果输入矢量的维数较大,则空间 A 可能很大。由于绝大多数学习问题并不包括所有输入空间中的状态,故可采用散列编码的映射方法(即 Hash-coding 方法),将空间 A 映射到一个较小的空间 A' 中,对应的物理单元数仍为 C 。

2.4 CMAC 输出

CMAC 的输出算法为

$$F(S) = \sum_{l=1}^C W_l \quad (5)$$

式中: $F(S)$ 是 CMAC 的输出; W_l 是空间 A' 中被激活地址所对应的权值。

2.5 学习算法

CMAC 学习算法采用梯度下降法,可描述为

$$W_l(k) = W_l(k-1) + \beta \frac{(F_d(k) - F(S(k)))}{C} \quad (6)$$

式中: $W_l(k)$ 为 k 时刻空间 A' 中被激活地址所对应的权值; $\beta(0 < \beta < 1)$ 为学习系数。

3 电液负载模拟器数学模型

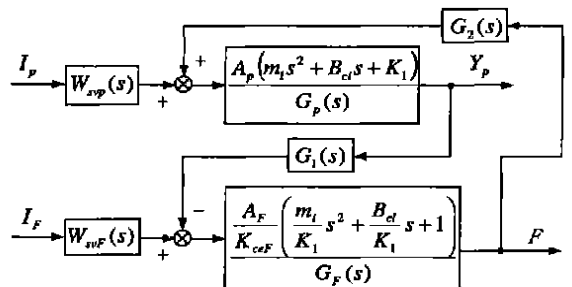


图 2 电液负载模拟器与操舵系统联动的动力机构方块图
不考虑外部干扰对系统的影响时,某飞行器舵机电液负载模拟器与操舵系统联动的动力机构方块图如图 2 所示。图中: I_p 为舵机系统伺服阀输入电流; I_F 为加载系统伺服阀输入电流; A_p 为舵机液压

缸活塞有效面积; A_F 为加载液压缸活塞有效面积; $W_{svp}(s)$ 为舵机伺服阀传递函数; $W_{svF}(s)$ 为加载伺服阀传递函数; B_{cl} 为惯性负载的粘性阻尼系数; K_{ceF} 为加载系统总的流量——压力系数; K_1 为等效舵机联接弹簧刚度; m_l 为惯性负载质量; Y_p 为舵机液压缸活塞位移; F 为加载系统液压缸输出力。此处, 舵机伺服阀和加载伺服阀传递函数均按振荡环节考虑, 其固有频率为 760 rad/s, 阻尼比为 0.7。

$$G_1(s) = \frac{G_{dF}(s)}{\frac{A_F}{K_{ceF}} \frac{m_l}{K_1} s^2 + \frac{B_{cl}}{K_1} s + 1} \quad (7)$$

$$G_2(s) = \frac{K_1 \frac{V_p}{4\beta_e} s + K_{cep}}{A_p (m_l s^2 + B_{cl} s + K_1)} \quad (8)$$

$$G_p(s) = s \left\{ \frac{m_l m_p V_{lp}}{4\beta_e} s^4 + \left[\frac{(m_l B_{cp} + m_p B_{cl}) V_{lp}}{4\beta_e} + m_l m_p K_{cep} \right] s^3 + \frac{(m_l + m_p) K_1 V_p + B_{cl} B_{cp} V_p}{4\beta_e} s^2 + (m_l B_{cp} + m_p B_{cl}) K_{cep} + A_p^2 m_l \right\} s^2 + \frac{(B_{cl} + B_{cp}) K_1 V_p}{4\beta_e} + (m_l + m_p) K_1 K_{cep} + B_{cl} B_{cp} K_{cep} + A_p^2 B_{cl} \right\} s + (B_{cl} + B_{cp}) K_1 K_{cep} + A_p^2 K_1 \quad (9)$$

$$G_F(s) = \frac{m_F m_F V_{lF}}{4\beta_e K_F K_1 K_{ceF}} s^5 + \left[\frac{(m_l B_{cF} + m_F B_{cl}) V_{lF}}{4\beta_e K_F K_1 K_{ceF}} + \frac{m_F m_F}{K_F K_1} \right] s^4 + \frac{(m_l + m_F) K_F V_{lF} + (m_F K_1 + B_{cl} B_{cF}) V_{lF}}{4\beta_e K_F K_1 K_{ceF}} + \frac{(m_l B_{cF} + m_F B_{cl}) K_{ceF} + A_F^2 m_l}{K_F K_1 K_{ceF}} \right] s^3 + \frac{(B_{cl} + B_{cF}) K_F V_{lF} + B_{cF} K_1 V_{lF}}{4\beta_e K_F K_1 K_{ceF}} + \frac{(m_l + m_F) K_F K_{ceF} + (m_F K_1 + B_{cl} B_{cF}) K_{ceF} + A_F^2 B_{cl}}{K_F K_1 K_{ceF}} \right] s^2 + \frac{V_{lF}}{4\beta_e K_{ceF}} + \frac{(B_{cl} + B_{cF}) K_F K_{ceF} + B_{cF} K_1 K_{ceF}}{K_F K_1 K_{ceF}} \right] s + 1 \quad (10)$$

$$G_{dF}(s) = \frac{A_F^2 + K_{ceF} B_{cF}}{K_{ceF}} \frac{m_F V_{lF}}{[4\beta_e (A_F^2 + K_{ceF} B_{cF})]} s^2 + \frac{B_{cF} V_{lF}}{4\beta_e (A_F^2 + K_{ceF} B_{cF})} + \frac{m_F K_{cF}}{A_F^2 + K_{ceF} B_{cF}} s + 1 \quad (11)$$

上述各式中, m_p 为舵机液压缸活塞质量; m_F 为加载液压缸活塞质量; K_F 为传感器刚度; B_{cp} 为舵机液压缸活塞的粘性阻尼系数; B_{cF} 为加载液压缸活塞的粘性阻尼系数; K_{cep} 为舵机系统总的流量——压力系数; V_{lp} 为舵机液压缸两个油腔的总容积; V_{lF} 为加载液压缸两个油腔的总容积; β_e 为有效体积弹

性模数。

由上述分析可得加载系统动力机构传递函数为

$$F = \frac{\frac{A_F}{K_{ceF}} \frac{m_l}{K_1} s^2 + \frac{B_{cl}}{K_1} s + 1}{G_F(s)} W_{svF}(s) I_F - G_{dF}(s) Y_p \quad (12)$$

系统主要参数值如表 1 所示。

表 1 系统主要参数值

参数	数值	单位	参数	数值	单位
m_l	14.5	kg	m_p	2.5	kg
m_F	2	kg	B_{cl}	100	N/(m/s)
B_{cF}	500	N/(m/s)	B_{cp}	500	N/(m/s)
K_1	1.37×10^7	N/m	K_F	5×10^8	N/m
A_p	6.41×10^{-4}	m ²	A_F	6.41×10^{-4}	m ²
K_{cep}	4×10^{-13}	m ⁵ /(N·s)	K_{ceF}	4×10^{-13}	m ⁵ /(N·s)
V_p	5.3×10^{-5}	m ³	V_{lF}	5.3×10^{-5}	m ³
β_e	690	MPa			

4 基于 CMAC 的控制器结构

由于要求加载系统在随着舵机系统快速运动情况下高精度地跟踪各种指令加载函数, 而干扰源的强度非常大, 且加载系统的时变特性和非线性使得 $G_{dF}(s)$ 是变化的, 这就说明单独采用对消的方法来消除它比较困难。通常, 电液负载模拟器采用结构不变性原理的方法抑制多余力, 即通过确定图 3 中的补偿环节 $G_e(s)$ 来实现对消 $G_{dF}(s) Y_p$ 项的影响。由于 $G_1(s)$ 中的二阶微分环节和振荡环节的频率很高, 加载伺服阀的频带也较宽, 在设计补偿环节时可以忽略, 因此可得补偿环节 $G_e(s)$ 的表达式为

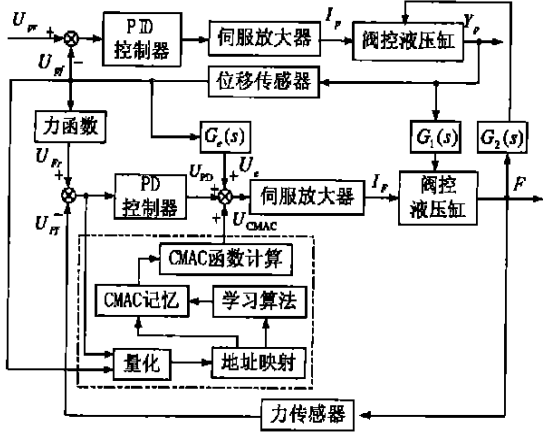


图 3 基于 CMAC 的电液负载模拟器控制系统

$$G_e(s) = \frac{U_e}{U_{pf}} = \frac{K_e s}{W_e(s)} \quad (13)$$

式中: U_{pf} 为舵机位移传感器输出电压; U_e 为补偿环节输出电压; K_e 为补偿环节增益; $W_e(s)$ 是考虑物理可实现因素而串联的一个滤波器。

由于系统时变特性和非线性影响及确定补偿环节时采取的简化方法难以做到完全抑制多余力, 因此为更好地抑制多余力, 本文提出了基于 CMAC 的电液负载模拟器控制结构, 如图 3 所示。其原理是: 初始状态时, CMAC 的所有权值为零; 控制时, 将加载系统的偏差信号和舵机位移信号量化后, 作为地址输入到 CMAC, 激活空间 A 中与之对应的 C 个地址单元, 并将这 C 个地址中的权值相加, 得到 CMAC 的输出。即

$$U_{CMAC} = \sum_{l=1}^C W_l \quad (14)$$

然后与 PD 控制器的输出 U_{PD} 和补偿环节的输出 U_e 相加, 得到电液负载模拟器控制器的总输出。即

$$U = U_{CMAC} + U_{PD} + U_e \quad (15)$$

被激活单元的权值调整规则为

$$W_l(k) = W_l(k-1) + \beta \frac{U_{PD}}{C} \quad (16)$$

实际应用中, 应设计一个允许误差极限 δ , 当 $|U_{PD}| < \delta$ 时, 权值不变, 否则按式(16)修正权值。

5 仿真研究

为了验证所提出基于 CMAC 的自学习控制策略的有效性, 需要进行对比仿真分析。仿真中, 加载系统 PID 控制参数为: $k_p = 1, k_i = 0.005, k_d = 0.001$ 。CMAC 控制器参数为: $k_p = 1, k_d = 0.001, \beta = 0.005, C = 100$, 加载系统的偏差信号和舵机位移信号量化级数分别为 2000 和 1000, 物理存储空间 $A = 10000$, 加载系统力函数为 $F_r = 2.5 \times 10^5 y_p$ 。

被测舵机输入信号 $y_r = 0.008\sin(\pi t)$ 时的仿真结果如图 4 所示。图中, 曲线 ① 为加载系统指令信号, 曲线 ② 为采用图 3 所示的基于 CMAC 控制器的仿真结果, 曲线 ③ 为采用 PID 与结构不变性原理混合控制的仿真结果, 曲线 ④ 为仅采用 PID 控制的仿真结果。可见, 仅采用 PID 控制时, 加载误差比较大; 采用 PID 与结构不变性原理混合控制或采用基于 CMAC 的控制器, 在舵机运动频率较低时, 都可以有效地抑制多余力, 系统加载精度较高。

被测舵机输入信号 $y_r = 0.002\sin(20\pi t)$ 时的仿真结果如图 5 所示。其中曲线 ① 为加载系统指令

信号; (a) 中曲线 ② 为采用 PID 与结构不变性原理混合控制的仿真结果, 曲线 ③ 为仅采用 PID 控制的仿真结果; (b) 中曲线 ② 为采用图 3 所示基于 CMAC 控制器的仿真结果。由仿真结果可知, 仅采用 PID 控制时, 加载误差非常大; 采用 PID 与结构不变性原理混合控制, 在舵机运动频率较高时, 加载误差较大; 采用基于 CMAC 的控制器, 在舵机运动频率较高时, 由于干扰强度非常大, 控制初始阶段系统误差也较大。这是因为 CMAC 控制器初始权值为零, 控制起始阶段, PD 与结构不变性原理混合控制器起主要作用。但经过 13 个周期的学习后, 系统控制精度已较高。

综合图 4 和图 5 的仿真结果可知: 电液负载模

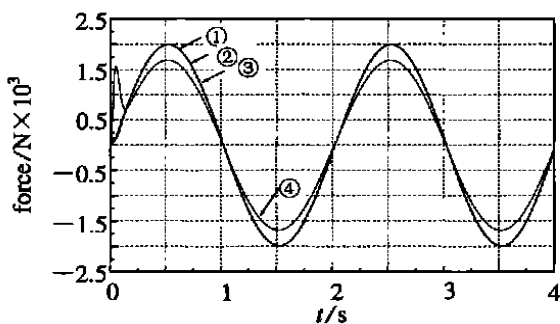
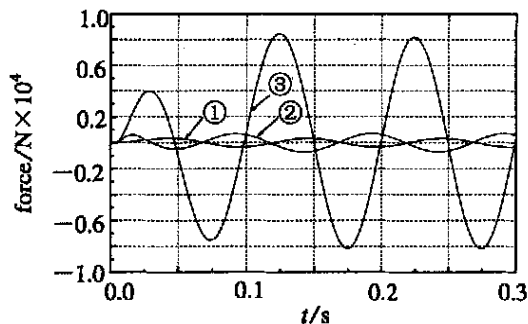
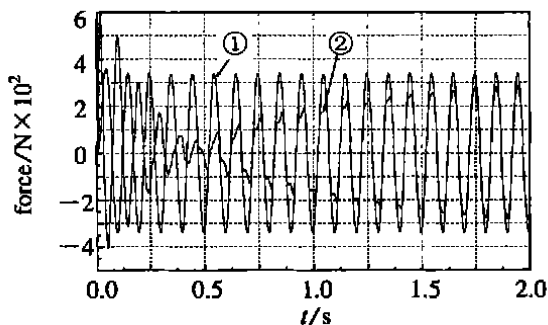


图 4 被测舵机输入信号 $y_r = 0.008\sin(\pi t)$ 时的仿真结果



(a) PID 与结构不变性原理混合控制的仿真结果



(b) 采用基于 CMAC 控制器的仿真结果

图 5 被测舵机输入信号 $y_r = 0.002$

$\sin(20\pi t)$ 时的仿真结果

拟器仅采用 PID 控制时,加载误差很大;采用 PID 与结构不变性原理混合控制时,舵机运动频率较低时,加载精度很高,但舵机运动频率较高时,加载误差变得很大;采用基于 CMAC 的控制器,加载系统可在较宽的频率范围内满足对舵机系统的加载精度要求,加载系统的动态性能得到明显改善。

6 结 语

多余力严重影响电液负载模拟器的动态加载性能,仅采用结构不变性原理抑制多余力达不到理想效果。本文针对电液负载模拟器的特点,将 CMAC 神经网络成功应用于电液负载模拟器的控制中,并给出了具体的控制结构和相应算法。仿真结果表明,该方法弥补了结构不变性原理的不足,抑制多余力的效果明显,极大地改善了电液负载模拟器动态加载性能,对电液负载模拟器的设计具有很大的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 李运华. 抑制电液力矩控制系统的多余力矩的新方法[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 4-7.
(Li Yunhua. New method to restrain superfluous moment of electro-hydraulic moment control system

[J]. *Chinese J of Mechanical Engineering*, 2000, 36(3): 4-7.)

- [2] 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [3] Albus J S. A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. *Trans of the ASME, J of Dynamic System Measurement and Control*, 1975, 97(3): 220-227.
- [4] Zhao Mingjie, Cheng Yiyu. Fuzzy CMAC and its application in function learning[A]. *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hefei, 2000. 904-907.
- [5] Kai Zhang, Feng Qian. Fuzzy CMAC and its application[A]. *Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hefei, 2000. 944-947.
- [6] 蒋志明, 林廷圻, 黄先祥. 基于 CMAC 的带有未知负载干扰电液位置伺服系统的自学习控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 368-374.
(Jiang Zhiming, Lin Tingqi, Huang Xianxiang. The CMAC-based self-learning control for an electrohydraulic position servo system subjected to unknown disturbances [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 368-374.)

(上接第 342 页)

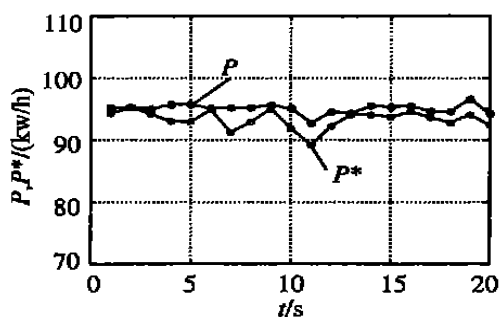


图 2 最佳电功率 P^* 与原电功率 P 的比较曲线

优化仿真结果表明,在满足产品质量的前提下,对不同进料量 F ,按相应的优化入炉电功率 P^* 进行生产,可使炉子始终处于优化工况,从而体现出优化控制的优越性和有效性。

6 结 论

本文以焊锡真空脱铅炉的优化控制问题为研究对象,利用辨识方法建立了真空炉生产过程的数学模型,并提出一种给定值改变的前馈-比例积分优化控制算法,仿真结果表明了该方法的有效性。但由于

数据的来源首先不能涵盖所有情况,且其本身具有一定的误差,因此所建模型、提出的优化方法具有一定误差,但它在一定范围和条件下是适用的。本文的研究工作对系统辨识和优化控制在真空炉中的实际应用具有很高的参考价值,并能对冶金工业生产过程控制提供一个较好的示例。

参考文献(References):

- [1] 戴永年,赵忠. 真空冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 冯雨辉. 内热式多级连续真空炉建模与仿真[R]. 昆明: 昆明工学院, 1994.
- [3] 黄文梅,杨勇,熊桂林. 系统分析与仿真——MATLAB 语言及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999. 142-166.
- [4] 徐昕,李涛,伯晓晨,等. MATLAB 工具箱应用指南——控制工程篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 78-82.
- [5] 邵惠鹤. 化工过程最优控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984. 285-313.