



一种设计仿人智能控制器特征模型的新方法

王俊普 郝金波 李国清

(中国科学技术大学自动化系 合肥 230027)

摘要 特征模型的设计是仿人智能控制理论中十分重要的组成部分之一. 文中从某些时域性能指标出发, 提出了一种设计 $(e-t)$ 信息空间特征模型的新方法. 通过引入特征点、特征直线等概念, 直接建立了仿人智能控制的特征模型与系统的上升时间 t_r 、超调量 δ_p 和峰值时间 t_p 等性能指标的定量关系, 并用于实时调整特征状态的切换阈值, 实现了对特征模型的动态设计. 仿真实验结果表明了该方法的适用性和有效性.

关键词 仿人智能控制, 特征模型, 上(下)界特征直线, 特征点.

A NEW METHOD FOR DESIGNING CHARACTERISTIC MODELS OF INTELLIGENT CONTROLLERS

WANG Jun-Pu HAO Jin-Bo LI Guo-Qing

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract Designing of characteristic models is a very important part of human-simulating-intelligent-control (HSIC) theory. The paper presents a new method based on some time-domain performances for designing characteristic models in $(e-t)$ information space by means of characteristic lines and characteristic points which are introduced concepts. The quantitative relation between characteristic models of HSIC and some time-domain performances (e. g., rising time t_r , overshoot δ_p , peak time t_p) is set up directly and is used for adjusting the threshold of switching among the characteristic states. The dynamic designing of characteristic models is thus implemented, and the results of simulations show the suitability and effectiveness of the method.

Key words Human-simulating-intelligent-control, characteristic model, boundary characteristic line, characteristic point.

1 引言

智能控制不依赖于系统的数学模型, 因此具有广泛的适用性. Saridis 提出了智能控制

系统的分层递阶结构,奠定了智能控制的三元结构的理论基础^[1].仿人智能控制(HSIC)作为智能控制的一个分支,最初由周其鉴、李祖枢等人提出,并建立了仿人智能控制的基本理论,给出了仿人智能控制器的设计方法^[2,3].李祖枢、涂亚庆等提出的设计方法以相平面($e-e'$)作为信息空间设计控制器.由于相平面($e-e'$)只是隐含了时间信息,难以与性能指标建立直接联系,因此这是一种定性的设计方法.控制系统设计的目标,总是针对控制系统完成的任务,满足于特定的性能指标^[4].基于这种思想,本文提出了面对某些时域指标,以($e-t$)为信息空间设计仿人智能控制器的方法,给出了特征模型的动态设计算法.该方法是一种定性定量相结合的设计方法.

2 HSIC 控制器设计的基本思想

按照仿人智能控制的基本理论,HSIC 的结构是分级递阶的结构:中枢司令级、组织协调级和单元控制级.单元控制级又分解为任务适应级(TA)、参数校正级(ST)和运行控制级(MC).运行控制级直接面向被控对象,采用产生式系统结构.知识库用三重序元 $\langle \Phi, \Psi, \Omega \rangle$ 描述,其中 $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ 称为特征模型, $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_r\}$ 称为控制(决策)模态集, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q\}$ 为产生式集.产生式 $\omega_i (i=1, 2, \dots, q)$ 可表示为

$$\text{IF } \phi_i \text{ THEN } \psi_i, \phi_i \in \Phi, \psi_i \in \Psi. \quad (1)$$

上式中 ϕ_i 称为特征状态,是特征信息空间划分的一个区域; ψ_i 是控制器的输出量 U 与输入信息 R 、特征记忆 Δ 之间定量或定性关系的描述.

无论是定值控制还是伺服控制,控制过程总是期望系统的动态响应在时相空间($e-e'-t$)为一条理想轨迹.由于被控对象具有不确定性且又不确知,实际上运动的轨迹只可能处在这条理想曲线周围的一个曲柱中.仿人智能控制器的设计任务就是以实际轨迹与理想轨迹在信息空间中的偏差轨迹为依据,对信息空间($e-e'-t$)进行划分(特征模型),并给出相应的控制模态.

MC 级的控制目标主要是控制精度,即满足特定任务的某些时域性能指标.在 HSIC 的基本算法中,特征模型的建立即特征状态的划分是一种近乎先验的过程^[2,3].特征变量的阈值不能根据实际过程的输出响应和偏差曲线做动态调整,更无法依据控制指标的要求变化而适应.这在相当大的程度上限制了控制任务的正确完成.本文提出了动态建立特征模型的一种新方法.根据系统的瞬态性能指标上升时间 t_r 、超调量 δ_p 和峰值时间 t_p 等划分($e-t$)平面,实时给出 MC 级特征状态的切换阈值,动态地建立其特征模型 Φ ,改变其知识库,迫使控制沿着适当的轨迹达到各项控制指标.

3 HSIC 的特征模型的动态设计算法

这里主要阐述基于时域性能指标的两种情况的算法.

3.1 基于上升时间 t_r 的特征模型的建立

首先对系统的单位阶跃响应的上升段的偏差曲线进行分析.如图 1 所示,考虑到通常允许稳态误差 $\Delta = e(0) \times 5\%$ 的性能要求,定义 t_r 为偏差达到 $0.05e_0$ 的时刻.于是,引入上升时间特征点 A 、第一上界特征直线 L_{1u} 、第一下界特征直线 L_{1l} 三个概念.

上升时间特征点 A ——由上升时间和允许稳态误差性能确定的标志点,坐标为 $(t_r, 0.05e_0)$.

第一上界特征直线 L_{1u} ——由偏差曲线的起点 $(0, e_0)$ 和特征点 A 确定的直线.斜率为

$$k_{1u} = \frac{0.05e_0 - e_0}{t_r} = -0.95 \frac{e_0}{t_r} \quad (2)$$

第一下界特征直线 L_{1l} ——第一上界特征直线 L_{1u} 与时间轴所成锐角的平分线.按照半角公式,可以求得这条直线的斜率为

$$k_{1l} = -\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = -\frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta} = -\frac{0.95}{t_r + \sqrt{(0.95e_0)^2 + t_r^2}} e_0 \quad (3)$$

显然,在时段 $(0, t_r)$ 内,介于直线 L_{1u} 和 L_{1l} 之间(图 1 的阴影区内)任意一条偏差曲线 $e_1(t)$ 都可以定义为满足性能指标 t_r 的理想偏差轨迹,即

$$k_{1l}(t - t_r) + 0.05e_0 \leq e_1(t) \leq k_{1u}(t - t_r) + 0.05e_0, \quad 0 \leq t \leq t_r. \quad (4)$$

于是对 $(e-t)$ 信息空间进行划分,建立相应特征模型如下:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4\}, \\ \left\{ \begin{aligned} \phi_1: & t < t_r \text{ 且 } e(t) \geq e_{1u}(t), \\ \phi_2: & t < t_r \text{ 且 } e_{1l}(t) < e(t) < e_{1u}(t), \\ \phi_3: & t < t_r \text{ 且 } e(t) \leq e_{1l}(t), \\ \phi_4: & t \geq t_r. \end{aligned} \right. \quad (5) \end{aligned}$$

这里对 ϕ_2, ϕ_4 两种特征状态,可以采取保持控制.

3.2 基于上升时间 t_r 、超调量 δ_p 和峰值时间 t_p 的特征模型的建立

现在对于单位阶跃响应具有超调的偏差曲线,依据控制性能指标——上升时间 t_r 、超调量 δ_p 和峰值时间 t_p 的要求,对于时间段 (t_r, t_p) 进行分析.类似于 $(0, t_r)$ 段的分析,进一步引入峰值特征点 B 、第二上界特征直线 L_{2u} 和第二下界特征直线 L_{2l} 的概念,如图 2 所示.

峰值特征点 B ——由超调量和峰值时间确定的标志点,坐标为 $(t_p, -\delta_p)$.

第二上界特征直线 L_{2u} ——连结两个特征点 A 和 B 所得到的直线.它的斜率为

$$k_{2u} = \frac{-\delta_p - 0.05e_0}{t_p - t_r} = -\frac{\delta_p + 0.05e_0}{t_p - t_r} \quad (6)$$

第二下界特征直线 L_{2l} ——第二上界特征直线 L_{2u} 与时间轴所成锐角的平分线.按照半角公式,可以求得这条直线的斜率为

$$k_{2l} = -\operatorname{tg} \frac{\angle ABD}{2} = -\frac{\sin \angle ABD}{1 + \cos \angle ABD} = -\frac{\delta_p + 0.05e_0}{(t_p - t_r) + \sqrt{(\delta_p + 0.05e_0)^2 + (t_p - t_r)^2}} \quad (7)$$

对于时间段 (t_r, t_p) ,理想偏差曲线 $e_2(t)$ 应介于特征直线 L_{2u} 和 L_{2l} 之间,如图 2 中的阴影区域所示,即

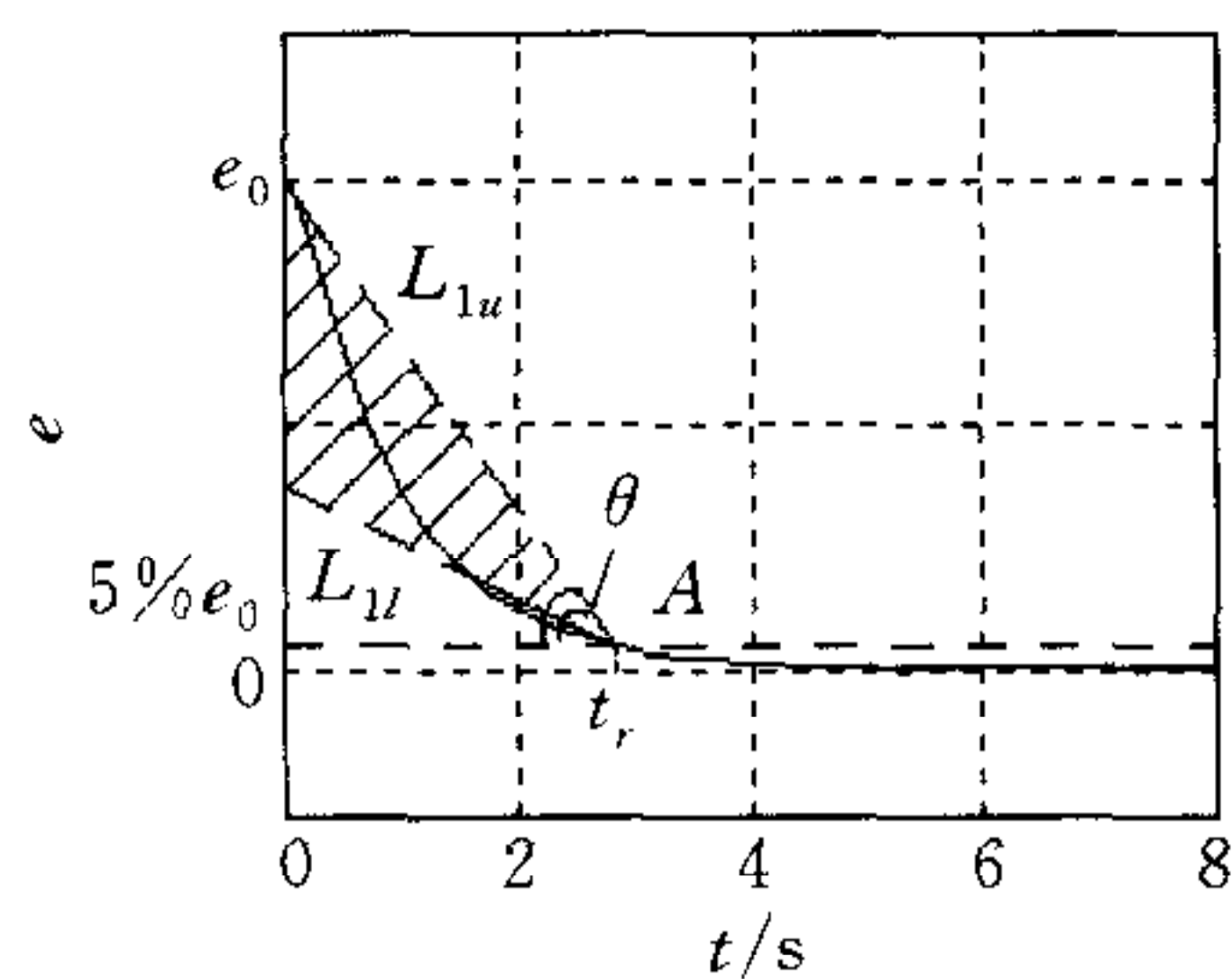


图 1 无超调的理想偏差曲线分析

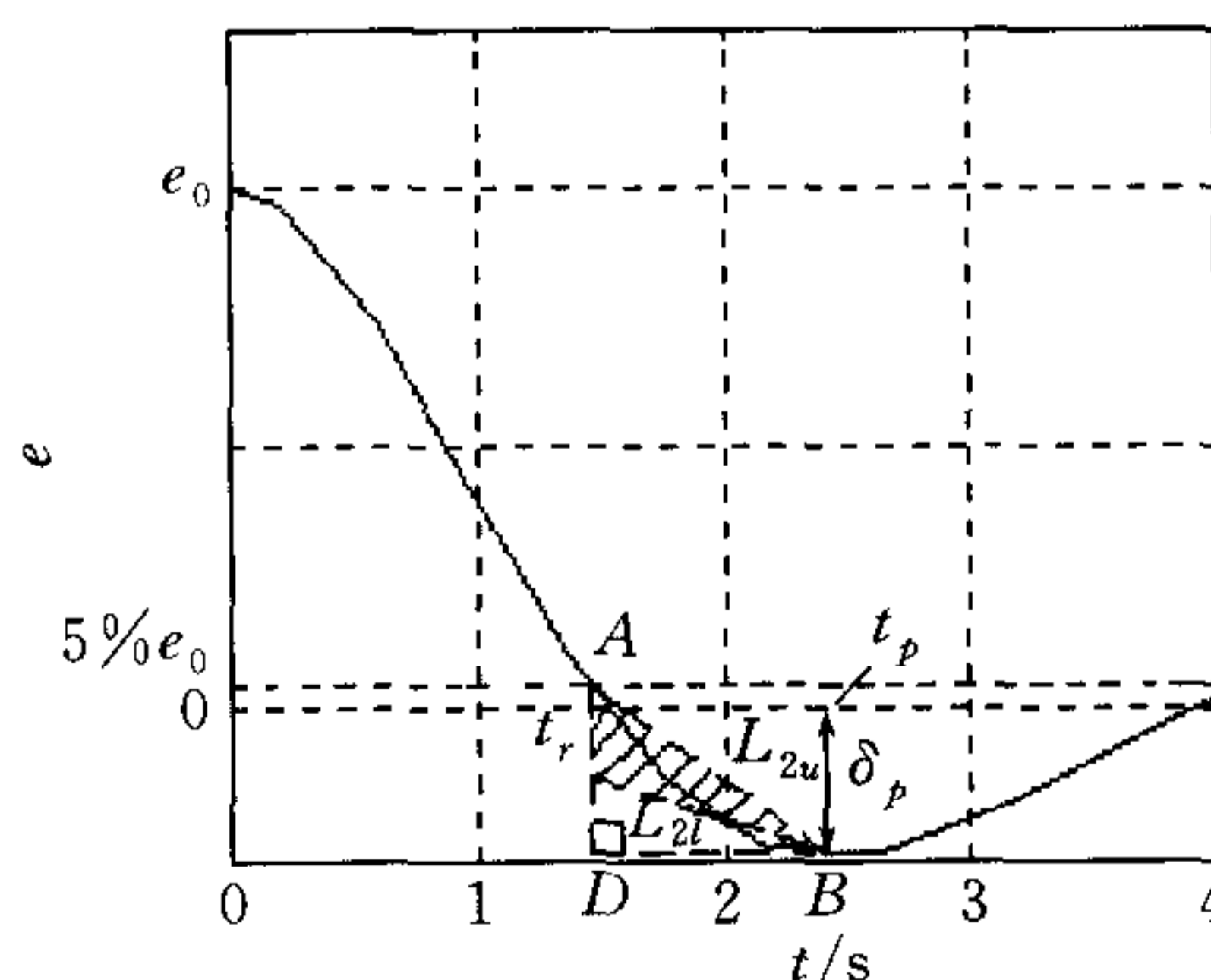


图 2 有超调的理想偏差曲线分析

$$k_{2l}(t - t_p) - \delta_p < e_2(t) < k_{2u}(t - t_p) - \delta_p, \quad t_r \leq t \leq t_p. \quad (8)$$

于是,对于以 t_r , δ_p 和 t_p 为性能指标的系统,特征模型中的 ϕ_4 ,特征状态被进一步划分成 4 个特征状态

$$\begin{cases} \phi_5: t_r \leq t < t_p \text{ 且 } e(t) \geq e_{2u}(t), \\ \phi_6: t_r \leq t < t_p \text{ 且 } e_{2l}(t) < e(t) < e_{2u}(t), \\ \phi_7: t_r \leq t < t_p \text{ 且 } e(t) \leq e_{2l}(t), \\ \phi_8: t \geq t_p, \end{cases} \quad (9)$$

从而得到特征模型 $\Phi_2 = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_5, \phi_6, \phi_7, \phi_8\}$. 这里对于 ϕ_2 , ϕ_6 和 ϕ_8 可以采用保持控制模式;对于 $\phi_1, \phi_3, \phi_5, \phi_7$ 可以采用不同参数的 PID 控制模式或其他控制算法.

类似地,还可以对时间段 (t_p, ∞) 的偏差曲线做进一步分析. 需要指出,这里定义的第一、二下界特征直线是经验直线,根据现场专家对于控制环境和对象的了解来确定. 出于简化考虑,本文将这条阈值轨迹设定为角平分线.

4 仿真实验

对具有不同特性的受控对象和不同时域性能指标要求的控制系统,我们对本文提出的

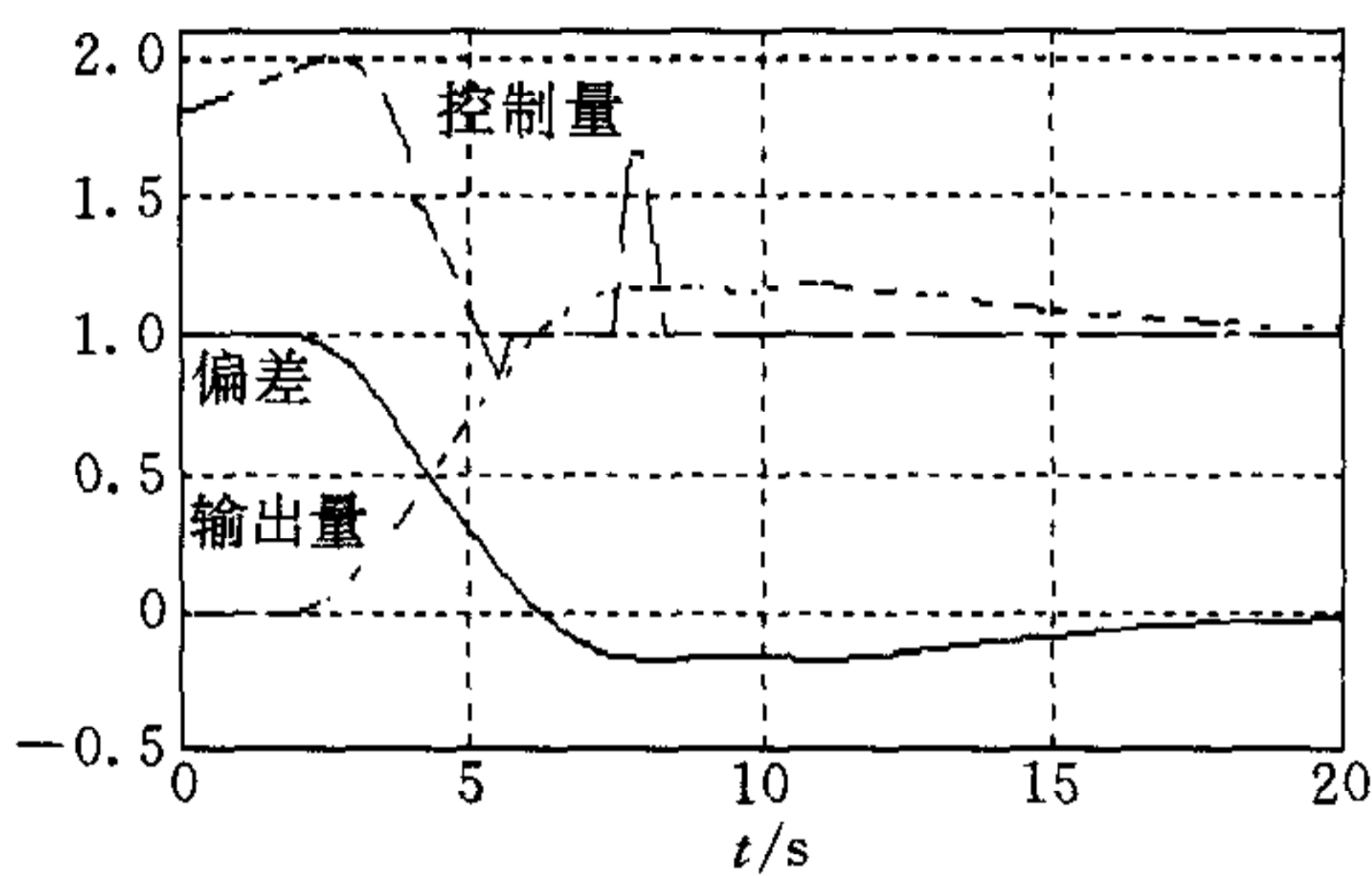


图 3 HSIC 仿真实验曲线

特征模型的设计方法做了大量的仿真实验测试. 仿真结果表明,该方法能够较好地满足控制性能指标的要求,具有很强的适用性. 现仅以一例说明.

设受控对象传递函数为 $G(s) = \frac{e^{-2s}}{5s^2 + 5s + 1}$, 输入为单位阶跃函数,性能要求是上升时间 $t_r = 5.5s$,超调量 $\delta_p = 20\%$,峰值时间 $t_p = 9s$. 仿真结果如图 3 所示.

5 结束语

本文从控制器自身如何对控制专家的结构和行为的模仿着手,重点讨论了基于某些时域性能指标的 SHIC 特征模型的设计方法,实验表明该方法具有良好的适用性和有效性.

此外,SHIC 的控制模式 Ψ 对系统性能同样是至关重要的. 因此,如何对 Ψ 进行选择、修改以及动态设计,同样是 SHIC 面临的课题,值得深入研究.

参 考 文 献

- 1 Saridis G N. Hierarchical intelligent control system for urban and freeway traffic, TR-EE-81. Purdue University, 1977
- 2 李祖枢,徐鸣,周其鉴. 一种新型的仿人智能控制器(SHIC). 自动化学报, 1990, 16(6):503~509
- 3 涂亚庆,李祖枢. 一种新型的仿人智能控制器的设计方法. 自动化学报, 1994, 20(5):616~621
- 4 王俊普,郑全,郝金波. 智能自适应控制的自学习方法. 清华大学学报, 1998, 38(S2):169~172

王俊普 教授,主要研究方向为智能控制、人工智能、机器学习和智能系统等.