

基于 H_∞ 环路成形和自适应神经模糊推理系统的模糊控制器设计

韩 璞, 周世梁, 刘玉燕, 王东风

(华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003)

摘要: H_∞ 环路成形方法设计的控制器阶次较高, 不利于工程实现和参数调整; 用传统方法确定模糊控制器隶属度函数的参数和模糊规则比较费时且难以保证鲁棒性能和时频域性能指标. 针对上述情况, 提出了一种综合运用 H_∞ 环路成形和自适应神经模糊推理系统设计模糊控制器的方法. 首先采用 H_∞ 环路成形设计方法, 得到鲁棒裕量、动态和稳态性能都符合要求的控制器, 然后用自适应神经模糊推理系统来逼近此控制器, 最后根据自适应神经模糊推理系统参数确定相应的模糊控制器规则和参数. 该方法确定模糊控制器隶属度函数的参数精确而省时, 且能保证控制器具有较强的鲁棒性和良好的控制效果. 通过对小车倒立摆系统进行的仿真, 验证了该控制器设计方法的有效性.

关键词: H_∞ 环路成形; 自适应神经模糊推理系统; 鲁棒控制; 模糊控制; 倒立摆

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Design of fuzzy controller based on H-infinity loop-shaping procedure and adaptive-neural-network-based fuzzy interference system

HAN Pu, ZHOU Shi-liang, LIU Yu-yan, WANG Dong-feng

(Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Controllers designed by H-infinity loop-shaping procedure are too complex to be applied to engineering, and it is time-consuming to decide fuzzy rules and membership function's parameters of fuzzy controllers using traditional method. To overcome the shortcoming, a design of fuzzy controller is proposed by using both H-infinity loop-shaping and adaptive-neural-network-based fuzzy interference system (ANFIS) synthetically. First, a controller was obtained which had enough stability margin, good dynamic properties and steady-state behavior using H-infinity loop-shaping design procedure. Then, adaptive neural-network-based fuzzy interference system was used to approximate the controller. Finally, corresponding parameters of fuzzy controller were set according to adaptive neural-network-based fuzzy interference system parameters. It was easy to confirm the rule and accurate parameters of fuzzy controller using this method, and the controller had enough stability margin and good control quality. Simulation results were given to show the validity of the scheme.

Key words: H-infinity loop-shaping; adaptive-neural-network-based fuzzy interference system; robust control; fuzzy control; inverted pendulum

1 引言 (Introduction)

倒立摆系统是一个典型的多变量、非线性、强耦合和快速运动的自然不稳定系统, 是验证现代控制理论和方法的典型实验装置, 而且其控制方法和思路对处理一般工业过程亦有广泛的用途. 在控制过程中能反映控制中的许多关键问题, 如镇定问题、非线性问题、鲁棒性问题、随动问题及跟踪问题等, 所以一直是控制领域研究的热点. 国内外研究者已提出了许多有效的控制方案. 其中比较典型的控制方法有自适应控制、变结构控制、现代鲁棒控制和模糊

控制等. 自适应控制成功取决于对未知参数的准确估计, 但这在实际工程中往往是难以实现的. 由于不确定的外部干扰和无法由定常参数表示的未建模动态等影响, 参数估计误差往往不收敛于零, 甚至会发散, 而且变结构控制中控制器频繁的切换动作有可能造成跟踪误差在零点附近产生抖动现象, 而不能收敛于零^[1]. 而鲁棒控制与模糊控制都不依赖于精确的数学模型, 这正是实际现场所期望的.

H_∞ 环路成形设计方法 (Loop shaping design procedure, LSDP) 是建立在对范数、系统的不确定性以

及鲁棒性定量的数学描述基础上,通过整形系统频率特性曲线来保证控制系统的鲁棒性能及控制品质的设计方法.对模型具有不确定性及干扰能量为有限信号的系统,应用 H_∞ LSDP 设计的控制器进行控制具有很强的鲁棒性,但所得控制器通常阶次较高,结构实现困难.另外,由于参数物理意义不明确,控制器参数不便现场调整,这些在很大程度上限制了它的实际应用.

模糊控制是以模糊数学为基础发展起来的一种非线性控制方式,对无法取得数学模型或数学模型相当粗糙的系统可以取得满意的控制效果.而且模糊控制器实现相对简单,参数物理意义明确,便于现场调试.模糊控制中,模糊规则的提取和隶属度函数参数的确定是模糊推理系统设计中重要而困难的问题.通常,从领域专家那里获取的模糊规则是比较粗糙的,且缺乏有效的方法来确定隶属函数参数以减少输出误差或提高性能指标.所以,在模糊推理系统设计中,模糊规则的建立和隶属度函数参数的确定是系统设计的瓶颈问题.

自适应神经模糊推理系统(Adaptive neural-network-based fuzzy inference system, ANFIS)是一种将模糊逻辑和神经网络有机结合的新型的模糊推理系统结构,是 T-S 模糊推理系统的神经网络实现.它能改善传统模糊控制设计中所依靠人的思维一次次的调整隶属函数才能达到减小误差,增进效能的缺点.以采用反向传播算法和最小二乘法的复合学习过程为基础,调整出适当的前提参数和结论参数以及相对应的 If-Then 规则,来满足所需要的模糊推理输入输出关系.

综合考虑三者的优缺点,作者提出如下设计方案:首先,运用 LSDP 通过选择适当的权函数得到符合要求的控制器;然后,选择合理的输出给定值信号产生一组误差和控制器输出数据,以这组数据训练 ANFIS;最后得到 ANFIS 对应的模糊控制器.所得控制器既能保证一定的鲁棒裕量和良好控制品质又便于实现和参数在线调整;同时也克服了常规模糊控制器设计中模糊化、反模糊化的人为决定性和模糊规则的不全面性、粗糙性.

本文先简要介绍 H_∞ LSDP 和 ANFIS,然后叙述 ANFIS 训练数据的选取及训练后参数的调整,最后给出仿真结果.

2 H_∞ 环路成形(H_∞ loop shaping)

H_∞ 回路成形设计就是对被控对象进行频率域的形状整形,使其满足频率域上的形状特点,然后实

施 H_∞ 算法获得反馈控制器.所得控制器具有良好性能并不会扭曲期望的频率特性,从而使闭环系统的性能得以保证.这种 H_∞ 控制算法计算简单,只需求解两个 Raccati 方程就能得到控制器.

2.1 H_∞ 环路成形设计步骤(H_∞ loop shaping design step)

这种设计方法分为三步^[4].

1) 回路成形.

通过选取适当预补偿器 W_1 和 / 或后补偿器 W_2 ,将标称受控对象的奇异值成形为期望的环路形状.标称对象和成形函数 W_1, W_2 合并成为成形后受控对象 $G_s = W_2 G W_1$.

2) 鲁棒镇定.

定义 1 对于标称对象 $G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$,如果存在互质因子 M 和 N 属于 H_∞ 空间,使得 $G = M^{-1}N$ 并且 $MM' + NN' = I$,则称 M 和 N 为的规范左互质因子分解.

计算最大稳定裕量 $\epsilon_{\max}$ 为

$$\epsilon_{\max} = \left(\inf_{K \text{ 镇定}} \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + G_s K)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \right)^{-1} = \sqrt{1 - \| [N \ M] \|_H^2} < 1. \quad (1)$$

$\epsilon_{\max}$ 是一个设计指标, $0.2 < \epsilon_{\max} < 0.5$ 说明经第二步 H_∞ 综合后,第一步所得的开环奇异值形状变化不大,从而 H_∞ 设计方法可以保证闭环系统的频域及时域性能.如果 $\epsilon_{\max}$ 不满足上述条件,则需返回(1),并且调整 W_1 和 W_2 .选择 $\epsilon < \epsilon_{\max}$,设计镇定控制器使得

$$\left\| \begin{bmatrix} I \\ K_\infty \end{bmatrix} (I + G_s K_\infty)^{-1} M^{-1} \right\|_\infty \geq \epsilon^{-1}. \quad (2)$$

3) 组合 H_∞ 控制器 K_∞ 和成形函数 W_1 和 W_2 ,构成最终的反馈控制器 K

$$K = W_1 K_\infty W_2. \quad (3)$$

2.2 权函数的选择(Method of choosing weight function)

环路成形权函数的选取通常用试凑的方法,这依赖于设计者的经验.实际上,权函数的选取可转化为复杂的有约束的优化问题,用优化的方法来求解.而遗传算法可较为有效地求解复杂的函数优化问题.因此,作者在 H_∞ 控制器的设计中,利用遗传算法(GA)把权函数 W_1 和 W_2 作为设计的指标^[2,3],对环路成形权函数进行优化,得到满足频域和时域性能指标的最优解.目标函数的具体描述参见文献[2,3].

2.3 K_∞ 的求取 (Calculate K_∞)

本文中仅给出 K_∞ 的求解公式,具体证明参见文献[5].

$K_\infty =$

$$\begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2(L^T)^{-1}ZC^T(C + DF) & \gamma^2(L^T)^{-1}ZC^T \\ B^TX & -D^T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

上式中

$$F = -S^{-1}(D^TC + B^TX), \quad (5)$$

$$L = (1 - \gamma^2)I + XZ. \quad (6)$$

其中 $X \geq 0, Z \geq 0$ 是如下 Riccati 方程的稳定解:

$$(A - BS^{-1}D^TC)^TX + X(A - BS^{-1}D^TC) - XBS^{-1}B^TX + C^TR^{-1}C = 0, \quad (7)$$

$$(A - BS^{-1}D^TC)Z + Z(A - BS^{-1}D^TC) - ZC^TR^{-1}CZ + BS^{-1}B^T = 0. \quad (8)$$

上式中

$$R = I + DD^T, S = I + D^TD. \quad (9)$$

3 自适应神经网络推理系统 (ANFIS)

ANFIS 由前件和后件构成,以两输入、单输出的系统为例,其规则可表示为如下形式:

If x is A_1 and y is B_1 then $z_1 = p_1x + q_1y + r_1$;

If x is A_2 and y is B_2 then $z_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

假设输入变量采用三角形隶属度函数,分别用 $t_{xi}(x, a_i, b_i)$ 和 $t_{yi}(y, c_i, d_i)$ 表示 ($i = 1, 2$).

ANFIS 结构可以分为 5 层.

第 1 层:计算输入的模糊隶属度

$$\begin{cases} O_{1i} = t_{xi}(x, a_i, b_i), \\ O_{1j} = t_{y,j-2}(x, c_{j-2}, d_{j-2}), i = 1, 2, j = 3, 4. \end{cases} \quad (10)$$

其中 O_{1i} 表示第一层上的第 i 个输出.

第 2 层:计算每条规则的适用度.

$$\begin{cases} O_{21} = O_{11} \times O_{13} = t_{x1}(x, a_1, b_1) \times t_{y1}(y, c_1, d_1), \\ O_{22} = O_{12} \times O_{14} = t_{x2}(x, a_2, b_2) \times t_{y2}(y, c_2, d_2). \end{cases} \quad (11)$$

记 $W_1 = O_{21}, W_2 = O_{22}$.

第 3 层:计算适用度的归一化值.

$$O_{31} = \frac{W_1}{W_1 + W_2}, O_{32} = \frac{W_2}{W_1 + W_2}. \quad (12)$$

记 $\bar{W}_1 = O_{31}, \bar{W}_2 = O_{32}$.

第 4 层:计算每条规则的输出.

$$z_i = p_ix + q_iy + r_i, i = 1, 2. \quad (13)$$

第 5 层:计算模糊系统的输出.

$$z = \bar{W}_1z_1 + \bar{W}_2z_2. \quad (14)$$

在复合式的学习过程中,假设各学习分量的模糊分割数是预先确定的,那么要学习的参数主要是后件网络的参数 p_i, q_i, r_i , 以及前件网络第二层各节点隶属函数的各参数. p_i, q_i, r_i 可由最小二乘参数估计法求得,而前件网络的隶属函数的各参数可通过误差反传算法与一阶梯度寻优算法来调节.在改变这些参数的过程中,对应 A_i 与 B_i 的适当隶属函数也就确定了. ANFIS 是一种模糊神经网络,因而也是局部逼近网络,它是按照模糊系统的模型建立的.因此网络中的各节点及所有参数均有较明显的物理意义,参数的初值可以根据系统的模糊或定性的知识来加以确定,然后利用上述寻优算法进行并较快收敛,同时由于它又具有神经网络结构,因而参数的学习与调整比较容易.

4 倒立摆控制 (Application to the control of inverted pendulum system)

倒立摆的受力分析,模型建立及角度的线性化处理参见文献[6~9].对《基准设计问题补充说明》中提出的倒立摆模型在 $\varphi = 0$ 处线性化模型的系统矩阵如下:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0742 & -0.5947 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.2227 & 31.1840 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = [0 \quad 0.7423 \quad 0 \quad -2.2268]^T.$$

状态向量为 $[x \quad \dot{x} \quad \varphi \quad \dot{\varphi}]^T$.

运用第 1 节所叙方法,由 GA 寻优求得 W_1 和 W_2 为

$$W_1 = \frac{166.7246}{s + 142.3891},$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} 87.4147 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 56.5154 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 292.4564 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 38.7351 \end{bmatrix}.$$

由公式(1),(4)~(9)求得的 $\epsilon_{\max} = 0.3063$. 对应控制器参数如下:

$A_k =$

$$\begin{bmatrix} -142.3891 & -72.9097 & -7.7754 & -64.7434 & 288.3131 \\ 0 & 1.8131 & -9.9977 & 15.5863 & -15.2067 \\ 0 & 1.8902 & -8.4477 & 9.7113 & -15.0146 \\ 0 & -1.8744 & 5.5565 & -11.1091 & 31.3208 \\ 0 & 11.8412 & -21.8969 & 65.1982 & -309.4917 \end{bmatrix},$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 797.6 & -81.5 & 8489.6 & 1522.4 \\ -627.7 & -376.1 & -5274.5 & -462.2 \\ -121.2 & -61.9 & -2743.7 & -285.8 \\ 98.5 & -28.3 & 1034.0 & 169.6 \\ -383.4 & 68.9 & -4075.8 & -775.1 \end{bmatrix},$$

$$C_k = [10.4203 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$D_k = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

运用此控制器,在位移给定值处加入激励信号,如图1所示.

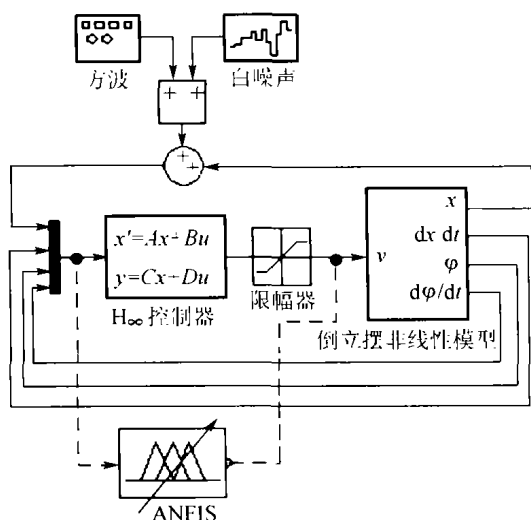


图1 ANFIS训练系统

Fig. 1 ANFIS train system

由于激励信号的选择适当与否直接关系到 ANFIS 训练的成败,激励信号必须满足如下条件:

- 1) 激励信号应该能保证倒立摆与垂直方向的夹角始终保持在比较小的范围内;
- 2) 要保证控制器输出大部分时间在给定幅度之间,并且分布较均匀;
- 3) 要保证状态量具有大部分可能的变化组合,且变化频率不能太小;
- 4) 激励信号、各状态和输出的均值约等于0.

经过多次仿真试验,最后确定给定值信号由幅度为 0.3 m,周期为 10 s 的方波信号与强度为 0.0001,采样时间为 0.1 s 的白噪声信号的叠加所组成.训练数据为在此信号激励下, H_∞ 控制器输入和输出数据.仿真时间为 40 s,采样时间为 0.01 s.

另外,ANFIS 结构的选择也决定了训练的精度.通过多次仿真试验发现,对输入 x 划分为 3 个模糊子集 $\{N, Z, P\}$,其他输入划分为 2 个模糊子集 $\{N, P\}$.输入的隶属度函数都采用三角型隶属度函数,输出函数选用单点类型.这样的 ANFIS 结构下,训练后 ANFIS 能很好的逼近原 H_∞ 控制器,且结构比较简单.

经过 20 代训练后,训练数据的均方误差为 0.6276.训练后的各输入的隶属度函数的具体参数和具体模糊规则见附录.需要说明的是,训练时选择三角型隶属度函数是为了加快训练速度和提高训练精度.实际运用时应更改为相应的梯形隶属度函数,这样更加符合逻辑,也具有更好的鲁棒性.另外,由于倒立摆系统的对称性,隶属度函数曲线应该关于原点对称的,可以对隶属度函数参数做相应调整.

对于文献[6]给出的初始条件、脉冲扰动和位移指令下倒立摆系统的角度变化响应和位置变化响应如图2和图3所示.其中 $H_\infty C$ 表示采用 H_∞ 控制器,而 FC 表示采用模糊控制器.脉冲宽度为 0.02 s.图4为 H_∞ 控制器与模糊控制器输出对比曲线.

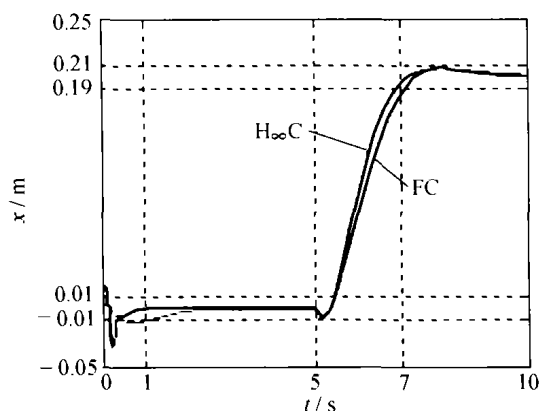


图2 小车位置变化响应

Fig. 2 Response of cart position

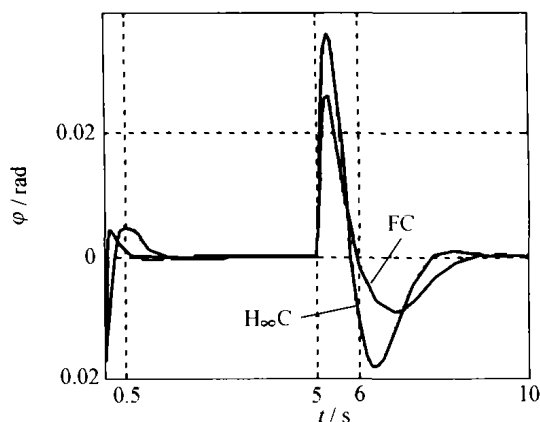


图3 摆角变化响应

Fig. 3 Response of pendulum

为了验证所得控制器的鲁棒性,将摆质心距节点的距离 L 由 0.25 m 变为 0.5 m,小车的摩擦系数 b 由 $0.1 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 变为 $0.475 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$.并考虑节点的摩擦系数 C ,取 $C = 0.03 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$.图5和图6给出了角度和位置响应曲线,可以看出该控制器具有较强的鲁棒性.由图2~6可见,采用 ANFIS 训练所得模糊控制器除了在调节时间这一项动态性

能指标上不如原 H_∞ 控制器,其他性能指标,如超调量、鲁棒性、稳态误差等并不比原 H_∞ 控制器差.而且,模糊控制器输出平滑,波动次数较少,若考虑实际执行器的响应速度和使用寿命,这样的输出更合理.另外,由表1的ISE值可看出,模糊控制器比原 H_∞ 控制器更有效地抑制了过渡过程中摆角度的大误差.这就说明了本文中提出的方案有效可行.出现这样结果的原因有以下两个方面.

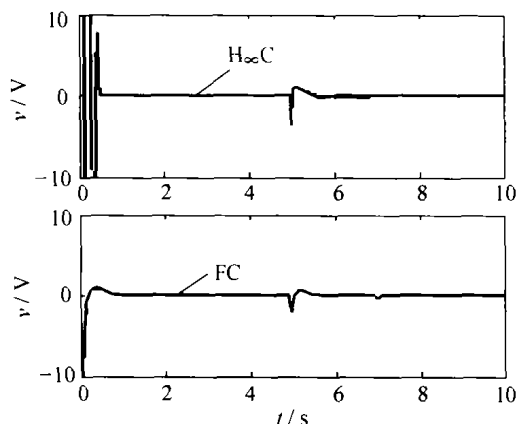


图4 控制器输出对比

Fig. 4 Outputs of the two controllers

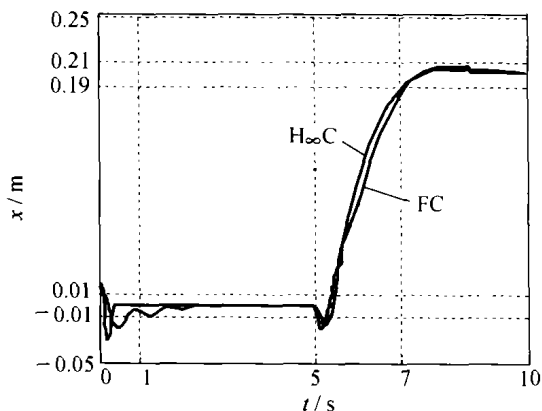


图5 模型参数改变后小车位置变化响应

Fig. 5 Response of cart position of perturbation model

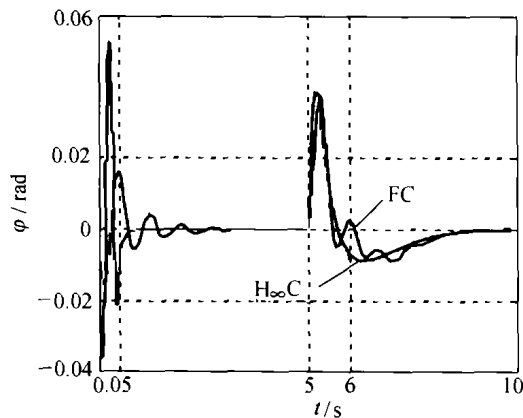


图6 模型参数改变后摆角度变化响应

Fig. 6 Response of pendulum angle of perturbation model

1) ANFIS 训练时就考虑模糊控制器输出的幅度.

2) ANFIS 采用单点输出,通过训练,相当于忽略了原 H_∞ 的高阶响应特性.而正是这些高阶特性引起控制器输出波动较大.

表1 平方误差积分(ISE)

Table 1 Integral square error(ISE)

模型	控制器	评价值 1	评价值 2
标称模型	$H_\infty C$	7.6426×10^{-4}	0.0332
	FC	2.3944×10^{-4}	0.0374
摄动模型	$H_\infty C$	2.3944×10^{-4}	0.0324
	FC	1.1057×10^{-4}	0.0362

注:“评价值 1”为 $\int_0^6 \varphi^2(\tau) d\tau$;“评价值 2”为 $\int_0^{10} \{\varphi^2(\tau) + (x(\tau) - x_d)^2\} d\tau$. 详见文献[6].

5 结论(Conclusion)

提出了一种综合运用 H_∞ LSDP 与 ANFIS 设计模糊控制器的方法.这种方法避免了高阶 H_∞ 控制器不易实现,参数物理意义不明确和不便于现场调整的缺点,同时也避免了模糊控制器设计时隶属度函数参数选取粗糙,模糊规则提取较困难的缺点,是一种既能满足给定鲁棒性能指标,又便于工程应用的模糊控制器设计方法.

参考文献(References):

- [1] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
(SHEN Tielong. *The Elementary of Robot Robust Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [2] 郑紫微, 王兴成, 贾欣乐. 一种 GA 和 H_∞ 混合优化控制器的设计方法[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(2): 85-89.
(ZHENG Ziwei, WANG Xingcheng, JIA Xinle. A controller designing method optimized by GA and H_∞ [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1999, 25(2): 85-89.)
- [3] 王兴成, 郑紫微, 贾欣乐. 基于 GA 和 H_∞ 混合优化的船舶航向控制器设计新方法[J]. 控制与决策, 1999, 14(suppl): 526-530.
(WANG Xingcheng, ZHENG Ziwei, JIA Xinle. GA and H_∞ based mixed optimization approach for ship course keeping controller design [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(suppl): 526-530.)
- [4] DUNCAN McFarlane, KEITH Glover. A loop shaping design procedure using H_∞ synthesis [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(6): 759-769.
- [5] 谭文, 刘吉臻. 典型工业过程的 H_∞ 控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 682-686.
(TAN Wen, LIU Jizhen. H_∞ control for typical industrial processes [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 682-686.)
- [6] 申铁龙, 梅生伟, 王宏, 等. 鲁棒控制基准设计问题: 倒立摆控制

- [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 974 - 975.
- (SHEN Tielong, MEI Shengwei, WANG Hong, et al. Reference design problem of robust control: inverted pendulum control [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 974 - 975.)
- [7] 申铁龙, 梅生伟, 王宏, 等. 基准设计问题补充说明: 实验条件 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 976 - 976.
- (SHEN Tielong, MEI Shengwei, WANG Hong, et al. Additional remarks of reference design problem: experiment condition [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 976 - 976.)
- [8] 黄丹, 周少武, 吴新开, 等. 基于 LQR 最优调节器的倒立摆系统 [J]. 微计算机信息, 2004, 20(2): 37 - 39.
- (HUANG Dan, ZHOU Shaowu, WU Xinkai, et al. An inverted pendulum based on the LQR optimal regulator [J]. *Pico-Computer Information*, 2004, 20(2): 37 - 39.)
- [9] 宋君烈, 肖军, 徐心和. 倒立摆系统的 Lagrange 方程建模与模糊控制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2002, 23(4): 333 - 337.
- (SONG Junjie, XIAO Jun, XU Xinhe. Modeling and control method of the inverted pendulum system [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2002, 23(4): 333 - 337.)

附录 (Appendix)

各输入隶属度函数参数如下 (三个参数从左到右分别为三角型隶属度函数的左顶点、中间点和右顶点):

输入 φ :

$N: [-0.3026 \ -0.1261 \ 0.1144], P: [-0.101 \ 0.0946 \ 0.299];$

输入 $d\varphi/dt$:

$N: [-2.746 \ -0.8789 \ 0.9815], P: [-0.8843 \ 0.9852 \ 2.847];$

输入 x :

$N: [-1.344 \ -0.6671 \ 0.05208], Z: [-0.6719 \ -0.00205 \ 0.6897],$

$P: [-0.04441 \ 0.6688 \ 1.353];$

输入 dx/dt :

$N: [-1.647 \ -0.5508 \ 0.5534], P: [-0.5424 \ 0.5507 \ 1.652].$

模糊规则如下:

- 1) If φ is N & ω is N & x is N & v is N then u is 41.51,
- 2) If φ is N & ω is N & x is N & v is P then u is -23.22,
- 3) If φ is N & ω is N & x is Z & v is N then u is -54.64,

- 4) If φ is N & ω is N & x is Z & v is P then u is -3.06,
- 5) If φ is N & ω is N & x is P & v is N then u is 4.398,
- 6) If φ is N & ω is N & x is P & v is P then u is -37.32,
- 7) If φ is N & ω is P & x is N & v is N then u is -86.25,
- 8) If φ is N & ω is P & x is N & v is P then u is 0.1577,
- 9) If φ is N & ω is P & x is Z & v is N then u is 17.56,
- 10) If φ is N & ω is P & x is Z & v is P then u is 2.908,
- 11) If φ is N & ω is P & x is Z & v is N then u is -10.64,
- 12) If φ is N & ω is P & x is P & v is P then u is 47.05,
- 13) If φ is P & ω is N & x is N & v is N then u is -40.91,
- 14) If φ is P & ω is N & x is N & v is P then u is 15.26,
- 15) If φ is P & ω is N & x is Z & v is N then u is 0.9271,
- 16) If φ is P & ω is N & x is Z & v is P then u is -10.1,
- 17) If φ is P & ω is N & x is P & v is N then u is 19.47,
- 18) If φ is P & ω is N & x is P & v is P then u is 59.2,
- 19) If φ is P & ω is P & x is N & v is N then u is 48.85,
- 20) If φ is P & ω is P & x is N & v is P then u is -12.11,
- 21) If φ is P & ω is P & x is Z & v is N then u is 0.5456,
- 22) If φ is P & ω is P & x is Z & v is P then u is 50.83,
- 23) If φ is P & ω is P & x is P & v is N then u is 6.952,
- 24) If φ is P & ω is P & x is P & v is P then u is -42.12.

其中, N 表示小于 0, P 表示大于 0, Z 表示等于 0, & 表示逻辑与, $\omega = d\varphi/dt$, $v = dx/dt$, u 为输出.

作者简介:

韩 璞 (1959—), 男, 华北电力大学控制科学与工程学院院长, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制理论及应用、计算机辅助工程、分散控制系统研究和计算机视觉;

周世梁 (1979—), 男, 华北电力大学自动化系博士研究生, 目前研究方向为混沌系统的鲁棒与模糊控制, E-mail: zsl0zsl@163.com;

刘玉燕 (1980—), 女, 华北电力大学自动化系硕士研究生, 研究方向为大机组智能优化控制;

王东风 (1971—), 男, 博士, 副教授, 目前主要从事预测控制、模糊控制、鲁棒控制及其在热工过程控制中的应用研究.