

文章编号: 1001-0920(2012)03-0349-06

基于权值范围设置的多模型稳定切换控制研究

周焕银^{1,2,3}, 刘开周¹, 封锡盛¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 东华理工大学
机械与电子工程学院, 江西 抚州 344000; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对线性加权多模型切换过程中权值难以确定问题, 提出了具有 Lyapunov 函数的多模型稳定切换的充分条件, 依据该充分条件可以确定加权多模型的权值范围和快速获取加权因子的取值, 实现多模型的平滑切换. 所提出的充分条件克服了多模型子系统必须稳定的苛刻条件, 通过对自主水下机器人多运动模型切换过程的仿真实验表明, 依据权值范围所给定的加权因子能够保证加权多模型切换过程中的渐近稳定性.

关键词: 加权多模型; 加权因子; 平滑切换; Lyapunov 函数; 自主水下机器人

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Stability switching of multiple models based on weighting setting

ZHOU Huan-yin^{1,2,3}, LIU Kai-zhou¹, FENG Xi-sheng¹

(1. The State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Electric and Communication, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China. Correspondent: ZHOU Huan-yin, E-mail: zhouhy@sia.cn)

Abstract: This paper presents some sufficient criterions for stabile switching of weighted multiple linear systems whose control performances are considered during switched process. By these criterions, the weighting regions can be obtained quickly. Meanwhile, the value of weighting factors of every switched sub-system can be assured to make smoothly switch. All these criterions deal with the restrictive condition of vector field commute. Some control simulations on AUV (autonomous underwater vehicle) different motions control are performed by using the proposed switched control algorithm. Simulation results show that the preset weight values by presented criterions can ensure the stability of multi-model switching.

Key words: weighted multiple linear systems; weighting factor; smoothly switch; Lyapunov function; autonomous underwater vehicle

1 引言

当被控对象从一种任务状态转换为另一种任务状态, 或系统周围环境发生变化时, 常造成系统的一些参变量发生较大跳变, 导致系统控制量突变, 加权多模型控制方法在克服系统参数突变问题上具有强鲁棒性^[1-3]. 加权多模型切换的关键问题是加权因子的设定与切换过程稳定性问题, 基于权值的多模型切换已得到广泛应用^[4-5], 但快速合理地确定模型的权重和选定子模型仍是加权多模型控制问题的难点. 加权多模型控制权值的设置多采用模糊

策略分析设计^[6], 或在加权模型构建后再进行具体分析. 文献 [7] 对离散与连续系统的权值切换进行了分析探讨, 但对于权值如何构建设没有明确说明. 由于多模型稳定性与多模型子系统模型稳定性的非等价性, 多模型切换过程的稳定问题成为重要的研究课题. 多模型稳定性多利用共同 Lyapunov 函数^[8]、多 Lyapunov 函数^[9-10]、驻留时间法^[11]、Lie 代数的可解性^[12-13]等方法进行分析研究. Lie 代数法虽然能够较好地解决多模型任意切换下的稳定性问题, 但无法保证系统控制的鲁棒性; 驻留时间法要求模型转换时

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2011-04-15.

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目(YYYJ-0917); 国家重点基础研究项目(6138102008-4); 江西省教育厅科技项目(GJJ10171).

作者简介: 周焕银(1975-), 女, 讲师, 博士生, 从事基于多模型控制水下机器人运动控制方法的研究; 封锡盛(1942-), 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 从事水下机器人开发等研究.

间足够长;多 Lyapunov 函数是共同 Lyapunov 法的延伸,降低了共同 Lyapunov 法的保守性,但所选取的类 Lyapunov 函数需满足右端单调递减性,或增加有界;共同 Lyapunov 函数法保守性主要体现在多模型各子系统必须为渐近稳定系统,且子系统矩阵具有可交换性或为可交换向量场。

本文通过对线性加权多模型系统矩阵的分析指出,只要模型转换前后有一模型为稳定模型,则总有相应的权值范围保证加权多模型切换过程中各子系统具有渐近稳定性,从而克服了共同 Lyapunov 函数法的保守性要求。根据切换前后的模型特点,提出 5 条推论以确定加权多模型的权值范围。最后通过对自主水下机器人(AUV)不同运动模型的仿真验证了由这些充分条件所确定的权值能够保证加权多模型切换过程的渐近稳定性以及系统良好的动态性能。

2 多模型切换过程中权值范围设置

根据线性系统稳定的相关理论提出了 5 条确定加权多模型平滑切换的权值范围设置的推论。

2.1 权值与对角占优阵

推论 1 切换系统为

$$\dot{x}(t) = H_\delta x(t), \delta \in \{1, 2\}. \quad (1)$$

设系统切换过程中权值为 ω_1 和 ω_2 , 且 $0 \leq \forall \{\omega_1, \omega_2\} \leq 1$, 加权多模型系统矩阵 H_1^2 描述为

$$H_1^2 = \omega_1 H_1 + \omega_2 H_2. \quad (2)$$

式(2)为对角占优矩阵(行对角占优或列对角占优),若 H_1^2 矩阵的对角元素都为负值,则加权模型稳定。

证明 以行对角占优为例进行证明分析。设

$$H_1 = \{h_{1ij}\} \in R^{n \times n}, H_2 = \{h_{2ij}\} \in R^{n \times n},$$

则 $H_1^2 = \omega_1 H_1 + \omega_2 H_2$ 各元素可以描述为

$$h_{1ij}^2 = \omega_1 h_{1ij} + \omega_2 h_{2ij}, i, j = 1, 2, \dots, n.$$

根据圆盘定理进行分析,盖尔圆系列为

$$C_i : |c_i - h_{1ii}^2| \leq R_i, i = 1, 2, \dots, n.$$

其中

$$R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n |\omega_1 h_{1ij} + \omega_2 h_{2ij}|, j = 1, 2, \dots, n.$$

由于 H_1^2 系统为行对角占优,有

$$|h_{1ii}^2| > \sum_{j=1, j \neq i}^n |\omega_1 h_{1ij} + \omega_2 h_{2ij}|.$$

又因为 $h_{1ii}^2 < 0$, 故 H_1^2 的所有盖尔圆系 $G = \bigcup_{i=1}^n (C_i)$ 均在复平面的左半平面。由 $\lambda_i \in G$, 有 $\text{Re}(\lambda_i) < 0$, 因此加权多模型系统稳定。□

2.2 加权多模型权值范围设置

通过 Rayleigh 商定义与定理引申出实现加权多

模型平滑切换的充分条件,并设置对应的权值范围。定义

$$R(X) = \frac{X^H A X}{X^H X} (\forall X (\neq 0) \in C^m)$$

为 A 的 Rayleigh 商。

定理 1 设 A 为 Hermite 阵,最大特征值为 λ_1 ,最小特征值为 λ_n ,则对于一切非零向量 X 有

$$\lambda_n \leq R(X) \leq \lambda_1,$$

$$\lambda_1 = \max(R(X)), \lambda_n = \min(R(X)).$$

证明过程见文献[14],此略。

设保证系统稳定的鲁棒因子为 $0 < \xi_+ < 1$, H_i 和 H_{i+1} 为稳定矩阵, H_{i+1} 为切换过程子系统矩阵,其稳定性未知。

推论 2 设加权多模型子系统的系统矩阵为 H_i 和 H_{i+1} , 切换顺序为 $H_i \rightarrow H_{i+1}$, H_i 为 Hurwitz 矩阵,即切换前的子系统为稳定系统,满足 $H_i^T p_i + p_i H_i = -Q_i$, Q_i 为正实对称阵,并有 $H_{i+1}^T p_i + p_i H_{i+1} = Q_{i+1}$ 。若满足如下条件:

$$\begin{cases} \omega_i/\omega_i \geq 0, \lambda_{\max}(Q_{i+1}) < 0; \\ \omega_i \geq \frac{\lambda_{\max}(Q_{i+1})}{(1-\xi_+)\lambda_{\min}(Q_i)}, \lambda_{\max}(Q_{i+1}) > 0. \\ 0 \leq \omega_j \leq 1, j = i, i+1. \end{cases} \quad (3)$$

则加权多模型系统矩阵 $\omega_i H_i + \omega_i H_{i+1}$ 为稳定矩阵。

证明 由于 H_i 为 Hurwitz 矩阵,有 $H_i^T p_i + p_i H_i = -Q_i$, p_i, Q_i 为正定矩阵。又因为 $H_{i+1}^T p_i + p_i H_{i+1} = Q_{i+1}$, 存在 Q_{i+1} 为实对称矩阵,由定理 1 可知

$$\frac{x_i^T Q_{i+1} x_i}{x_i^T x_i} \leq \lambda_{\max}(Q_{i+1}),$$

$$\frac{x_i^T Q_i x_i}{x_i^T x_i} \geq \lambda_{\min}(Q_i), x_i (\neq 0) \in C^m.$$

设加权多模型为 $\dot{x}_i = (\omega_i H_i + \omega_i H_{i+1})x_i$, 系统在 $H_i \rightarrow H_{i+1}$ 切换过程各子系统满足 Lyapunov 函数 $v(x) = x^T p_i x/2$ 。若 $\lambda_{\max}(Q_{i+1}) < 0$, 则满足 $x^T Q_{i+1} x < 0$, $\dot{v}(x) = x^T (-\omega_i Q_i + Q_{i+1})x < 0$, 权值满足 $0 \leq \omega_j \leq 1 (j = i, i+1)$ 和 $\omega_i/\omega_i \geq 0$ 条件即可。若 $\lambda_{\max}(Q_{i+1}) > 0$ 且满足

$$\frac{\omega_i}{\omega_i} \geq \frac{\lambda_{\max}(Q_{i+1})}{(1-\xi_+)\lambda_{\min}(Q_i)},$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{v}(x) &= x^T (-\omega_i Q_i + Q_{i+1})x < \\ &x^T (-\omega_i \lambda_{\min}^i (1-\xi_+) + \omega_i \lambda_{\max}^{i+1})x < 0. \end{aligned}$$

推论 2 所设权值在 $0 \leq \omega_j \leq 1 (j = i, i+1)$ 范围内,可以保证加权多模型的稳定性,且系统在切换过程中各子系统都满足 Lyapunov 函数

$$v(x) = x^T p_i x/2. \quad \square$$

推论 3 设加权多模型子系统的系统矩阵为

H_{i+1} 与 H_{i+1} , H_{i+1} 为 Hurwitz 矩阵(即切换后的子系统为稳定系统), 且有 $H_{i+1}^T p_{i+1} + p_{i+1} H_{i+1} = -Q_{i+1}$ (Q_{i+1} 为正定阵), $H_{i+1}^T p_{i+1} + p_{i+1} H_{i+1} = Q_{i+1}$, 若权值满足如下条件:

$$\begin{cases} \omega_{i+1}/\omega_i \geq 0, \lambda_{\max}(Q_{i+1}) < 0; \\ \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} \geq \frac{\lambda_{\max}(Q_{i+1})}{\lambda_{\min}(Q_{i+1})(1-\xi_+)}, \lambda_{\max}(Q_{i+1}) > 0. \end{cases} \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, j = i, i+1. \quad (4)$$

则加权多模型系统矩阵 $\omega_i H_{i+1} + \omega_{i+1} H_{i+1}$ 为稳定矩阵.

推论3 证明过程同推论2.

推论4 设加权多模型子系统的系统矩阵分别为 H_i 与 H_{i+1} , H_i 为 Hurwitz 矩阵(即切换前的系统为稳定系统), 且有 $H_i^T p_i + p_i H_i = -Q_i$ ($Q_i > 0$ 为对角阵), $H_{i+1}^T p_i + p_i H_{i+1} = Q_i$, 若权值满足如下条件:

$$\begin{cases} \omega_i/\omega_i \geq 0, \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i) < 0; \\ \frac{\omega_i}{\omega_i} \geq \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i)}{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i)(1-\xi_+)}, \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i) > 0. \end{cases} \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, j = i, i+1. \quad (5)$$

则加权多模型系统矩阵 $\omega_i H_i + \omega_{i+1} H_{i+1}$ 为稳定矩阵.

证明 Q_i 为实对称阵, 根据相应的实对称矩阵性质可知

$$P_i Q_i P_i^T = \Lambda_i, P_i^T P_i = I(n \times n).$$

则有

$$x^T Q_i x = (P_i x)^T \Lambda_i (P_i x) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i) (P_i x)^T (P_i x).$$

又因为 $Q_i > 0$ 为对角阵, 设 Lyapunov 函数为 $v(x) = x^T p_i x/2$, 将定理1的相应条件代入 Lyapunov 函数导数得

$$\begin{aligned} \dot{v}(x) &= -\omega_i x^T Q_i x + \omega_i x^T Q_i x \\ (P_i x)^T \left(-\omega_i \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i) + \omega_i \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i) \right) (P_i x) &< 0. \end{aligned}$$

综上, 推论4 得证 \square

推论5 设加权多模型子系统的系统矩阵分别为 H_{i+1} 与 $H_{i+1} = H_{i+1} - B_{i+1} k_{i+1}$ (k_{i+1} 为状态反馈参数), H_{i+1} 为 Hurwitz 矩阵(即切换后的系统为稳定系统), 且有 $H_{i+1}^T p_{i+1} + p_{i+1} H_{i+1} = -Q_{i+1}$, ($Q_{i+1} > 0$ 为对角阵), $(B_{i+1} k_{i+1})^T p_{i+1} + p_{i+1} (B_{i+1} k_{i+1}) = Q_{BK}$, $H_{i+1}^T p_{i+1} + p_{i+1} H_{i+1} = Q_{i+1}$, 若满足如下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{BK}) < 0; \\ \omega_i < \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i)}{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{BK})(1-\xi_+)}, \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{BK}) > 0. \end{cases} \quad 0 \leq \omega_j \leq 1, j = i, i+1, \omega_i + \omega_{i+1} = 1. \quad (6)$$

则过渡系统矩阵 $\omega_i H_{i+1} + \omega_{i+1} H_{i+1}$ 为稳定矩阵.

证明 由推论5 中所设条件可知

$$\begin{aligned} H_{i+1}^T p_{i+1} + p_{i+1} H_{i+1} &= \\ (H_{i+1} - B_{i+1} k_{i+1})^T p_{i+1} + p_{i+1} (H_{i+1} - B_{i+1} k_{i+1}) &\Rightarrow \\ Q_{i+1} &= -Q_{i+1} + Q_{BK}. \end{aligned}$$

设 Lyapunov 函数为 $v(x) = x^T p_{i+1} x/2$. 由于 Q_{i+1} 为预设的正实对角阵, Q_{BK} 为实对称阵, 存在 P_{BK} 满足 $P_{BK} Q_{BK} P_{BK}^T = \Lambda_{BK}$, $P_{BK}^T P_{BK} = I(n \times n)$, 参考推论4 证明过程可知

$$\begin{aligned} \dot{v}(x) &= x^T ((\omega_i H_{i+1} + \omega_{i+1} H_{i+1})^T p_i + \\ & p_i (\omega_i H_{i+1} + \omega_{i+1} H_{i+1})) x = \\ & -\omega_{i+1} x^T Q_{i+1} x + \omega_{i+1} x^T Q_{i+1} x = \\ & -\omega_{i+1} x^T Q_{i+1} x + \omega_{i+1} x^T (-Q_{i+1} + Q_{BK}) x = \\ & -(\omega_{i+1} + \omega_{i+1}) x^T Q_{i+1} x + \omega_i x^T (Q_{BK}) x = \\ & -x^T Q_{i+1} x + \omega_i x^T (Q_{BK}) x = \\ & -(P_{BK} x)^T \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{i+1}) - \right. \\ & \left. \omega_i \sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{BK}) \right) (P_{BK} x) < 0. \quad \square \end{aligned}$$

本节通过对加权多模型切换前后子系统控制特点进行研究, 以推论的形式确定了加权多模型切换的权值范围, 并保证了加权多模型满足 Lyapunov 意义下的渐近稳定性.

3 基于权值范围设置的多模型仿真

3.1 AUV 加权多运动控制模型

AUV 加权多模型控制原理见图1. 加权 AUV 多运动模型的控制器设置为构建多个模型的控制器, 系统运行过程中, 根据任务需要切换到相应的控制器, 为了提高切换过程中良好的性能指标, 确定切换过程中加权模型的权值范围是必需的.

AUV 运动模型经过横向、纵向解耦后, 深度(纵向)控制模型为^[15]

$$\begin{aligned} \dot{d} &= -u\theta, \dot{\theta} = q, \\ (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_q q + hW\theta &= M_{ster} u^2 \delta_s. \quad (7) \end{aligned}$$

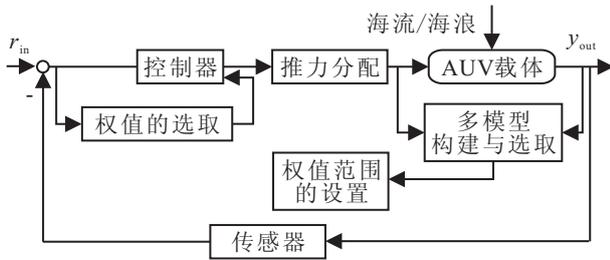


图1 加权多模型控制AUV运动控制原理

其中: d, θ, q 和 u 分别为深度、纵倾角、纵倾角速度与纵向速度; $M_{\dot{q}}, M_q, M_{ster}$ 为水动力系数; I_y 为刚体绕 y 轴转动惯量; h 为稳心高; W 为 AUV 重量; δ_s 为水平舵偏角, 同时为系统控制量。

设切换过程控制量为

$$u_{i,j} = \omega_i u_i + \omega_j u_j. \quad (8)$$

其中: u_i 与 u_j 分别为第 i, j 个模型对应的控制量, ω_i 与 ω_j 分别为第 i, j 个模型切换过程的权值。

3.2 实例分析加权多模型权值范围设置

设 $0 < \xi_+ < 0.02$, 采样时间为 0.05, 在第 1000 个采样点时, 系统深度状态 d 由下潜至 6 m 转换为下潜至 3 m. 由于环境变化, 系统中的一些水动力参数发生跳变, 深度控制模型系统矩阵由 H_1 跳变为 H_2 , 输入矩阵由 B_1 跳变为 B_2 .

设两模型切换前的系统矩阵为

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.8000 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.0120 & -0.4188 \end{bmatrix}.$$

通过状态反馈极点配置后系统矩阵为

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.8000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \\ 0.0094 & -0.1300 & -0.6500 \end{bmatrix}.$$

系统极点为 $\lambda(H_1) = [-0.1, -0.3, -0.25]$, 系统输入矩阵为 $B_1 = [0, 0, -0.0155]$; 高度变换后系统矩阵跳变为

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0800 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.0237 & -0.5581 \end{bmatrix}.$$

系统输入矩阵为 $B_2 = [0, 0, -0.0385]$.

通过状态反馈后, 系统矩阵变为

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0800 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \\ 0.0116 & -0.2000 & -0.8500 \end{bmatrix}.$$

所配置极点为 $\lambda(H_2) = [-0.1, -0.5, -0.25]$.

下面分两种切换顺序对加权多模型权值的设置进行分析:

1) 切换顺序为 $H_i \rightarrow H_{i+1} \rightarrow H_{i+1}$ 的权值分析

Step 1: ω_1 与 ω_1 的取值无法使系统 $\omega_1 H_1 + \omega_1 H_2$

转换为对角占优阵。

Step 2: 设加权多模型系统矩阵为 $\omega_1 H_1 + \omega_1 H_2$. 令 $Q_1 = I(3 \times 3)$ 为单位矩阵, 则 $\lambda(Q_1) = [1, 1, 1]$, 根据 Lyapunov 函数 $H_1^T p_1 + p_1 H_1 = -Q_1$ 解得 p_1 .

获取矩阵 $Q_2 = A_2^T p_1 + p_1 A_2$, 解得其特征值

$$\lambda(Q_2) = [-515.6946, 0.5694, 670.5275].$$

因 $\lambda_{\max}(Q_2) = 670.5275 > 0$ 且 $\sum_{\lambda=1}^3 \lambda(Q_2) = 155.4023 > 0$, 根据推论 4 得到加权因子比值为

$$\frac{\omega_1}{\omega_1} \geq \frac{155.4023}{3(1 - \xi_+)}.$$

取 $\omega_1/\omega_1 \geq 52$, 据此设置权值向量

$$\omega_1 = [0.98 \ 0.6 \ 0.1], \quad \omega_1 = [0.050, 0 \ 0.0100 \ 0.001].$$

Step 3: 加权多模型系统矩阵为 $\omega_1 H_2 + \omega_2 H_2$ 时的权值分析与设定: 根据推论 5 可知

$$\sum_{j=1}^3 \lambda_j(Q_{BK}) = 230.9875 > 0,$$

则有

$$\omega_i \in \left[0, \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_i)}{\sum_{j=1}^n \lambda_j(Q_{BK})(1 - \xi_+)} \right).$$

根据 ω_i 的范围取 $\omega_1 = [0.01 \ 0.007 \ 0.005 \ 0]$, $\omega_2 = [0.99 \ 0.993 \ 0.995 \ 1.0]$, 系统过渡模型 $\omega_1 H_2 + \omega_2 H_2$ 稳定。

系统通过 7 个过渡模型 (3 个 $\omega_1 H_1 + \omega_1 H_2$ 和 4 个 $\omega_1 H_2 + \omega_2 H_2$) 实现由模型 H_1 过渡到模型 H_2 .

2) $H_1 \rightarrow H_2$ 的切换过程

加权多模型的系统矩阵为 $\omega_1 H_1 + \omega_2 H_2$ 时的权值分析与设定: 根据 Step 2 中所获取的 p_1 , 设 $H_2^T p_1 + p_1 H_2 = Q_2$, 可得

$$\lambda(Q_2) = [-170.5399, -1.4011, 9.6714],$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i(Q_2) = -162.2696 < 0.$$

由推论 4 可得模型转换过程中两权值间的比值为 $\omega_i/\omega_i \geq 0$, 即

$$\forall \lambda(\omega_1 H_1 + \omega_2 H_2) < 0, \quad 0 \leq \omega_i \leq 1, \quad i = 1, 2.$$

设 5 个过渡模型的权值设置为

$$\omega_1 = [0.981 \ 0.7 \ 0.4 \ 0.1 \ 0],$$

$$\omega_2 = [0.02 \ 0.3 \ 0.7 \ 0.9 \ 1.0].$$

3.3 仿真曲线比较说明

本文采用 3 种切换策略对 AUV 加权多深度控制模型的切换过程进行仿真: 1) 直接切换法. 当深度控制命令发生改变且模型参数发生跳变后, 无过渡模

型直接切换到相应模型, 仿真结果如图2所示. 2) $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow H_2$ 间接切换法. 当系统深度控制命令发出时, 通过加权法设置相应的过渡模型(本文用7个过渡模型)过渡到跳变后的模型, 仿真曲线如图3所示. 3) 切换策略. 采用 $H_1 \rightarrow H_2$ 设计权值范围, 构建5个过渡模型完成切换任务, 仿真曲线如图4所示.

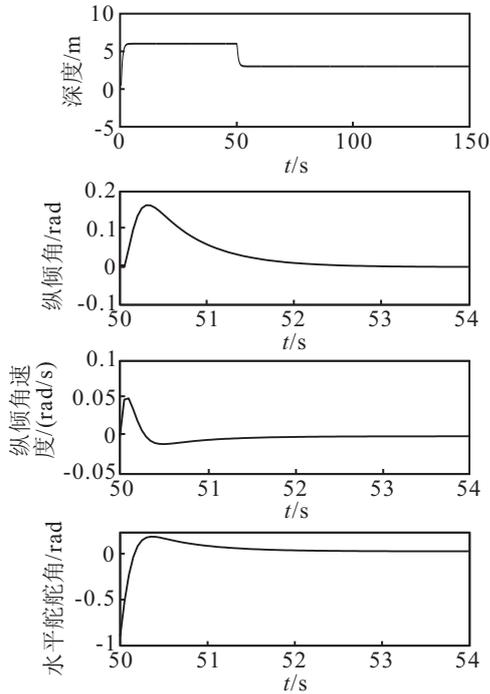


图2 直接极点控制输出曲线

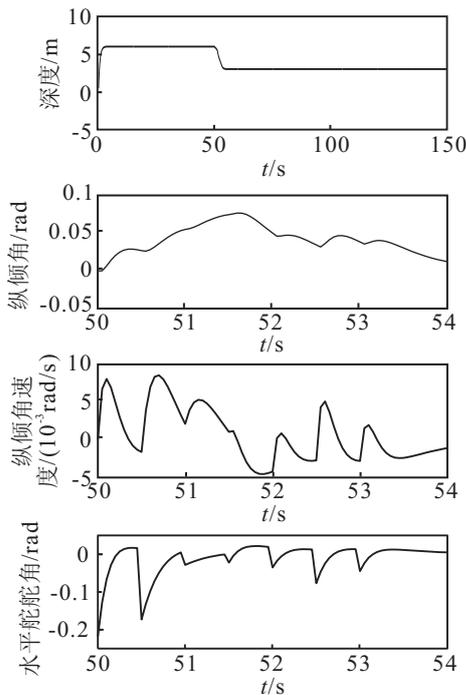


图3 7模型 $H_i \rightarrow H_{i+1} \rightarrow H_{i+1}$ 间接切换曲线

从仿真曲线可以看出, 系统切换过渡模型越多, 控制输出量与各状态变量控制曲线抖动幅度越小. 在切换过渡过程中, 图3控制量的水平舵角 δ_s 抖动角最

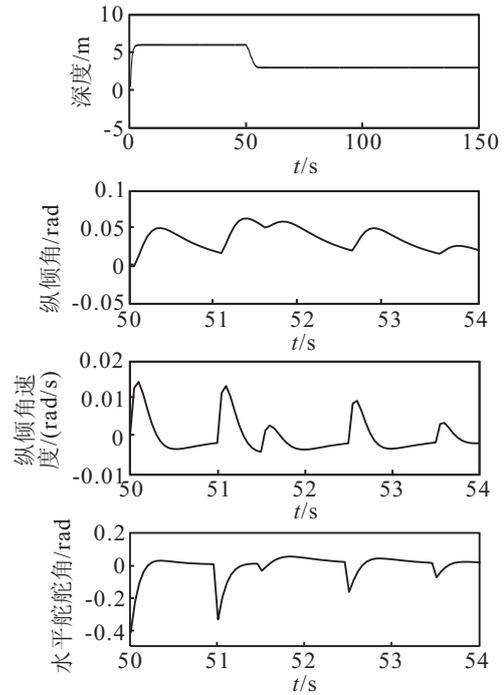


图4 5模型 $H_1 \rightarrow H_2$ 切换输出曲线

小, 其舵角最大抖动为 $\delta_s \approx 0.2 \text{ rad}$; 图4次之, 其舵角最大抖动为 $\delta_s \approx 0.4 \text{ rad}$; 图2最差, 其舵角最大需 $\delta_s \approx 0.9 \text{ rad}$.

图3和图4的深度控制变化曲线相对于图2而言曲线平滑得多. 直接切换法在切换过程中纵倾角速度的抖动幅度达到了 10° , 即 0.18 rad 左右, 而多模型控制中纵倾角速度的抖动幅度远小于此值.

图3和图4验证了权值预设范围的有效性, 在所设计的权值范围内过渡加权模型能够保证模型切换过程中的渐近稳定性. 同时图3验证了在模型切换过程中, 即使切换前后有一模型为不稳定模型也可以通过这些充分条件快速获取权值, 保证系统的渐近稳定性. 仿真结果表明, 系统各状态能够保证切换过程的渐近稳定性.

4 结论

本文给出了加权多模型切换过程中的权值范围, 保证了加权多模型加权因子的快速获取以及多模型切换过程的稳定性. 通过二次 Lyapunov 函数验证了加权多模型在所设置的权值范围内的收敛性, 并通过 AUV 加权多深度模型实例验证了即使有一切换模型不稳定同样可以获取权值, 保证加权多模型切换过程的渐近稳定性. 仿真结果表明, 切换过程所设置的加权因子个数越多即切换过程的过渡模型越多, 切换过程状态的抖动幅度越小. 但由于在分段切换过程中, 各切换子系统拥有同一 Lyapunov 函数法, 此法的局限性使得所获取的权值范围较小, 如何通过其他方法扩大所获取的权值范围是今后研究的重点.

参考文献(References)

- [1] 郑益慧, 王昕, 李少远, 等. 随机系统的多模型直接自适应解耦控制器[J]. 自动化学报, 2010, 36(9): 1295-1304. (Zheng Y H, Wang X, Li S Y, et al. Multiple models direct adaptive decoupling controller for a stochastic system[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(9): 1295-1304.)
- [2] 李晓理, 王伟. 基于不同加权因子的随机多模型自适应控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(11): 1226-1230. (LI X L, Wang W. Stochastic system multiple model adaptive control based on different weighting factors[J]. Control and Decision, 2008, 23(11): 1226-1230.)
- [3] Xie D, Wu Y. Stabilisability of switched linear systems with time-varying delay in the detection of switching signals[J]. IET Control Theory and Applications, 2009, 3(4): 404-410.
- [4] Daniel Liberzon, Stephen Morse A. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. Lecture Notes, 1999: 59-70.
- [5] Xiao Q G, Zhang M, Hu S S. Adaptive reconfiguration control for fighters based on weighted multiple-model-structure[J]. Trans of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 27(3): 219-225.
- [6] Lee D H, Park J B, Joo Y H. Improvement on nonquadratic stabilization of discrete time takagi-sugeno fuzzy systems: Multiple-parameterization approach[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2010, 18(2): 425-429.
- [7] Zhai G S, Lin H, Antsaklis P J. Quadratic stabilizability of switched linear systems with polytopic uncertainties[J]. Int J of Control, 2003, 76(7): 747-753.
- [8] Lin V, Daniel L. Common Lyapunov functions for families of commuting nonlinear systems[J]. System and Control Letters, 2005, 54(5): 405-416.
- [9] Zhao J, Hill D J. Passivity and stability of switched systems: A multiple storage function method[J]. Systems and Control Letters, 2008, 57(2): 158-164.
- [10] Wang F Y, Bahri P, Lee P L, et al. A multiple model, state feedback strategy for robust control of non-linear processes[J]. Computers and Chemical Engineering, 2007, 31(5-6): 410-418.
- [11] Lian J, Zhang K. Exponential stability for switched Cohen-Grossberg neural networks with average dwell time[J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 63(3): 331-343.
- [12] Margaliot Michael, Liberzon Daniel. Lie-algebraic stability conditions for nonlinear switched systems and differential inclusions[J]. Systems and Control Letters, 2006, 55(1): 8-16.
- [13] Zhao S W, Sun J T. A lie algebraic condition of stability for hybrid systems and application to hybrid synchronization[J]. Int J of Bifurcation and Chaos, 2009, 19(1): 379-386.
- [14] 张明淳. 工程矩阵论[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002: 103-105. (Zhang M C. Project matrix theory[M]. Nanjing: Southeast Universty Publisher, 2002: 103-105.)
- [15] 蒋新松, 封锡盛, 王棣堂. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000: 249-252. (Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000: 249-252.)

(上接第348页)

- [11] Goldberg D E, Richardson J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization[C]. Proc of the 2nd Int Conf on Genetic Algorithms. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press, 1987: 41-49.
- [12] Avriel M. Nonlinear programming, analysis and methods[M]. New York: PrenticeHall Co.Inc, 1976: 253-258.