

文章编号: 1001-0920(2007)01-0035-04

## 具有松弛条件的一类切换模糊系统的稳定性分析

杨红<sup>1,2</sup>, 赵军<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳大学 信息工程学院, 沈阳 110044)

**摘要:** 使用切换技术以及多 Lyapunov 函数方法, 研究一类切换模糊系统的稳定性问题. 给出了有连续控制输入时该切换模糊系统的一种松弛稳定性条件, 避免了并行分配补偿法中因模糊规则数较多而求解公共矩阵  $P$  的困难, 同时给出了实现系统全局渐近稳定的切换策略. 主要条件以 LMI 的形式给出, 具有较强的可解性. 空气调节系统的设计实例表明了所提出设计方法的可行性和有效性.

**关键词:** 切换模糊系统; 全局模型; 多 Lyapunov 函数; 切换律; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Stability analysis of a class of switched fuzzy systems having slack conditions

YANG Hong<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China. Correspondent: YANG Hong, E-mail: cherryyh@126.com)

**Abstract:** The stability problem of a class of switched fuzzy systems is studied using switching technique and multiple Lyapunov functions. Slack stabilizability conditions and a switching strategy achieving global asymptotic stability of the switched fuzzy system with continuous controlled input are developed. The proposed method overcomes the difficulty of solving a common matrix  $P$  by parallel distributed compensation (PDC) with a large number of fuzzy rules. The main condition is given in form of LMI which are more solvable. The design of air regulating system shows the feasibility and the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Switched fuzzy system; Global model; Multiple Lyapunov functions; Switching law; Stability

### 1 引言

近年来, 有关切换系统稳定性的研究已经取得了许多成果<sup>[1]</sup>. 如保证任意切换下系统渐近稳定的共同的 Lyapunov 函数<sup>[2]</sup>, 多 Lyapunov 函数技术<sup>[3,4]</sup>, 以及切换系统的分段二次 Lyapunov 函数的计算<sup>[5]</sup>等. 同时, 模糊逻辑控制已被视为研究复杂控制系统的较为方便的控制技术之一. T-S 模糊模型的提出<sup>[6]</sup>, 也越来越受到人们的重视. 文献[7]给出了在 Lyapunov 稳定性意义下系统稳定的充分条件; 文献[8]将整个状态空间划分为  $m$  个子空间, 将非线性时变系统稳定性问题转化为线性时不变系统的鲁棒控制问题.

如果切换系统的子系统为模糊系统, 则称为切

换模糊系统. 与切换系统以及模糊控制系统的研究成果相比, 关于切换模糊系统的研究成果却少有报道. 文献[9]将混杂系统与模糊多模型系统相结合, 提出一种模糊切换混杂系统的思想. 文献[10,11]则描述了一类由两级模糊规则组成的模糊切换系统模型, 系统根据第 1 级规则中的前件变量在第 2 级模型之间进行切换, 实际上是对同一个前件变量进行切换.

本文提出一类新的切换模糊系统, 其切换系统中的每个子系统都是模糊模型, 即子模糊系统. 这类切换模糊系统并没有分为两级结构, 而是在每个子模糊系统之间进行切换, 实际上是进行一种不同前件变量的切换. 本文首先给出切换模糊系统模型; 然

收稿日期: 2006-02-10; 修回日期: 2006-04-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574013, 60274009).

作者简介: 杨红(1978—), 女, 沈阳人, 讲师, 博士生, 从事切换系统、混杂系统等研究; 赵军(1957—), 男, 辽宁海城人, 教授, 博士生导师, 从事混杂系统、非线性控制和鲁棒控制等研究.

后采用多 Lyapunov 函数研究其稳定性条件,给出一种基于 LMI 的松弛判定条件,并设计出实现系统全局渐近稳定的切换策略.这种方法避免了因模糊规则数较多而带来的求解公共矩阵  $P$  的困难,扩大了它的应用范围.

### 2 问题描述

考虑由以下  $N$  条规则构成的切换模糊系统,即切换系统中的每个子系统为 T-S 模糊系统:

$$R^l: \text{If } x \text{ is } M^l_1 \dots \text{and } u \text{ is } M^l_p, \\ \text{Then } \dot{x}(t) = A_l x(t) + B_l u(t), \\ l = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

其中:分段常值函数  $\mu(x(t)): [0, +\infty) \rightarrow \{1, 2, \dots, m\}$  是一个切换信号;  $M^l_1, \dots, M^l_p$  代表第  $l$  个切换子系统内的模糊集;  $R^l$  代表第  $l$  个切换子系统内的第  $l$  条模糊规则;  $N$  为第  $l$  个切换子系统内的模糊规则数,模糊规则的选取是在每个切换子系统内进行的,每个切换子系统之间的隶属度函数相互独立;  $u(t)$  表示第  $i$  个子系统的输入量;  $x(t)$  为状态变量;  $A_l \in R^{n \times n}$  及  $B_l \in R^{n \times p}$  为第  $i$  个子系统中的常数矩阵;  $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p]$  为前件变量.

可以得到第  $i$  个切换子系统的全局模型为

$$\dot{x}(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) (A_{il} x(t) + B_{il} u_i(t)), \\ i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

其中

$$\sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) = 1, 0 \leq \mu_l(t) \leq 1. \quad (3)$$

且有

$$w_{il}(t) = \prod_{j=1}^p M^l_j(x_j(t)), \\ \mu_i(t) = w_{il}(t) / \sum_{l=1}^{N_i} w_{il}(t),$$

式中  $M^l_j(x_j(t))$  表示第  $i$  个子系统中  $x_j(t)$  属于模糊集  $M^l_j$  的隶属度.

对于每个子系统,采用常用的 PDC 模糊控制器

$$u_i(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) K_{il} x(t), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

可以得到

$$\dot{x}(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) \sum_{r=1}^{N_i} \mu_r(t) (A_{il} + B_{il} K_{ir}) x(t). \quad (4)$$

### 3 主要结果

对于系统(4),假设满足如下 2 个条件:

- 1) 控制器  $u_i(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) K_{il} x(t)$ , 其中  $K_{il}$  为待定的状态反馈增益;
- 2) 函数满足  $\mu_l(t) \leq \vartheta_{il}$ , 这里  $\vartheta_{il}$  为常数.

为证明简洁并不失一般性,假设  $m = 2$ . 作者利用多 Lyapunov 函数方法给出切换律  $\mu: [0, +\infty) \rightarrow \{1, 2\}$  的设计方案.

**定理 1** 假设存在 2 个非负或非正实数  $\alpha_1, \alpha_2$  和适当维数矩阵  $P_{12}, P_{13}, P_{22}, P_{23}$ , 以及 2 个正定对称阵  $P_{11j_1}, P_{21j_2}$ , 且有  $P_{11j_1} - P_{21j_2}$  同号, 使得下面 2 个 LMI 成立, 则存在切换函数  $\mu = (x(t)): [0, +\infty) \rightarrow \{1, 2\}$ , 使系统(1) 渐近稳定.

$$\begin{bmatrix} (A_{1j_1} + B_{1j_1} K_{1v_1})^T P_{13} + \\ P_{13}^T (A_{1j_1} + B_{1j_1} K_{1v_1}) + \\ P_{11j_1} - P_{12} \end{bmatrix} < 0, \\ j_1, j_2, v_1 = 1, 2, \dots, N_i; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} (A_{2j_2} + B_{2j_2} K_{2v_2})^T P_{23} + \\ P_{23}^T (A_{2j_2} + B_{2j_2} K_{2v_2}) + \\ P_{21j_2} - P_{22} \end{bmatrix} < 0, \\ j_1, j_2, v_2 = 1, 2, \dots, N_i. \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} & 1_{1j_1} = (A_{1j_1} + B_{1j_1} K_{1v_1})^T P_{12} + P_{12} (A_{1j_1} + \\ & B_{1j_1} K_{1v_1}) + \vartheta_{1j_1} (P_{11j_1} - P_{21j_2}), \\ & 2_{2j_2} = (A_{2j_2} + B_{2j_2} K_{2v_2})^T P_{22} + P_{22} (A_{2j_2} + \\ & B_{2j_2} K_{2v_2}) + \vartheta_{2j_2} (P_{21j_2} - P_{11j_1}). \end{aligned}$$

**证明** 考虑系统(4), 有

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) \sum_{r=1}^{N_i} \mu_r(t) \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{il} + B_{il} K_{ir} & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

这里  $y = \dot{x}$ . 为简单起见, 定义

$$\bar{A}_{ilr} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_{il} + B_{il} K_{ir} & -I \end{bmatrix}, \\ E = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{x}(t) = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

则系统(4) 可写成  $\dot{E}\bar{x}(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) \sum_{r=1}^{N_i} \mu_r(t) \bar{A}_{ilr} \bar{x}(t)$ . 令

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{i1} & 0 \\ P_{i2} & P_{i3} \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) \begin{bmatrix} P_{il1} & 0 \\ P_{il2} & P_{il3} \end{bmatrix}, \quad P_{il1} > 0.$$

取 Lyapunov 函数

$$V_i(t) = \bar{x}^T(t) E P_i \bar{x}(t) = \sum_{l=1}^{N_i} \mu_l(t) P_{il} x(t). \quad (8)$$

不失一般性, 假设  $\delta_{1, 2} = 0$ , 由文献 [12] 的 S-Procedure 知, 式(5) 和(6) 同时成立, 可得以下结论:

如果  $x(t)^T (P_{11j_1} - P_{21j_2}) x(t) = 0$  且  $\dot{x}(t) = 0$ , 则有

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta}_{1, v_1 j_1} & P_{11j_1} - P_{12}^T + \\ & (A_{1, 1} + B_{1, 1} K_{1v_1})^T P_{13} \\ P_{13}^T (A_{1, 1} + B_{1, 1} K_{1v_1}) + & - P_{13} - P_{13}^T \\ P_{11j_1} - P_{12} & \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

$j_1, v_1 = 1, 2, \dots, N_i;$

如果  $x(t)^T (P_{21j_2} - P_{11j_1}) x(t) = 0$  且  $\dot{x}(t) = 0$ , 则有

$$\begin{bmatrix} \tilde{\delta}_{2, v_2 j_2} & P_{21j_2} - P_{22}^T + \\ & (A_{2, 2} + B_{2, 2} K_{2v_2})^T P_{23} \\ P_{23}^T (A_{2, 2} + B_{2, 2} K_{2v_2}) + & - P_{23} - P_{23}^T \\ P_{21j_2} - P_{22} & \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$j_2, v_2 = 1, 2, \dots, N_i.$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{\delta}_{1, v_1 j_1} &= (A_{1, 1} + B_{1, 1} K_{1v_1})^T P_{12} + P_{12} (A_{1, 1} + B_{1, 1} K_{1v_1}) + \delta_{1j_1} P_{11j_1}, \\ \tilde{\delta}_{2, v_2 j_2} &= (A_{2, 2} + B_{2, 2} K_{2v_2})^T P_{22} + P_{22} (A_{2, 2} + B_{2, 2} K_{2v_2}) + \delta_{2j_2} P_{21j_2}. \end{aligned}$$

令

$$S_1 = \{x(t) \in R^n \mid x^T(t) (P_{11j_1} - P_{21j_2}) x(t) = 0, x(t) = 0\}, \quad (11)$$

$$S_2 = \{x(t) \in R^n \mid x^T(t) (P_{21j_2} - P_{11j_1}) x(t) = 0, x(t) = 0\}, \quad (12)$$

则  $S_1 \cap S_2 = R^n \setminus \{0\}$ .

切换律为

$$u(x(t)) = \begin{cases} 1, & x(t) \in S_1; \\ 2, & x(t) \in S_2 \setminus S_1. \end{cases} \quad (13)$$

当  $x(t) \in S_1$  时, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \sum_{l=1}^{N_i} \dot{x}^T P_{11l} x + \sum_{l=1}^{N_i} \{ \dot{x}^T P_{11l} x + x^T P_{11l} \dot{x} \} \\ &= \sum_{l=1}^{N_i} \dot{x}^T (\delta_{1l} P_{11l}) x + \sum_{l=1}^{N_i} \{ \dot{x}^T P_{11l} x + x^T P_{11l} \dot{x} \} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^{N_i} [x^T \quad y^T] \begin{bmatrix} \delta_{1l} P_{11l}^T & P_{12}^T \\ 0 & P_{13}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix} + \\ & \sum_{l=1}^{N_i} \{ \dot{x}^T \quad 0 \} \cdot P_{11l} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \\ & [x^T \quad y^T] \cdot P_{11l} \cdot \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix} \} = \\ & \sum_{l=1}^{N_i} [x^T \quad y^T] \cdot \begin{bmatrix} \delta_{1l} P_{11l}^T & P_{12}^T \\ 0 & P_{13}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \\ & 2 \sum_{l=1}^{N_i} \{ [x^T \quad y^T] \cdot \begin{bmatrix} P_{11l}^T & P_{12}^T \\ 0 & P_{13}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix} \} = \\ & \sum_{l=1}^{N_i} \dot{x}^T \begin{bmatrix} \delta_{1l} P_{11l}^T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x} + \\ & 2 \sum_{l=1}^{N_i} \dot{x}^T \begin{bmatrix} P_{11l}^T & P_{12}^T \\ 0 & P_{13}^T \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ N_i & N_i \\ r=1 & h=1 \end{bmatrix} \bar{x} = \\ & \sum_{l=1}^{N_i} \sum_{r=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{N_i} \dot{x}^T \bar{x}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{bmatrix} (A_{1r} + B_{1r} K_{1h})^T P_{12} + & (A_{1r} + B_{1r} K_{1h})^T P_{13} + \\ \delta_{1l} P_{11l} + P_{12} (A_{1r} + B_{1r} K_{1h}) & P_{11l} - P_{12}^T \\ P_{13}^T (A_{1r} + B_{1r} K_{1h}) + & - P_{13} - P_{13}^T \\ P_{11l} - P_{12} & \end{bmatrix}.$$

考虑式(3) 和(9), 对于任意  $x(t) = 0$ , 有  $\dot{V}_1(x(t)) < 0$ .

同理, 当  $x(t) \in S_2 \setminus S_1$  时, 有  $\dot{V}_2(x(t)) < 0$ . 因此系统(1) 在切换律(13) 下是渐近稳定的.

注 1 定理 1 仅研究了两个模糊系统之间切换的情形. 从定理 1 的证明过程中不难看出, 定理 1 的结论完全可以推广到在有限多个模糊系统之间切换的情形.

### 4 仿真结果

为了说明本文算法, 考虑基于模糊状态方程设计的房间空气调节系统<sup>[13]</sup>

$$\ddot{T}_n = - \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{T}_n - \frac{1}{T_1 T_2} T_n + \frac{k_1 k_2}{T_1 T_2} u.$$

其中:  $T_n$  为空调房间的空气温度变化(°C),  $\dot{T}_n$  为空调房间的空气温度变化(°C/min),  $T_1$  为空调房间的时间常数(min),  $k_1$  为恒温室的放大系数(°C/°C),  $T_2$  为蒸汽加热器的时间常数(min),  $k_2$  为电动执行

器的放大系数( / ),  $u$  为控制量. 温度较低时,  $T_1 = 20.30 \text{ min}$ ,  $T_2 = 1 \text{ min}$ ; 温度较高时,  $T_1 = 30.40 \text{ min}$ ,  $T_2 = 2.5 \text{ min}$ .

为分析系统稳定性, 进行坐标变换, 令  $x_1 = T_n - 20$ ,  $\dot{x}_1 = x_2$ , 将其转化为零点稳定性分析问题. 考虑冗余电路问题, 可将一般模糊模型转化为如下切换模糊模型, 以提高空调到达预定温度的速度.

$R_1^1$ : If  $x_1$  is  $P_{11}^1$ , 接近于正数,

Then  $\dot{x}(t) = A_{11}x + B_{11}u_1$ ;

$R_1^2$ : If  $x_1$  is  $N_{11}^2$ , 接近于负数,

Then  $\dot{x}(t) = A_{12}x + B_{12}u_1$ ;

$R_2^1$ : If  $x_1$  is  $P_{21}^1$ , 接近于正数,

Then  $\dot{x}(t) = A_{21}x + B_{21}u_2$ ;

$R_2^2$ : If  $x_1$  is  $P_{21}^2$ , 接近于负数,

Then  $\dot{x}(t) = A_{22}x + B_{22}u_2$ .

其中

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -0.5 & 4 \\ -0.943 & 1.0493 \end{bmatrix}, B_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4926 \end{bmatrix};$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -0.5 & 3 \\ -0.132 & -0.4529 \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1316 \end{bmatrix};$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -0.2941 & -1.4321 \end{bmatrix}, B_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5765 \end{bmatrix};$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -0.4706 & -0.7535 \end{bmatrix}, B_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1765 \end{bmatrix}.$$

隶属函数为<sup>[13]</sup>

$$\mu_{P_{11}^1}(x_1) = \mu_{P_{21}^1}(x_1) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-2x_1}},$$

$$\mu_{N_{11}^2}(x_1) = \mu_{N_{21}^2}(x_1) = \frac{1}{1 + e^{-2x_1}}.$$

由式(5)和(6), 得系统的状态反馈增益为

$$K_{11} = [-0.131 \quad -0.1148],$$

$$K_{12} = [-0.0623 \quad -2.302],$$

$$K_{21} = [-4.4991 \quad -2.4986],$$

$$K_{22} = [-5.4991 \quad -3.4986].$$

取  $\delta_{11} = 1$ ,  $\delta_{12} = \delta_{21} = \delta_{22} = 1$ , 可求出矩阵

$$P_{111} = \begin{bmatrix} 2.8709 & 1.1097 \\ 1.1097 & 1.8407 \end{bmatrix},$$

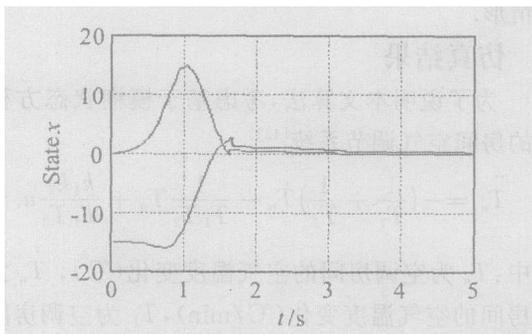


图 1 根据定理 1 得到的温度变化仿真

$$P_{112} = \begin{bmatrix} 2.1556 & 0.6542 \\ 0.6542 & 1.1225 \end{bmatrix},$$

$$P_{211} = \begin{bmatrix} 4.1346 & 2.4437 \\ 2.4437 & 2.7354 \end{bmatrix},$$

$$P_{212} = \begin{bmatrix} 2.9061 & 1.7414 \\ 1.7414 & 1.3659 \end{bmatrix}.$$

那么系统在切换律(12)下是渐近稳定的. 利用 Matlab 仿真, 对于初始点  $[-15, 0]$ , 仿真结果如图 1 所示.

## 5 结 论

本文研究了一类切换模糊系统的稳定性问题. 首先给出了切换模糊系统的概念, 将模糊系统与切换系统结合起来考虑问题, 将模糊系统作为切换系统的子系统, 设计其系统全局渐近稳定的切换律. 利用多 Lyapunov 函数, 考虑了每个子模糊系统采用 PDC 控制器时的稳定性条件, 克服了当模糊规则数较多所带来的求解公共矩阵  $P$  的困难, 缩短了系统状态响应时间, 提高了系统的性能. 最后通过仿真实例验证了所得结论的正确性.

## 参考文献(References)

- [1] Zhao J, Spong M W. Hybrid control for global stabilization of the cart-pendulum system [J]. Automatica, 2001, 37(12): 1941-1951.
- [2] Ooba T, Funahashi Y. On a common quadratic Lyapunov functions for widely distant systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(12): 1697-1699.
- [3] Branicky M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 475-482.
- [4] Branicky M S. Stability of switched and hybrid systems [C]. Proc of 33rd IEEE Conf on Decision and Control. Lake Buena: IEEE, 1994: 3498-3503.
- [5] Johansson M, Rantzer A. Computation of piecewise quadratic Lyapunov functions for hybrid systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 555-559.
- [6] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1985, SMC-15: 116-132.
- [7] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Set and Systems, 1992, 45: 135-156.
- [8] Cao S G, Rees N W, Feng G. Stability analysis and design for a class of continuous time fuzzy control systems [J]. Int J of Control, 1996, 64(6): 1069-1087.

(下转第 44 页)

MPF 具有相对稍差的估计精度,这是由于 MPF 在重抽样和正则化过程中引入了蒙特卡罗随机误差的缘故,但在较大初始姿态误差情况下,MPF 表现出了较好的收敛性,收敛速度较快.所以,当实际应用中存在较大初始姿态误差时,可以先采用 MPF 使得估计误差快速收敛,然后再切换到 EKF 或 UKF 方法进行姿态估计.

PF 算法的复杂度分析是一个比较复杂和困难的问题,有待于进一步研究.然而,单从算法的计算时间上看,EKF 耗时最少、运算最快;UKF 其次,计算时间大概是 EKF 的几倍;而 PF 的耗时最长.

### 参考文献(References)

- [1] Lefferts E J, Markley F L, Shuster M D. Kalman filtering for spacecraft attitude estimation [J]. *J of Guidance*, 1982, 5(5): 417-429.
- [2] Psiaki M L, Martel Francois, Pal P K. Three-axis attitude determination via Kalman filtering of magnetometer data [J]. *J of Guidance*, 1990, 13(3): 506-514.
- [3] Crassidis J L, Markley F L. Unscented filtering for spacecraft attitude estimation [J]. *J of Guidance and Dynamics*, 2003, 26(4): 536-542.
- [4] 西蒙 赫金. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉,等译. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 613-617. (Haykin Simon. Adaptive filter theory [M]. 4th ed. New York: Prentice Hall, 2003: 613-617.)
- [5] Wan E A, Van Der Merwe R. Kalman filtering and neural network[M]. New York: John Wiley, 2001.
- [6] Oshman Y, Carmi A. Spacecraft attitude estimation from vector observations using a fast particle filter[C]. Proc of 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conf. Hawaii: AAS, 2004.
- [7] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-gaussian Bayesian state estimation [J]. *IEE Proc on Radar and Signal Processing*, 1993, 140(2): 107-113.
- [8] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian Bayesian tracking [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2002, 50(2): 174-185.
- [9] Doucet A, De Freitas N, Gordon N. Sequential monte carlo methods in practice [C]. *Statistics for Engineering and Information Science*. New York: Springer, 2001.
- [10] Thomas Schon, Fredrik Gustafsson, Per-Johan Nordlund. Marginalized particle filters for mixed linear/nonlinear state-space models [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2279-2289.
- [11] Schaub H, Junkins J L. Stereographic orientation parameters for attitude dynamics: A generalization of the rodrigues parameters [J]. *J of the Astronautical Sciences*, 1996, 44(1): 1-20.
- [12] Simon D, Chia T L. Kalman filtering with state equality constraints [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 128-135.
- [13] Liu J S, Chen R. Sequential monte carlo methods for dynamical systems [J]. *J of American Statistical Association*, 1998, 93(5): 1032-1044.
- [14] Kitagawa G. Monte Carlo filter and smoother for non-gaussian nonlinear state space models [J]. *J of Computational and Graphical Statistics*, 1996, 5(1): 1-25.
- [9] Rainer P, Dimiter D. Fuzzy switched hybrid systems-modeling and identification [C]. Proc of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conf. Gaithersburg: IEEE, 1998:130-135.
- [10] Kazuo T, Masaaki I, Wang H O. Switching control of an R/C hovercraft: Stabilization and smooth switching [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(6): 853-863.
- [11] Hiroshi O, Kazuo T, Wang H O, Switching fuzzy control for nonlinear systems [C]. Proc of the 2003 IEEE Int Symposium on Intelligent Control. Houston: IEEE, 2003: 281-286.
- [12] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [13] 何希勤. 一类多变量模糊系统稳定性分析及其应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000. (He X Q. Stability and application of a class of multiple variables fuzzy systems [D]. Shenyang: Northeastern University, 2000.)

(上接第38页)