

参数不确定永磁同步电机混沌的模糊控制*

李 东^{1)†} 张小洪²⁾ 杨 丹²⁾ 王时龙³⁾

1) 重庆大学数理学院, 重庆 400030)

2) 重庆大学软件学院, 重庆 400030)

3) 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

(2008 年 6 月 22 日收到, 2008 年 9 月 4 日收到修改稿)

通过 Takagi-Sugen 控制技术, 建立了参数不确定永磁同步电机的 Takagi-Sugen 模糊控制模型, 然后利用矩阵分析和 Lyapunov 稳定性理论, 得到了参数不确定永磁同步电机渐进稳定的充分条件, 最后通过实例证实了结果的正确性. 相比传统的模糊控制方法, 基于 Takagi-Sugen 模型的模糊控制方法具有一定的优越性.

关键词: 混沌控制, Takagi-Sugen 模型, 模糊控制, 永磁同步电机

PACC: 0545

1. 引 言

永磁同步电动机(PMSM)具有体积小、重量轻、反应快、效率高等优点. 随着电力电子技术和控制技术的发展, 永磁同步电动机交流伺服系统已经在现代高性能伺服系统中得到了极为广泛的应用^[1,2].

永磁同步电机系统是非线性系统之一, 关于非线性系统的混沌控制得到了充分的研究^[1-23], 比如, 串级滑模变结构控制、自适应串级滑模变结构控制、 H_∞ 控制、模糊控制、脉冲控制等等. 然而相对于普通的非线性系统相比, 永磁同步电机对外部负载扰动和参数变化非常敏感, 于是关于永磁同步电机的控制技术成了永磁同步电机研究的重要内容, 但关于永磁同步电机的混沌控制的研究非常少. 文献 5 提出了永磁同步电机混沌的脉冲控制方法, 但脉冲控制不够灵活; 文献 6 提出了基于微分几何的永磁同步电机混沌控制方法, 但控制不易实现; 文献 7 提出了采用纳入轨道和强迫迁徙方法控制 PMSM 中的混沌, 该控制策略在理论上虽然有效, 但是由于它的目标轨道不允许是给定系统自身的轨道或状态, 并且需要系统轨道处于吸引域中时才能施加控制, 因而在实际系统中很难实现; 文献 8 利用状态延迟反馈研究了 PMSM 中的混沌控制, 但是该方法很难确

定控制的周期目标轨道与延迟时间的关系, 而且不容易控制到预知的轨道^[6].

需要指出的是, 由于机械磨损, 建模误差, 或者测量误差会导致永磁同步电机系统参数的不确定性, 于是, 考虑参数不确定的永磁同步电机的混沌控制方法是非常重要的. 模糊控制工作范围宽、适用范围广, 非常适用于非线性系统的控制. 但传统的模糊控制需要事先给定模糊论域, 然后在特定的模糊论域上研究其控制方法, 反而制约了模糊控制的工作范围宽的优点. 本文就试图提出参数不确定的永磁同步电机的 T-S 模糊控制模型, 针对一般模糊论域进行讨论, 并设计更具柔性的模糊控制器, 然后研究其稳定性, 得到参数不确定的永磁同步电机渐进稳定的充分条件.

2. 参数不确定的永磁同步电机的混沌数学模型

用 i_d, i_q 表示电流, ω 表示转子角频率, J 表示转动惯量, T_L 表示外部转矩, β 表示是黏性阻尼系数, R_1 表示定子绕阻, L_d, L_q 表示 $d-q$ 轴定子电感, ψ_r 表示永久磁通, n_p 表示极对数, 则永磁同步电机可写为

$$\frac{di_d}{dt} = (-R_1 i_d + \omega L_q i_q) / L_d,$$

* 国家自然科学基金(批准号: 60604007 和 50775226), 重庆市科委自然科学基金(批准号: CSTC_2008BB3308, 2007BB2120) 和重庆大学青年骨干教师创新能力培育基金(批准号: CDCX004) 资助的课题.

† E-mail: lid@cqu.edu.cn

$$\begin{aligned} \frac{di_q}{dt} &= (-R_1 i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_r) / L_d, \\ \frac{d\omega}{dt} &= [n_p \psi_r i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q - T_L - \beta \omega] / J. \end{aligned} \quad (1)$$

通过仿射变换和时间尺度变换, 将(1)式变换成

无量纲的状态方程. 即 $x = \lambda \tilde{x}, t = \tau \tilde{t}$, 其中

$$\begin{aligned} x &= [i_d \quad i_q \quad \omega]^T, \\ \tilde{x} &= [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q \quad \tilde{\omega}]^T, \\ \lambda &= \begin{bmatrix} \lambda_d & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_q & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bk & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1/\tau \end{bmatrix}, \\ b &= \frac{L_q}{L_d}, \\ k &= \frac{\beta}{n_p \tau \psi_r}, \\ \tau &= \frac{L_q}{R_1}. \end{aligned}$$

则无量纲的状态方程为

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{d\tilde{t}} &= -\tilde{i}_d + \tilde{\omega} \tilde{i}_q, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{d\tilde{t}} &= -\tilde{i}_q - \tilde{\omega} \tilde{i}_d + \gamma \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{d\tilde{t}} &= \sigma (\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) + \varepsilon \tilde{i}_d \tilde{i}_q - \tilde{T}_L, \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma &= -\frac{\psi_r}{kL_q}, \\ \sigma &= \frac{\beta\tau}{J}, \\ \varepsilon &= \frac{n_p b \tau^2 k^2 (L_d - L_q)}{J}, \\ \tilde{T}_L &= \frac{\tau^2}{J} T_L. \end{aligned}$$

考虑气隙均匀的永磁同步电动机混沌模型, 即

$L_d = L_q = L$, 并考虑其中参数的不确定性, 并设 $x =$

$[x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q \quad \tilde{\omega}]^T$, 则气隙均匀的参数

不确定永磁同步电动机混沌数学模型可写为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + x_3 x_2 + u_1, \\ \dot{x}_2 &= -x_3 x_1 - x_2 + \gamma x_3 + u_2, \\ \dot{x}_3 &= \sigma (x_2 - x_3) + u_3, \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\gamma \in [r_1, r_2],$$

$$\sigma \in [l_1, l_2].$$

其矩阵表示如下:

$$\dot{x} = Ax + \Phi(x) + Bu, \quad (4)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}$ 为不确定矩阵, $\Phi(x) =$

$[x_3 x_2 - x_1 x_3 \quad 0]^T$, u 为系统输入, 如果 u 与状态变量 x 无关, 称之为开环系统, 开环系统的模型表述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -x_1(t) + x_3(t)x_2(t) + u_1(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -x_3(t)x_1(t) - x_2(t) + \gamma x_3(t) + u_2(t), \\ \dot{x}_3(t) &= \sigma (x_2(t) - x_3(t)) + u_3(t), \end{aligned} \quad (5)$$

其矩阵表示如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \Phi(x(t)) + Bu(t). \quad (6)$$

如果 u 与状态变量 x 有关, 称之为闭环系统, 闭环系统的模型表述如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -x_1(t) + x_3(t)x_2(t) \\ &\quad + u_1(t, x_1(t), x_2(t), x_3(t)), \\ \dot{x}_2(t) &= -x_3(t)x_1(t) - x_2(t) + \gamma x_3(t) \\ &\quad + u_2(t, x_1(t), x_2(t), x_3(t)), \\ \dot{x}_3(t) &= \sigma (x_2(t) - x_3(t)) \\ &\quad + u_3(t, x_1(t), x_2(t), x_3(t)), \end{aligned} \quad (7)$$

其矩阵表示如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \Phi(x(t)) + Bu(t, x). \quad (8)$$

考虑如下的 T-S 模糊模型的 i -th 规则, 提出开环系统的模糊控制模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Plant Rule } i: & \text{ if } x_3(t) \text{ is } M_i, \\ & \text{ then } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ & i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (9)$$

其中 M_i 是模糊集, r 是 "if-then" 规则数, $A_i \in R^{3 \times 3}$,

$$A_i = \begin{bmatrix} -1 & d_i & 0 \\ -d_i & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}$$

为不确定矩阵, $\gamma \in [r_1, r_2], \sigma \in [l_1, l_2], d_i$ 的取值与 $x_3(t)$ 取值有关, B_i 为控制矩阵, 如果无输入控制, 则 $B_i = K$ (单位阵).

采用单点模糊化、乘积推理和平均加权反模糊化, 则开环系统(6)的模糊 T-S 的状态方程如下:

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) (A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))}, \quad (10)$$

其中 $\omega_i(x_3(t)) = M_i(x_3(t))$, $i = 1, 2, \dots, r$.

称 (10) 式为参数不确定的永磁同步电机的开环模糊控制模型.

根据闭环系统模糊控制器的 T-S 模型, 提出闭环系统的模糊控制模型如下:

$$\begin{aligned} &\text{Plant Rule } i \text{ if } x_1(k) \text{ is } M_1^i, \\ &\text{and } \dots \text{ and } x_n(k) \text{ is } M_n^i, \\ &\text{then } u(n) = -F_i x(t), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, r$, F_i 是全状态反馈矩阵, 模糊控制器的输出是 r 个子系统输出的加权平均, 即

$$u(t) = \frac{-\sum_{i=1}^r \omega_i(t) F_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(t)},$$

$$\omega_i(t) = M_i(x_3(t)). \quad (12)$$

则闭环系统 (8) 的模糊 T-S 的状态方程如下:

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) (A_i - B_i F_j) x(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}. \quad (13)$$

称 (13) 式为参数不确定的永磁同步电机的闭环模糊控制模型.

3. 系统的稳定性条件

本节将讨论系统 (10) 和 (13) 的稳定性, 需要利用如下引理:

引理 1 对于任意的 i , 设

$$A_i = \begin{bmatrix} -1 & c_{i1} & 0 \\ c_{i2} & -1 & \gamma_i \\ 0 & \sigma_i & -\sigma_i \end{bmatrix},$$

其中 $\gamma_i \in [r_1, r_2]$, $\sigma_i \in [l_1, l_2]$, 设

$$P_i = \begin{bmatrix} -1 & c_{i1} & 0 \\ c_{i2} & -1 & r_1 \\ 0 & l_1 & -l_2 \end{bmatrix},$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} -1 & c_{i1} & 0 \\ c_{i2} & -1 & r_2 \\ 0 & l_2 & -l_1 \end{bmatrix},$$

则 A_i 可以表示为

$$A_i = A_0 + E \Sigma_i F, \quad (14)$$

其中

$$A_0 = \frac{1}{2}(P_i + Q_i),$$

$$H = (h_{ij})_{3 \times 3} = H_i = \frac{1}{2}(Q_i - P_i),$$

$$\begin{aligned} \Sigma_i \in \Sigma^* &= \{\Sigma \in R^{9 \times 9} : \Sigma \\ &= \text{diag}(\epsilon_{11}, \epsilon_{12}, \dots, \epsilon_{13}, \dots, \epsilon_{31}, \dots, \epsilon_{33}), \\ &|\epsilon_{jk}| \leq 1, \epsilon_{32} = \epsilon_{33}, j, k = 1, 2, 3\}, \end{aligned}$$

$$E = (\sqrt{h_{11}} e_1, \sqrt{h_{12}} e_1, \sqrt{h_{13}} e_1, \dots, \sqrt{h_{31}} e_3, \dots, \sqrt{h_{33}} e_3) \in R^{3 \times 9},$$

$$F = (\sqrt{h_{11}} e_1, \sqrt{h_{12}} e_2, \sqrt{h_{13}} e_3, \dots, \sqrt{h_{31}} e_1, \dots, \sqrt{h_{33}} e_3)^T \in R^{9 \times 3},$$

$$e_1 = (1, 0, 0)^T,$$

$$e_2 = (0, 1, 0)^T,$$

$$e_3 = (0, 0, 1)^T.$$

类似地,

$$A = \begin{bmatrix} -1 & c_1 & 0 \\ c_2 & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix},$$

其中 $\gamma \in [r_1, r_2]$, $\sigma \in [l_1, l_2]$, 设

$$P_i = \begin{bmatrix} -1 & c_1 & 0 \\ c_2 & -1 & r_1 \\ 0 & l_1 & -l_2 \end{bmatrix},$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} -1 & c_1 & 0 \\ c_2 & -1 & r_2 \\ 0 & l_2 & -l_1 \end{bmatrix},$$

则 A 可以表示为

$$A = A_0 + E \Sigma F, \quad (15)$$

其中

$$A_0 = \frac{1}{2}(P + Q),$$

$$H = (h_{ij})_{3 \times 3} = H = \frac{1}{2}(Q - P),$$

$$\begin{aligned} \Sigma \in \Sigma^* &= \{\Sigma \in R^{9 \times 9} : \Sigma \\ &= \text{diag}(\epsilon_{11}, \epsilon_{12}, \dots, \epsilon_{13}, \dots, \epsilon_{31}, \dots, \epsilon_{33}), \\ &|\epsilon_{jk}| \leq 1, \epsilon_{32} = \epsilon_{33}, j, k = 1, 2, 3\}. \end{aligned}$$

E, F 同上.

显然, 对于任意的 i 和 $\Sigma_i \in \Sigma^*$, 有

$$1) \Sigma_i \Sigma_i^T = \Sigma_i^T \Sigma_i \leq I (9 \times 9 \text{ 单位阵});$$

$$2) EF^T = \text{diag}\left\{\sum_{j=1}^3 h_{1j}, \sum_{j=1}^3 h_{2j}, \sum_{j=1}^3 h_{3j}\right\};$$

$$3) F^T F = \text{diag}\left\{\sum_{i=1}^3 h_{i1}, \sum_{i=1}^3 h_{i2}, \sum_{i=1}^3 h_{i3}\right\}.$$

根据引理 1, 系统 (10) 可以写为

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0} + E \Sigma_i F) x(t) + B_i u(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))}. \tag{16}$$

系统 (13) 可以写为

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \mathfrak{I}(A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j x(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}. \tag{17}$$

定理 1 如果对于开环系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 使得

$$[A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T F + PEE^T P] \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r, \tag{18}$$

则永磁同步电机的开环系统 (10) 是全局渐近稳定的.

证明 设 Lyapunov 函数为 $V(x) = x^T P x$. 因为稳定性只取决于 A_i , 故可以令 $B_i = 0$.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ &= \left(\frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0} + E \Sigma_i F) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \right)^T P x(t) + \frac{x^T(t) P \sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0} + E \Sigma_i F) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &= \frac{x^T(t) \sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T + F^T \Sigma_i^T E^T) P x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} + \frac{x^T(t) P \sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T + E \Sigma_i F) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &= \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T + F^T \Sigma_i^T E^T) P + P \sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0} + E \Sigma_i F) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &= \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T + F^T \Sigma_i^T E^T) P + P(A_{i0} + E \Sigma_i F) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &= \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T \Sigma_i^T E^T P + PE \Sigma_i F) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &\leq \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T \Sigma_i^T \Sigma_i F + PEE^T P) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))} \\ &\leq \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \mathfrak{I}(A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T F + PEE^T P) \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))}. \end{aligned} \tag{19}$$

根据条件(18),可得

$$\dot{V}(x) < 0,$$

故参数不确定永磁同步电机的开环系统(10)是全局渐进稳定的.

证毕.

定理 2 如果对于开环系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 设 λ_i 是矩阵 $[A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T F + PEE^T P]$ ($i = 1, 2, \dots, r$) 的最大特征值 $\lambda(\alpha) = \max_i(\lambda_i)$ 若 $\lambda(\alpha) < 0$ 则永磁同步电机的开环系统(10)是全局渐近稳定的.

证明 设 Lyapunov 函数为 $V(x) = x^T P x$.

类似定理 1 的证明(19)式成立, 进一步推导可得

$$\dot{V}(x) \leq \frac{x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t)) \lambda_i \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(x_3(t))}$$

$$\leq \lambda(\alpha) x^T(t) x(t). \tag{20}$$

根据条件, 可得

$$\dot{V}(x) < 0,$$

故参数不确定永磁同步电机的开环系统(10)是全局渐进稳定的.

证毕.

定理 3 如果对于闭环系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 使得

$$\begin{aligned} & (A_{i0}^T P + PA_{i0} + F^T F + PEE^T P \\ & - F_j^T B_i^T P - PB_i F_j) < 0, \\ & i, j = 1, 2, \dots, r, \end{aligned} \tag{21}$$

则永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

证明 设 Lyapunov 函数为 $V(x) = x^T P x$.

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$$

$$\begin{aligned} & = \left(\frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \right)^T P x \\ & + x^T P \left(\frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \right) \\ & = \left(\frac{x^T(t) \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) \right)_i^T - F_j^T B_i^T}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \right) P x \\ & + x^T P \left(\frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j \right) x(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \right) \\ & = x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) \right)_i^T - F_j^T B_i^T \right) P \\ & + P \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j \right) x(t) \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x^T(t) \left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0} + E \Sigma_i F)^T - F_j^T B_i^T \right) P + P \left((A_{i0} + E \Sigma_i F) - B_i F_j \right) \right] x(t) \\
& = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \\
& x^T(t) \left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left((A_{i0}^T P + F^T \Sigma_i^T E^T P - F_j^T B_i^T P) + P A_{i0} + P E \Sigma_i F - P B_i F_j \right) \right] x(t) \\
& = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \\
& x^T(t) \left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \left(A_{i0}^T P + P A_{i0} + F^T F + P E E^T P - F_j^T B_i^T P - P B_i F_j \right) \right] x(t) \\
& \leq \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)}. \quad (22)
\end{aligned}$$

根据不等式(21),则

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} < 0, \quad (23)$$

故参数不确定永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

证毕.

定理 4 如果对于开环系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 设 λ_{ij} 是矩阵 $(A_{i0}^T P + P A_{i0} + F^T F + P E E^T P - F_j^T B_i^T P - P B_i F_j)$ ($i, j = 1, 2, \dots, r$) 的最大特征值, $\lambda(\alpha) = \max_{i,j}(\lambda_{ij})$, 若 $\lambda(\alpha) < 0$ 则永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

证明 设 Lyapunov 函数为 $V(x) = x^T P x$, 类似定理 3 的证明(22)式成立, 进一步推导可得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(x) & \leq \frac{x^T(t)}{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t)} \\
& \times \left[\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i(t) \omega_j(t) \lambda_{ij} \right] x(t) \\
& \leq \lambda(\alpha) x^T(t) x(t). \quad (24)
\end{aligned}$$

根据条件,得

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} < 0, \quad (25)$$

故参数不确定永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

证毕.

考虑其中的一些特殊情况,可以得到如下一些推论:

推论 1 如果不实施模糊控制,则在局部形成线性系统稳定性的相关结论.即对于参数不确定开环系统中所有的子系统就是原来的系统,如存在一个的正定矩阵 P ,使得 $A_{i0}^T P + P A_{i0} + F^T F + P E E^T P$

< 0 , 则参数不确定的永磁同步电机的开环系统(10)是全局渐近稳定的.

推论 2 如果对于闭环系统中无输入控制,即 $B_i = I$, 若对系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 使得

$$\begin{aligned}
& (A_{i0}^T P + P A_{i0} + F^T F + P E E^T P \\
& - F_j^T P - P F_j) < 0, \\
& i, j = 1, 2, \dots, r, \quad (26)
\end{aligned}$$

则参数不确定永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

推论 3 如果对于闭环系统中无输入控制,即 $B_i = I$, 若对于开环系统中所有的子系统存在一个公共的正定矩阵 P , 设 λ_{ij} 是矩阵 $(A_{i0}^T P + P A_{i0} + F^T F + P E E^T P - F_j^T P - P F_j)$ ($i, j = 1, 2, \dots, r$) 的最大特征值, $\lambda(\alpha) = \max_{i,j}(\lambda_{ij})$, 若 $\lambda(\alpha) < 0$, 则参数不确定永磁同步电机的闭环系统(13)是全局渐近稳定的.

4. 系统仿真研究

研究如下的参数不确定的永磁同步电机

$$\dot{x} = Ax + \Phi(x) + Bu, \quad (27)$$

其中, $\sigma = 5.45 \pm 0.2$, $\gamma = 20 \pm 1$, $A =$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}, \Phi(x) = [x_2 x_3 \quad x_1 x_3 \quad 0]^T, B \text{ 为}$$

单位阵.在实验中, σ 取区间 $[5.25 \quad 5.65]$ 中的随机值, γ 取区间 $[19 \quad 21]$ 中的随机值.

可以到得到该系统的模糊控制模型如下:

$$\text{Rule } i \text{ if } x_3(t) \text{ is } M_i,$$

then $\dot{x}(t) = A_i x(t)$,

$i = 1, 2, \dots, r$ and $j \in N$.

考虑具有两个“if-then”规则的初始的态矩阵如下：

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & -d & 0 \\ d & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1 & d & 0 \\ -d & -1 & \gamma \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix},$$

其中 $d = 20$, 首先两个子系统是稳定的, 以子系统的状态矩阵为 A_1 为例, 其稳定的状态图见图 1.

但是整个系统并不稳定, 其系统状态图见图 2.

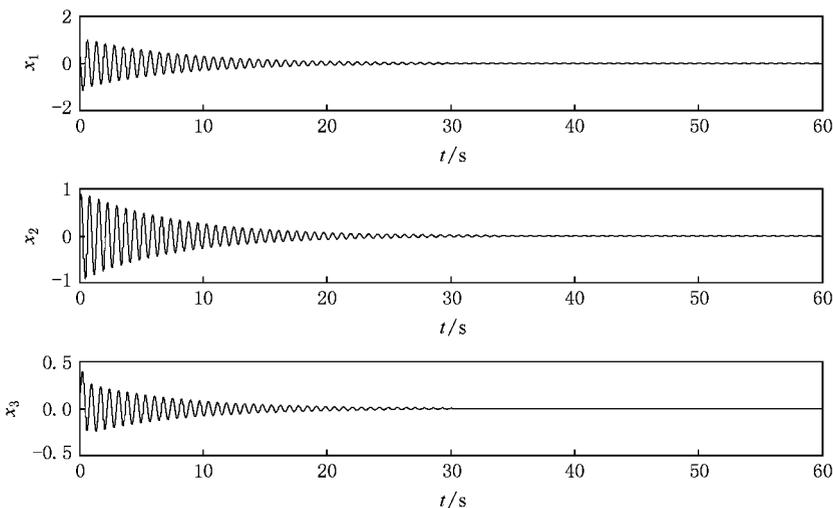


图 1 子系统的状态图

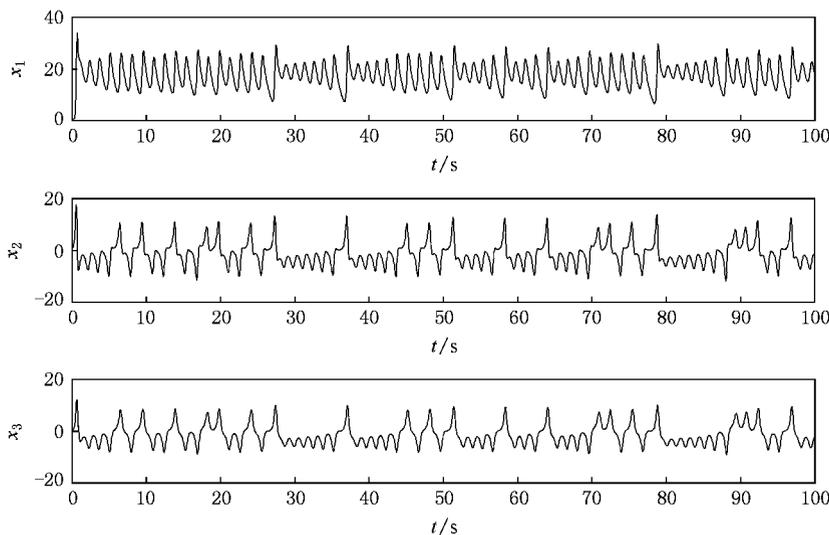


图 2 不稳定系统的状态图

设

$$M_1(x_3(t)) = 0.5 \times \left(1 + \frac{x_3(t)}{d} \right),$$

$$M_2(x_3(t)) = 0.5 \times \left(1 - \frac{x_3(t)}{d} \right),$$

$$F_1 = \text{diag}[23.2025 \quad 72.2707 \quad 75.5301],$$

$$F_2 = \text{diag}[-13.7102 \quad 287.0758 \quad 256.5038],$$

可以满足定理的条件. 系统是稳定的, 其稳定的系统状态如图 3 所示.

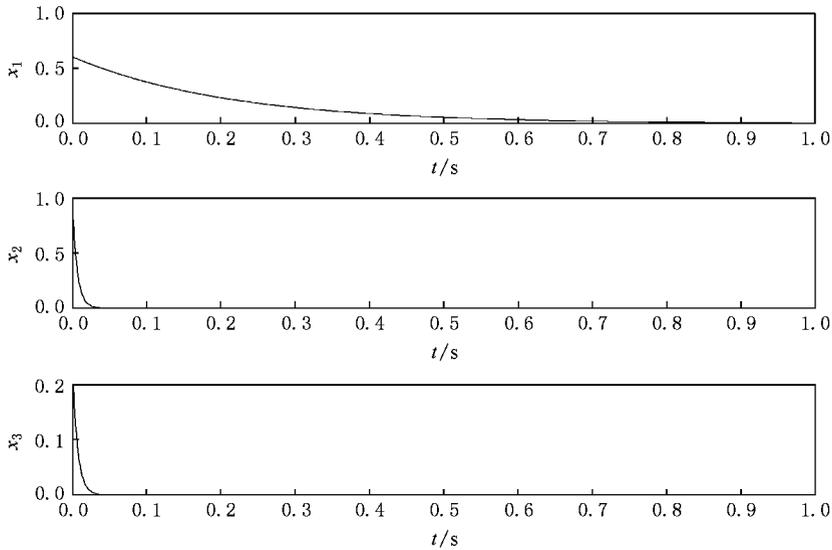


图3 模糊控制的系统状态图

由上图可见,系统在定理所示的条件下是稳定的.

5. 结 论

本文提出了参数不确定永磁同步电机模糊控制

的混沌模型,并设计相应的模糊控制器,得出了参数不确定的永磁同步电机的渐进稳定的充分条件,在研究的过程中,无须事先给定模糊论域,扩大了模糊控制的工作范围,最后的实例表明,本文所研究的结果是有效的.

- [1] Elmas C ,Ustun O 2008 *Control Engineering Practice* **16** 260
- [2] Lee T S ,Lin C H ,Lin F J 2005 *Control Engineering Practice* **13** 425
- [3] Baik I C ,Kim K H 2000 *Control Systems Technology* **8** 47
- [4] Baik I C ,Kim K H ,Youn M J 1998 *Electric Power Applications* **145** 369
- [5] Li D ,Wang S L ,Zhang X H ,Yang D ,Wang H 2008 *Chin . Phys . B* **17** 1678
- [6] Wei D Q ,Luo X S ,Fang J Q ,Wang B H 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 54 (in Chinese) [韦笃取、罗晓曙、方锦清、汪秉宏 2006 物理学报 **55** 54]
- [7] Li Z ,Zhang B ,Mao Z Y 2002 *Control Theory Appl .* **18** 53 (in Chinese) [李 忠、张 波、毛宗源 2002 控制理论与应用 **18** 53]
- [8] Ren H P ,Liu D ,Li J 2003 *Proc . CSEE .* **23** 175 (in Chinese) [任海鹏、刘 丁、李 洁 2003 中国电机工程学报 **23** 175]
- [9] Lin F J ,Chiu S 1998 *Control Theory and Applications* **145** 63
- [10] Wai R J 2001 *Industrial Electronics* **48** 926
- [11] Attaianes C ,Perfetto A ,Tomasso G 1999 *Electric Power Applications* **146** 391
- [12] Hsien T L ,Sun Y Y ,Tsai M C 1997 *Electric Power Applications* **144** 173
- [13] Yan J R ,Shen J H 1999 *Nonlinear Analysis* **37** 245
- [14] Luo X S ,Wang B H 2001 *Chin . Phys .* **10** 17
- [15] Zhao Y B ,Zhang D Y ,Zhang C J 2007 *Chin . Phys .* **16** 933
- [16] Liu B ,Liu X Z ,Liao X X 2004 *J . Math . Anal . Appl .* **290** 19
- [17] Sanchez E N ,Perez J P 1999 *IEEE Transactions on Circuits Systems* **46** 1395
- [18] Wu C L ,Ma S J ,Sun Z K ,Fang T 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 6253 (in Chinese) [吴存利、马少娟、孙中奎、方 同 2006 物理学报 **55** 6253]
- [19] Cao J D 2003 *Phys . Lett . A* **307** 136
- [20] Liu J D ,Yu Y M 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 1297 (in Chinese) [刘建东、余有明 2007 物理学报 **56** 1297]
- [21] Li Y ,Yang B J ,Yuan Y ,Liu X H 2007 *Chin . Phys .* **16** 1072
- [22] Liu X W ,Huang Q Z ,Gao X ,Shao S Q 2007 *Chin . Phys .* **16** 2272
- [23] Li D , Wang H , Yang D , Zhang X H , Wang S L 2008 *Chin . Phys . B* **17** 4091

Fuzzy control of chaos in permanent magnet synchronous motor with parameter uncertainties^{*}

Li Dong^{1)†} Zhang Xiao-Hong²⁾ Yang Dan²⁾ Wang Shi-Long³⁾

¹⁾ College of Mathematics and Physics Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

²⁾ College of Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

³⁾ State Key Laboratories of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Received 22 June 2008 ; revised manuscript received 4 September 2008)

Abstract

The permanent magnet synchronous motor (PMSMs) may have chaotic behaviors under certain working conditions , especially for uncertain values of parameters ,which threatens its secure and stable operation. Hence ,it is important to study methods of controlling or suppressing chaos in PMSMs. In this paper ,the Takagi-Sugeno fuzzy control model for PMSMs with parameter uncertainties is established via the Takagi-Sugen modeling method. Based on the new model ,the control conditions of asymptotical stability for PMSMs with parameter uncertainties have been derived by Lyapunov method and matrix analysis. An illustrative example is also given to show the effectiveness of our results. Compared with the curently available results ,the obtained results exhibit some advantage.

Keywords : chaotic control , Takagi-Sugen model , fuzzy control , permanent magnet synchronous motor

PACC : 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos 60604007 ,50775226) , the Chongqing Natural Science Foundation (Grant Nos. CSTC 2008BB3308 and 2007BB2120) , the Innovation Ability Training Foundation of Chongqing University (Grant No. CDCX004).

[†] E-mail :lid@cqu.edu.cn