

文章编号:1000-582X(2004)09-0040-05

电机调速过程的模糊自适应变结构控制

杨治平^{1,2}, 曹长修²

(1. 重庆师范大学现代教育技术系, 重庆 400047; 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400030)

摘要:电机在运行中受负荷和环境参数的扰动而速度不稳定,如不及时克服和调整,将使电机发生抖震,也影响系统的稳定。因此给出了一种针对电机调速过程的有效控制算法。采用 Tacagi-Sugeno 分段模糊化再进行连接的方法,用局部的模糊线性模型集合来代替整体的非线性模型,完成了模糊模型辨识,并基于此给出了模糊自适应预测控制算法,使得电机的输出速度保持动态稳定;为保证控制的动态跟踪功能引进了变结构控制;对于提出的算法给出了稳定性和鲁棒性设计。实际应用结果表明,所给的控制方案适合于一类不确定动态过程的有效控制。

关键词:电机调速;不确定过程;模糊化拟合;模糊自适应控制;模糊变结构控制

中图分类号:TP 273.2

文献标识码:A

电机在运行中受负荷和环境参数的影响,使其速度的变化呈不确定性,加之电机速度过程本身的非线性,要准确地测辨其动态过程的模型参数并构建系统的数学模型非常困难。由于调速过程表现出的“黑箱”或“灰箱”特性,寻找更优化的控制算法并对其实施有效控制,一直是重要的研究课题。文献[1]对模型动态化和模糊辨识有所贡献,而文献[2-3]则在局部线性化模型取代整体非线性模型方面有所推进,这些都为模糊控制策略的形成提供了有益的帮助。由于模糊模型辨识方法,对模型拟合要求不高,可作一般的近似处理,模糊模型辨识算法成功实施,已见诸于一些文献^[4-5],模糊规则的多元化和应用的自由度较高,为这一类控制策略付诸实施,提供了很大的空间。不确定及非线性过程的动态跟踪控制,也要求在每个采样周期,即时测辨系统模型参数的变化,并且进行实时控制。通过研究模糊控制策略,结合模糊自适应预测控制算法,施加于电机调速过程控制,解决了模型不确定带来的非参数模型辨识和控制问题,设计中还加进了变结构控制,利用滑模面的抑制扰动而保持系统响应特性不变性的特性,提高了系统的鲁棒性,利用滑模面的开关特性,强化对输出变化的可达性控制,解决了动态跟踪控制的实时性问题。实际应用结果表明,给出的控制器的设计是成功的。

1 模糊非线性模型的构建

随机过程动态参数模型由下式给出:

$$y(k) = F[y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)] \quad (1)$$

其中 $F(\cdot)$ 未知的电机速度过程, $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别是过程的输出, 对于这个不确定非线性过程, 采用 Tacagi-Sugeno 模糊模型算法^[1], 利用局部模型的模糊线性化来构建子系统的模糊线性模型。对于不确定动态系统的局部模型采用模糊化的处理方法, 对第 i 个子系统应用第 i 个 IF-THEN 规则来描述:

$$\text{IF } Z_1(k) \text{ is } M_1^i \text{ and } Z_2(k) \text{ is } M_2^i \\ \text{and } \dots \text{ and } Z_n(k) \text{ is } M_n^i$$

$$\text{THEN } A^i(q^{-1})y^i(k) = q^{-d^i}B^i(q^{-1})u^i(k) + w(k) \quad (2)$$

式中: $A^i(q^{-1})$ 和 $B^i(q^{-1})$ 是表示第 i 个子系统模型参数的多项式, d^i 是子系统的时延, $Z_1(k), \dots, Z_n(k)$ 是与 $(y^i(k-1), \dots, y^i(k-n_i^i), u^i(k-d^i), \dots, u^i(k-n_i^i-d^i+1))$ 有关的变量, M_n^i 是第 i 个子系统的模糊规则数, $w(k)$ 是受控系统的扰动。

由(2)式描述的模糊子模型再经过模糊函数的平

滑连接, 可得全局非线性模糊模型输出表示如下:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i \{ q^{-d^i} B^i(q^{-1}) u^i(k) / A^i(q^{-1}) + w(k) / A^i(q^{-1}) \} \quad (3)$$

其中

$$\mu^i(k) = h^i(k) / \sum_{j=1}^n h^j(k), \text{ 而 } h^i(k) = \prod_{j=1}^n M_j^i(Z(k)).$$

2 模糊自适应变结构控制律

2.1 模糊自适应控制算法

由自适应控制律可得针对第 i 个模糊子模型的模糊自适应控制律^[6]:

$$\begin{aligned} &\text{if } Z_1(k) \text{ is } M_1^i \text{ and } Z_2(k) \text{ is } M_2^i \text{ and } \dots \text{ and } Z_n(k) \text{ is } M_n^i \\ &\text{then } u^i(k) = \{ -S^i(q^{-1})y^i(k) + T^i(q^{-1})r(k) \} / R^i(q^{-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

一般情况下, 为提高系统的控制性能, 多在模型(1)中引入附加的控制作用, 以加强对系统扰动进行抑制的鲁棒性, 所以广义的自校正控制的系统模型给出为:

$$\begin{aligned} F[y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)] = \\ \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \{ q^{-d^i} B^i(q^{-1}) u^i(k) / A^i(q^{-1}) + \Delta u^i(k) \} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $S^i(q^{-1}), T^i(q^{-1}), R^i(q^{-1})$ 是使式(2)的子系统稳定, 并且能保持自适应动态跟踪的多项式, 在定值控制系统中 $T^i(q^{-1}) = 1$, $y^i(k)$ 和 $u^i(k)$ 分别是第 i 个子系统的输出和控制量, $r(k)$ 是系统的参考输入信号, $\Delta u^i(k)$ 是为改进系统特性而引入系统的附加控制项。

为使系统具有对扰动进行抑制的鲁棒特性, 引入变结构控制, 以达到更为优化的控制性能。设第 i 个子系统的变结构控制作用信号是 $u_s^i(k)$, 则合成的子系统的模糊自适应变结构控制律为:

$$u^i(k) = \{ -S^i(q^{-1})y(k) + T^i(q^{-1})r(k) + u_s^i(k) \} / R^i(q^{-1}) \quad (6)$$

再引入模糊拟合原理, 可得整个系统的模糊自适应变结构控制律为:

$$\begin{aligned} u(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \{ -S^i(q^{-1})y(k) + \\ T^i(q^{-1})r(k) + u_s^i(k) \} / R^i(q^{-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

由自适应控制原理, 控制项多项式 $S^i(q^{-1}), R^i(q^{-1})$ 还应满足下列的闭环系统特征多项式, 即

$$A_c^i(q^{-1}) = A^i(q^{-1})R^i(q^{-1}) + q^{-d^i}B^i(q^{-1})S^i(q^{-1}) \quad (8)$$

式中 $A_c^i(q^{-1})$ 是为求解 $S^i(q^{-1}), R^i(q^{-1})$ 而选择的稳定多项式, 这样在引入了变结构控制律以后, 再进一步考

虑闭环系统多项式对系统的稳定作用, 经过适当的数学处理, 得到下列合成后的全系统的输出为:

$$\begin{aligned} y(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \{ q^{-d^i} B^i(q^{-1}) T^i(q^{-1}) r(k) + \\ q^{-d^i} B^i(q^{-1}) u_s^i(k) + A^i(q^{-1}) R^i(q^{-1}) w(k) \} / A_c^i(q^{-1}) \end{aligned} \quad (9)$$

实现式(9)的稳定控制, 需求得模型参数 $A^i(q^{-1})$ 和 $B^i(q^{-1})$, 应用递归最小二乘参数估计算法, 可获得多项式 $A^i(q^{-1})$ 和 $B^i(q^{-1})$ 的系数, $A^i(q^{-1})$ 和 $B^i(q^{-1})$ 的向量形式为:

$$\begin{cases} \hat{\theta}^i(k) = [\hat{a}_1^i(k), \dots, \hat{a}_{n_a}^i(k), \hat{b}_0^i(k), \dots, \hat{b}_{n_b}^i(k)]^T \\ \Phi^i(k) = [-\hat{y}^i(k-1), \dots, -\hat{y}^i(k-n_a^i)], \\ u^i(k-d^i+1-n_{nb}^i) \end{cases} \quad (10)$$

递归最小二乘参数估计^[7]的计算式为:

$$\begin{cases} \hat{\theta}^i(k) = \hat{\theta}^i(k-1) + \Gamma^i(k) [y(k) - \Phi^i(k)^T \hat{\theta}^i(k-1)] \\ \Gamma^i(k) = p^i(k-1) \Phi^i(k) / [1 + \Phi^i(k)^T p^i(k-1) \Phi^i(k)] \\ p^i(k) = p^i(k-1) - \Gamma^i(k) \hat{\theta}^i(k) p^i(k-1) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)计算出的系统参数 $A^i(q^{-1})$ 和 $B^i(q^{-1})$, 再代入到式(8)中可求得控制器参数 $S^i(q^{-1}), R^i(q^{-1})$ 。 $S^i(q^{-1}), R^i(q^{-1})$ 是式(7)的模糊自适应控制律的基础。

2.2 模糊鲁棒变结构控制器设计

为在模糊自适应控制的基础上再引入变结构控制^[6,8], 滑模面的设计是首要的, 为此定义滑动开关表面 $\sigma(k)$ 的序列变化函数为:

$$\sigma(k) = C(q^{-1})e(k) \quad (12)$$

式(12)中 $e(k) = r(k) - y(k)$, $C(q^{-1})$ 是稳定的多项式。为了取得在有限时间内在滑模表面的能达控制, 滑动开关表面还必须满足下列关系式:

$$\begin{aligned} \sigma(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \sigma^i(k) = \\ \sum_{i=1}^n \mu^i(k) H^i(q^{-1}) \delta(k) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中 $H^i(q^{-1})$ 是具有适当阶数的能达多项式, $\delta(k)$ 是动态跟踪下的输入函数, 为保证变结构控制的稳定性, 考虑保持系统稳定的加权函数 β 的加入, 给出的模糊开关控制还需修改如下:

$$\begin{aligned} u_s^i(k) = -A_c^i(q^{-1}) \{ \sigma(k) + \\ \beta^i(q^{-1}) v_s^i(k) \} / B^i(q^{-1}) C(q^{-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中 $v_s^i(k)$ 是变结构控制的约束项, 对相关公式进行适当的数学整理可得:

$$\sigma(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \{ H^i(q^{-1})\delta(k) + V^i(q^{-1})\Delta^i(u(k), k) + B(q^{-1})\sigma^i(k - d^i) + \eta^i(q^{-1})v_i^i(k - d^i) \} \quad (15)$$

式(15)中 $\eta^i(q^{-1}) = \beta^i(q^{-1})B^i(q^{-1})$ 是滤除高频噪声的低通滤波器。 $V^i(q^{-1})\Delta^i(u(k), k)$ 是加入变结构控制后, 对扰动项 $w(k)$ 进行抑制的增量项, 也既是第 i 个子系统的开关控制的作用项, 它是鲁棒性设计主要考虑的因素, 下面给出设计过程。

由于变结构控制的增量项是 $V^i(q^{-1})\Delta^i(u(k), k)$ 是变结构控制作用 $u_i^i(k)$ 和滑模面 $\sigma^i(k)$ 的函数, 因此下列关系式也成立:

$$V^i(q^{-1})\Delta^i(u(k), k) = \gamma_1^i(k)v_i^i(k - d^i) + \gamma_2^i(k)\sigma(k - d^i) + \gamma_3^i(k) \quad (16)$$

其中

$$|\gamma_1^i(k)| < k_1 < 1, |\gamma_2^i(k)| < k_2, |\gamma_3^i(k)| < k_3, \forall k, i$$

定义 $\sigma^i(k)$ 的微分如下:

$$\Delta\sigma^i(k) = \sigma^i(k + d^i) - \sigma^i(k) \quad (17)$$

这样由式(14)和(17)得到:

$$\Delta\sigma(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k)\Delta\sigma^i(k) = \sum_{i=1}^n \mu^i(k) \{ \Lambda^i(k) + [1 - \tau^i(q^{-1}, k)]v_i^i(k) \} \quad (18)$$

式(18)中

$$\tau^i(q^{-1}, k) = 1 - \eta^i(q^{-1}) - \gamma_1^i(k) \quad (19)$$

$$\Lambda^i(k) = H^i(q^{-1})\delta(k + d^i) + V^i(q^{-1})\Delta^i(u(k), k) + [\gamma_2^i(k) + B^i(q^{-1})]\sigma(k) \quad (20)$$

$\Lambda^i(k)$ 的上确界估计如下:

$$\|\Lambda^i(k)\| \leq g_\lambda^i(k) = \lambda_0^i |\sigma(k)| + \lambda_1^i \quad (21)$$

其中,

$$\lambda_1^i \geq 0, [(1 - \bar{\lambda}^i)^2 - \varepsilon^i(1 + \bar{\lambda}^i)^2]/[4(1 + \bar{\lambda}^i)] > \lambda_0^i \geq 0, 1 > (1 - \lambda^i)^2/(1 - \lambda^i)^2/(1 + \bar{\lambda}^i)^2 > \varepsilon^i > 0, 1 > \bar{\lambda}^i = k_1 + v^i, \text{这也使得下列不等式成立, 即}$$

$$\|1 - \eta^i(q^{-1})\|_\infty \leq v^i < 1 \quad \text{关于 } D^i \quad (22)$$

式(22)中 $D^i = \{q \in C \mid |q| < 1\}$ 是包含 $\beta^i(q^{-1})$ 的极点和 $B^i(q^{-1})$ 的零点的稳定域。给出滑模面的开关特性如下:

$$v_i^i(k) = \begin{cases} -\xi^i(k)g_\lambda^i(k)\sigma(k)/[(1 - \bar{\lambda}^i)(1 + \bar{\lambda}^i)|\sigma(k)|] & \text{当 } |\sigma(k)| > X^i(k) \text{ 时} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$X^i(k) = \max\{4(1 + \bar{\lambda}^i)\lambda_1^i/[(1 - \bar{\lambda}^i)^2 -$$

$$\varepsilon^i(1 + \bar{\lambda}^i) - 4(1 + \bar{\lambda}^i)\lambda_0^i], 4(1 + \bar{\lambda}^i)g_\lambda^i(k)/[1 - \bar{\lambda}^i)^2 - \varepsilon^i(1 + \bar{\lambda}^i)^2]\} \quad (24)$$

在式(29)中的开关增益还满足下列不等式:

$$\xi_2^i(k) > \xi^i(k) > \xi_1^i(k) \geq 0 \quad (25)$$

其中

$$\xi_{1,2}^i(k) = g_1^i(k) \pm \sqrt{[g_1^i(k)]^2 - g_2^i(k)} \quad (26)$$

$$g_1^i(k) = (1 - \bar{\lambda}^i)^2 |\sigma(k)| / [(1 + \bar{\lambda}^i)g_\lambda^i(k)] - (1 - \bar{\lambda}^i) \quad (27)$$

$$g_2^i(k) = (1 - \bar{\lambda}^i)^2 \{ [g_\lambda^i(k)]^2 + 2g_\lambda^i(k) |\sigma(k)| + \varepsilon^i |\sigma(k)|^2 \} / [g_\lambda^i(k)]^2 \quad (28)$$

应用式(8)和(14), 再有 $R^i(q^{-1}), S^i(q^{-1}), T^i(q^{-1})$ 已求出, 并且式(21)和(22)已满足, 则 $\{u(k)\}$ 是有界的, 这说明 $\Delta^i(u(k), k)$ 的引入, 不仅能使滑模面的控制有力及时, 还能保证全系统的控制作用 $\{u(k)\}$ 限制在有限的范围内。从开关表面和输出扰动之间的敏感度函数最小的意义上, $\{\sigma(k)\}$ 也是有界的^[8]。由所给的算法可见, 所设计的控制律其稳定性和鲁棒性都是能得到保证的。

3 电机调速控制系统与调速过程

3.1 电机控制系统

将所设计的控制算法施加于受控系统, 由式(11)估计出系统模型参数; 再由式(7)、(14)和(15)计算出模糊自适应变结构控制律; 将式(14)计算的控制信号送到电机的控制电路; 再由电路输出控制信号控制电机。

实际的电机调速的主控制电路如图1所示, 在实施上述所给的控制律后, 由于力矩电机的电磁转矩正比于其控制电流, 微机调速系统输出的电流通过主控制电路, 对电机进行速度控制和正反转的控制。控制过程如下: 非门的输出端1、2、3、4的输出状态与电机的桥路的4个三极管1、2、3、4的导通状态相反, 即非门输出端1为低电平, 三极管1就导通, 其它3路也是这种对应关系。

当三极管1、2同时导通时, 电流由三极管1经电机流向三极管2, 电机沿正向转动(此时3、4截止); 当三极管3、4导通时, 电流由三极管4经电机流向三极管3, (此时1、2截止), 电机沿反向转动。这样通过单片机的高速输出部件HSO输出的脉冲调宽信号PWM波, 经过相辅的数字逻辑电路就可实现对直流力矩电机正反转的控制, 同时还可以对流过电机的控制电流的大

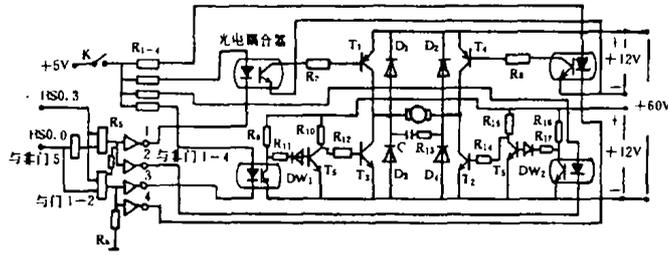


图 1 电机调速的控制电路

小进行定量控制, 以实现对电机速度的有效控制。实际的电机调速的微机控制系统如图 2 所示。

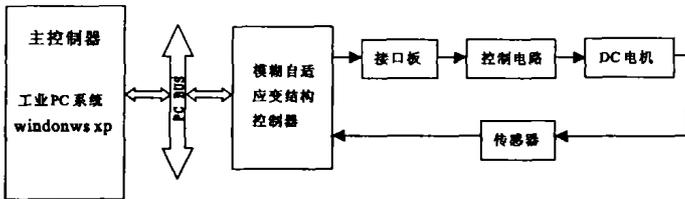


图 2 直流力矩电机模糊自适应控制的微机控制系统

3.2 仿真分析与实际电机控制响应曲线

应用所给出的控制算法, 执行仿真过程如下: 在采集 1 000 组数据, 并设置采样周期 $\Delta t = 0.001$ 后, 对所给的不确定动态过程进行控制输出的仿真(图中 y 是系统输出, k 表示采样时刻值)。

1) 在小干扰状况下, 既取 $w_i(t) = 0.015\sin(7t)$, 此时的扰动幅度较小, 获得了如图 3 的仿真效果, 从仿真曲线可以看出, 动态输出很好的跟踪了设定信号(图中的方波曲线), 响应特性是理想的。

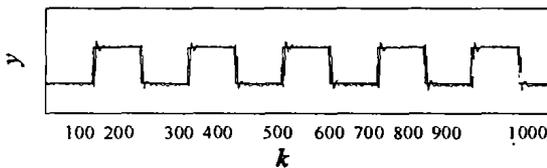


图 3 小干扰时模糊迭代学习控制的响应特性

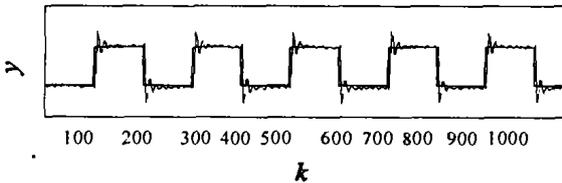


图 4 大干扰时模糊迭代学习控制的响应特性

2) 在大干扰状况下, 此时加大扰动的动作幅度, 取 $w_i(t) = 0.115\sin(7t)$, 得到了图 4 的仿真效果, 从仿真曲线可以看出, 加大扰动量后, 由于系统的抖震加剧, 控制的负担也加重, 系统的超调量明显增加, 但在模糊变结构控制算法的作用下, 控制器调节很有力; 由于对扰动作用的鲁棒性, 不仅抑制了初始的超调量, 还使系统在过渡过程中具有良好的动态响应, 并最终使系统输出很好的跟踪了理想的设定值。从仿真分析可

以看出, 所给控制器的设计是成功的。

实际的电机调速过程如图 5 所示: 从实际的调速过程曲线可以看出, 在电机速度设定值发生变化时, 电机的实际输出速度很好地跟踪了设定值, 系统的响应过程也非常理想。

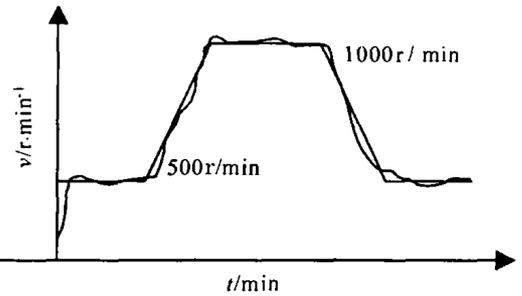


图 5 实测转速随时间变化曲线

4 结 语

给出了直流力矩电机速度控制的模糊自适应变结构控制算法, 并设计了执行调速算法的数字控制电路, 给出了完整的微机控制系统结构。通过仿真研究验证了算法, 仿真曲线表明电机的输出速度很好的跟踪了给定值。从实际的调速过程曲线看, 所给的控制器的设计是成功的。由于设计的算法优化实用, 对实际过程的控制效果较为理想, 所以这种控制器适合于推广到一类不确定动态过程的控制。所给的非参数模型化的模糊辨识算法和模糊控制方法, 较之早期的参数化模型的自适应类控制算法, 有了很大的改进。

参考文献:

- [1] WANG H O, TANAKA K, GRIFFIN M F. An approach to fuzzy control of nonlinear system: stability and design issues [J]. IEEE Trans. Fuzzy Systems, 1996, 4(1): 14 - 23.
- [2] READMAN M C, MULDOON M R, REYNOLDS L. Control of free length when coiling a helical spring[J]. IEE proc - Control Theory Appl. 2001, 148(3): 239 - 244.
- [3] CAO Y Y, FRANK P M. Stability analysis and synthesis of nonlinear time-delay systems via linear takagi-sugeno fuzzy models[J]. Fuzzy Sets Systems, 2001, 124(2): 213 - 229.
- [4] CHEN T T, TZU-HEUNG LI S. Simplex-type fuzzy sliding-mode control[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 124(2): 249 - 261.
- [5] CHEN B S, YANG Y S, LEE B K, et al. Fuzzy adaptive predictive flow control of ATM network traffic[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(4): 568 - 581.
- [6] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [7] GOODWIN G C. Adaptive filtering prediction and control [M]. New York: Prentice Hall, 1984.

[8] HWANG C L, CHAU JAN. Optimal and reinforced robustness designs of fuzzy variable structure tracking control for a

piezoelectric actuator system[J]. *IEEE Transaction on Fuzzy System*, 2003, 11(4): 507-517.

Fuzzy Adaptive Variable Structure Control of Speed Process of DC Motor

YANG Zhi-ping^{1,2}, CHAO Chang-xiu²

(1. Department of Modern Education Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The load changed of motor affects normal run. If it is not adjusted, the state of motor will become poor, while it affects steady of the system. This paper presents an efficient method for the motor speed controlling, it applies Takagi-Sugeno's method that each linear submodels are connected for fuzzy algorithm, an algorithm of the fuzzy model identifying and fuzzy control is fulfilled through whole nonlinear model which are replaced with local linear models. It makes speed of motor to maintain steady, and variable structure control is applied to guarantee performance of dynamic flowing for process controlled, the design of stability and robustness is proposed in the scheme. Practice running results show that it is efficient that uncertain dynamic processes are controlled.

Key words: speed controlled of motor; uncertain course; fuzzy connecting of sub-models; fuzzy adaptive control; fuzzy variable structure control

(编辑 吕赛英)

(上接第 28 页)

Design and Implementation of Fingerprint Identification Module Based on DSP Chip

HU Xiao-hong, LI Jian-wei, LIU Yuan-bing

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: An automatic fingerprint identification module based on the fixed DSP chip TMS320VC5410 and the fingerprint sensor FPS200 is presented. The program of fingerprint identification algorithm mixes the assemble language and C, which implements a high effective and low cost embedded system. The software and hardware design and implementation of this system are introduced later. In experiments, the module is fast speed and accurate, and takes a very good performance.

Key words: fingerprint identification; DSP; sensor; identification algorithm

(编辑 张小强)