

文章编号: 1001-0920(2003)01-0113-03

交流伺服系统模糊滑模控制器设计

谢成祥¹, 曾庆军^{1,2}, 徐绍芬¹, 周耀庭¹

(1. 华东船舶工业学院 电子与信息系, 江苏 镇江 212003; 2 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 针对交流伺服系统的位置控制, 设计出一种新型滑模控制器, 以前馈信号作为平均控制, 采用模糊推理来调节开关控制的幅度。仿真研究表明, 该控制器能较好地实现对指令信号的跟踪, 具有较强的抗参数摄动和抗干扰能力, 表现出良好的控制性能。

关键词: 滑模控制; 模糊控制; 交流伺服系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of fuzzy slide-mode controller for AC servo system

XIE Cheng-xiang¹, ZENG Qing-jun^{1,2}, XU Shao-fen¹, ZHOU Yao-ting¹

(1. Department of Electronic and Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang 212003, China; 2 Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new slide mode controller is designed for AC servo system. The feed forward signal is used as average control, and fuzzy inference is used to regulate the magnitude of on-off control. Simulation study shows that the controller can realize the track of command signal, and has strong ability of resisting parameter distortion and rejecting chattering.

Key words: Slide mode control; Fuzzy control; AC servo system

1 引言

在伺服系统中, 前馈加反馈的复合控制已得到广泛应用, 但它对于某些跟踪精度要求高、参数变化大且存在干扰的控制系统(如火炮伺服系统), 其精度和鲁棒性都难以满足要求。滑动模态控制(滑模控制)虽然对系统参数变化和外部干扰具有较强的鲁棒性, 并得到广泛应用, 但它存在以下不足: 1) 滑模控制要取得系统的全部状态变量是非常困难的, 尤其对于高阶系统。对此, 人们用 Luenberger 观测器来取得系统的状态, 但当系统参数不确定时, 用 Luenberger 观测器也不能确定系统所有的状态变量, 滑动模态难以保证^[1]。2) 滑动模态是在逻辑切换可瞬时实现的情况下取得的, 如果切换开关不理想, 则

必然会产生高频抖振, 使控制系统很难维持长时间正常工作。尽管有许多方法可以削弱抖振^[2], 但仍存在诸多不足, 使滑模控制的应用受到了制约。

模糊控制作为利用专家知识和经验的有效方法, 特别适用于难以用精确数学模型描述或系统参数有变化的对象, 但大多数模糊控制系统缺少保证系统性能的分析方法。将模糊控制与滑模控制相结合构成模糊滑模控制, 可以充分发挥二者的优点, 有效地保证系统稳定。目前, 模糊滑模的方案较多, 但易于实现的是利用模糊控制对趋近模面的速度进行调节^[3-5]。

本文针对交流伺服系统的位置控制, 提出一种新型滑模控制器。它能保证系统的稳定性, 在不牺牲

收稿日期: 2001-07-21; 修回日期: 2001-10-22。

基金项目: 船舶工业国防科技应用基础研究基金资助项目(99J33 3 2)。

作者简介: 谢成祥(1970—), 男, 江苏丹徒人, 副教授, 从事交流伺服系统、永磁同步电机控制方法的研究; 曾庆军(1969—), 男, 江苏句容人, 副教授, 在站博士后, 从事智能信号与信息处理的研究。

系统鲁棒性的前提下,能极大地削弱系统的抖振,对于位置指令信号的跟踪具有很高的控制精度。

2 模糊滑模控制器设计

2.1 滑模控制器设计

交流伺服系统是一双环系统,其外环为位置环,内环为速度环。目前,伺服系统的功率驱动模块——变频器大都集成有速度控制器,且速度对象的参数是变化的。电机转速经减速器后成为位置输出,故伺服系统固有部分的传递函数,即位置信号 θ 对于速度指令信号 u 的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = K_1 G(s) \frac{K_2}{s} \quad (1)$$

其中: K_1 为速度环静态放大倍数; $G(s)$ 体现速度环动态特性,一般为增益是1的最小相位系统; K_2 为减速系数。

在分析滑模控制时,通常将控制作用分成两部分^[6]:平均控制 u_e 和开关控制 u_k ,即 $u = u_e + u_k$ 。对于式(1)的系统,因为速度环后是一个积分环节,因此若实现对指令信号的跟踪,则速度环输出必须是指令信号 θ 的一阶导数的 $1/K_2$ 。于是,可取平均控制

$$u_e(s) = s\theta(s) / K_1 K_2 \quad (2)$$

此时,跟踪误差主要是由速度环的滞后引起的。为补偿这一滞后,必须在平均控制的基础上附加一开关控制 u_k 。

选择滑模切换线为

$$\sigma = \dot{e} + ce = 0, \quad e = \theta - \theta_d$$

其中 $c > 0$ 。对 σ 进行拉氏变换,有

$$\begin{aligned} \sigma(s) &= se(s) + ce(s) = \\ (s+c)e(s) &= (s+c)[\theta(s) - \theta_d(s)] = \\ (s+c)[\theta(s) - K_1 G(s) \frac{K_2}{s} u(s)] \end{aligned} \quad (3)$$

将 $u = u_e + u_k$ 代入式(3),得

$$\begin{aligned} \sigma(s) &= (s+c)[\theta(s) - \theta_d(s)G(s) - \\ &K_1 G(s) \frac{K_2}{s} u_k(s)] = \\ &(s+c)[1 - G(s)]\theta(s) - \\ &(1 + \frac{c}{s})u_k(s)K_1 K_2 G(s) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)的第1项可见,由于 $G(s)$ 是稳态增益为1的最小相位系统,因此只要指令信号 θ 的各阶导数有界(一般总能满足),则在 θ 单独作用下, σ 必为一有界值;从第2项可见, σ 与 u_k 的关系等价于一比例积分环节与一滤波环节 $G(s)$ 的串联,由于速度

环响应速度很快,因此在较短的时间内,可以近似为比例积分关系,正的 u_k 使 σ 不断减小,负的 u_k 使 σ 不断增大。因此,如果 u_k 与 σ 的符号相反,则在有限时间内,总可使 σ 穿过切换线 $\sigma = 0$ 。

2.2 模糊控制器设计

由式(4)可知,欲使 $\sigma = 0$,关键是 u_k 的选择。选取 u_k 时应使 σ 趋于 $\sigma = 0$ 的方向,因此应兼顾到 σ 的大小和趋近速度 $\dot{\sigma}$ 。如果 σ 很大而 $\dot{\sigma}$ 很小,则趋近过程慢,过渡时间长,控制品质下降;如果 σ 很小而 $\dot{\sigma}$ 很大,则将导致无法在切换线上形成滑动,造成系统的抖振。为兼顾趋近速度和控制品质,减小抖振,本文采用模糊推理来实时修正 u_k 的大小,具体方法如下:

滑动模态 $\sigma = 0$ 是一个非模糊化的切换线,将其扩展为模糊切换线,即 $\sigma = \text{ZERO}$ 是 $\sigma = 0$ 附近的一个模糊带。定义 δ 为滑动模态的厚度, $\sigma = 0$ 表示系统动态脱离稳定模态的程度;并定义 σ/δ 为一模糊集合, $\dot{\sigma}$ 为另一模糊集合。根据二者的大小,用模糊推理来得到相应的 u_k 。

σ/δ 的论域为 $[-L_1, L_1]$, $\dot{\sigma}$ 的论域为 $[-L_2, L_2]$, u_k 的论域为 $[-K_m, K_m]$, K_m 的取值为速度环的最大输入。在各自的论域上划分为不同的语言变量,并设

$$L(\sigma/\delta) = [\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}] = \{\tilde{F}_\sigma^1, \tilde{F}_\sigma^2, \tilde{F}_\sigma^3, \tilde{F}_\sigma^4, \tilde{F}_\sigma^5, \tilde{F}_\sigma^6, \tilde{F}_\sigma^7\}$$

$$L(\dot{\sigma}) = [\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}] = \{\tilde{F}_{\dot{\sigma}}^1, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^2, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^3, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^4, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^5, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^6, \tilde{F}_{\dot{\sigma}}^7\}$$

$$L(u_k) = [\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}] = \{\tilde{F}_{u_k}^1, \tilde{F}_{u_k}^2, \tilde{F}_{u_k}^3, \tilde{F}_{u_k}^4, \tilde{F}_{u_k}^5, \tilde{F}_{u_k}^6, \tilde{F}_{u_k}^7\}$$

控制规则可写成如下形式的一组 If-Then 条件语句

表 1 模糊规则表

$\dot{\sigma}$	σ						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	PS	PM
NM	NB	NB	NM	NS	ZE	PM	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PM	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NM	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NM	NM	ZE	PS	PM	PB	PB
PB	NM	NS	PS	PM	PB	PB	PB

If σ/δ is \tilde{F}_σ^i and $\dot{\sigma}$ is \tilde{F}_σ^j Then $u_k = \tilde{F}_u^s$

$i = 1, 2, \dots, 7, j = 1, 2, \dots, 7, s = 1, 2, \dots, 7$

控制规则如表 1 所示。

对上述关系按 Mamdani 推理方法进行推理, 便可得到相应的控制信号。

第 i 条规则得到的模糊关系为

$$\tilde{R}_{ij} = \tilde{F}_\sigma^i \times \tilde{F}_\sigma^j \times \tilde{F}_u^s$$

即

$$\tilde{R}_{ij}(\sigma, \dot{\sigma}, u_k) = \tilde{F}_\sigma^i \tilde{F}_\sigma^j \tilde{F}_u^s \quad (5)$$

其中: \times 为笛卡尔积, \min 为 \min 运算。则总的模糊规则所对应的模糊关系为

$$\tilde{R} = \bigwedge_{i=1}^{49} \tilde{R}_{ij}$$

即

$$\tilde{R}(\sigma, \dot{\sigma}, u_k) = \bigwedge_{i=1, j=1}^{7,7} [\tilde{F}_\sigma^i \tilde{F}_\sigma^j \tilde{F}_u^s] \quad (6)$$

其中 \bigwedge 为 \max 运算。采用 $\max \min$ 推理合成规则, u_k 的隶属度函数为

$$\mu(\tilde{u}_k) = (\tilde{F}_\sigma \tilde{F}_\sigma) \circ \tilde{R} \quad (7)$$

采用重心法进行模糊判决, 有

$$u_k = \left(\int_{-K_m}^{K_m} u_k \mu(\tilde{u}_k) du_k \right) / \left(\int_{-K_m}^{K_m} \mu(\tilde{u}_k) du_k \right) \quad (8)$$

这样, 通过模糊推理可得到 u_k 的大小。考虑到 σ/δ 与 $\dot{\sigma}$ 两方面因素, 便可使系统的抖振大大减小。

3 仿真研究

某舰炮交流伺服系统的速度环参数为

$$K_1 = 52.3, G(s) = \frac{0.02s + 1}{a_1s^2 + a_2s + 1}$$

但是随着负载转动惯量的变化, $a_1 = 0.000119 \sim 0.000529, a_2 = 0.020$ 。减速系数 $K_2 = 1/209$, 速度环最大输入 $K_m = 10$ 。取 $c = 5, \delta = 0.02, L_1 = 15, L_2 = 20$, 在有负载扰动(即发射炮弹时的瞬间脉冲干扰, 周期为 2 s, 幅度为 $100 \text{ N} \cdot \text{m}$, 占空比为 5%)的情况下, 作指令信号为 $60^\circ \sin t$ 正弦信号的跟踪控制仿真。最大速度为 $60\% \text{ s}$, 最大加速度为 $60\% \text{ s}^2$ 。

当速度环为三阶系统时, 建模过程中总是简化为二阶环节。为考察对建模简化的适应性, 在相同条件下进行阶次变化时(变为三阶)的跟踪控制仿真, 仿真结果如图 1 和图 2 所示。其中曲线 1, 2 和 3 分别为 $a_1 = 0.000119, a_1 = 0.000529$ 和三阶速度对象的误差曲线。

由图可见, 采用本文提出的控制器, 在各种对象特性变化的情况下, 其相轨迹很快进入滑动模式,

稳态误差小于 3 mil (1 mil 为 360° 的 $1/6000$) 且响应速度较快; 当误差的幅度很小时, 相点偏离滑动线, 但很快又进入滑动模式, 不存在极限环。图 1 中原点附近是多条曲线的结果, 并非极限环, 所以该控制器具有良好的控制性能。

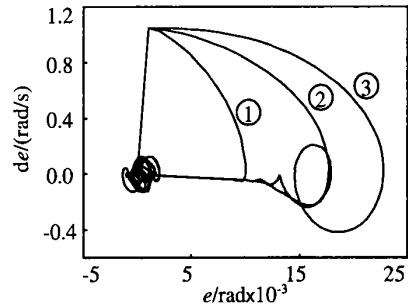


图 1 正弦跟踪控制相图

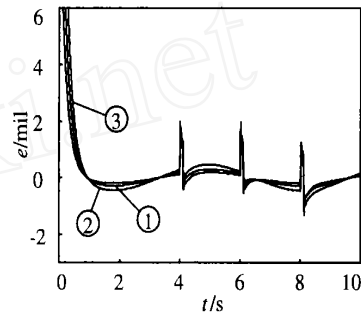


图 2 正弦跟踪控制的误差曲线

4 结 论

本文针对交流伺服系统的位置跟踪控制, 提出一种新型模糊滑模控制器。该控制器将指令信号的一阶导数作为平均控制, 并与一模糊控制量相加作为速度指令信号。该模糊控制量可以补偿速度环引起的滞后, 提高控制精度。所提出的模糊滑模控制器在求取控制时与系统参数无关, 因此系统的控制性能几乎不受系统参数变化的影响, 只在控制的初始阶段有限次穿越切换线, 稳态时系统的运动完全在切换线附近很小的范围内作滑动运动, 对阶次的变化和干扰具有很强的抑制能力。该控制器结构简单, 实现方便, 控制精度高, 鲁棒性强, 特别适合于高精度位置伺服系统的跟踪控制。

参考文献(References):

[1] Feng C B, Wu Y Q. A design scheme of variable structure adaptive control for uncertain dynamic systems[J]. Automatica, 1992, 132(4): 561-567.
[2] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (下转第 119 页)

入度大于 1 的顶点的状态为分, 若 $C_{mi} = C_{jm} = 1$ 且 $i \neq j$, 则 $t_m = 0$ 。

4 结 语

本文提出一种变结构耗散网络的新算法。该算法借助于线路现场终端 FTU 的数据采集与监控装置 SCADA 和通讯网络提供的丰富的决策支持, 可以实现配电网改变运行方式时负荷的再分配, 计算配电网的实际线损, 分析配电系统供电的可靠性, 解决配电网正常运行时负荷均衡和配电网故障隔离后的优化恢复问题。

目前, 还有一些较为先进的方法, 用以解决配电系统的网络重构(变结构)的优化问题, 例如:

1) 建立以可靠性指标最优为目标函数的数学模型, 采用 Tabu 搜索方法寻优;

2) 建立以降低电能损耗最优为目标函数的数学模型, 采用遗传算法进行求解。

参考文献(References):

- [1] 刘健, 倪建立. 银川城区配电网自动化工程[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 56-60
(Liu Jian, Ni Jianli. Distribution net automation engineering in Yinchuan city[J]. *Autom Electr Power Syst*, 1998, 22(8): 56-60)
- [2] 王泉根. 配电自动化综述[J]. 电世界, 2001, 42(8): 4-6
(Wang Quangen. Comprehensive description of distribution automation[J]. *Electric World*, 2001, 42(8): 4-6)
- [3] 王秀丽. 以提高系统可靠性为目标的配电网重构[J]. 中国电力, 2001, 34(9): 40-43
(Wang Xiuli. Distribution system reliability and network reconfiguration[J]. *Electric Power*, 2001, 34(9): 40-43)
- [4] Marija Ilic, Petter Skantze. Electric power system operation by decision and control[J]. *IEEE Control Systems Society*, 2000, 20(4): 25-40
- [5] Wei Zhang, Michael S Branicky, Stephen M Phillips. Stability of networked control systems[J]. *IEEE Control Systems*, 2001, 21(1): 84-99
- [6] 刘健. 变结构耗散网络[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [7] 张炜. 电力系统分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- [5] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律—NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 11(3): 221-225
(Han Jing-qing. Nonlinear states errors feedback control—NLSEF[J]. *Control and Decision*, 1995, 11(3): 221-225)
- [6] 万德均. 惯性导航初始对准[M]. 南京: 东南大学出版社, 1990
- [7] 王恩平. 线性控制系统理论在惯性导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984
- [8] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998
- [3] Sung-woo Kim, Ju-jang Lee. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface[J]. *Fuzzy Sets and System*, 1995, 71(3): 359-367.
- [4] Yi A Y, Chang M J. A robust fuzzy logic controller for robot manipulators with uncertainties[J]. *IEEE Trans SMC*, 1997, 27(4): 706-713
- [5] 马勇, 许晓鸣, 李辉. 基于模糊逻辑系统的变结构控制[J]. 电气自动化, 2000, 22(1): 4-6, 13
(Ma Yong, Xu Xiaoming, Li Hui. Variable structure control based on fuzzy logic system[J]. *Electr Autom*, 2000, 22(1): 4-6, 13)
- [6] 李少远, 席裕庚. 模糊滑动模态控制系统的性质分析[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 14-18
(Li Shaoyuan, Xi Yugeng. Analysis of fuzzy sliding mode control systems[J]. *Control Theory Appl*, 2000, 17(1): 14-18)

(上接第 112 页)

(上接第 115 页)