

提高电机位置伺服系统鲁棒性能的最优模糊模型跟踪控制

Robust Optimal Fuzzy Control Electrical Position
Servo System by a Novel Model Following Approach

李国民 曹东 夏长亮 (天津大学自动化学院 300072)

Tsang K M (香港理工大学电机系)

Li Guomin Cao Dong Xia Changliang (Tianjin University 300072 China)

Tsang K M (Hong Kong Polytechnic University)

摘要 提出一种应用在位置伺服系统上的最优模糊模型跟踪控制方案,并且将其与最优模糊控制进行了比较。研究表明,该方案即使在大的参数变化与负载扰动情况下,仍能保持系统输出最优或近似最优,具有很好的鲁棒性。

关键词: 模糊控制 模型参考控制 鲁棒性 最优控制

中图分类号: TP273.1

Abstract In order to improve the robustness of Optimal Fuzzy Control (OFC), this paper presents an Optimal Fuzzy Model Following Control (OFMFC) scheme for position servo systems. The proposed scheme is based on OFC and a novel model following control architecture. A Genetic Algorithm is employed to optimize fuzzy controller parameters. Numerical results illustrate that the proposed control can retain optimal system performance even in the presence of significant parameter variations. The comparison between OFMFC and OFC shows that OFMFC is much more robust than pure OFC scheme.

Keywords: Fuzzy logic control, model reference control, robustness, optimal control

1 引言

目前,模糊控制(FLC)在工业控制领域已经广泛应用,它具有模仿人类思维和推理、控制性能优良、克服参数变化和负载扰动等优点。但是设计模糊控制器往往需要通过反复试验与调整才能确定控制器的参数(如比例系数),控制效果达不到最优^[1,2]。可以将优化技术与 FLC 结合起来形成最优模糊控制(OFC),用以解决上述问题。可是 OFC 也依赖于被控对象模型,受参数变化和负载扰动等

因数的影响较大。于是,如何提高 OFC 的鲁棒性就成了很有研究价值的问题^[3]。

本文作者曾经提出了一种新型模型跟踪控制(MFC)方案^[4],较好地解决了伺服系统鲁棒控制等问题。在此方案中,参考模型采用被控对象在无参数变化与负载扰动等理想情况下的线性化模型,大大减少了对被控对象精确建模的要求,并且校正机构只需要输出偏差作为输入量。需要指出,MFC 方案采用了可以独立设计的模型控制器。结果表明:这种新型的 MFC 方案对参数变化和负载扰动

李国民 男,1963年生,副教授,博士,硕士生导师,从事自动控制与工业自动化的教学与研究工作,现主要研究领域有:电力电子与电力传动,鲁棒与新型控制策略,模糊控制与智能系统,楼宇自动化。

曹东 男,1979年生,工学学士,研究方向电力传动系统的智能控制等。

型 $G_m(s)$ 的输出优化以及被控对象的角速度给定, 其结构图见图 3。

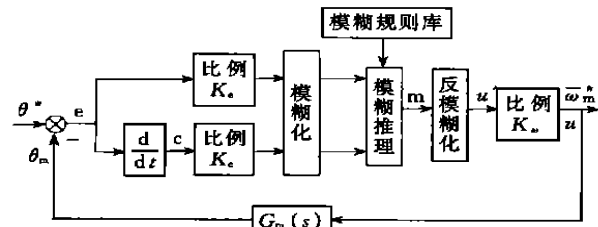


图 3 FMC 系统结构

Fig 3 System structure of FMC

FMC 有两个输入量: 角位移的给定值与实际值之间的偏差及其变化率; 一个输出量: 参考模型的角速度给定值 ω_m^* 。利用比例因子 K_e 和 K_c 。角偏差及其变化率被设定在论域 $[-1, +1]$ 之内。

FMC 可以在 MATLAB 的 SIMULINK 和 FUZZY Control Toolbox 下仿真计算^[8]。下面简要介绍设计过程, 详情见文献 [5]。

3.2.1 基于遗传算法的比例因子的最优设计

比例系数 K_e 、 K_c 和 K_ω 不但影响系统暂态和稳态性能, 甚至在某些情况下影响系统的稳定性。以前通常采用反复试验法来确定 K_e 和 K_c , 此法很费时且很难找到最优值。本文采用遗传算法来确定 K_e 和 K_c 的最优值, 用最大角速度来确定 K_ω 。

首先将 (K_e, K_c) 编码组成具有一定长度的编码串, 形成初始群体, 然后利用生物进化原理, 按照标准的 ITAE 适配值函数

$$ITAE = \int t |e| dt \tag{2}$$

式中 e ——角位移给定值与实际值的偏差

对各个体进行筛选, 从而使适配值高的个体被保留下来, 进而进行复制、交叉、变异等一系列遗传操作, 形成新的群体。新群体包含上一代大量信息, 并且引入了新的优于上一代的个体。这样不断循环, 群体中各个体的适应度不断提高, 直到满足一定的条件为止。此时, 群体中适配值最高的个体即为 (K_e, K_c) 的最优解。

通过在每一代中选择 40 个优秀个体。然后不断重复, 经过 25 次循环迭代后, K_e 和 K_c 达到最优结果, $K_e=0.8095$, $K_c=0.0377$, $K_\omega=20$ 。具体的实现过程见图 4。

3.2.2 模糊化

本文取“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正

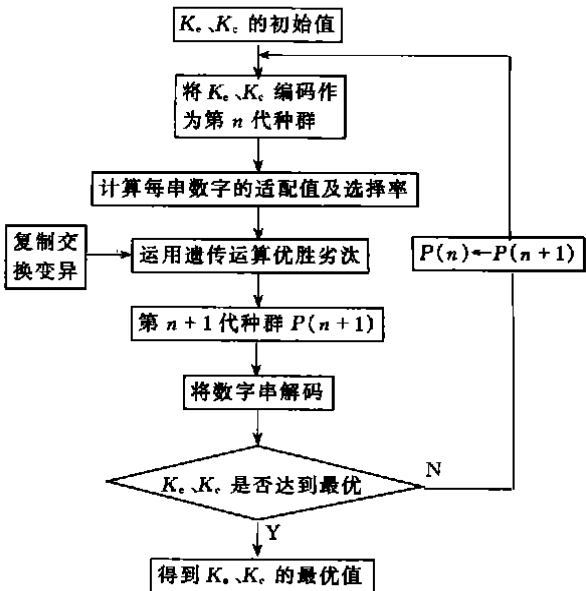


图 4 遗传算法示意图

Fig 4 Sketch diagram of the Genetic Algorithm

小”、“正中”、“正大”七大语言值 (NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB), 对“偏差”、“误差变化”、“控制量”进行量化。

3.2.3 模糊规则库

本文建立了一个既完备又简单的模糊规则库, 共有 49 条规则, 见表。

表 模糊规则库

Tab Rules base of the fuzzy control		偏差量 e						
控制量 m		偏差量 e						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
偏差变化量 C	NB	NB	NB	NB	NB	NM	Z	Z
	NM	NB	NB	NB	NB	NM	Z	Z
	NS	NM	NM	NM	NM	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	Z	PM	PM	PM	PM
	PM	Z	Z	PM	PB	PB	PB	PB
	PB	Z	Z	PM	PB	PB	PB	PB

3.2.4 反模糊化

本文采用重心法, 将模糊集 m 的重心作为输出控制量。

3.3 PID 校正机构的设计

PID 校正机构的设计可以转换为被控对象在最差情况下的反馈控制器的设计^[4]。假如被控对象实际时间常数是额定值的 10 倍 (在最差情况下), 其传递函数可表示为

$$G_p(s) = \frac{\bar{\omega}(s)}{\bar{\omega}^*(s)} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{s} \cdot \frac{0.97(9.7 \times 10^{-3}s + 1)}{4.8 \times 10^{-6}s^3 + 0.0013s^2 + 0.019s + 0.97} \quad (3)$$

由式(1)可得PID校正机构的传递函数 $G_a(s)$ 。由控制对象和PID校正机构组成的反馈控制系统开环传递函数可表示为

$$G_a(s)G_p(s) = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{K(9.7 \times 10^{-3}s + 1)(T_{ia}T_{da}s^2 + T_{ia}s + 1)}{4.8 \times 10^{-6}s^3 + 0.0013s^2 + 0.019s + 0.97} \quad (4)$$

其中开环增益为

$$K = \frac{0.97K_{p2}}{T_{ia}} \quad (5)$$

利用MATLAB中的控制系统工具箱,可以得到随 T_{da} 和 T_{ia} 变化而变化的反馈控制系统的根轨迹集合。通过分析,最后确定了 $T_{ia} = 0.25$ 、 $T_{da} = 0.1$ 。

选取一对阻尼系数为 0.707 且靠近虚轴的共轭极点,可得开环增益系数 $K = 77.6$, 因而PID校正机构传递函数为

$$G_a(s) = 20 \left(1 + \frac{1}{0.25s} + 0.1s \right) \quad (6)$$

4 仿真

图2中的速度系统采用额定参数,其传递函数为

$$\left. \frac{\bar{\omega}(s)}{\bar{\omega}^*(s)} \right|_{\text{额定值}} = \frac{0.0941s + 9.7}{4 \times 10^{-6}s^3 + 0.0013s^2 + 0.19s + 9.7} \quad (7)$$

参考模型 $G_m(s)$ 可表示如下:

$$\left. G_m(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{\bar{\omega}(s)}{\bar{\omega}^*(s)} \right|_{\text{额定值}} = \frac{0.0941s + 9.7}{4 \times 10^{-6}s^4 + 0.0013s^3 + 0.19s^2 + 9.7s} \quad (8)$$

在电机位置伺服系统中,被控对象有两个重要参数:电气时间常数 T_e 、机电时间常数 T_m 。在负载运行时机电时间常数 T_m 剧烈变化,因此,下面的分析将着重考虑 T_m 变化时的情况。

图5是 $T_m = 3T_{m0}$ 时 OFMFC 系统阶跃响应曲线,由图可知,控制对象输出完全跟随参考模型输出。两条输出曲线基本没有差别。

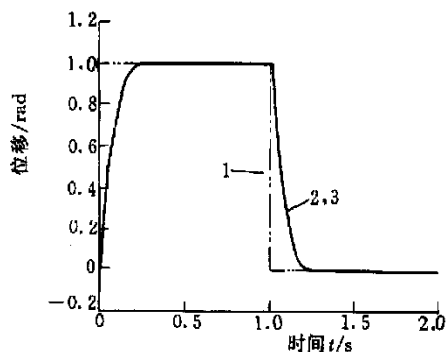


图5 $T_m = 3T_{m0}$ 时 OFMFC 系统阶跃响应曲线

1—参考输入 2—模型输出 3—对象输出

Fig. 5 Step response curve of OFMFC while $T_m = 3T_{m0}$

图6是 $T_m = 5T_{m0}$ 时 OFMFC 系统和 OFC 系统的阶跃响应曲线。由图可知,OFMFC 的控制效果很好,其实际输出量几乎接近最优,而 OFC 系统的输出曲线存在明显的振荡。

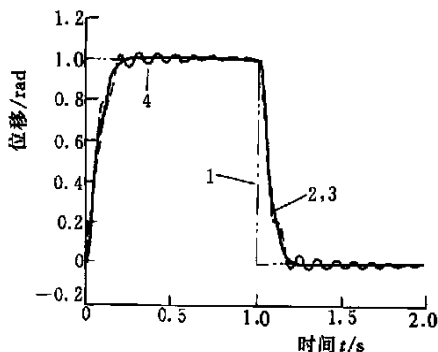


图6 $T_m = 5T_{m0}$ 时 OFMFC 系统和

OFC 系统阶跃响应曲线

1—参考输入 2—模型输出 3—OFMFC 4—OFC

Fig. 6 Step response curve of OFMFC and OFC

while $T_m = 5T_{m0}$

上述结果表明:OFMFC 方案能在大范围内实现控制性能最优或接近最优,并且 OFMFC 系统的鲁棒性明显优于 OFC 方案。

5 总结

本文提出了一种位置伺服系统 OFMFC 方案,这种方案将 OFC 和 MFC 结合在一起,因而两者优点兼备。大量结果证明:OFMFC 方案即使在参数改变和负载扰动的情况下仍能保持被控对象输出最优或接近最优。通过比较 OFMFC 和 OFC,可知 OFMFC 的鲁棒性更强,即引入 MFC 大大提高了 OFC 的鲁棒性。

(下转第 20 页)

从而可计算出电机的输出功率

$$P_3 = P_2 - p_e \quad (31)$$

并进而计算出电机的效率

$$\eta_2 = \frac{P_3}{P_2} \quad (32)$$

将式(20)、(26)、(29)和(32)各量的计算数值代入式(27),最后可得电网侧输入功率因数的计算值为 $\lambda=0.263$ 。

5 实验结果及结论

本项目测量功率因数的实验电路如图6所示,测出实验数据并使用公式

$$\lambda = P_1 / (\sqrt{3} U_L I_{av}) \quad (33)$$

作数据处理,得出电网侧功率因数 $\lambda=0.254$ 。上式中 P_1 是电网侧测得的实功率。

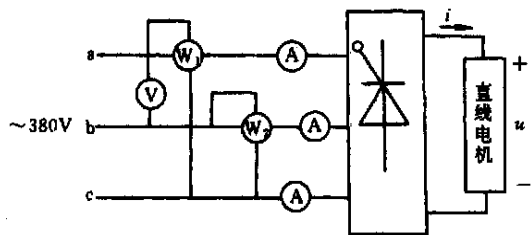


图6 测量输入功率和功率因数的实验电路

Fig. 6 Experimental circuit for measuring input power and power factor

实验测出的 λ 值比前文计算出的 λ 值小3.5%,主要是因为计算变流器和电机的各种损耗所使用的模型(公式)不完全准确,从而造成了上述的误差。

由以上分析可知,本文对 λ_e 、 K_S 和 λ 的推理计算与实验结果吻合,从而证明本文的理论和方法基本上是正确的。

参考文献

- 1 Cui Guangyuan, Chen Shikun. Design of a linear oscillogram for driving double-deck riddles. Proc. of China International Conference on Electrical Machines, Sep. 18-20 1991, China: 692~695
- 2 郑兆昌. 机械振动(上册). 北京: 机械工业出版社, 1980
- 3 崔广渊, 胡福荣. 往复式振动电机带双质量振动筛在机电共振运行状态下的力学分析. 洛阳工学院学报, 1988(3): 115~120
- 4 朝阳振动机械厂. 电磁振动给料机, 1986
- 5 赫伯特 H. 伍德逊. 机电动力学. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 6 宋书中, 崔广渊. 共振式直线电机微机控制系统. 电气自动化, 1996(4): 13~15
- 7 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 2000

收稿日期 2002-11-26

(上接第46页)

参考文献

- 1 诸静. 模糊控制原理与应用. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 2 Driankov D, Hellendoom H and Reinfrank M. An introduction to Fuzzy Control 1993 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg USA)
- 3 Chen Chiehli, Chen Peychung. A fuzzy model following control system design procedure Pro of Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems (IFES' 91), Japan, 1991: 718~729
- 4 Li Guomin, Tsang K M and Ho S L. A novel model following scheme with simple structure for electrical position servo systems Int. J. Sys. Sci. 1998, 29(9): 959~969

- 5 Li Gomin, Tsang K M and Li Hui. Concurrent FL-PI controller designed using GAs Pro. 34th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Champaign-Urbana, USA, 1996: 942~949
- 6 邵裕森, 巴筱云. 过程控制系统及仪表. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 7 Cheng Fengfu and Yeh Shengnian. Application of fuzzy logic in the speed control of AC servo system and an intelligent inverter IEEE Trans. Energy Conversion, 1993, 8(2): 312~318
- 8 Swanson S R. Aircraft model following control simulation with a fuzzy optimizer Pro of 3rd International Conference on Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems, USA, 1993: 232~235

收稿日期 2002-08-23