

基于模糊与遗传优化 PID 的电动助力转向系统的设计与实现

郑 胜¹, 张向文^{1,2}

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西自动检测技术与仪器重点实验室桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对电动助力转向 (EPS) 系统设计时路感不清晰合理的问题, 提出了一种基于模糊推理的电动助力转向目标电流的确定方法; 针对传统 PID 控制参数难整定的问题, 设计了一种基于遗传优化 PID 的控制算法, 快速跟随目标电流的变化, 达到控制电机输出转矩的目的。为了缩短研发周期和降低成本, 基于 dSPACE, 搭建了 EPS 半实物仿真实验平台并进行实验测试研究。结果表明, 基于模糊方法确定的目标电流, 路感清晰合理, 满足低速轻便性和高速稳定性, 遗传优化的 PID 控制器响应速度快, 超调量小于 5%, 实现了良好的助力效果。

关键词: 电动助力转向; dSPACE; 助力特性; 模糊与遗传优化 PID

Design and Implementation of Vehicle EPS System Based on Fuzzy and Genetic Optimization PID Algorithm

Zheng Sheng¹, Zhang Xiangwen^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In view of unintelligibility and irrationality of road feel, the target current's determination method of EPS is proposed based on a fuzzy algorithm. For the difficulty to set PID parameters, the PID controller optimized by a genetic algorithm is used to fast track target current to control the output torque. In order to shorten the software development cycle and cut the development cost down, the semi-physical simulation test bench is built based on dSPACE. The experimental research is done. The result shows that the designed determination method of target current based on fuzzy algorithm makes the road feel clear and reasonable, and meets the demand of easiness at low speed and stability at high speed. Genetic optimization PID controller's response is fast, and the overshoot is less than 5%, and achieves the better power steering effect.

Keywords: electric power steering; dSPACE; assist characteristic; fuzzy and genetic optimization PID

0 引言

电动助力转向系统 (EPS) 作为一种先进的汽车助力转向控制技术, 已经成为汽车助力转向系统的发展方向^[1], 其控制算法的研究是其中的关键技术之一。目前 EPS 系统软件算法主要有 PID 控制^[2]、模糊控制^[3]、滑模控制^[4]、预测控制^[5]算法等。由于传统的设计方法路感不清晰合理, 助力电机控制算法复杂, 存在硬件不易实现, PID 控制参数不好整定的问题。本文用模糊算法确定助力电流, 利用遗传优化 PID 算法跟踪助力电流的变化, 控制输出转矩, 利用 dSPACE 的高性能开发设计平台及其丰富资源, 搭建了汽车电动助力转向系统, 进行半实物仿真与测试验证。

1 系统总体结构及原理

电动助力转向系统 (EPS) 是由机械结构和电子单元组成。机械部分包括转向盘、转向柱、扭杆、助力电机、减速机机构和齿轮齿条等。电子部分包括扭矩、车速传感器, 电控单元和驱动电路等。工作原理是转矩与车速传感器测出转向盘上操纵力矩和车辆实时速度, 并将信号传递给 ECU, ECU 根据内置的控制策略和算法, 得出此时的理想助力矩, 再换算成相应的电机电流, 产生的助力矩经蜗轮蜗杆减速增扭后传送到机械转向系统, 与驾驶者的操作力矩叠加去克服转向阻力矩, 实现车辆的最终转向。

EPS 系统半实物仿真系统包括系统模型和监控软件的计算机、dSPACE 硬件平台和 EPS 系统试验台。系统原理框图如图 1 所示。

EPS 系统控制要解决两个问题: 1) 确定系统的助力特性曲线; 2) 采用何种控制算法能够快速稳定的跟踪助力特性曲线的变化, 这是 EPS 系统的两大关键技术^[6]。

2 助力特性曲线的确定

助力特性是指电机的电流与方向盘输入扭矩和车速的关系

收稿日期:2014-04-14; 修回日期:2014-05-15。

基金项目:广西科学研究与技术开发课题资助(桂科重 1348003-4);广西信息科学实验中心经费资助(20130302);广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助(YQ14111)。

作者简介:郑 胜(1987-),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事汽车电动助力转向系统方向的研究。

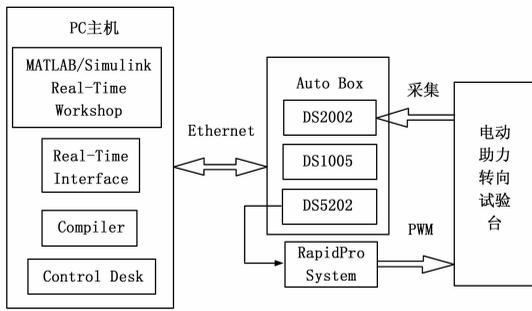


图 1 系统原理框图

曲线。电流与输入扭矩成正相关，与车速成负相关的关系，采用模糊算法确定，以转向盘的转矩 T 和车速 V 为输入，经由模糊算法模糊化、模糊推理、反模糊化后得到电动机的目标电流 I 。根据吉利自由舰助力电机的实际情况，确定系统的最大目标电流是 25 A。首先将车速、输入扭矩的绝对值分成不同的值域，模糊子集分别为 $PBBB$ 、 PBB 、 PB 、 PM 、 PS 、 PSS 、 $PSSS$ 。目标电流模糊子集为 $PBBB$ 、 $PBB2$ 、 $PBB1$ 、 $PB2$ 、 $PB1$ 、 $PM2$ 、 $PM1$ 、 $PS2$ 、 $PS1$ 、 $PSS2$ 、 $PSS1$ 、 $PSSS$ 。隶属度函数的形状对模糊控制器的性能有很大的影响。隶属度函数窄瘦时，误差较小、控制较灵敏；反之，控制较粗略和平稳。这里 $PSSS$ 部分采用 Z 型函数， $PBBB$ 部分采用 S 型函数，中间部分为三角型函数，采取最大最小值法，模糊规则表如表 1 所示。规则确定后，选择重心法作为反模糊化的方法。这种方法具有系统实时性好、助力特性调整方便等优点。按上述规则可以建立在不同车速下的扭矩—电流关系如图 2 所示。

表 1 目标电流的模糊规则表

	$PBBB$	PBB	PB	PM	PS	PSS	$PSSS$
$PBBB$	$PS1$	$PSS2$	$PSS2$	$PSS1$	$PSS1$	$PSS1$	$PSSS$
PBB	$PS2$	$PS1$	$PSS2$	$PSS2$	$PSS1$	$PSS1$	$PSSS$
PB	$PM1$	$PS2$	$PS1$	$PSS2$	$PSS1$	$PSS1$	$PSSS$
PM	$PB1$	$PM2$	$PS2$	$PS1$	$PSS2$	$PSS1$	$PSSS$
PS	$PB2$	$PB1$	$PM1$	$PS2$	$PS1$	$PSS2$	$PSSS$
PSS	$PBB2$	$PB2$	$PB1$	$PM1$	$PS1$	$PSS2$	$PSSS$
$PSSS$	$PBBB$	$PBB2$	$PB2$	$PM2$	$PS2$	$PSS2$	$PSSS$

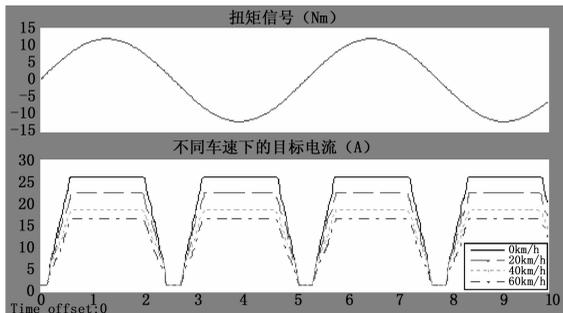


图 2 不同车速下 $I_c \sim T_h$ 变化曲线

从图 2 可以看出目标电流随扭矩的增大而增大，随车速的增大而减小；在扭矩很小时 I 几乎为零，不需要助力，在扭矩很大时， I 恒定，助力不变，防止“发飘”和电机损坏；扭矩

在很小与很大之间时，在区间内 I 几乎是线性关系。因此，通过模糊算法得到的目标电流 I 路感清晰合理，符合助力特性要求，可以作为电机目标电流变化的有效特性曲线。

3 遗传优化 PID 控制器算法

EPS 系统要求助力电机产生的助力作用不仅要迅速、灵敏、稳定，而且与驾驶员的输入相匹配，这就必须设计一个合适的电流控制器，用于控制助力电机的工作电流 I_a 来响应目标电流 I 信号，从而使助力电机输出相应的助力矩^[7]。PID 控制器经典、成熟、可靠，算法简单，实际应用广泛，易于编程实现。但 PID 控制参数只能通过大量实验调试获得，不易获得最优参数。采用遗传算法整定 PID 参数，其实现原理框图如图 3 所示。

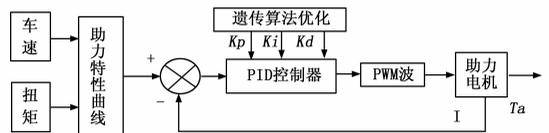


图 3 算法实现原理框图

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是模拟自然界遗传机制和生物进化论的一种并行随机搜索最优化方法^[8]。它把要优化的参数用基因型编码来表示，并对基因染色体进行复制、交叉、变异操作，以适应度函数作为评价指标，选择适应度函数较高的个体来进化，直到满足终止条件为止。

由于 PID 参数在线整定是依据系统实时输出与设定输入的偏差来计算个体适应度。但由于个体适应度的评价包含偏差的积分，需要较长时间，导致控制实时性不是很好，这里采用离线整定 PID 控制器参数。离线整定是根据已知被控系统的数学模型对其优化并用整定后得到的参数对系统设计。

遗传算法优化 PID 参数步骤如下。

1) 初始化种群的产生：

取样本数为 50，采用二进制编码，通过对系统带载和空载的联调效果，确定助力电机控制的 PWM 载波频率为 20 kHz 和设置 PID 参数合理范围为： Kp 为 0~20， Ki 为 0~50， Kd 为 0~10。确定染色体长度为 20 位。

2) 控制模型的建立：

电机为吉利自由舰助力转向电机，转向轴为齿轮齿条式。根据参考文献^[9]，可以建立下面的模型。

$$\text{电机的动力模型: } J_m \ddot{x} + B_m \dot{x} = T_m \tag{1}$$

$$\text{电流: } I = K_v T_c \tag{2}$$

$$\text{扭矩: } T_c = K_t \alpha \tag{3}$$

$$\text{电磁转矩: } T_m = K_a I = K_a K_v T_c = K_a K_v K_t \alpha \tag{4}$$

将式 (4) 代入 (1) 得：

$$J_m \ddot{x} + B_m \dot{x} = K_a K_v K_t \alpha \tag{5}$$

根据电机输出位置对方向盘输入位置的跟随性，则建立电机输出位置 x 对方向盘输入位置 α 的开环传递函数为：

$$G_1(s) = \frac{x(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_v K_t K_a / B_m}{s(T_0 s + 1)} \tag{6}$$

式中， $T_0 = J_m / B_m$

$$\text{电机转动惯量 } J_m = 0.00018 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{电机粘性阻尼系数 } B_m = 0.003399 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$$

电磁转矩常数 $K_a = 0.04 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$

扭杆的扭转刚度 $K_s = 184.33 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$

蜗轮蜗杆减速机构的减速比为 $N = 1/16.5$

3) 适应度函数的设计:

对于 PID 控制的效果的评价指标主要有误差的时间积分、上升时间、超调量等, 本文采用误差绝对值时间积分性能作为参数选择的最小目标函数, 为了防止控制器输出过大, 在目标函数中加入控制输入的平方项, 为了减小上升时间, 在目标函数中加入上升时间, 最后可以建立目标函数如式 (7) 所示。

$$J = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)|) + \omega_2 u^2(t) dt + \omega_3 \cdot t_d \quad (7)$$

式中, $u(t)$ 为控制器的输出, $e(t)$ 为系统误差, t_d 为上升时间, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为权值, 分别取 0.999, 0.001, 2.0。适应度函数 $f = 1/J$ 。

4) 算子的复制、交叉与变异:

本文选用锦标赛选择法, 在种群中随机抽取若干个体, 将适应度较高的个体不断选择复制到下一代, 直到下一代种群被完全更新, 这样避免了遗传算法中常用的轮盘赌法出现复制过多适应度大的个体, 保持了种群个体的多样性^[10]。交叉选择单点交叉法, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1。

5) 优化结果:

经过 470 代进化, 优化性能指标 $J = 24.0179$, PID 参数达到稳定优化值: K_p 为 16.1353, K_i 为 35.3658, K_d 为 0.2535。

图 4 为遗传算法目标函数 J 的优化过程, 从图中可以看出经过 470 代优化后, 目标值已经趋于最优。图 5 是根据最优 PID 参数得到的阶跃响应曲线, 从图中可以看出, PID 控制阶跃响应超调量小于 5%, 稳定时间在 0.02 s 左右, 达到较好的控制效果。

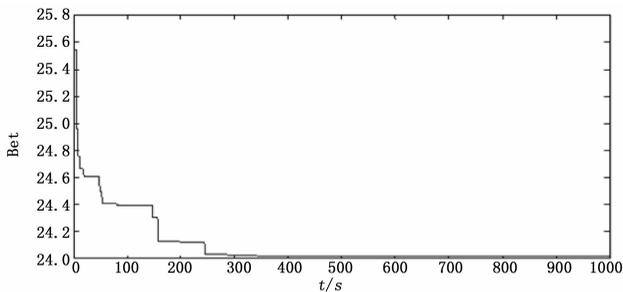


图 4 遗传算法优化过程

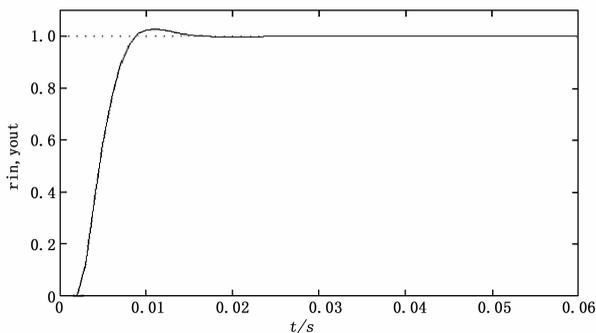


图 5 电机控制阶跃响应曲线

4 实验测试与分析

通过 Matlab/Simulink 设计控制算法、建立系统模型, 将 simulink 中模型生成的 .sdf 程序下载到 AutoBox 的嵌入式硬件平台上。硬件平台上有 DS1005 高性能板卡, 用于控制算法程序的实现, DS2002 卡用于 32 通道 16 位分辨率的 AD 转换, DS5202 卡的输出经桥式驱动模块 RapidPro System 驱动助力转向电机。计算机监控与数据下载系统通过 dSPACE 的 Control Desk 测试平台, 可以在运行过程中实时修改 EPS 的参数, 并以图文方式实时显示测试结果。所监控的数据分为 2 个部分, 一部分是用于实时改变 EPS 的控制参数和运行环境, 测试 EPS 电控单元的性能; 另一方面用于实时显示 EPS 控制输出, 以观测 EPS 控制单元是否能够按照所设计控制策略提供助力, 验证 EPS 控制器的功能。连接好 dSPACE 硬件平台和电动助力转向半实物实验台, 在 ControlDesk 设置好参数和 PID 控制器参数, 在 ControlDesk 界面实时显示控制效果, 如误差、超调量、稳定时间等。频率为 3 Hz 的正弦扭矩输入, 当输入车速为 40 km/h, 方向盘输入为幅值为 7 Nm 时, 其实时监测软件 ControlDesk 控制曲线如图 7 所示; 当输入车速 100 km/h, 输入扭矩幅值为 7 Nm, 其输出曲线如图 7 所示。

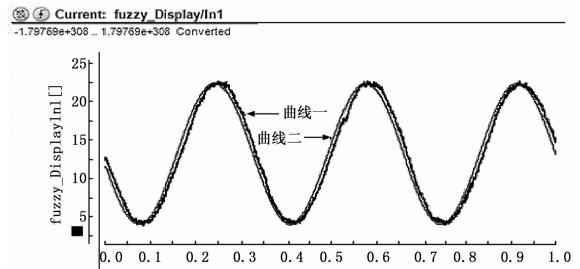


图 6 系统低速实时控制效果

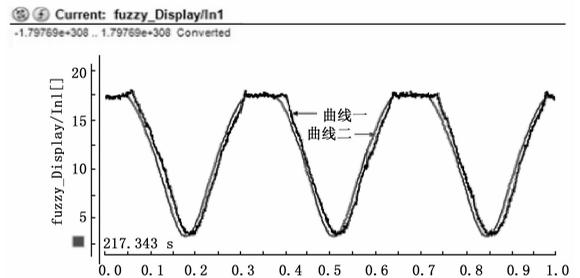


图 7 系统高速实时控制效果图

图中曲线一为控制器经过电流传感器 TBC25A05 调理后实际电机输出电流, 曲线二为根据助力特性曲线实时模糊出的目标电流, 从图 6 中可以看出两条曲线呈正弦曲线, 其频率与扭矩频率相同, 而且两条曲线几乎重合, 表明系统控制具有较高的实时控制跟随性能。从图 7 中可以看出当正弦扭矩输入信号达到当前车速的恒助力区时, 系统助力趋向稳定, 当助力未达到稳态区时, 其控制曲线与扭矩信号几乎重合, 且呈正相关的关系, 表明控制系统具有良好的高速稳定性。由于系统机械

惯性大, 传感器和采集系统的延时作用, 实际控制效果存在微小的滞后。

5 结束语

本文搭建了电动助力转向系统的半实物仿真试验台, 该平台以 dSPACE 为核心, 借助模块化建模工具 Matlab/Simulink 与 dSPACE 系统的无缝链接以及实时测试工具 ControlDesk, 采用模糊和遗传离线优化 PID 算法进行建模和控制算法分析, 并进行在线分析、调试和验证。实验结果验证了控制算法的良好控制性能和该实验平台的可靠性, 具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] Chen X, Yang T B, Chen X Q. A Generic Mode-Based Advanced Control of Electric Power-Assisted Steering Systems [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2008, 16 (6): 1298-1299.
- [2] 熊亮, 刘和平, 彭东林. 无转矩传感器汽车电动助力转向系统的控制策略 [J]. 汽车工程, 2013, (8): 711-715.

- [3] 赵树恩, 刘文文. 基于 NCD/自适应模糊 PID 的汽车 EPS 系统控制特性研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, (11): 2963-2965.
- [4] 邱亚琴, 张向文. 电动助力转向系统的滑模控制算法研究 [J]. 计算机仿真, 2013, (8): 159-163.
- [5] 谭光兴, 宋 畅, 吴列军, 等. 基于整车动力学模型的 EPS 预测控制策略仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (7): 1796-1799.
- [6] 向铁明, 易际明, 方 遵. 电动助力转向系统特性曲线的设计 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2009, (3): 35-38.
- [7] 向 丹, 迟永滨, 李武波, 等. 电动助力转向系统控制策略及其仿真研究 [J]. 控制工程, 2013, (2): 254-258.
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
- [9] 谢 刚, 殷国富, 等. 基于 PID 参数自整定控制的电动助力转向系统跟随性研究 [J]. 机床与液压, 2007, 7 (7): 15-17.
- [10] 国 珍. 改进遗传算法在无刷直流电机调速系统 PID 参数优化中的应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, (7): 90-91.

(上接第 2762 页)

识别技术。随着 Web 服务规模的增大, 传统的监控技术无法实时地诊断并定位发生异常的 Web 服务。本文提出了一种 Web 服务故障自动诊断框架, 并提出了一种基于 Viterbi 方法的故障诊断算法。实验表明, 该算法与其它相关的 Web 服务故障诊断算法相比准确性高, 并且对噪音数据有着很好的健壮性。

参考文献:

- [1] 朱大奇, 刘永安. 故障诊断的信息融合方法 [J]. 控制与决策, 2007, 22 (12): 1321-1328.
- [2] 范贵生, 虞慧群, 陈丽琼, 等. 基于 Petri 网的服务组合故障诊断与处理 [J]. 软件学报, 2010, 21 (2): 231-247.
- [3] Kopp O, Leymann F, Wutke D. Fault handling in the web service stack [M]. Service-Oriented Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 303-317.
- [4] Ardissono L, Bocconi S, Console L, et al. Enhancing Web service composition by means of diagnosis [A]. Business Process Management Workshops [C]. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 468-479.
- [5] Ardissono L, Console L, Goy A, et al. Cooperative model-based diagnosis of web services [A]. 16th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX 05) [C]. 2005: 125-130.
- [6] Ardissono L, Furnari R, Goy A, et al. Fault tolerant web service orchestration by means of diagnosis [M]. Software Architecture. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 2-16.
- [7] Yan Y, Dague P, Pencole Y, et al. A model-based approach for diagnosing fault in web service processes [J]. The International Journal of Web Services Research (JWSR), [6] 87-110, 2009.

- [8] Li Y, Ye L, Dague P, et al. A decentralized model-based diagnosis for BPEL services [A]. Tools with Artificial Intelligence, 2009. ICTAI'09. 21st International Conference on. IEEE [C]. 2009: 609-616.
- [9] Fugini M G, Mussi E. Recovery of faulty Web applications through service discovery [A]. Proceedings of the 1st SMR-VLDB Workshop, Matchmaking and Approximate Semantic-based Retrieval: Issues and Perspectives. 32nd International Conference on Very Large Databases [C]. 2006: 67-80.
- [10] Liu A, Li Q, Huang L, et al. Facts: A framework for fault-tolerant composition of transactional web services [J]. Services Computing, IEEE Transactions on, 2010, 3 (1): 46-59.
- [11] Van der Aalst W, Weijters T, Maruster L. Workflow mining: Discovering process models from event logs [J]. Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on, 2004, 16 (9): 1128-1142.
- [12] Forney Jr G D. The viterbi algorithm [J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61 (3): 268-278.
- [13] Al-Masri E, Mahmoud Q H. Investigating web services on the world wide web [A]. Proceedings of the 17th international conference on World Wide Web. ACM [C]. 2008: 795-804.
- [14] Bodik P, Goldszmidt M, Fox A, et al. Fingerprinting the data-center: automated classification of performance crises [A]. Proceedings of the 5th European conference on Computer systems [C]. ACM, 2010: 111-124.
- [15] Zhu Q, Tung T, Xie Q. Automatic Fault Diagnosis in Cloud Infrastructure [A]. Cloud Computing Technology and Science (Cloud-Com), 2013 IEEE 5th International Conference on. IEEE [C]. 2013, 1: 467-474.