

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.054

基于遗传整定 PID 参数的汽车永磁无刷电机伺服控制

邓福军, 邱斌武, 丁钱伟, 巢勇军, 陈肖杰

(江苏超力电器股份有限公司, 江苏 镇江 212321)

摘要:为进一步提高汽车永磁无刷电机伺服控制精度,设计一种遗传算法整定三环控制中 PID 参数的电机伺服控制方法。通过转速回路前馈的方法提高系统响应速度,利用遗传算法优化调节伺服参数。正弦信号跟随和直线进给实验研究结果表明:遗传算法整定参数获得了跟随性较弱的正弦信号,经改进处理后的绝对误差峰值减少 48.2%,绝对误差积分减少 39.0%。利用遗传调整时间得到较小跟踪误差,具有理想的跟踪效果,最大误差比原方法减少 42.5%,相对误差比传统方法减少 34.2%。该研究相对人工经验整定具有更优波动控制效果,可以拓宽到其他机械传动控制领域。

关键词:无刷电机;整定 PID 参数;遗传算法;伺服控制;跟踪效果

中图分类号:TP27 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0295-04

Automotive Permanent Magnet Brushless Motor Servo Control Based on Genetic Tuning PID Parameters

DENG Fujun, QIU Binwu, DING Qianwei, CHAO Yongjun, CHEN Xiaojie

(Jiangsu Chaoli Electric Appliance Co., Ltd., Zhenjiang 212321, China)

Abstract:In order to improve the servo control precision of permanent magnet brushless motor, a motor servo control method with three-loop controlled PID parameter tuning by genetic algorithm is designed. The system response speed is improved by the method of speed loop feedforward, and the servo parameters are optimized by genetic algorithm. The experimental results of sinusoidal signal following and linear feed show that the sinusoidal signal with weak following is obtained by genetic algorithm. The absolute error peak is reduced by 48.2%, and the absolute error integral is reduced by 39.0% after improved processing. Genetic is used to adjust time gain ing less tracking error with ideal tracking effect, namely the maximum error is reduced by 42.5% and the relative error by 34.2% compared with the traditional method. This research has better wave control effect and can be extended to other mechanical transmission control fields.

Keywords:brushless motor; tuning PID parameter; genetic algorithm; servo control; tracking effect

0 引言

现阶段,对车用无刷电机进行功率的调节基本都是采用驱动电机组成伺服电源^[1]。车用永磁无刷电机具备极低自振频率,对其控制性能也提出了更高标准。该检测程序可通过顺序调整伺服电机各状态参数来完成,从而建立三环反馈回路^[2-3]。可通过比例-积分-微分(PID)或者简化形式来设计以上控制器^[4-5]。

随着近年来研究的深入,已有学者将智能算法引入到神经网络中,其中大多数选择遗传算法^[6-7]。利用遗传算法对个体进行交叉变异计算,以此构造一个适合度函数,再对参数组合状态进行评估,从中剔除出最优个体来获取新个体^[8]。刘林等^[9]提出基于模型与规则相结合的 PI 控制

参数自整定方法,通过二自由度变量轮换法对 PI 控制参数进行控制优化,该方法可以快速整定得到一组合适的 PI 参数,具有良好的动态性能。刘延飞等^[10]提出基于改进遗传算法的 PID 参数整定方法来提升算法运行速度,通过电机传递函数建模分析,结果表明:所提方法进化代数减少了 79.0%,算法运行速度提升了 4.1%。金宏伟等^[11]选用遗传算法整定火力发电机三环控制参数,促进跟随性能的显著提升。

在实际工业领域应用方面,机械系统通常被作为一个刚体结构,混合液压机刚度相对其它类型的液压系统刚度更小^[12-14]。本研究采用遗传算法对汽车永磁无刷电机伺服系统三环控制中 PID 参数实施整定,使系统跟踪性能得到明显提升。

第一作者简介:邓福军(1979—),男,河南信阳人,工程师,硕士,研究方向为永磁同步电机控制算法及其电力电子应用技术和汽车热管理集成控制系统等,fujun7927@126.com。

1 理论模型

1.1 永磁无刷电机原理

为汽车动力系统配备的永磁无刷电机能够使其保持高效运行并有效降低能量损耗,目前已在液压驱动方面获得了广泛应用^[15-17]。结合图1测试结果可以发现,加入汽车永磁无刷电机后,需对三相电路参数进行转换得到 $d-q$ 坐标。

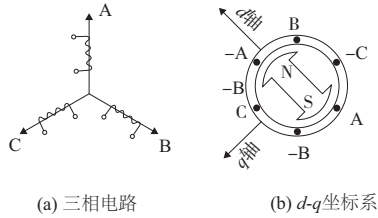


图1 汽车永磁无刷电机工作原理

汽车永磁无刷电机能够实现 d 轴电流的可靠调节,满足 $i_d = 0$ 。根据上述研究结果,建立如下电机控制模型:

$$u = R + L_q \frac{di}{dt} + \omega K_e \quad (1)$$

$$T_e = K_t i \quad (2)$$

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中:下标 d, q 为 $d-q$ 坐标分量; L 为电感; ω 为角速度; K_e 为反电动势系数; T_e 为输出转矩; i 为电流; u 为电压; R 为电阻; T_l 为负载转矩; K_t 为转矩指标; J 为转动惯量。

由此建立表1的模型数据。图2给出了汽车永磁无刷电机的具体控制流程。

表1 被控电机参数值

参数	数值
q 轴电感 L_q/mH	1.45
定子电阻 R/Ω	0.23
电机电矩常数 $K_t/(\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1})$	1.4
电机电压常数 $K_e/(\text{V} \cdot \text{r}^{-1} \cdot \text{min})$	89
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.007 96

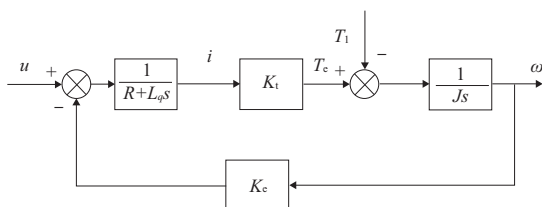


图2 汽车永磁无刷电机控制流程图

在无刷电机控制系统中设置了多个相互连接以及包含大量节点的结构,可以保持较低自振频率,因而需对其开展进一步深入研究^[18]。

本研究建立了点击传动系统振动模型,采集单自由度振动参数,建立电机与丝杠弹性阻尼力方程:

$$T_e - T_l = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta \quad (4)$$

式中: θ 为转动弧度; k 为结构弹性系数。

1.2 汽车永磁无刷电机三环控制模型

在伺服系统运行过程中,不仅需要对系统参数进行跟踪,同时还需对系统各个状态变量进行准确有效反馈。虽然多层反馈方法能够提高系统稳定性和控制精度,但无法满足快速性要求,因此需要通过转速回路前馈的方法来提高系统响应速度。图3是该试验特定控制框图,三环控制中调整的参数列于表2中。

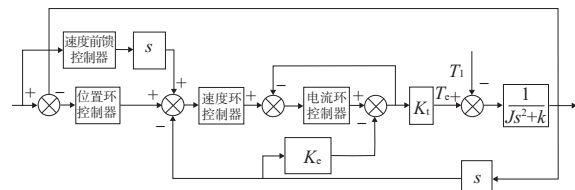


图3 本文电机控制流程图

表2 整定控制参数设置

参数	数值
电流环比例增益 $K_{pi}/(\text{V} \cdot \text{A}^{-1})$	10.6
电流环积分常数 T_{ic}/ms	15.3
速度环比例增益 $K_{ps}/(\text{Nm} \cdot \text{s})$	860
速度环积分常数 T_{is}/ms	12
位置比例增益 $K_{pp}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	80
速度前馈比例增益 $K_{sfp}/\%$	110

电流环是伺服控制的最内环,随着电机进入工作状态后,受各种外界条件影响也会产生很大的扰动性,通过试验得到电流环带宽 850 Hz。控制电路采用串联方式连接抗干扰仿真系统,经匹配后,建立传输函数 $1/(2\ 250s+1)$ 。

2 遗传算法的优化结果

根据以上研究结果,本文采用最小二乘法对三环控制中遗传参数进行优化,得到图4的适应度结果,共迭代 40 次。经过 51 次迭代后得到最终结果如表3所示。

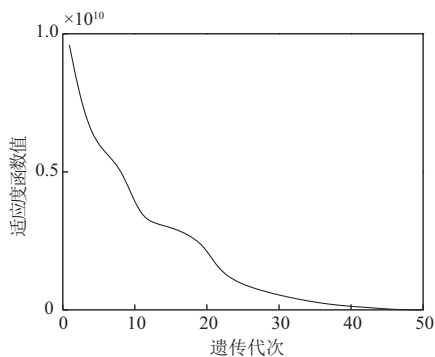


图4 算法迭代结果

表3 控制器参数选择

遗传参数值	控制器参数
9.96	$K_{pp} = 100.4 \text{ rad/s}$
12.70	$K_{pa} = 1 \text{ 150 Nm} \cdot \text{s}$
12.00	$T_{is} = 12 \text{ ms}$

经过遗传参数整定后,速度环的积分时间已经接近人工设定值,但位置环和速度环的变化值均超过手工设定值,因此推断采用人工调整的方式获得的参数并不适合。

根据以上处理方式,利用遗传算法来优化调节初始伺服参数,并将其输入该模型中来进行仿真试验,由此得到该系统幅频特性曲线。

3 优化结果的实验验证

3.1 正弦信号跟随实验

本实验针对电机设定转速变化幅度 10 r/min 与周期为 600 ms 正弦波,并通过人工经验遗传算法对系统伺服参数进行整定跟踪实验,得到图5的测试结果。由图5可以看出,通过遗传算法整定参数时获得了跟随性较弱的正弦信号,表现出明显的跟随性变化特点。图5测试结果表明,除了在初期启动阶段和换相过程中产生很大瞬态误差外,其他情况下则形成了相对稳定的误差。

表4是对正弦信号进行跟踪误差统计得到的数据。根据表4可知,经改进处理后的最大绝对误差(maximum absolute error, MAXAE)减少了48.2%,绝对误差时间积分(integrated time and absolute error, ITAE)减少了39.0%。以上各项指标表明,在进行正弦跟踪试验时,使用遗传算法调整参数可以更加准确地调整跟踪误差,从而获得更优异跟踪能力。

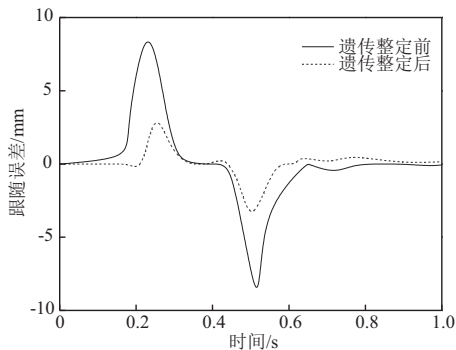


图5 不同参数下正弦信号跟随误差

表4 正弦信号下跟踪误差统计

控制参数整定方法	$M_{\text{MAXAE}}/\mu\text{m}$	$I_{\text{ITAE}}/(\mu\text{m} \cdot \text{s})$
人工经验	10.26	1.28
遗传算法	5.31	0.78

3.2 直线进给实验

实验是在 200 mm 线性进给情况下进行,对传统的手动调整和遗传算法调整后的跟踪偏差进行比较,得到图6和图7所示的测试结果。

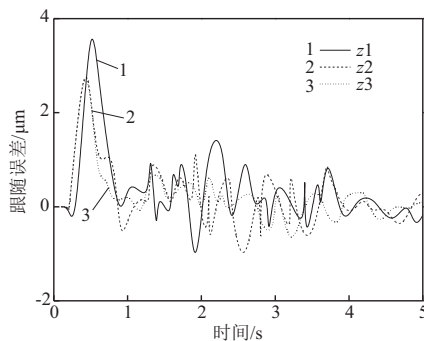


图6 原控制下跟踪误差

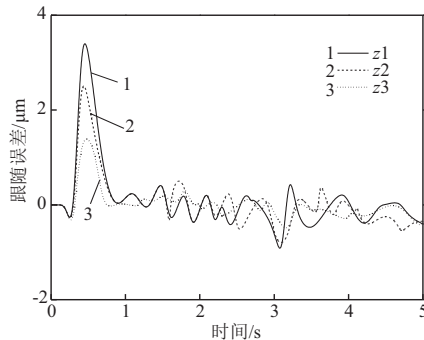


图7 遗传整定下跟踪误差

对图6和图7进行分析可以看出,利用遗传值来调整时间可以得到较小跟踪误差,并且具有

理想的跟踪效果。表5是直线进给下系统的跟随误差。根据表5可知,该方法的MAXAE值比原方法减少42.5%。并且,该方法的ITAE值比传统方法减少34.2%。

表5 直线进给下系统的跟随误差

控制参数整定方法	$M_{\text{MAXAE}}/\mu\text{m}$	$I_{\text{ITAE}}/(\mu\text{m}\cdot\text{s})$
人工经验	6.23	6.12
遗传算法	3.58	4.03

进入启动阶段后,伺服电机跟踪误差大于稳态下的跟踪误差。本文规定1~5 s时间段内为平稳期,比较该时段内进行误差和积分运算的结果,具体如表6所示。由表6可知,改进后的系统MAXAE值和ITAE值分别减少了48.8%和18.0%。通过对实际直线进给过程开展试验表明:在给定时间范围内,利用遗传实现了较好跟踪效果,有助于提高系统跟踪能力。

表6 直线进给1~5 s段系统的跟随误差

控制参数整定方法	$M_{\text{MAXAE}}/\mu\text{m}$	$I_{\text{ITAE}}/(\mu\text{m}\cdot\text{s})$
人工经验	1.62	3.16
遗传算法	0.83	2.59

根据以上两种试验全面比较的情况可以看出,采用人工经验调优后的控制系统获得了良好的跟踪性能。根据以上分析,本文提出了一种新型高精度线性进给系统,可以通过该系统实现高精度、低成本的连续进给控制。为了保证系统满足稳态偏差,本次使用的驱动器具备优异伺服控制精度,相比人工经验调整方法表现出了更好的误差起伏调节性能,具备更强伺服稳定控制性能。

4 结语

本文开展基于遗传算法整定参数的汽车永磁无刷电机伺服控制分析,取得如下结果。

1)通过遗传算法整定参数时获得了跟随性较弱的正弦信号,表现出来明显的跟随性变化特点。经改进处理后的绝对误差峰值减少了48.2%,绝对误差积分减少了39.0%。

2)利用遗传来调整时间得到较小跟踪误差,具有理想的跟踪效果,有助于提高系统跟踪能力,该方法最大误差比原方法减少42.5%,相对误差比传统方法减少34.2%。

参考文献:

- [1] 樊隆祥,周启武,彭东林,等.基于有限元及贝叶斯网络的数控滚齿机热误差建模研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2022,36(9):77-83.
- [2] 段凯原,胡利民,陈彦勇,等.微小型UUV无刷直流电机驱动控制系统[J].电机与控制应用,2020,47(4):35-39.
- [3] 褚亚强,刘腾,张艺凡,等.电主轴单元热误差半闭环主动控制方法[J].机械设计与研究,2021,37(5):111-116.
- [4] 赫巍巍,王立平,关立文,等.一种分析伺服进给系统动态误差的新方法[J].机械设计与制造,2021(10):159-164,168.
- [5] 袁新,徐燕.基于模糊PID的高精度汽车电子转向自动控制系统设计[J].计算机测量与控制,2025,33(8):129-136.
- [6] 蒋大伟,李加胜,刘品宽.基于MRAS-DCQGA算法的空气静压轴承伺服系统辨识及参数整定[J].机械设计与制造,2022(10):1-5.
- [7] 乔维德.电动汽车永磁同步电机BP神经网络故障诊断模型研究[J].石家庄学院学报,2024,26(6):50-55.
- [8] 张震.电动车用永磁同步电机设计及NVH优化[D].曲阜:曲阜师范大学,2025.
- [9] 刘林,曹鑫,钱梦飞,等.永磁同步电机电流环PI控制器参数整定及优化[J].电机与控制学报,2023,27(10):131-140.
- [10] 刘延飞,彭征,王艺辉,等.基于改进的遗传算法的有刷直流电机PID参数整定[J].计算机应用,2022,42(5):1634-1641.
- [11] 金宏伟,方匡坤,张方明,等.基于遗传算法整定参数的火力发电用电机伺服控制分析[J].中国工程机械学报,2024,22(1):27-31.
- [12] 陈东东,王晋,李子博,等.考虑谐振抑制的永磁同步电机长线缆驱动系统转子初始位置辨识技术[J].电工技术学报,2022,37(19):4938-4946.
- [13] 孙宇林.基于多目标优化的液压机同步及容错控制策略研究[D].天津:天津理工大学,2022.
- [14] 华强.汽车纵梁压制液压机滑块比例同步控制技术[J].锻压装备与制造技术,2023,58(4):67-70.
- [15] 邱马顺,华青松.基于田口迭代法的高速永磁同步电机电磁优化设计[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(5):713-719.
- [16] 秦乐.面向无刷电机驱动的机械臂神经网络FOC控制[D].西安:西安石油大学,2024.
- [17] 束建华.电动汽车用无刷直流电机回馈制动研究[D].西安:西安科技大学,2022.
- [18] 徐萌,王艳阳,高洁,等.基于双锁相环的永磁同步电机转子初始位置估算方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(19):49-57.

收稿日期:2023-09-14