

基于 ASAPSO 的火炮随动系统模糊控制策略

王继超, 冷育明, 戚延辉, 王 磊

(中国人民解放军 31696 部队, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 针对传统 PID 控制器因参数无法随负载变化而实时改变, 导致火炮随动系统控制效果不佳的问题, 设计了以空间矢量控制为理论基础的三闭环随动控制系统。该随动控制系统采用永磁同步电机 (PMSM) 作为执行电机, 并在系统位置环上加入了经自适应模拟退火粒子群优化算法 (ASAPSO) 优化参数后的模糊控制器。通过搭建系统仿真模型, 将这 2 种控制器分别运用在该随动控制系统的位置环上, 对比了 2 种控制器的位置响应、抗转矩扰动能力和目标跟踪能力。结果发现, 模糊控制器的参数经 ASAPSO 优化后, 系统的静态特性和动态特性比传统 PID 控制器更好, 能够有效克服转矩扰动等非线性因素的影响, 系统具有较好的目标跟踪性能。

关键词: 永磁同步电机; 粒子群优化算法; 模糊控制; 参数优化

中图分类号: TM 351; TJ 303^{+.8} **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)04-0053-05

doi: 10.12177/emca.2020.235

Fuzzy Control Strategy of Artillery Servo System Based on ASAPSO

WANG Jichao, LENG Yuming, QI Yanhui, WANG Lei

(31696 Troops, People's Liberation Army of China, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The parameters of traditional PID controller cannot be changed in real time with the change of load, which leads to the poor control effect of artillery servo system. In order to solve the problem, a three-closed-loop servo control system based on space vector control is designed. The permanent magnet synchronous motor (PMSM) is used as the executive motor, and a fuzzy controller optimized by adaptive simulated annealing particle swarm optimization (ASAPSO) is added to the position loop of the system. The proposed controller and traditional PID controller are applied to the position loop of the servo control system. The position response, anti-torque disturbance ability and target tracking ability of the two controllers are compared by building the system simulation model. The results show that the static and dynamic performances of the proposed controller are better than that of the traditional PID controller when the parameters of the fuzzy controller are optimized by ASAPSO. The system can effectively overcome the influence of nonlinear factors such as torque disturbance, and it has good target tracking performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); particle swarm optimization (PSO); fuzzy control; parameter optimization

0 引 言

进入 21 世纪以来, 交流伺服技术与智能控制相结合, 使得永磁同步电机 (PMSM) 在各个领域得到了广泛的应用。在速度控制和位置控制上, 以 PMSM 为主的交流伺服系统已成为主流, 在工

业领域和军事技术等方面均取得了突出的效益。当前, 地面火炮控制系统仍采用直流有刷电机作为执行元件。从控制效果看, 不仅响应速度慢, 而且定位精度一般。因此, 从提高武器装备性能的角度出发, 将交流伺服系统应用于火炮随动跟踪控制系统势在必行。

收稿日期: 2020-12-22; 收到修改稿日期: 2021-02-06

作者简介: 王继超 (1984—), 男, 工程师, 研究方向为电机控制。

PMSM 作为执行元件,应用于火炮随动系统上,必须适应随动系统转动惯量大、位置变化无规律、响应速度快、定位精度高的特点^[1]。因此,位置控制器的设计要求必须高。

与常规 PID 控制方式相比,模糊控制算法并不需要对被控系统建立数学模型。PMSM 具有非线性特点,作为火炮随动系统执行元件时,常规的 PID 控制方式难以跟随系统变化,对火炮随动跟踪系统的控制达不到要求。而模糊控制器在解决这一问题时,效果大大优于 PID 控制器。

模糊控制器性能的好坏,主要取决于 4 个参数,分别为 3 个量化参数和 1 个模糊规则权值^[2]。因此,为了保证火炮随动跟踪系统的速度和精度,本文采用自适应模拟退火粒子群算法(ASAPSO)对这 4 个参数进行优化。通过仿真,对比了模糊控制器和传统 PID 控制器在火炮随动跟踪系统中的控制效果^[3]。

1 系统结构

1.1 火炮随动跟踪系统基本模型

火炮随动跟踪系统由视频跟踪器、瞄准线控制器、执行机构和相应的传感器组成。图 1 为独立稳定的瞄准线控制系统结构图^[4]。

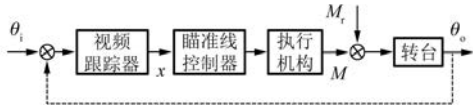


图 1 瞄准线控制系统结构图

图 1 中,目标位置 θ_i 与瞄准线位置 θ_o 的差值送给视频跟踪器, x 为跟踪误差, M 为执行机构的控制力矩。其中,执行机构用来带动火炮身管高低方向运动。系统采用 PMSM 替代传统直流电机,是本文研究的重点对象。

1.2 控制系统结构和模型的建立

以 PMSM 替代传统的无刷直流电机作为系统的执行机构,构建空间矢量模型。控制模块采用 dsPIC33F 来实现空间矢量控制脉宽调制(PWM)^[5]。搭建三闭环位置控制系统如图 2 所示。

该随动控制跟踪系统的模型大致由以下 5 个模块构成:

- (1) 角度偏差传感器模块;
- (2) PI 调节器;

- (3) 坐标变换模块;
- (4) 空间矢量 PWM(SVPWM) 模块;
- (5) 模糊控制器。

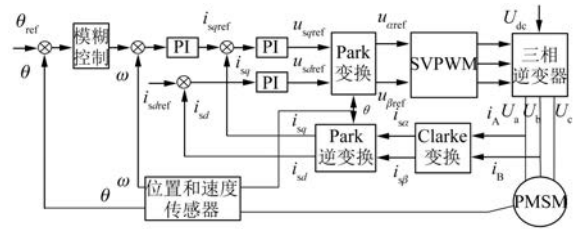


图 2 交流伺服系统三闭环矢量控制系统模型

控制过程为:目标位置与瞄准线位置的差值经视频跟踪器处理后得出跟踪误差 x 。模糊控制器放在系统位置环上,输出速度信号。 q 轴电流分量由速度 PI 调节器调节误差信号后得出, d 轴电流分量为设定值零。 q 轴和 d 轴电流分量经坐标变换后,得到相电压分量并通过 SVPWM 技术,产生 PWM 信号。控制 IGBT 模块,逆变输出可变频率的三相正弦电压输入到电机定子,达到控制的目的^[6]。

2 模糊控制器

2.1 模糊控制器的组成和原理

模糊控制系统的基本工作原理可以用图 3 来表示。控制过程为:单片机对被测对象进行采样并进行 A/D 转换,与给定值进行比较,从而得到误差 e 。误差 e 经过模糊化处理后,代入已经制定好的模糊控制规则,做出模糊决策,输出控制量 u 。图中虚线框内的模糊控制器是核心部分,模糊控制规律可以通过计算机程序设定^[7]。

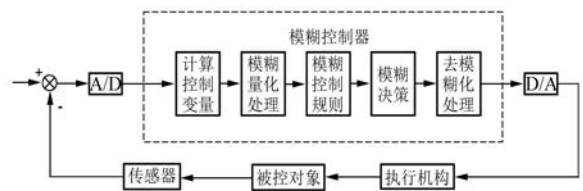


图 3 模糊控制系统原理图

对于火炮随动跟踪系统,图 3 中的被控对象就是火炮身管,执行机构采用 PMSM,传感器采用增量式编码器。模糊控制器通过编写程序设定在控制系统中。其主要由 4 个部分组成:模糊化接口、知识库、模糊推理和去模糊化。

2.2 模糊控制器的设计

2.2.1 模糊化接口

将测得的目标实际位置和火炮瞄准线位置相比较,得到误差信号 e 。该信号和变化量 ec 设定为 2 个输入量,执行机构给出的身管转动速度 u 作为输出量。将误差 e 、误差变化率 ec 和转速 u 进行尺度变换,统一采用归一化处理,即 $e \in [-1, 1]$, $ec \in [-1, 1]$, $u \in [-1, 1]$ 。

输入量 e 、 ec 和输出量 u 的隶属度函数选择三角形隶属度函数^[8]。隶属度函数形状及配置均按图 4 所示设置。为了更好地描述三角形分布特点,反映隶属度函数的控制规律,引入间隔参数 s_p ,间隔参数的大小反映的是三角形顶点的分布情况。当 $s_p > 1$ 时,三角形向中间聚拢;当 $s_p < 1$ 时,三角形向两边聚拢。图 4 所示为 $s_p = 2$ 时隶属度函数的形状。

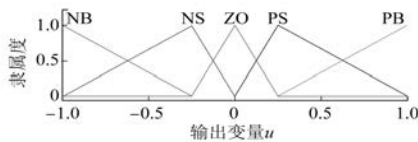


图 4 间隔参数为 2 时的隶属度函数

作为输入量,误差和误差变化率的量化因子分别为 k_e 和 k_{ec} ,电机的转速作为输出其比例因子设定为 k_u 。综合考虑电机控制的精度和响应速度, e 和 ec 均选择了 5 个模糊子集(NB、NS、ZO、PS、PB),控制量 u 选择了 7 个模糊子集(增加了 NM-负中和 PM-正中 2 个子集)来覆盖论域。

2.2.2 知识库和模糊推理

知识库当中存放的是各个输入和输出量在进行模糊化时设定的论域映射关系,以及设定的模糊子集个数。知识库当中还应当建立语言规则库,用来设定输入输出之间的关系,从而反映出控制规则。这些规则的制定是通过人的经验和直觉用相应的语言描述出来的^[9]。模糊控制规则如表 1 所示。该控制系统一共有 25 条模糊规则。

表 1 模糊控制规则状态

e	ec	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PM
ZO	NB	NB	NM	ZO	PM	PB
PS	NM	ZO	PS	PM	PB	
PB	ZO	PS	PM	PM	PB	

2.2.3 精确化计算

模糊量需要转换为精确量才可以对系统进行控制。本文运用重心法将模糊量转变成精确量,该方法将面积的重心作为推理结果。运用重心法解模糊的过程类似于加权平均法,其权值为各元素的隶属度^[10]。其计算式如下:

$$u = \frac{\int_x x \mu_N(x) dx}{\int_x \mu_N(x) dx} \quad (1)$$

3 ASAPSO 算法

3.1 模拟退火算法

模拟退火算法是受固体退火的原理启发而形成的^[11]。固体加温的过程中,由于其内部粒子运动速度加快,内能不断增大,当其达到一定的温度后开始降温,内部粒子由快速运动逐渐减慢,内能也逐步减小,粒子趋于稳定,最后在固体温度达到稳定值常温时,内能保持在稳定状态即最小值。

其基本思想是:目标函数 f 的设定遵循的原则为寻求固体内能 E 的最小值,其中 E 为固体在温度为 T 时的内能,不同 T 时内能的改变量为 ΔE 。算法由初始解 i 和温度 T 演化的控制参数 t 开始,对当前解重复进行“生成新解—算目标函数差值—判断是否接受”的迭代, t 值不断衰减,并在终了时得到近似的最优解。退火进程包含了给定初始温度 T 开始、每个 t 值时刻的迭代次数 k 和停止条件 S ^[12]。

基本流程:

- (1) 给定初始温度 $T_{\text{开始}}$ (T 充分大)及初始解状态,每个 t 设定的迭代次数 k ,最低温度 $T_{\text{终止}}$;
- (2) 计算该点的适应值 $E=f(S)$;
- (3) 更新计算当前温度 t ;
- (4) 产生新解 S' ;
- (5) 计算新解的适应值 $E'=f(S')$ 以及适应值增量 $\Delta E=f(S')-f(S)$,如果满足终止条件则停止算法。

3.2 ASAPSO 算法优化模糊控制器原理

与标准 PSO 相比,自适应模拟退火粒子群算法在算法优化过程中能够根据各个粒子的适应值主动调节学习因子,从而克服了局部收敛的问题^[13]。在前一阶段利用标准 PSO 算法寻求优化,

以提高算法的运行速度,后一阶段结合模拟退火算法,不断优化更新参数并寻求最优解。

为了提高 PSO 算法解决全局优化问题的能力,鉴于 ASAPSO 算法的寻优特点和能力,在对模糊控制器 4 个参数的优化上,运用 ASAPSO 算法对其进行优化。图 5 所示为 ASAPSO 算法对参数寻优的原理图。

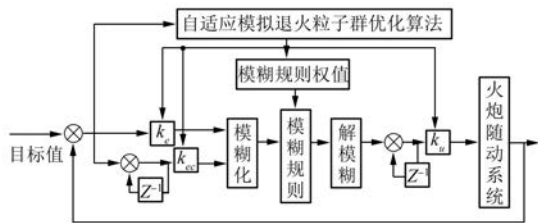


图 5 ASAPSO 算法对模糊控制器的参数寻优原理图

寻优参数为模糊控制器输入参数量化因子 k_e 和 k_{ec} 输出参数比例因子 k_u 以及模糊规则权值^[14]。其中 k_e 和 k_u 取值范围设定为 1~10, k_{ec} 和模糊规则权值取值范围为 0~1^[15]。适应度函数如下:

$$J_{ITAE} = \int t |e| dt \quad (2)$$

算法的流程图如图 6 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

基于 MATLAB/Simulink 建立的火炮随动跟

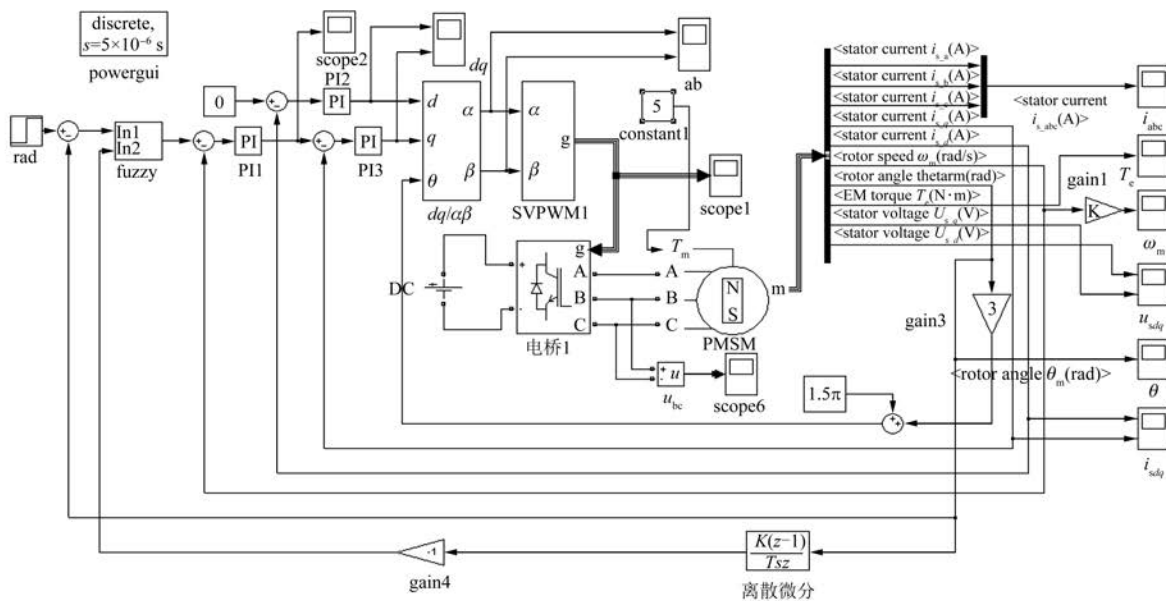


图 7 基于 ASAPSO 的火炮随动系统模糊控制仿真模型

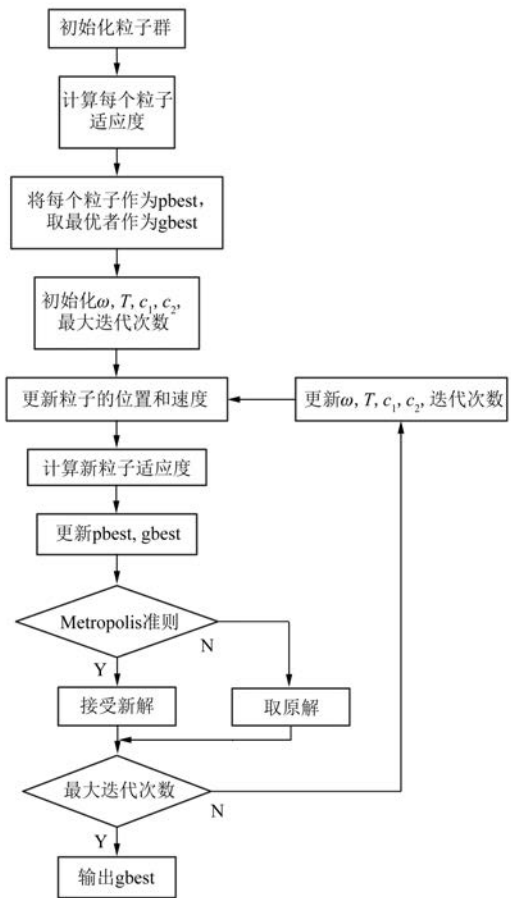


图 6 ASAPSO 算法对模糊控制器的参数寻优流程图

踪系统控制模块和执行机构仿真模型如图 7 所示^[16]。

4.2 结果分析

PMSM 的参数为:电阻 $R = 3.8 \Omega$, 电感 $L = 8.7 \text{ mH}$, 永磁磁链 0.185 Wb , 转动惯量 $J = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 摩擦系数 $f = 0.398 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 负载转矩 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 极对数 $n = 3$, 母线电压值 300 V 。

将 PD 控制器加入系统位置环, 设定 $p = 6, d = 0.3$, 设置仿真时间 0.4 s , 给定目标位置角度值设定为阶跃信号。获得的位置响应曲线如图 8 和图 9 实线所示。

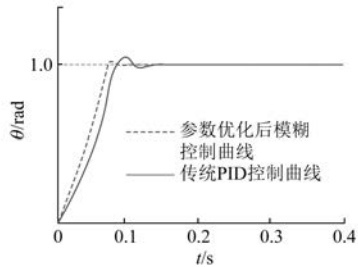


图 8 对比两种控制器获得的位置响应仿真波形

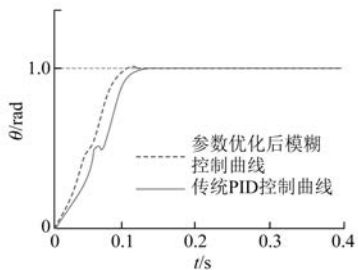


图 9 转矩扰动对两种控制器位置响应曲线的影响

量化比例因子分别为 $k_e = 5.08, k_{ec} = 0.12, k_u = 4.83$ 。将数据代入模糊控制器, 替代 PD 控制器, 用图 7 所示的仿真框图进行仿真试验, 仿真结果如图 8 和图 9 虚线所示。

图 8 所示为传统 PID 控制器和参数优化后的模糊控制器获得的位置响应曲线。图 9 所示为转矩扰动对 2 种控制器位置响应曲线的影响。

分析仿真结果可知: 参数优化后, 模糊控制器的各项性能明显优于传统 PID 控制器, 当给定角度随时间发生变化时, 模糊控制器能够更快速稳定地响应, 且超调量明显小于 PID 控制器。图 9 显示出了 2 种控制方式在转矩扰动时的控制曲线, 从图 9 可以看出转矩扰动对模糊控制器影响较小。

图 10 所示为系统的跟踪性能曲线。根据图

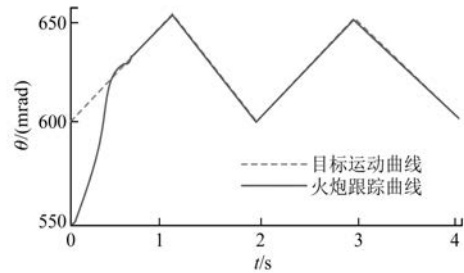


图 10 参数优化后模糊控制器的跟踪响应曲线

10 的仿真曲线分析, 跟踪响应模拟目标运动最大角速度 55 mrad/s , 目标起始位置 600 mrad , 火炮身管起始位置 0 。通过仿真发现, 参数优化后的模糊控制器能够快速响应, 具有良好的跟踪性能。

5 结语

本文以改进某型地面火炮随动控制系统跟踪性能为出发点, 提出了以 PMSM 替代传统直流电机作为火炮随动系统高低和方向的执行元件, 并在此基础上研究了火炮随动系统的位置环控制策略。通过 MATLAB 仿真, 对比了传统 PID 控制和经优化参数之后的模糊控制器作为位置控制器的响应曲线。

结果表明, 自适应模拟退火粒子群优化算法的优化效果显著, 控制效果较好, 系统的静态特性和动态特性比传统 PID 控制更好, 能够有效克服转矩扰动等非线性因素的影响, 系统具有较好的目标跟踪性能。

【参考文献】

- [1] 王晓明, 刘瑶, 周青山, 等. 电动机的 DSC 控制——微芯公司 dsPIC 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [2] 王学智. 模糊控制在全自动洗衣机中的应用[J]. 科技广场, 2017(2): 68.
- [3] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 张聚. 基于 MATLAB 的控制系统仿真及应用[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [5] 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [6] 雷秀娟. 群智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

(下转第 93 页)