

# 基于细菌觅食优化算法的永磁同步电机位置伺服系统模糊控制策略

王继超, 杨振强

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对 PID 控制器参数固定而引起永磁同步电机(PMSM)位置伺服系统控制效果不佳问题, 设计了基于细菌觅食优化算法的模糊控制器。该位置控制系统是以空间矢量控制为理论基础, 由位置环、速度环、电流环构成的 PMSM 三闭环控制系统。在 MATLAB/Simulink 环境中将模糊控制器应用在系统位置环上。对比仿真结果发现, 参数优化后的模糊控制器在系统位置环的作用更加优越, 完全克服了传统 PID 控制器的缺点, 能有效提高电机位置控制的快速性和准确性。

**关键词:** 细菌觅食优化算法; 模糊控制; 永磁同步电机; 矢量控制

**中图分类号:** TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0040-05

## Bacterial Foraging Optimization Algorithm Based Fuzzy Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo System

WANG Jichao, YANG Zhenqiang

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Due to the parameters of the controller were fixed, the control effect of permanent magnet synchronous motor position servo system was not satisfying. So we design a fuzzy logic controller based on bacterial foraging optimization algorithm (BFOA). Based on the theory of space vector control, the position control system was three closed loop control system of permanent magnet synchronous motor which was consisted of the position loop, speed loop and current loop. The fuzzy logic controller was applied to the position loop in the MATLAB/Simulink environment. The simulation results showed that compared with the traditional PID method, the fuzzy control scheme based on BFOA had better control quality and stronger ability of restraint interference, and could effectively improve the rapidity and accuracy of the motor position control.

**Key words:** bacterial foraging optimization algorithm (BFOA); fuzzy control; permanent magnet synchronous motor (PMSM); vector control

## 0 引言

21 世纪以来, 随着智能控制的兴起, 交流伺服技术得到了快速的发展。无论是速度伺服, 还是位置伺服, 交流伺服技术已日渐成熟, 并广泛应用于工业制造和军事领域等, 取得的效益十分明显。因此, 在军事装备信息化的条件下, 交流伺服系统必将被应用于火炮和机构控制上。

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous

Motor, PMSM) 以其自身的优点, 而被广泛应用于各行业交流位置伺服系统中。对基于 PMSM 的定位系统中, 如某型自行火炮供输弹系统, 其特点是系统转动惯量大, 位置变化量不确定, 要求定位精确。因此, 对位置控制器的性能要求十分高。

对一般的线性系统而言, 采用常规的数字 PID 控制器作为位置环控制器, 可以满足系统要求。但对于采用 PMSM 作为伺服电机的位置伺服系统, 由于其非线性的特点, 使得 PID 控制器无

法跟随系统变化而满足控制要求<sup>[1]</sup>。当被控对象或控制参数发生改变时,常规 PID 控制方式的控制性能大大下降。

相比之下,模糊控制算法对被控系统的线性特点以及数学模型的建立并不作要求,故可以解决一些系统模型不确定或难以确定的控制问题<sup>[2]</sup>。根据以往的控制经验,决定模糊控制器性能的主要有三个量化参数、隶属度函数的间隔参数和模糊规则的制定等。为了保证位置定位的精度和速度,本文利用细菌觅食算法 (Bacterial Foraging Optimization Algorithm, BFOA) 优化了模

糊控制器的三个量化参数和隶属度函数的间隔参数,并将其与传统 PID 控制器分别作用在位置伺服控制系统中,对比了二者之间的控制效果。

为了给实际控制系统设计提供依据,本文首先在 MATLAB 中搭建了位置伺服系统的仿真模型,分别对 PID 控制和优化参数之后的模糊控制进行了仿真。

## 1 系统结构和模型的建立

采用  $i_d = 0$  的 PMSM 矢量控制系统如图 1 所示。

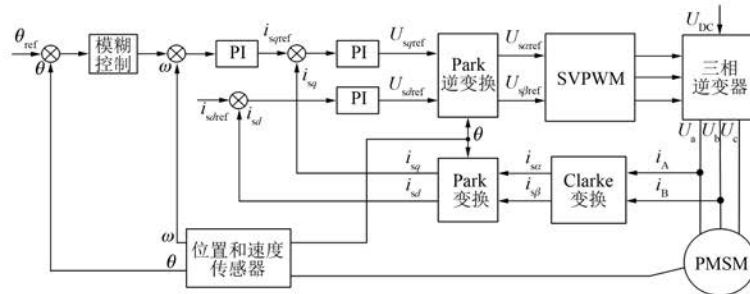


图 1 交流伺服系统三闭环矢量控制系统模型

该控制系统由转速转角传感器模块,电流调节器、速度调节器,坐标变换模块,PWM 控制器和逆变器模块,以及模糊控制器五部分组成。

控制过程如下:给定位置信号与检测得到的转角信号相比较,得到误差信号。经模糊控制器的调节后,输出速度信号,与检测到的速度信号相比较,得到误差信号。经速度 PI 调节器后,输出交轴电流分量  $i_{sqref}$ ,同时,给定直轴电流分量  $i_{sdref}=0$ ,然后经坐标变换后,输出  $\alpha\beta$  直角坐标系的定子相电压矢量的分量,利用 SVPWM 技术,产生 PWM 信号来控制逆变器,最后输出可变幅值和频率的三相正弦电流到电动机定子,从而实现给定的控制效果。

## 2 模糊控制器的设计

### 2.1 模糊控制器的组成和原理

模糊控制原理如图 2 所示。其核心部分为中间虚线框中的模糊控制器,其主要由四个部分组成:模糊化接口 (Fuzzy Interface)、知识库 (Knowledge Base)、模糊推理 (Fuzzy Reasoning) 和去模糊化 (Defuzzifier)。模糊控制规律由计算机

程序实现<sup>[3]</sup>。实现过程可以描述如下:计算机经采样并进行 A/D 转换,从检测机构获取被控制量的测量值,然后与给定值相比较作差,得到误差  $e$ 。经过模糊量化处理,利用模糊控制规则,形成模糊决策并解模糊,得到控制量  $u$ 。

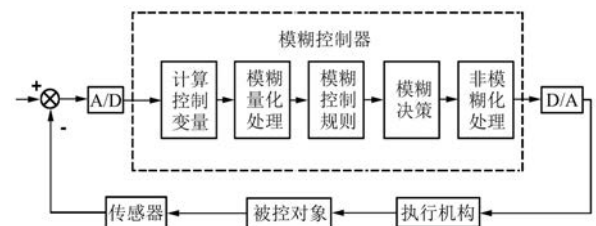


图 2 模糊控制系统原理图

由图 2 可以看出,模糊控制系统与计算机控制系统相比,不同之处仅在于用模糊控制器取代了数字控制器。

### 2.2 模糊控制器的设计

#### 2.2.1 模糊化接口

将测得的设定输入量和系统反馈回来的输出值进行映射,使其符合论域量程。映射的过程称之为尺度变换或者量化。这样测量的精确值被转换为模糊集合中的标志符,其作用就是将确定值变换为一

个模糊矢量,从而才能用于输出的推理求解。

将位置误差信号  $e$  和误差的变化率  $ec$  作为输入,电机应当给定的转速  $u$  作为输出。

模糊控制器采用归一化处理,即  $E \in [-1, 1], EC \in [-1, 1], U \in [-1, 1]$ 。输入量和输出量的隶属度函数形状选择上,均采用三角形隶属度函数。每个隶属函数三角形顶点位置都按图 3 所示设置,三角形左侧点同左侧三角形顶点重合,三角形右侧点同右侧三角形顶点重合。输入输出隶属函数间隔参数为  $s_p, s_p$  的大小决定隶属函数的形状。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 3 所示为  $s_p = 2$  时对隶属函数的影响。

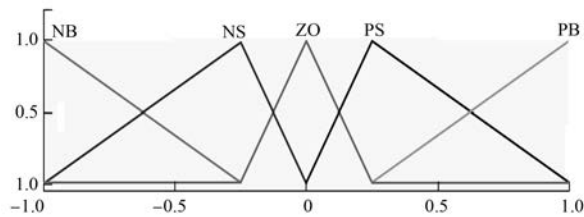


图 3 间隔参数  $s_p = 2$  时的隶属函数形状

量化因子和比例因子分别为  $k_e, k_{ec}$  和  $k_u$ , 考虑到电机控制的精度,误差  $E$  和误差变化  $EC$  选择 5 个模糊子集 (NB-负大、NS-负小、ZO-零、PS-正小、PB-正大), 控制量  $U$  选择 7 个模糊子集 (NB-负大、NM-负中、NS-负小、ZO-零、PS-正小、NM-正中、PB-正大) 来覆盖论域。

### 2.2.2 知识库和模糊推理

一般由数据库和语言规则库两部分组成。数据库存放的是模糊化接口时用到的论域映射关系、模糊子集的划分和隶属度函数的定义。规则库当中存放的是用模糊语言表述的控制规则。模糊控制中,人的直觉推理知识通过一组语言描述出来,由一系列关系词汇连接而成。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。本模型采用 Mamdani 模糊推理方法。

表 1 模糊控制规则状态

EC-E	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PM
ZO	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。把模糊量转换为精确量的过程称为解模糊。本文采用重心法来作为解模糊方法,将面积的重心作为推理结果。除此之外,还有最大隶属度法和加权法等。重心法的本质相当于加权平均法,权值为各元素的隶属度。其计算公式如下:

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

## 3 BFOA

### 3.1 BFOA

BFOA 与遗传算法、蚁群算法类似,都是模拟生物活动特征的一种算法<sup>[4]</sup>。其为模拟人类大肠杆菌活动规律的一种算法,运算步骤可以描述为以下四个步骤:

(1) 趋化操作。分为游动和翻滚两个运动,目的是使细菌避开有毒物并寻找到营养源。

其位置更新计算公式为

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}} \quad (2)$$

式中:  $\theta^i(j, k, l)$ ——细菌  $i$  的位置;

$j, k, l$ ——趋向操作、复制和驱散的次数;

$C(i)$ ——细菌  $i$  的趋化步长;

$\Delta(i)$ ——细菌变向过程中的随机向量。

(2) 群集操作。当寻找到更好的营养源时,细菌个体就会吸引其他细菌,达到群集的效果,从而细菌密度加大。群集作用数学表达式为

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{cc}(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S \left[ -d_a \exp\left(-w_a \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2\right) \right] + \sum_{i=1}^S \left[ -h_r \exp\left(-w_r \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2\right) \right] \quad (3)$$

式中:  $d_a, w_a$ ——引力的深度和宽度系数;

$h_r, w_r$ ——斥力的深度和宽度系数;

$S$ ——细菌总数。

鉴于电机实际控制情况,细菌  $i$  的适应值计算公式变为

$$J(i, j+1, k, l) = J(i, j, k, l) +$$

$$J_{cc}[\theta^i(j+1, k, l), P(j+1, k, l)] \quad (4)$$

式中:  $J_{cc} \theta, P(j, k, l)$ ——细菌间作用信号相互影响值;

$P$ ——细菌优化变量的数;

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T$ ——在  $P$  维搜索域的任意一点;

$d_a, w_a, h_r, w_r$ ——不同的系数, 应适当选择, 这里取  $d_a = h_r$ 。

(3) 繁殖操作。在这一阶段, 细菌的优劣将采用健康度函数来评定。细菌  $i$  的健康度函数计算公式为

$$J^i = \sum_{j=1}^{N_e+1} J(i, j, k, l) \quad (5)$$

其中,  $J^i$  的值反映了细菌的健康值, 健康值越大, 细菌被保留的可能性越大, 健康值小的细菌将遭到淘汰, 保留下来的一半细菌将进行复制操作。

(4) 驱散操作。当环境条件发生改变导致该区域的细菌可能会无法生存, 而转移到新的区域。这一现象使得局部最优位置的几率减小, 在算法中需要设定一个概率  $P_{ed}$ 。

### 3.2 基于 BFOA 的模糊控制

模糊控制器设计中, 量化因子、比例因子和输入输出变量隶属函数间隔参数  $s_p$  对系统性能影响最为直接<sup>[5-6]</sup>。合适的参数可以获得满意的控制效果。本文将 BFOA 与模糊控制器相结合, 通过 BFOA 对模糊控制器的参数  $\theta = [k_e, k_{cc}, k_u, s_p]$  进行优化, 优化控制原理框图如图 4 所示。其中:  $\theta_d$  为角位置设定值,  $\theta$  为系统输出。

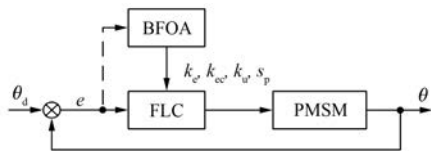


图 4 BFOA 模糊控制框图

为提高位置控制系统的动态性能, 降低超调量和减小过渡时间, 选取的适应度函数为

$$J(k_e, k_{cc}, k_u, s_p) = \sum_{k=1}^n |e(k)|$$

$$e(k) = \theta_d(k) - \theta(k) \quad (6)$$

式中:  $e(k)$ ——在第  $k$  次采样时间的系统误差<sup>[7]</sup>。

将该函数运用 BFOA 进行优化, 使其误差最小化, 可以使系统获得较好的动态性能。利用 BFOA 优化模糊控制器参数的过程是从搜索空间中寻找  $\theta = [k_e, k_{cc}, k_u, s_p]$  的最优值, 最大限度地减小适应度函数。

在 BFOA 实际控制中要设置的参数为  $P, S, N_c, N_s, N_{re}, N_{ed}, P_{ed}$ 。其中:  $P$  是搜索空间的维数;  $S$  是群体中的细菌总数;  $N_c$  是趋化步骤的数目;  $N_s$  是游泳的长度;  $N_{re}$  是复制步骤数;  $N_{ed}$  是驱散事件数;  $P_{ed}$  驱散概率。参数设置如表 2 所示。还要考虑到种群传递信号的影响值  $J_{cc}$  中的 4 个参数 ( $d_a, w_a, h_r$  和  $w_r$ )。设置  $d_a = 0.08, w_a = 0.1, h_r = w_r = 8$ 。

表 2 BFOA 参数

S	$N_c$	$N_s$	$N_{re}$	$N_{ed}$	$P_{ed}$
10	30	4	5	4	0.25

BFOA 优化模糊系统参数流程图如图 5 所示。

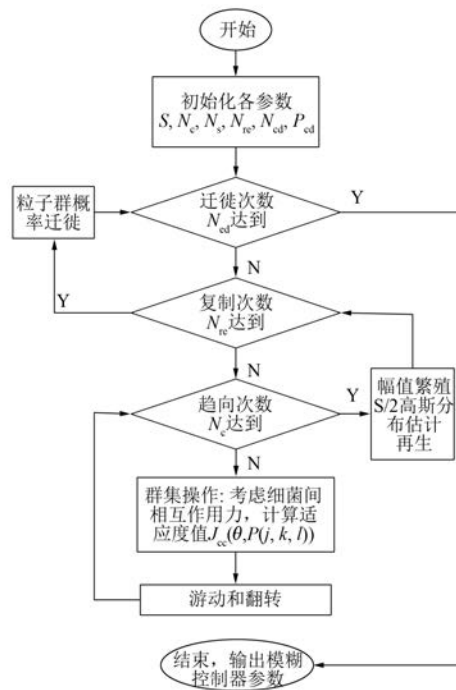


图 5 BFOA 优化模糊控制器参数流程图

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真模型

基于 MATLAB/Simulink 建立的仿真模型如图 6 所示。

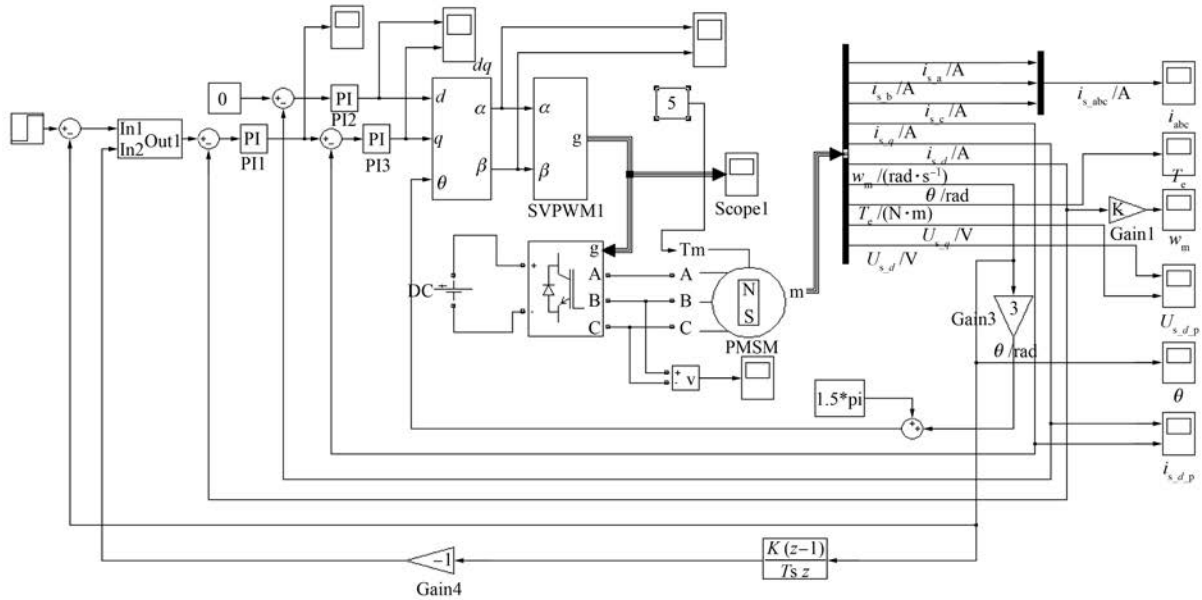


图6 基于 PMSM 的位置伺服系统仿真模型

4.2 结果分析

PMSM 的参数如下:电阻  $R=2.8 \Omega$ , 电感  $L=8.5 \text{ mH}$ , 永磁磁链为  $0.175 \text{ Wb}$ , 转动惯量  $J=1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 摩擦系数  $f=0.368 \text{ 2e-3 N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ , 负载转矩为  $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 极对数  $p=3$ 。

已知母线电压值  $300 \text{ V}$ , 运行时间设置为  $4 \text{ s}$ , 电机初始给定角度值为  $15$ ,  $1 \text{ s}$  时突然将角度值增加到  $45$ ,  $2.5 \text{ s}$  时角度值变为  $15$ , 对传统 PID 控制器进行仿真试验, 得到的仿真结果如图 7 所示。用模糊控制器对电机角度进行控制, 仿真结果如图 8 所示。

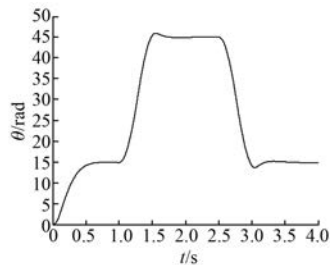


图7 位置变化时数字 PID 控制器的仿真结果

由仿真结果可知:传统 PID 控制器在设定参数条件下, 动态性能远不如基于 BFOA 的模糊控制器, 每一设定参数只能保证某一固定角度需求, 当角度给定发生变化时, 其动态性能也随之发生改变, 无法满足位置控制系统的动态响应。基于

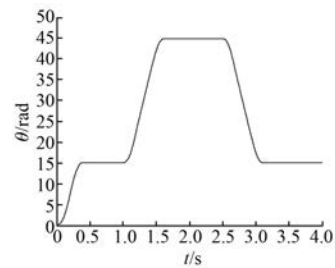


图8 模糊控制器获得的位置响应仿真波形

BFOA 的模糊控制器在角度给定值发生变化时, 其系统稳定性高且动态响应性能更加迅速。电机瞬间启动时, 基于 BFOA 的模糊控制器控制的系统响应更加迅速。

在  $0.3 \text{ s}$  时给电机转矩加扰动脉冲, 对比图 9 和图 10, 将转矩扰动加在曲线上升阶段时, 模糊控制器表现出了更强的抗扰能力, 上升时间更快。

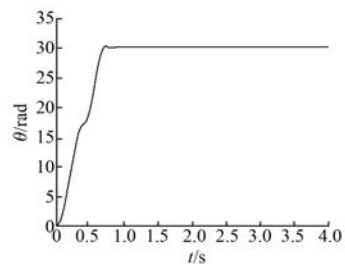


图9 转矩扰动对 PID 控制器位置响应曲线的影响

(下转第 96 页)