

一种基于猫群优化算法的焊缝跟踪自调整规则模糊控制方法^①

杨璟^{②*} 陶永^{③**} 任帆^{**} 江山^{**} 巩玥^{*}

(* 中国航空制造技术研究院高能束流加工技术重点实验室 北京 100024)

(** 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘 要 机器人焊缝跟踪系统由于焊接环境的复杂性是一个存在不确定信息的非线性复杂系统,一般的控制方法不能很好地适应受控对象的多变性。对此本文提出了一种基于猫群优化算法(CSO)的机器人焊缝跟踪自调整规则的模糊控制器(CSO-FC),使用解析形式的控制规则表达式,以简化机器人焊缝跟踪中模糊推理过程,并将一个权系数加入到表达式中,不同的权系数代表不同的控制规则,以实现焊缝跟踪的自调整。通过仿真实验,将本文提出的自调整规则模糊控制方法与其他控制方法进行对比和分析,验证了本文方法的有效性和适应性。

关键词 猫群优化算法(CSO);焊缝跟踪;模糊控制;加权因子

0 引 言

当前,机器人在工业生产和日常生活中代替人类完成各种任务与操作的作用变得越来越重要^[1-2]。焊接在工业制造体系中处于十分重要的位置^[3]。然而,由于焊接本身的工艺复杂和工作环境的恶劣与艰苦,导致焊接品质主要依赖于焊工的操作水平和技能^[4],进一步导致传统焊接方式越来越难以完成柔性和灵活的生产任务。随着科技进步与技术革新,焊接领域聚焦在如何提升焊接的智能化水平,焊接智能化的关键技术之一便是焊缝的识别与自动跟踪。

如何更准确地检测机器人焊缝,是智能机器人焊接系统的研究热点。霍平等^[5]使用结构光提取 V 型焊缝中心线,提出一种快速有效的中心线提取方法,得到连续平滑的中心线,即使在强噪声干扰情况下仍然有较好的效果。黄石生等人^[6]设计出一种基于自适应共振理论(adaptive resonance theory,

ART)神经网络的焊缝检测算法,以一定个数的象元作为模式长度单位,进而将焊缝截面方向上的灰度分为不同的模式,并与 ART 神经网络记忆的模板进行匹配,依据匹配结果中的模式形式可确定焊缝位置,从而抑制局部噪声。

神经网络由于可无限逼近非线性系统和对不确定系统的自学习能力,在智能机器人控制领域得到越来越多的青睐,在焊接系统中也逐渐得到运用^[7-9]。江一鸣^[10]针对多机械臂协调控制存在的问题,设计神经网络切换控制器,将传统神经网络的半全局稳定拓展为全局稳定。杨园园^[11]将中枢模式发生器(central pattern generators, CPG)神经网络应用到四足机器人控制中,由于直接将其应用到四足机器人上将出现协调性问题,因此对该神经网络进行了改进,验证了算法应用的可行性。滕涛^[12]提出了一种基于神经网络的机械臂自适应控制算法,该算法在存在模型不确定性的情况下,保证了神经网络学习性能和系统瞬态跟踪的性能。

郑军等人^[13]利用粒子滤波的线结构光完成焊

① 基础科研重点项目(JCKY2018205B023)资助。

② 男,1982年生,博士,研究员;研究方向:智能焊接技术与工艺;E-mail: 43753725@qq.com。

③ 通信作者,E-mail: taoy@buaa.edu.cn。

(收稿日期:2020-10-23)

缝跟踪,焊缝位置变化凭借焊缝序列图像的相关性进行观察,实验证明此套系统不仅能有效消除弧光、飞溅对焊缝提取的干扰,且对形状改变的焊缝也可进行跟踪。付涛等人^[14]借助神经网络的强大非线性映射能力作为控制器,同时为消除逼近误差加入了鲁棒项,机器人抖振现象得到了改善。

随着模糊控制理论的发展,许多研究人员将模糊控制算法与焊接机器人系统进行融合和创新研究。徐鹏飞等人^[15]针对强干扰的水下环境设计了 FUZZY-PID 控制器,通过模糊控制和 PID 并联,判断焊缝偏差大小以进行控制方法的选择。该控制器具有超调量小且动态响应快的优点,实现了平滑控制,但其不足之处是精度不够。谢光等人^[16]设计了模糊自适应 PID 控制器并应用到焊缝轨迹跟踪中,使大型薄壁结构件焊接精度得到改善和提高。欧阳快德等人^[17]基于旋转电弧传感器设计了规则自调整模糊控制器并应用于弧焊机器人的焊缝纠偏,改善了传统模糊控制存在的缺陷,纠偏精度满足需求。

猫群算法自提出以来因为算法的性能优越被逐步用于科学与工程应用的相关优化领域,随着算法的变体改进越来越展现出较好的适应性,研究者逐渐聚焦到该算法在智能机器人及智能制造领域的迁移应用。Bouzidi 等人^[18]针对工程实际应用优化难题——开放式车间调度问题,提出了使用猫群优化 (cat swarm optimization, CSO) 算法解决此类 NP-hard 问题,并通过实验与其他 7 种算法进行了比较,证明猫群算法在适宜的时间内取得了良好的效果,拥有更高的效率。Soto 等人^[19]针对制造单元设计问题提出了一种具有动态混合比的二进制猫群优化算法,此算法具有更好的性能,不易进入局部最优,动态混合比的引入额外增加了自调整功能,为解决典型 NP-hard 问题提供了一种解决方案。

Zhang 等人^[20]提出了一种基于猫群优化算法的计算机视觉系统并针对酒精使用障碍 (AUD) 进行识别,通过与遗传算法、免疫遗传算法、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)、混沌自适应粒子群优化等 4 种算法比较,证明了所提方法的先进性和高效性。Cam 等人^[21]将猫群和粒子群算法用于调整图像的对比值,在图像增强技术中对所需参数

进行了优化,并与传统的直方图均衡方法进行比较,证明其在收敛到最优解方面效果更好。Zhao 等人^[22]提出了一种柯西变异猫群优化和人工势场法的协同优化算法,并用于智能车巡航系统的路径规划,解决了全局路径长度和总转角变化最小的多目标优化问题。实验证明与多目标猫群优化和多目标粒子群优化相比,该算法优化时间更短,适应值更低,更适合室内环境下的全局路径规划。

机器人系统实际的焊接过程中,由于伴生的弧光、飞溅、粉尘等干扰具有非线性和实时变化的特点,实时的机器人焊缝跟踪变得困难。传统的模糊控制和其他经典的控制方法,均未能较好地实现焊缝的自动跟踪。本文针对上述问题,提出了一种基于猫群优化算法的自调整规则模糊控制焊缝跟踪方法 (cat swarm optimization fuzzy control, CSO-FC)。首先,利用结构光视觉传感器获取焊缝图像,进而处理后提取出路径传递给机械臂,然后基于 CSO-FC 方法实时进行焊缝跟踪。与传统 PID、传统模糊控制 (traditional fuzzy control, T-FC) 及粒子群优化算法 (PSO) 相比,本文提出的猫群优化算法具有更好的收敛性,提高了焊接机器人的控制精度和焊接精度。

1 系统组成

焊接机器人的焊缝跟踪系统如图 1 所示,主要包括结构光传感模块、上位机模块、工业机器人模块、焊接模块 4 部分。结构光视觉模块由工业摄像机、相机镜头、线激光发生器、窄带滤光片组成;工业机器人模块包括六轴工业机器人和控制柜;焊接模块由固结在机械臂末端的焊枪、送丝机和焊丝盘组成。

2 基于猫群优化的自调整规则模糊控制方法

2.1 机器人焊缝追踪模型

本文提出的焊缝跟踪自调整规则模糊控制方法是先进行焊接示教形成初始轨迹,再根据实际焊接过程中与示教轨迹的偏差量进行追踪,如图 2 所示。

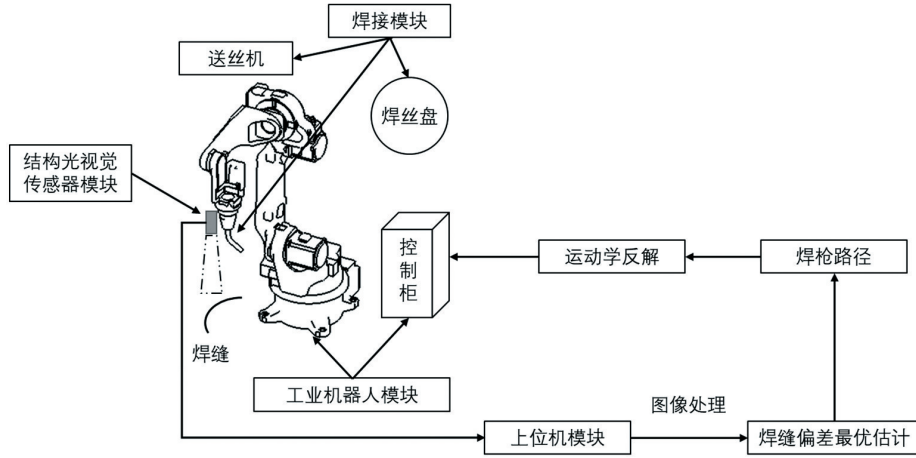


图1 机器人焊接系统的构成

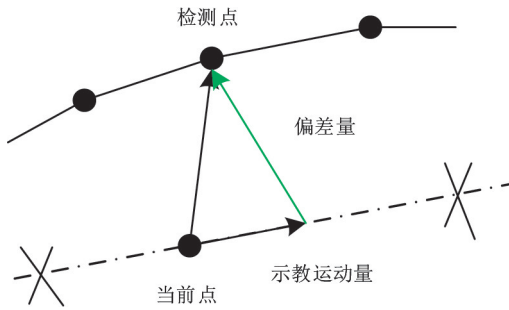


图2 焊缝跟踪的偏差量示意图

焊接机器人的焊缝跟踪原理,如图3所示。

其中, C_n 为焊接机器人焊枪末端的当前位置, D_n 为检测点,也是焊接机器人运动的目标点, $\overrightarrow{C_n P_n}$ 为示教运动分量。为了满足焊接机器人沿焊缝方向

速度恒定的条件,对初始的示教运动量 $\overrightarrow{C_n P_n}$ 进行分解,分解到2个方向,示教方向的运动量则可表示为2个分解运动的合成:

$$\overrightarrow{C_n P_n} = \overrightarrow{C_n P_1} + \overrightarrow{C_n P_2} \quad (1)$$

同时保证:

$$|\overrightarrow{C_n P_n}| = |\overrightarrow{C_n P_1}| \quad (2)$$

其中, $\overrightarrow{C_n P_1}$ 平行于焊缝方向。引入反向的 $\overrightarrow{C_n P_3}$, 使 $\overrightarrow{C_n P_3} = -2\overrightarrow{C_n P_2}$, 则有:

$$\overrightarrow{C_n P_1} = -\overrightarrow{C_n P_2} + \overrightarrow{C_n P_n} = \frac{1}{2}\overrightarrow{C_n P_3} + \overrightarrow{C_n P_n} \quad (3)$$

示教运动量 $\overrightarrow{C_n P_n}$ 最终转化为 $\overrightarrow{C_n P_1}$, 总偏差量只需计算垂直于焊缝方向的量即可。

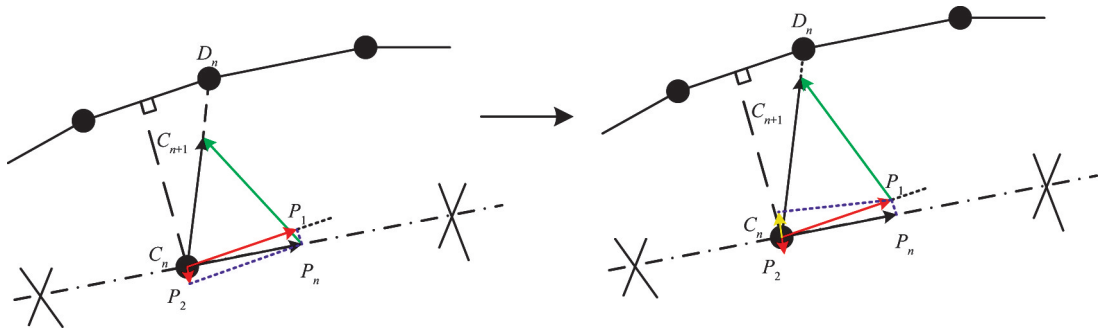


图3 焊缝跟踪原理图

2.2 猫群优化算法

2006 年文献[23]提出基于猫科动物行为的全局优化算法,即猫群优化算法。

根据对猫生活习性的长时间观察,发现猫有着

极高的警觉性,即使是在休息的时候仍然对移动的目标具有好奇心,目标出现在范围内时,便会迅速跟踪然后捕获。将其行为方式分为两种:一是处于闲散状态环视周围的模式称为搜寻模式;二是跟踪目

标进行动态跟随称为跟踪模式。猫群算法将这两种模式结合进行相关问题的优化解决。

图 4 所示为猫群算法流程,其中,算法输出的最优解即为所求问题的解。

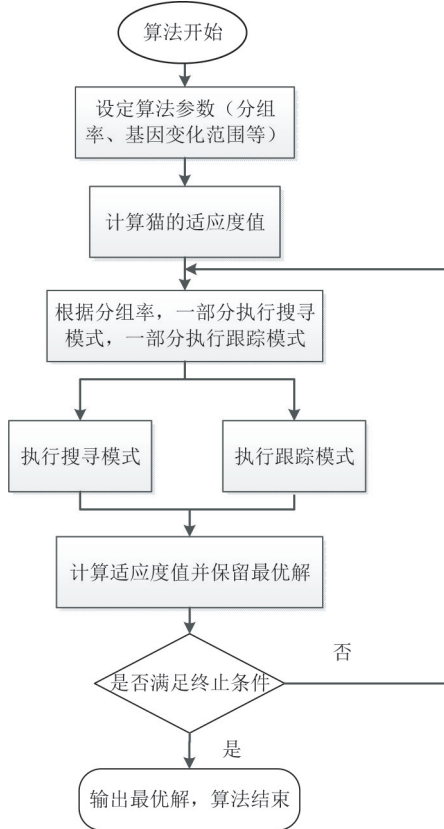


图 4 猫群优化算法流程

(1) 搜寻模式

搜寻模式包括 4 个参数:记忆池(SMP)、变化域(SRD)、变化数(CDC)和自身位置判断(SPC)。其中记忆池(SMP)中存放猫的副本数,表示猫的搜寻记忆空间的大小。变化域(SRD)表达猫在被选择维数的变化率。变化数(CDC)表达猫变化的维数个数。自身位置判断(SPC)表示猫是否将当前位置点作为下一步要到达的目标点。具体步骤如下。

1) 为猫 x_i 创建 $M(=SMP)$ 个副本,检查自身位置判断参数 SPC 的值,若 SPC 值为 1,令 $M = SMP - 1$,并将当前位置作为候选位置之一。

2) 对于 SMP 中的每一个位置点 x_j^i ,依据 CDC 值 η 的大小,随机地加上或减去当前值 $|x_{id}^{old}|$ 的 η 倍,并用变化后的值替代原本的值。

$$x_j^i \leftarrow x_j^i \pm \eta |x_{id}^{old}|, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

根据经验, η 一般取 0.2。

3) 计算记忆池中一切猫所在位置点的适应度值 $\{f_j\}_{j=1}^M$ 。

4) 假如适应度不全相等,则依据式(5)计算每个候选位置点被选择的概率;否则,将每个位置点被选择的概率置为 1。

$$p_j = \frac{|f_j^i - f^*|}{|f_{\max} - f_{\min}|}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

(2) 跟踪模式

跟踪模式就是对猫追踪目标时的行为模式进行建模,具体步骤如下。

1) 依据式(6)更新每一维的速度。

$$v_{i,d} \leftarrow v_{i,d} + r \times c(x_{\text{best},d} - x_{i,d}), \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (6)$$

其中, x_{best} 代表猫群中适应度值最大的位置点, x_i 体现猫 i 当前位置, c 为事先选定的常数, $r \in [0, 1]$ 的随机数。

2) 检查更新后的速度是否超出预先设定的速度区间 $[v_{\min}, v_{\max}]$, 假如超出区间,则将其设置为边界值。

3) 依据式(7)更新当前猫所在的位置。

$$x_d^i \leftarrow x_d^i + v_{i,d}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (7)$$

2.3 基于猫群优化的机器人焊缝跟踪自调整规则模糊控制方法

焊缝跟踪自调整规则模糊控制结构是二维形式,以焊缝与预期轨迹偏差及此偏差变化作为输入变量,选取合适的模糊子集进行模糊化确定模糊论域。为抛开有限的专家知识库简化模糊推理过程,引入了解析形式的控制规则表达式,并将一个权系数加入解析式,权系数选取的不同以实现实时调整控制规则。将性能测试函数 ITAE 的最值作为寻优的判断条件,猫群优化算法对相应参数的取值进行寻优确定,最终,得到一组最优的结果,运用此结果可对控制器完成理想的控制。控制器结构如图 5 所示。

图中, e 表示焊缝轨迹的误差, ec 表示焊缝轨迹误差变化率, u 为控制器输出; E 表示焊缝轨迹误差的模糊论域, EC 为焊缝轨迹误差变化率的模糊论域, U 为控制器输出的模糊论域; Ke 表示轨迹误差的量化因子, Kec 为轨迹误差变化率的量化因子, Ku

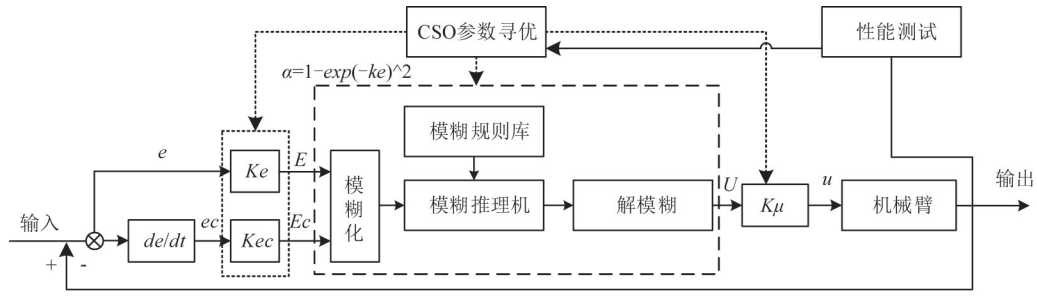


图5 基于猫群优化的机器人焊缝跟踪自调整规则模糊控制器结构

为控制量的比例因子。

焊接机器人当前点位置与焊缝之间的垂直距离即图3中 $|C_d C_n|$ ，为模糊控制器输入的偏差量 e ：

$$|C_d C_n| = e \quad (8)$$

由图5可知,模糊控制器选用双输入单输出形式。为了增加系统的实时性和适应性,模糊推理的过程为

$$U = [\alpha E + (1 - \alpha)EC] \quad (9)$$

其中, $[\]$ 代表表达式进行取整, α 为权系数,体现误差 E 和误差变化率 EC 对模糊输出 U 的加权程度。

在模糊控制的过程中,通过决定不同的 α 值以调整控制规则。选择隶属函数为

$$\mu_c(e) = \exp(-k^2) \quad (10)$$

选择权系数 α 为

$$\alpha = 1 - \exp(-k^2) \quad (11)$$

其中 k 是待定参数,由猫群算法优化后得出。

3 仿真实验

为了不失实验的一般性,本文选取控制对象为二阶系统,并最终确定为

$$G(s) = \frac{25}{30s^2 + 15s + 1} \quad (12)$$

基于SIMULINK对基于猫群优化的机器人焊缝跟踪自调整规则模糊控制方法进行仿真结构设计。结构框图如图6所示,其中SIMULINK中存在S-FUNCTION模块,将猫群优化算法(CSO)进行了封装,以便今后使用,如图7所示。

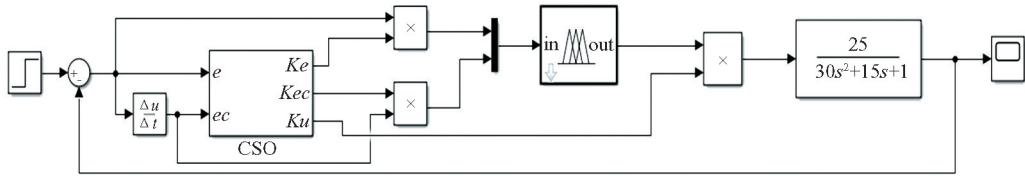


图6 SIMULINK CSO系统仿真框图

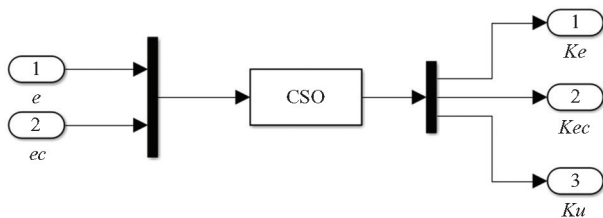


图7 S函数模块

CSO算法的参数设置如下,猫群的种群大小为100,最大迭代次数为180,分组率为0.1,变化域为0.2,记忆池大小为20。寻优过程中,设定 K_e 的寻

优范围为 $[0,1]$, K_{ec} 的寻优范围为 $[0,10]$, K_u 的寻优范围为 $[0,10]$,加权因子 α 中的待定系数 k 的寻优范围为 $[0,100]$ 。ITAE数值随迭代次数的变化,当ITAE达到最小值时,得到一组相对最优解为

$$k = 15.27, K_e = 0.125, K_{ec} = 1, K_u = 0.49$$

基于这组参数设计出对应的控制器并就控制器对阶跃信号的影响与传统PID控制和传统模糊控制(T-FC)算法进行对比,实验结果如图8所示。由图8可以看出,本文提出的自调整因子模糊控制方法(CSO-FC)更早达到稳定的跟随状态,超调量较小。

传统 PID 控制方法 (PID) 在 200 ms 后仍然没有达到稳定状态, 具有较大的超调量, 且有一定的震荡现象; 传统的模糊控制 (T-FC) 超调量虽然比 PID 小, 但仍然存在一定的超调量, 从而验证了本文提出的 CSO-FC 控制方法的有效性和适应性。

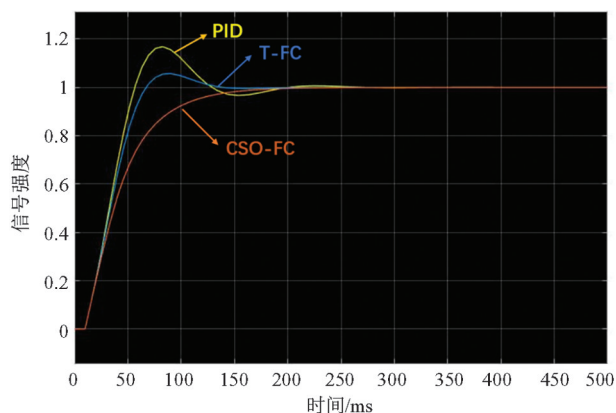


图 8 CSO-FC 方法、PID 方法、T-FC 方法对阶跃信号影响对比

CSO-FC 方法、PID 方法、T-FC 方法这 3 种算法对扰动信号影响的比较, 如图 9 所示。当系统恢复稳态后, 在 $t = 300$ ms 处施加一个阶跃信号, 从图 9 中可看出, 加入扰动信号后, CSO-FC 方法在 $t = 400$ ms

处就达到稳定跟随状态, 稳定后没有任何震荡。PID 方法和 T-FC 方法并未达到稳定跟随状态, 响应速度较慢且有震荡现象。这验证了本文所提方法动态性能良好。

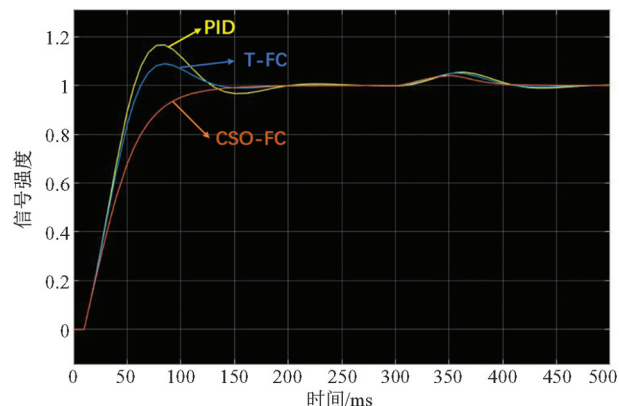


图 9 CSO-FC 方法、PID 方法、T-FC 方法对扰动信号影响对比

为了更好地验证本文所提出的猫群算法的优越性, 选择与其相似的群体智能算法——粒子群算法 (PSO) 进行实验比较, 同样基于图 6 的框图进行粒子群算法的封装 SIMULINK 系统仿真, 如图 10 所示。

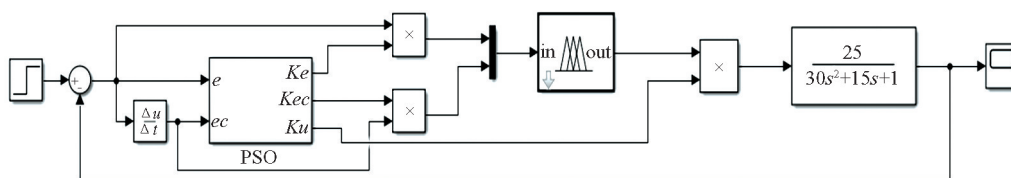


图 10 SIMULINK PSO 系统仿真框图

PSO 算法的参数设置如下: 粒子群的规模大小为 100, 最大迭代次数为 180, 加速常数 $c1 = c2 = 2$, 惯性因子 ω 为 0.2, 维数为 3。寻优过程中, 设定 Ke 的寻优范围为 $[0, 1]$, Kec 的寻优范围为 $[0, 10]$, Ku 的寻优范围为 $[0, 10]$, 加权因子 α 中的待定系数 k 的寻优范围为 $[0, 100]$ 。ITAE 数值随迭代次数变化, 当 ITAE 达到最小值时, 得到一组相对最优解为

$$k = 12.48, K_e = 0.56, K_{ec} = 1, K_u = 0.72$$

基于这组参数设计出 PSO 控制器与 CSO 控制器得到的参数进行对比, 实验结果如图 11 所示。

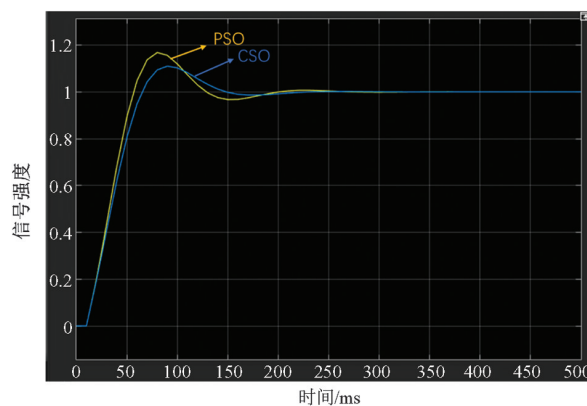


图 11 CSO 方法、PSO 方法对阶跃信号影响对比

为了比较两种智能算法纯性能的高低,将 CSO 方法与 PSO 方法对阶跃信号的影响进行比较,结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,两种智能算法在性能上非常接近,说明智能算法是控制方法的一个可行发展方向。从控制方法对阶跃偏差信号的调节来看,本文提出的自调整因子模糊控制方法更早达到稳定的跟随状态,超调量较小,从而验证了本文提出的 CSO 控制方法比 PSO 方法性能更高。

4 结 论

机器人系统焊接过程中的弧光、飞溅、粉尘等干扰使焊缝跟踪具有非线性和实时变化性等特点。为了提高机器人焊缝的实时跟踪精度,提出了一种基于猫群优化的焊缝跟踪自调整规则模糊控制方法。基于猫群算法对量化因子等 4 个参数进行寻找相对最优过程,将 ITAE 函数的最值作为判断条件,得到自调整规则模糊控制器的参数;所提出的方法因为权系数的存在,实现了规则的自调整,具有较好的适应性。仿真实验验证了本文提出的方法相较传统 PID 控制和传统模糊控制方法提高了焊缝跟踪的动态性能,改善了稳态精度。

参考文献

- [1] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014(9):7-19
- [2] WANG T M , TAO Y , LIU H. Current researches and future development trend of intelligent robot: a review [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2018,15(9):1-22
- [3] LI X D, LI X H, GE S Z, et al. Automatic welding seam tracking and identification[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017,64(9):7261-7271
- [4] 王雪宙,石玗,朱明,等. 基于焊枪姿态与熔池形貌的不同焊工焊接行为的测量与分析[J]. 机械工程学报, 2017,53(18):87-92
- [5] 霍平,李军萌,曾翰林,等. 一种基于结构光的 V 型焊缝实时图像处理方法[J]. 电焊机, 2014,44(12):144-148
- [6] 黄石生,钱迎雪. 基于 ART 人工神经网络的焊缝检测算法[J]. 机械工程学报, 1994, 30(2):93-98
- [7] 苗阜广,谢寿生,丁键,等. 基于 RBF 网络的航空发动机预测滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12):1601-1606
- [8] 黄永安,邓子辰,姚林晓. 基于神经网络混合建模的结构振动滑模控制[J]. 振动工程学报, 2005,18(4):465-470
- [9] 王贞艳,张井岗,陈志梅. 神经网络滑模变结构控制研究综述[J]. 信息与控制, 2005,34(4):451-456
- [10] 江一鸣. 双臂机器人系统模型辨识及协同控制理论研究[D]. 广州:华南理工大学自动化科学与工程学院, 2019
- [11] 杨园园. 基于多层 CPG 神经网络的四足机器人控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2018
- [12] 滕涛. 面向人机交互的智能机器人控制算法研究[D]. 广州:华南理工大学自动化科学与工程学院, 2019
- [13] 郑军,潘际鑫. 基于粒子滤波的结构光实时焊缝跟踪技术[J]. 上海交通大学学报, 2008,42(S1):61-64
- [14] 付涛,王城镇,弓清忠,等. 改进神经网络自适应滑模控制的机器人轨迹跟踪控制[J]. 大连理工大学学报, 2014,54(5):523-530
- [15] 徐鹏飞,张华,贾剑平. 复合 FUZZY-PID 焊缝跟踪控制算法[J]. 微计算机信息, 2009,25(13):20-21, 24
- [16] 谢光,熊禾根,陶永,等. 基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的机器人焊接前瞻控制方法[J]. 高技术通讯, 2016,26(10-11):883-889
- [17] 欧阳快德,张华,贾剑平,等. 规则自调整模糊控制的弧焊机器人焊缝纠偏研究[J]. 机电产品开发与创新, 2006,19(2):9-11
- [18] BOUZIDI A, RIFFI ME, BARKATOU M. Cat swarm optimization for solving the open shop scheduling problem [J]. *Journal of Industrial Engineering International*, 2019,15(2):367-378
- [19] SOTO R, CRAWFORD B, ASTE TOLEDO A, et al. Solving the manufacturing cell design problem through binary cat swarm optimization with dynamic mixture ratios[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019, 9(22):4736
- [20] ZHANG Y D, SUI Y, SUN J, et al. Cat swarm optimization applied to alcohol use disorder identification [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018,77(17):1-22
- [21] ÇAM H B, AKÇAJICA S, ELBIR A, et al. The perform-

- ance evaluation of the cat and particle swarm optimization techniques in the image enhancement[C]//2018 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT), Istanbul, Turkey, 2018: 1-4
- [22] ZHAO D M, YU H M, FANG X, et al. A path planning method based on multi-objective Cauchy mutation cat swarm optimization algorithm for navigation system of intelligent patrol car[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:151788-151803
- [23] CHU S C, TSAI P, PAN J S. Cat swarm optimization [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006(6):854-858

A Fuzzy control method for welding seam tracking self-adjusting rules based on cat swarm optimization algorithm

YANG Jing^{*}, TAO Yong^{**}, REN Fan^{**}, JIANG Shan^{**}, GONG Yue^{*}

(^{*} The Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024)

(^{**} School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

The robot welding seam tracking system is a non-linear complex system with uncertain information due to the complexity of the welding environment. General control methods do not adapt well to the variability of controlled objects. A fuzzy controller for robot seam tracking self-adjusting rules based on cat swarm optimization (CSO) algorithm is proposed. The analytical expressions of control rules are presented to simplify the process of fuzzy inference in robot seam tracking. Meanwhile, a weight coefficient is added to the expression to achieve the goal of weld seam self-adjustment. Different weight coefficients represent different control rules. Finally, the self-tuning rule fuzzy control method proposed in this paper is compared with other two control methods through simulation experiments to verify its effectiveness and adaptability.

Key words: cat swarm optimization (CSO), seam tracking, fuzzy control, weighted factor