

基于云蚁群算法的高效节能氩弧焊工艺参数优化研究*

肖 熙¹, 蔡旭林², 赖明波¹, 李瑞玲¹, 何箭南¹, 张建伟¹

(1. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 为在氩弧焊加工过程中提升效率的同时降低能耗, 研究了一种氩弧焊高效节能工艺参数的多目标优化模型及算法。首先确定了以焊接速度及焊接电流为优化变量, 在综合考虑焊接设备、工件特性、操作方法及焊接质量等约束的前提下, 建立了以最小电能消耗以及最短加工时长为优化目标的多目标工艺参数优化模型; 提出一种基于云模型的蚁群算法(CBACO)以对所构建的优化模型进行求解, 其中包含一种适当的编码方式、一种局部与全局相结合的探索策略、一种基于云模型的变异因子、传统的单点交叉因子、单形交叉因子以及适当的选择策略; 通过一个针对某航空器油箱的焊接实例, 对所提出的优化模型及算法的实用性进行了验证, 结果表明优化参数可在保证加工质量的前提下有效地节省时间 60.41%~69.05%, 节省电能 34.88%~46.30%。

关键词: 氩弧焊; 工艺参数优化; 云模型; 蚁群算法; 高效节能

Optimization of Argon Arc Welding Parameters Based on Cloud Ant Colony Algorithm for High Efficiency and Energy Saving

XIAO Xi¹, CAI Xulin², LAI Mingbo¹, LI Ruiling¹, HE Jiannan¹, ZHANG Jianwei¹

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Refco Group Ltd., Nanchang 330024, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] To improve the efficiency of argon arc welding and reduce the energy consumption, a multi-objective optimization model and algorithm of high efficiency and energy saving process parameters were studied. Firstly, taking welding speed and welding current as optimization variables, and considering the constraints of welding equipment, workpiece characteristics, operation method and welding quality, a multi-objective process parameter optimization model with the minimum power consumption and the shortest processing time as optimization objectives was established. Put forward a kind of ant colony algorithm based on cloud model (CBACO) to solve the optimization of the constructed model, which contains an appropriate encoding method, a combination of local and global exploration strategy, a mutation factor based on cloud model, the traditional single point crossover factor, simplex crossover factor and the choice of appropriate strategies; Through a welding example of an aircraft fuel tank, the practicability of the optimization model and algorithm proposed in this paper is verified. The results show that the optimized parameters can effectively save time 60.41%–69.05% and energy 34.88%–46.30% under the premise of guaranteeing the processing quality.

Keywords: Argon arc welding; Process parameter optimization; Cloud model; Ant colony algorithm; High efficiency and energy saving

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.10.089

氩弧焊由于其电弧稳定、焊接质量高、操作灵活等优势, 被广泛应用于车辆、船舶、桥梁、军工、航空航天等工业领域。但是, 生产效率较低、生产成本较高等问题

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51707501); 国防基础科研重点项目(JCKY2016605B006)。

限制着其进一步的发展。特别是在当下我国实施了节能减排战略的大背景下, 绿色制造、低碳制造、节能制造等方面的研究课题成了当下的研究热点, 同样, 针对焊接加工过程的减排、节能、节材工艺的研究也逐渐增多。

国内外的专家学者针对焊接参数优化进行了大量研究, Liu 等^[1]通过对激光氩弧焊加工过程的运行时间及运行状态进行优化,以降低焊接成本及能耗; Khan 等^[2]基于不锈钢工件焊缝预测模型对激光氩弧焊参数进行优化,从而在保证加工质量的前提下降低能耗; 罗毅等^[3]基于神经网络法对焊接工艺进行优化,以降低碳排放量; Islam 等^[4]基于遗传算法以及有限元法对焊接参数进行优化,从而获得较高的焊接质量; 张紫娟等^[5]通过遗传算法对焊接过程碳排放特征函数进行优化,以降低碳排放; 高星鹏等^[6]基于神经网络与遗传算法相结合的方法对微电阻电焊工艺参数进行优化,以实现较好的综合力学性能; 马小英等^[7]通过 Kriging 模型和粒子群算法相结合的方法对氩弧焊镁合金薄板的工艺参数进行了优化,以获得较好的力学性能。综上可得,随着优化算法的逐步发展,其被越来越多地应用于解决焊接工艺参数优化问题,但目前大部分的研究仅是针对焊接过程中某个单一目标进行工艺参数的优化,一般为成本、能耗、力学性能与碳排放中的一个; 部分文献虽然同时考虑了焊接过程中的多个目标,但均是在成本或质量的基础上加入能耗或碳排放,并不能在保证质量的同时实现焊接过程的高效节能。然而在航空航天制造业中,对于加工质量及效率的要求极其严格^[8-9],因而十分有必要在保证加工质量的前提下同时对加工效率以及耗电量进行优化。虽然目前有部分焊接工艺参数优化的研究采用了智能优化算法进行模型的求解,但采用的大多为最基础的算法,不能够满足复杂参数优化模型求解的需求。

蚁群算法作为一种启发式算法,其较快的收敛速度及简单的优化机制使其在实际工业生产的复杂问题优化中得到了广泛应用,然而其局部搜索能力差、易于陷入局部最优等缺陷限制了其进一步的发展,且目前尚未见有将蚁群算法应用于焊接工艺参数优化的研究。

基于此,本文提出了一种基于云蚁群算法的节能高效氩弧焊工艺参数优化方法。在满足焊接质量、焊接设备、焊丝直径等对工艺参数限制的前提下,以焊接速度、焊接电流为变量,建立了以加工时长及耗电量为优化目标的氩弧焊高效节能工艺参数的多目标优化数学模型,并利用所提出的云蚁群算法(CBACO)以及传统蚁群算法(ACO)对优化模型进行了求解。最后,通过一个针对某航空器油箱的实例对本文所提出的优化模型及算法的实用性进行了验证,其中加工参数包括经验参数以及通过 CBACO 优化所得的参数。

1 氩弧焊工艺参数优化模型的构建

1.1 优化变量

氩弧焊是一个极其复杂的加工过程,其加工时长以

及耗电量受到大量工艺参数的影响,如:电弧电压、焊接电流、焊接速度、焊丝直径、焊机性能等。通过查询现行国家标准 GB15579.1—2013 可得,其中大部分参数都有统一的标准,因此无需进行优化选择,而针对电弧电压、焊接电流以及焊接速度尚没有统一的标准,但标准中有关于所有焊接方式中电压关于电流的公式,即:

$$U_L = f(I_L) \quad (1)$$

其中, U_L 为焊接电弧电压; I_L 为焊接负载电流。因此,只需要优化焊接电流以及焊接速度两个变量即可实现包含电弧电压在内的 3 个参数的优化。同时考虑到本文所研究油箱的焊缝需采用几组不同的加工参数进行分段加工以保证最终的质量要求,假设焊缝共分为 N_{\max} 段进行加工,则编码方案如下:

$$(I_{L,1}, V_1, I_{L,2}, V_2, \dots, I_{L,N_{\max}}, V_{N_{\max}}) \quad (2)$$

1.2 目标函数

本文以高效节能氩弧焊加工工艺参数的优化选择为目的,因此本文以焊接过程中的最短加工时长以及最低耗电量为目标函数进行工艺参数的优化。考虑到本文所研究的某航空器油箱的焊接过程中需分段加工以保证最终的质量要求,因而针对性地构建了以下目标函数。

1.2.1 加工时长

加工时长为关于焊缝长度及焊接速度的函数,则第 N 段加工所耗费的时间 T_N 可表示为:

$$T_N = \frac{L_N}{V_N} \quad (3)$$

其中, L_N 与 V_N 分别为第 N 段加工的焊缝长度及焊接速度,则总加工时长可表示为:

$$T_t = \sum_{N=1}^{N_{\max}} T_N \quad (4)$$

1.2.2 耗电量

焊接过程中的能耗大多是由焊机所消耗的电能所引起的,因而焊接过程中的能耗目标函数可通过计算焊机的耗电量得到^[5,10]。考虑到某航空器油箱的焊接过程中的实际需求,因而同样将加工分为 N_{\max} 段进行探讨,即表示为:

$$E_t = \sum_{N=1}^{N_{\max}} P_N T_N \quad (5)$$

其中, P_N 为第 N 段加工中的负载功率,可表示为:

$$P_N = \frac{U_{L,N} I_{L,N}}{\eta_L} \quad (6)$$

其中, η_L 为焊机的功率因素。

综合式(1)及式(5)~(6),可得整个焊接过程中

的耗电量为:

$$E_t = \sum_{N=1}^{N_{\max}} \frac{f(I_{L,N}) I_{L,N} L_N}{\eta_L V_N} \quad (7)$$

1.3 约束条件

对于氩弧焊而言,其工艺参数的选取受焊接设备、工件特性、操作方法以及焊接质量等因素的约束。本文通过查询 HB/Z119—2011,确定从焊接速度、焊接电流以及焊接质量 3 个方面建立氩弧焊工艺参数优化选择的约束边界。

1.3.1 焊接速度约束

在焊接过程中,焊接速度的快慢直接影响单位时间热输入的大小。单位时间内热输入过大将导致焊缝处的金属过热,尤其在薄壁件如航空器油箱的焊接中,过热则会导致“焊穿”的问题;热输入过小则会导致未焊透的缺陷,无法保证焊缝质量。焊接速度的选取与焊接电流、电弧电压、焊接工件材料允许的热输入等有关,具体可表示为:

$$\frac{q_c}{U_{L,N} I_{L,N}} \leq V_N \leq \frac{q_{1\max}}{S \omega S_m} \quad (8)$$

其中, q_c 为材料允许的热输入; S 为焊缝的横截面积; ω 为焊接工件材料的比重; S_m 为单位重用已熔化材料的热焓; $q_{1\max}$ 为焊机的最大热输入,通过查询标准 NB/T 20002.3—2013 可知热输入可由式(9)计算:

$$q_{1\max} = K \frac{U_L I_L}{V} \times 10^{-3} \quad (9)$$

其中, K 为与焊接方法相关的热相率因数,通过查询相关标准可得,对于氩弧焊而言 $K=0.6$ 。

1.3.2 焊接电流约束

焊接电流的大小受两方面因素的限制。首先是焊机性能的限制,即为焊机最大及最小输出电流的约束;另外,焊接电流必须与所选用焊丝的直径相匹配^[11], HB/Z119—2011 规定了一定直径焊丝所对应的焊接电流系数 K_{\min} 和 K_{\max} 。则可得焊接电流约束为:

$$\max(I_{\min}, K_{\min} D) \leq I_{L,N} \leq \min(I_{\max}, K_{\max} D) \quad (10)$$

其中, I_{\max} 、 I_{\min} 分别为焊机的最大、最小输出电流; D 为焊丝直径。

1.3.3 焊接质量约束

本文根据江西洪都航空工业股份有限公司实际生产中,对油箱焊缝所使用的厂标,选取了焊缝熔深、焊缝宽度以及焊缝余高 3 个参数对焊接外观质量进行限定,其中由于航空器油箱属于薄壁件,因而对焊缝宽度及焊缝余高的要求根据正反面分别进行限定,即为:

$$\begin{cases} d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \\ b_{f\min} \leq b_f \leq b_{f\max} \\ b_{r\min} \leq b_r \leq b_{r\max} \\ h_{f\min} \leq h_f \leq h_{f\max} \\ h_{r\min} \leq h_r \leq h_{r\max} \end{cases} \quad (11)$$

其中, d 、 b_f 、 b_r 、 h_f 及 h_r 分别为焊缝熔深、正面焊缝宽度、反面焊缝宽度、正面焊缝余高以及反面焊缝余高, d_{\min} 、 d_{\max} 、 $b_{f\min}$ 、 $b_{f\max}$ 、 $b_{r\min}$ 、 $b_{r\max}$ 、 $h_{f\min}$ 、 $h_{f\max}$ 、 $h_{r\min}$ 及 $h_{r\max}$ 分别为焊缝熔深、正面焊缝宽度、反面焊缝宽度、正面焊缝余高及反面焊缝余高的最小及最大值。

综上,该电弧焊参数优化模型为:

$$T_i = \text{Minimum}$$

$$E_t = \text{Minimum}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{q_c}{U_{L,N} I_{L,N}} V_N \leq \frac{q_{1\max}}{S \omega S_m} \\ \max(I_{\min}, K_{\min} D) \leq I_{L,N} \leq \min(I_{\max}, K_{\max} D) \\ d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \\ b_{f\min} \leq b_f \leq b_{f\max} \\ b_{r\min} \leq b_r \leq b_{r\max} \\ h_{f\min} \leq h_f \leq h_{f\max} \\ h_{r\min} \leq h_r \leq h_{r\max} \end{cases} \quad (12)$$

2 云蚁群优化算法

为了高质高效的求解第 1 节所构建的参数优化问题,在本节中提出了一种基于云模型的蚁群算法(CBACO),通过云变异因子、单点交叉因子以及单形交叉因子以提升算法寻优方向的不确定性,从而有效克服蚁群算法的早熟问题,并通过适当的选择因子来进一步控制蚁群的寻优方向。在该算法中,优化模型的求解过程分为 4 个步骤,具体如图 1 所示。

首先,将 m 只蚂蚁随机地放置在解空间的不同位置 $X_i(x=1, 2, \dots, m)$ 上并释放相应浓度的信息素 τ_x ;接着,蚂蚁根据解空间中信息素的分布状况进行移动并更新信息素分布;然后,通过单点交叉因子以及云变异因子对少数蚂蚁的位置进行调整并更新信息素分布;最后通过单形交叉因子对少数划分为小群体的蚁群进行坐标的打乱重生成并更新信息素分布。通过以上步骤,以有效提升信息素的分布范围以及蚁群移动方向的不确定性。

2.1 基于加权求和法的多目标函数转化操作

在求解多目标优化问题中,常采用加权相加法将多目标问题转化为单目标进行求解^[12],则通过对上述目标函数进行加权相加得:

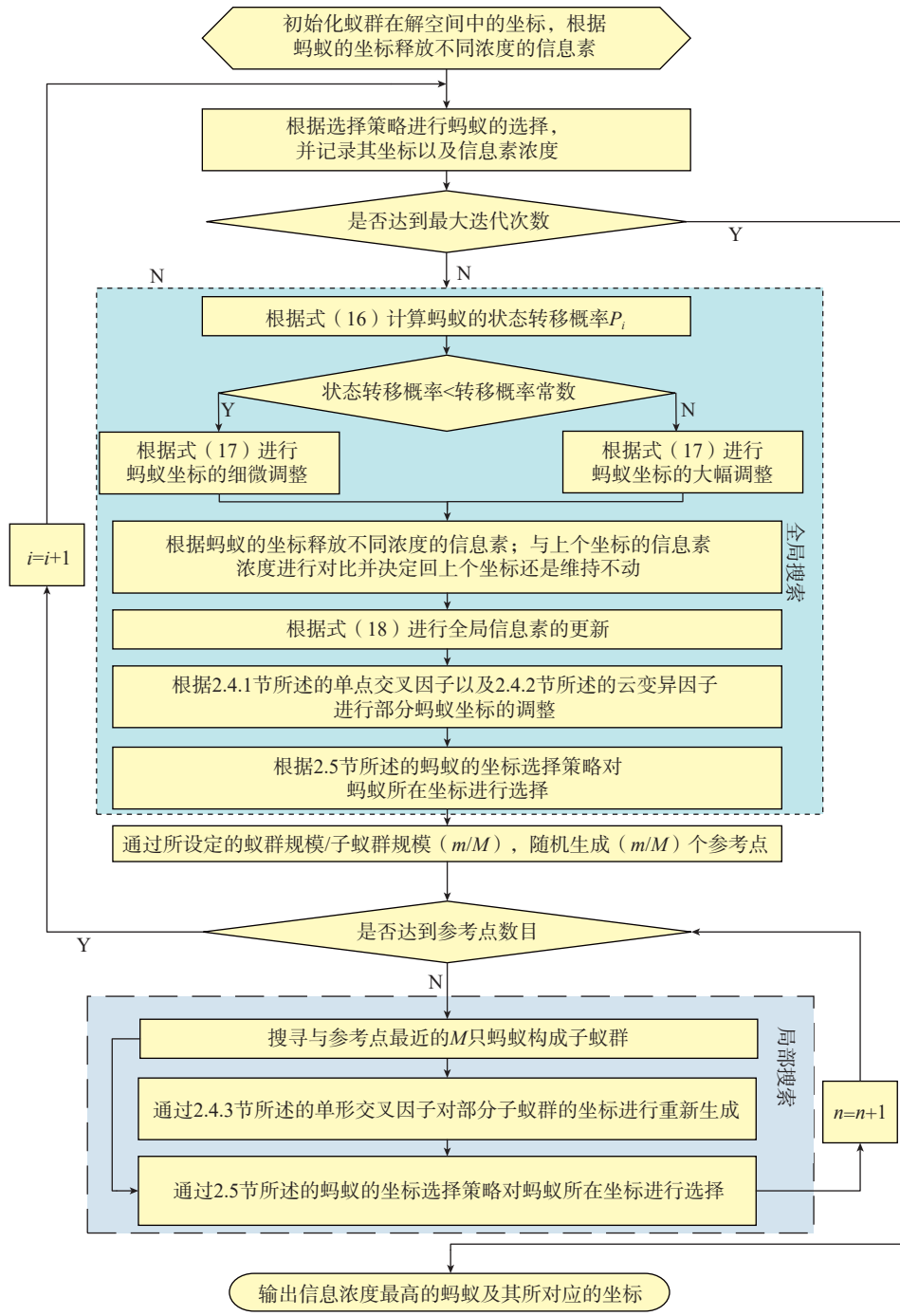


图1 CBACO算法流程图
Fig.1 Flow chart of CBACO algorithm

$$\min F(I_{L,1}, V_1, I_{L,2}, V_2, \dots, I_{L,N_{\max}}, V_{N_{\max}}) = \min(w_1 T_t + w_2 E_t) \quad (13)$$

其中, w_1 、 w_2 为权重系数, 满足 $w_1 + w_2 = 1$, 其取值的确定可采用模糊评价法、层次分析法、群体决策法、专家打分法等^[13]; E_t 为耗电量; T_t 为加工时长; 由于要对 T_t 和 E_t 进行求和, 且考虑到两者的量纲不统一, 因此需要先对其进行量纲统一化处理, 具体如下:

$$\begin{cases} T_t^* = \frac{T_t - T_{t\min}}{T_{t\max} - T_{t\min}} \\ E_t^* = \frac{E_t - E_{t\min}}{E_{t\max} - E_{t\min}} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $T_{t\max}$ 、 $T_{t\min}$ 分别为 T_t 作为单目标进行优化所得到的最大及最小值; 同理, $E_{t\max}$ 、 $E_{t\min}$ 分别为 E_t 作为单目标进行优化所得到的最大及最小值。由此, 式(13)可

转化为:

$$\min F(I_{L,1}, V_1, I_{L,2}, V_2, \dots, I_{L,N_{\max}}, V_{N_{\max}}) = \min \left(w_1 \left(\frac{T_l - T_{l\min}}{T_{l\max} - T_{l\min}} \right) + w_2 \left(\frac{E_l - E_{l\min}}{E_{l\max} - E_{l\min}} \right) \right) \quad (15)$$

2.2 自适应坐标转移策略

本文采用一种依据蚂蚁所在位置的信息素浓度自适应调整移动步长的坐标转移策略,以同时保证蚁群的全局搜索与局部探索能力。具体规则如下:

$$P_{i,x} = \frac{\max \tau_i - \tau_{i,x}}{\max \tau_i} \quad (16)$$

$$X_{i+1,x} = \begin{cases} X_{i,x} + \frac{\text{rand}()}{i} & P_{i,x} < P_0 \\ X_{i,x} + \frac{(\text{Up} - \text{Low}) \times \text{rand}()}{2} & P_{i,x} \geq P_0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, $P_{i,x}$ 为第 i 次迭代中蚂蚁 x 的状态转移概率, $\max \tau_i$ 为第 i 次迭代中最高的信息素浓度, $\tau_{i,x}$ 为第 i 次迭代中蚂蚁 x 所在坐标 $X_{i,x}$ 对应的信息素浓度, P_0 为所设定的转移概率常数, $\text{rand}()$ 为 0~1 之间的伪随机数, UP 以及 LOW 分别为蚂蚁坐标的上下界。

2.3 信息素更新策略

受传统蚁群算法中蚂蚁所释放的信息素会随着迭代次数而挥发的启发,本文中信息素的更新策略如下:

$$\tau_{i+1} = (1 - \rho) \tau_i + Q \times \tau_{i+1} \quad (18)$$

其中, τ_{i+1} 为第 $i+1$ 次迭代中蚂蚁 x 所在坐标 $X_{i+1,x}$ 对应的信息素浓度, ρ 为信息素挥发系数, Q 为蚂蚁移动一次可释放的信息素的总量,而具体释放量取决于 τ_{i+1} , τ_{i+1} 越大则蚂蚁在该位置释放信息素的浓度越高。

2.4 坐标变换操作

2.4.1 单点交叉因子

在本文中,采用单点交叉因子对全局中的部分蚂蚁进行成对的坐标变换,以提升蚂蚁坐标的不确定性。以第 $i+1$ 次迭代中蚂蚁 x 所在坐标 $X_{i,x}$ 以及蚂蚁 y 所在坐标 $X_{i,y}$ 为例,即:

$$\begin{aligned} X_{i,x} &= (X_{i,x1}, \dots, X_{i,xr}, X_{i,xs}, \dots, X_{i,xN_{\max}}) \\ X_{i,y} &= (X_{i,y1}, \dots, X_{i,yr}, X_{i,yS}, \dots, X_{i,yN_{\max}}) \end{aligned} \quad (19)$$

其中, r, s 之间为随机选取的交叉点,通过交叉操作之后,蚂蚁的坐标变换为:

$$\begin{aligned} X_{i,x} &= (X_{i,x1}, \dots, X_{i,xr}, X_{i,yS}, \dots, X_{i,yN_{\max}}) \\ X_{i,y} &= (X_{i,y1}, \dots, X_{i,yr}, X_{i,xs}, \dots, X_{i,xN_{\max}}) \end{aligned} \quad (20)$$

2.4.2 云变异因子

在本文中,受到云模型^[14]模糊处理机制的启发,提

出了基于云模型的云变异因子对全局中部分蚂蚁的坐标进行调整,其变异机制如下:

$$En' = N(En, He^2) \quad (21)$$

$$X_{i,x} = N(X_{i,x}, En'^2) \quad (22)$$

$$En = En_{\max} - \frac{En_{\max} - En_{\min}}{i_{\max}} \times i \quad (23)$$

$$He = He_{\max} - \frac{He_{\max} - He_{\min}}{i_{\max}} \times i \quad (24)$$

式(21)、(22)为传统的正交云模型,其中, En 为熵, He 为超熵,均随着迭代次数的增加逐步减小,如式(23)~(24)所示, En_{\max} 、 En_{\min} 分别为设定的熵的最大值及最小值, He_{\max} 、 He_{\min} 分别为设定的超熵的最大值及最小值, i_{\max} 为最大迭代次数,从而使算法在优化前期保持较高的探索能力,在后期实现有效的收敛。 En' 服从以期望值、以 He 为标准差的正态分布,同理,第 i 次迭代中蚂蚁 x 所在坐标 $X_{i,x}$ 服从以其本身为期望值、以 En' 为标准差的正态分布,由此生成若干云滴,随机挑选一个云滴的坐标替换 $X_{i,x}$ 的坐标,从而引入新的坐标。在本文中 $En_{\max} = 5.0 \times 10^{-3}$, $En_{\min} = 0$, $He_{\max} = 3.0 \times 10^{-3}$, $He_{\min} = 0$ 。

2.4.3 单形交叉因子

在本文中,考虑到单形交叉因子 (SPX)^[15] 可以不考虑信息素进行多只蚂蚁坐标的重新生成的特性,采用该因子对部分局部中的蚂蚁的坐标进行打乱重生成。以 M 只蚂蚁构成的子蚁群为例,连接它们与它们中心点 o , 从而构成了 M 个向量,其中中心点按下式求得:

$$o = (1/M) \sum_{i=1}^M X_{i,x} \quad (25)$$

然后以一定的比值(拓展因子)拓展所得到的向量,进而构成一个新的单形,最终从该单形中随机选取 M 个坐标点将蚂蚁放置上去。

2.5 选择策略

由于本文中含有如第 1.3 节中所述的约束,因此在优化过程中存在不可行解,因此需要规定如下选择策略:(1)若两个坐标对应的解均不可行,则蚂蚁停留在违背约束较小的坐标上;(2)若两个坐标对应的解均可行,则蚂蚁停留在信息素浓度高的坐标上;(3)若两个坐标对应的解一个可行、一个不可行,则蚂蚁停留在可行解上。

3 实例验证

以某航空器油箱的焊接为例,利用本文所提出 CBACO 及传统 ACO 对其焊接电流、焊接速度进行优化,然后通过 CBACO 优化所得工艺参数与经验参数进

行加工后的结果进行对比,从而验证所提出模型及算法的实用性。某航空器油箱示意图见图 2。

3.1 试验条件

该试验所采用的焊机为米勒 Dynasty700 型逆变氩弧焊机,其输出电流范围为 5~700A,功率因素为 0.99;采用的焊丝直径为 3.0mm 的 5A06,其焊接电流的限定范围为 90~160A,由式(11)可得焊接电流的取值为 90~160A,查询标准得对应的电压取值为 23.6~26.4V;所焊接油箱材料为 5A06,允许的最大热输入为 7.2kJ/m,热焔及比重分别为 1.195kJ/kg 及 2.64kg/m³,壁厚为 2mm,焊缝横截面积为 4mm²,总长度为 1400mm,分为 200mm、300mm、400mm、500mm 这 4 段采用无坡口方式进行焊接,其焊缝熔深、正面焊缝宽度、反面焊缝宽度、正面焊缝余高以及反面焊缝余高的限定范围分别为 0.6~2.16mm、6.0~15.0mm、0~5.0mm、0~1.5mm 以及 0~2.5mm。

3.2 试验结果

将以上参数代入第 1 节所构建的数学模型中,在 MATLAB 中对第 2 节所提出的 CBACO 进行编码,在此次优化中,蚁群总规模为 120,子蚁群规模为 12,总迭代次数为 200,信息素挥发系数为 0.9,转移概率常数为 0.2,信息素释放总量为 1;局部搜索的概率为 0.1,全局变异的概率为 0.2,全局交叉的概率为 0.8,单形交叉的拓展因子为 12。出于对比的目的,用 ACO 与 CBACO 对于所建立的数学模型分别进行优化求解。经过多次试验发现,在取与 CBACO 相同的蚁群规模以及迭代次数的情况下,ACO 不能有效地收敛到可行域,为了最大限度地避免这种情况,将蚁群规模放大为 2000,迭代次数为 300,其适应度函数评价价值相当于 CBACO 的 25 倍,即 ACO 的计算成本是 CBACO 的 25 倍。

分别采用两种算法对优化模型进行求解,经过取不同权重获得的 16 组解如图 3 所示,其中“o”代表 CBACO 优化所得结果,“*”代表 ACO 优化所得结果。明显可以看出 CBACO 可有效获得较为均匀的 Pareto 解集,而对于 ACO 而言,虽然获得了可行解,但是并不能有效收敛至 Pareto 前沿,即为其优化能力不能够满足参数优化的需求。CBACO 所获得 Pareto 解集中各个工艺参数及目标函数的具体取值见表 1。

一般来讲,焊接速度以及焊接电流满足约束要求的话便能够很好地保障焊接质量了。但是,为了进一步验证本文所构建的工艺参数优化模型及算法的实用性,从 CBACO 的优化结果中各选取 3 组参数作为加工工艺对油箱进行焊接加工,与经验参数作为加工工艺进行焊接的结果对比,以探究优化工艺参数是否能在保证加工质量的前提下提升加工效率并降低能耗。其中所选取的

优化工艺参数分别为最大加工时间、最低电能消耗量所对应的参数,即为表 1 中编号 1、16 所对应的工艺参数,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可得,3 组工艺参数焊接所得的焊缝余高、正反面的焊缝熔深及焊缝宽度均在前文所述的质量要求的范围以内,即为焊缝外形质量均合格,且通过 X 光射线检测得所焊接焊缝的质量均满足二级焊缝要求。除此之外,通过对比加工时长与耗电量可得,通过本文所提出的模型及算法获得的工艺参数进行焊接加工,可节省时间 59.41%~69.05%,节省电能 34.88%~46.30%,说明该方法确实能在保障焊接质量前提下实现高效节能焊接的目的,具有很强的实用性。

4 结论

(1) 以贴近实际生产为前提,构建了一种节能高效氩弧焊多目标工艺参数优化模型。

(2) 以 ACO 为基础,构建了一种适用于多目标焊接工艺参数优化的 CBACO。

(3) 通过 CBACO 以及 ACO 对所构建的工艺参数优化模型进行求解,可得 CBACO 在仅采用 ACO 计算成本的 1/25 的情况下即可有效地收敛到 Pareto 前沿,且所获得 Pareto 解的均匀性较好,同时虽然 ACO 的计算成本很高,但仅搜索到了可行域,仍无法收敛到

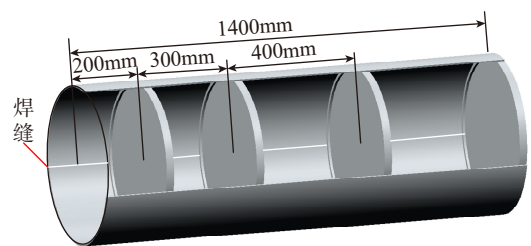


图2 某航空器油箱示意图

Fig.2 Schematic diagram of an aircraft fuel tank

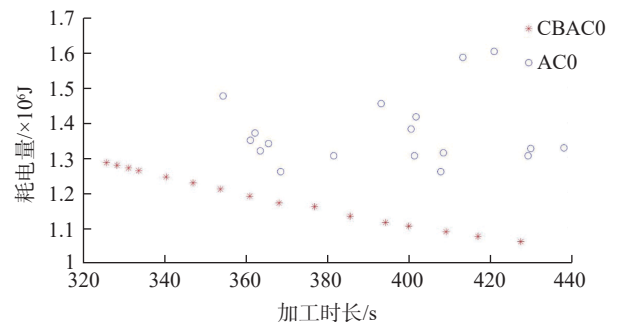


图3 CBACO以及ACO的优化结果

Fig.3 Optimization results of CBACO and ACO

表1 优化所得Pareto解集所对应的参数

Table 1 Parameters of Pareto solutions obtained by optimization

编号	设计变量								目标函数	
	$I_{L,1}/A$	$V_1/(mm \cdot s^{-1})$	$I_{L,2}/A$	$V_2/(mm \cdot s^{-1})$	$I_{L,3}/A$	$V_3/(mm \cdot s^{-1})$	$I_{L,4}/A$	$V_4/(mm \cdot s^{-1})$	T_i/s	$E_i/\times 10^6 J$
1	114.7221	3.6	101.4748	3.3	99.4354	3.2	99.7383	3.2	427.221899	1.059800
2	143.7232	4.0	94.0093	3.2	101.1939	3.2	102.1399	3.3	416.758286	1.074498
3	139.6281	3.7	125.3750	3.5	97.3745	3.3	94.8985	3.3	408.909354	1.088302
4	111.0273	3.2	111.0273	3.6	113.5489	3.6	111.0273	3.6	399.831023	1.104238
5	118.1269	3.6	109.9805	3.6	119.4116	3.6	110.2228	3.6	394.103213	1.114015
6	100.7432	3.2	108.2777	3.4	111.2755	3.6	145.1772	4.1	385.447315	1.132468
7	115.6531	3.5	116.1568	3.6	119.3215	3.7	134.0574	4.0	376.767315	1.159078
8	131.6701	3.8	124.4323	3.8	127.3460	3.8	122.6796	3.8	368.034346	1.169375
9	133.5952	3.9	127.6584	3.9	128.9516	3.9	124.6261	3.9	360.845599	1.189558
10	135.4966	4.0	130.7260	4.0	130.7260	4.0	136.8177	4.0	353.656852	1.209497
11	138.5112	4.1	135.2126	4.0	135.3415	4.1	139.4965	4.0	346.962515	1.226893
12	141.6238	4.2	140.1516	4.1	140.2659	4.1	142.1851	4.2	340.326159	1.244290
13	145.0828	4.2	145.0828	4.2	145.0828	4.2	145.0828	4.2	333.653074	1.261686
14	147.5583	4.2	147.5583	4.2	147.5583	4.2	147.5583	4.2	331.138799	1.269468
15	149.5484	4.3	149.5484	4.3	149.5484	4.3	147.4405	4.3	328.383074	1.277250
16	150.1692	4.3	150.1692	4.3	150.1692	4.3	150.1692	4.3	325.748074	1.285032

表2 优化结果与试验结果对比

Table 2 Comparison of optimization and experimental results

参数类型	高效	优化参数		经验参数
		高效	节能	
设计变量	$I_{L,1}/A$	150.1692	114.7221	80.0
	$V_1/(mm \cdot s^{-1})$	4.3	3.6	1.33
	$I_{L,2}/A$	150.1692	101.4748	80.0
	$V_2/(mm \cdot s^{-1})$	4.3	3.3	1.33
	$I_{L,3}/A$	150.1692	99.4354	80.0
	$V_3/(mm \cdot s^{-1})$	4.3	3.2	1.33
	$I_{L,4}/A$	150.1692	99.7383	80.0
	$V_4/(mm \cdot s^{-1})$	4.3	3.2	1.33
目标函数	T_i/s	325.748074	427.221899	1052.631579
	$E_i/(\times 10^6 J)$	1.285032	1.059800	1.973418
质量标准	d/mm	1.6	1.9	1.8
	b_j/mm	12.8	11.9	13.2
	b_r/mm	3.3	3.7	3.9
	h_j/mm	1.0	1.3	1.2
	h_r/mm	1.8	2.0	2.2

Pareto 前沿。

(4) 通过采用 CBACO 优化所得参数以及经验参数作为工艺参数在某航空器油箱上进行焊接试验, 可得优化参数在保证加工质量的前提下可有效节省时间 60.41%~69.05%, 节省电能 34.88%~46.30%, 即证明了所提出模型及算法具有很强的实用性, 对于焊接工艺参数优化领域的进一步发展具有一定的启发和借鉴意义。

参考文献

- [1] LIU L M, HUANG R S, CAO Y M. Behavior analysis of low power YAG laser-gas metal arc welding hybrid welding arc plasma[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3167-3173.
- [2] KHAN M M A, ROMOLI L, DINI G, et al. A simplified energy-based model for laser welding of ferritic stainless steels in overlap configurations[J]. CIRP Annals, 2011, 60(1): 215-218.
- [3] 罗毅, 曹华军, 李洪丞, 等. 基于 GRNN 网络的 CO₂ 气体保护焊工艺碳排放建模与参数优化[J]. 中国机械工程, 2013, 24(17): 2398-2403.
- [4] LUO Yi, CAO Huajun, LI Hongcheng, et al. Carbon emission modeling and parameter optimization of CO₂ gas shielded welding process based on GRNN network [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(17): 2398-2403.
- [4] ISLAM M, BUIJK A, RAIS-ROHANI M, et al. Simulation-

based numerical optimization of arc welding process for reduced distortion in welded structures[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2014, 84(1): 54–64.

[5] 张紫娟, 李仁旺, 柳新霞, 等. 焊接工艺碳足迹分析及其工艺参数优化[J]. *成型技术与生产现代化*, 2017, 34(1): 6–10.

ZHANG Zijuan, LI Renwang, LIU Xinxia, et al. Carbon footprint analysis of welding process and optimization of process parameters[J]. *Group Technology and Production Modernization*, 2017, 34(1): 6–10.

[6] 高星鹏, 陈峰, 王宇盛, 等. 基于遗传算法与神经网络微电阻点焊工艺参数优化[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(3): 33–37.

GAO Xingpeng, CHEN Feng, WANG Yusheng, et al. Optimization of micro-resistance spot welding process parameters based on genetic algorithm and neural network[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2018, 48(3): 33–37.

[7] 马小英, 孙志礼, 张毅博, 等. 基于 Kriging-PSO 智能算法优化焊接工艺参数[J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2019, 40(3): 370–375.

MA Xiaoying, SUN Zhili, ZHANG Yibo, et al. Optimization of welding process parameters based on kriging-PSO intelligent algorithm[J]. *Journal of Northeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 40(3): 370–375.

[8] 李亚江, 刘坤. 焊接技术在轻金属航空机体制造中的应用[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(23/24): 86–89.

LI Yajiang, LIU Kun. Application of welding technology in light metal airframe manufacturing [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2015, 58(23/24): 86–89.

[9] 胡晓冬, 彭伟, 赵万华, 等. 弧焊金属成形的电源选取及工作参数研究[J]. *航空制造技术*, 2005, 48(5): 77–80.

HU Xiaodong, PENG Wei, ZHAO Wanhua, et al. Study on power supply selection and work-ing parameters of metal forming in arc welding [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005, 48(5): 77–80.

[10] 万晓慧, 赵海涛, 金俊龙. TA15 钛合金超高频氩弧焊工艺试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 82–85.

WAN Xiaohui, ZHAO Haitao, JIN Junlong. TA15 titanium alloy uhf argon arc welding process experimental study[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2017, 60(7): 82–85.

[11] 王洪光. 实用焊接工艺手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

WANG Hongguang. *Practical welding process manual*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

[12] 李聪波, 崔龙国, 刘飞, 等. 面向高效低碳的数控加工参数多目标优化模型[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(9): 87–96.

LI Congbo, CUI Longguo, LIU Fei, et al. Multi-objective optimization model for numerical control machining parameters with high efficiency and low carbon[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(9): 87–96.

[13] 赵又群, 刘英杰. 基于改进模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观综合评价[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(18): 2519–2523.

ZHAO Youqun, LIU Yingjie. Subjective comprehensive evaluation of vehicle handling stability based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(18): 2519–2523.

[14] LI D, LIU C, GAN W. A new cognitive model: Cloud model[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2009, 24(3): 357–375.

[15] HIGUCHI T, TSUTSUI S, YAMAMURA M. Theoretical analysis of simplex crossover for realcoded genetic algorithms[M]//*Parallel*

Problem Solving From Nature PPSN VI. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

通讯作者: 肖熙, 高级工程师, 研究方向为航空焊接技术, E-mail: 715690145@qq.com.

(责编 阳光)

(上接第88页)

machining dynamics by substructure analysis[J]. *CIRP Ann*, 2000, 49(1): 303–308.

[11] MOVAHHEDY M R, GERAMI J M. Prediction of spindle dynamics in milling by sub-structure coupling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(3–4): 243–251.

[12] SCHMITZ T L, POWELL K, WON D, et al. Shrink fit tool holder connection stiffness/damping modeling for frequency response prediction in milling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(9): 1368–1380.

[13] 闫蓉, 蔡飞飞, 彭芳瑜, 等. 基于响应耦合方法的铣刀刀尖点频响函数预测 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2013(4): 6–10.

YAN Rong, CAI Feifei, PENG Fangyu. Prediction of milling cutter tip FRF based on RCSA[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013(4): 6–10.

[14] AHMADI K, AHMADIAN H. Modelling machine tool dynamics using a distributed parameter tool–holder joint interface[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(12–13): 1916–1928.

[15] 王二化, 吴波, 胡友民, 等. 主轴–刀柄与刀柄–刀具结合面参数辨识研究 [J]. *振动与冲击*, 2014(10): 50–54.

WANG Erhua, HU Bo, HU Youmin, et al. Research on connection parameters identification of spindle–holder and tool–holder Interface[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014(10): 50–54.

[16] 王军. 数控铣削加工过程稳定性分析与预测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

WANG Jun. Analysis and prediction of the stability of NC milling process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[17] ALBERTELLI P, GOLETTI M, MONNO M. A new receptance coupling substructure analysis methodology to improve chatter free cutting conditions prediction[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 72: 16–24.

[18] PARK S S, CHAE J. Joint identification of modular tools using a novel receptance coupling method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 35(11–12): 1251–1262.

[19] 李航. 统计学习方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

LI Hang. *Statistical learning methods*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

通讯作者: 郝小忠, 副高级, 研究方向为数字化设计与制造、机械加工、加工变形控制等, E-mail: xhao@nuaa.edu.cn.

(责编 阳光)