

# 基于 PSO-OSSART 算法的非轴对称电弧发射系数重建质量评价

洪海涛, 王璐, 韩永全, 昌乐

(内蒙古工业大学, 内蒙古自治区轻金属材料重点实验室, 呼和浩特, 010051)

**摘要:** 针对有序子集-联合重建算法 (ordered subsets-simultaneous algebraic reconstruction technique, OSSART) 重建参数选取主观性强的不足, 提出以重建区域误差最小为适应度的随机优化粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 来获取最佳重建参数, 并对非轴对称电弧发射系数稀疏角度重建质量进行评价。结果表明, 与最大似然函数期望值最大化算法相比, 基于粒子群的 OSSART 算法不仅能够在大投射角度间隔条件下使重建误差明显降低, 而且具有更强的边缘保持能力, 能够有效提高电弧中心区域的重建质量。采用 OSSART 算法, 应在 180°范围内至少等间距采集 6 次特征谱线投影, 才能保证变极性等离子-熔化极气体保护复合焊 (variable polarity plasma arc-metal inert gas, VPPA-MIG 复合焊) 电弧发射系数场的重建质量。试验结果为非轴对称电弧可靠光谱诊断提供理论依据。

**创新点:** (1) 将粒子群算法与有序子集-联合重建算法相结合, 能够快速获取质量最优的重建参数组合。  
(2) 在大投射角度间隔条件下, 提出的新算法能够有效提高电弧中心区域的重建质量, 重建误差明显降低。

**关键词:** 光谱诊断; 非轴对称电弧; 发射系数; 粒子群算法

中图分类号: TG 403 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20210823001

## 0 序言

近年来, 为了满足现代装备制造领域对焊接工艺高质量、高效率的要求, 相继提出多种复合焊接技术<sup>[1-2]</sup>。电弧作为能量传输的载体, 可以采用温度场来描述其热力学状态。为了最大程度发挥复合焊接的优势, 对电弧热力学状态进行研究, 有助于了解电弧内在本质, 进而改善焊接工艺, 提高焊缝质量。

发射系数重建作为获得电弧温度场的关键环节, 其重建质量直接关系到温度场的准确性。对于柱对称电弧, 可以采用 Abel 逆变换得到电弧不同位置的发射系数分布。而对于非对称分布的复合焊接电弧而言, 如果光谱诊断时仍假设电弧呈对称分布, 会极大的增加发射系数计算误差, 降低电弧温度场的可靠程度。为此, 研究人员提出多种非轴对

称电弧发射系数重建算法计算发射系数<sup>[3]</sup>。常用的三维重建算法有代数迭代重建算法、统计迭代重建算法以及压缩感知理论。代数重建算法作为典型的迭代重建算法, 其基本思想是给离散化区域赋初值, 从多个角度得到投影值, 与累加谱线强度值比较并加以校正, 直到满足所要求后结束迭代过程。由于需要对射线进行逐条更新修正, 重建速度慢, Liu 等人<sup>[4]</sup> 利用联合迭代重建算法对同一投影角度下的所有射线误差进行累计, 避免单条射线误差对重建结果的影响, 可以有效抑制噪声信号。李慧君等人<sup>[5]</sup> 提出两相式重建策略, 先利用代数重建算法重建中间图像进行非负约束, 再采用选择性全变差最小化对图像进行优化修正, 循环执行上述运算直到重建结果满足收敛准则为止。然而, 由于算法所需投影数量庞大, 对焊接电弧投影数据完备性提出较高的要求<sup>[6]</sup>。为了解决上述问题, 研究人员提出收敛速度快, 重建结果平滑的有序子集-联合重建算法 (ordered subsets-simultaneous algebraic reconstruction technique, OSSART), 以期在电弧发射系数分布重建中得到应用。

采用 OSSART 算法重建非轴对称电弧发射系

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51665044); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2019LH05017); 内蒙古自治区科技计划项目 (2020GG0313)。

数存在以下两方面的问题。首先，在电弧光谱诊断过程中，由于工况及成本等因素<sup>[7]</sup>，无法实现 0°~180°范围内光谱数据的逐角度采集。对于这类角度稀疏重建问题，由于投影方程的数量远小于待求解未知数数量，导致目标函数求解呈现不适定性，采用迭代方式求解容易收敛至局部最优解，难以得到满意的重建质量。为了避免此类问题出现，可以借鉴随机优化算法的求解过程。随机优化的思路是当求得的解陷入局部最优解时，算法根据其独特的新样本产生机制，不仅能够保证解的多样性，更有利于获得全局最优解<sup>[8]</sup>。除此之外，对于 OSSART 算法，重建质量依赖于子集个数、松弛因子以及松弛因子衰减系数的合理设置。如果重建参数采用控制变量法逐一尝试的方式获得，难以兼顾参数间的交互作用，无法获得最佳的重建质量。

采用随机粒子群优化 OSSART 算法，快速获取质量最优的重建参数组合。对模拟发射系数投影数据进行重建，采用归一化均方根误差对粒子群-有序子集-联合重建算法 (particle swarm optimization-ordered subsets simultaneous algebraic reconstruction technique, PSO-OSSART) 和最大似然函数-期望值最大化算法 (maximum likelihood expectation maximum, MLEM) 发射系数稀疏角度重建质量进行评

$$\varepsilon_j^{k+1} = \varepsilon_j^k + \frac{\sum_{t \in S_r} \left[ \lambda_0 \lambda_r w_{ij} \left( \sum_{j=1}^N w_{ij} \right)^{-1} \left( p_i - \sum_{j=1}^N w_{ij} \varepsilon_j^k \right) \right]}{\sum_{t \in S_r} w_{ij}} \quad (2)$$

式中： $\lambda_0$  为初始松弛因子； $\lambda_r$  为松弛因子衰减系数。

对于 OSSART 算法重建时需要合理设置投射角度间隔、子集数、松弛因子及其衰减系数才能实现准确重建。为了减少 OSSART 算法因主观选取的不足，文中提出采用粒子群启发式随机优化算

$$V_n^{k+1} = \left( w_{\max} - \frac{k(w_{\max} - w_{\min})}{k_{\max}} \right) V_n^k + c_1 \cdot rand \cdot (P_{\text{best}_n} - P_n^k) + c_2 \cdot rand \cdot (G_{\text{best}} - P_n^k) \quad (3)$$

$$P_n^{k+1} = P_n^k + V_n^k \quad (4)$$

式中： $V_n$  为第  $n$  个粒子的速度； $k$  为迭代次数； $w_{\max}$  为最大惯性权重； $w_{\min}$  为最小惯性权重； $k_{\max}$  为最大迭代次数； $c_1, c_2$  为学习因子； $rand$  为 (0,1)

内的随机数； $P_{\text{best}_n}$  为第  $n$  个粒子的历史最优解； $G_{\text{best}}$  为种群的最优解； $P_n$  为第  $n$  个粒子的位置。为了平衡算法的全局搜索能力和计算量，粒子群算法参数设置如表 1 所示。

表 1 粒子群算法参数

Table 1 Parameters for particle swarm optimization

种群规模 $N$ (个)	粒子维度 $D$	最大惯性权重 $w_{\max}$	最小惯性权重 $w_{\min}$	最大迭代次数 $k_{\max}$ (次)	学习因子 $c$
40	3	0.95	0.40	50	2

## 2 模拟发射系数分布模型的建立

采用由 CMOS 高速摄像机、带通滤波片以及中性滤波片组成的光谱信息采集系统得到变极性等离子-熔化极气体保护复合焊 (variable polarity plasma arc-metal inert gas welding, VPPA-MIG 复合焊) 电弧 Ar I 794.8 nm 的特征谱线图像, 如图 1 所示.

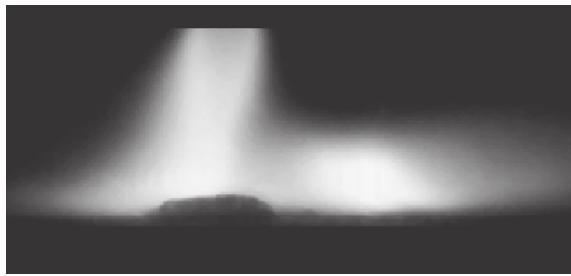


图 1 VPPA-MIG 复合焊电弧特征谱线图像

Fig. 1 Characteristic spectrum image of VPPA-MIG hybrid welding arc

从图 1 可以看出, 电弧不同高度, 特征谱线强度分布存在显著差异. 对于复合电弧上半部分, 仅存在等离子电弧, 由于等离子电弧与 MIG 焊电弧的电磁耦合作用<sup>[12]</sup>, 等离子电弧中心轴线向左侧偏斜. 图 2 为不同电弧高度的谱线强度分布. 图 2a 为等离子压缩喷嘴下方 1 mm 截面处的特征谱线强度分布, 谱线所在区域狭小并且电弧中心谱线强度有所降低. 对于复合电弧下半部分, 等离子电弧和 MIG 电弧同时存在. 图 2b 为等离子压缩喷嘴下方 9 mm 截面处的强度分布, 谱线强度呈现

$$\varepsilon_A = E_1 \exp \left\{ - \left[ \frac{\left( x - 0.1 \tan \alpha \left\{ E_1 \exp \left[ - \frac{(x - b_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \right\} - b_1 \right)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{y^2}{2\sigma_1^2} \right] \right\} - E_2 \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - b_1)^2}{2\sigma_2^2} + \frac{y^2}{2\sigma_2^2} \right] \right\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_B = E_3 \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - b_3)^2}{2\sigma_3^2} + \frac{y^2}{2\sigma_3^2} \right] \right\} + E_4 \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - b_4)^2}{2\sigma_4^2} + \frac{y^2}{2\sigma_4^2} \right] \right\} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_A$  和  $\varepsilon_B$  分别为模型 A 和模型 B 的发射系数;  $x$  为横坐标;  $y$  为纵坐标;  $E_1, E_2, E_3, E_4$  为模型 A 和模型 B 的发射系数分布曲线的幅值;  $b_1, b_3, b_4$  为模型 A 和模型 B 的曲线中心;  $\sigma$  为模型 A 和模型 B 的标准差;  $\alpha$  为电弧的偏斜角. 分别对图 2a 和图 2b 数据进行高斯拟合, 得到两种模型参数如表 2 所示, 其中  $\alpha$  的取值为  $\pi/200$ . 发射系数分布如图 3 所示.

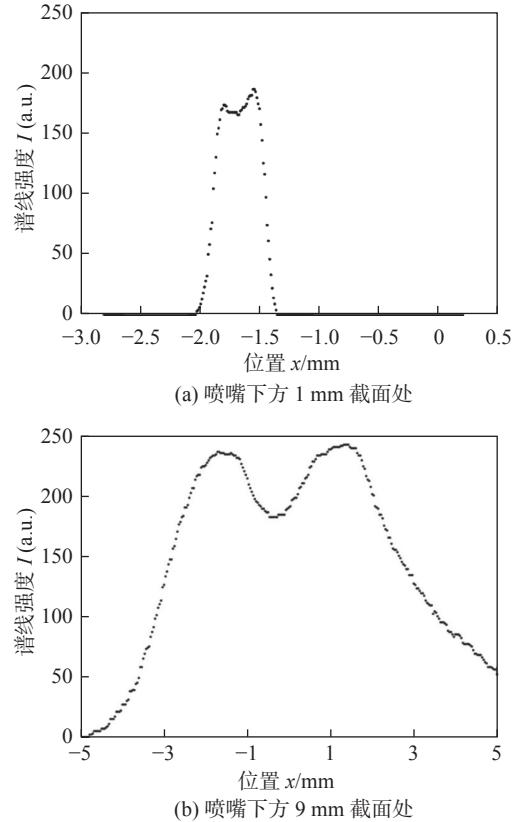


图 2 不同电弧高度的谱线强度分布

Fig. 2 Spectrum intensity distribution at different arc heights. (a) section of 1 mm below the nozzle; (b) section of 9 mm below the nozzle

双峰分布, 两电弧结合区域出现较大幅度的强度降低.

结合上述复合电弧特征, 采用二维高斯函数模型 A 和模型 B 模拟上述发射系数分布, 其表达式分别为

表 2 发射系数模型参数

Table 2 Parameters of emission coefficient model

模型	幅值 $E(\text{a.u.})$		标准差 $\sigma(\text{a.u.})$		曲线中心 $b/\text{mm}$	
	符号	取值	符号	取值	符号	取值
A	$E_1$	205.90	$\sigma_1$	0.42	$b_1$	-1.28
	$E_2$	70.70	$\sigma_2$	0.15		
B	$E_3$	225.80	$\sigma_3$	2.00	$b_3$	1.10
	$E_4$	164.60	$\sigma_4$	0.87	$b_4$	-2.09

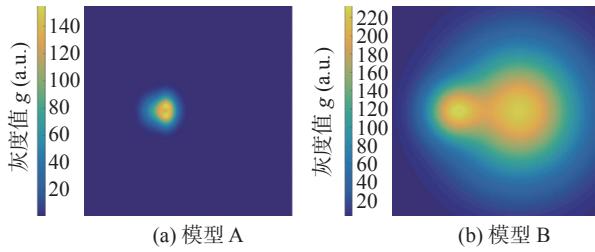


图 3 模拟发射系数分布

Fig. 3 Distribution of simulated emission coefficients.  
(a) model A; (b) model B

### 3 发射系数重建质量评价

在  $(0, 180^\circ)$  范围内, 对经归一化的发射系数分布模型进行 radon 变换, 得到不同投射角度间隔情况下的特征谱线强度。采用归一化均方根误差  $\delta$  评价重建质量, 其表达式为<sup>[13]</sup>

$$\delta = \frac{\|\varepsilon_j^k - \varepsilon_j\|_2}{\|\varepsilon_j\|_2} \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon_j^k$  为网格  $j$  第  $k$  次迭代的发射系数重建值;  $\varepsilon_j$  为发射系数的实际值。将重建区域离散为  $281 \times 281$  的网格, 每个角度投影采样数为 397, 迭代次数为 150。为了加快迭代收敛速度, 采用 Mueller 提出的加权距离最大方式<sup>[14]</sup> 安排子集间投影访问顺序。以重建区域归一化均方根误差为适应度函数, 采用粒子群算法对 OSSART 算法重建参数进行优化, 得到重建质量最优的参数组合, 如表 3 所示。

表 3 OSSART 算法重建参数

Table 3 Reconstructed parameters of OSSART algorithm

模型	投射角度间隔 $\theta/^\circ$	子集数 $T/\text{unit}$	松弛因子 $\lambda(\text{a.u.})$	松弛因子衰减系数 $\lambda_t(\text{a.u.})$
A	10	18	6.0198	0.9924
	15	12	2.3634	0.9986
	20	9	5.4391	0.9931
	25	8	5.4575	0.9885
	30	6	6.1309	0.9907
	35	6	3.8199	0.9957
	40	5	3.4286	0.9792
B	10	10	0.5273	1
	15	7	0.6470	1
	20	9	6.2536	0.9684
	25	8	2.7828	0.9844
	30	6	2.8102	0.9874
	35	6	6.9530	0.9856
	40	5	2.7630	0.9949

由于重建时无需额外设置参数, MLEM 算法不需要进行粒子群算法优化。文中采用两种方式评价

算法重建质量。首先, 以重建区域整体发射系数分布为对象, 采用归一化均方根误差, 评价算法重建质量, 如图 4 所示, 图中圆圈表示重建误差的最小值。

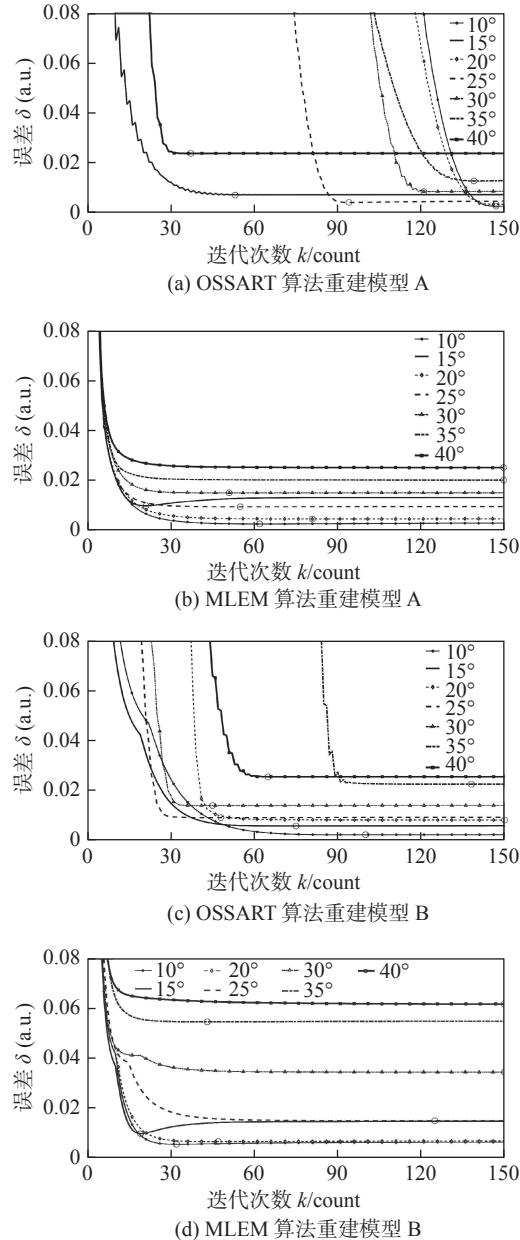


图 4 迭代过程中重建误差的变化

Fig. 4 Changes in reconstructed error during iterations.  
(a) OSSART algorithm of reconstructed model A;  
(b) MLEM algorithm of reconstructed model A; (c)  
OSSART algorithm of reconstructed model B; (d)  
MLEM algorithm of reconstructed model B

从图 4 可以看出, 在投射角度间隔相同的条件下, 采用 OSSART 算法得到的重建误差明显低于 MLEM 算法。重建算法误差对电弧截面发射系数分布的敏感程度不同。相比于仅存在等离子电弧, 分布相对单一的模型 A, 分布更为复杂的复合电弧模型 B 采用 OSSART 算法在大投射角度间隔条件下

能够获得更好的重建质量. 当投射角度间隔小于  $25^\circ$  时, OSSART 算法重建误差相比于 MLEM 算法降低约 35.3%, 而当角度间隔大于  $25^\circ$  时, OSSART 算法重建误差降低约 57.8%.

以发射系数分布中间行的数据为对象, 对比不同投射角度间隔 OSSART 算法和 MLEM 算法的重建质量, 如图 5 和图 6 所示, 图中误差为重建发射系数与原始发射系数的差值.

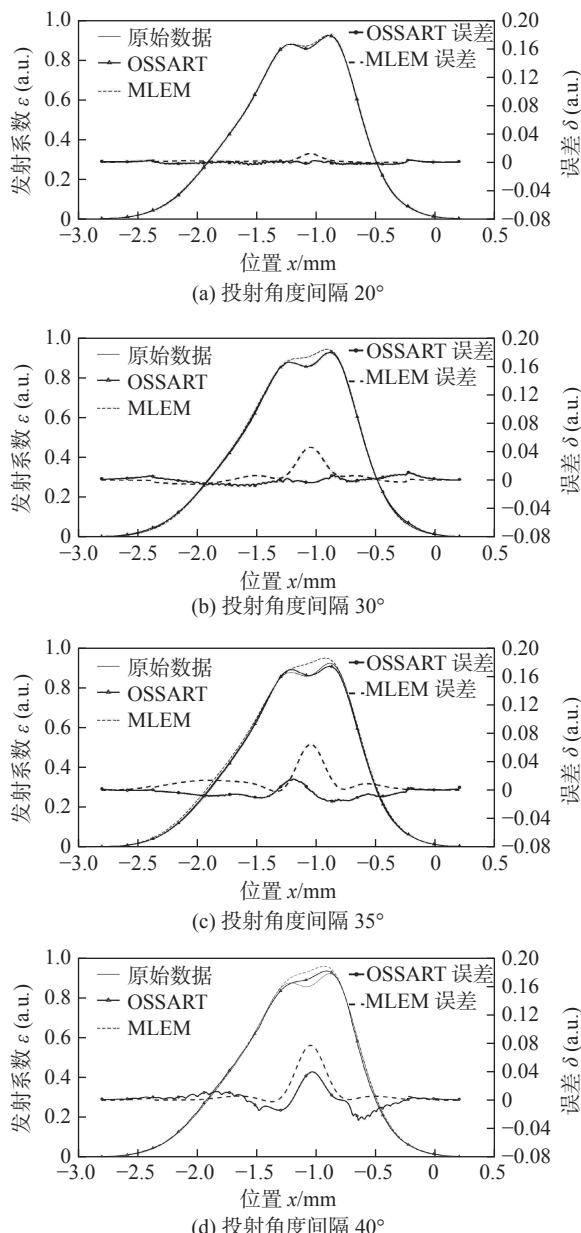


图 5 不同投射角度间隔下模型 A 的发射系数分布中间行的重建质量

Fig. 5 Reconstructed quality of the emission distribution middle row of model A at different projection angle intervals. (a) projection angle interval  $20^\circ$ ; (b) projection angle interval  $30^\circ$ ; (c) projection angle interval  $35^\circ$ ; (d) projection angle interval  $40^\circ$

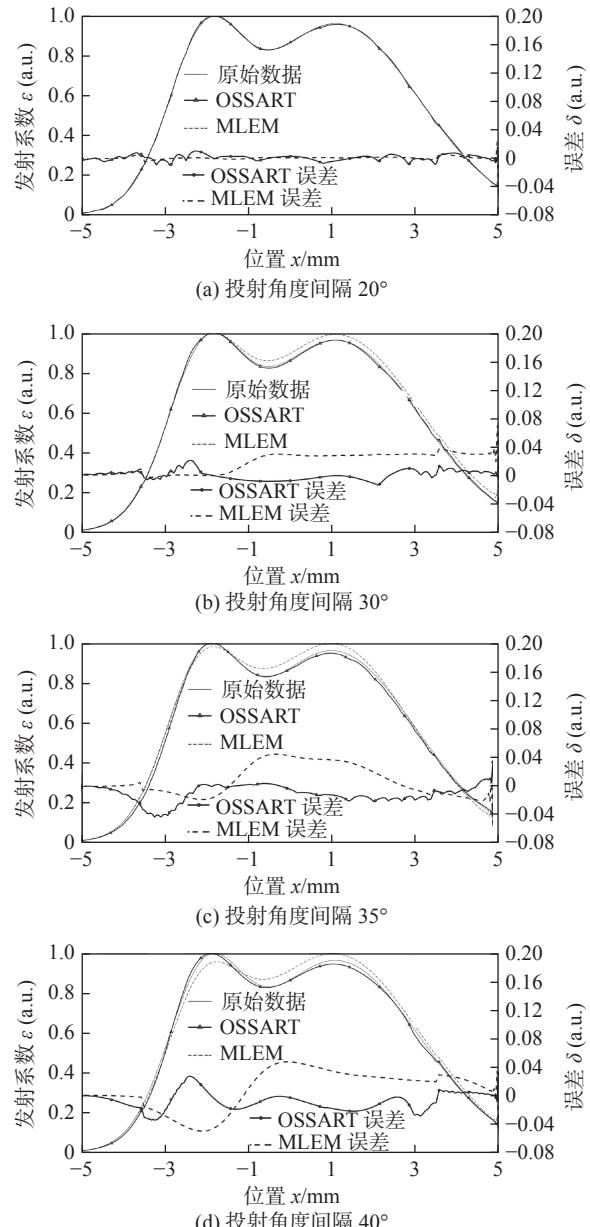


图 6 不同投射角度间隔下模型 B 的发射系数分布中间行的重建质量

Fig. 6 Reconstructed quality of the emission distribution middle row of model B at different projection angle intervals. (a) projection angle interval  $20^\circ$ ; (b) projection angle interval  $30^\circ$ ; (c) projection angle interval  $35^\circ$ ; (d) projection angle interval  $40^\circ$

对于电弧外围区域(模型 A 为图中  $-1.25 \sim -0.8$  之外的区域), 两种算法在发射系数重建时均能达到较高的精度, 而对于电弧中心区域, OSSART 算法得到的重建结果边缘保持能力优于 MLEM 算法. 据测算, 电弧中心区域流过的能量约占电弧整体传导能量的 70%<sup>[15]</sup>, 为了保证电弧物理研究的可靠性, 该区域需要更高的重建精度. 对于模型 A, MLEM 算法需要投射角度间隔小于  $20^\circ$  才能保证重建质量, 当投射角度间隔增加为  $30^\circ$  时电弧中心

的发射系数已无原始数据的变化趋势。而 OSSART 算法, 投射角度间隔为 35° 时还能基本保证重建质量。对于模型 B, 两种算法所需要的最低投射角度间隔相应提高。因此, 为了保证 VPPA-MIG 复合焊接电弧的重建质量, 尽可能的减少特征谱线拍摄次数, 应采用 OSSART 算法在 180° 范围内投射角度间隔 30° 采集投影数据。

## 4 结论

(1) 采用随机优化粒子群算法对有序子集-联合重建算法重建参数进行优化, 能够得到重建质量最优的参数组合。

(2) 相比于最大似然函数-期望值最大化算法, 有序子集-联合重建算法不仅在大投射角度间隔条件下, 复杂发射系数分布重建误差明显降低, 而且具有更强的边缘保持能力, 能够有效提高电弧中心区域的重建质量。

(3) 采用有序子集-联合重建算法, 应在 180° 范围内至少等间距采集 6 次特征谱线投影, 才能保证 VPPA-MIG 复合焊接电弧发射系数场的重建质量。

## 参考文献

- [1] 贾亚洲, 陈树君, 肖珺, 等. 脉冲激光与电弧布置方式对铝合金焊接熔滴过渡与焊缝形貌的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 17–24.  
Jia Yazhou, Chen Shujun, Xiao Jun, et al. Effect of pulse laser-arc arrangement on metal transfer and bead formation characteristics of aluminum alloy welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 17–24.
- [2] 李志宁, 都东, 常保华, 等. 激光-等离子弧复合焊接熔池流动和传热的数值分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(7): 37–40.  
Li Zhining, Du Dong, Chang Baohua, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer in weld pool of laser-plasma hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(7): 37–40.
- [3] Wu P, Sisniega A, Stayman J W, et al. Cone-beam CT for imaging of the head/brain: Development and assessment of scanner prototype and reconstruction algorithms[J]. Medical Physics, 2020, 47(6): 2392–2407.
- [4] Liu L, Lin W K, Jin M W. Reconstruction of sparse-view X-ray computed tomography using adaptive iterative algorithms[J]. Computers in Biology and Medicine, 2015, 56(1): 97–106.
- [5] 李慧君, 齐宏亮, 徐圆, 等. 基于选择性全变差约束的稀疏角度 CT 快速迭代重建算法 [J]. 生物医学工程学杂志, 2014, 31(5): 1011–1017.  
Li Huijun, Qi Hongliang, Xu Yuan, et al. A fast iterative reconstruction algorithm of spares angular CT based on the selective total variation[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(5): 1011–1017.
- [6] 张顺利, 张定华, 王成, 等. 投影数对 ART 算法重建质量的影响 [J]. 无损检测, 2008, 30(12): 889–891.  
Zhang Shunli, Zhang Dinghua, Wangcheng, et al. The influence of projection number on reconstruction quality of algebraic reconstruction technique[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(12): 889–891.
- [7] Jiang Fan, Li Yuanfeng, Chen Shujun. Tomographic measurement of temperature in non-axisymmetric arc plasma by single camera multi-view imaging system[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21745–21761.
- [8] Aydilek Ibrahim Berkani. A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for computationally expensive numerical problems[J]. Applied Soft Computing, 2018, 66(5): 232–249.
- [9] 李元锋. 非轴对称电弧瞬时温度场测量方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
Li Yuanfeng. Study on measurement method of instantaneous temperature field of non-axisymmetric arc[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [10] Wang Ge, Jiang Ming. Ordered-subset simultaneous algebraic reconstruction techniques (OS-SART)[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2004, 12(3): 169–177.
- [11] 邓新国, 游纬豪, 徐海威. 贝叶斯极限梯度提升机结合粒子群算法的电阻点焊参数预测 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1042–1049.  
Deng Xinguo, You Weihao, Xu Haiwei. Prediction of resistance spot welding parameters by Bayes-XGBoost and particle swarm optimization[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2021, 43(4): 1042–1049.
- [12] 洪海涛, 韩永全, 童嘉晖, 等. 铝合金 VPPA-MIG 复合焊接电弧形态及伏安特性 [J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 65–69.  
Hong Haitao, Han Yongquan, Tong Jiahui, et al. Study of arc shape and voltage-current characteristics in variable polarity plasma arc-MIG hybrid welding of aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 65–69.
- [13] Zhang Guangjun, Xiong Jun, Gao Hongming, et al. Reconstruction of emission coefficients for a non-axisymmetric coupling arc by algebraic reconstruction technique[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(1): 92–99.
- [14] Ivan G Kazantsev, Samuel Matej, Robert M Lewitt. Optimal ordering of projections using permutation matrices and angles between projection subspaces[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2005, 20(5): 205–216.
- [15] Xiao Tianjiao, Song Yonglun, Yang Fangtian. Regional characteristics of arc energy distribution[J]. China Welding, 2013, 22(2): 1–5.

**第一作者:** 洪海涛, 博士, 讲师; 主要从事高能束焊接机理方面的研究; Email: honghaitao@imut.edu.cn

(编辑: 温宇航)