DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.01.034

轮廓几何特征融合下的电网设备激光除锈控制参数 自适应确定方法

刘伟1,苏文斌2

(1. 贵州电网有限责任公司 电力科学研究院,贵州 贵阳 550002;

2. 山东惠工电气股份有限公司,山东 淄博 255086)

摘 要:基于激光除锈轮廓特征,在进行电网设备除锈控制参数确定时,主要依托于单一的轮廓几何特征,导致除锈后 表面粗糙度偏差较大。设计一种以轮廓几何特征融合为核心的参数自适应确定方法,根据激光除锈工作原理,建立激 光除锈有限元模型。采用边界矩分析算法,提取电网设备除锈的多个轮廓几何特征;融合多个轮廓几何特征,设计基于 融合特征的参数确定方法,有效选择各项控制参数;通过响应面分析,自适应确定电网设备激光除锈控制参数。实验结 果表明:该方法可使除锈后表面粗糙度与目标表面粗糙度值之间偏差减小2.7μm,与其他激光除锈控制参数设置结果相 比,除锈后表面粗糙度偏差降低了54.24%、63.51%。

关键词:轮廓几何特征;特征融合;激光除锈;控制参数;电网设备;表面粗糙度 中图分类号:TN249 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2024)01-0164-05

Adaptive Determination Method of Laser Derusting Control Parameters for Power Grid Equipment Based on Contour Geometric Feature Fusion

LIU Wei¹, SU Wenbin²

(1. Electric Science Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Shandong Huigong Electric Co., Ltd., Zibo 255086, China)

Abstract: Based on the profile characteristics of laser derusting, determining the control parameters of power grid equipment derusting mainly relies on a single profile geometric feature, which results in a large deviation of derusted surface roughness after the parameters determination. An adaptive parameter determination method based on contour geometric feature fusion is designed. According to the working principle of laser derusting, the finite element model of laser derusting. Based on the fusion of multiple contour geometric features, a parameter determination method is designed to effectively select various control parameters. Through response surface analysis, the laser derusting control parameters of power grid equipment are adaptively determined. The experimental results show that the deviation between the derusted surface roughness and the target surface roughness can be reduced 2.7 µm. Compared with the setting results of other laser derusting control parameters, the derusted surface roughness deviation is reduced by 54.24% and 63.51%

Keywords: contour geometric features; feature fusion; laser derusting; control parameters; power grid equipment; surface roughness

0 引言

因部分环境恶劣地区的湿度过高、温度较高 会使得电网设备出现严重锈蚀问题,导致输变电 设备服役寿命大大减少^[1-2]。同时,关键电网设 备被锈蚀后,也给后续电网运行带来安全隐患。 因此,对电网设备进行高效除锈已经成为电力行 业亟待解决的问题。目前,激光除锈作为最常见 的除锈方式,其控制参数取值直接影响了最终除锈 效果。因此,众多研究人员开始针对激光除锈控制 参数自适应确定方法进行研究。

文献[3]通过有限元模型,模拟激光除锈操 作过程,根据设备除锈要求选定最佳工艺参数。 但是,该方法鲁棒性较差。文献[4]提取重点工 艺参数,将其看作优化变量,运用改进灰狼优化算 法,建立以最优加工质量为核心的参数选取模型, 再通过逼近理想解排序法进行求解,得到最优工

基金项目:中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GZKJXM20191302)

第一作者简介:刘伟(1972—),男,贵州贵阳人,高级工程师,研究方向为电力化学环保研究,quanqiaochan7m0@163. com。

艺参数。但是,该方法确定控制参数耗时较长。 文献[5]采用灰色关联分析方法,对正交试验数 据进行分析,建立最优工艺参数优化模型。通过 主效应方法,明确不同工艺参数影响下,设备表面 粗糙度、应力的变化规律,从而确定最合适的控制 参数。但是,应用该方法得出的控制参数进行除 锈,设备表面粗糙度较高。

本文以电网设备除锈为目标,为了提升激光 除锈技术的除锈效果,提出一种基于轮廓几何特 征融合的除锈控制参数自适应确定方法。运用边 界矩算法提取激光除锈沟槽宽度、沟槽深度、横截 面积等多项轮廓几何特征,再依据融合后的特征 信息进行有效控制参数选择。

1 控制参数自适应确定方法设计

1.1 构建激光除锈有限元模型

以激光解离钝化原理为核心的除锈技术,属 于一种包括锈蚀层和基底的双层系统^[6]。在电网 设备激光除锈控制参数求取过程中,在锈蚀层、基 底层交界面上选定坐标原点,向两侧引出 *x* 轴和 *y* 轴,用以描述激光束的空间分布情况,再垂直引出 法线方向,最终形成图1所示锈蚀层-基底坐标。





基于图 1 所示的坐标,建立热传导方程:

$$ab \frac{T(x,z,t)}{t} = \frac{1}{x} \left[c \frac{T(x,z,t)}{x} \right] + \frac{1}{z} \left[c \frac{T(x,z,t)}{z} \right]$$
(1)

式中:a 为密度;b 为热容;c 为热传导系数;t 为时间;T 为目标时间内温度分布;x 为激光束的空间分布方向;z 为基底和锈蚀层之间的分界面的法线方向。

电网设备激光除锈系统,只有在接收到脉冲激光后,才会出现热作用并产生热应力,实现表面锈层的去除。因此,采用 ComsolMultiphysics 软件,根据激光除锈工作原理构建有限元模型。在有限元模型中,设置激光照射点为热源,再通过有

限元方法建立有限元网格,分析激光除锈过程中 温度分布和应力分布。有限元模型建立过程中, 需要在激光光束外围布置密度较小的网格,其后 越靠近激光光束发射点网格密度越大,以形成可 用于控制参数分析的网格模型。

1.2 提取电网设备除锈轮廓几何特征

针对电网设备进行激光除锈处理时,需要对 激光扫描点进行轮廓几何特征提取^[7]并将其看作 控制参数确定的基础。采用基于边界矩的特征提 取方法,针对实时除锈图像进行轮廓提取,再将其 转换为二维数字图像函数,针对不同阶数的边界 矩展开规格化处理^[8],得到规格化边界矩。

$$\lambda_{pq} = \frac{\sigma_{pq}}{\sigma_{00}^r}, \quad r = p + q + 1 \tag{2}$$

式中:*p*、*q*、*r*表示边界中心矩的阶数;σ表示边界 中心矩;λ表示规格化后的边界矩。再通过二阶 规格化边界矩,生成如下所示不变矩:

$$\begin{cases} \zeta_{1} = \lambda_{20} + \lambda_{02} \\ \zeta_{2} = (\lambda_{20} + \lambda_{02})^{2} + 4\lambda_{11}^{2} \end{cases}$$
(3)

式中*ζ*₁,*ζ*₂ 表示独立的不变矩。针对电网设备除锈 过程,低阶数的边界矩才能更好地区分沟槽形状。 所以,在电网设备除锈轮廓几何特征提取过程中,需 运用式(3)所示的独立不变矩,建立新的特征矩:

$$\psi = \frac{\sqrt{\zeta_2}}{\zeta_1} \tag{4}$$

式(4)计算的特征矩,不再受到比例因子的干扰。通过边界矩计算结果,可以描述除锈图像所有 边界像素点的分布特征,将目标图像划分为多个扇 形区域,对每一个子区域的边界矩进行修正^[9],再生 成子区域行向量。汇总所有行向量后,得到整幅图 像的分布特征,反映激光除锈过程中沟槽的形貌。

1.3 基于特征融合的参数确定方法

为了保证电力系统的稳定运行,在电力设备 除锈过程中,需要保证除锈后表面粗糙度满足要 求,避免除锈操作影响设备自身功能。激光除锈 本质上是通过多个光斑,按照一定路径扫描整体 电网设备^[10],如图 2(a)所示,而单个激光点除锈 处理后,得到图 2(b)和图 2(c)所示的沟槽形貌、 沟槽搭接模式。

通过 1.2 节提出的边界矩的特征提取方法获取 沟槽宽度、沟槽深度、横截面积三项主要轮廓几何特 征,明确其与扫描光斑直径、激光能量密度之间存在 的密切关系。所以,在参数自适应确定之前,需要根 据表面粗糙度要求,定义激光扫描沟槽深度:





图 2 激光扫描路径、沟槽形貌和沟槽搭接示意图

对于激光除锈技术来说,实际操作过程中很 多控制参数的取值均会影响最终除锈质量。因 此,激光除锈能量密度计算公式为

$$R = \frac{\omega Q d}{F v} \tag{6}$$

式中:R 表示能量密度; ω 表示峰值功率; Q 表示 脉冲宽度; d 表示脉冲频率; F 表示光斑直径; v 表 示激光扫描速度。

针对激光除锈沟槽轮廓,建立如下所示高斯 分布几何模型:

$$I(\alpha) = W + \frac{Y}{\sqrt{2}X} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2X^2}\right)$$
(7)

式中:α表示沟槽轮廓上目标点与光斑中心之间 的距离;I表示目标点深度值;W、Y、X表示待定 常量。

根据光斑直径和能量密度,对轮廓几何特征 进一步融合分析,得出沟槽轮廓的几何关系。

$$I\left(\frac{B}{2}\right) = W + \frac{Y}{\sqrt{2}X} \exp\left(-\frac{B^2}{8X^2}\right) = 0 \qquad (8)$$

$$I(O) = W + \frac{Y}{\sqrt{2}X} = A \tag{9}$$

$$\int_{-B/2}^{B/2} I(\alpha) \alpha = \alpha B + \frac{Y}{\sqrt{2}X} \int_{-B/2}^{B/2} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2X^2}\right) \alpha = C$$
(10)

式中:A 表示沟槽宽度;B 表示沟槽深度;C 表示横 截面积。结合式(8)—式(10),形成沟槽轮廓数 学模型,再进行列偏移量、搭接点与光斑中心距离 的求解:

$$\begin{cases} S = \sqrt{-2X^2} \left[\frac{\sqrt{2} \left(\frac{u}{2} - W \right) X}{Y} \right] \\ \tau = 2S \end{cases}$$
(11)

式中:S表示搭接点与光斑中心之间的距离; 7表 示列偏移量。通过上述计算,选择激光除锈所需 各项控制参数。

1.4 实现激光除锈控制参数优化

为了确保控制参数自适应确定结果满足除锈 要求,结合数据统计分析方法,建立基于响应面的 激光除锈控制参数优化模式。根据响应面分析原 理,建立独立因子与响应值之间的响应函数:

$$k = \partial_0 + \sum_{i=1}^{0} \partial_i l_i + \sum_{i=1}^{0} \partial_{ii} l_{ii}^2 + \theta \qquad (12)$$

式中:*l* 表示考查因子;*i* 表示独立因子;*O* 表示独 立因子总数量;*k* 表示响应预测值;*θ* 表示误差项; *∂*表示回归系数。

为了确保锈迹完全去除,通常情况下,电力设 备除锈需要经历两次扫描。初次扫描需要设置最 高激光能量,尽可能去除设备表面锈迹,而在第二 次扫描时,需要保证电网设备的表面不受到损伤。 因此,第二次扫描工艺参数的计算更需要运用上 述响应函数进行优化处理。运用BOX-Benhnken Design 组合,对于第二次扫描参数进行响应分析, 选取响应值较高的变量,作为最优参数值。

2 实验

2.1 实验准备

为了验证文中所提除锈控制参数自适应确定 方法具有可行性,选定图 3(a)所示的电网设备作 为实验对象。根据显微镜观察结果可知,该设备 的表面覆盖了厚度不小于 120μm 的锈层,如 图 3(b)所示。此时,该电网设备锈蚀等级 为 B 级。



针对图 3 所示的实验材料,设置试验的具体 过程如下: 1)在实验准备阶段,锈蚀显微图像尺寸为 70×150 mm,试件锈层厚度不小于 120 μm,每个测 试位置共5幅,设置为控制点标识,对除锈图像进 行轮廓提取,获取沟槽轮廓特征,生成激光扫描沟 槽轮廓示意图,如图4所示,使其与能量密度之间 的关联性,作为后续控制参数调整的参考。



图 4 激光扫描沟槽轮廓示意图

根据图4可知,激光扫描除锈产生的沟槽轮 廓,符合高斯分布模型。每个激光扫描点会出现 下凹的沟槽,但在部分沟槽边缘,因为熔融锈层金 属重新凝固,形成重凝颗粒物,出现凸起情况。这 些凸起部分与设备表面仅有些微粘接,在后续操 作时可以直接清除。

2)原材复试见证取样数必须大于等于总试验数的30%。因此,结合数据统计分析方法,确定沟槽宽度、沟槽深度、横截面积三项主要轮廓几何特征量。

3)为了更好地求取工艺参数,设置部分激光 光束控制参数为固定值,设激光峰值功率为1230 W,脉冲宽度为0.5 ms,光斑直径为2.0 mm,设置 激光扫描速度为15 mm/s,进行单线激光扫描。

4) 展开单线激光扫描实验,经过实验操作,将 控制参数自适应确定结果输入运动控制系统内, 并向下方二维移动平台发送移动命令。同时,将 待处理的电网设备放置于二维移动平台中心区 域,随着平台同步移动,再通过供气装置连接的切 割头,进行激光除锈,直至分别达到现行国家标准 《GB8923—2011 涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈 等级》中的 Sa2.5 级;表面粗糙度为 30~70 μm;处理 后的材料表面不应有焊渣、焊疤、灰尘、油污、水和 毛刺等。

5)分别设置除锈表面粗糙度为 30 µm、40 µm、 50 µm、60 µm、70 µm,按照文中提出的参数自适应 确定方法,获取最优脉冲频率和列偏移量参数。

2.2 确定最优控制参数

本文提出的参数确定方法,主要依托于轮廓几 何特征融合信息。在实验过程中,首先提取沟槽轮 廓几何特征,得到图5所示的沟槽几何特征随能量 密度的变化曲线。



图 5 沟槽几何特征与能量密度之间的关系

根据图 5 可知,沟槽的宽度、深度和横截面积, 与激光能量密度之间均表现出线性关系。在此基础上,融合多种沟槽几何特征,进行脉冲频率和列 偏移量的计算,得到表 1 所示的扫描控制参数计算 结果。

表1 激光扫描控制参数

表面粗糙度 要求/μm	激光能量密度/ (J/mm ²)	参数	
		脉冲频率/Hz	列偏移量/μm
30	2.2	185	665
40	3.1	260	735
50	3.8	355	784
60	4.8	432	847
70	5.9	530	895

利用表1所示的激光除锈控制参数进行电网 设备激光除锈处理,得到图6所示的除锈结果。



图 6 控制参数确定后激光除锈结果

搭接扫描实验后,在体视显微镜下观察除锈后 的沟槽表面和横截面状态。如图6所示,除锈试样 表面呈现良好的金属光泽,扫描区域内无锈层残留, 表面没有不牢固粘接颗粒,基本无过热氧化现象。 根据图 6 可知,确定有效的控制参数后,激光 除锈技术对扫描区域完成了有效的锈层修理,呈 现出具有金属光泽的除锈区,与未展开激光除锈 的区域表现出极大差异。对两个区域分别进行显 微镜观察,观测结果显示,经过激光除锈处理后, 电网设备表面锈层基本消失,表明了所提参数确 定方法的正确性。

2.3 除锈后表面粗糙度对比

选择基于响应面的参数确定方法、基于灰色 关联度的参数确定方法,与本文提出方法一起进 行实验。按照不同的参数求取结果,对电网设备 进行除锈处理,得到除锈后表面粗糙度对比结果 如图 7 所示。



图 7 不同方法除锈后表面粗糙度对比

根据图 7 可知,所提方法确定的控制参数应 用后,除锈后表面粗糙度始终满足表面粗糙度要 求,而其他两种方法大部分情况下,除锈后表面粗 糙度高于要求的表面粗糙度值。整体来看,所提 方法确定参数的平均除锈后表面粗糙度与要求值 相比,平均偏差值为 2.7 μm,而其他两种方法使得 除锈后表面粗糙度与目标表面粗糙度值之间偏差 分别为 5.9 μm、7.4 μm。综上所述,所提方法的应 用可以得到更加符合除锈要求的控制参数,使得 除锈后表面粗糙度偏差分别降低了 54.24%、 63.51%。

3 结语

针对电网设备的激光除锈工艺进行研究,提 出一种依托于几何轮廓特征融合的控制参数自适 应确定方法。从实验结果来看,所提方法求取的 参数值可以确保除锈后表面粗糙度更加贴近表面 粗糙度要求值,保证除锈操作不影响电网设备的 正常工作性能。

参考文献:

- [1] 马玉山,王鑫林,何涛,等. 金属表面腐蚀层及涂层的 激光干式清洗研究进展[J]. 表面技术,2020,49(2): 124-134.
- [2] 朱明,周建忠,孟宪凯,等. 基于响应面的 Q345C 钢锈 层激光清洗工艺参数优化[J]. 表面技术, 2019, 48(11):381-391.
- [3] 张燕,黄亚平. 船用钢板激光除锈工艺的有限元模拟 及参数优化[J]. 应用激光,2020,40(2):294-299.
- [4] 倪恒欣,阎春平,陈建霖,等.高速干切滚齿工艺参数
 的多目标优化与决策方法[J].中国机械工程,2021, 32(7):832-838.
- [5] 王排岗,王晓强,刘志飞,等. 基于灰色关联分析方法的超声滚挤压工艺参数优化[J]. 塑性工程学报, 2022,29(3):36-43.
- [6] 陈浩,余兴建. 变电站电力设备绝缘外表面激光除锈系 统设计[J]. 自动化技术与应用,2021,40(10):29-33.
- [7] 刘伟军,田泽琦,卞宏友,等. 基于机器视觉的钢材锈
 蚀表面激光清洗检测方法[J].应用激光,2021,41(6):1287-1292.
- [8] 邓德伟,范清华,赵祥路,等.激光清洗 FV520B 钢表 面氧化色工艺参数对表面粗糙度的影响[J].激光与 光电子学进展,2021,58(21):171-180.
- [9] 龚玉玲,徐晓栋.激光熔覆工艺参数对熔覆层质量影 响研究[J].机床与液压,2022,50(2):76-81.
- [10] 吴耀骏, 胡永祥, 姚振强. 激光喷丸强化系统协调 控制方法与实现[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1):165-168.

收稿日期:2022-07-26