

轻合金大型铸件 X 射线探伤 自动路径规划研究

李沁阳¹, 柳竺芑¹, 计效园¹, 董 溟¹, 侯明君¹, 赵高瞻², 黄志伟², 陈 强², 周建新¹

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 中国兵器装备集团西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 针对大型轻合金铸件X射线探伤人工规划存在的漏检率高和效率低等问题, 提出基于质量控制点的多目标自动路径规划方法。首先, 结合壁厚分析与几何特征提取技术, 通过密度聚类优化空间分布, 建立包含大壁厚区域和突出结构的质量控制点生成机制; 其次, 构建柱面约束射线探伤模型, 利用包络圆柱限定部件运动范围, 将三维路径规划转化为柱面映射点的优化排序问题; 再次, 优化遗传算法, 通过多目标适应度函数优化探伤路径; 最后, 开发图形化系统, 实现了三维模型分析, 质量点映射与路径优化的全流程可视化。试验表明, 该方法自动生成路径覆盖率达98%以上, 检测效率较人工提升3倍, 有效解决了传统检测的漏检与低效难题, 为大型铸件无损检测提供了创新技术方案。

关键词: 缺陷检测; 三维模型; 路径规划; 质量控制点

作者简介:

李沁阳(2000-), 男, 硕士生, 主要从事缺陷检测自动化研究工作。E-mail: liqinyang2132@163.com

通信作者:

计效园, 男, 教授。E-mail: jixiaoyuan@hust.edu.cn

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1138-09

基金项目:

国家自然科学基金(52275337、52090042); 国家重点研发计划项目(2020YFB1710100)。

收稿日期:

2025-03-12 收到初稿,
2025-04-09 收到修订稿。

铸件无损检测领域广泛采用超声波和X射线技术^[1], 但传统方法存在检测效率低、成本高昂及经验依赖性强等局限性, 难以满足现代工业智能化需求^[2]。近年来, 铸造行业在缺陷检测信息化方面取得显著进展, 尤其在X射线缺陷智能评片系统方面, 基于机器学习和三维定位技术^[3]已实现缺陷自动识别与分类。然而, 拍片规划环节仍严重依赖人工经验, 面对大型复杂铸件时, 人工操作存在工作强度大和漏拍风险高等突出问题, 严重制约质检工序的智能化进程。

在三维特征提取方面, Osada等提出的形状分布算法通过统计模型表面采样点的空间关系构建特征描述符^[4], Li等在此基础上融合整体与局部特征提升检索精度^[5]。孙晓龙等创新性结合法向算子和D2算子构建复合描述符^[6], 有效实现铸件特征匹配。深度学习领域, EdgeConv模块^[7]与改进的卷积神经网络算法^[8]分别在点云处理和特征紧凑性方面取得突破, 但现有方法多聚焦于表面特征, 对内部结构表征仍显不足。

路径规划研究呈现多元化发展态势, RRT类算法^[9]及其优化版本^[10-11]在机械臂路径规划中展现优势, 而智能算法^[12]和混合优化策略^[13-14]则为复杂曲面路径提供新思路。目前, 使用多视角表面覆盖自动路径生成方法^[15]获取完整工件表面信息和基于Transformer优化的VTSP启发式算法^[16]为解决X射线检测图像有序性获取问题, 均只对工件表面或平面材料检测作出优化, 普遍缺乏对内部缺陷检测路径的针对性设计, 针对铸件等大型工件的缺陷检测仍采用人工路径规划方法。

本文针对射线无损检测的特殊需求, 突破传统表面特征分析的局限, 提出融合内部缺陷预测与智能路径规划的新型框架。通过创新性整合质量关键点选取算法与自适应路径优化策略, 为实现铸件检测全流程智能化提供技术支撑, 如图1所示。

1 铸件质量控制点提取

质量控制点指在工件生产过程中需重点监控成形质量的关键区域, 主要包括工艺缺陷易发部位和性能敏感区域。这些部位需通过严格测试其性能指标及缺陷特

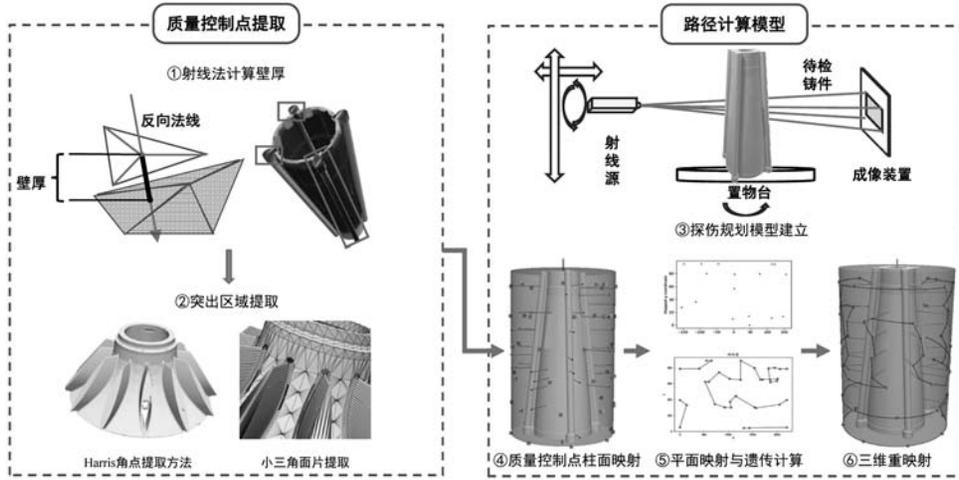


图1 大型铸件自动拍片路径规划方法图

Fig. 1 Automatic radiographic path planning method diagram for large castings

征，作为决定工件合格性的关键判断依据。

质量控制点的确定需结合铸件功能关键部位的风险评估和缺陷高发区域的经验判断。以镁合金铸件为例，其内部缺陷主要表现为缩孔、气孔和裂纹等^[17]。通过逆向追溯潜在缺陷风险区域，可有效指导检测方案制定，实现针对性探伤规划^[18]。实际生产中，镁合

金舱体普遍采用高压压铸成形工艺，其熔融金属在高压下快速充填型腔并凝固的特性，导致厚壁区易产生缩孔缺陷，结构突变处易形成应力集中裂纹。图2的CAE模拟结果验证了此类缺陷的分布规律，为质量控制点的科学选取提供了可靠依据。

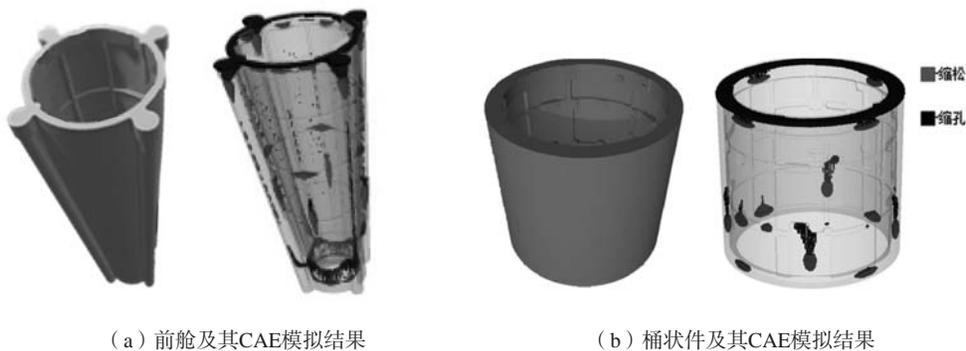


图2 铸件模型经铸造CAE模拟之后得到的缩孔缩松预测情况

Fig. 2 The porosity prediction of the casting model after casting CAE simulation

1.1 铸件大壁厚区域特征提取

对于轻合金大型铸件而言，搜索其壁厚较大的部位及其尖角、孔洞和凸起等特征即可几乎覆盖铸件的所有质量易失控区域。故对三维模型的大壁厚区域进行搜索，输入以三角面片构成的铸件三维模型。

本文采用优化的射线法求解模型壁厚。首先，需要对模型存储的顶点数据信息进行数据预处理，剔除生成模型文件时的不规范现象。对模型中的每一个顶点，获取其法线信息，并通过法线重计算增强法线方向的一致性。

$$n_i = \frac{\sum_{j \in N(i)} A_j n_j}{\|\sum_{j \in N(i)} A_j n_j\|} \quad (1)$$

式中： $N(i)$ 为顶点 i 的邻接面， A_j 为面面积，采用区域加权法线平均消除方向歧义，使得法线方向按固定规则排列。

随后，采用双向射线追踪算法， v_i 即对每个顶点建立局部坐标系，沿法线正负方向发射检测射线，则对应的射线参数方程如下：

$$\begin{cases} r_i^+(s) = v_i - \epsilon n_i + sn_i \\ r_i^-(s) = v_i - \epsilon n_i - sn_i \end{cases} \quad (s \in [0, L_{\max}]) \quad (2)$$

式中： $\epsilon = 10^{-5}$ 为防自相交偏移量，让射线起点沿射线方向偏转较小的距离，防止射线与起点相交影响后续

的判断, $L_{max}=1.5L_{model}$ 基于模型的矩形包围盒对角线长度确定。

遍历模型顶点, 由式(2)的两条射线的方向穿透模型求交获取交点集, $P_i=\{p_k^+, p_i^-\}$, 对该交点集进行处理, 过滤位于当前顶点邻域半径 $r=3\epsilon$ 内的无效数据, 取其中距离最近的点计算其欧式距离, 则为铸件在该点的壁厚。双向的射线追踪避免三维模型文件中

法线方向存在设计不规范的问题, 出现法线方向与实际相反的情况, 保证了壁厚计算的正确性。

图3为各类铸件经过双向射线法求解模型壁厚的可视化图像, 选取壁厚大小较大的前5%的区域作为质量控制点的候选点, 在这些区域中去区域中心, 作为候选质量控制点之一。

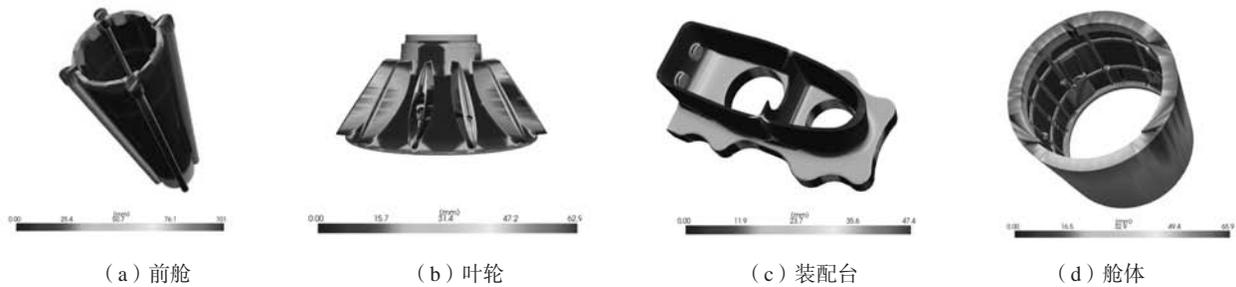


图3 双向射线法求解壁厚的三维模型壁厚可视化图像

Fig. 3 Visualization images of 3D model wall thickness solved by the bidirectional ray method for wall thickness

1.2 铸件三维模型突出区域特征提取

铸件表面的尖角、孔洞和凸起等突出区域因其几何突变特性, 是质量控制的重点监测部位。这些区域因材料截面的突变易引发应力集中, 在承受较大载荷时易产生裂纹等缺陷。本研究提出通过角点特征值计算结合三角网格结构分析的方法进行特征提取。

在三维特征识别中, 角点定义为表面曲率显著变化的区域(如锐边和拐角), 其特征表现为多向几何突变。基于三维Harris角点检测理论^[20], 首先构建顶点的k-ring邻域, 通过二次曲面拟合表征局部几何特征, 继而通过协方差矩阵M的主曲率分析实现特征提取:

$$M = \begin{bmatrix} \sum I_x^2 & \sum I_x I_y & \sum I_x I_z \\ \sum I_x I_y & \sum I_y^2 & \sum I_y I_z \\ \sum I_x I_z & \sum I_y I_z & \sum I_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: I_x, I_y, I_z 表示三维空间中的梯度分量。

通过三个方向上的分量对点的梯度进行表征, 使用Harris响应函数计算Harris响应值如下:

$$R = \det(M) - k \cdot \text{trace}(M)^3 \quad (4)$$

铸件三维模型响应值计算结果如图4所示, 可见其中有约1%的点与其他顶点不在一个响应值区间, 可取这些点作为角点, 计入候选质量控制点的范围中。

针对铸件三维模型的网格分布特性分析发现, 平整区域因几何特征趋同, 可采用大尺寸三角面片稀疏表征; 而高曲率曲面、微凹陷及锐角过渡等复杂区域, 则需高密度网格精确捕捉几何突变。此类结构在铸造过程中易引发熔融金属流速突变, 造成流动阻滞与冷却不均, 进而形成缺陷风险点。

本文提出基于小三角面片集群的特征提取方法: 首先选取面片面积分布前15%作为小面片阈值, 随后通

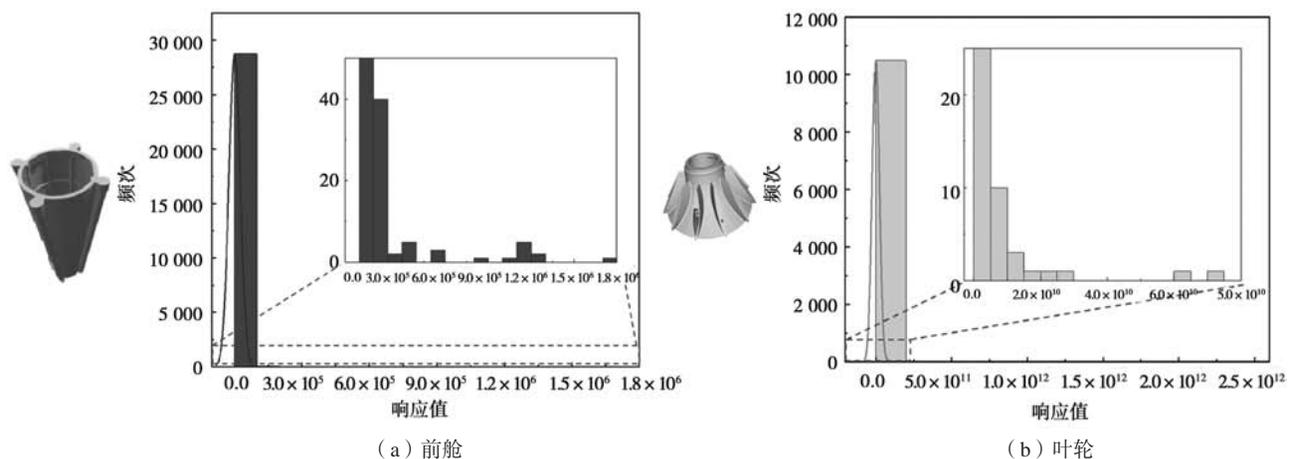


图4 三维模型及其Harris角点响应值分布情况

Fig. 4 3D model and its Harris corner response value distribution

过邻接图构建面片拓扑关系，采用广度优先搜索算法识别集群规模超过30的连续区域（图5），最终提取集

群质心作为质量控制候选点。该方法可有效定位与铸造缺陷强相关的复杂几何特征区域。

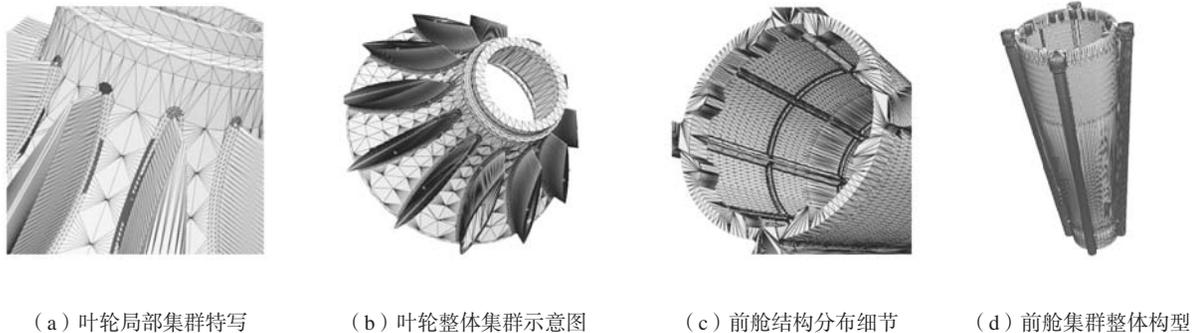


图5 不同铸件小三角面片集群分布
Fig. 5 Distribution of small triangular facet clusters in different castings

1.3 质量控制点的空间分布优化

针对铸件关键区域的质量控制点空间分布分析显示，候选点呈现显著聚集特征。鉴于射线探伤单次成像可覆盖500 mm × 500 mm范围（日联UNC160型设备参数），过密布点将导致检测冗余。本研究采用DBSCAN密度聚类算法^[19]实施空间优化：首先全域标记特征区域，通过调节邻域半径 $\epsilon = 200$ mm（基于成像板尺寸设定）控制点群密度，使相邻检测点间距满

足单次穿透检测要求。该策略在保证相邻图像保留30~50 mm重叠区的前提下，减少检测次数约60%，实现检测经济性与缺陷识别完整性的平衡，优化结果如图6所示。

质量控制点指导射线探伤路径规划模型的运动轨迹，是最终射线必须穿透的重要区域，提取的质量控制点对指导探伤工作有着重要作用。

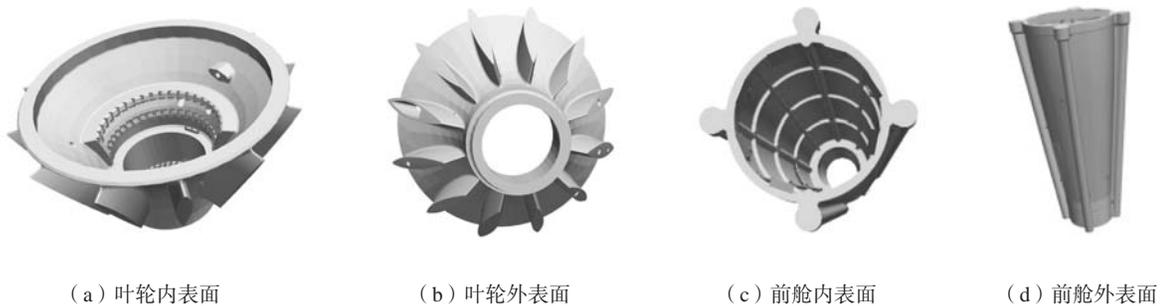


图6 DBSCAN聚类处理前后质量控制点分布
Fig. 6 DBSCAN clustering processing quality control point distribution before and after

2 基于遗传算法的铸件拍片路径规划方法

结合实际生成所需的功能，系统工作的步骤大致如图7所示：模型输入，确定几何中心，参考几何中心设置坐标系，输入质量控制点，生成成像板的活动柱面，进一步生成质量控制点在柱面上的投影（以射线与交点的形式表现），运用算法生成路径并用空间曲线表示。通过选取合适的质量控制点与实现这些点之间的路径规划方式，从两个方面提升拍片效率与样本质量。

2.1 探伤拍片规划系统坐标系建立

本文采用的X射线探伤系统主要结构由射线源和置物台及成像板构成。射线源与成像板分置光路两端，可在三维空间内协同移动，其水平间距在探伤初始阶段即固定于最佳对焦位置，确保成像清晰度和检测连续性。置物台具备平面移动与自转功能，配合射线源垂直运动实现铸件多角度成像。系统工作流程如下：铸件经输送带输送至铅房内转盘中心，射线源初始定位方向与转盘中心保持距离 R 。通过转盘旋转模拟射线源圆周运动轨迹。针对各质量控制点，以转盘中心轴等高点为原点构建射线模型，该射线与射线源运动柱

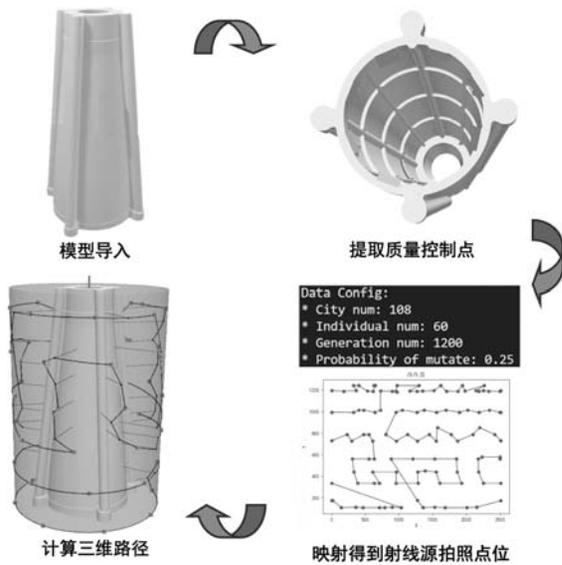
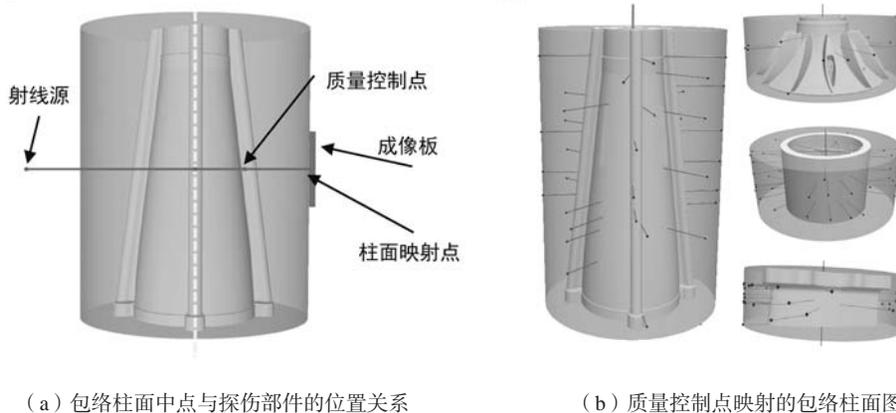


图7 路径规划算法流程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of road force planning algorithm process



(a) 包络柱面中点与探伤部件的位置关系

(b) 质量控制点映射的包络柱面图

图8 质量控制点空间分布与包络柱面映射关系

Fig. 8 Spatial distribution of quality control points and mapping relationship with envelope cylindrical surface

铸件-置物台参考系，射线源运动可分解为转台旋转与垂直移动的合成，其活动空间由包络圆柱面参数化表征，确保射线始终指向转盘中心。

映射算法的核心是以转台中轴为基准，从轴心等高点向质量控制点发射特征射线，计算其与包络圆柱面的交点坐标。该方案实现三重要素：（1）设备运动参考系空间统一；（2）射线入射方向中心约束；（3）设备运动安全碰撞规避。数学上通过逆向几何推导，以转轴等高点A为原点，沿质量控制点B方向延长射线，获得包络圆柱面交点C的坐标：

$$\begin{cases} e = \frac{\vec{AB}}{|\vec{AB}|} \\ \vec{AB} = e \cdot r \\ C = A + \vec{AC} \end{cases} \quad (6)$$

面的交点轨迹经柱面展开后，其最短路径即为射线源最优运动轨迹。

坐标系构建采用双重定义：（1）世界坐标系以置物台接触面中心为原点，X轴正方向为射线源初始指向，Y轴平行置物台平面，Z轴垂直向上；（2）柱坐标系以X轴正向为0°基准，Z轴方向与空间坐标系一致，其与世界坐标系的转换方程为：

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{cases} \quad (5)$$

该模型通过 (r, θ, z) 参数化描述置物台旋转状态，实现与笛卡尔坐标系的精准映射。

2.2 质量控制点柱面映射

针对三维检测定位难题，本研究构建基于包络圆柱面的坐标映射模型。通过铸件-设备空间配准建立统一坐标系后，将质量控制点几何投影至预设包络圆柱面（图8），由此构建射线源的三维运动约束域。基于

式中： e 为轴心至质量控制点的单位向量， r 为包络面半径， C 为映射点坐标。

通过参数化映射过程，将复杂三维定位问题转化为柱面几何计算。

将圆柱面映射点展开至二维平面分析，可直观评估质量控制点分布合理性：过密区域存在检测冗余，稀疏区域需补点检测。通过柱面展开公式：

$$\begin{cases} A = (x, y, z) \\ o = (x_0, y_0, z_0) \\ A^* = A - o = (x_1, y_1, z_1) \\ x' = \rho \theta \\ y' = z_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中： A 为对应映射点坐标， o 为转盘圆心坐标， A^* 为映射点以转盘圆心为参考系的相对坐标， ρ 和 θ 为 (x_1, y_1) 对应的极坐标， (x', y') 是转化后的二维平面对

应的纵横坐标。基于展开平面的路径规划技术，极大降低三维路径规划复杂度，增加了自动路径规划的效率，使其在生产场景可用性增强。

2.3 基于遗传算法和三维重映射的拍片路径规划

针对铸件探伤路径规划中质量控制点激增导致的路径复杂度问题，本研究采用遗传算法进行优化。相较于传统穷举法，该算法在设备遮挡和角度限制等约束条件下具有显著优势：通过全局搜索机制快速收敛至行程更短和时间效率更高的可行解。

遗传算法通过生物进化模拟实现路径优化：（1）将可行路径编码，建立基于移动成本的适应度函数；（2）通过选择，交叉和变异等遗传操作迭代优化种群。核心流程包括四阶段循环：父代种群生成→遗传算子生成子代种群→种群合并与适应度排序→精英保留筛选新种群，直至满足迭代终止条件。

适应度函数设计重点考量工程约束：（1）射线源与成像板Z轴位移易引发机械振动，需计入稳定时间成本；（2）旋转台周向运动对成像质量影响较小。由此建立函数：

$$\left\{ \begin{array}{l} p_k = |x_k - x_{k-1}| + t \cdot |y_k - y_{k-1}| \\ f(p) = \sum_{k=2}^N p_k \\ p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \\ p_c = \frac{f'}{k_1} + \frac{f_{\max}}{k_2} \end{array} \right. \quad (8)$$

在路径代价计算中，基因编码路径的第k段代价 p_k 由横向位移 $|x_k - x_{k-1}|$ 和纵向位移 $|y_k - y_{k-1}|$ 构成，其中C型臂运动通过修正系数 t 调整垂直与旋转电机的能耗权重（在本文的计算案例中取 $t=2$ ）。路径优先级函数 $f(p)$ 与选择概率 P_i 的计算采用自适应交叉策略：交叉概率 P_c 与个体适应度 f' 及种群最大适应度 f_{\max} 动态关联，其中， k_1 为初代种群平均适应度， k_2 为初代种群的

最大适应度。这种设计在保证种群多样性的同时提升收敛效率。

本研究采用遗传算法对108个三维节点进行路径优化，其控制参数少，全局搜索能力强的优势在试验中充分体现。如图12所示，经1 200代迭代后获得总行程约40 000的优化路径，收敛曲线显示算法在1 000代左右趋于稳定。测试表明，该算法在Intel 10400F平台仅需3.25 s即可完成千代计算，其快速收敛特性通过适应度函数的指数衰减趋势（图12a）得到验证，证实了算法处理三维路径规划问题的高效性。

3 大型铸件拍片路径规划系统的设计与数据验证

3.1 自动拍片路径规划系统可视化界面设计

本研究开发了集成化图形界面系统（图10），实现了铸造检测全流程的可视化操作与实时反馈。系统核心功能模块包括。

（1）三维模型交互：支持STL格式模型导入与实时渲染，构建可视化分析基础。

（2）质量控制点生成：自动生成基于特征分析的质量控制点，开放人工交互式补点功能强化重点区域监测。

（3）空间映射优化：将检测点投影至包围圆柱坐标系，降低路径规划维度。

（4）检测路径生成：采用改进遗传算法进行全局路径优化，实施三角面片覆盖度验证确保检测完整性。

3.2 数据测试和结果分析

本研究基于铸件缺陷分布特征构建质量控制点路径规划模型，结合射线穿透原理开展仿真验证^[3]。如图11所示，针对舱体铸件生成的108个检测点中，典型的12个质量控制点的投影分析表明：1、4、12与7、

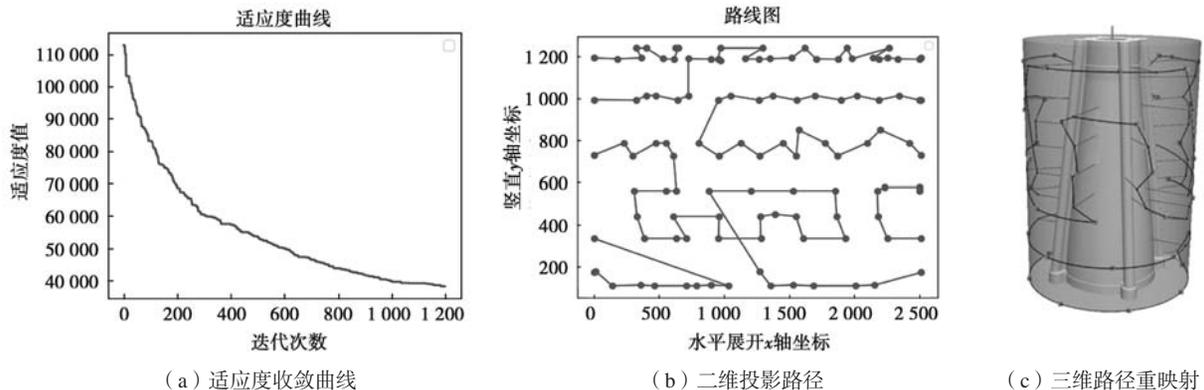


图9 遗传算法优化多维度路径规划进程
Fig. 9 GA-optimized multi-D path planning process

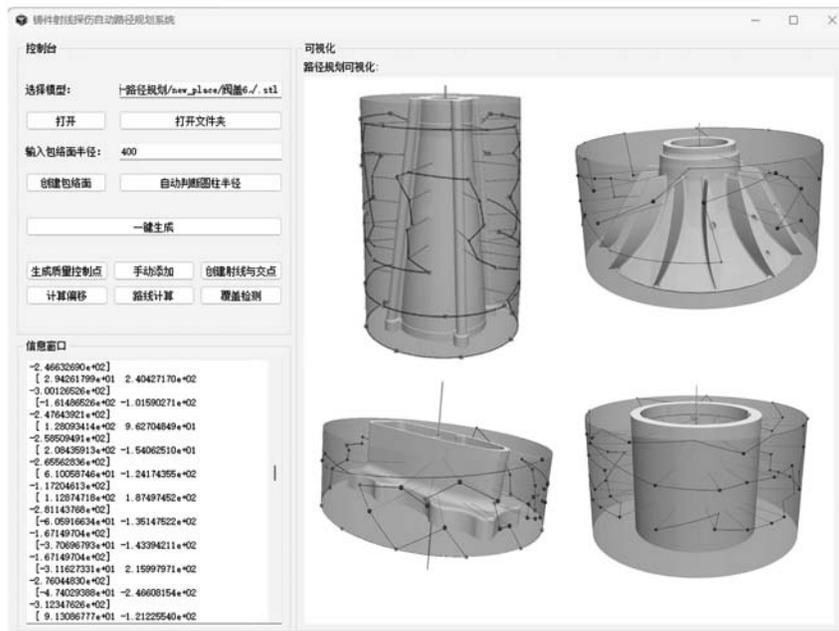
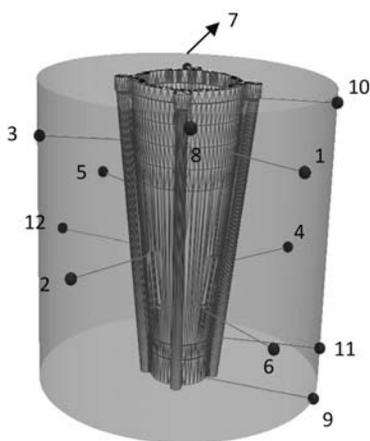
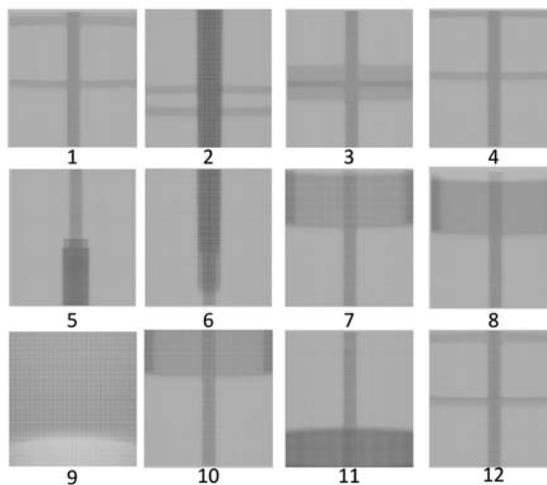


图10 大型铸件拍片路径规划系统界面 (多个案例已拼接)

Fig. 10 Interface of large-scale casting filming path planning system (Multiple cases have been spliced together)



(a) 质量控制点仿真成像与三维模型实体关联示意图



(b) 典型仿真成像图谱

图11 质量控制点仿真成像与三维实体模型的映射验证

Fig. 11 Mapping verification of quality control point simulation imaging and 3D solid model

8、10组虽呈现相似投影特征，实为铸件轴向对称结构经45°相位旋转所致。该方案有效获取了多方位缺陷信息，关键区域无本体遮挡且结构清晰，表明了自动路径的成像结果的可靠性。

对生成的自动路径进行锥形X射线束穿透模拟试验（图12），其中，模拟射线源分别向以路径点为中心的成像板投射1 000条均匀采样射线，并统计穿透三角面片数量，将被穿透的三角面片标记为红色。渲染结

果显示，射线束有效覆盖铸件主体结构，盲区主要源于离散采样间隙：量化数据（表1）揭示模型整体覆盖率达98.2%以上，仅2%盲区由射线离散分布导致，实际连续射线束可消除此类误差。本研究通过参数化调控射线密度与位姿，实现了铸件结构的工业级全覆盖检测。

在一线生产车间的实际生产模式中，使用CNC数控操控的射线检测装备进行铸件探伤的主要方式为人

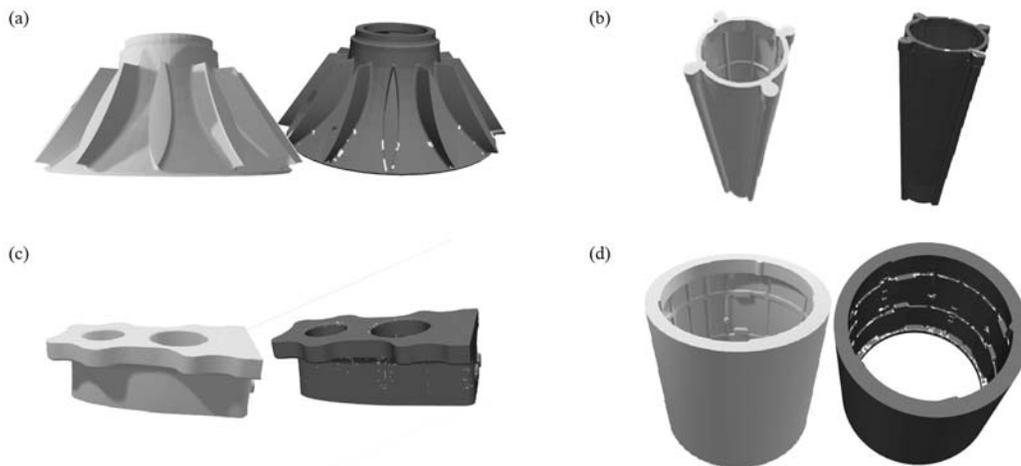


图12 不同铸件的射线覆盖率(红色为穿透区域)
Fig. 12 Radiographic coverage of different castings

表1 三角网格规模与检测路径覆盖率量化分析
Tab. 1 Triangle mesh size and inspection path coverage

模型名	三角面片数	质量控制点数	系统分析时间/s	穿透覆盖率/%
叶轮	21 020	39	47	99.45
前舱	130 370	109	115	98.69
台状件	105 318	51	94	98.58

工操作检测装备对铸件进行实时检测,其步骤主要包括:将铸件放入检测室内,调整射线源与成像板的位置,移动操作杆对铸件进行探伤操作,实时检查铸件的缺陷情况。对一个 $2\,000\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的铸件,人工探伤需要30~40 min才能得到较为完整的探伤结果。假设该铸件的拍摄路径点为150,用本文提到的方法进行的铸件特征分析和路径计算时间不超过5 min;对于每个路径点之间的移动时间不超过2 s,

参考文献:

- [1] 卢宗兴. 超声无损检测双机械手扫描技术的关键问题研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [2] 王一帆. 基于深度学习算法的铸件表面缺陷检测 [D]. 合肥: 安徽工业大学, 2021.
- [3] 李沁阳, 孙晓龙, 计效园, 等. 基于三维模型和射线探伤二维图像的铸件缺陷检测技术 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1360-1365.
- [4] OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions [J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2002, 21 (4): 807-832.
- [5] LI B, GODIL A, JOHAN H, et al. Non-rigid and partial 3D model retrieval using hybrid shape descriptor and meta similarity [C]// *International Symposium on Visual Computing*, 2012.
- [6] 孙晓龙, 张志鹏, 计效园, 等. 法向算子和D2算子相结合的铸件三维模型分类算法 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (22): 2655-2662.
- [7] WANG Y, SUN Y, LIU Z, et al. Dynamic graph cnn for learning on point clouds [J]. *ACM Transactions on Graphics (tog)*, 2019, 38 (5): 1-12.
- [8] WANG D, WANG B, YAO H, et al. Center-push loss for joint view-based 3D model classification and retrieval feature learning [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2021, 17 (4): 1-8.
- [9] 吴剑雄, 毕卓然, 李宗道, 等. 基于改进双树RRT*算法的冗余机械臂末端路径规划策略 [J/OL]. 计算机应用研究: 1-8[2023-12-11].
- [10] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning [J]. *The International Journal of Robotics Research*,

拍摄点停留时间为3 s左右,即整个探伤过程的时间为15~18 min,相对于传统方法效率提升2倍以上。

4 结束语

本文提出了一套针对大型铸件无损检测时的拍片路径规划方法,并开发了一个系统。该系统可以对铸件的三维模型进行分析,并生成一条合适的路径来完成对所有质量控制点的拍摄,解决大型铸件人工编程拍片路径造成的多拍漏拍问题。系统根据铸件结构分析得出铸件的质量控制点,再通过改进的遗传算法围绕质量控制点生成拍片路径。得到的路径主要针对单个质量控制点,并尽量将质量控制点区域居中,但在每次拍片的锥形视角内的其他质量控制点并没有完全利用,系统在此情况下移动了较多的距离,仍然可以有优化的空间。同时,系统还可添加对同一质量控制点多个角度的拍摄,以达到更佳的效果。

- 2011, 30 (7): 846–894.
- [11] WANG X, LUO X, HAN B, et al. Collision-free path planning method for robots based on an improved rapidly-exploring random tree algorithm [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (4): 1381.
- [12] SLIM M, ROKBANI N, NEJI B, et al. Inverse kinematic solver based on bat algorithm for robotic arm path planning [J]. Robotics, 2023, 12 (2): 38.
- [13] CURSI F, BAI W, YEATMAN E M, et al. GlobDesOpt: a global optimization framework for optimal robot manipulator design [J]. IEEE Access, 2022, 10: 5012–5023.
- [14] 田威, 李国良, 郑炜, 等. 机翼蒙皮无损检测生产线中扫描路径优化方法 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (6): 14–21.
- [15] CHATTERJEE S, ISSAC K K. Viewpoint generation using geodesics and associated semi-automated coverage path planning of panels for inspection [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (2): 906.
- [16] SONG G, XU W. A method of automatic field of view generation and path planning for automated x-ray inspection [J]. Expert Systems, 2025, 42 (1): e13429.
- [17] 颜秋余. 基于X射线图像的航空钛合金铸件缺陷检测与分类研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [18] ZHANG Z, JI X, ZHOU J, et al. A method for modeling and extracting 3D structural features of castings considering size [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 37: 563–570.
- [19] ESTER M, KRIEDEL H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C]// Kdd. 1996, 96 (34): 226–231.
- [20] SIPIRAN I, BUSTOS B. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes [J]. The Visual Computer, 2011, 27: 963–976.

Research on Automatic Path Planning for X-Ray Inspection of Large Lightweight Alloy Castings

LI Qin-yang¹, LIU Zhu-peng¹, JI Xiao-yuan¹, DONG Hao¹, HOU Ming-jun¹, ZHAO Gao-zhan², HUANG Zhi-wei², CHEN Qiang², ZHOU Jian-xin¹

(1.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2.Southwest Technology and Engineering Research Institute of China Ordnance Equipment Group, Chongqing 400050, China)

Abstract:

This study proposes a multi-objective automatic path planning method based on quality control points to address high leakage rates and low efficiency in manual X-ray inspection planning for large lightweight alloy castings. Firstly, a quality control point generation mechanism integrating wall-thickness analysis and geometric feature extraction is established using density clustering for optimized spatial distribution. Secondly, a cylindrical constraint model is built, converting 3D path planning into cylindrical mapping point optimization through enveloping cylinder motion constraints. Thirdly, genetic algorithm is enhanced with multi-objective fitness functions for path optimization. A graphical system visualizing 3D model analysis, point mapping, and path planning is developed. Experiments show the automated paths achieve over 98% coverage with tripled efficiency compared to manual methods, effectively resolving traditional inspection limitations and providing innovative NDT solutions for large castings.

Key words:

defect detection; 3D model; path planning; quality control points