

基于梯度下降的火车轴粗削最优加工标记方法^{*}

刘仁明¹ 张耀² 贺文斌³

(1. 长沙海贝智能科技有限公司 长沙 410100; 2. 湖南大学广州大湾区创新研究院 广州 510250;
3. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要:火车轴在高温锻造后,表面形状不规则,且在冷却过程中,轴体可能变形,给粗削工序的轴心点定位带来挑战和困难。现有方法,如两点法、光学投影法、回转轴法等,或只考虑端面中心与局部表面,忽略轴体变形与表面不规则形状,存在效率低、无法加工、产品损耗大的问题等。针对现有方法存在的问题,提出一种火车轴粗削最优加工的标记方法,首先通过扫描仪扫描得到3D轴体点云,先后对点云进行坐标系转换、对变换点云进行切片、计算初始加工轴;然后分析产品加工 CAD (computer aided design) 模型在轴体点云空间余量分布情况,采用梯度下降法优化策略来调整加工轴位置;最终计算得到火车轴粗削加工的最优标记点,再通过激光打标机标记在轴体上。该方法使用 C++ 与 PCL (point cloud library) 混合编码实现,在中车现场实践验证长达一个月,数据统计表明准确性>98%,效率相比人工提升了3~6倍。该方法提高了火车轴粗削工序的生产效率,降低了生产过程的报废率,同时保证车削加工过程中余量充分性和旋转平衡性。

关键词: 高温锻造;车轴粗削;最优加工;3D点云;CAD模型;梯度下降法;余量充分性;旋转平衡性

中图分类号: TP391; TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.3020

Marking method based gradient descent for train axle on primary turnery to processing optimal manufacturing

Liu Renming¹ Zhang Yao² He Wenbing³

(1. Changsha Hibay Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410100, China; 2. The Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou 510250, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The surface shape of the train shaft is irregular after hot forge, and the shaft body may deform during the cooling process, which poses challenges and difficulties for the positioning of the axis point in the primary turnery process. The existing methods, such as two-point method, optical projection method, rotation axis method, etc., or only consider the center and local surface, ignoring the deformation of the axis and the irregular shape of the surface, have problems such as low efficiency, inability to manufacture, and large product loss and so on. This paper proposes a marking method for the optimal manufacturing of train axle in primary turnery to address the problems, which in existing methods. Firstly, obtaining a 3D point cloud of the axle by a scanner. Then, the point cloud is successively transformed into another coordinate system, cut into discrete slices, and calculated to getting the initial machining axis. Next, the spatial margin distribution of the product machining computer aided design (CAD) model in the axle point cloud is analyzed. Simultaneously, the gradient descent optimization strategy is used to adjust the machining axis position. Finally, the optimal marking point for rail axle to processing optimal manufacturing is calculated, and then marked on the axle by the laser marking machine. This method is implemented using the mixed encoding of C++ and point cloud library (PCL), and has been validated on site by China railway rolling stock corporation (CRRC) for up to a month, and data statistics show an accuracy of over 98%, with an efficiency improvement of 3~6 times compared to the operator. This method improves the production efficiency of the primary turnery process for rail axes, reduces the scrap rate in the production process, and ensures the margin adequacy and rotational balance during the turning process.

Keywords: hot forge; primary turnery; optimal manufacturing; 3D point cloud; CAD model; gradient descent; margin adequacy; rotational balance

0 引言

火车轴是高铁、动车和地铁等动力传动系统和承载系统的重要组成部分,具有重量大、高速旋转作业等特点,其加工制造精度和质量是决定动力传动系统综合性能和安全运行的关键因素。火车轴的制造工艺^[1]流程大致为:钢坯轧制下料→高温锻造→两端面轴心点定位与打孔→车削粗加工→车削精加工→超声波探伤→表面处理→质量检查→防护包装。

火车轴由于其重量大、尺寸大,轴体在高温锻造后的冷却过程中受重力影响,产生难以避免的下垂变形问题,给车削粗加工带来了极大的挑战和困难。因此,在车削粗加工前,需要准确地定位出车轴两端面的轴心点,保证车削加工过程中的旋转空间最小,即旋转平衡性最优,避免车轴在高速旋转中产生异常振动;空间余量充分,即各处加工余量充足,避免车轴加工后产生黑皮,从而最大程度的保证加工质量和精度。轴心点是指车轴加工轴线与车轴端面相交的点,车轴加工轴线是车轴加工的装配基准与测量基准。

火车轴车削粗加工的过程如下:首先在地面上的滚动车轴,初步判断车轴是否存在大变形;然后对车轴进行测量,定位两端面的轴心点;最后以两端面的轴心点为数控机床的固定定位点,进行车削加工。两端面上的轴心点的定位,主要分为两点法、三点法、回转轴法、光学投影法、坐标测量法等。两点法,在轴两端表面,测量两点计算线段直径和中心;三点法^[2],在轴两端表面,测量三点计算圆直径和中心;回转轴法^[3],在轴表面测量多个点的运动轨迹或几何特征,从而定位端面中心;光学投影法^[4],利用光学投影仪将轴端面轮廓投影到屏幕上,通过图像处理计算端面中心;坐标测量法^[5-6],一般通过三坐标测量机获取轴端表面多个点的坐标,计算端面中心。

由于毛坯轴在高温锻造及冷却后,存在表面不规则形状与轴体弯曲变形的情况,以上所述端面轴心点的定位方法,只考虑端面中心与局部表面,或具有如下缺点:1)过度依赖工作经验和人工操作,导致测量不准确和效率低,无法满足生产能力需求,造成人工成本高;2)定位的轴心点很难顾及轴体表面复杂的锻造形状,导致某些区域车削后余量不足,出现黑皮,无法满足生产工艺要求,浪费轴胚材料;3)定位的轴心点容易忽略轴体切削时的旋转平衡性,导致车削时旋转空间较大,产生较大振动,影响加工精度和增加操作危险性。如马成玲^[3]提出了一种解决不规则外观车轴两端面中心定位的方法,该

方法属于回转轴法的一种方式,使用激光测距传感器,测量轴体上3个质点到测距仪的距离,旋转车轴一圈,得到车轴3个位置处的外轮廓。该方法无法评估整轴加工余量情况和旋转平衡性的问题。

近年来,3D建模检测^[7-8]快速在较多工业行业应用,点云模型与CAD(computer aided design)模型之间的配准算法^[9-12]也得到大量研究。针对以上方法所面临的问题,结合当前技术研究,本文提出了一种基于梯度下降的火车轴粗削最优加工标记方法,属于激光扫描法,利用激光扫描仪获取整个车轴的三维点云数据,通过算法分析轴身的加工余量情况,考虑旋转平衡性,计算得到最优的加工轴线和端面轴心点。算法使用梯度下降法^[13-14]优化轴体3D点云与轴体CAD模型之间的配准误差,使加工轴位置达到加工最优,保证车削加工过程中余量充分性和旋转平衡性,提高了高铁车轴粗削工序的生产效率,降低了生产过程的报废率。该方法使用C++与PCL(point cloud library)^[15]混合编码实现,在中车现场实践验证长达一个月,数据统计表明准确性>98%,效率相比人工提升了3~6倍。

1 方法实现原理

本文方法已在车轴智能检测定位系统落地实施,系统如图1所示。首先使用协作式机器人挂载跟踪式扫描仪,绕轴体环形运动扫描,得到车轴的3D点云,扫描精度为25 μm;再对点云进行坐标系转换,转换到校正坐标系,得到变换点云;接着结合车轴粗削加工后的CAD设计模型,如图2所示,对轴体点云进行算法分析,得到车轴两端最优加工的轴心点;然后把两端轴心点转换到对应激光打标机的坐标系,两台激光打标机按照相应转换后的坐标点位置,分别对轴体两侧端面进行打标标记;最后操作人员按照轴体上两头的标记点进行打孔(固定孔),再在车床上对准两头固定孔并夹紧轴体,进行车削加工。该方法能适配现场各种规格的车轴产品(规格包括长度2 300~2 800 mm,直径Φ300~400 mm,轴身不同的段数、台阶与圆弧等设计,如图2所示),目前正式生产时长已达一年。算法处理具体流程如下。

1) 对变换点云进行聚类处理,去除干扰信息,得到轴体点云。主要的点云聚类算法有欧氏聚类和K-means聚类等方法,本文方法使用欧氏聚类。

2) 对轴体点云进行降采样处理,提高运算效率,得到降采样点云。主要的降采样算法有随机降采样、均匀降采样和体素降采样等方法,本文方法采用均匀降采样法。

3) 对降采样点云进行轴向分段切片, 得到轴体点云切片。切片的优点是提高了运算效率, 缺点是漏掉了某些区域的分析。

4) 对点云切片进行分析, 计算初始加工轴。

5) 分析产品 CAD 设计模型在轴体点云的空间余量分布情况, 采用梯度下降法优化策略来调整加工轴位置, 通过不断分析和调整, 得到最终加工轴。

6) 计算加工轴与轴体两端面的交点, 得到高铁车轴粗削加工的最优标记点, 再把标记点转换到激光打标机坐标系。

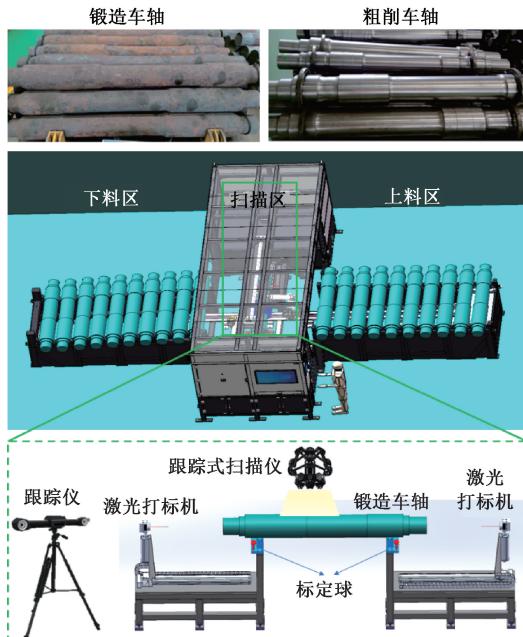


图 1 车轴智能检测定位系统

Fig. 1 Intelligent detection and position system for train axle

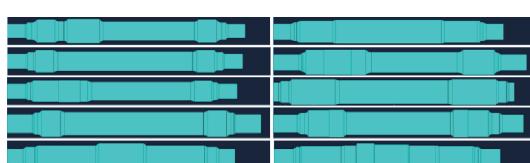


图 2 部分车轴的 CAD 设计模型

Fig. 2 CAD design model of some axles

2 坐标系标定

本文方法涉及到扫描仪坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 、标定球坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 、校正坐标系 $O-XYZ$ 、激光打标机坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$, 如图 3 所示。需要使用坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 与 $O_p-X_pY_pZ_p$ 来重建 $O-XYZ$, 并标定坐标系 $O-XYZ$ 与 $O_s-X_sY_sZ_s$ 的关系。标定球共 4 个, 分别布置在轴体两侧端头的位置, 即图 3 中 P_1, P_2, P_3, P_4 。打标机共两个, 分别

布置在轴体端头的两侧, 最大间距为 4.2 m, 即图 3 中激光打标机 A、激光打标机 B。激光打标机装配后 Z_s 轴应尽可能与 Z 轴平行, 减小打标机标定误差。

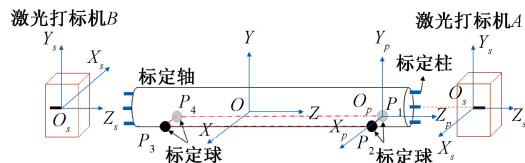


图 3 坐标系分布

Fig. 3 Coordinate system distribution

2.1 坐标系重建

为了校正扫描仪坐标系, 方便算法处理, 需要重建点云坐标系 $O-XYZ$, 本文方法使用标定球来重建。把 4 个标定球的球心位置拟合成一个空间平面 β , 平面拟合采用随机抽样一致 (random sample consensus, RANSAC) 算法^[16-17]。把点 P_1, P_2 分别投影到平面 β , 得到点 P'_1, P'_2 。以点 P'_1 为原点 O_p , 平面法向量为 Y_p 轴, 与点 P'_1 与 P'_2 连线为 X_p 轴, 过点 O_p 垂直平面 $X_pO_pY_p$ 的直线为 Z_p 轴, 得到坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 。空间平面的一般式方程如下:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

式中: D 为常数; (A, B, C) 为平面的单位法向量。记 $P(x_0, y_0, z_0)$ 为非平面上的点, 点 P' 为点 P 在平面的投影点, 则直线 $L_{P'P}$ 的参数方程表示如下:

$$\begin{cases} x = x_0 + At \\ y = y_0 + Bt \\ z = z_0 + Ct \end{cases} \quad (2)$$

把直线的参数方程代入平面方程, 可解出参数 t , 参数 t 计算公式如下:

$$t = \frac{Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (3)$$

把参数 t 代入直线的参数方程, 即可计算出投影点 P' 坐标值, 如投影点 P'_1, P'_2 。 Z_p 轴向量采用向量叉积计算得到, 公式如下:

$$\begin{cases} Z_p(x) = X_p(y) \cdot Y_p(z) - X_p(z) \cdot Y_p(y) \\ Z_p(y) = X_p(z) \cdot Y_p(x) - X_p(x) \cdot Y_p(z) \\ Z_p(z) = X_p(x) \cdot Y_p(y) - X_p(y) \cdot Y_p(x) \end{cases} \quad (4)$$

令 $O-XYZ$ 在 XYZ 轴上没有倾角, $O-XYZ$ 与 $O_p-X_pY_pZ_p$ 转换矩阵为 M_p , M_p 包括旋转和平移参数, 使用 Umeyama 算法^[6] 求解, 转换公式为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_p(x) & X_p(y) & X_p(z) \\ Y_p(x) & Y_p(y) & Y_p(z) \\ Z_p(x) & Z_p(y) & Z_p(z) \end{bmatrix} \cdot M_p \quad (5)$$

2.2 $O-XYZ$ 与 $O_s-X_sY_sZ_s$ 标定

为了让激光打标机把算法分析得到的最优加工轴心

点准确地标记在轴体上,需要标定坐标系 $O\text{-}XYZ$ 与 $O_s\text{-}X_sY_sZ_s$ 的关系,本方法设计标定轴来进行标定,如图 4 所示。

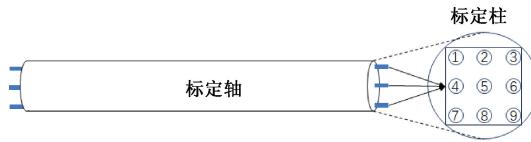


图 4 标定轴

Fig. 4 Calibration axle

在标定轴体的两端面各使用 9 个标定柱,标定柱设计为高精度圆柱体,且中心设计“十字”标记,再使用扫描仪扫描端面,得到标定柱点云,通过算法分析得到 9 个标定柱中心坐标矩阵,记为 C_9 :

$$C_9 = \begin{bmatrix} x_{c1} & y_{c1} & z_{c1} \\ x_{c2} & y_{c2} & z_{c2} \\ \vdots \\ x_{c9} & y_{c9} & z_{c9} \end{bmatrix} \quad (6)$$

移动激光打标机,使激光在标定轴端面聚焦最佳,依次投影激光点到 9 个标定柱“十字”中心,记录打标机激光偏转坐标矩阵,记为 S_9 :

$$S_9 = \begin{bmatrix} x_{s1} & y_{s1} & z_{s1} \\ x_{s2} & y_{s2} & z_{s2} \\ \vdots \\ x_{s9} & y_{s9} & z_{s9} \end{bmatrix} \quad (7)$$

令 $O\text{-}XYZ$ 与 $O_p\text{-}X_pY_pZ_p$ 转换矩阵为 M_s , M_s 包括旋转和平移参数,使用 Umeyama 算法^[18-19]求解,转换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_{s1} & y_{s1} & z_{s1} \\ x_{s2} & y_{s2} & z_{s2} \\ \vdots \\ x_{s9} & y_{s9} & z_{s9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c1} & y_{c1} & z_{c1} \\ x_{c2} & y_{c2} & z_{c2} \\ \vdots \\ x_{c9} & y_{c9} & z_{c9} \end{bmatrix} \cdot M_s \quad (8)$$

3 算法处理

本文方法依次进行点云聚类、降采样、轴向分段切片、计算初始加工轴、空间加工余量分析、优化加工轴位置、计算端面交点等算法处理,实现高铁车轴粗削加工的最优标记点计算,把标记点转换到激光打标机坐标系,再进行轴体激光打标标记。

3.1 初始加工轴

首先对轴体进行轴向分段切片,切片设计间距均匀并覆盖整个轴的长度,切片如图 5 所示;再对点云切片进行分析,计算出初始加工轴,过程如下。

1) 以步进长度为 q ,将轴体分为 p 段,称为切片。

2) 对每个切片上的点云,进行空间圆拟合,得到切片的质心 O_1, O_2, \dots, O_n 。

3) 对切片质心 O_1, O_2, \dots, O_n ,进行空间直线拟合,得到初始加工轴 L_0 。

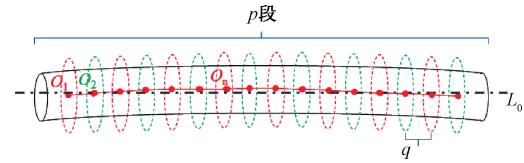


图 5 轴向分段切片

Fig. 5 Axial segmented slicing

3.2 空间加工余量分析

在轴体点云中放入 CAD 标准模型,对 CAD 标准模型空间区域进行轴向分段切片,分析切片上的数据点的余量情况,过程如下。

1) 设置加工轴 L_d 为初始加工轴 L_0 。

2) 在轴体点云中心位置放入 CAD 标准模型,并将模型的轴和加工轴 L_d 重合,如图 6 所示。

3) 对 CAD 标准模型空间区域所在点云,进行轴向分段切片,以步进长度为 q' ,将轴胚分为 p' 段, $q' \ll q$,即此处切片相对初始加工轴的切片,间距更加密集。

4) 计算切片上的数据点到加工轴 L_d 的距离,分析此处余量情况。余量计算如下:

$$\Delta M = D_c - D_m - ds \quad (9)$$

式中: ΔM 表示余量, $\Delta M > 0$,可进行加工, $\Delta M < 0$,无法加工; D_c 表示切片上数据点到加工轴 L_d 的距离; D_m 表示模型上对应点到加工轴 L_d 的距离; ds 表示余量补偿值,用来解决机械装配和坐标系标定等引起的误差。

5) 使用梯度下降法不断优化加工轴 L_d 在平面 XOY 的位置和空间姿态,使加工轴处于轴体点云的最佳位置。

6) 若余量分析 NG,则在 Z 轴正、负方向移动 CAD 标准模型。重复步骤 1)~6),直到余量分析 OK。

3.3 优化加工轴

需要求解使得所有点云切片上的数据点到轴的距离偏差最小的加工轴 L_{ok} ,即把 L_0 调整到 L_{ok} ,此时加工轴相对锻造车轴的质量分布最均匀,理论上具有最佳的加工余量与旋转平衡性。加工轴 L_{ok} 表示式为:

$$L_{ok} = \underset{\zeta L_d >}{} \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^N (d_p - \bar{d}_p)^2 \quad (10)$$

式中: N 为轴体切片点云的点数量; d_p 为切片点云上点到 L_d 的距离; \bar{d}_p 为 d_p 的平均值。

为了处理目标函数,本文使用批量梯度下降法(batch gradient descent, BGD)^[20-24],优化加工轴位姿,梯度下降法一般式为:

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} - \alpha \cdot \nabla F(\boldsymbol{\theta}) \quad (11)$$

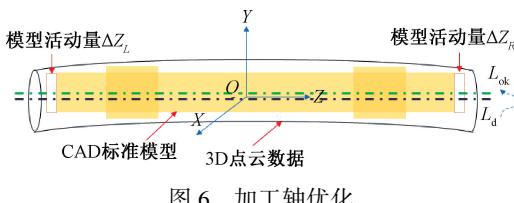


图 6 加工轴优化

Fig. 6 Optimization of manufacturing axis

式中: θ 表示目标参数, 本文方法为位姿参数, 包括位置 (x, y, z) 与姿态 (x_t, y_t, z_t) ; α 表示学习率, 控制每次迭代的步长; ∇ 表示对目标函数求导。加工轴位姿可以用空间直线表示, 空间直线的标准式方程如下:

$$\frac{x - x_0}{a} = \frac{y - y_0}{b} = \frac{z - z_0}{c} \quad (12)$$

其中, (a, b, c) 为直线的方向向量, 记为 \mathbf{V}_L , (x_0, y_0, z_0) 为直线上的点, 记为 q 。令 (x, y, z) 为切片点云上一点 p , 则点 p 与 q 的向量记为 \mathbf{V}_{pq} , \mathbf{V}_{pq} 可计算为:

$$\mathbf{V}_{pq} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0) \quad (13)$$

已知直线的方向向量 \mathbf{V}_L 和直线上一点到切片上点的方向向量 \mathbf{V}_{pq} , 那么计算点到空间直线的距离, 可以使用向量的叉积运算, 计算公式如下:

$$d_p = \frac{|\overrightarrow{\mathbf{V}_{pq}} \times \overrightarrow{\mathbf{V}_L}|}{|\overrightarrow{\mathbf{V}_{pq}}|} \quad (14)$$

4 实验研究

4.1 算法效果分析

为验证算法准确性, 本文在客户现场进行生产验证与统计, 验证时长为一个月(2023年11月20日~2023年12月27日), 验证产品为YD轴、BVV轴、HxD轴、CZ轴4种, 准确率为98.4%。生产人员把多个规格的车轴吊放在数控机床上, 通过经验判断和粗削, 对定位孔准确性进行验证和数据统计, 如表1所示。

表1 生产加工数据

Table 1 Manufacturing data of production

生产时段	车轴规格	生产数	错判数
2023年11月20日~2023年12月05日	YD	97	4
2023年12月06日	BVV	11	0
2023年12月06日	YD	11	0
2023年12月07日~2023年12月08日	BVV	49	0
2023年12月08日~2023年12月11日	YD	36	0
2023年12月19日~2023年12月20日	BVV	46	0
2023年12月21日	HxD	12	1
2023年12月21日~2023年12月25日	BVV	21	0
2023年12月25日	CZ	7	0
2023年12月26日	BVV	16	0
2023年12月27日	CZ	7	0
2023年11月20日~2023年12月27日	YD/BVV/HxD/CZ	313	5

4.2 生产效率分析

为验证生产效率, 本文在客户现场对各个流程进行了耗时统计。人工定位两端轴线点的速度是1~2根/h, 本文方法设备执行速度是6~9根/h, 大约是人工的3~6倍。客户需求设备生产能力≤10 min/根, 即≥6根/h。

表2 生产效率

Table 2 Productivity

动作流程	送料	扫描	算法	打标	卸料	总共耗时/min
	2~4	3~4	0.2	0.3	1~1.5	≤10

4.3 质心计算分析

为验证不同方法对质心计算的准确性, 本文做了空间圆拟合法(蓝色点)与空间坐标法(绿色点)两种的计算与效果对比, 如图7所示。

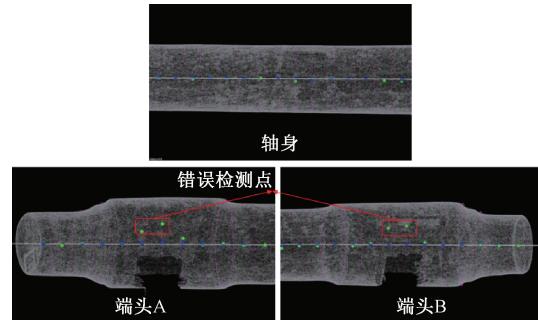


图7 质心计算方法比较

Fig. 7 Comparison of centroid calculation methods

空间圆拟合法, 是指对切片上的点云进行空间圆拟合, 得到的圆心, 记为质心。空间坐标法, 是指对切片上的点云进行空间坐标值的均值计算, 记为质心。

从图7可以看出, 空间坐标法在端头位置的质心检测出错, 其原因是该位置的切片点云存在部分缺失; 而空间圆拟合法的效果相对较鲁棒, 不受切片点云的少量数据缺失或少量噪点数据等的影响。

4.4 初始加工轴计算分析

为验证不同方法计算出的初始加工轴, 对加工轴优化的收敛速度和准确性, 本文做了奇/偶切片质心法、空间直线拟合法和起/终切片质心法3种的计算和效果对比, 如图8所示。

奇/偶切片质心法, 是指连接奇数段切片的平均质心与偶数段切片的平均质心所得到的直线, 记为初始轴。

空间直线拟合法, 是指对所有切片的质心进行一个空间直线拟合所得到的直线, 记为初始轴。

起/终切片质心法, 是指连接起始段切片的平均质心与终止段切片的平均质心所得到的直线, 记为初始轴。

从图8可以看出, 奇/偶切片质心法在一些产品中存

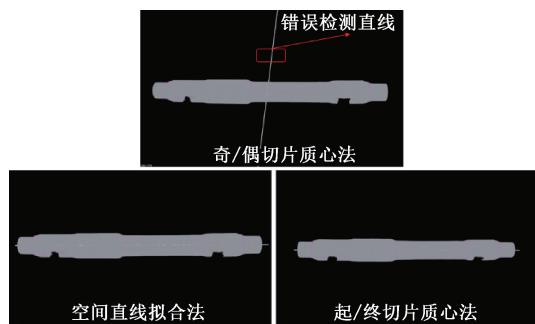


图 8 初始加工轴计算方法比较

Fig. 8 Comparison of primary axis calculation methods

在直线错误检测,原因是计算出的直线向量与轴向向量偏差太大,后续研究不考虑该方法的加工轴优化收敛速度和准确性。

在 4 种车轴规格,对空间直线拟合法与起/终切片质心法进行了加工轴优化收敛速度和准确性的对比,如表 3 所示。

表 3 初始加工轴计算方法比较

Table 3 Comparison of primary axis calculation methods

车轴规格	梯度步长/mm	空间直线拟合法		起/终切片质心法	
		Iters	Error/mm	Iters	Error/mm
YD	0.1	11	10.24	92	10.16
BVV	0.1	10	9.93	68	9.93
HxD	0.1	6	9.72	84	9.89
CZ	0.1	9	8.29	95	8.51

从表 3 可以看出,空间直线拟合法相比起/终切片质心法,加工轴优化收敛速度较快(迭代次数(Iter)呈现);准确性(误差值(Error)呈现)基本接近。

4.5 激光打标机标定分析

为验证激光打标机的标定效果,本文进行了标定实验,标定数据如表 4 和 5 所示,结果如表 6 和 7 所示。

表 4 激光打标机 A 标定数据

Table 4 Calibration data of laser marking machine A

标定点	打标机坐标系/mm			扫描仪坐标系/mm		
	X _s	Y _s	Z _s	X	Y	Z
1	-23.2	49.6	780	-24.5	-363.1	3 833.6
2	12.6	32.3	780	11.2	-380.9	3 833.6
3	48	14.6	780	47.1	-398.9	3 833.7
4	-40.5	13.9	780	-42.5	-398.9	3 833.6
5	-4.8	-4.0	780	-6.5	-416.9	3 833.6
6	30.8	-21.5	780	29.1	-434.6	3 833.6
7	-57.9	-22.2	780	-60.3	-434.7	3 833.5
8	-22.5	-40.1	780	-24.5	-452.6	3 833.5
9	13.3	-57.5	780	11.3	-470.4	3 833.6

表 5 激光打标机 B 标定数据

Table 5 Calibration data of laser marking machine B

标定点	打标机坐标系/mm			扫描仪坐标系/mm		
	X _s	Y _s	Z _s	X	Y	Z
1	34.1	43.7	735.0	-37.7	-374.0	1 800.8
2	-5.7	41.0	735.0	2.0	-376.8	1 800.9
3	-45.7	38.1	735.0	41.9	-379.4	1 801.1
4	37.0	3.6	735.0	-40.5	-414.1	1 800.8
5	-2.8	0.8	735.0	-0.7	-416.6	1 800.9
6	-42.8	-2.1	735.0	39.3	-418.9	1 801.1
7	39.9	-36.2	735.0	-43.2	-453.8	1 800.9
8	0.1	-39.4	735.0	-3.3	-456.4	1 800.9
9	-39.7	-42.0	735.0	36.4	-459.1	1 801.1

表 6 激光打标机标定矩阵

Table 6 Calibration matrix of laser marking machine

激光打标机 A			激光打标机 B		
0.996 73	-0.008 42	0	-1.003 33	-0.005 64	0
0.008 42	0.996 73	0	-0.005 64	1.003 33	0
0	0	0.996 76	0	0	-1.003 35

表 7 激光打标机标定误差

Table 7 Calibration error of laser marking machine

标定点	激光打标机 A/mm			激光打标机 B/mm		
	D _x	D _y	D _z	D _x	D _y	D _z
1	0.044	0.134	0.044	0.03	0.045	0.12
2	0.037	0.252	0.088	0.036	0.244	0.041
3	0.442	0.221	0.187	0.079	0.216	0.177
4	0.312	0.241	0.009	0.09	0.061	0.093
5	0.01	0.03	0	0.012	0.04	0
6	0.007	0.146	0.071	0.131	0.336	0.185
7	0.405	0.016	0.093	0.205	0.124	0.119
8	0.116	0.359	0.052	0.011	0.336	0.016
9	0.155	0.297	0.004	0.03	0.045	0.12
最大值	0.442	0.359	0.187	0.205	0.336	0.208
最小值	0.007	0.016	0	0.011	0.033	0
平均值	0.170	0.188	0.061	0.072	0.159	0.106

4.6 坐标系重建分析

为验证使用标定球校正扫描仪坐标系的有效性,本文对 YD 轴、BVV 轴和 HVD 轴进行了测试。

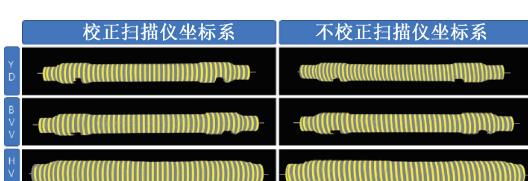


图 9 坐标系有无校正的切片比较

Fig. 9 Comparison of slice on coordinate system with or without correction

从图 9 可以看出,不校正扫描仪坐标系时,轴体的切片与轴体不垂直;校正扫描仪坐标系时,轴体的切片与轴体接近垂直;因此,使用标定球校正扫描仪坐标系是有必要的,方便后续算法处理和准确性。

4.7 切片间隔分析

为验证切片间隔是否影响打标位置,本文对 BVV 轴进行多个切片间隔测试,并分析了数据均值(Ave)、数据极差(Range)、数据方差(Std),如表 8 所示。

表 8 不同切片间隔的打标位置

Table 8 Marking positions for different slice intervals

间隔	激光打标机 A			激光打标机 B			(mm)
	X	Y	Z	X	Y	Z	
2	-5.64	-433.26	4 023.55	0.54	-433.40	1 697.94	
4	-5.48	-433.19	4 023.55	0.51	-433.41	1 697.94	
6	-5.42	-433.23	4 023.55	0.44	-433.20	1 697.94	
8	-5.57	-433.28	4 023.55	0.37	-433.08	1 697.95	
10	-5.68	-433.56	4 023.56	0.37	-433.41	1 697.94	
12	-5.56	-433.21	4 023.55	0.27	-433.14	1 697.94	
14	-5.61	-433.15	4 023.55	0.11	-432.98	1 697.95	
16	-5.57	-433.54	4 023.56	0.22	-432.84	1 697.95	
18	-5.54	-433.47	4 023.56	0.12	-433.04	1 697.95	
20	-5.47	-433.65	4 023.56	0.18	-432.94	1 697.95	
Ave	-5.56	-433.36	4 023.56	0.32	-433.15	1 697.95	
Range	0.261	0.501	0.004	0.427	0.578	0.004	
Std	0.006	0.030	0	0.022	0.038	0	

从表 8 可以看出, X 、 Y 方向存在 <0.6 mm 的位置波动,因此不同的切片间隔值对打标位置存在一定影响,理论上切片间隔越小,打标位置越准确。

4.8 梯度步长分析

步长是优化算法重要的参数之一,太大可能引起模型在最小值附近振荡或发散,太小可能导致模型收敛速度缓慢。为验证不同梯度步长值对加工轴优化的影响程度,本文设定多个步长值进行了测试,对比如图 10 所示。

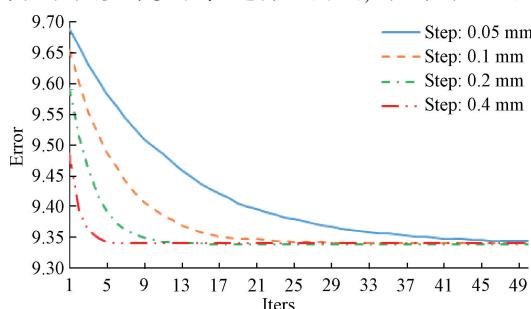


图 10 不同步长的优化对比

Fig. 10 Comparison of optimization with different step sizes

图 10 给出 0.05、0.1、0.2、0.4 mm 4 个步长值的测试,分别在第 49、25、12、6 次迭代开始收敛,说明步长值

越小收敛速度越慢;为了兼顾速度和精度,步长值 0.1 可能是比较理想的。

5 结 论

本文提出一种基于梯度下降的高铁车轴粗削最优加工标记方法。该方法使用梯度下降法优化轴体 3D 点云与轴体 CAD 模型之间的误差,不断调整加工轴位置使其达到加工最优,保证车削加工过程中余量充分性和旋转平衡性。该方法通过现场实践验证,准确性 $>98\%$,效率相比人工提升了 3~6 倍,且能适配现场各种规格的车轴产品,提高了高铁车轴粗削工序的生产效率,降低了生产过程的报废率。

此外,本文针对性做了一些研究,如质心计算分析、初始加工轴计算分析、打标机标定分析、坐标系重建分析、切片间隔分析和梯度步长分析等,对方法落地实施提供重要促进。遗憾的是,本文打标机的标定误差不小,后续工作将重点研究和处理该问题。

参 考 文 献

- [1] 吴毅,李翔,冯亦得,等.国内外高速铁路车轴技术发展现状与展望[J].高速铁路新材料,2022,1(5):1-6.
WU Y, LI X, FENG Y D, et al. Development status and prospect of high-speed railway axle technology at home and abroad [J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2022,1(5):1-6.
- [2] 高天元,程显东,陈琳,等.光学测量装置在轴孔内的同轴定位机构[J].应用光学,2010,31(1):87-90.
GAO T Y, CHEN X D, CHEN L, et al. Coaxial positioning of optical measuring device in the shaft hole[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 87-90.
- [3] 马成玲.车轴中心孔定位系统的研究[D].太原:太原科技大学,2011.
MA CH L, Research of the axle center hole location system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [4] 谭小群,唐婧仪,于微微,等.基于线激光扫描和图像处理的基准孔检测技术研究[J].现代制造工程,2019(4):115-121.
TAN X Q, TANG J Y, YU W W, et al. Research on reference hole detection technology based on line laser scanning and image processing [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019 (4): 115-121.
- [5] 罗哉,赵洪楠,江文松,等.基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法[J].仪器仪表学报,2021,42(12):

- 184-190.
- LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12):184-190.
- [6] 李杨,宋席发,王冰,等.基于三维点云的空间孔位对接技术研究 [J].工业控制计算机,2025,38(3):113-115.
- LI Y, SONG X F, WANG B, et al. Research on spatial hole docking technology based on 3D point cloud [J]. Industrial Control Computer, 2025, 38(3):113-115.
- [7] LI M H, FENG X, HU Q F. 3D laser point cloud-based geometric digital twin for condition assessment of large diameter pipelines [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 142(12):105430-105435.
- [8] WU Z J, WANG Y N, XIE H, et al. A systematic point cloud edge detection framework for automatic aircraft skin milling [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(1):560-572.
- [9] 傅瑶,陈鹏,郭贵松,等.基于4PCS和SICP的点云配准方法在钢轨磨耗计算中的应用 [J].电子测量与仪器学报,2022,36(12):210-218.
- FU Y, CHEN P, GUO G S, et al. Application of the point cloud registration method based on 4PCS and SICP in rail wear calculation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (12): 210-218.
- [10] LYU R, LIU H D, WANG Z J, et al. WPMAVM: Weighted plus-and-minus allowance variance minimization algorithm for solving matching distortion [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 76(8): 102320-102325.
- [11] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [12] SUN J Y, GONG Y D, ZHAO J B, et al. Matching based on variance minimization of component distances using edges of free-form surfaces [J]. Pattern Recognition, 2023, 143(11):109729-109737.
- [13] CHEN Y X, CHI Y J, FAN J Q, et al. Gradient descent with random initialization: fast global convergence for nonconvex phase retrieval [J]. Mathematical Programming, 2019, 176(1):5-37.
- [14] RUDER S. An overview of gradient descent optimization algorithms [J]. ArXiv preprint arXiv:1609.04747, 2016.
- [15] RUSU R B, COUSINS S. 3D is here: Point cloud library (PCL) [J]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, 13(9):1-4.
- [16] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):619-638.
- [17] CANTZLER H. Random sample consensus (RANSAC) [J]. University of Edinburgh, 1981, 1(1):1-4.
- [18] UMEYAMA S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(4): 376-380.
- [19] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: An accurate $O(n)$ solution to the PnP problem [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(7): 155-166.
- [20] QI H B, WANG F F, WANG H S. Statistical analysis of fixed mini-batch gradient descent estimator [J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2023, 32(4): 1348-1360.
- [21] LU Y L, LI W Y, WANG H W. A batch variable learning rate gradient descent algorithm with the smoothing L1/2 regularization for Takagi-Sugeno models [J]. IEEE Access, 2020, 8(5):100185-100193.
- [22] GANIE A G, DADVANDIPOUR S. From big data to smart data: A sample gradient descent approach for machine learning [J]. Journal of Big Data, 2023, 10(1): 1-13.
- [23] SOODABEH A, MANFRED V. A learning rate method for full-batch gradient descent [J]. Papers on Technical Science, 2020, 13(1): 174-177.
- [24] WOODRUFF D P, ZHU Y, ZHANG X. Simpler algorithm in gradient descent [J]. Frontiers in Educational Research, 2020, 3(4):1-5.

作者简介



刘仁明(通信作者),2012年于长沙学院获得学士学位,2016年于湖南大学获得硕士学位,现为长沙海贝智能科技有限公司工程师,主要研究方向为计算机视觉、图像处理、智能控制。

E-mail: ming27456@126.com

Liu Renming (Corresponding author) received B. Sc. degree from Changsha University in 2012, and M. Sc. degree from the Hunan University in 2016. He is now an engineer of Changsha Hibay Intelligent Technology Co., Ltd. His main research interests include computer vision, image processing, and intelligent control.



张耀,分别在 2009 年、2012 年、2022 年于湖南大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为湖南大学广州大湾区创新研究院的研究员,主要研究方向为图像处理及其视觉、自动化设备。

E-mail: zy85721@126.com

Zhang Yao received B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Hunan University in 2009, 2012, and 2022, respectively. He is now a researcher at the Greater Bay Area Institute for Innovation, Guangzhou, Hunan University. His main research interests include image processing, machine vision, and automation equipment.



贺文斌,2020 年于河南工业大学获得学士学位,2022 年于湖南大学获得硕士学位,现为湖南大学博士研究生,主要研究方向为机器人制造和检测,深度学习和智能信号处理。

E-mail: hwenbin@hnu.edu.cn

He Wenbin received B. Sc. degree from Henan University of Technology in 2020 and M. Sc. degree from the Hunan University in 2022. He is now a Ph. D. candidate in Hunan University. His main research interests include robotic manufacturing and detection, deep learning, and intelligent signal processing.