

汽车零部件点云虚拟装配顺序优化分析

陈志^{1*}, 邢彦锋^{1#}, 周建鹏¹, 曾胜²

¹上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海

²蔚来汽车(安徽)有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年3月8日; 录用日期: 2023年5月10日; 发布日期: 2023年5月17日

摘要

虚拟匹配技术对汽车装配过程中车身质量控制及生产效率提高有重要作用。目前, 对于多个零件不同点云获得最优匹配顺序的研究尚未开展, 本文基于混沌遗传算法进行汽车零部件点云匹配顺序优化。首先对PolyWorks二次开发实现匹配区域干涉间隙的自动化测量, 然后设置点云匹配准则, 建立虚拟匹配优化目标函数, 最后应用混沌遗传算法优化点云匹配顺序。结果表明, 提出的虚拟匹配优化模型相对于传统装配模型, 装配偏差降低了35%, 提高了装配质量, 降低了制造成本。

关键词

虚拟装配, 二次开发, 混沌遗传算法, 顺序优化

Virtual Assembly Sequence Optimization Analysis of Auto Parts Point Cloud

Zhi Chen^{1*}, Yanfeng Xing^{1#}, Jianpeng Zhou¹, Sheng Zeng²

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

²NIO Automobile (Anhui) Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: Mar. 8th, 2023; accepted: May 10th, 2023; published: May 17th, 2023

Abstract

Virtual matching technology plays an important role in body quality control and production efficiency improvement in the automotive assembly process. At present, the research on obtaining the optimal matching order of different point clouds of multiple parts has not yet been carried out,

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈志, 邢彦锋, 周建鹏, 曾胜. 汽车零部件点云虚拟装配顺序优化分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2243-2251. DOI: 10.12677/mos.2023.123205

and this paper proposes a chaotic genetic algorithm to optimize the matching order of point clouds of automotive parts. Firstly, the PolyWorks secondary development realizes the automatic measurement of the interference gap of the matching region, then sets the point cloud matching criterion, establishes the virtual matching optimization objective function, and finally applies the chaotic genetic algorithm to optimize the point cloud matching order. The results show that compared with the traditional assembly model, the virtual matching optimization model proposed in this paper reduces the assembly deviation by 35%, which improves the assembly quality and reduces the production cost.

Keywords

Virtual Matching, Secondary Development, Chaotic GA, Sequential Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

虚拟匹配技术是广泛应用于汽车制造和现代化生产领域的重要驱动和前沿技术，随着对汽车装配精度要求的不断提高，零部件实际装配的顺序是影响工件装配质量的关键因素[1] [2]。为了优化零件的装配顺序，对零件点云重叠区域干涉间隙进行虚拟测量，使得在实际装配前就得到零件的最佳装配顺序。从传统的装配过程来看，只有将零件实物搭建好后才能测量装配的精度，装配过程随机进行，缺乏定向的预测指导，为此许多研究工作者基于 PolyWorks 对零件点云进行虚拟匹配测量[3] [4]。

利用 3D 扫描设备对零件实物进行扫描，将零件点云与零件数模导入至 PolyWorks 中进行匹配分析[5]。随着现有扫描设备性能的提升，获得的点云数据边界质量及密度都较好，但不可避免地还是会生成杂点影响点云匹配偏差的测量[6]。AN 等[7]以零件偏差值的均方根为目标函数，通过迭代计算得到最佳的匹配位置，将完善后的 ICP 算法应用到对点云曲面的拟合配准。陶海跻等人[8] [9] [10]提出了可将大量点云杂点去除的方法，提高了零件装配质量，主要应用于较薄的钣金件且对算法要求较高。李明等人[11]以 PolyWorks 为基础，通过参数设置进行杂点过滤，并反映出零件真实的匹配状态，对零件的间隙与干涉情况进行分析。邵俊等[12]通过对零件的虚拟匹配偏差值进行预测，设计一种具有实物的测试方案，提出了可直接面向虚拟匹配模型的混合仿真概念。KHEDER 等[13]提出用遗传算法对交叉操作进行规范，可找到满足汽车后轴的最优拆卸序列。REN 等[14]以最短拆卸时间为目标，对三轴五速型号的机械变速器序列进行优化，设计一种异步并行的拆卸模型。TIAN 和 REN 等[15] [16]以降低成本为目标，将遗传算法用到对复杂产品的任务规划与拆卸序列中优化提升机的序列。

本文基于装配准则与 PolyWorks 二次开发建立了零件虚拟匹配优化模型，二次开发程序实现了零件点云干涉间隙的自动化测量，将混沌遗传算法应用于点云匹配顺序优化，提升了零件装配质量，研究成果为零件装配顺序优化提供了理论基础和技术支撑。

2. 虚拟装配模型

汽车装配时应尽可能提高装配精度，增加汽车的装配质量。对于不同的决策目标，产生的零件装配序列也会存在较大差异。以往都以装配作业车间调度、准时制生产方式、减少装配时间等问题作为研究目标[17]，没有考虑零件之间的装配偏差，使汽车装配质量不高。

2.1. 虚拟装配流程

装配序列规划的前提是建立虚拟匹配模型，确定总成的零件组成及数据信息，依照零件实际装配的优先级进行顺序编号。本文依据所得汽车总成的信息和图论方法，建立混合图模型来表示总成的装配关系，即 $G = \{V_s, U_e\}$ 。其中， G 代表混合图， V_s 表示用于装配的零件；无向边 U_e 表示零件之间具有重叠区域[18]。

对不同零件扫描获得点云数据，并对每个零件的点云数据进行顺序编号。将所获得点云进行去噪处理，并以编号为命名规范进行保存。将零件点云与 CAD 数模在 PolyWorks 中进行虚拟匹配，进行干涉与间隙测量偏差值的获取。把重叠区域点云匹配偏差设置为目标函数，通过优化装配顺序提高零部件装配精度。顺序规划是一个较为复杂的组合问题，装配前需要满足对应的匹配条件，根据零部件之间的重叠关系对当前装配的可行性做出判断。零件点云装配原则如下：

- 1) 点云的顺序编号一旦确定是不能发生改变的；
- 2) 每组点云匹配所得偏差结果都默认正确；
- 3) 总成组成零件的点云个数保持一致；
- 4) 每组点云匹配完成后，取出所有测点偏差的平均值当作最终偏差；
- 5) 每个点云匹配完成后，不能与其他点云重复匹配。

总成中组成零件的数量为 n ，零件的序列为 sqr ，单个零件的点云数都为 N ，初始种群为 Chrome 。根据所得汽车总成零件及相应点云的信息，基于图论方法来表示零件的重叠关系。即 $G = \{V_s, U_e\}$ 。在图论模型中，汽车的零件有各端点来表示，总成零件的重叠关系由重叠矩阵来表示，假使总成中零件总数为 n ，则矩阵 G 表示为

$$G = (c_{ij}) = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中，当 i 和 j 具有重叠关系时， $c_{ij} = c_{ji} = 1$ ；当 i 和 j 不具有重叠关系， $c_{ij} = c_{ji} = 0$ 。

2.2. 测量匹配偏差

将匹配数模与点云导入至 PolyWorks 中，通过锚定的方式对重叠区域上方零件创建曲面比较点。将锚定点通过至最近点方向投影到下方零件中，并保留原有对象就可得到重叠区域上方零件及下方零件的一组对应测点。对测点处抽取测量值，得到零件在该点处的偏差。并将对应测点的偏差值进行减法运算，当值大于 0 时说明此测点处产生间隙，当值小于 0 时，说明此测点处发生干涉。

通过手动锚定的形式得到测点过于繁琐，将首次锚定及投影测点坐标保存为文本文件，在之后点云的测量中调用已有测点文件。重叠区域点云的数目众多，若通过手动的方式将点云一次导入进行测量会加大工作量，单个零件有 N 个点云， n 个零件共有 $n \times N$ 个点云，要实现零件所有点云重叠区域之间干涉间隙的测量，根据实际装配顺序先对 1 号与 2 号零件进行装配，1 号与 2 号零件分别有 N 个点云，那匹配组合之间匹配组合的数目为 $N \times N$ 个，那所有零件匹配完成的总组合数目为 $(n-1) \times N \times N$ 个，要实现所有点云组合的测量[19]。为此对 PolyWorks 进行二次开发，将匹配零件的 $2N$ 个点云选中，实现点云的自动化测量，得到每组匹配点云在重叠区域的测点偏差值。

2.3. 目标函数

汽车总成组成零件的点云数量较多，所以可产生的点云匹配序列急剧增加，产生的点云初始匹配方

案也较复杂。若采用传统的方式，随机对装配零件进行组合，装配质量的随机性太大，效率低下。所以本文提出将混沌遗传算法应用于对点云装配序列的生成优化当中，找出零部件间的最佳匹配组合。

在零件总成装配研究中，装配偏差是最直观的决策目标，能够给决策者选择装配组合提供判断，因此建立装配偏差函数。

其中，设计变量如下： $D_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n)$ 表示点云 j 与点云 i 的匹配偏差，其目标函数如下：

$$\text{avg}D_{ij} = \sum_{c=1}^T p_{ij}^c / T \tag{2}$$

式中， $(c$ 是测点的编号： $1,2,3,\dots,T)$ ，表示点云 i 与点云 j 测点 c 位置偏差值的大小， T 代表测点的总个数， D_{ij} 代表点云 i 与点云 j 偏差均值。

对于零件之间的匹配优化问题，就是求得所有零件点云组合后偏差的最小值，来判定此种方案可以让零件的装配效果达到最优。

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} D_{ij} \tag{3}$$

式中， D_{ij} 表示装配点云 i 到点云 j 的偏差， $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ 表示零件匹配的方案。

2.4. 算法模型的建立

根据匹配偏差的决策目标对种群进行优化处理，得到最佳的总成零件匹配序列。在 PolyWorks 中进行点云的虚拟匹配不用考虑零部件装配顺序，问题实际为点云装配最优序列的求解，遗传算法是针对该类问题被研究者普遍应用的算法，但存在局部收敛等现象。因此在优化变量中加入混沌扰动，对得到的混沌变量进行编码，表示成“染色体”，待将最优解找到后继续加入扰动，进行下一步的搜索[20]。

染色体的长度为匹配零件的个数，其中基因排列顺序与零件顺序对应，基因的大小代表点云的编号。种群大小的值设为 100，作为各零件点云 1 至 100 相同编号的匹配组合。在本文中，定义最大迭代次数为 200，交叉概率及变异概率的值分别为 0.5 和 0.08。采用实数编码的方式，染色体中的基因对应重叠区域点云偏差，总长度为总成重叠区域的个数。采用装配偏差的倒数作为适应度函数，并设置适应度值对种群中染色体进行筛选。根据式(4)匹配偏差的目标函数，搜索装配偏差的最优值。

$$\min F(x) = \left[\frac{1}{P(x)} \right] \tag{4}$$

本文采用轮盘赌策略从种群中选择适应度大的个体，个体被选中的概率与其适应度的大小成正比，其被遗传到下一代的概率由式(5)计算可得。

$$P(x_i) = \left[\frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \right] \tag{5}$$

产生随机数用于判定是否进行交叉操作，根据式(6)采用帐篷映射产生的序列经映射后利用高斯函数去寻找交叉位置。

$$\theta_{n+1} = T(\theta_n) \begin{cases} 2\theta_n & 0 \leq \theta_n < 0.5 \\ 2(1-\theta_n) & 0.5 \leq \theta_n \leq 1 \end{cases} \tag{6}$$

由变异概率决定是否变异，根据式(7)采用 logistic 映射的序列经映射后利用高斯函数来确定变异位置。若新的染色体适应度高，则替代原染色体。

$$x_{n+1} = f(x_n) = 1 - 2x_n^2 \quad -1 \leq x_k \leq 1 \tag{7}$$

染色体中相邻基因代表匹配零件的两点云，通过点云干涉间隙偏差值对染色体的适应度值进行判断，从而得到最优的染色体。可知，对该染色体解码得到总成组件零件最优的点云匹配组合。其中算法的流程图如图 1 所示。

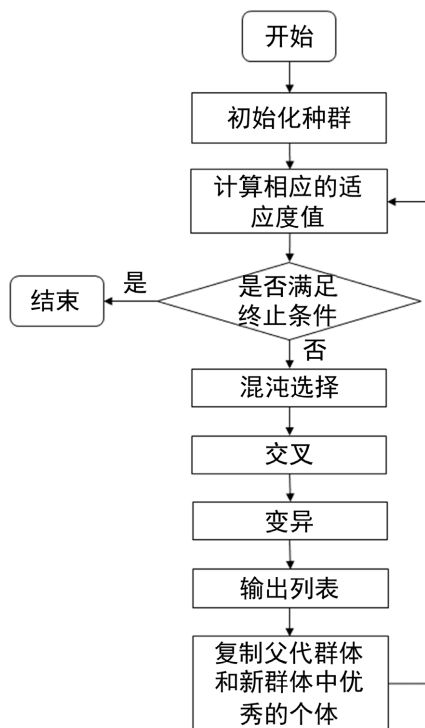


Figure 1. Chaos genetic algorithm workflow diagram
图 1. 混沌遗传算法工作流程图

3. 实证研究

将某公司汽车后地板总成作为研究对象。目前，该车型还未生产上市，研究零件点云装配序列对车身质量控制具有一定的实用价值。后地板总成 CAD 模型及点云数据如图 2、图 3 所示。

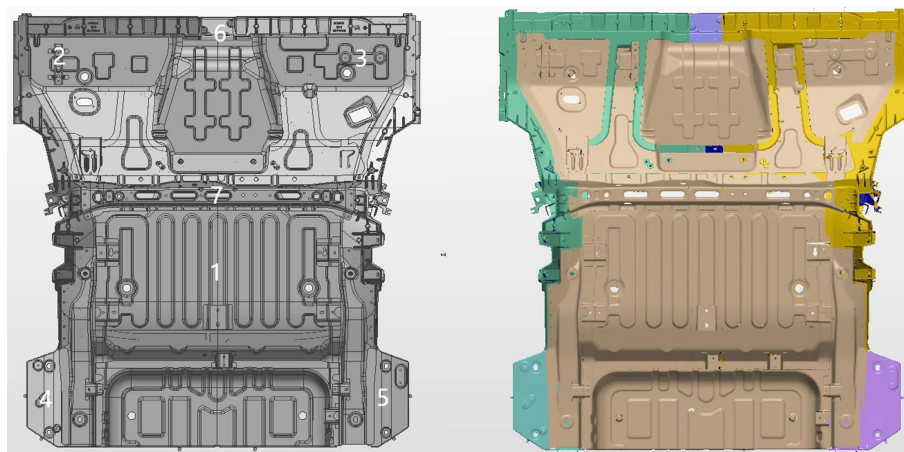


Figure 2. “Rear floor” assembly CAD and point cloud assembly part drawing
图 2. “后地板”总成 CAD 与点云装配零件图

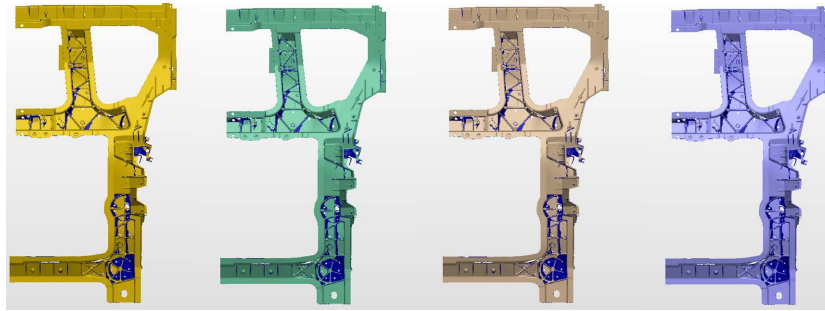


Figure 3. Point cloud map in four different states of "right rear stringer"
 图 3. “右后纵梁” 四种不同状态下的点云图

后地板组成零件如表 1 所示，各零件点云装配偏差值是由 PolyWorks 二次开发程序测量获得，测点偏差的平均值当作重叠区域干涉、间隙的结果。图 4 所示为测量过程中所得彩图，其中偏差值的约束条件在 1 mm 范围之内，后地板面板点云 1 与左后地板框架铸件不同点云的部分测点偏差值大小如表 2 所示。

Table 1. Car rear floor parts table
 表 1. 汽车后地板零件表

零件号	零件名称
1	左后地板框架铸件
2	右后地板框架铸件
3	后地板下连接件
4	后地板横向构件
5	后地板面板
6	左后纵梁
7	右后纵梁

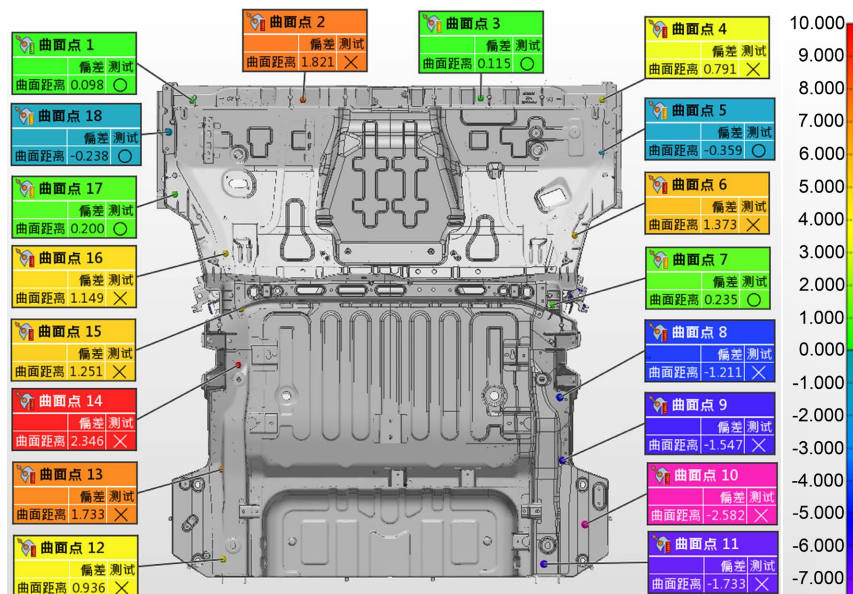


Figure 4. Part point cloud data measurement point deviation diagram
 图 4. 零件点云数据测点偏差图

Table 2. Table of deviation values for part point cloud measurement points**表 2.** 零件点云测点偏差值表

测点号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
MP1	0.61	0.53	0.86	0.49	0.52	0.22	0.59	0.37	0.75	0.18
MP2	0.75	0.61	0.35	0.72	0.56	0.43	0.76	0.49	0.84	0.47
MP3	0.73	0.52	0.46	0.64	0.21	0.91	0.41	0.59	0.76	0.93
MP4	0.32	0.27	0.71	0.19	0.52	0.57	0.39	0.33	0.91	0.78
MP5	0.23	0.56	0.34	0.78	0.13	0.42	0.25	0.97	0.39	0.53
MP6	0.38	0.64	0.16	0.32	0.39	0.37	0.37	0.24	0.43	0.64
MP7	0.73	0.71	0.37	0.41	0.45	0.51	0.94	0.13	0.69	0.28
MP8	0.47	0.29	0.49	0.63	0.24	0.93	0.76	0.88	0.92	0.39
MP9	0.79	0.45	0.52	0.74	0.87	0.59	0.23	0.76	0.31	0.11
MP10	0.21	0.97	0.44	0.28	0.18	0.62	0.91	0.14	0.79	0.58

基于混沌遗传算法, 根据对各零件不同点云测量所得数据, 使用 MATLAB 编写了相应算法程序。默认虚拟装配过程中对齐、测量、生成偏差值等操作都是自动化完成。因此, 为将本文所采用混沌遗传的优势更好说明, 将其与基本遗传算法和经验装配的结果进行对比分析, 将两种算法参数设置相同, 分别运行 20 次用于结果验证。

根据图 5 所示结果, 本案例中适应度值越低, 说明运行结果越好, 显然所采用混沌遗传算法优于基本遗传算法, 且具有运算速度快及收敛性能好等优点, 能更好的找出满足匹配偏差值的最优序列。

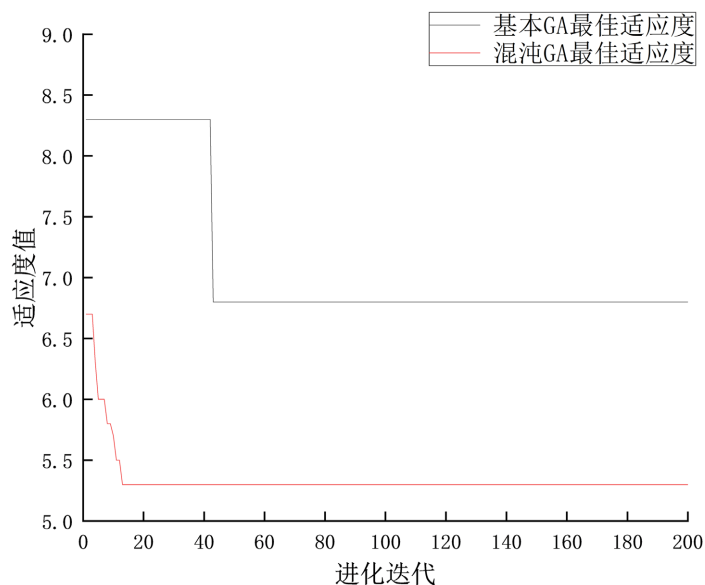
**Figure 5.** Convergence characteristic plot**图 5.** 收敛特征曲线图

表 3 对三种不同方式的实验结果进行统计归纳, 其中, 经验装配序列具有较大的随机性。标准 GA 最佳装配序列使一组 7 个工件的匹配偏差在 6.8 mm, 对程序执行 20 次得到实验结果, 将获得最优解的次数与总的实验次数相比可得收敛率。

Table 3. Comparison of experimental results of the three solution methods
表 3. 三种求解方法试验结果对比

求解方法	最优结果: 偏差/mm	最差结果: 偏差/mm	收敛率(%)	最佳进化代数
经验装配	8.2	12.5		
标准 GA	6.8	8.3	35.7	47
混沌 GA	5.3	6.7	93.2	13

混沌 GA 使一组 7 个工件的装配偏差达到 5.3 mm, 极大提升了车身的装配质量与装配精度, 待 2 号零件与 1 号零件的所有点云匹配序列确定后, 以 2 号零件点云的匹配序列为新的基准, 得到 3 号零件与 2 号零件的最佳匹配序列。以此类推, 得到所有零件之间的最佳匹配序列。

4. 结论

1) 将虚拟匹配和混沌遗传算法引入到汽车总成零件装配过程中, 利用混沌遗传算法对车身零部件的匹配组合进行优化调整, 并对优化前后的零件匹配质量进行对比分析。

2) 运用混沌遗传算法搜索, 得到汽车总成零件各个工件之间的最佳匹配序列, 最小偏差在 5.3 mm, 得到汽车总成零件实际装配序列。

3) 实例结果表明, 混沌 GA 在本文装配偏差优化问题的研究中优于经验装配和基本 GA, 装配精度明显提高, 具有更好的全局搜索能力和收敛率, 采用混沌遗传算法可以明显降低车身零部件匹配偏差, 提高了车身装备质量, 对于车身零部件的装配优化设计具有重要意义。

基金项目

上海市自然科学基金(20ZR1422600)。

参考文献

- [1] 王辉, 李明, 韦庆玥, 沈昕儒. 一种基于测点生成的间隙面差名义值算法[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(1): 23-26.
- [2] 王威, 王珉, 胡俊聪, 鲍益东, 金霞, 陈文亮. 面向汽车覆盖件的有限元仿真虚拟匹配方法[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(5): 532-543.
- [3] 周翰, 张磊, 吴焯骏, 彭杨, 徐刚, 罗帅, 赵云. 白车身虚拟匹配技术及应用[J]. 汽车实用技术, 2020(11): 169-171.
- [4] 潘碧琰, 李明, 韦庆玥, 朱志颖, 姜通通. 基于 PolyWorks 的零件虚拟匹配分析[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(3): 10-13.
- [5] 朱志颖, 李明, 韦庆玥, 潘碧琰. 车身虚拟匹配中三角化模型轻量化方法研究[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(3): 21-25.
- [6] 朱志颖, 李明, 韦庆玥, 潘碧琰. 汽车钣金件虚拟装配实物数字化研究[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(6): 32-34.
- [7] 安超, 赵文政, 刘银华. 面向车身虚拟匹配的非均匀点云数据配准算法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(4): 129-134.
- [8] 陶海跃, 达飞鹏. 一种基于法向量的点云自动配准方法[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 184-189.
- [9] 张溪溪, 纪小刚, 胡海涛, 张建安, 栾宇豪. 微型复杂曲面零件散乱点云特征点提取[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(5): 1-5.
- [10] 孙殿柱, 范志先, 李延瑞, 孙肖霞. 散乱数据点云型面特征分析算法的研究与应用[J]. 机械工程学报, 2007(6): 133-136.
- [11] 潘碧琰, 李明, 韦庆玥, 朱志颖, 姜通通. PolyWorks 二次开发在虚拟匹配中的应用[J]. 计量与测试技术, 2018,

45(6): 13-16.

- [12] 邵俊, 于兴林, 丁华. 基于混合仿真的车门虚拟匹配尺寸预测方法与实例[J]. 汽车工艺与材料, 2020(5): 65-71.
- [13] Kheder, M., Trigui, M. and Aifaoui, N. (2014) Disassembly Sequence Planning Based on a Genetic Algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, **229**, 2281-2290. <https://doi.org/10.1177/0954406214557340>
- [14] Ren, Y., Zhang, C., Zhao, F., *et al.* (2018) An Asynchronous Parallel Disassembly Planning Based on Genetic Algorithm. *European Journal of Operational Research*, **269**, 647-660. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.055>
- [15] Tian, G., Zhou, M.C. and Li, P. (2018) Disassembly Sequence Planning Considering Fuzzy Component Quality and Varying Operational Cost. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **15**, 748-760. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2690802>
- [16] Ren, Y., Meng, L., Zhang, C., *et al.* (2020) An Efficient Metaheuristics for a Sequence-Dependent Disassembly Planning. *Journal of Cleaner Production*, **245**, Article ID: 118644. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118644>
- [17] 尹凤福, 杜泽瑞, 李林, 梁振宁, 安瑞, 王瑞东, 刘广阔. 基于双种群遗传算法的废旧智能手机拆卸序列规划[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17): 226-235.
- [18] 吕海利, 朱家涛, 王正国, 吴姝. 装配作业车间的 JIT 调度研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 157-165.
- [19] Li, W.M., Han, D., Gao, L., Li, X.Y. and Li, Y. (2022) Integrated Production and Transportation Scheduling Method in Hybrid Flow Shop. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **35**, 123-142. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00683-7>
- [20] 杨宇明, 李传东. 混沌在遗传算法中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004(5): 76-77.