

基于匹配优化与保证铰链落销的车门装调方法

李深星¹,王志国¹,李磊²,陈涛²,张韬²,吴海江²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 上海翼锐汽车科技有限公司,上海 201804)

摘要:白车身质量控制中,零部件的装调特别是四门的装调难度很大。提出用扫描的点云数据建立虚拟模型,同时采用匹配优化且保证铰链落销的车门装调方法,根据调整量对铰链的安装位置进行调整,就可以一次性实现车门的装调。实验结果表明:该方法保证车门与车身有良好的外形匹配效果;可以有效地加快汽车车门的装调准确度和生产效率。

关键词:白车身;汽车装配;匹配优化;落销

中图分类号 U463.83 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0068-05

Mounting Method of Car Door on Panel with Optimized Match and Determination of Hinge Connecting

LI Shenxing¹, WANG Zhiguo¹, LI Lei², CHEN Tao², ZHANG Tao², WU Haijiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shanghai Yirui Automobile Technology Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

Abstract: To overcome the difficulty in assembling and adjusting car parts, four doors in particular in quality control of car body in white, scanned point cloud data are applied to build a virtual model, and a door adjustment method possessing matching optimization and ensuring hinge connecting is proposed. The hinge is positioned according to the calculated adjustment values to achieve the door installation at one time. The experiment results show that the proposed method can guarantee good shape matching for car door and body and effectively improve the accuracy and efficiency of car door assembly and adjustment.

Keywords: car in white; car assembly; matching optimization; hinge connecting

0 引言

汽车零件之间的外形匹配质量越来越受到重视^[1],外形匹配质量不但取决于各个零部件本身的制造质量,更取决于装配后相邻零部件之间的匹配情况。因此,对车身后覆盖件进行实车搭建与匹配偏差分析是白车身质量控制中的一项重要工作。搭建过程中各零部件的装调特别是四门的装调难度很大,车门通过铰链与侧围相连接,因此既要使得门与侧围间的匹配质量最优,还需要保证铰链的落销,然而两者往往难以同时满足。若是优先保证门与侧围之间的外形匹配质量,可能导致门铰链与侧围铰链无法同轴;若是优先保证铰链的同轴度,将可能导致门和车身之间的外形匹配质量差,即面差、间隙等超差。汽车行业常常用榔头或铝棒敲打的方式对铰链进行调整,进而带动门的位置变动,最终使安装后的门和车身有良好外形匹配结果。此过程中需要对铰链和车门进行反复安装、拆卸,存在生产效率低、装配周期长、难以调整到最佳位置、过于依赖工程经验等缺点。

随着三维数字化测量技术的发展,用扫描设备获取零件的点云数据,在计算机上进行虚拟环境搭建,能大大缩短产品的研发周期、降低生产成本。虚拟环境搭建中的一项关键技术是如何对相邻零件的点云数据进行匹配优化,

学者们对此进行了大量研究。通常,匹配优化的目标是使给定关键点处的匹配偏差最小,例如,文献[2]通过提出的关键点测量值提取方法,实现了基于各单个汽车零件测量数据的零件匹配及虚拟外匹配样架(aussenmeisterbock,AMB)搭建。针对汽车外形,一种观点认为匹配偏差的均匀性更影响质量,因此,文献[3-5]采用Hausdorff距离为优化函数来达到偏差的均匀性。文献[3]对点集间的Hausdorff距离进行优化,获得了更好的间隙匹配质量;文献[4]则通过对边缘轮廓线进行B样条曲线拟合和曲率Hausdorff距离进行匹配优化;文献[5]以高斯映射和数理统计为基础,并考量采样点夹角的均匀性实现匹配优化。

本文针对实车搭建中的车门与侧围的装调,提出一种同时保证铰链落销与匹配优化的车门装调方法。首先获取车门和侧围的点云数据,然后以关键点以及关键特征的偏差最小化为目标进行匹配优化,获得匹配优化后车门的虚拟搭建;然后就可以将计算的铰链调整量应用到实车搭建中,即在工装阶段对各个铰链进行调整并固定,车门铰链依靠销的自定位就可以挂进侧围铰链孔中,直接完成安装。本文方法免去繁琐的敲打铰链的调整步骤,既能够保证车门和车身有最优的外形匹配结果,又能保证安装后的铰链同轴度合格。

1 匹配优化

在优化目标上,已有的匹配优化方法或以关键点匹配偏差最小化为目标(文献[2]),或以关键点的偏差均匀化为目标(文献[3-5]),其中匹配偏差是指面差与间隙。本文与文献[2]类似,采用偏差最小化为优化目标。

为实现优化目标,需要对面差与间隙的匹配优化进行数学表示,可借鉴迭代最近点方法^[6]中的源点到目标点的距离优化方法。文献[2]中,源点是测量数据,目标点是自身理论模型上的最近点,也就是说采取的是各个零件测量数据到自身理论模型的最佳配准。本文则直接对两组测量数据进行匹配优化,其中一组测量数据上关键点为源点,匹配目标点则需要根据另一组测量数据计算出。另外,本文还给出了筋线匹配优化的数学表示。

1.1 面差及间隙的匹配目标点计算

在进行零件匹配时,通常只调整优化其中一个零件的位置,另一个零件则固定不动。这里,调整优化的零件称为匹配零件,记为 A,固定不动的零件称为参考零件,记为 B。对零件 A 与 B 之间面差与间隙的计算,本文采用类似文献[7-8]的从测量截面处提取关键点的方法。如图 1 展示了车后门(零件 A)与侧围(零件 B)匹配时某一个位置的测量截面及其局部放大图。在截面内定义两个方向:一是零件的外表面法矢量,图 1(b)中的 n_1 ,用于计算面差;另一个是与 n_1 垂直的方向 n_2 ,用于计算间隙。

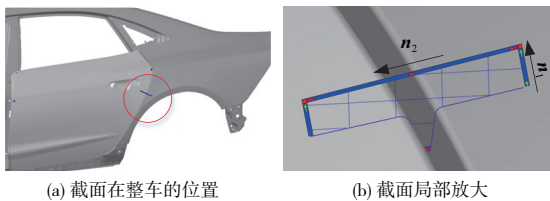


图 1 面差与间隙的测量截面

测量截面与零件 A、零件 B 的测量数据与理论模型分别相交后,会得到如图 2 所示的 4 条截面线,其中实线为测量数据截面线,虚线为理论模型截面线。通常,零件在匹配处的截面线设计为由直线-圆弧-直线组成的 3 段,在截面线上定义外表面处直线段与圆弧段的切点 a_1 、 b_1 为计算面差的关键点,在圆弧段上最接近对方零件的点 a_2 、 b_2 为计算间隙的关键点。

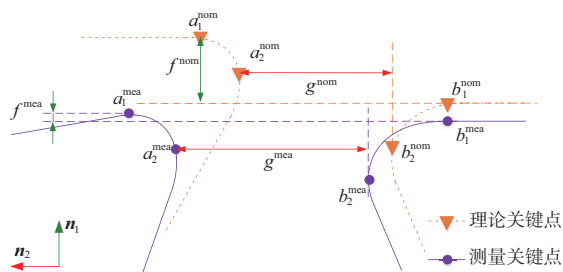


图 2 截面线与面差间隙关键控制点

因此,面差、间隙的理论值(分别记为 f^{nom} 、 g^{nom})可以用下式计算:

$$f^{\text{nom}} = (a_1^{\text{nom}} - b_1^{\text{nom}}) \times n_1 \quad (1)$$

$$g^{\text{nom}} = (a_2^{\text{nom}} - b_2^{\text{nom}}) \times n_2 \quad (2)$$

测量值计算方法与式(1)和式(2)类似。

对零件 A 与零件 B 进行匹配优化时,需要以面差与间隙的理论值为参考,计算零件 A 上测量值点的匹配目标点。

将图 2 中的测量数据截面线单独绘制,如图 3 所示。 a_1^{mea} 的面差匹配目标点 a_1^{mat} 位于点 b_1^{mea} 沿着 n_1 方向相距 f^{nom} 的直线上; a_2^{mea} 的间隙匹配目标点 a_2^{mat} 位于点 b_2^{mea} 沿着 n_2 方向相距 g^{nom} 的直线上。图 3 中点划线表示匹配目标截面线。

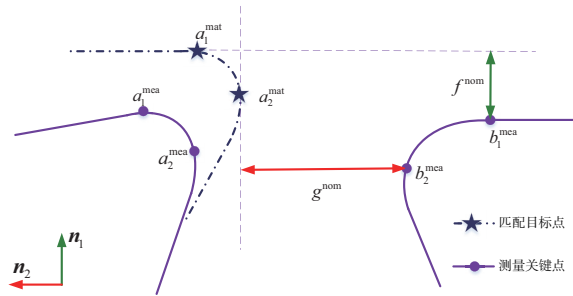


图 3 面差与间隙的匹配值计算

匹配目标点坐标可用下式计算:

$$a_1^{\text{mat}} = b_1^{\text{mea}} + a_1^{\text{nom}} - b_1^{\text{nom}} \quad (3)$$

$$a_2^{\text{mat}} = b_2^{\text{mea}} + a_2^{\text{nom}} - b_2^{\text{nom}} \quad (4)$$

此时有:

$$(a_1^{\text{mat}} - b_1^{\text{mea}}) \times n_1 = f^{\text{nom}} \quad (5)$$

$$(a_2^{\text{mat}} - b_2^{\text{mea}}) \times n_2 = g^{\text{nom}} \quad (6)$$

以测量关键点为源点,与各自的匹配目标点用迭代最近点算法进行配准,即可对零件 A 作位置优化。

1.2 筋线特征的匹配优化数学表示

对筋线的优化应以平齐为目标,以零件 B 上的筋线为参考,优化零件 A 的位置,以保证匹配位置筋线平齐。

如图 4 所示,在两个零件匹配边缘轮廓附近的筋线特征处,作 4 个与筋线方向垂直的截面。根据实验结果,靠近边缘轮廓的截面距离边缘设为 5 mm~50 mm,同一零件上的两个截面间距设为 20 mm。

与面差及间隙的截面线类似,图 4 中虚线段表示理论模型上的截面线,实线段表示测量数据的截面线。关键点的选择以每个轮廓圆弧段上的最高点作为筋线的关键点。

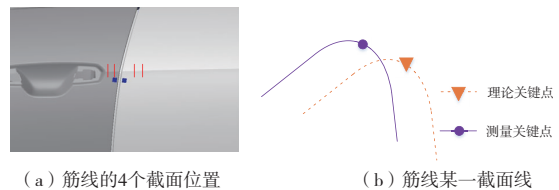


图 4 筋线截面位置及关键点位置

如图 5 所示,关键点记作 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 ,其中 a_1^{nom} 、

a_1^{mea} 表示零件 A 上靠近边缘轮廓处截面上关键点的理论值和测量值,其他截面处关键点的理论值和测量值有着类似的符号表示,优化目标是使 4 个测量点共线。

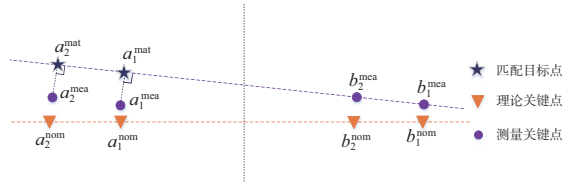


图 5 筋线关键点匹配值计算

在零件 B 上作一条经过关键测量点 b_1^{mea} 和 b_2^{mea} 的直线。从零件 A 上的关键测量点 a_1^{mea} 、 a_2^{mea} 作到直线的垂线,垂足 a_1^{mat} 、 a_2^{mat} 即为对应点的匹配目标点。

1.3 匹配优化方程建立

获得面差、间隙和筋线的匹配目标点后,就可建立匹配优化方程,求源点到匹配目标点的旋转平移矩阵。

实际车门装调时,面差除了要接近理论值外,还应满足“正高”要求(即 C 柱位置后门高于车身、B 柱位置前门高于后门)。因此,匹配零件上面差关键点的测量值除了要尽可能接近匹配目标点,在法矢方向上还应高于参考零件上的控制点。本文对原有带法矢方向的 ICP 算法^[9]基础上进行改进,在原有目标函数中添加公差要求作为约束条件,实现对“倒高”的控制。综上,可建立如下带约束条件的优化方程:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i \times [(\mathbf{R}a_i^{mea} + \mathbf{T} - a_i^{mat}) \times \mathbf{n}_i]^2 \\ \text{s.t. } & - [(\mathbf{R}a_i^{mea} + \mathbf{T} - a_i^{mat}) \times \mathbf{n}_i] + \varepsilon_l \leq 0 \quad (7) \\ & \text{s.t. } [(\mathbf{R}a_i^{mea} + \mathbf{T} - a_i^{mat}) \times \mathbf{n}_i] - \varepsilon_u \leq 0 \end{aligned}$$

式中: \mathbf{R} 为配准的旋转矩阵; \mathbf{T} 为平移矩阵; a_i^{mea} 为关键测量点; a_i^{mat} 为匹配目标点; \mathbf{n}_i 为法矢方向; w_i 为权值; ε_l 为下公差; ε_u 为上公差; m 为点对个数。方程求解可参考文献^[10]的 BFGS 法。

2 铰链调整

在门匹配优化前,门铰链已经通过定位工装初步安装到门上,车身铰链也初步安装到车身上。门经过匹配优化作了位置变换后,门上铰链也会跟随门作同样的位置变换;而车身固定不动,车身上铰链未作这样的位置变换。因此需要调整铰链位置,以保证铰链成功落销。

2.1 铰链关键控制圆定义

在将门安装在侧围上时,通常需要上、下两对铰链,即共有 4 个铰链。每一对铰链根据其安装位置又分为门铰链和车身铰链,铰链在其安装平面内有可调方向,可调整量为 2 mm 左右。

定义铰链的关键控制圆特征,提取关键控制圆的圆心坐标来计算两对铰链的同轴度。图 6 显示了一对铰链的剖面示意图,一对铰链对有 4 个关键控制圆特征。

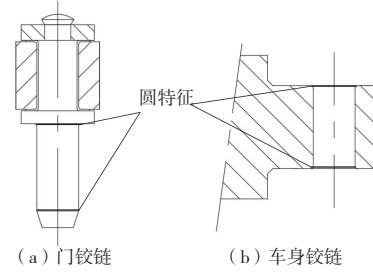


图 6 铰链特征位置剖面示意图

2.2 铰链迭代调整方法

对铰链的调整采用先旋转后平移、先调整单个铰链后调整一对铰链、迭代调整的策略。具体步骤为:

- 1) 先用铰链关键控制圆圆心拟合直线,将该直线作为铰链的中轴线;
- 2) 将该中轴线以及某一个铰链(设为铰链 A1)的关键控制圆圆心投影到该铰链的安装平面上;
- 3) 计算铰链 A1 在安装平面上的旋转角,旋转调整铰链,使铰链上两个特征点在投影面上与拟合的轴线平行;
- 4) 计算铰链 A1 在安装平面上非轴线方向的平移调整量,平移调整该铰链;
- 5) 与铰链 A1 成一对的铰链(设为铰链 A2),也按照步骤 2) 到步骤 4) 的方法进行调整;
- 6) 计算铰链 A1 和 A2 轴线方向的间隙,在轴线方向上平移调整铰链,使两铰链的上端特征点重合;
- 7) 调整后记录本次调整的调整量,求铰链的同轴度;若是同轴度超差,则重复步骤 1) 至步骤 6),直至铰链同轴度合格或某一方向上达到最大允许调整量。

以某一对铰链的调整为例,详细叙述该调整方法。为方便描述,不妨设铰链的轴线方向与其中一个坐标系方向相同(这里设为 z 向),门铰链的安装平面为 xOz ,车身铰链的安装平面为 yOz 。铰链在安装平面上可以有一个微小的旋转调整量,门铰链可旋转平面为 xOz ,车身铰链可旋转平面为 yOz 。门铰链的平移可调方向设为 x ,车身铰链的平移可调方向为 y 和 z 。铰链中心轴线方向的实际位置可能不是完全严格的 z 向,但经实际验证用 z 向替代得到的调整结果偏差极小。

设两对铰链所有的关键控制圆圆心拟合得到的直线为 l 。在安装平面上可以有一个微小的旋转调整量,门铰链的平移可调方向设为 x ,车身铰链的平移可调方向为 y 和 z 。

设车身铰链上两圆心分别为点 c_1 和点 c_2 ,设门铰链上两圆心分别为点 c_3 和点 c_4 。圆中心点初始位置记为 c_i^{org} ,经步骤 3) 旋转调整后为 c_i^{rot} ,经步骤 4) 平移调整后为 c_i^{tra} 。

步骤 1) 中的直线可由最小二乘法拟合。

步骤 2) 车身铰链在安装平面的投影如图 7 所示,其初始位置记为:

$$\mathbf{c}_1^{org} = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{c}_2^{org} = [x_2 \quad y_2 \quad z_2]^T \quad (9)$$

将轴线与圆心点投影到 yO_z 平面上,再计算圆心到中心轴线 l 的距离 d_1, d_2 ,两圆心在中心轴线方向上的距离为

$$h_z = z_1 - z_2 \quad (10)$$

步骤3) 旋转调整时以 c_1^{org} 和点 c_2^{org} 的中点为旋转中心,可计算得旋转角

$$\theta_x = \arctan \frac{d_2 - d_1}{h_z} = \arctan \frac{d_2 - d_1}{z_1 - z_2} \quad (11)$$

步骤4) 调整非轴线距离,旋转调整后两圆心的位置记为点 c_1^{tra} 和点 c_2^{tra} (如图7所示的实心圆圈),此时两圆心至中心轴线的距离相等,均为 d_3 ,只需要将铰链在 y 负方向上移动 d_3 距离即可。

步骤5) 对另一个铰链也按照上述方法调整。

步骤6) 调整铰链的轴向间隙,如图8所示。 c_1^{tra} 和 c_2^{tra} 为门铰链上的两个圆特征, c_3^{tra} 和 c_4^{tra} 为门铰链上的两个圆特征,两个铰链轴向间隙即为 c_1^{tra} 和 c_3^{tra} 在 z 向的距离,记为 d_z 。一对铰链装配完成时,它们的上端面完全贴合在一起,所以 c_1^{tra} 和 c_3^{tra} 应完全重合,因此铰链的轴向调整量即为 d_z 。

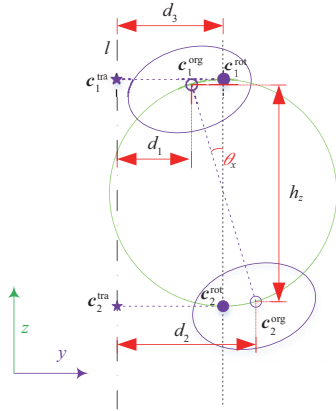


图7 铰链初始调整示意图

步骤7) 记录调整量,初次调整状态下铰链的旋转调整的旋转中心 $c_{1,2} = (c_1 + c_2)/2$,旋转角和平移调整量分别为: $\theta = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$, $d = [d_x \ d_y \ d_z]^T$ 。由于每个铰链旋转的旋转中心是两个圆心的中点,实际操作时难以调整,所以将一个铰链的旋转调整量转化为两个圆心点平移调整量。铰链轴向调整示意图如图8所示。

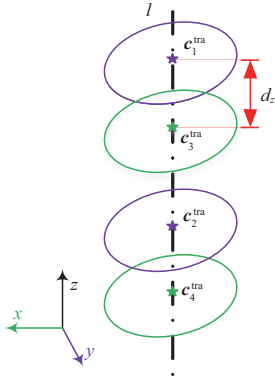


图8 铰链轴向调整示意图

对车身铰链,旋转角 $\theta = [\theta_x \ 0 \ 0]^T$,平移调整量 $d = [0 \ d_y \ 0]^T$,将旋转角转化后得到上下两圆心点的总调整量:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{h_z \tan \theta_x}{2} & \frac{h_z}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_x} - 1 \right) \end{bmatrix}^T + [0 \ d_y \ 0]^T \quad (12)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{h_z \tan \theta_x}{2} & -\frac{h_z}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_x} - 1 \right) \end{bmatrix}^T + [0 \ d_y \ 0]^T \quad (13)$$

对门铰链,旋转角 $\theta = (0 \ \theta_y \ 0)^T$,平移调整量 $d = [d_x \ 0 \ 0]^T$,将旋转角转化后得到上下两圆心点的总调整量:

$$D_3 = \begin{bmatrix} \frac{h_z \tan \theta_y}{2} & 0 & \frac{h_z}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_y} - 1 \right) \end{bmatrix}^T + [d_x \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} -\frac{h_z \tan \theta_y}{2} & 0 & -\frac{h_z}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_y} - 1 \right) \end{bmatrix}^T + [d_x \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

铰链调整完成后计算两对铰链的同轴度,分别计算圆心到中心轴线的距离,将距离最大值作为同轴度值。若是算得同轴度值大于阈值,则重复上述的调整步骤,拟合新的轴线,计算新的调整量。将每次的调整量叠加,直到最终同轴度达到要求或可调整量达到阈值。

3 实例验证

以左前、后门进行了实例验证,具体的步骤包括:1) 数据准备和RPS置零对齐;2) 门匹配关键特征创建;3) 门位置匹配优化;4) 铰链关键控制圆选取和铰链调整;5) 实车验证。

步骤1): 用FARO手持式扫描仪获得测量数据,将测量数据与理论模型进行RPS置零对齐,在每个RPS点的控制方向上使得测量数据与理论模型的偏差为0。

步骤2): 对左后门添加关键约束,重点考虑车门与车身处的面差和间隙偏差,兼顾筋线和内间隙。由于车门不允许“倒高”,所以面差约束的公差为 $^{+1}$,其余约束公差为 $^{+0.5}$ 。如图9所示为后门关键约束的位置。

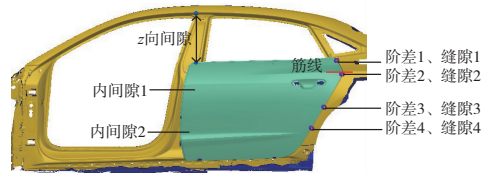


图9 左后门匹配优化时的约束位置

步骤3): 对左后门进行优化。各个约束的理论值及优化前后的测量值和偏差数据如表1所示。经过匹配优化后,后门和车身之间的外形匹配质量明显变好。

步骤4): 对铰链进行调整,铰链调整前同轴偏差0.415 mm,调整后已接近0。

步骤5):用实车进行装调实验,在门和车身上测量面差和间隙,实际测量的结果与虚拟环境中对测量数据的计算结果相比,偏差在 ± 0.25 mm以内,能够满足工程应用。

表1 左后门匹配约束数值 单位:mm

名称	理论值	优化前		优化后	
		测量值	偏差	测量值	偏差
间隙1	3.5	2.726	-0.774	3.551	0.051
间隙2	3.6	3.226	-0.374	3.572	-0.028
间隙3	3.7	3.486	-0.214	3.869	0.169
间隙4	3.7	3.221	-0.479	3.604	-0.096
面差1	0	-0.704	-0.704	-0.021	-0.021
面差2	0	-0.286	-0.286	0.583	0.583
面差3	0	-0.921	-0.921	0.023	0.023
面差4	0	-0.393	-0.393	0.435	0.435

4 结语

本文针对汽车车门和铰链的装调繁琐问题,用扫描的点云数据建立虚拟模型,用优化算法计算车门和铰链调整量,在铰链工装阶段直接按照调整量在夹具上对铰链进行调整。本文提出了车门和铰链的调整算法,对车门建立在公差约束下的优化方程,有效避免“倒高”问题,保证车门与车身有良好的外形匹配效果;对铰链同轴问题提出在可调整方向上调整的方法,保证铰链同轴度合格。左后门和左前门的调整实例说明本方法可以有效地加快汽车车门的装调准确度和生产效率。

参考文献:

- [1] MOREY B. New metrology culture improving chrysler quality[J]. Manufacturing Engineering, 2013, 151(3):69-71.
- [2] 许铭,刘胜兰,张韬,等. 基于点云测量数据的汽车车身外形匹配质量分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3):73-76, 111.
- [3] 朱文峰,王皓,李艳萍. 线段豪斯多夫距离度量下的车身覆盖件匹配方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12):1648-1652.
- [4] WANG H, YU J Y. The non-closed parts optimal fitting method based on curvature Hausdorff distance using 3D non-contact measurement points[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(2):201-212.
- [5] 许川,吴昊,王华,等. 基于高斯映射的多误差源复杂结构匹配分析与优化[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5):840-845.
- [6] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [7] 冯国卫,张一丁,孔飞,等. 基于激光测量的汽车零件间隙面差计算方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(4):370-373.
- [8] 刘治. 基于测量数据的汽车外形匹配评价技术[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [9] LOW, KOK L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration[J]. Chapel Hill, University of North Carolina, 2004, 10(4):1-3.
- [10] LIU D C, NOCEDAL J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization[J]. Mathematical Programming, 1989, 45(1/2/3):503-528.

收稿日期:2022-03-02

(上接第43页)

参考文献:

- [1] 徐凯. 钨铜复合材料的现状与发展[J]. 中国钨业, 2010, 25(3):30-34.
- [2] 陈豫红,周尚荣,张鹏程. 钨合金板群孔特种加工技术研究[J]. 机械设计与制造, 2012(11):114-116.
- [3] 马利政. 大深径比钨孔电火花加工研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [4] ZHANG C Y, ZHANG Y J, CHEN X L, et al. Investigation of the electrochemical dissolution behavior of tungsten during electrochemical machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9/10/11/12):3575-3582.
- [5] 徐正扬,张辰翔. 基于电火花-电解复合加工方法的微小孔制造[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3):16-22.
- [6] 张彦. 微小孔电火花-电解复合加工基础研究[D]. 南京:南

京航空航天大学, 2016.

- [7] MOHD ABBAS N, SOLOMON D G, FUAD BAHARI M. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7/8):1214-1228.
- [8] LAUWERS B, KLOCKE F, KLINK A, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2014, 63(2):561-583.
- [9] 时东波. 高钨合金微小孔电火花加工工艺及穿透检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 唐健,张彦, MD Rashedul Islam, 等. 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(6):18-21.

收稿日期:2022-02-15