

线段豪斯多夫距离度量下的车身覆盖件匹配方法

朱文峰¹, 王 皓², 李艳萍¹

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 上海交通大学 车身技术中心, 上海 200030)

摘要: 引入线段豪斯多夫距离 (line segment Hausdorff distance, LHD) 作为匹配质量度量, 建立基于特征点集合的覆盖件匹配模型, 基于遗传算法快速并行搜索匹配形位变量, 确定最佳匹配调整参数. 某发动机罩匹配的实际应用表明, 该方法能有效提高车身匹配质量.

关键词: 线段集合距离; 车身门盖件; 匹配优化

中图分类号: TH 161; TG 402

文献标识码: A

Method of Auto-body Closure Panels Fitting Based on Line Segment Hausdorff Distance

ZHU Wenfeng¹, WANG Hao², LI Yanping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. BMTC, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Line segment Hausdorff distance (LHD) is used to measure the degree of matching effect to improve fitting quality and the conception of Points Hausdorff Distance fitting is developed. New panel fitting model is presented and Genetic Algorithm is used for parallel searching fitting parameters. A case study of auto-body engine hood fitting design shows that the proposed method can effectively improve fitting quality.

Key words: line segment Hausdorff distance; closure panels; best fitting

轿车白车身开口部分(门框、发动机舱、行李舱等)与相应总成部件(例如车门、引擎盖、行李箱盖等)匹配(图 1)是车身制造的重要环节. 外覆盖件和白车身通过工装夹具定位后进行焊接匹配. 由夹具所确定的匹配形位参数反映了两者空间位置关系. 它以最大平整度和最大均匀度为目标函数, 根据匹配部件几何外形设计尺寸计算获得. 不良匹配将导致诸多使用功能问题, 如密封性差、漏水和风噪声

等. 匹配精度将影响整车综合出厂质量评分, 并直接影响用户的购买决策.

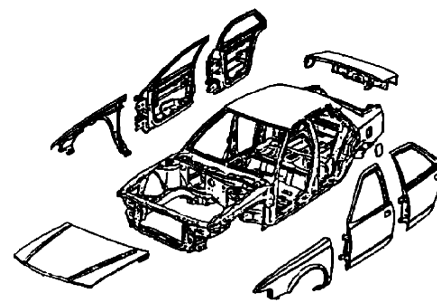


图 1 车身门盖类部件示意图

Fig.1 Panel fitting for auto-body assembly

车身匹配优化的数学本质是针对匹配部件寻找其在几何空间的最优相对位置, 使其在某一度量尺度下相似度最大, 以满足匹配质量评价指标. 在大批量生产中, 匹配部件不可避免地具有制造偏差. 不同批次、同一批次不同个体也存在外形尺寸差异. 工装夹具也会有磨损, 导致定位面、定位销外形变化, 使得依据设计尺寸所确定的匹配形位参数无法获得良好稳定的匹配效果, 导致质量和精度下降. 因此, 需要面向生产实际建立匹配模型, 研究制造偏差条件下门盖件匹配方法, 指导匹配工装根据不同批次零件的制造偏差进行优化调整, 实现在“先天”几何尺寸偏差状态下的“后天”匹配补偿.

针对 2 维闭合曲面, Z. Fainberg^[1] 基于孔轴嵌入概念建立匹配模型, 同时讨论了对于凸多边形的匹配简化方法. Shingkuo^[2] 从车身制造角度提出 3 类匹配质量评价指标. 文献[3]引入图像匹配中相关技术, 将开口件类比为模板, 门盖件类比为图像, 基于点集豪斯多夫距离 (point set Hausdorff distance) 函数判断车门与车身侧围开口的匹配质量度量.

以此为基础, 本文首先进行车身匹配质量评价,

收稿日期: 2008-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50605048); 上海市数字化汽车车身工程重点实验室开放基金资助项目(2008008); 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2008AA04Z105)

作者简介: 朱文峰(1976—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为车身先进制造技术. E-mail: zhuwenfeng@tongji.edu.cn

然后讨论匹配质量与匹配点集豪斯多夫距离(以下简称点集H距离)相关性.再次,扩展点集H距离匹配方法,引入线段豪斯多夫(lines egment hausdorff distance, LHD)距离(以下简称线段集H距离)作为匹配质量度量,将车身门盖件匹配从基于特征点的1维点集信息扩充到基于特征点的2维线段集信息.最后给出一个应用实例,对比两者的匹配效果.

1 车身匹配量化方法及模型

图2为依据生产检测现场实际确定的衡量车门匹配质量的关键控制点分布图.类似的关键控制点也分布于其他车身匹配部分.

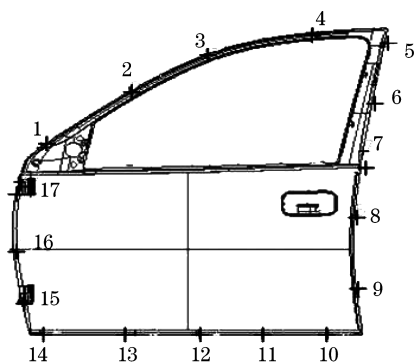


图2 车门匹配间隙均匀度的关键控制点

Fig.2 Checkpoints for door gap evenness

车身坐标系定义为:两前车轮轴中心点,此点到车尾方向为 x ,到副驾座方向为 y ,到车顶方向为 z .匹配质量指间隙均匀度和轮廓平整度.均匀度偏差(gap evenness deviation, GED)为匹配部分所有测点在匹配基本面(例如车门匹配为车身坐标 Oxz 面,发动机舱匹配为 Oxy 面)的间隙值相对于标准间隙的偏差波动,平整度偏差则指这些测点匹配基本面向(例如车门匹配为 y 向,发动机舱匹配为 z 向)距离的差值.当所有测点测量值与名义值相等时,达到理想匹配.否则,需要调整其中1个匹配部件的相对位置,最小化该偏差. GED 计算公式如下:

$$d_{ge} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{gap})^2 / n} \quad (1)$$

式中: d_{ge} 为均匀度偏差; e_i 为某对测点间隙值; e_{gap} 为该测点处的标准间隙值; n 为测点总数.

车身曲面是具有复杂外形的3维空间曲面,车身制造匹配问题的数学本质是针对2个相互匹配的具有复杂空间外形的部件,寻找并确定其在几何空间中的相对位置,从而实现匹配质量评价函数的最

优化.

为研究其轮廓线在复杂3维空间的匹配,通常将匹配空间曲面分别投影到车身坐标的 Oxy , Oxz , Oyz 平面中形成2维匹配,再按照不同投影平面对整体匹配质量的影响权重进行综合,如下式:

$$D_{fit}(A, B) = \omega_{xy} d_{xy}(A, B) + \omega_{xz} d_{xz}(A, B) + \omega_{yz} d_{yz}(A, B) \quad (2)$$

式中: D_{fit} 为整体匹配质量; d_{xy} , d_{yz} , d_{xz} 分别为各投影分量匹配质量; ω_{xy} , ω_{yz} , ω_{xz} 分别为各分量权重; A, B 分别为内外匹配测点集合

对于车身门盖件等大型覆盖件而言,由于在3个投影分量中通常只有1个具有决定作用,如车门匹配的 Oxz 平面上的分量,发动机盖匹配的 Oxy 平面上的分量.因此,车身门盖类部件的匹配可转化为只考虑其主投影分量的匹配优化.如此可以得到2维曲面匹配下的优化函数表达,如下式:

$$\begin{aligned} \min_Q \phi(d_{ge}) \\ \phi(d_{ge}) = f(x, y, \varphi) = \\ d(A_{outer}, H(x, y, \varphi) \cdot B_{inner}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_{outer} 为外覆盖件轮廓曲线; B_{inner} 内封闭件轮廓曲线; $H(x, y, \varphi)$ 表示以平移向量 (x, y) 、旋转角度 φ 构成的平面齐次坐标变换矩阵; d 表示某种距离度量下的外轮廓与内轮廓的相对位置关系.最终工程目标是最小化均匀度偏差.

2 车身匹配质量度量函数

间隙均匀度是匹配质量的直接评价指标.理论上,2条闭合平面曲线越相似,它们对应点的间隙分布越均匀.因此,提高匹配相似性成为提高匹配均匀度的可行途径.

曲线可看成由一系列特征点构成的集合,通常采用对应点间最小距离来衡量2个点集相似程度.然而,该定义有时不能有效反映2个匹配几何轮廓的实际相对位置变化^[4].文献[3]引入轮廓特征点集H距离作为相似性度量.为说明匹配轮廓点集H距离与匹配间隙均匀度的强相关性,以下计算2组正方形和同心圆分别进行旋转、平移变换时的点集H距离和间隙均匀度偏差.

图3为边长为1 mm和2 mm的两正方形匹配.内四边形均匀分布5个测点,与外四边形构成5对间隙值 e_1, e_2, \dots, e_5 .根据对称性,内四边形旋转 45° 过程中将经历所有匹配情况,计算每次的匹配均匀

度偏差和点集 H 距离, 获得匹配间隙均匀度偏差与点集 H 距离的关系, 如表 1 所示.

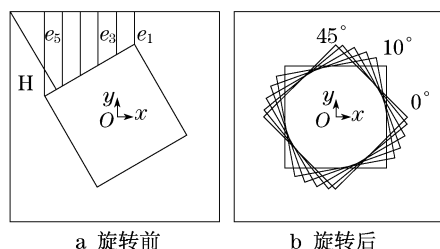


图 3 旋转变化下 H 距离与 GED 相关性

Fig.3 Correlation of H-distance and GED

表 1 旋转变换下的 H 距离与 GED 计算

Tab.1 Correlation calculation of H-distance with GED under rotation

点集 H 距离	旋转/(°)					
	0	10	20	30	40	45
$d_{ge}/\mu\text{m}$	0	3.8	15.5	35.7	65.3	83.9
H 距离/ μm	707	728	788	866	908	915

同理, 计算平移变化下 d_{ge} 与 H 距离的关系. 如图 4 所示, 内径为 1 mm、外径为 2 mm 的圆匹配. 考虑内圆在各种平移可能下两者的相关性, 获得匹配间隙均匀度偏差与点集 H 距离的关系, 如表 2 所示.

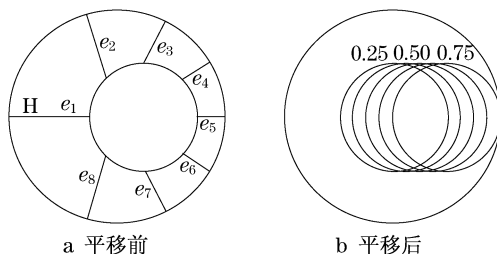


图 4 平移变换下 H 距离与 GED 相关性

Fig.4 Correlation of H-distance and GED

表 2 平移变换下的 H 距离与 GED 计算

Tab.2 Correlation calculation of H-distance with GED under translation

点集 H 距离	平移				
	0	250	500	750	1 000
d_{ge}	0	31.1	123	274	486
H 距离	1 000	1 250	1 500	1 750	2 000

计算表明: 旋转变换中, 计算得到点集 H 距离与 d_{ge} 的相关系数为 0.949 822. 平移变换下的相关系数为 0.959 548. 由此可见, d_{ge} 和点集 H 距离两者具有强线性相关. 提高匹配均匀度都对应于减小 H 距离. 因此可将最终的匹配优化目标函数从提高匹配间隙均匀度转换为极小化匹配件之间点集 H 距离.

利用 H 距离匹配精度高、响应迅速的优点, 建立基于 H 距离度量的匹配优化目标函数, 提高封闭件匹配质量和效率.

3 基于线段集合距离的匹配模型

匹配件内外轮廓曲线可离散为 2 大特征测点集合. 匹配质量反映内轮廓点集整体和外轮廓点集整体的相互位置. Chen J Y 指出: 基于点集的匹配在理论上丢失了较多的匹配轮廓几何信息^[5]. 如图 5 所示: 按照点集 H 距离判断, 平行点集 C 和垂直点集 D 的 H 距离相同, 两者具有相同的匹配质量. 但显然, C 的匹配效果好于 D.

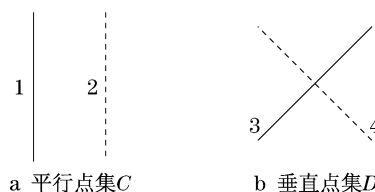


图 5 点集 H 距离匹配的奇异情况

Fig.5 Singular case for points H-distance match

若进一步在已有匹配轮廓特征点集的基础上, 点点顺次连接形成匹配线段集合, 则不仅有线段之间的距离信息, 同时还有线段之间的角度信息. 将曲线匹配抽象为直线段集合匹配, 比单纯点集 H 距离包含更多形位信息. 线段 H 距离就是在点集 H 距离基础上进行定义.

3.1 两线段 LHD 计算

任意两线段间 LHD 距离计算包含 3 个分量: 角度距离, 垂直距离和平行距离. 线段间 H 距离 LHD 计算示意如图 6 所示. 线段 a 和线段 b 成夹角 θ . 线段 a 绕其中点旋转角度 θ 后形成线段 c, 并与线段 b 平行. 线段 a 对应于式(4)及(5)中线段 m_i , 转动后得到的新线段 c 对应于式(4)及(5)中 l'_{m_i} , 线段 b 对应于式(4)及(5)中线段 n_j . 图 6 还标出 3 条线段的各自起始点坐标.

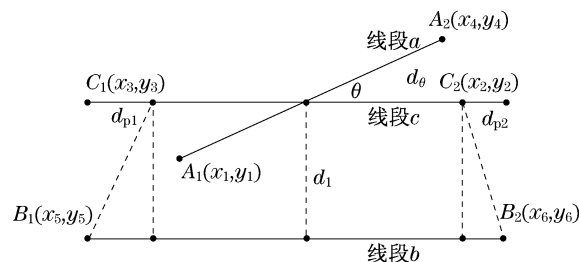


图 6 线段间 H 距离 LHD 计算示意图

Fig.6 Compute line segment Hausdorff distance

3.1.1 角度距离 $d_\theta(m_i, n_j)$

$$d_\theta(m_i, n_j) = \min(l_{m_i}, l_{n_j}) \sin(\theta(m_i, n_j)) \quad (4)$$

式中: $\theta(m_i, n_j)$ 表示 2 条直线段 (m_i, n_j) 的夹角; $\min(l_{m_i}, l_{n_j})$ 为 2 条直线段长度较小值.

3.1.2 垂直距离 $d_n(m_i, n_j)$

假设 l_{m_i} 为长度较小的线段, 转动 $\theta(m_i, n_j)$ 角度形成新线段 l'_{m_i} , 它与线段 l_{n_j} 平行. 则 2 条平行线段间距为垂直距离 $d_n(m_i, n_j)$.

3.1.3 平行距离 $d_p(m_i, n_j)$

将该新线段 l'_{m_i} 与 l_{n_j} 一端对齐所平移的距离记为 d_{p1} , 另外一端对齐所需要平移的距离记为 d_{p2} , 则平行距离为两者的较小值 $\min(d_{p1}, d_{p2})$.

3.1.4 两线段 LHD 距离

它为上述 3 个分量的均方根值, 公式如下:

$$d_{\text{LHD}}(m_i, n_j) = \sqrt{d_\theta(m_i, n_j)^2 + d_n(m_i, n_j)^2 + d_p(m_i, n_j)^2} \quad (5)$$

3.2 线段集合间 LHD 计算

假设外轮廓特征测点集顺次连接, 围成由 m 条线段构成的线段集合 A ; 内轮廓特征测点集顺次连接, 围成由 n 条线段构成的线段集合 B . 这两线段集合的线段 LHD 距离定义如下:

$$d_{\text{LHD}}(A, B) = \max(d_{\text{DLHD}}(A, B), d_{\text{DLHD}}(B, A)) \quad (6)$$

式中: $d_{\text{DLHD}}(A, B)$ 表示从集合 A 到集合 B 的有向 LHD (directed line segmented hausdorff distance, DLHD). 它的计算是以上述任意 2 个线段间 LHD 为基础, 遍历集合 A 中 m 条线段和集合 B 中 n 条线段

$$d_{\text{DLHD}}(A, B) = \max(\min(d_{\text{LHD}}(m_i, m_j)), i \in A, i = 1, 2, 3, \dots, m, j \in B, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

3.3 线段集合 LHD 下的匹配模型

生产实际中, 车身开口件的特征测点集构成线段集合 A , 与之匹配的门盖类封闭件的特征测点集构成线段集合 B .

进入匹配工装时, 假设集合 A 的位置固定, 匹配优化问题转化为确定线段集合 B 的平移、旋转坐标变换 $f(x, y, \varphi)$, 使得变换后的新位置 $H(x, y, \varphi) \cdot B_{\text{inner}}$ 与集合 A 之间的线段 LHD 距离最小, 即

$$\min f(x, y, \varphi) = \min(d_{\text{LHD}}(A_{\text{outer}}, H(x, y, \varphi) \cdot B_{\text{inner}})) \quad (8)$$

4 匹配案例研究

白车身装配后形成 8 大开口部分, 其中发动机舱面积大, 客户关注度高, 因此对匹配尺寸精度要求高. 外轮廓曲线由左右前翼子板、左右大灯、进气格栅等部件轮廓组成. 参与该部分匹配零部件较多. 而内轮廓曲线较为单一, 仅仅由发动机罩板轮廓组成. 因此, 在实际车身匹配中, 通常调整发动机罩匹配形位参数来实现该匹配部分间隙均匀与平整.

根据匹配过程中“稳定外轮廓, 调整内轮廓”的原则, 假设匹配外轮廓没有制造偏差, 而不同批次或者不同供应商提供的发动机盖轮廓存在制造偏差, 要求重新确定匹配形位参数, 为工装夹具调整提供科学依据.

如图 7 所示, 发动机盖为大尺寸覆盖件. 由于曲面轮廓线在高度方向变化不大, 可以简化为平面曲边六边形, 应用 2 维曲面匹配下的优化函数表达来计算匹配形位参数.

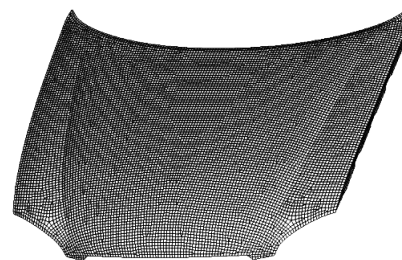
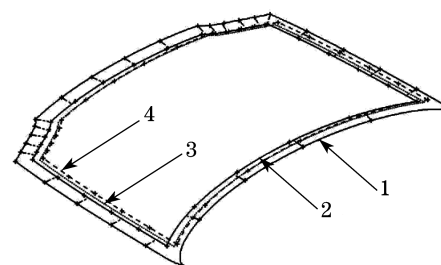


图 7 发动机盖匹配的内轮廓曲面

Fig.7 Inner profile of engine hood panel match

为使特征点能代表匹配的内外轮廓曲线, 在内外六边形轮廓线的每边上分别均匀分布 6 个特征测点, 如此构成 2 大特征测点集合.

如图 8 所示. 分别应用改进前和改进后的 Hausdorff 距离作为匹配度量, 基于遗传算法实现匹



1—发动机舱匹配的外轮廓曲线; 2—线段 LHD 度量匹配后的内轮廓; 3—点集 H 距离度量下匹配后内轮廓; 4—批次制造误差下内轮廓

图 8 点集 H 距离和线段 LHD 匹配效果比较

Fig.8 Comparison of point H distance and LHD

配形位变量的快速并行搜索,确定匹配形位参数. 相关算法参数为:遗传种群规模 30,最大迭代次数 60,交叉概率 0.85,变异概率 0.15,初始匹配变量(0,0,0).将两者对最终的匹配指标——间隙均匀度指标所产生的效果进行比较.

当采用点集 Hausdorff 距离度量时,匹配形位参数为(5.273 mm, - 2.429 mm,0.052 rad),30 特征点间隙均匀度偏差为 0.491 mm. 当采用线段 Hausdorff 距离度量时,匹配形位参数为(5.194 mm,

- 3.917 mm,0.029 rad),30 特征点间隙均匀度偏差为 0.374 mm. 相关数据见表 3.

由此可见,尽管采用的内外轮廓特征点集相同,线段 LHD 距离由于在点集 H 距离的基础上增加了角度方位信息分量,使得它能避免点集 H 距离匹配的奇异位置,更敏感地反映出匹配轮廓几何特征的变化. 以它为匹配度量函数的匹配优化过程使得最终匹配质量指数——间隙均匀度偏差相对减少了 0.117 mm,匹配质量提高 23.8%.

表 3 点集 H 距离与线段 LHD 匹配比较
Tab.3 Comparison of panel fitting using Point Set H-distance and LHD

匹配质量 度量函数	最终匹配 形位变量	匹配初始集合 距离/mm	匹配后集合 距离/mm	匹配后最大 间隙/mm	匹配后最小 间隙/mm	匹配后全测点 d_{ge} /mm
内外轮廓点集 H 距离	平移(5.273 mm, - 2.429 mm) 旋转 0.052 rad	8.475	4.392	5.278	3.107	0.491
内外轮廓线段 LHD 距离	平移(5.194 mm, - 3.917 mm) 旋转 0.029 rad	13.724	6.831	4.271	3.834	0.374

5 结语

(1) 线段 Hausdorff 距离通过增加角度方位信息分量,比点集 Hausdorff 距离更敏感地反映出匹配轮廓几何特征的变化.

(2) 基于线段距离度量的匹配优化过程更有效地提高最终匹配质量,实现在制造偏差或者生产波动下确定匹配形位参数和优化调整.

参考文献:

[1] Fainberg Z,Zussman E. Even fitting closed curves:2D algorithm and assembly application[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME,1999,121(2) :265.
[2] WU Shingkuo, HU Jack, WU S M. Optimal door fitting with

systematic fixture adjustment[J]. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems,1994,6(2) :99.
[3] 朱文峰,来新民,王皓,等. 计入焊接热效应影响的车身封闭件匹配优化方法研究[J]. 机械工程学报,2005,41(11) :80.
ZHU Wenfeng,LAI Xinmin,WANG Hao,et al. Optimal method of autobody closure panels fitting combining influence of welding thermal effects[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(11) :80.
[4] Rucklidge W. Efficient visual recognition using the Hausdorff distance[M]. Berlin:Springer-Verlag,1996.
[5] CHEN Jinying, Leung M K. Noisy logo recognition using line segment Hausdorff distance[J]. Pattern Recognition, 2003, 36 (4) :943.
[6] 林忠钦,连军,倪军,等. 基于小样本的车身装配尺寸质量动态高精度评价方法[J]. 机械工程学报,2001,37(11) :62.
LIN Zhongqin,LIAN Jun,NI Jun,et al. High precision evaluation of the autobody assembly quality based on small sample size[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2001,37(11) :62.