

基于位姿在线反馈调整的大型法兰对装^{*}

侯增选,杨修伟[†],黄磊,徐军

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为解决工业结构中大型法兰对接装配存在的低精度、低效率等问题,提出一种基于姿态矢量及LD-PSD在线反馈的对装方法.首先,以关节臂测量机获取标定块测量点的实际坐标值,与理论坐标值对比形成拟合误差矩阵,以该矩阵2范数最小为优化目标,利用奇异值分解法(SVD)建立全局坐标系与测量坐标系映射关系,并获取全局坐标系下待装配件若干点空间坐标,结合最小二乘法及随机霍夫变换(RHT)建立待装配体当前位姿数学模型.设计六自由度位姿调整装置,以静法兰为目标位姿,依据关键姿态矢量信息解算动法兰位姿调整参量,实现位姿预调整.LD-PSD在线反馈系统检测并反馈装配质量评价指标,规划微转动及微平动路径,对静法兰位姿多次纠偏以满足对接装配精度.试验结果表明:装配过程高效,装配精度高,能够实现法兰连接结构的精确对装.设计的LD-PSD在线反馈系统可实现位姿的调整、检测、反馈再调整的闭环装配操作.

关键词:关节臂测量机;关键姿态矢量;LD-PSD;奇异值分解法;最小二乘法;随机霍夫变换

中图分类号:TP23

文献标志码:A

Assemblage of Large Flange Based on Attituded Vector and Position Online Feedback

HOU Zengxuan, YANG Xiuwei[†], HUANG Lei, XU Jun

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to solve the problems of low precision and low efficiency in the assemblage of large flange, a new method was considered on the basis of the key attitude vector and LD-PSD online feedback for the assemblage of large flange. Firstly, joint arm measuring machine was used to measure the actual coordinates of calibration block, which was compared with the theoretical values to build fitting error matrix. Taking the least 2-norm of the error matrix as optimization objective, a mapping relation between the global coordinate system and measuring coordinate system with SVD was then established. Secondly, the space coordinates of several points in the parts to be assembled under global coordinate system, and the mathematical model of the current position of the parts by the combination of the least square and RHT the key attitude vector information for the position and attitude adjustment parameters of tail nozzle were calculated. Lastly, the LD-PSD online correction system detected and feedbacked the quality evaluation index

* 收稿日期:2016-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775185), National Natural Science Foundation of China(50775185)

作者简介:侯增选(1964-),男,陕西岐山人,大连理工大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yxwdlut@126.com

of the assembly to plan the micro motion and rotation path and adjust nozzle position in order to satisfy the assembly accuracy. According to the results of experiment, the assemble process through the proposed method is stable and efficient, the assemble precision is high, and the precise assemble of nozzle and combustion chamber is realized. LD-PSD system can realize a closed-loop operation of tail nozzle, such as adjustment, detection, feedback, and readjustment.

Key words: joint arm measuring machine; key attitude vector; LD-PSD; singular value decomposition method; least square method; random Hough transform

法兰对接结构具有构造简单、可操作性好等特点,因此在工业结构中应用广泛.典型应用如航天器间的对接、航天运载结构级间分离面的对接、火箭发动机燃烧室与尾喷管的装配、石油化工设备中密闭管道的连接、风力发电机主轴结构、飞机导管的螺栓法兰连接以及核反应堆冷却泵转子组件的轴向连接等等.以航天结构为例,美国航空喷气公司的统计数据显示,20世纪60年代,与对接结构相关的故障占14.9%,国内1969至1984年7种型号固体火箭发动机的50次实验中,有18%的故障由对接结构及密封问题引起,由此可知,法兰对接结构是很多工业结构失效的主要原因之一.因此,提高工业结构的法兰对接装配质量及效率,以提高工业结构的安全性能是值得研究的关键问题.针对大型法兰等大部件的自动对接问题,国内外已做了很多研究,且取得很大进展.先后基于光学原理发展了多种大部件位姿测量方法,如激光跟踪仪,柔性关节臂测量机、激光雷达、室内GPS^[1]等,为大部件对接装配提供了关键测量手段.目前,位姿计算主要采用的方法有三点法、四元数法、最小二乘法、ICP算法、奇异值分解法、正交迭代算法^[2]等.李钦杰提出一种基于激光视觉传感的飞机导管自动装配方法,搭建自动化装配平台,利用激光条纹特征计算偏差,并规划位姿调整路径实现导管间法兰的对接^[3];马政伟等设计了一种柔性工装机构,该机构基于精密三坐标定位器对侧壁部件进行装配调姿,实现了大型飞机侧壁部件的数字化装配^[4];西安航天化学动力厂针对薄壁开口燃烧室部件间的对接装配问题,提出变形识别与安全校正的方法解决了薄壁件因变形导致对装误差大的问题^[5].此外,针对其它大部件的对接装配,美国波音飞机制造公司构建了一套基于IGPS的辅助装配系统,提高了飞机、航天器、轮船等典型大部件的装配/对接精度及效率^[6];宋彰桓等针对IGPS在飞机对接中的多点实时测量问题,提出了一套基

于测量关键特性的IGPS测量点选取方法,改变了依赖经验选取的传统方法,提高了部件对接质量^[7];朱永国等针对飞机中机身的自动对接装配问题,设计一种新型的冗余驱动中机身自动调姿机构,同时提出基于理想驱动力的中机身多项式轨迹规划方法^[8];罗芳等针对飞机大部件自动对接装配问题,对装配运动路径进行规划,并分析装配误差,提出相应补偿方法,有效提高对接精度^[9];易旺民等提出了一种基于6-SPS并联机构的自动化大型舱段对接装配技术,将位姿控制与力随动控制技术相结合,实现了大型舱段的精确对接并兼顾小变形要求^[10];Williams等研制了基于激光跟踪仪、定位器和控制系统相组合的大部件位姿调整系统,替代了传统人工对接平台^[11];德国Brtje公司研制了一套自动化装配系统,该系统主要包括数控定位器、激光跟踪仪、控制系统等,用于精确调整和定位飞机机身以实现最佳质量的对接和装配^[12],以上国内外大部件对接装配方法为本文方法提供了有效参考.

现阶段,针对大型法兰对接装配的研究中,所用的装配方法都是基于一次测量即计算位姿调整量,不能剔除位姿计算误差及位姿调整传动误差影响,不能形成位姿调整闭环控制,从而限制了装配精度提高.基于关键姿态矢量信息及LD-PSD在线反馈的法兰对接装配方法,能够对法兰位姿实时检测并反馈,形成位姿调整闭环控制,消除位姿计算误差及位姿调整传动误差影响,有效提高法兰对接精度及效率.

1 装配系统组成

1.1 硬件系统设计

装配系统总体结构如图1所示.位姿调整机构是位姿调整的执行端,分为位置与姿态调整两部分.位置调整部分包括 X, Y, Z 方向直线运动单元,姿

态调整部分包括俯仰部分、绕动轴转动部分及动法兰 U 型基座的自转部分. 调整姿态时, 俯仰机构搭载动轴旋转机构及动法兰 U 型基座一起绕固定轴实现俯仰旋转; 动轴旋转机构搭载 U 型基座实现绕动轴旋转; 最后, U 型基座可搭载法兰实现绕法兰自身轴线的旋转.

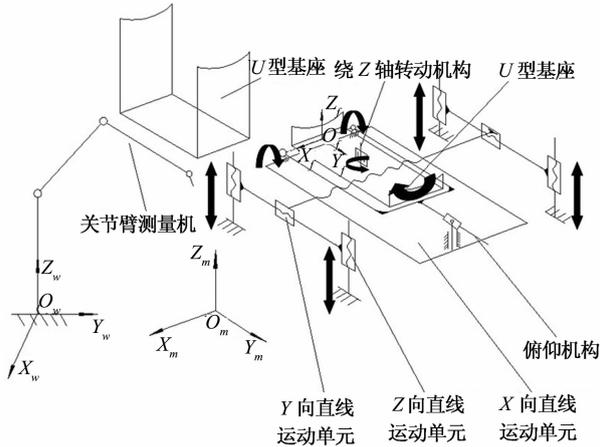


图 1 装配系统总体结构
Fig. 1 Overall structure of assembly system

为实现位姿调整闭环控制, 设计 LD-PSD 在线反馈系统, 该系统主要由激光二极管 LD、枕形高灵敏度光电位置传感器 PSD、加装凸透镜的 PSD 和 ARM 单片机等组成. 通过 LD 直接照射或凸透镜聚焦在 PSD 光敏面形成光斑, 处理电路自动输出光斑在 PSD 接收板的坐标 (X, Y) [13], 进一步处理便得到光斑与 PSD 板中心点的距离.

设计 LD-PSD 的安装基座以保证 LD 的激光发射线和 PSD 中心线分别和所在螺栓孔轴线重合, 安装基座直径与对应螺栓孔直径满足紧密配合关系, 以模拟螺栓与螺栓孔配合情况. 通过卡槽定位, 螺栓锁紧, 实现 LD 与 PSD 在安装基座的固定, 并分别从非装配面装入待装配法兰螺栓孔内. 得到光斑坐标后, 实时反馈回 PC 机供程序处理, LD-PSD 在线检测系统测量原理如图 2 所示.

为实现各部件的协调有序工作, 构建测量与运动控制通信系统, 如图 3 所示. 运动控制卡用于协调各伺服电机运动, 控制伺服电机的位置和运动方向实现姿态调整及位置移动; ARM 单片机, 控制光电位置传感器采集信息并控制测量过程; PC 机实现数据的分析处理、显示、信息存储等功能, 包括关节臂测量机获取的点坐标的存储与显示.

1.2 软件系统设计

软件系统采用模块化设计手段, 利用 VC++

在上位机开发数据处理软件系统, 主要包括参数设置模块、数据采集模块、数据分析处理模块、装配系统仿真模块、数据实时显示模块等. 参数设置界面包括测量点数设置, 调整精度设定等基本参数; 数据采集模块, 主要是对关节臂测量机的点测数据和光电位置传感器获得的距离数据进行采集并存储; 数据分析处理模块, 求解位姿矢量信息, 解算位姿调整参量. 数据显示模块主要用作测点坐标及对接误差的实时显示, 软件系统界面如图 4 所示.

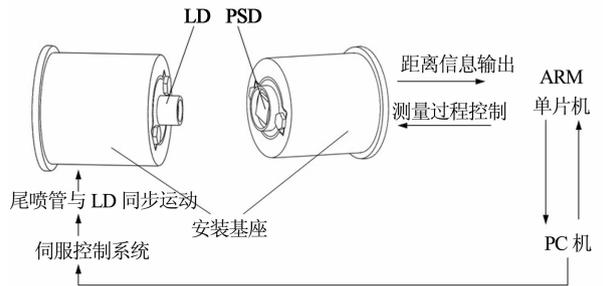


图 2 LD-PSD 测量原理
Fig. 2 LD-PSD measurement principle

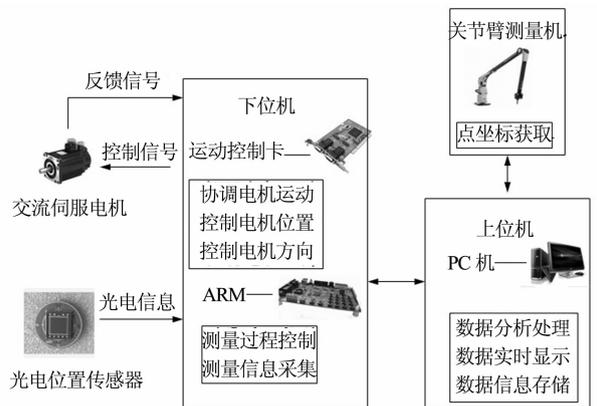


图 3 测量与运动控制通信系统
Fig. 3 Measurement and motion control communication system

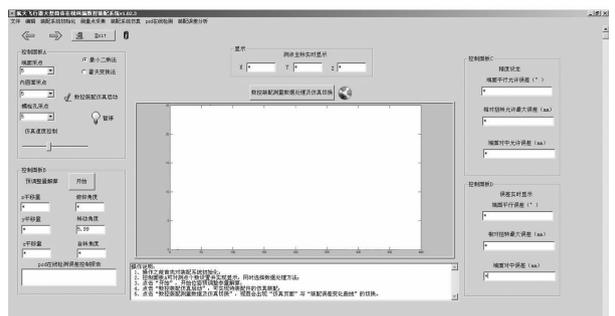


图 4 软件系统界面
Fig. 4 Software system interface

2 动法兰位姿预调整

关节臂测量机的测量坐标系为 $\{\omega:O-X_w,Y_w,Z_w\}$,全局坐标系为 $\{m:O-X_m,Y_m,Z_m\}$,且坐标系 $\{m\}$ 坐标轴与位置调整机构的直线导轨方向平行.坐标系 $\{m\}$ 与 $\{\omega\}$ 之间以 RPY (α,β,γ) 旋转矩阵 ${}^m_w\mathbf{R}$ 与位置矩阵 \mathbf{T}_w^m 表示映射关系,若 ${}^w p_i$ 与 ${}^m p_i$ 表示同一点分别在坐标系 $\{\omega\}$ 和 $\{m\}$ 的不同表示,则 ${}^w p_i = {}^m_w\mathbf{R} \cdot {}^m p_i + \mathbf{T}_w^m$.建立表征待装件姿态的二维坐标系 $\{S_i:O_i-l_i n_i, i=1,2\}$,及姿态调整机构随动坐标系 $\{f:O-X_f,Y_f,Z_f\}$,坐标系 $\{f\}$ 各坐标轴初始方向与坐标系 $\{m\}$ 相同.姿态调整机构搭载部件依次绕俯仰轴、转动轴、自转轴转动的过程,可等同于随动坐标系 $\{f\}$ 依次绕 X_f, Z_f, Y_f 轴的欧拉角转动.法兰对接装配过程如下所示:

①在坐标系 $\{\omega\}$ 下测量方形标定块的三条棱线多点坐标,建立坐标系 $\{m\}$,同时建立欧拉姿态调整机构随动坐标系 $\{f\}$;

②关节臂测量机分别测量动法兰与静法兰端面,柱面及对应螺栓孔内壁多点坐标,求解待装配件关键矢量信息,建立位姿数学模型及局部坐标系 $\{S_1:O_1-l_1 n_1\}\{S_2:O_2-l_2 n_2\}$;

③解算位姿调整机构旋转及平动调整参量,并由伺服控制系统驱动位姿调整机构实现动法兰位姿预调整;

④启动 LD-PSD 在线反馈系统, LD 发射光线经透镜聚焦在 PSD 接收板形成投影光斑,解算对接端面平面夹角误差,姿态调整机构对动法兰端面实时调整并反馈,直至消除端面平行误差;

⑤LD 发射光线直接在 PSD 接收板投影形成光斑,检测动法兰 3 个对应螺栓孔偏心距 $d_i, i=1,2,3$,并做微转动调整,直至 $d_1=d_2=d_3$,消除对应螺栓孔相对扭转误差;

⑥对动法兰位置微平动调整,并实时测量偏心距 d_i ,直至 $d_i=0$,最后沿静法兰法线方向做空间直线插补实现位置终调,实现精确对接.

2.1 建立坐标系 $\{\omega\}$ 与 $\{m\}$ 的映射关系

将坐标系 $\{m\}$ 建立于高精度方形标定块表面,并在 X', Y', Z' 轴所在棱边共取 n 点,如图 5 所示,记该坐标系下 n 点实际测量值 $P'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i), i=1,2,3,4,\dots,n$.对应坐标系 $\{\omega\}$ 下实际测量值 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$,且 ΔP_i 为点 i 对应的实际测量值与理论转换值误差,即 $P_i = {}^m_w\mathbf{R} P'_i + \mathbf{T}_w^m + \Delta P_i$,通过式

(1)求解对应的 ${}^m_w\mathbf{R}$ 与 \mathbf{T}_w^m .

$$\min \sum_{i=1}^{n=6} \|\Delta P_i\|^2 = \min \sum_{i=1}^{n=6} \|P - {}^m_w\mathbf{R} P'_i - \mathbf{T}_w^m\|^2 \quad (1)$$

计算坐标系 $\{m\}$ 与 $\{\omega\}$ 下的均值

$$\begin{cases} \bar{P}' = \sum_{i=1}^6 P'_i \\ \bar{P} = \sum_{i=1}^6 P_i \end{cases} \quad (2)$$

令 $Q'_i = P'_i - \bar{P}', Q_i = P_i - \bar{P}$,求解 $\min \sum_{i=1}^{n=6}$

$$\|\Delta P_i\|^2 = \min \sum_{i=1}^{n=6} \|P - {}^m_w\mathbf{R} P'_i - \mathbf{T}_w^m\|^2 \text{ 等同于求解 } \min \sum_{i=1}^{n=6} \|Q_i - {}^m_w\mathbf{R} Q'_i\|^2.$$

根据 SVD 法知,通过式(3)求解对应的 ${}^m_w\mathbf{R}$.令 $\mathbf{H} = \sum_{i=1}^{n=6} Q_i Q_i^T$,对 \mathbf{H} 奇异值分解:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{D} 是对角矩阵; \mathbf{V} 和 \mathbf{U} 是正交矩阵.计算矩阵 ${}^m_w\mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{U}^T$,并求此行列式的值,若为 1,则矩阵 ${}^m_w\mathbf{R}$ 就是待求姿态矩阵,若为-1,则令 $\mathbf{V}' = [V_1 \ V_2 \ -V_3]$,位姿矩阵为 ${}^m_w\mathbf{R} = \mathbf{V}' \mathbf{U}^T$,

$${}^m_w\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix}$$

其中, c 为 \cos ; s 为 \sin .

根据 $\bar{P} = {}^m_w\mathbf{R} \bar{P}' + \mathbf{T}_w^m$ 得

$$\mathbf{T}_w^m = \bar{P} - {}^m_w\mathbf{R} \bar{P}' \quad (4)$$

根据 $P = {}^m_w\mathbf{R} P'_i + \mathbf{T}_w^m$ 得

$$P'_i = ({}^m_w\mathbf{R})^{-1} P - ({}^m_w\mathbf{R})^{-1} \mathbf{T}_w^m \quad (5)$$

P 与 P'_i 分别表示同一点分别在坐标系 $\{\omega\}$ 与 $\{m\}$ 的坐标.其转换示意图如图 5 所示,以下测量点所用数据均为全局坐标系 $\{m\}$ 下的转换数据.

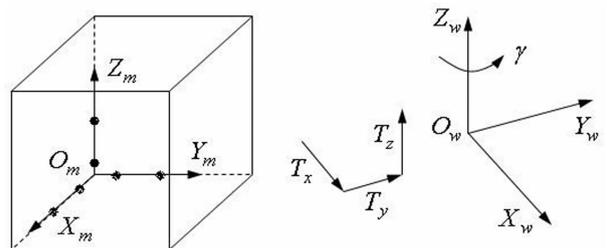


图 5 坐标系 $\{m\}$ 取点及坐标系转换示意图
Fig. 5 Point of coordinate system $\{m\}$ and ordinate transformation

2.2 待装配件当前位姿数学模型建立

实现法兰的对接装配,要求两法兰端面平行,圆心重合,且法兰周边螺栓孔按一定位置对准.分别以动法兰圆心为原点 O_1 , 圆心连线向量 l_1 , 法矢向量 n_1 , 建立表征位姿的坐标系 $\{S_1; O_1 - l_1 n_1\}$, 同理建立表征静法兰位姿的坐标系 $\{S_2; O_2 - l_2 n_2\}$, 法兰表面取点如图 6 所示.

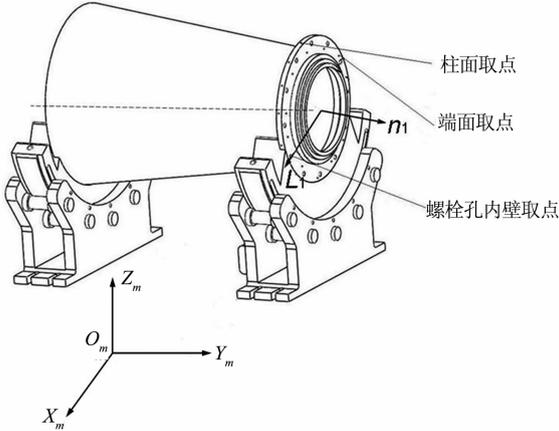


图 6 动法兰当前位姿示意图
Fig. 6 The current position and orientation of the moving flange

为减小测量设备系统误差及待装件几何误差对位姿特征向量精度造成的影响,将最小二乘法与 RHT 法^[14]相结合求解关键位姿矢量信息,抵消部分点测量误差及孤立点对位姿计算的影响,基本过程如下:

① 建立所有测量点集合 E , 并随机抽取 k 个测量点 ($4 \leq k \leq n-1$) 组成集合 c_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) 即 $c_i \subseteq E$;

② 建立参数空间 P , 利用抽取的 k 个点使用最小二乘法求解各项未知参数, 参数集合记为 P_1 , 再次不重样抽取 k 个点使用最小二乘法求解未知参数, 记为集合 P_2 , 假设抽取次数为 6 得到参数结果 $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$;

③ 设定样本点到拟合方程的距离阈值 Δx , 遍历所有样本点, 求解样本点到拟合方程距离 ξ_i , 对 $\xi_i \leq \Delta x$ 的样本点进行计数, 依次对所有方程样本点投票, 得到符合条件的点个数分别为 $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$;

④ 比较 $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$, 选择投票数最多所对应的一组参数作为最终拟合方程的参数值.

法兰端面取 n ($n \geq 4$) 个点, 坐标分别为 $(x_{1i},$

$y_{1i}, z_{1i}), i = 0, 1, \dots, n-1$; n 点中随机抽取 k 个点 $(x'_{1i}, y'_{1i}, z'_{1i}), i = 0, 1, \dots, k-1$, 记法兰端面平面方程

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z - 1 = 0 \quad (6)$$

由最小二乘法, 求解样本点与平面距离平方和

$$S_{\min} = \sum_{i=0}^{k-1} (A_1 x'_{1i} + B_1 y'_{1i} + C_1 z'_{1i} - 1)^2 \quad (7)$$

令 $\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \frac{\partial S}{\partial C} = 0$, 得到平面方程

的参数

$$P_1 = (M^T M)^{-1} M^T L \quad (8)$$

$$\text{其中, } L = \left[\begin{array}{ccc} \sum_{i=0}^{k-1} x'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} y'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} z'_{1i} \end{array} \right]^T$$

$$P_1 = [A_1 \quad B_1 \quad C_1]^T$$

$$M = \left[\begin{array}{ccc} \sum_{i=0}^{k-1} x'^2_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} x'_{1i} y'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} x'_{1i} z'_{1i} \\ \sum_{i=0}^{k-1} x'_{1i} y'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} y'^2_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} y'_{1i} z'_{1i} \\ \sum_{i=0}^{k-1} x'_{1i} z'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} y'_{1i} z'_{1i} & \sum_{i=0}^{k-1} z'^2_{1i} \end{array} \right]$$

依次求解 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 , 设定阈值 Δx , 判断所有样本点到 P_1 对应平面的距离 ξ_i 的样本点个数 P'_1

$$\xi_i = |A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i - 1| \leq \Delta x \quad (9)$$

并依次得到 $P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$, 对应的样本点数 n_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), 选择 $n_{i(\max)}$ 对应 P'_i 作为最终拟合平面的参数值. 假设 P'_1 的样本点最多, 则该平面的各项参数集合 $P'_1 = \{A_1, B_1, C_1\}$. 法兰端面法矢向量 $n_1 = (A_1 \quad B_1 \quad C_1)$, 同样可得另一法兰端面法矢向量 $n_2 = (A_2 \quad B_2 \quad C_2)$.

法兰柱面均匀取点 m ($m \geq 4$) 个, 坐标分别为 $(x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}), i = 0, 1, \dots, m-1$. 得法兰圆柱表面的点在法兰圆心所在平面投影:

$$\begin{cases} x'_{2i} = \frac{A_1 - A_1 B_1 y_{2i} - A_1 C_1 z_{2i} - A_1^2 x_{2i}}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} + x_{2i} \\ y'_{2i} = \frac{B_1}{A_1} \left[\frac{-A_1 B_1 y_{2i} - A_1^2 x_{2i} - A_1 C_1 z_{2i} + A_1}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \right] + y_{2i} \\ z'_{2i} = \frac{C_1}{A_1} \left[\frac{-A_1 B_1 y_{2i} - A_1^2 x_{2i} - A_1 C_1 z_{2i} + A_1}{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \right] + z_{2i} \end{cases} \quad (10)$$

由最小二乘法 and RHT 法得圆心

$$[X_1 \quad Y_1 \quad Z_1]^T = (M^T M)^{-1} M^T L \quad (11)$$

式中: $L = [1 \quad l_0 \quad l_1 \quad \dots \quad l_{m-1}]^T_{m \times 1}$

$$M = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ x'_{2-01} & y'_{2-01} & z'_{2-01} \\ x'_{2-12} & y'_{2-12} & z'_{2-12} \\ \dots & \dots & \dots \\ x'_{2-(m-2)(m-1)} & y'_{2-(m-2)(m-1)} & z'_{2-(m-2)(m-1)} \end{bmatrix}_{m \times 3}$$

$$x'_{2-(i-1)i} = x'_{2i} - x'_{2(i-1)}, y'_{2-(i-1)i} = y'_{2i} - y'_{2(i-1)},$$

$$z'_{2-(i-1)i} = z'_{2i} - z'_{2(i-1)}$$

$$l_{i-1} = \frac{x_{2i}^2 + y_{2i}^2 + z_{2i}^2 - x_{2(i-1)}^2 - y_{2(i-1)}^2 - z_{2(i-1)}^2}{2},$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

同时, O_2 的圆心坐标为 $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$.

法兰螺栓孔内壁取 $s(s \geq 3)$ 个点, 坐标分别为 $(x_{3i}, y_{3i}, z_{3i}), i = 0, 1, \dots, s-1$, 端面投影为 $(x'_{3i}, y'_{3i}, z'_{3i}), i = 0, 1, \dots, s-1$, 利用最小二乘法和 RHT 法得法兰螺栓孔圆心 O_3 坐标 (X_3, Y_3, Z_3) , 另一法兰的对应螺栓孔圆心 O_4 坐标 (X_4, Y_4, Z_4) , 连接 $O_1 O_3$ 与 $O_2 O_4$, 得

$$\begin{cases} l_1 = \overline{O_1 O_3} = (X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1) \\ l_2 = \overline{O_2 O_4} = (X_4 - X_2 & Y_4 - Y_2 & Z_4 - Z_2) \end{cases} \quad (12)$$

2.3 动法兰姿态预调整

本研究将位姿调整分为姿态调整与位置调整两部分, 姿态调整的目的为使两法兰端面法向量 n_1 与 n_2 相同, 螺栓孔圆心与端面圆心连线矢量 l_1 与 l_2 相同. 在姿态调整中, 动法兰的转动调整参量为依次绕俯仰轴、旋转轴、自转轴转动 α, γ, β .

若同一向量在坐标系 $\{f\}$ 和坐标系 $\{m\}$ 中分别为 P_f, P_m , 且 $\{f\}$ 与 $\{m\}$ 方向相同, 则 $P_f = P_m$. 若两坐标系发生相对转动, 则 $P_m = R_f^m P_f$, R_f^m 为两坐标系姿态变换矩阵. 随动坐标系 $\{f\}$ 随动法兰依次绕俯仰轴、旋转轴、自转轴转动 α, γ, β , 即坐标系 $\{f\}$ 依次绕 X_f, Y_f, Z_f 轴转动欧拉角 α, γ, β . 矢量 n_1 与 n_2, l_1 与 l_2 在坐标系 $\{f\}$ 下的方向如图 7 所示.

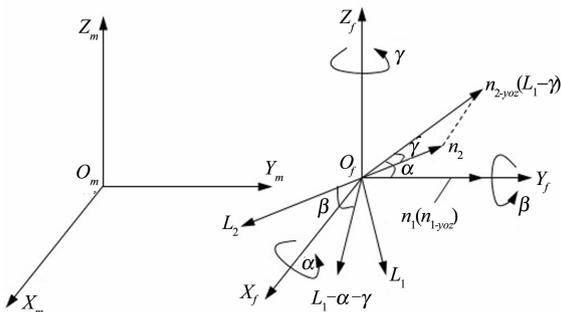


图 7 $\{f\}$ 下位姿矢量位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the position of the lower position

α 为 n_1 与 n_2 在面 yoz 的投影 $n_{1,yoz}$ 与 $n_{2,yoz}$ 夹角:

$$\alpha = \arccos \frac{n_{1,yoz} n_{2,yoz}}{|n_{1,yoz}| |n_{2,yoz}|} \quad (13)$$

γ 为 n_1 绕俯仰轴转动 α 后的向量 $n_{1-\alpha}$ 与 n_2 夹角:

$$\gamma = \arccos \frac{n_{1-\alpha} n_2}{|n_{1-\alpha}| |n_2|} \quad (14)$$

其中 $n_{1-\alpha} = |\text{Rot}(X_f, \alpha) n_1|$, β 为 l_1 分别绕俯仰轴、转动轴转动 α, γ 角度后的向量 $l_{1-\alpha-\gamma}$ 与 l_2 的夹角.

$$\beta = \arccos \frac{l_{1-\alpha-\gamma} l_2}{|l_{1-\alpha-\gamma}| |l_2|} \quad (15)$$

式中 $l_{1-\alpha-\gamma} = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) l_1$.

动法兰姿态调整中 n_1 与 l_1 变化如下:

① 向量 n_1 经过 α, γ, β 角度欧拉转动后为 n_1'' , 并与 n_2 理论方向相同.

$$n_1'' = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta) n_1 = \begin{bmatrix} A_1 \gamma c \beta - B_1 s \gamma + C_1 \gamma s \beta \\ A_1 s \gamma c \beta \alpha - A_1 s \alpha s \beta + B_1 \gamma c \alpha + s \gamma s \beta \alpha - C_1 \beta s \alpha \\ A_1 s \gamma c \beta s \alpha - A_1 c \alpha s \beta + B_1 \gamma s \alpha + C_1 s \gamma s \beta s \alpha + C_1 c \alpha c \beta \end{bmatrix} \quad (16)$$

② 向量 l_1 经过 α, γ, β 欧拉转动为 l_1'' , 并与 l_2 理论方向相同, 即对应螺栓孔对齐. 根据坐标欧拉转换定理

$$l_1'' = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta) l_1 = \begin{bmatrix} a_1 \gamma c \beta - c_1 s \gamma + c_1 s \beta \\ a_1 s \gamma c \beta \alpha - a_1 s \alpha s \beta + c_1 \gamma c \alpha + s \gamma s \beta \alpha - c_1 \beta s \alpha \\ a_1 s \gamma c \beta s \alpha - c_1 c \alpha s \beta + c_1 s \alpha c \gamma + s \gamma s \beta s \alpha + c \alpha c \beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.4 动法兰位置预调整

图 8 中, 坐标系 $\{f\}$ 原点 $O_f(X_f, Y_f, Z_f)$, 旋转轴为 AB , 基点 $A(X_A, Y_A, Z_A)$, 回转基座自转轴 CD , 且圆心 O_1 处于自转轴线上. 根据坐标系 $\{S_1\}$ 旋转角度, 圆心 O_1 依次绕俯仰轴转 α , 绕转动轴旋转 γ , 绕自转轴 CD 旋转 β , 圆心的最终位置为 O_1' . 在坐标系 $\{f\}$ 中, 由于坐标系的欧拉矩阵变换与 RPY 矩阵变换具有可逆互等性, 即圆心 O_1 以 X_f - AB - CD 顺序转动 Euler $(\alpha-\gamma-\beta)$ 的结果与按照 CD - AB - X_f 的顺序转动 RPY $(\beta-\gamma-\alpha)$ 的结果相同.

① 圆心 O_1 绕自转轴旋转 β 后仍在原来位置, 再绕旋转轴 AB 旋转 γ 到 $O_1'(X_1', Y_1', Z_1')$.

$$\begin{cases} x_1' = x_f - R_1 \sin \gamma \\ y_1' = y_f + R_1 \cos \gamma \\ z_1' = z_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中 $R_1 = \sqrt{(x_1 - x_A)^2 + (y_1 - y_A)^2}$

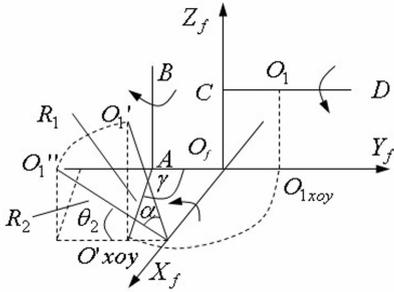


图8 圆心 O_1 变化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the center changes

②点 O_1' 绕俯仰轴 X_f 旋转 α 到 $O''(X_1'', Y_1'', Z_1'')$:

$$\begin{cases} x_1'' = x_1' \\ y_1'' = y_1' - R_2 \cos \theta_2 \\ z_1'' = z_1' + R_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (19)$$

其中:

$$R_2 = \sqrt{(y_1' - y_f)^2 + (z_1' - z_f)^2}$$

$$\theta_2 = | \arctan \frac{z_1' - z_f}{y_1' - y_f} + \alpha |$$

经位置预调整,使动法兰到达预设的在线纠偏系统作用位置.为避免移动过程中动法兰与静法兰发生干涉,位置调整路径为:动法兰端面圆心位置 O_1' 直线插补到 S 点, S 点直线插补到预先设定位置 F 点,如图9所示.其中, S_1 为 O_1' 在静法兰法线投影点, S 点为动法兰端面圆心实际到达点.

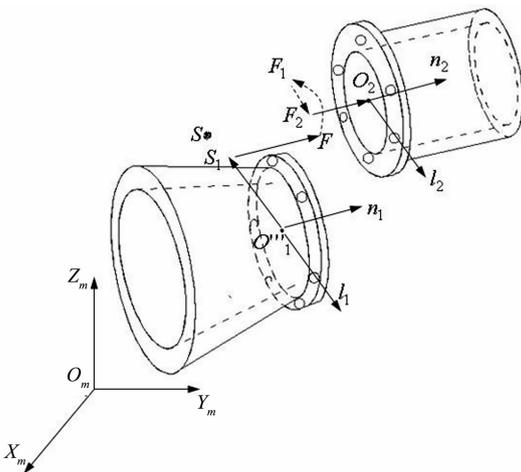


图9 位置调整轨迹示意图

Fig. 9 Schematic diagram of position adjustment track

3 LD-PSD 在线反馈系统

激光发射器 LD 分别安装于法兰的螺栓孔 A_1, B_1, C_1, Q_1 , 对应的 PSD 板安装在 A_2, B_2, C_2 位置, 透镜 PSD 板安装在 Q_2 位置, 配置分布如图 10 所示.

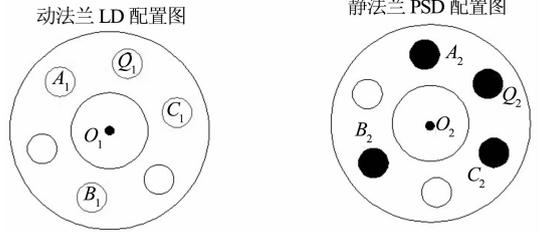


图 10 LD-PSD 配置分布图

Fig. 10 Distribution of LD-PSD configuration

3.1 动法兰微转动调整

3.1.1 消除对接端面夹角误差

LD 与透镜 PSD 组合测量对接端面夹角误差, 测量原理如图 11 所示.

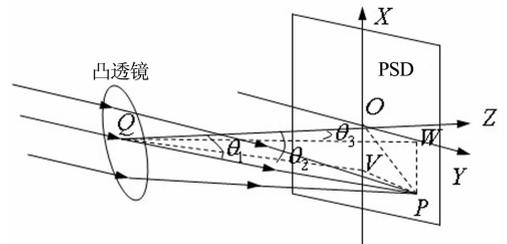


图 11 透镜 PSD 测量端面夹角图

Fig. 11 The angle of the end face of the lens-PSD

当光线偏离 PSD 面法线, 光斑偏离 PSD 板中心 O 点, 偏心距离 OP 与光线偏离法线的角度成一定几何关系, 光束与焦平面轴线夹角

$$\theta_1 = \arctan \frac{OP}{QO} = \arctan \frac{\sqrt{X_P^2 + Y_P^2}}{f} \quad (20)$$

f 为凸透镜焦距; X_P 为 P 点在 PSD 板的横向坐标; Y_P 为 P 点在 PSD 板的纵向坐标值.

该夹角在水平和垂直方向投影 θ_2, θ_3 .

$$\theta_2 = \arctan \frac{OV}{QO} = \arctan \frac{X_P}{f} \quad (21)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{OW}{QO} = \arctan \frac{Y_P}{f} \quad (22)$$

分别以预调整后动法兰与静法兰端面的圆心为原点, 端面法矢向量 n_1 与 n_2 为 Z 轴, 圆心连线矢量 l_1 与 l_2 为 Y 轴, 右手螺旋定则确定 X 轴, 建立动法兰坐标系 $S_1: O_1 - X_1 Y_1 Z_1$, 静法兰坐标系 $S_2: O_2 -$

$X_2Y_2Z_2$, 安装透镜 PSD 时, 调整 PSD 坐标系 $O-XYZ$ 与坐标系 $\{s_2\}$ 方向相同. 若同一向量在坐标系 $\{m\}, \{s_1\}, \{s_2\}, \{f\}$ 中分别为向量 $\mathbf{J}_m, \mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \mathbf{J}_f$ 则

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{R}_1^m \overline{\mathbf{J}}_1 = \mathbf{R}_2^m \overline{\mathbf{J}}_2 = \mathbf{R}_f^m \overline{\mathbf{J}}_f \quad (23)$$

预装配后的动法兰端面法矢向量在坐标系 $\{m\}$ 与 $\{s_1\}$ 下的转换关系为:

$$\mathbf{n}_1^m = \mathbf{R}_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (24)$$

其中, \mathbf{R}_1^m 为坐标系 $\{m\}$ 与 $\{s_1\}$ 的旋转矩阵.

$$\mathbf{R}_1^m =$$

$$[X_1^m \ Y_1^m \ Z_1^m]^T [0 \ 0 \ 1] \{ [0 \ 0 \ 1]^T [0 \ 0 \ 1] \}^{-1}$$

静法兰端面法矢向量在坐标系 $\{m\} \{s_2\}$ 下的关系为:

$$\mathbf{n}_2^m = \mathbf{R}_2^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (25)$$

其中 \mathbf{R}_2^m 为坐标系 $\{m\}$ 与 $\{s_2\}$ 的旋转矩阵

$$\mathbf{R}_2^m =$$

$$[X_2^m \ Y_2^m \ Z_2^m]^T [0 \ 0 \ 1] \{ [0 \ 0 \ 1]^T [0 \ 0 \ 1] \}^{-1}$$

静法兰端面法矢向量在坐标系 $\{f\}$ 与 $\{s_1\}$ 下的转换关系为:

$$\mathbf{n}_f = (\mathbf{R}_f^m)^{-1} \mathbf{R}_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (26)$$

其中, $\mathbf{R}_f^m = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta)$

设法矢向量 \mathbf{n}_1^m 在坐标系 $\{s_2\}$ 中表示为 $\mathbf{n}_1^m(S_2)$, 则

$$\mathbf{n}_1^m(S_2) = (\mathbf{R}_2^m)^{-1} \mathbf{R}_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (27)$$

随动坐标系 $\{f\}$ 下动法兰端面法矢向量 \mathbf{n}_1^m 绕 X_f 轴, Z_f 轴依次旋转欧拉角 α, γ 的效果等同于 \mathbf{n}_1^m 先绕坐标系 $\{s_2\}$ 的 X_2 轴旋转 θ_3 , 再绕 Y_2 轴旋转 θ_2 , 即

$$\mathbf{R}_f^m \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \mathbf{n}_f = \mathbf{R}_2^m \text{Rot}(Y_2, \theta_2) \text{Rot}(X_2, \theta_3) \mathbf{n}_1^m(S_2)$$

由上式求解 α, γ . 绕俯仰轴 X_f 旋转 α , 绕转动轴 Z_f 旋转 γ , 动法兰微调一次, 实时检测端面夹角, 重复上述端面夹角微调步骤, 直至满足精度要求.

3.1.2 消除对应螺栓孔的相对扭转误差

静法兰 PSD 板上形成的动法兰螺栓孔照射光斑的位置为 A_1', B_1', C_1' , 连接 $A_1' B_1' C_1'$ 与 A_2, B_2, C_2 , 如图 12 所示.

其光斑与 PSD 板圆心的距离分别为 $A_1' A_2, B_1' B_2, C_1' C_2$. 若燃烧室与尾喷管法兰对应螺栓孔存在周向扭转角度, 则 $A_1' A_2 \neq B_1' B_2 \neq C_1' C_2$, 对动法兰做周向调整, 并实时检测表示圆心位置的激光斑点与 PSD 接收板圆心的距离. 尾喷管绕基座旋转轴旋转后圆心 A_1, B_1, C_1 位置变为 D_1, E_1, F_1 位置, 在 PSD 板形成的光斑位置为 D_1', E_1', F_1' . 连接 $D_1' A_2, E_1' B_2, F_1' C_2$, 若偏心距 $D_1' A_2 = E_1' B_2 = F_1' C_2$, 即锁

住当前位姿, 只需经过位置平动可使对应螺栓孔和端面圆心对准.

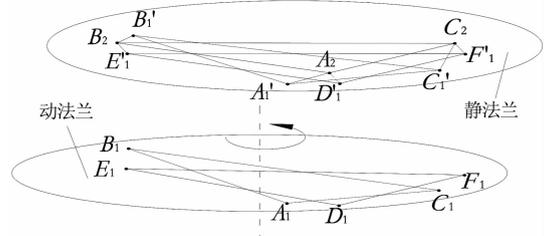


图 12 动法兰光斑位置示意图

Fig. 12 Sketch of the spot position of the moving flange

3.2 动法兰微平动调整

选取 A_1 孔与 A_2 孔进行平移调整参量解算, A_1 孔圆心光斑 A_1' 与圆心 A_2 的偏心距离 d , 坐标系 $\{m\}$ 下分解为 d_x, d_y, d_z , 如图 13 所示. 静法兰端面圆心位置移动到 F 点后, 经微转动落到 F_1 点, 静法兰沿垂直端面法线方向即 $X_m:Y_m:Z_m = d_x:d_y:d_z$ 方向做空间直线插补运动, 并实时检测偏心距 d , 设定偏心距精度 Δd , 若 $d \leq \Delta d$, 则停止平动, 此时动法兰圆心位置为 F_2 , 最后沿法线方向直线插补到 O_2 点, 实现动法兰的对接与装配.

$$\begin{aligned} d_x &= d_{xy} \cos \nu, d_y = d_{xy} \sin \nu \\ d_z &= d \sin \mu, d_{xy} = d \cos \mu \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $B_1(x_B, y_B, z_B)$ 在静法兰法线的投影点为 $B_1'(x_B', y_B', z_B')$,

$$\begin{aligned} \mu &= \arccos \frac{d_1}{\sqrt{d_1 d_2}} \\ d_1 &= (x_B' - x_B)^2 + (y_B' - y_B)^2 \\ d_2 &= (x_B' - x_B)^2 + (y_B' - y_B)^2 + (z_B' - z_B)^2 \\ \nu &= \arccos \frac{x_B' - x_B}{\sqrt{(x_B' - x_B)^2 + (y_B' - y_B)^2}} \end{aligned}$$

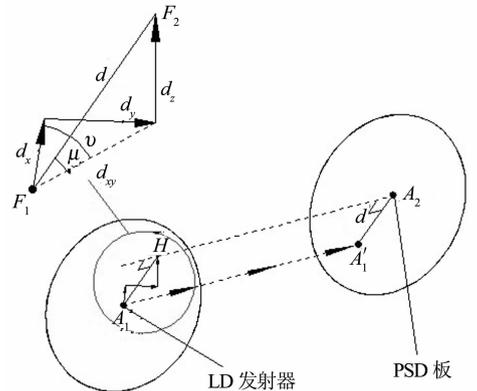


图 13 动法兰微平动调整示意图

Fig. 13 Schematic diagram of moving flange micro translational adjustment

4 实例验证

4.1 试验数据采集

为验证本文算法的有效性,在实验室条件下模拟静法兰与动法兰的位姿测算与对接装配.法兰外

径 900 mm,内径 550 mm,螺栓孔 $D=40$ mm,测量系统采用海克斯康关节臂测量机及 S2044 二维位置传感器.试验之前,应首先标定全局坐标系 $\{m\}$,并在坐标系 $\{m\}$ 下测量静法兰与动法兰的端面、柱面和螺栓孔内壁的 5 点坐标.端面、柱面和螺栓孔内壁的 5 点坐标,如表 1 表 2 所示.

表 1 动法兰各部分的采点数据
Tab. 1 The data of each part of the moving flange

序号	动法兰		
	端面取点/mm	柱面取点/mm	螺栓孔内壁取点/mm
1	(-459.977,1 410.091,1 538.801)	(-463.057,1 210.307,1 550.036)	(-832.501,1 408.122,1 790.252)
2	(-550.002,1 410.089,1 587.912)	(-860.211,1 220.900,1 849.986)	(-845.510,1 407.351,1 819.508)
3	(-759.010,1 410.091,1 747.100)	(-616.021,1 310.401,1 775.022)	(-848.985,1 409.095,1 820.006)
4	(-949.918,1 410.093,1 152.221)	(-916.122,1 327.100,1 844.502)	(-851.798,1 410.012,1 820.023)
5	(-1 049.618,1 410.009,1 182.603)	(-1 148.112,1 374.107,1 716.913)	(-858.899,1 410.011,1 817.950)

表 2 静法兰各部分的采点数据
Tab. 2 The data of each part of the static flange

序号	静法兰		
	端面取点/mm	柱面取点/mm	螺栓孔内壁取点/mm
1	(-549.956,156.226,1 910.012)	(-799.998,2 219.011,1 240.31)	(-865.498,1 692.201,1 882.201)
2	(-599.963,1 712.802,1 140.037)	(-560.017,2 120.003,1 259.001)	(-899.785,1 707.901,1 868.599)
3	(-650.007,1 590.071,1 980.112)	(-549.811,2 207.699,1 460.033)	(-889.022,1 732.319,1 676.198)
4	(-1350.017,1 951.213,1 159.997)	(-599.781,2 334.989,1 660.981)	(-878.898,1 732.318,1 676.201)
5	(-1 410.071,2 049.009,1 040.009)	(-1 010.012,2 310.911,1 279.029)	(-875.497,1 730.003,1 675.795)

4.2 试验数据处理

点坐标采集完毕,利用文中所述算法将数据处理后,得法兰的位姿,端面圆心 $O_1(-850.002, 1 410.091, 1 450.336)$ mm, $O_2(-693.246 7, 2 432.800, 1 281.400)$ mm;法矢向量 $n_1=(0, 1, 0)$, $n_2=(-0.375 9, 0.238 1, 0.895 6)$;螺栓与圆心连线矢量 $l_1=(0.004, -0.000 1, -1)$, $l_2=(0.013 5, 0.961 2, -0.275 6)$.动法兰相对静法兰的预调整欧拉转角 $\alpha=75.1^\circ, \beta=-1.3^\circ, \gamma=22.1^\circ$, X_m 方向插补位移 -236.4 mm, Y_m 方向插补位移 $1 116.5$ mm, Z_m 方向插补位移 -440.1 mm.

4.3 装配精度

为验证该位姿算法及位姿调整系统的有效性,对无 PSD 在线纠偏系统和有 PSD 在线纠偏系统的装配质量指标分别测算.用塞尺对法兰对接面周边检测,换算成两对接端面夹角 $\delta_1=0.012 1^\circ$ 与 $\delta'_1=0.009 1^\circ$;用标准圆柱检测两对接法兰端面通孔中心的位置偏差 $\delta_2=0.037 1$ mm 与 $\delta'_2=0.028 7$ mm,用标准圆柱检测螺栓孔中心的位置偏差,换算成螺栓孔相对扭转角 $\delta_3=0.013 2^\circ$ 与 $\delta'_3=0.009 3^\circ$.由对比结果可以看出,LD-PSD 在线检测系统可有效提高装配精度,满足装配精度要求:两平面夹角小于 0.01° ,连接孔偏心度小于

0.03 mm,对应螺栓孔相对扭转角小于 0.01° .同时,为进一步说明 LD-PSD 在线检测系统的优越性,于动静法兰端面、柱面、螺栓孔内壁进行等量取点,取点总个数在 $15\sim 75$ 之间时,其精度 δ_1 与 δ'_1, δ_2 与 δ'_2, δ_3 与 δ'_3 对比如图 14~图 16 所示.

由试验结果可知,在 LD-PSD 在线检测系统参与下,对接端面平面夹角误差、螺栓孔相对扭转误差、对应螺栓孔偏心度均优于无 LD-PSD 在线检测系统参与的情况,且基本不受测点个数影响,充分说明本方法的有效性 & LD-PSD 在线检测系统的优越性.

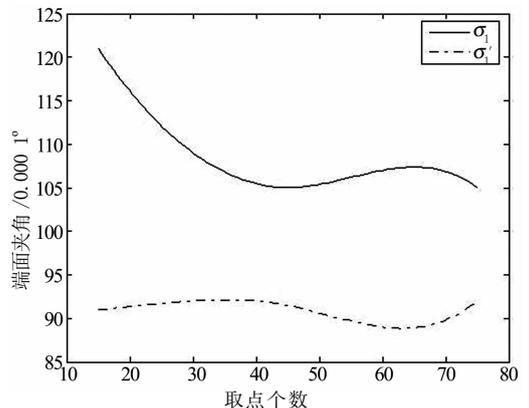
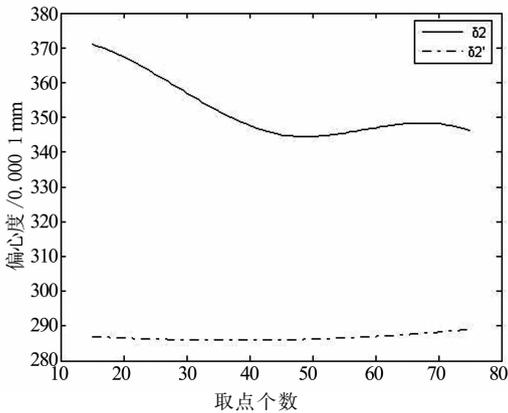
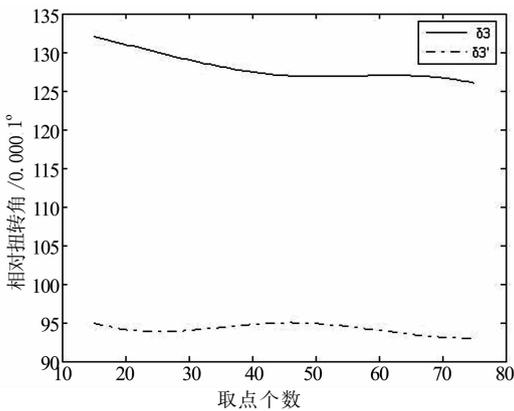


图 14 δ_1 与 δ'_1 对比图
Fig. 14 δ_1 and δ'_1 comparison chart

图 15 δ_2 与 δ_2' 对比图Fig. 15 δ_2 and δ_2' comparison chart图 16 δ_3 与 δ_3' 对比图Fig. 16 δ_3 and δ_3' comparison chart

5 结论

提出的基于关键姿态矢量信息与 LD-PSD 在线反馈的法兰对接装配方法,以静法兰为目标位姿实现了动法兰位姿的预调整,通过 LD-PSD 在线反馈系统实时检测装配质量指标,并实时调整动法兰位姿,直至满足要求精度,实现了装配精度的闭环控制。试验结果显示,最终对接端面夹角误差、对应螺栓孔相对扭转角度误差、连接孔的圆心位置误差均符合装配要求,验证了该位姿调整理论方法的正确性、实用性。此外,实现无人值守的高效、高精度智能装配是大部件装配的研究方向,也是本课题的努力方向。

参考文献

[1] 赵乐乐. 飞机大部件装配数字化测量场构建技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2013.
ZHAO Lele. Research on constructing technology of digital measuring field for aircraft large component assembly[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (In Chinese)

[2] LOWE D. Three-dimensional object recognition from single two dimensional Images [J]. Artificial Intelligence, 1987,31:355-395.

[3] 李钦杰. 基于激光视觉传感的飞机导管自动装配[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2014.
LI Qinjie. Automatic assembly of aircraft pipe based on laser vision sense [D]. Harbin: College of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2014. (In Chinese)

[4] 马政伟, 李卫东, 万敏, 等. 飞机侧壁部件装配调姿机构的设计与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 280-284.
MA Zhengwei, LI Weidong, WAN Min, *et al.* Design and analysis of flexible fixture for aircraft side panels[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 280-284. (In Chinese)

[5] 彭莎莎, 刘永盛, 宗路航, 等. 薄壁大开口分段固体发动机卧式对接装配研究[J]. 航天制造技术, 2014(6): 11-15.
PENG Shasha, LIU Yongsheng, ZONG Luhang, *et al.* Study on horizontal docking assembly method for segment thin-walled solid rocket motor with large opening[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(6): 11-15. (In Chinese)

[6] ZOU J. Indoor global positioning measurement system application for the aircraft flexible joint assembly[C]//SAE 2010 Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition. Wichita, USA, 2010: 28-30.

[7] 宋彰桓, 赵盟, 孙占磊, 等. 基于 IGPS 的飞机部件对接测量点选取方法研究[J]. 航空制造技术, 2016(5): 57-61.
SONG Zhanghuan, ZHAO Gang, SUN Zhanlei, *et al.* Research on IGPS measurement point selection method in fuselage docking[J]. Journal of Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(5): 57-61. (In Chinese)

[8] 朱永国, 黄翔, 宋利康, 等. 基于理想驱动力的中机身调姿多项式轨迹规划[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(7): 1790-1796.
ZHU Yongguo, HUANG Xiang, SONG Likang, *et al.* Polynomial trajectory planning method based on ideal drive forces for aircraft fuselage pose adjustment[J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(7): 1790-1796. (In Chinese)

[9] 罗芳, 周万勇, 侯志霞, 等. 部件自动对接过程中的运动规划及精度控制[J]. 航空制造技术, 2014(21): 156-158.
LUO Fang, ZHONG Wanyong, HOU Zhixia, *et al.* Motion planning and precision controlling in component automatic butt[J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014(21): 156-158. (In Chinese)

[10] 易旺民, 段碧文, 高峰, 等. 大型舱段装配中的水平对接技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2354-2360.
YI Wangmin, DUAN Biwen, GAO Feng, *et al.* Level docking technology in large cabin assembly[J]. Journal Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(9): 2354-2360. (In Chinese)

[11] WILLIAMS G, CHALUPA E, RAHHAL S. Automated positioning and alignment systems[R]. Tex, USA: Society of Automotive Engineers, 2000: 737-744.

[12] NAING S. Feature based design for jigless assembly[D]. Bedfordshire, UK: School of Engineering, Cranfield University, 2004.

[13] KOMATSU M, OHKAWA K, TSUCHIDAN, *et al.* Hole position and inclination sensor with 2 dimensional PSD, and its application to automatic shaft inserting[C]// International Conference on Multisensor and Integration for Intelligent Systems, 2000: 75-79.

[14] 梁桥康, 聂军平, 邹坤霖, 等. 基于极坐标 Hough 变换的焊点检测标定方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(4): 81-88.
LIANG Qiaokang, NIE Junping, ZOU Kunlin, *et al.* Calibration methods for solder joint inspection based on polar hough transform [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(4): 81-88. (In Chinese)