

大型筒体-尾喷管位姿建模与精确装配方法

黄磊, 侯增选
(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘 要: 针对大型筒体-尾喷管对接装配的现场特点及安全性要求, 为提高其装配精度及效率, 提出一种基于关键位姿矢量及 LD-PSD 多参量在线检测反馈的精确装配新方法. 利用跟踪仪获取标定块上标记点的实际坐标, 依据其理论坐标和实测坐标的偏差建立最小二乘矩阵模型, 利用 SVD 法实现测量坐标系与全局坐标系空间配准. 跟踪仪获取喷管、筒体关键点坐标, 利用最小二乘及霍夫变换建立喷管、筒体当前位姿模型. 研制六自由度装配设备, 基于位姿矢量反解喷管位姿调整参量, 完成姿态预调整. 启动 LD-PSD 在线反馈系统, 规划微调整路径, 对喷管位姿多次纠偏以满足给定装配精度要求. 在某动力厂的试验表明: 装配过程平稳、高效, 实现了筒体-尾喷管的精准对接.

关 键 词: 机械臂; 激光跟踪仪; 关键姿态矢量; 最小二乘法; 闭环校准
中图分类号: TP 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)12-1748-06

Research on Pose Modeling and Precise Assembly Method for Large Cylinder-Tail Nozzles

HUANG Lei, HOU Zeng-xuan
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: HUANG Lei, E-mail: 2856396202@qq.com)

Abstract: According to the setting and safety of docking assembly for large cylinder-tail nozzles, a new method for precise docking assembly is proposed based on LD-PSD to improve the assembly accuracy and efficiency. First, the calibration block marker coordinates are obtained by using laser trackers, and the least square model is established according to the deviation between theoretical coordinate and the measured coordinate of the mark point. Precise spatial registration is implemented between measured coordinate and global coordinate by using singular value decomposition(SVD). Then, the tracking instrument is used to obtain the coordinate of the key point of the nozzle and cylinder. The mathematical model of the current position of nozzle cylinder is established using the least squares and HSF. 6-DOF CNC equipment is developed, and taking the posture of the cylinder as a reference, posture preconditioning is done by the anti-resolution of nozzle pose parameters. The online feedback system is launched to detect the pre-assembly error. By planning micro rotation and micro translational path, the position of the nozzle is corrected several times to meet the requirement of a given assembly accuracy. The test results in a power plant show that the assembly process is smooth and efficient, and it can realize the precise docking assembly of large cylinder-tail nozzles.

Key words: mechanical arm; laser tracker; key pose vector; least square method; closed loop calibration

装配是固体火箭制造过程的一大重要工艺步骤, 而对接是装配的重要一环, 对接的精确程度直接影响着国防航天产品的制造质量. 其中, 固体火箭发动机的尾喷口与燃烧室由于结构复杂、体积

庞大、重量达数吨、型号众多,整体对接效率及精度较低,严重制约着产品的制造质量.另外,发动机尾喷管及燃烧室内部结构特殊,且燃烧室装满燃料,对准过程中的碰撞会带来极大的安全隐患.因此,急需一种高效、精确的自动化柔性化对接装配系统,以实现火箭发动机精准、高效装配,力争调整一次即满足预定装配质量要求.

近年来,国内外针对大部件对接装配研究取得了很大进展^[1].乐韵斐等针对大型风机叶片法兰轴孔对接装配问题研制了大口径法兰螺栓与孔自动对接设备,解决了风机叶片根部螺栓与轮毂法兰孔快速对接问题^[2];赵瑾等研制了基于线阵 CCD 像机结合电涡流传感器的尾喷管自动对接系统,提高了固体火箭发动机尾喷管-燃烧室的法兰对接装配效率及精度^[3];Paoli 等针对大型船体装配质量检测问题,构建了基于激光跟踪与视觉测量相组合的综合测量系统^[4].

综合国内外有关大部件各类装配对接工艺及方法可以看出,所采用的大部分方法是基于正向顺次测量结果计算位姿调整量,未能消除位姿计算误差及位姿调整机构传动误差影响,未能实现全过程位姿调整闭环控制,进而限制了对接装配精度的进一步提高.本文提出一种面向某航天器大部件自动对接装配系统的闭环反馈控制调姿新方法.首先利用带机械臂的激光跟踪仪获取标定块上预设标记点的空间实际坐标值,依据标记点理论坐标和实测坐标之间的偏差建立最小二乘矩阵模型,利用 SVD 法实现测量坐标系与装配现场全局坐标系精确的空间配准和坐标映射.接着跟踪仪获取尾喷管、大型筒体关键特征点空间坐标数据集,利用最小二乘及随机霍夫变换原理建立喷管、筒体当前位姿表征综合数学模型.研制六自由度位置调整数控设备,以筒体位姿为参照,基于关键位姿矢量反解尾喷管位姿调整参量,完成姿态预调整.设计并启动 LD-PSD 在线反馈校准系统,检测并反馈预装配质量误差,规划微转动及微平动路径,对尾喷管位姿多次微纠偏以满足最终给定装配精度要求.

1 柔性数控装配系统组成

六自由度柔性数控装配设备总体结构如图 1 所示.

1.1 硬件系统

六自由度柔性数控装配位姿调整机构是装配位姿调整的执行部件,该机构主要包括直线运动

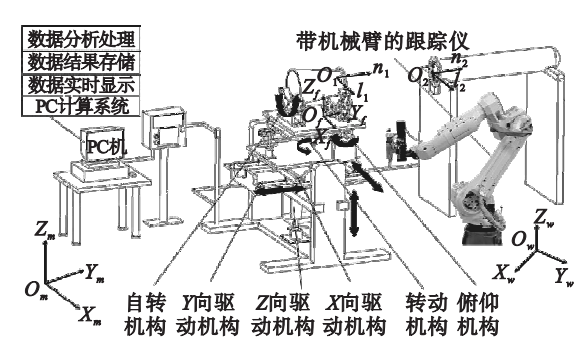


图 1 六自由度柔性数控装配设备总体结构
Fig. 1 Overall structure of six-DOF flexible CNC assembly

单元、回转运动单元、螺旋传动单元、交流伺服驱动单元等.整套机构可以联动实现待装配部件的空间三维位置调整和姿态调整两种功能.

采用基于机器人的 Leica 激光跟踪测量系统可自动获取空间关键点坐标,该系统能够在大量程范围内提供高精度的测量结果.

为弥补激光跟踪测量误差及位姿计算理论误差与位姿调整机构误差,设计了偏心距在线检测系统,可实现位姿调整闭环反馈控制.该系统是通过激光二极管照射和凸透镜聚焦进而在光电位置传感器 PSD 的光敏面上形成光斑,前置放大电路将光斑转换为电信号,经单片机进一步处理可得到光斑在接收板 PSD 上的坐标 (X, Y) ^[5-6],及光斑到接收板 PSD 中心点的距离.偏心距在线检测系统测量原理如图 2 所示.其中,激光发射端 LD 和接收端 PSD 均安装在与喷管-大型筒体两端对应螺栓孔等直径的金属圆柱体上,再分别将发射端和接收端从背面(非装配面)装入两端待装配件螺栓孔内.金属圆柱体采用精密加工制造.

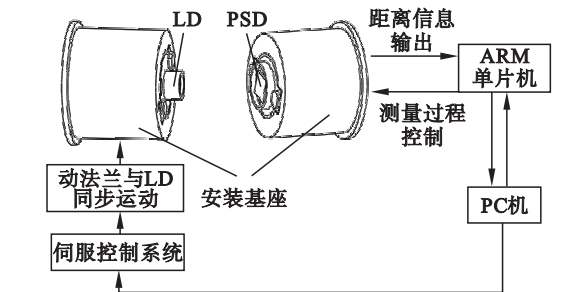


图 2 偏心距在线检测系统原理
Fig. 2 Principle of eccentricity on-line detection system

1.2 软件系统

软件系统遵循模块化设计思想,基于 MFC 和 open inventor 在上位机开发虚拟装配及数据处理集成软件系统,该系统包括人机界面模块、数据采集模块、数据分析处理模块、数控编程模块、数控装配虚拟仿真模块等.开发的集成装配软件系

统界面如图 3 所示。

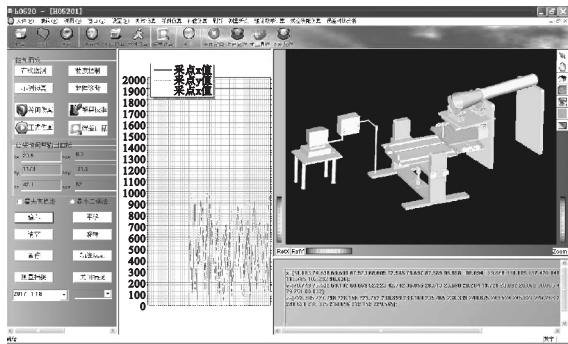


图 3 集成装配软件系统界面

Fig. 3 System interface for integrated assembly software

2 尾喷管位姿预调整

2.1 求解关系映射矩阵 m_wR 和 T^m_w

图 4 所示,设定全局坐标系 $\{m\}$ 位于调姿机构内置的精密标定块上.并在标定块上与坐标系 $\{m\}$ 坐标轴正向对应的棱边上取 n 点,设坐标系 $\{m\}$ 下所得 n 点对应坐标为 $P'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$, $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$.相应地,激光跟踪仪坐标系 $\{w\}$ 下对应的 n 点实测坐标值为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$,则有 $P_i = {}^m_wR P'_i + T^m_w + \Delta P_i$,其中 ΔP_i 为第 i 个测量点理想坐标值与实测坐标值的误差.则映射矩阵 m_wR 和 T^m_w 可由下式求得^[7].

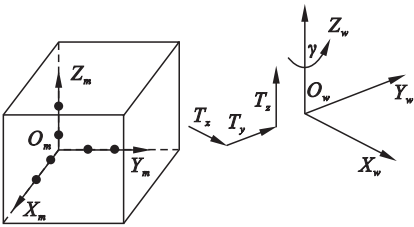


图 4 坐标系 $\{m\}$ 与 $\{w\}$ 转换示意图

Fig. 4 Conversion diagram of $\{m\}$ and $\{w\}$ for coordinate system

$$\min \sum_{i=1}^n \| \Delta P_i \|^2 = \min \sum_{i=1}^n \| P - {}^m_wR P' - T^m_w \|^2. \quad (1)$$

依照 SVD 法原理, m_wR 求解公式为

$${}^m_wR = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & c\gamma s\beta s\alpha - s\gamma c\alpha & c\gamma s\beta c\alpha + s\gamma s\alpha \\ s\gamma c\beta & s\gamma s\beta s\alpha + c\gamma c\alpha & s\gamma s\beta c\alpha - c\gamma s\alpha \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由 $\bar{P} = {}^m_wR \bar{P}' + T^m_w$ 推得

$$T^m_w = \bar{P} - {}^m_wR \bar{P}'. \quad (3)$$

P 与 P' 表示同一测量点分别在激光跟踪仪坐标系 $\{w\}$ 和全局坐标系 $\{m\}$ 下的对应坐标.经

过坐标转换算法处理后,以下所有测量点所得数据坐标值均指坐标系 $\{m\}$ 下的全局坐标.

2.2 喷管位姿矢量模型推导

如图 5 所示,喷管配合部端面建立位姿表征动坐标系 $\{S_1: O_1 - l_1 n_1\}$,其中 O_1 为端面圆心, l_1 为端面圆心与装配辅助基准螺栓孔圆心连线, n_1 为喷管端面法向量.考虑在测量过程中,激光跟踪仪测量系统误差及喷管、大型筒体的自身几何形状误差和变形误差不可避免,因此这里采用 RHT 法与最小二乘法相结合建立装配位姿矢量解算模型,以弱化以上几种误差对位姿求解精度的影响^[8].求解过程如下:

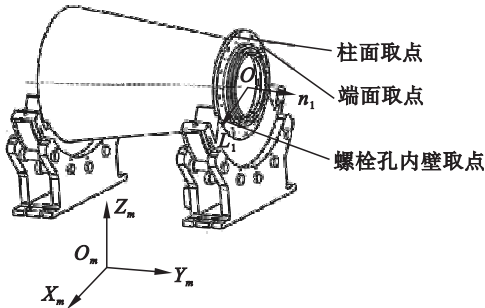


图 5 喷管位姿及测量取点示意图

Fig. 5 Illustration of nozzle pose and measuring points

喷管配合部端面取 $n(n \geq 20)$ 个测量点,记为 (x_{li}, y_{li}, z_{li}) , $i = 0, 1, \dots, n-1$,在这 n 点中再抽取 $k(4 \leq k \leq n-1)$ 个随机样本点 $(x'_{li}, y'_{li}, z'_{li})$, $i = 0, 1, \dots, k-1$,此时得喷管端面方程为

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z - 1 = 0. \quad (4)$$

计算每个样本到所求解平面的距离平方和:

$$S_{\min} = \sum_{i=0}^{k-1} (A_1 x'_{li} + B_1 y'_{li} + C_1 z'_{li} - 1)^2. \quad (5)$$

再令 $\frac{\partial S}{\partial A'} = 0, \frac{\partial S}{\partial B'} = 0, \frac{\partial S}{\partial C'} = 0$,可得待求平面

方程的参数:

$$P_1 = (M^T M)^{-1} M^T L. \quad (6)$$

同理可求解得到平面方程参数矩阵序列 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 ,设定临界值 Δx ,针对参数矩阵 P_1 ,统计符合式(9)所列条件下的样本点个数,记为 P'_1 .

$$\xi_1 = |A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 z_i - 1| \leq \Delta x. \quad (7)$$

同理可依次计算得到 $P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$,选取 $|P'_i|$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)中数值最大者所对应的参数矩阵 P_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)作为符合要求的拟合平面方程参数值.现假定 P'_1 数值最大,对应的 P_1 即为最终所求拟合平面方程的参数矩阵,记为 $P_1 = (A_1 \ B_1 \ C_1)$.显然可得喷管端面法矢为 $n_1 = (A_1 \ B_1 \ C_1)$,同理可得大型筒体侧配合

部端平面法矢 $\mathbf{n}_2 = (A_2 \ B_2 \ C_2)$.

喷管柱面均布取 $m(m \geq 4)$ 个点, 相应的坐标记为 (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) , $i = 0, 1, \dots, m-1$. 将柱面所得点沿法矢方向 \mathbf{n}_1 依次向喷管端面空间投影并基于 RHT 法结合最小二乘原理求解喷管端面圆心:

$$[X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{L}. \quad (8)$$

同理求得大型筒体侧端平面圆心坐标:

$$O_2(X_2, Y_2, Z_2).$$

喷管螺栓孔内柱面均布取 $s(s \geq 3)$ 个点, 记为 (x_{3i}, y_{3i}, z_{3i}) , $i = 0, 1, \dots, s-1$, 同理可求得向端面投影后的坐标, 记为 $(x_{3i}', y_{3i}', z_{3i}')$, $i = 0, 1, \dots, s-1$, 基于 RHT 法和最小二乘原理可求得喷管端面基准螺栓孔圆心坐标, 记为 $O_3(X_3, Y_3, Z_3)$, 同理, 容易求得大型筒体侧端平面相应基准螺栓孔圆心坐标, 记为 $O_4(X_4, Y_4, Z_4)$, 则

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{l}_1 = \overline{O_1 O_3} &= (X_3 - X_1 \ Y_3 - Y_1 \ Z_3 - Z_1); \\ \mathbf{l}_2 = \overline{O_2 O_4} &= (X_4 - X_2 \ Y_4 - Y_2 \ Z_4 - Z_2). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.3 喷管姿态预调整量解算

装配姿态调整过程中, 调姿机构上的喷管随调姿机构依次俯仰 α 角、动轴旋转 γ 角、自转 β 角的同时, 喷管端面随动坐标系 $\{f\}$ 也跟着绕 X_f, Z_f, Y_f 转动欧拉角 α, γ, β . 设矢量 $\mathbf{n}_{1_{yoz}}, \mathbf{n}_{2_{yoz}}$ 分别为矢量 \mathbf{n}_1 与 \mathbf{n}_2 向 yoz 平面的投影, $\mathbf{n}_{1_{yoz}}$ 与 $\mathbf{n}_{2_{yoz}}$ 之间的夹角记为 α , 则可求得

$$\alpha = \arccos \frac{\mathbf{n}_{1_{yoz}} \cdot \mathbf{n}_{2_{yoz}}}{|\mathbf{n}_{1_{yoz}}| |\mathbf{n}_{2_{yoz}}|} = \arccos \frac{B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{B_1^2 + C_1^2} \sqrt{B_2^2 + C_2^2}}. \quad (10)$$

当喷管随调姿机构绕俯仰轴转动 α 后, 矢量 \mathbf{n}_1 随之变换为 $\mathbf{n}_{1-\gamma}$, $\mathbf{n}_{1-\gamma}$ 与 \mathbf{n}_2 的夹角为 γ , 则

$$\gamma = \arccos \frac{\mathbf{n}_{1-\gamma} \cdot \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_{1-\gamma}| |\mathbf{n}_2|}. \quad (11)$$

设 \mathbf{l}_1 依次绕调姿机构俯仰轴、动轴旋转 α, γ 后所得矢量为 $\mathbf{l}_{1-\alpha-\gamma}$, $\mathbf{l}_{1-\alpha-\gamma}$ 与 \mathbf{l}_2 夹角为 β . 则

$$\beta = \arccos \frac{\mathbf{l}_{1-\alpha-\gamma} \cdot \mathbf{l}_2}{|\mathbf{l}_{1-\alpha-\gamma}| |\mathbf{l}_2|}. \quad (12)$$

喷管作姿态预调整过程中, 矢量 \mathbf{n}_1 与 \mathbf{l}_1 变换如下:

① \mathbf{n}_1 经 α, γ, β 欧拉角转动后变为 \mathbf{n}_1'' , 则理论上矢量 \mathbf{n}_1'' 与 \mathbf{n}_2 互相平行, 方向相反.

$$\mathbf{n}_1'' = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta) \mathbf{n}_1. \quad (13)$$

② \mathbf{l}_1 经 α, γ 欧拉角转动后变为 \mathbf{l}_1'' , 则理论上矢量 \mathbf{l}_1'' 与 \mathbf{l}_1 方向相同. 此时喷管-大型筒体两侧相应螺栓孔对齐. 基于欧拉转换定理得

$$\mathbf{l}_1'' = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta) \mathbf{l}_1. \quad (14)$$

2.4 喷管位置偏移预调整量解算

经过喷管-大型筒体空间姿态矢量模型的推导, 求解后得到喷管的理论姿态调整量 α, γ, β . 图 6 所示为喷管端面圆心 O_1 变化分析原理图. CD 为喷管随底座回转的自转轴线, 该轴线与喷管几何回转体轴线重合.

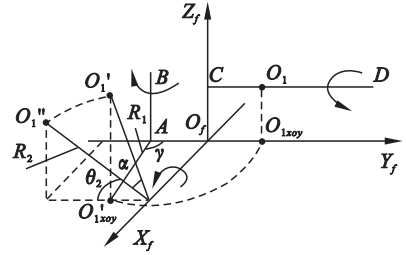


图 6 喷管端面圆心轨迹变动原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the change of the center of the nozzle

喷管随调姿机构的运动可分解为依次绕俯仰轴 X_f , 动轴 AB , 自转轴 CD 先后转动 α, γ, β . 最终喷管端面圆心 O_1 运动至 O_1'' 处. 为解算出 O_1'' 空间坐标值, 可作如下分析:

① 圆心 O_1 绕 CD 轴自转 β 后位置不发生变化, 接着绕 AB 动轴转动 γ 后到达位置 $O_1'(x', y', z')$ 处.

$$\left. \begin{aligned} x' &= x_A + R_1 \sin \gamma, \\ y' &= y_A + R_1 \cos \gamma, \\ z' &= z_1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

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

② O_1' 再绕俯仰轴 X_f 转动 α 后到达预定位置 $O_1''(x'', y'', z'')$ 处.

$$\left. \begin{aligned} x'' &= x', \\ y'' &= y_f + R_2 \cos \theta_2, \\ z'' &= z_f + R_2 \sin \theta_2. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

这里,

$$R_2 = \sqrt{(y' - y_f)^2 + (z' - z_f)^2},$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{z' - z_f}{y' - y_f} + \alpha.$$

求解出 $O_1''(x'', y'', z'')$ 坐标及姿态调整量 α, γ, β 后, 便可实施喷管-大型筒体预装配(先姿态预调整, 后位置预调整, 并留出余量).

3 喷管偏心距在线反馈精调整

图 7 所示偏心距在线检测器件安装图, 激光发射器 LD 通过精密制造的金属圆柱体依次安装在喷管端面螺孔 A_1, B_1, C_1, Q_1 上, 相应的激光接收板 PSD 依次安装在大型筒体端面螺孔 A_2, B_2, C_2, Q_2 上.

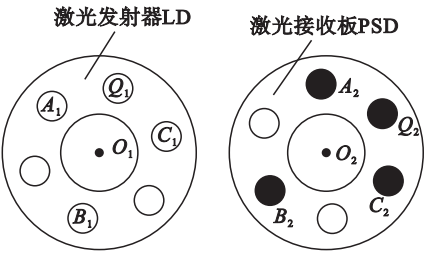


图 7 偏心距在线检测器件安装图

Fig. 7 Device of eccentricity on-line detection

3. 1 喷管在线反馈转动精调整

3. 1. 1 喷管 – 大型筒体装配端面法矢夹角误差补偿

图 8 为喷管 – 大型筒体装配端面法矢夹角测量示意图. 当非正交激光发射线束经凸透镜聚焦后成像于光敏 PSD 接收板 P 点处, 由矢量 OP 方向及 $|OP|$, 解算得激光线束与 PSD 接收板法矢夹角 θ_1 .

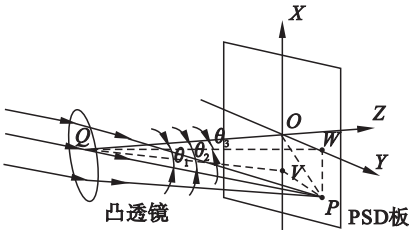


图 8 装配端面法矢夹角误差示意图

Fig. 8 Illustration of error of normal angle for assembly face

$$\theta_1 = \arctan \frac{OP}{QO} = \arctan \frac{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2}}{f} \quad (17)$$

式中: f 为凸透镜焦距; X_p, Y_p 为 P 点坐标值.

计算 θ_1 在水平和垂直方向投影 θ_2, θ_3 :

$$\theta_2 = \arctan \frac{OV}{QO} = \arctan \frac{X_p}{f} \quad (18)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{OW}{QO} = \arctan \frac{Y_p}{f} \quad (19)$$

现将预装配后的喷管端面圆心作为原点, 以喷管端面圆心与基准辅助螺栓孔圆心连线 l_1 为 Y 轴, 以喷管端面过圆心的法矢 n_1 为 Z 轴, 依照右手系定则建立坐标系 $s_1: O_1 - X_1 Y_1 Z_1$, 同理在大型筒体侧建立坐标系 $s_2: O_2 - X_2 Y_2 Z_2$. 凸透镜 PSD 板坐标系设定为 $O - XYZ$, 该坐标系与 $\{s_2\}$ 同向. 假设在坐标系 $\{m\}$ 下某一向量 J_m , 其在不同坐标系 $\{s_1\}, \{s_2\}, \{f\}$ 下的向量表示依次为 J_1, J_2, J_f , 可得

$$J_m = R_1^m \overline{J_1} = R_2^m \overline{J_2} = R_f^m \overline{J_f} \quad (20)$$

喷管预装配后端面法矢 n_1 变为法矢 n''_1, n''_1 在 $\{m\}$ 与 $\{s_1\}$ 下的转换公式为

$$n''_1 = R_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (21)$$

R_1^m 为坐标系 $\{m\}$ 与 $\{s_1\}$ 的转换矩阵:

$$R_1^m = [X_1'' \ Y_1'' \ Z_1'']^T [0 \ 0 \ 1] \{ [0 \ 0 \ 1]^T [0 \ 0 \ 1] \}^{-1}.$$

大型筒体侧端面法矢 n_2 在 $\{m\}$ 与 $\{s_2\}$ 下的转换公式为

$$n_2 = R_2^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (22)$$

R_2^m 为坐标系 $\{m\}$ 与 $\{s_2\}$ 的转换矩阵:

$$R_2^m = [X_2'' \ Y_2'' \ Z_2'']^T [0 \ 0 \ 1] \{ [0 \ 0 \ 1]^T [0 \ 0 \ 1] \}^{-1}.$$

大型筒体侧端面法矢在坐标系 $\{f\}$ 与 $\{s_1\}$ 下的转换公式为

$$n_f = (R_f^m) R_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (23)$$

这里, $R_f^m = \text{Rot}(X_f, \alpha) \text{Rot}(Z_f, \gamma) \text{Rot}(Y_f, \beta)$.

设法矢 n''_1 在 $\{s_2\}$ 中表示为 $n''_{1(s_2)}$, 可得

$$n''_{1(s_2)} = (R_2^m)^{-1} R_1^m [0 \ 0 \ 1]^T \quad (24)$$

由于坐标系 $\{f\}$ 下喷管端面法矢 n''_1 顺次绕轴 X_f, Z_f 转动 α', γ' 后的结果等价于 n''_1 顺次绕 $\{s_2\}$ 中的轴 X_2, Y_2 转动 θ_3, θ_2 后的结果, 进而可得

$$R_f^m \text{Rot}(X_f, \alpha') \text{Rot}(Z_f, \gamma') n_f = R_2^m \text{Rot}(Y_2, \theta_2) \text{Rot}(X_2, \theta_3) n''_{1(s_2)} \quad (25)$$

根据上式可解出 α', γ' . 启动数控系统, 驱动调姿机构带动喷管先绕俯仰轴转动 α' 角, 再绕动轴转动 γ' 角, 作依次微调姿后, 偏心距在线监测系统再实时测量喷管 – 大型筒体端面夹角偏差, 然后经解算再作一次喷管微调姿, 通过不断反馈、微调整, 直至满足配合端面平行度精度要求.

3. 1. 2 喷管 – 大型筒体装配端面扭转相位角误差补偿

图 9 为喷管激光发射线光斑形成示意图. 点 A', B', C' 为喷管侧激光发射线在大型筒体侧 PSD 接收板聚焦后形成的光斑点. 光斑点 A', B', C' 到 PSD 接收板中心的距离分别为 $A'A_2, B'B_2, C'C_2$, 若喷管端面与筒体端面相对扭转角不为零, 则 $A'A_2 \neq B'B_2 \neq C'C_2$, 此时需要对喷管作自转微调整, 在线检测系统再次实时检测光斑点到 PSD 接收板中心的刷新后距离. 假定喷管经多次微调后端面螺栓孔中心点 A_1, B_1, C_1 刷新为点 D_1, E_1, F_1 , 相应地落在 PSD 接收板上的聚焦光斑点刷新为 D', E', F' , 若偏心距满足 $D'A_2 = E'B_2 = F'C_2$, 则锁定喷管当前位姿, 姿态微调整工作彻底结束.

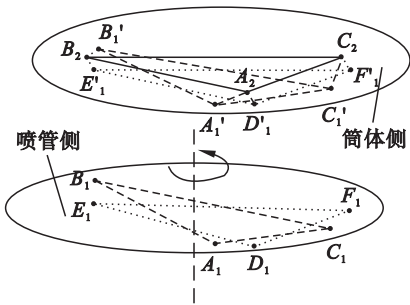


图 9 喷管激光发射线光斑形成示意图
Fig. 9 Schematic diagram of nozzle laser spot

4 试验验证

4.1 试验配置及相关参数

依照本文的装配调姿方法,在某化学动力厂喷管-大型筒体装配现场进行了现场试验测试。喷管配合部内径 $d = 650$ mm, 外径 $D = 1\,200$ mm, 喷管回转体长 $l_{pg} = 1\,300$ mm, 螺栓孔内径 $d_f = 40$ mm。大型筒体质量 $G = 20$ t, 长 $l_u = 5\,000$ mm。选用德国 KUKA 机器人, 激光跟踪仪选用海克斯康 Leica AT960 主机、T-probe 硬测头、T-scan 扫描测头完成状态测量和绝热层凸凹台扫描。位置传感器选用滨松 S2044。测量前需要进行测量系统标定, 并建立全局坐标系 $\{m\}$ 。

4.2 喷管位姿调整装配精度分析

利用所建立的位姿求解模型对测量数据进行处理与解算, 得到喷管的相对姿态调整量 $\alpha = 9.5018^\circ$, $\gamma = 13.164^\circ$, $\beta = 16.507^\circ$, 喷管端面圆心坐标 $O_1(-850.002, 1\,410.091, 1\,450.336)$ 及大型筒体端面圆心坐标 $O_2(-999.875, 1\,801.003, 1\,560.226)$ 。当调整机构作姿态 Euler(α, γ, β) 预调整后, 其喷管端面圆心解算值为 $O_1'(-803.496, 1\,366.802, 1\,277.293)$ 。接下来, 对未加入偏心距在线检测系统与加入了该系统后的装配各指标进行现场测验和评估。采用激光干涉仪对喷管配合部端面进行检验, 转换成喷管端面相对筒体端平面的夹角, 分别为 $\delta_1 = 0.012\,1^\circ$, $\delta_1' = 0.009\,1^\circ$ 。用标准圆柱和干涉仪联合检测喷管-筒体两配合端面圆心偏差, 测算后分别为 $\delta_2 = 0.037\,1$ mm, $\delta_2' = 0.028\,7$ mm, 同样再检测两侧辅助基准螺栓孔中心偏差, 经换算后得到喷管-筒体两配合部端面相对扭转角: $\delta_3 = 0.013\,2^\circ$, $\delta_3' = 0.009\,3^\circ$ 。检测结果对比可知, 偏心距在线检测系统的参与可显著提高装配精度, 装配最终效果不受激光跟踪仪测

点个数的显著影响, 且完全能够满足许用装配精度要求(喷管-大型筒体端面夹角小于 0.01° , 端面圆心偏心度小于 0.03 mm, 两端面相对扭转角小于 0.01°)。纠偏过程完全自动化, 因此装配质量提高的同时, 装配效率也大为提高。

5 结 论

本文使用激光跟踪仪采集尾喷管、大型筒体关键特征点空间坐标数据, 利用最小二乘法及随机霍夫变换原理建立了喷管、筒体当前位姿表征综合数学模型。以筒体侧位姿为参照, 基于关键姿态矢量反解尾喷管位姿调整各参量, 启动六自由度位姿调整数控机构实现喷管姿态预调整。设计了偏心距在线反馈闭环校准系统, 实时检测并反馈预装配质量误差, 规划微转动及微平动路径, 对尾喷管位姿多次微纠偏直至满足给定精度要求。试验结果表明: 装配过程平稳、高效, 能够实现筒体-尾喷管配合部的精准高效对接。

参考文献:

- [1] 乐韵斐, 钱根, 顾超. 大型风机叶片法兰轴孔自动对接系统的研究与分析[J]. 机电一体化, 2012(1): 36-39.
(Yue Yun-fei, Qian Gen, Gu Chao. Research and analysis of automatic butt joint system for large fan blade flange shaft hole[J]. *Journal of Mechanical and Electrical Integration*, 2012(1): 36-39.)
- [2] Estler W T, Edmundson K L. Large-scale metrology—an update[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 587-609.
- [3] 赵瑾. 喷管装配自动对准系统研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2008, 29(3): 224-227.
(Zhao Jin. Research on automatic alignment system of nozzle assembly[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2008, 29(3): 224-227.)
- [4] Paoli A, Rationale A V. Large yacht hull measurement by integrating optical scanning with mechanical tracking-based methodologies [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28: 592-601.
- [5] Arun K S. Least-squares fitting of two 3-D point sets [J]. *IEEE Transactions on PAMI*, 1987, 9(5): 698-700.
- [6] Lowe D. Three-dimensional object recognition from single two dimensional images [J]. *Artificial Intelligence*, 1987, 31: 355-395.
- [7] Almhdie A, Léger C, Deriche M, et al. 3D registration using a new implementation of the ICP algorithm based on a comprehensive lookup matrix: application to medical imaging [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28: 1523-1533.
- [8] Zou J. Indoor global positioning measurement system application for the aircraft flexible joint assembly [J]. *Journal of General Microbiology*, 2010, 74(1): 61-69.