

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.010

## 基于装配约束的飞机导管几何特征建模与误差补偿

蓝玉龙<sup>1,2</sup>, 陈松林<sup>2</sup>, 高文翔<sup>2</sup>, 李帮义<sup>1</sup>, 唐沐天<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 211106; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091)

**摘要:** 针对飞机导管实际装配过程中因装配应力大导致故障频发的问题, 提出了一种基于导管装配特征的误差补偿方法。首先采用几何建模法进行了导管装配过程的几何建模, 并提出了一种基于轴线矢量的导管装配模型建模方法。在此基础上, 采用罗德里格旋转公式建立了基于实际装配工况下的导管空间位姿计算模型。然后基于导管装配要求进行了装配约束分析并识别了导管装配关键约束特征。随后分析了不同约束形式下的导管装配场景, 并分别提出了单约束和关联约束下导管装配误差补偿方法。最后选用航空典型扩口导管进行试验研究, 分别进行导管装配误差补偿计算和导管装机气密性试验, 结果表明所提出的方法能够有效地实现导管理论空间位姿调节和参数补偿, 且补偿后的导管在装机气密性上明显优于未补偿的导管。

**关键词:** 装配约束; 特征建模; 特征识别; 误差补偿; 飞机导管装配

**中图分类号:** V2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2022)01-0086-09

## Pipe Geometric Feature Modeling and Error Compensation of Aircraft Based on Assembly Constraints

LAN Yulong<sup>1,2</sup>, CHEN Songlin<sup>2</sup>, GAO Wenxiang<sup>2</sup>, LI Bangyi<sup>1</sup>, TANG Mutian<sup>2</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

**Abstract:** An error compensation method based on assembly constraints of aircraft pipe is proposed for solving the problem of frequent failures caused by high assembly stress in the actual assembly process. Firstly, the pipe assembly process' geometric modeling is carried out using geometric modeling method, and a new modeling method based on axis vector is proposed. On this basis, the Rodrigues formula is used to establish a pipe space pose calculation model based on actual assembly conditions. Then, the assembly constraints are analyzed, and the key constraint features are identified based on the pipe assembly requirements. Subsequently, the pipe assembly scenarios under different constraint forms are analyzed, and the pipe error compensation methods under a single constraint and associated constraint are respectively proposed. Finally, a typical flaring pipe is selected for the test; the pipe assembly error compensation calculation and the pipe installation air tightness test are carried out, respectively. The results show that the proposed method could effectively realize the theoretical space pose adjustment and the pipe parameter compensation, and the air tightness of the compensated pipe is better than that of the uncompensated one.

**Key words:** assembly constraints; feature modeling; feature recognition; error compensation; aircraft pipe assembly

金属导管作为飞机主要零件, 大量应用在飞机      液压、环控、燃油系统等关键部位, 起到传递能源与

**收稿日期:** 2021-03-28; **修订日期:** 2021-08-17

**通信作者:** 高文翔, 男, 博士, 工程师, E-mail: gao\_scu@163.com。

**引用格式:** 蓝玉龙, 陈松林, 高文翔, 等. 基于装配约束的飞机导管几何特征建模与误差补偿[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 86-94. LAN Yulong, CHEN Songlin, GAO Wenxiang, et al. Pipe geometric feature modeling and error compensation of aircraft based on assembly constraints[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 86-94.

动力的作用<sup>[1]</sup>。在飞机航行的过程中,机体内部各个子系统开始工作,导管结构需承受高压和高频振动<sup>[2]</sup>。当导管存在较大装配应力时,会导致管路发生漏气、漏油等现象,从而使飞机中各个系统发生失压、能源泄露、着火等故障,严重影响飞机系统的性能和安全<sup>[3-4]</sup>。因此,研究如何减小导管装配应力、提升导管安装质量,已成为国内外学者密切关注的话题<sup>[5-7]</sup>。随着基于模型定义(Model based definition, MBD)技术的普及应用,航空导管设计水平得到了很大提升,飞机制造厂可根据设计数模直接生产导管,但在实际生产过程中,按设计理论数模制造的导管在飞机上安装时往往存在误差,导致管路发生渗漏问题的情况时有发生。

导管安装过程的误差组成包括制造误差和装配误差。制造误差是导管制造产生的误差,在导管制造误差研究中,宋飞飞等<sup>[8]</sup>采用多元逐步线性回归方法建立了制造误差与导管工艺参数之间的预测模型,其预测精度控制在5%以内。导管装配误差由定位误差和结构装配误差组成。定位误差是指导管装配定位所引起的误差,如导管的安装角度误差和位置误差。结构装配误差是指安装导管的基准结构自身的误差<sup>[9]</sup>。在定位误差研究中,张宗郁<sup>[10]</sup>基于数字化装配角度对导管焊接装配进行了研究,采用专用夹具将焊接导管各段的坐标系统一到基准坐标系中,分析了法兰盘与导管轴线夹角的变化规律并提出了一种导管装配相对误差主动补偿方法。曾德标等<sup>[11]</sup>提出了自主数字化重构夹具柔性定位装夹方案,采用矩阵式定位器,通过控制导管各直线段端点位置达到导管定位的目的。以上研究对于导管制造领域中带有法兰盘的焊接类导管制造具有较好的定位效果,但在无法兰盘导管在飞机上装配应用中,无法直接使用理论坐标点对导管进行定位,导致现有方法无法有效地应用到无法兰盘导管装配过程中。

目前通用建模方法主要有基于笛卡尔坐标系的三维空间坐标变换补偿方法,以及在此基础上衍生出的基于增量的误差建模补偿方法等。针对导管类结构,利用向量来对其轴线进行建模和补偿能够提高计算效率,如向量公差模型(Vector tolerance model, VTM)采用位置、方向、特征尺寸3个变量描述零件空间位姿状态<sup>[12]</sup>,赖际舟等<sup>[13]</sup>提出的等效旋转矢量法,对惯导系统圆锥误差进行了补偿。基于此,本文提出了一种基于导管装配特征的误差补偿方法,用于在飞机结构装配误差始终存在的情况下,通过补偿导管设计理论模型参数,实现导管制造满足装配要求的目的。首先采用几何建模法与罗德里格旋转公式<sup>[14]</sup>计算并建立了导管装

配过程矢量模型。在此基础上基于装配要求进行装配约束分析,识别了导管装配关键特征<sup>[15]</sup>。随后分析了导管装配场景并分别提出了单约束和关联约束下导管装配误差补偿方法。最后以航空典型扩口导管为例进行误差补偿计算和导管装机气密性试验,验证所提出的误差补偿方法的有效性。

## 1 装配特征识别

导管安装误差体现在预装配环节,在两个扩口导管预装配时,导管的一端固定在飞机结构上,通过沿导管轴线旋转调整导管位姿,使其满足两个导管连接处的位置关系及与卡箍等周边结构的位置关系。图1给出了两个扩口导管装配的结构示意图,导管1可以用有序点集表示为

$$P_1 = \{A_1, A_2, \dots, A_{n-1}, A_n\} \quad (1)$$

同理,导管2可以表示为

$$P_2 = \{B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_n\} \quad (2)$$

式中 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 和 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 分别表示端点 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 和 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 的坐标。

$O_1, O_2$ 分别表示导管1和导管2在飞机结构上的安装位置。两个导管的 $A_n$ 端和 $B_n$ 端实现连接。

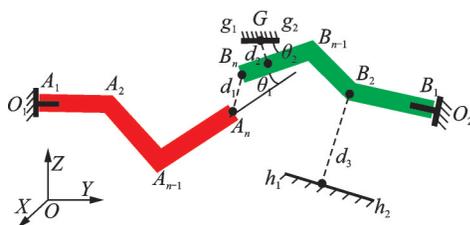


图1 导管装配结构示意图

Fig.1 Sketch of pipe assembly structure

为保证导管顺利安装到结构上,预装配过程需要满足结构装配要求,包括1个基本条件和5个装配特征。基本条件保证每个导管固定安装在飞机结构上,装配特征分为两个导管对接处的角度和距离约束、卡箍对导管中间部位的角度和距离约束、以及周边结构对导管的间隙约束。具体如下:

### (1) 基本条件

在将导管一端固定在飞机结构上时,采用螺纹连接,所以导管1的 $A_1$ 点与结构端 $O_1$ 必须重合,且满足直线 $A_1A_2$ 与结构 $O_1$ 端面保持垂直。导管2满足同样的要求。

### (2) 装配特征

①角度约束 $\theta_1$ :在两个导管位姿调整过程中,为保证连接处位置关系,导管1和导管2在连接端

满足导管装配角度约束,即直线  $A_{n-1}A_n$  与直线  $B_{n-1}B_n$  的夹角  $\theta_1$  必须满足理论约束条件  $\theta_1 \leq [\theta_1]$ , 其中  $[\cdot]$  表示理论值。

② 距离约束  $d_1$ : 在两个导管位姿调整过程中, 为保证连接处位置关系, 导管1的  $A_n$  端与导管2的  $B_n$  端满足距离约束, 即  $d_1 = |A_n B_n| \leq [d_1]$ 。

③ 角度约束  $\theta_2$ : 在两个导管位姿调整过程中, 为保证导管与卡箍的位置关系, 卡箍直线  $g_1 g_2$  与导管直线  $B_{n-1} B_n$  的夹角  $\theta_2$  必须满足理论约束条件  $\theta_2 \leq [\theta_2]$ 。

④ 距离约束  $d_2$ : 在两个导管位姿调整过程中, 为保证导管与卡箍的位置关系, 卡箍中心点  $G$  到导管直线  $B_{n-1} B_n$  的距离满足  $d_2 \leq [d_2]$ 。

⑤ 距离约束  $d_3$ : 在两个导管位姿调整过程中, 为保证导管与其他周边结构的位置关系, 导管与周边结构距离  $d_3$  满足  $|d_3 - h^*| \leq [d_3]$ 。

其中角度约束  $\theta_1$  和距离约束  $d_1$  是保证导管对接接头处密封性能的主要参数, 该参数过大会导致导管基本的密封功能丧失, 使飞机系统失效, 此类问题发生概率较高, 其重要程度最高, 需优先满足。角度约束  $\theta_2$  和距离约束  $d_2$  是反映导管固定卡箍与导管之间位置关系的参数, 其大小主要影响导管装配后的应力, 当应力过大时会使得导管发生渗漏、变形等问题, 但此类问题发生概率较低, 重要程度次之。距离约束  $d_3$  是导管周边结构与导管之间的距离, 其理论值被定义为  $h^*$ 。当距离过小时会导致飞行过程中导管与周边结构产生碰撞, 导致导管损伤, 但其发生概率较低, 重要程度最低。

## 2 矢量建模

在特征识别的基础上进行基于装配特征的导管矢量建模。首先提取出导管轴线矢量理论值及其安装结构的轴线矢量实测值, 然后建立实际装配状态下导管矢量模型。

### 2.1 轴线矢量提取

扩口类导管在与飞机结构固定端通常具有绕轴线旋转的冗余自由度, 如图2所示, 导管1可以绕轴线  $A_1 A_2$  旋转。

采用旋转矢量法对导管整体空间位置进行变换时, 需要导管矢量端点以及各个直线段轴线的矢量。对导管结构特征进行提取, 包括导管接头点、直线部位、转折点, 并用矢量集表示, 如图2所示, 则导管1和导管2可以表示为

$$a = \{a_1, \dots, a_n\} \quad (3)$$

$$b = \{b_1, \dots, b_n\} \quad (4)$$

导管1安装结构  $O_1$  的轴线矢量表示为  $s_1$ , 导管2安装结构  $O_2$  的轴线矢量表示为  $s_2$ 。

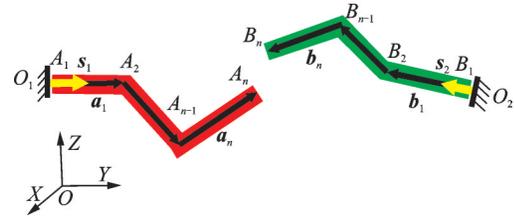


图2 导管装配矢量表示法

Fig.2 Representation method of pipe assembly in vectorization

### 2.2 模型建立

在实际装配过程中, 理想的导管装配模型与实际情况存在较大差距。如图3所示, 虚线部分表示导管2的理论安装位置。因导管结构存在偏差导致导管安装后存在角度误差和间隙, 为解决结构误差对导管装配精度的影响, 需要结合装配误差对导管装配环境进行建模。

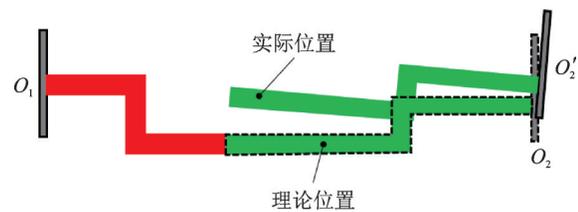


图3 导管装配模型示意图

Fig.3 Sketch of pipe assembly model

图4给出了结构误差环境下导管矢量模型, 在导管1固定的情况下, 导管2的理论安装位置如图4中虚线部分所示, 表示为矢量集  $b = \{b_1, \dots, b_n\}$ , 实际导管位置矢量集为  $b' = \{b'_1, \dots, b'_n\}$ 。在实际安装过程中, 首先连接结构端点  $O_2$  与导管2的起始端点  $B'_1$ , 保证导管2中矢量  $b'_1$  与结构轴线  $s_2$  平行, 形成导管2实际安装状态轴线  $b'$ 。通过测量可以直接得到结构端点  $O_2$  与结构轴线  $s_2$  的实际位置。然后, 结合导管2的理论位置采用旋转矢量法对导管2的实际安装位置进行计算。

在计算过程中, 采用罗德里格旋转公式, 该方

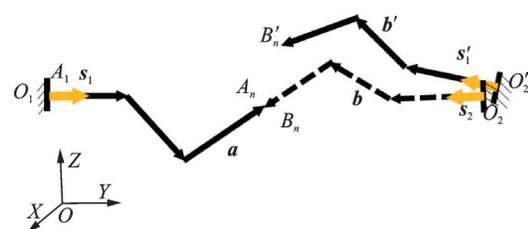


图4 结构误差环境下导管矢量模型

Fig.4 Vectorized model of pipe assembly in structural error

法采用空间轴矢和旋转角度两个要素对空间任意矢量进行变换。为确保导管 2 的末端矢量  $b'_1$  与结构轴线  $s_2$  同轴,计算  $b'_1$  的旋转轴与旋转角度。

(1) 计算旋转轴  $e_{P_1}$

$$e_{P_1} = \frac{s'_2 \times b_1}{\text{norm}(s_2 \times b_1)} \quad (5)$$

(2) 计算旋转角度  $\alpha$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{s_2 \cdot b_1}{\|s_2\| \|b_1\|}\right) \quad (6)$$

然后建立导管 2 整体旋转模型,计算导管 2 变换后的矢量

$$b' = b \cos \alpha + (e_{P_1} \times b) \sin \alpha + e_{P_1} (e_{P_1} \cdot b) (1 - \cos \alpha) \quad (7)$$

式中:  $\text{norm}(\cdot)$  表示计算矢量大小;  $e_{P_1}$  为旋转轴的单位矢量;  $\alpha$  为旋转角。

### 3 误差补偿方法

#### 3.1 装配场景分析

目前导管装配场景分为单约束装配和关联约束装配两种。图 5 给出了两种装配约束场景。其中,图 5(a)为单约束装配情况,导管的每段仅受来自单一结构的约束;图 5(b)为关联约束装配情况,导管至少有一段受到来自不同结构的共同约束,如导管  $B_3$  至  $B_4$  段同时受到  $d_1$  与  $d_2$  的距离约束。

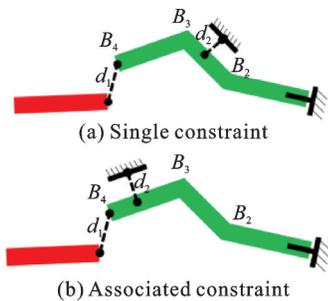


图 5 装配约束场景分析

#### 3.2 补偿流程

图 6 给出了导管装配误差补偿流程,主要有如下步骤:

(1) 计算出需要进行补偿的装配关键特征并对特征进行判断分类;

(2) 分别补偿单约束特征和关联约束特征并确定补偿后的导管参数。

##### 3.2.1 计算特征补偿量

补偿前首先识别出需要补偿的装配关键特征。上文中所列的 5 项装配关键特征的边界条件表示为  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ , 如表 1 所示。

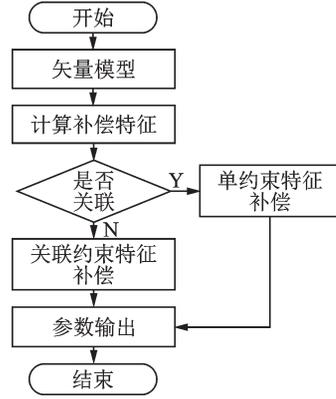


图 6 误差补偿流程

Fig.6 Flow chart of error compensation technique

表 1 边界条件余量对照表

Table 1 Boundary condition allowance comparison table

边界条件	特征名称	理论值	余量许用范围
$E_1$	角度约束 $\theta_1$	0	$\leq [\theta_1]$
$E_2$	距离约束 $d_1$	0	$\leq [d_1]$
$E_3$	角度约束 $\theta_2$	0	$\leq [\theta_2]$
$E_4$	距离约束 $d_2$	0	$\leq [d_2]$
$E_5$	距离约束 $d_3$	$h^*$	$\leq [d_3]$

调整后导管端点和矢量集可表示为  $b' = \{B'_1, b'_1, \dots, b'_n\}$ , 其中  $B'_1$  表示导管矢量起始端  $B_1$  的坐标,  $b'_i (i \in [1, n])$  表示各直线段矢量。计算导管调整后各边界条件满足程度, 具体计算方法如下:

(1) 计算边界条件  $E_1$ , 公差范围为  $[\theta_1]$

$$E_1 = \arccos\left(\frac{b'_n \cdot b_n}{\|b'_n\| \|b_n\|}\right) \quad (8)$$

(2) 计算边界条件  $E_2$ , 公差范围为  $[d_1]$

$$E_2 = \left| B'_1 + \sum_{i=1}^n b'_i - B_1 - \sum_{i=1}^n b_i \right| \quad (9)$$

(3) 计算边界条件  $E_3$ , 公差范围为  $[\theta_2]$

$$E_3 = \arccos\left(\frac{b'_k \cdot b_k}{\|b'_k\| \|b_k\|}\right) \quad (10)$$

式中  $b'_k$  和  $b_k$  分别表示实际导管和理论导管第  $k$  根矢量与卡箍连接。

(4) 计算边界条件  $E_4$ , 公差范围为  $[d_2]$

$$E_4 = \left( G - A'_1 - \sum_{i=1}^k b'_i \right) \cdot b'_k / \|b'_k\| \quad (11)$$

式中  $G, A'_1$  分别表示导管矢量起始端点  $G$  和  $A'_1$  的坐标。

(5) 计算边界条件  $E_5$ , 公差范围为  $d_3 - [d_3]$

$$E_5 = \min \left\{ \left[ \mathbf{h}_1 + l \overrightarrow{\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2} - \mathbf{B}_1 - \sum_{i=1}^j \mathbf{b}_i' \right] \cdot \frac{\mathbf{b}_j'}{|\mathbf{b}_j'|} \right\} - d_3$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中: $j$ 表示导管第 $j$ 根向量存在可能导致间隙值不满足要求的其他结构; $\mathbf{h}_1$ 、 $\mathbf{h}_2$ 表示周边结构的两个端点; $\mathbf{h}_1$ 表示端点 $\mathbf{h}_1$ 的坐标; $l$ 为长度因子,且 $0 \leq l \leq 1$ 。

### 3.2.2 单约束特征补偿

针对导管装配矢量模型进行补偿,根据影响装配的重要程度对前4项装配关键特征误差进行补偿,将导管分成单独的直线段进行补偿,然后对各直线段进行组合形成一完整的基于装配特征的补偿模型。当补偿过程中发现两个关键特征冲突时,按照特征的重要程度进行差异化补偿。

#### (1) 消除导管1和导管2连接端的误差

该步骤涉及的装配关键特征包括角度约束 $\theta_1$ 和距离约束 $d_1$ 。图7(a)给出了特征 $\theta_1$ 与 $d_1$ 的误差补偿示意图,其补偿过程为通过平移、旋转的方式调整导管2末端矢量 $\mathbf{b}_n'$ ,使其与导管1末端矢量 $\mathbf{a}_n$ 同轴,且首尾相连,即

$$\begin{cases} \mathbf{b}_n^{(1)} = k \mathbf{a}_n \\ |\mathbf{b}_n^{(1)}| = |\mathbf{b}_n'| \\ \mathbf{B}_n^{(1)} = \mathbf{A}_n \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{B}_n^{(1)}$ 表示导管2补偿后末端端点 $\mathbf{B}_n^{(1)}$ 的坐标; $\mathbf{A}_n$ 表示导管1末端端点 $\mathbf{A}_n$ 的坐标; $k$ 为常数,表示矢量 $\mathbf{b}_n^{(1)}$ 与矢量 $\mathbf{a}_n$ 平行。

#### (2) 消除导管固定卡箍与导管之间的误差

该步骤涉及的装配关键特征包括角度约束 $\theta_2$ 和距离约束 $d_2$ 。图7(b)给出了补偿示意,通过调整导管2与卡箍相配合的一根直线段矢量 $\mathbf{b}_j'$ ,使其与卡箍轴线矢量 $\overrightarrow{\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2}$ 同轴,且通过卡箍的中心点 $G$ ,且矢量端点与点 $G$ 的距离保持不变,即

$$\begin{cases} \mathbf{b}_j^{(1)} = r \overrightarrow{\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2} \\ |\mathbf{b}_j^{(1)}| = |\mathbf{b}_j'| \\ |\mathbf{B}_j^{(1)} - \mathbf{G}| = |\mathbf{B}_j' - \mathbf{G}| \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{b}_j^{(1)}$ 表示补偿前后导管2第 $j$ 根矢量; $\mathbf{B}_j^{(1)}$ 和 $\mathbf{B}_j'$ 分别表示导管2第 $j$ 根矢量补偿前后末端端点 $\mathbf{B}_n^{(1)}$ 和 $\mathbf{B}_j'$ 的坐标; $r$ 为常数,表示矢量 $\mathbf{b}_j^{(1)}$ 与矢量 $\overrightarrow{\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2}$ 平行。

#### (3) 补偿后组合

通过(1)和(2)进行补偿后导管各段矢量已满足装配关键特征要求,通过保证矢量方向不变,调整矢量大小的方式使导管2各直线段相交来补偿导管完整性,最终使导管2成为完整导管。图7(c)

给出了补偿后示意图,具体操作流程为

$$\begin{cases} \mathbf{B}_n^{(1)} - \mathbf{b}_n^{(2)} = \mathbf{B}_i^{(1)} + k_1 \mathbf{b}_i^{(1)} \\ \mathbf{B}_i^{(1)} - (1 + k_2) \mathbf{b}_i^{(1)} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{b}_1^{(2)} \\ \mathbf{b}_i^{(2)} = (k_1 + k_2 + 1) \mathbf{b}_i^{(1)} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $k_1$ 、 $k_2$ 表示导管2一根向量 $\mathbf{b}_i^{(1)}$ 与补偿后向量 $\mathbf{b}_i^{(2)}$ 的大小比例关系,为过渡参数。

通过对式(15)求解后得到补偿后导管2完整的矢量表达式为 $\mathbf{b}^{(2)} = \{\mathbf{b}_1^{(2)}, \dots, \mathbf{b}_n^{(2)}\}$ 。

最终得到导管2补偿后的理论矢量模型,表示为 $\mathbf{b}^{\text{th}} = \{\mathbf{A}_1^{\text{th}}, \mathbf{b}_1^{\text{th}}, \dots, \mathbf{b}_n^{\text{th}}\}$ ,其中 $\mathbf{b}_i^{\text{th}} = \mathbf{b}_i^{(2)}$ ( $i \in [1, n]$ )表示补偿后各直线段矢量, $\mathbf{A}_1^{\text{th}}$ 表示补偿后导管模型起始端端点 $\mathbf{A}_1^{\text{th}}$ 的坐标。

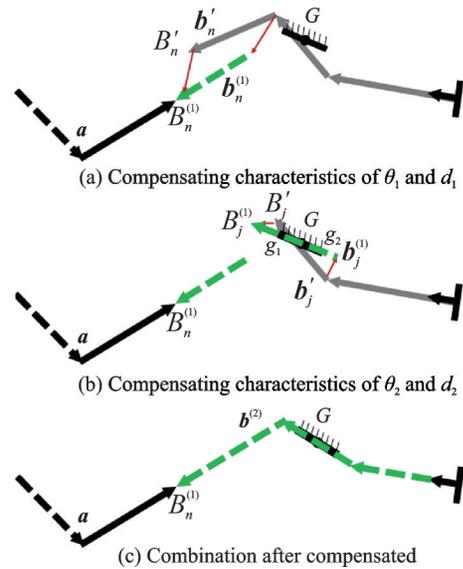


图7 导管装配关键特征误差补偿示意图

Fig.7 Error compensation technique sketch of main characteristics of pipe assembly

### 3.2.3 关联约束特征补偿

当两个关键特征需在同一根矢量上进行补偿时,若完全补偿其中一项装配关键特征,可能导致其他关键特征超出许用值范围而无法进行补偿。图8给出了导管对接处角度、距离误差和卡箍与导管2直线段角度、距离误差冲突时的示意图,图中 $\beta_1 \sim \beta_4$ 分别表示卡箍轴线与补偿后导管2第 $j$ 根矢量的夹角、导管1末端矢量 $\mathbf{a}_n$ 与补偿后导管2第 $j$ 根矢量的夹角、卡箍轴线与导管1末端矢量 $\mathbf{a}_n$ 的夹角、导管1末端矢量 $\mathbf{a}_n$ 与补偿前导管2第 $j$ 根矢量的夹角。 $d_1'$ 与 $d_2'$ 分别表示导管2补偿后端点与导管1端点的距离、导管2补偿后直线段与卡箍中心点距离。具体计算方法如下:

(1)  $\beta_2 \sim \beta_4$  安装矢量夹角公式计算,其中 $\beta_1$ 为未知数

$$\begin{cases} \beta_3 = \arccos\left(\frac{\vec{g}_1 \vec{g}_2 \cdot \vec{a}_n}{|\vec{g}_1 \vec{g}_2| |\vec{a}_n|}\right) \\ \beta_4 = \arccos\left(\frac{\vec{a}_n \cdot \vec{b}_j}{|\vec{a}_n| |\vec{b}_j|}\right) \\ \beta_2 = \beta_3 - \beta_1 \end{cases} \quad (16)$$

(2) 计算  $d'_1$  与  $d'_2$

首先根据  $\vec{b}_j$  与  $\vec{a}_n$  计算出  $\vec{b}'_j$  与  $\vec{a}_n$  的垂直向量, 利用罗德里格旋转公式, 按照式(7)计算出  $\vec{b}'_j$  关于  $\beta_1$  的函数, 可表示为

$$\vec{b}(\beta_1)' = \vec{b} \cos\beta_1 + (\vec{e}_{p_j} \times \vec{b}) \sin\beta_1 + \vec{e}_{p_j} (\vec{e}_{p_j} \cdot \vec{b}) (1 - \cos\beta_1) \quad (17)$$

利用式(17)求解结果, 得到

$$\begin{cases} d'_1 = |\vec{B}' - \vec{A}| \\ d'_2 = \overline{GB'} \cdot \vec{b}'_j / |\vec{b}'_j| \end{cases} \quad (18)$$

最后联立出角度约束  $\beta_1$  与  $\beta_2$ , 距离约束  $d'_1$  与  $d'_2$  的不等式组

$$\begin{cases} d'_1 \leq [d_1] \\ d'_2 \leq [d_2] \\ \beta_1 \leq [\theta_1] \\ \beta_2 \leq [\theta_2] \end{cases} \quad (19)$$

式中  $[\theta_1]$ ,  $[\theta_2]$  和  $[d_1]$ ,  $[d_2]$  分别表示角度约束  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和距离约束  $d_1$ ,  $d_2$  的许用值。

为优先满足两根导管对合处角度和距离误差  $\beta_2$  与  $d'_1$ , 当求解出  $\beta_1$  及点  $B'$  的空间坐标值  $(X, Y, Z)$  的取值范围时, 优先保证  $\beta_2$  与  $d'_1$  取最小值, 求解出  $\beta_1$  及  $B'$ , 代入式(17)后得到导管 2 补偿后的理论矢量模型  $\vec{b}^{th} = \{B_1^{th}, b_1^{th}, \dots, b_n^{th}\}$

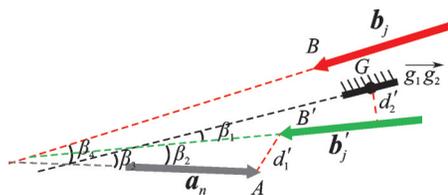


图 8 关键特征差异化误差补偿示意图

Fig.8 Error compensation technique sketch of differentiated main characteristics

## 4 试验与分析

对所提出的导管误差补偿方法和制造误差评估方法分别进行试验验证。图 9 给出了生产现场某两根导管在理论状态下的安装结构示意图, 导管材料为铝合金材质, 直径为 20 mm, 本文研究的是对导管预装配误差进行补偿, 在导管预装配阶段, 导

管所受外力仅为导管自身重力, 其引起导管自身形变可忽略。导管 1 和导管 2 在中间部位通过管接头连接, 导管端部和中间部分受到飞机装配结构部分的约束。图 10 给出了导管局部连接结构, 其中导管扩口部分与管接头锥形面以及平管嘴锥形面通过外套螺母的挤压形成密封, 外套螺母与管接头通过螺纹连接产生轴向预紧力。

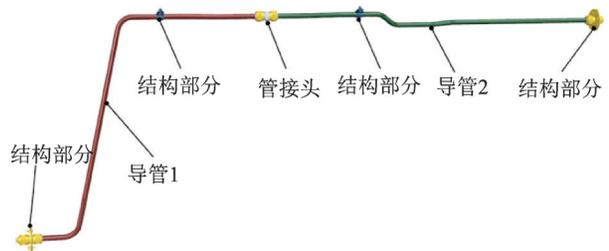


图 9 试验导管安装结构

Fig.9 Structure of experimental pipe assembly

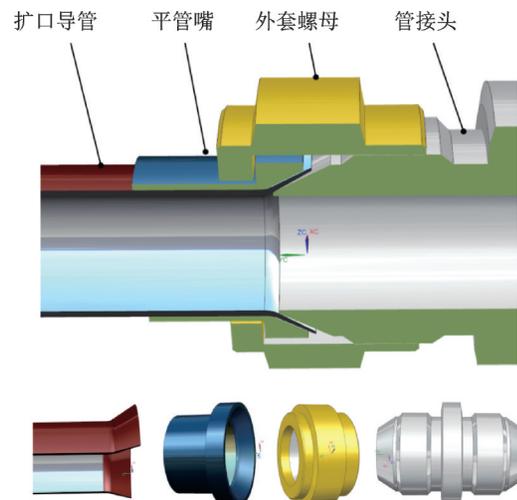


图 10 导管局部连接结构

Fig.10 Connected structure of partial pipe assembly

表 2 给出了导管 1 与导管 2 的理论模型参数,  $A_1 \sim A_4$  与  $B_1 \sim B_6$  分别为导管理论端点的坐标值, 参考坐标系为飞机坐标系。表 3 给出了两导管安装结构外形参数, 包括结构 1 和结构 2 的端点坐标  $O_1$  和  $O_2$ 、端点矢量  $s_1$  和  $s_2$ , 以及其他约束相关的一些参数坐标。

### 4.1 补偿量计算

按照所提出的导管误差补偿方法对试验导管进行补偿。根据表 2 提取得到的导管 1 与导管 2 的理论模型轴线矢量, 以及表 3 所测量得到的安装结构轴线矢量对导管 2 进行基于装配特征的空间位姿调整。首先利用式(5,6)计算出导管 2 的  $b_1$  向量与安装结构轴线矢量的夹角  $\alpha$ , 然后利用式(7)计算导管 2 旋转后的矢量集合  $\vec{b}'$ 。表 4 给出了导管 2 调整后的参数值  $B'_1 \sim B'_6$ 。图 11 给出了导管 2 调整

表2 试验导管1与导管2理论模型参数

Table 2 Parametric model of pipe 1 and pipe 2 (Theoretical)

导管	端点	X	Y	Z
1	A <sub>1</sub>	-50.00	4 109.00	100.00
	A <sub>2</sub>	-50.00	4 182.38	100.00
	A <sub>3</sub>	366.95	4 279.77	51.02
	A <sub>4</sub>	366.95	4 557.01	44.88
2	B <sub>1</sub>	350.00	5 312.17	50.00
	B <sub>2</sub>	350.00	4 986.45	50.00
	B <sub>3</sub>	350.00	4 951.62	70.00
	B <sub>4</sub>	350.00	4 861.49	70.00
	B <sub>5</sub>	366.95	4 821.14	39.03
	B <sub>6</sub>	366.95	4 596.69	44.00

表3 试验导管结构部分参数

Table 3 Parameters of experimental pipe in structure part

参数	X	Y	Z
结构1端点 O <sub>1</sub>	-50.00	4 109.00	100.00
矢量 s <sub>1</sub>	0	1	0
结构2端点 O <sub>2</sub>	348.54	5 311.55	50.10
矢量 s <sub>2</sub>	-0.003	1.000	0.001
起点 h <sub>1</sub>	582	4 457	0
矢量 h <sub>1</sub> h <sub>2</sub>	-1 164	0	0
矢量 g <sub>1</sub> g <sub>2</sub> <sub>1</sub>	0	-13	0
中心点 G	366.23	4 363.31	49.20
矢量 g <sub>1</sub> g <sub>2</sub> <sub>2</sub>	0.00	-13.00	0.29
中心点 G <sub>2</sub>	365.50	4 655.32	42.79

前后的空间位姿状态。

通过计算可以得到导管2调整前后末端点 B<sub>6</sub> 与 B'<sub>6</sub> 的距离为

$$\Delta d_{B_6} = |B_6 - B'_6| = 1.5893 \text{ mm} \quad (20)$$

式中 B<sub>6</sub>、B'<sub>6</sub> 分别为末端点 B<sub>6</sub>、B'<sub>6</sub> 的坐标。

导管2调整前后末端矢量 b<sub>5</sub> 与 b'<sub>5</sub> 的夹角为

$$\Delta \theta_{b_5} = \arccos \frac{b_5 \cdot b'_5}{|b_5| |b'_5|} < 1 \times 10^{-4} \quad (21)$$

然后,根据式(8~14),结合表3给出的导管装配关键特征参数,对导管1进行补偿。表4给出了导管1补偿后的参数,图12给出了导管1补偿后的空间位姿状态。

通过应用旋转矢量法对导管2进行空间位姿调整,以及对导管1进行基于装配特征的误差补偿,可以发现:

(1)所提出的方法能够有效地实现导管2的位姿调节,通过实验发现调整前后导管2端头距离偏

表4 导管2调整后及导管1补偿后的模型参数

Table 4 Parametric model of adjusted pipe 2 and compensated pipe 1

导管及其状态	端点	X	Y	Z
导管2调整后	B' <sub>1</sub>	348.54	5 311.55	50.10
	B' <sub>2</sub>	348.54	4 985.83	50.10
	B' <sub>3</sub>	348.54	4 951.00	70.10
	B' <sub>4</sub>	348.54	4 860.87	70.10
	B' <sub>5</sub>	365.49	4 820.52	39.13
	B' <sub>6</sub>	365.49	4 596.07	44.10
导管1补偿后	A' <sub>1</sub>	-50.00	4 109.00	100.00
	A' <sub>2</sub>	-50.00	4 182.38	100.00
	A' <sub>3</sub>	365.49	4 279.22	51.07
	A' <sub>4</sub>	365.49	4 556.42	44.97

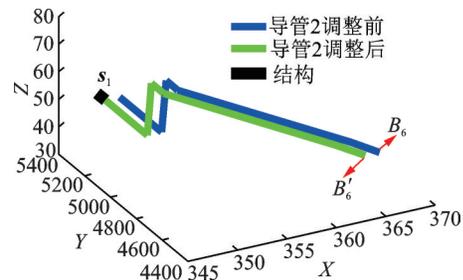


图11 装配环境下导管理论模型图

Fig.11 Theoretical model of pipe assembly

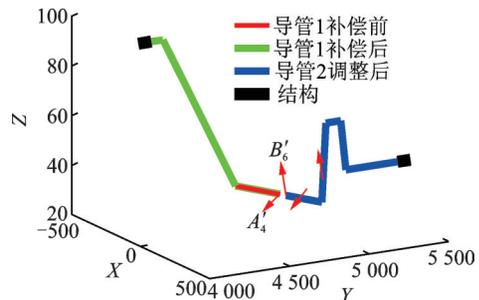


图12 导管补偿前后效果对比图

Fig.12 Effect comparison before and after pipe compensation

差为 1.5893 mm,角度偏差小于 1 × 10<sup>-4</sup> 度。

(2)通过表2和表3的对比可以发现补偿前后导管1的位姿发生了改变。

#### 4.2 装配气密性试验

分别选取补偿前后的2组导管进行装机、气密性试验,图13给出了补偿前后的导管预装机效果。其中,图13(a)为补偿前的导管装机图,导管接头轴线和导管末端轴线存在明显偏斜;图13(b)为补偿后的导管装机图,导管接头与导管末端轴线同轴度较好。

根据航空工业标准 HB4-1—2002《扩口管路连接件通用规范》,用恒定扭矩 60 N·m 的扳手进行导

管安装。然后根据装配气密性要求,对装配后的导管进行充气,使管路内部压力达到 0.9 MPa,并保压时间 5 min 观察管路压力变化。图 14 给出了两根导管保压期间气压值变化情况,从图中可以看出所选用的两个导管在误差补偿前发生了泄压现象。然而采用误差补偿方法进行装配后的导管其内部压力保持恒定。

装机试验结果表明所提出的误差补偿方法能够避免由安装环境引起的装配问题,提高了导管装配的气密性。

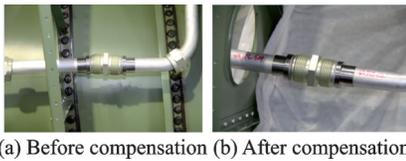


图 13 补偿前后导管 1 实物装机对比

Fig.13 Comparison of installed pipe 1 before and after compensation

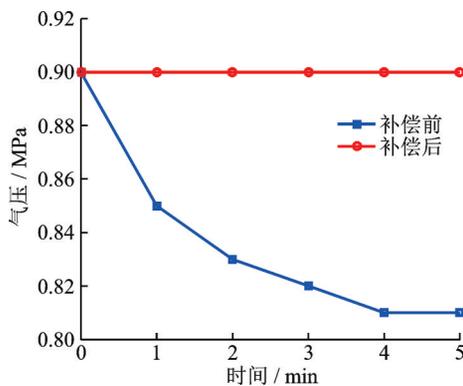


图 14 导管 1 补偿前后气密性对比图

Fig.14 Airtightness comparison of pipe 1 before and after compensation

## 5 结 论

本文建立了导管装配过程矢量模型,并分别提出了单约束和关联约束下导管装配误差补偿方法,通过导管装配误差补偿计算和导管装机气密性试验进行补偿方法验证。结果表明:

(1)所提出的方法能够有效地实现导管的位姿调节,通过计算得出导管 2 端头距离补偿量为 1.589 3 mm,角度补偿量小于  $1 \times 10^{-4}$  度。

(2)补偿后的导管在装机气密性上明显优于未补偿的导管。

本文在试验部分进行了单约束装配环境下的导管误差补偿方法验证,后续工作将进一步开展关联约束及其他复杂约束环境下的导管装配误差补偿方法研究及验证。

## 参考文献:

- [1] 樊未,郑联语,王亚辉.面向管路组件装配的自动化可重构柔性工装系统[J].计算机集成制造系统,2018,24(11):38-52.  
FAN Wei, ZHENG Lianyu, WANG Yahui. Automatic reconfigurable and flexible fixture system for pipeline components in assembly process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(11): 38-52.
- [2] 龚昊,江华,卞刚.飞机燃油导管柔性接头泄露量计算[J].科学技术与工程,2019,19(25):358-363.  
GONG Hao, JIANG Hua, BIAN Gang. Calculation and analysis of aircraft fuel line flexible coupling leakage[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 358-363.
- [3] 舒送,范鑫,刘峰,等.某型飞机肘形导管断裂故障分析与改进验证[J].机床与液压,2019,47(2):176-180.  
SHU Song, FAN Xin, LIU Feng, et al. Fracture failure analysis and improvement verification of elbow tube in a certain type of aircraft[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(2): 176-180.
- [4] 施红.飞机空气导管安全性设计与泄漏探测技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.  
SHI Hong. Study on safety design and leakage detection technology of the aircraft pneumatic duct system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [5] 於为刚,陈果,刘彬彬,等.飞机管道颗粒碰撞阻尼器设计与试验验证[J].航空学报,2018. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22264.  
YU Weigang, CHEN Guo, LIU Binbin, et al. Design of a particle damping absorber and experimental study on vibration damping of the pipe[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22264.
- [6] 王振兴,邱明星,王建军.拉伸载荷下管路连接副的密封性分析[J].航空动力学报,2011,26(8):1866-1870.  
WANG Zhenxing, QIU Mingxing, WANG Jianjun. Sealing performance of pipeline connection under the tensile load[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1866-1870.
- [7] 陈果,罗云,郑其辉,等.复杂空间载流管道系统流固耦合动力学模型及其验证[J].航空学报,2013,34(3):597-609.  
CHEN Guo, LUO Yun, ZHENG Qihui, et al.

- Fluid-structure coupling dynamic model of complex spatial fluid-conveying pipe system and its verification [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(3): 597-609.
- [8] 宋飞飞, 杨合, 李恒, 等. TA18 高强钛管数控弯曲回弹工艺参数影响的显著性分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(1): 43-48.  
SONG Feifei, YANG He, LI Heng, et al. Significance analysis of processing parameters effect on springback in high strength TA18 tube NC bending [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(1): 43-48.
- [9] BALAYKIN A V, BEZSONOV K A, NEKHOROSHEV M V, et al. Developing parametric models for the assembly of machine fixtures for virtual multiaxial CNC machining centers[C]//Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.]: IOP, 2018.
- [10] 张宗郁. 薄壁铝合金导管数字化装配及焊接偏差主动补偿[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
ZHANG Zongyu. Active compensation of the deviation in the digital assembly and welding of thin-wall aluminum alloy tube[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] 曾德标, 胥军, 石章虎, 等. 飞机导管数字化柔性定位装夹技术探讨[J]. *航空制造技术*, 2017(14): 45-48.  
ZENG Debiao, XU Jun, SHI Zhanghu, et al. Study on digital and flexible positioning technology of airplane pipes[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(14): 45-48.
- [12] MARTINSEN K. Vectorial tolerancing for all types of surfaces[J]. *Advances in Design Automation*, 1993, 65(2): 187-198.
- [13] 赖际舟, 吕品, 张玲, 等. 旋转惯导系统中的圆锥误差分析及其补偿[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(2): 159-164.  
LAI Jizhou, LV Pin, ZHANG Ling, et al. Coning error analysis and compensation in rotation inertial navigation system[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(2): 159-164.
- [14] KANG Yihao, HUANG Bihua, LU Peimin, et al. Reverse engineering of a Hamiltonian for a three-level system via the Rodrigues' rotation formula[J]. *Laser Physics Letters*, 2017. DOI: 10.1088/1612-202X/aa512d.
- [15] 熊青春, 王家序, 周青华. 融合机床精度与工艺参数的铣削误差预测模型[J]. *航空学报*, 2018. DOI: 10.7527/S1000-6893.  
XIONG Qingchun, WANG Jiaxu, ZHOU Qinghua. Prediction model of machining errors based on precision and process parameters of machine tools[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018. DOI: 10.7527/S1000-6893.

(编辑: 胥橙庭)