

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.011

基于间隙连接件和多维矢量环的机构装配精度预测

赵东平, 田锡天, 耿俊浩⁺

(西北工业大学 CAPP 与制造工程软件研究所, 陕西 西安 710072)

摘要:为了准确有效地实现机构装配的精度预测,提出一种基于间隙连接件和多维矢量环的精度预测方法。根据机构装配的特点,将其偏差源分为零件几何位置偏差、几何形状偏差和装配位置偏差三类;建立了装配间隙连接件模型,用间隙连接件的定向角描述零件的配合位置;定义了零件的基准参考结构,并基于装配约束建立了零件的基准路径和偏差传递路径、装配体多维矢量环和矢量方程;利用一阶泰勒展开和矩阵变换方法求解偏差源敏感度矩阵,进而用极值法得到了机构装配精度预测值。以某飞机内襟翼机构装配精度预测为例,验证了所提方法的有效性。

关键词:偏差源;间隙连接件;偏差传递路径;多维矢量环;机构装配

中图分类号:TP391.7 **文献标识码:**A

Kinematic assembly precision prediction based on gap connectors and multidimensional vector loop

ZHAO Dong-ping, TIAN Xi-tian, GENG Jun-hao⁺

(Institute of CAPP & Manufacturing Engineering Software,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To achieve kinematic assembly precision prediction effectively and accurately, a precision prediction method was proposed based on gap connectors and multidimensional vector loop. According to characteristics of kinematic assembly, deviation source was divided into three types: geometric location deviation, geometric form variation and assembly part location deviation. The gap connections model was set up for kinematic assembly and parts fitting position is described by the orientation angle of gap connections. Part's datum reference frame was defined, and datum path and deviation transfer path as well as assembly multidimensional vector loop and vector equations were established based on assembly constraints. The first order Taylor expansion and matrix transformation method were used to solve the assembly deviation source sensitivity and precision prediction value of kinematic assembly. The effectiveness and efficiency of the proposed method was verified by taking wing flap rocker as a research example.

Key words: deviation source; gap connectors; deviation transfer path; multidimensional vector loop; kinematic assembly

0 引言

飞机装配具有精度要求高、协调难度大的特点,装配精度预测是保证装配质量的有效方法^[1-3]。装配精度预测通过选用合适的算法,在虚拟环境下对包含零件容差与装配容差的产品装配模型进行仿真分析,来预测目标特性的装配精度和装配成功率,并

在精度预测的基础上进行公差优化^[4]。飞机产品的连接结构复杂、形式多样,如何在设计阶段对装配精度进行准确预测,是目前飞机研制中亟待解决的难题之一。

传统的基于二维图纸的飞机装配精度分析方法主要依靠设计人员的经验,通过经验公式和手工计算方式完成装配精度预测。针对传统的手工计算方

收稿日期:2014-07-23;修订日期:2014-12-25。Received 23 July 2014; accepted 25 Dec. 2014.

基金项目:国防基础科研计划资助项目(A0520110036)。**Foundation item:** Project supported by the National Defense Basic Research Program, China(No. A0520110036).

法工作效率低且校核困难的问题,文献[5-7]在虚拟环境下基于具体实例实现了装配精度的快速计算和校核,但仍采用经验公式,无法满足复杂连接形式下装配精度预测的准确性;文献[8-9]将偏差描述扩展到三维空间,构建了三维偏差传递过程状态的空间模型,但仅考虑了定位偏差对装配精度的影响。在面向三维空间的装配精度预测方面,唐健钧等^[10]从完整描述精度的信息出发,基于模型定义技术建立了包含初级层、定义层、预测层和优化层的集成精度信息模型,为数字量驱动的装配精度预测奠定了基础;LIU 等^[11-12]提出面向几何位置偏差、几何形状偏差和装配位置偏差三类偏差源,以统一表达多元统计学模型,并应用有向图和偏差流相关方法建立了偏差传递模型,实现了对装配精度的预测。上述装配精度预测方法虽然在工程中得到了初步应用,但是没有考虑机构运动副特性对装配偏差累积的影响。Mansuy 等^[13]提出将多维矢量方向的几何元素进行分段,通过计算敏感度实现了装配精度预测;Laperrière 等^[14]通过用六个标量方程表示三维空间的几何变化来实现公差分析,但忽略了装配基准在偏差传递中的作用。

为了实现多维空间机构装配精度预测,本文提出基于间隙连接件和多维矢量环的精度预测方法。在分析机构装配特点和偏差源的基础上,建立了机构装配间隙连接件模型;基于装配约束的偏差传递路径构建了多维矢量环和矢量方程;通过计算各偏差源的敏感度,实现了对机构装配精度的预测。

1 机构装配精度预测的特点及三类偏差源

1.1 机构装配精度预测的特点

飞机产品的机构装配包括起落架、舱门、襟翼连接部件等运动部件的装配。与常规装配相比,机构装配具有以下特点:

(1) 装配间隙偏差不容忽视

在机构装配中,为满足机构的运动特性,在零件配合处需给定装配间隙。装配间隙偏差的大小和方向在机构运动中不断发生变动,直接影响产品的装配精度。因此,装配间隙偏差在机构装配精度预测时不容忽视。

(2) 偏差传递路径多样化

装配过程中的偏差沿着零件配合部位进行传递并积累。机构装配由于存在配合间隙,零件在运动副处的配合位置不断变化,形成多条不同的偏差传

递路径;另外,由于零件在运动过程中相对位置的变化,偏差传递方向也随之变化,导致偏差传递路径多样化,为机构装配精度预测带来了难度。

1.2 三类偏差源

偏差是实际几何相对于理想几何的偏离值,如尺寸偏差、定位偏差和定向偏差等。机构装配过程中的力-热变形、装配间隙和进入装配系统的工具、工装等都会引入偏差,成为装配的偏差源。为简化分析,忽略装配变形偏差,假设装配零件均为刚体,则影响刚体机构装配的偏差源主要有以下三种:

(1) 零件功能几何的位置偏差 包括几何定位偏差和定向偏差。几何定位偏差包括尺寸偏差以及对称度、同轴度、位置度偏差等,如图 1a 中的 ΔR ;几何定向偏差包括角度偏差以及平行度、垂直度、倾斜度偏差等。在以偏差几何为装配配合面时,被装配零件位姿发生变动,位姿变动向后累积,最终影响产品的装配精度。

(2) 零件功能几何的形状偏差 包括平面度、圆柱度、直线度、线面轮廓度、圆跳动和全跳动度等,如图 1a 中的平面度误差 Δt 。形状偏差在装配过程中参与累积,最终影响产品的装配精度。

(3) 零件装配位置偏差 机构装配件之间存在大量的间隙配合,零件装配位置偏差主要来源于装配间隙偏差。包括两方面:①为满足装配体的运动性能而给定的装配间隙偏差(固定偏差);②由于柱面配合半径尺寸偏差引起的间隙偏差(随机偏差)(如图 1b 中的 Δr)。零件装配位置偏差会在装配过程中与几何位置偏差、几何形状偏差产生耦合(如图 1a 中的 Δu),最终影响产品的装配精度。

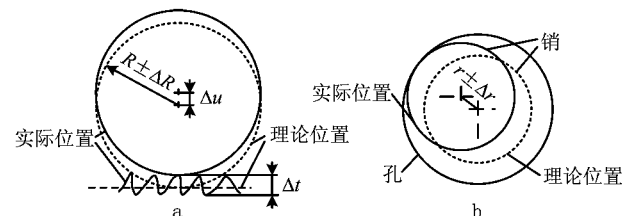


图1 三类偏差源实例

2 装配间隙连接件模型的建立

机构装配件之间存在大量的间隙配合,导致配合位置存在不确定性。因此在装配偏差积累分析前,需建立装配间隙模型,确定零件及其配合位置。

如图 2a 所示,零件 i 与零件 j 通过转动副配合,配合半径分别为 r_i 和 r_j 。在理想配合时,两零件的转动中心重合。但在实际配合过程中由于存在间隙,两零件转动中心产生间距 r_{ij} ,称为装配间隙环半径。将间隙环半径用无质量的虚拟杆件代替,该杆件称为间隙连接件。应用间隙连接件将带间隙的机构装配模型转化为无间隙的装配模型,如图 2b 所示。间隙连接件的名义尺寸 r_{ij} 为零件 i 与零件 j 的装配间隙环半径尺寸;间隙连接件的尺寸偏差 Δr_{ij} 为由相互配合的半径尺寸 r_i 与 r_j 的偏差引入的间隙偏差。定义 r_{ij} 与 x 轴的夹角 α 为间隙连接件的定向角,定向角表征了间隙连接件的方向,即零件在运动副处的配合位置。当定向角 α 改变时,零件的配合位置随之改变。

配合间隙对装配精度的影响是通过间隙连接件的尺寸偏差 Δr 和定向角 α 体现的。间隙连接件的尺寸及其偏差计算如下:

$$r_{ij} + \Delta r_{ij} = (r_i + \Delta r_i) - (r_j + \Delta r_j) \quad (1)$$

式中: r_{ij} 和 Δr_{ij} 为零件 i 与零件 j 的装配间隙连接件尺寸及其偏差; r_i 和 Δr_i 为零件 i 的配合半径尺寸及其偏差; r_j 和 Δr_j 为零件 j 的配合半径尺寸及其偏差。

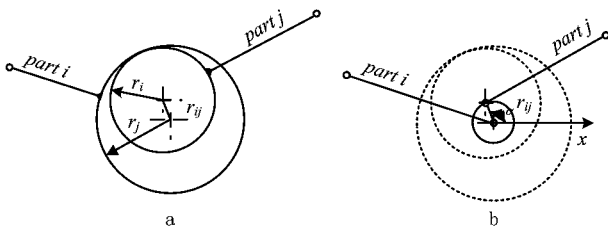


图2 装配间隙连接件模型

下面分两种情况讨论间隙连接件的定向角 α 。

(1) 主动件运动为定轴转动

主动件转动角度 θ 时,若不考虑装配间隙偏差,则主动件位置如图 3a 中的虚线所示,转动中心位于 O 点,由机构运动学原理可知,转动速度 v_1 与主动件的理论位置垂直;当考虑装配间隙偏差时,主动件先沿着速度 v_1 平移一个配合间隙偏差后再产生转动运动,此时主动件位置如图 1 中实线所示,转动中心位于 A 点,间隙连接件位置矢量 r_{ij} 与主动件的理论位置垂直。根据间隙连接件定向角 α 的定义可得

$$\alpha = \theta \pm 90^\circ \quad (2)$$

式中,当主动件逆时针转动角度 θ 时,式(2)中符号取正,反之取负。

(2) 主动件运动为平动

主动件的运动为平动,即主动件的运动可分解

为绕 O 点的定轴转动和沿其轴向的平移。如图 3b 所示,当主动件只作定轴转动时,由于存在配合间隙,转动中心位于图中 B 点,此时间隙连接件位置矢量 r_1 与主动件的理论位置垂直;当主动件只做平移运动时,转动中心位于图中的 C 点,此时间隙连接件位置矢量 r_2 沿速度 v_2 平移;则间隙连接件在平动下的位置矢量 r_{ij} 为 r_1 与 r_2 的合成。由几何关系可知,间隙连接件 r_{ij} 的定向角 α 为

$$\alpha = \theta \pm 45^\circ \quad (3)$$

式中当主动件的定轴转动分量为逆时针转动角度 θ 时,式(3)中符号取正,反之取负。

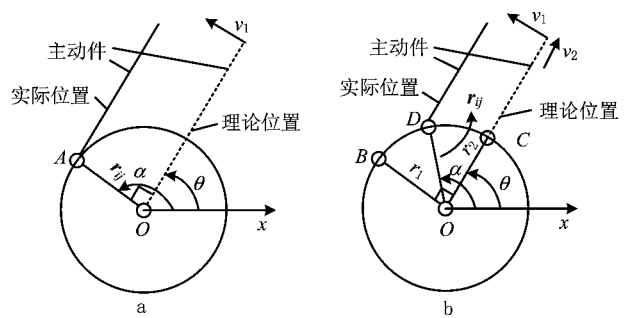


图3 间隙连接件定向角分析

通过对间隙连接件的定向角进行分析,确定了装配体在运动到 θ 角度时零件的配合位置。在此基础上分析偏差传递路径,并将间隙连接件的尺寸偏差 Δr_{ij} 作为偏差源,进行装配精度预测。

3 基于多维矢量环的装配精度预测

3.1 基于装配约束的偏差传递路径

装配件通过定位基准进行装配定位。在偏差传递路径构建过程中,将零件的定位基准称为基准参考结构(Datum Reference Frames, DRF)。基准路径(Datum Path, DP)表示在装配件中,从配合处到 DRF 之间用名义尺寸矢量连接形成的路径。有装配约束关系的两个零件之间的偏差传递路径是指沿 DP 形成的路径。偏差传递路径的创建规则如下:

- (1) 由配合处进入零件。
- (2) 在零件内部,沿着 DP 方向到达 DRF 处。
- (3) 在零件内部,沿着第二条 DP 方向到达另一个配合处。
- (4) 由该配合处退出该零件,进入邻接的零件。

如图 4 所示, a 和 b 、 c 和 d 分别构成零件的两条 DP,分别代表偏差进入零件内部和从零件内部退出的路径。DP 必须沿着受控的设计尺寸或可调的

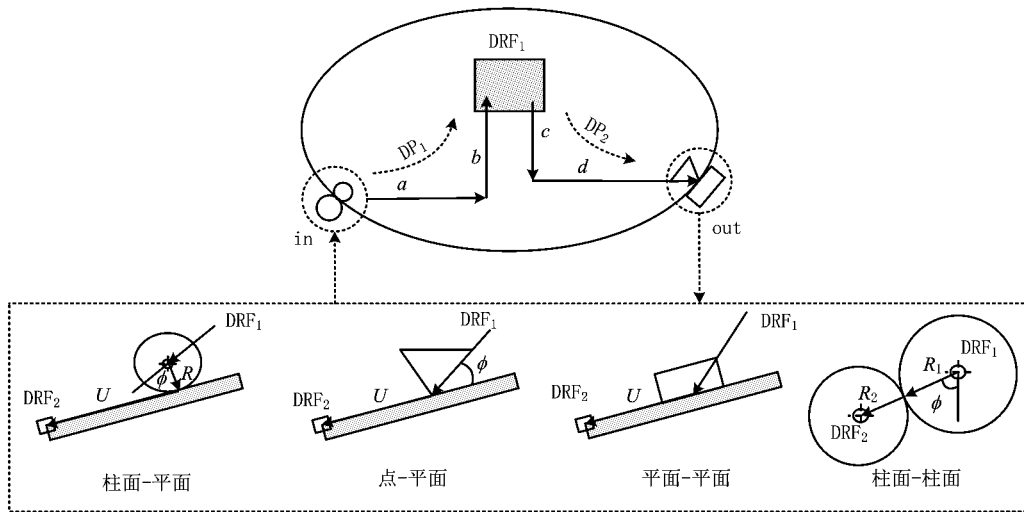


图4 偏差传递模型及常见配合的偏差传递路径

装配尺寸方向,因为这些尺寸是装配过程中偏差源的发生部分。另外,图中给出了常见的零件配合形式及其偏差传递路径。

3.2 矢量环和矢量方程

矢量环分为闭环和开环。闭环描述装配体中零件之间的名义尺寸关系,开环描述装配体中零件的名义尺寸对特定零件特征之间距离的影响。矢量环创建规则如下:

(1)装配体包含的矢量环必须通过每个零件和配合处。

(2)一个矢量环在一个配合处最多通过一次,但是可以在同一零件内开始和结束。

(3)在一个矢量环中,如果包含同一尺寸两次并且方向相反,则该尺寸可以忽略。

(4)对于一个装配体,闭环的数量 L 可以表示为

$$L = J - I + 1. \quad (4)$$

式中: J 表示装配体中零件之间配合数量, I 表示装配体所包含的零件数。

假设装配体包含零件尺寸 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 间隙连接件尺寸 $\{r_1, r_2, \dots, r_k\}$, 装配尺寸 $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 则多维矢量闭环可以表示为

$$h_D = \mathbf{D}(a_1, a_2, \dots, a_n, r_1, r_2, \dots, r_k, u_1, u_2, \dots, u_m) = 0. \quad (5)$$

式中: \mathbf{D} 表示尺寸在空间的矢量方向,三维空间 $\mathbf{D} = (u, v, w, \alpha, \beta, \gamma)$, 二维空间 $\mathbf{D} = \{x, y, \theta\}$; u, v, w, x, y 表示尺寸矢量位置参数; $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ 表示尺寸矢量方向参数。

多维矢量开环表示为

$$Gap = \mathbf{\Gamma}(a_1, a_2, \dots, a_n, r_1, r_2, \dots, r_k, u_1, u_2, \dots, u_m). \quad (6)$$

式中 $\mathbf{\Gamma}$ 表示开环偏差的矢量方向。

将式(5)和式(6)进行一阶泰勒展开,

$$\delta h_D = \frac{\partial h_D}{\partial a_1} \delta a_1 + \dots + \frac{\partial h_D}{\partial a_n} \delta a_n + \frac{\partial h_D}{\partial r_1} \delta r_1 + \dots + \frac{\partial h_D}{\partial r_k} \delta r_k + \frac{\partial h_D}{\partial u_1} \delta u_1 + \dots + \frac{\partial h_D}{\partial u_m} \delta u_m = 0; \quad (7)$$

$$\delta Gap = \frac{\partial Gap}{\partial a_1} \delta a_1 + \dots + \frac{\partial Gap}{\partial a_n} \delta a_n + \frac{\partial Gap}{\partial r_1} \delta r_1 + \dots + \frac{\partial Gap}{\partial r_k} \delta r_k + \frac{\partial Gap}{\partial u_1} \delta u_1 + \dots + \frac{\partial Gap}{\partial u_m} \delta u_m. \quad (8)$$

式中 δa 表示尺寸 a 的微小变化,其余参数类似。

装配体矢量闭环标量方程的矩阵表达为

$$[\mathbf{A}][\delta x] + [\mathbf{U}][\delta u] = 0. \quad (9)$$

装配体矢量开环标量方程的矩阵表达为

$$[\delta Gap] = [\mathbf{C}][\delta x] + [\mathbf{D}][\delta u]. \quad (10)$$

式中:

$[\delta x]$ 和 $[\delta u]$ 为机构装配偏差源尺寸和装配尺寸的微小变化矢量矩阵。其中 $[\delta x] = [\delta a_1 \delta a_2 \dots \delta a_n, \delta b_1 \delta b_2 \dots \delta b_n, \delta r_1 \delta r_2 \dots \delta r_n]$, δa_i 表示第一类偏差源(尺寸偏差)的微小变化; δb_i 表示第二类偏差源(形状偏差)的微小变化; δr_i 表示第三类偏差源(配合间隙偏差)的微小变化。

$[\mathbf{A}]$ 和 $[\mathbf{U}]$ 分别为闭环标量函数对偏差源尺寸和装配尺寸变化的偏导矩阵。其中,

$$[\mathbf{A}] = \left[\frac{\partial h_D}{\partial x_i} \right], [\mathbf{U}] = \left[\frac{\partial h_D}{\partial u_i} \right]. \quad (11)$$

$[\delta Gap]$ 为目标特性尺寸的微小变化矢量矩阵。

[C]和[D]分别为开环标量函数对偏差源尺寸和装配尺寸变化的偏导矩阵。其中,

$$[C] = \left[\frac{\partial \text{Gap}}{\partial x_i} \right], [D] = \left[\frac{\partial \text{Gap}}{\partial u_i} \right]. \quad (12)$$

对式(9)进行变换,可得

$$[\delta u] = -[U^{-1}A][\delta x]. \quad (13)$$

将式(13)代入式(10),有

$$[\delta \text{Gap}] = [C - DU^{-1}A][\delta x]. \quad (14)$$

式中[C- $DU^{-1}A$]表示偏差源对目标特性的敏感度矩阵,用矩阵 T 表示。

得到偏差源对目标特性精度影响的敏感度后,由式(15)可得装配精度的极限偏差,由 Monte-Carlo 仿真可得预测结果落在设计范围内的概率。

$$t_{uc} = \sum_{i=1}^n |T_i x_i|. \quad (15)$$

式中: t_{uc} 为目标尺寸偏差; x_i 为机构装配偏差源; T_i 为偏差源对目标特性的敏感度。

综上所述,基于间隙连接件和多维矢量环的机构装配精度预测主要包括以下步骤:

步骤 1 建立装配间隙连接件模型,分析间隙连接件的定向角,确定机构运动到角度 θ 时零件在运动副处的配合位置。

步骤 2 定义零件 DRF,创建基准路径;在偏差传递模型的基础上建立偏差传递路径和装配多维矢量环。

步骤 3 在多维空间建立开环和闭环的矢量方程;用一阶泰勒展开将矢量方程线性化,建立矢量闭环和开环标量方程;通过矩阵变换求得敏感度矩阵;根据式(15)或 Monte-Carlo 仿真实现对目标特性的装配精度预测。

4 应用实例

以某飞机内襟翼机构装配精度预测为例,分三个步骤介绍装配间隙连接件模型的构建、定向角的确定、偏差传递路径和多维矢量方程的创建过程,在

计算偏差敏感度的基础上进行装配精度预测。

图 5 所示为内襟翼连接机构装配体,包括 $P_{襟翼}$, $P_{连杆}$, $P_{摇臂}$, $P_{中接头}$, $P_{前接头}$ 和 $P_{后接头}$ 等零部件。襟翼偏转时, $P_{连杆}$ 提供作动力,带动 $P_{摇臂}$ 运动,然后 $P_{摇臂}$ 通过 $P_{中接头}$ 和 $P_{后接头}$ 带动襟翼本体边后边下偏运动。当连杆运动到与 x 负方向夹角为 60° 时,襟翼完全收起。此时,襟翼前段与翼身的垂直尺寸偏差为装配功能要求。该装配体产品设计尺寸如图 5b 所示,包括:①尺寸偏差 a_1, a_2, \dots, a_9 ;②运动副配合尺寸 r_i ,其中 $P_{前接头}$ 和 $P_{连杆}$ 、 $P_{连杆}$ 和 $P_{摇臂}$ 的配合半径均为 17.5 mm 和 17 mm, $P_{摇臂}$ 和 $P_{中接头}$ 、 $P_{摇臂}$ 和 $P_{后接头}$ 的配合半径均为 9.5 mm 和 8 mm;③形位偏差形位偏差 b ;④装配偏差 u_1, u_2 和 u_3 。部分尺寸和偏差值如表 1 所示。

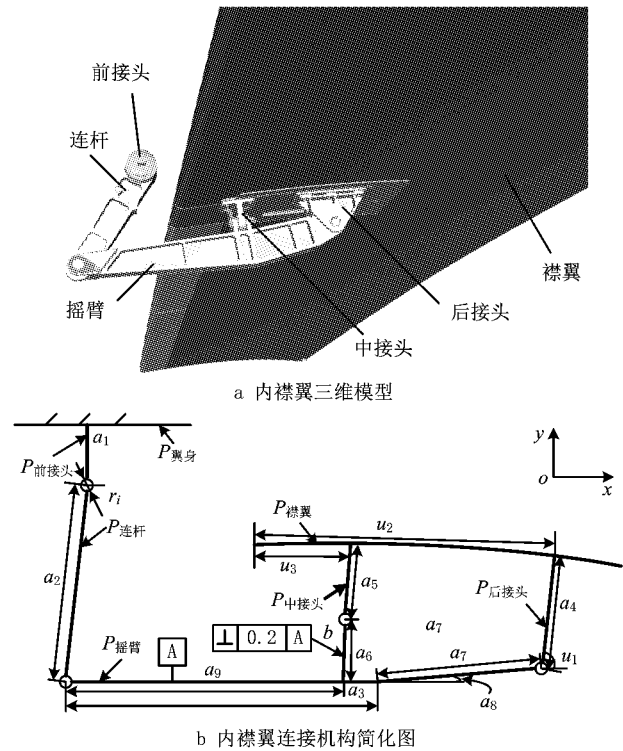


图5 内襟翼连接机构装配模型

表 1 产品设计尺寸

尺寸参数	a_1	a_2	a_4	a_5	a_6	a_3	a_7	a_8	a_9	b	u_1	u_2	u_3
名义值	85	300	80	52	42	432	221	9°	415	90°	84°	400	150
偏差值(±)	0.10	0.30	0.30	0.35	0.35	0.30	0.30	1°	0.30	1°	1°	0.25	0.20

步骤 1 襟翼连接机构装配间隙模型构建。

定位配合($J(P_{连杆}, P_{摇臂})$ 、 $J(P_{摇臂}, P_{中接头})$ 、 $J(P_{摇臂}, P_{后接头})$ 、 $J(P_{前接头}, P_{翼身})$ 和 $J(P_{后接头}, P_{襟翼})$ 、 $J(P_{中接头}, P_{襟翼})$ 、 $J(P_{前接头}, P_{连杆})$);根据装配约束关

系确定零件之间的装配连接形式,其中 $Joint i$ 为柱面接触的间隙配合, $Fixed i$ 为面一面接触的固定配合; $Joint i$ 的间隙连接件名义尺寸 r_{ij} 和偏差值 Δr_{ij} 由式(1)确定。当襟翼收起,即连杆顺时针转动到与

x 负方向的夹角为 60° 时, $Joint\ 1$ 的输入角度 $\theta_1 = 240^\circ$, 由式(2)可得 $Joint\ 1$ 处间隙连接件的定向角 $\alpha_{12} = 150^\circ$ 。同理按式(2)或式(3)计算 α_{ij} 值, 如表 2 所示。

表 2 间隙连接件参数 mm

间隙配合	$Joint\ 1$	$Joint\ 2$	$Joint\ 3$	$Joint\ 4$
尺寸参数	r_{12}	r_{23}	r_{34}	r_{56}
名义尺寸	0.5	0.5	1.5	1.5
偏差值(±)	0.01	0.01	0.02	0.02
输入角度 θ	240°	60°	189°	0°
定向角 α	150°	150°	144°	90°

基于定向角建立的机构装配间隙连接件模型如图 6 所示。

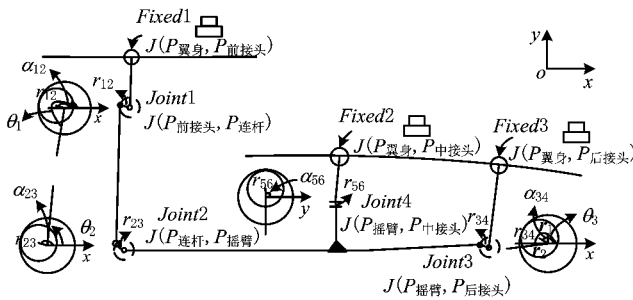


图 6 机构装配间隙连接件模型

步骤 2 创建偏差传递路径和偏差矢量环。

根据零件设计基准和装配定位基准等因素, 建立零件的基准参考结构 ($DRF_{连杆}$ 、 $DRF_{摇臂}$ 、 $DRF_{前}$ 、 $DRF_{中}$ 、 $DRF_{翼身}$ 、 $DRF_{襟翼}$ 和 $DRF_{后}$); 用名义尺寸矢量建立零件配合处到基准参考结构之间的参考路径, 进而创建偏差传递路径。图 7 所示为偏差从零件 $P_{摇臂}$ 到零件 $P_{后接头}$ 的传递路径和从零件 $P_{中接头}$ 到零件 $P_{襟翼}$ 的传递路径。放大图为偏差在 $Joint\ 3$ 内

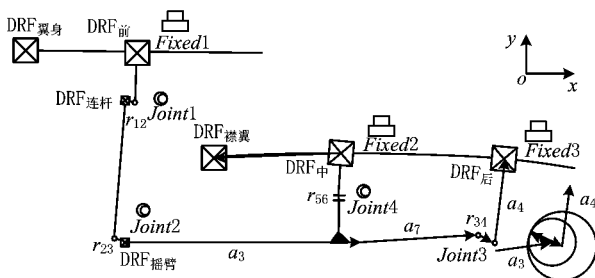


图 7 零件 DRF 和偏差传递路径

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.105 & 0 & 0 & 0.988 \\ 0 & 0 & 0 & 0.995 & 1 & 1 & 0.156 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 33.594 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.809 & 0 \\ 217.943 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.588 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

部的传递路径, 根据矢量环创建规则 3, $Joint\ i$ 的偏差传递路径沿着间隙连接件的尺寸方向。

以偏差传递路径为基础绘制内襟翼连接机构装配体的多维矢量环, 如图 8 所示。图 8a 为装配体偏差传递矢量闭环; 图 8b 为装配体偏差传递矢量开环, Gap 表示 $DRF_{翼身}$ 到 u_2 的距离。

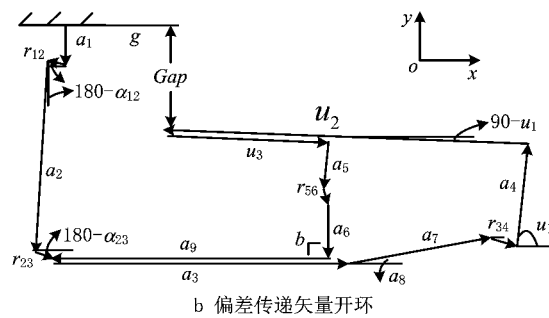
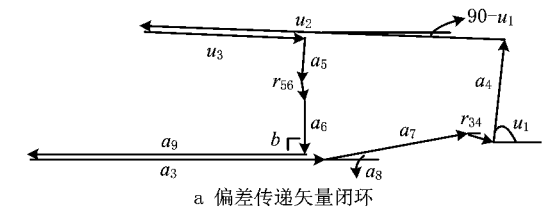


图 8 偏差传递矢量环

步骤 3 建立装配矢量方程, 求解敏感度矩阵和 Gap 的装配精度预测值。

按照矢量方向 $D = \{x, y, \theta\}$ 建立装配矢量环方程。

$$\begin{aligned} h_x &= a_3 \cos 0 + a_7 \cos a_8 + r_{34} \cos (45 - a_8) + a_4 \cos u_1 + u_2 \cos (90 - u_1) + u_3 \cos (90 - u_1) + a_5 \cos 90 + r_{56} \cos 90 + a_6 \cos 90 + a_9 \cos 0 = 0; \\ h_y &= a_3 \sin 0 + a_7 \sin a_8 + r_{34} \sin (45 - a_8) + a_4 \sin u_1 + u_2 \sin (90 - u_1) + u_3 \sin (90 - u_1) + a_5 \sin 90 + r_{56} \sin 90 + a_6 \sin 90 + a_9 \sin 0 = 0; \\ h_\theta &= 0 + a_8 + 45 - a_8 + 45 - a_8 + u_1 + 90 + 180 - 90 - 0 - 0 - b - 180 = 0; \\ Gap &= g \sin 0 + a_1 \sin 90 + r_{12} \sin (180 - \alpha_{12}) + a_2 \sin \theta + r_{23} \sin (180 - \alpha_{23}) + a_3 \sin 0 + a_7 \sin a_8 + r_{34} \sin (45 - a_8) + a_4 \sin u_1 + u_2 \sin (90 - u_1). \end{aligned} \quad (16)$$

通过一阶泰勒展开, 写成如式(9)和式(10)所示的矩阵形式。其中矩阵 A, U, C, D 按式(11)和式(12)求解。

$$[U] = \begin{bmatrix} -22.4 & 0.995 & 0.995 \\ -538.85 & 0.104 & 0.104 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C] = [1 \quad 0.5 \quad 0 \quad 0.995 \quad 0 \quad 0 \quad 34.476 \quad 217.943 \quad 0 \quad 0 \quad 0.5 \quad 0.866 \quad 0.588 \quad 0];$$

$$[D] = [-389.6 \quad 0.105 \quad 0].$$

偏差源对 *Gap* 的敏感度矩阵

$$T_i = [1 \quad 0.5 \quad 0 \quad -0.013 \quad -1.008 \quad -1.008 \quad 34.319 \quad 152.583 \quad 0 \quad 154.405 \quad 0.5 \quad 0.866 \quad 0.002 \quad -1.008].$$

在求得偏差源敏感度矩阵的基础上,由式(15)预测得到 *Gap* 的装配极限偏差 $t_{uc} = \pm 6.24 \text{ mm}$,并通过 Monte-Carlo 仿真得到预测值落在设计范围内的概率为 86.105%。

将预测结果与实测值、设计要求和不考虑配合间隙偏差时的装配精度仿真数据进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 结果对比

极限 偏差 /mm	预测值/%		实测值 /mm	设计 要求 /mm
	Monte-Carlo (考虑配合间隙)	Monte-Carlo (不考虑配合间隙)		
± 6.24	86.105	99.972	291.1	285 ± 5

结果表明,该目标特性的装配精度预测结果与装配现场实测值吻合较好,但落在设计范围内的概率为 86.105%,不能达到设计要求,需对容差方案进行优化。而不考虑配合间隙偏差时,预测结果落在设计范围内的概率为 99.972%,能达到设计要求,但实际装配超差。这是因为传统的装配精度预测方法没有考虑机构运动副特性对装配精度的影响。

5 结束语

本文针对机构装配精度预测问题,提出基于间隙连接件和多维矢量环的精度预测方法。通过构建装配间隙连接件模型,用间隙连接件定向角对零件配合位置进行描述,充分考虑了装配间隙对机构装配精度的影响,解决了机构装配精度预测中偏差传递路径不确定的问题。提出的偏差传递路径和多维矢量环建模规则,考虑了装配基准对偏差传递路径的影响,在研究装配体多维矢量环、矢量方程和偏差源敏感度的基础上,实现了对机构装配精度的准确预测。未来将在该方法中考虑多种偏差源,并研究多偏差源耦合和等效分析。

参考文献:

- [1] YAO P, TAN C, ZHOU L. Research on assembly quality evaluation for aircraft product based on Monte-Carlo simulation [J]. *Advanced Science Letters*, 2011, 4(6/7): 2352-2355.
- [2] XIONG Zhenqi, NING Ruxin, LIU Jianhua, et al. Pre-analysis of connecting precision of missile sections in virtual environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8): 950-955 (in Chinese). [熊珍琦, 宁汝新, 刘检华, 等. 虚拟环境下导弹舱段连接精度预分析 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(8): 950-955.]
- [3] ANSELMETTI B. Generation of functional tolerance based on positioning features [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(8): 902-919.
- [4] TANG Shuilong, YU Jianfeng, LI Yuan, et al. Assembly tolerance analysis for parts with flatness based on virtual mating plane [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(4): 711-715 (in Chinese). [唐水龙, 余剑锋, 李原, 等. 基于虚拟配合面的带平面度零件装配容差分析 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(4): 711-715.]
- [5] CHEN G, ZHOU J, CAI W, et al. A framework for an automotive body assembly process design system [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(5): 531-539.
- [6] HU Wei, LIU Jianhua, JIANG Ke, et al. Assembly precision prediction method for spacecraft based on 3D model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(5): 990-999 (in Chinese). [胡伟, 刘检华, 蒋科, 等. 基于三维模型的航天器装配精度预测方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(5): 990-999.]
- [7] LIU Yusheng, GAO Shuming, WU Zhaotong, et al. Hierarchical representation model and its realization of tolerance based on feature [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(3): 1-7 (in Chinese). [刘玉生, 高曙光, 吴昭同, 等. 基于特征的层次式公差信息表示模型及其实现 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(3): 1-7.]
- [8] LIU Jian, JIN Jionghua, SHI Jianjun. State space modeling for 3D variation propagation in rigid-body multistage assembly processes [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(2): 274-290.
- [9] HONG Jiansheng, LI Yingguang, SONG Wenjuan, et al. Aircraft assembly tolerance information model based on assembly sequence [J]. *Journal of Graphics*, 2013, 34(1): 55-59 (in Chinese). [洪建胜, 李迎光, 宋文娟, 等. 基于装配顺序的飞机装配容差信息建模 [J]. *图学学报*, 2013, 34(1): 55-59.]
- [10] TANG Jianjun, TIAN Xitian, GENG Junhao. Integrated precision information model of model-based definition [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(8): 1827-1833 (in Chinese). [唐健钧, 田锡天, 耿俊浩. 基于模型定义的集成化精度信息模型 [J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(8): 1827-1833.]
- [11] LIU Weidong, NING Ruxin, LIU Jianhua, et al. Mechanism analysis of deviation sourcing and propagation for mechanical assembly [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48

- (1);156-168(in Chinese). [刘伟东, 宁汝新, 刘检华, 等. 机械装配偏差源及其偏差传递机理分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1):156-168.]
- [12] LIU Weidong, NING Ruxin, LIU Jianhua, et al. Precision predicting based on directed deviation graph modeling and D-H methodology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7):125-140(in Chinese). [刘伟东, 宁汝新, 刘检华, 等. 基于偏差有向图和 DH 方法的产品装配精度预测技术[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7):125-140.]
- [13] MANSUY M, GIORDANO M, HERNANDEZ P. A new calculation method for the worst case tolerance analysis and synthesis in stack-type assemblies[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(9):1118-1125.
- [14] LAPERRIÈRE L, ELMARAGHY H. Tolerance analysis and synthesis using Jacobi transform[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2000, 49(1):359-362.

作者简介:

- 赵东平(1982—),男,甘肃庆阳人,博士研究生,研究方向:飞机装配精度优化与控制,E-mail:zhaodongp@163.com;
- 田锡天(1965—),男,河南新野人,教授,博士,博士生导师,研究方向:计算机辅助工艺规划、制造信息化、微细制造等;
- 耿俊浩(1979—),男,河南禹州人,副教授,博士,研究方向:计算机辅助工艺规划、制造信息化,通信作者,E-mail:gengjunhao@nwpu.edu.cn.

“智能制造”专刊征文通知

当前,随着云计算、物联网、大数据、移动互联网等为标志的新一代信息技术的飞速发展,以信息技术为核心的新一代科技革命和产业变革正在蓬勃兴起,全球科技创新呈现出新的发展态势和特征。

智能制造是制造业产品、装备、生产、管理和服务智能化应用水平的体现,也是消费互联网向产业互联网转型创新的重要方向。为此,我国已将智能制造作为当前和今后一段时期实现两化深度融合、加速推进制造业转型升级和创新发展的重要途径,将智能制造作为国家重大专项加以重点推进,以智能制造为核心的中国制造业也因此迎来勃勃生机。

为了促进我国智能制造技术的研究和发展,加强学术交流和推广应用,增强我国智能制造装备技术和关键产品的自主开发能力,构建自主的智能制造产业体系和工业基础能力,推动以新业态、新模式、新机制为核心的智能制造发展,《计算机集成制造系统》编辑部拟开展“智能制造”专刊征文活动。旨在报道智能制造的相关方法、技术、系统等的最新研究成果和进展,热忱欢迎相关领域的专家和学者踊跃投稿。

一、征文范围

1. 以信息技术为核心的智能制造模式;
2. 基于知识的产品智能设计与仿真优化;
3. 基于 3D 打印的众包设计和创新创意设计;
4. 智能工业机器人;
5. 智能车间物流管控;
6. 智能制造知识管理;
7. 智能制造服务管理;
8. 工业互联网、制造物联网技术与互操作技术;
9. 工业大数据及其在智能制造中的应用;
10. 信息物理融合系统及智能工厂;
11. 基于工业云服务的智慧企业。

二、征文要求

1. 论文必须为原创,并且未被其他会议、期刊录用或发表;
2. 论文可以是围绕智能制造的综述论文、技术方法论文和应用性论文,具有一定的创新性和前瞻性;
3. 论文格式请直接参照《计算机集成制造系统》期刊论文的格式要求,或访问期刊主页 <http://www.cims-journal.cn> 查询稿件格式要求。

三、投稿方式和截止日期

1. 通过《计算机集成制造系统》期刊网站:<http://www.cims-journal.cn> 进行投稿,稿件类型请务必注明“智能专刊”;
2. 投稿截止日期为 2015 年 9 月 30 日。

四、稿件录取

1. 所有来稿均需经两位以上同行专家评审,合格后方可录用。
2. 录用论文将在《计算机集成制造系统》集中发表(EI 收录)。

五、投稿联系方式

联系人:杨璐 通信地址:北京 2413 信箱 34 分箱 CIMS 编辑部(100089)
联系电话:(010)68962468-3;68962479 电子邮件:cims@onet.com.cn