

含间隙飞行器折叠舵面的尺寸链分析



任彦松¹, 马志赛¹, 王晓鹏², 王加攀², 符杰¹

1. 天津大学 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300350

2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

摘 要: 间隙在飞行器折叠舵面中普遍存在, 会显著影响结构系统的动态行为, 给折叠舵面的动力学建模与特性预示带来巨大挑战。针对含间隙飞行器折叠舵面的结构设计问题, 从控制间隙特征、改善工作性能的角度出发, 以间隙为目标尺寸, 综合考虑间隙的产生机理, 提出基于矢量环法的折叠舵面尺寸链分析方法, 来获取间隙对相关尺寸的敏感度以及相关尺寸对间隙的贡献度指标。以典型含间隙折叠舵面为例, 结合其实际工作原理构建尺寸链, 分别采用所提出的矢量环法和计算机辅助的统计分析法进行尺寸链分析, 两者所得的各相关尺寸的敏感度和贡献度指标相互吻合, 验证了基于矢量环法进行折叠舵面尺寸链分析的可行性, 可为折叠舵面的间隙特征设计优化提供技术支撑。

关键词: 折叠舵面; 间隙非线性; 尺寸链分析; 矢量环法; 设计优化

中图分类号: TH122

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.03.013

为适装机载、舰载等平台, 满足存储、运输和发射过程中严苛的空间约束条件, 很多飞行器都选用折叠舵面以节省空间。但由于包含运动副以及加工、装配误差和使用磨损等因素, 舵面的折叠机构处不可避免地存在间隙^[1-3]。作为典型的集中式非线性形式, 间隙的存在会显著影响结构系统的动态特性, 使传统的基于线性理论的气动弹性计算方法不再适用, 给飞行器折叠舵面的动力学建模与特性预示带来巨大挑战, 从而严重影响了伺服弹性、气动弹性以及力学环境的设计品质, 甚至引发飞行故障^[4-6]。因此, 面向高性能飞行器的研制需求, 既需要大力发展适用于折叠舵面的非线性动力学分析理论及方法, 也需要从间隙的产生机理入手, 对其进行尺寸链分析及设计优化, 以有效控制间隙特征, 进而从根本上改善折叠舵面的实际工作性能。

在加工和装配过程中, 零部件尺寸及装配形位均存在偏差, 偏差的共同作用会影响最终产品的实际工作性能。所谓尺寸链分析, 就是在已知零部件的尺寸分布和公差的情况下, 通过考虑偏差的传播和累积, 计算得出最终装配体

的尺寸分布和公差的过程^[7-9]。通过尺寸链分析可得出加工和装配中各尺寸对目标尺寸的影响程度, 进而实现尺寸链的设计优化。目前可用于尺寸链分析的方法主要有极值法、统计分析法和模拟法(试验法)等^[10-13]。极值法在所有尺寸取公差上偏差或下偏差的情况下进行分析, 多用于验证简单结构是否满足装配要求。统计分析法和模拟法均以计算机作为辅助工具自动生成装配尺寸链^[14-16], 并利用相应软件计算得出最终的尺寸链分析结果。综合来看, 现有的尺寸链分析方法已能够实现对简单结构的定性分析, 也能够利用计算机辅助工具对相对复杂的结构进行定量分析。

现阶段, 国内外学者对于飞行器折叠舵面的间隙非线性动力学问题已开展了大量研究, 在动力学模型降阶^[3,17-18]、气动弹性分析^[19-20]、参数识别^[21-22], 以及振动测试^[23-24]等方面均取得了显著进展。然而, 针对折叠舵面开展尺寸链分析及设计优化的研究还比较少, 尚难以满足航空航天工程实际中对折叠舵面的间隙特征进行有效控制的

收稿日期: 2022-09-15; 退修日期: 2023-01-09; 录用日期: 2023-02-10

基金项目: 航空科学基金(2020Z009048001); 国家自然科学基金(12272258); 天津市自然科学基金(21JCQNJC0360); 天津市青年人才托举工程(TJSQNTJ-2020-01)

引用格式: Ren Yansong, Ma Zhisai, Wang Xiaopeng, et al. Dimensional tolerance analysis on folding fin for flight vehicles with freeplay[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(03): 89-96. 任彦松, 马志赛, 王晓鹏, 等. 含间隙飞行器折叠舵面的尺寸链分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(03): 89-96.

迫切需求。

综上所述,本文针对典型含间隙飞行器折叠舵面的结构设计问题,以间隙为目标尺寸,提出基于矢量环法的折叠舵面尺寸链分析方法,得到各相关尺寸的敏感度和贡献度指标,并通过统计分析法对分析结果进行验证,可为飞行器折叠舵面的间隙特征设计优化提供技术支撑。

1 折叠舵面的模型

典型折叠舵面的整体装配图如图1所示,其各部件组成关系如图2所示。其中定件与飞行器主体结构相连,动件可绕定件进行转动和折叠,二者通过转轴和锁销连接,其中转轴保证舵面动件可折叠,锁销保证舵面动件在展开状态下可固定。在折叠状态下,锁销位于动件内部,待动件展开后,锁销可伸入定件内部进行固定。

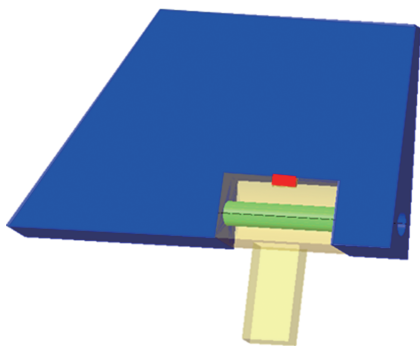


图1 折叠舵面的整体装配示意图

Fig.1 Assembly schematic diagram of the folding fin

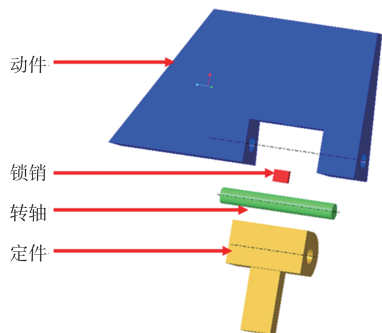


图2 折叠舵面的各部件组成关系

Fig.2 Different components of the folding fin

折叠舵面的工作原理如图3所示,在舵面展开状态下,定件结构配合面可限制动件逆时针转动,锁销限位面可限制动件顺时针转动。对于该折叠舵面来说,间隙主要出现在各零部件的装配部分,因此需要综合考虑不同位置的间隙,以构建合适的尺寸链进行分析。

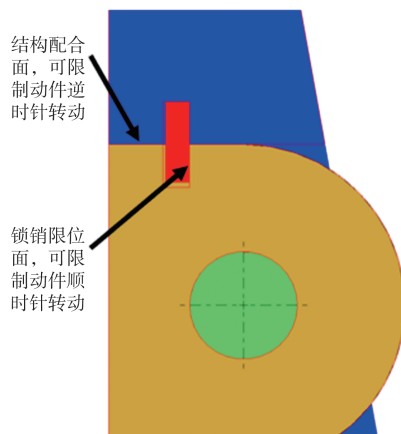


图3 折叠舵面的工作原理

Fig.3 Working principle of the folding fin

2 尺寸链分析方法

2.1 矢量环法简介

在加工和装配过程中,存在若干个必要尺寸来确定整个装配体的尺寸分布和公差,可将每个尺寸看成矢量,矢量的方向和大小对应尺寸的位置和长度。相连的零部件尺寸可视为首尾相接的矢量,由此封闭的尺寸链可形成一个矢量环^[25],如图4所示,该矢量环即可作为尺寸链分析的计算依据。

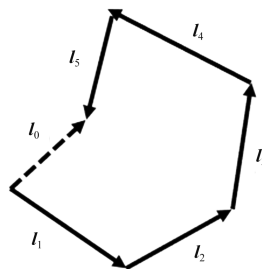


图4 矢量环示意图

Fig.4 Schematic diagram of the vector loop

对于图4中的矢量环,可建立坐标系,将其中每个矢量用坐标表示。在二维空间中确定矢量方向和长度的坐标有两个,分别是相位角 θ 和长度 l 。根据各矢量的位置关系,可基于坐标将封闭环用多个自变量表示出来,通过进一步计算分析可得出各组成环对封闭环的影响程度。上述过程可归纳为基于矢量环法的尺寸链分析。

2.2 矢量环法示例

下面通过一个简单示例对基于矢量环法的尺寸链分析流程进行说明。对如图5所示的二维矢量环,建立直角坐标系,对其进行尺寸链分析。

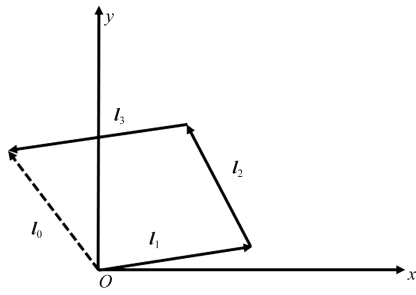


图5 直角坐标系下的矢量环

Fig.5 Vector loop in the rectangular coordinate system

假设该矢量环由实际尺寸简化而来,其中 l_1, l_2, l_3 均为组成环, l_0 为封闭环。则可将各矢量表示为如下形式

$$l_1 = \begin{bmatrix} l_1 \cos \alpha_1 \\ l_1 \sin \alpha_1 \end{bmatrix}, l_2 = \begin{bmatrix} l_2 \cos \alpha_2 \\ l_2 \sin \alpha_2 \end{bmatrix}, l_3 = \begin{bmatrix} l_3 \cos \alpha_3 \\ l_3 \sin \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$l_0 = l_1 + l_2 + l_3 \quad (2)$$

将式(2)整理成矩阵形式,可表示为如下形式

$$l_0 = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 & \sin \alpha_2 & \sin \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

敏感度是封闭环对组成环变动的敏感程度,是尺寸链分析中的重要指标,可用封闭环对组成环的偏导数来计算。在式(3)中影响封闭环的自变量有6个,对这些自变量求偏导数,所得出的结果即为封闭环对相应组成环的敏感度。

将式(3)中的 l_0 用隐函数表示为如下形式

$$l_0 = f(l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \quad (4)$$

以组成环 l_1 为例,假设 l_1 产生微小长度偏差 Δl_1 ,则有

$$l'_0 = f(l_1 + \Delta l_1, l_2, l_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \quad (5)$$

式中, l'_0 为自变量 l_1 改变后的目标尺寸函数。为了得到敏感度,需对隐函数 l_0 中自变量求偏导数,过程如下

$$\frac{\partial l_0}{\partial l_1} = \frac{l'_0 - l_0}{\Delta l_1} \quad (6)$$

若已知各组成环的名义尺寸大小,将相应数值代入式(6),即可计算得出封闭环 l_0 对 l_1 的敏感度,同理可得出 l_0 对其他组成环的敏感度。在求得敏感度的基础上,如果已知尺寸链中各尺寸的公差信息,可进一步得到贡献度,进而综合敏感度和贡献度的分析结果可进行尺寸链的设计优化。

3 折叠舵面的尺寸链分析

3.1 尺寸链构建

针对图1所示的含间隙折叠舵面,构建尺寸链。对于该模型,引起结构非线性现象的主要间隙出现在定动件配合面以及锁销限位面,由此引起的动件绕转轴的平面转动

问题在实际结构中最为明显,在这种情况下可采用二维尺寸链模型进行分析。

选定最终的目标尺寸为动件绕转轴相对于定件的可转动角度,进一步结合折叠舵面模型的具体尺寸可构建其尺寸链。转动角度分为逆时针和顺时针两个方向,各自受不同尺寸的影响,可先对每个方向进行单独分析,再组合构建形成完整的尺寸链。

影响动件相对于定件逆时针转动的主要尺寸如图6所示,各尺寸的符号含义及尺寸公差见表1。其中旋转角度 θ_1 为封闭环,其公差受到各组成环偏差的传播和累积影响,可通过矢量环法计算得出。

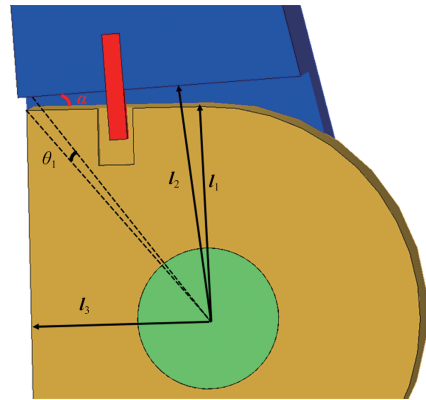


图6 逆时针转动的组成环示意图

Fig.6 Schematic diagram of constituent loop of counterclockwise rotation

表1 逆时针转动的组成环的符号含义

Table 1 Symbolic meaning of constituent loop of counterclockwise rotation

尺寸符号	符号含义	对应尺寸及公差
l_1	转轴孔距定件斜面距离	$30_{-0.1}^{-0.05}$
l_2	转轴孔距动件斜面距离	$30_{0}^{+0.1}$
l_3	转轴孔距定件侧面距离	$25_{-0.05}^{+0.05}$
$\alpha/(^\circ)$	定动件配合面夹角	$0_{-0.05}^{+0.05}$

影响动件相对于定件顺时针转动的主要尺寸如图7所示,各尺寸的符号含义及尺寸公差见表2,其中旋转角度 θ_2 为封闭环。至此构建完成了折叠舵面的间隙尺寸链,下面采用矢量环法对该尺寸链进行分析。

3.2 尺寸链分析

将图6中影响逆时针转动的组成环提取出来,以 l_1 方向为y轴建立直角坐标系,如图8所示。

其中各组成环矢量的坐标如下

$$l_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \end{bmatrix}, l_2 = \begin{bmatrix} l_2 \sin \alpha \\ l_2 \cos \alpha \end{bmatrix}, l_3 = \begin{bmatrix} -l_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

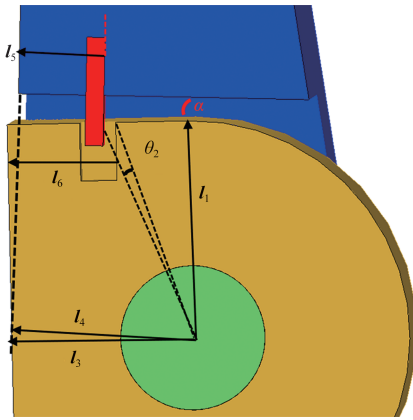


图7 顺时针转动的组成环示意图

Fig.7 Schematic diagram of constituent loop of clockwise rotation

表2 顺时针转动的组成环的符号含义

Table 2 Symbolic meaning of constituent loop of clockwise rotation

尺寸符号	符号含义	对应尺寸及公差
l_1	转轴孔距定件斜面距离	$30_{-0.1}^{-0.05}$
l_3	转轴孔距定件侧面距离	$25_{-0.05}^{+0.05}$
l_4	转轴孔距动件侧面距离	$25_{-0.05}^{+0.05}$
l_5	动件锁销孔距动件侧面距离	$15_{-0.1}^{-0.05}$
l_6	定件锁销孔距定件侧面距离	$15_{-0.1}^{+0.05}$
$\alpha/(^\circ)$	定动件配合面夹角	$0_{-0.05}^{+0.05}$

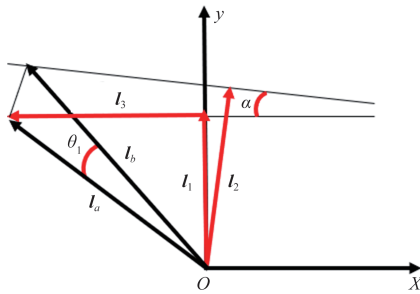


图8 逆时针尺寸链的简化图

Fig.8 Simplified diagram of counterclockwise dimension chain

引入辅助矢量 l_a 和 l_b , 其坐标如下

$$l_a = \begin{bmatrix} -l_3 \\ l_1 \end{bmatrix}, l_b = \begin{bmatrix} -\sqrt{l_1^2 + l_3^2 - l_2^2} \cos \alpha + l_2 \sin \alpha \\ \sqrt{l_1^2 + l_3^2 - l_2^2} \sin \alpha + l_2 \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

由 l_a 和 l_b 可得两矢量的夹角 θ_1 如下

$$\theta_1 \approx \sin \theta_1 = \frac{l_1 l_2 \sin \alpha + l_2 l_3 \cos \alpha}{l_1^2 + l_3^2} + \frac{\sqrt{l_1^2 + l_3^2 - l_2^2} (l_3 \sin \alpha - l_1 \cos \alpha)}{l_1^2 + l_3^2} \quad (9)$$

至此已经构建出以目标尺寸 θ_1 为因变量的函数, 下面进行敏感度的计算。对式(9)中各自变量分别求偏导数, 并

代入表1中各组成环名义尺寸的数值, 可求得封闭环对各组成环的敏感度如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_1}{\partial l_1} &= -0.040, \frac{\partial \theta_1}{\partial l_2} = 0.040 \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial l_3} &= 0, \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha} = 0.017 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 敏感度的正负不表示大小, 只表示影响的方向, 敏感度为正时该组成环与目标尺寸同方向增减, 敏感度为负时两者反方向增减。贡献度是指尺寸链中各个组成环公差对封闭环尺寸累积公差的贡献大小, 其分析是在敏感度分析和尺寸的变动基础上进行的, 统计贡献度的计算公式如下

$$C_{x_i} = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_i} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2}{\sigma_U^2} \times 100\% \quad (11)$$

式中, C_{x_i} 为贡献度, x_i 为第 i 个变量, U 为封闭环, σ_{x_i} 为 x_i 的标准偏差, σ_U 为 U 的标准偏差^[26-27]。

基于式(11)可求得 l_1, l_2, l_3 和 α 对 θ_1 的贡献度如下

$$\begin{aligned} C_{l_1}^1 &= 17.36\%, C_{l_2}^1 = 69.43\% \\ C_{l_3}^1 &= 0, C_{\alpha}^1 = 13.21\% \end{aligned} \quad (12)$$

以上是逆时针尺寸链分析的过程, 下面对顺时针尺寸链进行分析。将图7中影响顺时针转动的组成环提取出来, 仍以方向 l_1 为 y 轴建立直角坐标系, 如图9所示。

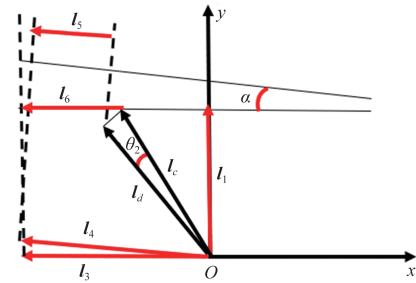


图9 顺时针尺寸链的简化图

Fig.9 Simplified diagram of clockwise dimension chain

其中各组成环矢量的坐标如下

$$\begin{aligned} l_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \end{bmatrix}, l_3 = \begin{bmatrix} -l_3 \\ 0 \end{bmatrix}, l_4 = \begin{bmatrix} -l_4 \cos \alpha \\ l_4 \sin \alpha \end{bmatrix} \\ l_5 &= \begin{bmatrix} -l_5 \cos \alpha \\ l_5 \sin \alpha \end{bmatrix}, l_6 = \begin{bmatrix} -l_6 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

引入辅助矢量 l_c 和 l_d , 其坐标如下

$$\begin{aligned} l_c &= \begin{bmatrix} l_6 - l_3 \\ l_1 \end{bmatrix} \\ l_d &= \begin{bmatrix} l_5 \cos \alpha - l_4 \cos \alpha - l_1 \sin \alpha \\ \sqrt{(l_6 - l_3)^2 + l_1^2 - [(l_5 - l_4) \cos \alpha - l_1 \sin \alpha]^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

由 l_c 和 l_d 可得两矢量的夹角 θ_2 如下

$$\theta_2 \approx \sin \theta_2 = \frac{-l_1(l_5 \cos \alpha - l_4 \cos \alpha - l_1 \sin \alpha)}{(l_6 - l_3)^2 + l_1^2} + \frac{(l_6 - l_3) \sqrt{(l_6 - l_3)^2 + l_1^2} - [(l_5 - l_4) \cos \alpha - l_1 \sin \alpha]^2}{(l_6 - l_3)^2 + l_1^2} \quad (15)$$

对式(15)中各自变量分别求偏导数,并代入表2中各组成环名义尺寸的数值,可求得封闭环对各组成环的敏感度如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_2}{\partial l_1} &= 0, \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial l_3} = -0.033, \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial l_4} = 0.033 \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial l_5} &= -0.033, \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial l_6} = 0.033, \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial \alpha} = 0.017 \end{aligned} \quad (16)$$

在式(16)敏感度分析结果的基础上,将表2中各尺寸公差代入式(11)的贡献度计算公式,可求得各组成环对 θ_2 的贡献度如下

$$\begin{aligned} C_{l_1}^2 &= 0, \quad C_{l_3}^2 = 36.05\%, \quad C_{l_4}^2 = 36.05\% \\ C_{l_5}^2 &= 9.01\%, \quad C_{l_6}^2 = 9.01\%, \quad C_{\alpha}^2 = 9.88\% \end{aligned} \quad (17)$$

以上是顺时针尺寸链分析的过程,下面对两个方向的尺寸链进行整合。在两个方向尺寸链的单独分析结束后,可将 θ_1 和 θ_2 合成一个完整的尺寸链。在假定中间位置的情况下,由不同位置间隙所引起的两个方向的转动可以同时存在,且互不干扰,直接将逆时针和顺时针的可旋转角度进行叠加可以免除中间位置的限制,得到动件的最大可旋转角度的保守估计值。

定义 θ_0 为动件相对于定件可旋转的角度,其表达式如下

$$\theta_0 = \theta_1 + \theta_2 \quad (18)$$

对整合后的尺寸链进行敏感度分析,本质上是求新的目标尺寸 θ_0 对各组成环的偏导数。由于两个方向的旋转角度具有独立性,整合后尺寸链的敏感度即为两个方向尺寸链的敏感度之和。综合式(10)和式(16)可得到 θ_0 对各组成环的敏感度如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_0}{\partial l_1} &= -0.040, \quad \frac{\partial \theta_0}{\partial l_2} = 0.040 \\ \frac{\partial \theta_0}{\partial l_3} &= -0.033, \quad \frac{\partial \theta_0}{\partial l_4} = 0.033 \\ \frac{\partial \theta_0}{\partial l_5} &= -0.033, \quad \frac{\partial \theta_0}{\partial l_6} = 0.033 \\ \frac{\partial \theta_0}{\partial \alpha} &= 0.035 \end{aligned} \quad (19)$$

在式(19)敏感度分析结果的基础上,将表1和表2中各尺寸公差代入贡献度公式,可求得各组成环对封闭环 θ_0 的贡献度如下

$$\begin{aligned} C_{l_1}^0 &= 6.67\%, \quad C_{l_2}^0 = 26.69\% \\ C_{l_3}^0 &= 18.53\%, \quad C_{l_4}^0 = 18.53\% \\ C_{l_5}^0 &= 4.63\%, \quad C_{l_6}^0 = 4.63\%, \quad C_{\alpha}^0 = 20.32\% \end{aligned} \quad (20)$$

至此已经得出了以 θ_0 为目标尺寸的尺寸链的敏感度和贡献度指标。可根据各组成环的指标大小进一步分析它们对目标尺寸的影响程度,两个指标均较大的组成环是需要重点考虑的设计优化对象。

通过式(19)中的敏感度分析结果可知,在上述折叠舵面中,目标尺寸对各组成环的敏感度整体差异较小,其中对 l_1 、 l_2 和 α 的敏感度较大。同时观察式(20)中的贡献度可知, l_2 和 α 的贡献度较大,这表明在给定表1和表2的尺寸公差之后,对目标尺寸最终影响较大的组成环是转轴孔距动件斜面距离 l_2 和定动件配合面夹角 α 。因此,综合考虑敏感度和贡献度的分析结果,为了有效控制间隙特征,需重点关注组成环 l_2 和 α ,并尽量提高它们的公差精度。

以上是基于矢量环法进行折叠舵面尺寸链分析的全过程,下面采用计算机辅助的分析方法对分析结果进行验证。

3.3 分析结果对比验证

本节运用统计分析法对折叠舵面模型进行尺寸链分析,借助计算机的运算能力,可得出尺寸链中封闭环对各组成环的敏感度和组成环对封闭环的贡献度,并以此来验证基于矢量环法进行折叠舵面尺寸链分析的正确性。

在计算机辅助的尺寸链分析过程中,首先基于图论技术并结合连接矩阵,将模型中各零部件尺寸按实际装配连接起来,构建尺寸链^[28]。在尺寸链生成后,进行偏差统计分析,将各零部件的偏差看作独立的统计分布图,综合这些分布图可预测出目标尺寸的分布图^[29]。本节对折叠舵面模型尺寸的统计分析选用系统矩方法,该方法通过计算统计系统矩对数据进行描述,可直接采用每个零部件变量的统计分布图来计算目标尺寸的分布图,在计算测量偏差时可考虑非线性几何行为和非正态变量分布图。

将模型中各尺寸特征及公差信息导入计算机中,并选用正态分布的公差概率对尺寸链进行统计分析,可得出敏感度和贡献度指标,见表3。将统计分析法所得结果与矢量环法的计算结果进行对比可知,矢量环法分析得出的敏感度和贡献度和统计分析法所得结果基本吻合,证明了基于矢量环法进行折叠舵面尺寸链分析的可行性。

4 结论

本文从控制飞行器折叠舵面间隙特征的角度出发,首先分析了典型折叠舵面中的间隙产生机理,并将间隙特征

表3 折叠舵面尺寸链分析结果对比

Table 3 Comparative results of dimensional tolerance analysis of the folding fin

尺寸符号	尺寸名称	尺寸公差	敏感度 (统计分析法/矢量环法)	贡献度 (统计分析法/矢量环法)
I_1	转轴孔距定件 斜面距离	$30^{+0.05}_{-0.1}$	-0.039/-0.040	6.54%/6.67%
I_2	转轴孔距动件 斜面距离	$30^{+0.1}_0$	0.039/0.040	26.16%/26.69%
I_3	转轴孔距定件 侧面距离	$25^{+0.05}_{-0.05}$	-0.033/-0.033	18.73%/18.53%
I_4	转轴孔距动件 侧面距离	$25^{+0.05}_{-0.05}$	0.033/0.033	18.73%/18.53%
I_5	动件锁销孔距动件 侧面距离	$15^{+0.05}_{-0.1}$	-0.034/-0.033	4.97%/4.63%
I_6	定件锁销孔距定件 侧面距离	$15^{+0.05}_0$	0.034/0.033	4.97%/4.63%
$\alpha/(\circ)$	定动件配合面夹角	$0^{+0.05}_{-0.05}$	0.034/0.035	19.90%/20.32%

作为目标尺寸构建尺寸链,进而基于矢量环法开展了折叠舵面的尺寸链分析,得到了各相关尺寸的敏感度和贡献度指标,总结归纳出各组成环对目标尺寸的影响规律,最终通过计算机辅助的统计分析法验证了上述尺寸链分析过程的正确性。上述研究工作是对折叠舵面间隙特征进行尺寸链分析的有益尝试,可为飞行器折叠舵面的间隙特征设计优化提供技术支撑。

AST

参考文献

[1] 黄锐,胡海岩. 飞行器非线性气动伺服弹性力学 [J]. 力学进展,2021,51(3): 428-466.
Huang Rui, Hu Haiyan. Nonlinear aeroservoelasticity of aircraft [J]. Advances in Mechanics, 2021, 51(3): 428-466. (in Chinese)

[2] 王博,马志赛,丁千,等. 基础激励下含间隙折叠舵面非线性系统辨识 [J]. 振动与冲击,2020,39(4): 122-128.
Wang Bo, Ma Zhisai, Ding Qian, et al. System identification of folding rudders with freeplay nonlinearity under base excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 122-128. (in Chinese)

[3] 王强,马志赛,张欣,等. 基于模态综合法的含间隙折叠舵面动态特性分析 [J]. 航空学报,2020,41(5): 202-210.
Wang Qiang, Ma Zhisai, Zhang Xin, et al. Dynamic character analysis for a folding fin with freeplay nonlinearities based on

mode synthesis method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 202-210. (in Chinese)

[4] Yang Ning, Wang Nan, Zhang Xin, et al. Nonlinear flutter wind tunnel test and numerical analysis of folding fins with freeplay nonlinearities [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(1): 144-159.

[5] 王斐,冉玉国,谭光辉,等. 全动翼面间隙非线性气动弹性响应分析 [J]. 航空工程进展,2022,13(2): 18-26.
Wang Fei, Ran Yuguo, Tan Guanghui, et al. Nonlinear aeroelastic response analysis of fully moving wing with free play [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 18-26. (in Chinese)

[6] Tang Deman, Dowell E H. Aeroelastic airfoil with free play at angle of attack with gust excitation [J]. Aiaa Journal, 2010, 48: 427-442.

[7] 颜世钊,刘忠明,张志宏,等. 大型起重机减速器尺寸链分析 [J]. 机械传动,2015,39(11): 118-120.
Yan Shidang, Liu Zhongming, Zhang Zhihong, et al. Analysis of the dimension chain of large crane reducer [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(11): 118-120. (in Chinese)

[8] Chen Hua, Li Xin, Jin Sun. A statistical method of distinguishing and quantifying tolerances in assemblies [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 156: 107259.

[9] 朱彬,于乃江,孟祥海,等. 航空发动机装配尺寸链公差设计方法研究 [J]. 测试技术学报,2015,29(2): 177-184.
Zhu Bin, Yu Naijiang, Meng Xianghai, et al. Study on the tolerance analysis of aircraft engine assembly dimension chain [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(2): 177-184. (in Chinese)

[10] 孟巧凤,张林鎔,尹琳峥,等. 基于3DCS的三维尺寸公差的分析与优化 [J]. 系统仿真学报,2018,30(5): 1730-1738.
Meng Qiaofeng, Zhang Linxuan, Yin Linzheng, et al. Three dimension tolerance analysis and optimization based on 3DCS [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1730-1738. (in Chinese)

[11] Chen Hua, Jin Sun, Li Zhimin, et al. A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods [J]. Computer-Aided Design, 2014, 53: 1-13.

[12] Shen Zhengshu, Ameta G, Shah J J, et al. A comparative study of tolerance analysis methods [J]. Journal of Computing and

- Information Science in Engineering, 2005, 5(3): 247-256.
- [13] 容芷君, 陈少云, 陈奎生, 等. 车身产品设计中的多层次尺寸链构建 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(11): 1394-1398.
- Rong Zhijun, Chen Shaoyun, Chen Kuisheng, et al. The development of multiple hierarchy dimension chain in auto-body design [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(11): 1394-1398. (in Chinese)
- [14] Gao Zhenbo, Wang Zhexing, Wu Zijian, et al. Study on generation of 3D assembly dimension chain[C]//Proceedings of the 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 2014: 163-168.
- [15] 郭崇颖, 刘检华, 唐承统, 等. 基于图论的装配尺寸链自动生成技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(12): 2980-2990.
- Guo Chongying, Liu Jianhua, Tang Chengtong, et al. Automatic generation technology of assembly dimension chain based on graph theory [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(12): 2980-2990. (in Chinese)
- [16] Muholzoev A V, Masyagin V B. Probabilistic calculation of tolerances of the dimension chain based on the Floyd-Warshall algorithm[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE), 2016: 959-962.
- [17] Wu Zhigang, Yang Ning, Yang Chao. Identification of nonlinear structures by the conditioned reverse path method [J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(2): 373-386.
- [18] He Haonan, Tang Hong, Yu Kaiping, et al. Nonlinear aeroelastic analysis of the folding fin with freeplay under thermal environment [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(9): 2357-2371.
- [19] Chung K W, Chan C L, Lee B H K. Bifurcation analysis of a two-degree-of-freedom aeroelastic system with freeplay structural nonlinearity by a perturbation-incremental method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 520-539.
- [20] Ding Qian, Wang Dongli. The flutter of an airfoil with cubic structural and aerodynamic non-linearities [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(5): 427-434.
- [21] Abdelkefi A, Vasconcellos R, Marques F D, et al. Modeling and identification of freeplay nonlinearity [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(8): 1898-1907.
- [22] Sun Yukai, Yang Chao, Wu Zhigang, et al. Nonlinear system identification of an all movable fin with rotational freeplay by subspace-based method [J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1205.
- [23] 何昊南, 于开平, 唐宏, 等. 有间隙折叠舵面的振动实验与非线性建模研究 [J]. 力学学报, 2019, 51(5): 1476-1488.
- He Haonan, Yu Kaiping, Tang Hong, et al. Vibration experiment and nonlinear modelling research on the folding fin with freeplay [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(5): 1476-1488. (in Chinese)
- [24] Ma Zhisai, Wang Bo, Zhang Xin, et al. Nonlinear system identification of folding fins with freeplay using direct parameter estimation [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019, 30: 3978260.
- [25] 张蕾. 三维尺寸链的偏差分析 [J]. 机械工程师, 2015(7): 105-107.
- Zhang Lei. Deviation analysis of 3D dimension chain [J]. Mechanical Engineer, 2015(7): 105-107. (in Chinese)
- [26] 侯天阳, 宋冰. 基于振动水平的离心泵关键尺寸三维公差分析与优化 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48(4): 59-61.
- Hou Tianyang, Song Bing. 3D tolerance analysis and optimization of centrifugal pump based on vibration level [J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(4): 59-61. (in Chinese)
- [27] Jiang Qing, Liu Sumei, Sun Jinxin, et al. 3D tolerance analysis of the 1/32 CFETR vacuum vessel [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 160: 111859.
- [28] 郑素娟, 黄美发, 张奎奎, 等. 基于装配约束的尺寸链自动生成方法 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(2): 122-128.
- Zheng Sujuan, Huang Meifa, Zhang Kuikui, et al. Automatic generation of dimension chain based on assembly constraints [J]. Machine Design and Research, 2017, 33(2): 122-128. (in Chinese)
- [29] 张志永. 统计公差设计及检验关键技术研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- Zhang Zhiyong. Research on key techniques of statistical tolerance design and inspection [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)

Dimensional Tolerance Analysis on Folding Fin with Freeplay for Flight Vehicles

Ren Yansong¹, Ma Zhisai¹, Wang Xiaopeng², Wang Jiapan², Fu Jie¹

1. *Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin University, Tianjin 300350, China*

2. *China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China*

Abstract: Freeplay exists widely in folding fins of flight vehicles, which can significantly affect their structural dynamic behaviors and bring great challenges to the corresponding dynamic modeling and characteristic prediction. This paper aims to investigate the structural design problem of a folding fin with freeplay to improve its operating performance by controlling the freeplay characteristics. Firstly, a dimensional tolerance analysis scheme of the folding fin with freeplay is proposed based on the vector loop method to obtain the sensitivity and contribution index of the relevant dimensions regarding to the freeplay. The freeplay is defined as the target dimension and its generation mechanism is comprehensively considered in the proposed method. Thereafter, the dimension chain of a typical folding fin with freeplay is constructed based on the proposed method by considering its actual operating principle. Finally, the proposed method and computer-aided statistical analysis method are subsequently used to analyze the dimension chain, and the sensitivity and contribution index of the relevant dimensions calculated by the two methods are consistent with each other, which validates the accuracy and feasibility of the proposed dimensional tolerance analysis method and provides technical support for the further design optimization of the folding fin with freeplay.

Key Words: folding fin; freeplay nonlinearity; dimensional tolerance analysis; vector loop method; design optimization

Received: 2022-09-15; **Revised:** 2023-01-09; **Accepted:** 2023-02-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2020Z009048001); National Natural Science Foundation of China(12272258); Natural Science Foundation of Tianjin(21JCQNJC0360); Young Elite Scientists Sponsorship Program by Tianjin(TJSQNTJ-2020-01)