

考虑磨损演化的铰链式襟翼机构动力学仿真研究

冯蕴雯¹, 唐家强¹, 薛小锋¹, 李帅¹, 陈先民^{2,3}

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065;
3.中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要:不同卡位的襟翼气动载荷差别很大,使得轴承在不同襟翼偏角下所承受载荷也存在明显差异,这导致在不同角度位置的轴承磨损深度不一致。因此,引入均匀磨损深度的方法难以适用于襟翼的动力学特性分析。为解决这一问题,提出了一种基于最小二乘法的动力学建模方法。根据襟翼翼面的连接特点利用 C-B 法对其进行柔性化,并采用 RBE2 单元建立刚柔耦合动力学模型。联合 UAMP、DISP、UMESHMOTION 子程序进行磨损演化仿真,获取铰链轴承的非均匀磨损数据,同时通过最小二乘拟合建立磨损深度和襟翼偏角角度以及摩擦因数的映射关系。将该映射关系以铰链轴承中心点的偏移量和轴承摩擦因数的方式更新刚柔耦合动力学模型,以获取在磨损影响下的襟翼机构动力学响应,验证了方法的适用性和有效性。结果表明,随着磨损的进行,襟翼内外侧轴承转轴同轴度逐渐降低,内外侧驱动力矩随之增加,增加幅度最大为 15.08%。该方法可为襟翼机构的设计及轴承选型提供一定支持。

关 键 词:襟翼机构;动力学;刚柔耦合;磨损演化;最小二乘

中图分类号:V224+.5

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)02-0222-10

近年来,随着下偏扰流板技术的成功应用以及对襟翼机械系统可靠度要求的提高,飞机襟翼的运动机构向着结构简单、质量轻、可靠性高的方向发展^[1-2],固定铰链式的运动机构凭借可靠性高和质量轻的显著优势,成为了襟翼机构轻量化设计的最优选择^[3-4]。该类机构主要通过铰链承受和传递襟翼翼面的气动载荷,而且还要实现襟翼与机翼之间的相对运动,以满足飞机不同飞行状态下的偏转角度要求,因此轴承不可避免地发生磨损,进而导致铰链机构的性能逐渐退化直至失效^[5]。相比其他类型的襟翼运动机构,铰链式襟翼运动机构的关节轴承承受着很大的集中载荷,磨损问题更加严重^[6]。同时,不同卡位的气动载荷差异导致轴承非均匀磨损,使得襟翼机构的动力学特性分析更为困难。因此,研究磨损演化对襟翼机构动力学特性的影响,对提高机构可靠性以及指导机构设计具有重要意义^[7]。

国内外学者针对襟翼机构的动力学特性和磨损演化预测开展了大量研究。冯蕴雯等^[8]针对空间铰链式襟翼机构建立了刚柔耦合动力学模型,并分析了该机构在正常工况和故障工况下的动力学特性。钟云龙等^[9]针对某型飞机襟翼运动机构,通过多体动力学仿真软件平台 LMS Visual Lab 建立了刚柔耦合仿真模型,并进行动力学仿真计算,得到了襟翼运动机构在不同工况下的动力学响应。Feng 等^[10]针对铰链式襟翼机构提出了一种刚柔耦合动力学建模方法,采用多点约束 RBE2 单元进行刚性和柔性部件的连接,并基于所建立的动力学模型研究了载荷分配原则和驱动力矩特性。Zhou 等^[11]利用 Simulink 和同步约束方法建立了襟翼机构的动态仿真模型,在此基础上分析了综合误差影响下运动参数误差的规律性和分散性,得到了襟翼偏转角最大偏差的位置和最大驱动力矩。Mukras 等^[12]基于 Archard 磨损模型提出了一种铰链磨损深度的预测方法。该方法考虑了多连杆机构动力学特性受铰链磨损深度变化的影响,并通过试验验证了方法的正确性。Geng 等^[13]基于多体动力学提出了一种铰链

磨损深度预测模型,可保证磨损后铰链间隙的平滑。朱爱斌等^[14]在充分考虑了含间隙铰链表面接触刚度对动态磨损影响的基础上,结合 Archard 磨损模型提出一种兼顾磨损精度和效率的磨损预测方法。Lai 等^[15]提出了一种基于动力学的铰链磨损预测方法,并通过磨损试验验证了所提出的预测方法,结果表明当磨损增量不大时,预测值与实际值相符。

以上学者的研究在襟翼机构动力学特性分析和磨损预测等方面发挥了重要作用。一方面,考虑到襟翼翼面跨度较大,均将翼面柔性化进行刚柔耦合动力学建模,获取襟翼机构的动力学特性,并没有考虑轴承磨损带来的影响^[8-11];另一方面,针对铰链磨损深度的预测多是基于赫兹理论^[16-17]并利用 Archard 磨损模型计算名义磨损深度^[7,14-15]。然而,轴承磨损导致的襟翼卡滞甚至卡阻却时有发生;同时在不同卡位下襟翼气动载荷的差距使得轴承所承受载荷在不同的襟翼偏转角度下具有明显的差异,这也导致轴承磨损深度的不一致。因此现有的襟翼动力学特性分析中对磨损的考虑并不全面。

本文以某型飞机后缘襟翼机构为研究对象,为获取铰链自润滑轴承非均匀的磨损状态数据,基于 Archard 模型,联合 UAMP、DISP 和 UMESHMOTION 子程序建立 ABAQUS 磨损演化仿真模型,并通过最小二乘拟合得到磨损深度随襟翼偏角角度的映射关系。在此基础上,结合刚柔耦合多体动力学模型,以铰链轴承中心位置的偏移和铰链轴承摩擦因数的变化来表征磨损深度,从而建立考虑磨损演化的刚柔耦合动力学模型。最后,基于此研究了铰链式襟翼

机构在轴承磨损后的动力学响应规律。

1 考虑磨损演化的动力学建模方法

如图 1 所示,考虑磨损演化的襟翼刚柔耦合动力学建模方法主要包括多体动力学仿真方法、磨损演化仿真方法和基于最小二乘法的参数更新三部分。主要思路是将磨损深度通过动力学模型中铰链轴承中心点的偏移量和摩擦因数的变化进行考虑。在动力学仿真部分,襟翼翼面为大跨度部件,受载后产生的较大变形将会对载荷分配产生影响,因此利用 Craig-Bampton 方法(C-B 法)对翼面进行柔性化,并通过 RBE2 连接单元进行刚性运动机构和柔性化翼面的耦合。通过所建刚柔耦合动力学模型输出铰链的偏转角度和铰链的交点载荷,用于铰链轴承的磨损演化仿真。在磨损演化仿真部分,由于铰链轴承磨损是非均匀的,通过 UAMP 子程序和 DISP 子程序分别将动力学输出的交点载荷和偏转角度导入 ABAQUS 磨损演化模型,用于模拟襟翼循环收放过程中的载荷变化。同时轴承内圈材料的硬度远大于衬垫材料的硬度,因此可以忽略轴承内圈的磨损,只考虑轴承衬垫的磨损^[18]。轴承衬垫的磨损基于 Archard 模型并结合 UMESHMOTION 子程序进行有限元计算和磨损深度预测。在参数更新部分,采用最小二乘法建立磨损深度和偏转角度以及摩擦因数之间的映射关系,并更新所建立的刚柔耦合动力学模型,以探究在磨损影响下的襟翼机构动力学响应。

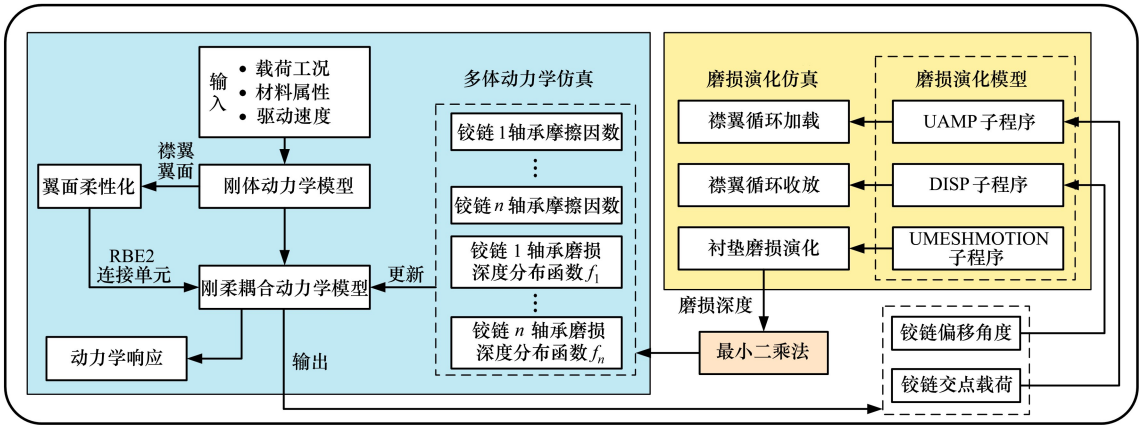


图 1 考虑磨损演化的动力学建模方法

将襟翼翼面进行有限元离散,并使用 C-B 法进行柔性体建模^[24],其中翼面蒙皮和普通翼肋采用四边形壳单元,加强肋和支撑管采用四面体单元。襟翼翼面的边界自由度包括连接边界自由度和载荷边界自由度,其中连接边界自由度是襟翼翼面和运动机构的连接副自由度,载荷边界是襟翼气动力加载的力边界,如图 3 所示。

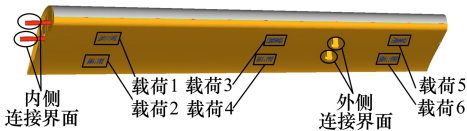


图 3 襟翼翼面的边界自由度

在 MotionView 虚拟样机分析软件中建立后缘襟翼的刚体动力学模型,并导入襟翼翼面柔性体模型替换原有的刚体翼面,在连接边界处采用 RBE2 连接单元进行耦合^[10],在载荷边界施加如图 4 所示气动载荷,其方向均垂直于襟翼翼面向上。其中,仿真时间与襟翼运动过程的对应关系如表 2 所示。

给定内外侧滚珠丝杠转动规律如图 5 所示,内侧滚珠丝杠转动速度为 100°/s,外侧滚珠丝杠转动

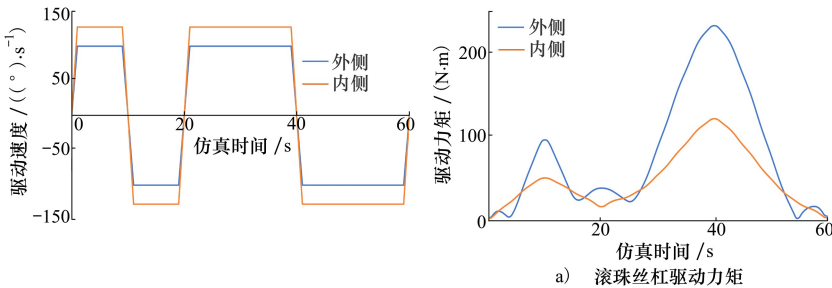


图 5 滚珠丝杠转动速度

3.2 铰链轴承磨损演化仿真

图 2 中球副所示位置为铰链轴承,在该型襟翼中采用自润滑轴承,其磨损主要发生在衬垫表面^[25]。衬垫为钢背基(轴承内圈)的表面涂覆上一层摩擦因数极低的 PTFE 复合材料,使得轴承内圈和外圈之间转动的摩擦力特别小。在利用 ABAU-QS^[26]进行磨损演化仿真时,需要对(7)式进行离散化,即每个时间增量步中每个节点磨损深度为

$$\Delta h_i = K \frac{\sigma_i s_i}{H}$$

(8)

式中: i 为节点编号; Δh_i 为第 i 个节点的磨损深度;

速度为 128°/s,至此完成了襟翼刚柔耦合动力学模型的建立。通过仿真即可得到铰链轴承处的交点载荷以及驱动力矩分别如图 6a)~6b) 所示。从图 6b) 可以看出轴承所受载荷在不同襟翼偏转角度下的差距很大。

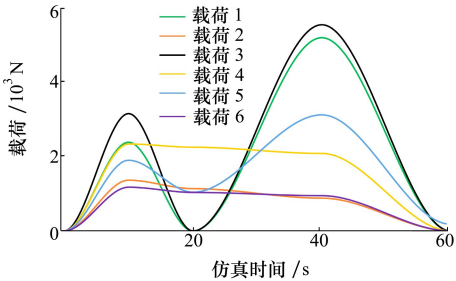


图 4 襟翼翼面气动载荷

表 2 仿真时间与襟翼运动过程的对应关系

仿真时间/s	襟翼运动过程
0~10	0°放到 17°
10~20	17°收回 0°
20~40	0°放到 34°
40~60	34°收回 0°

图 6 未考虑磨损时的仿真结果

σ_i 和 s_i 分别为第 i 个节点的接触应力和相对滑动距离,均由每一步的有限元计算结果确定。

通过(8)式就可以计算得到每个时间增量步中各节点磨损深度,随着磨损的进行,衬垫节点的位置需要不断改变。利用 ABAQUS 自带的自适应网格功能实现节点的调整,即 ALE(Arbitrary Lagrange-Euler)方法^[27](如(9)式所示)。该方法可实现单元内部材料的流入或流出,但整个场域内的物理量不会随着节点位置的改变而改变,从而保证节点位置的改变并不会影响计算结果精度,具体可通过 UMESHMOTION 子程序实现。

$$x'_{i+1} = x_{i+1} + u_{i+1} = N^N x_i^N \tag{9}$$

式中： x'_{i+1} 为新节点坐标； x_{i+1} 为节点初始坐标； u_{i+1} 为节点位移，大小等于 Δh_i ； N^N 为网格光滑算法的行函数； x_i^N 为邻近节点坐标。

为实现如图 5 所示轴承内圈的循环往复偏转和对应角度下的载荷施加,将轴向载荷依据 JB/T8565 进行等效,并采用 DISP 子程序和 UAMP 子程序分别来定义轴承内圈循环往复偏转的位移边界和不规则载荷曲线的载荷边界。仿真时,为更好地模拟真实的边界条件,获得较为精确的分析结果,建立耳片结构(耳片端面施加固定约束)和轴结构(通过耦合约束在轴中心施加载荷)。同时,在耳片和外圈间、轴和内圈间施加绑定约束,用以模拟过盈装配;在轴承内圈和外圈衬垫间施加面面接触、0.125 的摩擦因数以及 $0.9\text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 的磨损系数^[27]。至此,建立的铰链轴承磨损演化仿真模型如图 7 所示,具体材料参数及网格信息如表 3 所示。

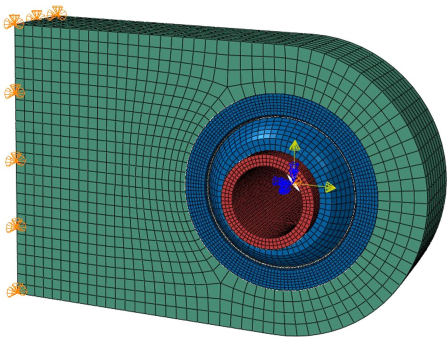


图 7 铰链轴承磨损演化仿真模型

表 3 材料参数及网格信息

结构	材料	弹性模量/ MPa	泊松比	网格类型	网格 数量
衬垫	PTFE 纤维	$E_1: 52\ 040$	0.370	C3D8R	4 312
		$E_2: 4\ 710$		沙漏控制	
		$G: 3\ 450$		增强	
内圈	钢	200 000	0.266	C3D8R	10 620
外圈	钢	200 000	0.266	C3D8R	34 188
耳片	钛合金	110 300	0.340	C3D8R	6 750
轴	钢	210 000	0.300	C3D8R	9 660

出了磨损前和磨损后位移云图分布,可以看出磨损后,轴承在 17°以及 34°附近磨损较为严重(图 8 中红色区域),这与襟翼收放过程的载荷变化相符。另一原因是当襟翼放到起飞卡位(17°)和襟翼放到着陆卡位(34°)的过程中,0°到 17°的范围经历了 4 次磨损,17°到 34°的范围只经历了 2 次磨损。

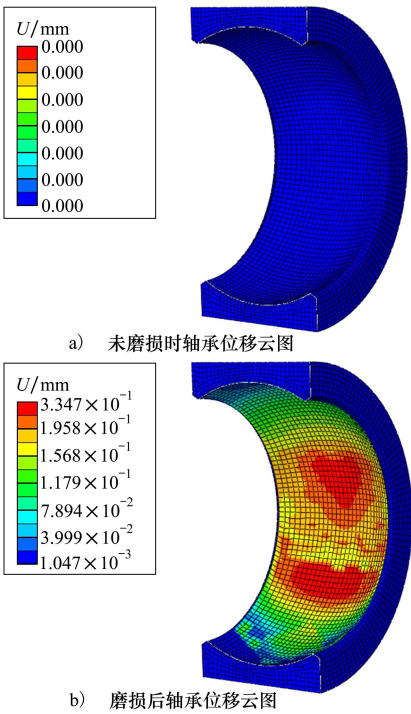


图 8 磨损前和磨损后轴承位移云图

图 9 为内、外侧轴承 17°处节点随时间的磨损曲线,可以发现在初始阶段磨损速率较大,随着磨损时间增加进入线性的稳定磨损阶段。这一变化满足“加速磨损-稳态磨损”的磨损演化过程,与通常的磨损试验结果基本一致^[28]。造成这一现象的原因是初始阶段接触面积很小,随着磨损的进行,接触面积逐渐变大并趋于稳定。图 10 给出了内外侧轴承在 20 万,40 万,60 万,80 万次循环下,轴承磨损深度随襟翼偏转角度变化曲线,与位移云图分布规律一致。可以看出,轴承磨损深度在不同襟翼偏转角度下的差异较大,这主要是因为襟翼在不同卡位下的气动载荷不同进而导致轴承所受载荷不同。

结合图 9 和图 10 可以发现,在相同的襟翼偏转角度下内侧轴承和外侧轴承的磨损深度差异也较大,这将导致襟翼转轴的偏移,进而影响襟翼的动力学特性。

有限元模拟结果如图 8~10 所示。其中图 8 给

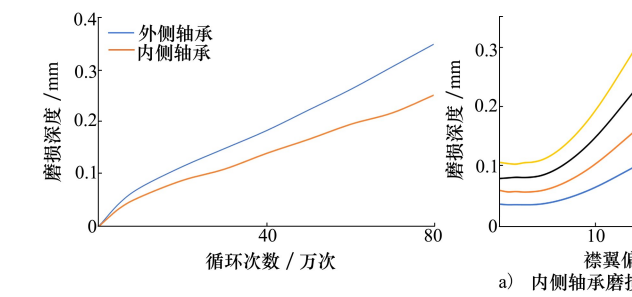


图 9 轴承 17°处的磨损曲线

3.3 基于最小二乘法的动力学模型更新

在完成轴承磨损深度的计算后,采用最小二乘法对轴承磨损深度与襟翼偏转角度、磨损深度与摩擦因数进行拟合,建立磨损深度与偏转角度以及摩擦因数的映射关系,具体方法如(10)式所示^[29]

min_a F(a) = 1/2 ||f(a)||_2^2 (10)

式中:f(a) 为要拟合的函数;F(a) 为目标函数。

通过寻找一个 a 令目标函数 F(a) 最小,即:求得的数据与实际数据之间误差的平方和最小,如

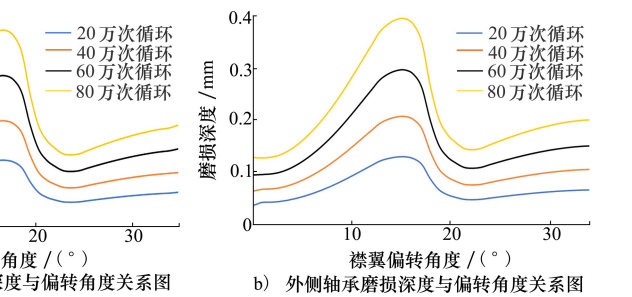


图 10 磨损深度与偏转角度关系

(11) 式所示。

F(a) = sum_{i=0}^n (y_i - f_i(a))^2 (11)

式中:y_i 为第 i 个真实值;f_i(a) 为通过参数 a 得到的第 i 个预测值。

通过图 10 可以看出磨损曲线在 17°处有明显的分段且为非线性,因此采用非线性最小二乘法进行拟合时,并以 17°为界限进行分段拟合,最终结果如表 4 所示。

表 4 轴承磨损深度与偏转角度的函数关系

结构	角度范围	阶段	拟合函数 (y 为轴承磨损深度,x 为襟翼偏转角度)	拟合优度
内侧轴承	0°~17°	20 万次循环	y=-0.000 03x ³ +0.000 9x ² -0.002x+0.025 9	0.985 9
		40 万次循环	y=-0.000 04x ³ +0.001 2x ² -0.001 6x+0.037 5	0.988 9
		60 万次循环	y=-0.000 06x ³ +0.001 7x ² -0.001 9x+0.051 4	0.983 3
		80 万次循环	y=-0.000 08x ³ +0.002 3x ² -0.003 6x+0.069 8	0.986 6
	17°~34°	20 万次循环	y=-0.000 04x ³ +0.003 2x ² -0.081x+0.73	0.973 6
		40 万次循环	y=-0.000 07x ³ +0.005 9x ² -0.015x+1.39	0.970 1
		60 万次循环	y=-0.000 07x ³ +0.005 9x ² -0.015x+1.34	0.973 6
		80 万次循环	y=-0.000 1x ³ +0.008 8x ² -0.224x+2.03	0.973 7
外侧轴承	0°~17°	20 万次循环	y=-0.000 06x ³ +0.001 7x ² -0.005 8x+0.041	0.992 0
		40 万次循环	y=-0.000 1x ³ +0.003x ² -0.009 8x+0.073	0.991 2
		60 万次循环	y=-0.000 2x ³ +0.004x ² -0.015x+0.106	0.991 8
		80 万次循环	y=-0.000 2x ³ +0.006x ² -0.021x+0.143	0.992 2
	17°~34°	20 万次循环	y=-0.000 06x ³ +0.005x ² -0.12x+1.11	0.986 3
		40 万次循环	y=-0.000 1x ³ +0.008x ² -0.22x+2.03	0.986 3
		60 万次循环	y=-0.000 1x ³ +0.012x ² -0.32x+2.89	0.981 2
		80 万次循环	y=-0.000 2x ³ +0.016x ² -0.42x+3.86	0.983 9

摩擦因数随磨损深度的变化关系则根据文献[30]中同类型轴承试验结果进行拟合,可发现随着磨损的进行,摩擦因数 y_f 呈线性稳定的增加趋势,其映射关系如(12)式所示。

$$y_f = 0.286\ 5x + 0.125$$

(12)

将表5中磨损深度与襟翼偏转角度的映射关系以轴承中心位置偏移的方式对襟翼刚柔耦合动力学模型进行更新,同时将铰链轴承处的摩擦因数更新为(12)式的映射关系,至此完成考虑磨损演化的动力学模型建立。最终得到在铰链磨损影响下的襟翼动力学响应如图11所示,同时取受载最为严重的34°卡位(40 s)下的驱动力矩进行对比分析,结果如表5所示。

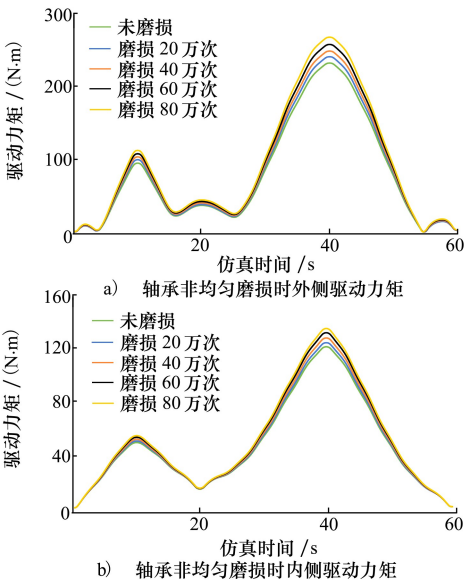


图 11 考虑轴承非均匀磨损时的驱动力矩

表 5 磨损不同时间的驱动力矩变化

驱动类型	磨损次数	驱动力矩/ (N·mm)	增加幅度/%
外侧驱动	未磨损	233 104	
	20 万次磨损	241 729	3.70
	40 万次磨损	249 392	6.99
	60 万次磨损	258 354	10.83
	80 万次磨损	268 253	15.08
内侧驱动	未磨损	121 977	
	20 万次磨损	124 945	2.43
	40 万次磨损	128 481	5.33
	60 万次磨损	132 288	8.45
	80 万次磨损	135 415	11.02

从图11和表5可以看出,随着铰链轴承磨损的进行内外侧驱动力矩均增加,且影响最大的位置位于襟翼偏转17°(20 s)和34°(40 s)。一方面是因为在17°和34°位置的襟翼受载最大,铰链轴承磨损也最为严重,使得内外侧轴承磨损深度相差最大,如图12所示。这导致襟翼转轴的偏移、同轴度降低,使得襟翼驱动力矩变大。这也是引入均匀的磨损量进行动力学分析无法考虑的。另一个方面是因为17°和34°位置的轴承载荷最大,而轴承磨损导致摩擦因数增大使得轴承产生的阻力矩增大,进而导致襟翼驱动力矩增大。此外,由于外侧铰链轴承所受载荷更大,导致外侧驱动的驱动力矩增加幅度更大,驱动增加幅度最大为15.08%。

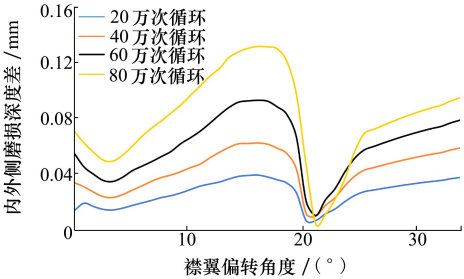


图 12 不同角度的内外轴承磨损深度差

综上所述,引入铰链轴承的非均匀磨损可以反映出内外侧轴承磨损深度的最大相差量,这会带来内侧摇臂转轴中心和外侧摇臂转轴中心的相对偏移进而导致襟翼内外侧轴承转轴同轴度降低,将会大大增加襟翼卡滞甚至卡阻的风险。因此,铰链轴承的非均匀磨损会对襟翼的动力学响应造成不可忽略的影响,运动机构设计和轴承选型时应考虑随着使用时间增加所带来的额外载荷。

4 结 论

本文基于最小二乘法提出了一种考虑磨损演化的襟翼机构刚柔耦合动力学模型建立方法,研究了铰链轴承非均匀磨损对襟翼机构动力学响应的影响,可为襟翼机构的设计及轴承选型提供一定支持。

1) 基于 UAMP 子程序、DISP 子程序和 UMESHMOTION 子程序实现了不规则载荷曲线的加载和往复循环运动的边界条件,获取了轴承的非均匀磨损数据,提供了一种复杂载荷条件下的轴承磨损预测方法;

2) 基于非线性和线性最小二乘法建立了磨损深度与偏转角度以及摩擦因数之间的映射关系,并基于此实现了对襟翼刚柔耦合动力学模型的更新;

3) 随着铰链轴承的磨损襟翼内外侧轴承转轴同轴度逐渐降低,内外侧驱动力矩随之增加,增加幅度最大为 15.08%,设计时需要考虑轴承非均匀磨损

带来的额外载荷。

本文所提方法考虑到轴承工作环境为高载低速的情况,因而选用 Archard 模型。因此,所提方法可应用于黏着磨损类型的轴承磨损深度预测中,同时可应用于多连杆系统考虑磨损方向的动力学特性分析中。

参考文献:

- [1] HOOGENDIJK A R. Knowledge engineering in high lift design: the ICAD flap kinematic tool[D]. Delft: Delft University of Technology, 2004
- [2] ZACCAI D. Design framework for trailing edge high-lift systems: a knowledge based engineering application[D]. Delft: Delft University of Technology, 2014
- [3] RECKSIEK M. Advanced high lift system architecture with distributed electrical flap actuation[C]//Aviation System Technology Workshop, 2009
- [4] SCHOLZ P, MAHMOOD S, CASPER M, et al. Design of active flow control at a drooped spoiler configuration[R]. AIAA-2013-2518, 2013
- [5] JIE Z, SUN Z, SONG Q. Analysis of flap mechanism reliability[C]//International Conference on Mechatronics Engineering & Information Technology, 2017
- [6] 张雷, 冯蕴雯, 薛小锋, 等. 直滑轨式襟翼运动机构可靠性分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1189-1191
ZHANG Lei, FENG Yunweng, XUE Xiaofeng, et al. Reliability analysis of straight track flap movement mechanism[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1189-1191 (in Chinese)
- [7] 喻天翔, 庄新臣, 宋笔锋, 等. 飞机连杆机构多铰链磨损寿命综合预测方法[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 133-142
YU Tianxiang, ZHUANG Xincheng, SONG Bifeng, et al. Integrated wear life prediction method of multiple joints in an aircraft linkage mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 133-142 (in Chinese)
- [8] 冯蕴雯, 何智宇, 唐家强, 等. 民用飞机顺气流襟翼机构故障工况动力学仿真研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 85-93
FENG Yunweng, HE Zhiyu, TANG Jiaqiang, et al. Dynamics simulation research on fault conditions of deflecting to airflow flap mechanism of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 85-93 (in Chinese)
- [9] 钟云龙, 张钟文, 张大鹏, 等. 基于失效模式的襟翼运动机构可靠性仿真分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(5): 1-7
ZHONG Yunlong, ZHANG Zhongwen, ZHANG Dapeng, et al. Reliability simulation analysis of a flap motion mechanism based on failure modes[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(5): 1-7 (in Chinese)
- [10] FENG Y W, HE Z Y, XUE X F, et al. Dynamic simulation of complex multi-hinge space flap mechanism[C]//The 12th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, 2022
- [11] ZHOU J, SUN Z, SONG Q. Analysis of flap mechanism reliability[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology, 2017
- [12] MUKRAS S, KIM N H, MAUNTLER N A, et al. Analysis of planar multibody systems with revolute jointwear[J]. Wear, 2010, 268(5/6): 643-652
- [13] GENG X Y, LI M, LIU Y F, et al. Non-probabilistic kinematic reliability analysis of planar mechanisms with non-uniform revolute clearance joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 140: 413-433
- [14] 朱爱斌, 何胜利, 邹超. 考虑接触刚度的含间隙铰接副动态磨损分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 12-18
ZHU Aibin, HE Shengli, ZOU Chao, et al. Dynamic wear analysis of clearance joint considering contact stiffness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 12-18 (in Chinese)
- [15] LAI X M, HE H, LAI Q F, et al. Computational prediction and experimental validation of revolute joint clearance wear in the low-velocity planar mechanism[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 963-976

- [16] 方鑫. 关节轴承协调接触模型与磨损寿命预测[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014: 14-31
FANG Xin. Conformal contact model and wear life prediction for spherical plain bearings[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 14-31 (in Chinese)
- [17] 刘尧. 基于分形理论的关节轴承微观接触模型与寿命预测研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016: 26-45
LIU Yao. A new microcontact model of conformal contact and wear life prediction for spherical plain bearings based on fractal theory[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016: 26-45 (in Chinese)
- [18] 袁军亚, 杨明明, 李佩隆, 等. 自润滑关节轴承用织物衬垫摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(2): 280-292
YUAN Junya, YANG Mingming, LI Peilong, et al. Progress research on the tribology of fabric liner for self-lubricating joint bearings[J]. Tribology, 2021, 41(2): 280-292 (in Chinese)
- [19] 张青林. 基于刚柔耦合的整车动力学仿真及悬架参数优化[D]. 重庆:重庆理工大学, 2015
ZHANG Qinglin. Simulation of vehicle dynamics and optimization of suspension parameters based on rigid-flexible coupling model [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2015 (in Chinese)
- [20] 梁力, 纪小飞, 孟兆康, 等. 基于刚柔耦合动力学仿真的起落架舱门优化[J]. 复合材料科学与工程, 2021(6): 45-51
LIANG Li, JI Xiaofei, MENG Zhaokang, et al. Optimization of landing gear door based on rigid-flexible coupling dynamic simulation[J]. Composites Science and Engineering, 2021(6): 45-51 (in Chinese)
- [21] FLORES P. Modeling and simulation of wear in revolute clearance joints in multibody systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(6): 1211-1222
- [22] WANG G X, LIU H Z. Dynamic analysis and wear prediction of planar five-bar mechanism considering multi-flexible links and multi-clearance joints[J]. Journal of Tribology, 2017, 139(5): 051606
- [23] ZHU A B, HE S L, ZOU C, et al. The effect analysis of contact stiffness on wear of clearance joint[J]. Journal of Tribology, 2017, 139(3): 031403
- [24] BORISENKO V, LEORO J, DIDENKO A. Main rotor blade modeling approaches comparison[C]//International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling, 2021
- [25] 汪选国, 严新平, 李涛生, 等. 磨损数值仿真技术的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2004(2): 188-192
WANG Xuanguo, YAN Xinping, LI Taosheng, et al. Research status of wear numerical simulation technology[J]. Tribology, 2004(2): 188-192 (in Chinese)
- [26] KIM N H, WON D, BURRIS D, et al. Finite element analysis and experiments of metal/metal wear in oscillatory contacts[J]. Wear, 2005, 258: 1787-1793
- [27] 李静, 尹俊. 自润滑轴承磨损行为的数值仿真[J]. 润滑与密封, 2018, 43(11): 120-124
LI Jing, YIN Jun. On the wear simulation of self-lubrication bearings[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(11): 120-124 (in Chinese)
- [28] 卢建军, 邱明, 李迎春. 自润滑向心关节轴承磨损寿命模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 56-63
LU Jianjun, QIU Ming, LI Yingchun. Wear life model for self-lubricating radial spherical plain bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 56-63 (in Chinese)
- [29] YU Ruifeng, DIAO Binbin, GAO Deli. A calculation model for improving the relative borehole uncertainty based on the least square method in relief well[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 217: 70-76
- [30] 杨雨钱. 民机典型零部件性能退化规律及可靠性建模分析研究[D]. 西安:西北工业大学, 2015: 67-69
YANG Yuqian. Research on performance degradation law and reliability modeling of typical components of civil aircraft[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015: 67-69 (in Chinese)

Study on dynamic simulation of hinged flap mechanism considering wear evolution

FENG Yunwen¹, TANG Jiaqiang¹, XUE Xiaofeng¹, LI Shuai¹, CHEN Xianmin^{2,3}

- 1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
- 2.Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;
- 3.National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Due to the significant differences in aerodynamic loads offlaps at different positions, there are also significant differences in the loads borne by bearings at different flap angles. This leads to inconsistent wear depth of bearings at different angles. Therefore, the method of introducing uniform wear depth is difficult to apply to the dynamic characteristics analysis of flaps. To address this issue, a dynamic modeling method based on the least squares method is proposed. Firstly, based on the connection characteristics of the flap surface, the C-B method is used to make it flexible, and the RBE2 element is used to establish a rigid flexible coupling dynamic model. On this basis, combining with UAMP, DISP and UMESHMOTION subroutines, the uneven wear data of hinge bearings are obtained by using the wear evolution simulation. At the same time, the function relation among the wear depth, flap deflection angle, and friction coefficient is established via least squares fitting. Finally, the function relation is updated to the rigid-flexible coupling dynamic model by the offset of the hinge bearing center point and the friction coefficient of the ball pair, so as to obtain the dynamic response of the flap under the influence of wear, which verifies the applicability and effectiveness of the method. As wear progresses, the coaxiality of the inner and outer bearing shafts of the flaps decreases gradually, and the driving torque on the inner and outer sides increases accordingly. The maximum increase is 15.08%. This method can provide some support for designing the flap mechanism and bearing selection.

Keywords: flap mechanism; dynamics; rigid-flexible coupling; wear evolution; least squares

引用格式:冯蕴雯, 唐家强, 薛小锋, 等. 考虑磨损演化的铰链式襟翼机构动力学仿真研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(2): 222-231

FENG Yunwen, TANG Jiaqiang, XUE Xiaofeng, et al. Study on dynamic simulation of hinged flap mechanism considering wear evolution[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(2): 222-231 (in Chinese)