

文章编号:1674-8190(2019)S1-055-07

倾转翼无人机倾转装置设计及强度校核

刘阳,王琦

(南昌航空大学 飞行器工程学院,南昌 330063)

摘要:以某型倾转翼无人机为研究对象,分析其过渡段过程中各个部件的运动方式,为使得无人机能够平稳飞行,成功完成过渡阶段,设计出一种以蜗轮蜗杆传动机构为主要部件的倾转装置,蜗轮蜗杆装置传动平稳且能够让倾转翼部分具有自锁效应,使其达到预定位置后不会因受到气动力的影响而发生相对运动,同时也保证了飞机前飞模式的稳定。针对倾转装置运动工况进行有限元仿真分析,并完成蜗轮蜗杆装置的强度分析及寿命预测。结果表明:设计出的装置能够满足现有的强度和寿命要求,其计算结果可为后续的优化提供一定的参考。

关键词:倾转翼无人机;蜗轮蜗杆;强度;寿命

中图分类号: V215.4⁺4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.S1.011

Design and Strength Check of Tilt-wing UAV Tilt Device

Liu Yang, Wang Qi

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Taking a certain type of tilt-wing UAV as the research object, the motion mode of each component during the transition period is analyzed, to enable the UAV to fly smoothly and successfully complete the transition phase, a tilting device with a worm and wormwheel mechanism as the main component is designed. The worm and wormwheel device is smooth transporting power and can make the tilting wing part have a self-locking effect, so that it does not get relative motion due to the influence of air force after reaching the predetermined position, and it will also ensure the stability of the forward flying mode of the UAV. The platform is a tool for analyzing the movement conditions of the tilting device and completing the strength check and life prediction analysis of the device. The analysis results show that the designed device can meet the existing strength and life requirements, and the calculation results can be provide as some reference for subsequent optimization.

Key words: tilt-wing UAV; worm wheel and worm bolt; strength; life

0 引言

倾转旋翼飞机作为一种独特的飞行器,它结合了固定翼飞机高速前飞和直升机垂直起降的特性,具有优异的运动特性和广泛的运用前景。但复杂多样的飞行方式同时也带来诸多技术问题,其中旋

翼与机翼的气动干扰问题较为突出,其原因是倾转旋翼飞行器在悬停状态和部分过渡状态过程中,旋翼产生的下洗气流与旋翼下方机翼上表面相互干扰影响,会产生部分的升力损失,特别是在悬停状态下螺旋桨拉力损失最大可达到 15%左右^[1-3],为减少拉力损失,提高螺旋桨的工作效率,倾转翼飞

收稿日期:2019-01-15; 修回日期:2019-02-27

通信作者:刘阳,572314831@qq.com

引用格式:刘阳,王琦. 倾转翼无人机倾转装置设计及强度校核[J]. 航空工程进展, 2019, 10(增刊 1): 55-61.

Liu Yang, Wang Qi. Design and strength check of tilt-wing UAV tilt device[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(S1): 55-61. (in Chinese)

机应运而生。

倾转翼飞机与倾转旋翼飞机最大的不同点在于倾转翼飞机机翼分成了固定翼和倾转翼两个部分,固定翼与机身相连接,与普通固定翼飞机的机翼无太大区别,倾转翼安装在固定翼两侧,在飞机从直升机模式到固定翼模式的过渡过程中随着旋翼一起倾转,其翼弦的方向与旋翼平面几近垂直,使得受旋翼尾流影响的机翼部分随着旋翼一起倾转。倾转翼飞机在在悬停状态下的螺旋桨拉力损失大约为 1%^[4],提升了飞机螺旋桨效率,相对来说可减小螺旋桨的尺寸来达到同样的升力要求,减轻了结构重量。但是新型的倾转翼飞机同样存在诸多可研究的问题,目前国内外的研究方向大都往气动和控制方面发展^[5-7],因此本文针对某型倾转翼无人机在过渡段的运动方式和受力特点,设计一种能够用于此无人机的一套倾转装置,并对这套倾转装置进行强度、刚度校核及寿命预测,以期为以后无人机的试飞实验提供理论基础。

1 倾转装置设计及理论分析

对于倾转翼无人机来说,实现从直升机模式到固定翼模式的转换需通过转动倾转翼来实现,因此,本文首先确定固定翼与倾转翼之间通过一根长杆连接,长杆中心位于机翼气动中心附近(即翼型四分之一弦长处),由于固定翼与倾转翼之间存在转动,因此,长杆上需安置滑动轴承来减小固定翼与长杆之间的滑动摩擦力,同时可增强结构的强度。在倾转翼飞机在固定翼模式的飞行过程中,由于倾转翼本身相对固定翼和机身是转动的,在受到气动力的作用下,如果机构没有自锁效应,倾转翼就会随着气动力的作用发生偏转,造成飞机的失控,为此,须在这套倾转装置中设计一个自锁机构。最后考虑上述种种原因,设计出的倾转装置如图 1 所示。

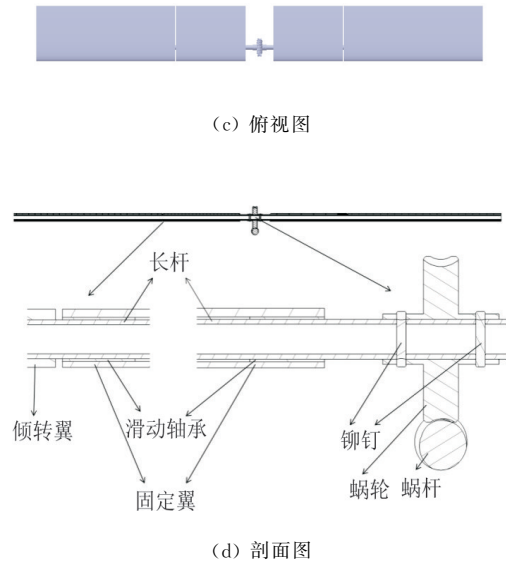
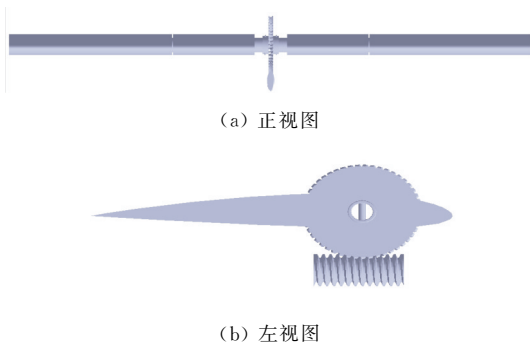


图 1 倾转装置三视图及剖面图

图 1 为倾转装置的三视图和剖面图,从剖面图可知,装置的中间是一个蜗轮蜗杆传动机构,安放在机身内部,倾转装置的电机安装在蜗杆上,电机工作时带动蜗杆转动,蜗轮通过两个铆钉与长杆相连接,倾转翼固定安装于长杆上,随着长杆一起转动,固定翼安装在机身上,其内部开孔处两端各安装一个滑动轴承,长杆在穿过固定翼仅与滑动轴承发生相对转动,不与固定翼直接接触,这样可减小长杆与固定翼之间的摩擦力。蜗轮蜗杆传动机构主要用来传递空间交错轴间的运动和动力,具有传递比显著、结构紧密、传动平稳、制造较为简单的特点^[8],特别是当蜗轮蜗杆的分度圆导程角小于当量摩擦角时,蜗轮蜗杆会发生自锁现象^[9]。通过分析结合上述的优点和特性,选择蜗轮蜗杆装置作为主要的传动机构。

2 蜗轮蜗杆实体模型建立

根据前期分析结果,蜗轮蜗杆需安置在机身的内部,因此体积不宜过大,且蜗轮蜗杆需要有自锁性能,因此蜗轮蜗杆应具有较小导程角,为满足上述的要求和条件,选择一种符合规格的 ZA 型蜗轮蜗杆,其基本尺寸如表 1 所示,同时将数据输入软件 gearTrax 中并调用 soildworks 生成蜗轮蜗杆机构,如图 2 所示。

表 1 蜗轮蜗杆基本尺寸和参数

参数	数值	参数	数值
中心距 a/mm	40	直径系数 q	18.00
模数 m/mm	1	分度圆导程角 γ	$3^{\circ}10'47''$
分度圆直径 d_1/mm	18	蜗轮齿数 z_2	62
蜗杆头数 z_1	1	变位系数 x_2	0

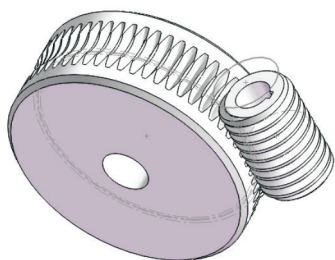


图 2 蜗轮蜗杆实体模型

3 蜗轮蜗杆有限元模型建立

在进行有限元分析时,考虑到蜗轮蜗杆相接触表面的复杂性,其啮合过程是一个连续动态变化的过程,为保证求解结果的精度和合理性,蜗轮蜗杆需采用瞬态动力学计算。同时作如下假设:蜗轮蜗杆材料为连续、线弹性和均匀的;蜗轮蜗杆为无误差的理想齿轮,忽略蜗轮蜗杆系统的热变形,不考虑接触表面弹性流体动力润滑机理,润滑作用仅用摩擦因数来考虑啮合时齿面上的摩擦力,接触表面摩擦作用服从库仑摩擦定律;蜗轮蜗杆之间的摩擦因数不仅与其滑动速度、材料齿面粗糙度和蜗杆螺纹硬度有关,而且还与润滑油的临界温度和膜厚有关,因此摩擦因数是一个变量,为了简化计算,在分析过程中,假设摩擦因数为定值。

3.1 定义材料属性和简化模型

在对机构进行有限元分析时,首要要对机构的材料的属性进行定义,如密度、弹性模量、泊松比等。本文研究的对象为倾转翼无人机,其自身的重量不宜过大,因此不能采用常规的金属作为蜗轮蜗杆的制造材料,应选择密度较小的有机材料,同时由于蜗轮蜗杆在啮合处有相对滑动,当润滑情况不好时,会产生较为严重的摩擦和磨损。因此,本文选择 POM(聚甲醛热塑性结晶聚合物)作为原材

料。POM 强度、刚度高,减磨耐磨性好,其力学性能优异,与金属十分接近,且疲劳强度突出,自润滑性优异。其材料特性如表 2 所示。

表 2 蜗轮蜗杆材料特性

名称	POM	名称	POM
杨氏模量(N/m^2)	$2.60\text{E}+09$	张力强度(N/m^2)	$7.15\text{E}+07$
泊松比	0.39	屈服强度(N/m^2)	$6.06\text{E}+07$
质量密度(kg/m^3)	$1.39\text{E}+03$		

由于蜗轮蜗杆几何模型比较复杂,其力学分析非常困难^[10],运用 workbench 进行蜗轮蜗杆接触应力分析时,如果选取整个模型进行分析,则需要较多的单元、节点和内存空间,同时需要耗费大量的求解时间,为此在不影响求解条件和精度的情况下,对蜗轮蜗杆进行对应的简化,简化模型如图 3 所示。



图 3 蜗轮蜗杆简化模型

3.2 接触设置及网格的划分

在 workbench 中选择 Transient structural 模块,在 Engineering data 中添加一种新材料 POM 并定义材料的属性,在 Geometry 模块中简化模型,进入 model 模块中,首先将模型的材料修改成 POM,接着定义蜗轮蜗杆间的接触,选择相啮合的齿面,同时将接触定义为 Frictional,设置摩擦系数为 0.12,如图 4 所示。

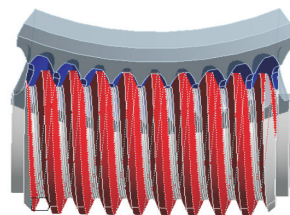


图 4 啮合接触面

选择蜗轮的上表面同时定义一个 joints,接触

类型选择 body-Ground, 运动类型选择为 Revolute, 使得蜗轮能够拥有对地旋转的自由度, 旋转轴为自身的 z 轴, 如图 5 所示。

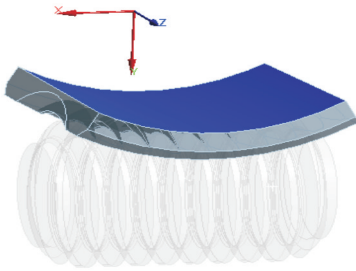
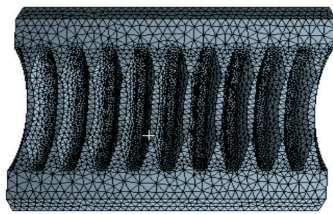


图 5 对地旋转自由度添加

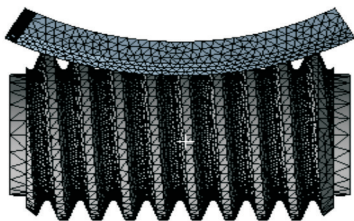
由于本次选择蜗轮蜗杆结构尺寸较小且结构较为复杂, 若对其进行六面体网格划分不但操作难度大且容易产生质量较差的网格, 因此选用对复杂表面适应性较为良好的四面体网格对其进行网格划分, 其中蜗杆最小网格尺寸为 0.45 mm, 最大网格为 1.5 mm, 蜗轮最小网格尺寸为 0.25 mm, 最大尺寸为 0.7 mm, 二者的网格增长率均为 1.5, 最后划分出的网格如图 6 所示。



(a) 蜗杆网格



(b) 蜗轮网格



(c) 总体模型网格

图 6 蜗轮蜗杆网格划分

4 蜗轮蜗杆接触强度分析与寿命预测

4.1 蜗轮蜗杆接触强度理论计算

由于材料和结构上的原因, 蜗杆螺旋齿部分的强度一般总是高于蜗轮轮齿的强度, 故失效经常发生在蜗轮轮齿上。因此, 在校核蜗轮蜗杆接触强度时, 一般只需对蜗轮轮齿的强度进行校核。蜗轮齿面接触强度计算的原始公式来源于赫兹公式^[11]。接触应力 σ_H 为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{KF_n}{L_0 \rho \sum}} \cdot Z_E \quad (1)$$

式中: F_n 为啮合齿面上的法向载荷, 单位为 N; L_0 为接触线总长, 单位为 mm; K 为载荷系数; Z_E 为材料的弹性系数, 单位为 Mpa, 其计算公式为

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{E_1}{1-\mu_1^2} + \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \right)}} \quad (2)$$

式中: μ_1 和 μ_2 分别为蜗杆和蜗轮的泊松比; E_1 和 E_2 分别为蜗杆和蜗轮的弹性模量。

将以上公式中的法向载荷 F_n 换算成蜗轮分度圆直径 d_2 与蜗轮转矩 T 的关系式, 再将 d_2 、 L_0 、 ρ 等换算成中心距 a 的函数后, 即得到蜗轮齿面接触强度的验算公式为

$$\sigma_H = Z_E Z_\rho \sqrt{\frac{KT_2}{a^3}} \leq [\sigma_H] \quad (3)$$

式中: Z_ρ 为蜗轮蜗杆接触线长度和曲率半径对接触强度的影响系数, 简称接触系数, 可从文献[12]查得 $Z_\rho = 2.65$; K 为载荷系数, $K = K_A K_\beta K_V$, 其中 K_A 为使用系数, K_β 为齿向载荷分布系数, K_V 为动载荷系数, 通过文献[12]查得三个载荷系数值均为 1, 因此 $K = 1$; T_2 为蜗轮的转矩, 根据前期的计算, 蜗轮最大的转矩大约为 2 500 N·mm; σ_H 、 $[\sigma_H]$ 分别为蜗轮齿面的接触应力与许用接触应力。

4.2 蜗轮蜗杆接触强度有限元数值分析

对于蜗轮蜗杆来说, 蜗杆输入力矩、蜗轮输出力矩、蜗轮输出的力矩大约是 2 500 N·mm, 因此, 在前期接触设置的 joint 上添加一个 2 500 N·mm 的力矩, 方向为阻碍蜗轮转动的方向, 同时在蜗轮 A、B 两端的面上添加 Remove Displacement, 并设置蜗杆绕自身的 z 轴旋转, 如

图 7 所示。旋转角度为 360°, 时间为 0.58 s, 这样即可计算在 0.58 s 内, 蜗杆旋转一周, 蜗轮转动一个齿, 即蜗轮蜗杆啮合传动的一个周期内的受力情况。

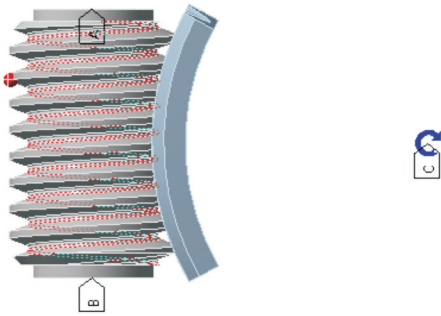


图 7 蜗轮蜗杆计算设置

经计算后, 提取出蜗轮的最大等效应力, 并将等效应力的最大值作为输出参数^[13], 求解结果如图 8 所示。

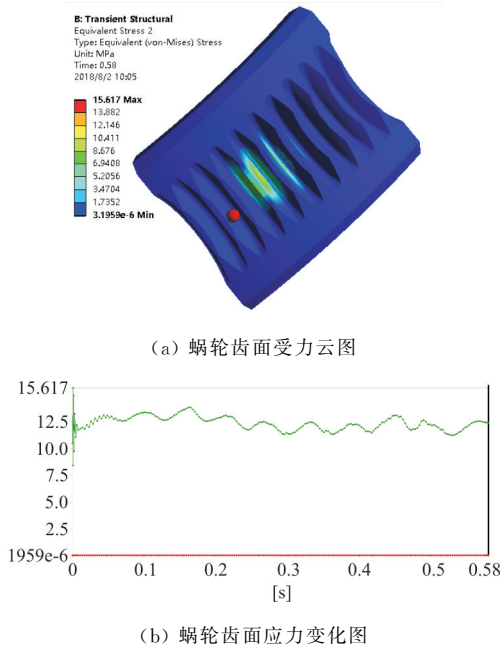


图 8 蜗轮应力云图及在转动周期内应力变化图

从图 8 可以看出: 蜗轮在齿根处的接触应力最大, 符合蜗轮蜗杆接触应力准则的一般规律, 同时, 从应力变化图中可知, 除去刚开始应力计算不稳定状态, 最大应力达到 15.617 MPa。此后应力变化都比较均匀规律, 最大为 13.785 MPa。

等效应力的弹性模量计算公式为

$$E_n = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (4)$$

式中: E_n 为等效应力弹性模量; E 是材料的杨氏模量; μ 为泊松比。

通过结合表 2 以及式(2)~式(4)可求赫兹公式计算出的接触应力 $\sigma_H = 13.965 \text{ MPa}$, 有限元仿真出的结果与公式计算的结果误差在 1.3% 左右, 这个误差在允许范围内, 表明本次 ANSYS workbench 仿真计算的结果较为准确。

在确认计算结果较为准确后, 将三种 Stress Tool 插入至计算结果中, 三种 Stress Tool 分别是最大拉应力、最大切应力、最大等效应力的安全系数, 如图 9~图 11 所示。

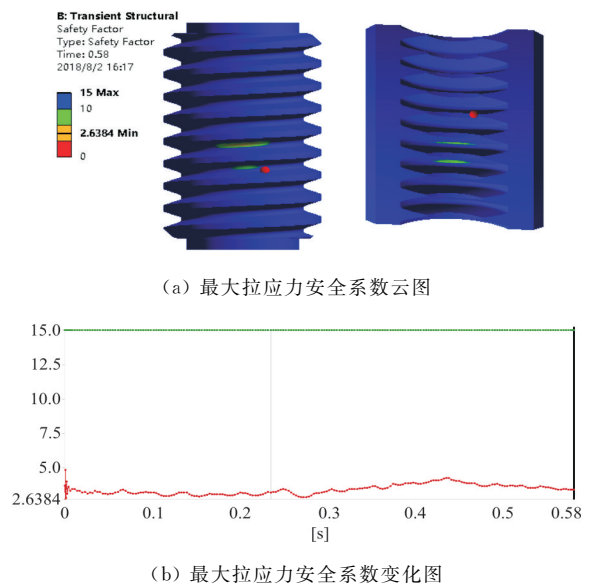


图 9 蜗轮蜗杆拉应力安全系数

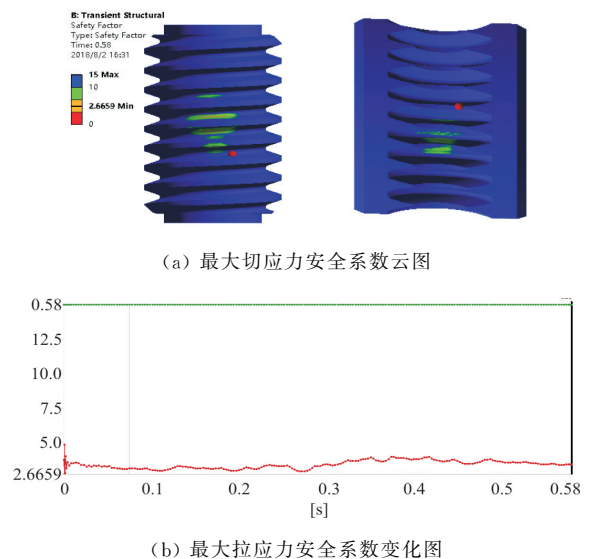
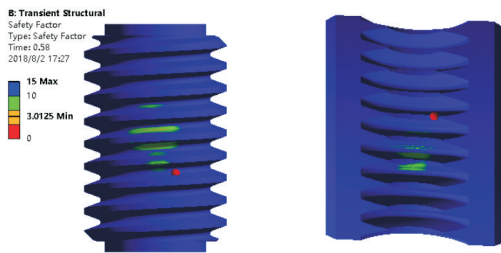
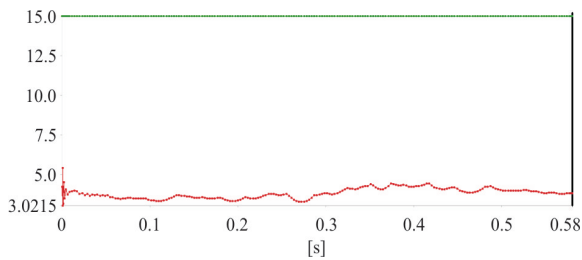


图 10 蜗轮蜗杆切应力安全系数



(a) 最大等效应力安全系数云图



(b) 最大等效应力安全系数变化图

图 11 蜗轮蜗杆等效应力安全系数

从图 9~图 11 可以看出:三种应力的安全系数均在 2.6 以上,最大拉应力、最大切应力、最大等效应力分别对应的是材料力学中的第一、第三、第四强度理论,第二强度理论是适用于脆性材料的,在此处可忽略。因此,上述情况表明用于制造蜗轮蜗杆的材料满足蜗轮蜗杆工作的强度要求。

4.3 蜗轮蜗杆工作寿命预测

倾转无人机飞机在悬停状态过程中,因为速度接近为零,所以其尾翼舵效也近似为零,为在悬停状态下保持飞机的稳定性,控制飞机的姿态不发生改变,就必须让倾转翼不停的小角度来回转动来保持飞机的平衡,在此过程中,蜗轮蜗杆齿面受到了高频率的交变应力的作用,容易产生疲劳效应,因此,须对其进行疲劳校核分析。

从蜗轮蜗杆齿面上的受力类型来说,当其发生往复运动时,其受到的应力为对称的循环应力。因此,首先将疲劳曲线添加至 workbench 的 POM 材料特性中,然后对蜗轮蜗杆施加对称循环应力,在 workbench Fatigue Tool 添加上 life 和 safety Factor 模块,运行计算,仿真的结果如图 12~图 13 所示。

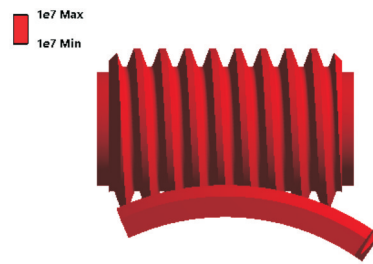


图 12 蜗轮蜗杆使用次数

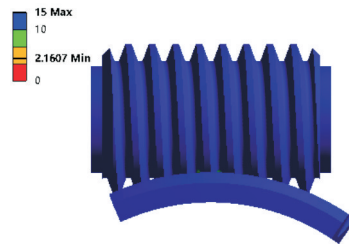


图 13 蜗轮蜗杆安全系数

从图 12 可以看出:蜗轮蜗杆在进行 10^7 次循环应力作用后仍不发生破坏,图 13 表明蜗轮蜗杆在进行 10^7 次循环应力作用后其安全系数为 2.1607,说明在此种受力条件下本文所采用的蜗轮蜗杆装置的寿命在理论上是接近无限的,可永久使用。

5 结 论

(1) 对蜗轮蜗杆结构进行动态啮合接触分析,其应力分析结果与经验公式的理论计算结果差距很小,表明本文所采用的计算设置和方法能够较为准确的模拟蜗轮蜗杆的动态啮合受力情况。

(2) 分别采用第一、第三和第四最大强度理论对蜗轮蜗杆的强度进行校核,其结果表明本文所选用的材料和蜗轮蜗杆的尺寸规格能够满足强度要求。

(3) 对蜗轮蜗杆进行寿命分析,其在循环应力的作用下可运转 10^7 以上,表明蜗轮蜗杆使用寿命接近无限,可永久使用。

参考文献

- [1] McCroskey W J, Spalart P R, Laub G H, et al. Airloads on bluff bodies with application to the rotor-induced downloads

- on tilt-rotor aircraft[J]. Vertica, 1983, 9(1): 1-11.
- [2] 郭剑东, 宋彦国. 小型无人倾转旋翼机气动与操纵特性试验研究[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(1): 107-112.
- [3] 李鹏, 招启军. 悬停状态倾转旋翼/机翼干扰流场及气动力的 CFD 计算[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 361-371.
- [4] Droandi G, Zanotti A, Gibertini G, et al. Experimental investigation of the rotor-wing aerodynamic interaction in a tiltwing aircraft in hover[J]. Aeronautical Journal, 2016, 119(1215): 591-612.
- [5] Droandi G, Gibertini G, Grassi D, et al. Proprotor-wing aerodynamic interaction in the first stages of conversion from helicopter to aeroplane mode[J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 58: 116-133.
- [6] Droandi G, Zanotti A, Gibertini G. Aerodynamic Interaction between rotor and tilting wing in hovering flight condition[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2015, 60(4): 1-20.
- [7] 王琦, 史小明, 高硕. 倾转翼飞机过渡段的纵向建模与分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 62-66.
- [8] 马路. 阿基米德圆柱蜗轮蜗杆加工特性分析[J]. 现代制造技术与装备, 2017(9): 149-149.
- [9] 徐平友. 蜗杆蜗轮机构的自锁性[J]. 现代机械, 2002(1): 79-80.
- [10] 柴群, 万朝燕. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的蜗轮蜗杆动态接触分析[J]. 现代制造工程, 2006(11): 46-48.
- [11] 周良埔. 环面蜗杆副疲劳强度的校核[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 180-184.
- [12] 濮良贵. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 252-253.
- [13] 彭佑多, 易陈斐, 颜健, 等. 基于 ABAQUS 的碟式太阳能方位角驱动机构蜗轮蜗杆接触强度分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(1): 25-29.

作者简介:

刘 阳(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器气动分析及强度校核。

王 琦(1964—),男,博士,教授。主要研究方向:飞机总体设计。

(编辑:沈惺)