

基于浮点编码遗传算法的行星轮系 折叠机构优化设计

弥晓亮,赵美英,孟毛毛,万小鹏
(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要:针对折叠机翼变体飞机,设计一种适合装配在变体飞机小空间的行星轮系折叠机构。在系统研究行星轮系设计目标、设计变量和约束条件的基础上,基于浮点编码遗传算法,使用 MATLAB 优化工具箱对其主要参数进行优化。结果表明:相对于安全系数法,浮点编码遗传算法可减轻结构重量 16.7%,使折叠机构在满足设计指标的情况下达到质量最轻的目的;采用浮点编码遗传算法进行优化求解是行星轮系机构设计的一种行之有效的优化设计方法。

关键词:折叠机构;行星轮系;遗传算法;轮系优化

中图分类号: V229; TH132.41

文献标识码: A

Based on the Floating-point Coded Genetic Algorithm Planetary Gear Train Folding Mechanism Optimization Design

Mi Xiaoliang, Zhao Meiyang, Meng Maomao, Wan Xiaopeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the folding wing morphing aircraft, a planetary gear train of folding mechanism is designed, which suits assembly in the small space of morphing aircraft. On the basis of the systematic study of the planetary gear design goals, variables and constraints, the main parameters are optimized by using the floating-point coded genetic algorithm, and the MATLAB optimization toolbox. Research shows that by using floating-point coded genetic algorithm the structure weight can be reduced by 16.7% compared with the safety coefficient method, and the minimum weight of the folding mechanism is achieved in the case of meeting the design specifications. Therefore the floating-point coded genetic algorithm optimization solution for planetary gear mechanism design is an effective optimal design method.

Key words: folding mechanism; planetary gear train; genetic algorithm; gear optimization

0 引言

变体飞机在飞行过程中可以改变外形,以适应多变的飞行环境,完成多种任务使命。与传统飞机不同,变体飞机可以有效地实现外形的分布式、连续式变形,因此需要更先进的技术、工艺来进行设计与加工。设计者需要在变体飞机的气动外形、作

动机构、结构强度、操纵性与稳定性、控制系统等方面进行探索与创新。折叠机翼变体飞机模仿老鹰的飞行姿态,改变机翼面积和展弦比,从而兼顾飞机高速飞行时的机动性能和低速飞行时的续航性能,是变体飞机中容易实现且能够有效提升飞行性能的一种飞行器。

洛马公司设计了折叠机翼变体飞机,该机采用热聚合激励器、压电作动器和形状记忆蒙皮折叠机翼,但是由于所使用的智能材料机构仍处于试验阶段,没有实用化。设计一种技术成熟、简单可靠的机械折叠机构是进一步深入研究折叠机翼变体飞

机的必要条件。在机械折叠机构的研究设计中,严子焜^[1]设计分析了齿轮啮合机构;金鼎^[2]设计分析了涡轮蜗杆机构。前苏联的苏-27K、美国的 F-18 等舰载机大量使用液压连杆机构,T. F. Fitzgibbon^[3]的 U. S. Patent 5310138 详细介绍了一种液压连杆机构。

本文在对折叠机翼变体飞机的折叠机构设计技术研究的基础上,根据设计指标,设计一种用于机翼折叠的行星轮系机构,适合装配在变体飞机内部,保持机翼外形光滑连续过渡。

基于遗传算法的诸多优点,采用浮点编码遗传算法,在满足设计指标的前提下,使轮系质量最轻,达到飞机减重的目的。浮点编码适合于精度要求较高的遗传算法,便于较大空间地遗传搜索,改善遗传算法的计算复杂性,提高运算效率,能够处理更复杂的变量约束条件。

1 折叠机翼行星轮系机构设计

变体飞机折叠机构用于飞机机翼的折叠展开动作,并且完成折叠展开动作后,能够保持机翼折叠位置相对固定。折叠机构需要考虑强度、质量、稳定性、可靠性等因素,要求具有结构简单、体积小、作动力强、适合薄机翼安装等优点。

1.1 折叠机构设计指标

折叠机翼变体飞机展开和折叠状态如图 1 所示。

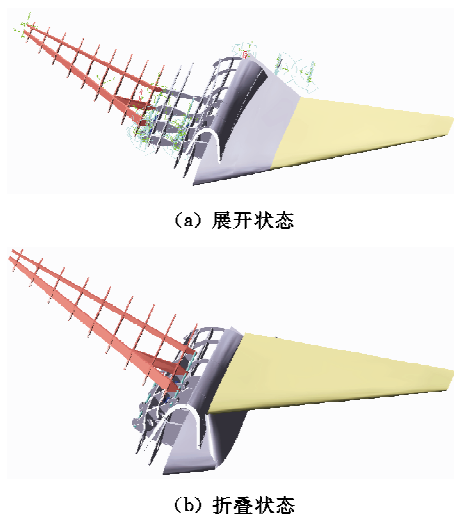


图 1 折叠机翼变体飞机展开和折叠状态
Fig. 1 Expand and collapse state of folding wing morphing aircraft

针对变体飞机机翼折叠形式(图 1),提出折叠机构的一系列设计指标。对于翼展 2 m、起飞质量 4 kg 的小型折叠机翼变体飞机,根据机翼的气动载荷,要求折叠机构的输出扭矩达到 12 000 N·mm;能够抵抗 3G 的过载;折叠机构应能够双向折叠;机翼折叠后内段机翼必须与机身贴合,减小阻力;折叠角度为 120°;考虑到起飞质量限制,折叠机构总质量不得大于 0.5 kg。

1.2 行星轮系机构设计

综合考虑上述设计指标,本文采用 2K-H 型行星轮系设计机构驱动机翼折叠。机构总装图如图 2 所示,1 为驱动电机,2 为传动轴,3 为机身锁销耳片,4 为锁销机构,5 为连接耳片,6 为行星轮系机体,7 为角度传感器,8 为行星轮系。

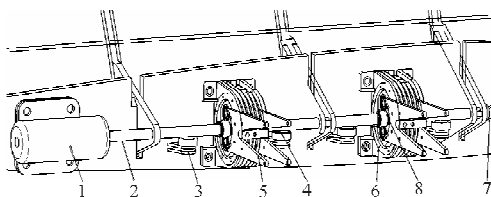


图 2 机构总装图

Fig. 2 Institutional general assembly drawing

在 2K-H 型行星轮系机构中,驱动电机、锁销机构和行星轮系机体通过螺栓固链在机身肋板上。当机翼进行折叠动作时,首先锁销机构中的锁舌收起,使内翼的锁销耳片同机身的锁销耳片处于活动状态^[8];然后驱动电机开始工作,驱动传动轴转动,传动轴带动行星轮系同向转动,带动连接耳片同步转动,连接耳片同内翼翼梁固链,达到驱使内翼绕传动轴旋转的目的。传动轴末端连接一个电位器作为角度传感器,电位器的电位信号作为角度反馈信号,直接输送到驱动电机伺服电路控制作动器转动角度。

行星轮系详细设计图(包括行星齿轮系的正视图 and 局部剖视图)如图 3 所示,9 为齿轮轴套,10 为太阳轮,11 为行星轮,12 为行星架左半盘,13 为行星架右半盘,14 为内齿圈,15 为输出轴。

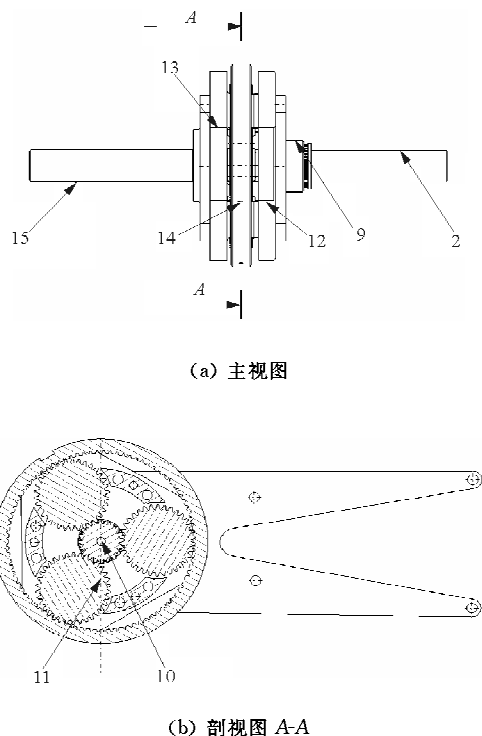


图3 行星轮系设计图

Fig. 3 Design drawing of planetary gear train

内齿圈通过键槽与机体固链,传动轴通过齿轮轴套和太阳轮的外段齿轮固链,方便拆卸行星轮系,增加可维修性。传动轴将扭矩同步传递给太阳轮,太阳轮同向转动,带动行星轮按照传动比同向减速转动,增大扭矩。行星轮通过滚动轴承同行星架铰链,带动行星架同步转动,行星架再带动连接耳片同步转动,并将扭矩通过输出轴传递给后续行星轮系。

行星轮系结构三维等轴视图,如图4所示。

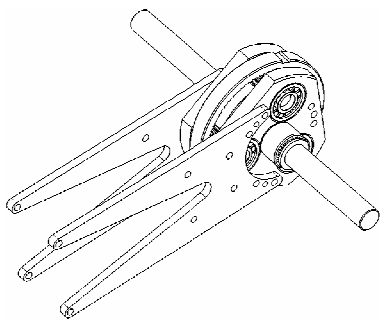


图4 行星轮系结构三维等轴视图

Fig. 4 3D equiaxed view of planetary gear structure

图2中给出了两组行星轮系机构,可以根据折

叠机翼实际受载分布增加机构数量。同齿轮啮合机构相比,行星轮系机构具有体积小、质量轻、结构紧凑、传递功率大、承载能力高、传动比大、传动效率高、运动平稳、抗冲击和振动能力强等优点。有多个行星轮和内齿圈分担承载,可以实现功率分流,有效减小机构中的齿间接触力,因此允许使用模数较小的齿轮,从而缩小径向、轴向尺寸,减轻结构质量并提高机构的承载能力。由于机翼承载气动力,而行星齿轮机构可以有效隔绝机翼在折叠过程中过量振动带来的结构损伤,保证折叠平稳运行,增加电机的工作寿命。

2 行星轮系优化设计

2.1 优化目的

基于遗传算法的诸多优点,采用浮点编码遗传算法,使用MATLAB优化工具箱对行星轮系的各个尺寸参数进行优化,在满足设计指标的前提下,使轮系质量最轻,达到飞机减重的目的。

2.2 浮点编码遗传算法的基本原理

遗传算法(GA)是以自然选择和遗传理论为基础的高效全局寻优搜索算法,主要应用于非线性、多模型、多目标等复杂系统优化问题。遗传算法的计算步骤是:编码并确定控制参数,生成初始群体,选择,交叉,变异,经反复迭代使个体逐渐接近最优解,直至满足规定的收敛准则,即找到全局最优解^[4]。基于浮点编码的遗传算法需要着重解决选择、交叉与变异算子的操作。

编码是解空间向GA空间的映射,是连续问题与算法的桥梁。本文中的设计变量均为连续变量,为了克服二进制编码在进行连续函数离散化时产生的映射误差和方便处理各约束条件,采用浮点数编码方法,染色体长度与设计变量的维数相同。

选择算子建立在对个体的适用度进行评价的基础上,选择操作的目的是把优化的个体直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。比例选择是最常用的选择算子,是一种回放式随机采样的方法。

交叉算子首先定义交叉操作的概率,然后按概率把两个父代个体的部分结构加以交换重组而生

成新个体。用浮点编码方法表示的个体,在进行交叉时一般进行算术交叉。

变异算子在实数编码遗传算法中起很大作用。在实数编码时,变异算子不再像二进制编码时仅仅是起到简单地恢复群体中多样性损失的作用,而已经成为一个主要的搜索算子。

经过选择、交叉和变异操作就得到了一个新的种群,上述步骤经过给定的循环次数之后,遗传算法终止,将当前群体中的最佳个体作为所求问题的最优解输出。

2.3 行星轮系优化问题的数学模型

2K-H 型行星轮系如图 5 所示,1 为太阳轮,2 为行星轮,3 为齿圈,H 为行星架。行星传动的设计比较复杂,其体积、质量和承载能力主要取决于传动参数。

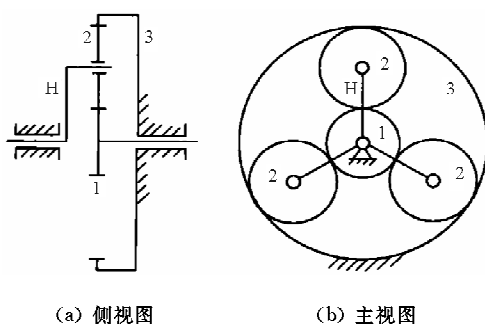


图 5 2K-H 型行星轮系
Fig. 5 2K-H planetary gear train

2.3.1 已知条件

根据设计指标和气动载荷计算结果,要求机构不溢出机翼空间,即

$$d_a + 2d_g \leq 40 \text{ mm} \quad (1)$$

式中: d_a 为太阳轮的分度圆直径; d_g 为行星轮的直径。

输出扭矩 $T = 12\ 000 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 3s 内折叠 120° , 与进气道壁面贴合, 即输出转速 $n_H = 10 \text{ r/min}$, 使用两组行星系平衡纵向扭矩, 传动比 $i_{aH} = 5$, 行星轮数 $C = 3$ 个, 电机输入扭矩 $T = 2\ 400 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 输入转速 $n_a = 50 \text{ r/min}$, 太阳轮与行星轮采用标准直齿圆柱齿轮组成的轮系。所用材料为 20CrMnTi, 强度极限为 $1\ 100 \text{ MPa}$, 屈服极限为 850 MPa , 齿面硬度为 $56 \sim 62 \text{ HRC}$, 许用接

触应力为 $1\ 350 \text{ MPa}$, 许用弯曲应力为 645 MPa 。

2.3.2 确定目标函数和设计变量

2K-H 型行星轮系传动优化以质量最小为目标, 建立优化设计模型。齿圈、整个机构的尺寸和质量能够由太阳轮和行星架的质量之和来确定, 因此可建立如下模型

$$f(x) = \frac{\pi}{4} \rho m^2 b (z_a^2 + C z_g^2) \quad (2)$$

式中: z_a 为太阳轮的齿数; z_g 为行星轮的齿数; C 、 m 、 b 、 ρ 分别为行星轮个数、齿轮模数、齿宽和材料密度。

行星轮系的同心条件

$$z_g = \frac{z_b - z_a}{2} = \frac{(K-1)z_a}{2} = \frac{(i_{aH} - 2)z_a}{2} \quad (3)$$

式中: z_b 为齿圈齿数; K 为行星排特性参数, $K = z_b/z_a$, 由设计给定。

从式(3)可以看出, 影响目标函数的独立参数 z_a 、 m 、 b 可以作为设计变量, 即

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [z_a \ m \ b]^T \quad (4)$$

所以目标函数为

$$f(x) = 0.001\ 532 x_1^2 x_2^2 x_3 [4 + C(i_{aH} - 2)^2] \quad (5)$$

2.3.3 约束条件

在 2K-H 型行星轮系传动中, 约束条件需满足已知条件中的几何要求和强度要求, 为了满足这些要求, 首先分析太阳轮、行星轮和齿圈的齿数关系。如图 5 所示的行星轮系, 其传动比 $i_{aH} = K + 1$, 轮系各齿轮齿数间有 $z_b = z_a + 2z_g$, 引进中间变量 z_m 、 z_n , 分别表示太阳轮和行星轮中较小者和较大者的齿数, 依式(3)有:

当 $k \geq 3$ 时, $z_g/z_a \geq 1$, 则取

$$\begin{cases} z_m = z_a = x_1 \\ z_m/z_n = z_a/z_g = 2/(i_{aH} - 2) \end{cases} \quad (6)$$

当 $k < 3$ 时, $z_g/z_a < 1$, 则取

$$\begin{cases} z_m = z_g = x_1(i_{aH} - 2)/2 \\ z_m/z_n = z_g/z_a = (i_{aH} - 2)/2 \end{cases} \quad (7)$$

本文中, $K \geq 3$, 故取小齿轮齿数为 x_1 。

各项约束条件如下:

①太阳轮根切约束条件为

$$g_1(x) = 17 - x_1 \leq 0 \quad (8)$$

②太阳轮模数约束条件为

$$\begin{cases} g_2(x) = x_2 - 0.6 \leq 0 \\ g_3(x) = 0.4 - x_2 \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

③齿宽系数约束条件为

$$\begin{cases} g_4(x) = x_3 - x_1 x_2 \leq 0 \\ g_5(x) = 0.5 x_1 x_2 - x_3 \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

④空间限制约束条件

$$g_6(x) = x_1 x_2 - 10 \leq 0 \quad (11)$$

⑤各行星轮相邻约束条件为

$$g_7(x) = \frac{x_1(K-1)}{2} [1 - \sin(\pi/C)] - x_1 \sin(\pi/C) + 2 \leq 0 \quad (12)$$

⑥为满足齿面接触疲劳强度约束条件,应有

$$d_1 \geq 76.6 \sqrt[3]{\left(\frac{K_1 T_1}{\varphi_d \sigma_{HP}^2} \cdot \frac{u+1}{u}\right)} \quad (13)$$

式中: d_1 为小齿轮分度圆直径; K_1 为载荷系数; T_1 为小齿轮工作扭矩; φ_d 为齿宽系数; σ_{HP} 为齿轮的接触疲劳许用应力; u 为计算齿轮副的齿数比^[5]。

对于外啮合齿轮副,式(13)可简化为

$$z_1^2 m^2 b > A_H T_1 (u+1)/u \quad (14)$$

式中:接触强度系数 $A_H = 76.3^3 / \sigma_{HP}^2 \cdot K_1$; 对于两组行星轮系,单个轮齿承担扭矩 $T_1 = T'/2C \cdot \Omega$, $\Omega = 1.1$; $u = z_g/z_a = (K-1)/2 = (i_{aH} - 2)/2$ 。

⑦齿面接触疲劳强度约束条件为

$$g_8(x) = 150.137 \left(1 + \frac{2}{i_{aH} - 2}\right) - x_1^2 x_2^2 x_3 < 0 \quad (15)$$

⑧为满足齿根弯曲疲劳强度约束条件,应有

$$m \geq 1.26 \sqrt[3]{\frac{K_1 T_1}{\varphi_d z_1^2} \cdot \frac{Y_F}{\sigma_{FP}}} \quad (16)$$

式中: Y_F 为齿形系数; σ_{FP} 为弯曲疲劳许用应力。

式(16)可简化为

$$m^2 z_1 b \geq A_F T_1 Y_F \quad (17)$$

⑨齿根弯曲疲劳强度约束条件为

$$g_9(x) = 8.3295 - x_1 x_2^2 x_3 \leq 0 \quad (18)$$

由上述各约束条件,可得到优化设计的数学模型为

$$\begin{cases} \min f(x) & (x \in E^3) \\ \text{s. t. } g_j(x) \leq 0 & (j = 1, 2, \dots, 9) \end{cases} \quad (19)$$

上述优化是一个具有非线性不等式约束的三维单目标优化问题。

2.3.4 计算结果与分析

由上文建立的目标函数和约束条件,利用 MATLAB 优化工具箱对行星轮系编写程序,进行

优化计算,并同安全系数法设计方案对比。浮点编码遗传算法优化设计和安全系数设计方案结果对比如表 1 所示。

表 1 遗传优化和安全系数设计方案结果对比

Table 1 Results contrast of genetic algorithm optimization and safety factor design

参数	安全系数法	浮点编码遗传算法	圆整标准
z_a	20.00	19.005 9	20.00
m/mm	0.50	0.400 8	0.50
b/mm	6.00	4.306 1	5.00
质量/g	28.50	11.870 0	23.75

将遗传算法优化结果圆整标准化后,得到行星轮系参数 $z_a = 20$, $z_g = 30$, $z_b = 80$, $m = 0.5 \text{ mm}$, $b = 5 \text{ mm}$, 校核参数均满足约束条件。从对比结果可以看出,采用 MATLAB 优化工具箱进行优化,优化后的质量同安全系数法相比较减小了 16.7%, 可以使其结构更加紧凑,质量减轻并降低成本。通过尺寸关系建立模型,得到如图 2 所示的机构总质量为 0.454 kg,满足设计指标。

3 结 论

(1) 同直齿轮系相比较,本文设计的变体飞机折叠机翼行星轮系机构,具有结构紧凑、传递功率大、运动平稳、抗冲击和振动能力强等特点,达到了设计指标要求,适合应用于折叠机翼。

(2) 基于浮点编码遗传算法对行星轮系进行优化设计,使得行星轮系机构质量同安全系数法相比较减小了 16.7%,证明该方法是一种行之有效的行星轮系机构优化设计方法。

参考文献

- [1] 严子焜. 变体飞机变形机构设计与仿真分析研究[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2008.
Yan Zikun. Morphing aircraft folding mechanism design and simulation analysis [D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)
- [2] 金鼎. 小型机翼折叠式变体无人机设计与飞行动力学[D]. 西安: 西北工业大学航空学院, 2011.
Jin Ding. The small folding wing morphing aircraft design and flight dynamics [D]. Xi'an: School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, 2011. (in Chinese)

(下转第 305 页)

- method using iSGIIT [J]. Microcomputer Information, 2009(34): 179-181. (in Chinese)
- [9] Donea J, Giuliani S, Halleux J P. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 33(1-3): 689-723.
- [10] Martin Larcher, Giampiero Manara. Influence of air damping on structures especially glass[R]. JRC 57330, Ispra(Italy); European Commission, 2010: 9-27.
- [11] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1981: 103-140.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures[M]. Wang Guangyuan, et al. Translation. Beijing: Higher Education Press, 1981: 103-140. (in Chinese)
- [12] Sondipon Adhikari. Damping models for structural vibration[D]. UK: Trinity College, Cambridge University, 2000.
- [13] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California; Livemore Software Technology Corporation, 2007: 137-170, 587-596.
- [14] 王敏, 朱国荣, 孔祥龙, 等. 用 Hooke-Jeeves 方法进行水文地质参数寻优的研究[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 724-727.
Wang Min, Zhu Guorong, Kong Xianglong, et al. A study of optimization for hydrogeologic parameters with hooke-jeeves methods[J]. Geological Review, 2005, 51(6): 724-727. (in Chinese)

作者简介:

刘超(1987—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 飞行器结构设计。

孙秦(1956—)男, 教授, 博导。主要研究方向: 飞行器设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 284 页)

- [3] Fitzgibbon T F. Wing fold actuator system for aircraft: USA, 5310138[P]. 1994-03-10.
- [4] 李元科. 工程最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Li Yuanke. Optimization principles and techniques for engineering design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 李育锡. 机械设计基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 99-102.
Li Yuxi. Fundamentals of machine design [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 99-102. (in Chinese)

作者简介:

陈晓亮(1986—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 飞行器结构设计。

赵美英(1962—), 女, 教授, 博导。主要研究方向: 飞行器结构设计、复合材料结构分析与设计、智能材料结构设计等。

孟毛毛(1988—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复合材料连接结构分析与设计。

万小朋(1962—), 男, 教授, 博导。主要研究方向: 飞行器总体设计、飞行器结构设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 298 页)

- [14] 童贤鑫, 高之恒, 关德新. 帽型复合材料加筋叠层板轴压稳定性分析与试验研究[J]. 航空学报, 1988, 9(5): 255-259.
Tong Xianxin, Gao Zhiheng, Guan Dexin. Analytical and experimental investigations on stability of composite hat-stiffened panels under compression[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(5): 255-259. (in Chinese)
- [15] 穆朋刚, 万小朋, 赵美英. 复合材料加筋壁板稳定性分析研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(9): 1190-1193.
Mu Penggang, Wan Xiaopeng, Zhao Meiyang. A study of the stability of composite stiffened plates[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(9): 1190-1193. (in Chinese)
- [16] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

Chinese Aeronautical Establishment. Stability analysis of composite structures guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:

程家林(1965—), 男, 研究员。主要研究方向: 飞行器总体设计、结构强度设计。

冯玉龙(1988—), 男, 硕士研究生, 助理工程师。主要研究方向: 飞机结构设计、复合材料结构设计。

姚卫星(1957—), 男, 教授, 博导。主要研究方向: 飞行器总体气动-结构的综合设计技术、结构抗疲劳设计、复合材料结构设计、可靠性工程等。

(编辑: 马文静)