DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.5009

一种变形翼机构构型综合及其可靠性优化

刘人瑞[1,2]，唐嘉昌[1,2]，姚齐水[1,2]，董鹏林[1,2]，余江鸿[1,2]

（1. 湖南工业大学 机械工程学院，湖南 株洲 412007；
2. 高性能滚动轴承技术湖南省工程研究中心，湖南 株洲 412007）

摘　要：为探索变形翼机构构型综合方法，提出一种基于图论理论的变形翼机构构型综合方法。首先，基于图论法进行运动链及拓扑图的同构判别，得到变形翼机构的基本构型，并研究了变形翼结构尺寸与刚度、总变形量及质量的敏感性关系；其次，针对传统优化方法的不足，采用基于可靠性的变形翼结构优化设计方法，对变形翼结构进行优化设计。仿真分析结果表明，采用所提方法进行优化设计，不仅大大节省了计算时间，而且得到的优化结果精度更高。对比完成构型优化前后的变形翼结构，发现优化后的质量减少 19.09%，且结构总变形量与等效应力失效概率均满足工程可靠性要求。

关键词：变形翼；构型综合；轻量化；可靠性优化

中图分类号：V224^{+}.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)05−0067−07

引文格式：刘人瑞，唐嘉昌，姚齐水，等 . 一种变形翼机构构型综合及其可靠性优化 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：67−73.

Research on the Configuration of a Morphing Wing Mechanism and Its Reliability Optimization

LIU Renrui[1,2]，TANG Jiachang[1,2]，YAO Qishui[1,2]，DONG Penglin[1,2]，YU Jianghong[1,2]

（1. School of Mechanical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China；
2. Hunan Engineering Research Center of High-Performance Rolling Bearing Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：In view of an exploration of the comprehensive method of morphing wing mechanism configuration, a comprehensive method of morphing wing mechanism configuration has thus been proposed based on graph theory. Firstly, based on graph theory, isomorphism discrimination of kinematic chains and topological graphs is carried out to obtain the basic configuration of the morphing wing mechanism, followed by a study on the sensitivity relationship between the structure size, stiffness, total deformation, and mass of the morphing wing structure. Secondly, in view of the shortcomings of the traditional optimization method, a reliability-based morphing wing structure optimization design method is adopted to optimize the morphing wing structure. The simulation analysis results show that the proposed method adopted for optimization design not only greatly saves computation time, but also obtains optimization results with higher accuracy. By comparing the morphing wing structures before and after configuration optimization, it is found that the optimized mass decreases by 19.09%, and the total deformation and equivalent stress failure probability of the structure meet the engineering reliability requirements.

Keywords：morphing wing；configuration synthesis；lightweight；reliability optimization

收稿日期：2025−11−11

基金项目：国家自然科学基金资助项目（U20B2028）；国家自然科学青年基金资助项目（52505258）；湖南省自然科学基金资助项目（2024JJ6203）

作者简介：刘人瑞，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为运载装备关键件设计理论及应用，E-mail：1153788388@qq.com

通信作者：余江鸿，男，湖南工业大学教授，博士，主要研究方向为设计科学与基础零件，E-mail：hutyjh@hut.edu.cn

1 研究背景

传统固定构型机翼因气动外形设计难以满足飞机性能不断提升的要求而存在一定应用局限。近年来，可变形机翼研究备受关注，逐渐成为国际航空航天领域的前沿课题。作为实现飞机在大空域与宽航速范围内高效飞行的关键技术，其发展趋势正逐步向多维设计、大幅变形、高刚性及轻量化方向演进[1]。

现有机翼机构研究多采用四杆机构作为基础单元，但因其功能简单、难以适用复杂工况，已转向多杆机构。Li B. 等[2]基于八杆机构提出一种可连续改变机翼弯度的变形机翼模型，通过改变机翼弯度改善其气动性能。Liu X. A. 等[3]提出了一种组合曲柄滑块机构和四连杆机构综合多功能八杆机构的可变后掠角机翼机构。Yang S. Z. 等[4]提出了一种变形翼八杆机构。可见八杆机构已被广泛用于变形机翼设计，其优势与可靠性得到验证。

目前，机构综合方法研究主要聚焦于四杆机构与六杆机构的构型设计[3]。多数学者采用解析方法进行机构综合，连杆机构综合的约束条件是一组多项式方程，因八杆机构的多项式方程是高度非线性的，增加了综合难度。图论因其强大的能力而被广泛应用于机构科学，并提供了一种用于描述和分析机构内拓扑关系的结构化方法[5−6]。Tian C. X. 等[7]提出了一种基于图论的带耦合子链并联机器人结构综合的系统方法。He L. T. 等[8]提出了一种基于拓扑图论的混联机构构型综合设计方法，解决了航空航天领域大型复杂曲面加工难题。Yang Y. L. 等[9]介绍了一种基于层次拓扑图理论的动力总成配置方案设计方法。

变形翼机构除需实现正常的收缩展开动作外，还应满足无干涉、强度达标、结构简洁及轻量化设计等要求。已有研究表明，减轻质量可显著降低波音、空客等商业航空公司的燃料消耗，每减轻 1 kg 每年能节省约 6 241.5 kg 航空燃料，大量减少排放量[10−11]。优化问题在工程学、医学、决策等多个领域中得到了应用[12]，并已提出了许多优化方法，如 SMA（slime mould algorithm）[13]、WOA（whale optimization algorithm）[14]、MPA（marine predators algorithm）[15]、鲑鱼群算法[16]、粒子群优化[17]等，这些优化方法常假设所有输入参数、约束条件和目标函数都已知且不随时间变化，忽略了尺寸误差、载荷波动等因素，导致结果不可靠。因此，可靠性评估与基于可靠性的设计优化（RBDO）被广泛应用于各种工程问题研究中[18]。

基于变形翼多杆机构构型综合方法尚处探索阶段，本文提出一种基于图论的变形翼机构构型综合方法，并构建其三维模型；同时针对传统优化方法的不足，采用可靠性优化设计方法进行结构优化，提出一种基于可靠性的变形翼结构优化设计方法。

2 变形翼机构构型综合

2.1 变形翼机构运动链同构判别

根据平面机构自由度计算公式 $F=3n-2P_l-P_h$（n 为活动构件数，P_l 为低副数，P_h 为高副数），变形翼机构需具备可稳定变形且运动轨迹确定的特性，通常设计为单自由度机构。若双副杆数量过少，会导致运动副集中于少数多副杆（如三副杆、四副杆），反而增加单个构件的连接复杂度；若双副杆数量过多，会增加活动构件间连接节点，导致运动链拓扑关系冗余，增大构件间碰撞风险。因此，选取八杆运动链中双副杆数为 4 的运动链，其结构见图 1，该数量能在保证单自由度确定运动的同时使运动副均匀分布于双副杆，避免构件连接过度集中。同时，不考虑四副杆以上结构，因多副杆拓扑关系复杂，会增加解析与优化难度，故障连锁性较强，可靠性与维护性较差。

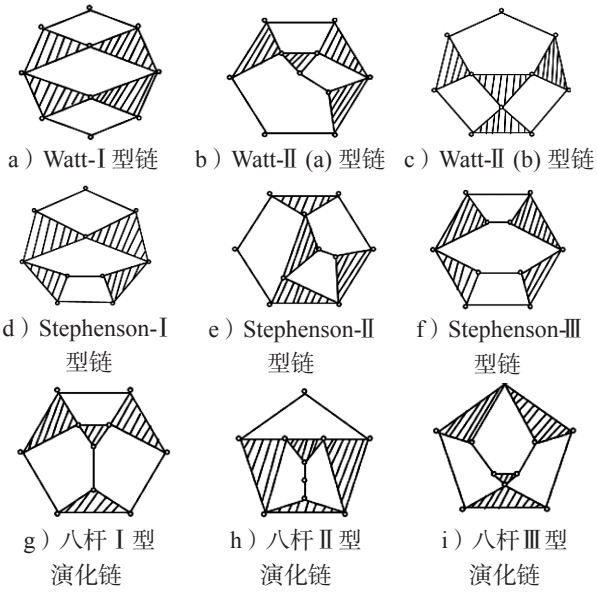


图 1 八杆运动链结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the eight-bar motion chain structure

在判断运动链的同构结构时，可采用基于特征序列的识别方法[19]，平面机构的拓扑图见图 2。

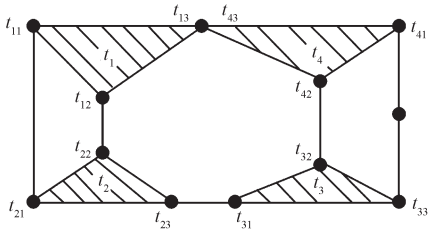


图 2 平面机构拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of the planar mechanism

各支链标记为 t_{ij}，其中 t_i 的每个支链由 j 标识，i、j 均取 1, 2, 3。如图 2 所示，特征数组 {110，111，112，210} 代表各 t_i 支链的二元杆数，i 为 1~3。可知，图 1a~d 的特征数组分别为 a={200，200，200，200}，b={120，120，100，100}，c={120，000，110，120}，d={200，200，110，110}。

得到特征数组后，可据其建立同构判别矩阵。以 a、d 数组为例，在 a_i 中寻找 d_j 的每个字符，若没有返回 0；若有则返回该字符在 a_i 中的位置，即处在第几位，且在 a_i 中删除该字符。因 a_i、d_j 中各含 3 个字符，故用变量 x_1、x_2、x_3 保存返回值。设标志变量 s，令 $s=x_1x_2x_3$，若 s=0，说明 $a_i \neq d_j$；若 $s \neq 0$，说明 $a_i=d_j$。举例说明：a_1=200，d_1=200，首先在 a_1 中寻找 d_1 的第一个字符“2”，得到返回值 x_1=1，然后删除 a_1 中的“2”；同样在 a_1 中寻找 d_1 的第二个字符“0”得到返回值 x_2=2，删除 a_1 中的“0”；在 a_1 中寻找 d_1 的第三个字符“0”得到 x_3=3。则 $s=x_1x_2x_3=1\times2\times3=6$，$s\neq0$，$a_1=d_1$。

将 a_1 分别与 d_1~d_4 对比后得到的 s 值存入矩阵的第一行；同样将 a_2、a_3、a_4 分别与 d_1~d_4 对比后得到的 d 值存入矩阵的第 2, 3, 4 行。a 与 d 的判别矩阵第 1~4 行均分别为 [6 6 0 0]。

设 a 与 b、a 与 c、a 与 d、b 与 c、b 与 d、c 与 d 的判别矩阵分别为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{III}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{IV}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{V}}$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{VI}}$，则：

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{\mathrm{I}}=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{II}}=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{III}}=\begin{bmatrix}6&6&0&0\\6&6&0&0\\6&6&0&0\\6&6&0&0\end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{IV}}=\begin{bmatrix}6&6&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\6&6&0&0\end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{V}}=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{VI}}=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&6&0\\0&0&6&0\end{bmatrix}。 \end{cases} \quad (1)$$

根据所提准则 [19]，若矩阵中任一行或列的元素之和均为 0，则相应运动链呈现不同构性；反之，若存在某一行或列的元素之和非 0，则该运动链为同构。因此，可据式（1）得知图 1 中 a~d 互不同构；同理可证图 1e~i 中的运动链互不构型。经计算，图 1 共存在 9 种互不同构的运动链。

2.2　变形翼机构拓扑图同构判别

机构拓扑图可以简化复杂机构的拓扑关系表达，降低解析难度。变形翼需实现稳定的展开和收拢运动，构件间的交叉干涉会导致卡滞、磨损甚至结构失效，而拓扑图可以直观表现运动干涉情况。构建图 1 中所有机构的机构拓扑图 [20]，见图 3，可观察到，图 1a 呈对称结构，且杆件之间不存在交叉情况，即杆件之间不存在交叉干涉现象。其他构型中均存在杆件之间的交叉情况，即杆件之间存在交叉干涉现象。最终，选取图 1a 对应的拓扑结构作为本研究的最终方案 [21]。

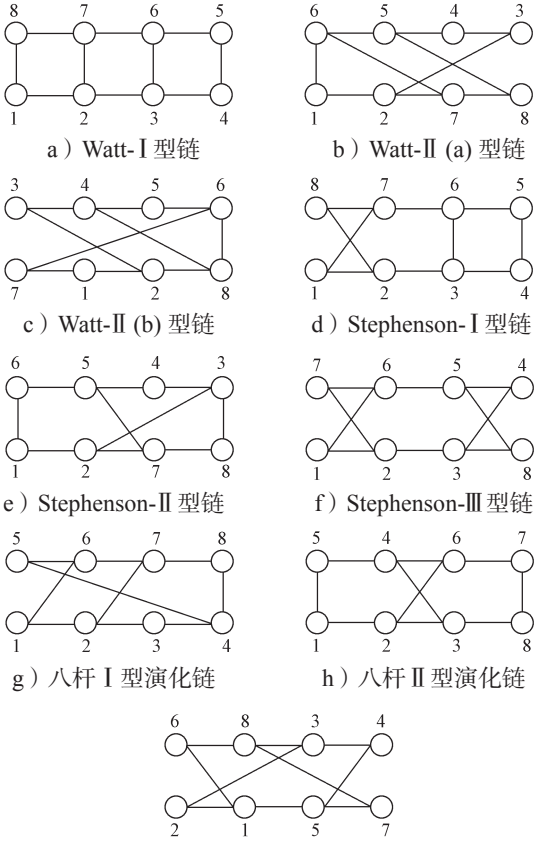


图 3　八杆运动链的机构拓扑图

Fig. 3　Structural topology diagram of the eight-bar movement chain

在判别之前，对八杆运动链拓扑图的拓扑节点采用连续数字编码（1~8），连接单元实施字母序列标记（a~j），图 3a 的拓扑图表示如图 4 所示。

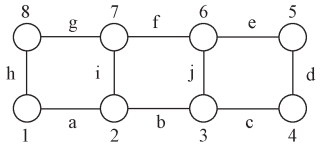
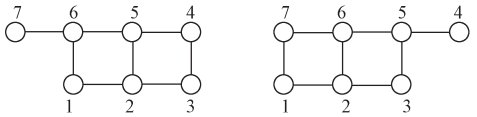


图 4　平面对称的机构拓扑图

Fig. 4　A topological diagram of a planar symmetrical mechanism

为了获取不同的拓扑结构变化，依次去除构件 1、4、5、8，并且在每次去除后重新对剩余的构件进行序号排序，得到了 4 种不同拓扑结构的变换子图，如图 5 所示。



a）去掉构件 1　b）去掉构件 4

c）去掉构件 5　d）去掉构件 8

图 5　平面对称机构拓扑图的第一种拓扑变换子图

Fig. 5　First topological transformation subgraph of a planar symmetric mechanism topology diagram

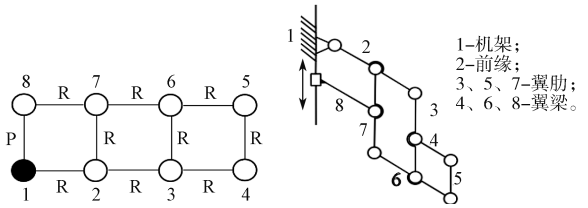
4 种拓扑子图对应的邻接矩阵，分别为 $\boldsymbol{A}_1$、$\boldsymbol{A}_4$、$\boldsymbol{A}_5$、$\boldsymbol{A}_8$，对应表示式如下：

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&1&0\\1&0&1&0&1&0&0\\0&1&0&1&0&0&0\\0&0&1&0&1&0&0\\0&1&0&1&0&1&0\\1&0&0&0&1&0&1\\0&0&0&0&0&1&0\end{bmatrix},\boldsymbol{A}_4=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0&1\\1&0&1&0&0&1&0\\0&1&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&1&0&0\\0&0&1&1&0&1&0\\0&1&0&0&1&0&1\\1&0&0&0&0&1&0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}_5=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0&1\\1&0&1&0&0&0&0\\0&1&0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1&0&0\\0&0&0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1&0&0\\1&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix},\boldsymbol{A}_8=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0&0\\1&0&1&0&0&0&1\\0&1&0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1&0&0\\0&0&0&1&0&1&0\\0&0&1&0&1&0&1\\0&1&0&0&0&1&0\end{bmatrix}。$$

对矩阵 $\boldsymbol{A}_1$、$\boldsymbol{A}_4$、$\boldsymbol{A}_5$、$\boldsymbol{A}_8$ 进行化简后，得到其最简形式，计算结果显示这 4 个矩阵的秩均为 4，表明它们之间等价，从而构件 1、4、5、8 在拓扑上呈现对称性（即拓扑同构）。类似地，通过分析可知矩阵 $\boldsymbol{A}_2$、$\boldsymbol{A}_3$、$\boldsymbol{A}_6$、$\boldsymbol{A}_7$ 之间亦满足等价关系，因此图 4 中展示的拓扑图实际上仅包含两种拓扑异构体。

本文主要考虑移动副（P 副）基数为 0 或 1 的情况，经分析共有 22 种基本构型，筛选出一种变形翼拓扑图及其对应的机构简图，如图 6 所示，图中实心几何体●为机架，空心几何体○为运动副节点。



a）拓扑构型　b）机构简图

图 6　变形翼机构拓扑构型及其机构简图

Fig. 6　Topological configuration of the morphing wing mechanism and its simplified diagram

3　变形翼构型优化与分析

3.1　变形翼机构构型优化

气动结构完整性分析中，如图 6b 所示，该构型存在关键设计缺陷：前缘组件 2 与肋板 3、5 及翼梁 4 之间缺乏闭式连接和支撑结构。前缘承受的气动载荷无法通过“前缘→肋板→翼梁→机身”形成闭环传递，仅通过局部接触点传递至翼梁 4，导致肋板 3、5 与翼梁 4 的连接处出现应力集中，气动载荷的周期性冲击将导致疲劳寿命大幅缩短。故在保持原自由度配置的前提下，通过引入连杆建立前缘－肋板 5 闭式约束环，重构翼肋 3、5 与翼梁 4 的载荷传递路径。原八杆机构设计为单自由度，将肋板 3、5 进行延伸，通过转动副连接，未增加额外自由度，确保机构运动轨迹仍为确定值，同时形成闭式连接，提供结构支撑。

为验证机构优化前后的刚度特性，借助有限元仿真获取机构的载荷－位移曲线对比结果，见图 7。由图可知，加杆机构承载时的最大载荷约为 2 250 N，且曲线初始段斜率较大，体现出该机构具备较高刚度。与之相比，子图 d 中的未加杆机构，最大载荷仅约 1 500 N，同时曲线初始斜率小于加杆机构，这进一步证实加杆设计能显著提升机构的承载刚度。

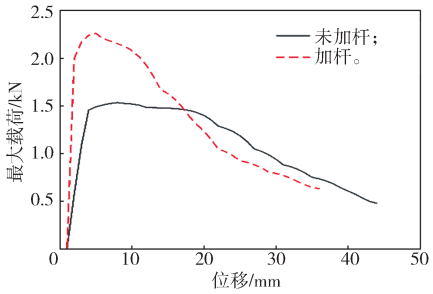


图 7　载荷－位移曲线对比图

Fig.7　Load-displacement curve comparison chart

3.2　变形翼结构参数化分析

变形翼三维模型见图 8，其尺寸参数划分见表 1。对于变形翼不同状态的作用与鸟类翅膀类似，当飞行器工况为低速滑翔时，变形翼处于展开状态；当飞行器工况为高速机动时，变形翼处于收拢状态。本文主要讨论展开状态，此时翼面受到的载荷最大。

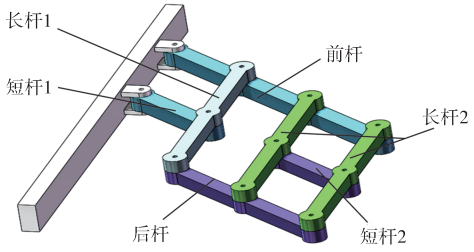


图 8　变形翼三维模型

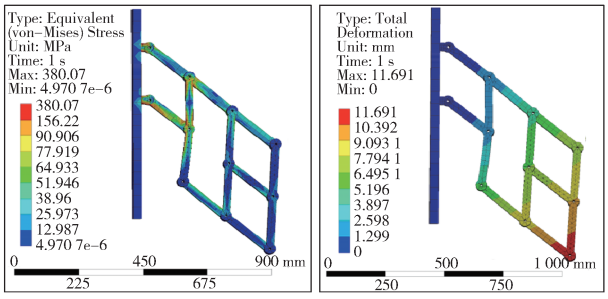
Fig.8　Three-dimensional model of the morphing wing

表 1　结构尺寸参数划分

Table 1　Structural dimension parameter division

结构名称	代号	结构名称	代号
短杆 1 长 = 前杆第一段长	P_1	长杆 2 宽	P_7
短杆 1 宽 = 前杆宽	P_2	长杆 2 高	P_8
短杆 1 高 = 前杆高	P_3	前杆第二段长 = 后杆长	P_9
长杆 1 长 = 长杆 2	P_4	后杆宽 = 短杆 2 宽	P_{10}
长杆 1 宽	P_5	后杆高 = 短杆 2 高	P_{11}
长杆 1 高	P_6		

利用 SolidWorks 构建了变形翼的三维模型，并将模型以中间格式保存后导入 ANSYS 进行有限元分析。所选材料为常用的铝合金，其参数如下：泊松比为 0.33，密度为 2.81 g/cm^3，弹性模量为 71 GPa，屈服强度为 455 MPa，机构总质量为 10.372 kg。在有限元模型中，变形翼左侧设置为固定支撑作为机身，且其与机身的连接区域为完全固定，铰接梁之间及前缘与机身之间均设置接触状态。网格划分采用自动划分方法。考虑到变形过程中前缘区域承受较大气动载荷，故在平行于前缘方向施加均布面压强以模拟实际工况，对前杆施加一大小为 11 kN 的均布力，同时，机翼表面还承受垂直于变形翼方向的升力作用，对杆件下表面施加一垂直向上大小为 1 kN 的力。得到的变形翼总变形量及等效应力云图见图 9。



a）等效应力　　b）总变形量

图 9　变形翼等效应力与总变形量云图

Fig. 9　Cloud map of equivalent stress and total deformation of the morphing wing

由图 9 所示等效应力云图可知，变形翼结构的主要承力部分是靠近机身附近的杆。对变形翼结构参数进行局部敏感性分析，结果见图 10。

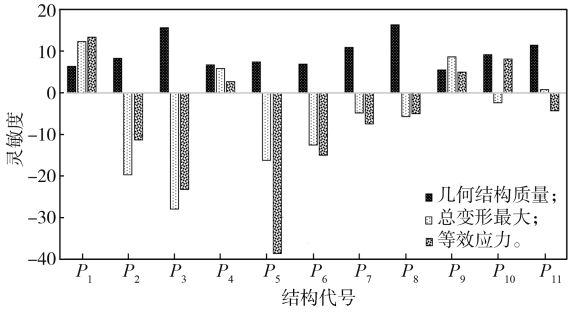


图 10　变形翼结构参数敏感性分析结果

Fig. 10　Sensitivity analysis results of structural parameters of the morphing wing

优化对象选取的原则为对质量影响大、对结构性能影响小，因此根据图 10，选取参数 P_6、P_7、P_8、P_{10}、P_{11} 为优化对象。

4　变形翼结构可靠性优化

4.1　基于可靠性的变形翼结构优化设计方法

RBDO 在工程设计中起着至关重要的作用，近年来受到越来越多的关注。它将可靠性集成到设计优化过程中，以实现系统在不确定性下的最佳性能，同时满足概率和非概率约束。

经典的 RBDO 公式如下：

$$\min f(d,X),$$

$$\text{s.t. } P_i\{g_i(d,X)\leqslant 0\}\leqslant P_{\mathrm{f}},\quad i=1,2,\cdots,N;$$

$$d^{\mathrm{L}}\leqslant d\leqslant d^{\mathrm{U}},\quad X^{\mathrm{L}}\leqslant X\leqslant X^{\mathrm{U}}。$$

式中：d 为下限 d^{L} 和上限 d^{U} 的确定性设计变量；X 为下限 X^{L} 和上限 X^{U} 的随机变量集合；$f(d,X)$ 为目标函数；$g_i(d,X)$ 为第 i 个性能函数，当 $g_i(d,X)\leqslant 0$ 时，视为故障事件；$P_i(\cdot)$ 为第 i 个性能的概率算子；P_{f} 为 $g_i(d,X)\leqslant 0$ 的目标失效概率；N 为性能函数的数量。

RBDO 问题本质上是一个嵌套优化过程，其中外层为设计优化，内层为可靠性分析。在每次可靠性分析中，逐一评估各性能函数的失效概率。本文构建了基于可靠性的变形翼结构优化设计流程（见图 11），其中约束可靠性分析与设计优化交替进行，直至满足预设的收敛准则：

$$\begin{cases} P_f\geqslant P_i,\quad i=1,2,\cdots,N; \\ \left|\left(f^{(k)}-f^{(k-1)}\right)\Big/f^{(k)}\right|\leqslant\varepsilon_{\mathrm{r}}。\end{cases}$$

式中：ε_{r} 为最小误差极限；$f^{(k)}$ 为第 k 步目标函数值。

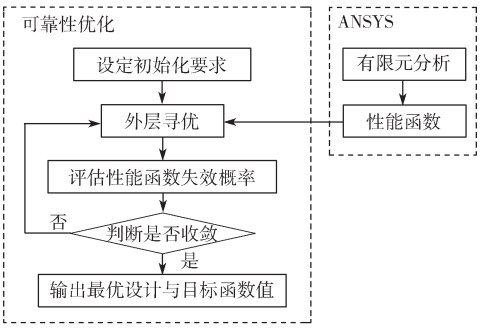


图 11　基于可靠性的变形翼结构优化设计流程图

Fig. 11　Flowchart of structural optimization design for morphing wings based on reliability

4.2　变形翼结构可靠性分析方法

一阶可靠度分析（first order reliability method，FORM）主要用于概率分析，当概率分布存在偶然的不确定性时，设 X 的联合概率密度函数（probability density function，PDF）为 f_X。失效概率通过以下积

分式进行计算：

$$P=\Pr\{G=g(\boldsymbol{X})<0\}=\int_{g(\boldsymbol{X})<c} f_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X}。$$

首先，将随机变量 $\boldsymbol{X}=\{X_1,X_2,\cdots,X_{n_x}\}$（在 $\boldsymbol{X}$ 空间中）变换为随机变量 $\boldsymbol{U}=\{U_1,U_2,\cdots,U_{n_x}\}$（在 $\boldsymbol{U}$ 空间中）的集合，其元素遵循标准正态分布。转换结果由下式给出：$u_i=\Phi^{-1}\{F_{X_i}(x_i)\}$。

式中：F_{X_i}为 X_i 的累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）；Φ^{-1} 为标准正态分布的逆 CDF。

然后，用以下模型确定最可能点（MPP）$\boldsymbol{u}^*$。

$$\min_{\boldsymbol{u}}\|\boldsymbol{u}\|，\text{s.t. } g(\boldsymbol{u})=0。$$

式中：$\|\cdot\|$为向量的范数；$\|\boldsymbol{u}\|=\sqrt{u_1^2+u_2^2+\cdots+u_{n_x}^2}$。

方程中给出的模型的解即 MPP，表示为 $\boldsymbol{u}^*$，最小距离 $\beta=\|\boldsymbol{u}^*\|$称为可靠性指标。

失效概率 p 近似为 $p=\Phi(-\beta)$，式中Φ为标准分布的 CDF。

4.3 基于可靠性的变形翼结构优化结果

结构尺寸参数的不确定性主要源于加工公差、装配误差及材料性能波动，此类误差多符合正态分布。因此，将“3.2 变形翼结构参数化分析”中选取的结构尺寸参数 P_6、P_7、P_8、P_{10}、P_{11} 分别设为随机变量 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5，以 3.2 节中变形翼三维模型的初始设计尺寸为基准，取初始尺寸作为均值，即 μ=26。参数方差通常随加工条件、环境及材料特性等因素产生波动，需根据加工样本的实测数据进行数据分析，考虑到杆件在相同条件下加工，采用同种材料，选取的尺寸结构参数标准差都取 0.5，即 σ=0.5。以变形翼质量为目标函数 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$，通过有限元分析得到的变形翼总变形量及最大等效应力函数 $g_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 与 $g_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 作为约束条件，建立优化模型，最终优化结果对比见表 2，优化后变形翼总质量减少 19.09%，如图 12 所示，失效概率 p_1 与 p_2 分别为 0.035 933 19, 0.035 936 97，满足实际工程应用要求。

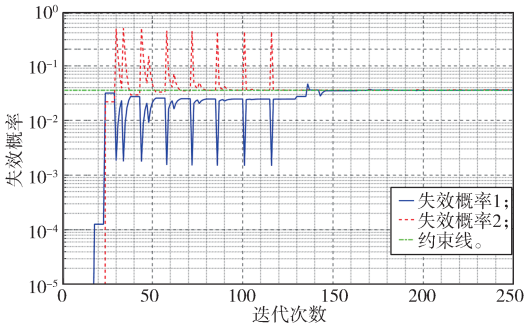


图 12 失效概率随迭代次数的变化趋势图

Fig.12 Trend plot of failure probability versus iteration number

表 2 可靠性优化结果对比

Table 2 Comparison of reliability optimization results

参 数	优化前	优化后
长杆 2 宽（x_1）/mm	26	22.01
长杆 2 高（x_2）/mm	26	15.03
后杆宽（x_3）/mm	26	22.42
后杆高（x_4）/mm	26	15.04
长杆 1 高（x_5）/mm	26	20.93
质量（f）/kg	10.37	8.39

使用 ANSYS 软件中直接优化模块对变形翼结构进行优化，得到的结果如表 3 所示。

表 3 传统方法的优化结果

Table 3 Optimization results of traditional methods

参 数	候选点 1	候选点 2	候选点 3
长杆 2 宽（x_1）/mm	20.666	16.950	19.904
长杆 2 高（x_2）/mm	15.000	16.630	15.974
后杆宽（x_3）/mm	17.030	19.238	16.807
后杆高（x_4）/mm	15.000	16.412	17.258
长杆 1 高（x_5）/mm	27.789	27.757	27.686
质量（f）/kg	8.471	8.553	8.579

通过比对表 3 中数据发现，本文方法要优于直接优化方法得到的结果，直接优化方法需要用到 84 组实验结果才能得到以下结果，十分耗费计算时间，而本文提出的方法只需要 25 组实验数据就能拟合出变形翼的状态性能函数，进行优化设计，而且得到的优化结果精度更高。同时还能保证足够的安全性能，降低不确定性因素带来的不利影响，因此，本文采用的优化方法不仅在轻量化效果方面优于这种传统方法，同时具有高效性。

5 结语

本文围绕变形翼“多维设计、大幅变形、高刚性、轻量化”发展趋势，开展构型综合与可靠性优化研究。提出了基于图论的变形翼构型综合方法，其通过运动链与拓扑图同构判别，以优选的对称八杆机构拓扑方案为多维设计提供核心支撑，其单自由度特性确保大幅变形时运动稳定无卡滞。本研究揭示了变形翼结构尺寸与刚度、总变形量及质量的敏感性关系，为高刚性设计提供了理论依据。通过引入可靠性优化方法，克服了传统优化设计方法的缺陷，完成了变形翼轻量化设计的同时，结构总变形量与等效应力失效概率均满足工程要求。

本文所提方法为变形翼结构设计提供了新思路，其核心成果在兼顾轻量化、高刚性与可靠性的同时，响应了变形翼多维设计、大幅变形的发展趋势，具有

明确的工程应用价值。

参考文献：

[1] 肖　洪，杨　广，郭宏伟，等 . 飞行器变形翼研究现状与展望 [J]. 机械工程学报，2023，59(19)：1-23.
XIAO Hong，YANG Guang，GUO Hongwei，et al. Research Status and Prospect of Aircraft Deformable Wing[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(19)：1-23.

[2] LI B，LI G. Analysis and Optimization of a Camber Morphing Wing Model[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems，2016，10：1-17. DOI：10.1177/1729881416664846.

[3] LIU X A，DING J Z，DONG Y，et al. The Hybrid Synthesis of a Multi-Functional Eight-Bar Linkage with a Translational Actuator[J]. Mechanism and Machine Theory，2022，173：104853.

[4] YANG S Z，XU P，LI B. Design and Rigid-Flexible Dynamic Analysis of a Morphing Wing Eight-Bar Mechanism[J]. Nonlinear Dynamics，2024，112(17)：15025-15060.

[5] TIAN C X，FANG Y F，GE Q J. Design and Analysis of a Partially Decoupled Generalized Parallel Mechanism for 3T1R Motion[J]. Mechanism and Machine Theory，2019，140：211-232.

[6] FENG C M，LIU T S. A Graph-Theory Approach to Designing Deployable Mechanism of Reflector Antenna[J]. Acta Astronautica，2013，87：40-47.

[7] TIAN C X，FANG Y F，GE Q J. Structural Synthesis of Parallel Manipulators with Coupling Sub-Chains[J]. Mechanism and Machine Theory，2017，118：84-99.

[8] HE L T，FANG H R，ZHANG D. Design of a Class of Reconfigurable Hybrid Mechanisms for Large Complex Curved Surface Machining Based on Topological Graph Theory[J]. Mechanism and Machine Theory，2023，190：105461.

[9] YANG Y L，LI P S，PEI H X，et al. Design of All-Wheel-Drive Power-Split Hybrid Configuration Schemes Based on Hierarchical Topology Graph Theory[J]. Energy，2022，242：122944.

[10] KHAN N，RICCIO A. Field-Driven Multi-Variable Framework for Tailoring of Additively Manufactured Lattice-Infilled Wing Structures[J]. Progress in Additive Manufacturing，2025，10(9)：6029-6048.

[11] PETER B. Short Haul：The Methodology Calculations for Fuel Cost Saving [EB/OL]. (2025-03-26)[2026-01-13]. https://atleurope.aero/short-haul-the-methodology-calculations-for-fuel-cost-saving/.

[12] SAHAB M G，TOROPOV V V，GANDOMI A H. A Review on Traditional and Modern Structural Optimization[M]//Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures. Amsterdam：Elsevier，2013：25-47.

[13] LI S M，CHEN H L，WANG M J，et al. Slime Mould Algorithm：A New Method for Stochastic Optimization[J]. Future Generation Computer Systems，2020，111：300-323.

[14] MIRJALILI S，LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm[J]. Advances in Engineering Software，2016，95：51-67.

[15] FARAMARZI A，HEIDARINEJAD M，MIRJALILI S，et al. Marine Predators Algorithm：A Nature-Inspired Metaheuristic[J]. Expert Systems with Applications，2020，152：113377.

[16] MIRJALILI S，GANDOMI A H，MIRJALILI S Z，et al. Salp Swarm Algorithm：A Bio-Inspired Optimizer for Engineering Design Problems[J]. Advances in Engineering Software，2017，114：163-191.

[17] KENNEDY J，EBERHART R. Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth WA Australia：IEEE，2002：1942-1948.

[18] ZHOU S，ZHANG J G，ZHANG Q Y，et al. Uncertainty Theory-Based Structural Reliability Analysis and Design Optimization Under Epistemic Uncertainty[J]. Applied Sciences，2022，12(6)：2846.

[19] 丁　玲，路　懿 . 运动链拓扑图的特征数组表示及同构判断 [J]. 机械工程学报，2010，46(7)：63-67.
DING Ling，LU Yi. Character Arrays Representation and Isomorphism Identification of Kinematic Chain Topology Graphs[J]. Journal of Mechanical Engineering，2010，46(7)：63-67.

[20] HUANG Z，DING H F. Theory of Loop Algebra on Multi-Loop Kinematic Chains and Its Application[J]. Science in China Series E：Technological Sciences，2007，50(4)：437-447.

[21] YAO Qishui，DONG Penglin，TANG Jiachang，et al. Comprehensive Analysis Method for Configuration of Large-Scale Continuous Deformation Mechanisms Based on Graph Theory[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2024，41(6)：1075-1086.

（责任编辑：廖友媛）