

形状可变机构综合及解域寻优方法

钱卫香 靳智超 杨银烁 屈卓成 郭荣卓

(西安科技大学 机械工程学院, 西安 710054)

摘要:【目的】为了有效地设计出形状可变机构并提高设计效率, 对该类机构的综合设计方法进行了研究, 提出一种适用于该类机构的解域寻优方法。【方法】首先, 针对不同变形任务, 确定了3种类型的刚体链; 为了降低机构变形控制难度, 对刚体链添加二副杆, 得到单自由度形状可变机构; 基于铰链二杆组运动生成理论, 建立了形状可变机构解析综合模型。该模型理论上可以得到无穷多能够完成指定变形任务的机构。然后, 对机构运动可行性进行了分析, 提出形状可变机构缺陷识别方法并分析了该机构的传动性能。最后, 结合解域寻优方法, 在众多设计方案中快速筛选出满足设计要求的最优机构, 缩短了该机构的设计周期。根据所提方法设计了一个变形机翼, 对最优机构进行了运动仿真。【结果】仿真结果表明, 该机构能够完成指定变形任务, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 形状可变机构; 机构综合; 解域寻优; 机构缺陷

中图分类号: TH112.1 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2025.09.003

0 引言

形状可变机构是一类能够在运动过程中改变自身轮廓外形的机构。同一机构能够形成多种轮廓外形。这类机构具有较强的适应能力, 能够满足机械系统轮廓外形多样化的需求。近年来, 已有不少学者将其应用在各种机械系统上, 如变形机翼^{[1]1041007[2]}、变形座椅^{[3]437-438}、机器鱼^[4]等。

形状可变机构主要分为形状可变柔性机构^[5]和形状可变刚性机构^[6]。与柔性机构相比, 刚性机构具有较强的载荷承受能力和较大的几何变形能力。此外, 刚性机构可以使用较少执行元件实现变形过程的精确控制, 控制变形过程简单。MURRAY等^[7]对平面形状可变机构的设计方法进行了系统的理论研究, 介绍了设计该机构的一般方法, 并给出U-D形状可变机构的设计实例。PERSINGER等^[8]针对封闭轮廓分段初始点选取困难的问题, 提出通过卷积积分寻找轮廓上曲率差值最大点的方法, 将其确定为轮廓分割的起点, 有效地扩展了形状可变机构的应用范围。

在上述文献提出的平面形状可变机构设计方法

中, 刚体链的链节之间都使用转动副连接, 设计出的变形机构只能在弧长相等的轮廓之间变形。SHAMSUDIN等^{[3]429-437}则将刚体链的链节分为转动副相连的节段和移动副相连的节段, 通过迭代的方法对目标轮廓进行分割, 求解出的刚体链由两种节段共同组成, 能够实现在不同弧长轮廓间的变形。以上学者主要聚焦于如何将所需轮廓曲线转化为刚体链, 对于形状可变机构的综合方法研究较少。在确定形状可变机构的结构参数时, 多以试凑法^[9-10]为主, 往往需要经过反求解才能确定最终设计方案。

形状可变刚体机构本质上是一种能完成变形任务的多杆机构。很多学者已针对多杆机构的综合方法进行了部分研究。薛娜^[11]通过提取五杆机构连杆曲线的小波特征参数, 建立了自适应图谱库, 基于动态自适应图谱法实现了五杆机构的轨迹综合。崔光珍等^[12]为提高机构的设计精度, 提出六杆机构双目标轨迹的设计方法, 所设计的机构最多可实现给定5位置的精确轨迹。李学刚等^[13]为进一步提高Stephenson-III型平面六杆机构轨迹综合的精度, 提出基于傅里叶级数的六杆机构代数求解方法。吕明

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2021JLM-01)

作者简介: 钱卫香, 女, 1975年生, 陕西西安人, 博士, 副教授; 主要研究方向为现代设计方法、机构学; qianwx2003@163.com。

靳智超(通信作者), 男, 2000年生, 陕西西安人, 在读硕士研究生; 主要研究方向为现代设计方法、机构学; 2893521637@qq.com。

引用格式: 钱卫香, 靳智超, 杨银烁, 等. 形状可变机构综合及解域寻优方法[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 19-25.

QIAN Weixiang, JIN Zhichao, YANG Yinshuo, et al. Synthesis and solution region optimization method of shape-changing mechanisms[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(9): 19-25.

青等^[4]为了使压力机拥有更好的性能,构建了六杆机构综合优化设计模型,基于遗传算法对机构进行了尺寸优化设计,有效提升了压力机的综合锻压性能。韩建友等^[15]为适应机器人手指多尺寸、多用途的设计需求,提出基于解域的六杆机构的手指机构解域综合方法。崔光珍等^[16]根据解域综合理论,给出八杆机构的综合方法,通过构建机构可行解域,有效避免了综合机构选取的盲目性。

目前,提出的多杆机构综合方法主要适用于五杆、六杆及八杆机构,针对八杆以上机构综合方法的研究还较少。本文针对形状可变的六杆机构提出一套通用综合方法,该方法适用于任意串联铰链多杆形状可变机构。研究这类机构的运动可行性,提出缺陷识别方法;基于解域综合理论,给出一种快速设计形状可变机构的方法。

1 形状可变机构综合

1.1 形状可变机构结构综合

图1所示的3条轮廓描述了一个变形任务。在轮廓上选取节点 $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$,将轮廓分为 $(n - 1)$ 个链节,铰接各链节得到刚体链;调整刚体链,使各链节的点位参数 $B_i (x_{B_i}, y_{B_i})$ 、 α_i 与各轮廓对应点位参数一致,便可完成该变形任务。

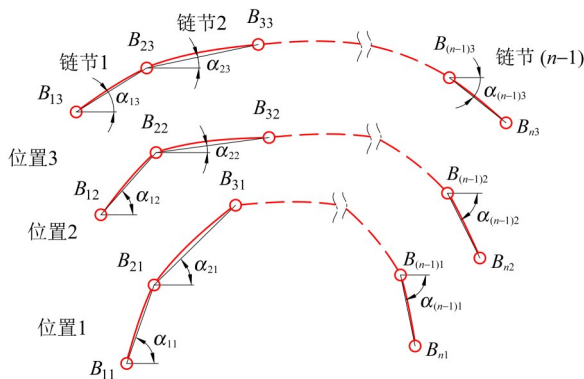


图1 所需轮廓

Fig. 1 Desired profile

若直接使用刚体链作为形变机构会存在以下两点问题:①该机构具有多个自由度,需要由多个主动件进行驱动,这将会导致轮廓的变形控制变得极为复杂;②机构需要有机架将其固定。在各链节与机架之间添加二副杆能够解决上述问题。随着二副杆数目的增多,机构自由度会逐渐减少,相应的变形控制难度也会降低。本文通过对刚体链添加二副杆得到单自由度形状可变机构。规定:若在某一链节运动过程中,其上有一节点位置不变,则称该链节的节端固定;反之则称该链节的节端自由。

根据刚体链中首链节与尾链节的节端是否固定,可将刚体链分为以下3种类型:

- 1) I型刚体链:首链节与尾链节的节端均自由。
- 2) II型刚体链:首链节与尾链节其中一个链节的节端固定,另一个链节的节端自由。
- 3) III型刚体链:首链节与尾链节的节端均固定。

假设有一由 n 个链节构成的刚体链。若该刚体链为I型刚体链,则可按图2(a)所示添加二副杆,其中,首链节需要添加2个二副杆,其余链节各添加1个二副杆,共添加 $(n + 1)$ 个二副杆,得到I型形状可变机构。对于II型刚体链,需将首链节与机架直接铰接,其余链节各添加1个二副杆,共添加 $(n - 1)$ 个二副杆,得到II型形状可变机构。与II型刚体链不同,III型刚体链最后两个链节无须添加二副杆,但需将尾链节与机架铰接,共添加 $(n - 3)$ 个二副杆,得到III型形状可变机构。图2所示即为各类刚体链添加二副杆后的形状可变机构。

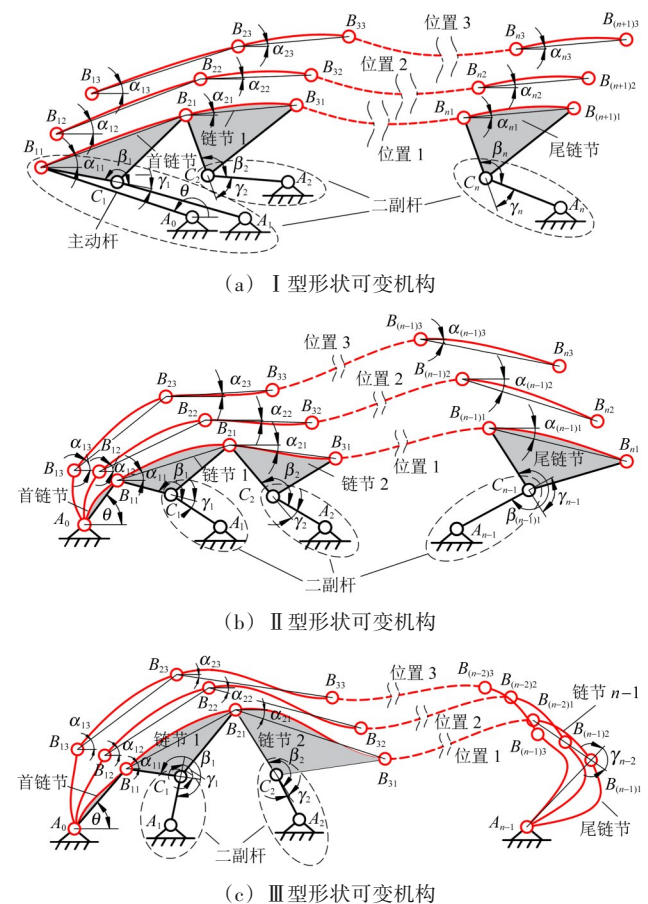


图2 形状可变机构

Fig. 2 Shape-changing mechanism

1.2 铰链二杆组综合方程

图3所示为铰链二杆组。需要确定铰链二杆组中

各杆件尺寸, 使得连杆2在运动过程中顺次经过3个位置。已知连杆2在第*i*个位置时的水平夹角为 $\alpha_i (i=1, 2, 3)$, 令相对转角 $\alpha_{li} = \alpha_i - \alpha_1 (i=2, 3)$, 由动铰点 $J_i(x_{J_i}, y_{J_i}) (i=1, 2, 3)$ 及相对转角 α_{li} 可求得位移矩阵, 有

$$D_{li} = \begin{bmatrix} d_{11i} & d_{12i} & d_{13i} \\ d_{21i} & d_{22i} & d_{23i} \\ d_{31i} & d_{32i} & d_{33i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{li} & -\sin \alpha_{li} & x_{J_i} - x_{J_1} \cos \alpha_{li} + y_{J_1} \sin \alpha_{li} \\ \sin \alpha_{li} & \cos \alpha_{li} & y_{J_i} - x_{J_1} \sin \alpha_{li} - y_{J_1} \cos \alpha_{li} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=2, 3) \quad (1)$$

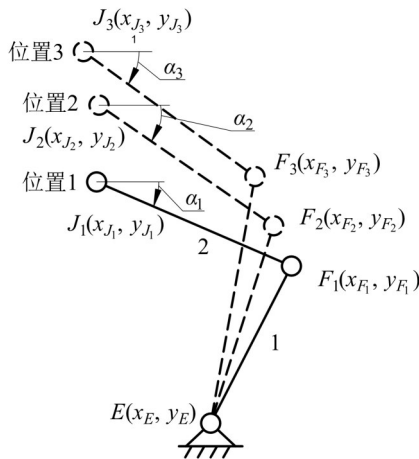


图3 铰链二杆组

Fig. 3 Hinged 2-bar set

连杆2上动铰点*F*满足刚体位移方程, 有

$$\begin{bmatrix} x_{F_i} \\ y_{F_i} \\ 1 \end{bmatrix} = [D_{li}] \begin{bmatrix} x_{F_1} \\ y_{F_1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i=2, 3) \quad (2)$$

在运动过程中连架杆1杆长不变, 定铰点*E*和动铰点*F*满足定长约束方程, 有

$$(\mathbf{F}_i - \mathbf{E})^T (\mathbf{F}_i - \mathbf{E}) = (\mathbf{F}_1 - \mathbf{E})^T (\mathbf{F}_1 - \mathbf{E}) \quad (i=2, 3) \quad (3)$$

联立式(2)、式(3), 消去 \mathbf{F}_2 、 \mathbf{F}_3 , 可得铰链二杆组综合方程, 即

$$(d_{11i}x_{F_1} + d_{12i}y_{F_1} + d_{13i} - x_E)^2 + (d_{21i}x_{F_1} + d_{22i}y_{F_1} + d_{23i} - y_E)^2 = (x_{F_1} - x_E)^2 + (y_{F_1} - y_E)^2 \quad (i=2, 3) \quad (4)$$

其中, x_{F_i} 、 y_{F_i} 、 x_E 、 y_E 均为未知变量。若已知其中任意两个变量, 则可求取其余变量。例如, 动铰点*F*在位置1的坐标(x_{F_1} , y_{F_1})已知, 将其代入式(4)并展开整理可得

$$H_i x_E + I_i y_E = G_i \quad (i=2, 3) \quad (5)$$

式中, $H_i = d_{13i} - (1 - d_{11i})x_{F_1} + d_{12i}y_{F_1}$; $I_i = d_{23i} + d_{21i}x_{F_1} - (1 - d_{22i})y_{F_1}$; $G_i = (d_{11i}d_{13i} + d_{21i}d_{23i})x_{F_1} + (d_{12i}d_{13i} + d_{22i}d_{23i})y_{F_1} +$

$$\frac{1}{2} (d_{13i}^2 + d_{23i}^2)$$

根据克莱姆法则, 定铰点*E*坐标为

$$x_E = \begin{vmatrix} G_2 & I_2 \\ G_3 & I_3 \end{vmatrix} / D; \quad y_E = \begin{vmatrix} H_2 & G_2 \\ H_3 & G_3 \end{vmatrix} / D$$

式中, *D*为行列式, $D = \begin{vmatrix} H_2 & I_2 \\ H_3 & I_3 \end{vmatrix}$ 。

1.3 形状可变机构尺寸综合

形变机构中, 刚体链尺寸参数已知, 需要确定各二副杆的圆心点 A_i 坐标及圆点 C_i 坐标, 使得在形变机构运动过程中, 各链节能够满足轮廓所需点位参数。为方便求解机构, 对形变机构进行拆分, 任何一个形状可变机构都可拆分为1个链头四杆机构和若干个RRR阿苏尔杆组。以I型形状可变机构为例, 可将其首链节拆分为1个链头四杆机构, 其余链节拆分为*n* - 1个RRR阿苏尔杆组, 如图4所示。

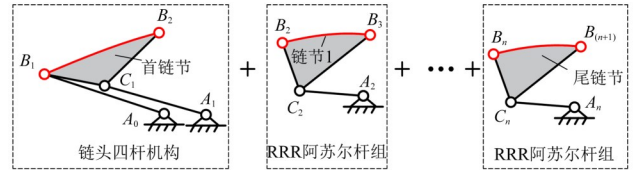


图4 I型形状可变机构拆分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the disassembly of the type I shape-changing mechanism

链头四杆机构的结构参数求解过程如下: 对于I型形状可变机构中的四杆机构 $A_0A_1B_1B_2C_1$, 将首链节点位参数 $B_{1i}(x_{B_{1i}}, y_{B_{1i}})$ 、 $\alpha_{li} (i=1, 2, 3)$ 代入式(1), 求得位移矩阵 $D_{li} (i=1, 2, 3)$; 根据式(4), 由节点 $B_1(x_{B_{11}}, y_{B_{11}})$, 求解得到圆心点 A_0 。选取合适的圆心点 $A_1(x_{A_1}, y_{A_1})$ 并代入式(4), 求得对应圆点 $C_1(x_{C_1}, y_{C_1})$ 。其余类型的形状可变机构中, 四杆机构连架杆 A_0B_1 位置已知, 仅需要通过选取的节点 $B_1(x_{B_{11}}, y_{B_{11}})$ 即可求解圆心点 A_0 。

RRR阿苏尔杆组结构参数求解过程如下: 将各链节的点位参数 $B_{ji}(x_{B_j}, y_{B_j})$ 、 $\alpha_{ji} (j=2, 3, \dots, n; i=1, 2, 3)$ 代入式(1), 求得位移矩阵 $D_{ji} (j=2, 3, \dots, n; i=1, 2, 3)$; 选取合适的圆心点 $A_i(x_{A_i}, y_{A_i}) (i=2, 3, \dots, n)$ 并代入式(4), 求得对应圆点 $C_i(x_{C_i}, y_{C_i}) (i=1, 2, \dots, n)$ 。

2 形变机构属性分析

2.1 形变机构缺陷识别

第1节所提的形变机构是由四杆机构与RRR阿苏尔杆组串联而成的。四杆机构顺次带动各杆组运动, 从而改变形变机构自身轮廓外形。由于各杆件间以转动副连接, 为了使形变机构完成给定形变任

务,除了要求四杆机构自身无缺陷外,还要考虑各杆件间的尺寸约束以及各阿苏尔杆组是否经过死点位置。形变机构中,链节与连架杆的夹角为分支夹角 β ,规定 $\beta > \pi$ 时链节位于分支1, $\beta < \pi$ 时链节位于分支2。图5为形变机构缺陷识别流程图,具体的缺陷识别过程如下所述。

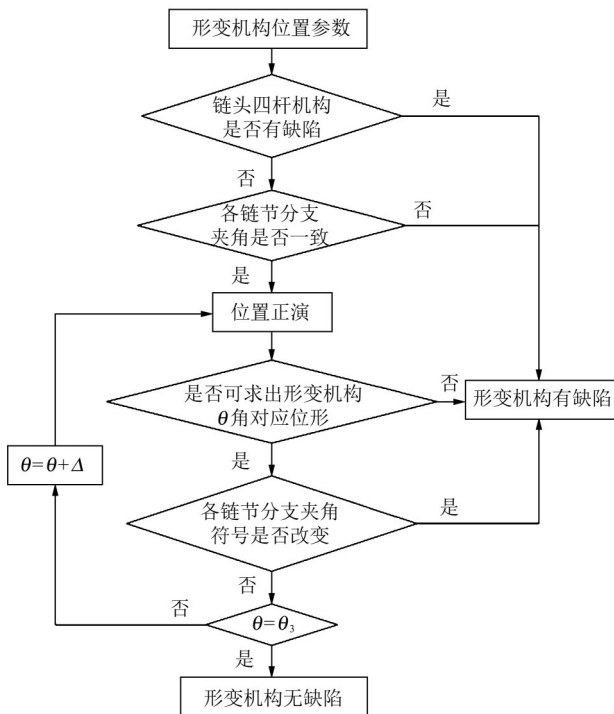


图5 形变机构缺陷识别流程图

Fig. 5 Shape-changing mechanism defect identification flowchart

第1步:在运动区间范围内判断链头四杆机构自身是否存在缺陷,此处缺陷包括分支缺陷、回路缺陷和顺序缺陷。其中,顺序缺陷是指四杆机构为了按顺序依次经过给定3位置而必须发生分支改变,此时机构必须经过死点位置。若链头四杆机构存在缺陷,形变机构将无法仅依靠主动杆驱动来完成变形任务,存在链头缺陷。

第2步:检查同一链节在给定3位置是否位于同一分支。若处于不同分支,则该链节有两种安装回路,形变机构只有通过重新拆装才能实现所有所需

轮廓,形变机构存在回路缺陷。

第3步:定义主动杆 A_0B_1 与水平方向夹角为方位角 θ ,令主动杆 A_0B_1 位于位置 i 的方位角为 θ_i ($i = 1, 2, 3$),根据几何关系求解出形变机构位于方位角 θ (θ 初始值为 θ_1)时的机构位形。若未能求出方位角 θ 时的形变机构位形,则表明期望轨迹超出链节可达范围,形变机构链节存在轨迹缺陷。

第4步:根据上一步求解出的机构位形,检查各链节所处分支是否发生改变。若某一链节分支发生改变,则表明该链节自身同样也存在回路缺陷。

第5步:取较小步长 Δ ,令 $\theta = \theta + \Delta$,重复第3步、第4步,直至主动杆 A_0B_1 运动至位置3,即 $\theta = \theta_3$ 时,若仍未检测出形变机构有缺陷,则表明该形状可变机构为无缺陷机构。

2.2 形变机构传动性能

形变机构通过将上一链节的输出作为下一链节的输入,实现能量的连续传递。为了能够更加精准地实现所需形状,机构通常需要较长运动链,从而使传动效率受到很大的影响。机构的传动效率直接影响机构的工作性能,因此,需要对形变机构的传动性能进行分析。各链节与二副杆在圆点 C_i 处的传动角 γ_i 可以度量形变机构传动性能的好坏。由于各链节之间是串联关系,所以,链节的驱动力会逐级减小。因此,形变机构在运动过程中各链节的传动角 γ_i 均不宜过小。

3 机构解域寻优设计示例

机翼轮廓外形对飞机的空气动力学性能具有至关重要的作用,设计一个能够灵活适应不同飞行状态的机翼显得尤为重要。例如,为了实现图6所示的3个位置的不同轮廓外形,参考文献[1]^{[94]1007}将轮廓线转化为由5个链节组成的Ⅲ型刚体链,对其添加二副杆 A_1C_1 、 A_2C_2 ,得到Ⅲ型形状可变机构。以圆心点 A_0 为坐标原点、水平方向为 x 轴建立直角坐标系 xA_0y ,固定铰点 A_3 坐标为(2 637, -393) mm,各链节应满足的点位参数如表1所示。

表1 变形机翼各链节点位参数

Tab. 1 Parameters of the place and direction of each chain in variable wing

位置	链节1		链节2		链节3	
	B_1/mm	$\alpha_1/(\text{°})$	B_2/mm	$\alpha_2/(\text{°})$	B_3/mm	$\alpha_3/(\text{°})$
1	(202, 396)	11	(2 498, 842)	-24	(4 512, -64)	-140
2	(137, 422)	10	(2 441, 828)	-20	(4 512, 60)	-139
3	(69, 439)	9	(2 380, 804)	-17	(4 495, 168)	-138

在变形机翼中,圆心点 A_0 、 A_3 初始位置已知,考虑到机架固定铰点安装的便捷性,要求圆心点 A_1 、

A_2 在线段 A_0A_3 上。为了便于描述圆心点 A_1 、 A_2 与点 A_0 的位置,引入铰距 L_i ($i = 1, 2$),如圆心点 A_1 的铰

$$\text{距 } L_1 = |A_0A_1|。$$

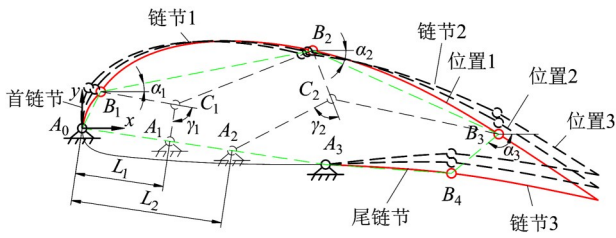


图6 变形机翼几何模型

Fig. 6 Geometric model of morphing aircraft wings

每一组铰距 L_1 、 L_2 的取值, 都可借助机构综合模型得到一个特定的变形机翼。为了更直观地分析设计变量如何影响机构运动学属性, 分别绘制杆长和、机构缺陷、最小传动角的机构属性图, 如图7所示。由图7(a)可知, 杆长和会受铰距 L_2 取值影响; 随着铰距 L_2 取值增大, 杆长和会逐渐减小; 当铰距 L_1 取值增大时, 杆长和会缓慢增大。图7(b)中, 各链节工作区间最小传动角 $\gamma_{i\min}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 仅与本链节铰距 L 取值有关, 最小传动角均呈现出先增大后减小的变化趋势。当铰距 L_2 增大到 2 600 mm 左右时, 链节 2 处最小传动角 $\gamma_{2\min}$ 为 0° , 机构运行时会存在死点位置, 该机构具有回路缺陷。链尾处的最小传动角只与变形轮廓有关, 这表明在给定变形任务时, 应考虑链尾处的传动效率, 避免出现机构传动效率较低的情况。

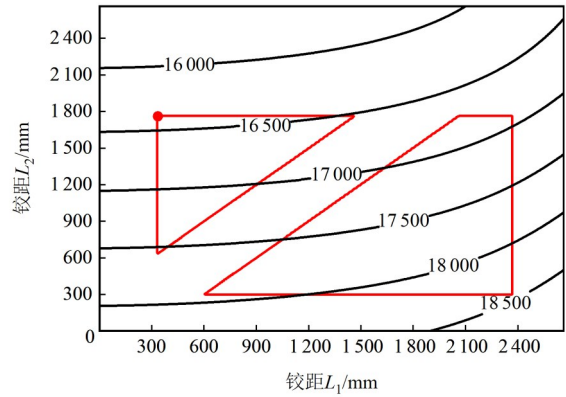
为了快速有效地确定变形机翼的结构参数, 本文使用解域寻优方法。出于节省材料、减轻机构质量和获得紧凑结构的目的, 选取杆长和最小为目标函数。考虑机构可行性, 施加如下约束条件: ①形变机构无链头缺陷、回路缺陷及轨迹缺陷。②形变机构各链节工作区间最小传动角 $\gamma_{i\min} \geq 40^\circ$ 。③将链身上的圆点 C_1 、 C_2 限制在以首链节圆心点 A_0 、尾链节圆心点 A_3 和刚体链节点 B_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) 为顶点的多边形区域内(图6所示绿色虚线围成的区域)。④最小杆长 $L_{\min} \geq 300$ mm。根据固定铰点 A_0 、 A_3 的距离, 设定设计变量取值范围; 铰距 L_1 、 L_2 均取 0~2 664 mm; 选择合适的步长(如步长取 4 mm)。

表2 最优机构结构及性能参数

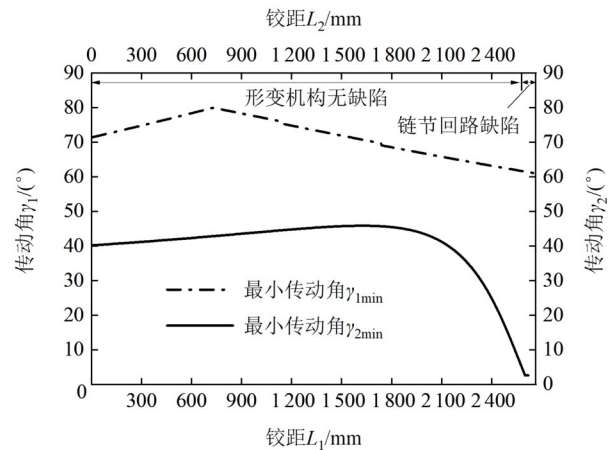
Tab. 2 Dimensional and performance parameters of the optimal mechanism

设计变量		结构参数						性能参数				
L_1/mm	L_2/mm	B_1/mm	B_2/mm	B_3/mm	B_4/mm	C_1/mm	C_2/mm	缺陷类型	$\gamma_{1\min}/(^\circ)$	$\gamma_{2\min}/(^\circ)$	L_{\min}/mm	杆长和/ mm
336	1 760	(202, 396)	(2 498, 842)	(4 512, -64)	(4 001, -488)	(501, 354)	(2 025, -161)	无缺陷	75.27	45.66	301	16 383

为进一步验证该方案的可行性, 根据表2中的最优机构结构参数, 设计了图9所示的变形机翼原型



(a) 机构可行解域



(b) 最小传动角及机构缺陷

图7 机构属性图

Fig. 7 Mechanism attribute figures

寻优过程如下: 首先, 借助综合模型, 根据设计变量取值综合出机构; 然后, 计算综合所得机构属性, 并逐一检查各属性是否满足约束条件, 只要有一项不满足, 则该机构为不可行机构; 记录满足所有约束条件的可行机构, 得到图7(a)中红色线条所围成的机构可行解域; 最后, 在解域内寻找杆长和最小的可行机构, 确定设计变量取值。最优机构结构及性能参数如表2所示。为进一步验证该方案的可行性, 对最优机构进行了运动仿真, 图8所示为该机构经过3个位置时的运动状态。仿真结果表明, 该机构能够通过形变运动, 实现指定3个位置的轮廓形状。

机, 借助 SolidWorks 软件对该原型机进行仿真, 得到了各节点的运动轨迹。变形机翼能否通过形变实

现指定轮廓形状,关键在于机翼在运动过程中各节点是否经过预先给定位置。表3所示为各节点实际位置与给定位置之间的距离。

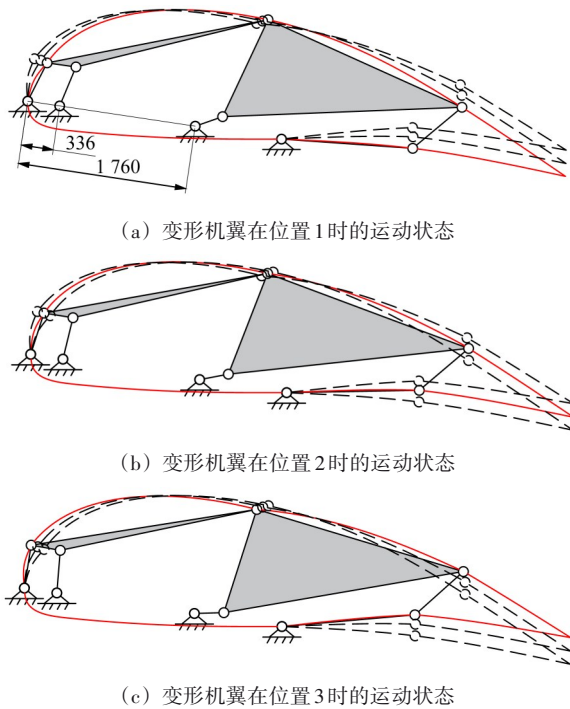
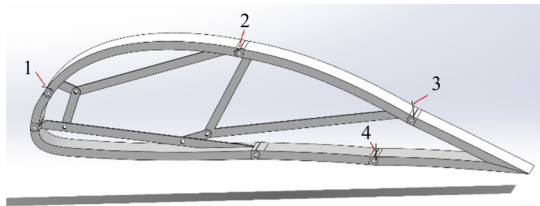


图8 最优机构形变过程

Fig. 8 Deformation process of the optimal mechanism



1. 节点 B_1 运动轨迹; 2. 节点 B_2 运动轨迹; 3. 节点 B_3 运动轨迹; 4. 节点 B_4 运动轨迹。

图9 变形机翼原型机

Fig. 9 Morphing wing prototype

表3 各节点实际位置与给定位置的距离

Tab. 3 Distance between the actual position of each node and the given position

节点	距离/mm		
	位置1	位置2	位置3
B_1	2.3	1.6	1.5
B_2	5.5	5.8	6.3
B_3	4.5	8.6	12.0
B_4	69.3	78.5	85.6

由表3可知,节点 $B_i(i=1, 2, \dots, 4)$ 随着运动链的增长,误差整体上呈现增大趋势;其中,节点 B_4 的误差最大,这主要是由各杆件的杆长误差累积所造成的。虽然存在一定的误差,但整体在可接受范围内,故该机构能够完成指定变形任务。

4 结论

本文针对形状可变机构的综合方法进行了研究,提出一种适用于该类机构的解域寻优方法,主要结论如下:

1) 采用解析方法建立了形状可变机构综合模型。该模型能够得到无穷多满足设计任务的形状可变机构,对于I、II、III型形状可变机构均有效。

2) 基于可视化思想绘制的机构属性图,能够很好地反映出形变机构属性的分布规律以及变化趋势。

3) 借助解域寻优方法,能够快速在众多设计方案中筛选出满足所施加约束条件的方案,并根据寻优目标得到最优机构。

4) 根据综合示例可以看出,由该方法得到的变形机翼机构能够完成指定变形任务,从而验证了该方法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] ZHAO K, SCHMIEDELER J P, MURRAY A P. Design of planar, shape-changing rigid-body mechanisms for morphing aircraft wings [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(4): 041007.
- [2] TONG X X, GE W J, GAO X Q, et al. Simultaneous optimization of fiber orientations and topology shape for composites compliant leading edge [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(15): 706-716.
- [3] SHAMSUDIN S A, MURRAY A P, MYSZKA D H, et al. Kinematic synthesis of planar, shape-changing, rigid body mechanisms for design profiles with significant differences in arc length [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 70: 425-440.
- [4] WANG J Y, XI F F. Robotic fish scales driven by a skin muscle mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 172: 104797.
- [5] ALFATTANI R, LUSK C. Shape-morphing using bistable triangles with dwell-enhanced stability [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(5): 051003.
- [6] FUNKE L W, SCHMIEDELER J P, ZHAO K. Design of planar multi-degree-of-freedom morphing mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(1): 011007.
- [7] MURRAY A P, SCHMIEDELER J P, KORTE B M. Kinematic synthesis of planar, shape-changing rigid-body mechanisms [J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(3): 032302.
- [8] PERSINGER J A, SCHMIEDELER J P, MURRAY A P. Synthesis of planar rigid-body mechanisms approximating shape changes defined by closed curves [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(7): 071006.
- [9] 王雪娇. 形状可变刚体机构的设计方法及特性分析 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016: 46-47.

WANG Xuejiao. Design and characteristic analysis of shape-

- changing rigid-body mechanisms [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016:46-47.
- [10] 倪帆. 形状可变机构的综合方法与应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2018:25-27.
NI Fan. Synthesis method and application of shape-changing mechanism [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018:25-27.
- [11] 薛娜. 基于数值图谱的单自由度多杆机构尺度综合方法研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2020:7-26.
XUE Na. Research on dimensional synthesis method of multi-bar mechanism with single degree of freedom based on numerical atlas method [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020:7-26.
- [12] 崔光珍, 肖艳秋, 王才东, 等. 六杆机构的双目标轨迹综合与运动分析 [J]. 机械传动, 2020, 44(12):73-79.
CUI Guangzhen, XIAO Yanqiu, WANG Caidong, et al. Synthesis and kinematic analysis for bi-objective path of six-bar linkage [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(12):73-79.
- [13] 李学刚, 张丽娟, 魏世民, 等. Stephenson-III型平面六杆机构轨迹综合的代数求解 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1):155-161.
LI Xuegang, ZHANG Lijuan, WEI Shimin, et al. Algebraic solution for path synthesis of planar Stephenson-III six-bar linkage [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1):155-161.
- [14] 吕明青, 邵珠峰, 徐道春, 等. 基于遗传算法的六连杆机构尺寸优化设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47(7):184-193.
LYU Mingqing, SHAO Zhufeng, XU Daochun, et al. Optimization design on dimension of six-link mechanism based on genetic algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(7):184-193.
- [15] 韩建友, 蔡营疆. 单自由度平面六杆手指机构解域综合方法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(9):367-373.
HAN Jianyou, CAI Yingjiang. Solution-region synthesis method of single-degree-of-freedom planar six-bar mechanisms for robotic fingers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):367-373.
- [16] 崔光珍, 韩建友, 杨通. 基于解域综合理论的八杆机构综合方法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(7):1010-1014.
CUI Guangzhen, HAN Jianyou, YANG Tong. The synthesis method of eight-bar linkage based on solution region synthesis theory [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(7):1010-1014.

Synthesis and solution region optimization method of shape-changing mechanisms

QIAN Weixiang JIN Zhichao YANG Yinshuo QU Zhuocheng GUO Rongzhuo
(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] To effectively design shape-changing mechanisms and improve design efficiency, the comprehensive design method for such mechanisms was studied, and a solution region optimization method suitable for these mechanisms was proposed. [Methods] Firstly, for different deformation tasks, three types of rigid-body chains were determined. To reduce the difficulty of controlling mechanism deformation, two-link bars were added to the rigid-body chains to obtain single-degree-of-freedom shape-changing mechanisms. Based on the motion generation theory of hinged two-bar groups, an analytical synthesis model of shape-changing mechanisms was established, which could theoretically yield an infinite number of mechanisms capable of completing specified deformation tasks. Then, the motion feasibility of the mechanisms was analyzed, a defect identification method for shape-changing mechanisms was proposed, and the transmission performance of these mechanisms was evaluated. Finally, combined with the solution region optimization method, the optimal mechanism meeting design requirements was quickly screened out from numerous design schemes, thereby shortening the design cycle of such mechanisms. A morphing wing was designed according to the proposed method, and motion simulation was performed on the optimal mechanism. [Results] The simulation results show that the mechanism can complete the specified deformation tasks, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: Shape-changing mechanism; Mechanism synthesis; Solution region optimization; Mechanism defect