DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.01.026

单曲柄双摇杆无相差扑翼驱动机构的设计与仿真

王鹏程,王浩,顾光健

(南京航空航天大学 航天学院,江苏 南京 210016)

摘 要:在具有二级减速齿轮的单曲柄双摇杆机构上,通过加入 Watt 直线机构,建立三维扑翼 飞行器模型,保证了左右拍动完全对称,提高了扑动的紧凑性和稳定性。Adams 仿真分析表明 左右扑翼角度和角速度完全一致,提高了运动对称性,验证了该优化方法的正确性和可行性。 关键词:单曲柄双摇杆机构;扑翼机构;Watt 直线机构;运动对称 中图分类号:TP391.9 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2020)01-0094-03

Structure Design and Simulation of Single-crank and Double-rocker Mechanism with Phase-Free Flapping Wing Drive

WANG Pengcheng, WANG Hao, GU Guangjian

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The Watt straight mechanism is installed, on the single-crank and double-rocker mechanism with the second-stage reduction gear, the three-dimensional flapping aircraft model is established, ensures the complete symmetry of the left and right flaps is ensured and the compactness and stability of flapping are increased. Adams simulation analysis result shows that the angle and angular velocity of the left and right flapping wings are exactly same, thus improving the symmetry of the motion and verifing the correctness and feasibility of the optimization method.

Keywords:single-crank and double-rockers mechanism; flapping-wing mechanism; watt straight mechanism; movement symmetry

0 引言

仿生扑翼飞行器是一种新概念飞行器,仿生扑翼飞行 器的研究是一个多学科多领域的交叉研究项目,需要综合 运用生物学和机械运动学的相关知识。其主要仿生研究 昆虫及鸟类的自然飞行机制,如昆虫利用其薄如蝉翼的翅 膀高频振动,可以实现前飞、倒飞、侧飞等特技飞行;如鸟 类可通过锁定机翼保持滑翔姿态,实现不需要外力作用下 低耗能的远距离飞行。

仿生扑翼飞行器由于体积小巧、便携、灵活的飞行,优 良的隐蔽性和高效率低能耗等优点得到了广泛的关注,其 可微程度远远大于旋翼和固定翼,而且没有螺旋桨或喷射 装置,从而可以迅速地起飞、加速、悬停,在民用和国防上 有着广泛的应用前景^[1]。

1 单曲柄扑翼驱动机构

驱动机构是扑翼飞行器的核心部分,其作用是把执行 机构的运动转换为机翼的拍打运动,从而产生扑翼飞行器 所需要的空气动力。

单曲柄双摇杆机构运动简化如图1所示,这是把一个 圆周驱动转化成两个左右往复运动的机构,其结构十分紧

基金项目:陆某装备预研项目(301020803) 第一作者简介:王鹏程(1992—),男,硕士研究生,研究方向为扑翼机器人。

凑,质量较轻,较容易微小化;但直接使用存在的缺点是左 右两侧摇杆机构存在相位差,会使左右机翼产生的瞬时升 力不等,造成飞行器晃动,影响飞行过程中的稳定性和操 作性^[2-4]。



图1 单曲柄运动简化图

因此,能否有效减少不对称摇杆机构的相位差,直接 关系到扑翼飞行器的飞行性能。

已有研究人员对单曲柄机构优化设计进行深入研究, 力求改善机构左右运动的不对称性。如图 2 所示,荷兰代 夫特科技大学的"DelFly I"^[5]和日本东京大学的 "BTO"^[6]扑翼飞行器在传统不对称传动机构的基础上进 行了改进,将两个连杆与曲柄的转动副分离,用成一定夹 角固结的曲柄连接左右两连杆,从而提高两侧摇杆的同步 性能,飞行试验验证了其可行性。



图 2 "DelFly I"飞行器

周凯^[7-8]和张亚峰^[9]等运用 MATLAB 优化工具箱. 通过设定目标函数和约束条件来优化不对称摇杆机构的 各杆长度,最终使两侧摇杆相位差达到最小。董二宝[10] 等则采用解析法求得运动对称机构的理论最优解,建立优 化设计线图和经验公式,可为实际应用提供设计参考。

本课题为了改善这种扑动不对称性,在单曲柄扑翼机 构上加入 Watt 连杆机构,利用 Watt 连杆机构产生的近似 直线运动轨迹。结果发现,加入 Watt 连杆机构之后,左右 机翼具有非常好的对称性,两翼之间的相位差可忽略不 计。

建立三维模型 2

设计模型依照鸟的质量及飞行姿态进行仿生设 计^[11-13],确定了仿生扑翼飞行器机身长度约 250 mm,整 个翼展长 300 mm。驱动机构设计应满足设计扑动参数要 求且使得结构更加紧凑合理。

首先确定减速装置。由于微扑翼飞行器扑动频率高, 负载相对较大,采用直流电机无法驱动直流扑翼机构。通 常的做法是采用齿轮减速器,以牺牲一定的转速作为代价 来增大驱动转矩。本文选择了二级展开式圆柱齿轮减速 组,是由一级齿轮和二级齿轮组成,其中:一级齿轮与无刷 电机齿轮相啮合,二级齿轮与一级齿轮相啮合,无刷电机 齿轮驱动一级齿轮转动从而带动二级齿轮传动。

然后进行整机建模。通过三维软件 SolidWorks 进行 各个零部件设计以及装配,图 3 为扑翼机构三维实体模 型,图4为爆炸视图。该机构具有两个分支(COAE 和 COBF),由于铰接点 A 和 B 不重合,导致左右扑动不对 称。



通过 Solidworks 软件运动学仿真, 仿真表明模型各部 件之间运动无干涉。



爆炸视图 图 4

3 Watt 连杆机构

JAMES Watt^[14]于 1782 年发明了蒸汽机,其中发明了 平行四边形机构,该平行四边形机构还整合了瓦特氏直线 机构。在大杠杆左边外侧是带动比较粗条的蒸汽机活塞 杆件,而在内侧则带动比较细支的气阀杆件。该机构设计 能保证同时提供蒸汽机活塞杆与气阀杆正确的垂直方向 往复运动,解决了如何利用连杆机构进行直线运动的难 题。

图5所示为Watt连杆的最简单形式,它由三连杆所 组成,即AB、BC和CD。其中,A和D需要固定在空间中, 但是可以自由旋转,从而带动 B 和 C 做圆弧运动。AB 与 CD 两连杆具有相同的长度,耦合连杆 BC 的中点 P 在中 心位置时,连杆 AB、CD 和 BC 分别水平和垂直。



图 5 最简单的 Watt 连杆

值得注意的是.AB的长度可能与 CD 的长度不相等。 一般形式的 Watt 连杆连接如图 6 所示,其中 P 点符合的 比例为:

 $\frac{AB}{CD} = \frac{BP}{CP}$

有用的一段仅是 B 的小位移,或等效 C 的小位移。 其中 P 点的完整轨迹是图 6 所示的一个倾斜"8"型轨迹, 其中心点附近是可以利用的近似直线轨迹。



图 6 Watt 连杆及其耦合轨迹

因真正需要利用到就是 P 点的运动轨迹,所以关心

的只是如何更好地产生近似直线轨迹。耦合点 P 的位置 可由5个参数计算得到,分别是3个连杆的杆长、固定铰 链A和D之间距离、从x轴正向逆时针旋转到连杆AB的 角度。

通过合适地选择3个连杆的长度和位置(图7),为了 产生更好的直线轨迹,Watt 遵循了以下公式:



这种 Watt 直线机构原理简单,容易实现,利用它的近 似直线运动轨迹,用在单曲柄双摇杆机构中,使得中心链 接能够执行直线运动,保证了左右拍动完全对称,同时增 加了扑动的紧凑性和稳定性,提高了飞行效率。其三维扑 翼机构图如图8所示。



图 8 三维扑翼机构

4 加入 Watt 机构前后比较分析

Adams 仿真分析 4.1

在 Adams 中建立单曲柄双摇杆机构简化模型(图 9), 添加运动副,添加驱动,进行一个周期的运动仿真,主要分 析左右机翼的扑翼角度和角速度的变化。



Adams 仿真

4.2 优化前后相关参数的比较

摇杆与水平线的夹角为扑翼角。当摇杆在水平面上方 时,扑翼角为正,反之为负。当摇杆向下运动时,摇杆角速 度为正,反之为负。优化前后相关参数的比较如图 10-图 13 所示。







从以上优化前后的参数曲线图可知:

1) 在没添加 Watt 机构之前,在 t=3.8s 时,左右扑翼 角度之差最大达到15°;在t=6s时,左右扑翼角速度之差 最大达到 14°/s;

(下转第126页)

表1 旋塞转过不同角度时打开流道 截面面积及其所占百分比

旋塞转过	旋塞打开截	旋塞完全打开流	不同角度打开截面
角度/(°)	面面积/mm ²	道截面面积/mm ²	面积所占百分比/(%)
0	0		0
5	0		0
10	0		0
15	0		0
20	475.21		3.52
25	1 481.65		10.97
30	2 525.23		18.69
35	3 579.81		26.50
40	4 639.12		34.34
45	5 697.78	13 509.81	42.18
50	6 751.92		49.98
55	7 797.63		57.72
60	8 830.80		65.37
65	9 759.66		72.24
70	10 840.38		80.24
75	11 803.80		87.37
80	12 729.71		94.23
85	13 509.81		100.00
90	13 509.81		100.00

(上接第96页)



图 13 优化前后扑翼角速度之差的比较

2) 当在添加 Watt 机构之后,发现扑翼角之差和扑翼 角速度之差都为0,即左右扑翼运动完全对称;

3) 在加入 Watt 机构之后,在保证了左右机翼运动完 全一样的同时,缺点是减小了上下扑翼角度的范围,从之 前的 60°范围变成了 40°的范围。

结语 5

优化改进了单曲柄双摇杆扑翼机构的左右不对称,在 Adams 中仿真分析了扑翼角度和扑翼角速度,为同类型的 驱动机构设计提供了理论设计基础,对其他类型的微扑翼 驱动机构设计也有很好的借鉴意义。

通过在单曲柄双摇杆中加入 Watt 机构之后,左右扑 翼角之差和扑翼角速度之差的幅值比加入之前显著降低. 这也验证了该优化方法的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] 昂海松. 微型飞行器设计导论[M]. 西安:西北工业出版社, 2012: 18-47.
- [2] 魏榛,贾立超,杨基明.一种平行曲柄连杆扑翼机构的设计、

结语 3

本文方法既可直观旋塞阀阀体内部旋塞转过不同角 度时旋塞与密封衬套或阀体流道打开流道截面面积的变 化,又可快速准确地获得旋塞转过不同角度下的旋塞打开 流道截面面积数值,不需要耗费大量的精力和时间进行复 杂的计算。无论是对于圆锥形还是圆柱形旋塞均可以快 速准确地计算出打开流道截面积值,效率高,准确度高。

参考文献:

- [1] 康喜,李悦钦. 旋塞阀的结构改进和强度校核[J]. 内蒙古石 油化工,2008(7):63-64.
- [2] 龚座平. 基于 CFD 的旋塞阀流动特性研究 [D]. 成都: 西华大 学,2015.
- [3] 马晓雯,宋磊. 文丘里式耐磨旋塞阀的设计[J]. 液压气动与 密封,2012(2):66-68.
- [4] 陆培文. 旋塞阀的功能与应用[J]. 化工设备与管道,2001 (2):52-55.
- [5] 练章华,宋周成,乐彬,等. 旋塞阀结构流道开度推导及其冲 蚀速度分析[J]. 石油机械,2008(7):15-18.

收稿日期:2018-11-13

优化与实现[J]. 力学与实践,2011,33(2): 62-66.

- [3] YANG L J, ESAKKI B, CHANDRASEKHAR U, et al. Practical flapping mechanisms for 20 cm-span micro air vehicles [J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2015, 7(2):181-202.
- [4] 郭建伟,周洋,贺业荣. 全转动副空间扑翼机构设计[J]. 机械 传动,2014(5):74-76.
- [5] TANAKA H, HOSHINO K, MATSUMOTO K, et al. Flight dynamics of a butterfly-type ornithopter[C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, Edmonton, 2005: 2706-2711
- [6] CROON G, PERCIN M, REMES BDW, et al. The DelFly: design, aerodynamics, and artificial intelligence of a flapping wing robot [M]. West-Berlin; Springer, 2015.
- [7] 周凯,方宗德,曹雪梅,等. 单曲柄双摇杆扑翼驱动机构的优 化设计[J]. 航空动力学报,2008,23(1):184-188.
- [8] 周凯,方宗德,张明伟. 一类微扑翼驱动机构的双重建模与仿 真[J]. 机械传动,2007,31(6):27-29.
- [9] 张亚锋,宋笔锋,马红萍,等. 仿生扑翼机构的优化设计[J]. 机械设计与研究,2008,24(4):23-25.
- [10] 董二宝,许旻,李永新,等. 单曲柄双摇杆机构同步性能优化 [J]. 机械工程报,2010,46(7):22-26.
- [11] 余春锦,颜蕙. 仿鸽子扑翼的气动性能分析[J]. 南昌航空大 学学报(自然科学版),2008,22(2):39-43.
- [12] 刘岚,方宗德,侯宇,等. 微扑翼飞行器的尺度律研究与仿生 设计[J]. 中国机械工程,2005,9(18):1613-1617.
- [13] 王姝歆,周建华,颜景平微型仿生扑翼飞行器的尺度效应分 析[J]. 南京航空航天大学学报,2005,12(6):807-810.
- [14] EUGENE S, FERGUSON. Kinematics of mechanisms from the time of watt[M]. [S.I.]: Smithsonian Institution, 1962:27-28.

收稿日期:2018-11-08