

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.010

仿枫树种子微型飞行器的总体与飞行控制设计

张帅浩 郑祥明 王 鹏 张九阳

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京,210016)

摘要:通过模拟枫树种子独特的自旋飞行方式,设计了一种仿枫树种子的新型微型飞行器。参考枫树种子的外形与重量分布来完成该微型飞行器的总体布局设计,同时采用动态网格非定常流场方法计算分析了该飞行器不同转速下的飞行工况。根据这种飞行器独特的飞行方式,基于地磁场的方位定标,设计了这类自身无固定参考系飞行器的飞行控制方法,最后制造了样机进行飞行试验。结果表明:仿枫树种子微型飞行器具有良好的气动效率,所设计的操纵方案有效可靠,大大增加了这种飞行器的可控性和实用性。

关键词:仿枫树种子;微型飞行器;总体布局;飞行控制;飞行试验

中图分类号:V211.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)06-0856-06

General Layout and Flight Control Scheme for Micro Air Vehicle in Imitation of Maple Seed

Zhang Shuaihao, Zheng Xiangming, Wang Peng, Zhang Jiuyang

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: By the simulation of the unique spin flying style of maple seed, a new type of micro air vehicle in imitation of maple seed is designed. Referenced to the appearance and weight distribution of maple seed, the general layout design for the micro air vehicle is completed, then the flight status at different rotating speed is analyzed by using the dynamic mesh unsteady flow method. The flight control scheme for this kind of aircraft is designed by magnetic field azimuth calibration according to its unique flying style. Finally, a prototype is produced for flight tests. Results show that the micro air vehicle in imitation of maple seed has good aerodynamic efficiency and the control scheme is effective and reliable, thus increasing the controllability and practicability of this kind of aircraft.

Key words: in imitation of maple seed; micro air vehicle; general layout; flight control; flight test

微型飞行器(Micro air vehicle, MAV)的概念最早由美国科学家布鲁诺·W. 奥根斯坦提出,它具备非常规的轻便性、隐蔽性、灵敏性等特点,在军事和民用领域都有着广阔的应用前景。目前研究的微型飞行器的基本技术指标参数范围是:飞行器通常最大尺寸小于 300 mm,质量 10~200 g,续航时间 20~60 min,巡航速度 30~60 km/h,有效载荷

10~200 g,最大飞行距离 1~10 km^[1]。单纯从飞行原理上,现在的微型飞行器可以分为“固定翼型”、“旋翼型”和“扑翼型”3 大类^[2]。本文所设计的仿枫树种子微型飞行器是一种新型的旋翼型微型飞行器。

枫树种子以不同于动物神经肌肉控制而只靠结构模型就能实现稳定飞行的自然例子,给了广大

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2014-09-12;修订日期:2014-12-01

通信作者:郑祥明,男,博士,副教授,E-mail:zhengxiangming@nuaa.edu.cn。

科学工作者很大的启发。1973年 Nprberg 就对枫树种子的自转稳定性进行了定量分析^[3], 2007年,麻省理工学院的 Kellas 讨论了采取舵控制方案来实现仿枫树种子飞行器的飞行实现,但并没有清楚展示实际飞行中如何进行控制^[4]。马里兰大学的 Ulrich 自 2007 年以来发表了多篇关于仿枫树种子飞行器的论文,并确立了机翼型心距离重心在两个坐标轴下的长度值与飞行器自由下降速度和重心摄动半径之间的函数关系^[5]。2008年,洛克希德马丁先进技术实验室的研发团队受枫树种子的启发开发出独特的自驱单叶旋翼机 Samara^[6],是一个较大的突破。国内对于此类飞行器的研究较少,只出现过类似飞行原理的飞行器模型,在航模界的别名为“飞行大刀”^[7]，“飞行大刀”自旋起飞后不能进行自主控制,只能随风飘行,无法投入实际的应用。

本文在参考了枫树种子的自有特点以及国内外相关的研究经验后,自主设计了一款仿枫树种子的微型飞行器,并计算分析了所设计的飞行器的飞行特性。根据这种飞行器独特的飞行方式,设计了该类自身无固定参考系的飞行器的飞行控制方法,并实现可控飞行,最后制造了样机进行飞行试验来验证理论分析和控制方法。

1 总体设计

所设计的微型飞行器是一种仿生型飞行器,基本外观形态参考了枫树种子的外形特征(见图1),结构比较简单。通过综合分析枫树种子的外形和重量分布,进行了整机的总体外形设计。飞行器主体为一段机翼,在机翼根部延伸处设计一个与机翼以碳管连接的圆盘,将航电系统布置于其中,在机翼近翼梢处安置动力装置。设计一个副翼作为控制面,其弦长为机翼弦长的20%,最后设计的仿枫树种子微型飞行器的总体设计效果图如图2所示。

根据飞机总体设计的要求^[8],参考所设计飞行器的实际需要,应选取具有较大升力系数 C_L 和较



图1 枫树种子实物照片

Fig. 1 Picture of real maple seed

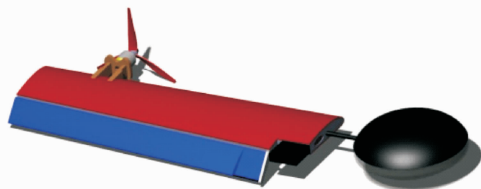


图2 仿枫树种子微型飞行器总体设计效果图

Fig. 2 Conceptual design sketch of micro air vehicle in imitation of maple seed

高升阻比 C_L/C_d 的翼型,参考翼型库里的翼型,经对比计算(见图3)最终选定 CLARK Z 翼型,由其升阻比曲线和升力系数曲线图(见图4)分析计算,该翼型符合基本的设计要求。

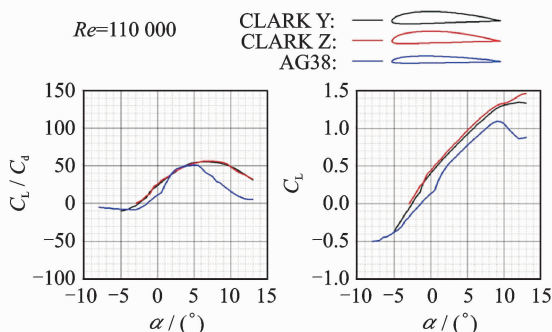


图3 初选翼型的升阻比曲线和升力系数对比

Fig. 3 Comparison of lift-drag ratio curve and lift coefficient by initial separation airfoil

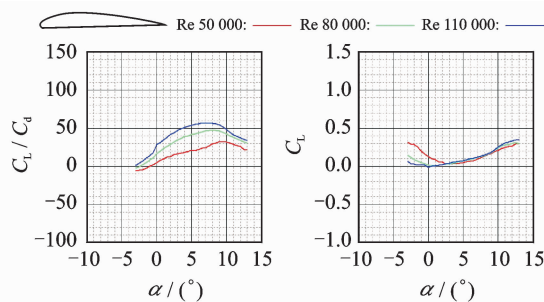


图4 CLARK Z 翼型的升阻比曲线和升力系数曲线图

Fig. 4 Lift-drag ratio curve and lift coefficient curve of airfoil CLARK Z

所设计的微型飞行器在地面旋转产生足够的升力从而起飞,考虑到重量最轻的设计原则,因此为该飞行器的起落架设计为三组贴附于机翼和圆盘下表面的弯曲钢丝(见图5),弯曲的钢丝既能依靠其与地面较小的接触面积减小滑动阻力,同时又能在飞行器降落时吸收落地时的冲击能量,可以很好地实现飞行器起落架的支撑和减震功能,具有很好的适用性与实用性。



图5 减震起落架设计实物图

Fig. 5 Picture of real shock absorber landing gear

2 气动设计分析

本文计算分析了仿枫树种子微型飞行器在不同转速下的升力和功率变化的规律,从而为飞行器动力系统的选择和飞行控制律的设计提供依据。气动计算所使用的软件是南京航空航天大学航空宇航学院飞机设计研究所研发的旋翼、机身组合气动力分析软件^[9],该软件具有动态网格非定常流场计算(DMUFS)功能^[10],本设计模型的气动力分析,需要用动态边界和多体相对运动非定常空气动力的数值模拟计算。

2.1 几何模型的简化和网格的划分

机体圆盘的主要作用是装载航电系统和配重来调配重心的位置,体积面积较小,气动力分析的主要对象为机翼。动态网格采用“嵌套网格”技术,在模型周围设计一个将飞行器包围的封闭胶囊型曲面以作为动态网格的区域边界,修改后的模型及其动态网格区域如图6所示。

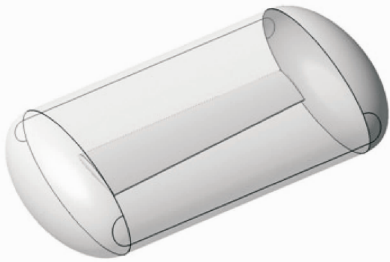


图6 模型及动态网格区域

Fig. 6 Model and area of dynamic grid

将修改后的几何文件导入ICEM中,将整个区域分为内部计算域(包围桨叶部分的区域)和外部计算域(剩余的整个流场区域)进行相应的网格划分(见图7)。

2.2 计算结果分析

预估这种类型的微型飞行器转速可以达到3~7 r/s,因此设定了5种转速进行计算分析:180, 240, 300, 360和420 r/min。选取8°迎角,在求解器中将控制方程类型设置为RANS(S-A湍流模型),流场求解方法设为格心隐式求解,每个算例的预处理截断马赫数设为桨尖马赫数,然后进行相应

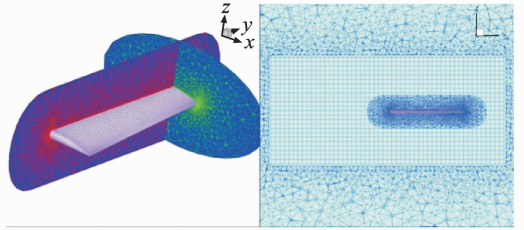


图7 内部计算域和外流场网格划分

Fig. 7 Grid of internal calculation area and external flow field

的计算。图8显示了180, 300, 360和420 r/min时机翼附近的流场分布情况。流场图像显示,飞行器在预定方向上产生稳定的涡流,从而可实现方向稳定的飞行拉力。

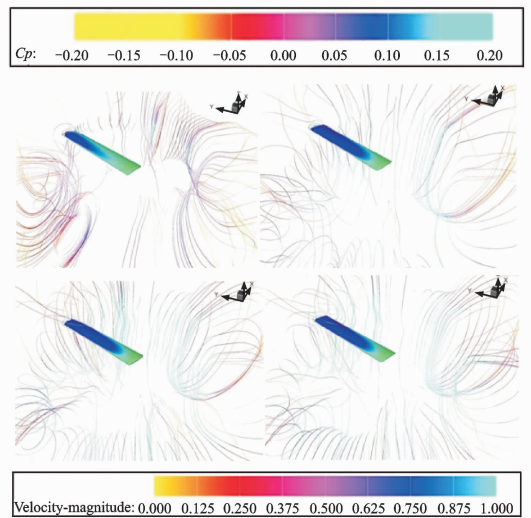


图8 180, 300, 360和420 r/min下流场内流线分布图

Fig. 8 Distributions of streamlines in flow field for 180, 300, 360 and 420 r/min

最后,将计算结果进行处理和整理后得到8°时不同转速下的飞行器实际升力大小和相应发动机需用功率的数据(见表1)。当转速为360 r/min时,升力即可达到2.25 N,而所设计的微型飞行器总质量约为200 g左右,同实际飞行试验中转速为5~6 r/s时飞行器可以起飞升空的状态相当。

初步筛选后,待定的电机型号有双天XM2215MA-17、基爱斯AJ-18-17-11和新西达A1510电机,它们的具体参数如表2所示,由于不同转速下飞行器需用功率为1.8~15.88 W,这3款电机都可满足,通过分析电机的KV值、重量大小和螺旋桨匹配特性,选择了基爱斯电机作为飞行器的动力装置。

表 1 不同转速下飞行器所获升力大小和发动机需用功率对应表

Tab. 1 Lift and engine required power of aircraft at different rotating speed

转速/(r · min ⁻¹)	升力/N	需用功率/W
180	1.32	1.88
240	1.47	3.42
300	1.72	5.89
360	2.25	9.98
420	2.42	15.82

表 2 备选电机参数列表

Tab. 2 List of alternative motor

电机型号	KV 值	工作电压/V	最大电流/A	最大功率/W	质量/g
XM2215MA-17	1 620	3~7.4	7.6	63	16.5
AJ-18-17-11	3 050	3~12.0	8.0	55	10.0
XXD- A1510	2 200	3~12.0	6.0	65	16.1

3 飞行控制方案设计

仿枫树种子微型飞行器的飞行方式类似枫树种子旋转飘飞,通过自身不断的旋转来产生升力,并通过相应力和力矩的平衡来保证能够稳定悬停和平飞。但是由于其整体一直处于旋转之中,飞行器本身没有固定的参考系,如何进行方向控制实现有效的飞行操纵成为了此类飞行器的飞行控制难题。传统直升机通过自动倾斜器进行飞行控制^[11],本文所设计的飞行器没有自动倾斜器,首先通过装载的磁强计来时刻测量机翼的指向,根据期望飞行方向,利用副翼在不同的机翼指向方位进行控制,使舵面进行相应的偏转以达到类似直升机桨盘稳定方向倾斜的效果,从而实现飞行器的航向操纵。

3.1 基于地磁场的机翼指向的测量和标定

通过磁强计测量获取任意时刻的机翼指向 ϕ 方位, ϕ 方位定义为由当地指向地理北极的向量逆时针转到机翼方位所转动过的最小角度。在进行具体的航向测量时,选择了霍尼韦尔 HMC5883L 传感器进行磁航向的测量,并定义相应坐标系下的磁场矢量的分量(见图 9),以便于进行测量选取和计算^[12]。

地磁场矢量可以在大地坐标系下分解到水平面和垂直方向上,选取测量得到的定义水平面上的数据,即 X 轴和 Y 轴磁场矢量分量数据 x, y , 经过相应的反正切计算便可得到方位角度 ϕ 方位,方位角计算公式为反正切函数的变种

$$\phi_{\text{方位}} = \text{atan2}(y, x) =$$

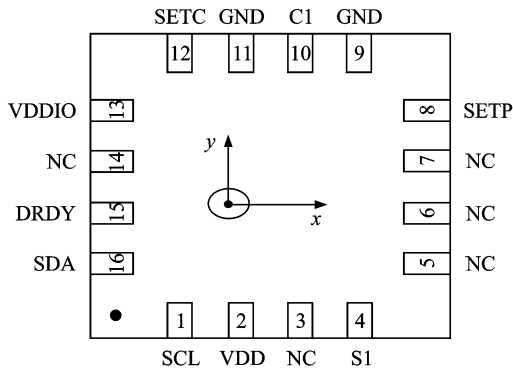


图 9 磁传感器坐标系的定义

Fig. 9 Definition of coordinate system by magnetic sensor

$$\left\{ \begin{array}{ll} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & y < 0, x < 0 \\ + \frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ - \frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \text{未定义} & y = 0, x = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

3.2 飞行控制流程设计

通过上述计算,可以计算获取即时的机翼指向 $\phi_{\text{方位}}$,通过控制输入给出飞行器的期望飞行方向 ϕ_{angle} 和期望飞行速度 v ,其中期望飞行方向定义为控制输入的指向地理北极的向量逆时针旋转至期望飞行方位的角度值。由于陀螺效应的存在,设定的飞行器舵面偏转的控制规律如下

$$P = kv \cos\left(\phi_{\text{方位}} + \phi_{\text{angle}} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

其中 k 为根据舵面最大偏转角度指定的系数。设计了一套完整的控制流程方法(见图 10),编写对应的飞行控制程序输入到所设计的飞控硬件板内。

以向左飞行为例来说明如何在实际飞行中进行方向控制(见图 11)。当给出指令让飞行器向左飞行时,飞行器在前方位时舵面偏转下偏最大,舵面下偏最大时整机的升力最大,机翼有向上的加速度,由于相对气流作用从而减小了机翼迎角,接着舵面偏转角度减小,升力从最大值开始减小但机翼仍在向上运动,由于陀螺效应的滞后影响,飞行器在右侧的时候会产生最大机翼上抬;而飞行器从右侧转到左侧的过程中,飞行器的舵面偏转不断向上,在后方时达到舵面上偏最大,同样地,由于陀螺效应的滞后影响,飞行器在左侧的时候机翼下降至

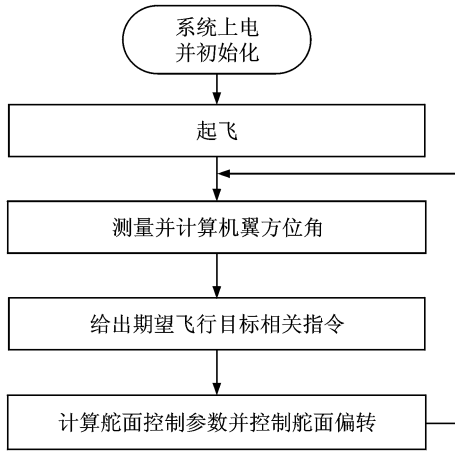


图 10 飞行控制流程图

Fig. 10 Flow diagram of flight control

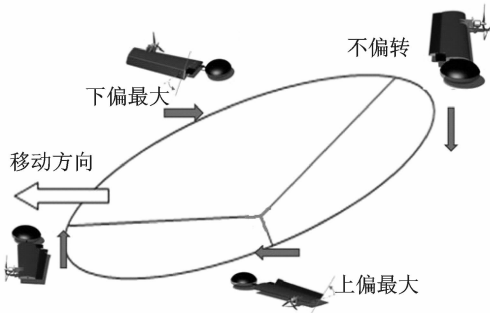


图 11 飞行器向左飞行时舵面控制示意图

Fig. 11 Diagram of control surface deflection when aircraft orienting left

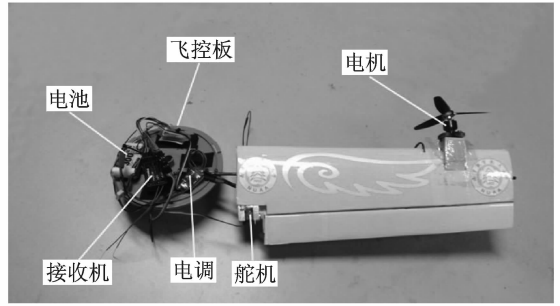


图 12 飞行器各主要系统部署位置示意图

Fig. 12 Diagram of aircraft main system deployment position

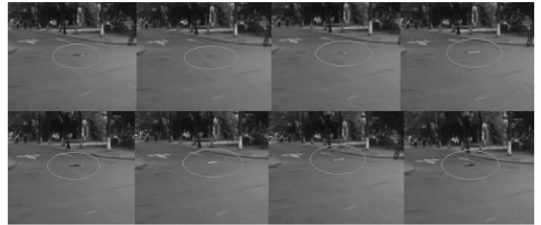


图 13 十字路口方向飞行逐帧图像

Fig. 13 Frame by frame images of orientation flight at crossroad



图 14 室内和室外飞行抓拍图像

Fig. 14 Snapshot for flight indoors and outdoors

最低位置。这样的周期偏转舵面使得机翼形成的桨盘产生稳定方向倾斜,桨盘升力有了指定侧向的分量,从而实现了飞行器的向左飞行。同理可以实现飞行器的水平平面上的所有方位位移控制。

4 飞行试验

为了验证所设计控制方法的正确性,同时为了考察仿枫树种子微型飞行器的实际可用性,笔者进行了大量飞行试验。该飞行器的样机上部署的各系统如图 12 所示。飞行器分别在室内外(南京航空航天大学大学的操场、十字路口和室内大厅)进行了飞行试验。图 13 是在十字路口分别向 4 个方向路口飞行的逐帧抓拍图像,图 14 是飞行器在室内飞行和操场飞行时的抓拍图像。在实际的飞行试验中,该飞行器姿态稳定,航向操纵稳定准确,携带 30 g 的微型摄像负载可以悬停达 10 min,证明该飞行器可以执行预定的飞行任务,具有一定的实用价值。

5 结 论

本文在对枫树种子及其飞行过程进行研究基础上,设计了一种仿枫树种子的新型微型飞行器,采用动态网格非定常流场方法进行了非定常气动计算分析,同时针对此类飞行器设计了基于地磁航向的飞行轨迹控制方法,并进行了相关飞行试验。研究表明:

- (1)该仿生飞行器结构简单,体积小,重量轻,可搭载一定的任务载荷完成设定的飞行任务。
- (2)该仿生飞行器具有较好的气动效率,相比其他微型旋翼飞行器,在一定程度上提高了飞行器的续航性能。
- (3)飞行试验结果表明,设计的飞行控制方案完全适用这类本身没有固定参考系的飞行器的实际操作,保证了航向的稳定准确控制。

本文所设计仿枫树种子微型飞行器为 MAV

提供了一种有实用潜力的新型平台。

参考文献:

- [1] 段文博. 可悬停双旋翼微型飞行器设计与制造[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院,2008.
Duan Wenbo. Design and manufacturing of a dual rotor micro aerial vehicle which can hover[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [2] 昂海松. 微型飞行器设计导论[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012.
Ang Haisong. Introduction of micro air vehicle design[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press, 2012.
- [3] Norberg R. Autorotation, self-stability and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight[J]. *Biological Reviews*, 1973,48(4):561-596.
- [4] Kellas A. The guided samara: Design and development of a controllable single-bladed autorotating vehicle[D]. Massachusetts: Institute of Technology, 2007.
- [5] Ulrich E, Pines D. Planform geometric variation, and its effect on the autorotation efficiency of a mechanical samara [J]. *Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*, 2008,64(2):1138.
- [6] Wood R J. The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect[J]. *Robotics, IEEE Transactions on*, 2008,24(2):341-347.
- [7] 朱宝鏊,刘立天.“飞行大刀”的奥妙[J]. *航空模型*, 2009(3):23-25.
Zhu Baoliu, Liu Litian. Secret of "fly broadsword" [J]. *Model Airplane*, 2009(3):23-25.
- [8] 顾诵芬. 飞机总体设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
Gu Songfen. Aircraft conceptual design[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2001.
- [9] 肖天航. 低雷诺数非定常流场的数值方法及其在微型飞行器上的应用[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院,2009.
Xiao Tianhang. A numerical method for unsteady lowreynolds number flows and application to micro air vehicles[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [10] 孟令兵,昂海松,肖天航. 柔性翼微型飞行器流固耦合数值模拟[J]. *南京航空航天大学学报*,2013,45(5):621-627.
Meng Lingbing, Ang Haisong, Xiao Tianhang. Numerical simulation of fluid-structure interaction for flexible wing MAV[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013,45(5):621-627.
- [11] 高正,陈仁良. 直升机飞行动力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
Gao Zheng, Chen Renliang. Helicopter flight dynamics[M]. Beijing: Science Press,2003.
- [12] 刘建业,贾文峰,赖际舟,等. 微小型四旋翼飞行器多信息非线性融合导航方法及实现[J]. *南京航空航天大学学报*,2013,45(5):575-582.
Liu Jianye, Jia Wenfeng, Lai Jizhou, et al. Multi-information nonlinear fusion technology of micro quadrotor aircraft[J]. *Journal of Nanjing University of Astronautics & Astronautics*, 2013,45(5):575-582.