

基于海月水母的微小卫星结构力学特性分析

李军瑶^{1,2}, 谷松^{1,3}, 陈善博^{1,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 旨在突破卫星结构设计思维局限, 提高卫星一体化程度, 降低结构质量占比。试图从生物形态和功能中获取微小卫星结构设计灵感, 发现了海月水母与卫星结构有类似的边界条件和重力缓释过程。从海月水母的生物形态中提取了其形态的数学模型, 提出了一种新型的卫星构型方案。建立了整星结构力学模型。卫星总重 50.4 kg, 结构质量为 4.5 kg, 结构质量占比 8.93%。用有限元软件对模型进行了力学特性分析。仿真结果表明: 整星基频为 63.5 Hz, 正弦响应和随机响应满足预期要求。因此, 说明上述构型可在保证力学特性情况下使卫星结构质量占比保持较低水平。

关键词: 仿生; 海月水母; 微小卫星; 构型

中图分类号: V411.8 **文献标识码:** B

Mechanical Analysis of Microsatellite Structure Design Based on Moon Jellyfish

LI Jun-yao^{1,2}, GU Song^{1,3}, CHEN Shan-bo^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100039, China;

3. Chang Guang Satellite Technology Ltd, Changchun 130033, China)

ABSTRACT: The aim is to break through the limitation of satellite structure design thinking, improve the degree of satellite integration, and reduce the proportion of structure quality. Getting the inspiration of microsatellite structure design from the biological state and function, it was found that the jellyfish have similar boundary conditions and gravity slow-release process with the satellite structure. A new satellite configuration scheme was proposed by extracting the mathematical model of its morphology from the biological morphology of sea moon jellyfish. The mechanical model of the whole star structure was established. The total weight of the satellite is 50.4 kg, and the structural mass is 4.5 kg, accounting for 8.93% of the structural mass. The simulation results show that the fundamental frequency of the whole satellite 63.5 Hz, the sinusoidal response, and the random response meet the expected requirements. Therefore, this configuration can keep the mass ratio of the satellite structure at a low level while ensuring the mechanical characteristics.

KEYWORDS: Bionic; Jellyfish; Microsatellite; Configuration

1 引言

微小卫星的界定是通过质量来定义的^[1], 是指质量在 10 千克到 100 千克区间内的卫星。每一颗微小卫星能通过

合并分布式卫星系统^[2]和地面无线传感器网络^[3]完成空间任务。对微小卫星来说, 结构是卫星的基础, 是卫星设计的前提。目前, 微小卫星结构的研究和开发都是基于劳动密集型或高单位成本的定制制造上的^[4], 研发周期长、成本高, 结构占整个卫星质量比重较大, 难以适应材料和微电子飞速发展的今日, 故而考虑通过仿生来弥补此缺陷。

任何一种生物其自身结构的合理性、稳定性和对外部环

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)

收稿日期: 2019-07-12 修回日期: 2019-09-24

境的适应性,都是传统产品设计所不具备的^[5],故而把研究生物作为向生物体系索取技术设计的手段^[6]可以快速高效的解决很多问题。

国外研究人员对卫星结构设计和分析进行了大量的研究工作。Naoko^[7]等人通过有孔虫的生物模型中,提出了一种空间系统的多面体模块结构和相应的几何装配规则。成功部署的 JAXA 发射工程测试卫星(ETS-VIII)和射电天文卫星(ASTRO-G)同样基于这种多面体模块化结构思想。

在自然界中,深海浮游生物与卫星有许多相似之处。首先,在深海环境中浮力与重力相互抵消和卫星几乎不受重力在力学条件上相似。其次,浮游生物从深海到浅海重力缓释过程与卫星从地面发射到外太空也有异曲同工之处。最后,就形态而言,浮游生物运动形态和卫星太阳能帆板展开上从自由边界的角度看是一样的。因此,浮生生物的形态具有参考价值。

浮游生物中,海月水母呈钟形,内部空间宽阔且比表面积较大,半封闭造型有利于节省物料降低质量,形态多变,可重复设计性强。是以期望通过研究海月水母的自然形态,提取其数学模型,设计出适用于卫星的可重复性轻巧构型以满足卫星结构轻量化日益增长的需求。

2 形态仿生设计

形态仿生设计是以自然中的素材为基础,通过研究自然形态的特征、特点,通过对自然形态的整体或局部运用提炼、夸张、减弱、变化、归纳等手段,使造型脱离自然形态,最终应用到产品设计当中。

2.1 海月水母形态数学模型

海月水母体圆筒状,无色透明,直径为 10-40cm,身体水的含量达 98%,水母体由外伞、内伞、口腕和胃囊四部分组成^[8]。海月水母构型具有质量轻、体积小的优点^[9]。仅考虑水母外形,以它外伞作为研究对象,建立数学模型。

为了建立海月水母的基本构型,将海月水母的腔体近似建模为一个不完全椭圆体,在三维正交系中,设:

- 1) 椭圆面短轴截面为圆形,半径为 r ;
- 2) h 为椭圆面长轴长度;
- 3) 夹角为 θ ;

图 1 是海月水母简化后的生长模型,根据生长模型可以得到数学表达式

$$\frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{r^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \quad (z \in [h \sin \theta, h]) \quad (1)$$

为验证数学模型的合理性,设置合理参数,对比生长模型和实物。图 2 为模型结果和海月水母实物图片对比。以下参数设置:

- 1) d 中 $\theta = 95^\circ$ $h = 400$ $r = 800$;
- 2) e 中 $\theta = 90^\circ$ $h = 600$ $r = 800$;
- 3) f 中 $\theta = 130^\circ$ $h = 400$ $r = 800$;

数学模型实现了与水母外形相似的生长形式,可用此模

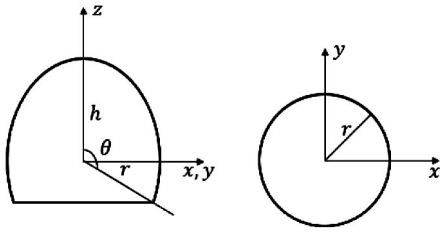


图 1 海月水母生长模型图

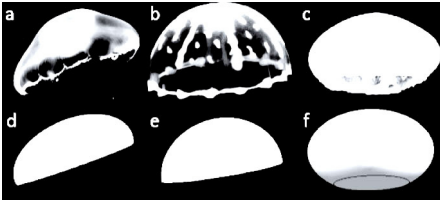


图 2 海月水母(上)和数学模型(下)对比图

型进行下一步研究。

2.2 仿生卫星构型设计

卫星的尺寸大小受火箭整流罩的限制,虽然空间有限,但这并不意味着无限制的压缩卫星体积。相反,在满足要求的情况下,根据整流罩形状和大小及卫星安装位置,设计出质量更轻的卫星结构才是构型任务的首要目的。

根据某卫星载荷尺寸和所有配套单机安装需要,合理布局并选取足够的包络空间,用此仿生模型完成构型,最终取 $\theta = 90^\circ$ $h = 840$ $r = 300$ 。构型结果如图 3 所示,质量分配见表 1。

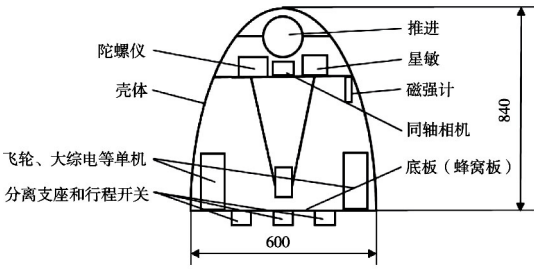


图 3 卫星构型简图

表 1 卫星质量分配

系统部件	质量(kg)
推进	2.5
相机	13.5
星敏、陀螺仪	1.5
其它单机	25.4
结构	4.5
合计	50.4

卫星帆板使用扇形薄膜式柔性太阳翼^[10]。相机和推进系统通过三个铰链与主结构相连,星敏和陀螺仪安装在相机背板上。为充分验证构型的力学特性,模型未经任何优化和减振处理。由表1可知,结构质量占比8.93%。

3 结构力学分析基本原理

系统的力学分析主要包括静力学分析和动力学分析。静力学分析主要是观察卫星在过载状态下结构的可靠性;动力学分析则是观察系统的稳定性,包括两个方面内容:一是系统自身的模态特性,主要是指结构的固有频率和模态振型,另一个是结构动态响应特性,指的是系统对外界激励作用下的响应状况,可用位移、速度、加速度和应力应变等物理量衡量。

3.1 结构有限元静态分析理论

卫星静力分析主要是分析其过载状态下应力集中状况。过载分析属于线弹性系统的应力分析。线性结构的等效方程为

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

解上述方程,得到各点位移矢量 $\{u\}$ 。根据位移插值函数,由弹性力学中给出的应变和位移及应变与应力关系,得出单元节点的应变和应力表达式为

$$\{\varepsilon^e\} = [B]\{u\} - \{\varepsilon^{th}\} \quad (3)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\} \quad (4)$$

求解可得最大应力和最大位移,由此可计算出安全裕度。

3.2 系统的模态分析

模态分析特性反映系统自身结构特点和动力学特性。无阻尼的系统自由振动的运动方程为

$$[M]\ddot{y}(t) + [K]y(t) = \{0\} \quad (5)$$

用于求解系统固有频率和模态振型的特征方程为

$$K - \omega^2 M \varnothing = 0 \quad (6)$$

系统的 n 个自振频率 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$,以及对应自由振型 $\varnothing_i (i=1, 2, \dots, n)$ 由此可得,系统的固有模态矩阵为 $\varnothing = [\varnothing_1, \varnothing_2, \varnothing_3]$,表达系统模态特性的固有频率和振型得以求解。

3.3 系统的动态响应特性

当系统受到的外部激励随着时间变化时,可用振型叠加法^[11]求解。令

$$y(t) = \varnothing q(t) = \sum_{j=1}^n q_j \varnothing_j \quad (7)$$

式中, $\varnothing_j$ 为第 j 阶阻尼自振振型; q_j 为振型坐标,代表每一个振型所占比例大小。

用 $\varnothing^T$ 左乘(7)式各项,得系统的广义运动方程

$$M^* \ddot{q}(t) + C^* \dot{q}(t) + K^* q(t) = F^* \quad (8)$$

上式可分解为 n 个独立的单自由度的运动方程

$$\ddot{q}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = F_j^* / m_j^* \quad (9)$$

求解每一个自由度的解即可得到系统的位移、速度、加

速度等物理量,依据此衡量系统对外界激励的响应特性。

3.3.1 简谐振动响应

简谐振动也成正弦振动,指运动的规律按正弦函数随时间变化的周期振动,反映结构对外界激励响应的情况可用频率传递特性表达。

简谐激励的动力学方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = -ME\ddot{x}_0 e^{j\omega t} \quad (10)$$

系统的广义方程为

$$M^* \ddot{q}(t) + C^* \dot{q}(t) + K^* q(t) = -\gamma \ddot{x}_0 e^{j\omega t} \quad (11)$$

$$\gamma = \varnothing^T ME \quad (12)$$

系统的频率响应矩阵为

$$H(\omega) = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} \quad (13)$$

简谐振动方程的稳态解为

$$y(t) = \sum_{j=1}^n q_j \varnothing_j = \sum_{j=1}^n -\gamma_j H_j \varnothing_j \ddot{x}_0 e^{j\omega t} \quad (14)$$

$$\ddot{y}(t) = -\omega^2 \sum_{j=1}^n -\gamma_j H_j \varnothing_j \ddot{x}_0 e^{j\omega t} \quad (15)$$

$\ddot{y}(t)$ 即为结构对简谐激励的响应加速度值。

3.3.2 随机振动响应

随机振动指在振动的某一时刻,瞬时值不可知,随机振动响应是不确定问题,虚拟激励法(34)可以把随机激励近似转化为简谐激励来进行求解,把随机问题转变成确定性问题的。动力学方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = -ME\ddot{x}(t) \quad (16)$$

利用虚拟激励法求得简谐振动方程的稳态解为

$$\tilde{y}(t) = \sum_{j=1}^n \tilde{q}_j \varnothing_j = -\gamma_j H_j \varnothing_j \sqrt{S_{xx}(\omega)} e^{j\omega t} \quad (17)$$

实际响应的自功率谱密度为

$$S_{yy}(\omega) = \tilde{y}(t) * \tilde{y}(t)^T \approx \sum_{j=1}^n \gamma_j^2 \varnothing_j \varnothing_j^T |H_j(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (18)$$

对上式积分并开方可得加速度响应的均方值 RMS

$$A_y = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_{yy}(\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}} \\ = \left[\sum_{j=1}^n \gamma_j^2 \varnothing_j \varnothing_j^T |H_j(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) d\omega \right]^{1/2} \quad (19)$$

卫星的随机振动响应分析实际就是观察其响应的自功率谱密度。

4 计算机仿真

卫星有效载荷为同轴光学相机,结构形式为椭圆薄壳结构。薄壳材料选用型号为 T700 的碳纤维复合材料,底板采用蜂窝夹层板,蜂窝板芯为正六边形铝芯格。利用 PATRAN 对该卫星进行过载、模态特性、简谐振动响应和随机振动响应分析。有限元模型如图 4(a) 所示。

该卫星的有限元模型主要利用 2D 单元建立,主要研究相机、推进的响应状况,其余单机和结构采用集中质量点模

拟,螺栓连接等使用 Rigid 建立 MPC 单元表示。图 3 中结构尺寸和选用的材料特性见表 2 和表 3。

表 2 结构尺寸

项目	厚度(mm)
壳体	0.6
蜂窝板	20

表 3 材料机械特性

机械性能	拉伸强度(Mpa)
2A12	407.1
T700	3500

4.1 过载分析

曲线结构比直线结构更稳定,但承载能力更弱,所以要 对卫星结构的强度进行考核。根据运载所给条件:

- 1) 卫星最大轴向过载为: 10g;
- 2) 卫星最大横向(X 向或 Y 向) 过载为: 2g;

参考美国 NASA - STD - 5001 标准中对卫星结构各类材 料的部件推进的用于设计的安全系数,取安全系数值 1.5。 在计算过程中,考虑运载过程中,三个方向的过载作用状况 难以预测,因此在组合最大过载工况作用下,模型受到的过 载环境比实际情况要更严重,计算结果偏于安全,具有参考 价值。按照材料对结构分类处理,最终结果如表 4。

表 4 过载分析结果

材料	最大应力(Mpa)	安全系数
A212	94.8	4.3
T700	94.9	36.9

计算所得该系统的安全系数大于设计参考值 1.5,结构 应力水平低于材料的强度极限,结构强度满足设计要求。

4.2 模态分析

提取有限元模型的模态,其中 3 阶和 4 阶为局部模态, 不具有参考价值。主要固有频率见表 5,整星振型见图 4 (b)。

表 5 卫星主要固有频率

模态阶次	频率(Hz)	振型
1	63.5	X 向振动
2	64.5	Y 向振动
5	103.7	Z 向平动

卫星结构最低自振频率最低为 63.5Hz,高于火箭给予 的横向大于 25Hz 和纵向大于 50Hz 的要求,主体结构刚度均 匀,满足设计要求。

4.3 简谐振动响应特性分析

卫星有效载荷为同轴相机,安装在壳体中间,推进系统 在壳体上方,其它单机则主要集中在底部支撑板。采样点在 相机、推进系统和大综电上选择。卫星受到的外部激励为加 速度激励,作用在底部安装节点上,频率范围为 5Hz -

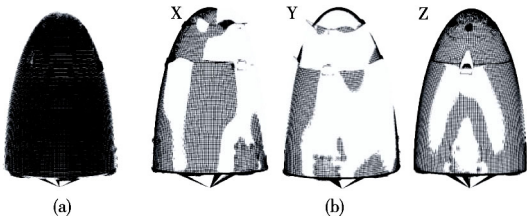


图 4 有限元模型图(a)和模态图(b)

100Hz,幅度为 0.8g。简谐振动分析还需考虑阻尼作用,整星 结构阻尼比取 0.03。三个方向的安装点输入简谐激励和采 样点输出的加速度响应曲线如图 5 和图 6。

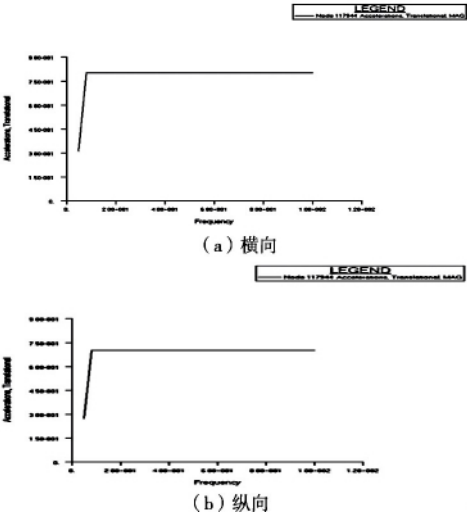
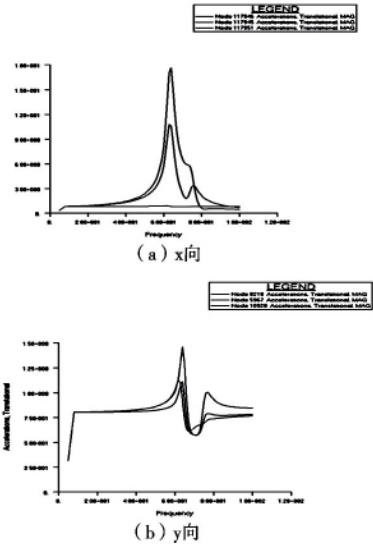


图 5 简谐激励加速度曲线图

从图 6 可看出推进峰值最高,其次是相机,大综电则几 乎不受影响。X、Y 和 Z 三个方向的简谐振动响应最大点均 位于上端推进系统中,简谐振动响应加速度值分别为 17.6g、



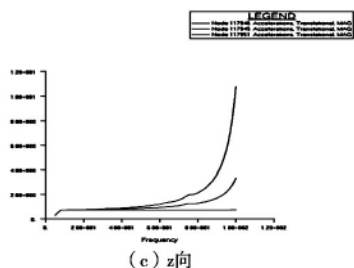


图6 简谐激励下采样点的加速度响应曲线图

15.0g和10.7g,峰值偏大。X和Y向峰值出现在65Hz附近,Z向模式大于100Hz,是以Z向无峰值,与模态计算结果相符。安装在底板的单机响应良好,满足设计要求,安装在中部的相机和上端的推进系统响应偏大,总体效果符合预期。

结合模态分析,推断出造成简谐响应过大的原因是系统约束过少且没有减振措施造成的,因此可通过增加约束、使用减振措施和提高局部刚度的方法来降低正弦响应峰值,以此保证各单机的正常工作。

4.4 随机振动响应特性

随机振动频率为5Hz-2000Hz,频率计算步长为10Hz,整星结构阻尼比取0.03,采样点与简谐分析中所取点一致。总均方根为7.9g。三个方向的输入随机激励和采样点输出的加速度响应曲线如图7所示。

整星结构在X、Y和Z三个方向随机振动最大响应为3.62g,0.81g,5.41g,均发生在推进系统处。整体结构对随机振动响应情况良好,满足随机振动响应设计要求。

5 结论

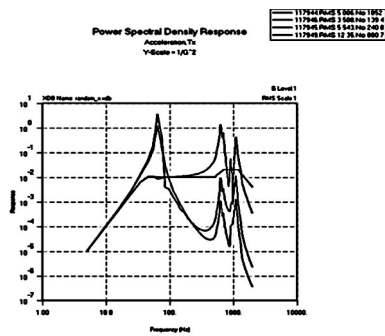
针对微小卫星良好稳定性和通用设计原则,考虑其边界条件和工作环境,提出了一种仿生构型,即通过仿照海月水母形态来设计卫星,构型形状为椭球薄壳状。

构型充分利用了其内部空间和有效载荷壳体力学性能,一体化程度较高,结构质量占比8.93%,低于一般卫星结构设计中质量占比,整星基频为63.5Hz,满足设计需求。

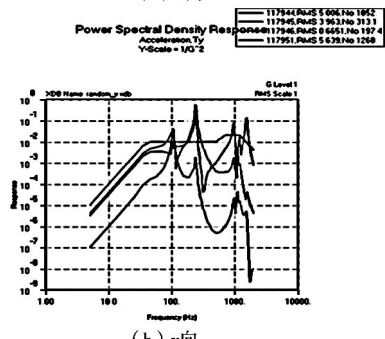
模型仅为验证其可行性,设计较刚,因此结构还有很大的优化空间。可通过对整体优化布局和结构拓扑优化等手段实现进一步降低结构质量从而降低质量占比。

参考文献:

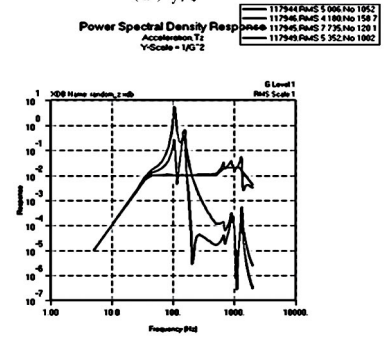
- [1] 张艳娥,常江,秦洁. 现代小卫星技术与应用专题讲座(1)——现代小卫星技术现状与发展[J]. 军事通信技术, 2006, 27(2): 71-76.
- [2] Shaw G. B, Miller D W, and Hastings D E. Generalized Characteristics of Communication, Sensing, and Navigation Satellite Systems[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(6): 801-811.



(a) x向



(b) y向



(c) z向

图7 PSD响应曲线图

- [3] Romer K, and Mattern F. The Design Space of Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 54-61.
- [4] David J, and Tanya Vladimirova, et al. Very - Small - Satellite Design for Distributed Space Missions [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(6): 1294-1297.
- [5] 潜铁宇,李昕. 产品仿生设计生物学原理[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 154-156.
- [6] 陈为. 工业设计中仿生设计的应用[J]. 机械研究与应用, 2003, 16(4): 9-12.
- [7] Naoko K, Takashi Y, et al. Space Structure Design Inspired by Morphology of Marine Plankton [C]. Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2009.
- [8] 郑凤英,陈四清,倪佳. 海月水母的生物学特征及其爆发[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(1): 126-131.
- [9] 胡娅楠. 低电压驱动仿水母式微型机器鱼研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2009-3: 7.

(下转第74页)

式 SOFC 的中部流速最大, 壁面处流速最小。

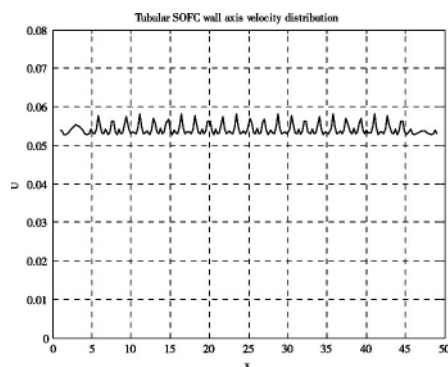


图 12 管式 SOFC 管壁中轴线速度分布

图 12 是管式 SOFC 管壁中轴线上的速度分布, 结果表明多孔介质中的流速分布与多孔介质的准周期性分布一致。

6 结论

本文从介观层次和宏观层次出发, 介观层次上采用格子玻尔兹曼方法建立了管式 SOFC 的电化学反应扩散模型, 宏观层次上采用计算流体力学方法建立了管式 SOFC 的 CFD 模型, 并将格子玻尔兹曼方法计算的反应放热量作为边界条件求解 CFD 模型, 实现了多尺度耦合模拟, 得到了管式 SOFC 的稳态数值模拟结果。从结果中可知, H_2 的浓度和反应时间随反应温度逐渐降低, 电流密度随反应温度逐渐增加。空气流道中的气体温度和管壁温度沿着流动方向逐渐升高。影响温度分布的两个重要因素, 一个是反应放热量, 另一个是空气的流动状态。反应放热量越多, 管式 SOFC 内部的总体温度越高。另外, 空气流速越高, 管式 SOFC 内部温度降低的越多, 达到平衡后便处于稳定状态, 且温度分布趋于均匀。

结果表明采用多尺度耦合方法模拟管式 SOFC 是行之有效的, 在一定程度上解决了管式 SOFC 介观尺度和宏观尺度多物理场耦合的问题。

参考文献:

- [1] Jinhai Li, Jiayuan Zhang, Wei Ge, Xinhua Liu. Multi-scale methodology for complex systems [J]. Chemical Engineering Science, 59(2004): 1687-1700.
- [2] 梁超余, 王家堂, 苗鹤, 韩越, 冯祥, 叶伟强, 袁金良. SOFC 多孔电极结构介尺度研究方法的综述 [J]. 化工进展, 2020: 1-12.
- [3] 马旭, 杨晨, 张雨英. 基于现象的复杂系统建模方法 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31(1): 61-66.
- [4] 郭照立, 郑楚光, 李青, 王能超. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法(第 1 版) [M]. 湖北科学技术出版社, 2002-12.
- [5] S Chen, S P Dawson, G D Doolen, D R Janecky and A Lawniczak. Lattice methods and their applications to reacting systems [J]. Computers chem. Engng, 1995, 19(6): 617-646.
- [6] 徐泽亚. 燃料电池/微透平混合发电装置系统建模与仿真 [D]. 重庆大学, 2006.
- [7] 杨晨, 张雨英, 徐泽亚. 管式 SOFC 内部传热传质的数值仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007 (14): 3206-3209, 3257.
- [8] 黄镜欢. 固体氧化物燃料电池的传热传质数值模拟 [D]. 南京理工大学, 2004.
- [9] Pei-Wen Li, Minking K Chyu. Simulation of the chemical, electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack [J]. Journal of Power Sources, 2003, 124: 487-498.
- [10] 卢立宁, 李素芬, 沈胜强, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合发电系统模拟研究 [J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 358-437.

[作者简介]



马旭(1983-), 男(汉族), 辽宁昌图人, 硕士研究生, 主要研究领域为流动传热问题的多尺度模拟。

杨晨(1963-), 男(汉族), 天津人, 教授, 博士, 中国计算机用户协会仿真应用分会理事, 《计算机仿真》编委, 主要研究方向为先进能源系统多尺度模拟及协同仿真。

(上接第 36 页)

- [10] 李瑞祥, 王治易, 肖杰, 等. 空间实验室大面积太阳能电池阵技术研究 [J]. 上海航天, 2003 (4): 10-14.
- [11] 范宣华, 王珂颖, 牛红攀, 肖世富. 基于模态叠加法的随机振动响应分析算法设计与并行实现 [C]. 中国计算力学学会 2014 暨第三届钱令希计算力学颁奖大会, 2014-8-10: 0324.

[作者简介]



李军瑶(1996-), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 主要研究领域为卫星结构设计。

谷松(1981-), 男(汉族), 辽宁省鞍山市人, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究领域为卫星结构与机构设计和空间遥感器结构设计。

陈善搏(1990-), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨人, 博士研究生, 主要研究领域为卫星结构与机构设计。