

嫦娥一号卫星定向天线动力学仿真分析

荣吉利¹ 李健^{1,2} 徐天富¹

(1 北京理工大学宇航学院,北京 100081)

(2 广西工学院汽车工程系,柳州 545006)

摘要 采用大型有限元软件 MSC.NASTRAN,对嫦娥一号卫星定向天线压紧与展开两种工作状态下的模态与压紧状态下的加速度动力学响应,进行数值计算分析。针对双轴定向天线结构特点,结合双轴电机试验参数,引入扭簧单元对双轴电机结构进行模拟,并将天线压紧状态下的固有频率和关键点的加速度响应计算结果与试验结果进行了对比分析,两者具有较好的一致性,证明了有限元模型建立及扭簧处理方法的正确性。研究了天线展开状态下双轴刚度与系统一阶模态之间的关系,提出了符合天线技术要求的轴向刚度的临界值,即应大于 0.035N/m。计算模型、方法对相关的工程研究和计算有一定的参考价值。

关键词 嫦娥一号卫星;定向天线;动力学分析;有限元;数值仿真;扭转弹簧

中图分类号:V443 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8748(2011)03-0081-05

Numerical Investigation of Dynamic Response of CE-1 Directional Antenna

RONG Jili¹ LI Jian^{1,2} XU Tianfu¹

(1 School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Department of Automobile Engineering, Guangxi University of
Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Numerical simulation is carried out for the modes and dynamic responses of CE-1 directional antenna with finite element analysis (FEA) softwares MSC.NASTRAN. A spring element is introduced to modeling the torsional stiffness of motors according to the characteristic of double axis driving mechanism. Both of the modes and dynamic responses of key points in antenna are calculated with the FEA software. It is found that the torsional stiffness of motors has close relation with the modes of antenna while in working status, and the critical value of torsional stiffness of motor is acquired according to the system requirements. The computational results of the modes and acceleration responses of key points of antenna are compared with the experimental results. The compared results show that the former is consistent with the latter. The finite element model is correct and effective; the relation between torsional stiffness of motors and first mode of antenna in working condition is analyzed, and the critical value of the axial stiffness in accordance with the antenna technical requirements is above 0.035N/m. The research is valuable to relative theory research and engineering calculation.

Key words: CE-1; directional antenna; dynamic analysis; finite element; numerical simulation; torsional spring

收稿日期:2011-03-11;修回日期:2011-03-24

作者简介:荣吉利(1964—),男,教授,研究方向为振动理论与应用。

1 引言

嫦娥一号(CE-1)月球探测卫星采用了“三体定向”技术,即卫星在环月飞行时,要保持卫星对月球定向,太阳电池翼对太阳定向,以及天线对地球定向。卫星相对于地球没有固定的对地面,环月时每一时刻天线对地球面的指向在卫星坐标系中均不相同,为了实现对地通信,需要采用高增益可转动定向天线进行对地跟踪,即天线的反射面要始终对准地球,以确保卫星与地球时刻保持通信联系^[1-2]。随着通信容量的提升,以及传输速率要求的提高,国内外在星载天线设计方面已经有了长足的发展^[3-7]。CE-1 卫星机械转动定向天线是国内卫星上首次采用的双轴大角度机械扫描天线,是保证卫星能成功进入绕月轨道的关键部件之一。卫星在发射阶段、飞行阶段、到达月球轨道等任务过程中都需要天线的支持。更重要的是,CE-1 卫星绕月工作时间较长,卫星飞行轨道的变化、飞行姿态的调整,感知与地面的距离,这些来自地面指挥系统的信号都必须通过天线接收,计算机才能做出相应的指令;同时,卫星搜集到月球的所有信息都将通过天线发送回地球。可以说,定向天线在 CE-1 任务中扮演了极其重要的角色,其工作状态的正常与否,将直接影响到此次探月任务的成败。因此,定向天线也是专家极为关心的问题之一^[8-10]。

2 系统组成

定向天线(见图 1)由以下几部分组成:射频部分,包括反射面、馈源、旋转关节、高频电缆组件;机构部分,包括双轴驱动机构、压紧释放机构、展开机构;结构部分,包括反射面支架、展开臂、系统安装板;此外,还包括展开机构的控制器和天线的低频控制线束。压紧释放机构用来将天线系统可靠地压紧在卫星侧板上,使系统在卫星的发射段可以承受较大的载荷而不被损坏,并且满足天线系统压紧状态的模态要求;在卫星入轨后,顺利地解除对天线系统的约束,使天线展开机构可以正常运动。展开机构采用步进电机加谐波减速器作为动力源,由电机驱动铰链运动,当锁定机构完成锁定时触发微动开关,电机停止转动。天线展开后,可以通过控制双轴驱动机构的转动角度实现反射面的定向,从而完成天线对地球的定向。

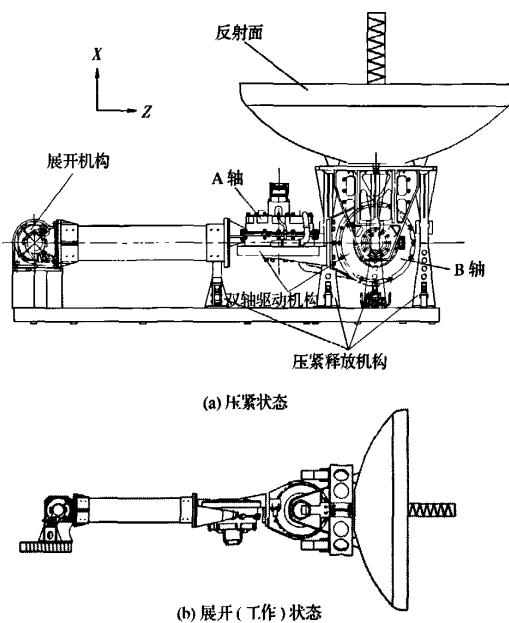


图 1 定向天线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of directional antenna

3 有限元模型

3.1 双轴驱动机构

双轴驱动机构是天线的关键部分。在卫星工作状态下,双轴驱动部件的扭转刚度相对较小,因此,在进行卫星天线动力学仿真分析时,双轴驱动机构力学参数(如约束方式、刚度等)的设置,对数值计算的准确性具有至关重要的作用,需要在仿真分析前先行测量转轴的刚度。

由于各转轴之间只有相对转动的运动趋势,并且两轴的扭转刚度已经通过试验获得,为真实描述电机及其转轴的质量特性,将电机等效为一梁单元,并赋予梁单元与电机及其转轴相同的质量特性;同时,也将两轴的固定部分与转盘用此梁单元来连接,并仅释放沿转轴方向的转动自由度。根据试验测量结果,采用 MSC. NASTRAN 软件中的弹簧单元来模拟转轴的扭转特性,即将转轴的扭转刚度直接在弹簧刚度系数中进行定义。双轴的有限元模型如图 2 所示。从图中可以看到,锁定组件与 A 轴固定部分的连接处有一些共用单元,而 A 轴的中部是一个梁单元,用于模拟电机及相对运动的约束。B 轴的建模方式及参数定义与 A 轴完全一样。

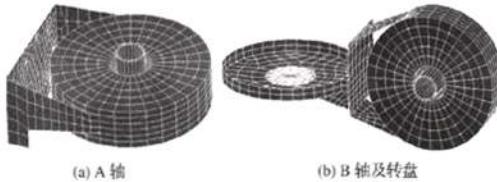


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

3.2 边界条件

由于本文最主要是对定向天线部分进行整体模态分析及响应分析,因此必须要确定边界条件。对于压紧状态,要考虑系统安装板及压紧座的影响,根据现实情况,在计算整体模态时,将约束点的 6 个方向的自由度全部约束住,在进行压紧状态的响应分析时,将加速度激励直接加在约束点上。为了便于计算,将系统安装板上的指定位置的约束点,用一个多项约束(MPC)单元全部连接到某一节点上,这样,只要对这一指定节点的各个方向自由度进行约束或加载,即可达到对系统安装板上各点的约束及加载。虽然该方法会适当提高安装板的刚度,但数值计算结果表明,天线前五阶模态振型均集中在反射面、馈源等部件上,与安装板相距较远;另外,将计算结果与每个约束点单独约束、加载对比,发现反射面与馈源顶端响应值基本保持不变,因此,可以采用 MPC 方法将安装板上的约束点连接后统一加载。天线压紧状态下的有限元模型,如图 3 所示。整个天线系统共有 41 171 个单元,对于展开状态,由于此时系统安装板已经不是主要考虑对象,因此可以将其忽略,而直接考虑底座与展开部分。另外,展开状态的约束,就是直接将底座上螺钉孔内各节点的 6 个自由度全部约束。

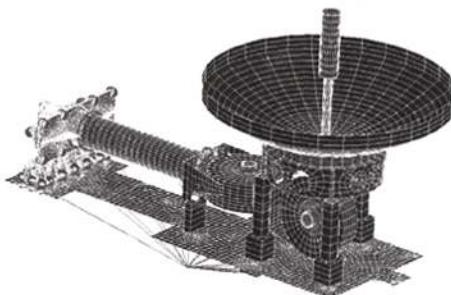


图 3 天线压紧状态下的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of directional antenna in locking condition

4 计算结果分析

4.1 压紧状态固有频率分析

当天线处于压紧状态时,其第一阶频率约为 92Hz,振型为沿展开臂方向,即沿 Z 轴方向的摆动,最大振幅位于反射面柱面边缘外侧(90°)及馈源顶端。第二阶频率为 103Hz 左右,振型表现为垂直于展开臂及底板方向的横向摆动,最大振幅同样位于反射面柱面边缘外侧(0°)及馈源顶端。第三阶频率约为 115Hz,振型为反射面的扭转振动。第四阶频率为 124Hz,振型为展开臂与馈源沿 Y 方向的横向摆动,最大振幅仍位于馈源顶部。第五阶频率为 130Hz,振型为反射面与馈源沿 Z 方向的振动。与第一阶振型不同的是,第五阶振型的反射面与馈源并不是同步振动,两个部件的振动应该有一个相位差;而第一阶振动是反射面的振动还带动馈源运动,这就是两者比较显著的差别。由于试验测量时仅扫到 100Hz 的频率,因此,试验结果仅包含前两阶模态,分别为 89Hz 和 100Hz。将数值计算结果与试验结果进行对比,计算结果略微偏高,但误差均控制在 3%~4%。这说明,计算结果与试验结果无论是在趋势还是数值上,都吻合得较好。

4.2 压紧状态动力学响应分析

本文主要是对压紧状态的正弦振动试验进行模拟,表 1 分别给出了 X、Y、Z 方向上所加的正弦加速度的大小。根据压紧状态馈源顶端振幅大于其他测点的情况,研究 X、Y、Z 方向正弦加速度激励作用下,馈源顶端的动力响应,计算结果如表 2 所示。

表 1 正弦振动试验量级

Table 1 Experimental data of sinusoidal vibration

X 方向		Y 方向		Z 方向	
频率/Hz	量级	频率/Hz	量级	频率/Hz	量级
10~20	6.2mm	10~20	5.0mm	10~20	5.0mm
20~35	10g _n	20~35	8g _n	20~35	8g _n
35~65	15g _n	35~65	12g _n	35~65	12g _n
65~100	8g _n	65~90	6g _n	65~80	6g _n
		90~100	5g _n	80~100	5g _n

由于在 X 方向的共振频率并不在 105Hz 以内,因此只提取了馈源顶端的峰值。从计算结果看,其加速度响应峰值在 X 方向受模态阻尼的影响较小,而 Y 方向与 Z 方向受模态阻尼的影响较为明显,表现为随着模态阻尼的增加,其加速度响应峰值明显减小。与此同时,各点响应值的数值计算结果较试验测试结果普遍偏小。因此,选择正确的模态阻尼对计算结果的正确性具有重要的现实意义。

表 2 喂源顶端方向加速度响应计算结果

Table 2 Calculated results of acceleration for endpoint of feed source

激励方向	模态阻尼	X 方向数值		Y 方向数值		Z 方向数值	
		共振点/Hz	响应值/ g_n	共振点/Hz	响应值/ g_n	共振点/Hz	响应值/ g_n
X	0.02	>105	16.32	>105	23.20	>105	89.08
	0.03	>105	16.32	>105	18.51	>105	78.09
	0.05	>105	16.32	>105	14.67	>105	69.20
Y	0.02	102	4.74	102	342.24	102	228.54
	0.03	101	3.10	101	207.57	101	169.51
	0.05	99	1.78	99	104.60	99	119.80
Z	0.02	95	0.42	95	75.69	95	223.81
	0.03	90	0.10	90	23.72	90	181.30
	0.05	89	0.24	98	42.97	98	145.03

由于 Y 方向的固有频率在 102Hz 左右,因此在 Y 方向激励下的响应峰值基本就出现在这一区域内。随着模态阻尼的增加,馈源顶端加速度响应值迅速降低,降幅分别为 39.3% 和 69.4%。可见,在 Y 方向激励下,模态阻尼对一些关键点的影响还是非常大的。根据测试结果,在 Y 方向激励作用下,反射面边缘外侧 0° 与 90° 方向的值分别为 84.6 g_n 与 119.7 g_n 。馈源顶端 Y 方向加速度值为 350.4 g_n ,在 Z 方向激励作用下,馈源顶端 Y 方向加速度值为 78.4 g_n ,而对应的数值计算结果分别为 342.2 g_n 与 75.6 g_n 。结果表明,仅模态阻尼为 0.02 时与试验值相对较为接近。随着模态阻尼的增加,响应值必然减小,此时与试验值相差会较大,因此,从这点上讨论,模态阻尼取为 0.02 较为合适。

与 Y 方向激励情况类似,Z 方向的共振频率在 89~92Hz 范围内。馈源顶端加速度响应数值测试结果为 179.56 g_n 。将计算结果与试验结果对比发现,在模态阻尼为 0.02 时,加速度响应值偏大;而取 0.03 时,两者吻合较好;取 0.05 时,计算结果与试验结果相差较大,数值明显偏小。

从响应分析的结果看,计算结果与试验结果基

本能吻合。对 Y 方向的响应分析可以看到,当模态阻尼取为 0.02 时,测点与试验数据吻合得较好。但是,随着阻尼的增加,其响应值会有较为明显的下降。而对 Z 方向各测点的响应分析来看,模态阻尼取为 0.02 时,关键点的响应值偏大;而取 0.03 时,吻合较好。考虑到天线在压紧状态时主要是受到垂直安装板以及沿 Y 方向的横向“摆动”,即主要沿 X 方向与 Y 方向振动,因此,综合考虑,在动力学响应分析时,可以将模态阻尼取为 0.02。

4.3 展开状态固有频率分析

展开状态共包括 15 种工况,即 A 轴(靠近展开臂)分别旋转 0°、45°、90°、135°、180°(共 5 种工况)与 B 轴(连接反射面)分别旋转 0°、90°、180°(共 3 种工况)之间的两两组合。天线一阶模态计算结果如表 3 所示。由于双轴驱动机构主要是由电机提供其刚度,而电机转轴相对于卫星其他部件而言,其刚度较低,因此,天线展开状态 15 种工况中第一阶模态振型均为从 AB 两轴连接部分、B 轴、反射面直到馈源顶端各部件整体围绕 A 轴转动并带动展开臂轻微摆动。结果表明,A 轴扭转刚度相对较低。而从计算结果看,各工况的一阶模态频率均大于 3.0Hz,处于 3.3~4.5Hz 之间。

表 3 天线展开状态 15 种工况下系统一阶模态频率计算结果

Table 3 Calculated results of first mode frequency of antenna in working condition for different cases

B 轴转角/(°)	0					90					180				
	A 轴转角/(°)	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180	0	45	90	135
一阶模态频率/Hz	4.43	4.22	4.12	4.22	4.45	3.50	3.38	3.31	3.37	3.51	4.45	4.24	4.12	4.21	4.44

4.4 双轴电机刚度对展开状态一阶模态的影响

在天线展开工作状态下,双轴驱动主要是由相应的电机提供的,而根据数值计算结果,定向天线的第一阶模态又表现为沿 A 轴方向的扭转振型,因

此,有必要研究双轴电机刚度与系统一阶模态之间的关系。对比上述 15 种工况中系统一阶模态,取一阶模态最小值所对应的工况(即 A、B 轴转角均为 90°)进行研究,计算结果如图 4 所示。从图中可以

看出,系统一阶模态频率随着扭转刚度的增加而增加,当双轴电机刚度大于0.2N/m时,两者基本呈线性关系。根据定向天线一阶模态指标要求^[1],为了保证系统一阶模态频率大于1.0Hz,通过对数值计算结果离散点的拟合,认为双轴电机刚度不能小于0.035N/m,因此可将此值作为保证天线一阶模态频率大于1.0Hz要求所对应的电机扭转刚度的临界值。

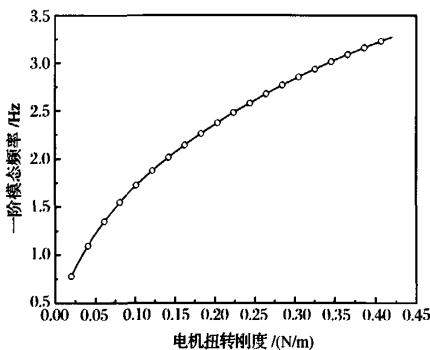


图4 电机扭转刚度与天线一阶模态频率之间的关系

Fig. 4 Relation between torsional stiffness of motors and first mode frequency of antenna

5 结论

本文以CE-1卫星定向天线为研究对象,采用MSC.NASTRAN有限元软件,对天线压紧与展开两种工作状态下的固有频率及压紧状态下的动力学响应进行分析。根据计算结果与试验结果的对比分析可以看出,定向天线压紧状态的频率值与试验值误差控制在5%以内,计算结果较试验测试结果略高。振型方面,一阶振型出现于沿展开臂方向;二阶振型与展开臂在同一平面内,并垂直于展开臂方向,出现摆动的情况;三阶振型出现的是反射面的扭转模态。从振型上看,馈源顶部振幅较大。

从定向天线展开工作状态的15种工况模态分析结果看,由于双轴驱动部件仅靠电机控制,其扭转刚度相对其他部件的刚度要低,因此第一阶模态出现在沿A轴轴向的扭转上,且频率值也较低,在3.3~4.5Hz范围。

针对双轴电机刚度与卫星低阶模态的影响,还研究了双轴电机刚度值变化与天线一阶模态频率的关系。从计算结果可以看出,天线的一阶模态频率会随着双轴电机刚度的增加而增加,若要保证天线一阶模态频率满足大于1.0Hz的技术要求,则双轴

电机刚度应大于0.035N/m。

为了避免压紧状态下某些部件由于较大的动力响应值损坏,应该适当地加大阻尼,以减小部分点的响应值。从计算结果看,纵观整个模型各节点,压紧状态下响应值不论是Y方向还是Z方向,最大值均出现在馈源顶端,而且最大值可达到约350g_a,为有效避免过高的加速度响应,还是应当适当加入阻尼而抑制过高的响应。另外,反射面边缘外侧两个方向的值相对也较大,这些都是值得注意的。

参考文献 (References)

- [1] Lecha J, Woods C. Design development and testing of the X-ray timing explorer high gain antenna system [C]//The 29th Aerospace Mechanisms Symposium. Washington:NASA,1995:193-207
- [2] Stephen R. Topex high-gain antenna system deployment actuator mechanism[C]//The 25th Aerospace Mechanisms Symposium. Washington:NASA,1991:205-212
- [3] Jan H, Enrico S, Michael S, et al. A compact, light-weight high data-rate antenna system for remote-sensing orbiters and space exploration[J]. Acta Astronautica, 2009, 65:1738-1744
- [4] Hiroaki T. Design optimization studies for large-scale contoured beam deployable satellite antennas[J]. Acta Astronautica, 2006, 58:443-451
- [5] Shogen K, Nishida H, Toyama N. Single shaped reflector antennas for broadcasting satellites [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1992, 40(2):178-187
- [6] Cherrette A R, Lee S W, Acosta R J. A method for producing a shaped contour radiation pattern using a single shaped reflector and a single feed [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1989, 37(6): 698-706
- [7] Akira M, Akio T, Naokazu H, et al. Technology status of the 13m aperture deployment antenna reflectors for Engineering Test Satellite VIII[J]. Acta Astronautica, 2000, 47:2-9
- [8] 叶培建,饶伟,孙泽洲,等.嫦娥一号月球探测卫星技术特点分析[J].航天器工程,2008,17(1):7-11
- [9] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005
- [10] 叶培建,孙泽洲,饶伟.嫦娥一号月球探测卫星研究综述[J].航天器工程,2007,16(6):9-15
- [11] 孙大媛.一种卫星机械转动定向天线的研制[J].航天器工程,2007,16(6):46-50

(编辑:夏光)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>