可展开空间结构动力学与控制专题·编者按

近年来,我国航天科技发展所需的空间结构在尺度上越来越大,构型、精度、寿命等指标也不断提升.以天基通信和观测所需的空天天线为例,其尺度可达数十米,而形面精度则需控制在几个毫米.由于运载火箭对有效载荷的尺寸限制,这类空间结构在发射前需折叠打包,入轨后再展开、锁定,投入运行.空间结构在展开过程中和展开锁定后会表现出非常复杂的非线性动力学特性,导致若干新的科学和技术问题.

在国家自然科学基金重大项目“大型可展开空间结构的非线性动力学建模、分析与控制”的资助下,北京理工大学、南京航空航天大学、北京工业大学、中国空间技术研究院西安分院等单位针对大型空间天线展开过程和展开锁定后的动力学开展应用基础研究,取得若干重要进展,有力推动了我国大型空间天线技术的发展.本专题收入10篇论文,较为系统地介绍了这些进展.

大型空间天线的展开过程涉及大范围运动与大变形耦合、刚柔耦合等复杂动力学问题,且在轨展开和地面试验存在重力、热环境等工况的巨大差异,需通过数值仿真与地面试验研究相互印证来揭示其展开动力学特性,从而为工程样机研制和在轨顺利展开提供充分依据.论文《大型空间环形桁架天线反射器展开动力学模拟与实验研究》基于绝对坐标描述的非线性有限元方法对天线进行动力学建模,提出基于静力凝聚和多层区域分解的高效算法,研究了环形桁架展开不同步现象,通过地面实验验证了数值模拟结果.

为了准确预测大型空间天线的展开动力学行为,需建立高维非线性多柔体动力学模型来精确描述结构展开过程的动力学响应,而高效数值计算是核心技术,论文《基于区域分解的柔性多体系统高效并行算法》借助等几何分析有限元方法,建立了可精确描述大转动与大变形耦合的平板单元,基于有限元撕裂对接区域分解技术提出了一种系统动力学方程的高效并行求解算法,并通过数值算例验证了该方法的有效性.

为了满足对天基对地观测平台的需求,空间天线的口径不断增大,其展开所需的驱动力也随之增大,这对驱动方式提出了新挑战.论文《大型环形桁架天线分布式驱动展开方法与数值分析》通过建立环形桁架天线动力学仿真模型,模拟不同驱动方式下的天线展开过程,分析了集中式驱动的不足及展开不同步的原因,进而提出了一种新的分布式驱动展开方法.

柔性包带是大型空间天线的关键部件之一,其解锁和释放的可靠性对天线能否顺利展开具有重要影响.论文《大型环形桁架天线柔性包带展开动力学仿真与实验研究》建立了柔性包带的数值计算模型,研究了柔性包带的展开动力学行为,开展了常温及高低温环境下的展开试验研究,验证了数值分析结果的有效性.

大型空间天线包含许多杆件,彼此间由铰链相连接,制造和装配误差导致铰链中存在不可避免的间隙,进而影响铰链的动刚度及结构的动态特性.论文《大型环形桁架天线间隙铰链径向动刚度的理论与实验研究》研究了环形桁架天线中铰链间隙引起的动刚度问题,通过理论和实验研究分析了外激励、间隙和振动幅值对动刚度系数的影响.

大型空间天线具有重量轻、柔性大、阻尼小、间隙多等特点,展开锁定后易产生复杂的、缓慢衰减的非线性低频振动,因此需研究与分析大型空间天线的非线性动力学特性.论文《受边界载荷的大型环形桁架天线

引用格式: 田强,胡更开,胡海岩.可展开空间结构动力学与控制专题·编者按.中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47: 104601

Tian Q, Hu G K, Hu H Y. Special topic: Dynamics and control of deployable space structures (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 104601, doi: 10.1360/SSPMA2017-00186

结构非线性动力学研究》将展开锁定后的环形桁架天线结构简化为等效圆柱壳结构,研究了特殊边界条件下呼吸振动的分岔和混沌,揭示了径向线载荷和面内载荷对天线结构振动的影响.

大型空间天线展开锁定后,成为具有频率低、阻尼小、模态密集等动力学特性的大型结构,而该结构与航天器耦合后的动力学特性更为复杂.论文《刚-柔耦合的对称天线结构非线性主共振》将天线与航天器耦合系统进行简化,研究了主共振激励下天线的非线性动态响应,发现主共振响应存在多解和非线性跳跃现象,分析了激励变化对天线结构幅频响应的影响.

航天器进出地球阴影区时,会经历高通量热辐射的迅速变化,使空间天线结构产生热致变形和热致振动,甚至发生结构屈服、断裂等,从而影响其正常工作.论文《大型环形桁架天线进出地影期热致振动特性研究》研究了大型环形桁架天线在轨运行时的热-结构耦合动力学问题,分析了温度场变化对结构热致振动的影响规律,并通过航天器在轨数据验证了数值分析结果.

大型空间天线的索网结构,在卫星调姿变轨时会产生振动,影响天线的形面精度.基于模态的振动控制策略难以准确描述索网结构的动力学特性且容易产生模态溢出等问题,而基于波动控制的方法则为索网结构振动控制提供了新思路.论文《基于变换方法的索网结构波传播控制研究》将索网均匀化为等效薄膜,建立了可描述索网结构中弹性波传播规律的均匀化等效波动方程,采用变换方法研究索网结构的波传播控制,通过数值计算验证了其有效性,为索网结构的振动控制提供了新的理论指导.

为了防止大型空间天线的桁架结构在轨展开后发生振动,对桁架结构的振动响应进行主动控制是确保其正常工作的有效手段,而对结构状态进行准确估计则是进行主动控制设计的基础.论文《基于PDE模型的空间柔性曲梁无穷维Kalman滤波器设计》基于结构的偏微分方程(PDE)模型和Kalman滤波理论,构建了一种无穷维状态观测器模型,并通过数值算例验证了其观测结果的有效性.

综上所述,这10篇论文理论联系实际,从一个侧面介绍了近年来我国学者在大型可展开空间天线动力学与控制研究领域的新进展,尤其是柔性机构/结构系统的非线性动力学建模、分析、仿真和控制方法,可供同行学者研究其他可展开空间结构动力学与控制问题时参考.

田强, 胡更开, 胡海岩
北京理工大学