大型环形桁架天线柔性包带展开动力学仿真与实验研究

万小平*, 杨军刚, 宋燕平, 马小飞, 胡建峰, 赵将

中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100

* 联系人, E-mail: 13669194798@163.com

收稿日期: 2017-04-06; 接受日期: 2017-05-27; 网络出版日期: 2017-07-21

国家自然科学基金(编号: 11290154, 11402196, U1537213)资助项目

摘要 柔性包带作为一种大型环形桁架天线的关键部件, 解锁释放后的展开动力学行为对大型可展开天线的可靠展开具有重要影响. 包带展开过程呈现大位移、大转动、大变形的特点, 属典型的柔性体几何非线性范畴, 其展开动力学行为异常复杂. 文中基于10 m级大型可展开天线的柔性包带特性与功能要求, 采用几何精确法建立了柔性包带的展开动力学数值分析模型, 通过研究识别了影响展开动力学特性的关键参数, 开展了常温及高低温下的展开试验验证, 试验与数值分析结果相符, 验证了数值分析结果的有效性.

关键词 大型环形桁架展开天线, 柔性包带, 展开动力学, 几何精确梁

PACS: 84.40.Ba, 83.85.Vb, 46.70.De, 46.70.-p

随着空间可展开结构技术的发展, 为满足空间对地观测、高轨移动通信等领域对超大型可展开天线的需求, 世界各航天强国纷纷发展了形式各异的大口径、轻质量、高收纳率的空间超大型可展开天线^[1-3]. 由于火箭整流罩包络尺寸的限制, 卫星发射时, 大型可展开天线一般收纳于卫星平台上. 卫星入轨后, 在地面遥控指令下, 天线于收拢状态先随展开臂伸出卫星平台, 然后天线解锁并展开至工作状态. 根据我国空间探测需求, 中国空间技术研究院西安分院研制了一种展开口径10 m以上大型环形桁架天线, 其中的大型可展开反射器是天线的核心关键单机. 为使大型可展开反射器收拢状态具备足够的刚度, 能够承受卫

星发射时的力学载荷, 大型可展开反射器一般采用柔性包带对其收拢状态进行紧固. 卫星入轨后, 包带解锁释放, 大型可展开反射器在内部弹性势能作用下自动展开, 此时包带解锁释放与反射器展开运动同步进行. 随着反射器的展开口径增大, 其收拢状态的包络尺寸增大, 柔性包带的长度也相应增加, 其动力学特性将直接影响反射器可靠展开, 因此需要研究柔性包带的展开动力学行为, 确保柔性包带与反射器的展开运动动态兼容. 本文以我国10 m级大型可展开反射器的柔性包带为研究对象, 开展其动力学特性研究, 为后续超大型可展开天线的研究奠定基础.

柔性包带解锁释放后的展开过程具有大位移、大

引用格式: 万小平, 杨军刚, 宋燕平, 等. 大型环形桁架天线柔性包带展开动力学仿真与实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 104605
Wan X P, Yang J G, Song Y P, et al. Simulation and experiment research on flexible belt deployment dynamics of a large hoop truss antenna (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 104605, doi: [10.1360/SSPMA2017-00094](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00094)

转动、大变形的特点,属典型的几何非线性动力学行为. 柔性部件的几何非线性动力学行为较为复杂,进行小变形假设,难以真正描述部件的动力学行为,通常利用空间非线性梁单元进行数值模拟. 非线性梁单元的关键在于如何处理梁单元的有限转动,其中包括有限转动的参数化问题、转动参数插值问题、合理的计算机数值方法的应用问题等^[4]. 目前几何非线性梁单元的主要研究方法有几何精确法^[4-8]和绝对节点坐标方法^[9,10]. Romero^[11]从计算效率、解决奇异性、应变客观性和编程实现难易程度等方面对几何精确法和绝对节点坐标法进行比较,得出两种方法各有优缺点:在编程实现上绝对节点坐标法更易实现,但在精度和计算速度上几何精确法更占优势. 综合两种方法的优缺点,本文基于柔性包带的结构特性,选取几何精确法建立柔性包带的展开动力学数值分析模型,并对其展开动力学特性进行分析,基于仿真分析结果优化了柔性包带的结构设计,并开展了相应的试验验证,解决了大型可展开天线研制过程中柔性包带与反射器同步展开时的动态兼容难题.

1 柔性包带的结构概述

大型可展开反射器方案设计中采用了3组柔性包带对其进行紧固,其功能要求为实现反射器收拢状态的紧固并能解锁释放,要求包带释放与天线同步展开运动动态兼容,不得相互碰撞. 根据上述的功能与性能要求,柔性包带应当具备柔性、高阻尼的特点. 一方面其刚度保持在合理范围,既可以保持一定的柔性确保能够弯曲成型,与反射器收拢状态匹配良好,又可以承受包带的预紧载荷,确保天线收拢的刚度;另一方面,需要包带具备高阻尼特性,其解锁释放后,其振动幅度较小,且能快速收敛,与天线的展开运动兼容.

根据上述边界条件,包带方案设计中采用了火工解锁的结构形式,其主要由柔性复材带、固定组件及火工解锁装置组成,结构组成如图1所示.

如图1所示,柔性包带由两根对称的复合材料带和相应的金属连接件构成,并在远端固定端与反射器固结. 包带解锁前,包带已产生弹性弯曲变形,并在施加的预紧力作用下存储一定弹性势能. 因此包带火工解锁释放后,柔性复材带在自身弹性储能作用下以固定端为转轴摆动,这样进行来回振荡直至达到平衡态.

图1 包带结构组成图示

Figure 1 The structure of the flexible belt.

2 柔性包带展开动力学数值分析

2.1 柔性包带展开动力学仿真建模

根据柔性包带的几何特点,本文在动力学建模时采用几何精确梁模拟柔性复材带;采用刚体来模拟金属接头、固定端固定座和反射器,在固定端施加固定约束,金属接头和包带施加转动副;包带初始施加预应力使其形状为圆形,展开过程中包带与反射器采用接触分析模拟其接触碰撞.

几何精确法是Simo和Vu-Quoc在文献^[12,13]的基础上提出来的. 在几何精确法中,梁截面曲率定义公式是几何精确的,对三维任意大转动均成立. 根据几何精确法,空间运动的梁单元允许发生3个方向的平动和转动,但梁截面仍然保持刚性,因此只要确定梁中心任意一点位置和姿态即确定梁的构型. 本文采用转动向量 ϕ 来描述截面质心坐标系的姿态. 我们选取梁左右两端中心线位置 r 和转动向量 ϕ 作为广义坐标描述梁的构型,如图2所示. 梁单元的广义坐标可表示为

$$q_b = [r_1^T \quad \phi_1^T \quad r_2^T \quad \phi_2^T]^T. \quad (1)$$

对于中心线任意一点的位置在全局坐标系下进行线性插值. 对于转动向量插值, Crisfield和Jelnic^[13]指出,转动向量是一个伪矢量,不具备矢量性质,他们提出在参考坐标系下对转动向量进行线性插值. 本文选择Crisfield和Jelnic提出的方法进行插值;选择单元第一个节点转动向量确定的坐标系为参考坐标系,则单元内中心线任意一点位置 r 、相对转动向量 ϕ^r 可表示为

$$\begin{cases} r = (1 - \xi)r_1 + \xi r_2, \\ \phi^r = (1 - \xi)\phi_1^r + \xi \phi_2^r, \end{cases} \quad (2)$$

图2 (网络版彩图)柔性梁单元图示

Figure 2 (Color online) The flexible beam.

其中 $\zeta \in [0, 1]$ 是梁单元内参数坐标, r_1, r_2 为两端点在全局坐标系下位置, φ_1', φ_2' 为两端点在参考坐标系下的转动向量. 对于梁单元的动能和势能均可通过广义坐标来表达, 具体推导可参见文献[13–15].

系统动力学控制方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} + \Phi_q^T \lambda = Q, \\ \Phi(q, t) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中 q 是广义坐标, $\dot{q}$ 为广义速度, T 为动能; V 为弹性势能; Φ 为约束方程组; λ 为拉格朗日乘子; Q 为广义力.

基于上述方法, 建立的柔性包带的展开动力学数

值分析模型如图3所示(锁定及展开构型).

2.2 柔性包带展开动力学数值分析

2.2.1 柔性包带展开过程特例分析

为了研究柔性包带解锁后的展开特性, 同时减小解算过程复杂程度, 仿真过程中首先考虑反射器始终处于收拢状态, 其包络大小保持不变时包带解锁释放. 仿真过程提取柔性复材带末端(自由端)在释放后的振荡过程中距反射器轴心的位移随时间的变化曲线, 结果如图4所示.

如图4所示, 包带末端距离反射器外包络的位移随时间呈振荡特性, 幅度随时间逐渐衰减, 且在第一次回弹时距离反射器外包络最近(图4中标识Y坐标), 柔性复材带的典型振荡形态如图5所示.

2.2.2 柔性包带展开过程特例分析

根据包带实际结构特性和受载特性, 分析得到包带固定端根部转动角度、柔性复材带抗弯刚度(复材带模量和宽度一定时, 用厚度来表征)、预紧力、结构阻尼等因素对包带解锁后的振荡特性具有相应的影响. 在上述仿真基础上, 采用控制变量法对上述物理参数进行敏感性研究, 每次保持其他变量不变, 只研究一个参数改变时, 包带解锁后振荡过程中末端到反射器外包络最小距离的变化趋势. 具体仿真结果如图6所示.

图3 (网络版彩图)包带数值分析模型图示. (a) 包带锁定模型; (b) 包带展开平衡模型(注: 图中锁定模型中间为大型可展开反射器外包络, 复材带为几何精确柔性梁)

Figure 3 (Color online) The numerical analysis model of the wrapping tape. (a) The model of wrapping tape in stowed; (b) the model of wrapping tape in deployed (comments: the middle of figure a is the envelope of large deployable antenna, the composite belt is the geometry precision beam).

图4 (网络版彩图)包带端部距反射器外包络位移变化曲线
Figure 4 (Color online) The curve of the distance that is between the bottom component of the wrapping tape and the reflector varies with time.

图5 (网络版彩图)包带解锁后的典型振荡形态
Figure 5 (Color online) The nominal oscillating shapes of the wrapping tape after releasing.

图6 (网络版彩图)柔性包带参数敏感性分析结果. (a)根部转动角度敏感性分析结果; (b) 复材带厚度(抗弯刚度)敏感性分析结果; (c) 结构阻尼系数敏感度分析结果; (d) 预紧力敏感度分析结果
Figure 6 (Color online) The sensitivity analysis results of the wrapping tape. (a) The sensitivity analysis result of the rooting rotation angle; (b) the sensitivity analysis result of the composite belt thickness; (c) the sensitivity analysis result of the structure damper ratio; (d) the sensitivity analysis result of the pretightening force.

图6(a)的分析结果表明,根部转动的角度越大,包带回弹位移越小,则包带回弹后末端距离反射器越远.但转动角度大到一定程度时(25° 开始),两组柔性复材带之间会发生碰撞,碰撞时的状态如图7所示,二者发生碰撞可能损坏其端部金属接头,因此禁止复材带之间发生碰撞现象.

图6(b)–(d)分析结果表明,柔性复材带抗弯刚度和结构阻尼对包带回弹位移影响较大,且复材带抗弯刚度越大、结构阻尼越大则包带回弹位移越小,即包带末端回弹后距离反射器的外包络距离越远;而预紧力对展开过程中包带末端到反射器最小距离影响较小.

2.2.3 柔性包带展开动力学数值分析结果

根据包带的参数敏感性分析结果,对包带进行结构优化设计.优化了包带解锁后的根部转动角度、包带复材厚度与结构阻尼特性等参数.同时依据大型可展开反射器真实展开工况,即包带解锁过程同时伴随着反射器展开口径变大,仿真过程中建立了反射器与柔性包带同步展开的模型,其同步展开过程包带与反射器的形态如图8所示.

如图8所示,当反射器展开到某个口径时,包带解锁后其端部金属接头与反射器之间的距离最小,当这一距离过小时包带端部接头将与反射器发生碰撞,从而损坏反射器上的易损部件,影响反射器的在轨可靠展开.结构优化后的包带展开动力学特性定量分析结果如表1所示,端部与反射器的外包络的距离随时间的变化曲线如图9所示.

表1及图9所示分析结果表明,包带结构方案可行,特性参数合理,功能与性能满足要求.柔性包带在地面重力及空间零重力环境下均能与反射器的同步展开兼容,包带解锁后其端部金属接头距反射器的外包络保持一定的安全间距,最小安全间距满足大于400 mm的设计要求,与反射器展开运动动态兼容.

图7 (网络版彩图)包带碰撞时状态
Figure 7 (Color online) The crashed status of the composite belts.

图8 (网络版彩图)包带与反射器同步展开过程
Figure 8 (Color online) The synchronous deployment process between the wrapping tape and reflector.

表1 柔性包带展开动力学数值分析结果
Table 1 The numerical analysis results of the wrapping tape

序号	仿真工况	包带解锁后与反射器最小距离分析结果 (mm)	包带解锁首次回弹时间 (s)
1	地面1g	855	1.1
2	在轨0g	410	1.0

图9 (网络版彩图)包带解锁后端部距反射器外包络位移变化曲线
Figure 9 (Color online) The curve of the distance that is between the bottom component of the wrapping tape and the reflector varies with time after releasing.

3 柔性包带展开动力学特性试验验证

为验证包带数值仿真分析结果的正确性, 根据设计与分析结果, 研制了柔性包带硬件产品1套, 并安装于大型可展开反射器上, 分别开展了柔性包带的展开特性验证试验及数值仿真分析结果验证试验.

3.1 柔性包带展开特性试验验证

柔性包带展开特性验证试验时, 反射器始终处于收拢状态, 试验按照柔性包带的真实使用工况, 对包带进行了预应力加载, 并采用火工品对柔性包带进行解锁释放. 试验过程中采用高速摄影记录包带解锁后的振荡形态, 并与特性分析结果进行比对, 以验证特性分析结果的正确性. 柔性包带展开过程的振荡形态如图10所示.

包带展开特性试验先后进行了3次, 各次试验包带振荡形态一致性较好, 与特性分析结果相符, 试验结果表明柔性包带动力学数值分析模型与边界条件正确.

3.2 柔性包带数值仿真分析结果试验验证

为验证柔性包带的展开动力学数值分析结果, 按照柔性包带地面真实工作工况, 即柔性包带解锁释放与大型可展开反射器展开同步进行, 以验证包带解锁释放与天线同步展开的运动兼容性. 试验按照常温、高温及低温等多工况分别进行, 展开试验过程中, 采用高速摄影方法获取了包带端部与反射器之间的最小间距, 试验状态如图11所示, 试验结果如表2所示.

试验结果与数值分析结果比对如表3所示.

表3所示结果表明, 柔性包带地面数值分析结果与试验结果一致, 包带解锁后与反射器的最小间距相

图10 (网络版彩图)柔性包带展开试验振荡形态(Time=0 s表示包带解锁前的状态, 后续为振荡过程中的状态)
Figure 10 (Color online) The oscillating shapes of the wrapping tape (Time=0 s represents the status before release, the others are the oscillating shapes).

图11 (网络版彩图)包带解锁与反射器同步展开试验状态
Figure 11 The test status of the synchronous deployment process between the wrapping tape and reflector.

表2 包带解锁试验结果
Table 2 The test results of the wrapping tape releasing

序号	试验工况	包带解锁后与反射器最小距离(mm)	包带解锁首次回弹时间(s)
1	常温手动解锁	850~1000	1.2
2	常温火工解锁1	850~950	1.0
3	常温火工解锁2	750~850	1.1
4	低温火工解锁3	700~800	1.0
4	高温火工解锁4	750~850	1.2

表3 柔性包带比对分析结果
Table 3 The compared results between the anlysis and test

序号	仿真工况	包带解锁后与反射器最小距离(mm)	包带解锁首次回弹时间(s)	备注
1	地面测试	700~800	1.0	地面试验平均值
2	地面仿真	855	1.1	重力工况
3	在轨仿真	690	1.0	微重力工况

当, 包带解锁后首次回弹时间一致. 基于地面的试验验证结果, 在轨解锁数值分析结果表明, 柔性包带在轨解锁时与反射器同步展开动态兼容, 包带首次回弹时与反射器的最小间距满足大于400 mm的设计要求.

4 结论

本文根据柔性包带的功能与性能要求, 基于精确

梁的非线性动力学分析方法, 建立了柔性包带的展开动力学数值分析模型, 通过参数敏感性分析, 识别了影响包带的关键参数, 给出了提高包带刚度与阻尼的方法. 根据分析结果研制了柔性包带硬件产品, 并随

大型环形桁架展开天线进行了高低温下的展开试验验证, 试验与数值分析结果相符. 柔性包带在轨解锁分析预示结果表明, 包带在轨解锁后与反射器之间的最小安全间距满足设计要求.

参考文献

- 1 Thomson W. The astromesh deployable reflector. *IEEE Anten Propag Soc*, 1999, 3: 1516–1519
- 2 Meguro A, Harada S, Watanabe M. Key technologies for high-accuracy large mesh antenna reflectors. *Acta Astron*, 2003, 53: 899–908
- 3 Li T J, Zhang Y, Duan B Y. Deployment kinematic analysis and control of hoop truss deployable antenna (in Chinese). *J Xidian Univ (Nat Sci)*, 2007, 34: 916–921 [李团结, 张琰, 段宝岩. 周边桁架可展开天线展开过程运动分析及控制. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2007, 34: 916–921]
- 4 Wu T H, Hong J Z, Liu Z Y. Advances of geometrically exact 3D beam theory (in Chinese). *Sci Paper*, 2013, 11: 1126–1130 [吴坛辉, 洪嘉振, 刘铸永. 非线性几何精确梁理论研究综述. 中国科技论文, 2013, 11: 1126–1130]
- 5 Li W X, Ma H T, Chen T C. Improvements geometrically nonlinear analysis algorithms for spatial frame structure (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2013, 45: 928–935 [李文雄, 马海涛, 陈太聪. 空间框架结构几何非线性分析方法的改进研究. 力学学报, 2013, 45: 928–935]
- 6 Xiao N J. Weak-form Quadrature Element Analysis of Frames Based on Geometrically Exact Beam Theory (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2011 [肖乃佳. 基于几何精确梁理论的框架的弱形式求积元分析. 北京: 清华大学, 2011]
- 7 Simo J C, Vu-Quoc L. On the dynamics in space of rods undergoing large motions—A geometrically exact approach. *Comp Methods Appl Mech Eng*, 1988, 66: 125–161
- 8 Simo J C, Vu-Quoc L. A three-dimensional finite-strain rod model. Part II: Computational aspects. *Comp Methods Appl Mech Eng*, 1986, 58: 79–116
- 9 Zhang X S, Zhang D G, Chen S J, et al. Several dynamic models of a large deformation flexible beam based on the absolute nodal coordinate formulation (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2016, 65: 156–165 [章孝顺, 章定国, 陈思佳, 等. 基于绝对节点坐标法的大变形柔性梁几种动力学模型研究. 物理学报, 2016, 65: 156–165]
- 10 Shabana A A, Yakoub R Y. Three dimensional absolute nodal coordinate formulation for beam elements: Theory. *J Mech Des*, 2001, 123: 606–613
- 11 Romero I. A comparison of finite elements for nonlinear beams: The absolute nodal coordinate and geometrically exact formulations. *Multibody Syst Dyn*, 2008, 20: 51–68
- 12 Reissner E. On lateral buckling of end-loaded cantilever beams. *J Appl Math Phys (ZAMP)*, 1979, 30: 31–40
- 13 Crisfield M A, Jelenic G. Objectivity of strain measures in the geometrically exact three-dimensional beam theory and its finite-element implementation. *Proc R Soc London Ser A*, 1999, 455: 1125–1147
- 14 Zhao Z H. The model celebration of flexible multi-body system and dynamic study of the deployment mechanism (in Chinese). Post-Doctoral Report. Beijing: Tsinghua University, 2013 [赵治华. 柔性多体系统建模及展开机构动力学研究. 博士后出站报告. 北京: 清华大学, 2013]
- 15 Hu J F, Xiao Y, Zhao Z H. Dynamic simulation on the large sized hoop truss antenna during deploying (in Chinese). *Sci Tech Eng*, 2016, 12: 171–176 [胡建峰, 肖勇, 赵志华. 大型周边桁架式天线展开过程动力学建模仿真. 科学技术与工程, 2016, 12: 171–176]

Simulation and experiment research on flexible belt deployment dynamics of a large hoop truss antenna

WAN XiaoPing^{*}, YANG JunGang, SONG YanPing, MA XiaoFei,
HU JianFeng & ZHAO Jiang

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China

The flexible belt is a critical component of the large hoop truss antenna, it decides whether the antenna can deploy successfully or not. When the antenna is stowed, it holds down and makes the antenna in a bundle. It releases before the antenna deployment in orbit. The dynamic behaviors of it have very important effect to the reliable deployment of the large deployable antenna, it is necessary and urgent to study its dynamic behaviors detaily. When flexible belt releases, its dynamic behaviors of large displacements, large rotations, and large deformations are shown during the deployment. These behaviors which belong to typically geometrically nonlinear behaviors of flexible bodies are very complex, it is very difficult to perform the numerical analysis using commercial softwares, and it becomes a hot spot of the dynamic research. According to the characteristics and function of the flexible belt which is adopted in a large deployable antenna, we established the numerical analysis model of the flexible belt by the house software that will be presented in the following paragraphs, in the house software, the geometrically exact method is used. During searching of the dynamic behaviors, a lot of factors are concerned, such as composite belts, mechanisms, damper equipments and so on. By the researching, the critical parameters which affect the dynamic characteristics are recognized, some optimized designs are performed, we developed a new flexible belt. The verified experiments are performed in different conditions which include the ambient, hot and cold temperatures. The results of the experiments show a good agreements which is compared to the numerical analysis results.

large hoop truss antenna, flexible belt, deployment dynamics, geometry precision beam

PACS: 84.40.Ba, 83.85.Vb, 46.70.De, 46.70.-p

doi: [10.1360/SSPMA2017-00094](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00094)