

周边桁架可展开天线展开过程仿真方法

李团结, 张琰, 段宝岩

(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)



摘要: 提出了一种基于虚拟样机技术的可展天线展开过程分析仿真方法。利用参数化建模技术建立各零部件的参数化模型; 利用有限元分析软件通过模态分析来完成各个零部件的柔性体模型; 利用系统动力学分析平台 ADAMS 将各零部件的模型组装成系统模型; 然后将自制的摩擦学行为仿真程序或其他学科行为仿真程序嵌入系统模型中, 实现可展天线的虚拟样机建模和展开过程的性能分析与仿真。给出的开发步骤和实例验证了该方法的可行性。

关键词: 周边桁架; 可展天线; 展开过程; 分析与仿真; 建模技术

中图分类号: V414; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2008) 08-2081-04

Approach to Deployable Process Simulation of Circular Truss Deployable Antenna

LI Tuan-jie, ZHANG Yan, DUAN Bao-yan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A feasible approach to deployable process analysis and simulation of circular truss deployable antenna was proposed based on the virtual prototype technology. The parameterized modeling technology was applied to build parameterized models for every part, the finite element analysis software was applied to create flexible body models for the parts through modal analysis, and the mechanical system dynamics analysis software platform ADAMS was applied to generate a system model through assembling all models. Then the custom programs such as the tribological behavior simulating program and other discipline behavior simulating programs were embedded in the system model to realize the virtual prototype modeling and the deployable process simulating for the deployable antenna. The presented development steps and examples validated the feasibility of the approach.

Key words: circular truss; deployable antenna; deployable process; analysis and simulation; modeling technology

引言

在未来先进的卫星通信、无线广播系统、地球观测、陆地遥感、深空探测和深空通信等领域, 大型可展开天线是必不可少的关键设备之一。一些研究机构已经提出了许多可展结构设想和工程样机, 例如石墨索网结构、辅助肋索网结构、桅杆式索网结构、构架式索网结构和可充气式薄膜结构^[1]。这些结构各具特点。其中, 由可展桁架、前索网、后索网、竖向张力索、金属反射网、驱动装置等组成的周边桁架式可展天线结构^[2]与其他天线结构形式相比, 具有柔性大, 空间热稳定性好, 压缩比大的特点, 应用空间比较大, 且结构形式简单, 在一定范围内口径的增大不会改变天线的结构形式, 质量也不会成比例的增加, 是目前大型可展开天线理想的结构形式。

可展天线具有折叠和展开两种状态。在卫星发射过程中处于收拢状态, 进入轨道后, 在没有人工干预的情况下天线自动展开进入工作状态。展开过程是可展天线最容易出现故

障的环节之一。故障现象主要为两个方面: 一是在太空中天线不能顺利展开; 二是展开过程不平稳, 使天线受到过大冲击而损坏。因此在设计阶段, 利用计算机仿真软件进行可展天线展开过程仿真和展开性能预测研究是十分必要的。

为了保证可展天线展开后, 反射面的精度满足其电性能的要求, 可展机构应具有高的机械精度。因此, 进行天线展开过程仿真时, 必须考虑可展机构运动副中的摩擦学行为, 而运动副间隙及碰撞可不予考虑。同时, 可展天线结构的柔性一般比较大, 天线在展开过程中, 经历着空间大范围、慢变的大位移与微小的、快变的弹性振动^[3], 弹性变形与刚体位移是耦合在一起的。因此, 在展开过程仿真时, 必须考虑零部件的弹性变形。

摩擦学行为是指发生在相对运动、相互作用表面和表面间的各种行为^[4]。在可展天线展开过程中, 摩擦学行为及其与运动学等学科行为的耦合作用是普遍存在的。忽略摩擦学行为的天线展开过程是难以真正模拟真实物理行为的。所以, 研究考虑摩擦学行为在内的可展天线的虚拟样机及其展开过程仿真, 对于天线的总体开发设计具有至关重要的作用。本文通过集成自己开发的摩擦学行为仿真分析程序和已有的商品化仿真软件, 建立一种包含摩擦学行为的可展天线虚拟样机及其仿真实现方法。

收稿日期: 2007-01-10 修回日期: 2007-04-10

基金项目: 装备预研项目(51321040102)

作者简介: 李团结(1972-), 男, 陕西兴平人, 教授, 博导, 研究方向为空间可展结构及智能机器人; 张琰(1982-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为 CAE; 段宝岩(1955-), 男, 河北冀县人, 教授, 博导, 研究方向为电子装备 CAD/CAE。

1 可展天线虚拟样机构建及仿真

大型可展天线虚拟样机的开发涉及到动力学、材料学、传热学、摩擦学等多个学科理论以及多个学科行为耦合的理论与数值仿真的实现。完全从底层构造和实施可展天线的虚拟样机是非常复杂甚至是不可能的。目前，许多学科行为的数值仿真已有成熟的软件，对于这些学科行为可利用已有的软件来实现。利用这些软件可构造出天线虚拟样机的雏形，然后在其基础上更详细的构建包含其他学科行为并考虑它们之间耦合作用的复杂虚拟样机。

快速完成一个考虑摩擦学行为、构件柔性的可展天线虚拟样机的构件和仿真方法步骤如下：

第一步：选择虚拟样机基础平台软件。系统平台应满足：能仿真天线要求的物理行为，具有开放的体系结构。对于可展天线虚拟样机的实现，选择系统动力学仿真软件 ADAMS 作为基础平台^[5]。ADAMS 可以进行基本的系统动力学分析，而且具有和建模工具软件、有限元分析软件 ANSYS、控制建模软件 MATLAB 及用户自己编写程序的接口。

星载可展天线工作环境特殊，处于零重力状态下，真实样机模拟零重力环境成本较高而且比较困难。借助于 ADAMS 虚拟样机软件可以方便地模拟零重力环境，进行可展天线各种性能的仿真分析。

第二步：选择数字化建模工具软件进行各零部件的实体建模。数字化模型是一切 CAX 技术的基础。只有建立了可展天线的数字化模型，它的性能分析和仿真才有可能。而且要求建模是参数化的，便于修改和优化设计。商品化 CAD 软件一般都具有零件级的参数化设计功能，设计建模的工具可以是开发平台 ADAMS 接受的任何设计软件，例如 Pro/E、I-DEAS、SolidWorks、UG 等 CAD 软件都能满足要求。鉴于 Pro/E 软件的强大功能，在行业内应用最广泛，以及丰富的接口，所以选择 Pro/E 软件进行各零部件的实体建模与装配。然后确定可展天线的设计变量。在 Pro/E 软件中完成天线各零部件的数字模型，用设计变量来表达设计参数的值，进行参数化建模。设计变量主要有周边桁架分段数、桁架高度等。确定这些设计参变量后模型零件的形状、装配关系等都是确定的了。模型输出为 Parasolid(*.T_X)文件格式，供其他软件使用。

第三步：选择结构动力学分析软件。利用有限元分析软件对天线各零部件进行模态分析，生成各零部件的柔性体模型，将各零部件的柔性体数字模型在虚拟样机基础平台 ADAMS 上组装，建立天线的系统模型。对天线零部件的有限元分析可用 ANSYS、NASTRAN、I-DEAS 等软件进行。ANSYS 功能强大，应用广泛，且转换接口丰富，所以选用 ANSYS 作为有限元分析软件。用 ANSYS 软件读取天线各零部件的 Parasolid(*.T_X)文件，对其划分网格，进行模态分析，并导出各零部件的柔性体数字模型。柔性体数字模型

文件保存为模态分析中性文件 ModalNeutralFile(*.MNF)，供其他软件使用。

第四步：根据需要把天线各零部件对应的*.MNF 或*.T_X 文件导入 ADAMS 中，将各零部件的柔性体数字模型或刚性体数字模型在虚拟样机基础平台 ADAMS 中组装，建立天线的系统模型。也可以把天线所有的零部件都以柔性体数字模型*.MNF 文件形式导入组装。这样分析结果虽然与真实样机更相近，但是运算速度会大大降低。所以可把那些无柔性变形或者柔性变形对系统影响不大的零件以刚性体来处理，这样会大大提高运算速度，而且分析结果比较符合实际。

在周边桁架式结构中，每个单元弦杆的柔性变形对系统运动的影响较大，所以把周边桁架上下弦杆定义为柔性体进行展开过程分析。与全刚体系统的展开运动进行比较，如图 1、2 所示。图 1 为纯刚体系统某一竖杆上一点在展开过程中的位移时间曲线图、速度时间曲线图、加速度时间曲线图。图 2 为刚柔混合系统上相应同一点在展开过程的位移时间曲线图、速度时间曲线图、加速度时间曲线图。可以发现，刚柔混合系统在展开过程中存在振动。且刚柔混合体的位移、速度、加速度时间曲线是在刚性体系统相应曲线附近波动。个别地方波动较大，主要是因为各杆都处于满应力状态，在某一时间可能在某些点产生稍大变形，这也是正常的。样机的实际工作情况应该是低频的展开运动与高频的振动运动耦合的情况。图 2 的曲线反映这一特性。

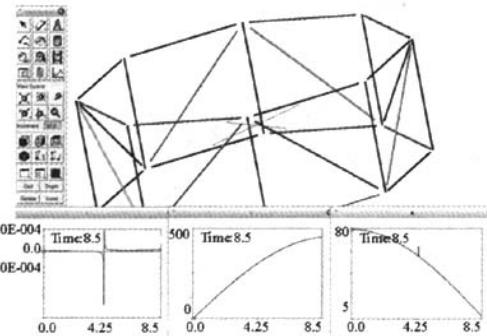


图 1 刚体系统展开过程

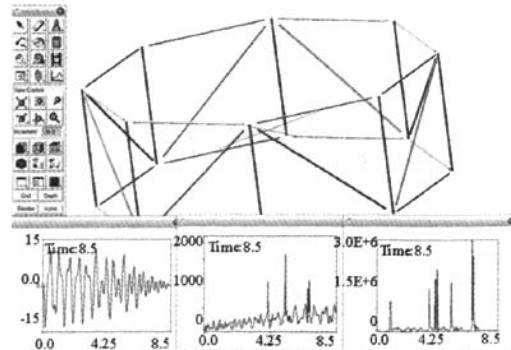


图 2 弦杆为柔性的刚柔混合系统展开过程

第五步:若不考虑摩擦学行为,进行系统的展开过程仿真分析,则展开索上的驱动力从基架到最外侧依次如图3所示。若展开速度恒定,展开索上的拉力逐渐减小。

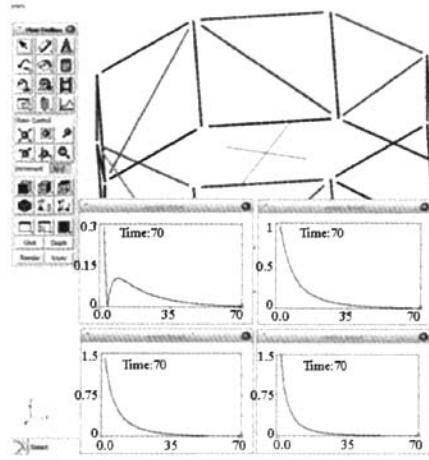


图3 不考虑摩擦的展开过程

第六步:进行天线系统的摩擦学设计,如各种摩擦副的设计,并进行摩擦学行为和天线系统中其他学科行为耦合的理论分析,建立耦合分析模型,完成摩擦学行为仿真的程序定制。

摩擦是一种复杂的非线性现象,严重制约伺服机械系统的定位精度和运动平稳性,而且与静摩擦、迟滞效应、Stribeck 效应、Stick-slip、运动速率和输入信号频率等多种因素有关。为了提高伺服机械系统的性能,必须深入了解摩擦特性,分析摩擦动力学机理,建立符合实际情况的摩擦数学模型,在此基础上才能抑制或彻底消除摩擦的不良影响。

在 ADAMS 中,摩擦力由 Coulomb 摩擦模型确定。根据材料、加工装配精度等确定摩擦系数,在运动副上添加摩擦力,进行天线展开过程仿真。仿真结果如图 4 所示。与图 3 比较可以发现,展开索上的驱动力从基架到最外侧依次减小,但由于摩擦的作用在数值上有明显不同。

Coulomb 摩擦模型无法全面表征摩擦的一些典型特性,例如 Stribeck 效应、Stick-Slip、摩擦记忆特性、预滑位移等,而这些特性在高精度位置跟踪系统中影响很大。近年来,为了能更精确地描述摩擦的动力学行为,尽可能全面地描述摩擦的动态特性,一些学者又提出了多种摩擦模型。这些模型中,较有影响力的模型主要有:Karnopp 模型^[6]、状态变量模型^[7]、时间延迟模型^[8]、鬃毛模型^[9]、集成模型^[10]。其中鬃毛模型不但可以描述增加的静摩擦力及摩擦记忆现象,而且可以描述 Stribeck 曲线,是目前较为完善的一个模型。假设两个相对运动的摩擦表面之间为弹性鬃毛接触,下表面的材料刚度大于上表面,由于相对运动导致刚毛弹性变形,产生摩擦力,当相对运动速度足够大时,鬃毛之间产生滑动。鬃毛的平均变形用 z 表示,则摩擦力和摩擦状态可

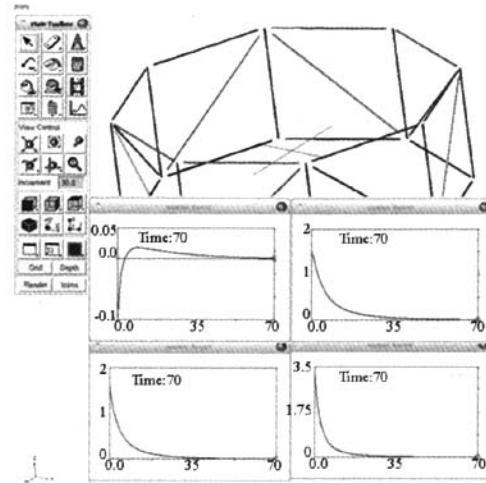


图4 考虑 Coulomb 摩擦力的展开过程

以表示为:

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \quad (1)$$

$$\dot{z} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (2)$$

$$g(v) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-(v/v_s)^2}] / \sigma_0 \quad (3)$$

式中, σ_0 为变形刚度, σ_1 为滑动阻尼系数, σ_2 为粘性摩擦系数, v 为相对运动速度, F_c 为 Coulomb 摩擦力, F_s 为静态摩擦力, v_s 为 Stribeck 速度。

该模型不仅考虑了粘性摩擦、Coulomb 摩擦,而且考虑了静态摩擦和 Stribeck 负斜率效应,较充分地反映了摩擦运动的机理。根据上述摩擦模型可完成摩擦学行为仿真程序的定制。通过 ADAMS 开放的接口将自己编写摩擦学行为仿真分析程序嵌入虚拟样机系统中,来实现展开过程中摩擦学行为的仿真及其与动力学行为的耦合分析,如图 5 所示。可以看出,考虑鬃毛模型摩擦的展开索上的驱动力与 Coulomb 摩擦在数值上有差别。

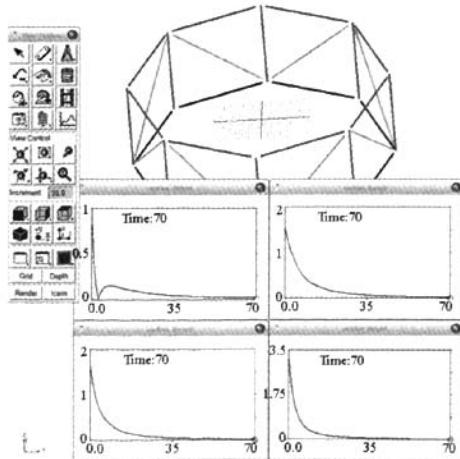


图5 考虑鬃毛模型摩擦力的展开过程

第七步：在虚拟样机上建立虚拟检测、控制系统，对样机进行调试。对实现的展开天线虚拟样机进行虚拟控制，得出各种运行结果参数。可展天线展开过程中的位置图如图 6 所示。完全收拢状态下利用展开索的拉紧作驱动存在死点，在理论上不可能使天线展开。所以在展开初始过程中先利用节点弹簧所存储的应变能使天线展开到一定的位置，然后再收缩展开索使天线完全展开。

根据上述步骤可实现天线的虚拟样机建模和展开过程分析与仿真，进而对天线的展开性能进行评估和预测，在此基础上，可以研究天线展开过程的控制策略与方法。

2 结论

本文把虚拟样机技术应用于可展开天线的展开过程仿真上。充分利用已有的建模仿真工具，结合自制的摩擦学行为仿真程序，实现了可展天线的虚拟样机建模和展开过程的性能分析与仿真。在此基础上，可以研究摩擦力、重力、构件柔性等因素对天线展开过程的影响，以及展开过程的控制方法。为可展天线物理样机的研制提供指导和帮助。

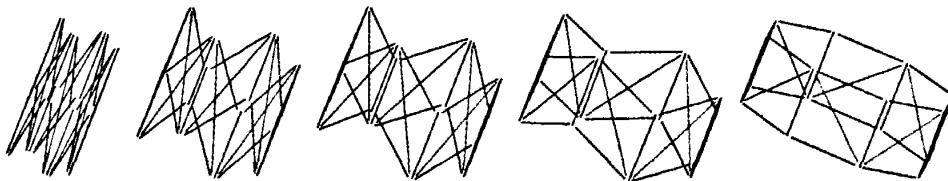


图 6 展开过程中的位置

参考文献：

- [1] Meguro A, Harada S, Watanabe M. Key Technologies for High-Accuracy Large Mesh Antenna Reflectors [J]. ACTA Astronautica (S0094-5765), 2003, 53(2): 899-908.
- [2] Thomson M W. The Astromesh Deployable Reflector [C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Orlando: IEEE, 1999: 1516-1519.
- [3] 段宝岩. 柔性天线结构分析、优化与精密控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Bauchau O A, Ju C K. Modeling Friction Phenomena in Flexible Multibody Dynamics [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (S0045-7825), 2006, 195(50): 6909-6924.
- [5] 李团结, 朱超. 基于虚拟样机技术的球形机器人运动仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 1026-1029. (LI Tuan-jie, ZHU Chao. Research on Motion Simulation of Spherical Robot Based on Virtual Prototype Technology with ADAMS [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(4): 1026-1029.)
- [6] Karnopp D. Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic System [J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control (S0022-0434), 1985, 107(1): 100-103.
- [7] Dieterich J H. Modeling of Rock Friction (1): Experimental Results and Constitutive Equations [J]. Journal of Geophys Research (S0148-0227), 1979, 84(B5): 2161-2168.
- [8] Hess D P, Soom A. Friction at Lubricated Line Contact Operating at Oscillating Sliding Velocities [J]. Journal of Tribology (S0742-4787), 1990, 112(1): 80-86.
- [9] Canudas W C, Olsson H, Hstrom K J, Lischinsky P. A New Model for Control of Systems with Friction [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 1995, 40(3): 419-425.
- [10] Swevers J, Al-Bender F, Ganseman C G, Prajogo T. An Integrated Friction Model Structure with Improved Presliding Behavior for Accurate Friction [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2000, 45(4): 675-686.

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>