

航天器铰接结构非线性动力学特性研究进展

王 巍^{1,†} 于登云² 马兴瑞³

¹ 航天东方红卫星公司总体设计部, 北京 100094

² 中国空间技术研究院, 北京 100094

³ 中国航天科技集团公司, 北京 100037

摘 要 航天器铰接结构非线性动力特性研究直接关系到航天器动力学模型的建立、航天器姿态控制方案的制定、有效载荷指向稳定度的保持以及部件可靠性的提高, 是航天器设计领域的研究重点之一。首先介绍航天器铰接结构研究中发现的非线性动力学现象和对该类问题的研究思路, 然后分别对铰链非线性和高维非线性系统动力学研究的最新研究成果进行介绍, 最后对航天器铰接结构非线性动力学特性研究的发展前景进行总结。

关键词 航天器, 铰接结构, 非线性动力学, 研究进展

1 引 言

航天器上安装的太阳翼、天线等附件大多是由铰链将附件部件连接在一起构成的, 称为航天器铰接结构。航天器铰接结构的动力学特性, 尤其是其基频动力学特性, 是航天器设计的重要参数, 直接关系到航天器控制系统方案的制定, 并影响航天器指向精度和姿态稳定度, 是设计航天器时需要加以考虑的重要问题之一。

铰链中存在间隙, 在外界载荷作用下, 铰链零件之间发生接触并产生复杂的微观力学现象, 由此产生铰链非线性, 并导致铰接结构的力学特性表现出强烈的非线性特征, 为确定航天器铰接结构动力学特性带来较大的难度。

铰链是一种由多个零件构成、结构复杂的连接结构。铰链零件之间可能出现粘着、微滑现象, 导致部件无法精确定位, 并可能使局部结构发生松动, 甚至发生疲劳破坏。铰链零件之间的摩擦是结构中阻尼的主要来源, 并且离散地分布于铰接结构各处。铰链零件中的间隙是产生空程的直接原因, 也是导致铰接结构产生高频振动的重要原因。铰链产生的非线性刚度和阻尼离散地分布于铰接结构各处, 是导致系统模态密集和非线性耦合的主要原因^[1]。

铰链通过零件之间的接触、挤压、摩擦等方式传

递载荷, 使得铰链的载荷 / 位移关系具有明显的非线性特点^[2]。在载荷作用下, 铰链零件接触处发生微观非线性力学现象, 使得铰接结构的模态频率、振型及响应在很大程度上随激振量级发生变化。Tinker^[3]通过对试验数据的对比, 认为间隙造成的摩擦、粘滑是导致结构非线性响应的主要原因, 并且响应是载荷的非线性函数。虽然 Tinker 所研究的现象只涉及到非线性刚度、迟滞两种非线性因素, 但是已经由此产生了相当明显的非线性动力学现象。另外, 由于铰链加工时的随机误差和重力的影响, 铰接结构的动力学特性在一定情况下可能出现多值现象, 并且试验结果可能不能复现^[4], 更增加了研究铰接结构动力学的难度。

铰链是铰接结构中阻尼的重要来源, 对铰接结构动力学产生重大影响。Bowden^[5]的研究结果表明: 铰链阻尼与结构固有频率之间存在耦合关系, 随着铰链阻尼的提高, 系统固有频率相应提高。同时, 铰链阻尼对铰接结构弹性振动也起到一定的抑制作用。Onoda^[6]认为预紧力起到减小零件间隙的作用, 当振动量级达到或超过一定的门槛值时, 铰链产生的摩擦力为铰接结构引入了摩擦阻尼, 从而抑制了系统的振动。

铰链间隙导致铰接结构动力学行为表现出非线性特征。吴德隆等人^[7]在对空间伸展机构的研究中

收稿日期: 2004-09-21, 修回日期: 2006-01-04

† E-mail: victory_ww@sina.com

发现：间隙的有无使得系统动力学行为表现出显著差别，间隙使得结构表现出很强的非线性，并使结构变柔。另外，间隙可导致铰链内撞击，并引发铰接结构的变形和振动，直接影响航天器姿态控制以及铰接结构支撑的有效载荷指向稳定度，甚至可造成结构损坏 [8]。

我国学者将间隙、内碰撞以及摩擦等非线性因素对铰接结构动力学的影响作为研究重点，已经取得了众多的研究成果。于登云等人 [9] 针对铰链内撞击问题，采用多柔体动力学方法对太阳翼展开、锁定过程中的多体碰撞动力学进行了深入研究，给出了便于工程应用的确定作用于铰接结构根部的力和力矩的方法。陈滨、潘寒荫 [10] 利用小参数法将间隙运动展开为无间隙的标准运动，避开对单间隙系统的直接求解。吴德隆、文荣、黄铁球等人 [11] 采用 Dubowsky 接触碰撞模型，将间隙内摩擦力的作用视为间隙元素的阻尼特性，分别对间隙内的摩擦和碰撞问题进行了深入研究。阎绍泽等人 [12] 通过对空间可展结构的动力学计算发现间隙和柔性附件都对系统的动力学性能造成影响，并且间隙和柔性附件之间存在相互影响。而刘锦阳和洪嘉振 [13] 则注意到铰链零件之间的微观力学现象，将铰链碰撞过程中的局部碰撞变形表示为撞击力的非线性函数，利用 Hertz 法则研究了太阳电池阵在撞击过程中的动力学特性。

根据航天器铰接结构的特点，可以将航天器铰接结构非线性动力学研究划分为铰链非线性研究和铰接结构系统非线性动力学研究两个主要研究内容。本文首先介绍航天器铰接结构研究中发现的非线性动力学现象和对该类问题的研究思路，然后分别对铰链非线性和铰接结构系统非线性系统动力学研究

的最新研究成果进行介绍，最后对航天器铰接结构非线性动力学特性研究的发展前景进行总结。

2 铰链非线性研究

铰链非线性研究即对铰链的非线性力学特性以及铰链参数与铰链非线性之间关系进行研究。铰链中的间隙是产生铰链非线性的根本原因，在载荷的作用下，铰链零件产生接触微变形、粘着、微滑等微观力学现象，并导致宏观上的铰链非线性。所以，确定微观力学现象是铰链非线性建模的基础。

Ferri [14] 使用单向非线性弹簧表示零件之间的接触力，在考虑摩擦因素的情况下建立了套筒式连接铰的非线性模型。Ferri 将使用单向非线性弹簧模拟零件接触力，但需要根据试验数据确定弹簧的刚度系数。Wang [15] 则利用 Hertz 接触理论，根据球铰的结构尺寸获得了球铰的非线性恢复力，并将接触恢复力表示为单向非线性弹簧，从而建立了球铰的力学模型。

铰链存在间隙，通过试验可以清楚地发现空程效应的存在，所以也可以使用分段线性模型近似表示 [16]。该表示方法较为简单，但是这种近似往往忽略了小幅载荷作用时零件的非线性变形，误差较大。

如何确定铰链的非线性摩擦力一直是铰链模型研究的一个难点。Folkman [17] 忽略销轴式连接铰中摩擦的非线性，假设摩擦是线性的，建立了含有迟滞效应的连接铰力学模型 (图 1(a))。但是这样的简化模型和试验数据 (图 1(b)) 之间的误差较大，所以仍然需要对铰链零件之间的非线性摩擦进行必要的研究。

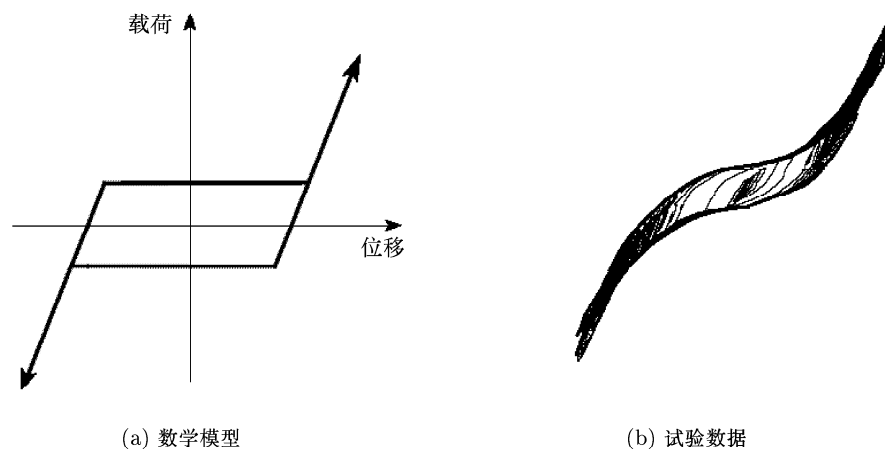


图 1 销轴式连接铰的数学模型与试验数据

接触理论为确定铰接结构非线性阻尼提供了一个新的思路,但是铰链结构复杂,使得确定铰链内部的摩擦极为困难.所以,使用经典的摩擦模型,并根据铰链的具体结构加以改进成为预示铰链摩擦的重要手段. Hachkowski^[18,19]利用 Todd/Johnson 摩擦模型,建立了轴承的摩擦模型,并发现轴承内部摩擦和接触微变形之间存在着耦合关系. Shi 和 Atluri^[20]引入改进后的库仑摩擦铰链模型,使用 Ramberg-Osgood 函数描述铰链引入的迟滞特性.该函数由连接结构的几何尺寸确定,并可以方便地进行结构响应计算.我国学者也对间隙铰链模型进行了深入研究.王巍等人^[21]将太阳帆板板间铰链简化为非线性弹簧约束下的非线性摆,利用接触理论建立了铰链的力学模型.王天舒等人^[22]使用分段线性模型表示铰链间隙,并通过数值方法研究了航天器附件展开过程中间隙的影响.黄铁球、吴德隆等人^[23]提出了近似“迟滞”碰撞力模型,是一种 Dubowsky 线性碰撞力模型的改进模型.李海洋、吴德隆等人^[24,25]立足零件之间作用力关系对武器系统中存在的各种铰链(包括滑移铰)的力学模型进行了系统介绍.另外,白鸿柏^[26]对于干摩擦模型的介绍对于建立铰链类结构的力学模型也具有借鉴意义.

此外,直接利用试验手段获得铰链模型也是一种有效手段,即铰链参数辨识,是在对铰链力学特性具备经验性认识的基础上进行的.试验研究结果表明铰链的刚度和阻尼具有不连续性、迟滞性、时变、分段线性和刚度硬化等多种非线性特性,并可以近似地表示为 3 次非线性弹簧^[27].

力 / 状态映射法 (force-state mapping method) 是由 Crawley 提出的^[28,29],认为铰链恢复力与铰链运动速度和位移的非线性函数.恢复力可以表现为以位移和速度为因变量的三维空间单值曲面,曲面的形状根据铰链结构的具体情况而不同.利用力 / 状态映射方法可以清晰地区分铰链结构刚度和阻尼的不连续性、迟滞性、时变特性、分段线性等特征. Al-Hadid 和 Wright^[30,31]针对力 / 状态映射法在试验中的应用进行了研究,通过对比不同激振条件下得到的分析结果,指出敲击方法得到的结果较为理想,为铰链非线性的试验研究提供了指导性意见.

铰链响应特性研究是研究铰链力学特性的另一种方式.将铰链假设为含间隙的、具有非线性弹性约束的不光滑系统,其受迫振动响应与分段线性系统相近,呈现出很强的非线性特征,并可能出现分岔、混沌等非线性现象^[32~37].关于该类问题的数值解法主要有龙格-库塔法、接缝法、打靶法、谐波平衡法等.

Mahfouz^[38,39]使用数值方法对多种分段线性系统的响应进行了详细研究,计算结果表明分段线性系统存在谐波共振、分岔及混沌响应,阻尼、刚度等参数对系统动力学特性具有直接影响. Kim^[40]发现含间隙的分段线性系统存在叉式分岔,同时存在倍周期分岔导致的混沌和阵发性混沌.在实际工程实践中, Moon^[41]通过对桁架结构的试验研究,认为铰链间隙是导致桁架结构出现混沌的原因,并发现预紧载荷可以抑制混沌的发生.

3 航天器铰接结构非线性动力学特性研究

铰接结构可以简化为局部非线性约束高维非线性系统,该类结构的动力学现象极为复杂,某一局部非线性参数的微小变化都将导致整个系统动力学特性发生变化.张伟等人^[42]利用通过对轴向激励条件下 5 次非线性简支柔性梁的研究发现:当阻尼系数发生变化时,非线性简支柔性梁具有不同的横向振动形式,并指出为了控制柔性梁横向振动的振幅,必须对柔性梁的分岔、混沌动力学进行研究.另外,连接结构的松动和相对滑移不仅会使系统产生各种类型的内共振,而且连接结构的松动、滑移和外载荷的量级对系统的动力学特性具有较大影响.当激振幅值达到一定程度时,系统的非线性被激发出来,出现明显的跳跃,而当非线性刚度达到一定程度后,非线性刚度的微小变化都可能引起系统振动幅值发生强烈跳跃,并加剧连接结构的松动和滑移^[43,44].

航天器系统中,铰接结构非线性动力学问题,尤其是基频运动特性问题,对航天器的在轨运动产生较大影响,是设计航天器时必须加以解决的问题之一.所以,航天器铰接结构非线性动力学特性是航天器铰接结构非线性动力学研究的一项重要内容,对航天器设计具有直接的工程意义.

3.1 铰接结构动力学工程处理方法

使用有限元等工程工具研究非线性动力学难度较大,所以在研究带柔性附件的卫星动力学特性时,往往将系统的非线性部分进行某种处理.

我国学者对带柔性附件的大型结构的动力学特性问题给予了足够的关注,并取得了许多研究成果.杨辉、洪嘉振等人^[45]针对单翼太阳帆板卫星的结构,采用一次近似刚柔耦合动力学建模方法开展带柔性附件的中心刚体的特性频率研究,并对刚柔惯量比和刚柔刚度比对系统频率的影响进行了充分的研究.

雷勇军等人^[46]基于分布参数系统传递函数方

法,将太阳能电池阵基板划分为条形单元,将基板间连接铰简化为均匀梁单元,并利用条形单元与梁单元公共节点间位移连续与力平衡条件,建立了空间结构太阳能电池阵动力学特性分析的半解析计算模型.该方法将有限元技术和关键环节的解析方法结合起来,为太阳能电池阵这类铰接结构的动力学分析提供了一个很好的解决思路.

徐小胜等人^[47]由航天器部件模态与系统模态之间的模态恒等式推导了柔性飞行器系统的模态频率估算公式,结合有限元软件,可以基于航天器部件模态特性,在工程层面上迅速获取系统频率,是一种粗略研究柔性航天器频率的工程方法.

另外,还可以针对铰链等结构引入的不确定性参数,通过其他数学方法进行处理.何柏岩等人^[48,49]利用 Monte-Carlo 方法对铰接结构中的不确定参数进行随机参数建模,并使用固定界面子结构法进行铰接结构系统的柔性多体系统动力学建模.这种方法对于铰链类结构引入的随机性参数模拟较好,但仍然属于线性处理方法.

在航天器工程设计领域,往往将铰链简化为线性梁单元或者线性弹簧单元,或者直接将铰链试验参数值引入铰接结构有限元模型.但是,这种工程处理方法忽略了铰链非线性的影响,会产生一定的误差,尤其不能体现结构动力学特性与铰链参数之间的非线性关系.

3.2 铰接结构动力学非线性研究方法

航天器上的大型附件是非线性系统,直接采用非线性方法对其动力学特性进行研究是更为直接的方法.但是由于非线性方法的复杂性,使用非线性方法进行研究的难度较大.吴德隆等人^[50]针对空间站大型伸展机构的运动稳定性问题,采用姿态-伸展-振动耦合系统的分析方法,并考虑时滞系统和滞后系统的稳定性问题和 Stick-slip 运动对系统稳定性的影响,利用 Lyapunov 指数方法分析了该类非线性复杂系统的稳定性的一般解.

另外,结构展开过程中出现的摩擦、碰撞也对系统的动力学特性产生较大影响,张晓伟、张靖、闻邦椿等人^[51,52]针对转子系统非线性振动特性的研究成果对研究航天器伸展结构的非线性动力学特性研究也具有积极意义.

从力学角度看,航天器铰接结构可以简化为具有局部铰链非线性约束的高维非线性系统.陆启韶^[53]将高维非线性振动系统的降维约化和模态相互作用研究作为复杂非线性系统动力学研究的一项重要内容.对于铰接结构这类非线性系统的基频特性,需要

求解铰接结构这类高维非线性系统的周期值.

Shaw^[54]将非线性模态定义为系统相空间不变流形上的运动,并认为非线性物理系统的模态需要模态坐标的位移、速度共同决定.Boivin 和 Pesheck 等人^[55]引入了多模式不变流形概念,以解决处理内共振现象问题. Pesheck 和 Pierre^[56]提出的 Galerkin 映射不变流形构造方法对使用有限元技术进行非线性模态分析作了初步研究,为该方法的工程应用打下了基础,并由 Jiang^[57]将其推广到分段线性系统.

目前,我国非线性模态研究主要集中在理论研究领域.在工程应用领域,胡仔溪^[58]利用非线性模态结果对存在非线性连接的火箭有限元模型进行模型修正.而王巍等^[59]则利用非线性模态理论对含非线性铰链的板结构的基频进行分析,并通过数值计算获得了非线性铰链与系统基频之间的非线性关系.

将高维非线性系统的动力学行为表示成低维运动形式,并在此基础上求解非线性系统的周期值并对系统各阶非线性模态的运动特性进行研究,属于铰接结构非线性动力学特性研究的非线性方法范畴,可以为铰接结构非线性动力学特性研究提供另一个思路.除利用非线性模态研究铰接结构这类高维非线性系统的周期解以外,C-L 方法、规范形方法以及奇异性理论都可用于非线性高维系统的降维约化和模态相互作用的研究^[42].

4 结 语

铰链是一种复杂的连结结构,所以关于铰接结构动力学特性的研究成果不仅可以丰富航天器动力学研究,而且可以为其他工程领域的研究提供参考.但是,关于该领域的研究,尤其高维非线性系统动力学研究方面尚需要进一步探索.具体地说,可以在如下几个方面进行更为深入的研究:

- (1) 通过理论和试验相结合的方法对诸如螺栓、减震器等结构的迟滞非线性进行研究;
- (2) 通过对齿轮、齿条等传动部件中的接触、啮合、脱离过程的粘着、微滑等微观现象的研究,确定其运动过程中的非线性摩擦,并以此为基础开展具有迟滞非线性约束的单边多体系统动力学研究;
- (3) 含有局部非线性约束,包括迟滞非线性约束的航天器部件级子系统动力学响应的分岔、混沌研究;
- (4) 具有局部不光滑非线性约束的高维非线性系统非线性模态研究;
- (5) 适应性更广的非线性模态不变流形构造方法

参 考 文 献

- 1 马兴瑞, 王本利, 苟兴宇等. 航天器动力学——若干问题进展及应用. 北京: 科学出版社, 2001. 5~24
- 2 Lake M S, Warren P A. A revolute joint with linear load-displacement response for precision deployable structures. In: Proceedings of the 37th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC, Salt Lake City, Utah, 1996-04-15~17, 1996. 1639~1647
- 3 Tinker M L. Nonlinear due to joint friction and clearance in a structural dynamic test fixture. In: Ferri A A, ed. Elasto-Impact and Friction in Dynamic Systems, Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Atlanta, Georgia, 1996. 35~46
- 4 Hsu S T, Griffin J H. How gravity and joint scaling affect dynamic response. *AIAA Journal*, 1989, 27(9): 1280~1287
- 5 Bowden M, Dugundji J. Joint damping and nonlinearity in dynamics of space structures. *AIAA Journal*, 1990, 28(4): 740~749
- 6 Onoda J. Passive damping of truss vibration using preloaded joint backlash. *AIAA Journal*, 1995, 33(7): 1335~1341
- 7 吴德隆. 空间站大型伸展机构动力学研究 (一、二、三). 863 高科技项目研究报告, 北京: 中国运载火箭技术研究院, 1999
- 8 Hardway L M R. Nanometer scale spontaneous vibrations in a deployable truss under mechanical loading. *AIAA Journal*, 2002, 40(10): 2070~2076
- 9 于登云, 王跃宇, 曲广吉编. 航天器撞击动力学. 见: 曲广吉编. 航天器动力学工程, 北京: 中国科学技术出版社, 2000. 526~553
- 10 陈滨, 潘寒萌. 含铰接间隙与杆件柔性的空间伸展机构单元的力学建模与计算模拟. 导弹与航天运载技术, 1997(1): 27~46
- 11 黄铁球, 吴德隆, 严绍泽. 带间隙伸展机构的非线性动力学建模. 中国空间科学技术, 1999, 19(1): 7~12
- 12 阎绍泽, 申永胜, 陈洪彬. 考虑杆件柔性和铰间隙的可展结构动力学数值模拟. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43(2): 145~148
- 13 刘锦阳, 洪嘉振. 卫星太阳电池阵的刚-柔耦合动力学. 空间科学技术, 2004, 24(5): 367~372
- 14 Ferri A A. Modeling and analysis of nonlinear sleeve joints of large space structures. *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, 1988, 25(5): 354~360
- 15 Wang P K C, Hadaegh F Y. Forced vibrations of preloaded elastic beams with joints in the micro-dynamic regime. *Journal of sound and vibration*, 1993, 166(1): 1~19
- 16 胡海岩. 分段光滑机械系统动力学的进展. 振动工程学报, 1995, 8(4): 331~341
- 17 Folkman S L. The joint damping experiment. NASA Contractor Report 4781, June 1997
- 18 Hachkowski M S, Peterson L D. Analytical model of nonlinear hysteresis mechanisms in a rolling element joint. AIAA-99-1268, 1999
- 19 Hachkowski M R, Peterson L D. Load path management design theory for precision deployable joint. In: 41st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Atlanta, GA, April, AIAA-2000-1364, 2000
- 20 Shi G, Atluri S N. Nonlinear dynamic response of frame-type structures with hysteretic damping at the joints. *AIAA Journal*, 1992, 30(1): 234~240
- 21 王巍, 孙京, 于登云, 马兴瑞. 基于接触理论的一类带锁机构的间隙铰链分析模型研究. 宇航学报, 2004, 25(1): 1~9
- 22 王天舒, 孔宪仁, 王本利等. 含铰间间隙的航天器附件展开过程分析. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(3): 283~286
- 23 黄铁球. 柔性空间伸展机构动力学与自适应结构技术研究: [博士论文]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 1999. 7
- 24 李海洋, 吴德隆, 张永. 机动武器系统的含间隙动力学研究——上篇: 含摩擦碰撞模型. 兵工学报, 2002, 23(2): 145~149
- 25 李海洋, 吴德隆, 张永. 机动武器系统的含间隙动力学研究——中篇: 间隙铰模型. 兵工学报, 2002, 23(3): 289~293
- 26 白鸿柏, 黄协清. 干摩擦振动系统响应计算方法研究综述. 力学进展, 2001, 31(4): 527~534
- 27 吴志刚. 航天器连接结构物理参数辨识及其动力学问题研究: [博士论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998
- 28 Crawley E F, Aubert A C. Identification of nonlinear structure elements by force-state mapping. *AIAA Journal*, 1986, 24(1): 155~162
- 29 Crawley E F, O'Donnell K J. Force-state mapping identification of nonlinear joints. *AIAA Journal*, 1987, 25(7): 740~749
- 30 Al-Hadid M A, Wright J R. Application of the force-state mapping approach to the identification of non-linear systems. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 1990, 4(6): 463~482
- 31 Al-Hadid M A, Wright J R. Estimation of mass and modal mass in the identification of non-linear single and multi-degree of freedom systems using the force-state mapping approach. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 1992, 6(4): 383~401
- 32 Kahraman A. Nonlinear dynamics of a spur gear pair. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 142(1): 49~75
- 33 Comparin R J, Singh R. Frequency response characteristics of a multi-degree-of-freedom system with clearance. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 142(1): 101~124
- 34 Natsiavas S. Periodic response and stability of oscillators with symmetric trilinear restoring force. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 134(2): 315~331
- 35 Cheung Y K. Application of the incremental harmonic balance method to cubic non-linearity systems. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 140(2): 273~286
- 36 Natsiavas S. Vibration of harmonically excited oscillators with asymmetric constraints. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59(6): 284~290
- 37 Lau S L. Nonlinear vibrations of piecewise linear systems by incremental harmonic balance method. *Journal of Applied Mechanics*, 1992, 59(3): 153~160
- 38 Mahfouz I A, Badrakhhan F. Chaotic behaviour of some piecewise linear systems part i: systems with setup spring or with unsymmetric elasticity. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 143(2): 255~288
- 39 Mahfouz I A, Badrakhhan F. Chaotic behaviour of some piecewise-linear systems part ii: systems with clearance. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 143(2): 289~328
- 40 Kim Y B. Stability and bifurcation analysis of oscillators with piecewise linear characteristics: a general approach. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, 58(6): 545~553
- 41 Moon F C. Chaotic and Fractal Dynamics. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992

- 42 张伟, 张建. 柔性梁的非线性动力学和分岔. 见: 张伟等编. 非线性系统的周期振动和分岔. 北京: 科学出版社, 2002. 83~92
- 43 郝淑英, 陈予恕. 连接结构松动对系统非线性动力学特性的影响. 天津大学学报, 2001, 34(4): 452~454
- 44 张琪昌. 非线性连接梁形结构弯曲振动的分岔. 天津大学学报, 2002, 35(2): 143~146
- 45 杨辉, 洪嘉振, 于征跃. 带柔性附件的中心刚体的频率特性及实验研究. 空间科学学报, 2002, 22(4): 372~378
- 46 雷勇军, 李东旭, 唐国金. 太阳能电池阵组合基板模态参数分析的半解析模型. 国防科技大学学报, 2003, 25(1): 12~16
- 47 徐小胜, 于登云, 曲光吉. 柔性航天器自由飞行状态系统基频的估算方法. 宇航学报, 2004, 25(2): 208~212
- 48 何柏岩, 王树新, 金国光. 计及参数不确定性的卫星太阳能帆板的柔性多体动力学研究. 自然科学进展, 2003, 13(4): 434~438
- 49 张海根, 何柏岩, 王树新, 王锐. 计及参数不确定性的柔性空间曲线梁动力学建模方法. 天津大学学报, 2003, 36(1): 47~50
- 50 吴德隆, 李海洋, 彭伟斌. 空间站大型伸展机构运动稳定性分析. 宇航学报, 2002, 23(6): 98~102
- 51 张靖, 闻邦椿. 松动 - 碰摩耦合故障转子系统振动特性分析. 机械科学与技术, 2005, 24(2): 183~185
- 52 张晓伟, 姚红良, 李小彭, 闻邦椿. 基于 Taylor 变换法的转子系统分岔与稳定性研究. 机械强度, 2005, 27(1): 28~32
- 53 陆启韶. 复杂非线性系统的某些动力学理论与应用. 力学进展, 2004, 34(4): 568~569
- 54 Shaw S W, Pierre C. Nonlinear normal modes and invariant manifolds. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 150(1): 170~173
- 55 Boivin N, Pierre C, Shaw S W. Non-linear modal analysis of structural systems featuring internal resonances. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 182(2): 336~341
- 56 Pesheck E, Pierre C, Shaw S W. A new galerkin-based approach for accurate nonlinear normal modes through invariant manifolds. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 249(5): 971~993
- 57 Jiang D. Large amplitude nonlinear normal modes of piecewise linear systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 217(3): 869~891
- 58 胡仔溪. 利用 NASTRAN 和模态试验修正结构有限元分析模型. 强度与环境, 2000, 2: 1~7
- 59 王巍, 于登云, 马兴瑞. 基于非线性模态的航天器铰接结构基频特性研究. 中国空间科学技术, 2005, 25(3): 19~27

ADVANCES AND TRENDS OF NON-LINEAR DYNAMICS OF SPACE JOINT-DOMINATED STRUCTURE

WANG Wei^{1,†} YU Dengyun² MA Xingrui³

¹ DFH Satellite Co. Ltd, Beijing 100094, China

² China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

³ China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100037, China

Abstract Non-linear dynamic behaviors of spacecraft joint-dominated structures are directly related with the modeling, attitude control and pointing precision. This paper briefly reviews the advances of studies on local non-linearity, non-linear vibration of structures, normal non-linear modes and modal reduction. And some comments are made about the future development in this field.

Keywords spacecraft, joint-dominated structure, non-linear dynamics

[†] E-mail: victory_ww@sina.com