

接头连接刚度对桁架索网结构动力学特性的影响

鲁睿

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为研究桁架索网结构中接头连接的不同建模方式对该结构动力学特性的影响, 对一个桁架索网结构进行了建模仿真, 将模型中杆件与接头的连接分别处理为绑定接触和转动副, 并进行了静力分析和模态分析。对两种处理方式下模型的仿真结果进行对比发现, 二者静变形和模态振型保持一致, 在转动副处理方式下, 初始应力随转动副刚度增大而变小, 固有频率随转动副刚度增大而变大, 且转动副处理方式下模型的固有频率均小于绑定接触处理方式下模型的固有频率。

关键词:桁架索网结构; 有限元建模; 预应力模态

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2019)05-0115-03

Effects of Connection Stiffness on Dynamic Characteristics of Truss Cable Net Structure

LU Rui

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the influence of joint connection stiffness on the dynamic characteristics of the truss cable net structure, this paper establishes its modeling and does its simulation. The connection between truss rod and joint in the model is treated as bonded contact and revolute joint respectively, and the static analysis and modal analysis are performed. Comparing the results of the two ways, it is found that the deformation and mode shapes remain the same. In the simplified model of the revolute joint, the stress decreases and the natural frequency increases with the increase of the stiffness of the revolute joint. The natural frequency is always less than the other one.

Keywords: truss cable net structure; finite element modeling; prestress mode

0 引言

随着空间科学的发展, 卫星成为信息传播中继站的一种重要选择, 而信息量的不断增大和现代用户终端小型化的发展, 需要增大卫星天线口径来提高其传输带宽和信号增益^[1]。受限于运载火箭整流罩尺寸, 一般构型的天线口径在 4 m 以内, 严重限制了地面的应用。星载大型可展开天线的出现, 使得大口径、高精度、低质量、高强度的天线设计成为可能^[2]。目前大型空间天线普遍设计成可展开结构, 在航天器发射前处于收缩状态, 进入轨道后再由展开机构将天线展开至工作状态后锁定。对于星载天线来说, 除了要求质量轻, 还要求具有很高的反射面误差控制能力, 并且能很好地适应复杂、恶劣的空间和卫星本体姿态变化, 能对振动和冲击响应进行有效的控制^[3], 因此对可展开结构展开后的结构动力学特性进行研究对保证天线的正常工作具有重要意义。

周边桁架式是空间可展开结构的一种, 具有收纳率高、质量轻、结构刚度好等优点, 可适用从数米到上百米口径结构形式需要, 是一种备受关注的空间可展开形式, 受到了广泛研究。赵孟良^[4]等建立了考虑摩擦的周边可展桁架结构的展开动力学模型, 分析了摩擦对展开过程的影响。刘福寿^[5]等基于能量等效原理, 将平面桁架周期单

元等效成空间各向异性梁模型, 获得了环形桁架的等效连续体模型。周志成^[6]等利用非线性理论模型分析了大型网状可展开天线中存在的拉索几何非线性和间隙接触非线性对结构动力学特性的影响。

空间可展开结构展开锁定后, 其运动副中仍有无法完全消除的微小间隙, 这些间隙对在轨飞行器动力学性能有着不可忽视的影响^[7-8]。在分析展开结构在展开后的动力学特性时, 已有的分析多将接头处的连接考虑为固定连接^[9], 或者仅将接头考虑为质量点^[10], 并未考虑接头处的连接刚度对结构动力学特性的影响。本文为了分析接头处的连接对结构动力学特性的影响, 建立了桁架索网仿真模型, 分别将杆件与接头的连接处理为绑定接触和一定刚度的转动副连接, 对两种处理方式下的模型进行模态分析, 仿真结果说明了连接处的刚度对分析结果的影响, 对准确分析大型空间天线结构的动力学特性具有借鉴作用。

1 桁架索网结构建模

1.1 桁架索网结构建模

桁架索网结构由环形桁架和索网两部分构成, 本文首先建立如图 1 所示的仿真模型。环形桁架的外接圆半径 $R=210\text{ mm}$, 桁架高 $H=103.5\text{ mm}$, 由 12 个构型相同的四边

形单元组成,每个单元包括横杆、竖杆和斜杆,所有杆件均为空心管件,环形桁架的横杆和竖杆的外径均为 5 mm,斜杆有粗细 2 种,外径分别为 7 mm 和 5 mm,所有杆件壁厚均为 2 mm。各杆件通过接头连接在一起,分别是 3 支杆接头和 5 支杆接头。

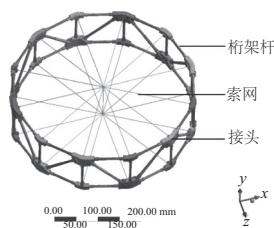


图 1 桁架索网模型

对于环形桁架的网格划分,由于桁架杆件结构比较规则,可以采用六面体单元,而接头由于结构复杂,需要对不规则的部分采用四面体网格。对于索网,在软件内直接建立 link180 索单元,再将索的横截面积及材料属性赋予单元,索的横截面为直径 1 mm 的圆。

桁架索网结构中有 3 种材料,桁架杆为碳纤维复合材料,接头为铝合金材料,索网为凯夫拉纤维,其材料参数如表 1 所示。对于桁架杆在结构中主要起维持外形的作用,主要载荷为轴向载荷且载荷并不大,为了便于建模,将其作为各向同性材料处理,弹性模量取纤维方向的弹性模量,泊松比取其主方向的泊松比。

表 1 桁架索网结构材料参数

项目	碳纤维复合材料	凯夫拉纤维	铝合金
密度/(kg/m ³)	1 770	1 460	2 810
弹性模量/GPa	80.0	15.0	71.7
泊松比	0.3	0.3	0.3

对于桁架索网结构的边界条件,使用两点约束方式,将 1 个三向接头和五向接头的 2 个面施加固定约束,如图 2 所示。为维持索网的外形并保持一定的刚度,需要给索网施加一定的初始应力,本文在索网中间的竖索中施加 10 N 的预拉力作为结构的初始应力。

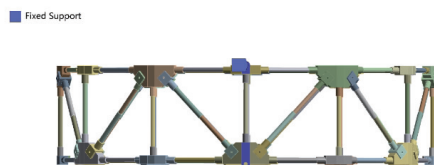


图 2 桁架索网模型的边界条件

1.2 杆件与接头连接的处理

完成网格的划分后需要对杆件与接头处的连接进行处理,桁架杆与五向接头的连接示意图如图 3 所示,需要对斜杆与接头之间的连接进行处理。由于桁架索网结构一般为可展开结构,所以斜杆与接头之间存在着一个转动副,在展开锁定前转动副可以转动,结构锁定后不能再自

由转动。第 1 种处理方式认为结构锁定后斜杆与接头之间不再能转动,接头处的连接是刚性的,所以将斜杆与接头处的连接简化为接触面之间的绑定接触。第 2 种处理方式认为结构锁定后杆件与接头之间仍可能存在相对转动,斜杆与接头的连接并不是刚性的,彼此之间存在着一个连接刚度,所以将杆件与接头的连接简化为存在一定转动刚度的转动副,杆与接头之间存在 1 个转动自由度,而其他自由度被限制,在外力作用下二者之间会发生一定相对转动。

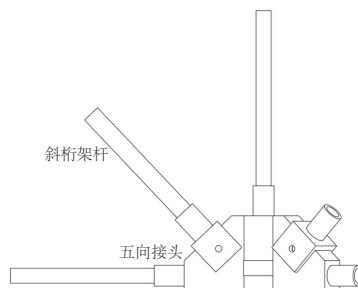


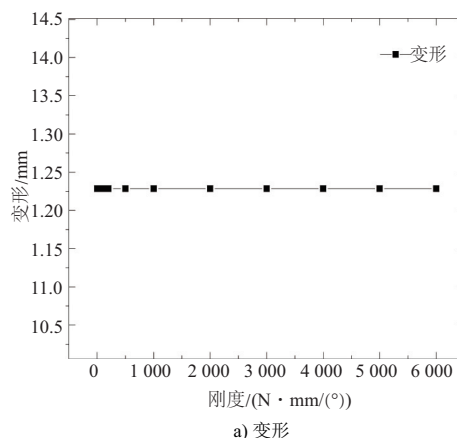
图 3 杆件与接头处连接的处理

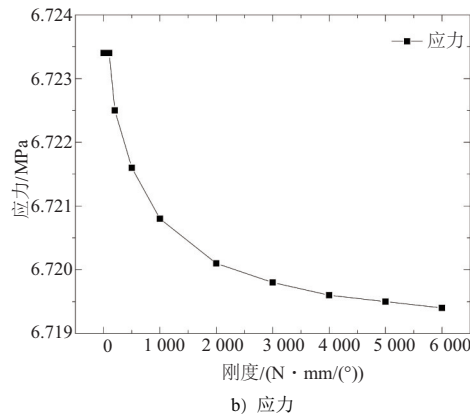
2 仿真分析

2.1 初始静力分析

由于桁架索网结构内存在一定的初始预应力,结构存在一定的初始静变形,所以首先对模型进行静力分析。第 1 种处理方式下模型的初始变形发生在索网的中心,结构的最大位移为 12.286 mm,最大应力为 6.72 MPa,结构整体的初始应力较低。

第 2 种处理方式下模型的变形和应力分布与第 1 种处理方式下的模型保持一致,结构的最大变形也发生在索网中心,结构的最大变形和应力则随转动副刚度变化的曲线如图 4 所示。由图 4 中的变形曲线可知转动副的刚度变化对结构的最大变形没有影响,同时结构的最大变形 12.285 mm 与第 1 种处理方式下模型的最大变形 12.286 mm 相比没有较大的差别。由图 4 中的应力曲线可知,随着转动副中的刚度变大,结构的最大应力降低,且在刚度较小时,应力随刚度变化更为明显。当两种处理方式下结构的最大应力相同时,对应的转动副的刚度为 2500 N·mm/(°)。





通过两种处理方式下模型的静力结果对比可以发现,接头处的连接刚度对分析结果中的静变形影响不大,但是对模型的最大应力影响较大,特别是当连接刚度较小时,最大应力随刚度变化明显。

2.2 预应力下的模态分析

连接处的刚度会影响结构整体的刚度,从而对结构的模态产生一定的影响。对第 1 种处理方式下的模型进行预应力下的模态分析,得到结构的前 4 阶固有频率如表 2 所示。

表 2 结构的前 4 阶固有频率

阶数	1	2	3	4
频率/Hz	11.10	22.44	86.89	90.06

第 1 种处理方式下模型的前 4 阶振型如图 5 所示,结构的第 1 阶振型主要是结构面内的左右摆动,第 2 阶是结构的上下摆动,前两阶振型都是结构整体的大范围运动,位移最大点都出现在离固定约束最远的一端。结构的第 3 阶是结构整体的横摇振动,第 4 阶是面内的呼吸振动,这两阶振型里结构出现了柔性变形,位移最大点出现在固定约束的两侧。

第 2 种处理方式下模型的模态振型与第 1 种简化方式下的保持一致,其模态频率则随转动副刚度的变化而变化,结构的第 1 阶固有频率和第 2 阶固有频率随转动副刚度变化如图 6 所示。由图 6 中的曲线可知,随着转动副刚度变大,结构的固有频率会逐渐变大,而且在转动副刚度较小时,较小的刚度变化就会引起较大的频率变化。将两种简化方式下求得的结果进行对比可以发现,第 2 种处理方式下的固有频率小于第 1 种简化方式下的频率。

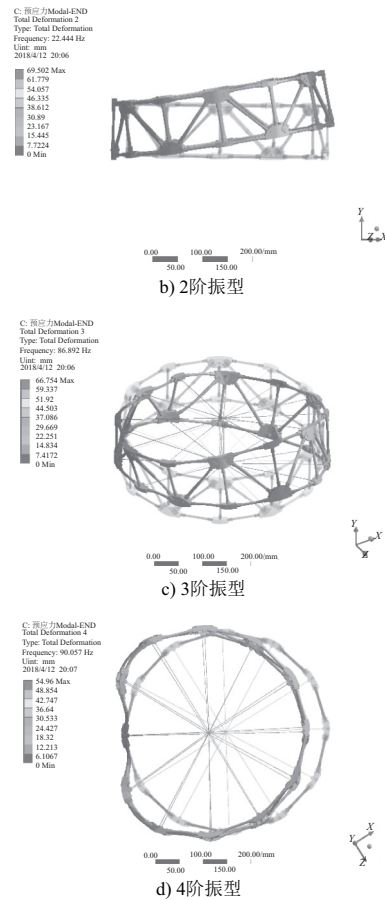
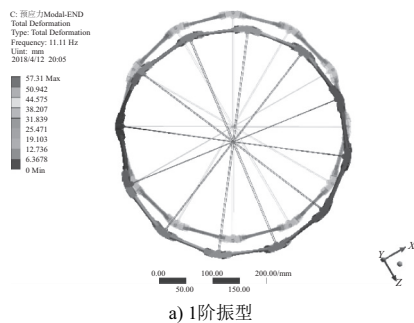


图 5 结构的前 4 阶振型图

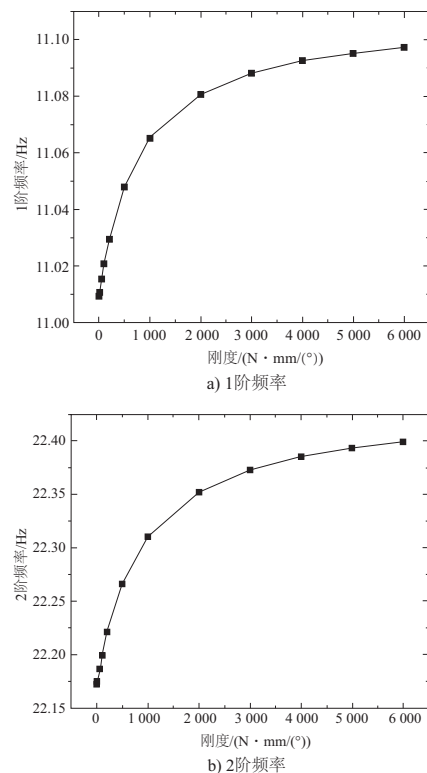


图 6 绑定接触设置下结构的固有频率随刚度变化曲线

(下转第 120 页)