

Analysis of Vibration Characteristics of a Repeatable Collapsible Spherical Antenna Support Mechanism Based on ANSYS

Zezheng Xing, Shanhong Ma*, Bo Zhang

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang
Email: 15343436993@163.com, *fengxiao-yd@163.com

Received: Jul. 28th, 2020; accepted: Aug. 12th, 2020; published: Aug. 19th, 2020

Abstract

ANSYS software is used in the performance analysis of space folding mechanism. The computing power of the software meets the requirements of large-scale mechanism simulation. The object of this analysis is a repeatable folding spherical antenna support mechanism composed of a deformed shear fork mechanism. As an aerospace machine, its working state needs to maintain high stability under its working environment. Finite element technology can be used to analyze the working state of the mechanism. Excessive mechanical vibration will affect the working performance of the parts and the folding movement performance of the mechanism and structural stability. This analysis mainly simulates and verifies that the stability of the folding mechanism designed by the deforming shear fork mechanism meets the design requirements. Typical metal materials and composite materials are selected, and more appropriate composite materials are selected as the main material of the folding unit of the mechanism under the condition of meeting the conditions.

Keywords

ANSYS Software, Repeatable Folding Mechanism, Spherical Support Mechanism, Analysis of Vibration Characteristics

基于ANSYS的可重复折展类球面天线支撑机构振动学特性分析

邢则拯, 马善红*, 张波

浙江理工大学, 浙江 杭州

*通讯作者。

文章引用: 邢则拯, 马善红, 张波. 基于 ANSYS 的可重复折展类球面天线支撑机构振动学特性分析[J]. 机械工程与技术, 2020, 9(4): 296-306. DOI: 10.12677/met.2020.94032

Email: 15343436993@163.com, *fengxiao-yd@163.com

收稿日期: 2020年7月28日; 录用日期: 2020年8月12日; 发布日期: 2020年8月19日

摘要

在空间折展机构性能分析中采用的是ANSYS软件, 该软件的计算能力满足大型机构仿真的需求。本次分析的对象是一种经过变形后的剪叉机构组成的可重复折展类球面天线支撑机构。作为航天机械, 在其工作环境下工作状态需要保持较高的稳定性, 利用有限元技术可以对机构的工作状态进行分析, 过多的机械振动会影响零件的工作性能、影响机构折展运动性能和结构稳定性。本次分析主要仿真、验证了变形剪叉机构设计的折展机构的稳定性满足设计需求, 在材料上选择了典型的金属材料 and 复合材料, 在符合条件的情况下选择了更为合适的复合材料作为机构折展单元主要材料。

关键词

ANSYS软件, 可重复折展机构, 类球面支撑机构, 振动学特性分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 建模与前置处理

此次分析中使用 Solid works 软件对可重复折展类球面天线支撑机构进行三维建模, 使用 Ansys workbench 软件对机构进行自由模态分析、约束模态分析、谐响应分析等振动学特性分析。

可重复折展类球面天线支撑机构, 由经过变形剪叉机构设计的两级折展单元构成, 其折展单元如图 1 所示。从机构设计组成上分析, 可重复折展类球面天线支撑机构由两个部分组成, 一个是经过拓扑优化设计后的变形剪叉机构杆组, 一个是柔性斜拉索, 是一个刚柔耦合的机械系统。整体机构在一二级完全展开后为一种稳定的弧面结构[1]。

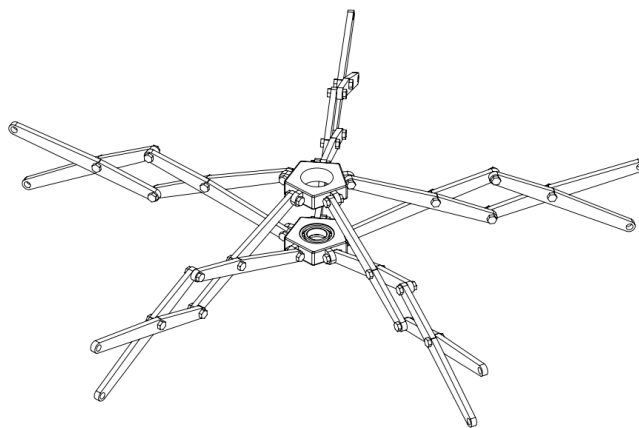


Figure 1. 3D model of repeatable element

图 1. 折展单元三维模型

使用 solid works 2019 软件对可重复折展类球面天线支撑机构建立三维模型, 对其结构进行简化处理后导入 ANSYS workbench 进行相关分析[2]。天线支撑机构完全展开后为一种稳定的弧面结构, 在此次分析中采用 SOLID185 单元来模拟机构的杆件和铰接块, 且选用 SOLID185 单元中增强应变的方法。此方法可消除剪切锁定和体积锁定, 并提高计算精度[3]。模型网格化处理后, 共计有 166,284 个单元和 54,216 个节点。可重复折展类球面天线支撑机构采用较为常见的铝合金 2A12 作为杆件和铰接块的材料, 采用合金钢 40Cr 作为斜拉索的材料, 铝合金 2A12 和合金钢 40Cr 的材料属性参数如表 1 所示。

Table 1. Main properties of material

表 1. 材料主要属性

材料	弹性模量(MPa)	密度(kg/mm ³)	泊松比	抗拉强度(MPa)	屈服强度(MPa)
铝合金 2A12	7.5×10 ⁴	2.8×10 ⁻⁶	0.31	470	325
合金钢 40Cr	2.1×10 ⁵	7.8×10 ⁻⁶	0.30	980	785

2. 求解计算

2.1. 模态分析

2.1.1. 模态分析基本理论

模态分析可以用来确定机构的振动特性, 可以通过模态分析确定自然频率、振型和振型参与系数。有限元动力学分析的基本方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = R$$

式中: $[K]$ ——刚度矩阵; $[M]$ ——质量矩阵; $[C]$ ——阻尼矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别是有限元分割体的加速度、速度和唯一向量表示; R 是外载荷向量。

固有频率和振型是系统的固有属性, 外载荷的施加与否不影响其结果, 故取 $R = 0$ 。在完全展开状态下, 阻尼对于完全展开时的结构作用影响可以忽略, 故也取 $[C] = 0$, 此时可以得到完全展开结构自由振动方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$$

线性系统的简谐形式为:

$$\{\ddot{u}\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t$$

可得到在模态分析中, 振动频率和模态的计算依据方程为:

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi\}_i = 0$$

2.1.2. 自由模态

在自由模态分析的过程中, 可重复折展类球面天线支撑机构的有限元模型的边界设置为结构无约束状态。斜拉索的主要作用是在完全展开的情况下提供索拉力, 使得结构整体更加稳定, 但有无斜拉索对整体机构的运动没有影响, 故针对天线支撑机构在完全展开状态下有无斜拉索分别作出自由模态分析[4]。

机构完全展开后, 其理论口径为 1054 mm, 在无斜拉索自由模态的情况下得到天线支撑机构的前 10 阶的固有频率如表 2 所示。

得到其前 8 阶振型图如图 2 所示。

Table 2. The first 8 natural frequencies in free mode without slant pull element
表 2. 无斜拉索自由模态下前 8 阶固有频率

阶数	1	2	3	4
频率(Hz)	31.972	32.044	49.509	49.943
阶数	5	6	7	8
频率(Hz)	50.295	50.670	67.675	67.907

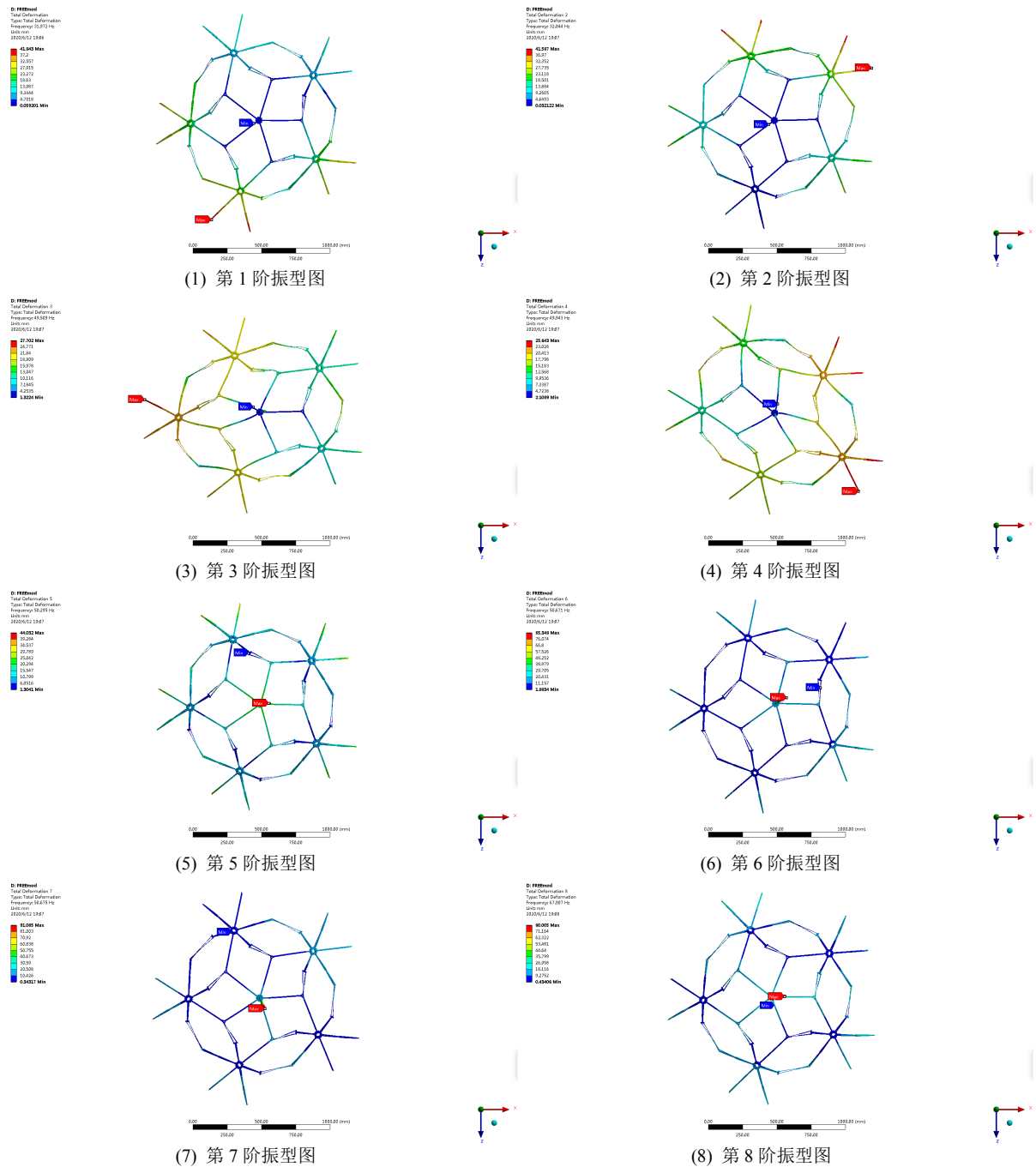


Figure 2. Figure of the first eight modes in free mode without stay cables
图 2. 无斜拉索自由模态下前 8 阶振型图

对于有斜拉索的可重复折展类球面天线支撑机构模型，斜拉索设置为 40Cr 材料，预紧力为 200 N。相对预应力变求方程为：

$$F = EA\lambda_0$$

式中： E ——斜拉索材料的弹性模量； A ——斜拉索设计的横截面积(不考虑拉伸导致的变形)； λ_0 ——相对预应力变； F ——拉力。

计算得所添加的相对预应力变为：

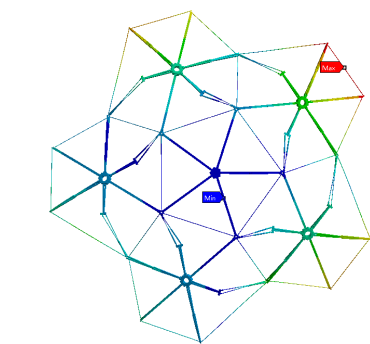
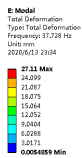
$$\lambda_0 = \frac{EA}{F} = 0.0036$$

加入斜拉索单元后进行自由模态分析，得到其前 8 阶的固有频率如表 3 所示。

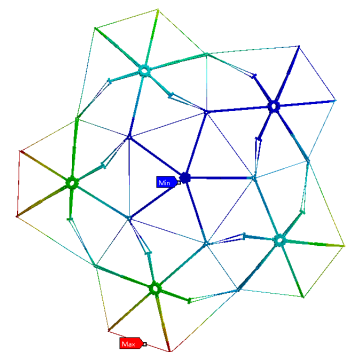
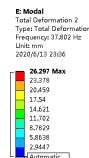
Table 3. The first 8 natural frequencies in free mode with slant pull element
表 3. 有斜拉索自由模态下前 8 阶固有频率

阶数	1	2	3	4
频率(Hz)	37.728	37.802	58.740	59.007
阶数	5	6	7	8
频率(Hz)	62.592	76.560	76.765	79.457

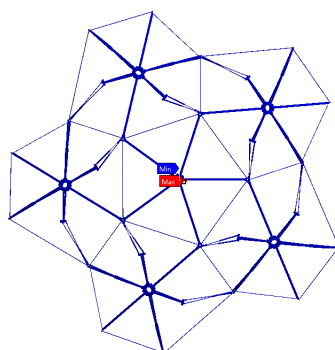
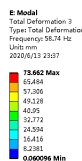
得到其前 8 阶振型图 3 所示。



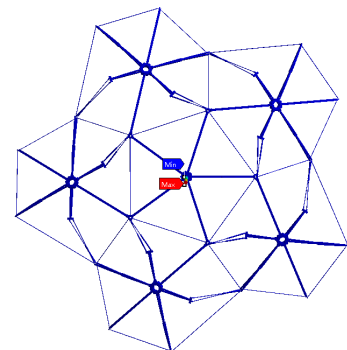
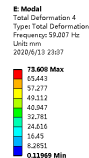
(1) 第 1 阶振型图



(2) 第 2 阶振型图



(3) 第 3 阶振型图



(4) 第 4 阶振型图

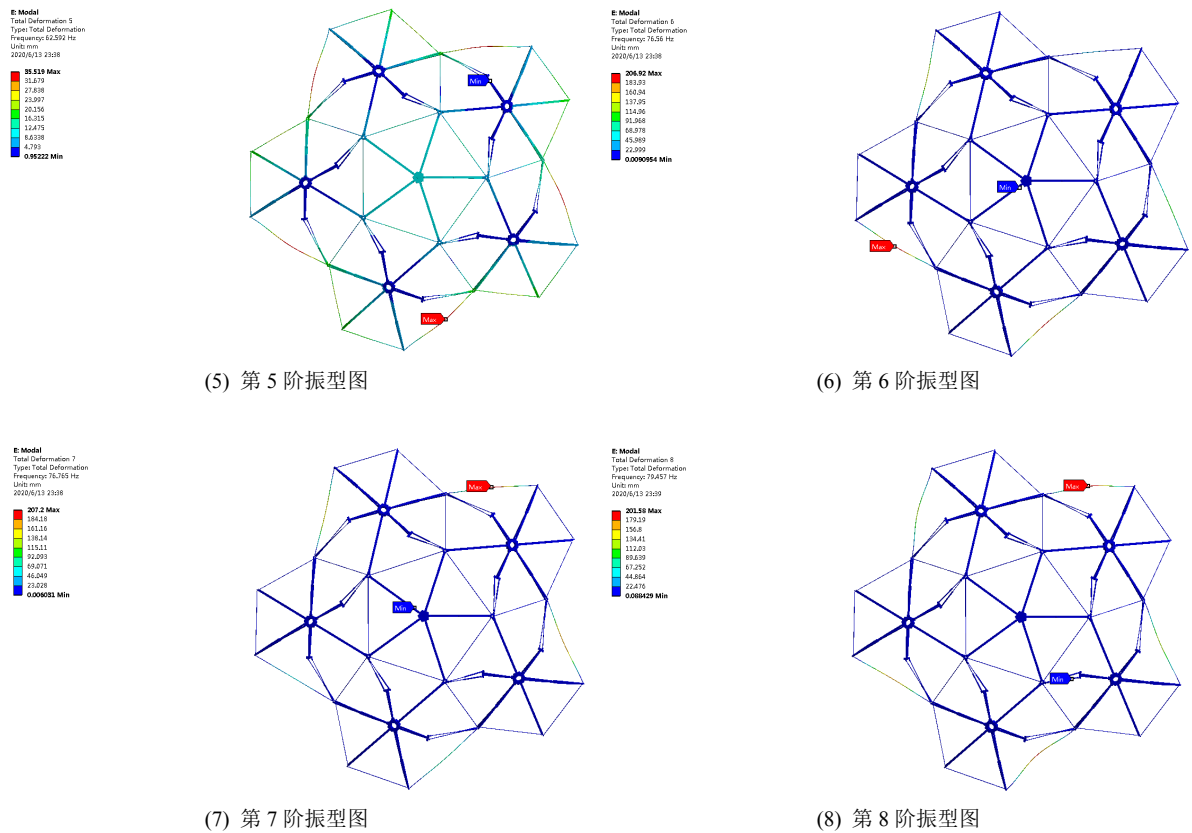


Figure 3. Figure of the first eight modes in free mode with stay cables
图 3. 有斜拉索自由模态下前 8 阶振型图

针对前 6 阶进行讨论可以看出，添加斜拉索对于机构完全展开后的稳定性较为明显的提升。由上述图表可以看出，可重复折展类球面天线支撑机构第 1 阶和第 2 阶、第 3 阶和第 4 阶、第 5 阶和第 6 阶、第 7 阶和第 8 阶的固有频率均较密集。针对其前 6 阶振型进行讨论，前 4 阶振型分别表现为整体扭转，第 5 阶和第 6 阶振型表现为二级折展模块的各模块绕着各自中心铰接处往复摆动。

2.1.3. 约束模态

根据天线支撑机构在实际作业时，其一级折展单元铰接处与航天器的连接为移动副，所以约束模态的边界条件为一级折展单元的中心铰接块全约束。

在无斜拉索的情况下得到可重复折展类球面天线支撑机构前 10 阶的固有频率频率与振型描述如表 4 所示。

Table 4. The first 10 natural frequencies in Constraint modal without slant pull element
表 4. 无斜拉索约束模态下前 10 阶固有频率及振型描述

阶数	1	2	3	4	5
频率(Hz)	13.031	13.064	25.404	27.225	28.017
振型描述	z 向左右平移	x 向左右平移	y 向扭转 + 平移	y 向平移	z 轴扭转
阶数	6	7	8	9	10
频率(Hz)	28.083	31.973	32.045	49.531	49.956
振型描述	x 轴扭转	反射面上下弯曲	反射面上下弯曲	反射面内侧弯曲	反射面内侧弯曲 + 扭转

对可重复折展类球面天线支撑机构加入斜拉索单元进行约束模态分析,得到其前 10 阶的其频率及振型描述如表 5 所示。

Table 5. The first 10 natural frequencies in Constraint modal with slant pull element
表 5. 有斜拉索约束模态下前 10 阶固有频率及振型描述

阶数	1	2	3	4	5
频率(Hz)	14.007	14.005	27.148	31.826	31.885
振型描述	z 向左右平移	x 向左右平移	y 向扭转	y 向平移	z 轴扭转
阶数	6	7	8	9	10
频率(Hz)	34.059	37.685	37.793	64.858	65.279
振型描述	x 轴扭转	反射面上下弯曲	反射面上下弯曲	反射面内侧弯曲	反射面内侧弯曲 + 扭转

经过对比和分析,可以看出在约束模态下,阶数之间和自由模态下一样存在着固有频率密集的现象。第 1 阶和第 2 阶、第 4 阶和第 5 阶之、第 6、7、8 阶、第 9 阶和第 10 阶之间,其固有频率之差都很小。

2.2. 谐响应分析

2.2.1. 谐响应分析基本理论

谐响应分析分析的目的是得到机构在几种频率下响应值对频率的曲线,进而预测结构的持续动力学特征,从而验证其机构的设计能否克服共振、疲劳及其他受迫振动引起的有害效果。

在分析上,机构受迫振动的稳态响应的表现为机构的节点以相同频率振动根据有限元运动基本方程,得到谐响应求解的基本方程:

$$(-\Omega[M] + i\Omega[C] + [K])(\{u_1\} + i\{u_2\}) = \{F_1\} + i\{F_2\}$$

式中: i ——单位复数; $\Omega = 2\pi f$; $\{u_1\} = \{u_{\max} \cos \phi\}$ ——实位移矢量; $\{u_2\} = \{u_{\max} \sin \phi\}$ ——虚位移矢量; $\{F_1\} = \{F_{\max} \cos \phi\}$ ——实力矢量; $\{F_2\} = \{F_{\max} \sin \phi\}$ ——实力矢量。

在上述表达式中: u_{\max} ——最大位移; F_{\max} ——力幅值; ϕ ——位移相位偏差; φ ——力相位。

谐响应分析属于线性分析,因此所有的非线性分析的特征可以在计算时将之忽略。

2.2.2. 谐响应分析

根据 2.1 的分析可以得到,可重复折展类球面天线支撑机构在有斜拉索约束模态下固有频率的变化范围为 0 到 70Hz,故在谐响应分析时在中心加载的频率设置为 80Hz。选取结构中 3 个典型节点作为测试点,节点对应的检测位置如图 4 所示。

采用模态叠加法得到 3 个检测节点的响应曲线如图 5 所示。

由对于天线支撑机构模态分析可知,机构在第 2 阶、第 3 阶、第 4 阶、第 5 阶、第 6 阶、第 7 阶、第 8 阶的振型图展现的振型均为机构整体的弯曲和扭转。因此选择的 3 个测试点对第 2 阶到第 8 阶的固有频率较敏感,从理论上分析,这是因为外界载荷在机构固有频率附近时,机构的振动更加明显,这些频率响应曲线所展现的结果和约束模态分析的结果一致。

2.3. 材料机构固有频率的影响

对于可重复折展类球面天线支撑机构,选择材料应该在整体稳定性保证的前体现使得机构整体质量最小,据此应该选择密度小而弹性模量、强度和刚度高的材料。符合上述条件的材料主要有金属材料

复合材料，各选择一种典型材料进行分析，碳纤维材料选用 M60J。

复合材料碳纤维材料下的机构约束模态下前 8 阶频率及振型描述如表 6 所示。

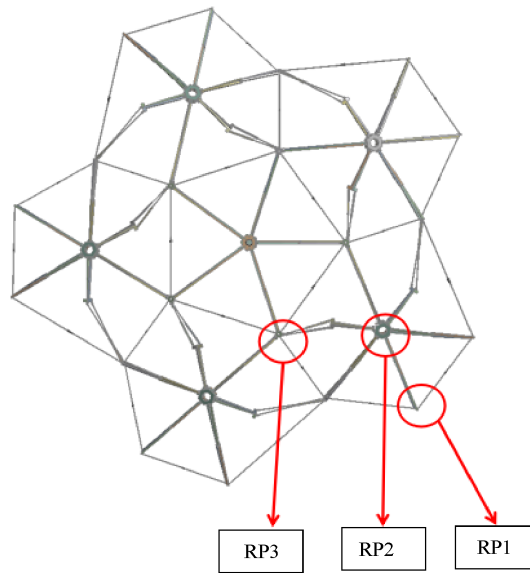
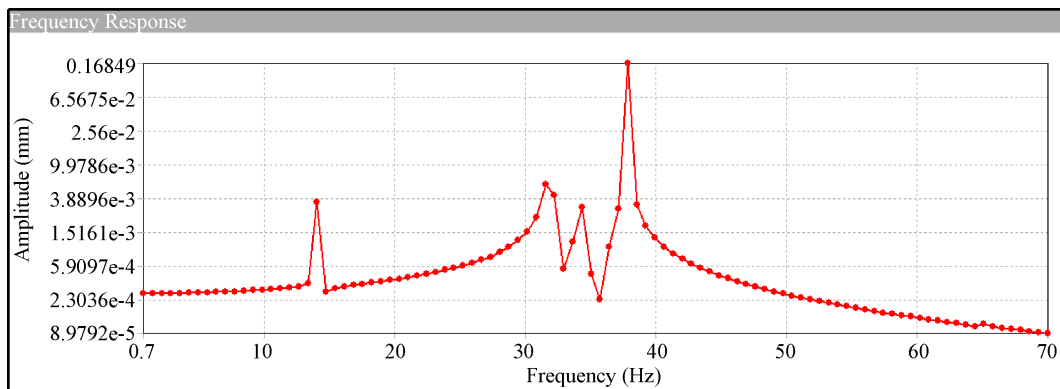
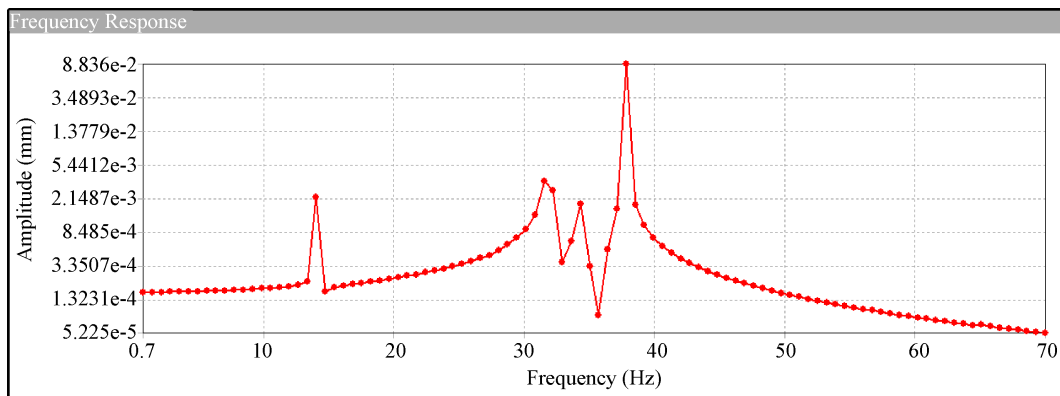


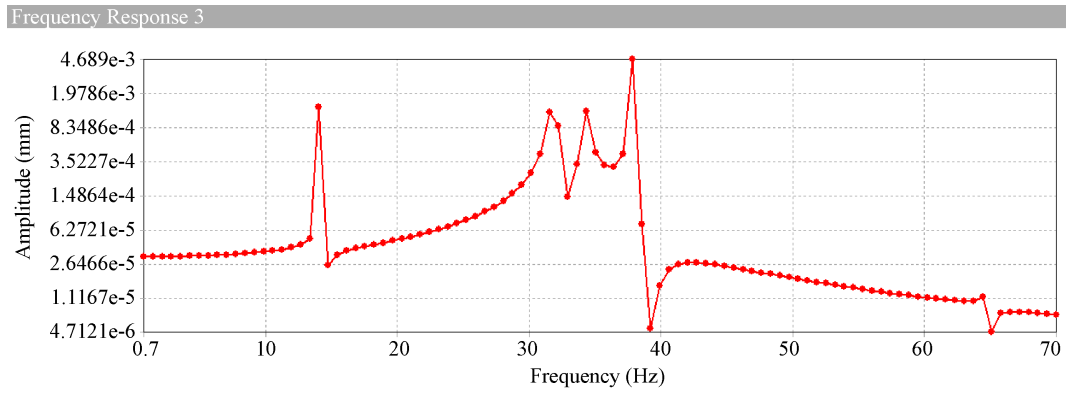
Figure 4. Schematic diagram of detection node location
图 4. 检测节点位置示意图



(1) RP1 频率响应曲线



(2) RP2 频率响应曲线



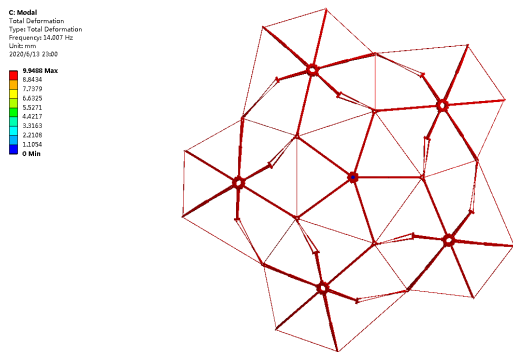
(3) RP3 频率响应曲线

Figure 5. Response curves of the three test points
图 5. 三个测试点的响应曲线

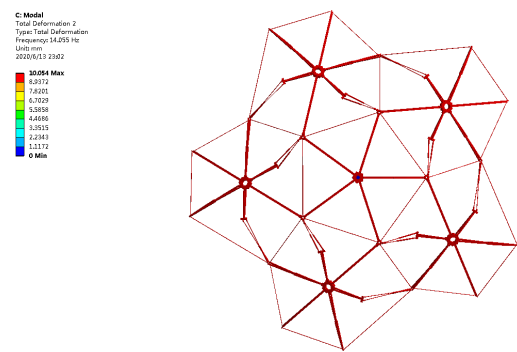
Table 6. The first 8 order natural frequencies and modes of vibration were described
表 6. 有斜拉索碳纤维材料下前 8 阶固有频率及振型描述

阶数	1	2	3	4
频率(Hz)	29.327	29.406	57.666	67.590
振型描述	z 向左右平移	x 向左右平移	y 向扭转	y 向平移
阶数	5	6	7	8
频率(Hz)	67.713	72.334	80.089	80.322
振型描述	z 轴扭转	x 轴扭转	反射面上下弯曲	反射面上下弯曲

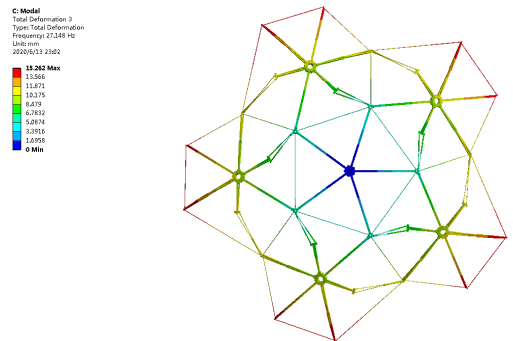
得到复合材料碳纤维材料下的机构的振型图如图 6 所示。



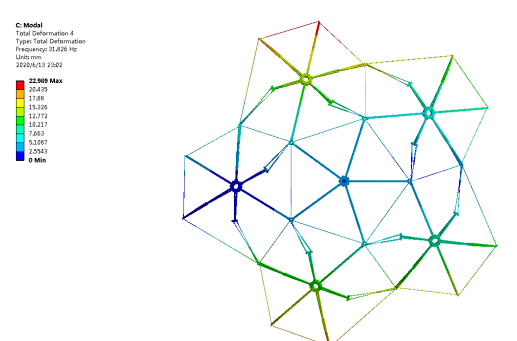
(1) 第 1 阶振型图



(2) 第 2 阶振型图



(3) 第 3 阶振型图



(4) 第 4 阶振型图

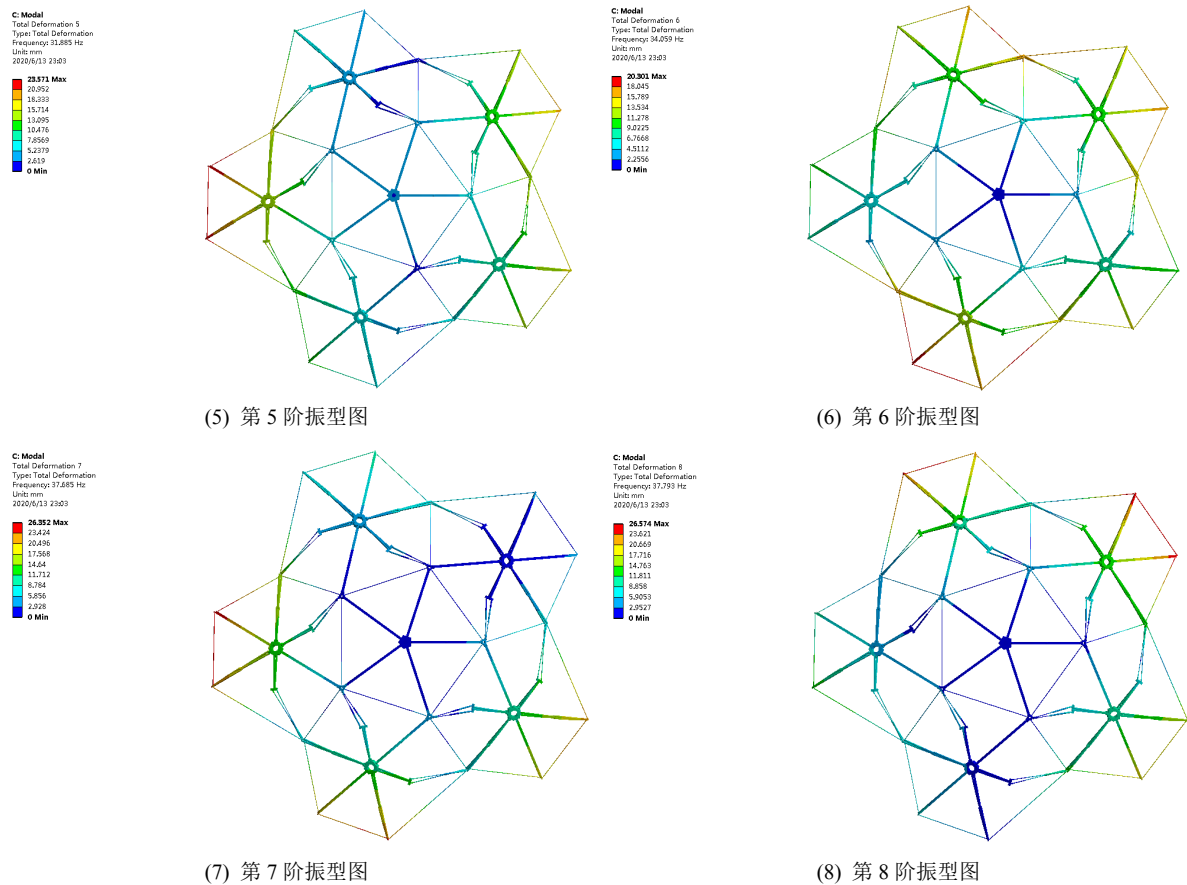


Figure 6. The first 8 order vibration pattern of cable-stayed carbon fiber material is presented
图 6. 有斜拉索碳纤维材料前 8 阶振型图

3. 数据分析及结论

3.1. 数据分析

从运动学角度分析, 可重复折展类球面天线支撑机构的运动由一级折展单元中心铰接块控制, 有无斜拉索对其折展运动没有影响, 所以如果在经过分析后加斜拉索对完全展开机构的作用不明显的话应采取不加斜拉索的方案。有无斜拉索的对比如图 7 所示。经过第 2 节的数据对比我们发现, 加斜拉索可以有效提升支撑机构完全展开作业下的稳定性, 在天线支撑机构的真实作业情况下, 采用斜拉索可以有效提升机构的稳定性, 延长机构运动的可靠周期。

在材料方面, 经过 2.3 的比对和分析, 金属材料铝合金 2A12 和复合材料碳纤维 M60J 两种材料前 5 阶的振型图没有明显差别, 但固有频率相差较大。在相同阶数下, 碳纤维材料相比与铝合金材料, 其固有频率有显著提高。金属材料和复合材料均可以满足天线支撑机构的力学性能要求和运动学性能要求, 但是碳纤维材料在质量优化上明显效果更好, 如果继续对机构整体进行优化设计, 可以在复合材料方面进一步选择更为合适的材料。如果搭建原理样机在原理研究和运动学特征验证的过程中, 可以采用复合材料。

3.2. 结论

- 1) 利用图论拓扑学在机械结构设计方面的应用, 设计了该型二级折展机构并建立了其有限元模型。

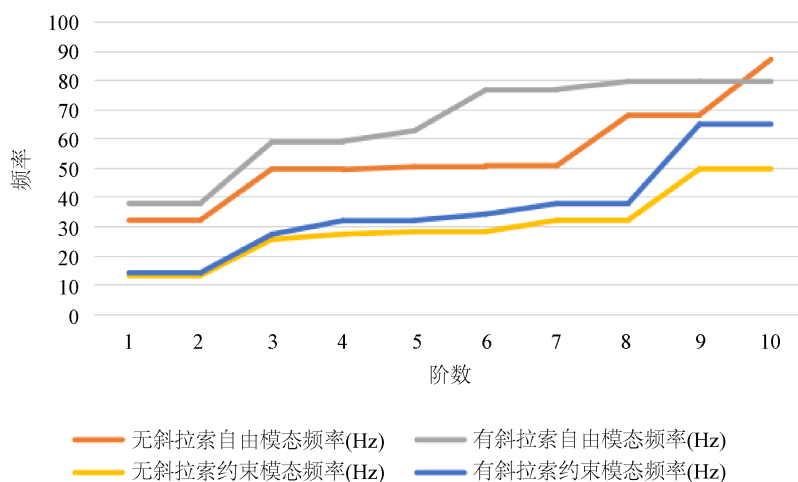


Figure 7. Frequency comparison between with slant pull element or not
图 7. 有无斜拉索频率对比

2) 基于有限元模型, 采用有限元模态法对有无斜拉索及两种主要材料对折展机构性能进行了分析, 整体稳定性最好的为带斜拉索的复合材料构成的机构。

3) 对类球面折展天线模块化设计提供一定的基础, 有利于后期更多级折展机构的设计及分析。

基金项目

“可重复折展类球面天线支撑机构”国家级大学生创新创业项目创新训练计划, 项目编号: 201810338005, 项目成员: 邢则拯、张波、骆前罕、钱昶旭、吴帆。

参考文献

- [1] 邓宗全. 空间折展机构设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- [2] 赵海霞, 王玉民, 赵晓. 剪叉机构的疲劳寿命分析及结构优化[J]. 起重运输机械, 2018(7): 104-107.
- [3] 华琴. 基于 ANSYS Workbench 的某型平板天线力学分析[J]. 机械研究与应用, 2018(2): 23-28.
- [4] 吕建根, 王荣辉. 考虑抗弯刚度斜拉索动力学建模及频率分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014(7): 169-174.