

幕墙玻璃协同下索网结构自振特性分析

赵海燕, 吴 锦

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年4月26日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月28日

摘 要

玻璃面板作为构成拉索式玻璃幕墙的重要组件之一, 本文通过ANSYS软件对单层索网玻璃幕墙进行了自振特性分析, 并参数化研究了拉索、玻璃对整体模型自振特性的影响, 得到了对应振型与各阶自振频率。针对单樘拉索玻璃幕墙, 考虑玻璃协同对拉索自振特性的影响, 运用有限元方法对其单独展开研究。

关键词

拉索式玻璃幕墙, 自振特性, 玻璃协同, 有限元模拟

Analysis of the Natural Vibration Characteristics of the Cable Net Structure under the Synergistic Curtain Wall Glass

Haiyan Zhao, Jin Wu

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 26th, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 28th, 2024

Abstract

One of the key elements of the cable-style glass curtain wall is the glass panels. In this paper, ANSYS software is used to analyze the natural vibration characteristics of a single-layer cable-mesh glass curtain wall. The influence of the glass and cable on the overall model's natural vibration characteristics is studied parametrically, and the corresponding mode shapes and natural frequencies of each order are found. The finite element approach was utilized to analyze the single-cable glass curtain wall independently in order to take into account the impact of glass synergy on the cable's inherent vibration characteristics.

Keywords

Cable-Type Glass Curtain Wall, Natural Vibration Characteristics, Glass Synergy, Finite Element Simulation

Copyright © 2024 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. 引言

玻璃面板作为构成拉索式玻璃幕墙的重要组件之一, 其不仅起到了外围保护作用, 同时也是结构体系关键的传力组件。在进行拉索及结构整体静力和动力特性分析时, 玻璃面板的协同作用是不容忽视的重要因素之一。

冯若强[1] [2] [3]运用模型试验和数值模拟的方法, 研究了在静力荷载作用下单索幕墙体系中玻璃和拉索的协同工作机理, 并通过参数化分析了各种因素对玻璃在体系中发挥作用的影响。此外, 建立了一个考虑玻璃和索网协同工作的理论模型, 并在动力荷载作用下将这种协同工作分为对结构附加刚度和附加阻尼两部分, 这一模型也为后续研究提供了相应的理论框架。张瑜[4]运用 ANSYS 软件对单层平面索网玻璃幕墙的风振响应特性进行了有限元分析, 通过改变玻璃面板的分割尺寸和厚度参数化分析的玻璃对整体结构体系刚度的贡献, 结果表明当玻璃面板属于双向板时, 结构体系的刚度和振动频率较低。刘亚申[5]运用 SAP2000 对单层平面索网玻璃幕墙进行可自振特性分析, 通过改变玻璃面板的厚度对比分析各个模型前 12 阶的自振频率, 结果表明增大玻璃面板的厚度可以增大高阶频率减小低阶频率。杨晓龙[6]分别建立单层平面索网和单层平面索网玻璃幕墙的有限元模型, 通过模态分析得出了前十阶的模态, 通过改变玻璃面板的厚度分析了玻璃参数变化对玻-索结构体系动力响应的影响。

对于玻璃协同, 大部分研究局限于对玻璃协同工作下索网幕墙整体的静力力学性能, 也有部分学者对其动力特性进行了研究, 但局限于结构整体, 而频率法索力测试的对象是拉索本身, 因此玻璃协同对单索振频的影响也不可忽视的。因此, 考虑玻璃协同对频率法测试拉索索力的影响需要进一步的研究。

当外界激励作用在幕墙上时, 玻璃面板往往也会随着发生振动, 激励的位置和大小也决定着玻璃面板的振动程度。在运用频率法对玻璃幕墙拉索进行索力测试时, 首先就需要外界激励使拉索产生振动, 这种激励可以是自然激励如风荷载等, 也可以是通过人工激励使其发生振动。以单层平面索网玻璃幕墙为例, 由于拉索和玻璃面板存在关联性, 拉索的振动也会引起玻璃面板的振动, 玻璃协同工作同时也会反过来影响拉索的自振特性, 因此玻璃协同对自振频率识别影响的研究是很有必要的。

2. 单层平面索网幕墙自振特性分析

2.1. 有限元模型的建立

1) 单元选择

在建立单层索网幕墙有限元模型时需要考虑拉索、爪件以及玻璃面板的共同组合。对索网幕墙的整体建模拉索均采用 LINK180 单元, 对于爪件以及玻璃面板的单元分别选择 BEAM188 单元和 SEHLL63 单元。

2) 计算假定及约束条件

① 各个组件的材料均处于弹性工作状态, 即应力应变满足线弹性;

- ② 忽略爪件与其他组件连接件的质量，且忽略爪件接头与玻璃之间相互作用产生的变形；
- ③ 忽略玻璃面板分格块之间密封胶的作用及质量；
- ④ 拉索与拉索、拉索与主体结构之间、爪件与玻璃面板之间均为铰接连接，玻璃面板边界与主体结构的连接均视为固接。拉索与拉索之间以及爪件与玻璃面板之间铰接的设置均采用不同单元之间节点重合并耦合平动自由度的方式予以实现；
- ⑤ 拉索仅受拉力作用。

3) 模型设计图

本节用于自振特性分析的单层索网幕墙设计模型如图 1 所示。

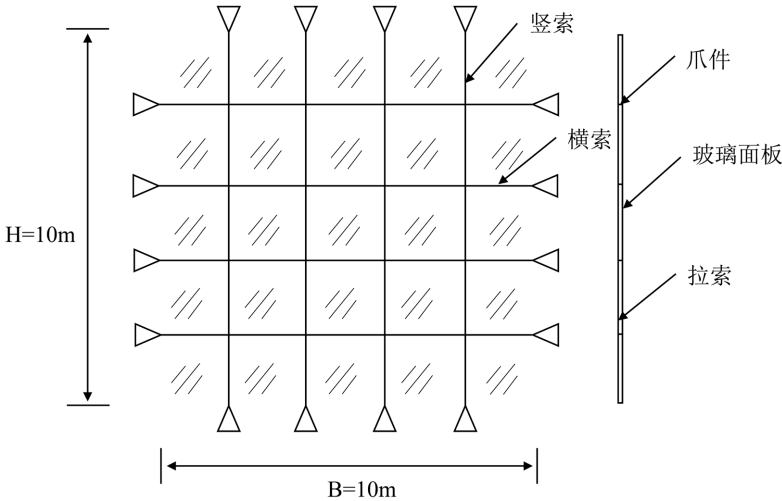


Figure 1. Model design
图 1. 模型设计图

图中索网幕墙分格尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，爪件长度即拉索距玻璃面板的垂向距离为 30 mm ，这些参数用于索网幕墙和索网模型建立的尺寸参考值。

4) 材料参数

索网幕墙的各部件材料参数如表 1 所示。

Table 1. Material data sheet
表 1. 材料参数表

部件	材料	厚度/mm 直径/mm	泊松比	杨氏模量/ N/m^2	密度/ (kg/m^3)	预拉力/kN
玻璃面板	—	20	0.2	$7.2\text{E}+10$	2560	—
拉索	不锈钢	50	0.3	$1.95\text{E}+11$	7700	300
爪件	不锈钢	50	0.3	$1.95\text{E}+11$	7700	—

2.2. 索网幕墙的分析结果

为了解索网幕墙的动力性能及振动模式，对建立的模型进行了自振特性分析。运用 ANSYS 进行模态分析，并得到了结构各阶振型和自振频率，前 30 阶自振频率分布如表 2 和图 2 所示，结构部分阶振型如图 3 所示。

Table 2. Results of the first 30 natural frequencies of the single-layer cable net curtain wall structure
表 2. 单层索网幕墙结构前 30 阶自振频率结果表

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	3.731	11	15.267	21	22.915
2	6.017	12	15.286	22	24.922
3	7.939	13	16.846	23	25.127
4	8.801	14	17.018	24	25.636
5	8.810	15	19.284	25	26.907
6	10.598	16	19.510	26	27.367
7	12.591	17	20.552	27	28.228
8	13.240	18	20.699	28	28.614
9	14.365	19	22.096	29	28.751
10	14.391	20	22.410	30	28.781

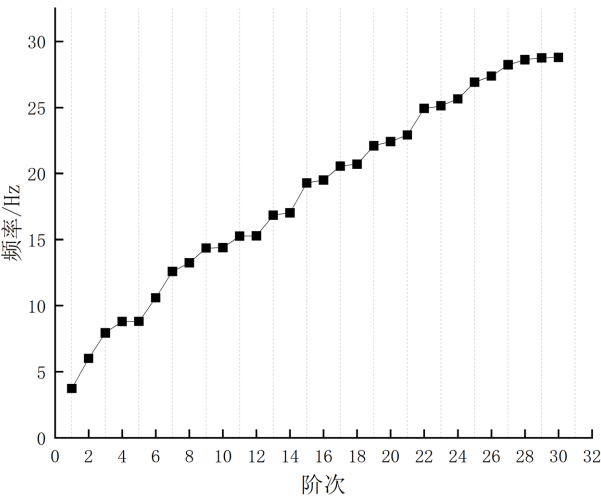
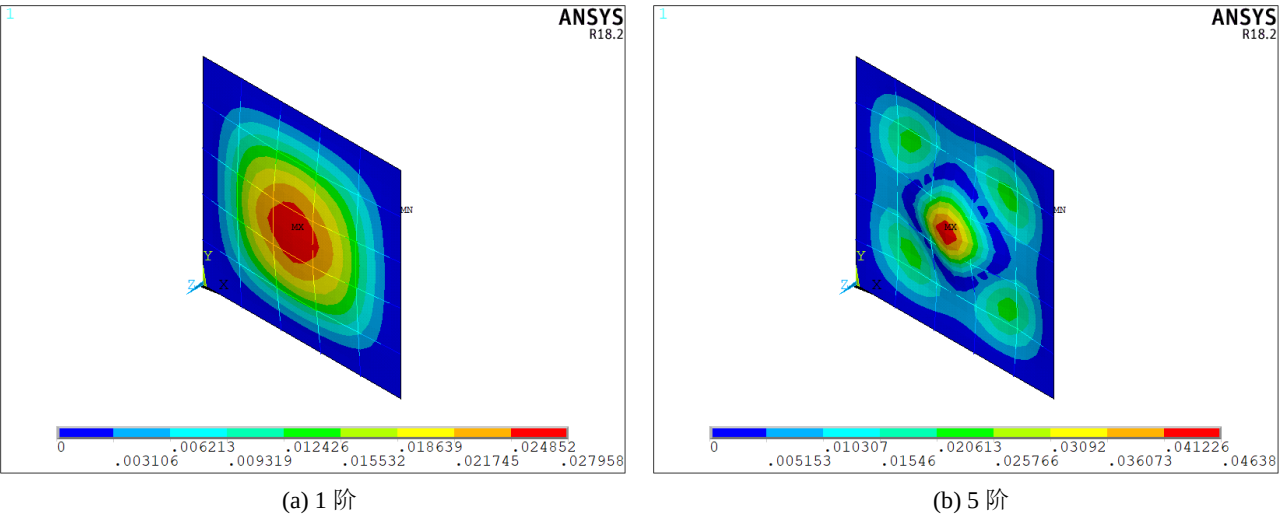


Figure 2. The first 30-order natural frequency curve of a single-layer cable-net curtain wall structure
图 2. 单层索网幕墙结构前 30 阶自振频率曲线



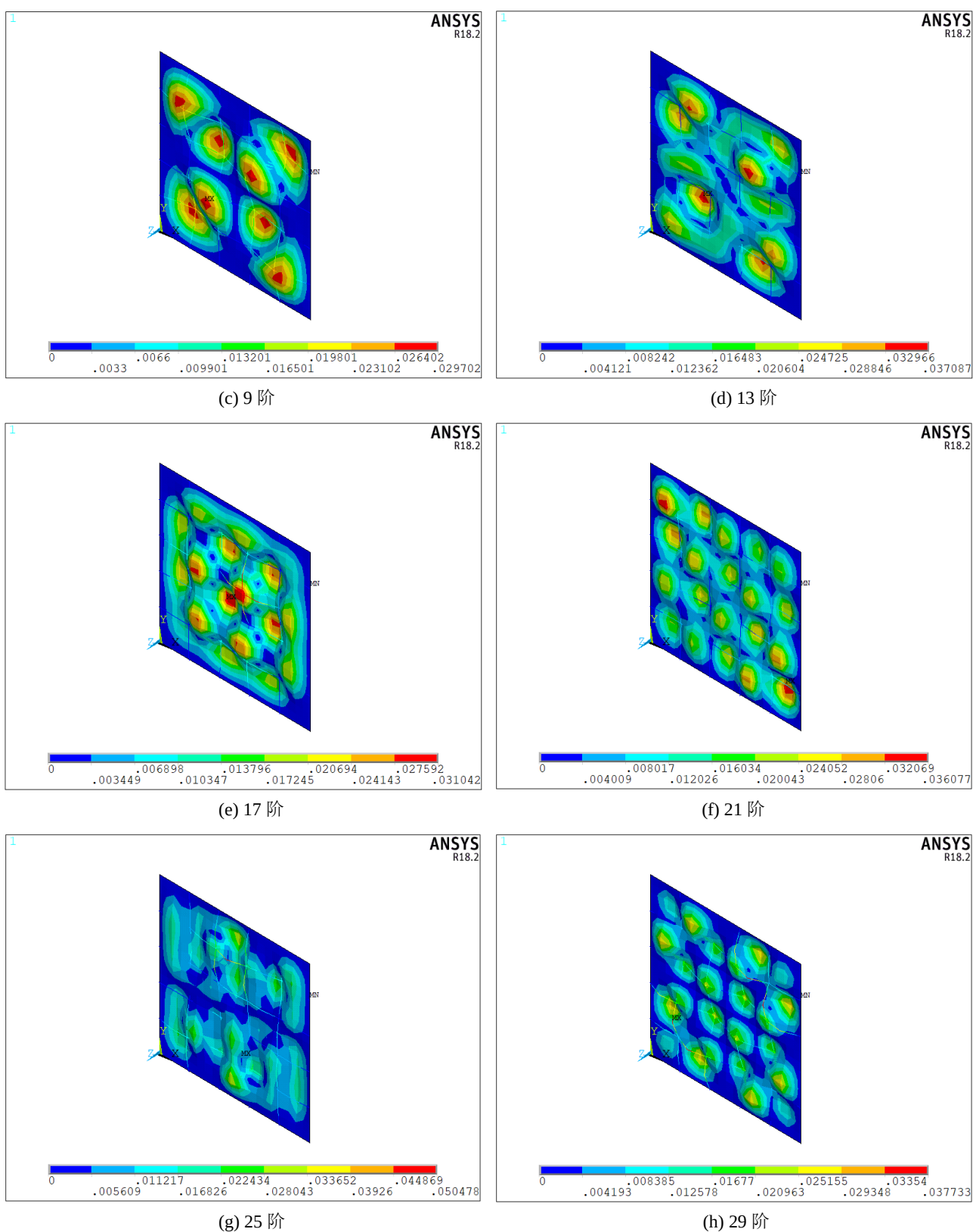


Figure 3. Partial mode shape diagram of single-layer cable net curtain wall structure
图 3. 单层索网幕墙结构部分振型图

由前 30 阶自振频率结果及部分振型可知,索网玻璃幕墙结构的振动主要以 Z 方向即垂直于幕墙平面方向为主,且结构第一振型为垂直于平面单一方向振动。从上面选取的部分振型图可以看出,除第一振型外结构的其他阶振型均表现为垂直于索网平面的正反方向振动且具有对称性。

结构整体各阶的自振频率相比一般结构较小,且分布较为密集表现为连续阶梯型增长的特征,说明单层索网幕墙结构体系的刚度相对更小,因此更容易产生振动。此外,前 30 阶自振频率中出现了两两大小相近的频率对,这也与结构的对称振型有关。

2.3. 玻璃协同索网自振特性对比

为了探究玻璃协同对索网自振特性的影响,对玻璃协同索网和单独索网模型进行的参数化分析比较。索网幕墙结构的振动方程为:

$$[K] - \omega^2 [M] = 0 \quad (1)$$

其中包含结构刚度、质量以及自振频率,因此玻璃协同对结构振动的影响主要包括玻璃刚度及玻璃质量两方面。本小节建模时将玻璃面板与平面索网组合形成幕墙整体结构体系,并与单独建立的索网模型进行对比分析,比较两者自振特性的差异。

有限元模型的材料参数参照表 1,玻璃协同索网与单独建立的索网部分振型对此如图 4 所示。

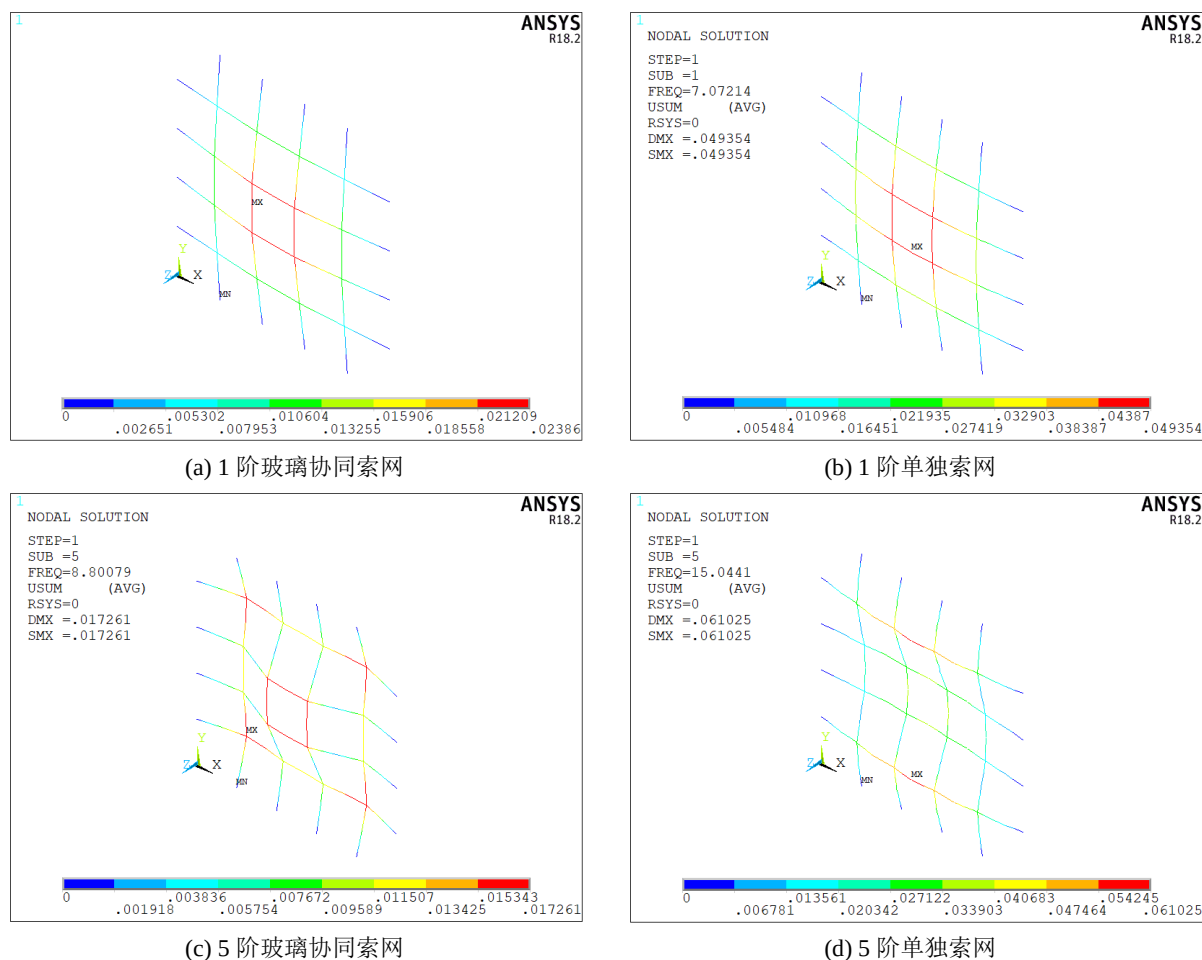


Figure 4. Comparison of partial mode shapes of glass synergistic cable mesh and individual cable net

图 4. 玻璃协同索网及单独索网部分振型对比

由以上部分振型对比图可知, 玻璃协同索网和单独建立的索网各阶振型相似, 两者在低阶振型下表现出相同的自振特性。玻璃单元的建立也会影响结构整体的刚度和质量, 从而导致玻璃协同索网各阶自振频率明显小于单独索网。

玻璃面板厚度和分格尺寸的变化会直接影响索网幕墙整体结构的刚度和质量, 为此通过改变玻璃厚度及分格尺寸参数化分析玻璃协同对索网自振特性的影响。对比单独索网模型、索网 + 玻璃面板质量(不考虑玻璃刚度)模型以及索网 + 玻璃面板质量并考虑玻璃刚度(玻璃协同索网)模型各阶频率从而分析玻璃刚度对索网自振特性的影响, 本小节以模型 A、B、C 来分别表示这三种模型。

1) 玻璃厚度变化对索网自振特性的影响

为了研究玻璃厚度变化对索网自振特性的影响, 建立了玻璃厚度为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 以及 30 mm 的有限元模型, 其他组件参数仍参照表 1。分别得到了模型 A、玻璃厚度为 20 mm 时模型 B 以及不同厚度下模型 C 的前 20 阶自振频率, 此处通过将玻璃面板质量等效到索网上以建立模型 B。结果对比见图 5, 图 6。

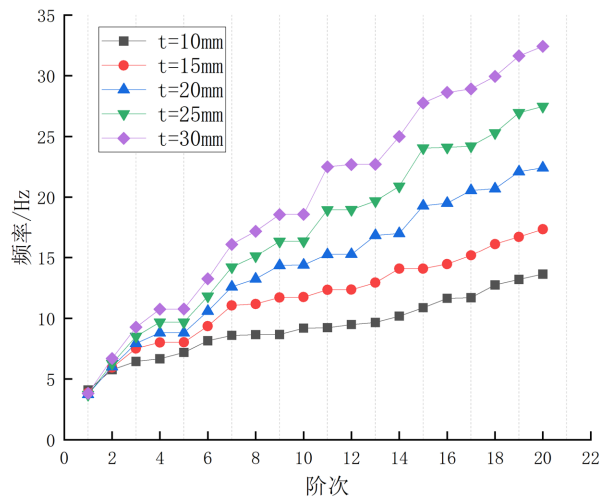


Figure 5. Comparison of the first 20 natural frequencies of glass thickness change model C
图 5. 玻璃厚度变化模型 C 前 20 阶自振频率对比

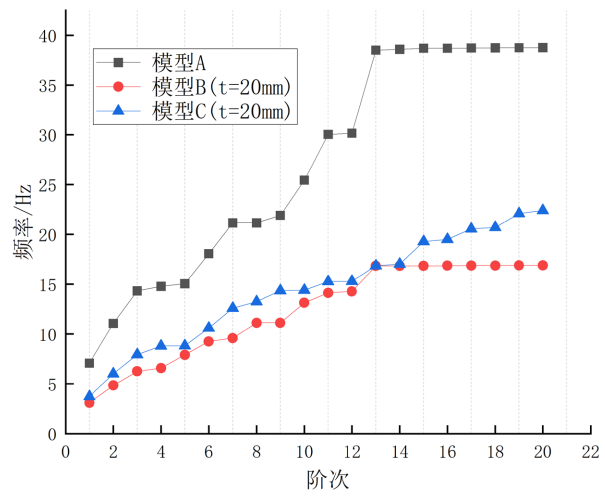


Figure 6. Comparison of the first 20 natural frequencies of model A-C when $t = 20 \text{ mm}$
图 6. $t = 20 \text{ mm}$ 时模型 A~C 前 20 阶自振频率对比

由图表中的自振频率对比可知，考虑玻璃的协同工作，玻璃协同索网模型自振频率整体随玻璃厚度的增加而减小，玻璃厚度变化对低阶振频的影响明显低于高阶振频，其主要原因是结构高阶模态的振型曲线变化较低阶更为明显，局部曲率较大，玻璃面板对局部的刚度影响更大。对比单独索网、索网 + 玻璃质量以及玻璃协同索网模型的振频可知，未考虑玻璃质量和刚度的单独索网各阶振频明显大于其他两者。索网 + 玻璃质量模型由于忽略了玻璃刚度其各阶振频明显小于玻璃协同索网，说明相同质量下玻璃刚度的贡献会导致索网自振频率增大，与式(1)的成立条件相符。

2) 分格尺寸变化对索网自振特性的影响

为了探究分格尺寸变化对索网自振特性的影响，建立了玻璃和索网分格尺寸分别为 2 m × 1 m、2 m × 1.25 m、2 m × 2.5 m 的有限元模型，其他组件参数仍参照表 1。分别得到了不同分格尺寸下对应模型 C 的前 20 阶自振频率，结果及对比见表 3 及图 7。

Table 3. The results of the first 20 natural frequencies of the grid size change cable net
表 3. 分格尺寸变化索网前 20 阶自振频率结果表

阶次	分格尺寸改变模型 C (玻璃协同索网)振频/Hz		
	2 m × 1 m	2 m × 1.25 m	2 m × 2.5 m
1	4.241	4.067	3.527
2	6.365	6.277	4.160
3	7.199	6.785	5.691
4	8.865	8.555	6.679
5	9.194	9.134	6.701
6	10.259	9.755	7.072
7	11.404	11.167	7.072
8	11.816	11.393	8.367
9	12.645	12.577	8.924
10	14.296	13.757	9.811
11	14.381	13.943	10.386
12	14.712	14.508	11.428
13	15.453	15.327	11.641
14	15.856	15.420	12.018
15	16.710	16.610	13.350
16	16.958	16.940	13.877
17	17.621	17.308	13.926
18	18.240	17.800	14.295
19	18.730	18.522	14.312
20	19.449	19.451	14.315

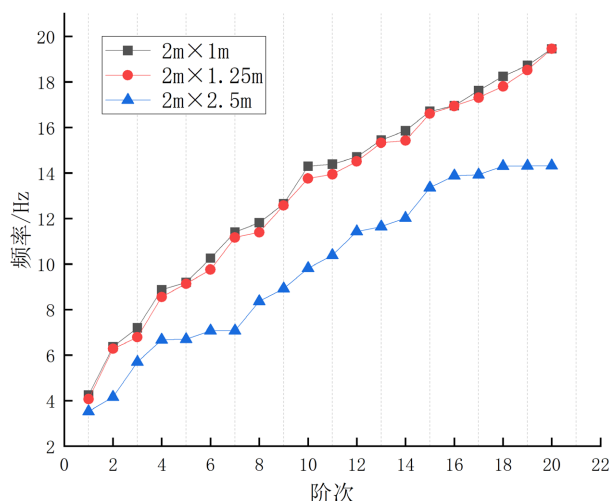


Figure 7. Comparison of the first 20 natural frequencies of the glass synergistic cable net with the change of grid size
图 7. 分格尺寸变化玻璃协同索网前 20 阶自振频率对比

由上图表可知, 玻璃协同索网的自振频率整体随分格尺寸的增大而减小, 说明分格尺寸变小会导致结构体系的整体刚度变大, 这也符合式(1)的成立条件。此外, 分格尺寸变化对低阶自振频率的影响明显低于高阶, 同时分格长宽比的变化也会来自振频率的变化产生一定影响。因此, 在进行幕墙设计时, 需要综合考虑分格尺寸给结构自振特性带来的影响。

3. 玻璃协同对单索自振特性的影响分析

在运用频率法对玻璃幕墙拉索进行索力测试时, 分别对待测的单根拉索进行一系列测试操作, 得到的自振频率也仅适用于单根拉索, 因此研究玻璃协同对单根拉索自振特性的影响是很有必要的。本小节对幕墙结构中单根拉索所在的某一榀拉索玻璃幕墙进行自振特性研究, 并分析了玻璃厚度改变对考虑抗弯刚度和不考虑抗弯刚度拉索自振频率的影响。

组件的材料参数参考表 1, 基于图 1 截取单根拉索所在的一榀幕墙(含拉索和玻璃), 设置玻璃面板的平面尺寸分别为 2 m × 10 m、2 m × 12 m 以及 2 m × 14 m, 其中长度为玻璃面板的总长即拉索的索长。索端约束及各组件的连接条件 2.1 小节已经详细说明, 此处不再赘述。对单榀玻璃幕墙建模的难点在于合理设置玻璃端部沿长度方向即玻璃分割线区域节点的约束。为了使玻璃面板和拉索保持同步的振型, 约束了玻璃端部沿长度方向节点三个方向的转动自由度和玻璃面内两个方向平动自由度, 节点自由度约束示意如图 8 所示。由于此处模拟研究的主要对象是玻璃幕墙结构中单根竖索, 因此忽略了索网体系中横索耦合对竖索产生的影响。运用频率法进行索力测试的关键就是在于准确获得拉索的自振频率特别是基频, 因此在研究玻璃协同对单索自振频率影响时重点分析对基频的影响。

考虑玻璃协同的影响, 对单索和单索 + 玻璃面板质量(不考虑玻璃自重)以及单索 + 玻璃面板质量并考虑玻璃刚度(玻璃协同拉索)分别建模, 同样以模型 A、B、C 来表示这三种模型。此处仍通过将玻璃面板质量等效到单索上以建立模型 B。玻璃面板和拉索单元采用单元尺寸控制进行网格划分, 单元尺寸分别设置为 1 m 和 0.5 m, 则沿长度方向各模型的一阶振型如图 9 所示。

由图 9 可知, 各模型一阶振型较吻合, 说明三者之间振动相对同步。分别取玻璃厚度为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm, 则不考虑拉索抗弯刚度及考虑抗弯刚度条件下模型 A、玻璃厚度为 20 mm 时模型 B 以及玻璃厚度变化时模型 C 基频结果如表 4 和表 5 所示。

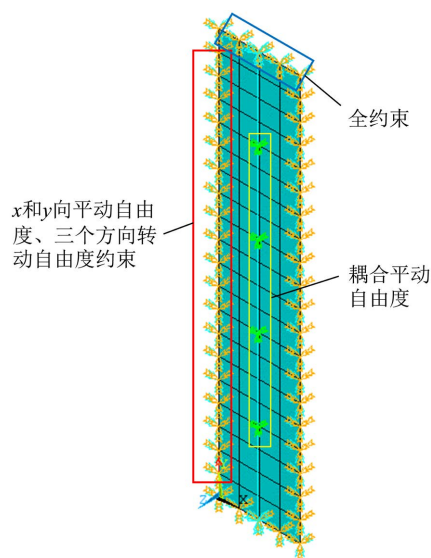


Figure 8. Schematic diagram of the node's degrees of freedom constraint
图 8. 节点自由度约束示意图

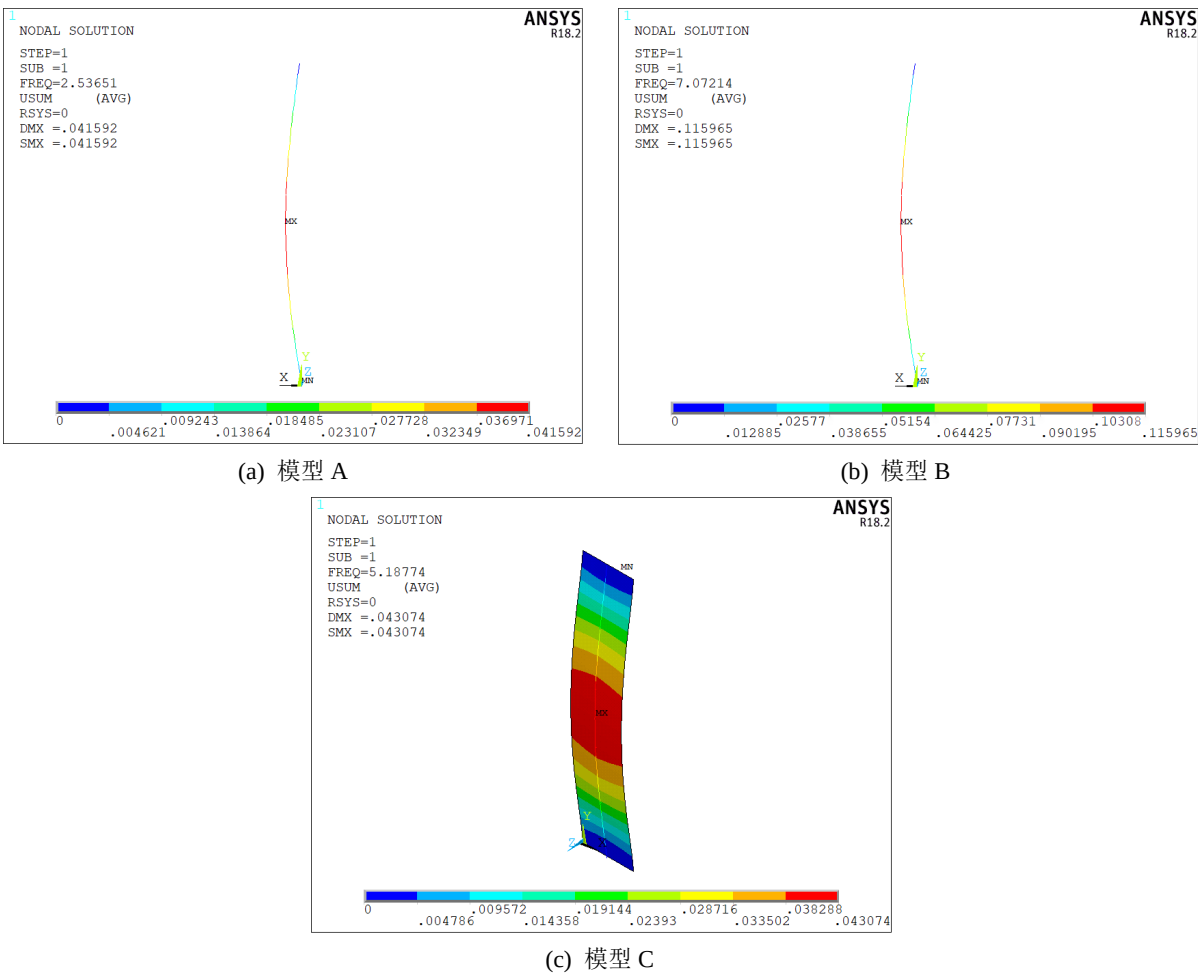


Figure 9. Comparison of first-order mode shapes of models A-C
图 9. 模型 A~C 一阶振型对比

Table 4. The bending stiffness of the cable is not considered, and the comparison of the fundamental frequency of the single cable

表 4. 不考虑拉索抗弯刚度单索基频对比

索长/m	模型 A (单索) 基频/Hz	模型 B (单索 + 玻璃质量) 基频/Hz	玻璃厚度改变模型 C (玻璃协同拉索)基频/Hz			
			t = 10 mm	t = 15 mm	t = 20 mm	t = 25 mm
10	7.072	2.5365	3.907	4.380	5.188	6.173
12	5.886	2.1111	3.266	3.633	4.294	5.107
14	5.041	1.808	2.804	3.104	3.664	4.354

Table 5. Considering the bending stiffness of the cable, the comparison of the fundamental frequency of the single cable

表 5. 考虑拉索抗弯刚度单索基频对比

索长/m	模型 A 基频/Hz	模型 B (t = 20 mm) 基频/Hz	玻璃厚度改变模型 C (玻璃协同拉索)基频/Hz			
			t = 10 mm	t = 15 mm	t = 20 mm	t = 25 mm
10	7.142	2.562	4.386	4.800	5.571	6.541
12	5.927	2.126	3.680	3.979	4.608	5.407
14	5.067	1.817	3.168	3.399	3.930	4.609

由上表可知，不同长度下考虑抗弯刚度的拉索基频在一定程度上有所提高。索长相等条件下，玻璃协同拉索基频随玻璃厚度的增加而增大。不同玻璃厚度下玻璃协同拉索以及拉索 + 玻璃质量模型基频明显小于单索，相同质量下拉索 + 玻璃质量模型基频明显小于单索。说明在玻璃面板和拉索共同振动时运用频率法进行索力测试需要充分考虑玻璃的协同作用(玻璃质量和刚度的贡献)，实际计算时应该将玻璃质量和刚度折算到拉索上从而使索力计算值更贴近真实值。

4. 结语

通过有限元模拟了考虑玻璃面板协同的幕墙结构体系，分析表明：

- 1) 幕墙结构的各阶振型主要以垂直于幕墙平面方向为主，且具有对称性。整体的各阶自振频率较小，说明幕墙结构体系更易产生振动。
- 2) 与单独建立的索网相比，玻璃协同索网在低阶振型下与其表现出相同的自振特性。玻璃协同索网模型自振频率整体随玻璃厚度的增加而减小，且玻璃厚度变化对低阶振频的影响明显低于高阶振频。单独索网模型各阶振频明显大于索网 + 玻璃质量以及玻璃协同索网模型。
- 3) 玻璃协同索网自振频率随分格尺寸的增大而减小，且对低阶振频的影响明显低于高阶，同时分格长宽比的变化也会影响结构的自振频率。索网 + 玻璃质量模型由于忽略了玻璃刚度其各阶振频明显小于玻璃协同索网，说明相同质量下玻璃刚度的贡献会导致索网自振频率增大。
- 4) 分别对单索和单索 + 玻璃面板质量以及玻璃协同拉索进行自振特性分析，以拉索长度和玻璃面板厚度为变量，不同长度下考虑抗弯刚度拉索基频相比于忽略抗弯刚度拉索基频有所提高。玻璃厚度的增加会提高玻璃协同拉索的基频，同时分析表明玻璃刚度和质量对单索基频的影响显而易见，因此幕墙结构整体振动下对单根拉索进行频率法索力测试需要综合考虑玻璃协同的影响。

参考文献

- [1] 冯若强, 武岳, 沈世钊. 考虑玻璃参与工作的单层平面索网幕墙结构静力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2005(4): 99-106.
- [2] 冯若强, 冀鹏, 武岳, 沈世钊. 单索幕墙中玻璃与索静力协同工作试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006(12): 2065-2069.
- [3] 冯若强, 花定兴, 武岳, 沈世钊. 单层平面索网幕墙结构玻璃与索网协同工作的动力性能研究[J]. 土木工程学报, 2007(10): 27-33.
- [4] 张瑜. 单层平面索网幕墙力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [5] 刘亚申. 玻璃与索网联合工作下索网幕墙结构性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [6] 杨晓龙. 单层平面索网玻璃幕墙风载作用下力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.