

预应力索杆体系的力学性能研究

张赵强

安徽建工检测科技集团有限公司 安徽合肥 230000

【摘要】预应力索杆体系的力学性能已然成为此类结构设计、施工及改造的重要理论参考。本文利用有限元软件ANSYS针对预应力索杆体系的模态、内力和位移等力学特性及性能展开研究。研究表明：前六阶固有频率范围为0.14~235.68 Hz；X向最大受拉和受压单元内力均为3536.17N，杆和两根斜拉索Y方向内力较大，受拉和受压单元最大值均为2500.01N。单元1、单元2、单元3和单元4均受拉且内力均为3536.2N；结构最大位移3.80mm出现在6号节点，X方向的最大位移0.97mm发生在4号节点，Y方向最大位移3.78mm出现在6号节点。

【关键词】预应力索杆体系；模态分析；内力和位移；力学性能

引言

预应力索杆体系具有受力合理、结构形式多样、跨越能力强和施工效率较高等特点而在建筑结构和桥梁结构中广泛应用，但预应力索杆体系存在易失稳和抗扭能力不足等问题。因此，预应力索杆体系的力学性能研究可为此类结构安全高效使用提供理论参考。

国内外相关专家学者针对预应力索杆体系的力学性能展开了一系列研究。刘廷勇^[1]等人采用ANSYS软件开展了新型全装配结构体系-大跨度装配式脊杆环撑索穹顶预应力分布理论研究。孙求知^[2]运用理论与数值方法研究对称预应力索杆结构形态构建和刚度特性。李宏胜^[3]等人探讨屋盖及张拉体系的结构选型和优化，并明确设计中的关键问题。石启印^[4]等人研究大跨度张弦桁架结构的自振特性及其地震响应，考察不同参数对其自振特性和地震响应的影响规律。熊逸丰^[5]针对大跨度弦支穹顶结构的静力性能、静力稳定性及施工仿真等问题进行研究。戚鹏飞^[6]从预应力对弦支穹顶受力性能的主动控制入手，提出弦支穹顶索杆形态优化的等效荷载法，并进行形状参数优化。Zhao^[7]等人探索预应力体系在使用和施工过程中的锚固力损失，并考察锚固力随

时间变化的影响规律。Adriana^[8]等人研究火灾荷载下预应力体系的承载能力和适用性能，评估相关参数对耐火性能的影响。

上述研究主要集中在索杆体系的选型和动力特性，而针对预应力索杆体系的模态、应力和变形研究十分有限。基于此，本文通过大型有限元软件ANSYS针对预应力索杆体系的模态、内力和位移等力学特性及性能展开研究。

1 工程概况

本文以某实际工程的预应力索杆结构为研究对象，结构布置及几何尺寸如图1所示，杆截面面积 $A_s=2.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ，索截面面积 $A_c=1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ ，索的初始应变 $\epsilon=0.00001$ ，杆和索的弹性模量分别为 $E_s=2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ 和 $E_c=1.9 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比 $\mu=0.3$ ，杆与索接触摩擦系数为0。本文通过ANSYS软件计算结构的模态、内力和位移，其中，索单元和杆单元分别采用LINK10和LINK8模拟，接触单元采用CONTACT52模拟。

(见图1)

2 模态分析

模态分析是采用整体动力平衡方程阐述结构承受动态荷载能力的重要流程，其表达式为：

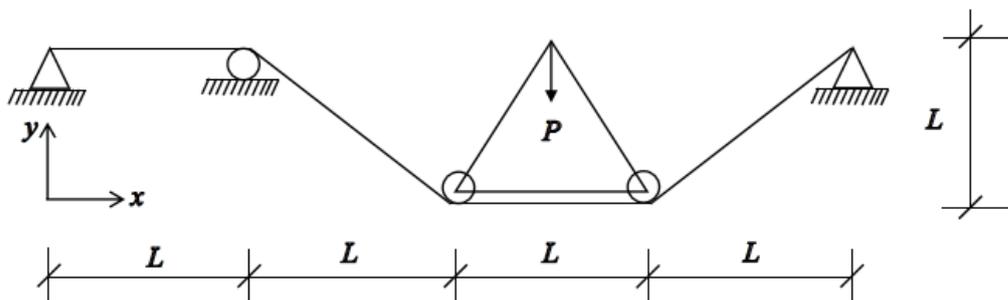


图1 结构布置及几何尺寸

Fig. 1 Structural arrangement and geometry

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (1)$$

式中： $[M]$ 为质量矩阵； $[C]$ 为阻尼矩阵； $[K]$ 为刚度矩阵； $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度矢量； $\{\dot{u}\}$ 为节点速度矢量； $\{u\}$ 为节点位移矢量。

基于有限元方法获得结构前六阶模态自振频率如表1所示，分析发现，前六阶固有频率范围在0.14~235.68 Hz之间，结构第一阶频率较低，表现形态为索杆体系的前后平动变形，在结构设计时应考虑采取辅助索杆加强结构的动力特性。结构后五阶自振频率以高频成分为主，与索杆体系工作频率具有较大差距，表明结构在高频下力学性能较为稳定，结构具有良好抵抗荷载的能力。

表1 前六阶模态自振频率

Tab. 1 Self-resonant frequencies of the first six orders of modes

模态	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶	第六阶
频率 (Hz)	0.14	35.20	60.45	114.22	178.31	235.68

3 计算结果分析

对于预应力索杆结构的瞬态动力学平衡方程，本文通过直接积分采用缩减法求解，即使用Newmark方法如式(2)和式(3)和改进后的HHT方法如式(4)。

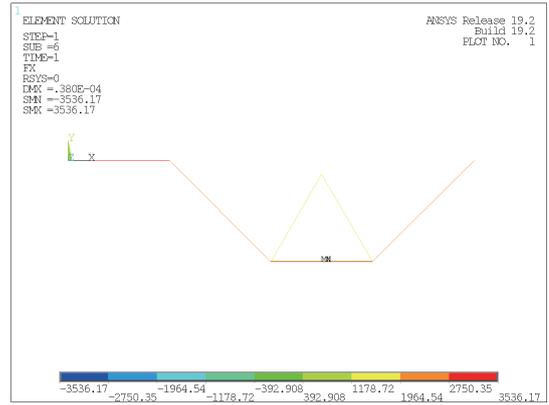
$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1-\delta)\{\dot{u}_n\} + \delta\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (2)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\} + \{\dot{u}_n\}\Delta t + [(\frac{1}{2}-\alpha)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}]\Delta t^2 \quad (3)$$

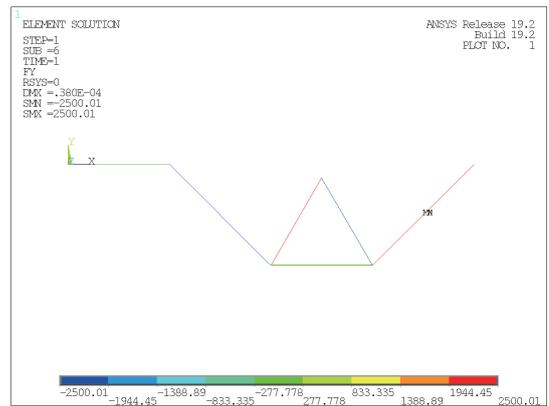
$$[M]\{\ddot{u}_{n+1-\alpha_n}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1-\alpha_f}\} + [K]\{u_{n+1-\alpha_f}\} = \{F_{n+1-\alpha_f}^a\} \quad (4)$$

式中： α 、 δ 、 α_f 和 α_m 为Newmark和HHT方法的积分参数

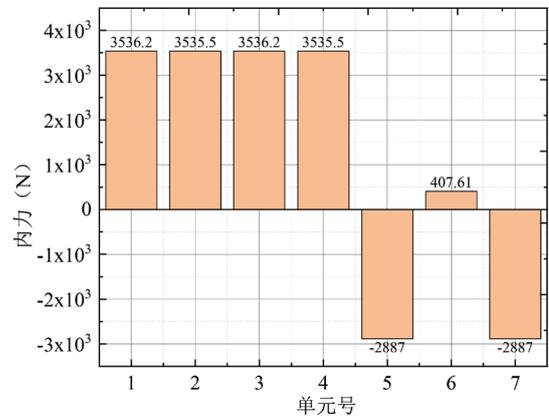
预应力索杆结构X、Y方向内力分布、单元内力值和单元内力占比如图2所示，从X向和Y方向内力分布可以看出，X向受拉和受压单元最大内力均为3536.17N，各索杆受力比较均匀，充分发挥了结构材料力学性能，结构体系较为合理；从Y方向内力分布可以发现，水平方向两根索受力较小，杆结构和两根斜拉索受力较大，受拉和受压单元最大值均为2500.01N，低于X方向29.3%。分析图2(c)可知，单元合内力最大为单元1、单元2、单元3和单元4，各单元均受拉且最大内力均为3536.2N，单元6受力最小且承受压力，仅有407.61N。图2(d)为各单元内力占比分布，可以发现，前4个单元占比较大分别为17.4%、17.39%、17.4%和17.39%，占比最小的单元是单元6，仅占2.01%，与图2(c)内力值分布规律一致，验证了计算结果的准确性。



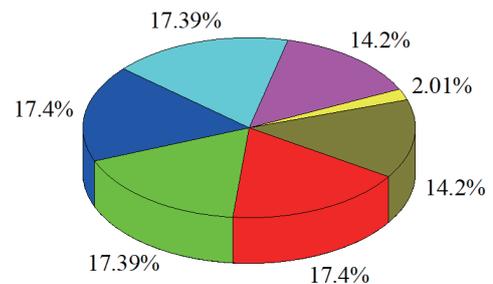
(a) X向内力分布



(b) Y向内力分布



(c) 单元内力值

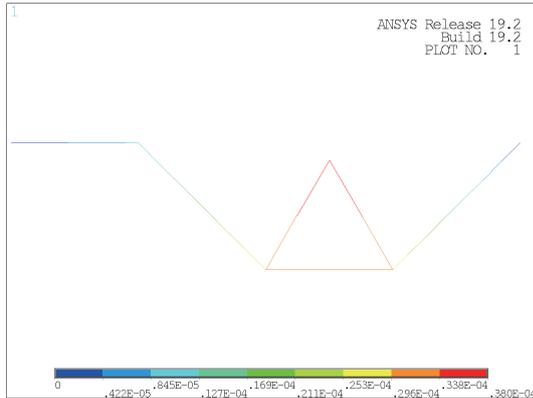


(d) 单元内力占比

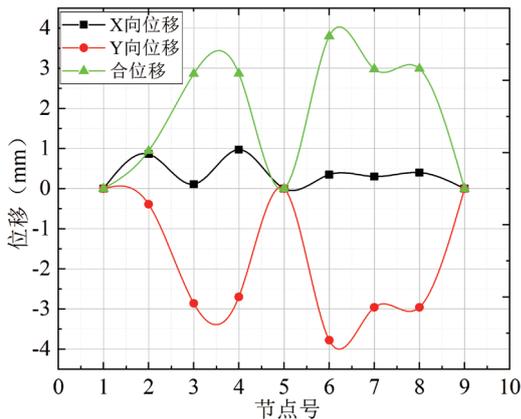
图2 索杆结构体系结构内力

Fig. 2 Structural internal forces of the cable-rod structural system

图3为预应力索杆体系的结构变形图和节点位移曲线，分析可知，结构变形最大位置在施加荷载的结构顶部6号节点，最大位移为3.80mm，支座处位移均为0。由图3（b）和表2可知，X方向的最大位移发生在4号节点，位移值为0.97mm，Y方向最大位移为3.78mm，出现在6号节点，最大合位移3.80mm发生在6号节点，其中3号、4号、7号和8号节点的位移也达到2.8mm以上，结构设计时应注意采取加强措施。



(a) 结构变形



(b) 节点位移

图3结构变形与节点位移

Fig. 3 Structural deformation and nodal displacement

表2 结构节点位移 (mm)

Tab. 2 Structural node displacements (mm)

节点	X	Y	合位移
1	0	0	0
2	0.86	-0.39	0.94
3	0.11	-2.86	2.86
4	0.97	-2.70	2.87
5	0	0	0
6	0.35	-3.78	3.80
7	0.30	-2.96	2.98
8	0.40	-2.96	2.99
9	0	0	0

4 结论

本文利用有限元软件ANSYS针对预应力索杆体系的模态、内力和位移等力学特性及性能展开研究，获得以下主要结论：（1）前六阶固有频率范围为0.14~235.68 Hz，结构第一阶频率较低，结构后五阶自振频率以高频成分为主。（2）X向受拉和受压单元最大内力均为3536.17N，Y方向水平索内力较小，杆和两根斜拉索内力较大，受拉和受压单元最大值均为2500.01N，低于X方向29.3%。（3）单元1、单元2、单元3和单元4均受拉且内力均最大为3536.2N，占比17.4%。单元6受力最小承受压力，仅有407.61N，占比2.01%。（4）结构最大位移3.80mm出现在6号节点，X方向的最大位移0.97mm发生在4号节点，Y方向最大位移3.78mm出现在6号节点。

参考文献：

[1] 刘廷勇, 张爱林, 李久林. 大跨度装配式脊杆环撑索穹顶预应力分布与结构性能研究[J/OL]. 工程力学, 1-12.

[2] 孙求知. 对称预应力索杆体系形态构建及刚度特性研究[D]. 东南大学, 2018.

[3] 李宏胜, 吴逸枫, 付斌等. 瓯海奥体中心体育馆屋盖无环索弦支网壳结构设计[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 中国建筑科学研究院有限公司. 第十八届空间结构学术会议论文集. 中南建筑设计院股份有限公司; 2020: 8.

[4] 石启印, 蔡永刚, 李爱群. 大跨度张弦桁架结构自振特性和地震响应分析[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(03): 154-159.

[5] 熊逸丰. 大跨度弦支穹顶结构的静力稳定性及施工仿真分析[D]. 华南理工大学, 2015.

[6] 戚鹏飞. 圆及类椭圆形弦支穹顶形状参数优化设计研究[D]. 东南大学, 2017.

[7] Yu Zhao, Huasu Wang, Jing Bi, et al. Study on damage-stress loss coupling model of rock and prestressed anchor cable in dry-wet environment[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(12): 1451-1467.

[8] Adriana S. Azevedo, João P. Firmo, João R. Correia, et al. Fire behaviour of reinforced concrete slab strips strengthened with prestressed NSM-CFRP laminates[J]. Engineering Structures, 2023, 297: 116982.

作者简介：

张赵强 (1995.4—) 男, 汉, 籍贯: 安徽省合肥市; 学历: 硕士; 职称: 助理工程师; 研究方向: 工程检测。