

大跨度空间张弦桁架结构自振特性及参数分析

刘艳辉,何庭君,王路明,朱文凯,徐兵坚

(西南交通大学土木工程学院 交通隧道工程教育部重点实验室,四川成都 610031)

【摘 要】 文章对大跨度张弦桁架结构的自振特性进行了研究。以典型铁路站房屋盖空间张弦桁架为研究对象,采用有限元分析方法,讨论了屋面荷载、拉索预拉力、支座类型、撑杆数目等因素对大跨度张弦桁架结构自振特性造成的影响。研究表明:结构的基频为 0.636 5,结构自振频率分布非常密集,前 20 阶结构主要表现为平动和竖向振动,20 阶以后结构以竖向的局部振动和扭转为主;结构承受的荷载对结构 20 阶以后的自振频率影响较大,每增加 0.5 倍荷载,自振频率的减少幅度约降低 5.0 %;预应力、支座类型对张弦桁架结构的自振频率影响很小;撑杆数目增加,结构自振频率减小,撑杆数目对结构高阶模态影响较大。研究成果可对铁路站房抗震设计、动力分析及后期运营维护提供理论基础和设计建议。

【关键词】 大跨度空间张弦桁架; 铁路站房; 自振特性; 有限元分析

【中图分类号】 TU393.3

【文献标志码】 A

随着我国铁路事业的高速发展,张弦桁架结构由于其承载力强、造型多变、良好的整体性能和抗震性能等特点已在我国铁路车站中得到了广泛应用,如大连北站、北京火车北站雨篷、延安火车站等^[1-4]。张弦桁架结构(Truss String Structure,简称 TSS)属于半刚性结构体系,结构整体偏柔,动力响应相对较大,外界条件一旦发生改变,结构的自振特性就会发生明显改变,从而影响结构在动荷载下(地震荷载、风荷载)的动力响应和受力性能分析的准确性^[5-6],因此对张弦桁架结构的自振特性有必要进行深入系统地分析。近年来,大量国内外学者对张弦结构的自振特性进行了研究,并取得不少的成果。Yunjing Nie^[7]对某实际工程的单榀张弦梁进行了模态分析和 4 种不同地震作用下的单向地震时程分析。王秀丽^[8]对某辐射式张弦梁结构体育馆屋盖的振型和频率进行了分析,分析发现辐射式张弦梁结构频谱相当密集,结构基频较小,刚度较弱,建议对结构进行动力分析时,振型数应不少于 40 阶。石启印^[9]基于镇江体育会展中心体育会展馆屋盖模型,研究了预应力、撑杆数、拉索横截面积及约束条件结构前 6 阶自振特性和地震响应的影响以及不同地震波对结构响应的影响。尹越^[10]利用考虑结构几何非线性的单自由度预应力钢结构自振特性分析方法研究预应力和荷载对张弦梁结构的基频影响进行了研究,发现预应力通常增大结构刚度和自振频率,而荷载可能增大或减小结构刚度和自振频率,在对张弦梁这类结构进行自振特性分析时,可以忽略几何非线性的影响,直接采用线性自振频率。张国明^[11]以广州国际会议展览中心 126.6 m 张弦桁架为工程背景,分析结构不同矢跨比、垂跨比、撑杆数量及布置等变化参数对张弦桁架结构基频及第一竖向振型频率的影响。

上述研究多是对张弦结构自振特性理论分析方法和会展中心、体育馆等长期受静力荷载结构的自振特性分析,很少对长期承受高铁车辆运行动荷载的铁路客站的自振特性进行研究,而铁路车站作为大型的交通枢纽,结构的安全性能更是关系着广大旅客的生命和财产安全。同时对自振特

性的研究只涉及到结构基频或者低阶振型,针对张弦梁这类频谱密集的结构,应根据(GB50011-2010)《建筑抗震设计规范》^[12],保证模态分析时振型参与质量达到总体质量的 90 %。

本文以典型高铁站房屋盖张弦桁架为研究对象。利用有限元软件 Midas Gen 2019,结合张弦桁架结构动力特性计算理论,采用 Lanczos 法对进行自振特性分析,并从荷载、预应力、支座类型、撑杆数目 4 个参数的变化系统地对张弦桁架结构的自振特性进行参数分析。研究成果补充了外界条件变化对张弦结构特性影响的相关规律,结合实际工程设计给出相关设计建议,可为既有铁路张弦桁架结构车站后期抗震加固设计及其它动力分析提供理论参考和设计依据。

1 张弦桁架结构动力特性计算理论

由于张弦桁架结构体系阻尼比极小,在做理论分析时可忽略其对结构自振特性的影响,故张弦桁架结构自振特性可采用无阻尼自由振动时的频率及相应振型表示^[13]。阅读文献^[14-16]可知,结构离散化无阻尼多自由度体系自由振动方程可用于张弦桁架结构的自振特性分析计算。

结构离散化无阻尼多自由度体系自由振动方程为:

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

其中 $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 为节点加速度向量; $\{u\}$ 为节点位移向量。 $[M]\{\ddot{u}\}$ 为惯性力, $[K]\{u\}$ 为弹性恢复力。

对边界条件进行处理,从而求解自由振动运动方程得到

[定稿日期] 2019-07-25

[作者简介] 刘艳辉(1969~),女,博士,副教授,主要研究方向为结构工程抗震设计理论、结构撞击机理及防撞设计理论、BIM 研发及应用。

[通信作者] 何庭君(1994~),女,在读硕士,研究方向为结构工程。

广义特征值方程：

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = \{0\}$$
 (2)

若特征值方程有非零解,则有特征行列式：

$$I[K] - \omega^2[M]I = 0$$
 (3)

式中 ω 为圆频率; $\{\varphi\}$ 为振型向量。通过求解行列式(3)得到结构各阶振型频率 ω_i ,将各阶各阶振型频率 ω_i 代入式(2)即可得到对应各阶振型 $\{\varphi\}$ 。

常用的广义特征值解法有多重 Ritz 向量法、子空间迭代法、Lanczos 法等几种,当结构特征值密集时,Lanczos 法相对其它两种方法更快速精确^[16]。

2 工程概况及计算模型

车站站房屋盖采用上部拱形倒三角钢桁架、下部预应力拉索与中间撑杆相结合的张弦桁架结构形式。屋盖整体由 8 榀同样的张弦桁架体系组成,各榀桁架间距为 12 m,各榀桁架之间通过上弦檩条、水平支撑连接保证整体结构的稳定性。张弦桁架采用倒三角立体桁架,桁架网格为四角锥,网格长 2 m,宽 1 m;结构支座跨度为 88.8 m,上下弦距离 1.8 m,桁架矢高 7.8 m,拉索垂度 6.0 m,张弦梁总高 13.8 m,一端为固定铰支座,另一端为可水平滑动铰支座。荷载条件:屋面板荷载 0.5 kN/m²,吊挂荷载 0.3 kN/m²,檩条和水平支撑 0.4 kN/m²,屋面活荷载为 0.5 kN/m²,屋面雪荷载为 0.5 kN/m²。

以单榀桁架结构为研究对象,建立的单榀张弦桁架有限元结构模型(图 1、图 2),建模时上(下)弦杆使用梁单元,腹杆及撑杆使用桁架单元,拉索使用只受拉桁架单元。构件截面参数如表 1。

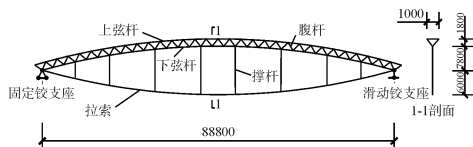


图 1 单榀张弦桁架结构计算模型(单位:mm)

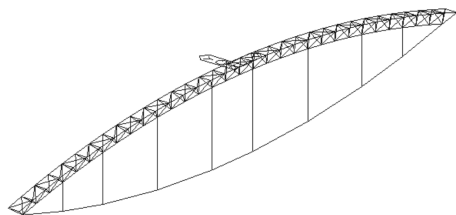


图 2 单榀张弦桁架结构三维模型

表 1 单榀桁架结构基本参数

杆件	截面/mm	材料	弹性模量 × 10 ⁵ /MPa
上(下)弦杆	φ299 × 14	Q345B	2.06
腹杆	φ152 × 8	Q345B	
撑杆	φ159 × 8	Q345B	
拉索	φ100	φ7 × 265 半平行钢丝束	1.85

注:拉索抗拉强度为 1 670MPa,最优预拉力 1 524 kN^[5]

3 自振特性分析

参考(GB 50011 - 2010)《建筑抗震设计规范》^[12],以某铁路车站屋盖张弦桁架为背景进行分析,同时将 1.0 倍恒荷载 + 0.5 倍雪荷载转化为集中质量以考虑结构上的荷载对结构自振特性的影响,采用 Lanczos 法对结构进行模态分析(图 3)。

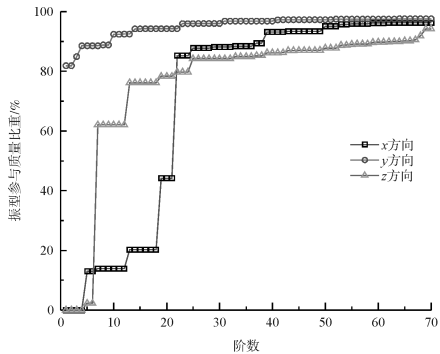


图 3 振型参与质量比重

从图 3 振型参与质量比重可以看出,张弦桁架结构在 70 阶振型参与质量达到总体质量的 90 %,参照规范理论应对结构前 70 阶模态进行分析,但结构前 30 阶三个方向达到振型参与质量达到总体质量的 80 %,30 阶之后振型参与质量变化较小且规律,结合文献[17 - 18],本文对结构前 30 阶自振频率及自振周期进行分析(表 2)。

表 2 结构前 30 阶自振频率

Hz		Hz		Hz	
模态号	频率	模态号	频率	模态号	频率
1	0.1269	11	2.3854	21	6.5784
2	0.6365	12	2.9434	22	6.8797
3	0.6765	13	3.0183	23	7.4064
4	1.1122	14	3.0736	24	8.1904
5	1.2898	15	3.2323	25	8.8227
6	1.3125	16	3.9635	26	9.4870
7	1.4813	17	4.5267	27	9.8782
8	1.9443	18	4.7103	28	10.6243
9	1.9768	19	5.4960	29	11.4957
10	2.3777	20	6.0828	30	11.8570

从前 30 阶阶数 - 自振频率曲线可知(图 4),结构自振频率分布非常密集,结构的第 1 阶振型为桁架的侧向振动,且第 1 阶自振频率接近于 0,这是由于上弦桁架没施加平面外约束即没考虑到檩条支撑的影响导致的,说明对于单向张弦桁架有必要设置上弦撑杆。第 2 阶自振频率为 0.636 5,结构表现为竖向振动,参考文献[19]可知,这才是结构的第 1 自振频率即结构基频。结构的基频值较小,说明该结构刚度值较小、结构体系较柔;同时,随着阶数的增加,结构自振的频率较为平缓地增加,说明结构的刚度分布较为均匀,但结构在第 20 阶后频率值频率增幅明显比前 20 阶更大,其原因是结构跨度大,前 20 阶结构主要表现为平动和竖向振动,

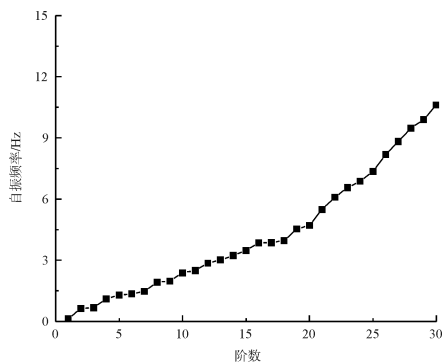


图4 阶数-自振频率曲线(前30阶)

频率低;20 阶及以后结构各阶振动主要表现为竖向的局部振动和扭转,扭转振型的出现对结构刚度影响很大,因而在自振频率数值上呈现明显的变化。

张弦桁架结构的振型主要可以分为水平振型和竖向振型,总体以竖向为主。第 1~4 阶为对称水平振型(图 5),第 5 阶开始呈现竖向振型(图 6);第 9 阶首次出现明显的水平振型与竖向振型耦合的现象(图 7);这与振型参与质量相一致,Y 方向在第一阶振型其参与质量已经达到 80 %,而 X、Z 方向在 1~4 阶振型参与质量均为 0,在第 9 阶 Y 向和 Z 向振型参与质量分别达到了 89 %和 69 %。

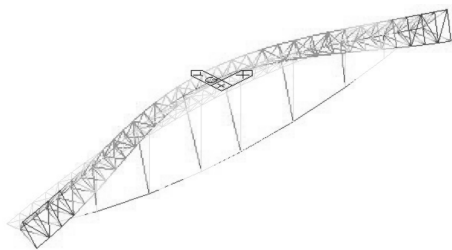


图5 水平振型

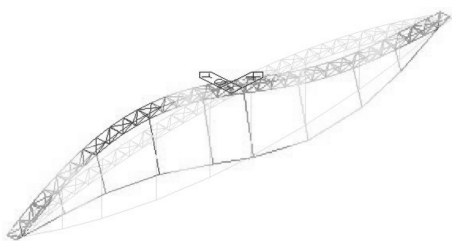


图6 水平振型

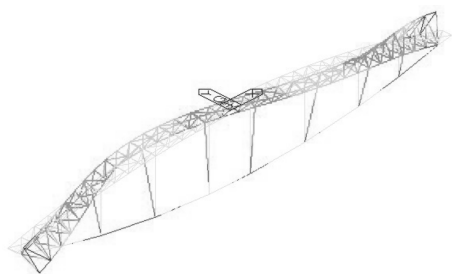
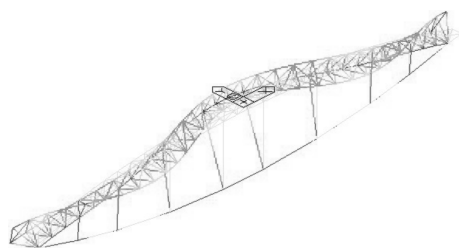


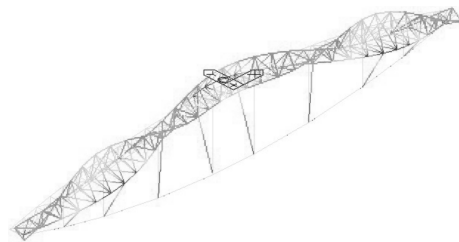
图7 水平、竖向耦合振型

明显的扭转振型在第 14 阶首次出现(图 8(a)),第 20 阶及以后主要为竖向局部振动和扭转振动(图 8(b)),并且随着阶数的增大,扭转程度越明显(图 8(c)),说明结构的竖

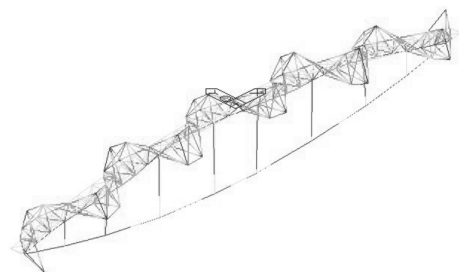
向刚度和扭转刚度较弱。



(a) 第 14 阶



(b) 第 28 阶



(c) 第 43 阶

图8 扭转振型

4 自振特性参数分析

从式(3)可以看出,结构的自振特性实质由结构的质量及结构刚度决定,结构质量变化由结构自重及外荷载两部分组成,张弦桁架的结构刚度受拉索预应力、边界条件及撑杆的设置影响。因此本节从荷载、预应力、支座类型和撑杆数目四个参数的变化来对张弦桁架结构的自振特性进行参数分析^[4,20]。

4.1 荷载的影响

在结构的自振特性分析中,将作用在结构上的荷载转换为集中质量以考虑结构上的荷载对自振特性的影响,所以分析荷载对结构自振频率的影响其实就是分析质量对结构自振特性的影响。结合结构实际承受恒、活荷载及结构分析荷载工况^[18,21],对结构分别施加 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍和 2.0 倍来分析荷载对结构自振频率的影响,结果如图 9。

分析图 9 的结果,可以看出:荷载的变化对结构前 20 阶影响不明显;20 阶之后,由于 20 阶以后扭转振型的存在,随荷载的增加,结构的自振频率减小,并且结构自振频率的减少的幅度也在降低。为进一步研究荷载对自振频率变化幅度的影响,提取 20~30 阶自振频率,并做如下定义:

$$\alpha_{\frac{m}{n}} = \frac{\omega_{ni} - \omega_{mi}}{\omega_{ni}} \times 100\% \quad (4)$$

其中:

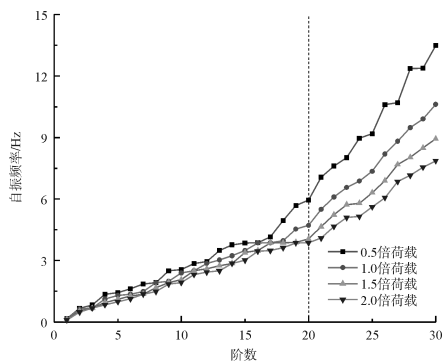


图9 结构前30阶自振频率随荷载的变化

$\alpha_{m/n}$ 为 m 倍荷载相对于 n 倍荷载的自振频率减少率;
 ω_{mi} 、 ω_{ni} 分别为 m 倍荷载、第 i 阶自振频率圆频率和 n 倍荷载第 i 阶自振频率圆频率。

从图 10 可以看出,张弦桁架结构每增加 0.5 倍荷载,自振频率的减少幅度约降低 5.0 %,1.0 倍荷载相对于 0.5 倍荷载自振频率降低 20 %,1.5 倍荷载对于 1.0 倍荷载自振频率降低 15 %,2.0 倍荷载对于 1.5 倍荷载自振频率降低 10 %。这是由于,张弦桁架上部为拱形结构,其受力主要表现为轴向受压,增加荷载相当于轴向压力增加,在轴向压力的作用下体系有效刚度矩阵减小,结构自振频率减小。

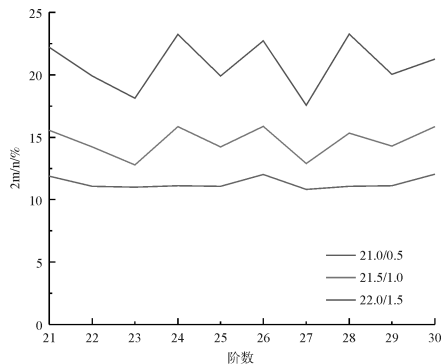


图 10 结构 20 ~ 30 阶自振频率减少率

4.2 预拉力的影响

分别取结构的最优预拉力为 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍分析预拉力对结构自振频率的影响,结果如图 11 所示。

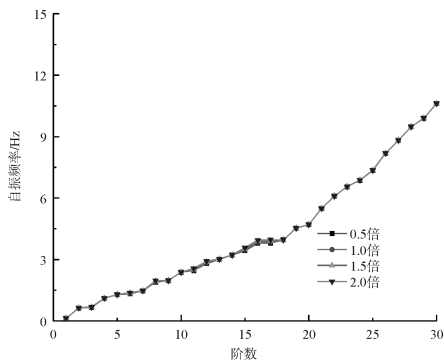


图11 结构前30阶自振频率随预拉力的变化

从图 11 可以看出,随施加拉索预拉力的增加,结构初始响应增大,结构的自振频率增加,随着内力重分布,拉索初始预应力增加,结构的自振频率趋于一致。因张弦梁结构预应

力的几何刚度与其弹性刚度相比是小量,所以拉索预应力的 大小对张弦桁架结构的自振特性影响很小^[22-23],设计时拉 索内预张力的大小满足结构的反拱要求即可。

4.3 支座类型的影响

以施加 1.0 倍恒荷载 + 0.5 倍雪荷载,预拉力为最优预 拉力时为标准模型,建立如表 3 四种常用的支座模型,研究 支座约束条件对张弦桁架自振特性的影响,结果如图 12 所示。

从以上分析结果可以看出,结构支座约束越强,结构的 自振频率越大,但增幅极小,因此支座类型对张弦桁架结构 的自振频率影响较小。在实际设计过程中尽量采用一端固 定铰支座,一端滑动铰支座的形式,这样张弦桁架的整体受 力形成理想简支形式,可以很好的释放桁架中的温度预应 力,同时不对下部结构产生较大推力,大大简化下部结构和 基础结构的设计。

表 3 模型介绍

模型	支座约束
模型 1	一端固定铰接,一端滑动铰接
模型 2	两端固定铰接
模型 3	一端刚接,一端固定铰接
模型 4	两端刚接

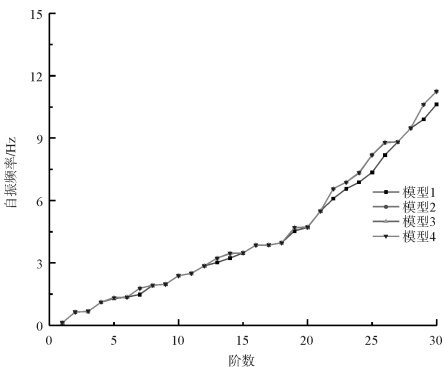


图 12 结构前30阶自振频率随支座类型变化

4.4 撑杆数目的影响

站房桁架屋面原结构有 8 根撑杆,现分别取撑杆数为 4 根、6 根、8 根、10 根、12 根进行对比分析研究。

从图 13 可以看出,张弦桁架结构整体随着撑杆数目的 增加,结构的自振频率减小,其变化规律与所分析自振频率 阶数有关。第 1 ~ 13 阶,随着撑杆数目的变化,桁架自振频率 几乎没有变化;第 13 阶之后,设置 4 根和 6 根撑杆的桁架结构 自振频率出现明显差异;设置 8 根、10 根、12 根的桁架在 20 阶 之后变化。因此,在实际设计过程中,不需考虑高阶模态的张 弦桁架结构可根据建筑要求及桁架结构整体稳定性确定撑杆 的位置和数目;对于需要考虑分析高阶模态的张弦桁架结构, 应对撑杆数目对结构动力响应的影响做进一步分析。

5 结论及设计建议

本文基于典型铁路车站屋盖张弦桁架结构,利用有限元 软件研究了结构的自振特性,考虑荷载、预应力、支座类型、

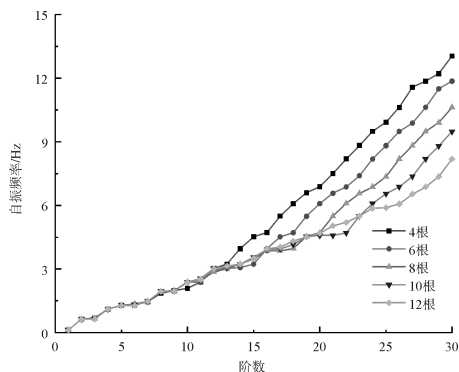


图13 结构前30阶自振频率随撑杆数目变化

撑杆数目4个参数的变化对张弦桁架结构的自振特性的影响得出如下结论:

(1)结构的基频为0.636 5,结构的基频值较小,结构体系较柔;随着阶数的增加,结构自振的频率较为平缓地增加,说明结构的刚度分布较为均匀;结构前20阶结构主要表现为平动和竖向振动,20阶及以后结构各阶振动是竖向的局部振动和扭转,并且随着阶数的增大,扭转程度越明显。

(2)荷载对结构前20阶自振频率影响较小;20阶后,桁架结构每增加0.5倍荷载,自振频率的减少幅度约降低5.0%。在铁路站房实际工程设计过程中,屋面恒载由屋面做法确定,单榀桁架荷载的大小主要由各榀桁架的间距即柱距决定。因此,在设计柱距时,除了考虑规范要求,还应考虑其与荷载的关系,通过设置合理的柱距将单榀桁架承受的荷载控制在一定范围内。

(3)预拉力、支座类型对张弦桁架结构的自振频率影响很小,对结构刚度的影响十分有限。

(4)自振频率随撑杆数目的增加而减小;撑杆数目对结构高阶模态影响较大。设置4根、6根撑杆的桁架在13阶出现明显变化,8根、10根、12根撑杆的桁架在20阶后变化较大。工程设计中撑杆间距一般按工程经验取跨度的 $1/8 \sim 1/12$,满足文献[24]中的验算条件即可,并没有相关规范,但本文研究表明,撑杆数目对高阶振型有较为明显的影响。因此,对于结构的撑杆数目还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 常篷,郭子昭,杨娜. 基于概念分析的铁路客站结构优化研究[J]. 中国铁道科学,2012,33(2):59-65.
- [2] 黄永安. 西宁站站房倾斜框架柱和拱形钢桁架结构设计研究[J]. 铁道标准设计,2014(6):150-152.
- [3] 张毅刚. 张弦结构的十年(一)——张弦结构的概念及平面张弦结构的发展[J]. 工业建筑,2009,39(10):84-89.
- [4] 陈志华. 张弦桁架结构体系[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [5] 徐珂. ANSYS 建筑结构分析应用[M]. 中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 余佳亮. 无站台柱张弦桁架雨棚结构性能分析与倒塌模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [7] Yunjing Nie, Tiejing Li. The Seismic Performance of Single Beam String Structure [J]. Advanced Materials Research, Vols. 243 - 249 (2011) :1013 - 1017.
- [8] 王秀丽,李晓飞,薛晓峰. 辐射式张弦梁结构自振特性和地震响应分析[J]. 空间结构,2010,2010(1):24-29.
- [9] 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(3):154-159.
- [10] 尹越,冯涛,郑力. 预应力钢结构自振特性研究[J]. 天津大学学报. 自然科学与工程技术版,2017,50(Suppl):169-174.
- [11] 张国明,梁令枝,徐忠根,等. 大跨度张弦桁架自振特性参数分析[J]. 四川建材,2017,43(5):46-47.
- [12] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 王秀丽,丁南生,崔继付. 张弦梁结构的自振特性分析[J]. 兰州交通大学学报,2006,32(4):105-108.
- [14] 廖允峰. 单榀或多榀桁架预应力损失对张弦桁架抗震性能影响分析[D]. 广州大学,2018.
- [15] 李杰,李国强. 地震工程学导论[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [16] 杜瑞明,姚佳. Lanczos 向量叠加法[J]. 地震工程与振动工程,1992,11(1):1-6.
- [17] 刘阳. 大跨度空间张弦桁架结构稳定性与静动力性能分析[D]. 广州:广州大学,2015.
- [18] 樊铁江. 铁路客站大跨叠层桁架结构受力分析[J]. 铁道标准设计,2019,63(2):120-125.
- [19] 曾滨,周臻,朱冬平,等. 罕遇地震下自定心支撑张弦桁架振动响应分析[J]. 振动测试与诊断,2017,37(6):1195-1200.
- [20] 余志祥,赵雷. 张拉膜结构自振特性分析[J]. 西南交通大学学报,2004,39(6):734-738.
- [21] 朱丹晖,淳于铭,张秀山. 张弦桁架钢结构雨棚设计[J]. 铁道标准设计,2012,32(10):112-115.
- [22] 沈世钊,徐崇宝,赵辰. 悬索结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [23] 张汝清,詹先义. 非线性有限元分析[M]. 重庆:重庆大学出版社,1990,175-185.
- [24] 王帆,舒宣武,李旗. 张弦梁结构设计中几个概念问题的探讨[J]. 工业建筑,2004.