

刘影,刘德贵.抗震约束下大跨度空间钢结构设计中支吊架的合理选取[J].地震工程学报,2019,41(3):631-637.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.631

LIU Ying,LIU Degui.Reasonable Selection of Support and Hanger in the Design of Long-span Spatial Steel Structures Under Seismic Constraints[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):631-637.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.631

# 抗震约束下大跨度空间钢结构 设计中支吊架的合理选取

刘影<sup>1</sup>,刘德贵<sup>2</sup>

(1.成都师范学院物理与工程技术学院,四川成都610000;2.西南科技大学,四川绵阳621010)

**摘要:**大跨度空间钢结构设计中,合理选取支吊架对建筑的抗震性有着重要的影响,当前设计过程中未考虑支吊架组合后的抗震性能。综合选取适用于大跨度空间钢结构的支吊架结构,使其具有更优的抗震性能。首先给出目前应用较多的三种结构,其次给出一定的抗震约束条件,如承载力、应力应变与拉伸变形等。在条件约束下,给出具有抗震能力的支吊架选取模型并给出具体计算示例,选取和组合具有一定抗震能力的大跨度空间钢结构支吊架。结果表明,相较于传统的随机支吊架选取方式,具有抗震能力的模型下支吊架核心钢结构抗震水平明显提升。

**关键词:**大跨度;空间钢结构;支吊架;施工抗震;内力值

中图分类号: TU393

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0631-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.631

## Reasonable Selection of Support and Hanger in the Design of Long-span Spatial Steel Structures Under Seismic Constraints

LIU Ying<sup>1</sup>, LIU Degui<sup>2</sup>

(1.College of Physics and Engineering, Chengdu Normal University, Chengdu 610000, Sichuan, China;

2.Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

**Abstract:** In the design of long-span spatial steel structures, reasonable selection of the support and upper hanger combination has an important influence on the seismic resistance of the structure. However, such factors are not taken into account in present designs. The main purpose of this paper is to comprehensively select the suitable support and hanger structure for the long-span spatial steel structure, in the hope of better seismic performance. First, three kinds of widely-used contemporary structures were listed. Second, some seismic constraint conditions, such as bearing capacity, stress-strain, and tensile deformation, were presented. Considering seismic constraints, the selection model for the support and hanger with anti-seismic capacity were given along with a concrete calculation example. The support and hanger of long-span spatial steel structure was selected, with a certain seismic capacity considered. The experimental results of the

收稿日期:2018-11-25

基金项目:四川省教育厅项目(15ZB0122)

第一作者简介:刘影(1983-),女,四川阆中人,讲师,硕士,研究方向:结构工程。E-mail:mefzg2018@sina.com。

long-span spatial steel structure showed that the seismic level of the core steel structure with the model was obviously improved compared with the traditional random hanger selection method.

**Keywords:** large span; spacial steel structure; support and hanger; construction aseismic; internal force value

## 0 引言

大跨度空间钢结构建筑因能实现人们对建筑平面、空间造型的质量要求,成为热门建筑结构之一<sup>[1]</sup>。近几年,大跨度空间结构建筑得到快速发展,空间结构的复杂程度也逐渐加深。该建筑形式广泛应用在体育馆、火车站、机场等重要公共设置中<sup>[2]</sup>,公共设施对建筑质量的要求较高,尤其在地震等灾害多发地区,如何确保这些工程在施工和使用过程中的安全性是人们长期关注的重要课题。

大跨度空间钢结构建筑中以使用支吊架为主,结构的抗震性能主要取决于支架选取与组合应用中的抗震性。对支吊架选取的抗震性研究也成了建筑施工抗震中必不可少的一部分。在抗震设防烈度为Ⅵ度及以上地区,在施工过程中必须对大跨度空间钢结构建筑的支吊架进行特殊的施工抗震设计。国内外学者对此也做了相关研究。杨大彬等<sup>[3]</sup>提出大跨度网壳结构抗震性能研究,分离处理下部支承结构,将其分为可承受屋盖水平及竖向荷载的部分和只承受屋盖竖向荷载部分,降低震害影响,实验结果表明所设计整体模型用钢量较少,在小震及大震下抗震性能良好。Lee等<sup>[4]</sup>提出将4组钢板开缝板进行组合,设计了新型阻尼器用于结构抗震加固,在循环加载试验下评价其抗震能力。试验结果表明,在极限承载力作用下,可以有效抑制建筑物的位移,具有较好的钢结构建筑抗震作用。

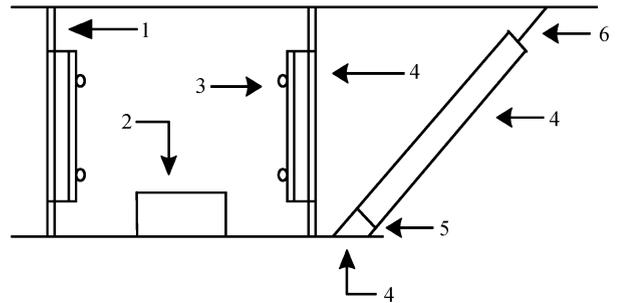
为给大跨度空间钢结构建筑施工过程提供明确的抗震设计结构,本文结合抗震支吊架、侧向抗震支吊架和纵向抗震支吊架,研究其在抗震约束下的合理组合模型,模型通过计算支吊架抗地震冲击的构件内力值,结合相关内力值选取抗震支吊架的种类,选取和组合具有一定抗震能力的大跨度空间钢结构支吊架,为同类结构建筑的施工和抗震设计提供参考。

## 1 大跨度空间钢结构支吊架抗震特征分析

建筑设计中主要有三种大跨度空间钢结构支吊架基础单元,分别为抗震支吊架、侧向抗震支吊架、纵向抗震支吊架。在施工时,大跨度空间钢结构支吊架是根据抗震计算结果进行选取与组合的。三种

形式支吊架的设计结构图及描述如下:

(1) 抗震支吊架:以地震为主要荷载的抗震支撑设施,与大跨度空间钢结构构件牢固连接,由锚固件、加固吊杆、抗震连接构件和抗震支撑构成。其结构如图1所示。

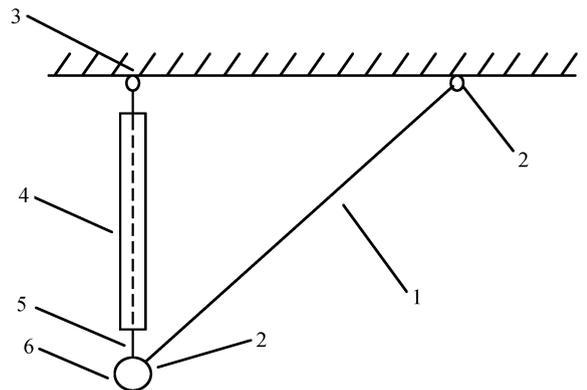


1. 长螺杆;2. 设备或管道;3. 螺杆紧固件;4. C型槽钢;  
5. 快速抗震连接构件;6. 抗震连接构件

图1 抗震支吊架结构

Fig.1 Structure of aseismic support and hanger

(2) 侧向抗震支吊架:斜撑和管道截面平行的抗震支吊架。其结构如图2所示。



1. 斜撑;2. 抗震连接构件;3. 锚固件;4. 螺杆锚固件;  
5. 承重吊杆;6. 管道

图2 侧向抗震支吊架结构图

Fig.2 Structure diagram of lateral seismic support and hanger

(3) 纵向抗震支吊架:斜撑和管道截面垂直的抗震支吊架。其结构如图3所示。

## 2 基于抗震内力计算的支吊架选取模型设计

当地震发生时,抗震支吊架能够令支撑面在横、纵两个方向进行限制性位移,避免发生碰撞而产生

破坏。大跨度空间钢结构支吊架系统的安装和布置原则都是严格依照力学抗震计算结果确定的。在选取支吊架的过程中,由于抗震连接构件起到主要的抗震作用,故主要考察其压力承受以及变形状况。将抗震支吊架的连接构件等效为弹簧支撑,构建弹簧支撑的地震作用下变形模型如图 4 所示。

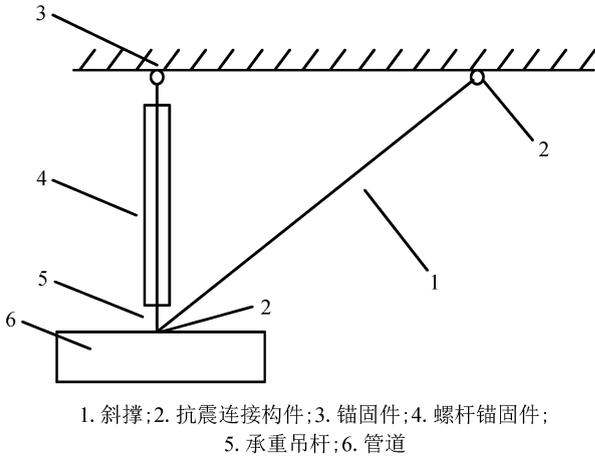


图 3 纵向抗震支吊架结构

Fig.3 Structure diagram of longitudinal aseismic support and hanger

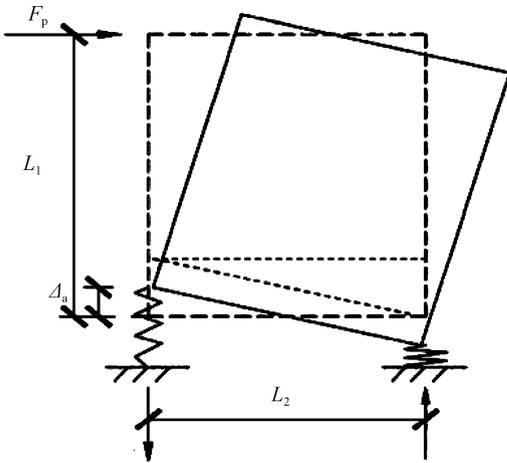


图 4 地震作用下的弹簧支撑变形示意图

Fig.4 Schematic diagram of spring bracing deformation under earthquake action

得到抗震支吊架的抗压刚度  $k$  与钢结构抗剪承载力及相对变形的关系为:

$$k = \frac{2F_p L_1}{L_2 \Delta a} \quad (1)$$

式中: $\Delta a$  为地震作用下的竖向相对变形; $L_1$ 、 $L_2$  分别为钢结构的高度和宽度。

依据弹簧支撑受力变形状况,将钢结构建筑的整体受力模型简化如图 5 所示。

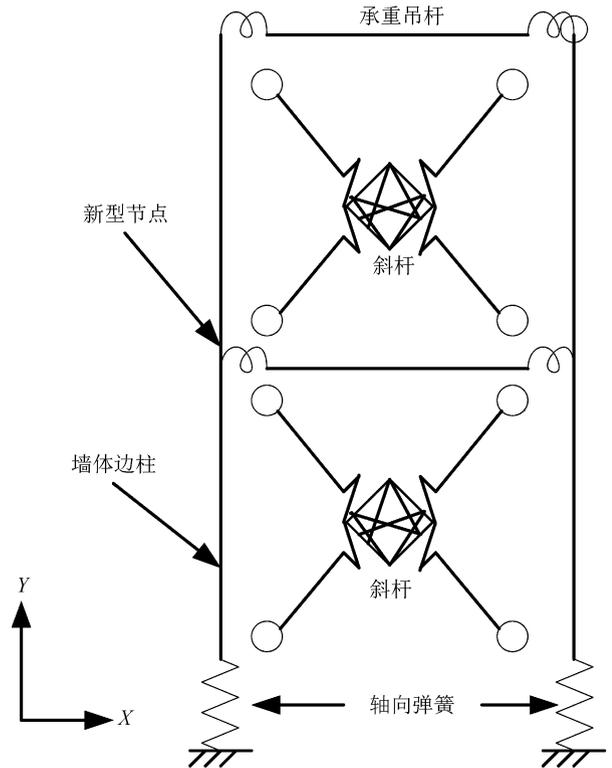


图 5 钢结构建筑的整体受力简化模型

Fig.5 Simplified model of overall force of steel-structure building

依照等效侧力法,运算过程中的水平地震力为:

$$H = x\mu\zeta_1\zeta_2 a_{max} K \quad (2)$$

式中: $H$  为沿最差方向施加于大跨度空间钢结构设施重心处的水平地震作用力标准值; $x$  为非结构构件功能参数,取值设定为 0.8(常规条件下固定值); $\mu$  为非结构构件类别参数; $\zeta_1$  为状态参数,对支撑点低于重心的任何设备宜取 2.1,其他情况宜取 1.2; $\zeta_2$  为位置参数,沿高度线性分布,钢结构的顶点可取 2.0,底部可取 1.1; $a_{max}$  为地震响应参数最大值; $K$  为非结构构件的外部重量,包括操作时的相关人员、管道和储运柜中的物品重量。

综合上述的水平地震力以及整体受力简化模型,在地震作用下,钢结构支吊架的应力  $\sigma$  和应变  $\varepsilon$  分别为:

$$\sigma = \frac{H}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{H}{AE} \quad (4)$$

式中: $A$  代表钢结构的横截面积; $E$  代表钢结构的弹性模量。

此时支吊架的拉伸变形为:

$$\Delta l = \varepsilon L_1 = \frac{H}{AE} L_1 \quad (5)$$

令总位移为  $M$ , 则抗震连接构建的变形量  $\delta$  为:

$$\delta = M - \Delta l = M - \frac{H}{AE} L_1 \quad (6)$$

若在地震作用下, 支吊架中的抗震连接构件变形等效为弹簧变形, 则抗震连接构件的内力值  $Q$  为:

$$Q = \frac{H}{\delta} = \frac{1}{\frac{M}{H} - \frac{L_1}{AE}} \quad (7)$$

根据不同成品类型、不同组合、不同间距的抗震支吊架, 计算出间距范围内全部的重力荷载值<sup>[8]</sup>。再依照规则获得所计算的抗震支吊架的状态参数、位置参数以及功能类别参数, 进而计算出此大跨度空间钢结构支吊架的水平地震作用情况。根据计算得到的水平地震作用情况, 对每个构件进行受力分析, 得到每个构件的内力值, 进而选取不同支吊架形式。

例如: 以 DN300 支架为例, 材质为钢管, 根据规范可知其对应的数据为: 每米钢管重量 78.42 kg, 即  $K_{水} = 0.7693 \text{ kN/m}$ 。

根据大跨度空间钢结构工程施工抗震设计规范, 查询抗震支吊架间距, 按  $J_{水} = 11 \text{ m}$  计算, 则有:

$$K = K_{水} \times J_{水} = 0.7693 \times 11 = 8.4623 \text{ (kN)} \quad (8)$$

$$H = x\mu\zeta_1\zeta_2a_{\max}K = 0.8 \times 1.3 \times 2.1 \times 2.0 \times 0.09 \times 8.4623 = 3.3267 \text{ (kN)} \quad (9)$$

根据支架施工抗震设计规范, 大跨度空间钢结构设施构件选取支架的模型为:

$$P = x_K P_{KD} + x_{DM} P_{DMF} \quad (10)$$

式中:  $P$  为构件内力组合的设计值;  $x_K$  为重力荷载分项参数, 通常取 1.1<sup>[9]</sup>;  $x_{DM}$  为水平震动作用分项参数, 取 1.2;  $P_{KD}$  为重力荷载关键值的效应;  $P_{DMF}$  为水平地震作用标准值的效应。

根据力学计算得出斜撑和吊杆支架的内力组合设计值, 则有  $P_{斜撑} = 4.95 \text{ kN}$ ,  $P_{吊杆} = 3.83 \text{ kN}$ 。

表 2 静载作用下钢结构支吊架杆件轴力 (单位: kN)

Table 2 Axial force of members of steel structure support and hanger under static loading (Unit: kN)

工况	类型杆件			
	上弦杆 F-1	下弦杆 F-2	竖腹杆 F-3	斜腹杆 F-4
施工阶段	1 840	1 975	54	2 381
使用阶段	2 826	2 923	295	4 283

由表 2 可以看出, 使用阶段弦杆最大轴力是 2 923 kN, 腹杆最大轴力是 4 283 kN。由于施工阶段钢结构支吊架为滑动支撑, 支吊架中部弯矩变大,

根据计算得到大跨度空间钢结构支吊架构件内力值, 依据该模型对大跨度空间钢结构支吊架进行选取。

### 3 选取方法的测试实验分析

#### 3.1 内力计算与支吊架选取

利用上述模型, 对某一建筑工地的支吊架进行内力计算, 选出合适的支吊架基础单元, 组成最优支吊架。另外, 利用传统的支吊架间距计算标准比较分析方法设计支吊架的结构。对两者的结构抗震性进行对比分析。

核心钢结构支吊架 K-1 的内力计算结果如表 1 所列。从该表可以看出, 本文方法使用阶段钢结构支吊架 K-1 剪力最大值为 (V) 992 kN, 在施工阶段连廊两端选择更为合理的滑动支撑, 左、右两个钢结构支吊架不会受到连廊两端分配过来的剪力作用, 在使用阶段左、右两个钢结构支吊架能承担连廊两端传递过来的剪力, 因为连廊自重施工阶段已经施加完成, 所以钢结构支吊架承受的剪力比较小。

表 1 静载作用下核心钢结构 K-1 内力

Table 1 Internal force of core steel structure K-1 under static loading

工况	杆件部位	内力/kN
施工阶段	N	4 346
	M	1 179
	V	70
使用阶段	N	5 622
	M	2 074
	V	992

静载作用下支吊架杆件的轴力分布规律为: 上弦杆中部轴压力最大 (N), 桁架两端逐渐减小, 端部弦杆承担轴向拉力, 下弦杆中部轴压力最大 (M), 桁架两端逐渐减小; 斜腹杆中部轴力最小, 桁架两端逐渐变大。在静载作用下, 受力最大的杆件中部位位置弦杆 F-1、F-2 和支座腹杆 F-3、F-4 的内力计算结果如表 2 所列。

进而令弦杆轴力相应增加, 而斜腹杆轴力变化较小, 说明边界情况的变化对腹杆受力影响不大。从整体上看, 应该选取第二种侧向抗震支吊架。

### 3.2 抗震作用分析与对比

实验测试采用振型分解反应谱法,使用 SATWE 软件进行抗震分析,设置基本地震加速度值为  $0.15g \sim 0.20g$ 。工程抗震设防类别为标准设防,抗震设防烈度是 8 度,场地类别为 III 类,设置地震分组为第一组,大跨度钢结构剪力抗震等级为一级,框架抗震等级为二级。

#### (1) 动力作用下的位移和振型质量参数变化分析

运用上文设计的支吊架组合方法与支吊架间距计算标准比较分析方法,进行震动条件下大跨度钢结构支吊架结构在不同坐标轴上的位移和振型质量参数的对比(表 3)。从该表可以看出,支吊架间距计算标准比较分析方法的大跨度钢结构支吊架在不同坐标轴下的震动位移较大,动力性能较差。而本文方法的大跨度钢结构支吊架基本位移较小,因此,本文方法的大跨度空间钢结构地震影响参数曲线由反应谱

平台段变化到下降段,有效改善了大跨度空间钢结构的动力性能,其抗震水平也随之增高。

表 3 两种方法模态特性对比

Table 3 Comparison between modal characteristics using two methods

	本文方法 /cm	支吊架间距计算标准 比较分析方法/cm
1	0.37(Y)	0.58(Y)
2	0.33(X)	0.47(X)
3	0.28(XY)	0.43(XY)
4	0.26(Z)	0.32(Z)
5	0.21(X)	0.23(X)
6	0.28(Z)	0.22(Z)
质量参数	99.55%(X)	96.89%(X)
	99.55%(Y)	97.11%(Y)

#### (2) 支吊架剪力的对比与分析

支吊架间距计算标准比较分析方法、大跨度拱形管桁刚架空间网格钢结构施工阶段结构分析方法与本文方法的剪力对比结果如图 6 所示。

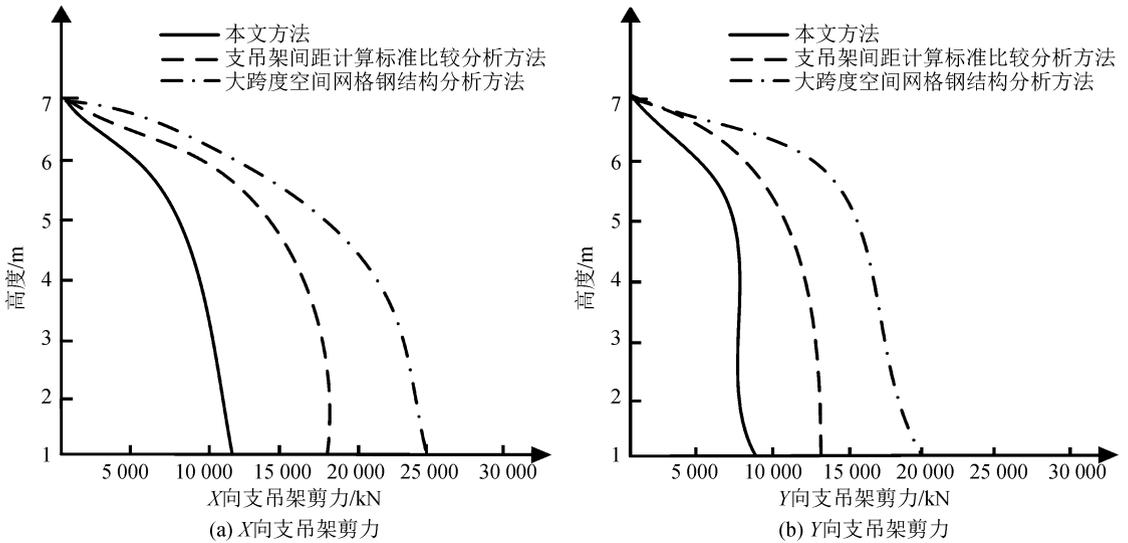


图 6 三种方法支吊架剪力对比

Fig.6 Comparison between shear forces of support and hanger using three methods

从图 6 中可以看出,相比支吊架间距计算标准比较分析方法,本文方法的支吊架剪力显著降低,X 向基底剪力由 18 035 kN 减小到 11 972 kN,降幅达到 33%;Y 向基底剪力由 13 937 kN 减小到 9 177 kN,降幅达到 34%。相比大跨度拱形管桁刚架空间网格钢结构施工阶段结构分析方法,本文方法的支吊架基底剪力也明显降低。这说明运用合理的支吊架,作用在大跨度空间钢结构上的地震作用会大幅下降。因此,本文方法设计的大跨度空间钢结构

支吊架的抗震效果更强。

### 3.3 对比分析地震冲击下支吊架静力弹塑性 (Pushover 能力分析)

在地震冲击下,测试不同方法下大跨度空间钢结构支吊架沿 Y 向推覆分析的 Pushover 能力曲线(图 7),这种曲线可间接反映抗震性能。

由图 7 可以看出,运用本文方法合理设计选取支吊架,该支吊架下的 Y 向 Pushover 能力曲线总体上呈单调均匀变化,说明在推覆分析过程中,构件

分批依次达到屈服状态,整个大跨度空间钢结构屈服是一个渐变的过程。而另外两种方法的曲线波动较大,当基底剪力为 6.5 kN 时,本文方法的顶点位移为 25 mm,另外两种方法的顶点位移分别为 43 mm、56 mm。因此,可以看出在相同基底剪力作用下,经本文方法设计选取的支吊架的顶点位移更小,说明大跨度空间钢结构的稳定性更高、抗震性能更好。

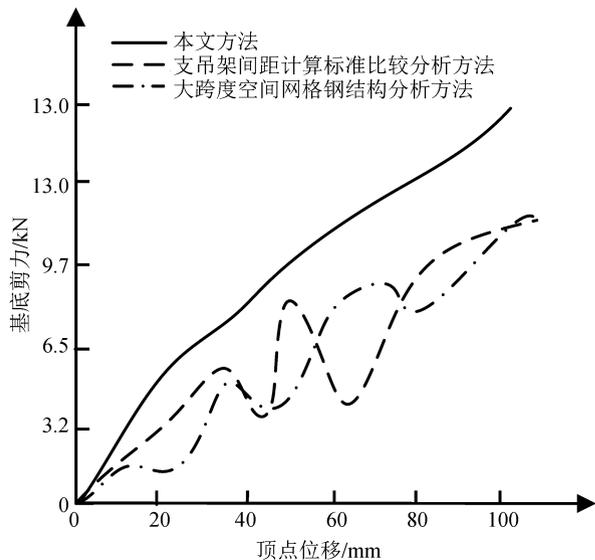


图7 三种方法的 Pushover 能力曲线

Fig.7 Pushover capability curves of three methods

## 4 结论

本文研究的大跨度空间钢结构支吊架设计与选取方法,通过综合选取适合的支吊架结构,以适用于大跨度空间钢结构,且具有更优的抗震性能。几种方法经实验测试结果表明,通过对动力作用下的位移和振型质量参数变化分析、支吊架剪力的对比与分析、支吊架静力弹塑性分析(Pushover 能力分析)的对比分析,得到结论:根据本文研究的大跨度空间钢结构抗震内力计算结果选取的抗震支吊架,与支吊架间距计算标准比较分析方法相比,核心钢结构支吊架的静力弹塑性与抗震性能显著提升。

随着国家相关规范的健全以及相关技术的完善,抗震支吊架系统将会贯穿将来复杂工程设计之中,最大力度地保障人民生命和财产安全。本文方法为相关研究提供理论依据。鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节在此恕不能做更多详述,有兴趣的读者可与作者联系讨论。作者

水平有限,文中遗漏之处及错误难免,恳请阅者给予批评指正。

## 参考文献(References)

- [1] 操礼林,庄庆文,郑可恪,等.人行荷载作用下大跨度梁加速度反应谱研究[J].科学技术与工程,2017,17(25):127-132.  
CAO Lilin, ZHUANG Qingwen, ZHENG Keke, et al. Acceleration Response Spectrum Research of Large Span Beam under Pedestrian Loads [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25): 127-132.
- [2] 崔路苗,郭志宇.地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析[J].地震工程学报,2018,40(1):54-59.  
CUI Lumiao, GUO Zhiyu. Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 54-59.
- [3] 杨大彬,云超光,吴金志,等.基于下部支承分离式设计的大跨度网壳结构抗震性能研究[J].振动与冲击,2018,37(3):237-242.  
YANG Dabin, YUN Chaoguang, WU Jinzhi, et al. Aseismic Performance of Large Span Latticed Domes with Separated Substructures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 237-242.
- [4] LEE J, KIM J. Development of Box-shaped Steel Slit Dampers for Seismic Retrofit of Building Structures [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 934-946.
- [5] 韩凌,蒋晓洪,周骁雄,等.大跨度空间钢结构楼面行走式塔式起重机施工技术[J].施工技术,2016,45(11):108-110.  
HAN Ling, JIANG Xiaohong, ZHOU Xiaoxiong, et al. Construction Technology of Walking-type Tower Crane for Long-span Spatial Steel Structure [J]. Construction Technology, 2016, 45(11): 108-110.
- [6] 高晓频,张方绮,安永尧.管道支吊架间距计算标准比较分析[J].热力发电,2016,45(12):119-123.  
GAO Xiaopin, ZHANG Fangqi, AN Yongyao. Comparative Analysis of Calculation Standards for Pipe Hanger Interval [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(12): 119-123.
- [7] 吕志军,侯瑞,宋一铭,等.不同荷载工况下高层薄壁钢结构的抗震性能研究[J].计算机集成制造系统,2017,23(9):1899-1906.  
LÜ Zhijun, HOU Rui, SONG Yiming, et al. Seismic Behavior of High Thin-walled Steel Structure with Different Load Distribution [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(9): 1899-1906.
- [8] 王晓明,于吉圣,张兆平,等.超高层建筑中大跨度空中平台整体提升施工技术研究[J].钢结构,2014,29(12):65-68.  
WANG Xiaoming, YU Jisheng, ZHANG Zhaoping, et al. Integral Lifting Construction Technology of Long-span Aerial Platforms in Super High Rise Building [J]. Steel Construction, 2014, 29(12): 65-68.

- 2014,29(12):65-68.
- [9] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带 Z 字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(8):31-41.  
ZHANG Ailin, GUO Zhipeng, LIU Xuechun, et al. Analysis of Seismic Behavior of Prefabricated Steel Frame Joints With Z-shaped Cantilever Beam Splicing[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8):31-41.
- [10] 谈磊,宁帅朋,韩丽婷.输电线路工程预应力灌注桩防蚀设计及施工工艺[J].电力工程技术,2017,36(6):63-67.  
TAN Lei, NING Shuaipeng, HAN Liting. Anti-corrosion Design and Construction Technology for Prestressed Cast-in-place Pile with Serious Corrosion in Transmission Line Towers[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(6):63-67.
- [11] 尹凌峰,王康,徐正林,等.钢货架结构纵向抗侧体系及抗震性能分析[J].物流技术,2015,34(8):163-166.  
YIN Lingfeng, WANG Kang, XU Zhenglin, et al. Analysis of Lateral Anti-Leaning System and Shake-Proof Performance of Steel Racking Systems [J]. Logistics Technology, 2015, 34(8):163-166.
- [12] 张艳霞,宁广,张贺昕,等.再生仿古建砖夹心墙体抗震性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):85-91.  
ZHANG Yanxia, NING Guang, ZHANG Hexin, et al. Test Research on Seismic Behavior of Recycled Archaized Brick Cavity Wall[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5):85-91.
- [13] 舒兴平,曹福亮,卢倍嵘,等.基于增量动力分析法的大跨度空间管桁架结构地震易损性分析[J].工业建筑,2016,46(3):108-112.  
SHU Xingping, CAO Fuliang, LU Beirong, et al. Seismic Fragility Analysis of Large-span Spatial Pipe-truss Based on Incremental Dynamic Analysis Method[J]. Industrial Construction, 2016, 46(3):108-112.
- [14] 张忠良.一种考虑地震动不确定性的钢结构抗震设计方法研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(1):108-112.  
ZHANG Zhongliang. A Seismic Design Method for Steel Structures in Consideration of Uncertainty of Ground Motion [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(1):108-112.
- [15] 杨晓敏.钢结构建筑顶棚的抗震性测试分析研究[J].科技通报,2015,31(10):151-153.  
YANG Xiaomin. Analysis of Aseismic Test of Steel Structure Building Roof [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(10):151-153.