

基于模态分析法的钢组合结构支座选取分析

魏国庆^{1,2}, 孟媛³, 王占魁⁴

(1. 青岛市公路事业发展中心, 山东 青岛 266071; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
3. 青岛市招标中心, 山东 青岛 266072; 4. 潍坊市白浪河水库运营维护中心, 山东 潍坊 261052)

摘要: 为研究不同支座类型对结构振型和自振周期的影响, 利用有限元分析软件 SAP2000 对西安某体育馆进行建模, 研究刚性铰接支座与弹性支座两种支座类型下大悬臂桁架与网架组合结构的模态特性。结果表明: 固定铰支座模型与弹性支座模型两者的自振频率相差较大, 相较于弹性支座模型, 固定铰支座模型第一阶自振频率由 1.587 41 降低到 1.125 8, 减小了 41.0%, 频率波动较大; 弹性支座模型模态振型整体刚度分布均匀, 属于整体振动, 结构的第一振型以 Z 方向的竖向振动为主, 振型-频率曲线更为平缓, 更适用于大悬臂桁架与网架组合结构。

关键词: 大悬臂桁架与网架组合结构; 模态特性; 支座类型; 有限元分析

中图分类号: TU398⁺.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)04-0031-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.04.047

Selection analysis of steel composite structure support based on modal analysis method

WEI Guoqing^{1,2}, MENG Yuan³, WANG Zhankui⁴

(1. Qingdao Highway Development Center, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Institute of civil engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. Qingdao Tendering Center, Qingdao 266072, Shandong, China;
4. Weifang Bailanghe Reservoir Operation and Maintenance Center, Weifang 261052, Shandong, China)

Abstract: In order to study the influence of different bearing types on the vibration mode and self-oscillation period of the structure, a stadium in Xi'an is modeled by using the finite element analysis software SAP2000, and the modal characteristics of the large cantilever truss and mesh frame combined structure with rigid articulated bearing and elastic bearing are investigated under the two types of bearings. The results show that: the difference between the self-oscillation frequency of the fixed-hinge bearing model and the elastic bearing model is large, compared with the elastic bearing model, the first-order self-oscillation frequency of the fixed-hinge bearing model is reduced from 1.587 41 to 1.125 8, which is 41.0%, and the frequency fluctuates a lot; the modal vibration pattern of the elastic bearing model has uniform distribution of the overall stiffness, which is an integral vibration, and the first vibration pattern of the structure is dominated by the vertical vibration in the Z direction, and the vibration pattern-frequency curve is dominated by the vibration pattern-frequency curve. The first vibration mode of the structure is dominated by vertical vibration in Z-direction, and the vibration mode-frequency curve is more gentle, which is more suitable for the combination structure of large cantilever truss and net frame.

Key words: large cantilever truss and grid composite structure; modal characteristics; bearing type; finite element analysis

收稿日期: 2023-01-08

作者简介: 魏国庆(1994—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 从事组合结构研究及公路管理工作。

通信作者: 王占魁(1994—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 从事水利工程管理工作。

大跨度空间结构是衡量一个国家建筑业发展水平的重要评价标准,其设计建造水平体现了一个国家的综合国力^[1]。20 世纪 70 年代后,鉴于轻质高强材料的发展,大跨度空间结构在大型公共建筑中得到广泛应用^[2-3]。大悬臂钢桁架的网架结构作为一种大跨空间结构的混合结构,在设计建造中需考虑多种荷载作用尤其是地震作用的影响,地震时由于结构受到动力作用的影响产生强迫振动。地震反应是一种动力反应,其大小与自振周期、振型和阻尼等结构自身动力特性有关。而结构抗震性能研究主要通过对动荷载的响应大小,确定结构的承载能力、变形能力和动力学特性,为结构的抗震性能设计提供重要依据^[4-5]。

模态分析作为一种动力特性分析方法,能够判断空间结构自振特性等重要参数,是结构动力分析和获得结构动力响应参数的关键。通过模态分析提高结构的自振频率,为结构的动力特性优化设计提供依据,从而改善结构的抗震性能^[6-7]。随着对结构抗震和动力性能深入研究,发现地震动具有明显的随机性和非平稳特征^[8]。因而对结构的抗震性能,尤其是大跨度空间结构的动力特性研究极为重要^[9-10]。研究发现模态分析能够对结构刚度大小和质量分布做出定性判断。通过选取合适的支座模型,进而分析出结构的抗震性能。SAP2000 作为有限元分析软件,具有集成化的使用界面、完备的设计工具以及强大的分析功能等优点^[11-12],可以完成对阻尼器一类的耗能装置进行整体建模分析。

本文利用 SAP2000 对西安某体育馆进行建模研究,考虑刚性铰接支座与弹性支座两种模型,通过 Ritz 向量法分别对两种模型进行模态分析,分析不同模型对结构周期、振型的影响,进而得出不同支座类型对结构动力特性及抗震性能的影响,选择出混凝土框架柱与网架结构连接部分的最佳支座模型,以期可为今后类似工程设计提供参考意义。

1 工程概况

1.1 工程概况

工程项目为西安某体育馆,地下 1 层、地上两层,建筑面积为 15 233.80 m²。下部是混凝土框架结

构,上部为大悬臂钢桁架的架结构,钢结构屋盖采用网架与悬挑桁架相结合的矩形平面结构形式,正放四角锥的网架形式,结构采用螺栓球连接。平面结构长度为 84.00 m,宽度为 56.7 m,高度为 20.95 m,网架部分长度为 71.10 m,宽度为 55.40 m,厚度为 2.00~3.50 m,上弦杆件从屋盖边缘到屋脊之间坡度为 3°,采用上弦柱点支撑。桁架部分采用平行弦桁架,长度为 55.4 m,宽度为 9.55 m,桁架厚度为 0.7 m,由 15 榀主桁架及 5 榀次桁架组成,桁架采用圆钢管及相贯节点。

下部混凝土框架结构与钢结构屋盖共有杆件数 5 742 根,框架结构柱、梁及板的混凝土强度等级均为 C30,泊松比取 0.2,弹性模量取 30 kN/mm²,剪切模量取 12.5 kN/mm²。上部结构嵌固部位为地下室顶板,主筋采用 HRB400 钢筋,箍筋采用 HRB400 钢筋。桁架和网架结构均采用材料为 Q345B 无缝钢管,泊松比取 0.3,网架钢结构杆件之间为铰接,框架柱下部节点为刚接。

1.2 模型建立

采用 SAP 2000 软件建立大跨拱形空间桁架的有限元模型,梁、柱及圆钢管均用框架单元模拟,板采用壳单元模拟,节点数为 2 820,采用 Rubber Isolator 单元模拟,共计 34 个。建模步骤:

(1) 根据体育馆设计图建立模型坐标系、轴网、材料以及截面属性。

(2) 依次建立柱、梁、板、弹簧支座、网架下弦、上弦、腹杆以及桁架部分的模型。

(3) 利用 Rubber Isolator 单元模拟,计算得出支座模型的水平刚度、竖向刚度,进行连接单元的连接属性数据定义。

(4) 确定荷载。杆件自重由系统导出,框架根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[13]的要求,确定为活荷载,通过计算得到墙体恒荷载,同时将定义厚度为零的壳作为屋面板自重及外荷载进行施加,并以双向板的形式将面荷载传递到杆件节点。

模型一采用直接铰接的方法建立铰接支座模型,模型二连接采用弹性支座的形式建立模型,体育馆模型及大悬臂桁架的网架结构模型如图 1、2 所示。

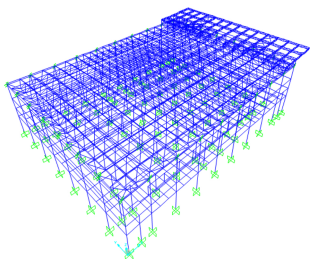


图 1 体育馆模型

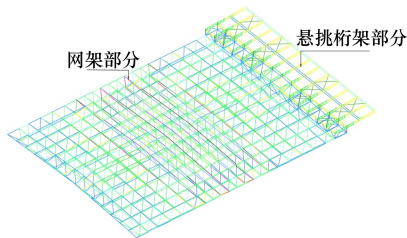


图 2 具有大悬臂桁架的网架结构模型

2 模态分析

2.1 基本理论

模型利用 SAP2000 进行模态分析时, 考虑到

表 1 铰接支座和弹性支座模型的前 40 阶自振周期和频率

振型	铰接支座模型		弹性支座模型		振型	铰接支座模型		弹性支座模型	
	周期	频率	周期	频率		周期	频率	周期	频率
1	0.629 96	1.587 41	0.888 26	1.125 80	21	0.168 83	5.940 88	0.307 43	3.252 77
2	0.485 68	2.058 96	0.793 33	1.260 52	22	0.160 13	6.244 91	0.283 83	3.523 30
3	0.365 58	2.735 37	0.629 89	1.587 59	23	0.157 86	6.334 06	0.276 94	3.610 94
4	0.352 47	2.837 13	0.607 26	1.646 73	24	0.155 48	6.431 69	0.260 50	3.838 70
5	0.336 68	2.970 14	0.564 79	1.770 85	25	0.136 18	7.343 04	0.249 04	4.015 35
6	0.332 82	3.004 67	0.539 88	1.852 26	26	0.132 95	7.521 48	0.246 00	4.065 12
7	0.291 89	3.425 93	0.489 45	2.043 13	27	0.129 13	7.743 98	0.241 07	4.148 10
8	0.272 56	3.668 86	0.457 23	2.187 10	28	0.119 97	8.335 11	0.222 60	4.492 37
9	0.259 03	3.860 61	0.453 03	2.207 36	29	0.111 21	8.992 05	0.203 74	4.908 11
10	0.258 57	3.867 41	0.422 27	2.368 13	30	0.109 20	9.157 24	0.191 10	5.232 90
11	0.251 08	3.982 77	0.414 94	2.410 01	31	0.099 87	10.012 64	0.160 83	6.217 67
12	0.236 23	4.233 16	0.412 75	2.422 76	32	0.082 48	12.123 85	0.159 30	6.277 47
13	0.225 18	4.440 89	0.411 48	2.430 24	33	0.078 20	12.787 72	0.121 59	8.224 61
14	0.203 59	4.911 72	0.386 11	2.589 94	34	0.076 71	13.036 45	0.117 32	8.523 58
15	0.195 97	5.102 78	0.379 94	2.632 21	35	0.054 28	18.423 15	0.111 07	9.002 95
16	0.195 66	5.110 98	0.368 84	2.711 18	36	0.051 75	19.324 37	0.104 77	9.544 33
17	0.191 86	5.212 07	0.358 93	2.786 06	37	0.049 15	20.343 81	0.087 01	11.492 97
18	0.188 74	5.298 32	0.350 59	2.852 35	38	0.022 26	44.924 69	0.056 77	17.615 83
19	0.175 53	5.697 02	0.346 72	2.884 21	39	0.020 31	49.230 30	0.048 64	20.557 26
20	0.172 84	5.785 60	0.335 22	2.983 07	40	0.019 97	50.065 39	0.041 16	24.293 69

子空间迭代法相对稳定, Ritz 向量法考虑了动力荷载的空间分布, 其计算量更少且更准确, 因此取前 40 阶振型进行模态分析, 求得结构的自振频率及振型^[14-16]

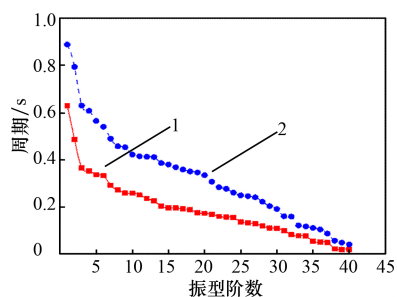
在结构动力分析中^[17], 结构动力响应的求解是基于质量系统的动力平衡方程来完成的, 多自由度集中质量体系的动力平衡方程如下。

$$F_l(t) + F_D(t) + F_s(t) = F(t)$$

式中: $F_l(t)$ 为用在节点质量上的惯性力向量, kN; $F_D(t)$ 为粘滞阻尼力向量或者能量耗散力向量, kN; $F_s(t)$ 为结构承担的内力向量, kN; $F(t)$ 为外部施加的荷载向量, kN。

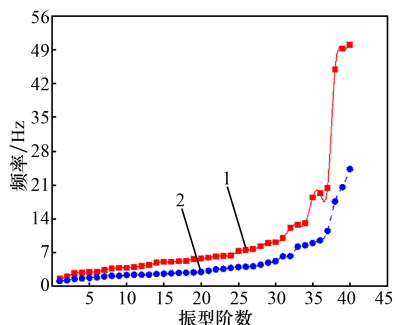
2.2 模态分析结果

支座模型的前 40 阶自振周期和频率模态分析结果如表 1 所示, 支座模型自振周期曲线如图 3 所示, 振型 - 频率分布曲线如图 4 所示。



1—固定铰支座模型；2—弹性支座模型

图 3 支座模型自振周期曲线



1—固定铰支座模型；2—弹性支座模型

图 4 Ritz 法前 40 阶振型 - 频率曲线

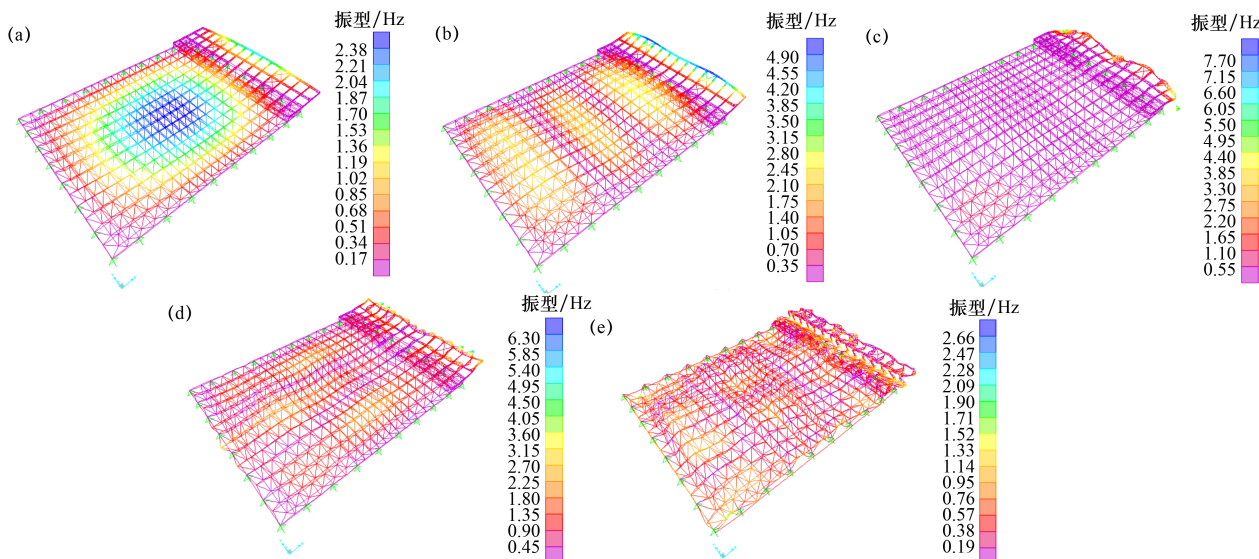
通过分析表 1 的数据可知, 固定铰支座模型与弹性支座模型两者的自振频率相差较大。相较于弹性支座模型, 固定铰支座模型第 1 阶自振频率由 1.587 41 降低到 1.125 8, 减小了 41.0% ; 第 10 阶自振频率由 3.867 41 降低到 2.368 13, 减小了 63.31% ; 第 20 阶自振频率由 5.785 6 降低到

2.983 07, 减小了 93.95% ; 第 20 阶自振频率由 5.785 6 降低到 2.983 07, 减小了 93.95% ; 第 40 阶自振频率由 50.065 39 降低 24.293 69, 减小了 106.08%。从图 3、4 可以看出, 相较于固定铰支座模型, 弹性支座模型振型 - 频率曲线更为平缓, 主要因为弹性支座模型整体结构柔性大, 水平方向刚度小; 而固定铰支座模型结构相反, 使得固定铰支座模型的结构自振周期曲线下落迅速, 周期更小。

由此可以看出, 相较于弹性支座模型, 固定铰支座模型误差很大, 因此结构选取弹性支座模型。对该结构进行整体建模, 由于结构形式较为复杂, 仅就上部网架结构进行模态分析展示, 结构振型如图 5、6 所示。

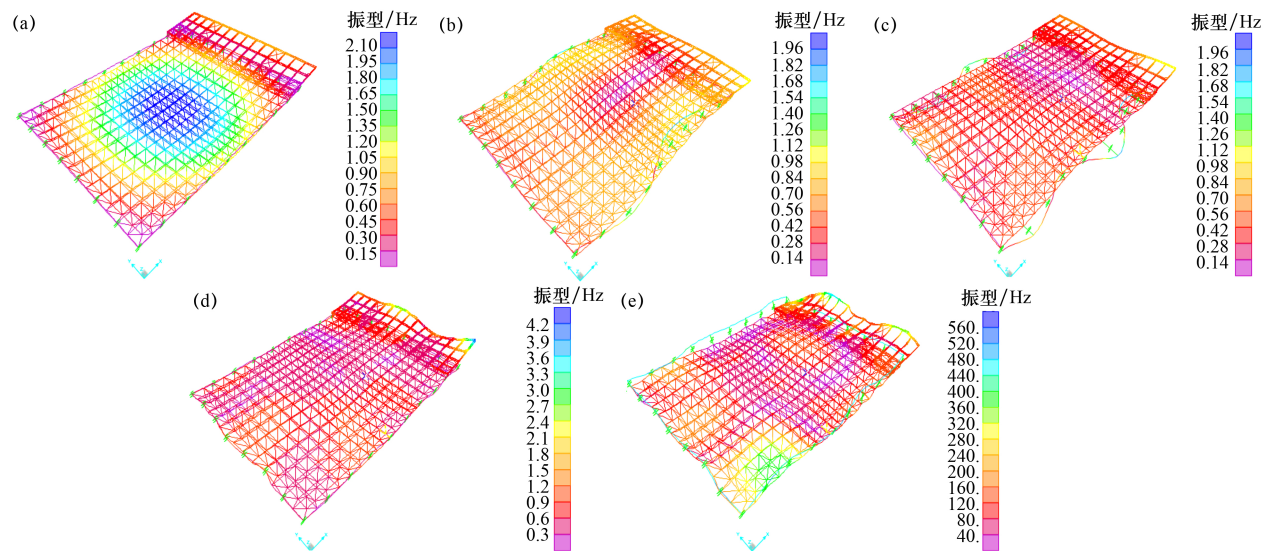
取弹性支座模型前 40 阶振型结构的质量参与系数进行分析, 其中, UX 、 UY 、 UZ 、 RZ 分别表示结构 X 、 Y 、 Z 、 RZ 方向的振型参与质量系数, $\text{Sum } UX$ 、 $\text{Sum } UY$ 、 $\text{Sum } UZ$ 分别表示结构 X 、 Y 、 Z 方向振型参与质量系数之和, 如表 2 所示。

通过图 5 及表 2 可知, 弹性支座模型模态振型整体刚度分布均匀, 属于整体振动。同时通过对结构的前 40 阶振型分析发现: 振型一时, $UZ = 0.025 07 > UX = 0.015 02$, 说明结构的第一振型以 Z 方向的竖向振动为主; 振型十时, $UX = 0.002 87 >$



(a) 铰接支座模型第 1 阶振型; (b) 铰接支座模型第 10 阶振型; (c) 铰接支座模型第 20 阶振型;
(d) 铰接支座模型第 30 阶振型; (e) 铰接支座模型第 40 阶振型

图 5 铰接支座模型结构阶振型图



(a)弹性支座模型第 1 阶振型;(b)弹性支座模型第 10 阶振型 ;(c)弹性支座模型第 20 阶振型;
(d)弹性支座模型第 30 阶振型(e)弹性支座模型第 40 阶振型

图 6 弹性支座模型结构阶振型图

表 2 弹性支座模型前 40 阶质量参与系数

振型序号	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RZ
1	0. 015 02	0. 000 00	0. 025 07	0. 015 02	0. 000 00	0. 025 07	0. 000 00
2	0. 000 03	0. 320 00	0. 000 00	0. 015 05	0. 320 00	0. 025 07	0. 002 22
3	0. 140 00	0. 000 00	0. 001 59	0. 155 05	0. 320 00	0. 026 66	0. 000 02
4	0. 405 00	0. 000 02	0. 00013	0. 560 05	0. 320 02	0. 026 79	0. 001 32
5	0. 000 11	0. 00417	0. 000 01	0. 560 16	0. 324 19	0. 026 80	0. 640 00
6	0. 029 69	0. 000 00	0. 005 80	0. 589 85	0. 324 19	0. 032 66	0. 001 95
7	0. 000 05	0. 000 65	0. 000 00	0. 589 90	0. 324 84	0. 032 66	0. 000 51
8	0. 000 02	0. 001 56	0. 000 01	0. 589 92	0. 326 40	0. 032 67	0. 000 07
9	0. 000 19	0. 400 00	0. 980 00	0. 590 11	0. 726 40	0. 032 67	0. 011 18
10	0. 002 87	0. 000 96	0. 000 00	0. 592 98	0. 727 36	0. 032 67	0. 037 68
11	0. 003 56	0. 070 05	0. 000 00	0. 596 54	0. 797 41	0. 032 67	0. 071 65
12	0. 002 19	0. 032 06	0. 000 00	0. 598 73	0. 829 47	0. 032 67	0. 028 83
13	0. 000 00	0. 000 01	0. 000 00	0. 598 73	0. 829 48	0. 032 67	0. 002 65
14	0. 096 64	0. 000 01	0. 000 42	0. 695 37	0. 829 49	0. 033 09	0. 000 63
15	0. 047 07	0. 000 00	0. 000 83	0. 742 24	0. 829 49	0. 033 92	0. 001 62
16	0. 003 51	0. 000 15	0. 000 03	0. 745 95	0. 829 64	0. 033 95	0. 000 71
17	0. 140 00	0. 000 78	0. 000 33	0. 885 95	0. 830 42	0. 034 28	0. 000 13
18	0. 019 50	0. 000 52	0. 000 01	0. 905 45	0. 830 94	0. 034 29	0. 015 46
19	0. 001 08	0. 043 69	0. 000 00	0. 906 53	0. 874 63	0. 034 29	0. 000 48
20	0. 000 01	0. 005 64	0. 000 00	0. 906 54	0. 880 27	0. 034 29	0. 000 83
21	0. 000 83	0. 000 46	0. 000 00	0. 907 37	0. 880 73	0. 034 29	0. 048 15
22	0. 000 05	0. 016 29	0. 000 00	0. 907 42	0. 897 02	0. 034 29	0. 002 82
23	0. 003 95	0. 001 32	0. 000 05	0. 911 37	0. 898 34	0. 034 34	0. 003 72
24	0. 016 69	0. 001 88	0. 000 20	0. 928 06	0. 900 22	0. 034 54	0. 004 95
25	0. 020 46	0. 024 06	0. 000 00	0. 948 52	0. 924 28	0. 034 54	0. 001 15
26	0. 007 06	0. 008 47	0. 000 75	0. 955 58	0. 932 75	0. 035 29	0. 001 83
27	0. 005 44	0. 012 70	0. 000 46	0. 961 02	0. 945 45	0. 035 75	0. 005 51

表 2(续)

振型序号	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	RZ
28	0.001 44	0.038 69	0.000 03	0.962 46	0.984 14	0.035 78	0.007 57
29	0.000 32	0.000 00	0.061 51	0.962 78	0.984 14	0.097 29	0.000 15
30	0.005 02	0.000 00	0.001 30	0.967 80	0.984 14	0.098 59	0.015 66
31	0.009 01	0.002 69	0.013 77	0.976 81	0.986 83	0.112 36	0.006 36
32	0.000 91	0.000 65	0.081 88	0.977 71	0.987 48	0.194 24	0.000 45
33	0.012 09	0.003 28	0.000 58	0.989 80	0.990 76	0.194 82	0.007 61
34	0.000 11	0.008 83	0.000 28	0.989 91	0.999 59	0.195 10	0.000 02
35	0.000 05	0.000 02	0.230 00	0.989 96	0.999 61	0.425 10	0.000 28
36	0.003 88	0.000 17	0.006 72	0.993 84	0.999 78	0.431 82	0.000 11
37	0.000 05	0.000 00	0.150 00	0.993 89	0.999 78	0.581 82	0.000 72
38	0.000 05	0.002 20	0.000 00	0.993 94	1.000 00	0.581 82	0.000 00
39	0.002 57	0.000 00	0.003 12	0.996 51	1.000 00	0.584 94	0.000 07
40	0.000 02	0.000 00	0.360 00	0.996 53	1.000 00	0.944 94	0.000 22

$UY = 0.000\ 96$, 说明结构的第 10 振型是以 X 方向的平动为主; 振型为 20 时, $UY = 0.005\ 64 > UX = 0.000\ 01$, 说明结构的第 3 振型是以 Y 方向的平动为主; 振型为 30 时, $UX = 0.005\ 02 > UZ = 0.000\ 13$, 说明结构的第 1 振型以 X 方向的竖向振动为主; 振型为 40 时, $UZ = 0.036 > UZ = 0.000\ 02$, 说明结构的第 1 振型以 Z 方向的竖向振动为主, 符合规范要求。

3 结 论

本文通过有限元软件 SAP2000 对大悬臂桁架与网架组合结构进行模态分析, 研究刚性铰接支座与弹性支座两种模型下对结构周期、振型的影响。结果表明, 弹性支座模型整体结构柔性大, 水平方向刚度小且刚度分布均匀, 整体性更好, 在地震作用下可以吸收地震能量, 充当隔振支座的作用, 在地震荷载作用下整体结构抗震性能优于刚性铰接支座, 因此选择弹性支座模型作为混凝土框架柱与网架结构连接部分的最佳支座形式^[18]。

参考文献:

- [1] 董石麟, 罗尧治, 赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[J]. 空间结构, 2005, 11(4): 3-10.
- [2] 董石麟, 邢栋, 赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J]. 空间结构, 2012, 18(1): 3-16.
- [3] 沈世钊. 大跨空间结构理论研究和工程实践[J]. 中国工程科学, 2001, 3(3): 34-41.
- [4] 汪权, 周超杰, 孙旭, 等. 多维地震作用下高层结构振动混合控制研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(4): 742-747.

- [5] CAO Z, ZHANG Y. A study on the seismic response of lattices shells [J]. International Journal of Space Structures, 2000, 15(3): 243-247.
- [6] 楼梦麟. 结构振动模态分析的 Wilson-Ritz 向量法[J]. 地震工程与工程振动, 1992(4): 40-48.
- [7] 郭伟. 不规则网架混凝土框架抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [8] 郭彦林, 窦超. 现代拱形钢结构设计原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] 徐传光. 长悬臂空间钢桁架结构抗震性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [10] 沈世钊. 大跨空间结构的发展-回顾与展望[J]. 土木工程学报, 1998(3): 5-14.
- [11] 贾强. 框架梁扭矩折减与梁端弯矩调幅系数合理性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [12] 中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [13] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2012.
- [14] 李秀梅, 吴锋. 广义特征值问题求解的改进 Ritz 向量法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 19-23.
- [15] 汪梦甫, 沈蒲生. Ritz 向量叠加法的改进及其应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1996, 23(3): 109-115.
- [16] 陈波, 武岳, 沈世钊, 等. Ritz-POD 法及其在大跨度屋盖结构风振分析中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(6): 601-605.
- [17] 姚谦峰, 苏三庆. 地震工程学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- [18] 魏国庆. 大悬臂桁架与网架的组合结构抗震性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2020.