doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.018
引用格式：韩昆，钱晨阳，冯国将. 高大型混凝土井塔结构抗震及振动特性分析[J]. 矿冶，2026，35(1)：138-146.
HAN Kun, QIAN Chenyang, FENG Guojiang. Analysis of seismic and vibration characteristics of tall and large concrete tower structures[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 138-146.

高大型混凝土井塔结构抗震及振动特性分析

韩 昆 钱晨阳 冯国将
（矿冶科技集团有限公司，北京 100160）

摘 要：井塔结构是矿井工业场地内重要的地面塔式工业建筑，是实现材料运输、人员升降和矿物提升的重要通道。针对地上建筑高于60 m的高大型混凝土井塔的相关抗震、动力特性和设备激振力作用研究相对较少。本文通过YJK软件对某铜矿项目主井塔进行三维建模，计算在现行抗震标准下该结构在6度、7度和8度地震作用下的地震响应，分析高大井塔结构的抗震薄弱环节，利用有限元软件Midas/Gen重点对提升层大厅振动特性进行分析，并进一步研究电动机大梁单激励结构振动规律。结果表明：由于高宽比偏大、楼板开洞率高和荷载分布不均匀等原因，高大型混凝土井塔结构抗震薄弱处突出，在设计过程中需特别注意控制层间剪力和层间位移角。在设计时由于考虑设备安装、检修、楼面堆载等多工况，提升层大厅楼板和主梁刚度较大，提升设备自振频率较低，仅为5.33 Hz，远小于该功能层的自振频率，电动机的自振频率为9.78 Hz，穿越提升大厅层第2 阶和第3 阶模态，由于激振力较小激起的振动最大应力为0.143 $N\cdot mm^{-2}$，最大变形值为0.011 6 mm，最大变形速度为1.015 $mm\cdot s^{-1}$，均不足以引起该支撑梁振动，因此只要保障提升层大厅楼板和主梁具有足够刚度，在该提升系统下不会引起提升大厅功能层振动。

关键词：高大型混凝土井塔；提升大厅层；激振力；振动特性；Midas/Gen
中图分类号：TD85 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854(2026)01-0138-09

Analysis of seismic and vibration characteristics of tall and large concrete tower structures

HAN Kun QIAN Chenyang FENG Guojiang
(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Well tower structure is an important ground tower industrial building in the mine industrial site, and it is an important channel to realize material transportation, personnel lifting and mineral lifting.Relatively few studies have been conducted on the seismic performance, dynamic characteristics, and the effects of equipment excitation forces of high-rise concrete shaft towers with a height exceeding 60 meters above ground.This paper employs YJK software to carry out 3D modeling by the existing main well tower of a copper mine project, computes the seismic response of the structure under the earthquake actions of 6 degree, 7 degree and 8 degree under the current seismic standard, and analyzes the seismic weakness of the tall well tower structure. By using the finite element software MIDAS/GEN, the vibration characteristics of the elevator hall are analyzed, and the vibration law of the single excitation structure of the motor beam is further investigated. The results indicate that the seismic weakness of tall and large concrete tower structures is prominent due to the high aspect ratio, high floor opening rate and uneven load distribution. Special attention should be paid to controlling the interstory shear and interstory displacement angle in the design process. In the design, considering the conditions such as equipment installation, maintenance, floor loading, etc., the floor and main beam stiffness of the lifting floor hall is large, and the natural vibration frequency of

收稿日期：2024-11-11
基金项目：矿冶科技集团有限公司技术提升项目(0101-45-00093)
第一作者：韩昆，硕士，工程师，主要从事结构设计。E-mail：hankun@bgrimm.com
通信作者：钱晨阳，硕士，高级工程师；E-mail：qianchenyang@bgrimm.com

the lifting equipment is low, merely 5.33 Hz, which is far less than the natural vibration frequency of the functional floor. The natural vibration frequency of the motor is 9.78 Hz, which passes through the second and third modes of the lifting hall floor. Due to the small excitation force, the maximum vibration stress caused is 0.143 $N \cdot mm^{-2}$, the maximum deformation value is 0.011 6 mm, and the maximum deformation speed is 1.015 $mm \cdot s^{-1}$, which are not sufficient to cause the vibration of the support beam and thus are not enough to cause the vibration of the functional layer of the lifting hall. Therefore, ensuring that the floor slab and main beam of the lifting hall have sufficient rigidity will not cause vibration in the functional layer of the lifting hall under this lifting system.

Key words: high large concrete well tower; hoisting hall floor; vibration characteristics; excitation force; Midas/Gen

井塔结构是矿井工业场地内的重要塔式工业建筑，是连接地上、地下，实现材料运输、人员升降和矿物提升的重要通道，是矿井的核心组成部分，在整个生产系统中起着举足轻重的作用[1,2]。随着我国可开发矿产资源向深部转移，对井塔的提升能力要求越来越大。在设计过程中，由于工艺布置不规则、荷载种类特殊且大、抗震薄弱环节突出[3]，井塔结构一般采用框架—剪力墙结构体系，需要特别关注其抗震性能。研究者们总结了低烈度区井塔结构的平面及立面布置、荷载组合、结构体系选型和设计等方面内容[4,5]，为设计人员提供了参考。随着提升能力的提升，现阶段的混凝土井塔结构一般高于60 m，符合现行抗震标准[6]规定的高层结构，且属于特别不规则体系，地震作用特别突出，但是科研人员对高烈度区的高大型混凝土井塔结构的抗震研究的文献较少。为了实现运输功能，井塔结构下部布置料仓和输送系统，上部则是提升大厅层，是主要设备的布置层，包含提升系统、导向轮和防撞梁等重要设备[7]。提升系统一般采取多绳摩擦提升系统，具有不受地形影响、布置紧凑省地、全部荷载垂直向下和运行稳定等特点[7]。但是提升机系统属于旋转式动力设备，在运行过程中易产生较大的激振力，相近结构构件甚至是整个井塔结构在提升机扰动下容易发生共振现象，产生墙体开裂、楼板振动、结构构件开裂甚至破坏等不利影响。王丽等[8]通过模态分析发现，所述井塔结构振动原因为井塔结构自振频率与提升系统主轴振动频率相近。因此，为避免共振现象产生，研究井塔结构的动力特性和设备激振力作用具有重要意义。

本文通过YJK软件对某铜矿项目主井塔进行三维建模，计算在现行规范条件下该结构在6度、7度和8度地震作用下的地震响应，分析高大井塔结构的抗震薄弱环节，利用有限元软件Midas/Gen重点对提升层大厅振动特性进行分析，并进一步研究电动机大梁单激励结构振动规律。

1 井塔概况

1.1 井塔设计

某铜矿项目主井塔采取四绳塔式提升系统，设计提升高度为1 050~1 250 m。该高大型主井塔高度82 m左右，长宽分别为19.5 m和18.6 m，从首层到屋顶依次设置皮带运输机、13 m高矿仓、卸料设备及防撞梁、导向层和提升大厅及重型吊车等，其竖向布置见图1。

该井塔结构采取框架—剪力墙结构体系，建筑使用年限为50 a，结构重要性系数取1.1，其主要功能层分布见表1，混凝土强度为C40。根据建筑抗震设计标准[6]可知，该井塔在不同抗震设防烈度下的抗震等级和抗震构造措施见表2，采取YJK软件进行三维建模，并分析6~8度抗震设防烈度下井塔结构的地震反应。

1.2 提升大厅有限元模型

该井塔结构提升大厅设备多，且大部分都属于振动设备，在地震作用下极易产生振动，甚至发生共振现象，本文选取该功能层建立有限元模型研究其振动性能。根据设计资料，该楼层主要设备参数见表3，对功能层的固有属性自振频率影响大，本文主要研究多绳摩擦式提升机和电动机对井塔结构振动影响。结构模板图如图2(a)所示，采取拟静力方法施加设备荷载，为获得该功能层的振动频率，建立有限元模型（图2(b)）。电动机大梁截面尺寸为500 mm × 1 800 mm，约束条件为两端铰接，其激励荷载作用点及有限元模型见图2(c)，$F_2(t)$见1.3小节公式（2）。

1.3 理论依据

由结构动力学相关理论可知，有两个方面的因素控制着结构的振动：一个是对结构施加的激振力，即扰力源P_O；另一个则是结构对特定激励的响应，即

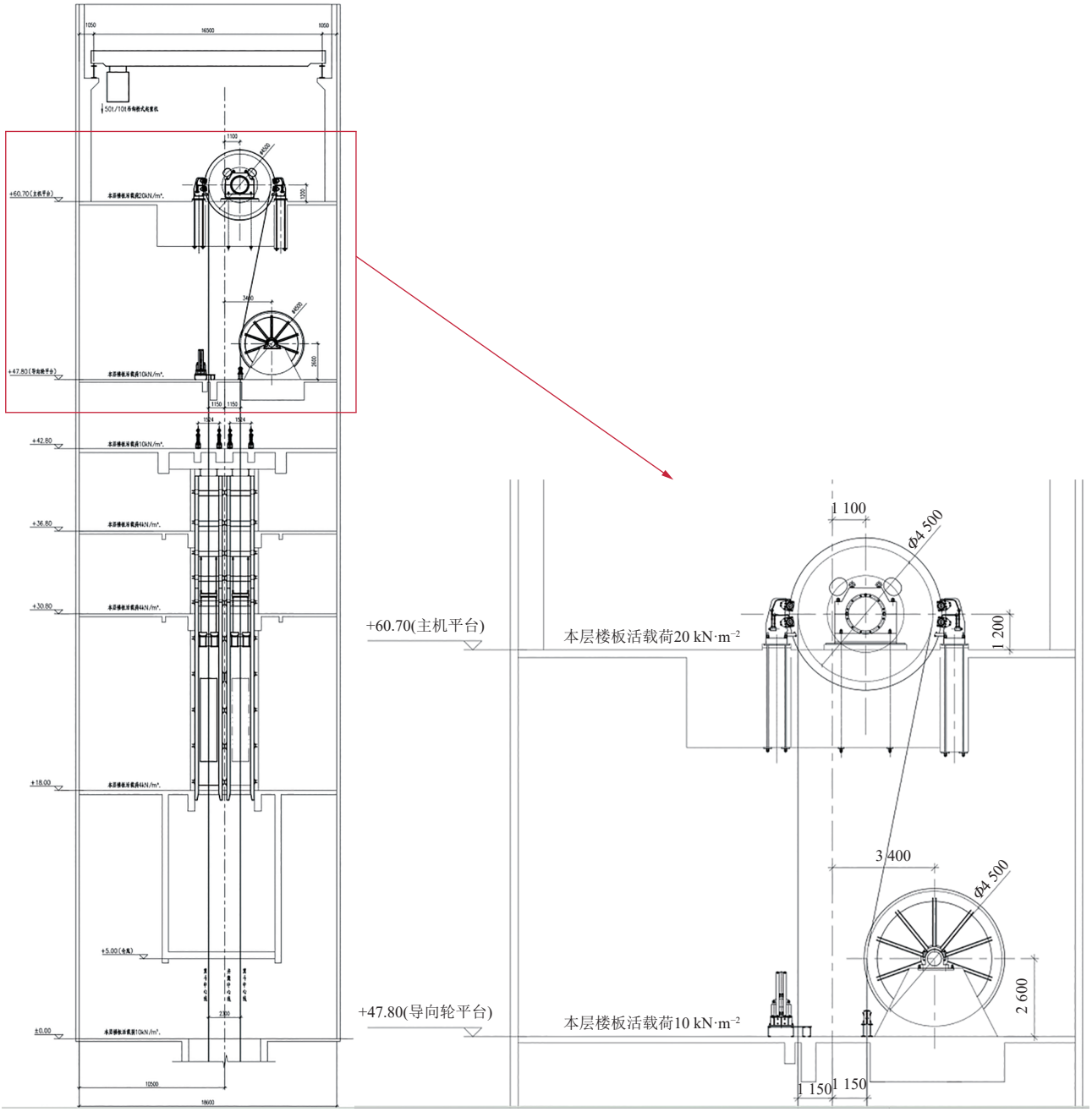


图1　高大型混凝土主井塔立面布置图

Fig. 1　Elevation Layout of the concrete main shaft tower

表1　井塔结构主要功能分区及楼层分布

Table 1　Well tower structure main function zoning and floor distribution

层号	楼层	标高范围/m	层高/mm	主要设备
1~3	运料层	−3.900~6.300	3 900/4 500/1 800	皮带廊
4~6	储料层	6.300~18.000	2 700/4 500/4 500	粉矿仓
7~9	卸料层	18.000~30.800	4 260/4 260/4 280	卸料转置、防过卷保护装置
10~13	防撞层	30.800~42.800	3 000/3 000/3 000/3 000	防撞井架
14	张紧层	42.800~47.800	3 200	重锤拉紧装置
15~18	导向层	47.800~60.700	3 200/3 200/3 200/3 300	导向轮
19~22	提升大厅	60.700~76.000	4 500/1 300/5 700	提升设备、电梯机房、检修吊车等
23	屋面局部突出层	76.000~81.100	5 100	水箱

注：*xxxx*/*xxxx* 表示相应楼层层高，与第1列“层号”对应。

表 2　井塔结构的抗震等级和抗震构造措施

Table 2　Seismic grade and seismic construction measures of well tower structure

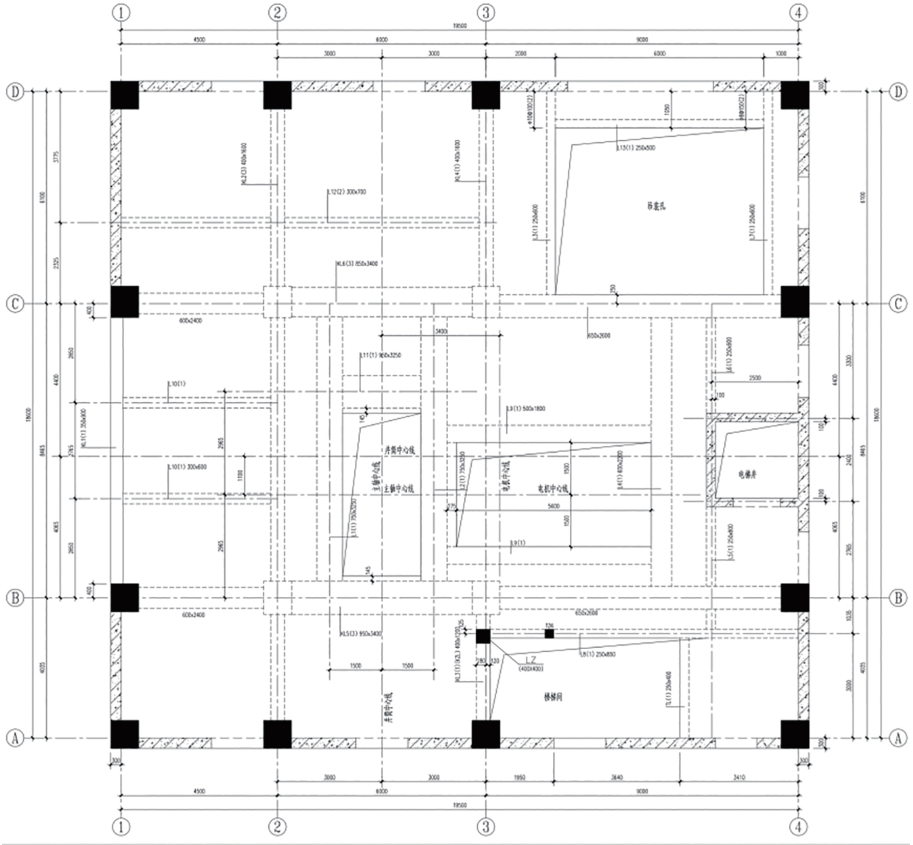
	6(0.05 g)		7(0.10 g)		8(0.20 g)	
	框架柱	剪力墙	框架柱	剪力墙	框架柱	剪力墙
抗震等级	三级	三级	二级	二级	一级	一级
抗震构造措施	三级	三级	三级	三级	二级	二级

注：$x(y\ \mathrm{g})$，括号前的数字表示抗震设防烈度，括号内的数值为设计基本地震加速度，其中，1 g=9.8 m·s^{-2}。

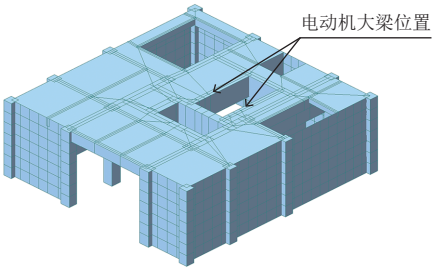
表 3　提升大厅主要设备参数

Table 3　Upgrade the parameters of the main equipment in the hall

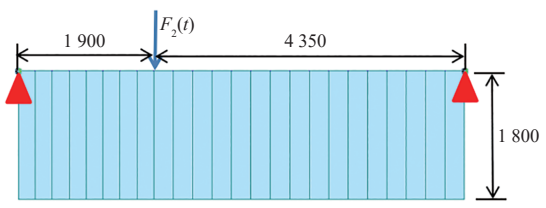
编号	设备名称	转速/(r·min^{-1})	质量/t	速度/(m·s^{-1})	频率/Hz	备注
1	50/10 吊钩桥式起重机	–	40.57	–	–	
2	多绳摩擦式提升机	最大值 50.93	66.91	最大值 12	5.33	摩擦轮直径 4.5 m
3	多绳底卸式箕斗	–	20.50	最大值 12	–	
4	电动机	基本值 50.93（最大值 70.03）	52.50	基本 12（最大 16.5）	9.78	电机磁极对数 12



(a)模板图



(b)提升大厅有限元模型



(c)电动机大梁有限元模型

图 2　提升大厅的模板图及有限元模型

Fig. 2　The template diagram and finite element model of the upgrade hall

结构自身的动力特性，自振频率ω，结构在外部激振力作用下动力反应方程见式（1）[9,10]。

$$F'(t)=\rho\cos(\varpi t-\theta) \quad (1)$$

式中，$\rho=\frac{P_O}{k}\times D$表示外部激励作用下结构振幅；$\theta=\arctan\frac{2\xi\beta}{(1-\beta^2)}$表示相位差，反映了动力相应的相位比外部激振力的相位所落后角度，ξ表示结构阻尼比，在设计过程中，混凝土结构一般取0.05；$D=\frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\xi\beta)^2}}$表示动力放大系数；$\beta=\varpi/\omega$，表示外部激励频率与结构自振频率比，$\varpi$和$\omega$分别表示外部激振力的频率和结构固有频率；$P_O$表示外部激振力；$k$表示结构刚度。

混凝土井塔提升大厅层在设计过程中，需要考虑的动力荷载有：提升过程中摩擦轮转动产生的扰力作用，电机振动引起的扰动力，紧急制动力作用以及可能的钢丝绳拉断力作用[11]。其中，提升摩擦轮的振动激励和电动机的振动激励是提升大厅主要振源[12]。特别是当提升机摩擦轮、减速机、电动机转子等旋转部分的质量中心与转轴中心不重合时会导致旋转失衡，使系统受到外部激励作用而产生振动。这种转子质量偏心引起的受迫振动荷载，是正常运行中最有可能发生的振动，对井塔结构影响较大。当外部激励频率与结构自振频率接近是，极易引起共振现象，形成较大振幅、高动应力等效应。本文重点研究的是高大型混凝土井塔结构提升大厅的振动特性，并进一步研究提升机大梁单激励结构振动规律。参考《动力机器基础设计标准》[13]和《建筑工程容许振动标准》[14]，可求得提升机摩擦轮和电机正常运转过程中的激振力支座处加速度时程，详见式（2）和式（3）。

$$F_1(t)=175.97\sin(5.33t) \quad (2)$$

$$F_2(t)=52.50\sin(61.41t) \quad (3)$$

2 结果分析

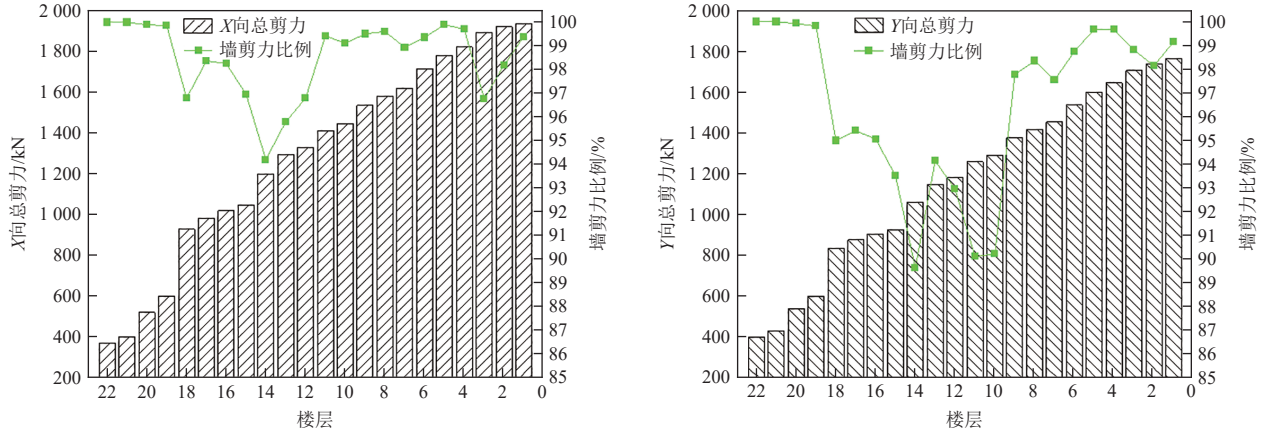
2.1 楼层剪力分析

根据抗震规范要求，从地震作用效应和地震作用两方面考虑，选取地震剪力和地震反应力进行楼层剪力分析。图3给出的是不同抗震设防烈度下井塔结构的地震剪力及剪力墙承当的剪力百分比。可以发现，在相同设防烈度下，井塔结构地震剪力在X向和Y向差异较大，两个方向地震剪力最大差绝对值分别为189.04、545.14和756.16 kN，而不同楼层承担的剪力变化差异也较大，均为18和19层承担的剪力差最大，18层承担的X向和Y向剪力差为327.14、981.43、1 308.57 kN，19层承担的X向和Y向剪力差为235.70、707.11、942.81 kN，这是因为平面开洞和工艺布置原因导致井塔结构刚度变化较大，存在不规则性，且由于各功能层设备较重，日常维护保养荷载较大，设计过程中需采取厚楼板。井塔结构采取框架剪力墙结构体系，由于对空间要求较大，在设计过程中采取四周布置剪力墙，内部主要由框架体系支撑，局部布置剪力墙，这样的设计方案会导致剪力墙承担大部分地震剪力。图3折线图中剪力墙承担的剪力占剪力比例均不小于89%即可表明此现象。而10~18层剪力墙承担剪力百分比较小，说明框架结构也承担部分剪力，结构体系协同作用。当设防烈度不同时，总剪力随设防烈度的增加而成倍数的增加，与建筑抗震设计规范（GB/T 50011—2010）[6]一致。

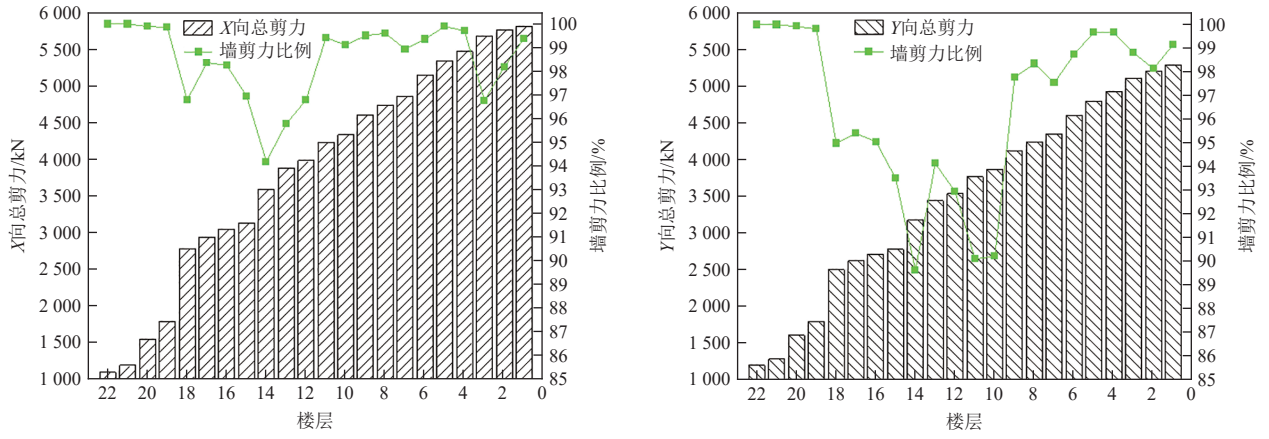
图4为不同抗震设防烈度下井塔结构的的楼层地震反应力变化曲线。从图4可以看出，X向和Y向层剪力变化趋势和数值基本一致，其中1、3、6、18、19和22层的数值有较小差别，22层顶（23层）布置水箱，屋面局部突出，鞭梢效应导致该层剪力最大，下面的分析中不作考虑。当设防烈度不同时，井塔结构的楼层地震反应力逐步增大，其中7（0.15 g）度地震作用下的最大地震反应力为6（0.05 g）的3倍，8（0.20 g）的最大地震反应力为7（0.15 g）度的1.34倍，变化趋势基本符合成熟的地震理论。而在相同设防烈度下，该井塔结构的不同功能层地震反应力变化较大，其中对应表1功能分区和楼层表的提升层和导向层的地震反应力较大，表明该功能分区属于抗震敏感区域，在地震作用下易破坏。

2.2 变形分析

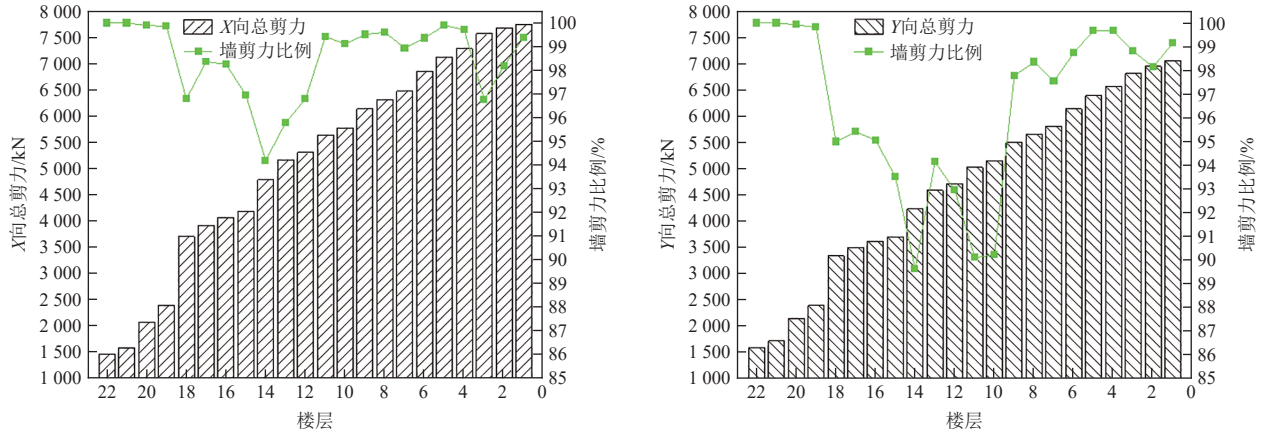
不同抗震设防烈度下井塔结构的地震位移角见表4。由表4可知，Y方向的地震位移角较X方向的大，说明该井塔结构体系的X方向的整体刚度明显强于Y方向的。而对比不同抗震设防烈度下层间位移角变化趋势可以发现，按照8度设防烈度设计得到的井塔结构体系，在7度地震作用下的地震位移角显著减小，在6度地震作用下的地震反应几乎为零。地震位移角随楼层的升高先增大后减小，在16~17层达到最大，为导向层功能区，且上部的提升大厅层地震位移角也较大，说明该功能层在地震作用下变形较大，容易产生较大位移，为抗震敏感区域，与2.1节所得结论一致。



(a)设防烈度为6度



(b)设防烈度为7度



(c)设防烈度为8度

图3　不同抗震设防烈度下井塔结构的地震剪力

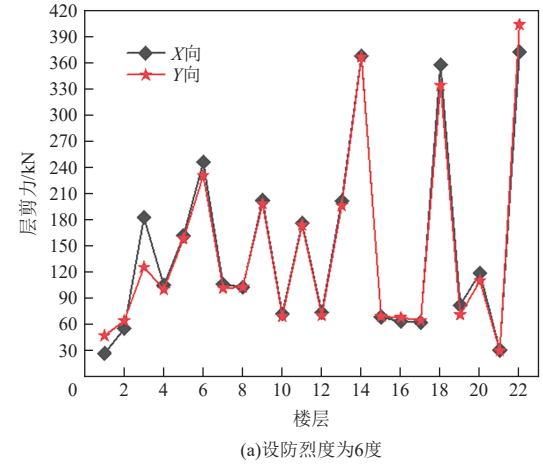
Fig. 3　Seismic shear force of well tower structure under different seismic fortification intensity

2.3　振动分析

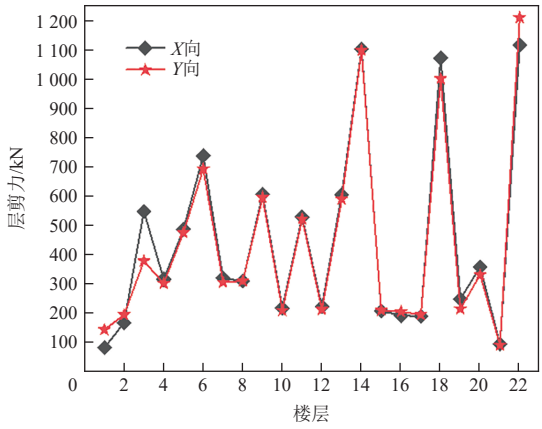
2.3.1　提升大厅振动分析

该高大混凝土井塔结构的提升层大厅有限元模型周期及频率见表5。根据本文1.2节表3给出的设备资料计算得到电动机频率为9.78 Hz，该频率穿越提升层大厅的自振频率，处于振动大厅第2阶和第3阶频率之间，且根据1.3节中公式(3)给出的外部激振力为52.50 kN，可能导致共振现象发生。

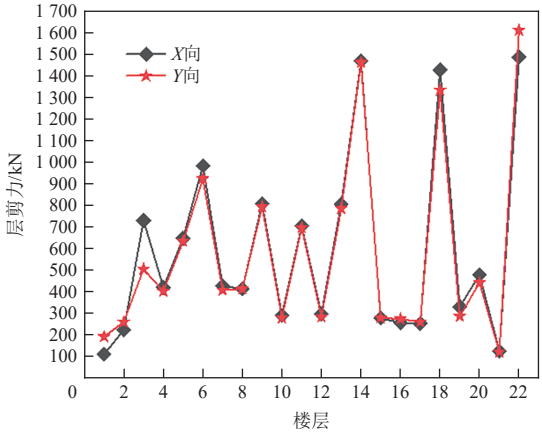
提升系统摩擦轮的启停及运转全过程的频率曲线和提升大厅第1阶模态的对应关系如图5所示。可以发现，摩擦轮的自振频率仅为5.33 Hz，仅为第1阶模态频率的61.5%，不易引起该楼层的整体共振，同时也较与其相关的第3、7和8阶模态频率相差更大，说明摩擦轮的运转不会引起该功能层的振动。



(a)设防烈度为6度



(b)设防烈度为7度



(c)设防烈度为8度

图4 不同抗震设防烈度下井塔结构的楼层地震反应力

Fig. 4 Seismic response force of well tower structure under different seismic fortification intensities

2.3.2 电动机大梁单激励结构振动分析

单激励工况下电动机大梁振动应力和应变反应如图6所示。可以发现，在电动机振动荷载作用下，电动机大梁最大应力为0.143 N·mm^{-2}，远小于C40混凝土的2.39 N·mm^{-2}的抗拉强度标准值，梁变形等值线最大值0.011 6 mm，远小于规范限值，最重要的是该大梁最大变形速度为1.015 mm·s^{-1}，远小于电动机基本速度12（最大速度16.5）m·s^{-1}，最大振动效应均位于激励荷载作用点附近。上述现象说明，由于电动机振动荷载激励下引起该梁变形速度（1.015 mm·s^{-1}）远小于《建筑工程容许振动标准》[14]中限值3 mm·s^{-1}，影响可忽略，不会引起支撑梁的振动，进一步说明电动机不会引起提升大厅层振动现象。

表4 不同抗震设防烈度下井塔结构的地震位移角

Table 4 Seismic displacement angle of well tower structure under different seismic fortification intensity

楼层	X方向			Y方向		
	6度	7度	8度	6度	7度	8度
1	1/9999	1/9999	1/9999	1/9999	1/9999	1/9999
2	1/9999	1/9999	1/7835	1/9999	1/5876	1/7935
3	1/9999	1/9999	1/7052	1/9999	1/5289	1/8474
4	1/9999	1/9999	1/8100	1/9999	1/6075	1/9999
5	1/9999	1/9999	1/6823	1/9999	1/5117	1/8081
6	1/9999	1/9999	1/5868	1/9294	1/4401	1/6971
7	1/9999	1/9999	1/4741	1/5100	1/3555	1/3825
8	1/9999	1/9999	1/4273	1/3834	1/3205	1/2876
9	1/9999	1/9999	1/4087	1/3373	1/3065	1/2530
10	1/9999	1/9137	1/3838	1/3045	1/2878	1/2284
11	1/9999	1/8876	1/3662	1/2958	1/2747	1/2219
12	1/9999	1/8398	1/3614	1/2799	1/2711	1/2099
13	1/9999	1/7964	1/3646	1/2654	1/2734	1/1991
14	1/9999	1/8316	1/3891	1/2772	1/2918	1/2079
15	1/9999	1/7966	1/3713	1/2655	1/2785	1/1991
16	1/9999	1/7538	1/3501	1/2512	1/2626	1/1884
17	1/9999	1/7505	1/3514	1/2501	1/2635	1/1876
18	1/9999	1/7776	1/3752	1/2592	1/2814	1/1944
19	1/9999	1/8036	1/4358	1/2678	1/3268	1/2009
20	1/9999	1/8355	1/5126	1/2785	1/3844	1/2088
21	1/9999	1/8744	1/6587	1/2914	1/4940	1/2186
22	1/9999	1/9107	1/5969	1/3035	1/4477	1/2276

表5 提升层大厅有限元模型周期及频率

Table 5 Period and frequency of finite element model of upgrade the hall

模态	周期/s	频率/Hz	振动特性描述
1	0.115 4	8.662 1	X向整体水平振动
2	0.113 3	8.955 9	Y向整体水平振动
3	0.094 9	10.533 0	大门位置附件楼板上下振动
4	0.087 2	11.462 9	吊装孔边L13上下振动
5	0.085 3	11.727 9	楼梯间洞口与电机洞口间楼板上下振动
6	0.080 3	12.454 4	电梯洞口四周楼板水平振动
7	0.071 9	13.915 6	大门位置附近楼板水平振动
8	0.067 7	14.781 6	大门位置到提升设备洞口楼板水平振动
9	0.065 5	15.276 5	楼梯间附近剪力墙水平振动
10	0.063 1	15.848 1	吊装孔附近剪力墙水平振动

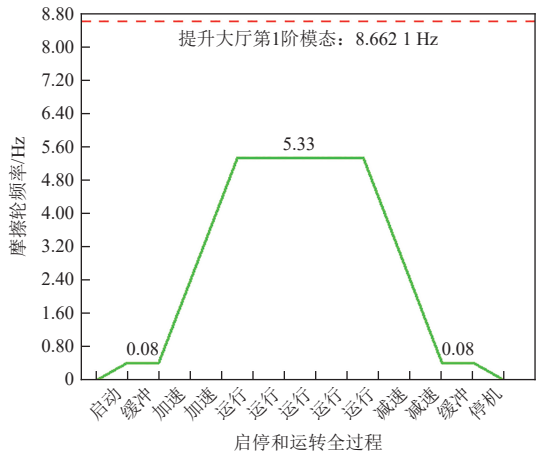
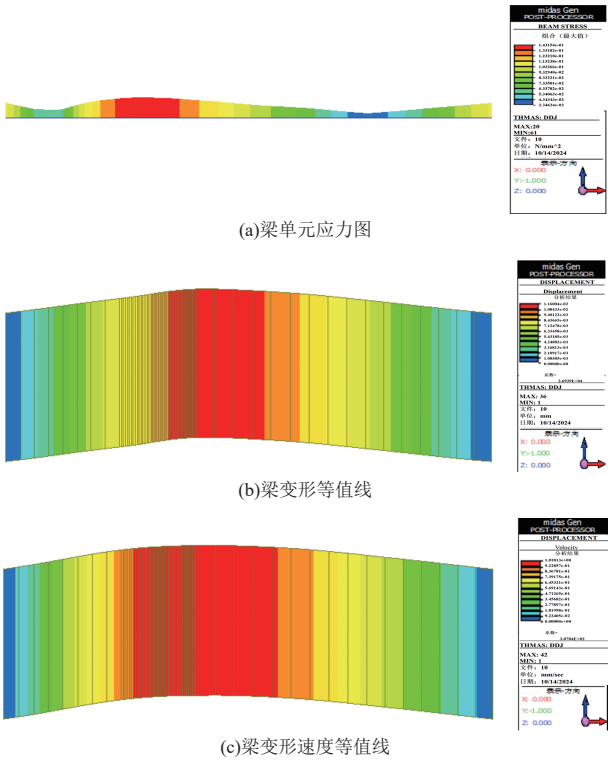


图5　提升系统摩擦轮的启停及运转全过程的频率曲线和提升大厅第1阶模态的对应关系

Fig. 5　The frequency curve of the whole process of starting, stopping and running of the friction wheel of the lifting system corresponds to the first mode of the lifting hall



(a)梁单元应力图

(b)梁变形等值线

(c)梁变形速度等值线

图6　单激励工况下电动机大梁振动应力和应变反应

Fig. 6　Vibration stress and strain response of motor girder under single excitation condition

3　结论

1）高大型混凝土井塔结构受高宽比偏大、楼板开洞率高及荷载分布不均等因素影响，其提升层与导向层为显著的抗震薄弱部位，在结构设计过程中需采取有针对性的构造措施，加强该部位抗震能力，尤其需严格控制层间剪力和层间位移角。

2）在确保提升层大厅楼板及主梁具有足够刚度的前提下，提升机摩擦轮（自振频率为5.33 Hz）远低于该功能层的自振频率，且设备激振力较小，因此不会激起该功能层的共振现象。

3）尽管本工程所采用电动机的自振频率（9.78 Hz）穿越提升大厅层第2阶与第3阶模态，但在该设备激振作用下，电动机大梁最大应力仅为0.143 N·mm^{-2}，最大变形值为0.011 6 mm，最大变形速度为1.015 mm·s^{-1}，均未超过容许阈值，说明该型电动机不足以引起支撑梁明显振动，也不会激起提升大厅层的有害振动。

参考文献

[1] 刘兵．井塔的钢结构体系选型和提升大梁振动分析[D]．西安：西安建筑科技大学，2019.
LIU B. Steel structure system selection of well tower and vibration analysis of lifting girder[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

[2] 刘正宇，李爱兵，邹平，等．下告铁矿主井井塔基础稳定性研究与设计[J]. 有色金属（矿山部分），2009, 61(1): 42-45.
LIU Z Y, LI A B, ZOU P, et al. Research and design of shaft tower foundation stability of main shaft in Xiaogao iron mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2009, 61(1): 42-45.

[3] 刘彦东，王志杰，刘兵，等．钢结构提升井塔体系的探讨[J]. 煤炭工程，2020, 52(4): 12-16.
LIU Y D, WANG Z J, LIU B, et al. Discussion on steel structure lifting tower system[J]. Coal Engineering, 2020, 52(4): 12-16.

[4] 刘显旺．葫芦素煤矿主井井塔结构设计研究[J]．煤炭工程，2023, 55(3): 25-29.
LIU X W. Research on tower structure design of main shaft in Hulusu coal mine[J]. Coal Engineering, 2023, 55(3): 25-29.

[5] 刘彦东．纳林河矿井副立井井塔设计[J]．煤炭工程，2015, 47(8): 19-21, 24.
LIU Y D. Tower design of auxiliary shaft in Nalinhe mine[J]. Coal Engineering, 2015, 47(8): 19-21, 24.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部．建筑抗震设计规范：GB/T 50011—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2024.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB/T 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.

[7] 王丹．提升机动载荷作用下井塔振动分析与寿命预测[D]．阜新：辽宁工程技术大学，2009.
WANG D.Vibration analysis and life prediction of well tower under lifting dynamic load[D]. Fuxin: Liaoning Technical

University, 2009.

[8] 王丽, 苏荣华. 煤矿主提升系统井塔振动分析[J]. 煤矿机械, 2003(11): 58-60.
WANG L, SU R H. Vibration analysis of shaft tower in main hoisting system of coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2003(11): 58-60.

[9] 滕黎明, 江锦波, 彭旭东, 等. 基于Laplace变换的干气密封轴向自由振动与强迫振动解析研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(21): 148-160.
TENG L M, JIANG J B, PENG X D, et al. Analytical study of axial free vibration and forced vibration of dry gas seals based on Laplace transform[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(21): 148-160.

[10] 冯琳琳. 八字形强迫振动方柱绕流机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
FENG L L. Study on the mechanism of flow around a square column with forced eight-figure vibration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[11] 肖长江, 张振宇. 钢井塔提升大厅层振动特性分析[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(4): 20-23, 27.
XIAO C J, ZHANG Z Y. Vibration characteristics analysis of lifting hall layer of steel shaft tower[J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(4): 20-23, 27.

[12] 李凤翔. 矿井提升机的3 500 kW同步电动机传动变频装置及其主要环节调试[J]. 矿冶, 1996, 5(3): 81-87, 111.
LI F X. 3 500 kW synchronous motor drive frequency conversion device of mine hoist and its main link debugging[J]. Mining and Metallurgy, 1996, 5(3): 81-87, 111.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 动力机器基础设计标准: GB/T 50040—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of dynamic machine foundation: GB/T 50040—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程容许振动标准: GB/T 50868—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for allowable vibration of building engineering: GB/T 50868—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.