

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.12.002

强辐射棒料提升翻转机构抗震性分析及优化

周 杰¹, 史慧民¹, 王时龙¹, 杨 波¹, 李 海²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:提升翻转机构是某强辐射棒料后处理系统的关键设备,根据相关设计规范,地震工况下要保证棒料不发生破坏,并且保证机构的安全功能和运行性能正常。为验证机构的抗震性能,采用基于 ANSYS Workbench 的分析方法,对该后处理系统中包含卷扬机组、钢丝绳、料仓架-料仓、翻转小车及上/下导轨在内的提升翻转机构建立有限元模型并进行抗震计算,再根据 ASME 规范对主要部件及重要螺栓进行了应力评定和强度校核,同时对上导轨安装螺栓数进行了优化。结果显示,优化后的提升翻转机构满足核电抗震设计要求。

关键词:提升翻转机构;抗震计算;应力评定;优化设计

中图分类号:TH136

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)12-009-14

Seismic analysis and optimization of lifting-turnover mechanism of strong-radiation rods

ZHOU Jie¹, SHI Huimin¹, WANG Shilong¹, YANG Bo¹, LI Hai²

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, P. R. China)

Abstract: The lifting-turnover mechanism is the key equipment of the post-processing system of the strong-radiation rod. According to the relevant design specifications, it is necessary to ensure that the rods does not break under seismic conditions and that the safety function and running performance of the mechanism are normal. To verify the seismic performance of the mechanism, based on ANSYS Workbench, finite element models of the lifting-turnover mechanism containing a hoist, a steel-wire rope, a silo rack-silo part, a rolling-over vehicle and upper/lower rails in the post-processing system, are established for seismic evaluation. Then, the stress assessment and strength check of the main units and the major bolts are carried out according to ASME codes, and the number of bolts installed on the upper rail is optimized. The simulation results show that the optimized lifting-turnover mechanism meets seismic design requirements of nuclear power plants.

Keywords: lifting-turnover mechanism; seismic calculation; stress assessment; optimal design

收稿日期:2019-07-02

基金项目:中国高校科学基金资助项目(2018CDQYJX0013);教育部创新团队发展计划项目(IRT_15R64)。

Supported by Chinese Universities Scientific Fund (2018CDQYJX0013) and Innovation Team Development Program of the Ministry of Education (IRT_15R64).

作者简介:周杰(1965—),男,重庆大学副教授,主要研究方向为机械结构设计,(E-mail)jiezhou@cqu.edu.cn。

通讯作者:史慧民(1991—),男,重庆大学硕士研究生,主要研究方向为机械结构设计,(E-mail)20140702035t@cqu.edu.cn。

提升翻转子系统为某强辐射棒料后处理系统的关键设备,功能是将强辐射棒料从水池提升至送料热室,并将其从竖直工位翻转 90°到水平工位,以实现水平送料。提升翻转机构为提升翻转子系统的核心机构,属于安全 RS 级、抗震 I 类设备^[1],其动静力学性能直接影响整个后处理系统的正常运行。

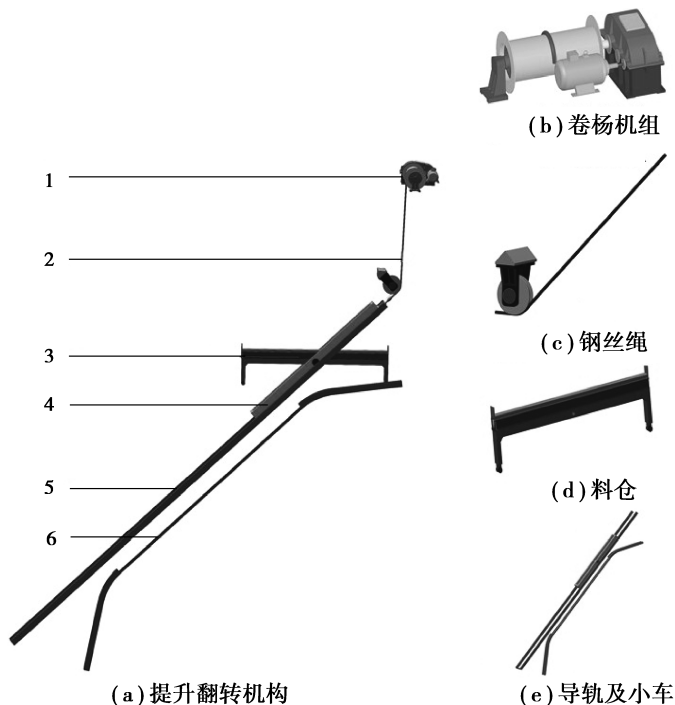
核电后处理系统中物项的抗震设计应满足系统整体抗震要求^[2]。根据规范,抗震 I 类设备必须进行抗震检验^[3-6],方法主要有实验法和数值模拟法^[7]。由于实施周期长,且会耗费大量的人力物力,国内主要使用实验法对大型、复杂的核电设备进行抗震鉴定^[3,8-9]。数值模拟法主要有等效静力法、响应谱法和时程分析法^[10-12]。等效静力法不能描述系统固有特性和系统内部结构间的动力响应,计算结果较为保守,不适用于基频小于 33 Hz 的结构^[10,13-14];时程分析法采用逐步积分法对方程进行求解^[10-11],计算量大、不确定因素多,在实际工程中应用较少^[15-17]。

笔者采用基于 ANSYS Workbench 的计算方法,对某强辐射棒料后处理系统中主要部件进行模态分析,在对结构合理解耦后使用响应谱法进行抗震计算,为使结果保守可靠,按核电厂要求,使用美国 ASME 规范对主要零部件及重要螺栓进行应力校核和优化,对提升翻转机构在地震载荷作用下的结构完整性和功能可靠性进行了鉴定。

1 研究对象及载荷

1.1 几何模型

提升翻转机构主要由卷扬机组、钢丝绳、料仓架-料仓、翻转小车及上/下导轨等部件组成,几何模型如图 1 所示。卷扬机组安装于标高 13.5 m 的基座上,为机构动力源;料仓架-料仓通过转轴安装于翻转小车,最高位置标高 9.5 m,强辐射棒料放置于料仓内;上/下导轨分别由多个 M24 螺栓倾斜 45°安装于基座,作为翻转小车、料仓架-料仓的运行轨道。当料仓架-料仓位于导轨底部时为竖直上料工位,机械手夹持强辐射棒料并转运到料仓内;上料完毕后,翻转小车在卷扬机拉力作用下沿上轨道运行,料仓架滚轮在下轨道的导向下同步进行提升、翻转;料仓到达水平位置后与接料料仓(图中未给出)连接并密封,完成提升翻转动作。该机构具有结构简单紧凑、使用寿命长、能适应各种恶劣工作环境等优点。



1.卷扬机组;2.钢丝绳;3.料仓架-料仓;4.翻转小车;5.上导轨;6.下导轨

图 1 提升翻转机构几何模型

Fig. 1 the Geometric model of the lifting-turnover mechanism

如图 2 所示为上导轨截面图,导轨全长 13 600 mm,采用螺栓连接的方式安装于基座。连接螺栓分布于导轨两侧,两端螺栓距导轨端面 500 mm,其余螺栓均匀分布。在小车上下运动时,由安装于上导轨的上、下挡块对其限位。下导轨安装螺栓均匀布置于导轨中央,因此,螺栓个数取上导轨的一半。

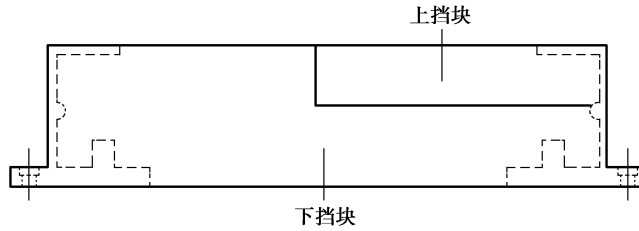


图 2 上导轨截面示意图

Fig. 2 Section diagram of upper guideway

卷扬机组内部、卷扬机组与公共底座及轨道与基座之间均使用 8.8 级螺栓连接紧固。计算时使用简化模型,去除较小倒角、圆角及螺纹孔;由于不关心卷扬机减速箱轮齿受力情况,齿轮以质量相近的圆盘替代,仅保留一对啮合齿。提升翻转机构各部件外形尺寸及质量见表 1,主要材料的力学性能参数见表 2。

表 1 提升翻转机构各部件尺寸、材料及质量

Table 1 Size, material and quality of various parts of lifting-turnover mechanism

部件	材料	外形尺寸/mm	质量/kg
卷扬机组	Q235 等	1 810×900×625	725.0
钢丝绳	复合材料	$\phi 42 \times 3\ 400$	25.0
上/下轨道	0Cr18Ni9	11 510×684×1 453	2 080.0
料仓	1Cr17Ni2	4 010×240×360	680.0
料仓架	1Cr18Ni9Ti	3 995×230×730	1 305.0
转轴	1Cr17Ni2	$\phi 70 \times 370$	10.5
翻转小车	1Cr18Ni9Ti	4 476×528×300	1 160.0
小车车轮	1Cr17Ni2	$\phi 100 \times 39$	1.5
强辐射棒料	复合材料	132×114×3 900	330.0

表 2 主要材料力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of main materials

材料	弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	屈服强度 S_y/MPa	抗拉强度 S_u/MPa	许用应力 S/MPa
Q235	210	7 850	0.30	225	370	92.5
0Cr18Ni9	194	7 930	0.28	205	520	137.0
1Cr17Ni2	206	7 750	0.27	205	1 080	171.1
1Cr18Ni9Ti	206	7 800	0.28	205	520	130.0
球墨铸铁	170	7 300	0.28	310	450	112.5
42CrMo	212	7 900	0.28	930	1 080	270.0

当料仓位于水平位置时约束最少且标高最高,由经验分析可知,须对此工位进行抗震分析。

1.2 载荷组合

根据 ASME 规范,核级抗震 I 类设备均须考虑运行基准地震动(operating basis earthquake, OBE)和安全停堆地震动(safe shutdown earthquake, SSE)的作用^[2,18]。运行基准地震动是在核电站使用寿命期间内厂址有可能遭遇的一次最为强烈的地震,要求核电站在此地震作用下能够正常运行;安全停堆地震动是结构及设备在使用寿命期其所在地区几乎不可能遇到的地震,在此地震作用下,核电设备可不运行,但必须保证设备不发生损坏,地震后仍能正常运行^[18]。

提升翻转机构抗震分析时,需考虑设备自身质量 DW、运行载荷 EL 及阻尼比分别为 2%,4% 的 OBE 和 SSE^[19]。载荷组合列于表 3。

表 3 载荷组合
Table 3 Load combination

工况	载荷组合	准则级别
设计工况	DW+EL	A
异常工况	DW+EL+OBE	B
事故工况	DW+EL+SSE	D

2 抗震分析方法

2.1 响应谱法

响应谱法是一种将模态分析结果和已知谱联系起来计算结果位移、速度、加速度、力及应力的分析方法^[20-21],分为单点响应谱法和多点响应谱法^[22]。

通过模态分析,可以得到一个 n 自由度系统的各阶频率 ω_i 及振型向量 ϕ_i ,若在地震载荷作用下,系统 j ($j=x, y, z$) 方向的加速度响应谱为 $S_{aj}(\omega_i)$,则系统第 i 阶振型的位移响应值为^[14-15]:

$$u_{ji} = \phi_i \gamma_i [S_{aj}(\omega_i)] / \omega_i^2,$$

式中 γ_i 为第 i 阶振型的参与系数。分别将 3 个方向地震作用分量代入上式,计算得到系统各阶振型在 x, y, z 3 个方向的地震响应分量,然后采取算术平方根法计算总地震响应。

响应谱法是一种准静态分析方法,它通过动力分析计算得到结构加速度与频率之间的关系(加速度反应谱),再以最大惯性力的方式施加于结构上,即将动态问题转化为静态问题且保留了原有的动态特性,是目前国内外采用最为广泛的抗震分析方法。

2.2 抗震分析流程设计

一般而言,地震动频率在 0~33 Hz 范围内。结构固有频率大于 33 Hz 时看成刚体,使用其支撑结构三方向最大加速度的 1.5 倍作为地震输入^[8,23],用等效静力法进行抗震分析;若结构第 1 阶固有频率小于或等于 33 Hz,添加集中质量后,输入其所在标高三方向加速度地震谱,用响应谱法进行抗震分析。主要分析内容及步骤如图 3 所示。

1)对简化后的提升翻转机构进行自身质量和工作载荷的静力分析,然后进行有预应力的模态分析,采用子空间法提取前 8 阶振型。

2)根据 ASME 规范对提升翻转机构进行解耦。

3)建立各子结构有限元模型,使用等效静力法或响应谱法进行抗震计算,得到各子结构地震响应。

4)对主要部件及重要螺栓进行应力评定和强度校核。

5)对不满足抗震规范的零部件进行优化和迭代验算,直到满足规范要求。

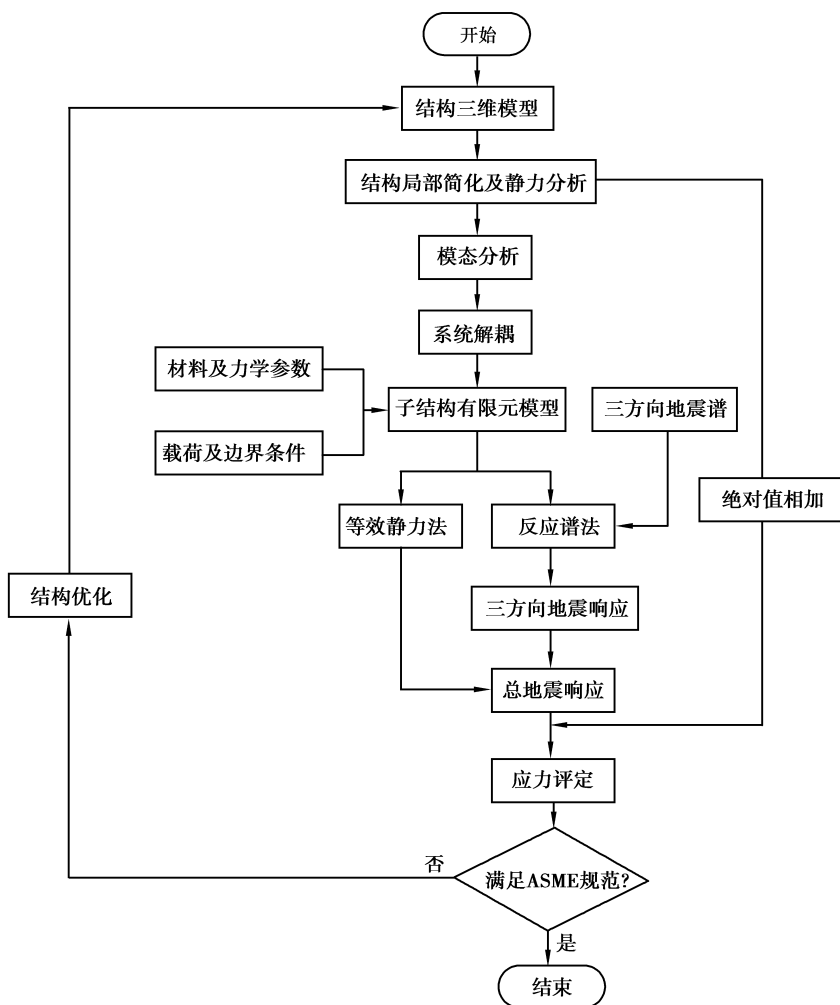


图 3 抗震分析流程图

Fig. 3 Flow chart of the seismic analysis

3 模态分析及系统解耦

3.1 有限元模型

将提升翻转机构的三维实体模型导入到 ANSYS Workbench 中进行网格划分,建立有限元模型,由于篇幅限制,图 4 仅给出卷扬机组有限元模型,模型共有单元 470 814 个,节点 795 966 个。

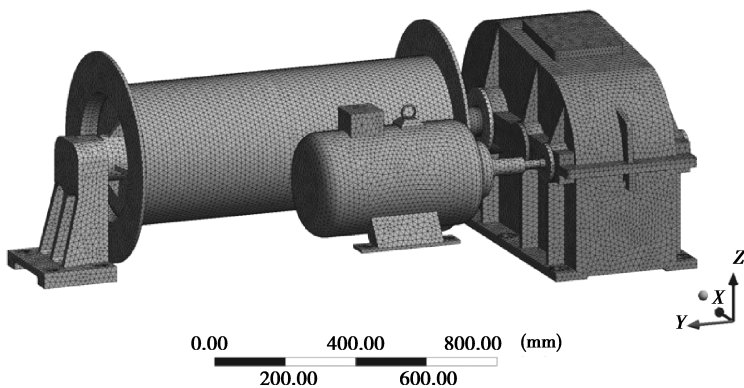


图 4 卷扬机组有限元模型

Fig. 4 Finite element model of hoist unit

3.2 模态分析

对各子结构进行模态分析,计算固有频率。表 4 给出了主要零部件前 8 阶频率,图 5 为料仓架-料仓部件的第 1 阶振型。

表 4 子部件前 8 阶固有频率

Table 4 The first 8 natural frequencies of each sub part

部件	不同阶次固有频率/Hz							
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
卷扬机	14.78	15.68	19.08	29.01	200.67	206.14	280.19	298.51
钢丝绳	22.56	22.79	62.08	62.71	121.43	122.64	200.19	202.14
料仓架-料仓	23.20	38.62	40.16	136.55	164.05	175.52	214.00	225.99
翻转小车	38.79	94.80	96.23	97.23	97.86	97.99	98.04	99.06
上导轨	11.60	11.85	14.11	14.28	14.45	15.41	17.28	17.87
下导轨	25.06	44.27	46.90	56.50	62.92	73.97	88.08	107.43

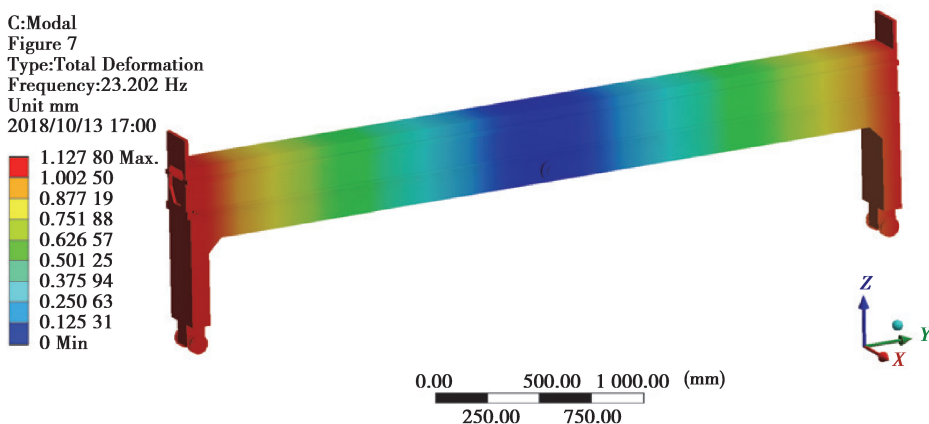


图 5 料仓架-料仓第 1 阶振型

Fig. 5 First mode vibration of silo rack-silo part

3.3 机构解耦及抗震方法选择

对于大型组合结构,采用三维整体建模的有限元模型进行数值仿真通常需要很大的存储和计算规模,超出现有的计算条件。因此,应研究组合结构各部件的动力学特性,从而建立合理的三维简化力学模型,并以该模型为基础进行有限元数值仿真^[24]。

根据相关法规,核电设备抗震分析前可将其解耦,在分析各子结构动力学特性的基础上建立简化力学模型,并选择适当的方法分别进行抗震分析^[25]。

$$1) \lambda_m < 0.01;$$

$$2) 0.01 \leq \lambda_m \leq 0.1, \text{ 且 } \lambda_f \leq 0.8 \text{ 或 } \lambda_f \geq 1.25.$$

λ_m 为子系统与主系统质量之比, λ_f 为子系统的基本频率与主结构主导频率之比。只要满足条件 1) 或 2), 均可解耦。

分析表 1 和表 4 可知,翻转小车安装于上导轨,质量、频率相近,不满足解耦准则,因此将上/下导轨和翻转小车看成一个整体进行抗震分析,其基频为 11.22 Hz;同理分析得到,卷扬机组、钢丝绳及料仓架-料仓均满足解耦准则,三者可看成子结构单独进行抗震计算。解耦情况及抗震方法见表 5。由于上/下导轨安装于不同标高,所以采用多点响应谱法进行计算。

表 5 解耦情况及抗震分析方法选择

Table 5 Decoupling and selection of seismic analysis method

子结构	基频/Hz	抗震方法
卷扬机组	14.78	
钢丝绳	22.56	单点响应谱法
料仓架-料仓	23.20	
上/下导轨-翻转小车	11.22	多点响应谱法

4 抗震计算

4.1 地震动

对抗震 I 类设备施加的 SSE 地震动由厂区地震谱离散化得到,图 6 仅给出标高 13.5m、阻尼比 4% 的 SSE 地震动。阻尼比 2% 的 OBE 地震动取 SSE 地震动的 $2/3^{[5]}$ 。

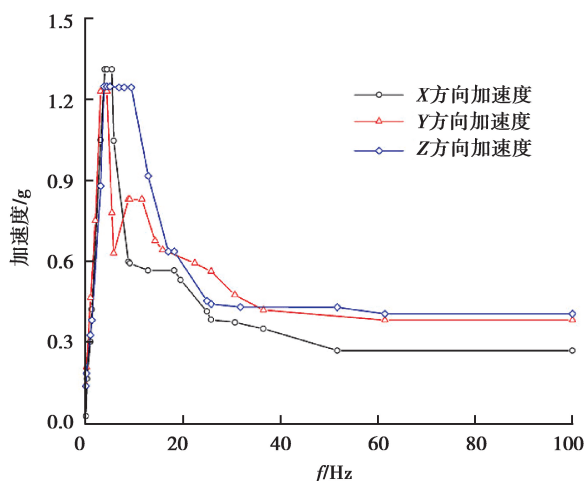


图 6 标高 13.5 m、阻尼比 4% SSE 地震动

Fig. 6 Elevation 13.5 m and damping ratio 4% SSE ground motion

4.2 抗震计算

在完成有预应力的模态分析后,对提升翻转机构进行异常工况和事故工况的抗震计算,计算时应考虑电机启动、停止时的加减速对钢丝绳等零部件的冲击效应。各子部件最大应力列于表 6。

表 6 提升翻转机构各部件最大应力值

Table 6 the Maximum stress value of each component of lifting-turnover mechanism

子结构	最大应力/MPa			
	设计工况	异常工况	事故工况	
卷扬机组	电动机	13.93	26.54	38.21
	减速箱体	18.54	49.87	74.46
	传动机构	237.68	238.92	257.41
	卷筒	76.36	78.50	110.25
	卷筒支架	27.26	30.30	45.46

续表 6

子结构		最大应力/MPa		
		设计工况	异常工况	事故工况
料仓架-料仓	料仓	3.94	8.33	9.03
	料仓架	9.70	16.69	20.19
钢丝绳	钢丝绳	110.99	146.63	164.45
上/下导轨-小车	翻转小车	38.48	167.05	241.34
	转轴	46.10	65.53	75.24
	车轮	35.83	78.31	106.73
	上导轨	79.80	293.84	400.86
	下导轨	15.68	33.14	41.87

5 应力评定及优化

5.1 主要部件应力评定

根据 ASME BPVC-3 第 1 册 NF 分卷中相关规定,金属材料在不同使用等级下的应力限值见表 7。

表 7 材料容许的最大应力值

Table 7 The maximum allowable stress value of materials

使用等级	应力类别	应力限值计算公式	不同材料应力限值/MPa					
			Q235	1Cr18Ni9Ti	球墨铸铁	0Cr18Ni9	1Cr17Ni2	42CrMo
A	δ_1	S	92.50	130.00	112.50	137.00	171.10	270.00
A	$\delta_1 + \delta_2$	1.5S	138.75	195.00	168.75	205.50	256.65	405.00
B	δ_1	S	92.50	130.00	112.50	137.00	171.10	270.00
B	$\delta_1 + \delta_2$	1.5S	138.75	195.00	168.75	205.50	256.65	405.00
D	δ_1	$\text{Min}\{1.5S, 0.4S_u\}$	138.75	195.00	168.75	205.50	256.65	405.00
D	$\delta_1 + \delta_2$	$\text{Min}\{2.25S, 0.6S_u\}$	208.13	292.50	253.13	308.25	648.00	558.00

使用 ANSYS Workbench 对提升翻转机构 A,B,D 3 种载荷进行分析计算,得到各主要部件应力值如表 8 所示。表中 δ_1 为总体薄膜应力,不包括不连续和应力集中; δ_2 为弯曲应力,不包括不连续和应力集中^[1,15]。本模型同时承受总体薄膜应力和弯曲应力,因此使用 $(\delta_1 + \delta_2)$ 的应力类别进行评定。

比较可知,卷扬机组、料仓架-料仓部件、下导轨在各工况下部件的最大应力均远小于材料允许的最大应力限值;钢丝绳选用 $\phi 42$ 的钢芯钢丝绳,其最小破断拉力为 1 870 MPa^[26],安全系数大于 11,其应力分布满足 ASME 规范的相关要求;但翻转小车在 B,D 工况下应力偏大,上导轨在 B,D 工况下应力大于应力极限,须对上/下导轨-小车部件(或局部)进行优化。

表 8 提升翻转机构各部件最大应力值

Table 8 The maximum stress value of each component of lifting-turnover mechanism

部件名称	Von Mises 应力值			
	A(应力限值)	B(应力限值)	D(应力限值)	
卷扬 机组	电动机	13.93(138.75)	26.54(138.75)	38.21(208.13)
	减速箱体	18.54(168.75)	49.87(168.75)	74.46(253.13)
	传动机构	237.68(405.00)	238.92(405.00)	257.41(558.00)
	卷筒	76.36(168.75)	78.34(168.75)	87.50(253.13)
	卷筒支架	27.26(168.75)	29.10(168.75)	36.15(253.13)
料仓架—料仓	料仓	3.94(205.50)	8.33(256.65)	9.03(648)
	料仓架	9.70(195.00)	16.69(195.00)	20.19(292.50)
上/下导轨—小车	翻转小车	38.48(195.00)	167.05(195.00)	241.34(292.50)
	转轴	46.10(256.65)	65.53(256.65)	75.24(648.00)
	车轮	35.83(256.65)	78.31(256.65)	106.73(648.00)
	上导轨	79.80(205.50)	293.84(205.50)	400.86(308.25)
	下导轨	15.68(205.50)	33.14(205.50)	41.87(308.25)

5.2 上导轨安装优化

由表 8 可知,翻转小车及上导轨在设计工况下满足规范要求,但在地震载荷作用下应力偏大,因此考虑增加上导轨安装螺栓数以减小地震载荷的影响。

表 9 为分别使用 8,12,16,20 颗螺栓固定安装上导轨时各零部件最大应力;表 10 为使用不同数目螺栓安装上导轨时,各部件应力相对于安装 8 个螺栓时的应力降幅;图 7 为不同安装螺栓数各部件应力变化情况。图表显示,上导轨安装螺栓数由 8 个增加到 12 个时,各部件应力均出现大幅下降,且各部件在 OBE、SSE 两种地震载荷下均满足安全系数不小于 1.3 的要求^[27]。因此,上导轨使用 12 个 M24 螺栓均匀分布于导轨两侧(每侧 6 个)安装,间距约 1 800 mm;下导轨使用 6 个 M24 螺栓分布于导轨内侧安装,间距约 1 950 mm。

表 9 不同螺栓数上/下导轨—小车各部件应力值

Table 9 Stress values of different bolts on the upper/lower rails-vehicle parts

部件	不同螺栓数 OBE 工况下各部件应力值/MPa					不同螺栓数 SSE 工况下各部件应力值/MPa				
	8	12	16	20	许用应力	8	12	16	20	许用应力
翻转小车	167.05	63.03	55.71	52.40	195.00	241.34	75.30	64.33	59.36	292.50
转轴	65.53	51.20	49.12	48.60	256.65	75.24	53.76	50.63	49.85	648.00
车轮	78.31	36.78	39.27	38.76	256.65	106.73	42.26	41.00	40.23	648.00
上导轨	293.84	100.87	95.05	87.21	205.50	400.86	111.41	102.69	92.41	308.25
下导轨	33.14	21.17	18.21	23.56	205.50	41.87	23.51	19.53	26.51	308.25

表 10 不同螺栓数上/下导轨-小车各部件应力降幅

Table 10 The decreasing amplitude of stress values of different bolts on the upper/lower rails-vehicle parts

部件	不同螺栓数 OBE 工况各部件应力降幅/%			不同螺栓数 SSE 工况各部件应力降幅/%		
	12	16	20	12	16	20
翻转小车	62.27	66.65	68.63	68.80	73.34	75.40
转轴	21.87	25.04	25.84	28.55	32.71	33.75
车轮	53.03	49.85	50.50	60.40	61.59	62.31
上导轨	65.67	67.65	70.32	72.21	74.38	76.95
下导轨	36.12	45.05	28.91	43.85	53.36	36.68

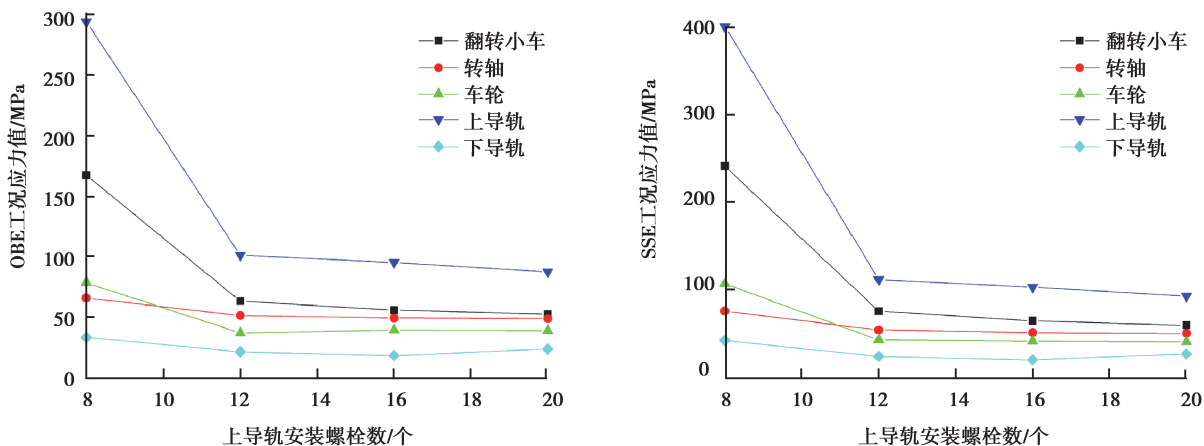


图 7 不同安装螺栓数上/下导轨-小车各部件应力变化图

Fig. 7 Stress variation charts of different bolts on the upper/lower rails-vehicle parts

5.3 重要螺栓应力评定

卷扬机组及导轨均以螺栓连接的方式固定在底座上,假设螺栓的初始预紧力产生的摩擦力足够抵消水平地震力 F 的作用,使 F 在螺栓处无剪切效应而只产生弯矩效应。即螺栓的应力由螺栓预紧力和地震力 F 的弯矩共同产生^[28]。

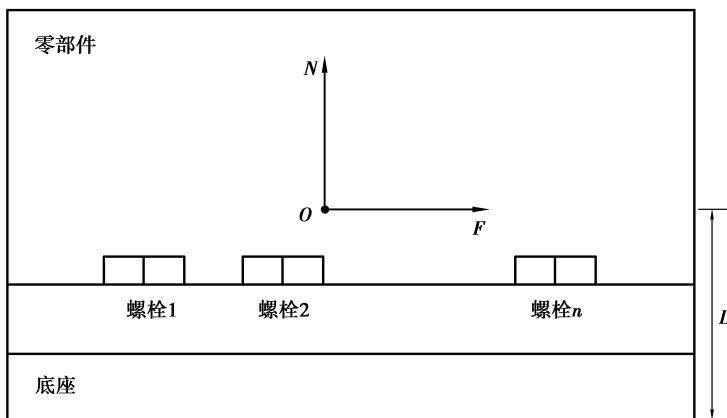


图 8 螺栓应力评定原理图

Fig. 8 Schematic diagram of bolt stress evaluation

在水平 $i(i=x,y)$ 方向,部件的地震力为 $F_i = m \cdot a_i$,为平衡地震力的作用,单个螺栓(共 n 个)的预紧力为 $f_{i,1} = F_i/n\mu$ (μ 摩擦系数,取 $0.15^{[20]}$),则预紧力在螺栓上产生的拉应力为 $\sigma_{i,1} = f_{i,1}/A_0$ (A_0 为螺栓有效面积)。

水平地震力在螺栓处产生的弯矩为 $T_i = F_i \cdot L$,为抵消弯矩限制部件在 O 点摆动,单根螺栓产生的最大拉力为 $f_{i,2} = T_i/L_m$,假设弯矩产生的应力均分于各螺栓,取 L_m 为各螺栓到摆动支点的平均距离,则弯矩在螺栓上产生的拉应力为 $\sigma_{i,2} = f_{i,2}/A_0$ 。

在铅垂方向,若地震力作用下沿 z 轴正向的加速度小于等于 g ,则部件不会因起跳而产生附加应力,否则会产生拉应力 σ_z 。

使用各分量平方后开方的方法对螺栓 3 个方向应力进行合成,即

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{x,1} + \sigma_{x,2})^2 + (\sigma_{y,1} + \sigma_{y,2})^2 + \sigma_z^2}$$

螺栓支撑件应满足 ASME BPVC-3 第 1 册 NF 分卷中对螺栓紧固件的应力要求,如表 11 所示。这里仅对螺栓的地震响应进行应力评定。

表 11 螺栓容许的最大应力值

Table 11 Maximum allowable stress of bolts

使用等级	应力类别	应力限值	8.8 级螺栓应力限值/MPa
A	拉应力 f_t 剪应力 f_v	$F_{tb} = 0.5 S_u$	
		$F_{vb} = 0.207 S_u$	400.0
		$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_{vb}}\right)^2 \leq 1$	165.6
B	拉应力 f_t 剪应力 f_v	$F_{tb} = 0.575 S_u$	
		$F_{vb} = 0.238 S_u$	460.0
		$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_{vb}}\right)^2 \leq 1$	190.4
D	拉应力 f_t 剪应力 f_v	$F_{tb} = \text{Min}\{0.7 S_u, S_y\}$	
		$F_{vb} = \text{Min}\{0.42 S_u, 0.6 S_y\}$	560.0
		$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2 + \left(\frac{f_v}{F_{vb}}\right)^2 \leq 1$	336.0

说明: F_{tb} 为容许拉压应力; F_{vb} 为容许剪切应力。

在正常工况下,提升翻转机构匀速工作,在水平和竖直方向均不产生加速度惯性力(电机启动、停止的加速度小于地震响应加速度的 5%,忽略其影响)。电动机、减速箱体、卷筒支架及上、下导轨在 OBE、SSE 地震作用下的螺栓应力及评定见表 12~16。

表 12 电动机与公共底座连接螺栓应力评定

Table 12 Stress assessment of connecting bolts between the motor and the common base

工况	f_t/MPa	F_{tb}/MPa	$\frac{f_t}{f_{tb}}$	$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2$
B	67.1	460.0	0.15	<1
D	83.5	560.0	0.15	<1

表 13 减速箱体与公共底座连接螺栓应力评定

Table 13 Stress assessment of connecting bolts between the reducer and the common base

工况	f_t/MPa	F_{tb}/MPa	$\frac{f_t}{f_{tb}}$	$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2$
B	110.8	460.0	0.24	<1
D	126.3	560.0	0.23	<1

表 14 卷筒支架与公共底座连接螺栓应力评定

Table 14 Stress assessment of connecting bolts between the bracket and the common base

工况	f_t/MPa	F_{tb}/MPa	$\frac{f_t}{f_{tb}}$	$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2$
B	19.6	460.0	0.04	<1
D	29.4	560.0	0.05	<1

表 15 上导轨与公共底座连接螺栓应力评定

Table 15 Stress assessment of connecting bolts between the upper slider and the common base

工况	f_t/MPa	F_{tb}/MPa	$\frac{f_t}{f_{tb}}$	$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2$
B	6.95	460.0	0.02	<1
D	10.44	560.0	0.02	<1

表 16 下导轨与公共底座连接螺栓应力评定

Table 16 Stress assessment of connecting bolts between the lower slider and the common base

工况	f_t/MPa	F_{tb}/MPa	$\frac{f_t}{f_{tb}}$	$\left(\frac{f_t}{F_{tb}}\right)^2$
B	12.04	460.0	0.03	<1
D	12.24	560.0	0.02	<1

6 结束语

采用基于有限元的仿真方法,对提升翻转机构进行有预应力的模态分析,根据各部件固有特性进行合理解耦后,使用多点响应谱法进行抗震计算,并对上导轨安装螺栓数进行合理优化,得到以下结论:

1) 分别使用 12 个、6 个螺栓安装上、下导轨时,经计算,其第 1 阶固有频率大于 33 Hz,地震最大应力均小于应力限值。

2) 优化后机构各子部件均满足抗震设计要求, A, B, D 3 种工况下的安全系数分别大于 1.704, 1.695, 2.168。

3) 两种地震载荷作用下,重要连接螺栓满足设计要求在 B, D 工况下的安全系数均大于 4。

参考文献:

- [1] 中国核电工程有限公司. 核燃料后处理厂建(构)筑物、系统和部件的分级准则: EJ/T 939—2014 [S/OL]. [2014-11-17]. <http://www.doc88.com/p-7364820705136.html>.
China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.. Classification for structures, systems and components of nuclear fuel reprocessing plant: EJ/T 939—2014 [S/OL]. [2014-11-17]. <http://www.doc88.com/p-7364820705136.html>. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 核电厂抗震设计规范 GB 50267—1997[S/OL]. 北京:中国计划出版社, (1998-02-01) [2017-08-12]. <http://dbpub.cnki.net/grid2008/dbpub/detail.aspx?dbname=SCSD&filename=SCSD000000356207>.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of nuclear power plants GB 50267—1997[S/OL]. Beijing: China Planning Press, (1998-02-01)[2017-08-12]. <http://dbpub.cnki.net/grid2008/dbpub/detail.aspx?dbname=SCSD&filename=SCSD000000356207>. (in Chinese)
- [3] 马伟锋, 朱沛文, 庞宇, 等. 核级及抗震型单元式空调机组的设计与鉴定[J]. 制冷与空调, 2016, 16(6): 27-32.
MA Weifeng, ZHU Peiwen, PANG Yu, et al. Design and identification of nuclear-grade and anti-seismic type unitary air conditioner[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2016, 16(6): 27-32. (in Chinese)
- [4] 杜坤, 丁梦龙, 王晓峰. 多接管载荷作用的核辅助设备抗震分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(6): 49-52.
DU Kun, DING Menglong, WANG Xiaofeng. Seismic analysis of nuclear auxiliary equipment subjected to Multi-Nozzle loads[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(6): 49-52. (in Chinese)

- [5] 周莹, 邹建荣. 核一级电动闸阀抗震分析[J]. 阀门, 2015(1): 16-17, 20.
ZHOU Ying, ZOU Jianrong. Nuclear electric valve seismic stress analysis[J]. Valve, 2015(1): 16-17, 20. (in Chinese)
- [6] 张丽芹, 邱建文, 王江波. 核安全级阀门部件的抗震鉴定试验分析和实施[J]. 核动力工程, 2014, 35(S1): 133-135.
ZHANG Liqin, QIU Jianwen, WANG Jiangbo. Nuclear safety valve components analysis and implementation of seismic qualification test[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(S1): 133-135. (in Chinese)
- [7] 周文建, 陈宏, 闻邦椿. 核电站反应堆冷却剂泵的地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 32-35, 162-163.
ZHOU Wenjian, CHEN Hong, WEN Bangchun. Seismic response analysis of reactor coolant pump in nuclear power plant[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 32-35, 162-163. (in Chinese)
- [8] 季同盛. 核电应急柴油发电机组抗震分析[D/OL]. 镇江: 江苏科技大学, 2016[2017-08-15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201701&filename=1016736361.nh>
JI Tongsheng. Seismic Analysis of Emergency Diesel Generator Sets for Nuclear Power Plant[D/OL]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016[2017-08-15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201701&filename=1016736361.nh>. (in Chinese)
- [9] Dai K S, Huang Y C, Gong C Q, et al. Rapid seismic analysis methodology for in-service wind turbine towers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(3): 539-548.
- [10] 伍杜傲, 高红波, 徐德城, 等. 核级管接头抗震特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S2): 402-405.
WU Du'ao, GAO Hongbo, XU Decheng, et al. Seismic performance analysis of nuclear piping fittings[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(S2): 402-405. (in Chinese)
- [11] Nguyen P C, Kim S E. Nonlinear inelastic time-history analysis of three-dimensional semi-rigid steel frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 192-206.
- [12] 欧智菁, 林建茂, 林上顺, 等. 钢管混凝土柱格构式高墩连续梁桥抗震设计[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(9): 94-104.
OU Zhijing, LIN Jianmao, LIN Shangshun, et al. Research on seismic design of continuous girder bridge with high piers of concrete filled steel tubular laced column[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(9): 94-104. (in Chinese)
- [13] Li M, Tang W C, Yuan M. Structural dynamic topology optimization based on dynamic reliability using equivalent static loads[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(1): 121-129.
- [14] 侯磊. 核电厂用柴油机组抗震计算与分析研究[D/OL]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015[2017-08-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201801&filename=1018051987.nh>.
HOU Lei. Seismic analysis and research of emergency diesel genset for NPP[D/OL]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015 [2017-08-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201801&filename=1018051987.nh>. (in Chinese)
- [15] 朱镜清. 结构抗震分析原理[M/OL]. 北京: 地震出版社, 2002[2017-8-15]. <http://find.nlc.cn/search/showDocDetails?docId=187758842223203149&dataSource=ucs01&query=%E7%BB%93%E6%9E%84%E6%8A%97%E9%9C%87%E5%88%86%E6%9E%90%E5%8E%9F%E7%90%86>.
ZHU Jingqing. Principle of Seismic Analysis of Structures[M/OL]. Beijing: Seismological Press, 2002[2017-8-15]. <http://find.nlc.cn/search/showDocDetails?docId=187758842223203149&dataSource=ucs01&query=%E7%BB%93%E6%9E%84%E6%8A%97%E9%9C%87%E5%88%86%E6%9E%90%E5%8E%9F%E7%90%86>. (in Chinese)
- [16] Nasim S, Moghaddasi B, Zhang Y F. Seismic analysis of diagrid structural frames with shear-link fuse devices[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(3): 463-472.
- [17] Zhang R, Weng D, Ren X. Seismic analysis of a LNG storage tank isolated by a multiple friction pendulum system[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 10(2): 253-262.
- [18] Liu F. Seismic response analysis of containment with hemisphere dome for advanced nuclear power station[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256/257/258/259: 2091-2095.
- [19] 美国机械工程师学会. ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范[S/OL]. 北京: 中国石化出版社, 2004[2017-08-12]. <https://www.docin.com/p-1835276916.html>.
American Institute of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code [S/OL]. Beijing: China

- Petrochemical Press, 2004[2017-08-12].<https://www.docin.com/p-1835276916.html>. (in Chinese)
- [20] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺. 抗震工程学 A6[M/OL]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000[2017-08-15].<http://find.nlc.cn/search/showDocDetails?docId=6419255223109543579&.dataSource=ucs01&.query=%E6%8A%97%E9%9C%87%E5%B7%A5%E7%A8%8B%E5%AD%A6>.
- SHEN Jumin, ZHOU Xiyuan, GAO Xiaowang. Aseismic engineering A6[M/OL]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 [2017-08-15]. <http://find.nlc.cn/search/showDocDetails?docId=6419255223109543579&.dataSource=ucs01&.query=%E6%8A%97%E9%9C%87%E5%B7%A5%E7%A8%8B%E5%AD%A6>. (in Chinese)
- [21] Pozzi M, der Kiureghian A. Response spectrum analysis for floor acceleration[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(12): 2111-2127.
- [22] Liu G H, Guo W, Li H N. An effective and practical method for solving an unnegligible problem inherent in the current calculation model for multi-support seismic analysis of structures[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(7): 1774-1784.
- [23] Pentti Varpasuo. Seismic design and analysis of nuclear power plant structures[J]. Engineering Sciences, 2013, 11(3): 10-19.
- [24] 谭忠文, 王海涛, 何树延. 核电厂大型组合结构的有限元抗震分析方法研究[J]. 核科学与工程, 2008, 28(2): 188-192.
- TAN Zhongwen, WANG Haitao, HE Shuyan. Research on seismic analysis method of large joint structures in nuclear power plant using finite element method[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2008, 28(2): 188-192. (in Chinese)
- [25] 刘中华. 核电设备抗震试验与计算分析[D/OL]. 上海: 同济大学, 2008[2017-08-15].<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&.dbname=CMFD2011&.filename=2008066618.nh>.
- LIU Zhonghua. Seismic testing and analysis of equipments for NPP[D]. Shanghai: Tongji University, 2008[2017-08-15]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&.dbname=CMFD2011&.filename=2008066618.nh>. (in Chinese)
- [26] 郑州三合不锈钢制品有限公司. 不锈钢丝绳 GB9944-2015[S/OL]. 北京: 中国标准出版社(2015-09-11)[2018-08-12].
<http://www.doc88.com/p-5781214889473.html>.
- Zhengzhou Sanhe Stainless Steel Products Co., Ltd.. Stainless Steel Wire Rope GB9944-2015[S/OL]. Beijing: China Standard Press, (2015-09-11)[2018-08-12].<http://www.doc88.com/p-5781214889473.html>. (in Chinese)
- [27] 孔宪京, 林皋. 核电厂工程结构抗震研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 62-74.
- KONG Xianjing, LIN Gao. Research advances on engineering structural seismic safety of nuclear power plant[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4): 62-74. (in Chinese)
- [28] 谭忠文, 张征明, 何树延. 中国实验快堆新燃料组件装载机的抗震分析[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(8): 734-738.
- TAN Zhongwen, ZHANG Zhengming, HE Shuyan. Seismic analysis of new fuel assembly loading machine for China experiment fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(8): 734-738. (in Chinese)