

中国实验快堆新燃料组件装载机的 抗震分析

谭忠文, 张征明, 何树延

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:中国实验快堆新燃料组件装载机是一机构部件, 结构复杂, 装载机的许多运动件和传动件难以用有限元进行精细模拟。本文引入了一种简化有限元计算的思路, 即针对装载机主要部件的主体框架建立简化的有限元模型, 通过反应谱分析, 计算出各个主要部件在地震条件下的加速度响应。采用手算方法对主要的连接螺栓进行力学计算, 并根据相关法规对螺栓进行评价, 以确保总体结构的完整性。

关键词:燃料组件装载机; 有限元分析; 抗震计算

中图分类号: TL425

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)08-0734-05

Seismic Analysis of New Fuel Assembly Loading Machine for China Experiment Fast Reactor

TAN Zhong-wen, ZHANG Zheng-ming, HE Shu-yan

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: New fuel assembly loading machine of China Experiment Fast Reactor is a kind of kinetic equipment with very complex structure. Many of its motional and driving components can not be simulated exactly by finite element model (FEM). A simplified FEM analysis method was introduced in the paper, and the main frame of the equipment was simulated by a simplified FEM model. Response spectrum analysis method was used to obtain the acceleration response of the main components of the equipment under seismic condition. Theoretical analysis method was used to calculate the stresses of the main connecting bolts, and these bolts were evaluated based the regulations of nuclear codes to ensure the structure integrity of the equipment.

Key words: fuel assembly loading machine; finite element analysis; seismic analysis

中国实验快堆的新燃料组件装载机(简称装载机)位于主厂房的+16.8 m 楼层。装载机属于安全3级、抗震Ⅰ类设备,设计上要求地震时总体结构保持完整性,即地震时不出现整体

性的破坏。

装载机在地震条件下的载荷主要是自身质量所产生的惯性力。从整体结构上看,装载机的主要部件均有很高的刚度,主要部件间均通

过螺栓相互连接,地震载荷也主要通过螺栓进行传递,因此,螺栓件是地震载荷的主要承担者,也是装载机整体结构上的薄弱环节。因此,本工作针对装载机的主体结构建立简化的有限元模型,并采用反应谱法进行地震响应计算,根据计算所得各主要部件的地震响应加速度,采用手算方法对主要的连接螺栓进行力学计算,最后根据相关法规对螺栓进行评价,以确保总体结构的完整性。本文所采用的有限元软件为NASTRAN,前后处理软件为PATRAN。

1 地震响应分析

1.1 有限元模型

装载机是一机构部件,其结构十分复杂(图1),许多运动件和传动件难以用有限元软件进行

精细的模拟。它的主要部件及其质量列于表1,主要部件间的连接螺栓列于表2。用简化方法

表1 装载机的主要部件

Table 1 Main components

of new fuel assembly loading machine

图中序号	部件名称	部件质量/kg
1	底座	1 800
2	立柱	275
3	框架	260
4	上横梁	274
5	导向柱	890
6	导向管及抓手	52
7	支臂	140
12	重量传感器	32
13	卷扬驱动	290
14	转位驱动	110
15	转位显示	40

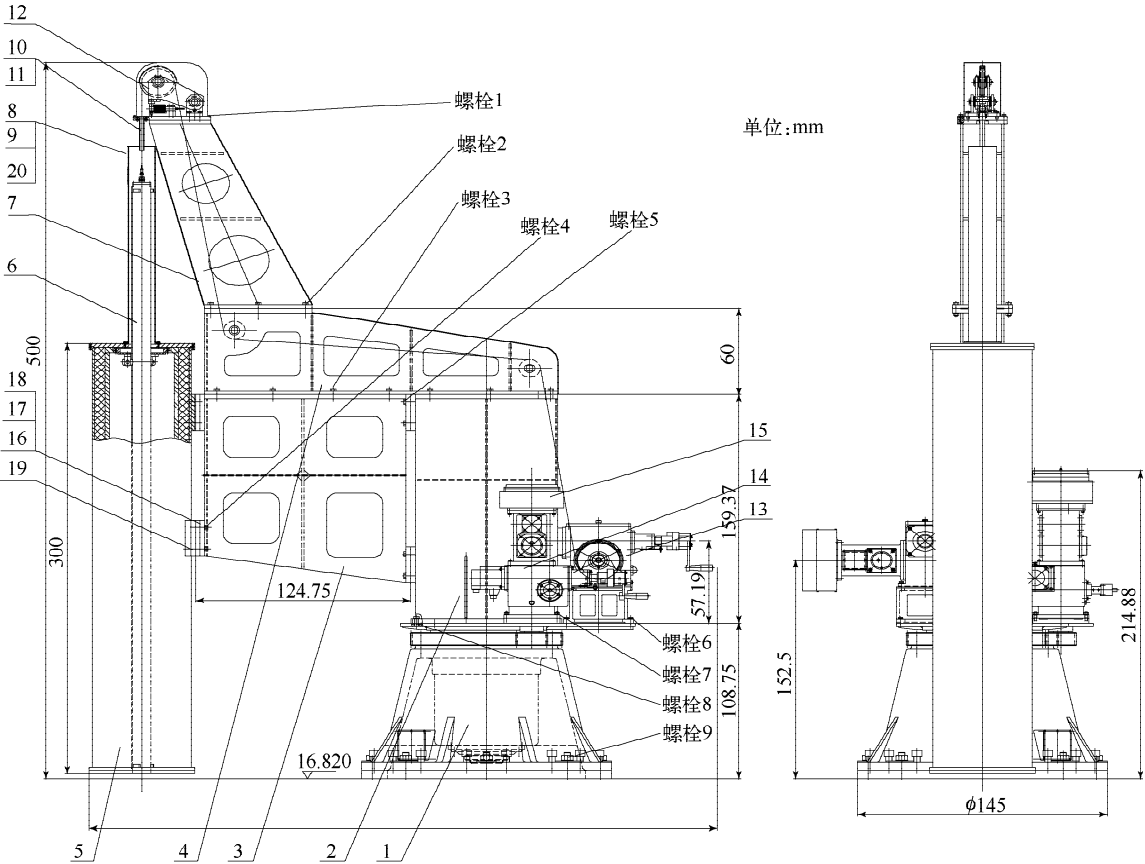


图1 装载机结构示意图

Fig.1 Scheme of new fuel assembly loading machine

- 1——底座部件;2——立柱部件;3——框架部件;4——上横梁部件;5——导向柱;6——导向管及抓手部件;
7——支臂部件;8——防护筒体;9——内六角圆柱头螺钉 M6×20;10——防护筒体;11——内六角圆柱头螺钉 M5×12;
12——重量传感器部件;13——卷扬驱动部件;14——转位驱动部件;15——转位显示部件;16——六角头螺栓 M16×65;
17——标准型弹簧垫圈 16;18——内螺纹圆锥销 16×65;19——调整垫板;20——盖板

表 2 装载机主要部件间的连接螺栓

Table 2 Connecting bolts of main components

螺栓序号	功能	规格	材料	数量
1	连接重量传感器部件与支臂部件	M10	8.8 级	4
2	连接支臂部件与上横梁部件	M16	8.8 级	6
3	连接上横梁部件与框架部件和立柱部件	M16	8.8 级	14
4	连接导向柱与框架部件	M16	8.8 级	8
5	连接框架部件与立柱部件	M16	8.8 级	8
6	连接卷扬驱动部件与立柱部件	M12	8.8 级	8
7	连接转位驱动部件与立柱部件	M12	8.8 级	8
8	连接立柱部件与底座部件	M16	8.8 级	11
9	底座部件上的地脚螺栓	M30	8.8 级	8

建立的有限元模型示于图 2。模型以梁单元建立,梁单元的刚度取各主要部件的主体框架的刚度,而质量则取各主要部件的全部质量。模型中认为各主要部件之间为刚性连接。模型在底座部件的底部施加刚性约束条件。

取截止频率为 34 Hz。计算表明,在 34 Hz 以内,模型仅有 1 阶固有频率,其振型为模型以底座部件的轴线为轴转动振动。

1.3 地震输入谱

针对图 2 所示的分析模型,地震动由底端输入,此处为+16.8 m 楼板。该处的楼层谱参见文献[2]。

根据相关法规,按螺栓连接钢结构确定装载机的阻尼比,即 SL-1 级地震为 4%,SL-2 级地震为 7%^[1]。作为一种偏保守的简化计算,本文只考虑 SL-2 条件下的地震响应,而装载机的结构阻尼比则取 SL-1 条件下的值为 4%。

1.4 地震响应

对于本次计算,只考察模型所产生的加速度响应。

由模态分析的结果可知,在楼层谱的截止频率(34 Hz)范围内,装载机只有 1 阶固有频率,该阶振型将只在水平 y 向的地震激励下产生响应,而在水平 x 向和垂直 z 向的地震激励下,装载机不会产生振型响应。因此,在进行反应谱计算时,仅将 y 向的反应谱输入模型,以得到模型在 y 方向地震激励下的最大响应,而装载机在 x 向和 z 向地震激励下的最大加速度响应则为对应反应谱的零周期加速度值。由此得到的装载机各主要部件上的最大加速度列于表 3。

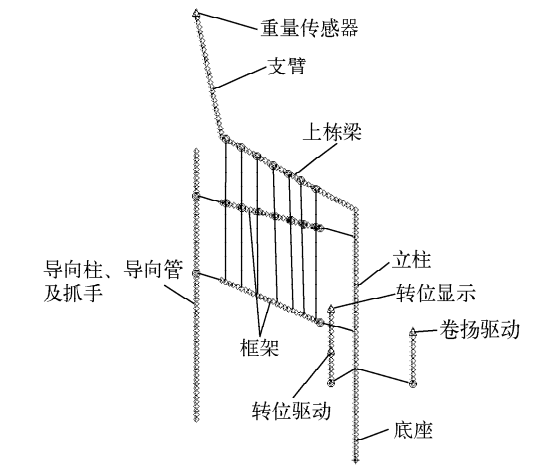


图 2 装载机有限元模型图

Fig. 2 FEM model

of new fuel assembly loading machine

1.2 模态分析

反应谱计算基于模态分析。因此,反应谱计算的第一步是对结构进行模态分析,以了解结构的基本动力学特性。

对图 2 所示的有限元模型进行模态分析,

Table 3 Maximum accelerations of main components

部件名称	最大加速度/(m·s ⁻²)		
	水平 <i>x</i> 向	水平 <i>y</i> 向	垂直 <i>z</i> 向
底座	6.27	0.046	7.35
立柱	6.27	1.43	7.35
框架	6.27	5.31	7.35
上横梁	6.27	6.38	7.35
导向柱、导向管及抓手	6.27	6.23	7.35
支臂	6.27	9.30	7.35
重量传感器	6.27	10.60	7.35
卷扬驱动	6.27	0.060	7.35
转位驱动	6.27	0.15	7.35
转位显示	6.27	0.20	7.35

2.1 材料的机械性能和截面参数

Fig. 3 Schematic diagram of bolts analysis

重量传感器部件所产生的垂直 z 向的地震力 $F_{\tilde{z}} = 32 \text{ kg} \times (7.35 + 9.8) \text{ m/s}^2 = 548.8 \text{ N}$ 。

由于垂直向上的地震加速度小于 1 g,因此,重量传感器部件不会向上跳起,螺栓不会产生附加的应力。

4) 应力分量的合成

将 1)、2)、3)中对应的应力分量按 SRSS 法进行合成,即可得螺栓 1 在地震条件下的最大拉应力 $\sigma_1^{SRSS} = \sqrt{(\sigma_1^x + \sigma_1^{xx})^2 + (\sigma_1^y + \sigma_1^{yy})^2} = 18.49 \text{ MPa}$ 。

依据同样的计算方法,可以得到其余各主要连接螺栓(螺栓 2~9)各自的拉应力。

3 力学评价

3.1 力学评价准则

此处将螺栓均视为设备支承件,按 ASME-III-NF 中 3 级设备的有关准则进行应力评价。SL-1 级地震属于 ASME 规范的 B 级使用限制,SL-2 级地震属于 ASME 规范的 D 级使用限制。由于 B 级使用限制比 D 级使用限制严格,因此,保守地按 B 级使用限制进行评价。

NF-3265、NF-3225、NF-3324. 6 规定了 3 级螺栓连接件(铁素体钢)在 B 级使用限制下的限值,按摩擦型连接件进行评价^[6],有:1) 仅有拉伸应力时,拉应力 f_t 的限值 $F_{tb} = S_u/2 = 400 \text{ MPa}$;2) 仅有剪切应力时,剪应力 f_v 的限值 $F_{vb} = 0.62S_u/3 = 165.3 \text{ MPa}$;3) 拉伸与剪切组合时,应满足公式 $f_t^3/F_{tb}^3 + f_v^2/F_{vb}^2 \leq 1$ 。

3.2 应力计算总结

主要连接螺栓的应力计算结果列于表 4。

这里认为所有的连接螺栓均具有足够的预紧力,因此,螺栓只有拉应力,而不存在剪应力。

由表 4 可知,装载机的主要连接螺栓的应力均小于对应的应力限值,并有一定的安全裕度。因此,在地震条件下,装载机能够保持总体结构的完整性。

4 小结

机构类的设备在结构上较复杂,在进行抗震计算时,如采用有限元方法进行分析,通常不

易将这类设备合理地简化成一个有限元模型。本文的算例实际上是探讨了这样一个思路:抓住设备的主要动力学特性,将其简化成一个非常简单的有限元模型,求取设备在地震激励下各主要部分所产生的最大加速度响应值,然后针对设备的薄弱环节,采用手算的办法来验证设备的抗震性能。

表 4 地震条件下主要连接螺栓的应力及其限值
Table 4 Stresses and corresponding limits of connecting bolts under seismic condition

螺栓序号	拉伸应力值/MPa	限值/MPa
1	18.49	
2	23.49	
3	31.49	
4	102.27	
5	170.54	400.0
6	25.88	
7	13.68	
8	235.92	
9	82.05	

参考文献:

[1] GB 50267—97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,1997.

[2] 俄罗斯联邦原子能部圣彼得堡核动力研究设计院. CEFR-00-002C (0# 修改)中国试验快中子反应堆(CEFR)地震作用下楼层反应谱修改[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.

[3] GB 3098.1—86 紧固件机械性能——螺栓、螺钉和螺柱[S]. 北京:中国标准出版社,1986.

[4] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1991.

[5] 王国周,翟履谦. 钢结构:原理与设计[M]. 北京:清华大学出版社,1993.

[6] 美国机械工程师学会. ASME-III 核动力装置设备, NF 分卷:设备支承结构[S]. 合肥:中国机械工程学会,1989.