

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.007

基于 ANSYS 的桥式抓斗卸船机结构 抗震性能分析

叶永伟, 陆俊杰

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对桥式抓斗卸船机在地震作用下的动态响应和抗震性能问题,对卸船机结构在地震作用下的结构强度、应变特性、轮压稳定性以及损伤模式等方面进行了研究,提出了基于 ANSYS 的结构抗震分析方法。结合传统岸桥和建筑抗震分析理论,利用 ANSYS 建立了桥式抓斗卸船机钢结构有限元模型,对卸船机在不同工况和不同地震激励下的位移响应、应力响应和轮压进行了地震等效静载分析计算,明确了卸船机的关键位置。在等效静载分析的基础上,根据拟建场地的基础特性和卸船机的结构振动特性,选取了合适的抗震设计反应谱和典型地震波记录,对卸船机主要工况在不同地震激励下进行了反应谱分析和动力时程分析,并将其与等效静载分析的实验数据进行了对比研究。实验结果表明:桥式抓斗卸船机有较好的抗震性能,满足规定的抗震设防烈度 7 度,保证了其钢结构设计的正确性,对卸船机的抗震研究领域和工程应用具有参考意义。

关键词:桥式抓斗卸船机;地震响应;反应谱分析;时程分析

中图分类号:TH21;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)09-0986-07

Seismic behavior analysis of bridge-type grab ship unloader based on ANSYS

YE Yong-wei, LU Jun-jie

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at dynamic response and seismic performance of bridge type grab ship unloader under earthquake, the method for seismic analysis of structure based on ANSYS was put forward with the research on intensity, strain characteristics, wheel pressure stability and damage mode of ship unloader structure under earthquake. According to the traditional theoretical anti-seismic analysis of quayside container crane and architecture, a finite element model of the bridge-type grab ship unloader based on ANSYS was established for stability of major damage pattern and wheel pressure with equivalent static analysis in different conditions and seismic excitations. Aiming at dynamic behavior and seismic response of the ship unloader under longitudinal or transverse seismic action, according to the court sorts division and the vibration characteristic of structure, the anti-quaking design reacting spectrum of crane and the typical seismic record was used for time history analysis of ship unloader. The experimental data between the equivalent static analysis, response spectrum analysis and time history analysis was compared. The research result indicates that the ship unloader can satisfy the requirement of seismic fortification intensity and ensure the correctness of the design of steel structure. It has certain reference significance to the seismic research field and project application of bridge-type grab ship unloader.

Key words: bridge-type grab ship unloader; earthquake response; response spectrum method; time history analysis

0 引言

桥式抓斗卸船机适用于散货驳船和海轮船舶的卸船作业,对港口码头的正常工作起到了关键作用。随着船舶加速向大型化发展和日益增长的散货物料运输量

的需求,这促使桥式抓斗卸船机的技术不断进步以适应码头的装卸要求。同时港口机械的大型化伴随工作效率的大幅提高也带来了诸多安全隐患,其中以地震灾害的破坏最为明显。桥式抓斗卸船机(以下简称卸船机)因其钢结构跨度大、工作频繁且工作条件差等特点更易

收稿日期:2017-02-28

作者简介:叶永伟(1964-),男,浙江义乌人,博士,副教授,主要从事机电系统智能控制方面的研究。E-mail: yzw@zjut.edu.cn

遭受地震破坏,明确卸船机结构在地震作用下的破坏模式、提高抗震性能,是其结构设计的重要部分。

国内外诸多学者在港口起重机抗震理论分析取得了一定的进展^[14]。KOSBAB 等^[5]建立了有限元数值模型定量的计算了起重机的地震动态特性;金玉龙等^[6]研究了带有隔震装置的岸边集装箱起重机在不同工况和不同地震激励下的动态地震行为;郑培等^[7]通过相似模型的地震试验数据验证了起重机抗震装置的设计和性能。目前港口机械的抗震分析研究主要以集装箱起重机为对象,对于桥式抓斗卸船机的研究大多集中在金属结构的应力应变特性和疲劳特性的研究^[8-10],对于整机钢结构的动态特性和抗震性能的研究尚显不足。

本研究以桥式抓斗卸船机为对象,建立卸船机钢结构的有限元分析模型,利用 ANSYS 软件对结构在基本抗震设防烈度 7 度下的动态特性进行分析。

1 桥式抓斗卸船机有限元建模

桥式抓斗卸船机是典型的多自由度钢结构,主要由运行大车、门架结构(海陆侧立柱、上下横梁、门框横梁及撑杆系统)、前后大梁、前后拉杆、运行小车、操作机房和料斗吊具等组成^[11]。

桥式抓斗卸船机的金属结构在实际工作中受力情况较为复杂,因此在有限元建模过程中,考虑到各个部件实际受力情况,结合结构力学理论和岸边集装箱起重机研究经验^[12],对卸船机的钢结构进行以下简化^[13],卸船机有限元模型如图 1 所示。

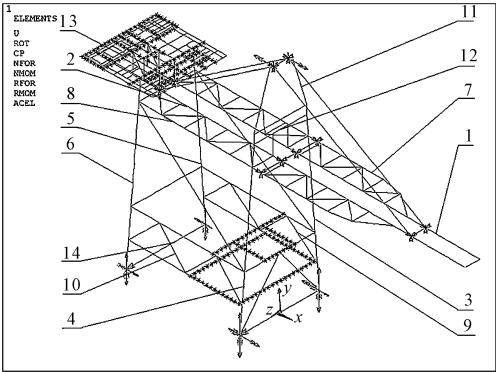


图 1 桥式抓斗卸船机有限元模型

1—前大梁;2—后大梁;3—海侧右立柱;4—海侧左立柱;5—陆侧右立柱;6—陆侧左立柱;7—右侧水平桁架;8—左侧水平桁架;9—右侧桁架;10—右侧桁架;11—小门架;12—前门架;13—机房平台;14—后门架

- (1)卸船机附属的安全栏、扶梯和焊缝等没有直接体现在模型中的结构,将其以等效质量的方式加载;
- (2)小车运行机构、机房平台、料斗、四通平台以

及结构内部筋板、隔板等部件不易用模型体现,故等效为集中质量添加到结构上;

(3)卸船机模型结构中的焊缝和高强度螺栓连接的部件均以刚性连接的方式,前后拉杆与前后大梁和小门架绞结以自由度耦合的方式在模型中体现。

2 桥式抓斗卸船机等效静载分析

各国港口在建设新型港口装卸机构时均提出了等效地震载荷的验算,即采用当地地震局根据港口码头的基础特性以及本地的地震记录向用户或者咨询公司提供一个惯性载荷进行抗震验算^[14]。本研究采用用户提供的 0.22 g(g 为重力加速度)等效惯性载荷,另外根据该地大震不多,小震频发的特点,笔者将 HCP 审查提供的瓦尔帕莱索—TPS0.15g 应用于本研究模型中进行核算。根据《起重机设计手册》中所描述,设计安全系数为 1.1,本次计算所用卸船机结构材料为 Q345 钢,屈服应力为 345 MPa,因而该模型最大许用应力为 313 MPa。

根据卸船机实际工作状态结合损伤形式,本研究将卸船机在抗震分析计算时主要分为以下 3 个主要实验工况:

- (1)工况 1。小车位于前大梁端部并且抓斗满载;
- (2)工况 2。小车位于后大梁中部并且抓斗满载;
- (3)工况 3。空载情况下前大梁 80°抬起,小车位于后大梁中部并且抓斗空载。

本研究通过 ANSYS 进行的 3 个工况下的静载计算,发现在卸船机在前大梁端部与机房平台后端部的位移响应值最大,各个工况在各个载荷方向下的最大位移值和位置如表 1 所示(纵向为小车行驶方向,横向为大车行驶方向)。

表 1 卸船机在纵向和横向等效静载作用下的最大位移响应

地震载荷	载荷方向	工况	最大位移值/mm	最大位移位置
惯性载荷 0.22g	纵向 OX	工况 1	126.04	前大梁端部
	纵向 OX	工况 2	94.04	机房平台右侧后端
	纵向 OX	工况 3	616.3	前大梁端部
	横向 OZ	工况 1	149.39	前大梁端部
	横向 OZ	工况 2	99.11	机房平台左侧后端
	横向 OZ	工况 3	251.82	前大梁端部
瓦尔帕莱索—TPS0.15g	纵向 OX	工况 1	121.95	前大梁端部
	纵向 OX	工况 2	83.08	机房平台右侧后端
	纵向 OX	工况 3	497.82	机房平台右侧后端
	横向 OZ	工况 1	133.49	前大梁端部
	横向 OZ	工况 2	85.37	机房平台左侧后端
	横向 OZ	工况 3	247.84	前大梁端部

卸船机在地震作用下的最大位移主要集中在前大

梁端部和机房平台后端,这与实际地震作用下结构最大位移发生的位置一致。其中当卸船机的前大梁以 80°抬起时处于纵向载荷情况下,在其端部会出现较大

的位移响应,这需要引起设计者的注意。
在等效地震载荷作用下卸船机结构的最大应力结果及发生位置如表 2 所示。

表 2 卸船机在纵向和横向等效静载作用下的最大应力响应

地震载荷	载荷方向	工况	最大应力值/MPa	最大应力位置
惯性载荷 0.22g	纵向 OX	工况 1	224.36	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	纵向 OX	工况 2	213.07	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	纵向 OX	工况 3	269.77	小门架底部与前门架上横梁连接处
	横向 OZ	工况 1	160.46	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处
	横向 OZ	工况 2	155.99	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处
	横向 OZ	工况 3	154.13	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处
瓦尔帕莱索 —TPS0.15g	纵向 OX	工况 1	154.50	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	纵向 OX	工况 2	146.98	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	纵向 OX	工况 3	222.43	小门架底部与前门架上横梁连接处
	横向 OZ	工况 1	153.58	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处
	横向 OZ	工况 2	149.33	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处
	横向 OZ	工况 3	147.82	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处

由于卸船机主要采用梁单元模拟,因此该处的最大应力为梁截面上由弯曲引起的正应力与轴向应力之和的绝对值。从表 2 中可以看出卸船机在两种等效地震载荷下的最大应力值均能达到设计要求。

式,当剧烈地震发生时,大车车轮与码头轨道之间发生滑动摩擦,迫使卸船机在该方向上出现跳轨情况,对门腿支撑造成损伤,是卸船机失效的主要原因之一,因此考察结构在等效载荷作用下的轮压情况,卸船机在地震等效静载作用下的轮压计算如表 3 所示。

由于卸船机在垂向(OY)方向上为轮轨接触的形式,

表 3 卸船机在地震等效静载作用下的轮压计算

地震载荷	载荷方向	工况	最大应力/N			
			陆侧左	陆侧右	海侧左	海侧右
惯性载荷 0.22g	纵向 OX	工况 1	2.36E+06	2.34E+06	2.52E+06	2.54E+06
	纵向 OX	工况 2	2.89E+06	2.86E+06	1.74E+06	1.76E+06
	纵向 OX	工况 3	3.23E+06	3.21E+06	1.40E+06	1.42E+06
	横向 OZ	工况 1	2.06E+05	2.52E+06	1.61E+06	5.42E+06
	横向 OZ	工况 2	8.70E+05	3.04E+06	9.24E+05	4.42E+06
	横向 OZ	工况 3	1.14E+06	3.31E+06	5.80E+05	4.22E+06
瓦尔帕莱索—TPS0.15g	纵向 OX	工况 1	2.04E+06	2.03E+06	2.84E+06	2.85E+06
	纵向 OX	工况 2	2.59E+06	2.57E+06	2.04E+06	2.05E+06
	纵向 OX	工况 3	2.91E+06	2.90E+06	1.72E+06	1.73E+06
	横向 OZ	工况 1	5.72E+05	2.15E+06	2.22E+06	4.81E+06
	横向 OZ	工况 2	1.21E+06	2.69E+06	1.48E+06	3.86E+06
	横向 OZ	工况 3	1.49E+06	2.97E+06	1.16E+06	3.64E+06

从表 3 中的数据可知在等效载荷 0.22 g 和 0.15 g 的作用下,卸船机的海陆侧轮压均为正值,这说明在这种工况下,卸船机基本不会发生跳轨的现象。另外一方面,虽然采用惯性载荷 0.22 g 的地震载荷时并未出现轮压为负的情况,但是工况 1 的陆侧左支撑的压力余量只剩下 21 t,相对于上千吨的结构来说,当出现 8 度或者 9 度以上的地震情况时,结构有极有可能会发生跳轨情况。

3 桥式抓斗卸船机模态分析

构动力特性的一种近代方法,主要用于确定结构的振动特性,即结构的固有频率和固有振型,进行模态分析有助于避免结构发生共振或使结构按特定频率进行振动。

笔者研究的桥式抓斗卸船机的结构属于大型对称结构,因此采用 Block Lanczos 方法对卸船机有限元结构进行模态分析,得到其在 3 种工况下的前 20 阶固有频率及主要振型,取前 10 阶为主要模态研究,由于篇幅有限本研究列出主要工况 1 和工况 3 的固有频率及振型特征,如表 4 所示。

模态分析是地震反应谱分析的基础^[15],是研究结

表 4 工况 1 下卸船机 10 阶固有频率

阶数	频率/Hz	工况 1 主要振型特征	频率/Hz	工况 3 主要振型特征
1	0.921 27	整机横向弯曲	0.509 76	前大梁绕前大梁横撑转动
2	1.178 1	整机纵向弯曲	1.012 5	整机横向弯曲
3	1.445 6	前后大梁垂向转动	1.279 1	整机纵向弯曲
4	1.649 0	前大梁垂向弯曲	2.033 0	前大梁与机房平台横向弯曲
5	2.110 8	机房平台电气系统横撑纵向弯曲	2.116 2	机房平台电气系统横撑纵向弯曲
6	2.136 4	机房平台后部垂向弯曲	2.140 9	机房平台后部垂向弯曲
7	2.181 0	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲	2.206 0	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲
8	2.206 8	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲	2.206 8	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲
9	2.206 8	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲	2.206 8	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲
10	2.207 0	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲	2.207 0	机房平台卷筒机构横撑纵向弯曲

从计算结果可知,结构的前 10 阶频率较为密集且数值较低,这与卸船机的实际频率一致。由表 4 可以看出卸船机在后几阶模态均是机房平台承重梁发生弯曲,这与许多相似结构的模态分析大相径庭,究其原因 是机房平台建模的细化使得该部位在模态分析情况下 容易产生局部振动。在对比各个工况下模态振型,容 易发现在工况 1 下的模态振型完全包括了工况 2 下的 振型并且各个工况的后三、四阶模态数值几乎相等。

从计算结果中不难发现,在卸船机的振动中,卸船 机的大部分模态振型为 OX 方向上的振动,而除机房 平台的局部振动在 3 种工况下的诸多振型均是大梁沿 着 OZ 方向的摆动,这与其整体结构的刚度在 OZ 方 向最弱、频率最低的情况相当吻合,此外卸船机三向主 轴方向的振动其主要作用而扭转作用的效应影响较小。

4 桥式抓斗卸船机地震反应谱分析

美国学者在 20 世纪 40 年代提出了计算地震作用 的反应谱理论,也称动力法,其考虑地震时地面的运动 特性与结构自身的动力特性,是当前工程设计应用中最为 广泛的抗震设计理论^[16]。反应谱理论是以单质点体系 在实际地震作用下的反应为基础来分析结构反应的方法, 确定结构对随机载荷或随时间变化载荷的动力响应。

我国学者根据国内外数百条地震记录的反应谱进 行统计分析,建立了地震响应系数与结构体系自振周期 T 的关系曲线(T),本研究根据当地的地质勘探报

告,该施工场地为中软土,建筑场地类别为 2 类,场地 位于抗震设防烈度为 7 度区内,设计基本地震加速度 值为 $0.1g$,设计地震分组为第一组,地震特征周期为 $0.35s$ 。抗震设计反应谱如图 2 所示。

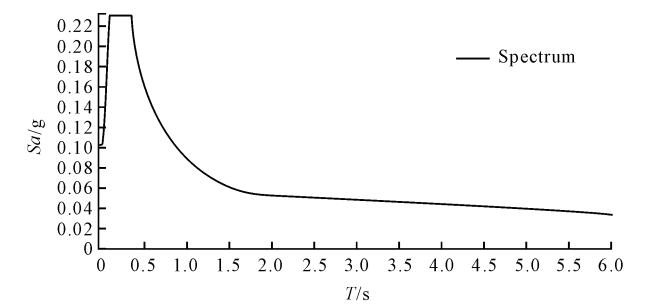


图 2 抗震设计反应谱

《建筑抗震设计规范》规定:在一般情况下,应允许 建筑结构的两个主轴方向分别计算水平地震作用并进 行抗震计算,各个方向的水平地震作用应由该方向抗侧 力结构承担,因此本研究分别计算卸船机在纵向(OX) 和横向(OZ)两个水平方向作用下的响应。同时考虑钢 结构之间连接处的摩擦着用,结构阻尼比为 5%。

由于卸船机结构相对复杂,模型中单元与节点较 多,在动态分析时不可能给出每个单元或者节点的信 息,本研究对一些关键位置的地震特性进行研究。在 地震作用下,卸船机结构的 4 个关键位置即前大梁端 部、后大梁端部、机房位置和小车吊点位置的位移响应 如表 5 所示。

表 5 卸船机在地震作用下的位移响应(谱分析)

载荷	工况	最大位移响应/mm											
		前大梁端部			后大梁端部			吊点位置			机房位置		
		纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向
纵向	1	14.2	3.08	0.21	14.08	4.22	-0.09	14.17	2.47	0.19	15.5	6.17	0.09
	2	12.88	1.70	0.14	12.83	4.01	0.03	12.83	0.40	0.04	14.19	5.97	0.03
	3	299.4	54.05	0.10	11.41	4.60	0.02	11.41	1.93	0.16	12.48	5.85	0.03
横向	1	0.19	0.13	46.37	0.07	0.01	25.64	0.03	0.02	43.29	0.51	1.86	27.33
	2	0.07	0.03	24.71	0.09	0.02	25.79	0.05	0.07	22.86	1.10	2.08	27.78
	3	0.32	0.02	23.28	0.06	0.01	25.72	0.03	0.06	22.70	1.14	2.09	27.74

由表 5 中数据可以看出各工况下,卸船机在纵向或横向地震的作用下,由于耦合振型作用各点处除在载荷作用方向上出现位移外,与载荷方向相垂的两个方向也有位移响应,但是地震作用主要引起载荷方向上的位移。

当卸船机前大梁 80°抬起即工况 3 在纵向地震作

用下出现了较大的位移响应,这是因为该工况下接近设计反应谱峰值对应的频率。总的来说,卸船机关键位置在地震作用下的位移响应是可以接受的,但前大梁端部的位移响应需要引起设计者的注意。为探求各种工况下卸船机的最大位移,各个工况下的最大位移响应云图如图 3、图 4 所示。

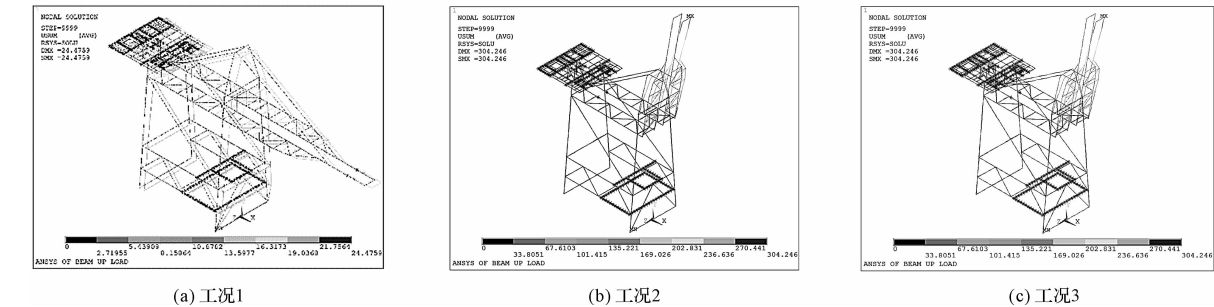


图 3 卸船机在纵向地震作用下的位移响应云图

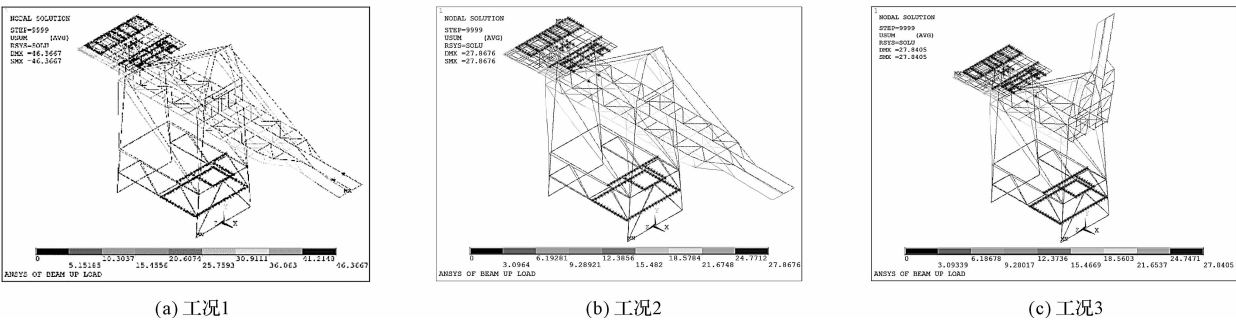


图 4 卸船机在横向地震作用下的位移响应云图

卸船机结构在地震作用下的应力响应是判断其强度的主要参数。

卸船机在地震作用下的最大应力值以及出现位置如表 6 所示。

表 6 卸船机在地震作用下的应力响应(谱分析)

载荷	工况	最大应力值/MPa	出现位置
纵向	1	73.59	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	2	67.58	海侧右立柱与右侧桁架连接处
	3	130.16	小门架底部与前门架上横梁连接处
横向	1	47.23	海侧右立柱与右侧水平桁架连接处
	2	41.08	海侧右立柱与右侧水平桁架连接处
	3	36.86	小门架底部与前门架上横梁连接处

由表 6 可见卸船机在前两种工况下最大应力出现的位置与数值均一致,并且与等效静载作用下的最大应力的位置相同。在纵向地震作用下,卸船机在工况 3 的最大应力大于其他工况,这是因为工况 3 下起主要作用的振型的频率靠近放大因子对应的共振频率。总体来说,卸船机在地震反应谱作用下的应力响应满足抗震设计要求。

5 桥式抓斗卸船机地震时程分析

动态时间历程分析法(简称时程分析法),是将地震波记录或人工波作用在结构上,直接对结构运动方程进行积分从而求得结构在任意时刻地震反应的分析方法,所以动态时程分析方法也称为直接积分法^[17]。

根据该场地位于抗震设防烈度 7 度区第一组,场地类别为 2 类,由于篇幅有限本研究选用该类场地典型地震记录 El-Centro 波进行分析验算。在抗震研究分析方面,建筑和桥梁无论理论试验分析还是实例应用方面都是先驱者,所以本研究在研究桥式抓斗卸船机的抗震分析时借鉴其抗震理论和技术。我国铁路工程、公路工程和水工建筑抗震规范中规定,只有位于抗震设防烈度为 9 度的悬臂结构需要考虑竖向地震作用。因此本研究在进行地震时程分析时,地震波按照纵向(OX)和横向(OZ)分别单独输入。

由上述的等效静载分析和反应谱分析可知,在地

震作用下工况 1 和工况 2 对应的卸船机整体结构位移和应力响应基本一致,因此本研究仅对工况 1 和工况 3 的地震行为作系统的分析。由于卸船机结构复杂,模型中单元与节点较多,在时程分析时不可能给出每

一个单元或节点的信息,本研究结合上述地震反应谱分析结果,在已列关键位置的基础上进行分析。在两组实际地震激励的作用下,卸船机结构的关键位置在整个时域内的最大位移响应如表 7 所示。

表 7 卸船机在 El-Centro 波作用下的位移响应

载荷	工况	最大位移响应/mm											
		前大梁端部			后大梁端部			门架最高点			机房位置		
		纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向	纵向	垂向	横向
纵向	1	124.83	51.31	2.66	121.35	53.22	1.27	129.72	27.13	0.64	137.46	93.816	1.56
	3	502.44	137.61	1.38	101.14	64.79	0.86	239.08	2.13	0.78	117.94	111.67	1.52
横向	1	0.93	1.27	307.10	0.45	0.86	144.28	0.40	0.12	104.94	14.14	28.39	152.85
	3	1.82	0.39	173.82	0.69	0.90	170.22	0.21	0.16	123.20	14.23	19.42	194.45

从表 7 中数据可见,卸船机在纵向或横向地震作用下,由于耦合振型作用各点除在载荷作用方向出现位移外,在与载荷两个垂直方向上也有位移响应,但主要引起载荷方向上的位移。卸船机在地震波的激励下位移响应的位置主要在前大梁端部和机房位置,这与反应谱分析的结果一致。

本研究将卸船机在地震波作用下的位移响应与谱分析下的仿真结果进行对比,卸船机在地震作用下的最大位移都出现在前大梁端部,尤其在工况 3 和纵向地震作用的情况下出现了较大的垂向位移,究其原因主要因为卸船机在工况 3 下的整机重心提升且结构的固有频率与地震波的卓越周期相近;卸船机在时程分析下的位移响应结果显然大于谱分析结果,这主要是因为本研究为了探求其在真实地震波激励下的位移响应,对地震波未进行振幅的调整,而这在样的地震波下卸船机的地震响应往往会比抗震设计反应谱分下的地震响应大;同时谱分析和时程分析下其他位置的位移响应较小,整体观察卸船机的位移响应可知整机结构保持在弹性应变的状态,卸船机在实际地震激励下满足结构的抗震设计要求。将其与反应谱以及等效静载作用下的应力响应进行对比可以看出,在时程分析下的最大应力的出现位置和静载分析和谱分析的结果基本相同。同时与工况 3 相比工况 1 关键位置的应力响应要略高一些,这可能是因为前大梁抬起导致其起主要作用的振型与地震记录的卓越周期更接近的缘故,总体来说卸船机结构的受力性能基本表现为弹性状态。

卸船机在 El-Centro 波作用下的应力响应如表 8 所示。

表 8 卸船机在 El-Centro 波作用下的应力响应

工况	关键位置	最大应力/MPa	
		纵向	横向
工况 1	海侧右立柱与右侧桁架连接处	183.15	56.15
	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处	81.24	154.67
	海侧右立柱与右侧水平桁架连接处	98.62	52.17
	小门架底部与前门架上横梁连接处	74.95	90.42
工况 3	海侧右立柱与右侧桁架连接处	134.25	91.26
	后门架上梁与右侧机房平台横撑连接处	75.68	172.05
	海侧右立柱与右侧水平桁架连接处	89.25	73.95
	小门架底部与前门架上横梁连接处	247.25	88.56

6 结束语

本研究首先对桥式抓斗卸船机结构进行了简化,建立了相应的有限元模型,然后分别对其进行了等效地震载荷静载分析,随后分析了卸船机结构在纵向和横向地震作用下的动态特性,最后进行了动态时间历程分析,对卸船机的在不同工况和不同地震激励作用下的抗震性能做了较为全面的研究与计算。

根据试验结果,卸船机在等效静载分析、反应谱分析和时程分析下的位移应力响应结果相似,结构的应力应变响应基本表现为弹性;同时卸船机在等效地震静载作用下海、陆侧轮压均为正值,且余量相对充足。

参考文献(References):

[1] KANAYAMA T, KASHIWAZAKI A. An evaluation of up lifting behavior of container cranes under strong earthquakes [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,1998,64(618):480-486.

[2] KANAYAMA T, KASHIWAZAKI A, SHIMIZU N, et al. Large shaking table test of a container crane by strong ground excitation[C]. Proc. of Pressure Vessels and Pip-ing Conference, New York: ASME,1998.

- [3] KOSBAB B D, JACOBS L D, DESROCHES R, et al. Analysis and testing of container cranes under earthquake loads [C]. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Reston: ASCE, 2009.
- [4] JACOBS L D, REGINALD DESROCHES, LEON T. Experimental determination of the seismic response of port container cranes including uplift phenomena [C]. Structures Congress, Reston: ASCE, 2009.
- [5] KOSBAB B D, LEON R T, DESROCHES R. Seismic behavior considerations for jumbo container cranes [C]. Structures Congress, Reston: ASCE, 2009.
- [6] 金玉龙, 吴天行. 集装箱码头岸桥结构的动力相似分析与试验验证 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (10): 1609-1615.
- [7] 郑 培, 张 氢. 大型集装箱起重机的抗震性能分析 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43 (1): 116-120.
- [8] 高晋晋, 王 磊. 桥式抓斗卸船机金属结构应力测试应用与分析 [J]. 起重运输机械, 2016 (7): 72-76.
- [9] 王 超, 谭光宇, 刘广军, 等. 基于缩尺模型的桥式抓斗卸船机应力应变特性研究 [J]. 起重运输机械, 2015 (1): 101-104.
- [10] 邱法聚, 李中金, 赵章焰. 基于 FEM 的桥式抓斗卸船机疲劳分析 [J]. 起重运输机械, 2013 (11): 69-73.
- [11] 谢跃平, 张 尧, 蒋立科. 散料卸船机新型料斗干式收尘装置的应用 [J]. 节能, 2012, 31 (12): 50-51.
- [12] 金玉龙. 集装箱岸桥结构的抗震分析与隔震研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2012.
- [13] 叶连强. 港口机械数字化设计与分析关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2015.
- [14] 李 刚, 许 林, 程耿东. 基于 ANSYS 软件的大型复杂结构可靠度分析 [J]. 建筑结构, 2002, 32 (5): 58-61.
- [15] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [16] 刘先明, 叶继红, 李爱群. 多点输入反应谱法的理论研究 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (3): 17-22.
- [17] 李桂青. 抗震结构计算方法和理论 [M]. 北京: 地震出版社, 2002.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

叶永伟, 陆俊杰. 基于 ANSYS 的桥式抓斗卸船机结构抗震性能分析 [J]. 机电工程, 2017, 34 (9): 986-992.

YE Yong-wei, LU Jun-jie. Seismic behavior analysis of bridge-type grab ship unloader based on ANSYS [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34 (9): 986-992.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 985 页)

参考文献 (References):

- [1] OZBOLAT I T. Bioprinting scale-up tissue and organ constructs for transplantation [J]. **Trends in biotechnology**, 2015, 33 (7): 395-400.
- [2] OZBOLAT I T, HOSPODIUK M. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting [J]. **Biomaterials**, 2016, 76 (37): 321-343.
- [3] LIU Y, CHAN J K, TEOH S H. Review of vascularised bone tissue-engineering strategies with a focus on co-culture systems [J]. **Journal of tissue engineering and regenerative medicine**, 2015, 9 (2): 85-105.
- [4] VAEZI M, CHIANRABUTRA S, MELLOR B, et al. Multiple material additive manufacturing-part 1: a review [J]. **Virtual and Physical Prototyping**, 2013, 8 (1): 19-50.
- [5] FEDOROVICH N E, SCHUURMAN W, WIJNBERG H M, et al. Biofabrication of osteochondral tissue equivalents by printing topologically defined, cell-laden hydrogel scaffolds [J]. **Tissue Engineering Part C: methods**, 2011, 18 (1): 33-44.
- [6] LI S, XIONG Z, WANG X, et al. Direct fabrication of a hybrid cell/hydrogel construct by a double-nozzle assembling technology [J]. **Journal of Bioactive and Compatible Polymers**, 2009, 24 (3): 249-265.
- [7] KLEIN T J, RIZZI S C, REICHERT J C, et al. Strategies for zonal cartilage repair using hydrogels [J]. **Macromolecular bioscience**, 2009, 9 (11): 1049-1058.
- [8] LEE J S, HONG J M, JUNG J W, et al. 3D printing of composite tissue with complex shape applied to ear regeneration [J]. **Biofabrication**, 2014, 6 (2): 024103.
- [9] MURPHY S V, ATALA A. 3D bioprinting of tissues and organs [J]. **Nature biotechnology**, 2014, 32 (8): 773-785.

[编辑: 李 辉]