

吊钩桥式起重机主梁的有限元计算

任德斌,赵美涵

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 在过载条件下,对吊钩桥式起重机的主梁进行分析计算,确保作业安全.方法 选用壳单元 SHELL63 对主梁进行有限元分析,施加均布载荷和集中载荷后,在正常吊重、1.1 倍吊重、1.25 倍吊重情况下,对整体结构的应力分布进行计算,并与根据《起重机设计手册》计算出的刚度、强度结果进行对比.结果 在正常吊重、1.1 倍吊重、1.25 倍吊重情况下,许用变形均小于 27.5 mm,许用应力均小于 202.6 MPa.结论 起重机主梁的刚度、强度均有足够的剩余,满足要求,可以安全使用.

关键词 过载;主梁;有限元;刚度;强度

中图分类号 TU61

文献标志码 A

Finite Element Calculation of Hook Bridge Crane Girder

REN Debin, ZHAO Meihan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In the overload condition, the hook of the bridge crane girder is analyzed to guarantee safe operation. Method using shell element shell63 of main girder of finite element analysis, applied uniformly distributed load and concentrated load in normal hanging weight, 1.1 times the hanging weight, 1.25 times the hanging weight, and according to the crane design manual calculation of stiffness and strength was compared. Results in the case of normal lifting weight, 1.1 times of lifting weight and 1.25 times of lifting weight, the allowable deformation is less than 27.5 mm, and the allowable stress is less than 202.6 MPa. Conclusion the rigidity and strength of the main girder of the crane can meet the requirements, and can be used safely.

Key words: overload; main beam; finite element; stiffness; strength

随着科学技术的不断发展,现代工业生产对自动化要求越来越高,在起重运输中,桥式起重机的重要性得到了体现,尤其是在港口物流周转、铁路运输、钢铁化工等领域中的

应用日益广泛^[1-3]. 越来越多的大型项目开始动工,建筑市场对物料吊装、转运的需求越来越多,这给起重机械行业的发展带来了契机,预计在未来几年中,大型起重机械市场的

需求会进一步提高,市场前景十分可观^[4-6].

在起重机械技术日益发达的今天,该领域中自动化产品的应用也越来越广泛,尽管我国由于特殊的历史原因,起重机械行业的自动化水平较差,但如今越来越多的人开始意识到自动化起重机械的重要性,所以相信在不久的将来,国内也能会涌现出一大批新型专用起重机,还有很多具有特殊性能的起重机也逐渐在市场上得到了使用,比如绝缘起重机、防爆起重机等^[7-9]. 对其进行系统的性能研究是非常必要的.

在我国交通运输业、建筑业、工农业快速发展的今天,起重机械的使用也越来越频繁,在未来几年中我国起重机领域势必会朝着智能化、专业化、大型化的方向发展. 考虑到起重作业带有一定的危险性,所以为了确保操作人员在工作时的人身安全,要求每一台起重机必须具备极高的安全性. 从目前的实际情况来看,我国起重机故障事故频发,而且相关部门缺乏对起重机行业的监管,这个问题已经成为一个迫切需要解决的重要问题.

由于起重机械的特殊性,一旦起重机在使用时发生故障,无论操作者,或是对机械或生产对象和周围的环境会造成极大的危害. 对大型的机械设备行之有效的分析方法就是有限单元法^[10-14]. XXX 有限公司因业务发展需要,拟将磨摆车间 100/32t - 22m - A5、铸造车间 100t - 21m - A6、机加车间 100/32t - 22m - A5 起重机,额定载荷 100t 改造

成吊重 130t 的起重机,以满足生产需要. 由于升级改造后,起重机极少达到最大 130t 的吊重载荷,故其工作级别极低. 3 台桥式起重机的具体情况如下:磨摆车间 100/32t - 22m - A5 起重机,于 2001 年建造完工. 由 XX 公司设计制作安装,一直使用到现在,状况良好. 铸造车间 100t - 21m - A6 起重机,于 1999 年建造完工. 由 XX 公司设计制作安装,一直使用到现在,状况良好. 机加车间 100/32t - 22m - A5 起重机,于 2001 年建造完工. 由 XX 公司设计制作安装,一直使用到现在,状况良好. 笔者以其中正在使用的三台吊钩桥式起重机为例,在超载的情况下,对三台吊钩桥式起重机的主梁分别进行分析计算. 研究过载条件下,三台吊钩桥式起重机的作业安全,对解决起重机实际应用问题具有参考价值.

1 计算模型的建立

1.1 起重机主梁结构模型建立

该起重机主梁为箱梁结构(见图 1),结构主要部分由上盖板、下盖板、左右腹板、四片薄板和均匀设置在箱体內的加强板组成. 在有限元分析中,以上各部分采用板壳单元进行模拟分析. 板壳单元经常用于分析薄板或曲面模型,为了保证计算精度,在单元的划分时每个单元的表面积不小于厚度的 10 倍,在具体计算时,选用壳单元 SHELL63.

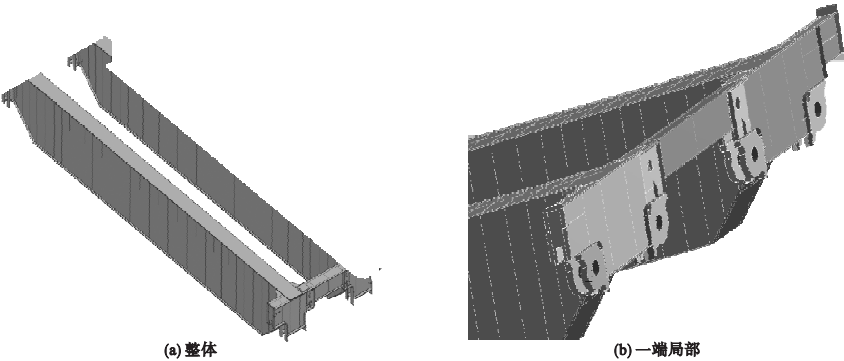


图 1 主梁结构三维模型

Fig. 1 The 3D model of the main girder

SHELL63 单元基本特征主要表现在:

- (1)空间弹性板壳单元,可以沿单元表面的法线方向、面内方向施加载荷.
- (2)该单元有 4 个节点,每个节点上有 6 个自由度: X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 方向的旋转.
- (3)能够进行两种网格划分: 四边形、三角形.

起重机主梁结构主要由并列放置的桥梁及支撑桥梁的端梁、中间梁组成,用以承担吊重、小车及附属零部件. 起重机主梁结构选用普通碳素钢 Q235,材料力学参数见表 1.

表 1 Q235 钢的特性

Table 1 Characteristics of Q235 steel				
钢材	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	泊松比
Q235	7.8	235	375~460	0.3

在建立主梁结构三维模型时,主梁扶手、操控室及不贡献刚度和强度的附属结构做了简化,转换成荷载施加到结构上. 不同部位的钢板厚度不同,还有不在一个平面内的两部分之间为焊接,板材间的连接处为连续的角焊缝,在有限元模型中,可简化为刚性连接.

对主梁结构面体模型采用自由网格划分,整体结构网格比较密(见图 2),图中只显示一个局部. 选择适当的单元尺寸,同时对桥架与端梁、端梁与中间梁接头做绑定接触处理,为了得到较为精确的计算结果,网格划分为规则的四边形网格. 网格划分精度能够保证求解结果尽量精确,整个模型划分的单元

总数为 150 833 个,节点数为 184 592 个. 对左端梁的大车轮毂施加全约束,即支承处的 X、Y、Z 方向的平移自由度和 X、Y、Z 方向的旋转自由度;右端梁两个大车轮毂处施加局部约束,即仅约束支撑面处的垂直位移,水平面内的位移不受限制,是自由的.

1.2 主梁载荷工况

主梁结构在工作过程中,承受的载荷主要有主梁的自重、吊重和小车、走台、控制室及附属结构的自重. 主梁自重为分布载荷,其他载荷为作用不同位置的集中载荷,这与实际情况相比是比较不利的. 各载荷情况如表 2 所示.

表 2 主梁结构载荷计算

Table 2 Load calculation of main girder		
载荷类型	载荷名称	结果
集中载荷	起升载荷	$Q_{总} = 130\text{ kg}(1\,274\,000\text{ N})$
	小车自重	$G_{小车} = 38\,480\text{ kg}(377\,488\text{ N})$
	主梁自重	$G_{主梁} = 11\,229\text{ kg}(110\,156\text{ N})$
均布载荷	走台及梯子等自重	$G_{走台} = 2\,542\text{ kg}(24\,937\text{ N})$
	电气及其他	$G_{其他} = 2\,000\text{ kg}(19\,620\text{ N})$

根据工程的需要,在实际计算中分别计算标准载荷、1.1 倍载荷和 1.25 倍的载荷. 1.1 倍载荷和 1.25 倍的载荷是实际工程分析时常用的,为了分析结构在超载时的性能和安全程度.

1.3 计算结果及分析

起重机由额定吊重 100 t,因为 130 t 载荷是偶发情况,在这个载荷工作的次数极少,此载荷可按第Ⅲ类载荷(验算载荷)计算. 根据《起重机设计手册》,第Ⅲ类载荷时,Q235 塑性材料许用应力的安全系数 $n = 1.16$.

因此,对于主梁结构,Q235 材料强度的许用应力为

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{235}{1.16} = 202.6\text{ MPa}. \quad (1)$$

主梁刚度要求:刚度要求的主要目的是限制主梁的最大变形,即主梁的跨中挠度 f ,

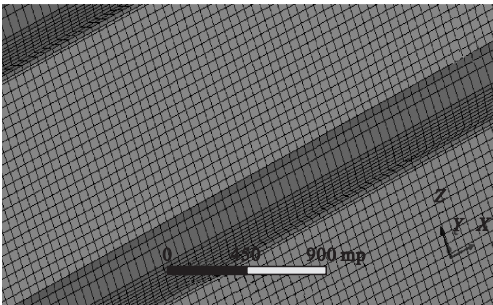


图 2 主梁结构网格划分结果

Fig. 2 Results of grid division of main girder

根据《起重机设计手册》可知:

$$f \leq \left(\frac{1}{700} \sim \frac{1}{1\,000} \right) L. \tag{2}$$

起重机的工作级别为中级,通常选取 $\frac{1}{800}$ 较为合适,即

$$f \leq \frac{1}{800} \times L = 27.5 \text{ mm}. \tag{3}$$

因此,主梁跨中位置的变形应小于 27.5 mm.

将上述边界条件加载到主梁结构有限元模型中,可得出主梁在标准载荷、1.1 倍载荷以及 1.25 倍载荷情况下结构的变形情况如图 3 ~ 图 5 所示.

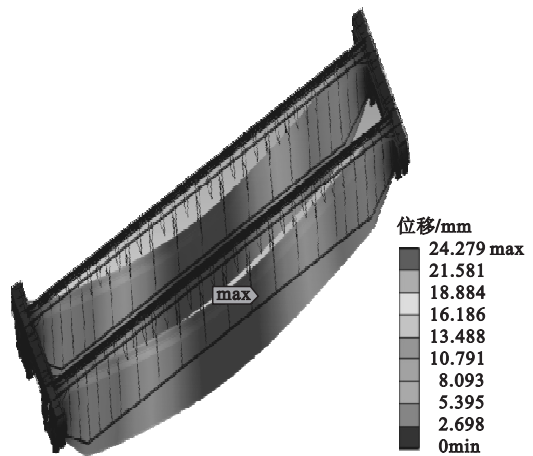


图 3 标准载荷时主梁结构挠度
Fig. 3 Deflection diagram of main girder



图 4 1.1 倍吊重时主梁结构挠度
Fig. 4 1.1 times the weight of the main girder structure deflection diagram

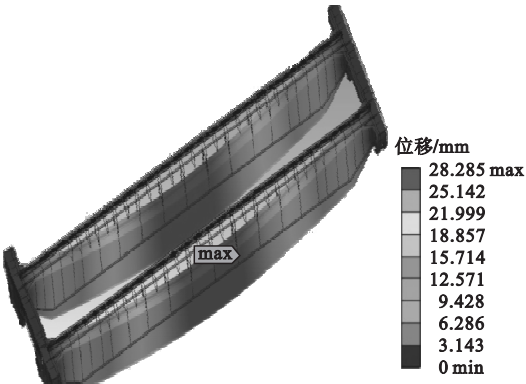


图 5 1.25 倍吊重时主梁结构挠度
Fig. 5 1.25 times the weight of the main girder deflection diagram

由图 3 ~ 图 5 可以看出,按最不利情况计算,吊重位于大梁中点时是最危险的,标准载荷(130 t)吊重时主梁结构挠度最大出现在跨中位置(如图 3 中箭头指向的位置),最大值为 24.2 mm,小于许用变形 27.5 mm; 1.1 倍吊重时,跨中挠度最大值为 25.8 mm (如图 4 中箭头指向的位置),小于许用变形 27.5 mm;1.25 倍吊重时,跨中挠度最大值为 28.3 mm(如图 5 中箭头指向的位置),大于许用变形 27.5 mm.

从变形图可以看出,主梁的变形形态符合实际情况,最大位移均发生在梁的中点,但是 1.25 倍荷载时的最大位移超过的允许值,这需要对结构提出改进意见,进一步验算.

结构改进后标准吊重、1.1 倍吊重和 1.25 倍吊重下的主梁等效力分布分别如图 6 ~ 图 8 所示.

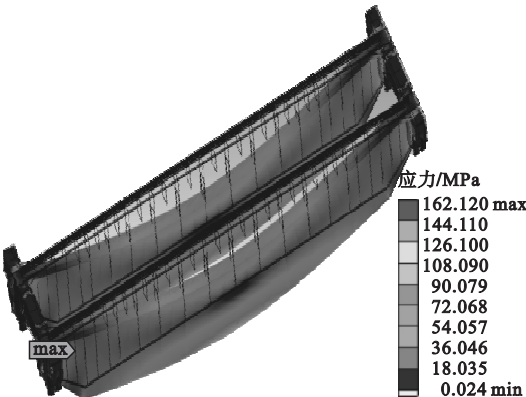


图 6 标准载荷时主梁结构主应力云图
Fig. 6 Principal stresses contour plot of main girder

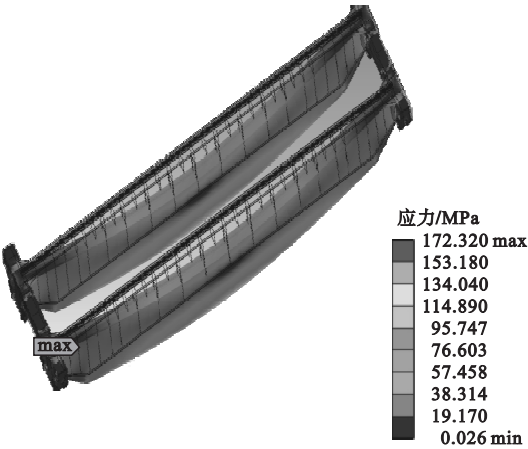
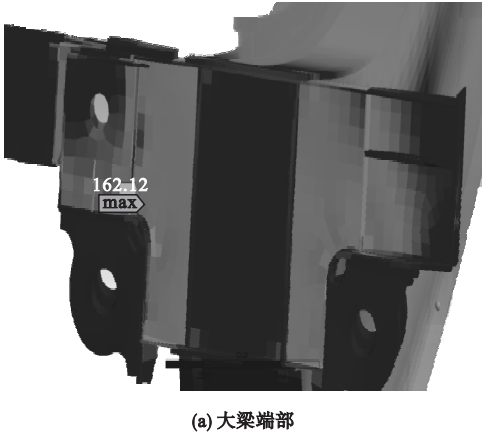


图 7 1.1 倍吊重时主梁结构应力云图
Fig. 7 1.1 times the main girder stress contour plot



(a) 大梁端部

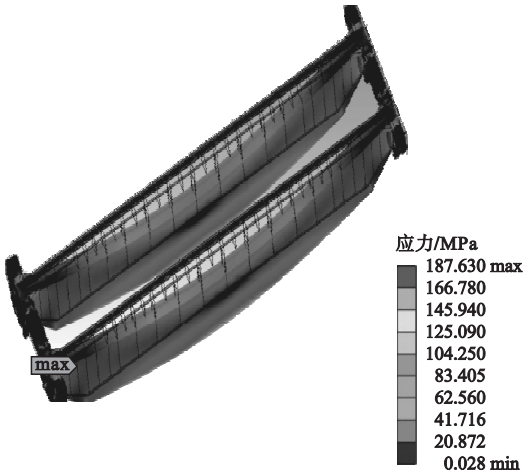
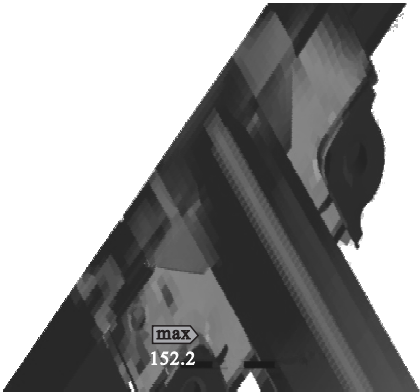


图 8 1.25 倍吊重时主梁结构应力云图
Fig. 8 1.25 times the main beam structure stress contour plot



(b) 大梁上部

图 9 主梁结构应力最大位置

Fig. 9 The location of maximum stress in main girder
最大等效应力没有出现在主梁上,而是在吊车两端的约束位置,这对吊车的正常工作不会造成影响,约束点处是施加的点约束,比实际情况是不利的,可以判断实际情况中的等效应力会低于计算值.经计算结果还可以看出,主梁上的最大等效应力在 1.25 倍载荷时是 100 MPa 左右,远低于许可值,有足够的储备.

2 结果校正

由图 6 ~ 图 8 可以看出,主梁结构在 130 t 吊重(标准载荷)下,最大主应力为 162 MPa,出现在大车运行机构车轮处.按第Ⅲ类载荷校核,小于 Q235 材料的许用应力 202.6 MPa; 1.1 倍吊重时,最大主应力为 172 MPa,小于材料许用应力 202.6 MPa; 1.25 倍吊重时,最大主应力为 187.3 MPa,小于材料许用应力 202.6 MPa. 主梁结构最大主应力出现的位置有 4 处,具体见图 9(a)和图 9(b)的箭头指向处.图 9(a)是从大梁端部看到的应力最大点,图 9(b)是从大梁上面看到的应力最大点.

经初步计算,主梁强度符合要求,刚度不满足要求,可能是因为部分板的连接不好造成的,经过对主梁局部连接方式的设计上的完善,对 1.25 倍的载荷工况重新进行了计算,得到变形如图 10 所示.

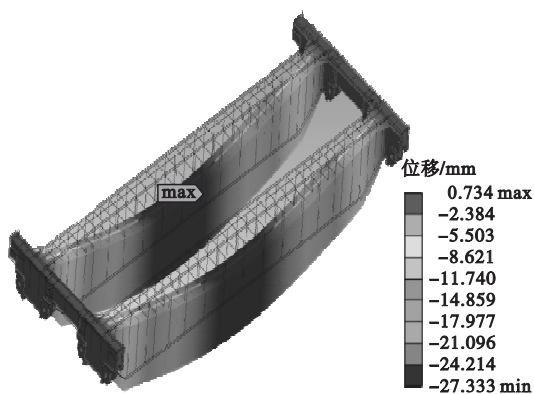


图10 修正后 1.25 倍吊重时主梁结构挠度

Fig. 10 1.25 times the weight of the main girder deflection diagram

由图10可以看出,1.25倍吊重时,跨中挠度最大值为27.3 mm,仍然出现在主梁的中部,这与前面的计算结果相同,最大变形小于许用变形.满足了主梁结构对刚度的要求.改进结构的设计后,其他两种载荷工况的变形也会小于修改设计之前的值,所以没有进行重复性的计算.

1.25倍载荷时的等效应力分布如图11所示.从图中可以看出,1.25倍吊重时,最大主应力为172.3 MPa,比完善设计之前的值有所降低,小于材料许用应力202.6 MPa,说明设计方案不论是对吊车的刚度还是强度都是有利的,同时可以看到计算结果与以往的研究符合较好^[15-21].

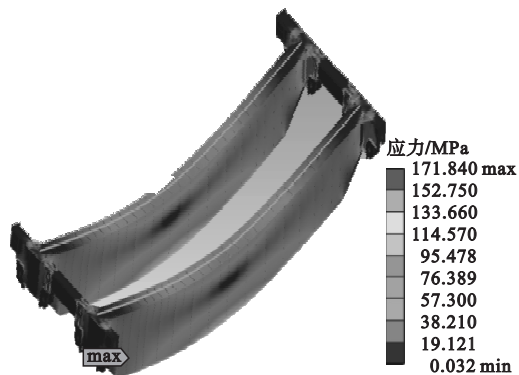


图11 修正后 1.25 倍吊重时主梁结构应力云图

Fig. 11 1.25 times the main girder stress cloud

3 结 语

采用有限单元法对吊钩桥式起重机的主梁进行分析计算,分别计算了标准载荷、1.1倍吊重和1.25倍吊重的三种载荷工况,通过第一次计算,发现标准载荷和1.1倍吊重情况下,考虑了安全系数,主梁的刚度和强度均满足工程安全条件,但1.25倍吊重时,强度条件满足,刚度条件不满足.通过对结构设计上的修改,改善了主梁的力学性能,在1.25倍吊重情况下,主梁的刚度条件和强度条件均得到满足,总的计算结果和以往对类似结构分析的结果保持一致.对工程结构、设备的力学分析时非常必要的,可以发现设计中的问题,提出改进建议,确保安全使用.

参考文献

- [1] 张晓霞,艾莹,林旭,等.动臂塔机非工作状态风载荷加载方式[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,26(1):164-168.
(ZHANG Xiaoxia, AI Ying, LIN Xu, et al. The wind load loading method research of movable are type tower crane in non-working status[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 26(1): 164-168.)
- [2] 陈炯,路志浩,徐峰,等.变截面吊车梁圆弧式和直角式突变支座的受力性能分析[J].结构工程师,2010,26(1):22-27.
(CHEN Jiong, LU Zhihao, XU Feng, et al. Mechanical analysis of arc-shape and right-angle supports of crane girders with variable cross sections [J]. Structural engineers, 2010, 26(1): 22-27.)
- [3] MOHAMMED A A, KHALED M S, HESHAM A K. GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites[J]. Alexandria engineering journal, 2015, 54(3): 519-526.
- [4] NESIN D Y, DUSHKO V R. Numerical model of the large carrying capacity crane ship with the fully revolving topside [J]. Procedia engineering, 2015, 100: 1082-1091.
- [5] KENAN N, DIABAT A. A branch-and-price algorithm to solve a quay crane scheduling problem [J]. Procedia computer science, 2015, 61: 527-532.
- [6] HUANG L J, SYU H J. Seismic response analysis of tower crane using SAP2000 [J]. Procedia engineering, 2014, 79: 513-522.

- [7] 龚卫锋, 聂松辉, 尹果. 基于 ANSYS 吊车支撑梁的分析设计及优化研究[J]. 现代机械, 2012(3): 51 - 54.
(GONG Weifeng, NIE Songhui, YIN Guo. Optimization research and analysis design of support beam for overhead crane based on ANSYS [J]. Modern machinery, 2012(3): 51 - 54.)
- [8] 袁昕. DF50/160 架桥机主梁设计及有限元分析研究[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(6): 124 - 126.
(YUAN Xin. Girder design of DF50/160 type bridge erector and its analysis on finite element method[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2008, 21(6): 124 - 126.)
- [9] 孟丹, 杨金堂, 黄新豪, 等. 变截面吊车梁静动态特性的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 44 - 46.
(MENG Dan, YANG Jintang, HUANG Xinhao, et al. Finite element analysis of static and dynamic characteristics of crane girders with variable cross sections[J]. Machinery design & manufacture, 2014(4): 44 - 46.)
- [10] 王衡. 大跨度吊车型轨道梁的有限元计算分析[J]. 安徽建筑, 2013, 20(2): 179 - 180.
(WANG Heng. Intensity analysis of long-span-trunk crane beam by ANSYS[J]. Anhui architecture, 2013, 20(2): 179 - 180.)
- [11] 代军. 对 3 种变截面吊车梁的有限元分析[J]. 工程设计, 2011, 26(11): 44 - 45, 50.
(DAI Jun. Finite element analysis of three crane beams with variant cross-section [J]. Steel construction, 2011, 26(11): 44 - 45, 50.)
- [12] 刘进宝, 叶建海, 刘迎曦, 等. 基于 ANSYS 的岩锚悬臂吊车梁结构数值分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2004, 16(2): 1 - 4.
(LIU Jinbao, YE Jianhai, LIU Yingxi, et al. Numerical analysis of rock-bolt crane girder based on ANSYS [J]. Journal of yellow river conservancy technical institute, 2004, 16(2): 1 - 4.)
- [13] 金小群, 童根树, 赵伟. 水平隅撑对门式刚架柱力学性能的有限元分析[J]. 铁道标准设计, 2007(12): 91 - 93.
(JIN Xiaoqun, TONG Genshu, ZHAO Wei. Finite-element analysis on dynamic performance of horizontal knee-braces on frame columns [J]. Railway standard design, 2007(12): 91 - 93.)
- [14] 郑永锋, 胡仕成, 王祥军, 等. 正面吊车架有限元分析与结构优化[J]. 机械制造, 2013, 51(7): 18 - 20.
(ZHENG Yongfeng, HU Shicheng, WANG Xiangjun, et al. The front suspension frame finite element analysis and structure optimization [J]. Machinery, 2013, 51(7): 18 - 20.)
- [15] ELWANY M H, ALI I, ABOUELSEoud Y. A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem [J]. Alexandria engineering journal, 2013, 52(4): 671 - 677.
- [16] BUCAS S, RUMELHART P, GAYTON N, et al. Stress-strength interference method applied for the fatigue design of tower cranes [J]. Procedia engineering, 2013, 66: 500 - 507.
- [17] JAAFAR H I, MOHAMED Z, JAMIAN J J, et al. Dynamic behaviour of a nonlinear gantry crane system [J]. Procedia technology, 2013, 11: 419 - 425.
- [18] CHAUHAN N, BHATT P M. Improving the durability of the E. O. T. crane structure by finite element analysis, and optimize the hook material for improving its solidity [J]. Procedia engineering, 2012, 38: 837 - 842.
- [19] WU Xianwen, CHEN Bo, ZHANG Dan, et al. The research on optimal design of large metallurgical crane [J]. Procedia engineering, 2011, 24: 783 - 787.
- [20] PU Hanjun, XIE Xiaopeng, LIANG Guangchi, et al. Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane [J]. Procedia engineering, 2011, 16: 586 - 593.
- [21] TONG Minhui, WANG Yuemin, QIU Huiqing. Dynamic responses of high speed quay container cranes [J]. Procedia engineering, 2011, 16: 342 - 347.