

文章编号: 1674-2869(2016)06-0599-06

## 隧道救援吊车机臂的结构分析

郑贤中<sup>1</sup>, 邵泽亮<sup>1</sup>, 於潜军<sup>2</sup>

1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉江汉化工设计有限公司, 湖北 武汉 430223

**摘要:** 为了在设计阶段确定隧道救援吊车在起吊过程中机臂的变形情况和应力分布以及应力集中点位置, 使用有限元法对作业状态下的机臂进行数值模拟. 利用 ANSYS 软件完成了机臂在 3 种工况下(仅考虑自重; 自重和 15 t 起吊载荷; 自重和 60 t 起吊载荷)的强度及刚度计算, 并基于强度分析和刚度分析对机臂进行了安全评定. 结果表明: 不同工况下, 应力具有相似分布规律, 最大应力出现在机臂与支柱接触点附近以及耳梁与机臂腹板连接处, 可以通过加厚耳梁翼板和腹板、增加支撑板数量、使用强度等级更高的材料来提高机臂的强度和刚度.

**关键词:** 吊车机臂; 结构分析; 有限元

**中图分类号:** TH213.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.06.016

## Structural Analysis of Tunnel Rescue Crane Boom

ZHENG Xianzhong<sup>1</sup>, SHAO Zeliang<sup>1</sup>, YU Qianjun<sup>2</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Wuhan Jiangnan Chemical Design Co., Ltd, Wuhan 430223, China

**Abstract:** To determine the tunnel rescue crane deformation condition of boom, and the stress distribution and the stress concentration in the lifting process at the design stage, the numerical simulation calculations have been carried out to analyze the operating state of the crane boom by the finite element method. The calculation of strength and stiffness of crane boom under the three load cases (dead weight, dead weight plus 15 t lifting loads, dead weight plus 60 t lifting loads) were completed by using ANSYS software, and then the safety assessment of the boom was performed based on strength and stiffness analysis. The results show that the stress distribution is similar under different working conditions. Moreover, the maximum stress appears near the contact point of boom and pillar, the junction of beam with lifting eyes and boom web. To improve the strength and stiffness of the crane boom, we should thicken the flange and web of beam with lifting eyes, increase the number of support plates and use high strength materials.

**Keywords:** crane boom; structural analysis; finite elements

## 1 引言

当隧道内火车发生追尾、自燃或者发生堵塞的情况时, 受隧道高度和空间的限制, 普通吊车无法进入隧道内直接拖曳、起吊, 且无能力完成重型负荷的起吊任务, 这将会对该线路的交通和救援产生严重的影响<sup>[1-2]</sup>, 故设计开发一种新型的隧道

内救援专用吊车(如图1所示). 而专为此研发的隧道救援吊车可以利用其机臂长的优势, 伸入隧道内部完成起吊任务、对超重事故车辆也可以顺利起吊、运离事故现场从而使交通在较短时间内恢复通畅. 这对日益增多的交通事故的快速处置和快捷救援有着重要的意义<sup>[3-4]</sup>.

隧道救援吊车上的机臂是救援车上最重要的

收稿日期: 2016-07-20

作者简介: 郑贤中, 博士, 副教授. E-mail: 1020933697@qq.com

工作装置<sup>[5]</sup>,它作为隧道救援吊车在起吊过程中的重要支撑构件,其设计的合理性,直接影响吊车的承载能力、整车稳定性及自重.由于吊臂在进行清障和救援工作时承受的载荷工况比较复杂,传统设计过程对其尺寸(参数)缺乏精确的强度、刚度计算方法<sup>[6]</sup>,为了分析隧道救援吊车在救援的时候受到重型载荷的条件下机臂是否满足强度和刚度要求而运用有限元方法对机臂进行数值模拟分析与强度和刚度计算,既准确、经济、可靠,又能得出构件在各种工况下的应力分布情况,为隧道救援车辆的设计与优化提供了一定参考.首先,对机臂的结构进行分析和简化,建立其分析的计算模型;然后,在各种工况下对其进行加载并进行有限元分析,得出相应工况下的应力强度与变形位移,分

析它的危险截面和高应力区域的分布情况;最后针对出现的问题,指出改进的方向和措施.

## 2 隧道救援吊车的有限元分析

### 2.1 建模

2.1.1 单元选取 由于该机臂的结构形式为工程上常用的耳梁,机臂采用盖板钢箱梁结构,带上下耳梁(见图1).上耳梁作为机臂的加固,下耳梁作为吊钩的支撑点兼滑道<sup>[7]</sup>,支柱作为机臂的上下端面的支撑.其几何形式上在纵向中截面保持对称,横截面上并非完全一致,而无法实现大范围的简化,不可用梁单元进行模拟.故选用三维实体单元进行模拟较为合理.

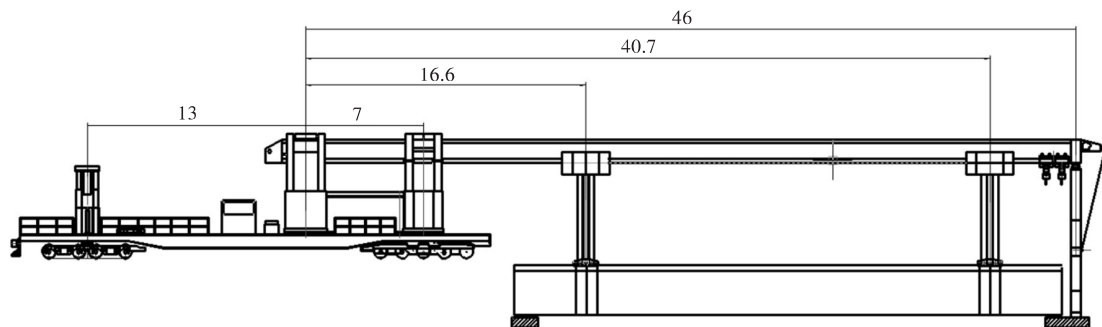


图1 隧道救援吊车结构示意图(单位:m)

Fig. 1 Structure of the tunnel rescue crane (unit:m)

2.1.2 材料选用 由于该机臂属于承重构件,属于特种设备类型,为了安全起见,采用Q345钢材进行设计制造.其材料属性分别为制造起重臂的材料为常见的Q345钢材,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.28,其密度为7 850 kg/m<sup>3</sup>,经查表结合实际安全系数,可得Q345许用应力为

$$[\sigma] = \frac{345}{1.34} = 257 \text{ MPa}.$$

$$\text{许用切应力: } [\tau] = \frac{175}{\sqrt{3}} = 148.38 \text{ MPa}.$$

2.1.3 几何建模 由于该机臂结构关于中面对称,故在建模的时候可采只建立一半几何模型,以达到减少占用计算机资源的目的<sup>[8]</sup>.建模时采用结合机臂的实际尺寸先建立1 m梁段然后再把该梁段在纵向进行复制的方式以达到快速而准确地建立模型,对复制后的梁段进行布尔运算,将其粘接为一个整体后,机臂整体在几何上就有了关联性,机臂的几何模型如图2所示.

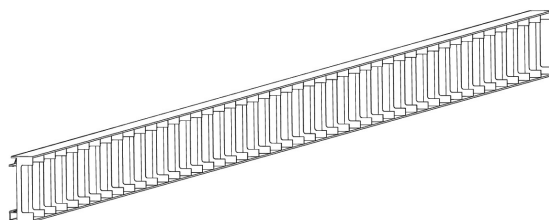


图2 隧道救援吊车机臂 $\frac{1}{2}$ 几何模型

Fig. 2 One half of geometric model of tunnel rescue crane boom

### 2.2 网格划分

网格划分的优劣是计算结果能否准确的至关重要的因素之一.为了得到更精准的计算结果,在整个网格划分的过程中利用工作平面将几何模型进行切割操作,切分成一个个形状规整的六面体结构.划分网格后其网格示意图如图3和图4所示.

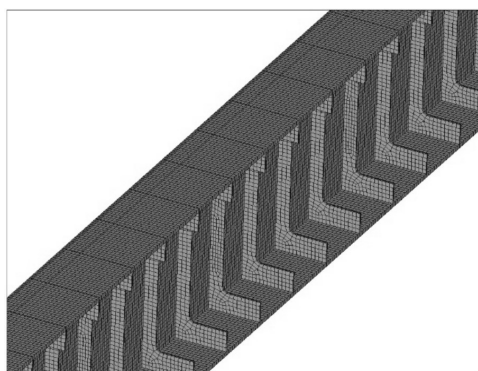


图3 机臂纵向截面网格图

Fig. 3 Longitudinal cross section of boom mesh model

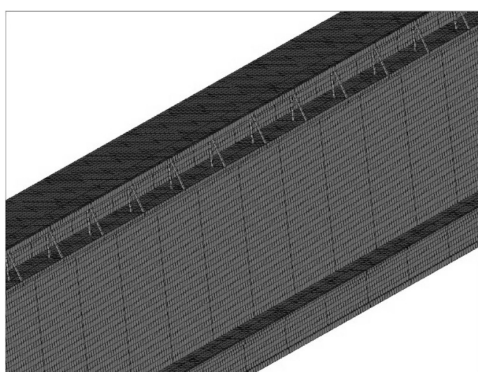


图4 机臂侧面网格图

Fig. 4 Side of boom mesh model

### 2.3 加载和求解

由于其几何形式上在纵向中截面保持对称,在建模时也只建立了  $\frac{1}{2}$  模型,故在施加位移约束时需施加对称约束.各支柱在机臂上下端面起到支撑作用,故对与支柱相接触的部分面施加  $Y$  向约束.在特定工况下的起重位置施加集中力荷载,由于还要考虑自重的影响<sup>[9]</sup>,故还需要设定重力加速度,其值为  $9.8 \text{ N/kg}$ .

### 2.4 后处理

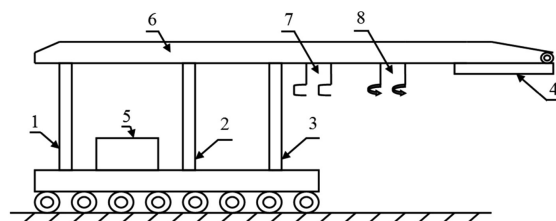
求解完成后,在后处理模块中,可查看机臂结构总位移云图和 Von Mises 等效应力云图.通过将结果云图中的数值和工程中的许用应力数值进行比较,可判定该起重机臂是否满足强度和刚度要求.

## 3 常用工况下隧道救援吊车机臂强度的刚度分析

机臂通过液压传动、机臂顶端离支柱1的支撑,整体后移,直至机臂顶端在支柱2处固定.由于隧道救援吊车在使用过程中可能出现非常复杂的情况,在经过一系列的总结后进行工况设定<sup>[10]</sup>,可

设定为3种工况,分别如下:

工况1:隧道救援车在空载情况下(支柱4收起、两大吊钩空载、两小吊钩空载)的工作情况;该工况下救援吊车各支柱的使用情况如图5所示.



1、2、3、4—支柱;5—操作室;6—机臂;7—大吊钩;8—小吊钩  
1, 2, 3, 4—pillar;5—operating room;6—boom;7—large hook;8—small hook

图5 隧道救援吊车在工况1下的结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of the tunnel rescue crane under load case 1

从图6~图8中可以看出,工况1的最大位移值为  $66.153 \text{ mm}$ ,最大应力强度为  $105 \text{ MPa}$ ;应力最大值位于机臂重心位置附近,耳梁与机臂腹板连接位置应力集中现象明显;工况1的  $Y$  方向最大位移(即挠度)远小于  $\frac{3}{1000} L$  ( $L$  为起重臂总长)<sup>[11-12]</sup>,最大应力强度小于 Q345 的许用应力.故工况1安全.

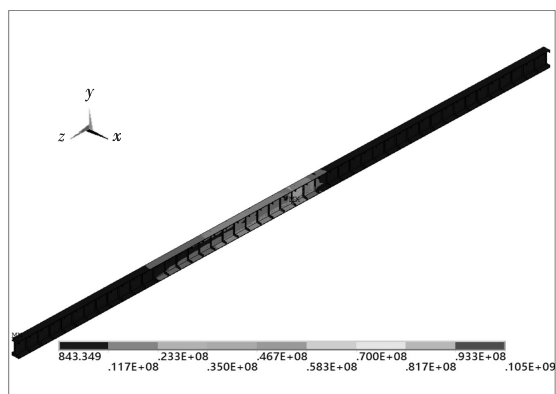


图6 工况1下的机臂 Von Mises 应力云图

Fig. 6 Von Mises stress diagram under load case 1

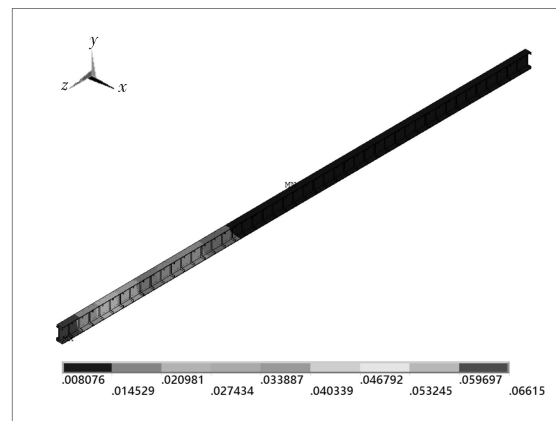


图7 工况1下的机臂总位移云图

Fig. 7 Deformation diagram under load case 1

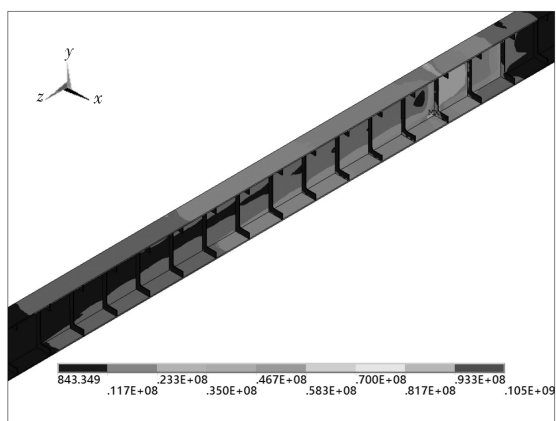
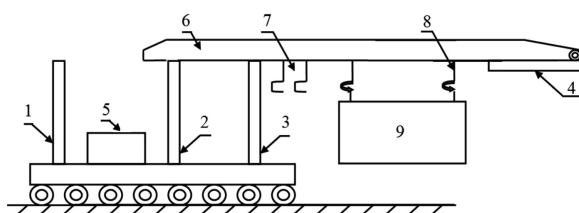


图8 工况1下最大应力点

Fig. 8 Maximum stress point under load case 1

工况2:隧道救援车在加载情况下(支柱4收起,两大吊钩空载,仅使用两小吊钩吊起15 t负重并装载)的工作情况;该工况下救援吊车各支柱的使用情况如图9所示。



1、2、3、4-支柱;5-操作室;6-机臂;7-大吊钩;8-小吊钩;  
9-15 t 客车

1, 2, 3, 4 - pillar; 5 - operating room; 6 - boom; 7 - large hook;  
8 - small hook; 9 - 15 t passenger car

图9 隧道救援吊卡在工况2下的结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of the tunnel rescue crane under load case 2

从图10~图12中可以看出,工况2的最大位移值为446.0 mm,最大应力强度为287 MPa;应力最大值位于机臂与支柱3接触点附近,耳梁与机臂腹板连接处应力集中现象明显;工况2的Y方向最大位移446.0 mm小于  $\frac{3}{1000} L = 652.174$  mm (L为起重臂总长),最大应力强度值超过了Q345的许用应力,故工况2危险。为了减弱耳梁与机臂腹板连接处的应力集中,在实际制造过程中应该对该小区域进行加强处理,采取增加耳梁翼板与耳梁腹板厚度等方法来降低该区域的应力集中现象。

工况3:隧道救援车在加载情况下(支柱4被使用、两小吊钩空载,仅使用两大吊钩吊起60 t负重并装载)的工作情况;该工况下救援吊车各支柱的使用情况如图13所示。

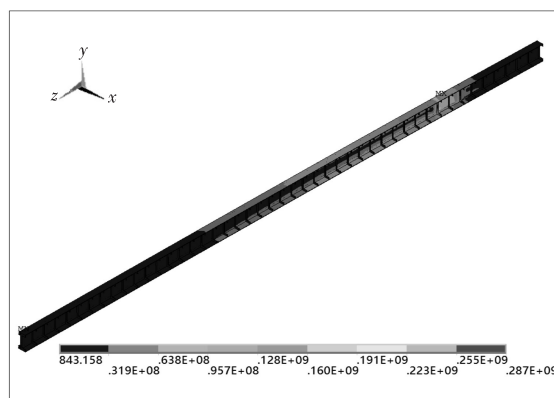


图10 工况2下的机臂 Von Mises 应力云图

Fig. 10 Von Mises stress diagram under load case 2

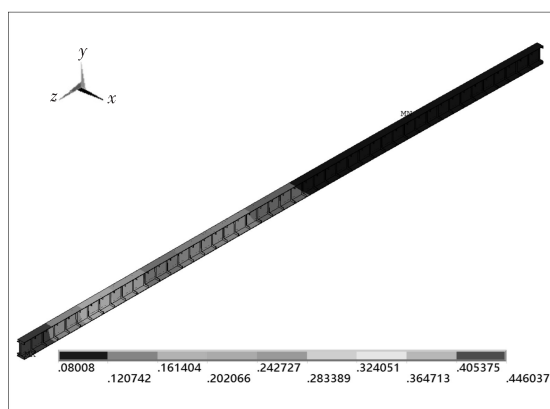


图11 工况2下的机臂总位移云图

Fig. 11 Deformation diagram under load case 2

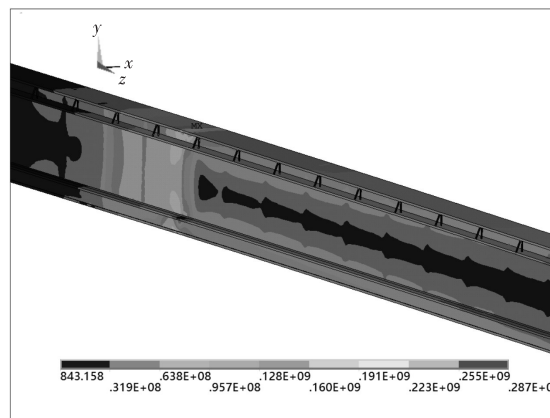
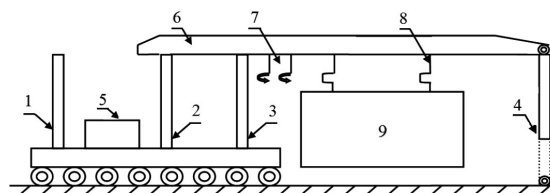


图12 工况2下最大应力集中点

Fig. 12 Maximum stress point under load case 2



1、2、3、4-支柱;5-操作室;6-机臂;7-大吊钩;8-小吊钩;  
9-60 t 客车

1, 2, 3, 4 - pillar; 5 - operating room; 6 - boom; 7 - large hook;  
8 - small hook; 9 - 60 t passenger car

图13 隧道救援吊卡在工况3下的结构示意图

Fig. 13 Structural diagram of tunnel rescue crane under load case 3

从图14~图16中可以看出,工况3的最大位移值为21.932 mm,最大应力强度为249 MPa;应力最大值位于机臂与支柱4接触点附近,同时机臂与支柱3接触点附近也存在明显的应力集中,均在耳梁与机臂腹板连接位置出现最大应力值;工况3的Y方向最大位移远小于 $\frac{3}{1\,000}L$ ( $L$ 为起重臂总长),最大应力强度值小于Q345的许用应力.故工况3较为安全.

上述3种工况下隧道救援吊车机臂结构求解计算完成后,对数据结果进行统计.表1为3种工况下机臂受载后的最大应力值和最大挠度值,并将其与实际制造采用的钢材的许用应力和最大挠度<sup>[13]</sup>进行了对比.

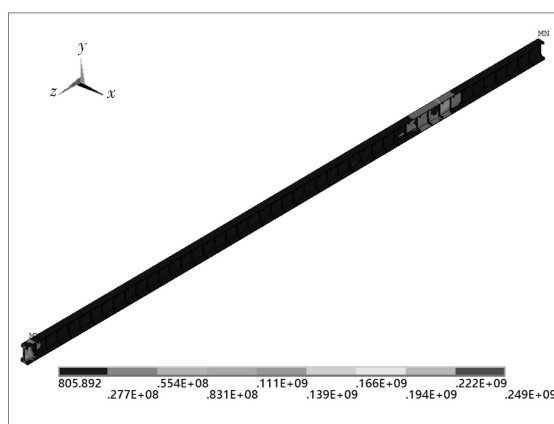


图14 工况3下的机臂Von Mises应力云图

Fig. 14 Von Mises stress diagram under load case 3

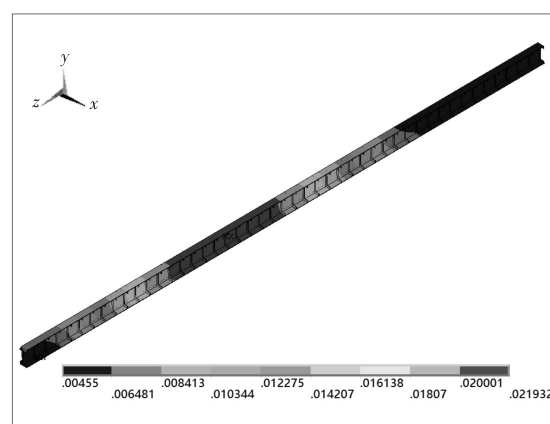


图15 工况3下的机臂总位移云图

Fig. 15 Deformation diagram under load case 3

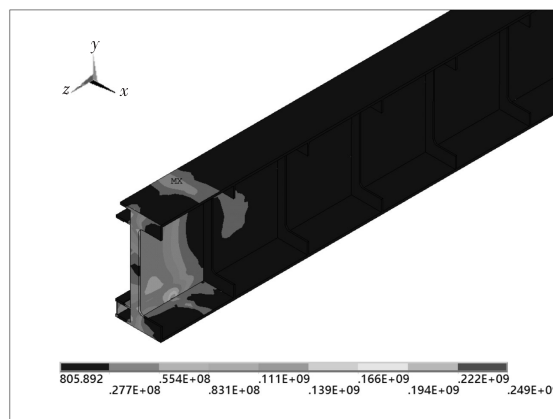


图16 工况3下最大应力集中点

Fig. 16 Maximum stress point under load case 3

表1 三种工况的有限元分析结果

Tab. 1 Results of finite element analysis in three cases

load case	result of finite element equivalent stress /MPa	admissible stress value / MPa	result of finite element deflection calculation/mm	allowable deflection/ mm
case 1	105(safe)		66.153(safe)	
case 2	287(danger)	257	446.04(safe)	652.174
case 3	249(safe)		21.932(safe)	

## 4 结 语

通过有限元软件对某型隧道救援吊车机臂进行结构强度和刚度有限元分析,观察计算结果,分析得到的结论如下:

1)对比第2、第3种工况下的应力云图和位移云图,可以看出在起吊过程中支柱4的使用对于整个机臂的强度与刚度有着显著的改善,大大增加了起吊能力和增强了结构的稳定性,提高了起重机的安全性能.

2)观察3种工况下应力集中的位置,可以发现主要的应力集中区域在支撑位置、耳梁与机臂腹板连接位置,为了减小应力集中,进一步提高机臂的承载能力,可以通过加厚耳梁翼板和腹板<sup>[14]</sup>、增加支撑板数量,机臂使用强度等级更高的材料(如Q460)等方法来处理.

3)吊车机臂设计人员在设计阶段使用有限元软件对机臂结构进行有限元分析可确定机臂受载下的应力分布和危险截面位置从而有效地选取并改进设计方案,有利于提高产品的设计质量<sup>[15]</sup>.



## 参考文献:

- [1] 赵昱萌. 山区高速铁路隧道救援设施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] 郭春, 王明年, 赵海东. 铁路特长隧道火灾应急救援问题研究[J]. 中国安全科学学报, 2007(9): 153-158.  
GUO C, WANG M N, ZHAO H D. Research on the emergency rescue of fire in super-long railway tunnel [J]. China safety science journal, 2007(9): 153-158.
- [3] 谢亮. 内昆线160T救援铁路起重机整车吊复可视化仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [4] 兰瑞鹏. 高速铁路架桥机结构稳定性分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [5] 周衍领. 架桥机耳梁简化计算方法探讨[J]. 铁道建筑技术, 2015(1): 47-50.  
ZHOU Y L. Simplified calculation method investigation of the ear beam structure of the bridging machine [J]. Railway construction technology, 2015(1): 47-50.
- [6] 吕洪彬. JQD32M/500T单臂箱梁架桥机的结构设计与分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- [7] 徐艳平, 谷立臣, 朱冰, 等. 基于ANSYS的YZS900 t上行式造桥机导梁有限元分析[J]. 建筑机械, 2010(21): 75-78.  
XU Y P, GU L C, ZHU B, et al. Guide girder finite element analysis of upward type bridge-building machine YZS900t based on ANSYS [J]. Construction machinery, 2010(21): 75-78.
- [8] 靳慧, 王金诺, 张仲鹏. N100型铁路救援起重机吊臂的有限元设计[J]. 起重运输机械, 2001(3): 14-16.  
JIN H, WANG J N, ZHANG Z P. N100 railway rescue crane of finite element design [J]. Hoisting and conveying machinery, 2001(3): 14-16.
- [9] 王良文, 王传鹏, 郭志强, 等. 基于ANSYS二次开发的塔式起重机快速设计系统[J]. 机械设计, 2014(5): 69-74.  
WANG L W, WANG C P, GUO Z Q, et al. Rapid design system of tower crane based on ANSYS secondary development technology [J]. Journal of machine design, 2014(5): 69-74.
- [10] 王艳丽. TJ165B架桥机机臂改造设计[J]. 建筑机械, 2016(1): 55-57.  
WANG Y L. Study on the transformation design of the arm for bridge erector TJ165B [J]. Construction machinery, 2016(1): 55-57.
- [11] 钢结构设计规范: GB 50017-2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 128-129.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 起重机设计规范: GB/T 3811-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 59-61.
- [13] 袁昕. 基于有限元法的DF50/160架桥机主梁优化[J]. 建筑机械, 2008(23): 73-76.  
YUAN X. Optimization of DF50/160 type launching girder based on finite element method [J]. Construction machinery, 2008(23): 73-76.
- [14] 万恒国, 范明伟. JQ140G型架桥机提高结构强度的改造方案研究[J]. 交通科技, 2011(2): 52-55.  
WAN H G, FAN M W. Study of methods of strengthening the structure of JQ140G bridge girder-erecting machine [J]. Transportation science & technology, 2011(2): 52-55.
- [15] 黄忠文, 王培, 於潜军. 塔式起重机臂的结构分析[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(6): 68-72.  
HUANG Z W, WANG P, YU Q J. Structural analysis of tower crane's boom [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2014, 36(6): 68-72.

本文编辑: 陈小平