

DOI:10.3969/j.issn.2095-509X.2016.11.006

单梁桥式起重机横梁结构的瞬态动力学研究

刘文静¹, 宋学亮², 靳 岚²

(1. 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对 10t-24.8m 的单梁桥式起重机横梁结构进行了瞬态动力学仿真分析。分析了不同加载时间对横梁结构的冲击影响以及在不同工位时桥式起重机横梁结构的时间-载荷动态响应特性, 得出了不同加载时间对起重机系统振动的影响规律以及在不同工位时横梁的最大应力、振动位移、速度和加速度随时间-载荷的动态响应特性及变化规律, 分析结果对桥式起重机的设计制造提供了较为可靠的试验数据和理论依据。

关键词: ANSYS; 横梁; 瞬态动力学分析; 时间-载荷; 动态响应

中图分类号: TH215

文献标志码: A

文章编号: 2095-509X(2016)11-0032-05

桥式起重机的快速发展和广泛应用为建筑、物流、运输等领域注入了强大的动力, 在减轻人类工作负荷的同时, 也大大提高了工作效率。桥式起重机起升机构主要由金属结构件(吊钩组、滑轮组、卷筒、钢丝绳)和驱动部件(电动机、加速器、制动器、联轴器)组成^[1]。起重机横梁的动力学分析和优化研究在诸多文献中可见。日本研究者 TANI ZUM KAZUYA 运用 Newton-Raphson 方法和状态轨迹确定的速度模式来研究起重机载荷的震荡^[2]; ABB 公司、奥地利伊林公司将变频调速应用在起重机上, 不但实现了无极调速, 而且还大大降低了能耗^[3]; ALLESSANDRI 等^[4]运用状态轨迹和 Newton-Raphson 方法仿真了汽车起重机在不同工况下的动力学行为。起重机横梁结构在作业过程中受载情况复杂。目前国内关于起重机的研究主要集中在横梁结构在不同工况下的静力学分析、谐响应分析以及结构优化设计上, 关于其瞬态动力学分析的文献相对较少, 也没有确切的试验数据, 这给起重机的设计制造带来了不便。

桥式起重机横梁在各工况下(本文只研究横梁跨端部、1/8 工位、1/4 工位和跨中工位)主要经历钢丝绳从松弛到预紧、钢丝绳开始受力到重物刚要离开地面、重物离开地面上升(稳定上升、加速上升、制动上升)3 个阶段。不同的阶段所受外界激振力的大小不同, 导致横梁沿 Y 轴(竖直方向)

的振动位移也随之变化。本文主要研究了重物起升过程中不同的加载时间对横梁结构冲击的影响规律, 分析了起升过程中不同工位处横梁结构的最大应力、振动位移、速度和加速度随时间-载荷的动态响应及其从跨端到跨中工位处最大应力、位移、速度和加速度的变化规律。

1 横梁的三维结构及主要参数

1.1 单梁桥式起重机的主要性能参数

以设计的工作级别为 A7 级、额定载质量为 10t、跨度为 24.8m 的单梁桥式起重机的横梁结构为研究对象, 其主要性能参数见表 1。

表 1 桥式起重机横梁结构主要性能参数

参数名称	数值
额定载质量/t	10
跨度/m	24.8
最大起升高度/m	16
弹性模量	2.10×10^{11}
泊松比	0.274
小车总质量/kg	200
起升速度/($m \cdot \min^{-1}$)	15
重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)	9.8
密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7.83×10^3
启动时间/s	1.3

收稿日期: 2016-03-28

作者简介: 刘文静(1980—), 女, 山东肥城人, 兰州理工大学高级工程师, 主要从事先进制造技术及数字化网络制造等方面的研究。

1.2 横梁结构的有限元模型

在三维 CAD 建模软件 SolidWorks2012 中对桥式起重机横梁结构进行几何建模^[5],并将建立好的模型保存为 igs (iges) 格式,以方便导入 ANSYS Workbench 分析软件中进行网格划分。对划分的网格单元进行质量检验,检验结果表明,横梁各部分网格疏密度合理,整体网格质量较好,可以对其进行有限元静力学和动力学分析^[6]。最终得到横梁的有限元模型如图 1 所示。

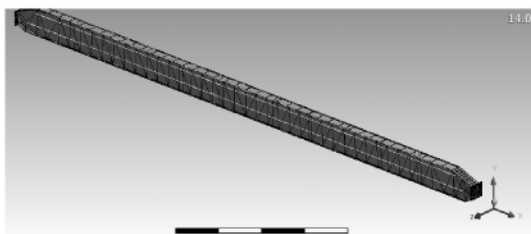


图 1 单梁桥式起重机横梁结构的有限元模型

2 横梁结构的瞬态动力学分析

本文运用 ANSYS Workbench 中的瞬态动力学分析(transient structural analysis)模块对桥式起重机横梁起升机构从钢丝绳预紧(不受外界载荷)到受时间-载荷上升这一过程进行瞬态动力学仿真,得到了横梁结构的最大应力、位移、速度及加速度随时间-载荷的动态响应特性曲线。

2.1 起升过程中时间-载荷的建模分析

当重物(满载)刚离开地面的时候由于速度突然变大,有一定的加速度,钢丝绳的拉力会大于额定载质量;稳态上升结束到制动过程中,钢丝绳拉力则会小于其额定载质量。整个起升加载过程仿真如图 2 所示。

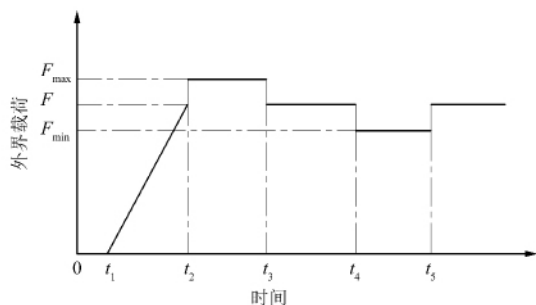


图 2 起升加载过程仿真图

1) $0 - t_1$ 为钢丝绳预紧阶段,这一阶段可以看作横梁结构不受外界激励作用,没有明显的应力、位移及加速度变化,因此不再赘述。

2) $t_1 - t_2$ 为钢丝绳预紧到重物刚要离开地面

阶段,可以看成是横梁受载均匀增加的过程,其所受载荷 F 最终等于起吊物的质量,但重物始终没有离开地面。此时横梁所受载荷为:

$$F = P_{10t} = (10 \times 10^3 + 200) \times 9.8 = 9.996 \times 10^4 (\text{N})$$

3) $t_2 - t_3$ 为启动时间段,即重物加速上升阶段,由表 1 可知起升机构的起升速度为 $v = 15 \text{ m/min} = 0.25 \text{ m/s}$,启动时间(加速上升)为 $t_{启动} = 1.3 \text{ s}$,所以启动加速度为:

$$a_{启动} = \frac{v - v_{停止}}{t_{启动}} = \frac{0.25 - 0}{1.3} = 0.192 \approx 0.2 (\text{m/s}^2)$$

根据《起重机设计手册》规定:启动阶段平均加速度 $\bar{a} < 0.2 \text{ m/s}^2$,所以启动加速度符合要求,此时横梁所受的最大载荷为:

$$F_{max} = m(g + a_{启动}) + Mg = 10 \times 10^3 (9.8 + 0.2) + 200 \times 9.8 = 1.02 \times 10^5 (\text{N})$$

式中: m 为起升机构额定载质量; M 为小车总质量。这一阶段横梁受载最大,处于超重阶段。

4) $t_3 - t_4$ 为重物稳定上升阶段,此时横梁所受的载荷为:

$$F = 9.996 \times 10^4 (\text{N})$$

5) $t_4 - t_5$ 为制动时间段,即重物减速上升阶段,最终上升到最大高度时速度为 0 m/s 。此阶段,重物处于失重状态。在制动过程中,如果制动时间较短,则制动力矩较大,易产生冲击,为此将制动时间设定在 1.25 s ,则制动时的加速度为:

$$a_{制动} = \frac{v_{停止} - v}{t_{制动}} = \frac{0 - 0.25}{1.25} = -0.2 (\text{m/s}^2)$$

此阶段横梁所受的载荷最小,为:

$$F_{min} = m(g - a) + Mg = 10 \times 10^3 \times (9.8 - 0.2) + 200 \times 9.8 = 9.6 \times 10^5 (\text{N})$$

(6) t_5 以后为重物静止阶段,横梁所受的载荷为:

$$F = 9.996 \times 10^4 (\text{N})$$

2.2 横梁瞬态动力学求解原理

本课题选用计算动力学分析对桥式起重机进行瞬态分析,首先根据结构模型建立其振动微分方程为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F$$

式中: M 为质量矩阵; C 为结构阻尼矩阵; K 为结构刚度矩阵; \ddot{U} 为节点加速度矢量; \dot{U} 为节点速度矢量; U 为节点位移矢量; F 为力矢量。

当 $t_1 < t < t_2$ 时,横梁振动微分方程可设为:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = Kt$$

由动力学知识可知,横梁的稳态响应为该振动

方程的特解 $y^* = \frac{k}{\omega^2}t - \frac{2k\zeta}{\omega^3}$; 横梁的瞬态响应为其对应的线性齐次微分方程的解 $y = Y e^{-\zeta\omega_n} \cdot \cos(\omega_d t - \varphi)$ 。综上可得横梁的总位移响应为:

$$y(t) = y + y^* = Y e^{-\zeta\omega_n} \cos(\omega_d t - \varphi) + \frac{kt}{\omega^2} - \frac{2k\zeta}{\omega^3}$$

式中: ω_d 为阻尼自然频率, 且有 $\omega_d = \omega_n(1 - \zeta^2)$; Y 为位移矩阵; ζ 为阻尼比; ω_n 为固有频率; k 为等效刚度系数; ω 为主要响应频率; φ 为相位。

当 $t = t_1$ 时 $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$, 由此可以确定横梁瞬态响应的振幅和相位分别为:

$$y = \frac{K}{\omega_n^3 \sqrt{1 - \varphi_2}} = \frac{K}{\omega_n^2 \omega_d}$$

$$\varphi = \arccos(\zeta \sqrt{1 - \zeta^2})$$

式中: K 为横梁等效刚度。

当 $t > t_2$ 时, 即重物刚刚离开地面, 这时重物将随着横梁一起做自由振动, 即 $Kt = 0$, 振动微分方程可以变换为:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = 0$$

此时, 对应的位移响应为:

$$y(t) = Y e^{-\zeta\omega_n} \cos(\omega_d t - \varphi)$$

则此阶段对应的振幅和相位为:

$$y = \sqrt{y_0^2 + \frac{(v_0 + \zeta\omega_n y_0)^2}{\omega_d^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{v_0 + \zeta\omega_n y_0}{y_0 \omega_d}$$

式中: $v_0 = \dot{y}(t_2)$; y_0 为 t_2 时横梁的振幅。

由上面的分析可以得到在整个起升过程中横梁的位移响应表达式为:

$$y(t) = \begin{cases} Y e^{-\zeta\omega_n} \cos(\omega_d t - \varphi) + \frac{Kt}{\omega_n^2} - \frac{2k\varphi}{\omega_n^2} & (t < t_2) \\ y_i + Y e^{-\zeta\omega_n(t-t_2)} \cos[\omega_d(t-t_2) - \varphi] & (t \geq t_2) \end{cases}$$

3 瞬态动力学求解

瞬态动力学分析求解的是机械结构受到随时间变化载荷后的动态响应。横梁结构的瞬态分析参数的设置主要包括: 阻尼设置、步控制、求解器设置。本文中起重机起升机构的起升速度为 15m/min, 由于起升速度较低, 定义起升机构钢丝绳从预紧到重物刚要脱离地面的时间为 0.30s 或 0.20s, 起升时间为 1.30s, 稳定上升时间为 2.15s, 制动上升时间为 1.25s, 即本文研究分析了时间-载荷在 5s 内

横梁结构的动态响应。设置载荷以时间-历程 (time-dependent load histories) 的加载方式加载, 在 ANSYS 中, 当设定好 $\Delta t_{initial}, \Delta t_{min}, \Delta t_{max}$ 后, 程序会根据自动时间步长决定最优的 Δt 值。

在 ANSYS Workbench 中的瞬态动力学分析 (Transient Structural Analysis) 模块中设置好求解参数, 然后对横梁有限元模型进行瞬态动力学分析求解, 得到横梁结构的最大应力、位移、速度和加速度随时间-载荷的瞬态响应特性曲线, 通过对比不同加载时间和不同工位处的瞬态响应特性曲线^[7-10], 得出相关结论。

3.1 横梁结构对应不同加载时间的动态特性响应

当 $t_1 - t_2$ (钢丝绳预紧到重物刚要离开地面的时间段) 的时间不同, 载荷对横梁结构造成的冲击也不同, 本文主要分析了 $t_1 - t_2$ 为 0.20s 和 $t_1 - t_2$ 为 0.30s 时横梁结构跨中工位的最大应力、沿 Y 轴方向位移、速度和加速度随时间-载荷的动态响应, 得到其瞬态响应特性曲线, 如图 3~6 所示, 限于篇幅, 只给出位移和加速度响应图, 并对结果进行了对比分析。

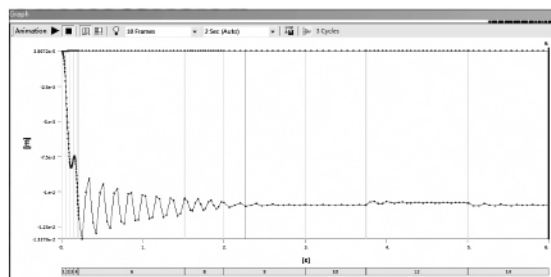


图3 $t_1 - t_2$ 为 0.20s 时横梁结构位移随时间-载荷的瞬态响应曲线

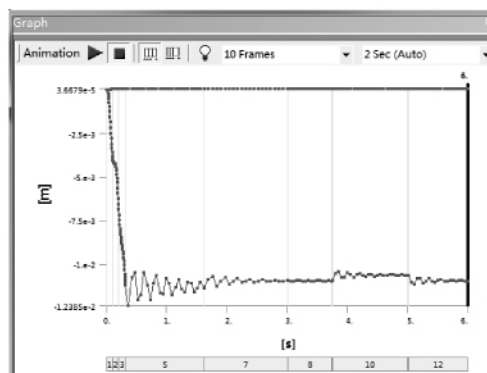


图4 $t_1 - t_2$ 为 0.30s 时横梁结构位移随时间-载荷的瞬态响应曲线

通过对比横梁结构的振动位移随时间变化的瞬态响应特性曲线, 可以明显看出横梁受到随时间

变化的载荷后,横梁沿Y轴方向有明显的振动位移变化。当满载稳定上升时,振动逐渐衰减并趋于平稳;当满载加速上升和制动上升时,横梁沿Y轴位移又出现明显的变化,而且 $t_1 - t_2$ 时间越短,横梁振动的位移越大。但不同的加载时间,沿Y轴最大位移都出现在 t_2 附近,即 $t_1 - t_2$ 时间段横梁振幅最大,此阶段横梁受到的冲击最大。从图中可以看出,当 $t_1 - t_2$ 为0.30s时,横梁的最大位移为12.385mm;当 $t_1 - t_2$ 为0.20s时,横梁的最大位移为13.370mm,这就说明加载时间越短,横梁的振幅越大,横梁受到的冲击也就越大。所以在实际作业中,增加钢丝绳从预紧到重物刚离开地面时间,对延长起重机寿命有重要意义。

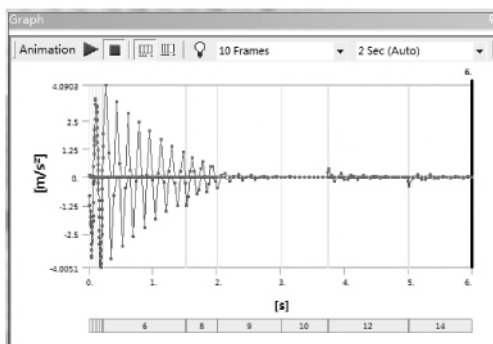


图5 $t_1 - t_2$ 为0.20s时横梁结构振动加速度随时间-载荷的瞬态响应曲线

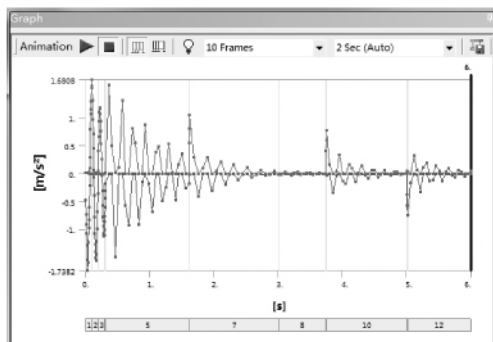


图6 $t_1 - t_2$ 为0.30s时横梁结构加速度随时间-载荷的瞬态响应曲线

通过对比加速度随时间载荷瞬态响应特性曲线可以很明显地发现,当 $t_1 - t_2$ 为0.30s时,加速度为 1.74m/s^2 ;当 $t_1 - t_2$ 为0.20s时,加速度为 4.00m/s^2 ,即 $t_1 - t_2$ 为0.20s时横梁振动的加速度要比 $t_1 - t_2$ 为0.30s时大得多,再一次证明钢丝绳从预紧到重物刚要离开地面的时间越短,横梁结构受到的冲击就越大。因此在起重机实际作业过程中,设置较长的钢丝绳从预紧到重物离开地面的时

间,对起重机的保护相当重要。

3.2 不同工位处横梁的动态响应

当 $t_1 - t_2$ 为0.30s时,分别对横梁跨端部、1/8工位处、1/4工位处、跨中工位处进行了最大应力、振动位移、速度和加速度的瞬态响应分析。限于篇幅,这里只给出横梁跨端部和1/4工位处最大振动位移和加速度的瞬态响应特性曲线,如图7~10所示,对得到的结果进行分析比较,得出相应的结论。

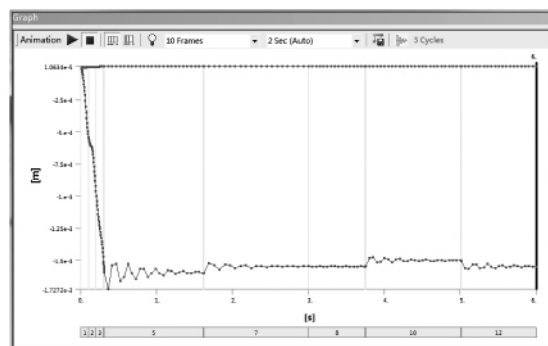


图7 横梁结构跨端部位移随时间-载荷的瞬态响应特性曲线

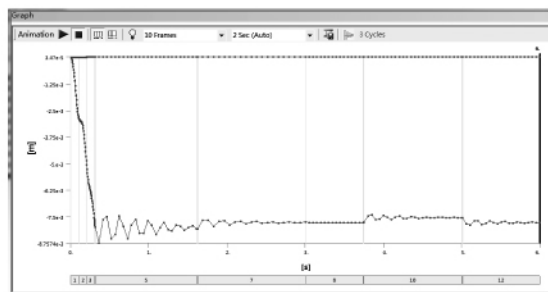


图8 横梁结构1/4工位处位移随时间-载荷的瞬态响应特性曲线

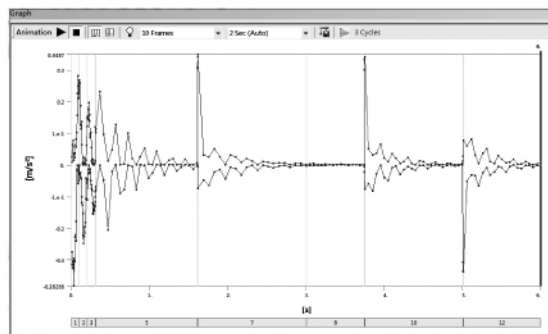


图9 横梁结构跨端部加速度随时间-载荷的瞬态响应特性曲线

起重机满载工况下,在不同工位时横梁结构的最大应力、振动位移、速度和加速度的瞬态特性响应见表2。

表2 横梁结构不同工位处动态响应

	跨端处	1/8 工位处	1/4 工位处	跨中工位处
应力/MPa	75.27	114.32	152.17	173.02
位移/m	1.73×10^{-3}	3.78×10^{-3}	8.75×10^{-3}	12.30×10^{-3}
速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5.08×10^{-3}	25.60×10^{-3}	32.70×10^{-3}	44.27×10^{-3}
加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.38	0.89	1.28	1.74

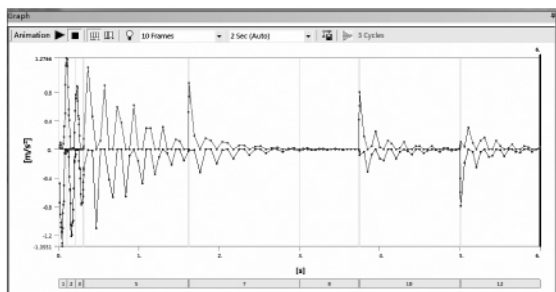


图10 横梁结构1/4工位处加速度随时间-载荷的瞬态响应特性曲线

通过表2可以看出,跨端工位的最大位移为1.73mm,最大加速度为 0.38m/s^2 ;跨中工位的最大位移为12.30mm,最大加速度为 1.74m/s^2 ,这就表明重物从跨端工位到跨中工位等依次起吊时,横梁振动的最大位移和最大应力以及振动位置处的速度和加速度逐渐增大,说明横梁受到的冲击也是从跨端工位到跨中工位越来越大。同时,与跨端工位处相比,跨中工位处加速上升和制动上升阶段的振幅和加速度也大得多,所以跨中工位为横梁作业的最危险工位,应尽量避免在横梁跨中工位进行起吊作业。

4 结束语

本文结合有限元对桥式起重机横梁结构进行了瞬态动力学仿真分析,得到了时间-载荷对于起重机系统冲击的影响规律以及在起升过程中不同工位处横梁结构的最大应力、振动位移、速度和加

速度随时间-载荷的瞬态响应及其从跨端到跨中工位处最大应力、位移、速度和加速度的变化规律,完成了既定目标,为起重机的设计制造提供了理论依据和参考,且为后续起重机起升机构钢丝绳的柔性分析及横梁结构优化奠定了研究基础。

参考文献:

- [1] 中国国家标准委员会. GBT3811-2008 起重机设计规范[S]. 北京: 国家标准局出版社, 2008.
- [2] 任远. 单梁桥式起重机结构分析及优化设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [3] 王运. 基于ANSYS的桥式起重机多目标动态优化设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [4] ALESSANDRI A, SACONE S, SIRI S. Modeling and optimal receding horizon control of maritime container terminals[J]. Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, 2007, 6(1): 109-133.
- [5] 詹迪. SolidWorks 2012 高级应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例讲解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [7] 刘众. 双梁桥式起重机起升机构动力学仿真研究[D]. 株洲: 中南林业科技大学, 2014.
- [8] 段本明, 张洪信, 张鲁邹, 等. 基于动力学分析的车架轻量化研究现状[J]. 机械设计与制造工程, 2013, 42(4): 72-74.
- [9] 张钦, 聂宏, 张明, 等. 无人机折叠翼展开动力学分析[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(2): 12-16.
- [10] 黎璐琳, 孙文磊, 黎路杨. 大型风力发电机传动系统动力学仿真分析[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(7): 19-22.

Research on the transient dynamic characteristic of beam structure for the single girder bridge crane

LIU Wenjing¹, SONG Xueliang², JIN Lan²

(1. College of Technology Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

(2. College of Electrical and Mechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou, 730050, China)

Abstract: It simulates the transient dynamic characteristic of the single girder bridge crane beam structure. In view of shocking influence of the beam, it analyzes the results under different loading time and the dynamic response of bridge crane beam structure at time-load in different location, obtains the dynamic response change rules of the stress, displacement, velocity and acceleration of the bridge crane beam under above conditions. This provides a more reliable test data theoretical basis for the design and manufacturing of bridge crane.

Key words: ANSYS; bridge crane beam; transient dynamic analysis; time-load; dynamic response