

单钩桥式起重机主梁设计

卜 匀

(唐山学院 机电工程系, 河北 唐山 063000)

摘要:介绍了桥式起重机主梁设计的计算方法及校核过程。应用有限元软件建立主梁三维模型,并针对主梁进行了静力学分析。为保障主梁结构的可靠性,将主梁与端梁装配成桥架,建立了桥架整体模型,并进行了静态分析和模态分析,在确认桥架设计合理的基础上提出了改进方案。

关键词:桥式起重机;桥架;主梁;有限元分析

中图分类号:TH215 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2020)03-0006-06

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2020.03.002

Design of Main Beam in the Single-Hook Bridge Crane

BU Yun

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: In this paper, the calculation method and checking process of the main beam design in the bridge crane are introduced, where the finite element software is used to establish a three-dimensional model and a static analysis is carried out for the main beam. In order to ensure the reliability of the structure, the main and the end beams are assembled into a bridge frame. With an overall model of the bridge frame established, the static and modal analysis are made, and an improvement plan is proposed based on the reasonable design of the bridge frame.

Key Words: bridge crane; bridge; main beam; finite element analysis

桥式起重机是横架于车间、仓库和料场上空用于物料吊运的起重设备,一般由装有大车运行机构的桥架、装有起升机构和小车运行机构的起重小车、电气设备、司机室等几部分组成^[3]。桥式起重机的桥架沿铺设在两侧高架上的轨道纵向运行,起重小车沿铺设在桥架上的轨道横向运行,构成一个矩形的高空作业范围,不受地面设备的阻碍,以充分利用桥架下面的空间吊运物料。支承结构桥架具有重要作用,其金属结构由主梁和端梁组成,是起重机安全工作的重要保障。因此无论从科学性还是从实用性出发,进行起重机主梁结构设计研究,对降

低生产成本、实现安全生产都具有现实意义。

1 桥架主梁设计计算

主要技术参数:额定起重量为5 t;起升高度 H 为16 m;跨度 S 为16.5 m;工作类型为中级。

1.1 主梁主要尺寸的确定

(1) 主梁高度 $H_1 = (1/17 \sim 1/14) S = 0.97 \sim 1.18$ m, 取 $H_1 = 1.07$ m。

(2) 端部支承梁高度 $H_2 = 0.5 H_1 = 0.535$ m, 取 $H_2 = 0.6$ m。

(3) 桥架端部变截面长度 $d = (1/8 \sim 1/4) S = 2.06 \sim 4.13$ m, 取 $d = 2.15$ m。

(4) 主梁腹板高度 h_1 : 根据主梁计算高度

作者简介: 卜匀(1971—)女,河北唐山人,副教授,硕士,主要从事机械制造、数字控制与仿真研究。

$H_1 = 1.07$ m, 选定腹板高度 $h_1 = 1.07$ m。

(5) 主梁截面尺寸: 主梁中间截面各构件板厚查表得腹板厚 $\delta = 6$ mm; 上下盖板厚 $\delta_1 = 8$ mm。

主梁两腹板内壁间距根据关系式计算:

$$b > H/3.5 = 1\,070/3.5 = 277 \text{ mm};$$

$$b > S/50 = 16\,500/50 = 330 \text{ mm}。$$

因此取 $b = 388$ mm。

盖板宽度 $B = b + 2\delta + 40 = 440$ mm; 主梁的实际高度 $H_1 = h_1 + 2\delta_1 = 1\,086$ mm。

端部支承截面的腹板高度取 $h_2 = 600$ mm, 则端部支承截面的实际高度 $H_2 = h_2 + 2\delta_1 = 616$ mm。

主梁中间截面和端部支承截面的尺寸简图如图1, 图2所示。

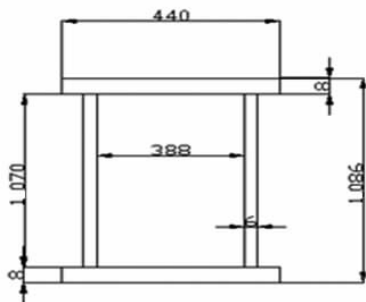


图1 主梁中间截面的尺寸简图

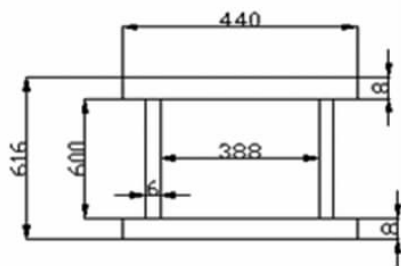


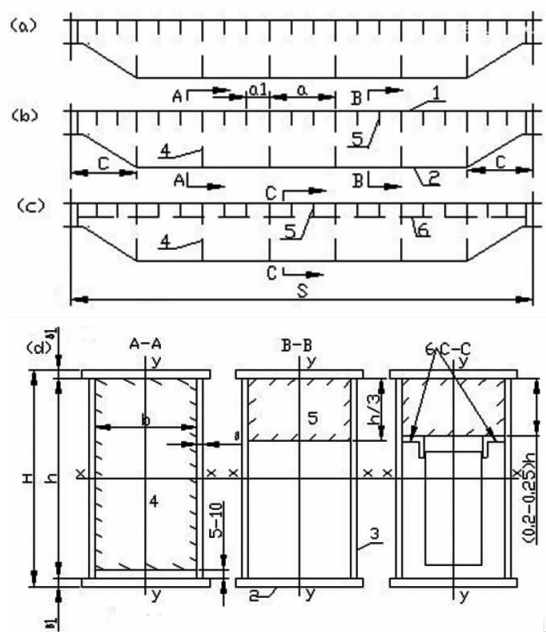
图2 主梁端部支承截面的尺寸简图

为保证主梁截面中受压构件的局部稳定性, 需设置一些加劲构件^[2], 箱型主梁的结构如图3所示。

主梁端部大加劲板的间距: $a' \approx h_1 = 1.07$ m, 取 $a' = 0.95$ m。

主梁端部(梯形部分)小加劲板的间距: $a_1 = a'/2 = 0.475$ m。

主梁中部(矩形部分)大加劲板的间距: $a = (1.5 \sim 2)h_1 = 1.605 \sim 2.14$ m, 取 $a = 1.8$ m。



1—上盖板; 2—下盖板; 3—腹板; 4—大加劲板;
5—小加劲板; 6—水平角钢

图3 箱型主梁的结构简图

主梁中部小加劲板的间距: 若小车钢轨采用 P_{15} 轻轨, 其对水平重心线 $x-x$ 的最小抗弯截面模数 $W_{\min} = 38.6 \text{ cm}^3$, 则根据连续梁由钢轨的弯曲强度条件求得加劲板间距:

$$a_1 \leq \frac{6W_{\min}[\sigma]}{\Phi_2 P} = 171.18 \text{ cm} = 1.71 \text{ m},$$

式中, P 为小车轮压, 取平均值; 小车自重 $G = 30\,000 \text{ N}$; Φ_2 为动力系数; 查得钢轨的许用应力 $[\sigma] = 170 \text{ MPa}$ 。

为了布置方便, 选择 $a_1 = a/3 = 0.6$ m。

由于腹板高厚比 $h/\delta = 161.67 > 160$, 因此设置水平加劲杆, 以保证腹板局部的稳定性。采用 $\angle 80 \times 50 \times 6$ 角钢作水平加劲杆。

1.2 主梁载荷的计算

1.2.1 主梁载荷

半个桥架(不包括端梁)的自重 $G_{q/2} = 40\,000 \text{ N}$, 桥架自重引起的主梁均布载荷 $q_1 = G_{q/2}/S = 24.24 \text{ N/cm}$ 。由于大车运行机构采用分别驱动, 主梁所受的全部均布载荷 q' 就是桥架自重引起的均布载荷 q_1 , 即 $q' = q_1 = 24.24 \text{ N/cm}$ 。大车运行机构的重量 $G_1 = 4.5 \text{ kN}$, 重心作用位置 $l_1 = 1.5$ m。

主梁的总计算均布载荷 $q = \Phi_1 q' = 26.67 \text{ N/cm}$, 式中 Φ_1 为冲击系数, $\Phi_1 = 1.1$ 。

设定作用在一根主梁上的小车两个轮压值 $P_1' = 21\ 000 \text{ N}$, $P_2' = 18\ 000 \text{ N}$, $B_x = 1\ 100 \text{ mm}$ 。考虑动力系数 Φ_2 的影响 ($\Phi_2 = 1.15$), 小车车轮的计算轮压 $P_1 = \Phi_2 P_1' = 24\ 150 \text{ N}$; $P_2 = \Phi_2 P_2' = 20\ 700 \text{ N}$ 。

1.2.2 主梁垂直最大弯矩

设敞开式操作室的重量 $G_0 = 10\ 000 \text{ N}$, 其重心距支点的距离为 $l_0 = 280 \text{ cm}$ 。

主梁垂直最大弯矩为:

$$M_{\max}^{(G+P)} = \frac{[P_1 + P_2 (\frac{S-B_x}{S}) + \frac{qS}{2} - \frac{\Phi_1 G_0 l_0}{S}]^2}{4(\frac{P_1 + P_2}{S} + \frac{q}{2})} +$$

$$\Phi_1 G_1 l_1 + \Phi_1 G_0 l_0 = 28.79 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{cm}。$$

1.2.3 主梁水平最大弯矩

主梁最大水平弯矩为:

$$M_{g \max} = 0.8 M_{\max}^{(G'+P')} \frac{a}{g},$$

式中, g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; a 为大车起动、制动加速度平均值, $a = 0.15 \sim 0.21 \text{ m/s}^2$; $M_{\max}^{(G'+P')}$ 为不计冲击系数 Φ_4 和动力系数 Φ_2 时主梁垂直最大弯矩。

$$M_{\max}^{(G'+P')} = \frac{[P_1' + P_2' (\frac{S-B_x}{S}) + \frac{q'S}{2} - \frac{G_0 l_0}{S}]^2}{4(\frac{P_1' + P_2'}{S} + \frac{q'}{2})} +$$

$$G_1 l_1 + G_0 l_0 = 26.69 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{cm}。$$

因此得主梁水平最大弯矩 $M_{g \max} = 4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{cm}。$

1.2.4 主梁的强度验算

主梁中间截面的最大弯曲应力为:

$$\sigma = \sigma_{(G+P)} + \sigma_g = \frac{M_{\max}^{(G+P)}}{W_x} + \frac{M_{g \max}}{W_y} \leq [\sigma]_n,$$

式中, W_x 为主梁中间截面对水平重心轴线 $x-x$ 的抗弯截面模数, 其近似值为 $W_x = (\frac{h_1 \delta}{3} + B \delta_1) h_1 = 5\ 296.2 \text{ cm}^3$; W_y 为主梁中间截面对垂直重心轴线 $y-y$ 的抗弯截面模数, 其近似值为 $W_y = (\frac{B \delta_1}{3} + h_1 \delta) b = 2\ 713.3 \text{ cm}^3$ 。

因此得 $\sigma = 55.83 \text{ MPa}$; 查 Q235 钢许用应

力 $[\sigma]_n = \sigma_s / 1.33 = 165.4 \text{ MPa}$, 故 $\sigma < [\sigma]_n$ 。

主梁支承截面的最大剪应力:

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max}^{(G+P)} \cdot S'}{I_{x0} \cdot 2\delta} \leq [\tau]_n,$$

式中, $Q_{\max}^{(G+P)}$ 为主梁支承截面所受的最大剪力,

$$Q_{\max}^{(G+P)} = P_1 + P_2 \frac{S-B_x}{S} + \frac{qS}{2} + \Phi_4 G_1 + \Phi_4 G_0 \cdot$$

$$\frac{S-l_0}{S} = 8 \times 10^4 \text{ N}; I_{x0} \text{ 为主梁支承截面对水平重}$$

心轴线 $x-x$ 的惯性矩, 其近似值为 $I_{x0} \approx W_{x0} \cdot$

$$\frac{H_2}{2} = (\frac{h_2 \delta}{3} + B \delta_1) h_2 \cdot \frac{H_2}{2} = 58\ 308 \text{ cm}^4; S' \text{ 为主梁}$$

支承截面半面积矩对水平重心轴线 $x-x$ 的静

$$\text{矩}, S' = 2 \cdot \frac{h_2 \delta}{2} \cdot \frac{h_2}{4} + B \delta_1 (\frac{h_2}{2} + \frac{\delta_1}{2}) = 727 \text{ cm}^3。$$

因此得 $\tau_{\max} = 8.31 \text{ MPa}$; 查 Q235 钢许用应力

为 $[\tau]_n = [\sigma]_n / \sqrt{3} = 95.6 \text{ MPa}$, 所以 $\tau_{\max} < [\tau]_n$ 。

综上可得主梁强度满足要求。

1.2.5 主梁的垂直刚度验算

主梁在满载小车轮压作用下, 在跨中所产生的最大垂直挠度:

$$f = \frac{P_1' S^3 [1 + \alpha(1 - 6\beta^2 + 4\beta^3)]}{48EI_x},$$

式中, $\alpha = P_2' / P_1' = 0.857$; $\beta = B_x / S = 0.067$; I_x 为跨中截面惯性矩, $I_x \approx W_x \cdot H_1 / 2 = 2.6 \times 10^5 \text{ cm}^4$; α, β 为系数; E 为梁截面弹性模量。

因此得 $f = 0.66 \text{ cm}$; 允许的挠度值 $[f] = S / 700 = 2.36 \text{ cm}$, $f < [f]$, 可得主梁垂直刚度满足要求。

1.2.6 主梁水平刚度验算

主梁在大车运行机构起动、制动惯性载荷作用下产生的水平最大挠度可按式计算:

$$f_g = \frac{P_g S^3}{48EI_y} + \frac{q_g S^4}{384EI_y},$$

式中, P_g 为作用在主梁上的集中惯性载荷, $P_g = (0.01 \sim 0.02) V (P_1' + P_2') = 487.5 \sim 975 \text{ N}$; q_g 为作用在主梁上的均布惯性载荷, $q_g = (0.01 \sim 0.02) V q' = 0.303 \sim 0.606 \text{ N/cm}$; $I_y = W_y \cdot B / 2 = 59\ 692.6 \text{ cm}^4$ 。

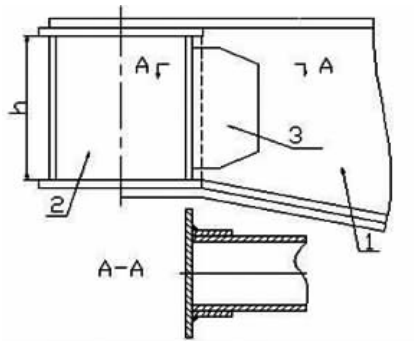
由此可得: $f_g = 0.082 \text{ cm}$; 水平挠度的许用值 $[f_g] = S / 2\ 000 = 0.825 \text{ cm}$, $f_g < [f_g]$, 所以,

主梁水平刚度满足要求。

当起重机工作无特殊性要求时,可以不必进行主梁的动刚度验算。

1.2.7 主梁与端梁的连接焊缝

主梁与端梁的连接焊缝如图4所示。



1—主梁;2—端梁;3—连接板

图4 主梁和端梁的连接焊缝

主梁和端梁的连接焊缝剪应力计算得:

$$\tau_3 = \frac{Q_{\max}^{(G+P)}}{n_3 \cdot 0.7 \cdot h_f \cdot h_0} = 20.70 \text{ MPa},$$

式中, h 为连接处焊缝的计算高度, $h_0 = 0.95h = 46 \text{ cm}$ 。

主梁在支承处最大剪切力 $Q_{\max}^{(G+P)}$ 作用下,上盖板焊缝剪应力计算得:

$$\tau = \frac{Q_{\max}^{(G+P)} S}{2 \times 0.7 \cdot h_f \cdot I_{x0}} = 13.28 \text{ MPa},$$

式中, I_{x0} 为主梁在支承处截面对水平重心 $x-x$ 的惯性矩; S 为主梁上盖板对截面的水平重心线的面积矩。

由上式得到的 $\tau < 95 \text{ MPa}$ (许用应力), 由此可得主梁与上盖板焊缝强度满足要求。

2 起重机主梁、桥架整体的有限元分析

2.1 主梁静力学分析

利用 PROE 软件建立主梁三维模型, 主梁材料 Q235, 弹性模量 $E = 2.01 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 密度 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ 。自由划分网格。对主梁的两端施加固定约束, 中间施加行走小车的均布载荷, 考虑重量的影响添加重力载荷^[4]。

图5为主梁节点位移云图。主梁在施加载荷和约束后的最大位移为 4.196 mm , 最大位移

发生在主梁中部, 与计算值 6.6 mm 相近, 小于主梁最大位移允许值 23.6 mm 。图6为主梁节点等效应力云图。主梁的应力最大值为 60.6 MPa , 与计算值 55.83 MPa 相近, 小于 Q235 的许用应力 165.4 MPa , 主梁的强度和刚度合理。

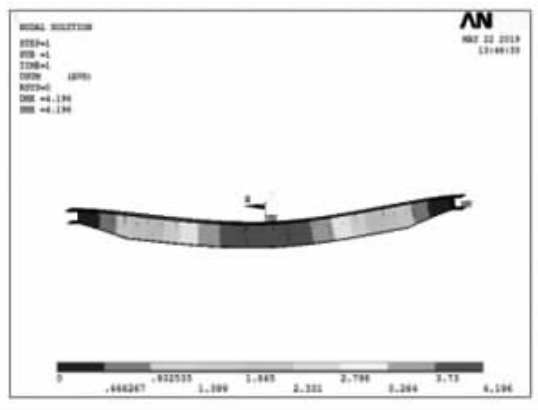


图5 主梁节点位移云图

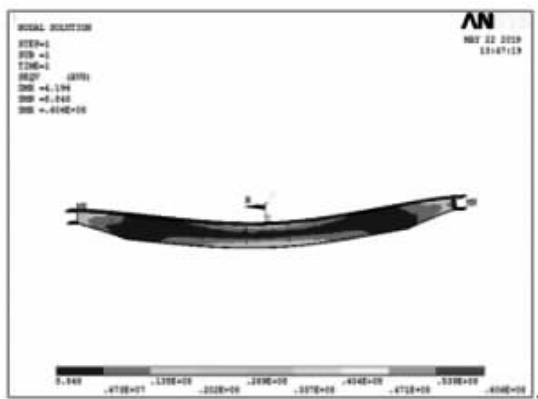


图6 主梁节点等效应力云图

2.2 桥架整体静力学分析

将设计的主梁和端梁(设计过程略)三维模型进行装配构成桥架, 对桥架进行分析, 以验证主梁设计的合理性。划分网格, 对桥架的端梁两端施加固定约束, 中间施加小车的均布载荷, 添加端梁重力载荷。

图7为桥架节点位移云图。桥架在施加载荷和约束后的最大位移为 8.86 mm , 最大位移发生在桥架中部, 小于桥架最大位移允许值 23.6 mm 。图8为桥架节点等效应力云图。桥架的应力最大值为 228 MPa , 小于 Q235 的许

用应力 240 MPa,说明桥架的强度和刚度是合理的。

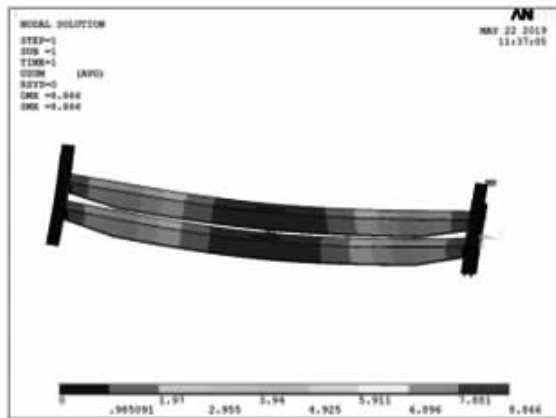


图 7 桥架节点位移云图

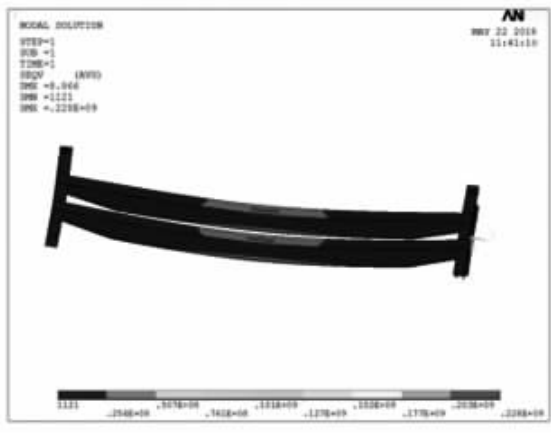


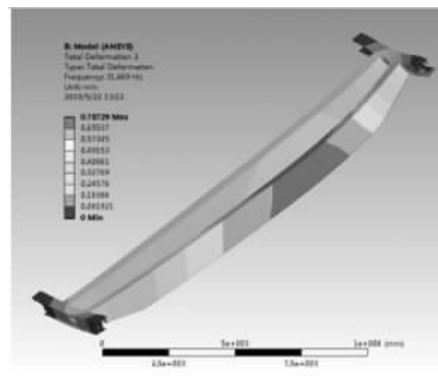
图 8 桥架节点等效应力云图

根据以往起重机桥架损坏的经验,桥架整体跨中承受最大载荷时,应力值为 228 MPa,接近 Q235 的许用应力值 240 MPa,出于安全性考虑,需要增大桥架的刚度,适当地增大主梁截面宽高尺寸,减小垂直变形,以保证小车不爬坡。

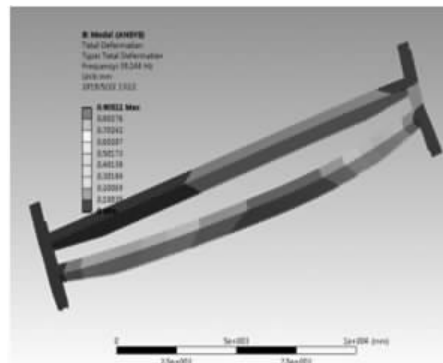
2.3 桥架结构模态分析

采用 AWE 进行桥架结构的模态分析,对精度要求高的部分自动调整网格密度,提高研究准确性^[7]。

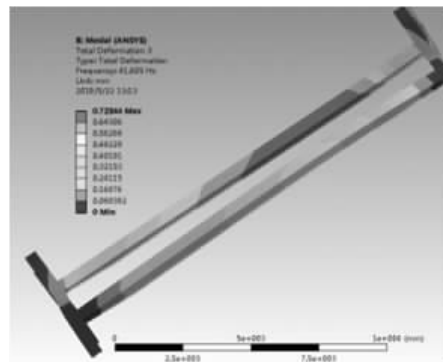
由于前几阶固有频率对桥架的影响很大,桥架结构模态分析前 6 阶振型,能很好地反映出桥架结构的动态特性,因此求解参数设为 6。求解以后得到桥架结构模态分析的前 6 阶固有频率,以及各阶的相应振型,如图 9 所示。前 6 阶固有频率见表 1。



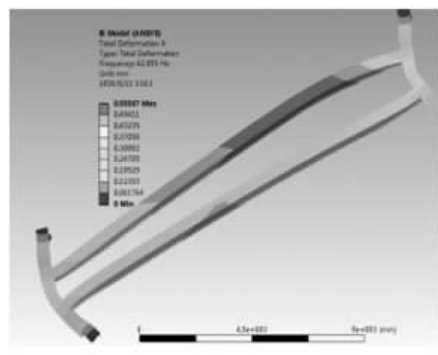
1 阶振型图



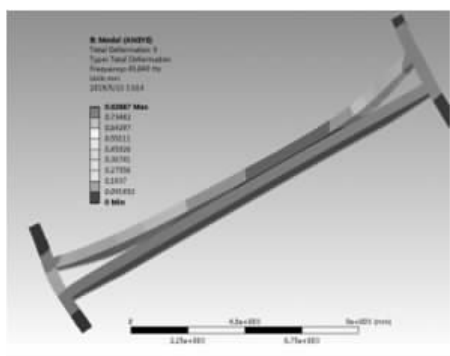
2 阶振型图



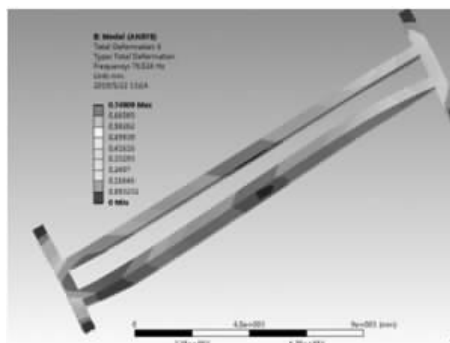
3 阶振型图



4 阶振型图



5 阶振型图



6 阶振型图

图 9 桥架结构模态分析的前 6 阶振型图

表 1 前 6 阶固有频率

模态阶数	振动频率/Hz	最大振幅/m
1	31.496	0.737×10^{-3}
2	39.114	0.903×10^{-3}
3	41.805	0.723×10^{-3}
4	42.955	0.556×10^{-3}
5	45.049	0.827×10^{-3}
6	78.524	0.666×10^{-3}

分析可知:自由振动情况下最小振动频率为 1 阶模态 31.469 Hz,最大振幅为 2 阶模态 0.903×10^{-3} m。桥架不仅有上下振动还有左右振动,桥架的固有频率远大于其冲击频率,不易发生共振,较为合理。但振动影响桥架的强度和刚度,影响小车运行的精度及小车车轮的

使用寿命,因此改进措施应适当增加局部刚度和阻尼抑制振动的影响。

3 结论

基于起重机的设计理论,完成 5 t 单钩桥式起重机桥架主梁结构设计及校核,并应用有限元软件对主梁进行结构静力学分析,经验证其强度和刚度满足设计要求。进一步对桥架整体结构进行静态分析,发现部分强度和刚度有盈余,可改进局部结构,以降低成本。经对桥架模态分析后得到固有频率和振型,获得了动态特性,这为改善工作环境、降低噪音污染提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册[M]. 4 版. 北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 周开勤. 机械零件手册[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [3] 起重机设计手册编写组. 起重机设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1980:478-505.
- [4] 饶刚. 53 m 大跨度桥式起重机设计中有限元技术的应用[J]. 起重运输机械,2008(3):25-27.
- [5] 李子木. 现代起重机的特征和发展趋势[J]. 科技视野,2013(1):52.
- [6] 贾旺兴,房师平. 起重机起升机构轻量化的研究[J]. 起重运输机械,2013(6):62-65.
- [7] 黄灵峰,侯振宁,田洪根,等. 基于有限元法的桥式起重机主梁结构分析与优化[J]. 中国仪器仪表,2018(3):48-51.

(责任编辑:夏玉玲)