

轨道承重式液压爬升系统的优化设计

乐韵斐, 张苗, 钱根

(同济大学机械工程学院, 上海 201804)

摘要: 分析了轨道承重式液压爬升系统的工作原理, 该系统由爬升器主体和轨道系统组成, 工作时, 爬升器沿轨道升降重物, 轨道通过卡子连接到辅助塔架上. 当爬升高度较大时, 轨道系统的质量和稳定性是设计的关键点. 以轨道的截面积最小为优化目标, 以轨道截面的参数为变量, 建立数学模型, 利用有限元软件计算出较优的轨道截面参数和卡子间距. 最后, 还分析了塔架的尺寸和缆风绳的初张力对轨道系统稳定性的影响.

关键词: 爬升器; 轨道承重式; 优化; 有限元

中图分类号: TH 113.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-5581(2011)01-0082-05

Optimization design for track-loaded hydraulic climbing systems

LE Yun-fei, ZHANG Miao, QIAN Gen

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this study, the working principles of orbit-loaded hydraulic climbing systems, comprises the climbing component and track system, are first analyzed. During working process, the heavy commodities are hoisted along the track, where the track is linked to the auxiliary tower-frame via bands. In case of big climbing heights, the mass and stability of track systems are regarded as the design criteria. By minimizing the track section as an optimization objective, a mathematical model is then established using track sectional parameters as variables. Next, the preferred parameters of track sections parameters and distances between bands are calculated based on the finite element software. Finally, the impacts of tower-frame dimension and initial cable tension are analyzed upon track stability.

Key words: climbing device; track loaded; optimization; finite element

随着大型构件的安装和维修作业日益增多, 液压提升和液压滑移装置得到迅速发展, 国内相关产品有钢绞线式提升系统、链板式顶升系统、液压滑移系统等^[1], 其技术趋于成熟. 本文设计的轨道承重式液压爬升系统采用了1种承载轨道和辅助塔架的组合设计, 对比相同承载能力的塔架起重系统, 降低了系统的重量, 节约了成本.

1 轨道承重式液压爬升系统工作原理

轨道承重式液压爬升系统主要包括顶升液压缸、上下插销机构、承重轨道、辅助塔架、轨道踏板和卡子等, 如图1所示. 顶升液压缸的2端分别铰接在上下插销机构上, 上下插销机构卡在承重轨道上, 承重轨道上每隔一定间距设有踏板, 工作时, 通过插销与踏板的相互作用承受载荷. 承重轨道通过卡子连接到辅助塔架上, 以保证轨道的稳定性. 辅助塔架不受垂直方向的载荷, 设计为方形塔架, 结构较为轻巧.

轨道承重式液压爬升系统是通过顶升液压缸的同步伸缩和插销的插拔实现重物的步进式升降,工作过程如图 2 所示.图中 H_1 为过程 1,5 的顶升高度; H_2 为过程 3,7 的顶升高度.在实际应用中,可以根据需要,组合 2 个或多个轨道承载式液压爬行系统同时使用,该系统的辅助塔架也可根据现场条件,改为固定墙或则固定立柱等,使用前必须验证其稳定性.

2 轨道优化设计

典型的轨道截面有实心方形、箱形和 H 形.由于 H 形轨道的抗弯模量较大,易于布置踏板,制造工艺相对简单,因此拟采用 H 形轨道.轨道截面参数直接影响轨道的重量、承载能力和成本,需对 H 形轨道进行优化设计.

2.1 优化设计模型

H 形轨道优化设计的数学模型由目标函数,强度、稳定性约束条件^[2],厚度约束条件 3 大部分组成.

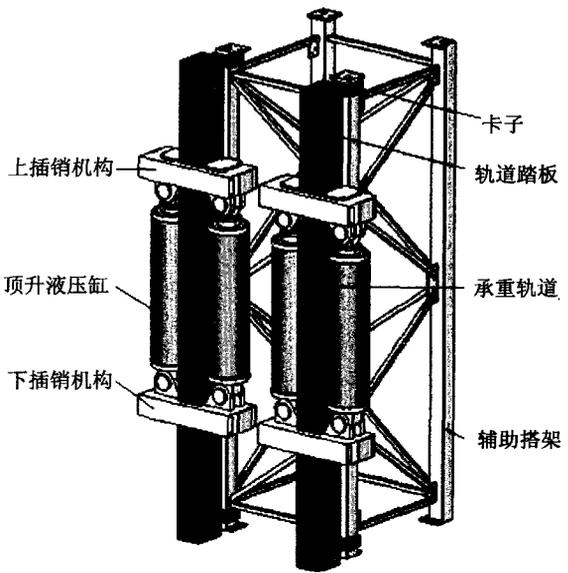


图 1 轨道承重式液压爬升系统模型

Fig.1 Model of the orbit-loaded hydraulic climbing system

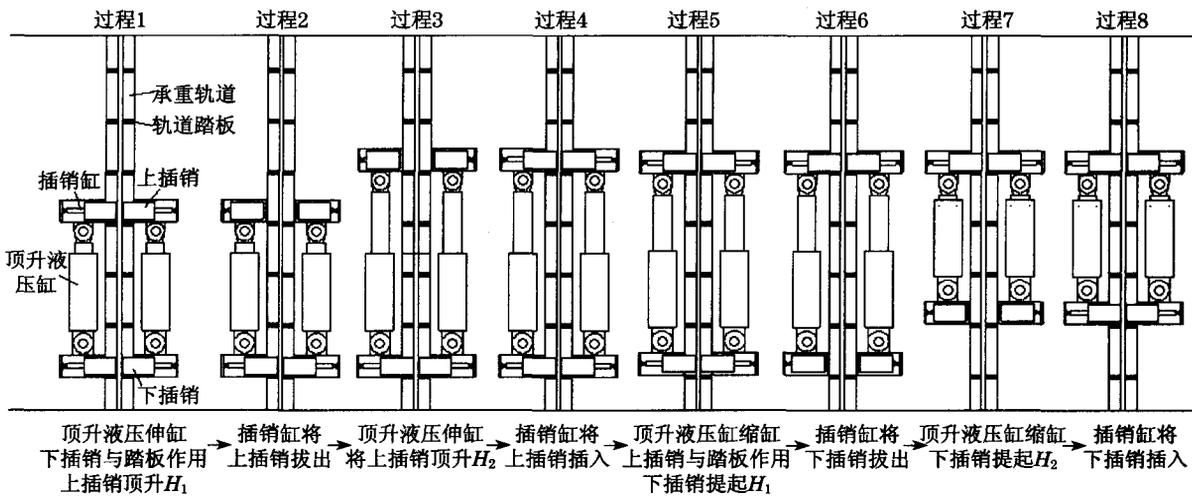


图 2 轨道承重式液压爬升系统的工作过程图

Fig.2 Working process of the orbit-loaded hydraulic climbing system

H 形轨道截面示意图如图 3 所示.在满足轨道强度和稳定性的条件下,以轨道截面积最小为最优目标,建立目标函数:

$$S = f(t_1, t_2, h, b) = 2bt_1 + ht_2 \quad (1)$$

式中: S 为轨道截面面积; t_1, t_2, h, b 为 H 形轨道的截面尺寸,如图 3 所示.

强度、稳定性控制条件:截面尺寸必须满足强度、稳定性的要求,而且使构件截面的应力小于并尽量等于材料的设计强度.

轨道底端处的应力为

$$\sigma = \frac{F_N}{S} + L\rho g \quad (2)$$

式中: F_N 为工作载荷; L 为轨道长度; ρ 为轨道密度; g 为重力加速

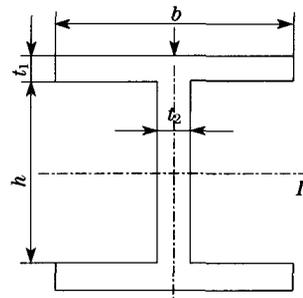


图 3 轨道截面参数

Fig.3 Orbital section parameter

度, $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

载荷因子为

$$r = \frac{F_{\alpha}}{F_N} = \frac{\pi EI}{F_N(\mu L)^2} \quad (3)$$

式中: F_{α} 为临界载荷; E 为弹性模量; I 为轨道惯性矩; μ 为长度因数.

$$I_x = \frac{b(h - 2t_1)^3 - (b - t_2)h^3}{12} \quad (4)$$

$$I_y = \frac{2t_1 b^3 + ht_2^3}{12} \quad (5)$$

式中: I_x, I_y 是 H 型截面对 x, y 轴的惯性矩.

厚度约束条件: 由于钢板的焊接条件和钢板的局部强度的限制, 钢板的厚度的约束条件为

$$\begin{cases} t_{1\min} \leq t_1 \leq t_{1\max} \\ t_{2\min} \leq t_2 \leq t_{2\max} \end{cases} \quad (6)$$

由上可得轨道优化的数学模型为

$$\begin{aligned} \min f(t_1, t_2, h, b) &= 2bt_1 + ht_2 \\ \begin{cases} r = \frac{\pi EI}{F(\mu L)^2} \geq [r] \\ \sigma = \frac{F_N}{A} + L\rho g \\ t_{1\min} \leq t_1 \leq t_{1\max} \\ t_{2\min} \leq t_2 \leq t_{2\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 优化结果分析

轨道的材料选用 Q345, 屈服应力 $\sigma_s = 295 \text{ MPa}$, 轨道的强度安全因数取为 2, 稳定安全因数一般高于强度安全因数, 取为 4.5. 以 6 m 长的轨道为例, 优化结果如表 1 所示.

表 1 优化前后截面尺寸对比

Fig.1 Comparison of cross section before and after optimization

工况	t_1/mm	t_2/mm	h/mm	b/mm	r	σ/MPa	S/m^2
优化前	40	50	320	360	7.618 1	112.5	0.044 800
优化后	50	52	190	282	4.800 7	132.3	0.038 132

从表中可以看出, 在满足轨道强度和稳定性的条件下, 轨道的横截面积明显减小, 经计算, 轨道质量减小了 19.6%.

3 轨道系统的稳定性分析

轨道系统的稳定性的影响因素主要包括轨道的截面参数、卡子间距、塔架尺寸和缆风绳的初张力等. 以优化后的轨道截面参数建模, 通过有限元软件分析, 得到卡子间距与轨道载荷因子的关系, 如图 4 所示. 其中载荷因子等于临界载荷与工作载荷的比值, 在实际应用中, 可根据轨道稳定性条件选择合理的卡子间距.

本节主要在确定轨道截面参数和卡子间距的条件下, 探讨塔架尺寸和缆风绳的初张力对轨道系统稳定性的影响.

3.1 轨道系统的模型

轨道系统由 H 形轨道、塔架和缆风绳组成, 其中塔架由 4 根塔柱、横杆和斜杆构成. 轨道截面为 H 形, 材料为 Q345. 塔柱使用格构式钢柱, 选用正方环形截面, 截面尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 材料为 Q235; 横杆与斜杆的截面尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 材料为 Q235, 塔架尺寸参数为 $L \times L$. 在实

际应用中,缆风绳与地面的夹角值越小,塔架系统的稳定性越高,但随着夹角的变小,缆风绳对塔架产生的垂直应力增大,缆风绳的长度也会变长. 本模型选择缆风绳与地面的夹角为 50° , 截面为 $\phi 32\text{ mm}$. 建立轨道系统的有限元模型如图 5 所示.

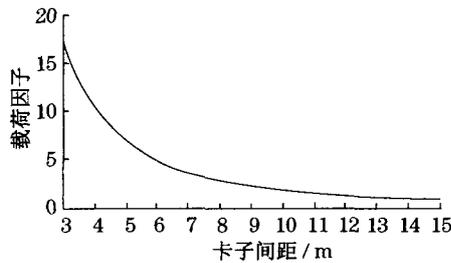


图 4 卡子间距与载荷因子关系图
Fig.4 Relationship chart of bands' spacing and load factor

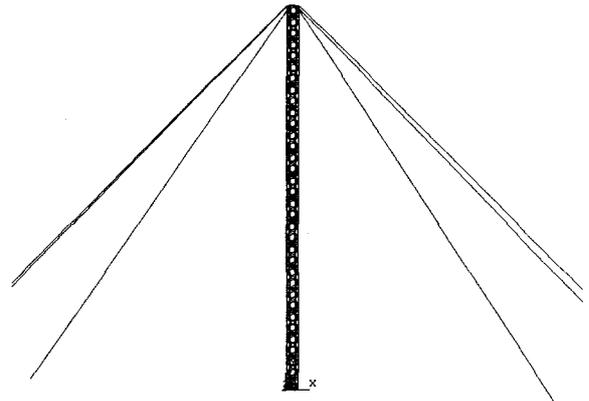


图 5 轨道系统的有限元模型
Fig.5 Finite element model of the rail system

3.2 载荷分析

轨道主要承受恒荷载、自重和风荷载的作用,其中恒荷载包括重物和起重横梁的重量.塔架的作用只是防止轨道失稳,主要承受自重和风荷载的作用.以 6 级及 6 级以下风为例计算风荷载^[3],规定在 6 级风速以上的环境下禁止爬升器工作.

3.3 分析结果

使用 ANSYS10.0 软件分析轨道系统的稳定性,轨道系统为梁-索-桁架混合结构,属于高度非线性的空间结构.计算时考虑几何非线性的影响,采用修正的 Newton-Raphson 法求解非线性方程组,在求解的过程中不断修正结构体系的总刚度矩阵^[4]最终获得精确的计算结果如图 6,7 所示.

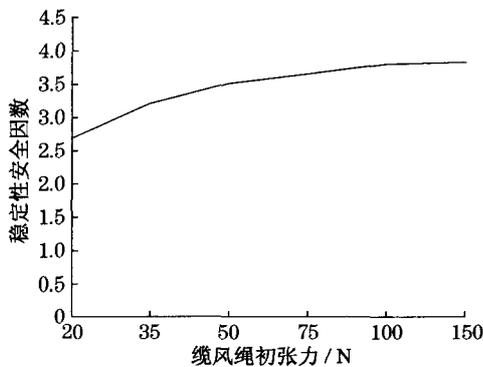


图 6 缆风绳的初张力与轨道系统的稳定性安全因数关系图

Fig.6 Relationship chart of initial tension and stability safety coefficient

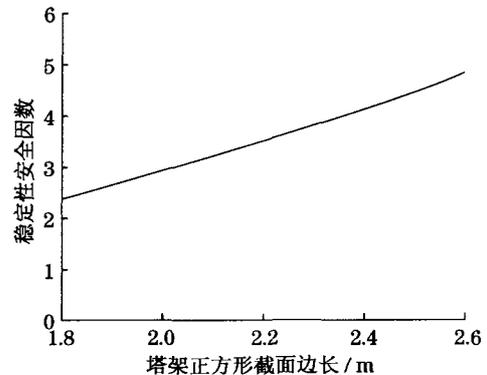


图 7 塔架的尺寸与轨道系统的稳定性安全因数关系图

Fig.7 Relationship chart of tower's size and stability safety coefficient

根据分析结果可以看到,随着缆风绳初张力或塔架尺寸的增大,轨道系统的稳定性都会随之提高,但较大的缆风绳初张力会增大塔柱的局部应力,同时也会导致缆风绳上出现较大的张力,故在选取缆风绳初张拉力时,必须验算缆风绳在工作时的张力,以保证其小于缆风绳的承受极限.较大的塔架尺寸会增加轨道系统的重量,因此在设计塔架尺寸时,应在满足稳定性的条件下,尽量选择较小的塔架尺寸.

4 算例分析

以工作载荷 19.6 MN 荷载为力的单位 kN,起重高度 100 m 为例,组合 4 个爬升器同时工作.首先在满足轨道稳定性和强度的前提下,运用有限元软件优化轨道截面参数,如表 1 所示,轨道的翼缘板厚为 50 mm、腹板厚为 52 mm、腹板宽为 190 mm、翼缘板宽为 280 mm.设计轨道的局部载荷因子为 4.5,从图 4 中可查出卡间距为 6 m.设计轨道系统的稳定性安全因数为 3.5,则从图 6,7 中可查出缆风绳初张力为 50 kN,塔架尺寸为 2.2 m×2.2 m,经计算该轨道系统的总质量为 175 t.对比塔架起重系统^[5],而在相同的稳定性安全系数和起重高度条件下,塔架起重系统的总质量为 181 t,起重载荷为 14.7 kN^[3],因此轨道承重式液压爬升系统的起重能力提高了 25%.

5 结语

轨道承重式液压爬升系统是集机械结构、液压系统和控制系统于一体的系统,在实际应用中必须有稳定的液压系统和良好的控制性能做保障.在结构设计中,轨道系统的优化和稳定性分析尤其重要,本文运用有限元软件的优化功能得出较为合理的轨道参数,并分析了影响轨道系统稳定性的关键因素.轨道承重式液压爬升系统的最大优点在于其轨道系统的创新设计,轨道系统由承重轨道和辅助塔架组成,工作载荷由 H 形轨道传至基础,塔架只是防止轨道受压失稳,本身不受垂直载荷的作用,因此塔架较为轻巧,由算例分析可知,对比塔架起重系统,轨道系统的承载能力提高了,也就是说,相同承载能力的条件下,轨道系统的质量减小,节约成本.

参考文献:

- [1] 桑军.塔式起重机电式液压顶升机构[J].机械工程师,2008(2):149-150.
SHANG Jun. Hydraulic jack-up institutions crawling in tower crane[J]. Mechanical Engineer, 2008(2):149-150.
- [2] 田丰果,寇桂岳,熊巍.基于 Solid Works 的车辆变截面高速轴优化设计[J].机械工程师,2005(5):80-81.
TIAN Fengguo, KOU Guanyue, XIONG Wei. Optimization design of vehicle variable cross-section high-speed axis based on solid works [J]. Mechanical Engineer, 2005(5):80-81.
- [3] 乐韵斐,郭军,施俊俊.大型门式起重塔架的稳定性分析[J].机械工程与自动化,2009(1):51-53.
LE Yunfei, GUO Jun, SHI Junjun. Stability analysis of large-scale gantry framework[J]. Mechanical Engineering Automation, 2009(1): 51-53.
- [4] 张秀华,王秋萍.钢结构设计原理[M].北京:北京科学院出版社,2009.
ZHANG Xiuhua, WANG Qiuping. Steel structure design principle[M]. Beijing: Beijing Academy of Sciences Press, 2009.
- [5] 康国政,张娟.大型有限元程序的原理、结构与使用[M].北京:人民邮电出版社,2007.
KANG Guozheng, ZHANG Juan. The principle, structure and usage of large finite element program[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2007.