

# The Effect of Attached Wall Stiffness on the Stability of Tower Crane

Zhigang Zhang<sup>1</sup>, Jianping Xu<sup>2</sup>, Haiwei Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Huadong Engineering Corporation, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Architectural & Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

<sup>3</sup>Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou Zhejiang

Email: 13858163149@163.com

Received: May 10<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 25<sup>th</sup>, 2018; published: May 31<sup>st</sup>, 2018

---

## Abstract

The energy method is used to solve the buckling load of tower crane and it can conclude the effect law on the stability of different attached wall stiffness and section parameters of tower crane, thus providing some references for the design and construction of tower crane.

## Keywords

Tower Crane, Energy Method, Attached Wall Stiffness, Buckling Load

---

# 附墙刚度对塔式起重机塔身稳定性的影响

张志刚<sup>1</sup>, 许建平<sup>2</sup>, 张海伟<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

<sup>2</sup>浙江工业大学, 建筑工程学院, 浙江 杭州

<sup>3</sup>浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州

Email: 13858163149@163.com

收稿日期: 2018年5月10日; 录用日期: 2018年5月25日; 发布日期: 2018年5月31日

---

## 摘要

本文采用能量法求解塔式起重机塔身的屈曲荷载, 给出塔吊不同附墙刚度系数以及截面参数对于塔吊稳定性的影响规律, 从而为塔吊设计施工提供一些参考意见。

## 关键词

塔吊, 能量法, 附墙刚度, 屈曲荷载

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国民基础设施的不断完善, 塔式起重机在施工现场扮演着越来越重要的角色, 但塔吊失稳的事故也时有发生[1], 因此对于塔吊稳定的不同影响因素特别是塔吊附墙的研究很有必要。本文采用能量法求解塔式起重机塔身的屈曲荷载, 给出不同截面参数对塔吊的屈曲极限荷载的影响。现有的塔吊的稳定问题的研究方法主要分两种, 一种是采用有限元方法[2], 另一种是解析法[3] [4] [5]。前者主要是针对具体的塔吊给出精度较高的结果, 但不能给出一般性的规律; 后者需要做较多的简化, 而且往往只能给出弯曲失稳的临界力。

本文采用能量法求解塔式起重机塔身的屈曲荷载, 给出塔吊不同附墙刚度系数以及截面参数对于塔吊稳定性的影响规律, 从而为塔吊设计施工提供一些参考意见。

## 2. 模型简化

考虑到附墙的刚度很大而且位移很小, 故将两侧支撑看成是铰接(图 1, 图 2)。

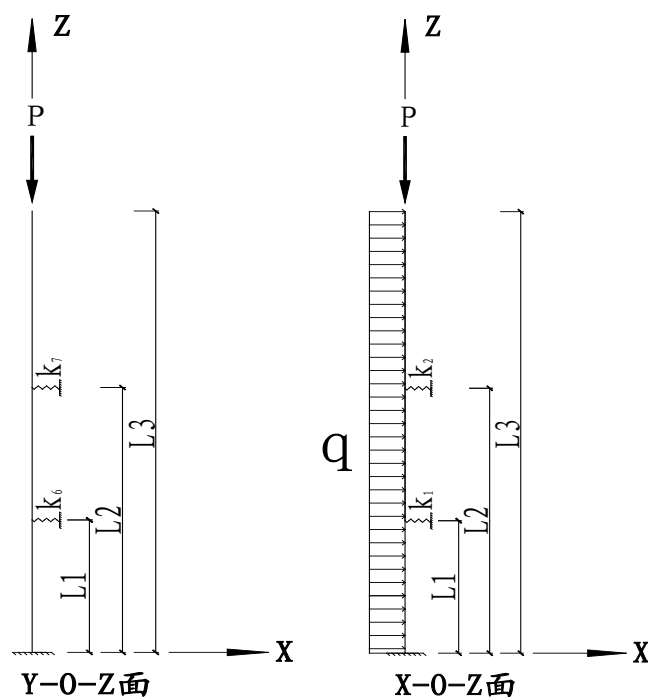


Figure 1. The load diagram of tower crane

图 1. 塔吊受力简图

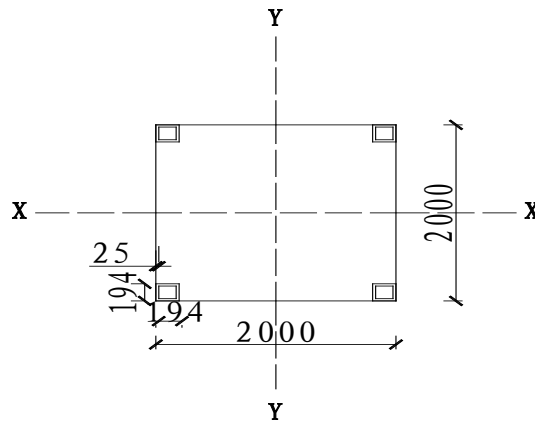


Figure 2. The body section of the tower  
图 2. 塔身截面图

### 3. 公式推导

由钢结构稳定理论[6], 导出单轴受压构件的总势能公式为:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l \left[ EI_y u_{zz}^2 + EI_x v_{zz}^2 + EI_\omega \varphi_{zz}^2 + GI_t \varphi_z^2 - P(u_z^2 + v_z^2 + i_0^2 \varphi_z^2) - qa\varphi^2 + \sum_{i=1}^n K_i C_i^2 \right] dz$$

式中,  $I_x$  为绕截面 X-X 方向截面惯性矩;  $I_y$  为绕截面 Y-Y 方向截面惯性矩;  $I_t$ : 截面自由扭转惯性矩;  $I_\omega$ : 截面扇性惯性矩;  $E$ : 截面弹性模量;  $G$ : 截面剪切弹性模量;  $K_i$ : 第  $i$  根弹簧的刚度系数;  $C_i$ : 第  $i$  根弹簧的位移;  $A_s$ : 截面面积;  $q$ : 均布荷载值;  $a$ : 荷载作用点与截面剪心之间的距离;  $i_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A_s}$ 。

根据位移边界条件, 假设塔身的位移函数如下:

Y-O-Z 方向:

$$u = \frac{z^2 \times (z-l_2) \times (z-l_3)}{l_1^2 \times (l_1-l_2) \times (l_1-l_3)} c_1 + \frac{z^2 \times (z-l_1) \times (z-l_3)}{l_2^2 \times (l_2-l_1) \times (l_2-l_3)} c_2 + \frac{z^2 \times (z-l_1) \times (z-l_2)}{l_3^2 \times (l_3-l_1) \times (l_3-l_2)} \times (c_3 z^2 + c_4 z + c_5)$$

Y-O-Z 方向:

$$v = \frac{z^2 \times (z-l_2) \times (z-l_3)}{l_1^2 \times (l_1-l_2) \times (l_1-l_3)} c_6 + \frac{z^2 \times (z-l_1) \times (z-l_3)}{l_2^2 \times (l_2-l_1) \times (l_2-l_3)} c_7 + \frac{z^2 \times (z-l_1) \times (z-l_2)}{l_3^2 \times (l_3-l_1) \times (l_3-l_2)} \times (c_8 z^2 + c_9 z + c_{10})$$

绕 Z 轴扭转:

$$\varphi = z^2 \times (z-l_1) \times (z-l_2) \times (c_{11} z^2 + c_{12} z + c_{13})$$

式中,  $c_1, c_2, \dots, c_{13}$  为待定系数。

由势能驻值定理,  $\frac{\partial \Pi}{\partial C_i} = 0, (i=1, 2, \dots, 13)$  得:

塔身的屈曲条件为:

$$\Theta = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} & a_{68} & a_{69} & a_{610} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} & a_{78} & a_{79} & a_{710} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{86} & a_{87} & a_{88} & a_{89} & a_{810} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{96} & a_{97} & a_{98} & a_{99} & a_{910} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{106} & a_{107} & a_{108} & a_{109} & a_{1010} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{1111} & a_{1112} & a_{1113} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{1211} & a_{1212} & a_{1213} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{1311} & a_{1312} & a_{1313} \end{pmatrix} = 0$$

其中

$$a_{11} = \left( 2l_2^2 (l_1 - l_3)(l_2 - l_3) \left( 105K_1 l_1^4 (l_1 - l_2)^2 (l_1 - l_3)^2 + l_3^3 \left( Pl_3^2 (-14l_2^2 + 21l_2 l_3 - 9l_3^2) + 84EI_y (5l_2^2 - 10l_2 l_3 + 6l_3^2) \right) \right) \right) / \left( 210l_1^4 (l_1 - l_2)^2 l_2^2 (l_1 - l_3)^3 (l_2 - l_3) \right)$$

其余略。

#### 4. 实例分析

针对塔吊实例(横剖面见图2), 用一些参数的具体值如下:

$I_x = I_y = 7.0 \times 10^{-2} \text{ m}^4$ ;  $I_t = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ ;  $I_\omega = 5.8 \times 10^{-6} \text{ m}^{-6}$ ;  $A_s = 6.97 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ;  $i_0^2 = 2.01 \text{ m}^2$ ;  $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ;  $G = 0.79 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ;  $q = 4 \times 10^3 \text{ N/m}$ ;  $a = 1.0 \text{ m}$ ;  $L_1 = 38.75 \text{ m}$ ;  $L_2 = 58.4 \text{ m}$ ;  $L_3 = 83.75 \text{ m}$ ;  $K_1 = K_2 = K_6 = K_7 = 1.0 \times 10^9 \text{ N/m}$ ; 方形钢管的壁厚为 25 mm。

利用 Mathematics 求得行列式

$$\begin{aligned} \Theta = & \left( 1.74156 \times 10^{49} \left( -3.71007 \times 10^{174} + 3.50384 \times 10^{167} P - 1.36319 \times 10^{160} P^2 \right. \right. \\ & + 2.85073 \times 10^{152} P^3 - 3.52468 \times 10^{144} P^4 + 2.70038 \times 10^{136} P^5 - 1.32397 \times 10^{128} P^6 \\ & + 4.21173 \times 10^{119} P^7 - 8.59978 \times 10^{110} P^8 + 1.0745 \times 10^{102} P^9 - 7.24436 \times 10^{92} P^{10} \\ & + 1.7014 \times 10^{83} P^{11} + 3.22811 \times 10^{73} P^{12} - 4.42093 \times 10^{63} P^{13} - 4.71084 \times 10^{53} P^{14} \\ & + 6.33513 \times 10^{42} P^{15} \left. \right) \left( 1.28517 \times 10^{159} - 6.9888 \times 10^{151} P + 1.39568 \times 10^{144} P^2 \right. \\ & - 1.47212 \times 10^{136} P^3 + 9.44048 \times 10^{127} P^4 - 3.92628 \times 10^{119} P^5 + 1.08604 \times 10^{111} P^6 \\ & + 1.99026 \times 10^{102} P^7 + 2.33168 \times 10^{93} P^8 - 1.59779 \times 10^{84} P^9 + 5.06115 \times 10^{74} P^{10} \\ & - 8.08203 \times 10^{63} P^{11} - 1.70264 \times 10^{55} P^{12} + 9.03441 \times 10^{44} P^{13} + 1.50962 \times 10^{35} P^{14} \\ & \left. - 4.26425 \times 10^{24} P^{15} + 2.82877 \times 10^{13} P^{16} \right) / \left( (-1.02887 \times 10^{19} + 2.80224 \times 10^{10} P)^6 \right. \\ & \left. \times (6.37917 \times 10^{19} - 1.69797 \times 10^{11} P - 20.4705 P^2)^4 (-8.60839 \times 10^{42} + 8.92748 \times 10^{34} P \right. \\ & \left. - 1.9404 \times 10^{26} P^2 + 4.036 \times 10^{16} P^3 - 5.27144 \times 10^5 P^4) \right) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ -8.65477 \times 10^9; -8.65477 \times 10^9 - 3592.76i; -8.65477 \times 10^9 + 3592.76i; \right. \\
 & \left. -8.65477 \times 10^9; 3.85633 \times 10^7; 3.85633 \times 10^7; 5.92786 \times 10^7; 5.95071 \times 10^7; \right. \\
 P \text{ 的解集: } & 5.96744 \times 10^7; 1.34835 \times 10^8; 2.93913 \times 10^8; 2.93914 \times 10^8; \\
 & 3.59095 \times 10^8 - 2.25785 \times 10^6 i; 3.59095 \times 10^8 + 2.25785 \times 10^6 i; \\
 & 3.59534 \times 10^8 - 1.40302 \times 10^6 i; 3.59534 \times 10^8 + 1.40302 \times 10^6 i; \\
 & 3.65336 \times 10^8 - 3.31669 \times 10^6 i; 3.65336 \times 10^8 + 3.31669 \times 10^6 i; \\
 & 3.66532 \times 10^8 - 3.8811 \times 10^6 i; 3.66532 \times 10^8 + 3.8811 \times 10^6 i; \\
 & 3.6951 \times 10^8 - 1.91818 \times 10^6 i; 3.6951 \times 10^8 + 1.91818 \times 10^6 i; \\
 & 3.70348 \times 10^8; 9.90013 \times 10^8; 9.90013 \times 10^8; 4.61709 \times 10^9; \\
 & \left. 6.28591 \times 10^9; 6.28591 \times 10^9; 7.14445 \times 10^{10}; 8.20618 \times 10^{10}; 8.20618 \times 10^{10} \right] N
 \end{aligned}$$

这里取最小值得到塔吊的屈曲荷载为 3860 吨，而 ANSYS 求得的塔吊屈曲荷载为 3600 吨，两者的差值 8% 在精度允许范围内，符合要求。

### 5. 考虑塔吊附墙刚度和不同截面参数对屈曲荷载的影响

采用本文的公式，分析了不同附墙刚度系数、附墙间距、横向荷载、惯性矩对塔身稳定性的影响，如图 3~8 所示。结论如下：

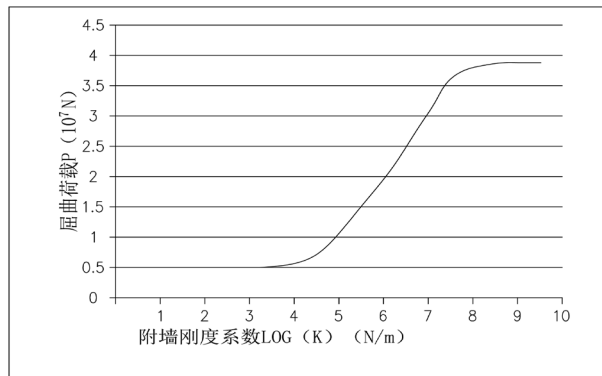


Figure 3. The influence of different wall stiffness coefficients  
图 3. 不同附墙刚度系数的影响

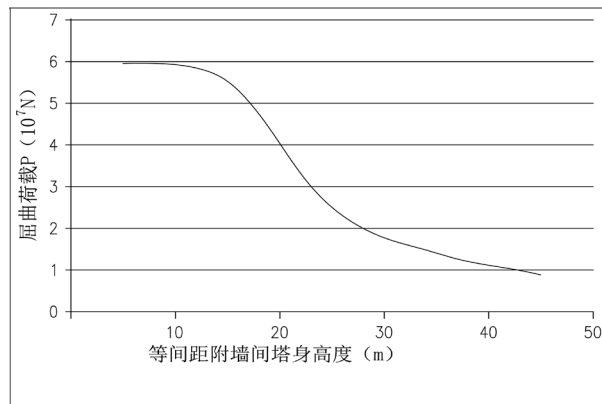
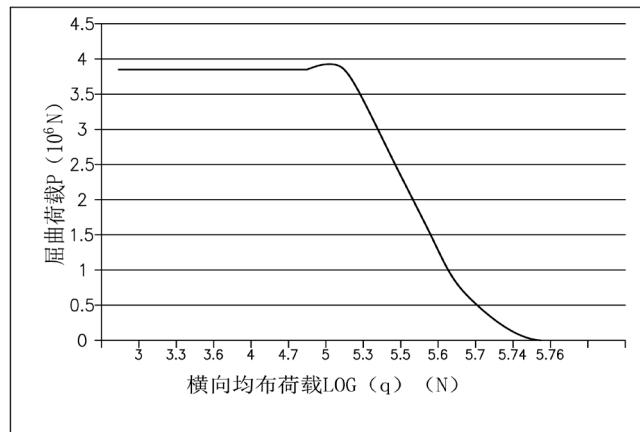
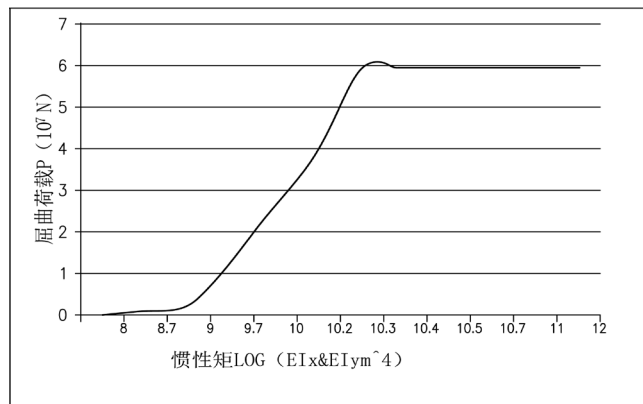


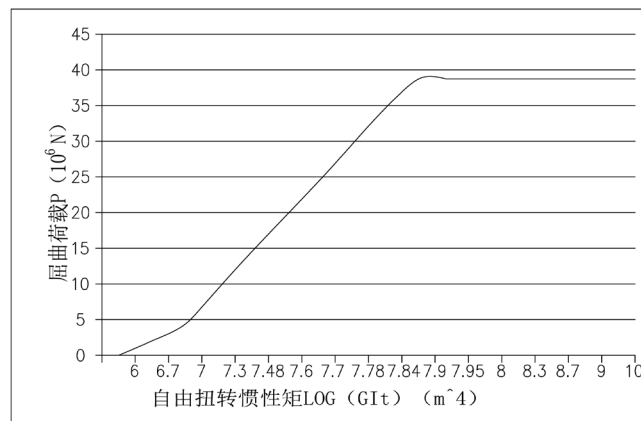
Figure 4. The influence of the Attached to the wall spacing  
图 4. 附墙间距的影响



**Figure 5.** The influence of transverse uniformly distributed load  
**图 5.** 横向均布荷载的影响



**Figure 6.** The influence of the moment of inertia of section  
**图 6.** 截面惯性矩的影响



**Figure 7.** The influence of free torsional moment of inertia  
**图 7.** 自由扭转惯性矩的影响

- 1) 塔吊屈曲荷载的大小在附墙刚度不大的情况下变化很小，当刚度超过一定数量级  $10^5$  N/M 后屈曲荷载显著增加；当刚度大于  $10^9$  N/M 后，屈曲荷载大小恒定。
- 2) 两道附墙条件下塔吊屈曲荷载大小随着塔身高度的增加而显著下降。

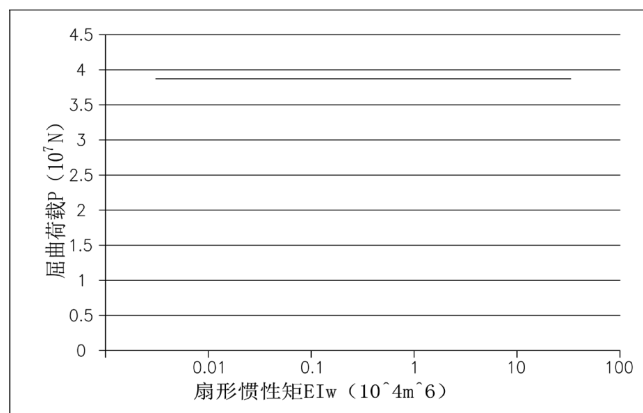


Figure 8. The influence of sectional fan inertia moment

图 8. 截面扇性惯性矩的影响

3) 当横向均布荷载在一定设计范围内, 对塔吊的屈曲荷载影响不大; 只有当遇到超强水平风荷载作用时, 塔吊的屈曲荷载才会急剧下降。

4) 提高塔吊截面的抗弯惯性矩能明显提高塔吊的屈曲荷载, 但惯性矩的对于屈曲荷载贡献作用有个限值。

5) 自由扭转惯性矩在设计范围  $10^7 \sim 10^8 \text{ m}^4$  内对塔吊的屈曲荷载影响很大, 超出此范围后影响很小。

6) 扇性惯性矩对塔吊的屈曲荷载无影响, 可以忽略不计。

## 6. 结束语

本文采用能量法给出了塔式起重机塔身的屈曲荷载求解公式, 揭示塔吊附墙刚度系数以及截面参数对于塔吊稳定性的影响规律。较有限元及其他数值方法, 本文公式可方便、快捷地确定塔式起重机塔身的屈曲荷载。

## 参考文献

- [1] 刘健, 王基业. 塔吊事故分析与对策[J]. 科技风, 2011(21): 93.
- [2] 周英. 单侧附着塔式起重机安全使用的稳定性校核研究[J]. 浙江建筑, 2013, 30(11): 48-50.
- [3] 刘古岷. 考虑风荷载作用时自升式塔机塔身非线性变形的解析解与近似解[J]. 建筑机械: 上半月, 1995(1): 32-33.
- [4] 刘古岷, 李洪洲. 自升塔式起重机塔身临界屈曲荷载的近似计算公式[J]. 建筑机械: 上半月, 1995(1): 32-33.
- [5] 周晓玲. 塔式起重机塔身稳定性计算[J]. 建筑机械化, 2005, 26(6): 24-26.
- [6] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计(第6版)[J]. 北京: 科学出版社, 2014.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)