

# 考虑基础弹性的履带式起重机回转工况分析

杨庆乐<sup>1</sup>, 屈福政<sup>\*1</sup>, 于志远<sup>2</sup>, 谢正义<sup>1,3</sup>

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 宾夕法尼亚州立大学 工程学院, 美国 宾夕法尼亚 16509;

3. 沈阳建筑大学 交通与机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要:** 针对回转工况下基础变形导致履带式起重机侧向荷载增大甚至引发臂架破坏或倾翻事故的问题, 基于 Winkler 地基模型, 考虑起重机机械结构与弹性基础的耦合作用, 应用 Adams 软件建立多体刚柔耦合作用模型, 通过实验数据验证模型的正确性. 进一步分析不同的地基系数、回转速度以及起升高度对起重机臂架危险截面应力与整机倾翻稳定性的影响, 得到特定基础条件下满足施工要求的工作参数, 为履带式起重机的设计以及安全使用提供了参考.

**关键词:** 基础变形; Winkler 地基模型; 臂架破坏; 刚柔耦合作用; 倾翻稳定性

**中图分类号:** TH213.7      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201902006

## 0 引言

在履带式起重机使用说明中通常只给出地耐力的要求, 而无刚度要求, 这使得起重机在使用过程中因地面变形过大而倾翻的风险增大. 起重机回转过程中, 由于惯性力作用吊重发生偏摆, 使得臂架发生侧向变形, 两侧履带的接地比压发生变化. 不均匀的履带接地比压导致基础不均匀沉降, 加上转台、车架、履带架等结构件的弹性变形, 最终使整机及臂架的侧向倾斜随荷载状态的不同而变化, 而这种变化通常会反过来加剧不均匀的基础沉降, 直接威胁臂架强度和整机侧向抗倾翻稳定性. 另一方面, 考虑到吊重偏摆的周期性, 其与基础沉降的耦合作用使得这一动态过程非常复杂, 通常的静力分析已无法得到准确的结果. 由于这一动态过程与多个操作参数相关, 其最不利的设计工况也难以确定, 所以采用刚柔耦合多体动力学分析, 确定最不利荷载状态以及基础要求, 对履带式起重机设计和安全使用是非常有意义的.

因为安装在臂架上的角度传感器能够实时检测臂架在变幅平面内的倾角, 所以力矩限制器能够感知弹性基础和起重机结构的耦合作用, 保证

作业安全. 但起重机还无法感知在回转平面内(臂架侧向)弹性基础和起重机结构的耦合作用, 因此本文重点研究回转工况下起重机臂架强度与整机侧翻稳定性.

许多学者对该问题进行了理论研究. 文献[1]对米勒公园起重机事故进行了分析, 得出风载引起臂架的侧向荷载与侧向位移, 这种不利的侧向荷载导致了两侧履带的受力不均, 加剧了地面的沉陷, 最终侧向荷载的大小超过了基于自重的抗倾覆设计极限. 文献[2]讨论了两起起重机事故, 得出了设计与基础的缺陷是导致起重机倾覆的主要原因. 文献[3]假设位于弹性基础上的履带式起重机荷载呈三角形或梯形分布, 针对不同的土壤类型, 推导出履带式起重机基础的承载能力. 文献[4]应用 Adams 软件对履带式起重机进行回转动力学仿真, 根据臂架头部的挠度计算出等效荷载与回转动载系数. 文献[5-7]通过拉格朗日方程建立了起重机刚柔耦合动力学模型, 与 Adams 软件仿真结果进行对比分析, 验证了计算模型的准确性. 文献[8-10]建立了吊重摆振动力学方程, 对全地面起重机塔臂回转工况吊重摆振动态特性进行分析研究, 得到启动加速时间、吊绳长度及工作幅

度对吊重偏摆角大小与主臂强度的影响程度.文献[11]使用 Adams 软件分析了集装箱起重机小车由额定速度到静止过程中吊具与集装箱的运动特性.文献[12]采用 Adams 软件对汽车起重机回转时突然卸载工况进行动力学分析,得出不同回转速度对臂架头部位移、加速度以及臂架最大应力的影响程度.文献[13]综合考虑了臂架回转的惯性力、几何非线性及刚柔耦合效应,采用拉格朗日方程推导出了大吨位轮式起重机吊重回转时臂架系统的动力学分析模型.文献[14-18]考虑吊绳长度、激励频率、起落速度等因素对吊重摆动的影响,建立浮式起重机动力学模型,并采用拉格朗日方程推导出船体运动与吊重摆动耦合作用的非线性动力学方程.文献[19-20]采用弹性阻尼系统模拟森林起重机与地面作用,使用拉格朗日方程推导出臂架运动方程,分析了连杆刚度对转动关节荷载、驱动力矩以及棱柱关节驱动力的影响,并将一种基于动态的最优控制方法用于控制起重机臂架的摇摆.文献[21-23]采用拉格朗日方程推导出塔式起重机回转工况动力学方程以及吊重的一般运动方程,并通过模型实验验证推导方程的正确性.文献[24]介绍了一种可在起重机运行期间计算出支腿或履带支反力的自动化系统,用于控制起重机机身倾斜与荷载偏摆.文献[25]考虑履带式起重机钢丝绳的弹性、结构的几何非线性以及风载作用,应用鲁棒性控制系统,实现荷载和吊臂在小范围内摆动.文献[26-28]根据 Winkler 地基梁理论,得出了位于弹性地基上的短梁在任意荷载作用下的位移方程.采用弹性地基梁法模拟单个路基箱在不同模量的地基土层上的受力状况,得到单个路基箱的分压比与土层模量的关系,提出组合式路基箱模型,并构造出新型弹性地基梁单元.

上述研究成果对起重机臂架动力学分析、吊重偏摆角控制以及基础沉降量计算有重要的指导意义,但就本文提出的考虑基础弹性的履带式起重机回转工况分析问题仍需要在弹性基础和起重机结构的耦合作用方面展开进一步研究.

本文基于 Winkler 地基模型,采用 Ansys 与 Adams 软件建立履带式起重机与基础地面耦合作用的多体动力学模型,根据相似理论,设计起重机缩尺模型实验,比较模型计算应力与实验测得应力,验证动力学仿真模型的正确性.以某 QUY400 型履带式起重机为例,分析回转工况下不同的地基系数、回转速度以及起升高度对起重

机臂架危险截面应力与整机稳定性的影响程度,为履带式起重机的设计以及使用提供参考.

## 1 建立弹性基础与履带作用模型

### 1.1 Winkler 地基模型上履带沉降量计算

起重机的荷载通过车架、履带架、履带板(路基箱)作用到地面.若车架作用到履带架的荷载为竖直向下的力  $P_1$ 、 $P_2$ ,则作用于弹性基础上的履带架简化受力模型如图 1 所示.履带架可视为短梁,依据 Winkler 地基模型及自由端约束条件可得:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad (1)$$

式中: $E$  为履带架弹性模量; $I$  为履带架截面惯性矩; $y$  为履带架任一点沉降量; $x$  为履带架上任一点水平坐标; $k$  为地基系数.

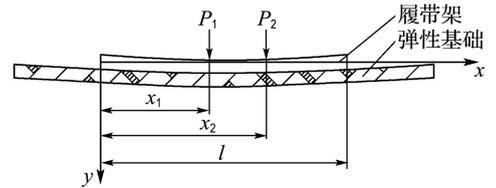


图 1 履带架作用于弹性基础上的受力

Fig. 1 Force of crawler structure on elastic foundation

边界条件: $x=0$  时,  $d^2 y/dx^2 = 0$ ,  $d^3 y/dx^3 = 0$ ;  $x=l$  时,  $d^2 y/dx^2 = 0$ ,  $d^3 y/dx^3 = 0$ ;  $x=x_1$  时,  $y_1^+ = y_1^-$ ,  $\theta_1^+ = \theta_1^-$ ,  $M_1^+ = M_1^-$ ,  $Q_1^+ = Q_1^- - P_1$ ;  $x=x_2$  时,  $y_2^+ = y_2^-$ ,  $\theta_2^+ = \theta_2^-$ ,  $M_2^+ = M_2^-$ ,  $Q_2^+ = Q_2^- - P_2$ .

解得:

$$y(x) = \frac{A_2 B_3 - A_3 B_2}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \varphi_1(\beta x) + \frac{A_1 B_3 - A_3 B_1}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \frac{\varphi_2(\beta x)}{\beta} + C_3 \quad (2)$$

式中: $A_1 = 4EI\beta^3 \varphi_3(\beta l)$ ;  $A_2 = 4EI\beta \varphi_4(\beta l)$ ;  $A_3 = -\frac{P_1}{\beta} \varphi_2[\beta(l-x_1)] + \frac{P_2}{\beta} \varphi_2[\beta(l-x_2)]$ ;  $\beta = (k/4EI)^{1/4}$ ;  $B_1 = 4EI\beta^3 \varphi_2(\beta l)$ ;  $B_2 = 4EI\beta^2 \varphi_3(\beta l)$ ;  $B_3 = -P_1 \varphi_1[\beta(l-x_1)] - P_2 \varphi_1[\beta(l-x_2)]$ ;  $C_3 = \left\| \frac{P_1}{EI\beta^3} \varphi_4[\beta(l-x_1)] \right\|_{x_2} + \frac{P_2}{EI\beta^3} \varphi_4[\beta(l-x_2)]$ ,  $\left\| \right\|_{x_1}$  表示当  $x > x_1$  时后面公式进入计算;  
 $\varphi_1(x) = \text{ch } x \cos x$ ;  $\varphi_3(x) = \text{sh } x \sin x$ ;  $\varphi_2(x) = \frac{1}{2}(\text{ch } x \sin x + \text{sh } x \cos x)$ ;  $\varphi_4(x) = \frac{1}{2}(\text{ch } x \sin x - \text{sh } x \cos x)$ .

## 1.2 弹性基础与履带作用模型

采用 Adams 软件中的三维力 VFOCE 建立基础与履带的作用方程:

$$F = \begin{cases} 0; & z \leq 0 \\ l/nbkz; & z > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $F$  为履带架支重轮对基础作用力;  $l$  为履带接地长度;  $n$  为支重轮总数(包括引导轮与驱动轮);  $b$  为履带接地宽度;  $k$  为地基系数;  $z$  为对应支重轮处的基础沉陷量。

以某 QUY400 型履带式起重机为例, 履带与基础参数如表 1 所示。分别采用式(2)与 Adams 软件得到作用于弹性基础上的履带沉陷量, 图 2 是地基系数分别为 3 000 和 100 000  $\text{kN}/\text{m}^3$  时, 履带各位置沉陷量曲线图。通过对公式计算结果与仿真结果比较, 可以得出:

(1) 两种方法得到的履带沉陷量基本一致, 最

大沉陷量的误差小于 5%, 满足工程计算要求。

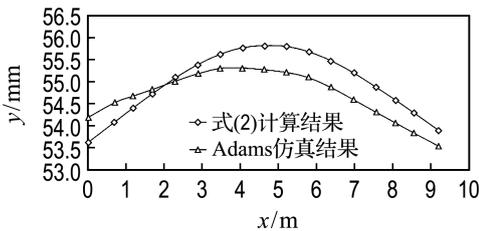
(2) 当地基系数增大时, 基础沉陷量与履带变形减小, 基础对各支重轮的支反力差值增大, 各支重轮对履带架的荷载分配不均匀性增加。

(3) 误差的产生一方面是因为公式法采用的履带架计算模型是等截面, 而 Adams 仿真采用的是变截面; 另一方面是因为公式法是假设履带与基础全接触, 而 Adams 仿真是根据支重轮数量将荷载等效分配后再作用于基础。

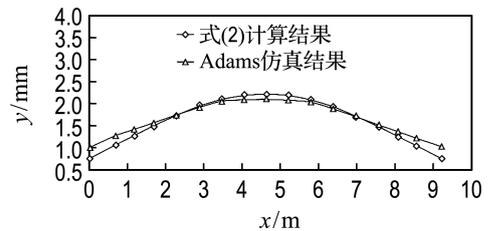
表 1 履带与基础参数

Tab. 1 Parameters of track and foundation

$P_1/\text{kN}$	$P_2/\text{kN}$	$x_1/\text{m}$	$x_2/\text{m}$	$l/\text{m}$
1 000	1 000	3.4	5.82	9.212
$I/\text{m}^4$		$k/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		$b/\text{m}$
0.020 731		3 000/100 000		1.29



(a) 地基系数 3 000  $\text{kN}/\text{m}^3$



(b) 地基系数 100 000  $\text{kN}/\text{m}^3$

图 2 履带沉陷量比较

Fig. 2 Track subsidence comparison

## 2 实验设计与模型计算分析

### 2.1 实验目的与内容

模型实验的目的是验证吊重在摆动情况下弹性基础和起重机结构耦合作用分析模型及分析方法的正确性。

地基基础为松散砾石, 对应的地基系数<sup>[26]</sup>(单位面积地基土产生单位位移所需施加的力)为 20 000  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。考虑到与起重机的几何相似与动力相似, 相似定数选取应力值, 设计一缩尺实验台(见表 2 和图 3)。在臂架变幅支撑点处, 选取位置粘贴应变片, 标记为位置 A。起重机吊载回转工况中, 荷载绕着臂架端部定滑轮做类似单摆运动, 因此实验中采用测力仪对吊重施加约吊重 5% 的侧载, 然后卸掉侧载, 让吊重绕臂架端部做单摆运动。分有支撑弹簧(弹性基础)和无支撑弹簧(刚性基础)两个工况, 读取位置 A 处应力值  $\sigma_A$  随时间变化曲线, 如图 4 所示。

表 2 模型主要参数

Tab. 2 Main parameters of the model

前后支撑 间距/mm	左右支撑 间距/mm	臂架长度/ mm	变幅支撑点距离根部 铰点长度/mm
205	210	1 140	195
臂架仰角/(°)		支撑弹簧刚度/( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	
74		60	
			吊重/kg
			30.25

### 2.2 结果分析

对实验工况采用 Adams 软件进行仿真, 得到测点应力值随时间变化曲线, 如图 4 所示, 与实验结果比较, 分析 Adams 仿真模型的准确性。

(1) Adams 仿真结果与实验测得数据基本一致, 最大误差小于 3%, 满足工程计算要求。

(2) 比较弹性基础对臂架危险截面应力的影响, 弹性基础的测点应力比刚性基础的测点应力最大值增加 12%。

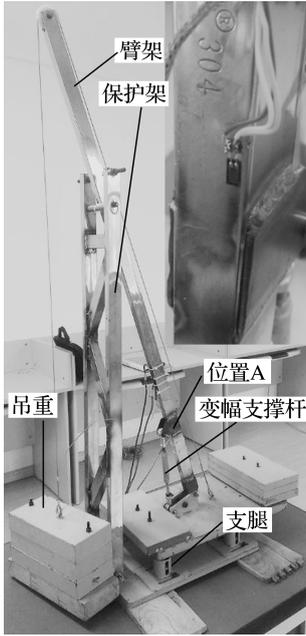
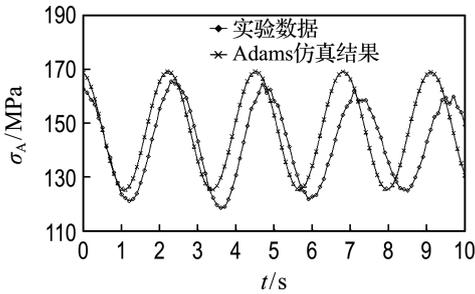
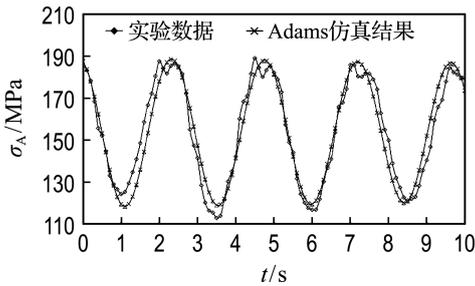


图 3 实验模型及应变片位置

Fig. 3 Experiment model and strain gauge position



(a) 刚性基础应力随时间变化



(b) 弹性基础应力随时间变化

图 4 实验数据与 Adams 仿真结果

Fig. 4 Experimental data and Adams simulation results

(3) 实验过程中,吊重单摆运动到达最高点时,吊重会绕其吊点轻微转动,因此该位置测得的应力值也产生波动。

通过上述分析证明弹性基础对起重机回转工况中臂架危险截面应力产生较大的影响,采用 Adams 软件对该工况进行仿真可以满足工程计算的要求。

### 3 算 例

以某 QUY400 型履带式起重机为例(参数见表 3),工况为超起塔臂工况,吊重 42.6 t,采用 Adams 软件建模如图 5 所示.其中主臂、副臂、前撑臂、后撑臂、超起桅杆及下车采用柔性体建模,转台采用刚体建模,基础与履带之间的作用采用三维力 VFOCE 建立.仿真初始阶段,由于吊重以及整机自重影响,主臂与副臂会发生轻微摆动,在 30 s 以后摆动基本停止,因此在 30 s 时转台开始回转,前 10 s 匀加速,后 10 s 匀减速,中间过程匀速,回转 90°时转台停止转动.分析回转过程中不同的地基系数、回转速度以及起升高度对臂架危险截面应力以及整机稳定性的影响。

表 3 QUY400 型履带式起重机主要参数

Tab. 3 Main parameters of QUY400 crawler crane

幅度/m	主臂长/m	副臂长/m	主臂仰角/(°)	副臂仰角/(°)
30	72	66	86	72
车身压重/t	后配重/t	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	起升高度/m	
40	120	0.10~1.00	2~70	

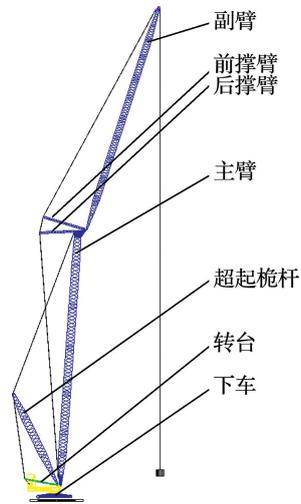
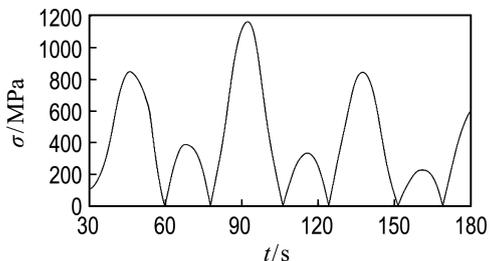


图 5 Adams 模型

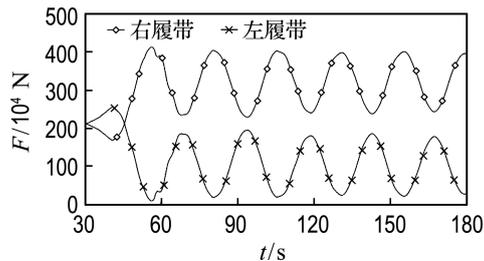
Fig. 5 Adams model

图 6(a)为地基系数 3 000 kN/m<sup>3</sup>,回转速度 1.00 r/min、起升高度 2 m 时,臂架危险截面应力随时间变化曲线.可以看出危险截面最大应力发生在吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中,最大值为 1 162 MPa,而在吊重即将开始摆动时刻,危险截面应力为 848 MPa.图 6(b)为该工况下,左右两履带承受竖直方向荷载随时间变化曲线,可看出左履带最小支撑荷载为 8.6 × 10<sup>4</sup> N.

GB 3811—2008 中规定履带式起重机在侧向或最小支撑荷载的底盘端部倾覆线上的总荷载不应小于起重机总重力的 15%。该工况下履带式起重机总质量 375 t, 最小支撑荷载不应小于  $56.25 \times 10^4$  N。因此该工况下臂架危险截面应力以及整机稳定性都不满足要求。



(a) 危险截面应力



(b) 履带支撑荷载

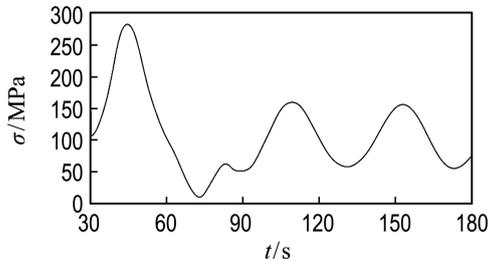
图 6 危险截面应力与履带支撑荷载

(3 000 kN/m<sup>3</sup>, 1.00 r/min, 2 m)

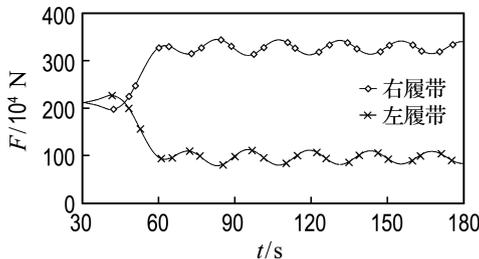
Fig. 6 Critical cross section stress and track supporting force (3 000 kN/m<sup>3</sup>, 1.00 r/min, 2 m)

图 7(a)为地基系数 3 000 kN/m<sup>3</sup>、回转速度 0.33 r/min、起升高度 2 m 时,臂架危险截面应力随时间变化曲线。可以看出危险截面最大应力发生在吊重即将开始摆动时刻,最大值为 283 MPa,而吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中,危险截面最大应力为 160 MPa。图 7(b)为该工况下,左右两履带承受垂直方向荷载随时间变化曲线,可以看出左履带最小支撑荷载为  $79 \times 10^4$  N。因此该工况下臂架危险截面应力以及整机稳定性都满足要求。

图 8(a)为地基系数 100 000 kN/m<sup>3</sup>、回转速度 0.50 r/min,不同起升高度下臂架危险截面应力随时间变化曲线。可以看出该转速下,臂架危险截面最大应力发生在吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中,且随着起升高度增加,危险截面最大应力逐渐减小,图 8(b)为地基系数 100 000 kN/m<sup>3</sup>、回转速度 0.33 r/min,不同起升高度下臂架危险截面应力随时间变化曲线。可以看出该转



(a) 危险截面应力

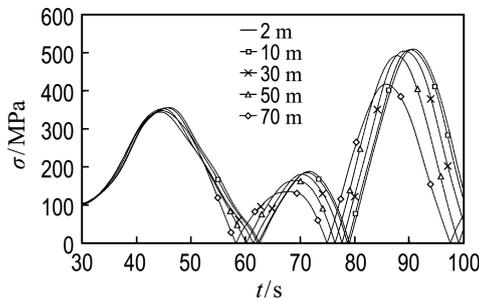


(b) 履带支撑荷载

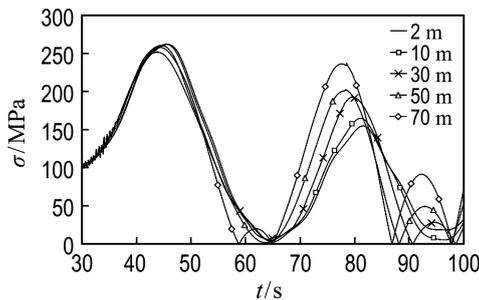
图 7 危险截面应力与履带支撑荷载

(3 000 kN/m<sup>3</sup>, 0.33 r/min, 2 m)

Fig. 7 Critical cross section stress and track supporting force (3 000 kN/m<sup>3</sup>, 0.33 r/min, 2 m)



(a) 0.50 r/min



(b) 0.33 r/min

图 8 回转速度对起重机臂架危险截面应力的影响

Fig. 8 Effect of swinging speed on critical cross section stress of the crane boom

速下,臂架危险截面最大应力发生在吊重即将开始摆动时刻,且起升高度对最大应力影响不大。

图 9(a)为不同地基系数与回转速度下,吊重即将开始摆动时刻臂架危险截面应力曲面图,坐

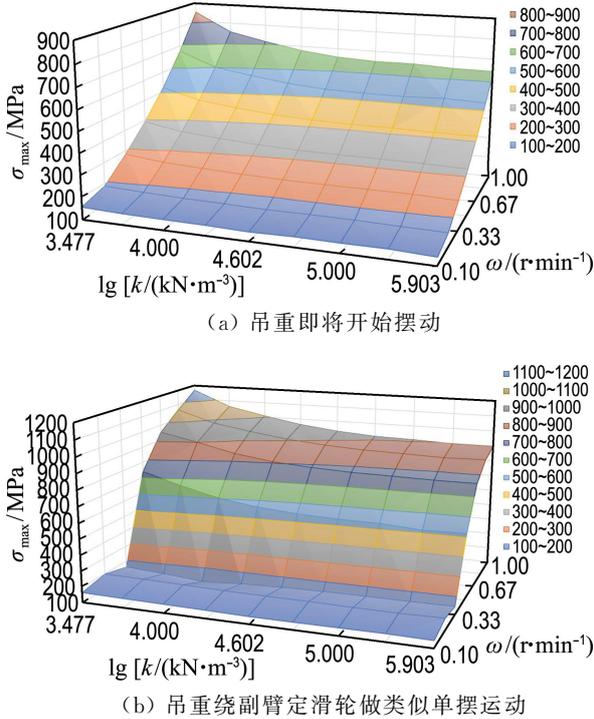


图9 不同时刻出现的起重机臂架危险截面最大应力

Fig. 9 Critical cross section maximum stress of the crane boom at different time

标中的地基系数为实际地基系数的对数值。可以看出随着地基系数的增大、回转速度的减小,危险截面最大应力逐渐减小,且回转速度对危险截面最大应力影响更明显。图9(b)为不同地基系数与回转速度下,吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中臂架危险截面最大应力曲面图。可以看出,当回转速度大于0.33 r/min后,最大应力急剧增加。

通过上述结果分析可以得出:

(1)当地基系数与起升高度一定时,不同的回转速度,臂架危险截面最大应力出现的时刻不同。当回转速度大于0.33 r/min时,最大应力出现在吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中;当回转速度小于0.33 r/min时,最大应力出现在吊重即将开始摆动时刻。

(2)当地基系数与起升高度一定时,回转过程中若回转速度超过某一临界值将导致吊重摆动幅度过大而引起某侧履带支撑荷载小于额定值而造成整机失稳事故。当地基系数为3 000 kN/m<sup>3</sup>,起升高度为2 m时,该临界值为0.50 r/min。

(3)当地基系数一定,回转速度小于0.33 r/min时,臂架危险截面最大应力发生在吊重即

将开始摆动时刻,且起升高度对最大应力影响不大;当回转速度大于0.33 r/min时,臂架危险截面最大应力发生在吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中,且随着起升高度增加,危险截面最大应力逐渐减小。

(4)当起升高度2 m,回转速度0.10 r/min,地基系数由200 000 kN/m<sup>3</sup>降低到3 000 kN/m<sup>3</sup>时,臂架危险截面最大应力增加10.7%;当起升高度2 m,回转速度1.00 r/min,地基系数由200 000 kN/m<sup>3</sup>降低到3 000 kN/m<sup>3</sup>时,臂架危险截面最大应力增加29.6%。可见在回转速度较大时,地基系数对臂架危险截面最大应力的影响更大。

(5)与地基系数和起升高度相比,回转速度对臂架危险截面应力以及整机稳定性的影响更大。

## 4 结论

(1)比较Adams中采用三维力VFOCE模拟基础与履带架作用模型的仿真结果和Winkler地基模型解析解,证明该作用模型可以用于弹性基础上的履带式起重机仿真分析。

(2)采用Winkler地基模型,设计起重机模型实验,建立了臂架危险截面应力与基础变形的耦合作用模型,通过与实验数据进行对比分析,证明该作用模型是正确的。

(3)通过仿真分析,得到特定弹性基础条件下满足臂架强度与整机稳定性要求的回转速度,降低施工过程中由于回转速度导致地面变形过大而引起重大事故的风险。

(4)分析了不同的回转速度下,臂架危险截面应力随时间变化情况。当回转速度较低时,危险截面最大应力发生在吊重即将开始摆动时刻;当回转速度较高时,危险截面最大应力发生在吊重绕副臂定滑轮做类似单摆运动的过程中。

(5)分析了不同地基系数、回转速度以及起升高度对臂架强度与整机稳定性的影响,发现回转速度对其影响最大。

## 参考文献:

- [1] ROSS B, MCDONALD B, VIJAY SARAF S E. Big blue goes down. The Miller Park crane accident [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(6): 942-961.
- [2] MARQUEZ A A, VENTURINO P, OTEGUI J L. Common root causes in recent failures of cranes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 39: 55-64.

- [3] LIU Xiteng, CHAN D H, GERBRANDT B. Bearing capacity of soils for crawler cranes [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, **45**(9):1282-1302.
- [4] 刘家辉,王欣,滕儒民,等.履带起重机回转特性研究[J].机械设计与研究,2008,**24**(3):106-109,112.  
LIU Jiahui, WANG Xin, TENG Rumin, *et al.* Research on the rotary dynamic characteristics of crawler crane [J]. **Machine Design & Research**, 2008, **24**(3):106-109,112. (in Chinese)
- [5] 郑宇锋,王殿龙.考虑吊钩组升降的伸缩臂起重机动力学模型研究[J].大连理工大学学报,2017,**57**(3):259-265.  
ZHENG Yufeng, WANG Dianlong. Study of dynamic model of telescopic crane with a lifting and pulling load movement [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2017, **57**(3):259-265. (in Chinese)
- [6] 王殿龙,关伟,滕儒民,等.全地面起重机多体动力学仿真平台研究[J].中国工程机械学报,2011,**9**(2):189-193.  
WANG Dianlong, GUAN Wei, TENG Rumin, *et al.* Study on multi-body dynamical simulation platform for all-terrain cranes [J]. **Chinese Journal of Construction Machinery**, 2011, **9**(2):189-193. (in Chinese)
- [7] 杨悦,曹旭阳,高顺德.塔式起重机刚柔耦合动力学模型研究[J].机械设计与制造,2018(1):79-82.  
YANG Yue, CAO Xuyang, GAO Shunde. Rigid-flexible coupling dynamic modeling of a tower crane [J]. **Machinery Design & Manufacture**, 2018(1):79-82. (in Chinese)
- [8] 高顺德,杨超,滕儒民,等.全地面起重机塔臂工况吊重摆振特性研究[J].中国工程机械学报,2013,**11**(4):303-308.  
GAO Shunde, YANG Chao, TENG Rumin, *et al.* Hoisting and shimmy properties for tower jib operations of all-terrain cranes [J]. **Chinese Journal of Construction Machinery**, 2013, **11**(4):303-308. (in Chinese)
- [9] 杨超,李杰,高顺德,等.全地面起重机塔臂工况回转对主臂强度影响的研究[J].建筑机械,2013(13):98-102,105.  
YANG Chao, LI Jie, GAO Shunde, *et al.* Study on the influence of rotation on boom for an all-terrain crane in tower jib operation [J]. **Construction Machinery**, 2013(13):98-102,105. (in Chinese)
- [10] 秦绍友,苗文博,苗明.伸缩臂履带起重机回转时臂架应力状态分析[J].起重运输机械,2014(9):48-52.  
QIN Xuyou, MIAO Wenbo, MIAO Ming. Analysis for boom stress state for slewing of telescopic boom crawler crane [J]. **Hoisting and Conveying Machinery**, 2014(9):48-52. (in Chinese)
- [11] 齐桂营,王蕾.基于ADAMS集装箱起重机防摇摆柔性系统仿真分析[J].机械工程与自动化,2017(1):102-103,105.  
QI Guiying, WANG Lei. Dynamics simulation of anti-swing flexible system in container crane based on ADAMS [J]. **Mechanical Engineering & Automation**, 2017(1):102-103,105. (in Chinese)
- [12] 李欣业,段晓炳,黄晓辰,等.汽车起重机伸缩臂突然卸载的瞬态响应仿真[J].河北工业大学学报,2017,**46**(3):35-38.  
LI Xinye, DUAN Xiaobing, HUANG Xiaochen, *et al.* Transient response simulations of telescopic boom of truck cranes [J]. **Journal of Hebei University of Technology**, 2017, **46**(3):35-38. (in Chinese)
- [13] 颜世军,彭剑,刘泽,等.大型柔性起重臂系统回转吊装刚柔耦合动力学模型[J].振动与冲击,2018,**37**(5):175-179.  
YAN Shijun, PENG Jian, LIU Ze, *et al.* Rigid-flexible coupled dynamic model of a huge-type truck crane's boom system during its slewing hoisting [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, **37**(5):175-179. (in Chinese)
- [14] HAM S H, ROH M I, LEE H, *et al.* Multibody dynamic analysis of a heavy load suspended by a floating crane with constraint-based wire rope [J]. **Ocean Engineering**, 2015, **109**:145-160.
- [15] 韩广冬,张桐,陈海泉,等.船用起重机吊重摇摆的动态分析[J].山东大学学报(工学版),2017(1):112-118.  
HAN Guangdong, ZHANG Tong, CHEN Haiquan, *et al.* Payload pendulation dynamic analysis of ship-mounted crane [J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2017(1):112-118. (in Chinese)
- [16] 孙友刚,董达善,李万莉,等.海上浮式集装箱起重机非线性动力学模型及试验验证[J].中国工程机械学报,2017,**15**(6):482-487.  
SUN Yougang, DONG Dashan, LI Wanli, *et al.* The nonlinear dynamics of offshore container crane on the sea and experimental verification [J]. **Chinese Journal of Construction Machinery**, 2017, **15**(6):482-487. (in Chinese)
- [17] LEE H W, ROH M I, HAM S H, *et al.* Coupled analysis method of a mooring system and a floating crane based on flexible multibody dynamics considering contact with the seabed [J]. **Ocean Engineering**, 2018, **163**:555-569.

- [18] HONG K S, NGO Q H. Dynamics of the container crane on a mobile harbor [J]. **Ocean Engineering**, 2012, **53**:16-24.
- [19] URBAS A. Computational implementation of the rigid finite element method in the statics and dynamics analysis of forest cranes [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2017, **46**:750-762.
- [20] KALMARI J, BACKMAN J, VISALA A. Nonlinear model predictive control of hydraulic forestry crane with automatic sway damping [J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2014, **109**:36-45.
- [21] JU F, CHOO Y S, CUI F S. Dynamic response of tower crane induced by the pendulum motion of the payload [J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2006, **43**(2):376-389.
- [22] JERMAN B, PODRZAJ P, KRAMARJ. An investigation of slewing-crane dynamics during slewing motion — Development and verification of a mathematical model [J]. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2004, **46**(5):729-750.
- [23] GHIGLIAZZA R M, HOLMES P. On the dynamics of cranes, or spherical pendula with moving supports [J]. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 2002, **37**(7):1211-1221.
- [24] HASAN S, AL-HUSSEIN M, HERMANN U H, *et al.* Interactive and dynamic integrated module for mobile cranes supporting system design [J]. **Journal of Construction Engineering and Management**, 2010, **136**(2):179-186.
- [25] TUAN L A, LEE S G. Modeling and advanced sliding mode controls of crawler cranes considering wire rope elasticity and complicated operations [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2018, **103**:250-263.
- [26] 龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981:66-67.  
LONG Yuqiu. **Calculation of Elastic Foundation Beams** [M]. Beijing: The People's Education Press, 1981: 66-67. (in Chinese)
- [27] 丁俏俏, 邱国志. 大型履带式起重机路基箱分载能力研究 [C] // 第十四届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 天津大学, 2014: 688-691.  
DING Qiaqiao, QIU Guozhi. Research on load-distribution capability of large crawler cranes [C] // **Proceedings of the 14th National Symposium on Modern Structural Engineering**. Tianjin: Tianjin University, 2014: 688-691. (in Chinese)
- [28] 李潇, 王宏志, 李世萍, 等. 解析型 Winkler 弹性地基梁单元构造 [J]. **工程力学**, 2015, **32**(3):66-72.  
LI Xiao, WANG Hongzhi, LI Shiping, *et al.* Element for beam on Winkler elastic foundation based on analytical trial functions [J]. **Engineering Mechanics**, 2015, **32**(3):66-72. (in Chinese)

## Analysis of swinging loads operating condition for crawler crane mounted on elastic foundation

YANG Qingle<sup>1</sup>, QU Fuzheng<sup>\*1</sup>, YU Zhiyuan<sup>2</sup>, XIE Zhengyi<sup>1,3</sup>

( 1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Engineering, Pennsylvania State University, Pennsylvania 16509, America;

3. School of Transportation and Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China )

**Abstract:** The deformation of foundation during swinging loads operation causes the increasing of crawler crane side loading or even leads to the boom failure or tipping failure. To solve this problem, based on Winkler foundation model, a multibody rigid-flexible coupling model is established considering the coupling of the crane mechanical structure and elastic foundation using Adams software. The model is verified by experimental data. Then the model is further used to analyze the influence of different foundation coefficients, swinging speeds and lifting heights on the critical cross section stress of the crane boom and the tipping stability in order to obtain operating parameters that can meet the requirements of construction for the given foundation conditions. The results will provide reference for the design and safe operation of crawler cranes.

**Key words:** deformation of foundation; Winkler foundation model; boom failure; rigid-flexible coupling; tipping stability