

Theoretical study and engineering application of load calculation of car suspension legs

Sheng Wang

China Railway 5th Bureau Group South China Engineering Co., Ltd., Dongguan, Guangdong, 523133, China

Abstract

Construction cranes are extensively utilized in engineering projects, handling tasks ranging from steel structure installation and material transportation to equipment hoisting, prefabricated component assembly, and beam slab lifting. These machines operate across tonnage categories including super-large, large, and medium-sized models. Characterized by their extended working radius, stringent positioning precision requirements, complex operational conditions, and specialized technical expertise, cranes play a pivotal role in both economic efficiency and safety management within the construction industry. This paper addresses the stability issues in truck-mounted crane operations by establishing a mathematical model for crane outrigger bearing capacity based on static equilibrium principles. Through analyzing the coupled relationships between crane self-weight, load weight, boom geometric parameters, and outrigger layout, an analytical expression for four outrigger bearing capacity is derived, providing theoretical support for safe crane operation.

Keywords

truck-mounted crane; outrigger load; moment balance; safety factor; stability analysis

汽车吊支腿荷载计算理论研究与工程应用

王生

中铁五局集团华南工程有限责任公司，中国·广东东莞 523133

摘要

汽车吊在工程建设中应用广泛，作业内容涉及钢结构的安装、材料转运、设备吊装、预制构件安装、梁板吊装等，所需设备吨位涵盖超大型、大型及中小型。其作具有作业半径大、吊装定位精度要求高、工况复杂，专业化程度突出的特点，在工程建设领域中的经济效益和安全管理中占据至关重要的地位。本文针对汽车吊作业稳定性问题，基于静力学平衡原理，建立了吊车支腿承载力的数学模型。通过分析吊车自重、吊物重量、吊臂几何参数与支腿布局的耦合关系，推导出四支腿承载力的解析表达式，为吊车安全操作提供理论依据。

关键词

汽车吊；支腿荷载；力矩平衡；安全系数；稳定性分析

1 引言

汽车吊，系指安装于专用汽车底盘上的流动式起重设备，可独立执行货物装卸与建筑结构吊装作业。核心构成部件包括：底盘系统、起重臂结构、液压传动系统、回转机构及支腿装置。

根据近年工程建设领域汽车吊安全事故的统计分析，支腿的实际荷载超出允许值、超载与支腿沉陷占事故总量的 70%。根据《流动式起重机稳定性的确定》(GBT19924) 规定：当汽车吊上部回转结构的纵向轴线在指定拱墙区域内与底盘纵轴垂直或重合时，各支腿承受的最小荷载应不低于起重机总重的 15%，但未明确给出汽车吊支腿荷载的具体

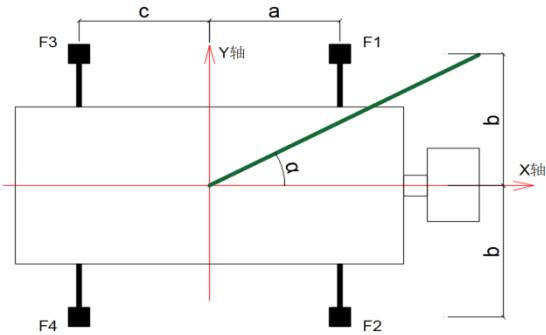
计算方法。为此，本文开展汽车吊各支腿荷载计算研究，旨在为支腿荷载计算及地基承载力验算提供理论支撑。

2 支腿荷载计算理论模型

假设一汽车吊自重为 W (含配重)，吊物 (包括吊钩) 重量为 P ，吊臂伸出长度为 L ，吊臂仰角为 β ，吊臂水平投影与吊车轴线夹角为 α ，前后支腿至 y 轴垂直距离为 a, c ，左右支腿至 x 轴垂直距离为 b 。以吊车回转中心为坐标系原点，纵轴为 x 轴，水平面垂直 x 轴方向为 y 轴，建立直角坐标系，如下图所示。

吊车在起吊重物时，四个支腿对称伸出，各支腿承受的荷载分别为 F_1, F_2, F_3, F_4 ，现在需要研究其荷载大小的计算方法。

【作者简介】王生（1974-），中国湖南衡阳人，本科，工程师，从事桥隧工程施工技术研究。



2.1 基本假设

吊车结构为刚体。刚体假设指吊车结构在受力时不会变形，即忽略材料的弹性变形和非线性效应。该假设大幅简化计算模型。仅需满足力的平衡条件 ($\sum F=0$, $\sum M=0$) 即可求解。

支腿与地面为理想铰接，无滑移。这个假设符合多数汽车吊支腿的受力特征，聚焦于主要荷载（竖向荷载）的分配计算。

荷载通过支腿中心线传递。忽略支腿偏载引起的局部效应，使各支腿荷载通过对称性直接分布，简化了计算模型。

吊车的重心与回转中心重合。

忽略风荷载及惯性动力等动态因素。吊车作业一般在比较稳定的环境（如室内或低风速条件），忽略风荷载及惯性动力等动态因素，降低计算的复杂程度。而且，静态分析结果可以作为动态分析基准值。

2.2 参数定义

2.2.1 荷载参数

包括吊车自重 W （含配重）、吊物总重 P （含吊具），是计算支腿荷载的核心参数；吊车支腿荷载 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ，方向竖直向上，是验算地基承载力和吊车稳定性的关键参数。

2.2.2 吊臂参数

吊臂伸出长度 L ，是指吊物通过钢丝绳悬吊在吊臂上作用点至回转中心之间的吊臂长度。

吊臂在水平面投影与 X 轴夹角 α ，吊臂仰角（与水平面夹角） β ，这两个参数直接影响荷载在支腿上的分配。

2.2.3 支腿坐标（以回转中心为坐标原点）

前支腿 X 坐标： $x=a$ ；后支腿 X 坐标： $x=-c$ ；左右支腿 y 坐标： $y=\pm b$ 。

3 荷载分配与静力学平衡方程

3.1 吊物作用力位置

为详细分析吊物 P 对各坐标轴的力矩，需计算其在坐标系中的位置。设吊臂伸出长度 L ，仰角为 β ，则其水平投影长度为 $L\cos\beta$ ；吊物水平投影与 X 轴夹角为 α ，故其在 $x-y$ 平面的投影坐标为 $X_p=L\cos\beta\cos\alpha$ 、 $y_p=L\cos\beta\sin\alpha$ 。据此可依据 $\sum F=0$ 与 $\sum M=0$ 建立力学平衡方程。

3.2 垂直力平衡

吊车四个支腿反力之和，与吊车自重和吊物重之和。

$$\text{即由: } \sum F_z=0, \text{ 得到: } F_1+F_2+F_3+F_4=W+P \quad (1)$$

3.3 绕坐标轴的力矩平衡

吊物 P 的重量会产生绕 x 轴 y 轴的力矩，这个力矩与四个支腿绕 x 轴 y 轴力矩形成平衡。吊物绕 x 轴的力矩由 P 的 y 坐标分量引起，即 $Py=PL\cos\beta\sin\alpha$ ；同样，吊物绕 y 轴的力矩由 P 的 x 坐标分量引起，即 $Px=PL\cos\beta\cos\alpha$ 。考虑到力矩方向，可以得到以下方程：

3.3.1 绕 x 轴力矩平衡

$$\text{吊物力矩: } MP_x=Py_p=-PL\cos\beta\sin\alpha$$

$$\text{支腿力矩: } MF_x=b(F_1-F_2+F_3-F_4)$$

$$\text{由: } MF_x+MP_x=0, \text{ 得:}$$

$$b(F_1-F_2+F_3-F_4)=PL\cos\beta\sin\alpha \quad (2)$$

3.3.2 绕 y 轴力矩平衡

$$\text{吊物力矩: } MP_y=Px_p=PL\cos\beta\cos\alpha$$

$$\text{支腿力矩: } MF_y=a(F_1+F_2)-c(F_3+F_4)$$

$$\text{由: } MF_y+MP_y=0, \text{ 得:}$$

$$a(F_1+F_2)-c(F_3+F_4)=PL\cos\beta\cos\alpha \quad (3)$$

4 支腿反力计算公式的推导

考虑到对称性以及汽车结构为刚体的假设，每个支腿的反力由两部分组成：一部分来自吊车和吊物重力的分配，另一部分来自力矩的分配。而且，支腿的反力与其到坐标轴的距离成比例。联立方程 (1) (2) (3)，定义中间变量：

$$\text{令: } S_x=F_1+F_2; T_x=F_3+F_4;$$

$$\text{由 (1) : } S_x+T_x=W+P \quad (1') \quad \text{由 (3) : } aS_x-cT_x=PL\cos\beta\cos\alpha.$$

联立解得：

$$S_x=F_1+F_2=\frac{c\times(W+P)+P\times L\times\cos\alpha\times\cos\beta}{a+c}$$

$$T_x=F_3+F_4=\frac{a\times(W+P)-P\times L\times\cos\alpha\times\cos\beta}{a+c}$$

$$\text{令: } D_y=(F_1+F_3)-(F_2+F_4); \text{ 联立 (2) 解得:}$$

$$D_y=\frac{P\times L\times\cos\beta\times\sin\alpha}{b}$$

又考虑到因为支腿左右横向距离相等，所以两侧的力矩分配相同 ($F_1-F_2=F_3-F_4$)。最终解得：

$$F_1=\frac{c\times(W+p)+P\times L\times\cos\beta\times\cos\alpha}{2\times(a+c)}+\frac{p\times L\times\cos\beta\times\sin\alpha}{4\times b}$$

$$F_2=\frac{c\times(W+p)+P\times L\times\cos\beta\times\cos\alpha}{2\times(a+c)}-\frac{p\times L\times\cos\beta\times\sin\alpha}{4\times b}$$

$$F_3=\frac{a\times(W+p)-P\times L\times\cos\beta\times\cos\alpha}{2\times(a+c)}+\frac{p\times L\times\cos\beta\times\sin\alpha}{4\times b}$$

$$F_4=\frac{a\times(W+p)-P\times L\times\cos\beta\times\cos\alpha}{2\times(a+c)}-\frac{p\times L\times\cos\beta\times\sin\alpha}{4\times b}$$

W-- 汽车吊自重, kN;

P-- 吊物重量, kN;

a-- 支腿至 y 轴垂直距离, 单位: m;

b-- 支腿至 x 轴垂直距离, 单位: m;

α -- 吊臂水平投影与吊车轴线夹角, 单位: ° ;

β -- 吊臂仰角, 单位: ° ;

F₁、F₂、F₃、F₄-- 各支腿荷载, kN。

现在需要验证上面方程的正确性。

竖向力: F₁+F₂+F₃+F₄=W+P, 因此竖向力满足力的平衡方程。

绕 X 轴 力 矩: $\sum F_i Y_i = F_1 b - F_2 b + F_3 b - F_4 b = PLCOS \beta SIN \alpha$, 符合吊物绕 x 轴的力矩平衡。

绕 y 轴力矩: $\sum F_i X_i = F_1 a + F_2 a - F_3 c - F_4 c = PLCOS \beta COS \alpha$, 符合吊物绕 y 轴的力矩平衡。

说明以上吊车支腿荷载反力的计算公式是正确的。

5 参数影响分析

5.1 吊臂方位影响

$\alpha=0^\circ$, 正前方作业, 前后反力差最大:

$$\Delta F_{\text{前后}} = \frac{P \times L \times COS \beta}{a + c}$$

$\alpha=90^\circ$, 侧方作业, 左右反力差最大:

$$\Delta F_{\text{左右}} = \frac{P * L * COS \beta}{2 \times b}$$

5.2 安全边界条件

支腿不离地, 即 $\min(F_1, F_2, F_3, F_4) > 0$;

地面承载力 $F_{\text{地基}} > \max(F_1, F_2, F_3, F_4)$;

临界工况发生在 $\alpha = \tan^{-1}(\frac{2b}{a+c})$ 时, 此时支腿反力达到最大值。

6 工程应用

某 50t 汽车吊, 参数 (W=40.4t, a=3.17m, c=2.75m, b=3.95m), 吊物重量 15t, 吊臂长度 15.0m, 吊臂仰角

$\beta=53.13^\circ$, 地面为 20cm 厚 C20 混凝土, 支腿垫板尺寸为 1.1m × 1.1m。各支腿在不同工况时的反力如下:

吊臂方位 α	F ₁ (t)	F ₂ (t)	F ₃ (t)	F ₄ (t)
0°	22.75	22.75	4.95	4.95
45°	25.09	14.62	13.08	2.61
90°	20.27	5.46	22.24	7.43

当 $\alpha = \tan^{-1}(2*3.95 / (3.17+2.75)) = 53.15^\circ$ 时, 支腿反力达到最大值, $F_{\text{max}} = F_3 = 26.68t$, 同时出现最小值 $F_{\text{min}} = F_2 = 1.02t$ 。

地基承载力按最大支腿反力验算, 混凝土内应力按 45° 角扩散, 则地基荷载:

$\sigma = 266.8kN / ((1.1+0.4) * (1.1+0.4)) = 118.6kPa$, 只要地基承载力大于 120kPa 均可满足吊装要求。

此结果与实际监测结果基本相符, 说明计算方法有效。

7 结语

建立的支腿反力解析模型精确表征了吊物重量、吊臂位姿与支腿布局的耦合关系, 为吊装设备选择、吊车稳定性验算、地基承载力验算提供理论依据; 最大支腿反力发生在吊臂垂直于支腿对角线方向, 作业时应避开这一工况; 建议作业时优先选择 $\alpha=0^\circ$ 或 180° 方位; 通过调整 β 可优化载荷分布: 增大仰角 β 能显著降低支腿反力极值; 公式可为汽车吊稳定性验算、支腿地基加固方案制定提供理论依据。

参考文献

- 董文俊, 殷克锋, 白贺昶, 等. 一种确定汽车吊支腿荷载大小的计算方法 [J]. 建筑工程技术与设计, 2019(27):4665.
- 郑齐征, 郑士金. 汽车吊支腿反力及楼面等效均布活荷载的计算方法 [J]. 中国标准化, 2019(16):21-22.
- [3] 何文滔. 汽车吊与平板车同时上楼板作业分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(7):57-59.
- [4] 檀俊成, 张荣. 旧桥拆除汽车吊作用结构计算分析与建议 [J]. 山西建筑, 2018, 44(27):162-164.
- [5] 邓德员, 黄敏, 吴有明. 220t 汽车吊上混凝土桥面施工作业计算分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2017(10):94-96, 101.