

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.03.007

基于 ADAMS 的折臂式高空作业车 展开作业稳定性分析*

王昭君¹, 何雪泓^{1*}, 周振东², 谢里阳¹

(1. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 江苏东迈重工机械有限公司, 江苏 昆山 215334)

摘要:针对折臂式高空作业车臂架结构展开过程中的稳定性问题,利用 ADAMS 软件建立了整车结构的动力学模型,对臂架结构由极限回缩状态至极限伸展状态的全行程动作进行了仿真,并导入了质心轨迹求解程序,得到了在不同展开方式与作业顺序下的整机质心横向偏离曲线;结合重力法,分析了臂架结构在顺序展开和同步展开方式下的稳定性;同时通过对比质心横向偏距的大小,研究了不同的作业顺序对展开作业稳定性的影响。研究表明:该作业车具有良好的展开作业稳定性,且在顺序展开基础上,通过自下而上、先变幅后伸缩的作业顺序可以进一步提高展开过程中的稳定性;上述方法可推广到其他折臂式高空作业车展开作业稳定性的分析中。

关键词:折臂式高空作业车;展开作业稳定性;展开方式;质心轨迹;ADAMS

中图分类号:TH211.6;TH137.51

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)03-0259-06

Stability analysis on unfolding process of articulating boom lifting vehicle based on ADAMS

WANG Zhao-jun¹, HE Xue-hong¹, ZHOU Zhen-dong², XIE Li-yang¹

(1. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System of Ministry
of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Jiangsu Eastman Heavy Machinery Co., Ltd., Kunshan 215334, China)

Abstract: Aiming at the stability problem during the unfolding process of the articulating boom lifting vehicle, dynamic models of the vehicle were made by software ADAMS, and the full-stroke action from the folded state to the extreme extension state was simulated. The centroid trajectory solving program was imported to obtain the lateral offset curves of the centroid of the whole machine under different expansion modes and operation sequences. Combined with the gravity method, the stability of the boom structure under the sequential expansion and synchronous expansion was analyzed. The influence of different operation sequences on the stability of the unfolding process was considered by comparing the lateral offset of the centroid. The results indicate that the lifting vehicle has good stability, and the sequential expansion from bottom to top, first-unfolding to post-extension can further improve the stability during the unfolding process. The above method can be applied to the analysis of the stability of other articulating boom lifting vehicles.

Key words: articulating boom lifting vehicle; unfolding stability; expansion modes; centroid trajectory; ADAMS

收稿日期:2019-06-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(U1708255)

作者简介:王昭君(1994-),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事高空作业平台稳定性分析方面的研究。E-mail:1466379761@qq.com

通信联系人:何雪泓,女,博士,副教授。E-mail:xhhe@me.neu.edu.cn

0 引 言

稳定性是高空作业车辆的一个基本安全性能指标^[1]。在工程实际中,因高空作业车展开过程中,发生失稳而引发的倾翻事故不仅会损坏作业车本身,也会危及工作人员的生命安全。对于折臂式高空作业车,将工作平台伸展至指定作业位置的过程中,整机的质心位置不断变化。质心在水平面的投影落入稳定区域外侧时,作业车就有发生倾覆的危险。因此,对高空作业车的展开作业稳定性进行校核至关重要。同时,在操作过程中,选取更加安全稳定的展开方式与作业顺序,也可以减小倾翻事故发生的可能性。

对高空作业车稳定性的研究已经取得很多有价值的研究成果,主要涉及作业车的整机抗倾覆稳定性、动态稳定性、结构稳定性等方面的研究。

对于静态下的抗倾覆稳定性的研究:高旭宏等^[2]通过各轮胎承载的载荷特性曲线,计算出了整车的稳定性安全系数;S Palani 等^[3]基于力分析和重心分析方法,对自行式作业车在极限位置的稳定性进行了研究。

对于动态稳定性的研究:王君文^[4]利用理论公式,计算出了极限位置下的路缘石动态稳定性安全系数;夏林焱^[5]基于仿真得到了臂架结构的动态特性曲线,并分析了臂架的平稳性是否满足要求。

对于局部稳定性的分析:张珂等^[6]在有限元分析软件 ANSYS 中,创建了起升机构的参数化模型,并对其进行了线性和非线性屈曲分析,证明了起升机构在工作状态下不会出现失稳现象。

对于影响高空作业车稳定性因素的研究:王富亮等^[7]分析了转台的安装位置、支腿的横向跨距与作业臂的质量等参数对稳定性的影响;周根兵和崔金一^[8]通过编程得到了不同的组合状态与任意的作业臂变幅角度下,高空作业平台稳定性安全系数;王翠英等^[9]对工况变化时影响稳定性的负载和力的力矩变化进行了分析,得到了所受负载和力对稳定性的影响因子,该研究对高空作业平台的稳定性设计及应用工况起到了很好的指导作用。

以上关于起升机构稳定性的研究中,有关臂架结构伸展过程中的失稳判据与研究方法较少。基于此,本文以重力法作为研究的基本方法,利用 ADAMS 软件建立整车的动力学模型,对臂架结构由极限回缩状态至极限伸展状态的全行程动作进行仿真;同时分析不同展开方式及作业顺序对稳定性的影响。

1 高空作业车展开仿真过程的实现

折臂式高空作业车主要由折叠臂变幅机构、伸缩臂变幅机构、小臂伸长机构、飞臂变幅机构和调平机构等机构组成。本研究采用 SolidWorks 软件建立整车的装配体三维模型。

1.1 作业车结构模型及工作过程

A45 折臂式高空作业车结构模型如图 1 所示。

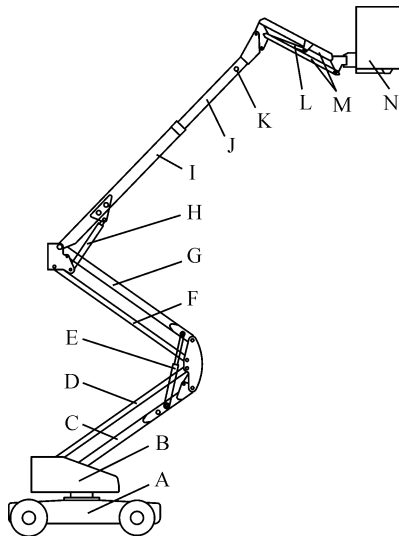


图 1 A45 折臂式高空作业车结构模型

A - 底盘;B - 转台;C - 下臂;D - 下拉杆;E - 折叠臂变幅油缸;F - 上拉杆;G - 上臂;H - 伸缩臂变幅油缸;I - 伸缩臂;J - 小臂;K - 小臂伸长油缸;L - 飞臂变幅油缸;M - 飞臂;N - 工作平台

折臂式高空作业车的工作过程如下:

(1) 折叠臂变幅油缸 E 带动下拉杆 D、下臂 C、上臂 G 和上拉杆 F 同步运动,实现对臂架整体的升降功能;(2) 伸缩臂变幅油缸 H 实现对伸缩臂 I 的升降功能;(3) 小臂伸长油缸 K 实现对小臂 J 的伸缩功能;(4) 飞臂变幅油缸 L 实现对飞臂 M 的翻转功能,及工作平台 N 的升降功能。

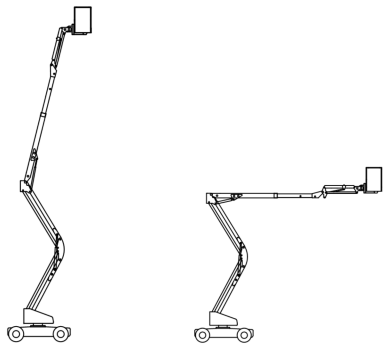
本研究将整车的三维模型以 Parasolid 格式导入至 ADAMS 中,并在 ADMAS 中对模型的零件进行合并等操作,以减少计算量;随后在各个构件之间添加约束,限制相对运动;经虚拟样机模型检验得知,系统没有冗余约束,证明模型定义基本正确。最后对折叠臂变幅油缸 E、伸缩臂变幅油缸 H、小臂伸长油缸 K 和飞臂变幅油缸 L 这 4 处液压油缸进行驱动定义,驱动函数为 STEP 函数,运行时间为 120 s。

1.2 仿真工况及展开方式

为了体现展开过程中整机质心可能出现的极限空

间位置,仿真中主要考察两种极限作业工况:最大高度作业工况和最大水平延展作业工况。最大高度作业工况指工作平台伸展至最高极限位置,最大水平延展作业工况指工作平台伸展至最远极限位置。

两种极限作业工况如图2所示。



(a) 最大作业高度工况 (b) 最大水平延展作业工况

图2 两种极限作业工况

不同的展开方式对展开作业稳定性的影响不同,本次仿真针对上述两种工况选用工程实际中常用的两种展开方式进行校核,分别是同步展开和顺序展开。同步展开表示各个作业臂之间同时进行动作,顺序展开则表示各个作业臂之间依次进行动作。

2 高空作业车展开作业稳定性分析

2.1 质心轨迹求解程序

依照重力法原则^[10],从前支点到后倾翻线距离的80%为稳定区域,高空作业车的重心在水平面上的投影位置应不超过该稳定区域,即高空作业车在展开过程中,整机的质心轨迹在水平面上的投影始终落入稳定区域内,则展开作业稳定性满足要求。

对于本文选取的A45折臂式高空作业车,已知前后轴倾翻线之间的距离 l 为2 000 mm,在倾覆线中心点位置建立坐标系,倾覆线以内80%区域为稳定区域。

折臂式高空作业车倾覆线内稳定区域如图3所示。

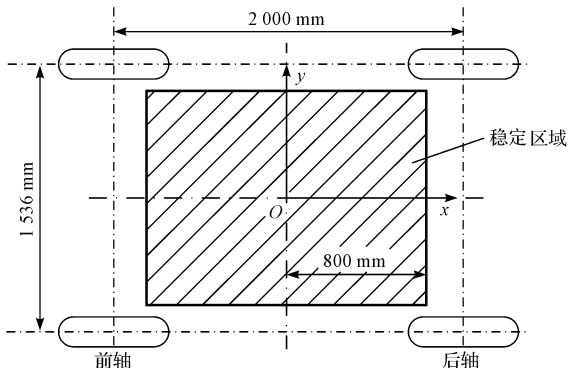


图3 折臂式高空作业车倾覆线内稳定区域

在臂架结构展开过程中,若要保证整机的稳定性,整机质心的横向偏距最大值 x_{max} 不得大于稳定区域的界限值,即:

$$x_{max} \leq \left| \pm \frac{l}{2} \times 80\% \right| = 800 \text{ mm} \quad (1)$$

已知在ADAMS/VIEW的后处理中,仅能得到各个组成部件仿真后的质心坐标,但判定展开作业稳定性所需要的整机质心坐标并不能直接得到。因此,此处引入系统质心的求解公式。

质点系质心 C 在直角坐标系 $Oxyz$ 中的坐标可以表示为:

$$x_c = \frac{\sum x_i \cdot m_i}{M} \quad (2)$$

式中: M —质点系的总质量; m_i —质点系中质点的质量; x_i —质点 m_i 相对于直角坐标系 $Oxyz$ 的坐标。

基于质心求解原理,即式(2),编写质心轨迹求解程序,该程序可以计算并记录折臂式高空作业车展开过程中,整机质心坐标值的变化过程。

具体步骤为:首先建立系统状态变量和坐标设计变量,然后通过for循环对模型中的部件进行遍历,查找获取模型部件的总质量和质心 x 方向的坐标值,最后将该程序保存为后缀名为.cmd的文本文件^[11]。

实现仿真后,导入并运行质心轨迹求解程序,在后处理中导出整机的质心坐标,以此分析并确定臂架结构展开过程中,是否会发生倾覆^[12]。

2.2 最大高度作业工况及其稳定性分析

本研究对高空作业车臂架结构伸展至最高极限位置的过程进行仿真,展开方式分别为同步展开与顺序展开。导入质心轨迹求解程序,得到整机的质心坐标值,并在Matlab中进行质心横向偏离曲线的绘制。

伸展至最高极限位置过程中质心横向偏离轨迹如图4所示。

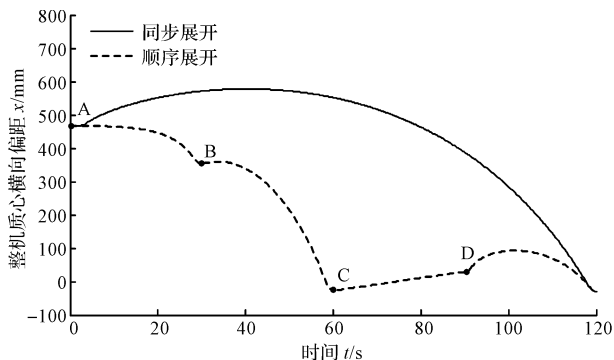


图4 伸展至最高极限位置过程中质心横向偏离轨迹

图4中,点A、B、C、D分别表示以顺序动作伸展至最

高极限位置的过程中,折叠臂变幅油缸、伸缩臂变幅油缸、小臂伸长油缸和飞臂变幅油缸依次开始作用的时间。

由图 4 可知,在工作平台伸展至最高极限位置的过程中,展开方式为同步展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 1}$ 为 578.22 mm;展开方式为顺序展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 2}$ 为 468.16 mm。且有: $x_{\max 1} < 800$ mm; $x_{\max 2} < 800$ mm。

由此说明,高空作业车在以上述两种展开方式伸展至最高极限位置的过程中,质心在水平面上的投影始终落入稳定区域,即高空作业车没有发生倾覆的危险,整车具有良好的展开作业稳定性。

2.3 最大水平延展作业工况及其稳定性分析

本研究对高空作业车臂架结构伸展至最远极限位置的过程进行仿真,展开方式分别为同步展开与顺序展开。

伸展至最远极限位置过程中质心横向偏离曲线如图 5 所示。

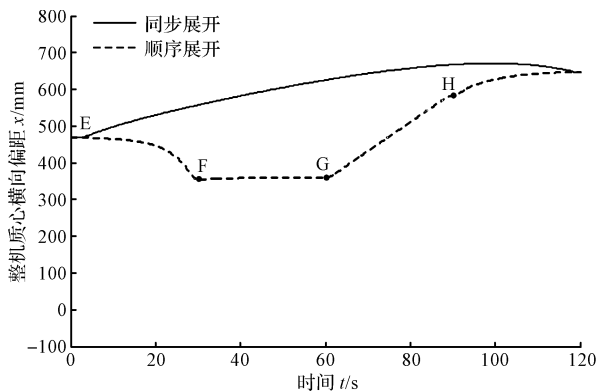


图 5 伸展至最远极限位置过程中质心横向偏离曲线

图 5 中,点 E、F、G、H 分别表示以顺序展开方式伸展至最远极限位置的过程中,折叠臂变幅油缸、伸缩臂变幅油缸、小臂伸长油缸和飞臂变幅油缸依次开始作用的时间点。

由图 5 可知,工作平台伸展至最远极限位置的过程中,展开方式为同步展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 3}$ 为 670.83 mm;展开方式为顺序展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 4}$ 为 645.51 mm。且有: $x_{\max 3} < 800$ mm; $x_{\max 4} < 800$ mm。

由此说明,高空作业车在以顺序展开和同步展开方式伸展至最远极限位置的过程中,质心在水平面上的投影始终落入稳定区域,整车没有发生倾覆的危险,也具有较好的展开作业稳定性。

2.4 两种不同展开方式的对比

在 2.2 和 2.3 节中已经证明了在顺序展开与同步展开方式下,臂架结构伸展至极限位置过程中的稳定

性满足作业要求,现分别以顺序和同步展开方式将工作平台伸展至最高和最远极限位置,以对比这两种展开方式下的质心横向偏离曲线。

顺序及同步展开至极限位置过程中质心横向偏离曲线如图 6 所示。

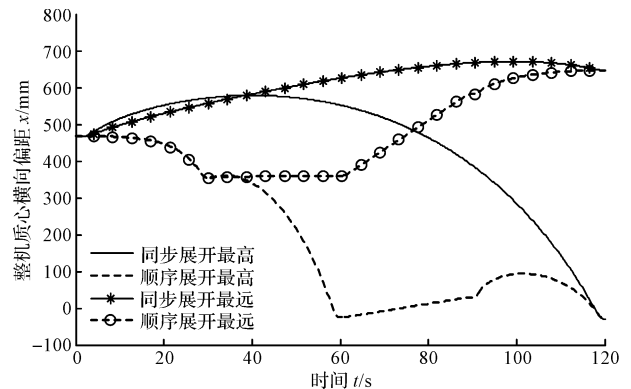


图 6 顺序及同步展开至极限位置过程中质心横向偏离曲线

由图 6 可以看出,顺序展开方式下的质心横向偏移距离相对小于同步展开方式下的偏移距离;同时在顺序展开过程中,整机质心处在横向危险位置的时间比同步展开要少。

综上所述,相比于同步展开,以顺序展开的方式操作高空作业车会更安全,稳定性也更高。因此,在工程实际操作条件允许的前提下,工作人员应尽量避免同步展开作业方式,应选择以顺序展开的作业方式将作业平台伸展至工作位置。

3 基于作业顺序的稳定性分析

为了进一步提高高空作业车臂架展开过程中的安全性及稳定性,本节在顺序展开的基础上,探讨可以使展开过程更稳定的作业顺序。笔者选取两种情况进行研究分析:(1)自上而下与自下而上展开作业顺序,(2)先伸长后变幅与先变幅后伸长展开作业顺序。选取的工况为最大高度作业工况,限于篇幅原因,对仿真过程不再详述。

3.1 自上而下与自下而上展开作业顺序

笔者在高空作业车臂架结构伸展至最高极限位置的过程中,分别以自上而下和自下而上的展开作业顺序进行运动学仿真,后处理得到整机质心的横向偏离曲线。

自上而下与自下而上作业顺序下质心横向偏离曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,高空作业车臂架结构以自上而下的顺序展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 5}$ 为 628.85 mm;臂架结构以自下而上的顺序展开时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 6}$ 为 468.16 mm。且有:

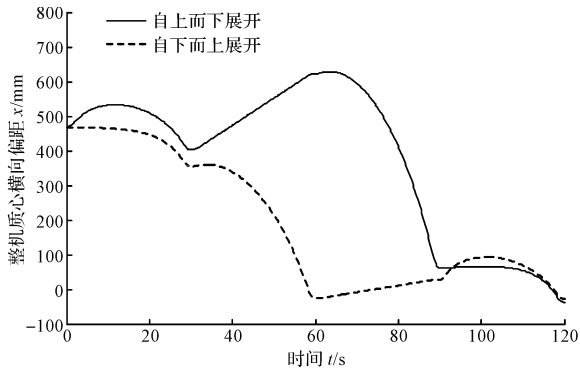


图7 自上而下与自下而上作业顺序下质心横向偏离曲线

$$x_{\max 5} < 800 \text{ mm}; x_{\max 6} < 800 \text{ mm}。$$

由此说明,高空作业车在以自上而下和自下而上的展开作业顺序伸展至最高极限位置的过程中,没有发生倾覆的危险,展开作业稳定性得以保证。

同时可以看出,相比于自上而下的展开作业顺序,自下而上展开作业过程中的质心横向偏移距离相对更小,且其处于横向危险位置的时间也较短,所以自下而上展开作业顺序更趋向于稳定。

综上所述,在工程实际中,自下而上展开作业顺序较安全,稳定性也更高。

3.2 先伸长后变幅与先变幅后伸长展开作业顺序

本研究通过调整驱动函数,在高空作业车臂架结构顺序伸展至最高极限位置的过程中,分别以先伸长后变幅和先变幅后伸长的作业顺序进行运动学仿真,绘制整机质心的横向偏离曲线。

先伸长后变幅与先变幅后伸长作业顺序下质心横向偏离曲线如图8所示。

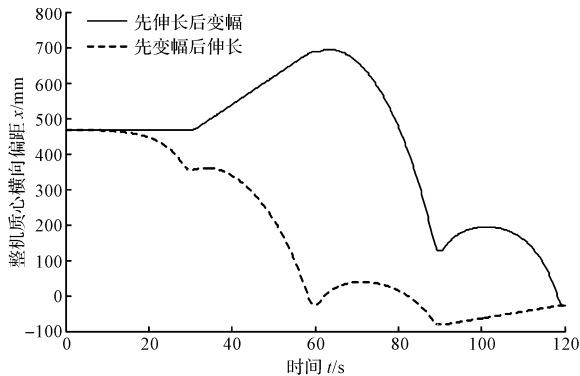


图8 先伸长后变幅与先变幅后伸长作业顺序下质心横向偏离曲线

由图8可知,臂架结构先变幅后伸长时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 7}$ 为 468.16 mm;臂架结构先伸长后变幅时,整机质心横向偏距最大值 $x_{\max 8}$ 为 693.90 mm。且有: $x_{\max 7} < 800 \text{ mm}; x_{\max 8} < 800 \text{ mm}$ 。

由此说明,高空作业车在以先伸长后变幅和先变幅后伸长的作业顺序伸展至最高极限位置的过程中,没有发生倾覆的危险,展开作业稳定性得以保证。

同时可以看出,相比于先伸长后变幅的展开作业顺序,先变幅后伸长展开作业过程中的质心横向偏移距离更小,且其处于横向危险位置的时间也较短,所以先变幅后伸长展开作业顺序更趋向于稳定。

综上所述,在工程实际中,先变幅后伸长的展开作业顺序较安全,稳定性也更高。

4 结束语

针对当前对于臂架结构伸展过程中的失稳判据与研究方法较少的现状,本文结合 ADAMS 软件,一方面提出了一种通过仿真与重力法相结合的方法,对作业臂的展开作业稳定性进行了分析,另一方面对比了不同的展开方式及作业顺序对稳定性的影响,有助于在工程实际操作中选取更加安全的执行方式。研究结论如下:

(1) A45 折臂式高空作业车在以顺序和同步动作伸展到最高和最远极限位置的过程中,整机质心的横向偏距均小于 800 mm,没有发生倾覆的危险,整车具有良好的展开作业稳定性。

(2) 臂架结构伸展至极限位置的过程中,相比于同步展开,顺序展开方式具有更高的稳定性。

(3) 以顺序展开方式伸展至最高极限位置的过程中,各作业臂以自上而下、先变幅后伸长的顺序动作时,整机具有更高的稳定性。

参考文献 (References):

- [1] 宋树军,李培启.论高空车稳定性校核方法[J].专用汽车,2010(2):55-57.
- [2] 高旭宏,徐向阳,王书翰,等.自行式高空作业平台的动态稳定性分析[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48(10):2836-2842.

(下转第 276 页)

本文引用格式:

王昭君,何雪滋,周振东,等.基于 ADAMS 的折臂式高空作业车展开作业稳定性分析[J].机电工程,2020,37(3):259-263,276.

WANG Zhao-jun, HE Xue-hong, ZHOU Zhen-dong, et al. Stability analysis on unfolding process of articulating boom lifting vehicle based on ADAMS[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(3):259-263,276.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- 四点接触球轴承的接触分析[J]. 制造技术与机床, 2011(2):139-141.
- [10] 高大华,刘玉霞. 基于赫兹理论的推力球轴承设计与计算[J]. 现代制造技术与装备,2017(3):43-44.
- [11] 张 睿. 几类典型弹性半空间接触问题的积分变换基本解及数值方法研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院, 2016.
- [12] 李峪岚. 球与内锥面接触时的局部应力计算[J]. 甘肃工业大学学报,1993,19(2):61-64.
- [13] 罗继伟,罗天宇. 滚动轴承分析计算与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [14] 付秋菊. 贫油润滑下深沟球轴承的摩擦磨损研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2014.
- [15] 周益乐. 多工况下角接触球轴承力学响应分析[D]. 大连:大连理工大学运载工程与力学学部,2016.
- [16] 梁 群. 角接触球轴承的热特性分析[D]. 青岛:青岛理工大学机械工程学院,2015.
- [17] 艾思源. 滚动轴承温度分布及润滑性能研究[D]. 北京:北京理工大学机械与车辆学院,2015.
- [18] 陈英俊. 弹性流体动力脂润滑机理与实验研究[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2014.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

刘文福. 圆锥滚子轴承挡边倾角的优化研究[J]. 机电工程,2020,37(3):271-276.

LIU Wen-fu. Optimization of rib angle of tapered roller bearings[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(3):271-276.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 263 页)

- [3] PALANI S, SHANMUGAN S, SELVAM M, et al. Stability analysis of self-propelled aerial man lift vehicles[J]. **International Journal of Vehicle Structures and Systems**, 2017,9(5):276-279.
- [4] 王君文. 基于高空作业车运动范围安全性的研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2015.
- [5] 夏林焱. 高空作业车臂架优化设计及多体动力学分析[D]. 长沙:中南林业科技大学材料科学与工程学院, 2018.
- [6] 张 珂,黄小征,陈建平,等. 自行式高空作业平台结构稳定性分析[J]. 中国工程机械学报,2013,11(1):11-15.
- [7] 王富亮,熊静琪,刘亚超,等. 折叠式高空作业车的稳定性分析[J]. 工程机械,2011,42(3):23-28,7.
- [8] 周根兵,崔金一. 基于 MATLAB 的高空作业平台稳定性计算[J]. 农业装备与车辆工程,2012,50(6):28-30,41.
- [9] 王翠英,许东京,郭 兵. 高空作业平台抗倾覆稳定性研究与分析[J]. 建筑机械化,2016,37(3):21-25.
- [10] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 9465—2018. 高空作业车[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [11] MSC 软件公司. MSC 产品实用技术技巧[M]. 北京:北京水利水电出版社,2004.
- [12] 李淑慧,杨一明. 桁架式桥梁检测车仿真设计与应用研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(3):75-78.

[编辑:李 辉]