

高空作业平台四杆变幅机构动力学特性与操控性研究

徐运海 楚斯铭 何霖鹏

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410000

[摘要] 高空作业平台臂架变幅动作的平顺性直接影响高空作业平台操控性。文中以直臂式高空作业平台四杆变幅机构为研究对象, 通过动力学分析, 比较不同四杆变幅机构对平台操控性的影响。结果表明: 平行四杆变幅机构的臂头速度和加速度整体平缓, 符合高空作业“低快高慢”的安全原则, 平台操控性更佳。

[关键词] 高空作业平台; 变幅机构; 动力学分析

DOI: 10.33142/ec.v6i11.9896

中图分类号: TH213

文献标识码: A

Research on the Dynamic Characteristics and Handling of the Four Bar Luffing Mechanism of High Altitude Work Platform

XU Yunhai, CHU Siming, HE Jipeng

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: The smoothness of the boom luffing action of the high-altitude work platform directly affects the maneuverability of the high-altitude work platform. The article takes the four bar luffing mechanism of a straight arm high-altitude work platform as the research object, and compares the influence of different four bar luffing mechanisms on the platform's maneuverability through dynamic analysis. The results show that the arm head speed and acceleration of the parallel four bar luffing mechanism are generally gentle, in line with the safety principle of "low fast, high slow" high-altitude operation, and the platform has better maneuverability.

Keywords: high altitude work platform; luffing mechanism; kinetic analysis

引言

直臂式高空作业平台是建筑、消防等行业作业过程中常用的机械设备, 随着行业的不断发展, 高空作业从业者在满足安全作业的前提下, 对高空作业平台作业操控的舒适要求也越来越高。直臂式高空作业平台的变幅结构是连接臂架与转台、驱动臂架角度变化来完成高空作业平台升高动作的工作执行机构, 臂架变幅动作的平顺性直接影响高空作业平台操控性, 其机构的运动学特性直接决定高空作业平台操作的舒适性和平顺性。本文以四杆变幅机构为研究对象, 阐述变幅机构操控性研究的方法: 四杆变幅机构骨架模型分析、四杆变幅机构载荷分析、四杆变幅机构运动仿真分析。同时以市场常见的非平行四杆变幅机、平行四杆变幅机为实例分析, 验证方法的实用性。

1 高空作业平台发展现状

高空作业平台是运送工作人员和施工设备到达指定高度进行特种作业的高空作业机械, 其广泛应用于船舶制造、市政工程、建筑装饰、港口货运等行业, 具有结构紧凑、机动灵活、转移迅速、安全可靠等特点, 适用于工作地点不确定的多点面作业, 适应能力强, 可极大降低工作人员劳动强度、显著提高工作效率, 具有广阔的发展前景, 2019年至今, 在其他工程机械每年负增长的情况下, 唯有高空作业机械一枝独秀, 连续4年保持30%的增长速度, 行业规模上千亿元, 截止2023年6月, 仅JLG在手订单44亿美元, Genie在手订单27亿美元, 折合人民币500亿。

2 变幅机构的作用及功用

臂式高空作业平台是高空作业机械中最常用的一种, 它能悬伸作业, 跨越一定高度的障碍, 具有作业高度高, 作业幅度广, 可在任意作业高度自由行驶, 显著提高了工作效率, 为满足上述要求, 高空作业平台要经常改变作业幅度。变幅机构则是实现幅度变化的工作机构, 用来扩大高空作业平台工作范围, 提高其工作效率。

按照臂架和驱动装置间传动件结构形式不同, 变幅机构可分为挠性传动和刚性传动两类。挠性传动变幅机构臂架和驱动装置间采用钢丝绳滑轮组或拉板传动, 如履带起重机和动臂塔式起重机变幅机构, 其优点是构造简单, 臂架位置可放至很低, 拆装方便, 缺点是臂架容易晃动且有倾覆的危险。刚性传动变幅机构臂架和驱动装置间采用刚性件传动, 增强了臂架倾覆稳定性, 变幅过程平稳。由于臂式高空作业平台是运送工作人员至高空进行作业的设备, 臂架晃动及冲击严重影响高空作业人员的安全性和舒适性, 因而臂式高空作业普遍采用刚性传动变幅机构。

3 变幅机构结构形式对比分析

臂式高空作业平台刚性传动变幅机构分三铰点和四连杆式。三铰点变幅机构形式简单, 仅有三个铰点, 铰点位置易于布置, 便于提供较大变幅力, 在30米以上的大高度高空作业平台主臂变幅中的应用具有不可替代的地位, 但该变幅机构结构不紧凑, 未得到合理的变幅力, 臂架上的铰点需尽量往臂头方向布置, 铰点位置尽量靠近

臂尾,使变幅油缸行程和主臂长度增大,整车长度方向上尺寸较大。四连杆变幅机构是一根液压油缸与连杆相结合的多连杆变幅机构,在保证整机作业高度前提下,缩短了主臂长度和变幅油缸行程,增大了作业幅度,增强了整机后倾稳定性,并提高了设备作业灵活性,在30米级以下的高空作业平台主臂变幅中广泛应用。由于三铰点变幅结构简单,本文仅对铰点数目多、结构复杂的非平行和平行四杆变幅机构进行动力学分析,为低米段高空作业平台变幅机构提供参考和借鉴。

4 四杆变幅机构骨架模型分析

四杆变幅机构骨架模型简图1所示:

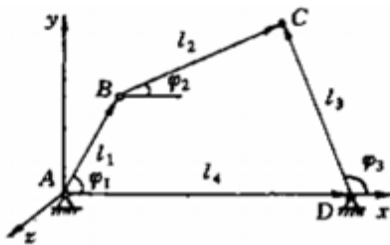


图1 四杆机构骨架模型简图

为了对结构进行分析,先建立坐标系,并将各构件表示为杆矢量。结构封闭矢量方程式的复数矢量形式为:

$$l_1 i^{\varphi_1} + l_2 i^{\varphi_2} = l_3 i^{\varphi_3} + l_4 \quad (1)$$

应用欧拉公司 $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$ 将(1)的实部、虚部分离,得:

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\varphi_2 &= l_4 + l_3 \cos\varphi_3 \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\varphi_2 &= l_3 \sin\varphi_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由此方程组(2)可求得两个未知方向角 φ_2, φ_3 ;

当要求解 φ_3 时,应将 φ_2 消去可得:

$$l_2^2 = l_3^2 + l_4^2 + l_1^2 - 2l_1 l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) - 2l_1 l_4 \cos\varphi_1 \quad (3)$$

解得: $\tan(\frac{\varphi_3}{2}) = (B + \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}) / (A - C)$

$$\varphi_2 = a \tan \frac{B + l_3 \sin\varphi_3}{A + l_3 \cos\varphi_3} \quad (4)$$

其中: $A = l_4 - l_1 \cos\varphi_1$; $B = -l_1 \sin\varphi_1$;

$$C = \frac{A^2 + B^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3}$$

5 四杆变幅机构载荷分析

高空作业平台的产品认证机构不同,用于结构计算的载荷和载荷组合所依据的规范不同。在产品阶段,宜依据 EN 280 要求确定载荷和载荷组合。如无特殊说明,载荷和载荷组合均以 EN 280 5.2 要求进行说明。

(1) 额定载荷 M 如公式(5)所示:

$$M = (n \times M_p) + M_e \quad (5)$$

其中: n: 工作平台上操作人员人数;

M_p : 工作平台上单个操作人员质量,取 80kg;

M_e : 工作平台上工具及材料的总质量,取 40kg。

(2) 结构载荷 M_j 。结构载荷为静态结构载荷与动态结构载荷之和,静态结构载荷是伸缩臂式高空作业平台未运动构件的总重量,动态结构载荷是伸缩臂式高空作业平台运动构件的总重量。

(3) 风力载荷 M_f : 伸缩臂式高空作业平台表面需要最大承受 $100N/m^2$ 的风压,约相当于表面承受六级风力。

(4) 手动操作力 M_s : 由于伸缩臂式高空作业平台设计为多人操作,手动操作力取 400N,该力所作用的高度距工作平台底平面为 1.1m。

以上各种载荷应考虑相应分项载荷系数,并进行载荷组合,用于结构计算。载荷组合及分项载荷系数见表 1。

表 1 载荷组合和分项载荷系数 ψ

载荷	分项载荷系数 ψ	
	载荷组合 A	载荷组合 B
额定载荷 ψ_1	1.34	1.22
自重 ψ_2	1.22	1.16
风载荷 ψ_3	-	1.22
手动操作力 ψ_4	-	1.22

由于高空作业平台臂架系统结构比较多,且臂体较长,臂体重量较大,在臂架举升过程中,极易受到臂体重心变化的影响。因此需要将各个结构的重心全部等效到整体重心上。则臂架重心空间位置等效重心公式:

$$X_g = \sum M_i X_i / M \quad (6)$$

$$Y_g = \sum M_i Y_i / M \quad (7)$$

$$Z_g = \sum M_i Z_i / M \quad (8)$$

6 四杆变幅机构运动仿真分析

使用运动学仿真软件设计优化的基本流程如下:

力学模型简化原则

① 由于变幅机构中四连杆自重占机构总质量比重比较小,故力学分析时可忽略其质量,将其等效为二力杆;

② 在工作载荷作用下,变幅油缸受压且忽略其自重,因此可将变幅油缸简化为受压杆;

③ 假设变幅机构在变幅过程中不受偏载荷作用,在变幅平面内对其进行受力分析;

④ 高空作业平台四杆变幅机构以变幅油缸作为驱动,由于高空作业人员对设备操控性的要求,实际驱动函数为变速运动函数,但为了能准确四杆变幅机构对工作平台加速度的影响,减少驱动力的影响,在运动学分析软件中把油缸驱动设置为匀速运动。

6.1 参数化建模

使用运动学仿真软件对变幅机构进行运动学分析,一般会使用参数化建模。将优化位置点作为优化变量参数化的载体,通过建模模块、零件模块等建立模型结构,并在不同的模型结构之间依照结构本身自由度选用连接模块中相对应的连接方式连接。

6.2 参数化分析

建立好参数化模型后, 选择运动学仿真的测量模块, 测量目标值. 并通过驱动模块在参数化模型上施加合适的驱动, 使用力模块在模型上施加作用力, 从而得出变幅机构加速度运动特性对臂架系统工作平台加速度和速度的影响。

7 实际案例分析

本文以直臂式高空作业平台常用的非平行四杆变幅机构(如图2所示)和平行四杆变幅机构(如图3所示)为例, 分析非平行、平行四杆变幅机构动力学特性对臂架系统工作平台加速度和速度的影响。

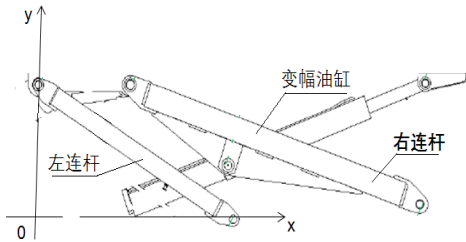


图2 非平行四杆变幅机构

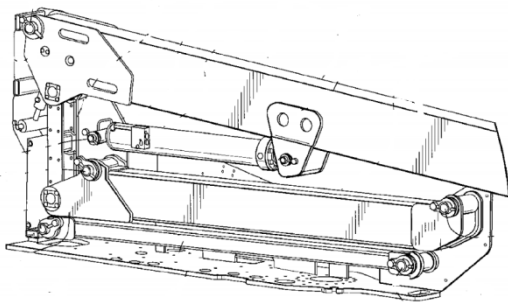


图3 平行四杆变幅机构

通过多体动力学仿真软件 Adams 建立多刚体骨架模型, 缸杆、缸筒为移动副, 其余各连杆间为旋转副, 在缸杆、缸筒组成的移动副上增加驱动, 油缸以 35mm/s 匀速度运行。确定刚体和旋转副连接形式后, 通过 Adams 动态仿真分析, 获取变幅机构动力学特性对臂架边的加速度和速度的影响。

将上述非平行四杆变幅机构和平行四杆变幅机构的相关参数, 代入相关公式当中, 通过 Adams 软件进行仿真分析, 加速度变化曲线如下:

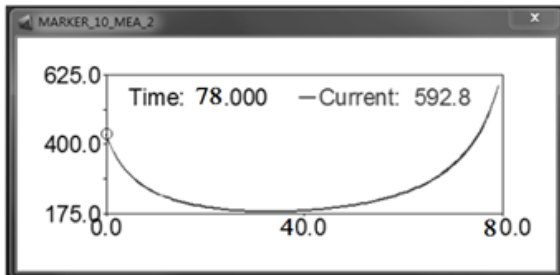


图4 非平行四杆变幅机构加速度特性图

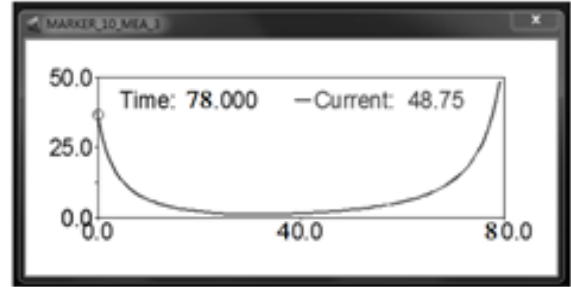


图5 非平行四杆变幅机构速度特性图

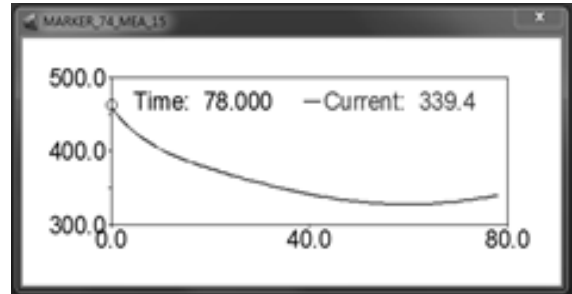


图6 平行四杆变幅机构加速度特性

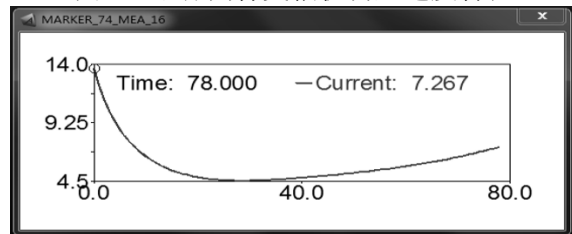


图7 平行四杆变幅机构速度特性

上述分析结果表明:

图2所述非平行四杆变幅机构, 图4所示的最大加速度、图5所示的速度发生在臂架角度为 75° 时, 加速度最大值为 592.8mm/s^2 , 其变化区间为 $175\text{--}592.8\text{mm/s}^2$, 速度最大值为 48.75mm/s , 其变化区间为 $4.5\text{--}48.75\text{mm/s}$; 图3所述平行四杆变幅机构, 图6所示的最大加速度、图7所示的速度发生在臂架角度为 0° 时, 加速度最大值为 467.2mm/s^2 , 其变化区间为 $355.8\text{--}467.2\text{mm/s}^2$, 速度最大值为 14mm/s , 其变化区间为 $4.5\text{--}14\text{mm/s}$;

从动力学分析结果表明: 在同等变幅油缸驱动速度情况下, 非平行四杆变幅机构的最大加速度比平行四杆变幅机构大 26.8% , 且加速度变化区间为 417mm/s^2 , 是平行四杆变幅机构加速度变化区间(112mm/s^2)的近4倍; 非平行四杆变幅机构的最大速度比平行四杆变幅机构大 248% , 且速度变化区间为 44.25mm/s , 是平行四杆变幅机构速度变化区间(9.5mm/s)的近4.5倍; 因而平行四杆变幅机构的操控特性明显优于非平行四杆变幅机构。

图3所述平行四杆变幅机构臂头速度和加速度在变幅初段和末段均优于图2所述非平行四杆变幅机构, 整个行程速度和加速度变化整体平缓; 且最大加速度、速度发

生在臂架角度为 0° 时,符合高空作业“低快高慢”的安全原则,有助于提高高空作业的安全性和作业效率。

8 结束语

本文针对直臂式高空作业平台四杆变幅机构展开动力学分析,阐述变幅机构动力学特性与操控性研究的流程和方法,并以实际案例为例展开计算,以具体数据证明变幅机构动力学特性对直臂式高空作业平台操控性的影响,同时为电气和液压联合方案对高空作业平台操控性提升提供理论依据和参考,对高空作业平台操控性优化和提升建设具有积极意义。

[参考文献]

[1]李双博,任会礼,李明富.自行走直臂式高空作业车连杆尺度优化以改善工作舒适性[J].机械设计与研

究,2020(2):1.

[2]陈华波.高空作业平台上车的虚拟样机与结构分析[D].长沙:湖南大学,2011.

[3]GB/T25849-2010.移动式升降工作平台、设计计算、安全要求和测试方法[S].国家质量技术监督局.2011.

[4]于珊珊,贺磊,郭前建.基于ADAMS软件的机械压力机工作机构优化设计[J].机械设计,2013(1):1.

作者简介:徐运海(1973.4—),男(汉族),湖南省邵阳市新宁人,1996年毕业于湘潭大学机械工程学院机械制造工艺与设备专业,工学学士,工程机械产品设计资深工程师,2017年至今,任中联重科智能高空作业机械有限公司臂式产品经理,主要从事高空作业机械臂式产品开发与性能研究。