

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.028

农田复合连杆式施药机械设备优化设计与实现

康维嘉

(山东省菏泽市牡丹区农机服务中心, 山东 菏泽 274006)

摘 要:农田复合连杆式施药机械具有多个连杆、传动和控制部件,其耦合关系复杂,设计稳定性直接影响工作安全性。因此,考虑设备的结构和尺寸设计,改进优化传统设计。根据施药机械设备的运动过程,结合结构布置特点,简化设备模型,分析具体的运动力学,根据液压缸与多连杆相对位置,确定整个设备的横向尺寸。计算结构位置与提升、下降高度之间的关系,确定液压缸与多连杆的最优相对位置。结合动力学方程,分析设备的受力情况,确定设备受力参数与结构尺寸之间的关系,设计设备最优的结构尺寸。试验结果显示:所设计的设备位移、速度、加速度变化较为规律,杆件与轴承连接的侧向力、轴向力均较为稳定,说明所设计的设备能够提升工作效率。

关键词:农田施药;机械设备;动力学分析;优化设计

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0145-07

Optimal Design and Implementation of Farmland Composite Linkage Pesticide Application Machinery and Equipment

KANG Weijia

(Agricultural Machinery Service Center of Shandong Mudan District, Heze 274006, China)

Abstract: As the compound connecting rod pesticide application machine on farmland has multiple connecting rods, transmission and control components with complex coupling relationship, its design stability directly affects operation safety. This paper improves and optimizes the traditional design considering the structure and size of the equipment design. According to the motion process of the application machinery and equipment, combined with the characteristics of structural layout, the equipment model is simplified, the specific motion mechanics is analyzed, and the transverse dimension of the whole equipment is determined according to the relative position of the hydraulic cylinder and the multi-connecting rod. The relationship between the structure position and the lifting and lowering height is calculated to determine the optimal relative position between the hydraulic cylinder and the multi-connecting rod. Combined with the dynamic equation, the force of the equipment is analyzed, the relationship between the force parameters and the structure size is determined, and the optimal structure size of the equipment is designed. The test results show that the displacement, speed and acceleration of the designed equipment change regularly, and the lateral force and axial force of the connection between the rod and the bearing are stable, which illustrates that the work efficiency can be improved.

Keywords: field application of medicine; mechanical equipment; kinetic analysis; optimal design

0 引言

随着农业生产水平的提升和机械化水平的不断发展,使得高效、准确、均匀的农田施药成为提高农作物产量和品质的关键因素之一。农田复合连杆式施药机械通过多个连杆、传动和控制部件实现施药操作,具有复杂的柔性结构和运动方式^[1]。在施药过程中,需要考虑到作物行间距的差异、地形起伏以及施药精度要求等多种因素。因此,深入研究农田复合连杆式施药机械的设计方法,对于优化其机械的设计和改进行施药效果具

有重要意义。

贾梦实等^[2]采用 D-H 参数法,利用理论运动学方程,建立机械臂的运动数学模型,推导出喷杆与各关节的相对位姿关系,准确描述喷药设备的运动特性;分析机械臂作业轨迹,得出最佳速度参数。受实际工作环境、负载变化等因素的影响,分析结果与实际情况存在偏差。袁祥等^[3]通过模型研究四连杆喷药机械设备的连杆负载情况,但没有经过实际应用得到验证。梅海强等^[4]应用解析几何方法描述多连杆机构的运动学,分析了各连杆之间的几何关系和运动特性。采用四连杆解析

基金项目:山东省自然科学基金项目(cj2019mu036)

作者简介:康维嘉(1970—),男,山东菏泽人,高级工程师,本科,研究方向为农业机械推广及应用,wwso2587@163.com。

法优化设计多连杆机构,建立顶架杆的运动方程来完成实际作业。由于顶架杆运动方程的建立依赖于各连杆的长度等参数,但受到测量误差的影响,使得设备运动特性不稳定。吕明青等^[5]以滑块速度波动、压力角、侧向力和机构的机械增益为优化目标,通过统一量纲和线性加权方式构造了多目标优化函数,以压力机的工作空间和杆件不干涉为约束条件。采用遗传算法完成设备多目标优化设计。由于优化设计过程中考虑的约束条件较多,增加了问题的复杂性,导致设计空间受限。

针对以上研究存在的诸多问题,本文从设备器件的结构设计和尺寸设计出发,对传统设计方案进行改进优化。

1 施药机械设备的优化设计

1.1 农田复合连杆式施药机械设备运动过程划分

农田复合连杆式施药机械设备如图1所示。

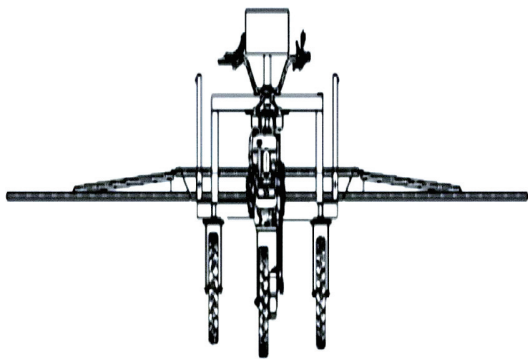


图1 农田复合连杆式施药机械设备

根据图1所示的农田复合连杆式施药机械设备,可以将其工作过程进行分析并按照不同的运动情况划分为提升和下降两个机构单元^[6]。这些机构单元通过伸缩推杆电机、滑块、位移传感器等控制元件的配合,完成对喷头高度和位置的调整和控制^[7-8]。

提升机构通过伸缩推杆电机控制,喷头可以实现在垂直方向上的伸出与回收。为了保证喷杆能够自由移动,喷杆连接了一个滑块,确保在电机的作用下发生滑移,以适应不同作物的高度及施药要求。

下降机构通过控制滑块或滑移装置以及配合位移传感器等控制装置,可以实现喷头在水平方向上的精确位置控制,保证喷头的稳定性和精准对位^[9]。

根据该结构设计使得农田施药机械能够精准地进行施药操作,从而提高农作物的产量和品质。

1.2 相关器件的结构设计优化

1) 上升下降中设备横向尺寸分析

按照图1中农田复合连杆式施药机械设备,绘制机械设备运动简图如图2所示。

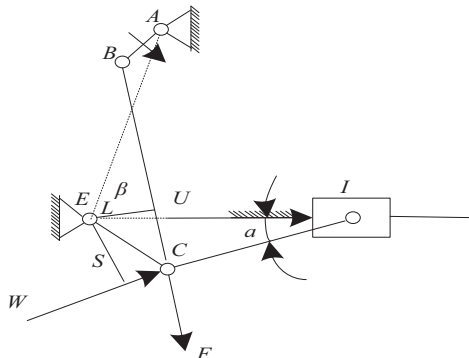


图2 机械设备运动简图

由图2所示,将农田复合连杆式施药机械设备的运动看成是一个铰链四杆的结构(该结构包含A、B、C、I四个节点),A-B是曲柄,主要负责动力的输入;B-C、C-E以及C-I均为中间杆件,这些杆件分别负责整个结构的运动以及动力的输出,是设备设计中主要的动力学参数^[10-11]。

结合上升和下降过程的力学分析,可以进一步分析设备的具体运动。

上升过程分析:设定上升过程中设备的高度变化为 h ,液压缸的长度为 L_h 。根据相似三角形关系可得:

$$h/L_h = r/(BC+CI) \quad (1)$$

式中:BC表示B-C杆件;CI表示C-I杆件。

下降过程分析:设定下降过程中设备的高度变化为 h' ,根据相似三角形关系可得:

$$h'/L_h = r/(BC+CE+CI) \quad (2)$$

式中CE表示C-E杆件。

这个关系可以帮助进一步优化设备的横向尺寸,以确保喷头在下降过程中能够覆盖到目标区域,并满足施药要求。

2) 液压缸与多连杆的最优相对位置

考虑到B-C和C-I两个连杆都能划分成二力杆,这两个连杆都会影响C点的受力, F 和 W 两个位置的作用力都会影响C点的受力情况^[12]。将农田复合连杆式施药机械设备中的C-E杆作为主要研究对象,假设E点受到 F 和 W 两个点的合力矩值是0,进行力学计算以确定各点的关系。

根据力矩平衡原理,得到式(3)。

$$FC \cdot BC = WC \cdot CI \quad (3)$$

从另一个角度来看,从 I (力输出杆件) 的角度进行研究,可得

$$AC/AI = BC/CI \quad (4)$$

$$AI = (CI \cdot AC) / BC \quad (5)$$

结合式(2)和力矩平衡,得到:

$$CE \cdot W = CI \cdot BI - BC \cdot F \quad (6)$$

分析式(3)可知,液压缸的作用力点 F 和外界作用力点 W 对 C 点的影响以及 $C-E$ 杆与力输出杆件 I 之间的受力平衡关系。通过计算和分析该公式,可以进一步理解和确定各个参数之间的关系,即改变上述参数的数值,可以确定农田复合连杆式施药机械设备中液压缸与多连杆的最佳相对位置。这种确定的位置关系将确保设备能够实现所需的提升和下降高度,并优化设备的动力学特性。

1.3 复合连杆式施药机械设备尺寸设计优化

通过进行设备的动力学分析,可以了解设备的受力情况,并确定设备受力参数与结构尺寸之间的关系^[13]。根据这种关系,可以设计出最优结构尺寸的设备。

1) 参数设置中动力学方程构建

为了实现这一目标,选择使用 Adams 软件来进行复合连杆式施药机械设备曲柄和中间杠杆的动力学特性分析。通过该软件提供的分析工具,能够模拟出设备的运动模型并进行动力学仿真。在建立模型的过程中,以前文计算得到的液压缸与多连杆的最优相对位置,在 Adams 软件中设置了曲柄和中间杠杆之间的连接方式和约束关系^[14-15]。通过上文的分析,设定运动约束和驱动约束,建立曲柄和中间杠杆的约束方程 m , 描述机械设备中各杆件的运动连接关系^[16-17]。同时,使用广义矢量来描述机械设备上的运动约束方程 $\Gamma^{\kappa}(p)$, 其函数形式如下:

$$\Gamma^{\kappa}(p) = [\Gamma_1^{\kappa}(p), \Gamma_2^{\kappa}(p), \dots, \Gamma_m^{\kappa}(p)]^T = 0 \quad (7)$$

式中: p 表示广义坐标; T 表示动能; κ 表示独立变量; Γ 表示运动约束方程中的正态分布函数,并设定了适当的驱动约束 $\Gamma^D(p, t)$, 其形式如下:

$$(\partial \Gamma / \partial p) \cdot \ddot{p} = - \left[(\partial^2 \Gamma / \partial^2 t) + \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (\partial^2 \Gamma / \partial p_k \partial p_l) \dot{p}_k \dot{p}_l + (\partial / \partial t) \cdot (\partial \Gamma / \partial p) \cdot \dot{p} + (\partial / \partial p) \cdot (\partial \Gamma / \partial p) \cdot \dot{p} \right] \quad (16)$$

根据设备的最优结构尺寸确定,在最优状态下,设备产生最佳的摩擦力。使用拉格朗日方程进一步计算获得:

$$(\partial \Phi / \partial p)^T \lambda = [- (D / Dt) (\partial T / \partial \dot{p})^T + (\partial T / \partial \dot{p})^T + Q (\partial \Gamma / \partial p) \cdot \dot{p}] \quad (17)$$

$$\Gamma^D(p, t) = 0 \quad (8)$$

式中 t 表示运动时间。按照机械运动的运动规律,时间函数与广义坐标函数同时也是驱动函数。式(8)也是曲柄和中间杠杆多个广义坐标的多个非线性方程,这些方程共同组成了曲柄和中间杠杆在工作过程中的位置方程:

$$\Gamma(p, t) = \begin{bmatrix} \Gamma^{\kappa}(p, t) \\ \Gamma^D(p, t) \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

求导式(9)获得曲柄和中间杠杆实际运动时的速度约束方程:

$$\dot{\Gamma}(p, \dot{p}, t) = \Gamma_p(p, t) \dot{p} + \Gamma_t(p, t) = 0 \quad (10)$$

假设 $-\Gamma_t(p, t)$ 表示速度 v , 则有式(11):

$$\dot{\Gamma}(p, \dot{p}, t) = \Gamma_p(p, t) \dot{p} - v = 0 \quad (11)$$

求导式(11)则有加速度方程:

$$\ddot{\Gamma}(p, \dot{p}, \ddot{p}, t) = \Gamma_p(p, t) \ddot{p} + [\Gamma_p(p, t) \dot{p}] \dot{p} + \Gamma_{tt}(p, t) = 0 \quad (12)$$

设定 η 与 $-(\Gamma_p \dot{p})_p - 2\Gamma_{pt} \dot{p} - \Gamma_{tt}$ 相等, 精简式(12)后得

$$\ddot{\Gamma}(p, \dot{p}, \ddot{p}, t) = \Gamma_p(p, \dot{p}, t) \ddot{p} - \eta(p, \dot{p}, t) = 0 \quad (13)$$

式中 Γ_p 是雅可比矩阵。假设 m 是 Γ 的维数, 使用 $m \cdot n$ 矩阵表示 Γ_p , 进一步得到: $(\Gamma_p)_{(i,j)} = \partial \Gamma_i / \partial \Gamma_j$ 。

2) 在上文求出的动力学参数约束下, 曲柄和中间杠杆设计参数求解^[18]

通过使用 Adams 软件分析曲柄和中间杠杆模型的动力学特性, 可以计算出关键参数, 如加速度、位移以及约束反力等^[19-20]。在最优状态下, 通过求解约束方程式, 确定各个连杆在不同时刻下的设计长度、宽度和安装位置:

$$(\Gamma_p)_{(i,j)} (\partial \Gamma / \partial p) \cdot \Delta p_j + \Gamma(p_j, t_n) = 0 \quad (14)$$

式中 p_j 表示第 j 次迭代, 同时 $\Delta p_j = p_j + 1 - p_j$ 。

通过求导约束方程, 获得在 t_n 时刻下的复合连杆式施药机械设备上各个连杆的安装方向:

$$(\partial \Gamma / \partial p) \cdot \dot{p} = - (\partial \Gamma / \partial t) \quad (15)$$

式中: λ 表示分配权重的参数; Q 表示位能。通过结合动力学方程的分析, 能够确定设备受力参数与结构尺寸之间的关系, 并依据这种关系设计出设备的最优结构尺寸, 可通过材料选择来实现最佳摩擦力。

2 试验结果

为了验证农田复合连杆式施药机械设备动力学特性研究方法的有效性,选取一个真实的农田实验场地模拟水稻田作物环境。研究对象是一台以本文方法为基础设计的复合连杆式施药机械设备。在该试验中喷洒宽度为 2 m 的连续喷雾。试验总共持续 30 min,施药速度为 2 m/s,药液喷洒量为 0.1 L/m²。驱动系统采用液压驱动方式,供给压力为 10 MPa。试验设计如下。

设置设备初始配置,并记录液压缸长度(L_0)和连杆长度(L_0)作为基准设置。设计试验矩阵以确保每个参数组合都能被测试到。选择 3 个液压缸长度($L1$ 、 $L2$ 、 $L3$)和 3 个连杆长度($L4$ 、 $L5$ 、 $L6$)的参数组合进行试验。试验矩阵如表 1 所示

表 1 试验矩阵			单位:cm
试验编号	液压缸长度	连杆长度	
1	100($L1$)	50($L4$)	
2	100($L1$)	60($L5$)	
3	100($L1$)	70($L6$)	
4	110($L2$)	50($L4$)	
5	110($L2$)	60($L5$)	
6	110($L2$)	70($L6$)	
7	120($L3$)	50($L4$)	
8	120($L3$)	60($L5$)	
9	120($L3$)	70($L6$)	

根据试验方案,逐个改变液压缸长度和连杆长度,并进行多次重复试验,以获得可靠的数据。例如,试验 1 对应液压缸长度为 $L1$ (100 cm)、连杆长度为 $L4$ (50 cm) 的组合,实验 2 对应液压缸长度为 $L1$ 、连杆长度为 $L5$ (60 cm) 的组合等。使用试验收集到的数据,比较不同参数组合的施药效果,并确定具有最佳施药效率的参数组合。选择覆盖面积(%)这一指标来评估施药效率,覆盖面积表示被涂覆或喷洒的作物面积占总面积的比例。不同参数组合的评估结果如表 2 所示。

表 2 不同参数组合的覆盖面积评估结果

单位: %			
实验编号	覆盖面积	实验编号	覆盖面积
1	87.6	6	97.7
2	89.3	7	90.6
3	79.5	8	92.1
4	93.7	9	95.7
5	99.4	—	—

通过对表 2 进行分析,确定了具有最佳施药效率的参数组合,即液压缸长度为 110 cm,连杆长度为 60 cm,这个参数组合应用于复合连杆式施药机械设备的设计中。

基于最佳施药效率的参数组合,设计了农田复合连杆式施药机械设备,如图 3 所示。

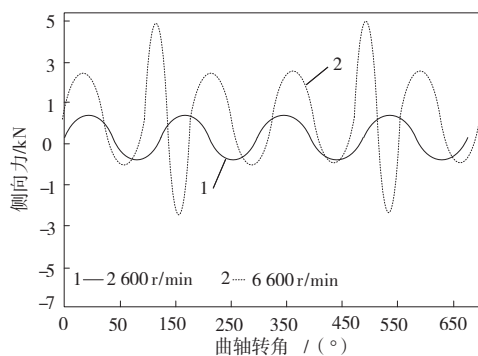


图 3 农田复合连杆式施药机械

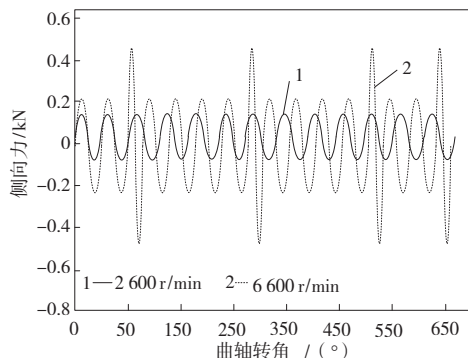
该设备以液压缸长度 110 cm 和连杆长度 60 cm 为基础,通过合理的结构设计和布置达到高效的施药效果。这样的设计可以确保施药液的均匀分布,并提高作业的准确性和效率。

2.1 曲轴转速对动力学特性影响

为了评估复合连杆式施药机械设备的杆件动力学变化和验证优化设计的效果,使用 Adams 软件构建了设备的模型并进行了计算和分析。在模型中,考虑了曲轴转动对杆件的影响。通过调整曲轴转速和曲轴转角,可以观察杆件在不同条件下的侧向力、曲轴侧向力和轴向力的变化情况。试验中所选用的曲轴转速具有代表性,包括最大压缩力和无负载超速工况。这些转速代表了设备在不同工况下的运行情况,用于进行优化设计前后的对比分析。结合之前确定的具有最佳施药效率的参数组合,将试验结果与优化设计前后的数据进行对比。通过分析杆件在不同曲轴转速和转角下力的变化情况,评估优化设计对设备性能的改进程度,结果如图 4 所示。



(a) 优化设计前连杆侧向力



(b) 优化设计后连杆侧向力

图4 优化设计前后机械设备性能对比分析

综合图4能够看出,在优化设计前后,相同曲轴转速下,优化后设备杆件的受力变化更加规律,表现出较好的性能。这说明在实际工作过程中,复合连杆式施药机械设备的各个杆件呈现出规律的循环运动状态。

为了进一步评估改进设计后设备的性能,选择了两种转速(2 600 r/min、6 600 r/min)进行连杆轴向力测试。这些转速是根据之前确定的最佳参数组合来选择的。通过对优化设计后设备的连杆轴向力进行测试,可以观察和分析不同转速

下杆件所受到轴向力的变化情况。这将有助于进一步了解优化设计对设备性能的影响。

图5所示的连杆轴向力中,两种转速下,设备的连杆运动规律在初期阶段存在明显的差异。这种差异是因为在运动初期,不同杆件在各个轴承的带动下,轴向力会出现短时的差异,这是所有设备都会出现的问题。因此,图5中出现这种情况是正常的现象。然而,本文所优化设计后的设备能够迅速恢复到稳定状态,这说明通过结合动力学方程的分析,成功地确定了设备受力参数与结构尺寸之间的关系。基于这种关系,设计了具有最优结构尺寸的设备,使得设备具备了较强的恢复能力。

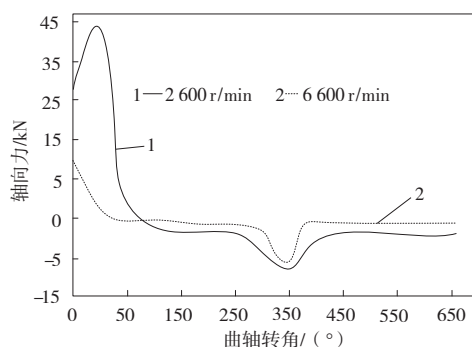


图5 短时差异下设备连杆轴向力恢复

2.2 滑块动力学模拟试验分析

通过 Adams 软件,可以分析复合连杆式施药机械设备的传感器数据以研究各个杆件和零部件的运动情况和动力学特性。在优化设计后,对设备上滑块的位移变化、速度变化以及加速度运动曲线进行了研究,如图6所示。

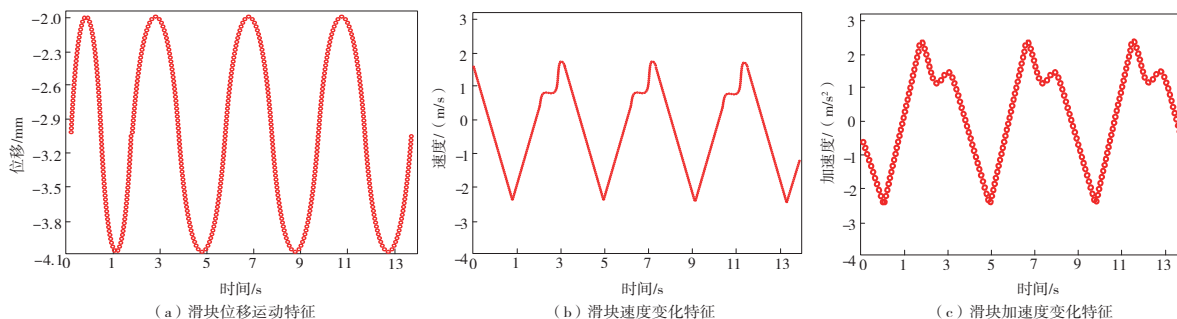


图6 滑块运动特征

根据图6中本文设计的复合连杆式施药机械设备上滑块的运动情况分析,估计滑块的运动行程约为850 mm,这与相关机械设备设计的标准上

限一致。在实际工作中,设备的滑块呈现规律的运动特征。从滑块的速度变化曲线来看,设备首先以较快的速度伸出,然后以较慢速度施药,最后

以更快的速度回落完成施药过程。滑块在运动过程中的速度范围大约为 $-2.5\text{ m/s} \sim 1.5\text{ m/s}$ 之间。由此证明本研究通过对设备的力学分析和动力学方程的应用,设计出具有最优结构尺寸的设备,进而实现了较高的工作效率。该设计还能降低振动和噪声产生,提高设备的工作品质,使其在操作过

程中表现出色。

2.3 杆件动力学测试试验分析

使用 Adams 软件对复合连杆式施药机械设备进行分析,可以观察到杆件的运动速度、位移与加速度的变化特征,分析结果如图 7 所示。

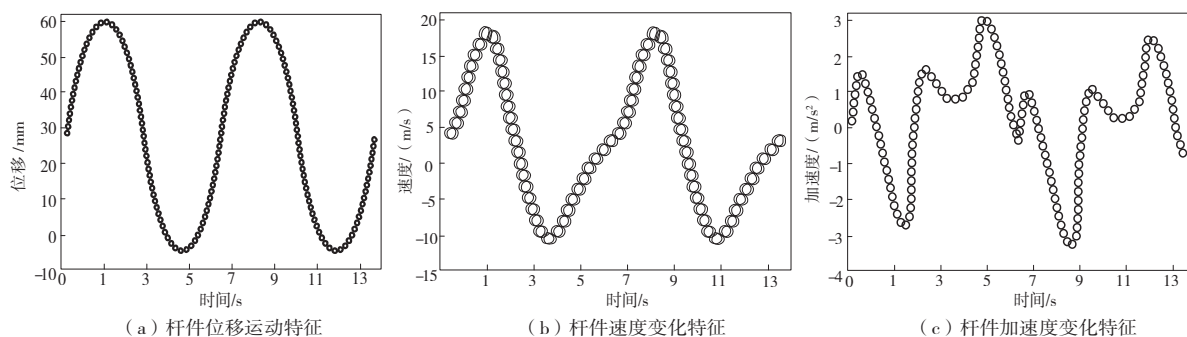


图 7 杆件运动特征

综合图 7 能够看出,通过合理调整液压缸和多连杆的相对位置,能够对复合连杆式施药机械设备的位移结果进行优化。这种优化可以实现杆件的最大位移接近 60 mm ,最小位移约为 -8 mm 。这个位移范围符合相关机械规范的要求,且与机械设备的运动规律相一致。此外,该复合连杆式施药机械设备并没有出现明显的冲击荷载,同时工作时的运动状态较为稳定。在农田施药过程中,使用这种设备可以构建稳定的施药环境并提高工作效率。

3 结语

以复合连杆式施药机械设备作为研究对象,通过合理简化设备模型,将设备划分为多个运动情况并考虑结构布置特点,能够更好地控制设备的运动过程。同时,通过动力学分析和最优设计,保证了设备在实际工作中的稳定性和效率。经过计算分析发现,改进设计的复合连杆式施药机械设备在实际工作时,能够循环稳定实现农田施药,其良好的动力学特征,保证了实际农田施药时具有较高的稳定性与工作效率。

参考文献:

[1] 陈缘缘,刘艳妍,张起樑,等. 平行连杆式锻造操作机缓冲装置的结构特性分析[J]. 锻压技术, 2023, 48(2):168-173.
[2] 贾梦实,张莲洁,顿国强,等. 自走式草莓施药机设计与轨迹仿真可靠性分析[J]. 中国农机化学报, 2023,

44(7):85-90,117.

[3] 袁祥,高飞,廉自生. 两柱掩护式支架四连杆负载特性研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(2):13-16.
[4] 梅海强,何雪明,罗康. 升降装置多连杆机构设计[J]. 轻工机械, 2023, 41(2):17-21.
[5] 吕明青,邵珠峰,徐道春,等. 基于遗传算法的六连杆机构尺寸优化设计[J]. 锻压技术, 2022, 47(7):184-193.
[6] 王振,陈国平,惠旭龙,等. 基于旋转内凹六边形的负泊松比结构力学性能研究[J]. 机械强度, 2023, 45(1):124-130.
[7] 薛卫萍,熊俊,姚志文. 机械臂数控加工过程动力学控制仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5):287-291.
[8] 徐凯,冯增铭,杨金兴,等. 可变压缩比发动机多连杆机构设计及动力学分析[J]. 机械传动, 2022, 46(12):161-168.
[9] 路春辉,金国光,魏展. 基于有限元的新型高速剑杆织机箱座系统柔性动力学分析[J]. 机械强度, 2021, 43(5):1141-1148.
[10] 刘晓飞,高兴华,魏亚博. 复合连杆式菠萝采摘装置设计及传动分析[J]. 机械传动, 2021, 45(8):165-169.
[11] 王中双,尹久政. 考虑运动副间隙三角连杆肘杆式压力机机构动力学研究[J]. 机械传动, 2021, 45(3):1-7.
[12] 常海洋,蒋扇英. 多关节机械臂系统非线性动力学分析[J]. 力学季刊, 2023, 44(2):385-394.
[13] 王传礼,王顺,靳华伟,等. 矿用机械盘式制动器的结构优化与动力学分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2):171-174.
[14] 陈修龙,王爱郭,王景庆. 含转动副润滑间隙的多连杆机构动力学优化设计[J]. 中国机械工程, 2025,

- 36(1):87-95.
- [15] 张丹,齐炜胤,邵华. 4RRR 冗余并联机械手的动力学分析与优化[J]. 机械设计与研究,2024,40(5):187-192.
- [16] 徐璐. 工业产品智能包装封口机械二级臂抗振方法[J]. 机械设计与制造,2025(3):5-10.
- [17] 陈洪月,蔡明航,杨辛未,等. 更换电铲钢丝绳专用机械臂架的结构及动力学分析[J]. 工程设计学报,2023,30(5):590-600.
- [18] 卢燕会,任燕,卢东亮,等. 平面并联五连杆机构的改进 PSO-SVR 可靠性分析[J]. 机械设计与制造,2025(2):179-182.
- [19] 郭家乐,常宗瑜,何静文,等. 基于等效机械模型的液舱-运动模拟平台系统动力学分析[J]. 机械设计,2024,41(6):7-13.
- [20] 周健,万烂军,罗海霞. 基于域泛化的旋转机械故障诊断方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(1):127-131,137.

收稿日期:2023-11-08

(上接第 138 页)

参考文献:

- [1] 梅迪,朱迪,朱开鼎,等. 航天器低成本高效率运输方案探究[J]. 军民两用技术与产品,2024(4):33-38.
- [2] 范丽,胡泽阳,武丹,等. 基于光纤传感航天器神经网络与数字孪生研究[J]. 仪表技术与传感器,2024(5):12-18.
- [3] 李刚,周尚波,郭尚志,等. 通信延迟下自适应容错控制及其在航天器编队中的应用[J]. 重庆大学学报,2024,47(4):104-113.
- [4] 潘星熠,陈提. 基于 Vicsek 分形结构的智能航天器集群在轨组装动力学与控制[J]. 动力学与控制学报,2024,22(3):34-42.
- [5] 王璟贤,白玉铸,陈致钧,等. 基于测地线的航天器集群隐蔽机动轨迹规划[J]. 宇航学报,2024,45(4):513-522.
- [6] 杜荣华,张翔,王宁,等. 非合作目标交会接近的自主检测和跟踪方法研究[J]. 宇航学报,2021,42(5):621-633.
- [7] 何林坤,薛文超,张冉,等. 运载火箭动力着陆段制导控制方法综述与展望[J]. 航空学报,2023,44(23):58-83,3.
- [8] 诸葛运成,任飞,李安庆,等. 一种用于连续推力航天器燃料最优轨迹优化的协状态初始化方法[J]. 齐鲁工业大学学报,2023,37(5):19-27.
- [9] 乔衍迪,张泽旭. 基于双层凸优化模型的月面运载器大范围转移最优轨迹规划方法[J]. 深空探测学报(中英文),2023,10(5):470-480.
- [10] 谢尔盖·伊斯科夫,格里果利·菲利波夫,周晓,等. 帕累托-有限推力航天器轨道机动问题中相对运动的最优控制[J]. 西北工业大学学报,2023,41(3):529-536.
- [11] 任飞,田晨璐,张桂青,等. 基于 2 阶圆锥规划的大规模电动汽车充电调度优化研究[J]. 计算机时代,2022(9):100-104.
- [12] 张显库,洪皓辰. 基于非线性修饰和零阶保持器的船舶航向保持控制[J]. 中国舰船研究,2024,19(1):84-89.
- [13] 刘涛,王青山,秦斌,等. 矩形板自由振动的 Chebyshev 谱方法[J]. 塑性工程学报,2021,28(5):145-152.
- [14] 黄洁,张友安,刘永新,等. 基于 Radau 伪谱方法的轨迹优化[J]. 海军航空工程学院学报,2015,30(4):315-320.
- [15] 陈诗雨,宝音贺西. 多目标交会轨迹优化方法综述[J]. 动力学与控制学报,2022,20(4):1-11.
- [16] 王访寒,周如好,余薛浩,等. 基于序列凸优化的上级远程交会轨迹优化[J]. 上海航天(中英文),2022,39(2):45-52.
- [17] 房炫伯,孙鑫,殷国梁. 基于凸优化的 OFDM 信号峰均比抑制算法[J]. 自动化与仪器仪表,2022(8):118-121.
- [18] 田霖,苏智杰,冯婉媚,等. 面向多无人机携能网络的轨迹与资源规划算法[J]. 西安电子科技大学学报,2021,48(6):115-122.
- [19] 曾益东,黄俊,陈波,等. 基于伯克霍夫预处理的良态伪谱法[J]. 控制工程,2023,30(7):1324-1331,1367.

收稿日期:2024-10-08