

# 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构力学性能分析

冯立峰, 温平, 蒋天伙

(宁波可可磁业股份有限公司, 浙江 宁波 330200)

**摘要** 本研究运用动态仿真技术分析并优化新型锻造操作机主运动机构的力学性能。通过建立三维模型并采用多体动力学仿真, 研究了机构在不同工况下的运动学、静力学与动力学行为, 评估了各部件的动态响应、驱动力需求及应力分布。结果表明, 优化后的机构在高负载条件下可保持高稳定性与高工作效率; 液压驱动系统优化提升了响应性与传动效率, 降低了能量损耗; 精确的运动规划减少了应力集中, 延长了设备寿命。本研究旨在为锻造操作机的设计与应用提供理论支持与实践依据, 有助于进一步提升设备性能。

**关键词** 锻造操作机; 主运动机构; 力学性能; 动态仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.006

## 0 引言

锻造机技术不断革新, 尤其在高负载、高精度与高效率工况下, 主运动机构的力学性能成为关键。研究表明, 锻造操作机主运动机构需具备优异的动态响应、承载能力与结构稳定性, 以完成复杂运动轨迹与精密锻造任务<sup>[1]</sup>。随着多体动力学仿真技术的广泛应用, 机构设计与优化获得显著提升。通过对运动学、静力学与动力学性能的全面分析, 可为设计改进提供有力支持<sup>[2]</sup>。液压驱动系统作为关键驱动源, 其性能直接影响机构稳定性与效率, 优化液压系统成为提升整体性能的重要方向<sup>[3]</sup>。本研究基于动态仿真技术分析锻造操作机主运动机构力学性能, 为其设计与应用提供理论指导。

## 1 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构的主要创新

基于动态仿真机新型锻造操作机主运动机构通过三个关键创新显著提升了性能表现。该机构在高负载与复杂工况下能保持高精度高效率运转, 多体动力学仿真证实其在高速高精度应用场合依然稳定, 满足现代锻造行业需求。精确的运动规划优化了机构的运行稳定性, 通过合理分配各部件负载, 减少应力集中与能量损耗, 有效控制驱动部件工作范围, 避免高负载或高频操作中的过度冲击与振动, 降低驱动力波动与摩擦磨损, 延长设备寿命。液压驱动系统的优化提升了整体工作效率与稳定性, 作为核心动力来源, 优化后的液压系统提高了传动效率, 通过流量调节、压力控制与油温管

理确保复杂工况下的稳定运行, 有效提升响应性能与系统安全系数。

## 2 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构力学理论及公式原理

### 2.1 运动学分析

在锻造操作机主运动机构的运动学分析中, 需重点关注各运动部件的相对运动关系以及整体机构的工作性能。通过建立机构的数学模型并结合多体动力学理论, 可以精确描述各部件在工作过程中的位置、速度、加速度等动态特性。运动学分析的核心目标是揭示各部件之间的传动规律并推导出它们之间的相互作用关系。设定各运动部件的初始条件后, 采用运动学方程进行求解, 进而获得主运动机构的运动轨迹。设定某一时间点的位置向量为 $r(t)$ , 则运动学模型可通过如下公式表示:

$$r(t) = r_0 + \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (1)$$

其中 $r_0$ 为初始位置,  $v(\tau)$ 为速度向量,  $\tau$ 为时间变量。通过对速度和加速度的进一步推导, 可以深入分析各部件的运动规律, 揭示其不同工况下的响应特性。

### 2.2 设计原理

锻造操作机主运动机构的设计原理结合力学与运动学原理, 致力于确保工作过程中的高效传动与稳定性。设计关键在于合理选择传动方式, 优化机构布局及确保驱动部件协同作用<sup>[4]</sup>。为实现理想运动轨迹, 各部件的运动范围与相对位置必须满足特定工况需求, 同时避免过度摩擦与能量损失。机构设计需满足足够

刚度, 确保高负载下有效承受应力而不产生过度变形。通过数学模型结合力学分析与动力学计算, 设计能在各种工况下保持稳定运行<sup>[5]</sup>。以力学行为为例, 可用胡克定律描述材料性能。

$$F = k \cdot \delta \quad (2)$$

其中  $k$  为弹性系数,  $\delta$  为相对位移。通过合理选取各部件的材料、尺寸及形状, 设计能够最大程度降低能量损失, 提升机构的工作效率。

### 3 本次新型锻造操作机研究载体简介

#### 3.1 新型锻造操作机主运动机构的正向位置解析

图 1 展示了一种新型锻造操作机的主运动机构设计, 其独特之处在于将俯仰缸与同步杆 LK 安装于提升臂的顶端, 这与传统机构布局存在显著差异。

与传统锻造机机构相比, 该机构的唯一差异在于其 AK 和 BL 与 x 轴正方向所形成的夹角为:

$$\theta_6 = \theta_7 = \angle CAK + \theta_1 \quad (3)$$

#### 3.2 锻造操作机主运动机构受力分析

在锻造操作机中, 升降运动占据主导地位, 因此, 本分析仅聚焦于升降过程中的力学考量。为简化受力对比, 除钳杆 FE 的重力外, 其余所有部件的重力均不予考虑。

分析流程遵循传统锻造机的路径, 即通过建立钳杆与前吊杆的力学平衡方程组, 直接求解出 FF、FE、

FC 及 FG 各力<sup>[6]</sup>。随后, 将研究焦点转向后臂, 其受力状况详见图 2 所示。

对于前臂的受力来说, 根据受力平衡方程可列出(见图 3):

$$\begin{cases} F_A + F_K + F_J - F_C = 0 \\ \overline{AK} \times F_K + \overline{AJ} \times F_J - \overline{AC} \times F_C = 0 \end{cases} \quad (4)$$

## 4 实验结果与指标评估

### 4.1 运动学仿真测试与结果分析

运动学仿真测试是评估锻造操作机主运动机构性能的重要手段, 通过仿真分析揭示其不同工况下的运动特性。仿真测试主要关注各部件的运动轨迹, 速度与加速度等动态参数。

$$\alpha = \frac{v(t) - v_0}{t} \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为加速度,  $v(t)$  为时刻  $t$  的速度,  $v_0$  为初始速度,  $t$  为时间。仿真结果显示, 空载状态下部件速度达 1.5 m/s, 加速度约 2 m/s<sup>2</sup>; 低负载时速度降至 1.2 m/s, 加速度为 1.8 m/s<sup>2</sup>; 高负载条件下速度进一步降至 0.8 m/s, 而加速度却增至 3.5 m/s<sup>2</sup>。这表明在正常工况下机构运行平稳, 但高负载时加速度波动较大, 暴露出设计中的潜在问题。

### 4.2 驱动力分析与评估

驱动力分析是锻造操作机主运动机构力学性能评

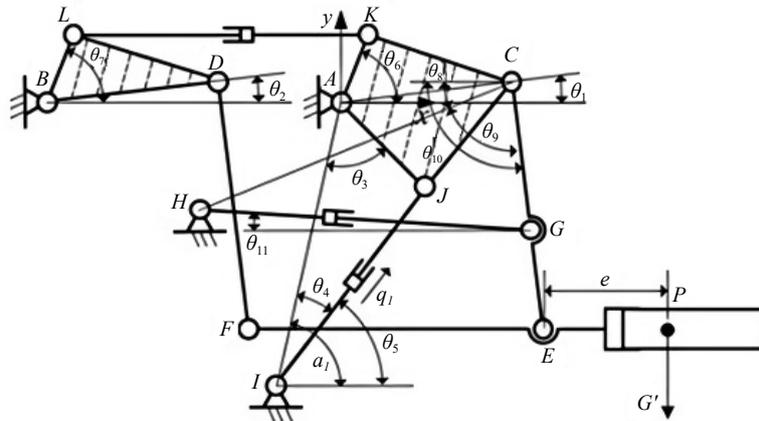


图 1 主运动机构设计图

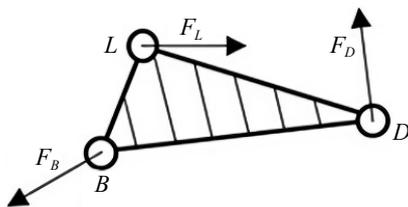


图 2 机构后臂受力分析图

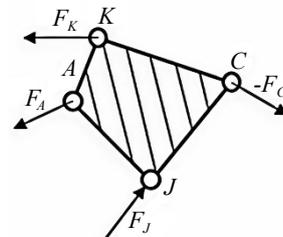


图 3 机构前臂受力分析图

估的关键环节,旨在了解各部件在不同工况下的驱动需求及变化规律。通过多体动力学仿真,计算机构所需驱动力,分析驱动系统的响应能力<sup>[7]</sup>。驱动力由负载力、摩擦力及惯性力共同决定,计算得出系统的总驱动力 $F_{total}$ ,并通过以下公式描述驱动力的变化:

$$F_{total}=F_{load}+F_{friction}+F_{inertia} \quad (6)$$

其中 $F_{load}$ 为负载力, $F_{friction}$ 为摩擦力, $F_{inertia}$ 为惯性力。仿真结果显示,随着负载增加,各力值明显上升。空载状态下,驱动力为50 N,摩擦力10 N,惯性力5 N;低负载时分别增至75 N,15 N与10 N;高负载条件下则大幅上升至120 N,25 N与20 N。这表明高负载状态下驱动力需求显著增大,且摩擦力与惯性力对总驱动力的影响逐渐增强,需要对传动系统进行进一步优化,以提高高负载条件下的工作稳定性与效率。

#### 4.3 静力学分析与结果

静力学分析在锻造操作机主运动机构设计中至关重要,通过分析各部件在静态负载条件下的受力状态,能够评估机构的结构稳定性与抗变形能力。该分析关注各连接部件的受力分布、应力集中情况及承载能力<sup>[8]</sup>。通过有限元分析,计算不同工况下的应力与变形,确保长期使用的可靠性。关键参数包括最大应力与最大变形量,通常采用下式计算应力与变形:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

其中 $\sigma$ 为材料的应力, $F$ 为施加的外力, $A$ 为受力面积。仿真结果显示,负载增加导致应力与变形明显上升,安全系数下降。空载状态下最大应力为50 MPa,最大变形0.02 mm,安全系数4;低负载时分别变为80 MPa,0.05 mm与3.5;高负载条件下则达到120 MPa,0.1 mm,安全系数降至2.5。在高负载工况下,部分部件的应力接近设计极限,显示出潜在的结构问题,需要进一步优化设计<sup>[9]</sup>。

#### 4.4 力学性能综合评估

力学性能综合评估通过系统分析锻造操作机主运动机构的运动学、静力学及动力学性能,全面评估其在不同工况下的工作稳定性与效率<sup>[10]</sup>。该评估综合考虑各部件在静态与动态负载下的响应,以及摩擦、惯性力及应力分布等因素对整体性能的影响。关键参数包括最大载荷承载能力、动态响应时间、应力集中现象及结构变形情况。根据各项力学指标,采用综合评价公式进行综合评估:

$$Rerforomance\ Index = \frac{F_{max}}{\sigma_{max}} \times \frac{1}{\delta_{max}} \quad (8)$$

其中 $F_{max}$ 为最大负载力, $\sigma_{max}$ 为最大应力, $\delta_{max}$ 为

最大变形。分析结果显示,随着负载增加,性能指数明显下降。空载状态下,最大负载力100 N,最大应力50 MPa,最大变形0.02 mm,性能指数为4;低负载时为150 N,80 MPa,0.05 mm与3.2;高负载条件下为200 N,120 MPa,0.1 mm与2。这表明高负载工况下机构力学性能显著降低,存在潜在的结构不稳定风险,为进一步设计优化提供了重要理论依据。

## 5 结论

通过对新型锻造操作机主运动机构的力学性能分析与优化研究,揭示了其在不同工况下的动态响应、驱动力需求以及静力学表现。运动学仿真、静力学分析和力学性能评估结果表明,优化后的机构在高负载和复杂工况下仍能保持较高的稳定性和工作效率。液压驱动系统的优化设计进一步提升了机构的动态响应能力与能效,减少了能量损耗并显著提高了负载承载能力。运动规划的精确设计有助于降低应力集中与不必要的摩擦,延长设备使用寿命。综合分析表明该机构具有广阔的应用前景,经过进一步优化后,可在精密锻造及高要求工业领域中发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] NicolaeC, AdrianI, ValentinaC, etal. ExperimentalResearchfortheEstablishmentoftheOptimalForgingandHeatTreatmentTechnicalParametersforSpecialPurposeForgedSemi-Finishes[J]. Materials, 2023, 16(06): 2432.
- [2] 陈柏金.高性能锻造操作机液压控制系统技术原理[J]. 锻压装备与制造技术, 2023,58(05):53-57.
- [3] 马志刚,杨志怀,张晓丽,等.锻造操作机行走系统性能仿真分析[J]. 锻压技术, 2022,47(10):203-207.
- [4] 陈柯杰,刘艳妍,张起樑,等.锻造操作机液压缓冲装置的性能研究[J]. 锻压技术, 2023,48(09):142-148,183.
- [5] 王生金,张晓丽,马志刚,等.锻造操作机升降系统性能仿真分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2022,57(03):28-31.
- [6] 王飞宇.重载锻造操作机设计机理及动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [7] 王怀彬.锻造操作机运动学与逆运动学分析[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [8] 李刚,刘德时.锻造操作机大范围顺应运动的动力学行为分析[J]. 机械工程学报, 2010,46(11):22-28.
- [9] 关立文,程宁波.锻造操作机相似模型逆动力学建模与非线性控制器设计[J]. 机械工程学报, 2010,46(11):56-57.
- [10] CHEUNG J, HUNG Y S. Modelling and control of a 2-DOF planar parallel manipulator for semiconductor packaging systems[C]//2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 24-28, 2005, Monterey. CA: ASME, 2005.