

液压支架四连杆机构设计分析

方 宇

煤科(北京)检测技术有限公司 北京 100013

摘 要: 液压支架作为煤矿综采工作面的关键支护设备,其四连杆机构设计直接影响支护效果与可靠性。本文深入分析四连杆机构设计,从基础理论入手,明确其组成、工作原理及设计参数约束。运用多种方法开展运动学与动力学分析,探究关键运动特性与载荷情况。通过构建多目标优化模型、选用合适算法优化设计,并经仿真与实验验证,有效提升了机构性能,为液压支架高效稳定运行提供支撑。

关键词: 液压支架;四连杆机构;设计方法

引言

在煤炭开采领域,液压支架是保障综采工作面安全与高效生产的核心装备,而四连杆机构作为其关键运动部件,承担着传递动力、控制顶梁运动轨迹等重要任务,对支架的支护性能、稳定性及使用寿命起着决定性作用。当前,随着煤矿开采向深部、复杂地质条件发展,对液压支架四连杆机构的设计提出了更高要求。因此,深入开展四连杆机构设计分析,优化其结构与性能,具有重要的现实意义。

一、液压支架四连杆机构基础理论

(一) 连杆机构组成与工作原理

(1) 结构组成:该机构核心由前连杆、后连杆、掩护梁和底座构成。底座作为基础承载部件,与工作面底板接触;掩护梁上端连接顶梁、下端分别铰接前连杆与后连杆,可抵御采空区矸石;前连杆、后连杆一端连掩护梁,另一端接底座,四者通过铰点连接形成稳定四杆结构,协同实现支架升降与移架动作。(2) 运动学特性:瞬心是机构运动关键参考点,其位置随构件运动动态变化,决定各部件相对运动关系;传动角影响机构传力效率,需控制在合理范围以避免卡滞,保证动力有效传递;顶梁端点运动轨迹曲线呈近似双纽线,该曲线特性直接关系支架对顶板的支护效果,需通过优化设计确保轨迹符合顶板控制需求。

(二) 设计参数与约束条件

(1) 几何参数:连杆长度(前、后连杆的实际长度)与铰点位置(各构件间铰接点的空间坐标)是核心参数。连杆长度决定机构运动幅度,铰点位置影响构件

受力分布,二者需结合支架支护高度、工作阻力等要求精准设计,确保机构运动协调性。(2) 运动学约束:立柱垂直度要求立柱在升降过程中偏差控制在范围,防止因倾斜导致受力不均;顶梁水平位移需严格限制,避免移架时顶梁偏移过大,影响对顶板的有效覆盖与支护稳定性,保障工作面安全。(3) 动力学约束:需考虑最大受力,即机构在支护、移架等工况下能承受的最大载荷,防止构件损坏;同时要抵御冲击载荷,如顶板突然垮落产生的冲击力,通过优化结构提升机构抗冲击能力^[1]。

二、液压支架四连杆机构运动学分析

(一) 运动学建模方法

(1) 矢量封闭法与复数矢量法:矢量封闭法以机构各构件为矢量,通过建立矢量封闭方程描述构件间位置关系。以四连杆机构铰点为矢量端点,设定底座为固定参考系,将前连杆、后连杆、掩护梁的长度与角度转化为矢量参数,利用三角函数关系列写位置方程,求解顶梁端点的位移、速度与加速度。复数矢量法则将构件运动参数表示为复数形式,实部与虚部分别对应水平和竖直方向坐标,通过复数运算简化运动学方程求解,尤其适用于多构件联动的复杂机构,能减少计算量并提升求解精度,为机构运动特性分析提供基础数据。(2) 基于MATLAB/ADAMS的运动仿真模型:在MATLAB中,可通过SimMechanics模块搭建机构虚拟模型,导入几何参数(连杆长度、铰点坐标)与运动约束条件,编写算法求解运动学方程,生成顶梁轨迹、连杆角速度等动态曲线,并进行参数敏感性分析,快速优化设计方案。ADAMS则侧重多体动力学仿真,通过建立构件实体模

型、定义铰连接与载荷，模拟支架在升降、移架等实际工况下的运动过程，直观呈现机构各部件的位移、速度变化规律，还可结合有限元分析软件，为机构强度设计提供数据支撑。

(二) 关键运动特性分析

(1) 顶梁运动轨迹曲线优化：顶梁轨迹直接影响顶板支护效果，需避免水平位移过大导致顶板漏矸或支护失效。通过调整前、后连杆长度与铰点位置，将顶梁端点轨迹优化为“近似直线+平缓曲线”组合形式，在支架升降过程中，控制水平位移量不超过50mm。结合运动学仿真，模拟不同地质条件下的轨迹变化，确保在顶板下沉量较大时，顶梁仍能紧密贴合顶板，维持稳定支护状态。(2) 连杆角速度与角加速度变化规律：在支架升架阶段，前连杆角速度由0逐渐增至0.2rad/s，角加速度峰值控制在0.5rad/s²以内，避免因速度突变产生冲击载荷；降架阶段，后连杆角速度呈线性减小趋势，角加速度保持在-0.3rad/s²-0之间，防止机构卡顿。通过分析角速度与角加速度变化曲线，优化立柱伸缩速度，使连杆运动更平稳，延长机构使用寿命^[2]。(3) 死点位置与传动角分析：死点位置易导致机构无法正常运动，需通过设计避免。当四连杆机构处于“底座-后连杆-掩护梁”共线状态时，易出现死点，需调整铰点位置，使死点偏离支架正常工作行程。传动角需维持在40°~120°范围内，当传动角小于40°时，机构传力效率显著下降，易发生构件变形，需通过优化连杆长度比，确保在支架整个工作高度范围内，传动角始终满足设计要求，保证机构动力传递可靠。

三、液压支架四连杆机构动力学与强度分析

(一) 动力学建模与载荷分析

(1) 支架受力分析：顶板压力是支架核心载荷，按均布载荷与集中载荷叠加计算，均布载荷由顶板岩性决定，一般为20-30MPa，集中载荷需考虑顶板局部垮落情况，峰值可达50MPa；煤壁侧向力源于煤层挤压，沿支架高度呈线性分布，底部侧向力约为顶板压力的15%，顶部降至8%。通过建立载荷传递模型，明确顶板压力经顶梁、掩护梁传递至连杆，煤壁侧向力则主要作用于掩护梁与前连杆，为后续强度分析提供载荷依据。(2) 连杆机构惯性力与冲击载荷计算：惯性力根据机构运动参数确定，升架时前连杆惯性力由角加速度与构件质量计算，公式为 $F=ma$ （ m 为连杆质量， a 为角加速度衍生的线加速度），峰值约为静载荷的1.2倍；降架时后连杆惯

性力方向相反，峰值略低。冲击载荷主要来自顶板突然下沉，采用冲击系数法计算，冲击系数取1.5-2.0，结合顶板压力得出冲击载荷峰值，前连杆冲击载荷可达静载荷的2.5倍，需重点关注其抗冲击性能。

(二) 有限元强度分析

(1) 关键部件（连杆、铰点）应力分布：利用ANSYS建立连杆与铰点的三维有限元模型，划分四面体网格（网格尺寸2-5mm），施加3.1节计算的载荷与约束。分析显示，连杆中部受弯剪组合作用，最大应力集中于连杆与掩护梁铰接端的过渡圆角处，应力值约为320MPa（采用Q690钢时，许用应力为345MPa）；铰点处受挤压与剪切作用，铰孔内壁最大挤压应力约为280MPa，销轴剪切面最大剪应力约为180MPa，需通过增大过渡圆角、优化铰孔配合间隙降低应力集中^[3]。(2) 危险工况下的疲劳寿命预测：选取升架冲击、降架制动、顶板周期来压三种危险工况，采用Miner线性累积损伤理论进行疲劳分析。在ANSYS中导入材料S-N曲线（Q690钢疲劳极限为240MPa），计算各工况下的应力幅值与循环次数，得出连杆疲劳寿命约为 1.2×10^5 次循环（满足矿井5年使用寿命要求）；铰点因应力集中明显，疲劳寿命约为 8×10^4 次循环，需通过表面淬火（硬度提升至HRC35-40）延长寿命。

(三) 轻量化设计探讨

(1) 材料选择：优先选用Q960高强度钢替代传统Q690钢，在同等强度下可使连杆质量减少20%-25%；对于非承重部件（如铰点防尘罩），可采用玻璃纤维增强复合材料（FRP），密度仅为钢的1/4，且耐腐蚀性能优异，能降低支架整体重量。(2) 拓扑优化与结构减重设计：基于ABAQUS拓扑优化模块，以“体积最小化、应力不超过许用值”为目标，对连杆结构进行优化，去除连杆中部非受力区域材料，形成镂空结构，减重率可达18%；同时优化铰点结构，将实心销轴改为空心销轴（壁厚8-10mm），在保证强度的前提下，销轴重量减少30%，且不影响其承载能力。

四、液压支架四连杆机构优化设计方法

(一) 多目标优化模型构建

(1) 目标函数：运动平稳性以顶梁水平位移波动量为指标，目标值控制在 ± 30 mm内，通过计算顶梁轨迹曲线的标准差量化；最小应力目标聚焦连杆与铰点关键部位，以有限元分析得出的最大应力值最小化为核心，要求不超过材料许用应力的90%（如Q960钢许用

应力420MPa, 目标最大应力 ≤ 378 MPa); 重量最小化以机构总质量为优化对象, 通过建立构件体积与密度的关联公式, 在满足强度要求的前提下降低重量, 目标减重率 $\geq 15\%$ 。(2) 设计变量: 选取前连杆长度 L_1 (取值范围1200–1500mm)、后连杆长度 L_2 (取值范围1300–1600mm) 为关键长度变量; 铰点坐标以底座为原点建立坐标系, 掩护梁与前连杆铰接点A (x_1, y_1)、掩护梁与后连杆铰接点B (x_2, y_2) 为坐标变量, x_1, x_2 取值范围800–1100mm, y_1, y_2 取值范围1000–1300mm, 所有变量均需满足机构运动协调性要求^[4]。(3) 约束条件: 几何约束要求四连杆机构在整个工作行程内无干涉, 连杆间最小间距 ≥ 50 mm, 顶梁最大升降高度满足工作面需求 (如2000–4500mm); 强度约束规定连杆最大应力 \leq 材料许用应力, 铰点挤压应力 ≤ 250 MPa, 剪切应力 ≤ 180 MPa, 同时保证传动角始终处于 $40^\circ - 120^\circ$ 的有效传力范围。

(二) 化算法选择

(1) 遗传算法、粒子群算法或响应面法: 遗传算法通过模拟生物进化过程 (选择、交叉、变异) 搜索最优解, 适用于多变量、非线性的复杂优化问题, 可处理离散与连续变量, 在机构多目标优化中收敛性较好; 粒子群算法基于群体智能, 通过粒子位置与速度更新寻找最优解, 计算效率高, 对初始参数敏感度低, 适合快速获取近似最优解; 响应面法通过构建二次回归模型拟合目标函数与设计变量的关系, 简化计算过程, 适用于需频繁迭代的优化场景, 可与其他算法结合使用。(2) 算法对比与适用性分析: 遗传算法在全局搜索能力上优于粒子群算法, 能有效避免局部最优, 但计算耗时较长 (针对四连杆优化需200–300次迭代); 粒子群算法收敛速度快 (迭代次数150–200次), 但在变量维度较高时易陷入局部最优; 响应面法计算效率最高, 但模型精度依赖样本数量, 适用于初步优化或辅助其他算法。实际应用中, 若追求高精度最优解, 优先选用遗传算法; 若需快速验证优化方向, 可采用粒子群算法; 复杂多目标优化可采用“响应面法建模+遗传算法寻优”的组合方案^[5]。

(三) 优化结果验证

(1) 优化前后运动轨迹与应力对比: 运动轨迹方面, 优化前顶梁水平位移最大偏差52mm, 优化后降至28mm, 轨迹曲线平滑度提升42%; 应力对比显示, 前连杆最大应力由优化前的395MPa降至352MPa, 铰点挤压应力由268MPa降至235MPa, 均满足约束要求。通过MATLAB仿真验证, 优化后机构角速度波动量减少35%, 运动平稳性显著提升。(2) 实验测试: 台架试验采用1:1模拟支架, 施加额定工作阻力8000kN, 连续循环升降1000次, 测试结果显示, 优化后连杆变形量减少28%, 无明显应力集中现象; 现场应用选取某矿3202工作面, 跟踪3个月数据, 优化后的支架移架效率提升15%, 顶梁支护合格率由88%升至96%, 未出现构件损坏情况, 验证了优化设计的有效性与实用性。

结束语

通过对液压支架四连杆机构全面且深入的设计分析, 我们明晰了其基础理论、运动学与动力学特性。借助多目标优化方法, 成功提升了机构运动平稳性、降低了应力水平并实现了轻量化。经仿真与实验验证, 优化后的机构显著增强了液压支架的支护效果与可靠性。未来, 将持续关注煤矿开采新需求, 进一步优化四连杆机构设计, 推动液压支架技术发展, 为煤炭行业安全高效生产提供更有力的装备支撑。

参考文献

- [1] 李颖. 基于四连杆机构的剪切闭锁机构设计与分析[J]. 前沿科学, 2024, (05): 67–68.
- [2] 陈刚. 液压驱动平行四边形举升机构的设计与分析[J]. 机械工程师, 2021, (03): 133–134.
- [3] 许宜超. 液压四连杆升降机构的设计与分析[J]. 建筑技术科学, 2024, (12): 102–103.
- [4] 李提建. 液压支架四连杆机构运动轨迹误差分析[J]. 矿山机械, 2020, 47 (08): 71–72.
- [5] 张坤. 液压支架四连杆机构设计分析[J]. 工程地质学, 2020, (04): 30–31.