

某重载锻造操作机运动学及动力学分析研究

撰文 / 太原重工股份有限公司技术中心 李永亮

一、引言

锻造操作机作为与锻造压机协调作业的重要辅助设备，主要用于夹持锻件来配合主机完成各种锻造工艺或坯料的装出炉、运输和堆放。它的主要功能是实现锻件的快速位置控制，完成夹持运送锻件、锻压过程顺应等操作任务。锻造操作机与加工装备协调作业，可以大大提高制造能力、制造精度、生产效率和材料利用率。如果操作机辅助操作动作时间较长，与快速锻造液压机锻造速度不相匹配，将导致整个锻造循环周期延长，限制快锻液压机组快速性优势的发挥，进而影响整套机组的生产效率。因此，操作机的运动灵巧性、动态灵巧性、力承载性能和末端刚度性能等对于产品设计就显得尤为重要。加之重载操作机制造成本高、设计与制造周期长，通常采用单台制造模式，很难通过物理样机实验对其操作性能进行验证，设计高精度、高效率锻造操作机存在一定的难度。本文将应用虚拟样机技术，通过运用多体动力学仿真分析程序 RecurDyn 对新设计的某重型锻造操作机进行运动学及多体动力学仿真分析，仿真校核操作机各机构在实际工况中的运动特性及动力特性。模拟现实环境下 400KN 操作机系统的运动和动力特性，精确计算出钳杆机构的设计参数，探索一条应用现代设计技术确定或校核操作机动态性能参数的有效途径，为操作机的设计提供理论依据，也为研究同类产品提供参考。

二、锻造操作机工作特性分析

锻造操作机的主要功能是夹持锻件配合压机完成锻造工艺动作，具有载荷大、惯量大和自由度多等特点。其工作过程可分为锻压前、锻压中和锻压后三个时段。在锻压前和

锻压后时段，操作机需要完成的工作主要是实现锻件的移动和快速位置调整。而在锻压时段，操作机主要是起顺应作用，即操作机在水平方向应能顺应受压锻件充分发生变形，在垂直方向能够精确跟踪压机上砧的位移。在操作机设计时，要求操作机在水平方向的强度要尽量小一些，以便能被动顺应锻件形变，使锻件的变形可以达到更好地效果。在垂直方向，要求操作机末端的刚度要尽可能大，以保证夹钳能够将压机上砧的位移量控制在合理范围内。

由此可见，力承载性与顺应特性是大型锻造操作机的核心性能。锻造操作机机构速度性能、加速度性能等运动特性和力承载性能等结构动力学特性是其工作特性的决定性因素。特别是锻造工艺对力承载性能和末端刚度性能的方向性要求及夹钳轴向的被动顺应能力对保护操作机的机构本体非常关键。应用虚拟样机技术模拟锻造操作机的运动学和动力学特性是十分必要的。

三、仿真模型的建立

400KN 操作机本体结构主要由大车行走驱动装置、机架和夹钳装置三大部分组成。其中，夹钳机构直接决定了操作机的工作空间、最大负载及动态响应特性，是锻造操作机的核心部分。它包括钳杆装置、升降、摆移和缓冲装置等部件，主要完成运送锻件、及时调整锻件位置、锻件顺应等任务。应用 NX7.5 建立 400KN 操作机夹钳机构仿真模型如图 1 所示。

在建立仿真模型时，先将上述 400KN 操作机本体虚拟样机模型经过力学等效简化处理后，导入大型多体动力学仿真分析软件 RecurDyn，按实际工况中各油缸速度、行程和重量等真实工作参数施加边界条件；再根据运动仿真和动力

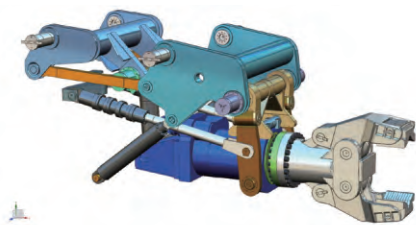


图1 400kN 操作机夹钳机构仿真模型示意图

学仿真的不同要求建立运动仿真模型和动力学仿真载荷工况。

四、运动学仿真分析

锻造操作机通常在高温重载条件下工作，工作条件恶劣、工况复杂。锻造操作机的运动灵巧性、动态灵巧性主要体现在其运动性能方面。在设计操作机时，如不能精确计算出操作机钳杆机构的设计参数，就会影响到产品的设计质量。另外，由于所夹持锻件距夹钳末端较远，直接测量夹钳末端位姿非常困难。因此，对夹钳平行机构进行运动学特性分析，研究夹钳末端位姿随锻件运动的变化规律，不失为一种实现操作机高精度控制的有效方法。

在建立400kN运动学仿真模型时，首先，按照实际工况，将操作机各主要部件分别创建为不同的连杆以及定义约束连杆运动的运动副，共创建转动副、移动副等共22个。然后，根据实际工况定义运动驱动，使提升油缸达到最大行程，实现操作机平行升降动作；并由此求解出操作机夹持锻件时主要部件油缸、夹钳装置的运动轨迹、运动参数、钳杆装置速度变化趋势、夹紧油缸所需行程及钳臂及连接杆等需要转动的角度变化等，为进一步做动力学分析打下基础。其中，模拟夹持的锻件参数为：直径1270mm，长度4000mm，重量40t。夹持锻件时夹钳装置运动仿真分析结果及平行升降时各主要部件运动轨迹如图2、3所示。

通过对400kN操作机夹钳装置夹持锻件过程进行运动

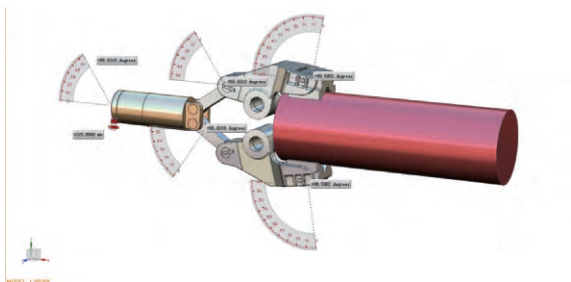


图2 400kN 操作机夹钳装置夹持锻件时运动实时参数示意图

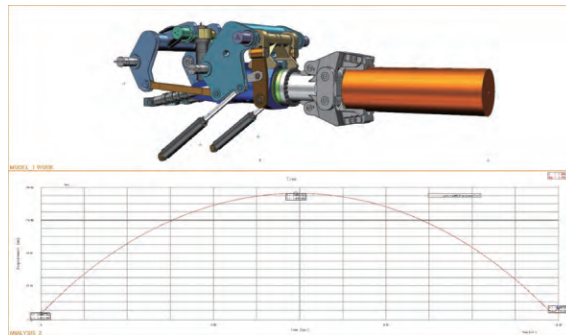


图3 400kN 操作机平行升降时缓冲缸活塞杆相对于缸筒销轴位移变化曲线

学仿真分析可知，当操作机在初始装配位置时即两钳口旋转中心距离为2176mm时，夹紧缸动作推动连接杆使钳臂旋转夹持直径为1270mm的锻件时，夹紧缸活塞所走行程为125mm，连接杆旋转角度为 14.5902° ，两钳臂旋转角度为 13.142° ，均在设计范围之内。

由以上运动学分析结果可知，当400kN操作机平行升降时，连接杆和倾斜缸始终与初始位置平行，提升缸转角趋势为由小变大，再变小。各主要部件如提升油缸、缓冲油缸、倾斜油缸、夹钳装置、钳杆装置、升降、摆移和缓冲装置运动轨迹均为圆弧曲线，其中，夹钳装置运动轨迹半径为1746.5605mm；夹钳装置、钳杆装置、锻件与地面水平夹角为 179.9839° ，非常接近水平。活塞杆相对于缸体的运动轨迹近似为开口向下的抛物线。为便于分析比较，现将400kN操作机平行升降运动仿真结果如表1所示。

五、动力学仿真分析

锻造操作机在整个操作过程中都承受锻件自重和锻压变形抗力，因此，力承载性能是体现操作机工作能力的重要指标，主要体现在对力承载性能的方向性要求和末端刚度性能的方向性要求。动力学分析的目的，主要是为设计提供安全计算的理论基础。

在进行动力学分析时，锻件重量为40t。根据实际工况分为三种情况。

(1) 夹持锻件从低位进行平行举升到最高位，提升油缸达到最大行程1392mm，求解各主要部件受力变化趋势及大小。

(2) 夹持锻件升到最高位行程后进行锻造，提升油缸达到最大行程1392mm，根据设计参数，对两提升油缸施加

表 1 400KN 操作机平行升降运动仿真结果汇总表

仿真对象		前传动杆	后传动杆	侧向摆动架	连接杆	倾斜缸	缓冲缸	提升缸
仿真结果								
相对于初始位置旋转变角度(°)	提升油缸行程 1392mm	61.772	61.799	8.4437	0	0	24.722	0.3863
	提升油缸行程 696mm	30.738	30.752	0	0	0	12.304	3.904

150t 提升力，作用时间为 15s，仿真求出砧子对锻件的锻造力的大致范围及变化趋势。

(3) 夹持锻件举升到中位行程后进行锻造，提升油缸达到最大行程 696mm，根据设计参数，对两提升油缸施加 150t 提升力，作用时间为 15s，仿真求出砧子对锻件的锻造力的大致范围及变化趋势。

根据上面 2 种工况，建立适用于本次计算工况的连杆和运动副，根据实际工作循环情况，分别进行多体动力学仿真分析，求解出 400KN 操作机中各主要部件的动力特性变化，如空载举升锻造力、前吊点受力等。400KN 操作机动力学仿真模型示意图及仿真分析结果如图 4 ~ 6 所示，将各工况下的动力学仿真分析结果如表 2 所示。

通过对 400KN 操作机进行动力学仿真分析可知，当操作机夹持重约 40t、直径为 1270mm 的锻件进行平行升降时，

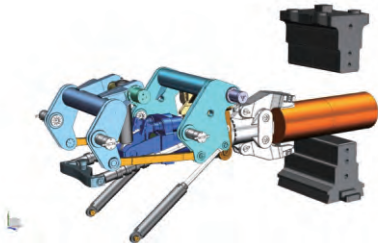


图 4 400KN 操作机夹持锻件升到最高位后进行锻造示意图

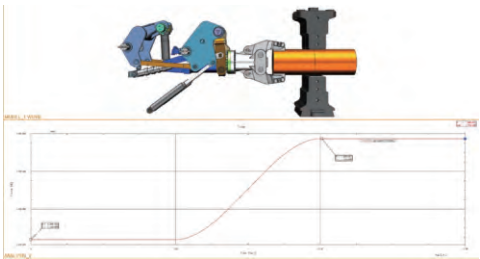


图 5 400KN 操作机夹持锻件升到最高位后提升油缸提升力随时间变化趋势图

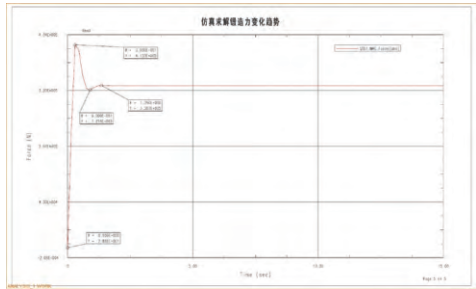


图 6 400KN 操作机高位锻造时，锻造力变化图

提升油缸从低位伸到高位，提升油缸受力等变化近似为正弦曲线，各主要部件受力变化范围均不大。对 400KN 操作机提升油缸施加 150t 的提升力，经过动力学仿真分析反推出的锻造力范围约为 312.9KN ~ 413.3KN。这与锻造压机实际测试出的力非常接近。

六、结语

通过本项目的研究，应用仿真分析技术，更准确地求解出实际工况中 400KN 操作机的运动规律及机构中各部件的动力特性变化，对该操作机整体运动特性及动力学特性有了更深入的了解，为同类型大型操作机的设计、改进和优化分析等提供较准确、真实的参考数据。本文的研究方法可以用于其它设备操作机夹钳装置运动学动力学分析研究。

表 2 400KN 操作机各工况下多体动力学仿真结果汇总表

仿真结果		提升油缸受力 (KN)		缓冲油缸受力 (KN)		倾斜油缸(后吊点) 受力 (KN)		前吊点受力 (KN)		锻造力 (KN)	
		最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
工况 1	夹持锻件举升至最高位	1106.7	1083.4	11.7	11.7	703.9	703.2	1457.8	1457.0	—	—
工况 2	举升锻件至最高位进行锻造	1500	1500	13.6	11.7	1367.4	1261.2	2505.4	2343.7	413.3	329.9
工况 3	举升锻件至中位进行锻造	1500	1500	14.3	11.7	1346.9	1233.4	2398.0	2303.3	412.0	312.9