DOI: 10.3901/JME.2019.14.186

系列化液压挖掘机数字样机研究*

葛磊¹ 董致新¹ 李运华² 权龙¹ 张晓刚¹ 赵斌¹

(1. 太原理工大学新型传感器及智能教育部实验室 太原 030024;

2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘要: 液压挖掘机是典型的多执行器工程装备,其特点是执行器惯性大和单泵驱多执行器,工作过程中负载大范围变化,在设计中难以充分了解整机工作特性,导致系统设计效率低、系统运行特性差等问题。采用数字化样机设计方法可以有效提高系统设计效率,但目前传统一维仿真设计方法不能实时计算作用在各执行器上的等效质量与时变转动惯量,难以将作用在铲斗上的载荷实时分配到各液压缸上,存在负载工况模拟不准确和动态特性失真问题。针对上述问题,提出采用基于元件试验或真实物理结构的数字样机设计方法,实现液压挖掘机整机机、电、液、控制系统及载荷的实时信息交换和协同计算,在6 t数字样机成熟技术基础上,拓展研发20 t、76 t、260 t、390 t挖掘机数字样机平台,并成功开发6 t挖掘机进出口独立控制系统、76 t高效能液压挖掘机和国内首台260 t和390 t超大型挖掘机,对科研及生产具有重要的指导意义。

关键词: 液压挖掘机; 数字样机; 参数化建模; 变转动惯量; 矿用液压挖掘机

中图分类号: TH137

Research on Digital Prototypes of Serial Hydraulic Excavators

GE Lei¹ DONG Zhixin¹ LI Yunhua² QUAN Long¹ ZHANG Xiaogang¹ ZHAO Bin¹

(1. Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Hydraulic excavator is a typical multi-actuator engineering equipment, which is characterized with large inertia actuator and single pump driving multi actuators, and its load changes largely. Thus, it is difficult to fully understand the operating characteristics before the design, which leads to low efficiency and poor performance. The digital prototype can effectively improve the efficiency of system design. However, it is difficult to calculate the equivalent quality effect and variable inertia applied on each actuator in real time with the traditional one-dimensional simulation technology, result in lack of precision and distortion of dynamic characteristics and it is difficult to simulate the real system characteristics. Aiming at the above problems, the digital prototype design method based on component test and real physical structure is proposed. With this method, real-time information exchange and collaborative computing between the mechanical structure, electric system, control system and the load can be realized. Firstly, a digital prototype of a 6 t hydraulic excavator is designed and it is modified with detail tests. And then, it is introduced to develop the digital prototype of 20 t, 76 t, 260 t, 390 t excavators. And based on the digital technology, a 76 t high efficiency hydraulic excavator and the first domestic 260 t and 390 t ultra large excavators, are developed.

Key words: hydraulic excavator; digital prototypes; parametric modeling; variable inertia; mining hydraulic excavator

0 前言

液压挖掘机是典型的工程作业装备,被广泛应用于工程建设和矿山开采中,其典型特点是工作环境多变、负载情况不可预测,以及多执行器耦合运动,整机是一个多输入、多输出和多参数

的强耦合系统。在技术攻关和工业生产研发过程中,理论分析难以充分考虑机械机构、电气、液压系统及相关附件等各子系统之间的相互影响。尤其是近年来,电控技术、新能源技术等的发展及其在液压挖掘机上的应用,如进出口独立控制、电液负载敏感控制、智能化控制系统以及混合动力系统等^[1-3],显著提升了液压挖掘机驱动和控制复杂度,对液压挖掘机新机型研发的快速性和高效性也提出更高的要求。

* 国家自然科学基金(U1510206)和中德国际合作项目(2015DFA70210)资助项目。20181025收到初稿,20190510收到修改稿

基于数字化样机技术的研发方法,可以综合考虑整机系统级和元件级耦合特性,可对设计备选方案进行分析和评价,对系统的能耗规律、能量平衡和热平衡特性进行预测,为整机集成设计方案和控制策略优化提供指导,采用仿真技术可使复杂机电液产品的设计和研制周期缩短20%以上^[4]。

目前,基于数字样机的液压挖掘机研究,主要集中在机械结构设计和动力系统设计两个方面。在机构设计方面,主要是通过机构学和运动学方法对液压挖掘机工作装置动态性能进行评价和优化,常用的运动和动力学建模方法有牛顿-欧拉方程和拉格朗日方程等。FRIMPONG等^[5]利用牛顿-欧拉方程建立大型矿用液压挖掘机的动态仿真模型,分析执行机构的受力。徐兵等^[6]从运动学的角度分析三种不同状态空间变量之间的关系,并在Simulink中建立挖掘机的运动学模型。张桂菊等^[7]在ADAMS中构建液压挖掘机机械结构模型,通过添加经验公式计算的挖掘力对挖掘机工作装置的受力进行分析。

DING等^[8]设计一种液压铲工作机构,并建立Matlab数学仿真模型,结果表明新设计的结构可以有效扩大液压铲工作范围和提升挖掘力。然而采用这种方法需要依赖经验公式,未能考虑液压系统和实际工作中的动态负载对工作装置受力的影响。针对该问题,张卫国等^[9]开展以试验数据为驱动的液压挖掘机工作装置瞬态动力学仿真研究,结合应力测试结果验证有限元计算的准确程度,为结构优化设计提供依据。

在动力系统设计方面,虚拟样机应用相对较多,主要集中在动力源能耗特性及节能控制、液压系统节能控制和整机匹配三个方面。动力源能耗特性和节能控制主要包括动力源能耗特性预测及新型节能控制等。杨世平等^[10]基于发动机台架试验数据构建液压挖掘机动力源Simulink仿真模型,通过检测负载功率改变发动机转速使其工作在高效区域,提高发动机能量效率。CASOLI等^[11]在Amesim中构建可以预测发动机燃油消耗率的模型,并通过试验验证了模型准确性。杜磊等^[12]在Simulink中建立挖掘机发动机模型,设计以超级电容作为储能元件的并联式混合动力系统挖掘机及其控制策略。何清华等^[13-14]均对基于AMESim建立虚拟样机模型进行仿真研究,但这种方法,不能实时计算在各执行器上的等效质量与时变转动惯量,难以将作用在铲斗上的载荷实时分配到各液压缸上,存在负载工况模拟不准确和动态特性失真的问题。2003年以后,太原理工大学权龙教授团队和潘双夏教授团队等采用AMESim、ADAMS和Simulink等软件建立挖掘机

液压系统、机械结构与控制系统等互为驱动的联合仿真模型,解决以往单一维度的仿真设计方法不真实的问题^[15-17]。但多软件联合仿真存在时间步长难以统一的问题,易导致仿真出错并且需要更多的资源解决通信问题。

为了解决上述问题,在SimulationX软件环境中,将液压挖掘机机、电、液、控制不同学科模型在同一界面下整合,构建基于元件试验和真实结构的液压挖掘机数字样机,并结合试验数据提高了仿真精度。历经多年发展,拓展形成6t、20t、76t、260t以及390t液压挖掘机元件及整机多学科参数化数字样机平台。在此基础上,将6t液压挖掘机建模方法和工作装置动力学与疲劳寿命分析方法拓展应用到260t液压挖掘机上,与太原重工合作开发国内首台260t和390t液压挖掘机^[18]。

1 液压挖掘机机电液耦合数字样机

1.1 液压挖掘机基本组成

图1所示为液压挖掘机的基本组成,包括动力源、液压系统、手柄、机械结构以及相关附件等。

图1 液压挖掘机基本组成

在工作过程中,操作员首先根据工作情况设定挖掘机工作转速,然后通过操控手柄对阀和泵进行控制,根据液压系统工作原理,泵输出流量通过液压阀进行分配和管理,进而推动执行器工作。

1.2 液压挖掘机基本部件建模

1.2.1 动力源建模

液压挖掘机动力源主要为整机提供动力,可以采用柴油发动机,也可以采用电动机。一般情况下,液压挖掘机上主要采用定转速动力源,其转矩与负载匹配,也有部分研究采用变转速动力源,其转速和转矩均随负载变化而变化。以发动机为例,图2

所示为液压挖掘机发动机工作原理。

图 2 发动机工作原理

其具体工作原理是，当负载转矩小于设定转速下发动机可输出最大转矩时，发动机油门开度随负载转矩变化而变化，转速不变；当负载转矩大于当前转速下发动机可输出最大转矩时，发动机转速下降直至达到转矩平衡。

动力源建模可以采用基于真实物理结构模型，但其工作过程比较复杂，存在多种能量转换，并且外界影响因素也较多，因此在模型中很难用一个精确的物理模型来描述。一般情况下，可以基于其速度特性、输出转矩和燃油消耗率(或电效率)等试验数据，采用查表法构建其仿真模型。如图 3 所示为某 375 kW 级发动机的外特性和燃油消耗率曲线，图中数字为发动机的燃油消耗率，单位为 g/kWh。

图 3 发动机外特性及燃油消耗曲线

图 4 所示为采用上述方法构建的发动机模型，该模型可以反映发动机速度波动、负载突变时速度和转矩变化以及不同工况下燃油消耗。

图 4 参数化发动机模型

1.2.2 液压泵建模

液压挖掘机上使用的液压泵，主要有正流量控制泵、负流量控制泵和负载敏感泵等。图 5 所示为某机液负载敏感变量泵照片及工作原理，其可以实现系统负载敏感控制、恒功率控制和压力切断功能。

图 5 负载敏感泵照片及原理

液压挖掘机工作过程中，其动态特性主要受液压泵影响。因此，需要充分考虑其动态特性，可通过数学方程建立其传递函数或者通过液压泵变量控制物理结构构建其仿真模型。图 6 所示为基于 LS 控制阀数学模型的负载敏感泵模型。

图 6 负载敏感液压泵动态模型

液压挖掘机工作过程中，负载大范围变化，液压泵参数与挖掘机运行特性相互耦合影响，为了研究挖掘机工作过程中负载对液压泵柱塞腔压力等的影响，需要构建能够反映液压泵真实结构的模型，对系统进行分析。图 7 所示为构建的基于单柱塞吸排油负载敏感泵模型。该模型，与真实液压泵工作方式一致，在吸排油口的柱塞数目周期性变化，每个柱塞和泵整体压力流量都存在脉动，能够对泵动静态工作特性、系统匹配和油液发热提供数据支撑。

图 7 基于单柱塞吸排油的负载敏感泵模型

1.2.3 多路阀建模

液压挖掘机由于具有多个执行器，一般采用多路阀进行控制，图 8 所示为 LUDV 系统多路阀的一联，包括主阀芯、补偿阀和次级补油阀等。

图 8 LUDV 系统多路阀

为了满足工程机械平稳运行需求，主阀芯结构复杂，大量采用非全周节流型式，通过其阀口节流边的流量可以用式(1)描述。

$$q = C_d \cdot x \cdot W(x) \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中， C_d 为流量系数； x 为阀芯位移； $W(x)$ 为阀芯面积增益； Δp 为阀口两端压力差； ρ 为液压油密度； q 为阀口流量。

由式(1)可知，通过阀口的流量可以用阀芯节流面积增益及其两端压差计算，因此在建模过程中，可以根据阀芯物理结构计算出阀口面积增益，进而根据两端压差计算出通过阀口的流量；也可以通过流场或试验方法直接获得阀口流量与其位移和压差的关系，进而根据其工作状态确定通过阀芯的流量。

图 9 所示为基于真实面积参数的多路阀仿真模型，在建模过程中首先对已有多路阀尺寸进行了测绘分析，根据理论推导，获得了多路阀面积数据，将其导入对应的节流口，形成图 9 所示的模型。采用该模型，可以用来分析多路阀不同面

积增益对系统动态特性的影响，进而优化多路阀节流面积。

图 9 多路阀数字模型

1.2.4 机械结构建模

液压挖掘机结构复杂，是典型的多关节系统，其动力学特性主要受关节位置、转动惯量以及质心位置影响，也是挖掘机机构设计的重点。为了充分反映液压挖掘机真实受力以及其对系统动态特性的影响，需要按其真实物理结构进行建模，获得与真实受力情况一致的仿真模型。在建模过程中，根据其物理尺寸在三维建模软件中建立整机的机械结构模型，然后将模型转换为 SimulationX 支持的文件格式，并计算出各结构件的质心与转动惯量，导入 SimulationX 中，形成图 10 所示机械结构模型。

图 10 挖掘机 MBS 模型

1.2.5 手柄在环模型

液压挖掘机工作过程中，操作员是不可缺少的环节，不同操作员的操作模式不同，液压挖掘机动态特性也不一致，即操作员的操作手法对机器运行

特性影响较大。通过 SimulationX 开放的 Modelica 接口, 构建了图 11 所示的手柄在环模型。

图 11 手柄在环模型

该模型可以通过数据接口, 将实际的操作信号传递给仿真模型, 从而基于手柄实际信号对液压挖掘机运行特性进行分析。

1.3 液压挖掘机整机模型验证

将上述建立的元部件模型, 通过模型接口有机连接起来即可获得图 12 所示液压挖掘机整机模型, 包括动力源、液压系统、操控手柄以及机械结构。

图 12 液压挖掘机整机系统模型

该模型中液压模型为整机系统提供动力、三维系统模型将工作机构的负载力同步传递给液压系统, 很好地解决了使用多款分析软件仿真时间步长不同步的问题。

为了验证建立模型的准确性, 对某 6 t 液压挖掘机进行了试验和仿真对比, 图 13 所示为采用 LUDV 系统, 动臂完整举升与下降一次, 动臂液压缸位移及两腔压力的试验与仿真曲线。

图 13 动臂液压系统仿真试验对比

由图 13 中曲线可知, 仿真计算结果与试验测试结果非常接近, 表明仿真模型具有较高的准确性。试验曲线, 4~7 s, 由于试验液压缸基本达到最大位移, 无杆腔压力达到系统最大压力, 而仿真位移未达到最大位移处, 在这一时间段两者差异较大。并且图 13 中容易看出, 动臂液压缸在举升工作时, 其无杆腔和泵的压力波动都较大, 幅值可达 6 MPa, 波动频率为 2 Hz, 波动持续时间近似占整个动作的 50%, 对液压系统冲击较大, 这也是重载举升系统的通病。

2 液压挖掘机整机模型应用

2.1 进出口独立系统仿真分析

在完善了 6 t 液压挖掘机 LUDV 系统模型的基础上, 针对原机动臂举升过程和回转制动过程系统压力波动大、四边滑阀压力损失大等问题, 开展了基于压力流量复合的进出口独立控制液压挖掘机仿真研究。

为了降低动臂举升过程的压力冲击, 设计了压力与流量复合控制策略^[19], 首先根据手柄操控信号设定系统需求的流量, 并根据需求流量借鉴负载敏感原理计算出当前流量下需求的泵压力, 并将这两个信号传递给电比例压力流量复合泵, 液压泵输出需求的流量。图 14 为采用压力流量复合控制策略和

图 14 压力流量复合控制动臂举升

单纯流量控制策略的仿真数据,两次仿真除控制策略不同外,其他参数均一致。

两次仿真泵输出流量一致,均约为 50 L/min。由图 14 容易得到,单纯流量控制液压缸 A 腔压力波动较大,频率约为 2.5 Hz。而采用压力流量复合控制策略可以有效地提高系统压力响应阻尼比,液压缸 A 腔压力基本不存在波动。因此,该控制策略是有效的。

2.2 基于功率匹配电动液压挖掘机节能

液压挖掘机是典型的多执行器液压工程装备,其动力源功率往往按系统最大功率配置,并且按额定转速运行,导致在部分负载和怠速工况时,能量效率较低,当采用发动机作为液压系统动力源时,更会带来大的排放污染。为了解决上述问题,提出了基于功率匹配的转速与排量匹配节能电动液压挖掘机方案,并设计了协同电动机分段转速和液压泵连续摆角控制的功率匹配策略,一方面使电动机和液压泵都工作在较高效率区,另一方面减少电动机起制动次数,降低在移动工程装备应用中对供电设备的需求和冲击,满足液压挖掘机高动态、高效率、零排放工作要求。为了验证提出方案的可行性,在液压挖掘机电动化改造前,对系统方案进行了仿真研究,通过实验室获得的电动机各种转速和负载转矩下的效率构建电动机数字样机模型,并结合上述进出口独立液压挖掘机模型开展联合仿真研究。

图 15 为在同样工况下和动作下,完成一次挖掘循环,采用柴油机、常规定转速电动机和变转速变频电动机驱动变量泵成本数据。

图 15 柴油驱动和电动成本对比

图 15 中数据柴油费用按 6.2 元/L、电费按 1 元/kW·h。由图 15 可知,较柴油机系统,采用电动机驱动完成相同工作可以降低运行成本 25.8%,而进一步采用设计的协同控制策略,较柴油机运行成本可以降低 51.8%。根据仿真研究结果,在后期开展了相关研究^[20],试验结果表明仿真结果具有较高的可信度,能比较真实地反映液压挖掘机整机系

统能量损耗特性。

3 液压挖掘机工作装置动力学

液压挖掘机工作装置是典型的多关节、机液刚柔耦合系统,在工作过程中,受力情况复杂,其结构设计主要依赖经验。一般为了满足外界载荷大、范围快速变化的工作要求,设计的工作装置自重相对较大,导致在高频次工作过程中能量损耗较大,如动臂工作时的势能损失。因此,为了辅助设计工作装置结构,尤其是在无经验可循的新机型开发时,实现液压挖掘机轻量化高可靠运行,需要对工作装置的可靠性和耐久性进行研究。

以某 6 t 小型挖掘机为研究对象,首先建立液压挖掘机整机的 SimulationX 仿真模型、Patran 有限元模型和 Fatigue 寿命分析模型,对工作装置应力应变及寿命进行分析,然后将通过试验实测获得挖掘过程中各液压缸的位移和压力随时间的变化曲线,为挖掘机工作装置的结构有限元分析和疲劳分析提供试验基础。

3.1 挖掘机工作装置应力变形

为了研究正常挖掘时,液压挖掘机工作装置的应力变形,首先开展了试验研究,在液压挖掘机工作装置上贴设应变片、液压泵出油口和液压缸油口装设压力传感器以及在液压缸上安装位移传感器,采集正常挖掘时液压系统压力、液压缸位移以及各应变点电压。将采集的系统压力和位移经理论计算导入有限元软件 Patran 中作为驱动力,通过仿真可以获得动臂和斗杆的应力云图,如图 16 所示为斗杆挖掘时工作装置应力云图。

由图 16 可知,斗杆液压缸挖掘时,动臂上 B 点附近产生应力集中,最大应力为 258 MPa,该销绞点所在的板上应力也较大,最大应力可达 200 MPa,其他各处应力相对较小,应力均在 100 MPa 以下;斗杆上 D 点处出现应力集中,最大应力为 170 MPa,斗杆 E、F 点附近应力也较大,最大应力为 100 MPa,其余各处的应力均在 100 MPa 以下。

(a) 动臂应力云图

(b) 斗杆应力云图

图 16 斗杆挖掘机时工作装置应力分布云图

为了验证采用仿真方法获得应力应变特性的准确性, 将其与试验过程获得的各测点应力结果对比, 如表 1 所示。

表 1 有限元值与试验测试值比较

应力测试	测点应力值/MPa					
	1	2	3	4	5	6
有限元	57.3	68.2	80.4	51.4	53.3	54.3
试验测试	53.3	65.3	74.9	46.8	50.7	48.8

由表中数据可知, 有限元分析结果与试验测试结果基本一致, 表明基于试验方法确定的驱动力作为有限元模型施加力的依据具有较好的可信性。

3.2 液压挖掘机工作装置疲劳寿命

疲劳破坏作为工程机械结构零部件失效的主要原因之一, 引起结构失效的循环应力最大值往往远小于根据静态分析计算出的结构许用应力值。因此在对结构完成强度和刚度分析的基础上再对结构进行疲劳分析有着十分重要的意义。疲劳分析可在 MSC.Fatigue 中通过添加工作装置各销铰点时域受力数据进行分析。

分析过程中, 首先采用经验证过的液压挖掘机虚拟样机模型进行仿真, 获得挖掘机工作过程中各铰销点的工作载荷时域谱, 然后导入疲劳分析软件 MSC.Fatigue 对工作装置进行全寿命分析计算, 可获得图 17 所示的工作装置在正常挖掘工作时的疲劳寿命图。

(a) 动臂寿命云图

(b) 斗杆寿命云图

图 17 工作装置疲劳寿命图

由图 17 可知, 挖掘机在正常挖掘过程中, 动臂上动臂与动臂液压缸铰接的支撑板容易疲劳受损坏, 其最小疲劳寿命为循环 9.12×10^6 次, 动臂距离平台远端下板与动臂上板与侧板拐角处疲劳寿命相对较长, 循环次数为 $7.9 \times 10^9 \sim 3.2 \times 10^{12}$ 次, 其余各处的疲劳寿命则更长, 循环次数在 $10^{13} \sim 10^{20}$ 次; 斗杆上, 斗杆结构的边缘、E 点附近、F 点附近轴孔内测边缘及铲斗液压缸支撑板属于易疲劳破坏部位, 最小疲劳寿命为 1.78×10^7 次, 其余各处的疲劳寿命则更长, 循环次数在 $10^{13} \sim 10^{20}$ 次。

4 大型矿用液压挖掘机拓展应用

如第 2 节和第 3 节所述, 采用基于试验和元件特性的液压挖掘机虚拟样机具有较好的可信性, 能够模拟液压挖掘机的运行特性。团队在开发国内首台大型矿用液压挖掘机时, 将在 6 t 上成熟的数字样机建模经验拓展到该新机型上, 通过分析, 顺利完成了整机电液控制系统方案制定、元件选型、管路设计、车间安装调试、现场试验测试的全流程研发工作。研发中制定的工作装置全电比例控制和双液压马达电比例闭式回转驱动的整机控制策略, 获得了企业和德国力士乐公司专家的高度认可, 已将其直接推广到其他规格的机型。

4.1 矿用液压挖掘机数字样机分析

本团队研制的 260 t 矿用液压挖掘机, 回转系统采用两个闭式泵驱动; 动臂、斗杆、铲斗和开闭斗液压缸及行走装置由四台开式泵供油, 每台泵通过一组多路阀对流量进行分配; 液压冷却系统由两台闭式泵驱动; 一台先导液压泵用来为主液压泵和回转液压泵提供先导压力油。

如图 18 为团队研发的 260 t 级矿用液压挖掘机数字样机, 采用该数字样机, 可对采用不同的液压系统控制方案、工作装置机械结构、控制策略下, 整机在多种运行工况运行特性进行分析、对比和论证; 可对整机在多种工况下的能耗特性进行分析评

价并追根溯源; 可研究关键元器件动态特性对整机运行特性的作用和影响以及工况负载条件下对关键元件和结构的耦合冲击。

图 18 大型矿用液压挖掘机数字样机

采用设计大型矿用液压挖掘机数字样机, 对其完整的 90° 装载循环过程进行仿真。图 19 为执行器位移和负载力曲线。工作过程中, 首先, 斗杆和铲斗复合挖掘, 挖掘结束之后, 动臂提升与回转复合, 到指定位置开斗, 放物料, 然后闭斗与回转复合, 随后动臂下降和回转复合, 至初始位置。

图 19 整机循环动作仿真

通过计算可得图 20 所示的整个工作循环的功率转换情况。

图 20 图 19 所示循环系统能量损耗

如图 20 所示, 在所有执行器不工作时, 四个泵工作在其最小排量处, 此时电动机消耗功率约为 143 kW; 当斗杆和铲斗复合动作时, 液压阀口和管

路节流损失较小, 只占泵输出功率的 8%; 动臂上升和回转复合时, 液压阀口和管路节流损失占泵输出功率的 15.6%。由此可知, 设计的整机工作效率较高, 满足系统节能需求, 如果为了降低非工作周期电动机的能量消耗, 可以参考第 2.2 节中理论, 通过功率匹配控制电动机转速。图 20 中, 36 s 由于铲斗达到最小位移, 存在较大的功率冲击。

4.2 矿用液压挖掘机工作装置应力与寿命分析

如第 3 节所述, 采用试验数据驱动的液压挖掘机工作装置应力分析与应力试验测试结果具有较强的一致性, 并且建立的虚拟样机模型能够很好地模拟液压挖掘机工作特性, 因此在新机型研发前期, 可以采用可信度较高的虚拟样机模型代替试验, 从而获得工作装置各关节铰销点载荷数据导入 Patran 有限元模型和 Fatigue 寿命分析模型, 进而对工作装置应力和疲劳寿命进行分析, 可以获得图 21 和图 22 所示的工作装置应力云图和寿命云图。

图 21 为正常挖掘工作在最大受力位置时的工作装置应力云图。

(a) 动臂应力云图

(b) 斗杆应力云图

图 21 斗杆挖掘机时工作装置应力分布云图

由图 21a 可知, 挖掘时, 动臂上板拐角处出现应力集中, 最大应力 173 MPa, 动臂与动臂液压缸铰销点与动臂与铲斗铰销点周围应力较大, 最大应力为 100 MPa 左右, 其余各处的应力分布较小且比较均匀, 集中在 0~50 MPa。由图 21b 斗杆上板与两侧支撑板交点处出现应力集中, 最大应力为 88.9

MPa, 斗杆上板及两侧板在斗杆上板拐角附件应力比较大, 最大应力为 50 MPa 左右, 其余各处应力较小, 集中在 0~25 MPa。通过分析可以得出, 挖掘时工作装置最大集中应力为 173 MPa, 约为所用材料 16Mn 钢的屈服强度 345 MPa 的一半, 满足强度要求。但动臂上应力集中部位最大应力较其他各处应力大的多, 因此需要对该处进行优化设计以削弱此处集中应力。

如图 22 所示为将一个完整工作循环下挖掘机各铰销点时域受力导入 Fatigue 模型中获得的动臂和斗杆的疲劳寿命。

图 22 工作装置疲劳寿命图

从图 22 中可以看出, 正铲液压挖掘机在正常工作中, 动臂上板拐角处内测疲劳寿命最短, 最小破坏次数为 8.22×10^6 次; 斗杆上靠近斗杆与动臂铰销轴处的孔上疲劳寿命最短, 最小破坏次数为 7.46×10^6 次。由此可知工作装置的最小破坏次数为 7.46×10^6 次, 按完成一次工作的时间为 30 s, 一天按挖掘机连续工作 10 h, 挖掘机工作装置的最小寿命为 17 年, 满足工作装置的设计要求。

4.3 大型矿用液压挖掘机履带分析

大型矿用液压挖掘机履带行走系统设计, 目前主要以经验公式为基础, 依赖设计经验, 这种方法在一定程度上可以辅助设计行走系统参数, 但仅采用静态载荷难以充分反映多关节系统的运行特性。尤其是在新装备开发时, 经验相对缺少。本团队提出了一种履带系统机液耦合的数字样机设计方法,

采用该方法能充分考虑机械结构的惯性、各关节受力、地面对履带系统作用力以及变载荷对低速高质量履带链接关节机构动态性能的影响, 可以为履带式行走系统设计提供数据支撑。

如图 23 所示为设计的履带式行走系统仿真模型原理, 首先在 SimulationX 中构建行走系统驱动和控制模型, 然后基于 FMI 协议将该模型封装为 FMU, 然后与 RecurDyn 中构建的矿用液压挖掘机整机模型联合仿真, 从而实现履带系统的机械和液压相互耦合仿真。

图 23 液压挖掘机履带系统分析原理

履带行走马达采用闭式泵控回路, 因此马达的输出转矩与其两油口的压差成比例关系, 在分析中可以取马达两油口的压差作为对比对象。图 24 为试验、仿真和理论计算的两个马达油口压差对比曲线。

图 24 行走液压马达压力

如图 24 所示, 公式计算的左、右行走马达的驱动压力为一条直线, 其压力为 11.2 MPa; 联合仿真左右行走履带负载一致, 左、右行走马达压差一致, 但由于履带系统在行走时负载是波动变化的, 因此行走马达两腔压力差也是变化的, 其平均值约为 6.1 MPa, 波动峰值约为 1.9 MPa; 左右马达的试验曲线可知, 左、右马达压力存在交替变化, 产生该现象的原因主要是试验工况下两条履带地面作用力、履带预紧力以及摩擦等其他影响因素均存在差异,

其平均值约为 6.7 MPa。

经上述分析可知,理论计算值比试验压力均值高约 4.5 MPa,具有较大的冗余性;联合仿真均值比较接近试验压力均值,约差 0.6 MPa,联合仿真能模拟出负载的交替变化,与试验具有一致性。

5 结论

(1) 为了解决单一维度数字样机不能真实反映液压挖掘机受力的问题,本文在同一软件环境中构建基于元部件特性的液压挖掘机二维和三维互为驱动数字样机模型,通过试验对比,结果表明构建的虚拟样机模型具有较高的可信性。

(2) 采用构建的 6 t 数字样机开展了挖掘机节能与平稳运行机制研究,通过基于压力流量复合控制的进出口独立系统,降低大惯性执行器加速启动时系统的压力波动;研究了基于负载功率匹配的变排量变转速电液控制系统在挖掘机上的应用,与柴油发动机系统相比,可以降低运行成本 30% 以上。

(3) 构建了基于试验数据驱动的挖掘机工作装置有限元分析模型,与应力应变试验对比,结果表明采用该方法具有较高的可信性。并构建了疲劳寿命分析模型,研究了正常挖掘工况下工作装置的疲劳寿命。

(4) 将上述 6 t 液压挖掘机数字样机的成功经验拓展到 260 t 矿用液压挖掘机上,构建了 260 t 矿用液压挖掘机虚拟样机模型,并分析了整个工作过程的能量损耗,结果表明设计的液压系统具有较高的能量效率。在此基础上,开发了国内首台 260 t 级矿用液压挖掘机,并投入现场使用。

(5) 将上述 6 t 液压挖掘机工作装置应力与疲劳寿命分析的成功方法拓展到 260 t 矿用液压挖掘机上,对矿用液压挖掘机工作装置应力与疲劳寿命进行了分析。

(6) 开发了基于 FMI 协议的机械与液压互为驱动的矿用液压挖掘机履带式行走系统分析模型,该模型具有较高精度,能很好地反映履带系统工作过程中压力变化。

参 考 文 献

- [1] 董致新,黄伟男,葛磊,等. 泵阀复合进出口独立控制液压挖掘机特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 173-180.
DONG Zhixin, HUANG Weinan, GE Lei, et al. Research on the performance of hydraulic excavator with pump and valve combined separate meter in and meter out circuits[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 173-180.
- [2] XU Bing, CHENG Min, YANG Huayong, et al. A hybrid displacement/pressure control scheme for an electrohydraulic flow matching system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2771-2782.
- [3] 王庆丰. 油电混合动力挖掘机的关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 123-129.
WANG Qingfeng. Research on key technology of oil-electric hybrid excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 123-129.
- [4] HAUG E J, HUSTON R L. Computer aided analysis and optimization of mechanical system dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1985(52): 243-249.
- [5] FRIMPONG S, HU Y, INYANG H. Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials[J]. Int.J. Geomech., 2008(8): 20-29.
- [6] 徐兵,朱晓军,刘伟,等. 挖掘机工作装置运动学建模与仿真[J]. 机床与液压, 2011, 39(9): 97-99, 131.
XU Bing, ZHU Xiaojun, LIU Wei, et al. Kinematics modeling and simulation of an excavator working device[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(9): 97-99, 131.
- [7] 张桂菊,肖才远,谭青,等. 基于虚拟样机技术挖掘机工作装置动力学分析及仿真[J]. 中南大学学报, 2014, 45(6): 1827-1833.
ZHANG Guiju, XIAO Caiyuan, TAN Qing, et al. Dynamic analysis and simulation of excavator working device based on virtual prototype technology[J]. Journal of Central South University, 2014, 45(6): 1827-1833.
- [8] DING Huafeng, HAN Lei, YANG Weijian, et al. Kinematics and dynamics analyses of a new type face-shovel hydraulic excavator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(5): 909-924.
- [9] 张卫国,权龙,程珩,等. 基于真实载荷的挖掘机工作装置瞬态动力学分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 144-149.
ZHANG Weiguo, QUAN Long, CHENG Hang, et al. Transient dynamic analysis on working device of excavator based on practical load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 144-149.
- [10] 杨世平,余浩,刘金刚,等. 液压挖掘机动力系统功率匹配及其节能控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 152-160.
YANG Shiping, YU Hao, LIU Jingang, et al. Research on power matching and energy saving control of power system in hydraulic excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 152-160.

- [11] CASOLI P, RICCÒ L, CAMPANINI F, et al. Mathematical model of a hydraulic excavator for fuel consumption predictions[C]//Proceedings of the ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control, Chicago, IL, USA. 2015: 12-14.
- [12] 杜磊, 杨福源, 徐梁飞, 等. 并联式混合动力挖掘机系统设计及其耦合控制策略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 118-126.
- DU Lei, YANG Fuyuan, XU Liangfei, et al. Design and coupling control strategy for parallel hybrid excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(18): 118-126.
- [13] 何清华, 张大庆, 郝鹏, 等. 液压挖掘机工作装置仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 735-738, 746.
- HE Qinghua, ZHANG Daqing, HAO Peng, et al. Study on motion simulation of hydraulic excavator's manipulator[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 735-738, 746.
- [14] CHEN Qihuai, WANG Tao, WANG Qingfeng. The research on compound energy regeneration for hybrid excavator[C]//Proceedings of the 9th IFK International Fluid Power Conference, Aachen, Germany, 2014, March 24-26: 179-189.
- [15] 武宏伟. 挖掘机负载敏感系统的联合仿真及能耗分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- WU Hongwei. Co-simulation of load sensing system of excavator and energy consumption research of excavator[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [16] 杨敬, 权龙, 杨阳. 小型液压挖掘机回转过程能量消耗与节能研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 120-126.
- YANG Jing, QUAN Long, YANG Yang. Research on energy consumption and conservation of light type hydraulic excavator in swing process[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 120-126.
- [17] 潘双夏, 刘静, 冯培恩, 等. 挖掘机机器人虚拟样机的机电液一体化建模与仿真[J]. 中国工程机械学报, 2003, 1(1): 49-53.
- PAN Shuangxia, LIU Jing, FENG Peien, et al. Integrated modeling and co-simulating of the mechanical and electro-hydraulic system for the virtual excavator-robot prototyping technology[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2003, 1(1): 49-53.
- [18] 赵斌, 权龙, 黄家海, 等. 大型液压铲上车回转驱动系统及特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 176-186.
- ZHAO Bin, QUAN Long, HUANG Jiahai, et al. Driven system and characteristics research of large hydraulic shovel swing motion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(6): 176-186.
- [19] LIU Bin, QUAN Long, GE Lei. Research on the performance of hydraulic excavator boom based pressure and flow accordance control with independent metering circuit[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2017, 231(5): 901-913.
- [20] GE Lei, QUAN Long, ZHANG Xiaogang, et al. Efficiency improvement and evaluation of electric hydraulic excavator with speed and displacement variable pump[J]. Energy Conversion and Management, 2017(150): 62-71.

作者简介: 葛磊, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为工程机械节能。

E-mail: gelei@tyut.edu.cn

权龙(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液控制系统。

E-mail: quanlong@tyut.edu.cn