

基于 VL Motion 的装载机工作装置 耦合仿真分析研究*

陈国金, 金绍勋, 陈慧鹏

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对装载机工作装置系统响应缓慢、液压缸位移跟踪效果差等问题, 借助 Virtual Lab Motion 中内嵌的 Catia 软件, 根据 HT25-J 装载机具体尺寸建立了工作装置三维模型, 在 VL Motion 中定义了构件、添加运动副和耦合仿真相应驱动接口, 形成了机械系统动力学模型。通过对装载机工作装置电液系统进行分析, 利用 AMEsim 建立了工作装置电液系统模型, 同时添加了相应的 VL Motion 无缝集成应用接口, 最终通过两者间的接口进行变量的数据交互, 实现了在 VL Motion 耦合仿真分析平台上进行耦合仿真分析。通过采用经典 PID 闭环控制系统控制改善了工作装置液压缸相应速度和位移跟踪效果等性能。仿真结果表明, 借助 VL Motion 和 AMEsim 耦合仿真分析平台, 在 PID 闭环控制下的装载机工作装置综合性能较之前有较大的提高, 响应迅速, 并且跟踪位移误差可以控制在 2% 以内。

关键词: 装载机工作装置; 耦合仿真; VL Motion; AMEsim

中图分类号: TH137; TP391.9 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1135-04

Coupled simulation study on working device of loader based on VL Motion

CHEN Guo-jin, JIN Shao-xun, CHEN Hui-peng

(College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at improving the working device's performance defects of displacement tracking, the low response speed, a multi-body dynamic model of the loader's working device was created by building its three-dimensional model with Catia embedded in the VL Motion, defining its bodies, the joints and the corresponding driving interface of coupled simulation. According to the analysis of the hydraulic system of the working device, the electro-hydraulic system with the interface of VL Motion was built-in AMEsim. And the coupled simulation was performed by exchanging the variable's data through the interface in the plane of VL Motion and AMEsim. The classical control strategy of PID closed loop control was taken to optimize the defects. The simulation results indicate that with the coupled simulation plant, the working device's comprehensive properties controlled by PID closed loop have been improved greatly, its response speed becomes faster and tracking displacement error is less than 2%.

Key words: loader's working device; coupled simulation; virtual lab(VL) Motion; AMEsim

0 引 言

作为目前世界上使用量最大的工程机械之一, 多功能装载机具有作业效率高、操作便利、机动性好等特点, 广泛应用于港口、路桥、建筑、矿山、物流及国防工程中, 对加快工程建设速度、减轻劳动强度、提高工

程质量、降低工程成本都发挥着非常重要的作用。装载机工作装置是一个集机械、液压以及电子于一体的非线性复杂系统, 其动力学特性涉及到机械、液压、控制以及多体动力学等多个不同学科多个不同领域, 更涉及到多学科、多领域的交叉耦合问题^[1-3]。

在传统的设计过程中, 设计人员对于同一个系统

收稿日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105125)

作者简介: 陈国金(1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事机电系统智能检测方面的研究工作. E-mail: chenguojin@163.com

的不同领域需要各自建立一个模型,分别采用不同的软件进行分析,进行独立的设计、调试和试验,最后建造一个物理样机进行联合调试,如发现问题则需要回到各自的模型中重新修改各系统,然后再进行样机的联合调试。研究人员每一次只进行单一属性的分析,及时部件级相应的预测是准确的,但是预测整个系统的性能仍很困难。因此,对复杂系统精确建立仿真模型,分析和优化系统设计方案,需要集成多学科领域仿真环境中建立的机电液控系统模型,通过变量信息实时交互实现闭环耦合仿真,既可以减少研发时间、降低研发成本,同时对系统进行整体分析及优化设计,可提高系统的稳定性和可靠性。

目前,该耦合仿真技术在飞机起落架的应用研究中有了一定的研究成果。赵世春等^[4]采用该仿真技术结合某飞机起落架落震可靠性分析案例对飞机起落架可靠性进行了分析研究,结果表明采用该仿真技术结合可靠性分析方法进行起落架系统复杂机构可靠性分析具有可行性和实用性。王彤等^[5]应用该种仿真方式实现了舰载机前起落架弹射-突伸动力学联合仿真,通过改进突伸模式获得了更好的突伸效果。安慧军等^[6]针对汽车起重机液压伸缩系统进行了机液联合仿真与试验研究,该方法能更好地模拟真实的负载,提高仿真精度。

本研究针对单一仿真模块所存在的缺陷,借助VL Motion和AMESim耦合仿真分析平台,分别对装载机工作装置机械系统和电液系统建立模型,采用经典控制算法,通过耦合仿真分析平台对工作装置机电液系统性能进行仿真研究,并进行误差分析。

1 装载机工作装置系统建模

LMS公司所提供的机电联合仿真平台是目前比较系统完整的机电系统虚拟样机开发环境,提供了多学科仿真解决方案。LMS公司的Virtual Lab Motion(以下简称Motion)能够对机电系统的机械部分进行三维建模,并进行运动学和动力学分析^[7],LMS Imagine.Lab AMESim(以下简称AMESim)是一维专业仿真软件,具有强大的液压模块和电子控制模块,通过两者的无缝集成的接口进行耦合仿真,便于解决无法用单一软件对复杂机电系统仿真的问题^[8]。

1.1 Motion与AMESim耦合仿真原理

为实现Motion与AMESim的耦合仿真,研究者首先需要建立仿真对象的装配体三维物理模型,在该模型基础上创建构件、添加运动副和驱动,形成多体动力学模型,建模过程如图1所示。AMESim和Motion耦合仿真通过接口实现变量交互与耦合。

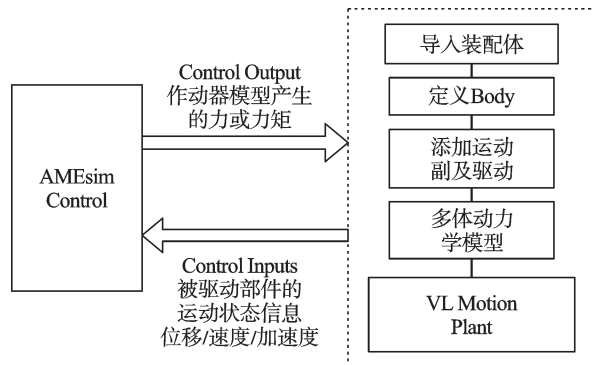


图1 AMESim、VL Motion耦合仿真原理及VL Motion建模过程

本研究在AMESim中建立电液系统,并定义Motion接口模块,同时定义输入、输出变量名,注意此时的输入、输出是相对Motion中的机械系统而言的,输入变量即Control Outputs,假设为Force,输出变量即Control Input,假设为Disp和Vel。本研究在Motion中通过定义Control Inputs表征机械系统输出的状态量,如位移、速度等,定义式分别选择生成名为Disp和Vel的Control Nodes。经过AMESim对电液系统编译,本研究在Motion中导入AMESim模型和动态链接库,此时会自动生成与Control Outputs对应的Control Nodes,即Force;同时在Motion中定义Control Outputs,一般是作用在物体上的力或力矩,并选择导入之前AMESim模型编译时自动生成的Control Nodes,即Force。这样研究者即可建立AMESim和Motion之间的变量对应关系,通过变量的交互与耦合实现耦合仿真。

1.2 装载机工作装置建模

1.2.1 装载机三维模型建立

笔者所研究的浙江豪泰公司HT-25J装载机主要由行走和转向车身、工作装置、发动机、静液驱动控制系统等构成,其中工作装置主要由动臂、动臂液压缸、铲斗臂、铲斗臂液压缸、拉杆以及铲斗构成。液压缸经工作机构控制系统实现装载机作业时候的提升和铲斗动作。根据装载机具体尺寸,本研究利用Motion中内嵌的Catia软件建立了装载机三维虚拟样机模型。

1.2.2 装载机工作装置多体动力学建模

根据如图1所示的Motion多体动力学建模流程,本研究在Catia模型的基础上创建构件并添加运动副和驱动。装载机工作装置的各部件之间的运动副如表1所示。模型的驱动利用接口模块在动臂和铲斗上分别建立2个动臂缸和1个铲斗缸的Control Inputs、Control Outputs以及相应的Control Nodes,耦合仿真将依赖该接口进行变量的交互。

1.3 装载机工作装置液压系统与AMESim液压模型

装载机工作装置液压系统主要由动力源、工作油

表 1 装载机工作装置各运动部件运动副定义

部件名称	部件名称	运动副
机架	动臂	旋转副
动臂	铲斗	旋转副
动臂	铲斗臂	旋转副
铲斗臂	拉杆	旋转副
拉杆	铲斗	旋转副
动臂液压缸 缸筒	机架	旋转副
动臂液压缸 活塞杆	动臂	旋转副
动臂液压缸 缸筒	动臂液压缸 活塞杆	移动副
铲斗臂液压缸 缸筒	机架	旋转副
铲斗臂液压缸 活塞杆	动臂	旋转副
铲斗臂液压缸 缸筒	铲斗臂液压缸 活塞杆	移动副

泵、多路换向阀和执行机构等组成,经过简化后的单个液压回路原理如图 2 所示。系统的动力源工作油泵提供工作油压驱动泵工作,将机械能转换成液压能,多路换向阀由三位四通电液伺服阀及管路组成,用来传递功率和换向控制,这也是液压系统的关键零件。执行机构由 2 个动臂液压缸和 1 个铲斗液压缸组成,完成装载机的各种动作;其中溢流阀起安全阀的作用,当系统的压力超过条定给定最大工作压力时,溢流阀打开,油液流回油箱,保护系统不受损坏。

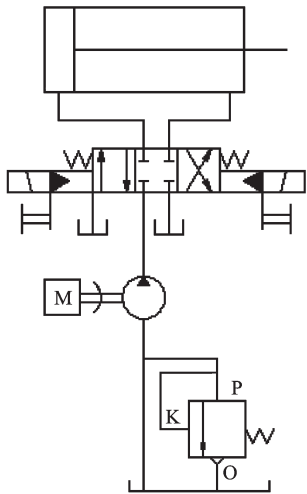


图 2 单个液压回路原理图

液压系统是强非线性系统,对其进行精确的建模往往十分困难,因此研究者一般采用线性简化的方法对其进行建模仿真,但其结果与实际情况往往有较大差距。而如采用通过 AMEsim 基于功率键合图的方法对液压系统进行建模,能够得到十分准确的液压系统模型^[9]。

本研究基于 AMEsim 液压模型库和信号控制模型库建立相应的 AMEsim 电液系统模型,该模型如图 3 所示。液压缸通过机械变量转换器将输出的力通过接口模块经过与 Motion 的联合仿真得出相应的速度和位移信号,该信号反馈给液压缸,同时与输入信号比较的误差作为电液伺服阀的控制信号控制液压缸的运动。

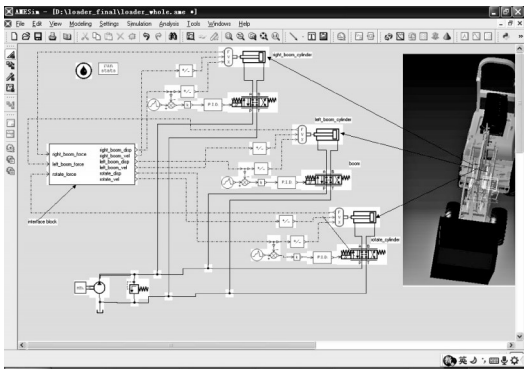


图 3 工作装置电液系统模型

2 工作装置控制策略

为保证工作装置能够高效、稳定地工作,研究者需要设计控制器对液压系统进行有效控制。根据装载机工作装置性能特点,本研究通过比较分析几种控制算法在其液压系统中的应用情况,决定采用最经典的 PID 算法对其进行控制。

PID 控制器原理简单、使用方便,使用中不需要精确的系统模型等先决条件,具有适应性以及鲁棒性强等优点,因此在工业控制中得到了广泛的应用。PID 控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)组成^[10]。PID 控制器是一种对“过去”、“现在”、“将来”进行信息估算的控制算法。PID 将给定值 $r(t)$ 和实际的输出值 $c(t)$ 进行比较,得到二者构成的控制偏差 $e(t)$, $e(t) = r(t) - c(t)$, $e(t)$ 经过 P(比例)、I(积分)、D(微分)后经线性组合得到控制量 $u(t)$,用 $u(t)$ 对被控对象进行控制,其控制规律数学表达式为:

$$u(t) = K_p \times [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

(1)

传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

(2)

式中: K_p —比例系数; T_i —积分时间常数; T_d —微分时间常数; K_i —积分系数, $K_i = K_p/T_i$; K_d —微分系数, $K_d = K_p \cdot T_d$ 。

3 仿真及结果分析

3.1 耦合仿真设置

完成 Motion 机械系统模型和 AMEsim 电液系统模型之后,本研究在 Motion 模型基础上导入 AMEsim 模型,并根据两者耦合仿真原理完成仿真接口变量交互设置。本研究在 solution-set 设置中选择 AMEsim_Coupled 方式进行仿真,该方式是以 Motion 作为主求解器,AMEsim 电液系统模型编译为 dll 文件,集成到 Motion 中,分析过程中由 Motion 求解器 DADS 进行积分求解,

并且可以将 AMESim 模型的参数和变量导入到 Motion 中,即 Watch Parameter 和 Watch Variable,即可以允许在 Motion 中直接修改电液系统模型参数,而无须回到 AMESim 中修改再重新导入^[11-13]。

本研究中所设置的变量为 PID 的 3 个参数。针对系统综合性能,经过反复测试调整 PID 参数及比较后,最终确定的 PID 参数如表 2 所示。

表 2 液压缸 PID 参数

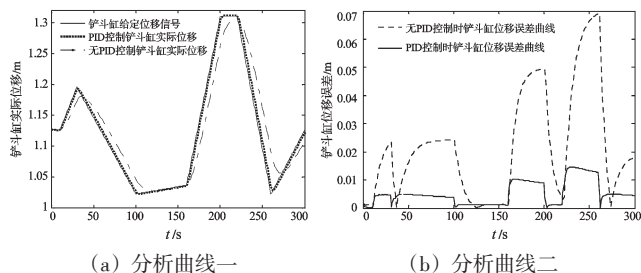
	K_p	T_i	T_d
转斗缸	5	0.25	0
动臂缸	4	0.05	0

在仿真试验过程中,本研究采用如图 4(a)、5(a)所示的给定铲斗缸和动臂缸驱动位移信号曲线作为电液伺服阀的控制输入控制铲斗液压缸和动臂液压缸的实际位移,测试工作装置液压缸的位移跟踪性能。

3.2 结果分析

动臂缸与铲斗缸的仿真试验曲线如图 4、图 5 所示。铲斗油缸以及动臂油缸给定的驱动位移信号和实际得到的位移曲线对比如图 4(a)、5(a)所示。由此可知,未加 PID 控制器的油缸实际位移跟踪效果比较差,延时滞后性比较严重,同时稳定性也较差,达不到较为理想的位移跟踪效果。加入 PID 前后的实际位移误差曲线如图 4(b)、图 5(b)所示。加入 PID 控制器后,转斗油缸综合性能得到了很大提高与改善,图 4(a)中 PID 控制铲斗实际位移曲线显示了铲斗油缸的响应迅速且平稳,跟踪效果良好,稳定性较好。

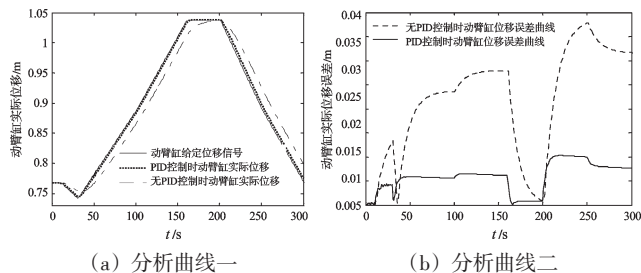
本研究通过对仿真结果数据进行分析可得到加 PID 前后动臂油缸和铲斗油缸位移误差对比结果,具体如表 3 所示。



(a) 分析曲线一

(b) 分析曲线二

图 4 铲斗油缸加 PID 前后实际位移对比及误差分析曲线



(a) 分析曲线一

(b) 分析曲线二

图 5 动臂油缸加 PID 前后位移对比及误差分析曲线

表 3 有、无 PID 仿真前后位移误差分析

	最大位移 误差/m	最大位移误 差率/(%)	平均位移 误差/m	平均位移 误差率/(%)
动臂油缸	0.037 8	4.26	0.021 5	2.44
动臂油缸(PID)	0.010 3	1.05	0.005 8	0.66
铲斗油缸	0.069 2	6.76	0.003 8	0.4
铲斗油缸(PID)	0.014 6	1.18	0.000 47	0.039

3 结束语

本研究借助 LMS 公司的 Virtual Lab Motion 和 AMESim 的无缝集成对 HT-25J 装载机工作装置进行了耦合仿真分析,对工作装置的机械和电液系统分别建模并实现了变量之间的交互,采用最经典的 PID 控制器对液压缸的位移跟踪效果进行了控制。仿真结果表明,装载机各液压缸的位移跟踪性能在经 PID 控制后得到了较大的改善,系统的位移跟踪性能良好,且系统较为平稳,系统误差也被控制在合理的范围之内,耦合仿真得到了比较理想的效果。

由此可见,多领域耦合仿真分析方法对复杂的机电系统整体仿真分析具有实用性,可以实现缩短产品研发周期,降低产品研发成本。

参考文献(References):

- [1] 吴庆鸣,何小新. 工程机械设计[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006.
- [2] 黄建,龚友平. 多功能装载机工作装置机械-液压系统联合仿真[J]. 机电工程,2010,27(12):27-31.
- [3] 吴永平. 现代装载机技术发展综述[J]. 建设机械技术与管理,2009(1):64-67.
- [4] 赵世春,喻天翔,王慧,等. 仿真技术在飞机起落架可靠性分析中的应用研究[J]. 航空工程进展,2011,2(4):444-448.
- [5] 王彤,许锋,聂宏. 基于前起落架突伸技术的新型缓冲器仿真设计分析[J]. 中国机械工程. 2012,23(3):330-334.
- [6] 安慧军. 汽车起重机液压伸缩系统液液联合仿真与试验研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2011.
- [7] 万晓峰,刘岚. LMS Virtual. Lab Motion 入门与提高[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [8] 付永领,齐海涛. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真实例教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [9] 肖岱宗. AMESim 仿真技术及其在液压元件设计和性能分析中的应用[J]. 舰船科学技术,2007(S1):142-145.
- [10] 王正林,王胜开. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [11] 金波,张佳林,顾临怡,等. 注塑机变量泵节能液压系统的 AMESim 仿真[J]. 轻工机械,2010,28(4):12-15.
- [12] 王文灵,边心文. 基于 AMESim 注塑机快速合模系统的建模仿真及节能研究[J]. 机电工程技术,2011,40(11):53-56.
- [13] 程磊. 1D&3D 仿真平台在航空行业中的应用[J]. 航空制造技术,2009(11):78-81.

[编辑:罗向阳]