

挖掘机液压—机械复合系统建模与仿真研究

(安徽工程科技学院机械工程系, 安徽 芜湖 241000) 时培成 王幼民 王立涛 汤精明

摘要 利用三维实体建模软件 Pro/E 与机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 建立了挖掘机器人机械子系统、液压子系统模型,并在 ADAMS 环境中利用参数关联技术,将两个子系统模型集成,建立起挖掘机液压与机械一体化的虚拟样机模型;在此基础上进行了大量的运动学和动力学仿真。研究结果为预见设计方案的可行性及物理样机的试制提供了一定参考;可提高产品开发速度和精度,降低开发成本;具有重要的理论与工程意义。

关键词 挖掘机器人 液压—机械复合系统 虚拟样机 Pro/E ADAMS

引言

挖掘机器人是机—液一体化的机械装备,对挖掘机的开发涉及到机械和液压等学科领域的技术。传统的物理样机开发模式存在开发周期长、成本高、修改困难等多方面的问题。应用数字化虚拟样机技术能有效地克服传统物理样机开发模式的缺陷,加快产品开发速度,节约开发成本,为机—液复合系统设计、产品复合性能评价提供了一种有效的手段^[1,2]。借此技术,工程设计人员可在建造物理样机之前,在计算机上建立虚拟样机模型,伴之以三维可视化处理,模拟现实环境下系统的运动和动力特性,并根据仿真结果对各种设计方案进行快速优化对比,在设计早期就能确定关键的设计参数,预测产品系统性能,以减少产品开发阶段,物理样机的试制、试验次数,节省设计经费,缩短设计周期,提高产品质量及产品系统性能。

本文以 WY3.5t 小型挖掘机器人机—液复合系统建模为例,利用特征造型软件 Pro/E 和机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 建立挖掘机液压—机械复合系统的整机虚拟样机模型,并在 ADAMS 环境中对样机模型进行运动学和动力学仿真分析,而后利用 ADAMS 软件后处理模块 ADAMS/PostProcessor 进行数据处理及相关特性曲线的绘制输出。

1 机械系统建模

利用三维实体建模软件 Pro/E 和机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS/View 联合建立挖掘机机械系统模型。

1.1 Pro/E 环境建模与装配

机械系统模型的准确性是决定所设计的液压系统是否具有实用性的前提条件,所以,建立的机械系统模型应尽可能准确,但考虑到仿真实时性要求,模型在基

本适合所要求工况的前提下还应尽可能简单。根据研究目的,建模时将挖掘机结构进行了合理的简化和抽象,按照是否存在相对运动(暂不考虑行走运动)将挖掘机器人划分为:转台 1、动臂 2、斗杆 3、铲斗 4、铲斗摇杆 5、铲斗连杆 6、动臂液压缸体 7、动臂液压活塞杆 8、斗杆液压缸体 9、斗杆液压活塞杆 10、铲斗液压缸体 11、铲斗液压活塞杆 12 共十二个大运动部件^[3],见图 1 所示。

挖掘机三维实体建模包括所有零件的三维实体模型建立及整机装配。利用 Pro/E 特征选项里的拉伸、旋转、剪切、混合扫描等操作命令建立各零部件;然后按照挖掘机工作装置的各零部件间装配与配合关系,对各零件的三维实体模型进行装配,得到挖掘机整机的三维实体装配模型^[4]。

1.2 机械系统模型从 Pro/E 传到 ADAMS/View 中

ADAMS 提供了与 Pro/E 软件的数据交换接口 Mechanism/Pro, Mechanism/Pro 是 MSC 公司为 ADAMS 开发的与 Pro/E 软件的专用接口程序,作为一个菜单,挂接在 Pro/E 环境中。该模块是连接 Pro/E 与 ADAMS 之间的桥梁。二者采用无缝连接的方式,使用户不需要退出 Pro/E 应用环境,就可以将装配完毕的总成传送到 ADAMS/View 中。利用该接口模块解决了 ADAMS 环境中不易构建复杂模型的缺点,使用户可以在其熟悉的 CAD 中建立三维机械系统模型,通过一个按键操作,就可将数据传到 ADAMS 环境中,提高了工作效率。

点击 Pro/E 中 Mechanism/Pro 下的 interface—ADAMS/View—Geometry Quality,在 Geometry Quality 下有 1~10 个数字可以选择,为了提高转换精度,选择的数字越大,输出的几何体面元素就越多,形状就越接近实体。这里输入 10,再点击 Done/Return,这时,Pro/E 系统会自动启动 ADAMS/View,并把机械系统装配模

型传入 ADAMS/View 中。

三维实体模型进入 ADAMS/View 后,各零部件之间是毫无联系地独立存在于 ADAMS/View 环境中。这种状态下即使全部零部件都已导入,也不能构成一台具有现实意义的虚拟样机。只有在此基础上,借助 ADAMS 软件再添加适当的连接、载荷、运动约束和力等模型特性,才能建立仿真模型即虚拟样机,如图 1 所示。模型中共使用了 1 个圆柱副(Cylindrical)、8 个铰接副(Revolute)、1 个球形副(Spherical)、3 个移动副(Translation)、1 个固定副(Fixed)、1 个点-线约束副(In-line)^[2]。动臂下铰点铰接在转台上,利用动臂油缸的伸缩,使动臂绕动臂下铰点转动,依靠斗杆油缸使斗杆绕动臂的上铰点摆动。

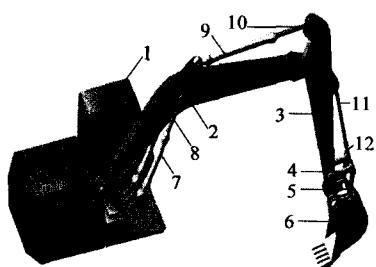


图 1 挖掘机机械系统模型

2 液压系统建模

利用 ADAMS/Hydraulics 模块建立挖掘机液压系统模型。液压系统模块 ADAMS/Hydraulics 是 ADAMS 软件的扩充模块之一,能够同机械系统模块集成在一起,可建立和测试液压系统模型,实现在计算机上对液压系统的动、静态特性分析仿真。

在 ADAMS/Hydraulics 环境中建立液压回路,主要内容包括设置 Hydraulics 环境参数,创建液压油 1、油箱 2、压力源(液压泵)3、各类控制阀 4、5、6、液压缸 7、三通联接 8 等,见图 2。然后在 Hydraulics 下使用 connect 命令,依次选择液压元件的端口,将上述的液压元件按指定的液压回路联接到一起。在液压系统回路中,控制元件通过控制方程表达式来控制液压流量,从而控制液压阀并驱动挖掘机完成预定的工作^[2]。

虽然挖掘机的液压系统很复杂,但是具体分到每个工作回路,其工作原理除了执行元件的不同(液压缸和液压马达)外都是相同的。本文根据需要对液压油路进行了简化,并按功能划分为结构相似的动臂、斗杆、铲斗、回转、行走五个工作回路^[5,6]。图 2 出示的是挖掘机举升机构,即动臂的液压工作回路,其是简化的执行元件为液压缸的典型液压回路,其它几个回路与此类似。当换向阀 4 由中位移至左位(下)时,压力油经单向阀 3 进入液压缸底部,液压缸上腔里的液压

油回到油箱,活塞向上运动;反之,当换向阀 4 由中位移至右位(上)时,液压油直接进入液压缸上腔,使活塞向下运动,从液压缸下腔流出的油通过阀 6 回到油箱,如达到一定压力,则向液压缸上腔补油。当换向阀处于中位时,阀 5 和阀 6 均关闭,活塞双向锁止,动臂处于某一固定位置。以下为基于流体传动理论,利用 ADAMS 提供的数值算法和函数,创建液压元件和液压系统模型的过程。

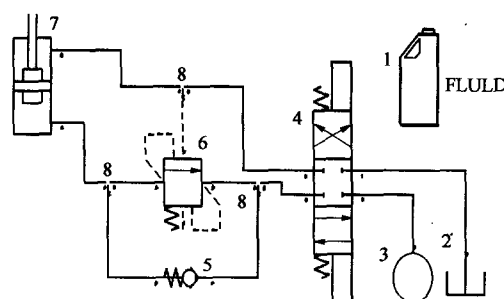


图 2 挖掘机动臂液压回路模型

2.1 油液及有关的状态参数设定

设置的状态参数包括纯液压油测定时的密度 ρ_{ref} 、温度 T_{ref} 、体积(弹性)模量 B 、热膨胀系数 α 以及压力 p_{ref} 等;空气含量参数包括标准状态温度 T_{STP} 和压力 p_{STP} 下的空气密度 ρ_{aSTP} 、饱和状态压力 p_{sat} 、空气可溶性系数 S_C 、液压油中未溶解的空气体积含量比率 C_u 和空气体积多变系数 κ ;粘度参数包括温度点和相应的粘度值(按插值法确定各温度点粘度值)等。

空气与液压油混合液油液的密度、温度与压力的变化关系式为^[2,5-8]

$$\rho = \frac{1 + \frac{\rho_{aSTP}}{\rho_{lSTP}} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} + \frac{C_u}{1 - C_u} \right)}{\frac{1}{\rho_l} \frac{1}{\rho_{lSTP}} \frac{P_{STP}}{P_{sat}} \left(\frac{P_{sat}}{P} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \frac{T}{T_{STP}} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} + \frac{C_u}{1 - C_u} \right)} \quad (1)$$

式中 ρ ——油液的密度

T ——油液的温度

p ——油液的压力

p_{STP} ——态的压力, 101.315 kPa

T_{STP} ——标准状态的温度, 73.15 K

ρ_{aSTP} ——标准状态下的空气密度, 1.293 kg/m³

C_u ——标准温度和压力下在液压油中未溶解的空气体积含量比率

p_{sat} ——饱和压力, 即液压油充分溶解空气后的最低压力

S_C ——空气可溶性系数

κ ——空气体积多变指数

ρ_l ——纯液压油的密度

$$\rho_t = \rho_{ref} \left[1 + \frac{1}{B} (p - p_{ref}) + \alpha (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

p_{ref} —— 液压油的测定时的压力

ρ_{ref} —— 液压油的测定时的密度

T_{ref} —— 液压油的测定时的温度

B —— 纯液压油体积(弹性)模量

α —— 纯液压油热膨胀系数

ρ_{ISTP} —— 标准状态下的纯液压油密度

$$\rho_{ISTP} = \rho_{ref} \left[1 + \frac{1}{B} (p_{STP} - p_{ref}) + \alpha (T_{STP} - T_{ref}) \right] \quad (3)$$

C_d —— 标准温度和压力下在液压油中已溶解的空气体积含量比率

$$C_d = C_{dmax} \left[\left(\frac{p}{p_{sat}} \right)^3 - \frac{p}{p_{sat}} - \frac{p}{p_{sat}} + 1 \right] \quad (4)$$

$$C_{dmax} = \frac{1}{1 + \frac{p_{STP}}{S_{CPsat}}} \quad (5)$$

2.2 压力源(泵)及油箱

压力源是为整个液压系统提供动力的元件。根据液压系统的设计,压力源的初始压力设为 11.4MPa。一般情况下,液压系统工作时压力源的压力变化不大,故认为该压力为定值,并将压力变化函数设置为与初始压力相同的数值,即设为定值;油箱被认为是一个很大容积的蓄能器,压力可维持不变,故油箱模型只需设置压力参数即可。

2.3 方向控制阀(三位四通阀)

方向控制阀为整个系统的控制中枢。由操作人员直接控制,实现液压缸的往复运动。所需设置的参数有阀芯的初始位置、阀开启及关闭所需的时间、阀的泄漏系数和因阀所造成的压力损失等。

2.4 止回阀(单向阀)

止回阀在液压系统中起到正向流通,反向截止的作用。对于止回阀来说,需要设置关闭时阀芯两端的压力差及流量,阀口心截面积变化率以及泄漏系数和响应时间等。

2.5 背压阀

背压阀在液压系统中主要起保压和稳压作用。在背压阀属性对话框中,需要设置阀口流通截面面积变化率、阀口初始位置、阀的泄漏系数和响应时间等参数。

2.6 液压缸

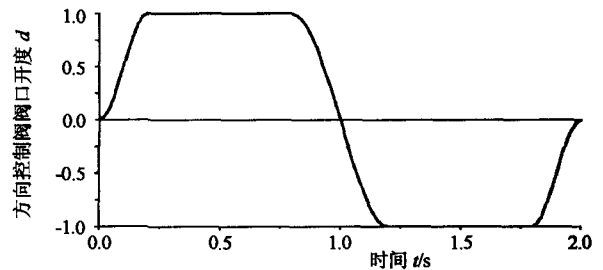
液压缸是直接和机械系统相连接的液压部件,需设置的参数有液压缸的最大和最小长度、缸的有效容积、活塞直径、活塞杆直径、上、下两腔的阀口直径及初始压力等参数。

2.7 系统关联集成

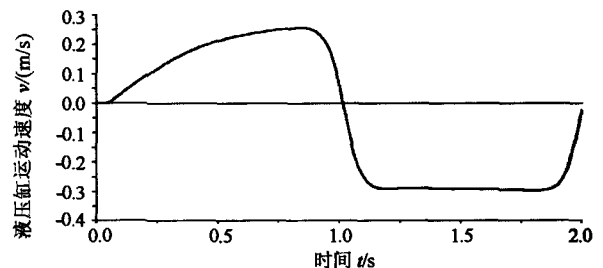
将机械系统和液压系统通过液压缸相连接,在液压缸设置对话框中的 I Marker 和 J Marker 2 项分别设置为动臂液压缸底座中心点和动臂上液压杆支座的中心点。这样,利用参数关联起来就将液压系统与机械系统模型虚拟结合到一块,便于分析液压系统与机械系统的相互作用^[2]。一定要注意位置准确,否则将出现由于过约束而无法运动的情况。

3 仿真分析

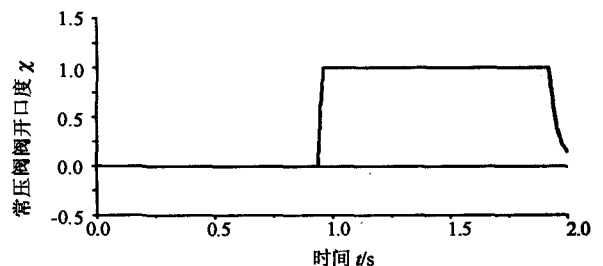
在 ADAMS 交互仿真界面中选择指定的仿真控制方式进行运动仿真,软件可在输出挖掘机挖掘工作过程仿真动画的同时,同步输出该时刻不同系统的性能状态曲线,如机械系统零部件运动速度、位移等曲线;液压系统流量、压力状态曲线等。综合比较分析这些仿真结果,可以实现对挖掘机不同方案的整机性能评价。



(a) 控制阀开口开启状态



(b) 液压缸运动速度



(c) 背压阀开启状态

图3 测试运动仿真

3.1 测试仿真分析

对经过建模和参数关联得到的挖掘机机—液复合系统虚拟样机,在 ADAMS 环境中进行测试性运动仿

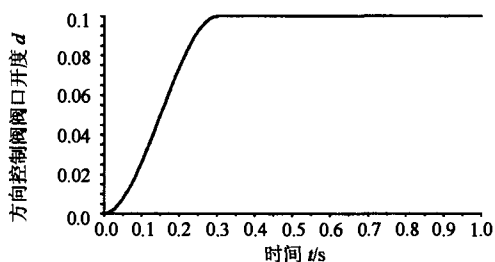
真,以考察系统的瞬态性能及建模的正确性,仿真结果如图3所示。

图3a出示了三位四通方向控制阀在0.2s时到达全开状态,接着换向占用了大约1s时间,从1.8s至2.0s,阀处在逐渐关闭阶段;图3b表明液压缸活塞的最大伸出速度是0.26m/s,最大缩回速度是0.3m/s;图3c表明在0.96s至1.92s时间段,背压阀是全开的。

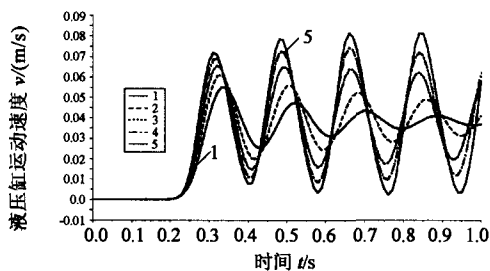
该组曲线表明系统仿真过程与挖掘机实际工作状态相符,证明了系统建模是正确的、合理的,可在此模型的基础上继续考察样机的其它性能。

3.2 优化仿真分析

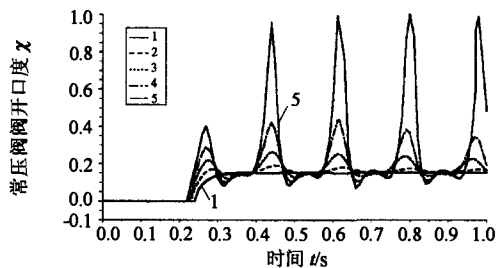
挖掘机的稳定性在很大程度上受背压阀的影响,而背压阀的特性直接影响到整个系统的响应特性,当液压系统回路建立并完成后,可以对背压阀阀口流通截面积变化率进行一个单变量参数设计,对液压系统进行优化分析研究。改变方向控制阀的开启状态、仿真时间,进行优化分析仿真所得结果如图4所示。



(a) 控制阀阀口开启状态



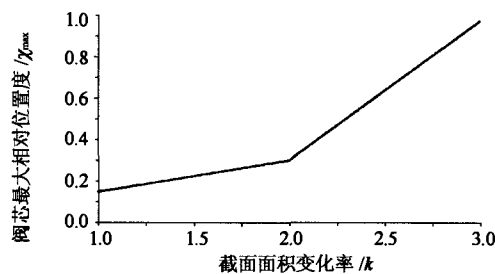
(b) 液压缸运动速度



(c) 背压阀开启状态

图4a出示了三位四通方向控制阀的开口状态;图4b、图4c出示了液压缸运动速度、背压阀阀芯相对位置度与背压阀阀口流通截面积变化率的优化仿真结果,图中曲线1~5分别表示阀口流通截面积变化率等

于1、1.5、2.0、2.5、3.0时,与的波动情况;图4d出示了背压阀阀芯最大相对位置与阀口截面面积变化率之间的关系。该组曲线表明理想的阀口流通截面积变化率应在1和2之间,这时系统波动较小,稳定性较好。



(d) 阀芯位置与阀口流通截面积变化率的关系

图4 优化仿真

4 结束语

从虚拟样机系统仿真建模的角度来看,整个系统可以分为机械系统、液压系统两个大部分。通过对挖掘机液压—机械系统分别建立虚拟样机模型,而后利用参数关联技术使机械系统和液压系统成为有机的整体,实现了整机机—液复合系统的联合动态仿真分析,打破了单纯机械设计的局限性,仿真结果基本符合技术上的要求,为物理样机的试制及其它型式机—液复合系统的设计和研究提供了很好的参考。可以用于研究液压系统、机械系统参数改变对整机系统性能的影响及挖掘机复合系统设计、系统优化和方案论证;加快挖掘机产品的开发速度,降低开发成本,提高市场竞争力。

参 考 文 献

- 1 刘能宏,田树军. 液压系统动态特性数字仿真. 大连:大连理工大学出版社,1993
- 2 Mechanical Dynamics Inc. Using ADAMS/Solver. MDI, 2002
- 3 刘静,潘双夏,冯培恩. 挖掘机器人虚拟样机建模策略与仿真技术研究. 浙江大学学报(工学版),2004,38(11):1490~1495
- 4 王广欣,朱莉莉,关天民. 基于Pro/E的摆线钢球行星传动建模仿真研究. 机械传动,2005(3):27~29
- 5 李永堂,雷步芳,高雨茁. 液压系统建模与仿真. 北京:冶金工业出版社,2003
- 6 陆元章. 液压系统的建模分析. 上海:上海交通大学出版社,1989
- 7 Shahram Tafazol, Peter D Lawrence, Salcudean S E. Identification of inertia and friction parameters for excavator arms. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5):966~971
- 8 王幼民,周革,王曙光. 基于MATLAB的电液力伺服系统设计与优化. 机械传动,2005(4):46~49

收稿日期:20060823

基金项目:安徽省自然科学基金项目(项目编号:050440105)

作者简介:时培成(1976-),男,安徽六安人,硕士,讲师