

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.005

液压挖掘机多领域建模与仿真

崔洪新, 李军, 申金星, 王朴

(解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007)

摘要: 针对机电液一体化系统联合仿真对硬件及操作人员要求过高的问题, 提出基于同一仿真平台 Matlab 建立复杂系统虚拟样机的方法。以建立液压挖掘机虚拟样机多域仿真模型为例, 采用 Matlab 软件 SimMechanics 工具箱、SimHydraulics 工具箱和 Simulink 工具箱分别建立了液压挖掘机的机械系统、液压系统和控制系统仿真模型, 并通过各模型间的接口技术, 实现了机械、液压、控制子系统的有机集成。仿真结果证明: 该方法可在样机设计阶段进行系统整体性能分析, 能及时发现错误, 降低开发成本, 为复杂机电液一体化系统的多领域仿真分析提供了有效方法。

关键词: 液压挖掘机; 多领域仿真; 虚拟样机; SimMechanics; SimHydraulics

中图分类号: TJ812 **文献标志码:** A

Multi-Domain Modeling and Simulation of Hydraulic Excavator

Cui Hongxin, Li Jun, Shen Jinxing, Wang Pu

(College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: A method of constructing virtual prototype for complex mechanical system based on the same platform of Matlab is proposed. It can overcome the difficulties of co-simulation of hydromechatronics system of hardware as well as high requirement of operating staff. Taking the construction of hydraulic excavator multi-domain virtual prototype as an example, the simulation model of mechanical system, hydraulic system and control system of excavator are established respectively. Matlab toolboxes of SimMechanics, SimHydraulics and Simulink are used in the simulation. Subsequently, the interface technique of various models is investigated. This work perfectly integrates hydraulic and mechanical systems with control system of excavator. The simulation results show that the method can analyze the overall performance of the system in the prototype design phase, find out the mistakes in time and reduce development costs. It also provides an effective method for the analysis of multi-domain simulation of complex electromechanical system.

Keywords: hydraulic excavator; multi-domain simulation; virtual prototype; SimMechanics; SimHydraulics

0 引言

液压挖掘机是集机械、电子、液压和控制等多领域子系统于一体的复杂系统。在进行这类复杂产品的开发设计时, 通常由专门的部门对某一领域分系统进行设计开发, 然后由项目组长或者技术总工对各领域建模结果进行综合分析与设计。现有的仿真工具多是针对单一领域分系统的专业建模与仿真, 能够很好地解决单领域系统性能分析的问题, 如 SolidWorks 软件用于机械模型的设计与分析^[1], AMESim 软件用于液压系统建模与仿真^[2]。对于复杂的系统, 各领域耦合的特征非常显著, 各分系统间的关系非常复杂, 仅靠传统的单领域仿真分析很难反映出系统的整体性能。目前对机电液一体化复杂系统的研究分析主要利用不同专业软件分别进行单领域的建模, 通过软件间的接口实现基于接口的联合仿真^[3]。但使用此方法建模仿真时, 需要多个软件同时运行, 对计算机的性能要求较高^[4]; 同时要求开发人员能够熟练运用各个专业软件并掌握软件之间数据交互接口的配置方法^[5], 导致专业技术

人员需要花费大量的时间和精力用于学习软件, 但由于各软件的专业特殊性, 只有极少数技术人员能够对各种软件熟练运用并能掌握不同软件协同建模与仿真方法。基于此, 笔者提出了一种基于 Matlab 同一平台的液压挖掘机虚拟样机建模仿真方法。

1 液压挖掘机机械系统建模

液压挖掘机主要由机械动力学模型^[6]、液压系统模型^[7]和控制系统模型 3 大部分构成。基于 Matlab 的液压挖掘机虚拟样机实现方案如图 1 所示。笔者利用多体动力学仿真工具箱 SimMechanics 建立机械系统模型, 利用液压系统建模工具箱 SimHydraulics 建立液压系统模型, 利用 Matlab/Simulink 建立控制系统模型。由于各子系统仿真模型的建立均基于 Matlab 同一软件平台, 因此, 通过模型信号的转换便可实现各子系统的协同仿真, 即实现机械、液压、控制子系统的有机集成。基于同一平台的复杂系统多域仿真环境与真实环境更加接近, 仿真结果具有重要参考意义。

收稿日期: 2013-12-10; 修回日期: 2014-01-12

基金项目: 江苏省青年基金“基于物联网技术的专用汽车智能化管理与控制关键技术”(BK2012061)

作者简介: 崔洪新(1987—), 男, 安徽人, 在读硕士, 从事军事装备技术研究。

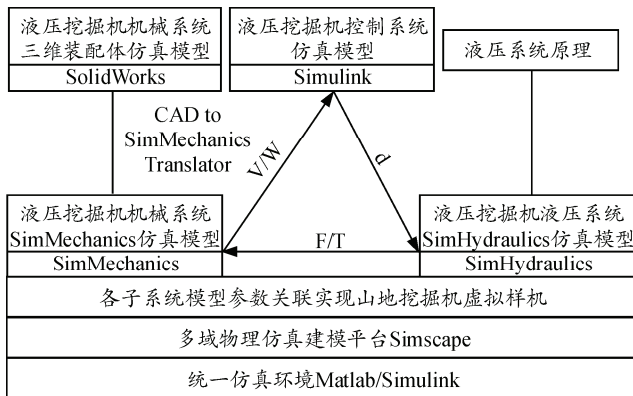


图 1 液压挖掘机虚拟样机实现方案

SimMechanics^[8]是 Matlab6.5 新增加的基于 Simulink 的机构仿真软件包，利用该软件包可以建立各种机构模型，根据运动件之间的约束关系添加各种运动副，并可添加驱动和检测模块，建立机械系统运动学仿真模型及其运动的检测，实现对机构系统的动态特性分析。同时，利用 SimMechanics 软件建立的机械系统模型不仅具有机构的几何特性，而且包含机构的物理特性，即质量与转动惯量等，对实现多体动力机械系统及其控制系统的正向动力学分析、逆向动力学分析、运动学分析、线性化分析、平衡点分析等提供了直观有效的分析平台。利用 SimMechanics 平台可以准确、方便、高效地对机械系统的受力、共振、阻尼等特性进行分析，为设计和制造出经济、安全的机械产品提供了有效数据支持和仿真平台。SimMechanics 仿真模型的建立主要采用 2 种方法：对于简单的机械模型，很容易计算出结构的质心坐标和转动惯量，可以直接利用 SimMechanics 的建模工具进行建模，但对于结构复杂的模型在 SimMechanics 中直接建模工作量大、数据计算繁琐、出错率高、难度大；对于结构复杂的模型，可利用三维建模软件建立机械系统模型，三维建模软件具有强大的实体造型能力，可以快速、准确地建立各零部件模型并进行装配，通过三维建模软件与 SimMechanics 间的模型转换接口将模型导入 SimMechanics^[9]，同时根据三维模型自动计算各刚体的质量、质心坐标、转动惯量等属性参数，实现高效快速的机械系统建模。

笔者利用三维建模软件 SolidWorks 建立了某型液压挖掘机的三维模型，通过 SolidWorks 与 SimMechanics 间的模型转换接口将液压挖掘机模型导入 SimMechanics 中，其三维可视化模型如图 2 所示。图中，圆圈表示其所在零部件的质心位置，垂直相交的细线表示挖掘机零部件局部坐标系，左下方坐标系为全局坐标系，也可通过菜单栏改变观

察视角。

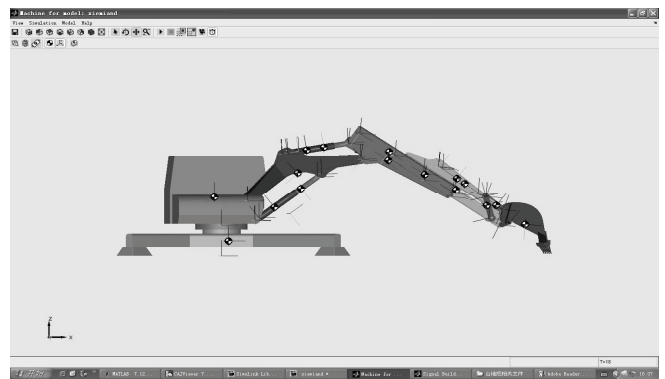


图 2 SimMechanics 中挖掘机三维可视化模型

2 挖掘机液压系统建模

SimHydraulics^[10]是 Matlab7.8 新增的液压系统建模和仿真软件包，SimHydraulics 模块库提供了 70 余种流体和液压机械元件，包括油泵、油缸、蓄能器、液压管路和马达等，大部分液压元器件均可以找到相应模型，SimHydraulics 还提供了自定义模型和自定义流体属性的功能，增加了建模仿真的灵活性。对 SimHydraulics 模型的仿真以数学方程组的计算为基础，使用 Simulink 求解器可直接对 SimHydraulics 模型进行计算仿真。使用 SimHydraulics 可以基于实际液压系统的物理系统结构建立起完整的液压系统模型。SimHydraulics 使用物理网络方式建模^[11]，每个模块均对应实际的液压元器件；元件模块之间用代表动力传输管路的线条连接。在 SimHydraulics 模型中，可以添加 Sensor 模块测量关节或刚体的速度、受力等作为反馈信号实现对运动模型的闭环控制。此外，结合 SimMechanics 工具可以将机械系统、控制系统及电子控制系统有机组合在一起，非常有利于多领域系统的开发。利用 SimHydraulics 建立某型液压挖掘机某一液压缸的液压系统仿真模型，如图 3。

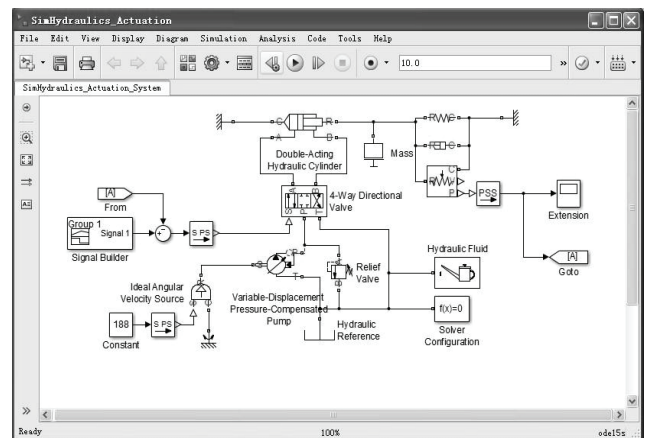


图 3 SimHydraulics 中液压系统仿真模型

3 液压挖掘机多域联合仿真

在前文已建立了液压挖掘机的机械系统和液压系统仿真模型，根据各液压缸与挖掘机工作臂之间的关系，建立液压挖掘机的机液一体化模型，工作臂和液压缸进行封装后的模型如图 4 所示。若要实现对液压挖掘机的多领域联合仿真，还需要建立其控制系统模型，笔者利用 Simulink 建立了液压挖掘机的 PID 控制器，并通过多次仿真调整其参数。最后根据液压挖掘机的实际结构组成及各系统之间的关系，建立了液压挖掘机多领域联合仿真模型^[12]如图 5 所示。图中，Ref 模块为仿真控制信号，Controller 模块为闭环 PID 控制器模块，Excavator 模块为液压挖掘机机械系统与液压系统集成封装子

系统，Angles 模块为各关节转角的实际转动测量值，连线表示各模块间的信号转换关系。由于挖掘机在挖掘过程中回转马达是不工作的，因此在挖掘作业仿真时暂不考虑回转马达的作用。以液压挖掘机一个工作循环的数据作为仿真控制信号。运行仿真模型，得到各工作臂的控制信号及跟踪反馈信号如图 6 所示，图中横坐标表示时间(单位: s)，纵坐标表示各关节的转角(单位: rad)，点划线表示给定控制信号，实线表示跟踪反馈信号，从图中可以看出运动跟踪精度较好。图 7 为各工作液压缸压力变化曲线，PA、PB 分别表示液压缸 A、B 腔的工作压力，从图中可以看出大臂(Boom)和斗杆(Arm)液压缸压力波动较大，与其承受的惯量较大相吻合，证明了多域联合仿真的可行性。

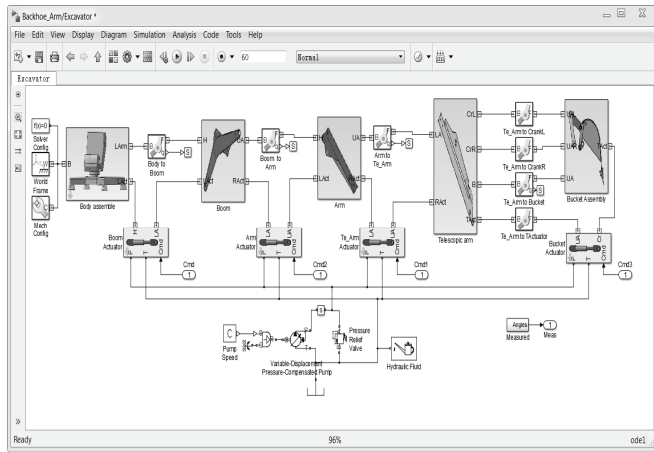


图 4 挖掘机机液一体化模型

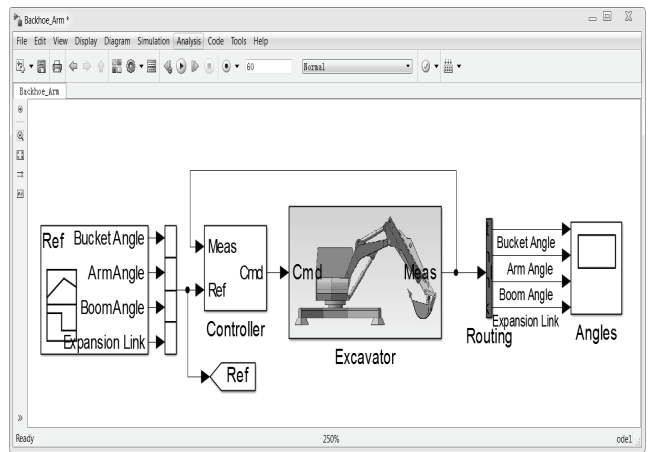


图 5 挖掘机多领域联合模型

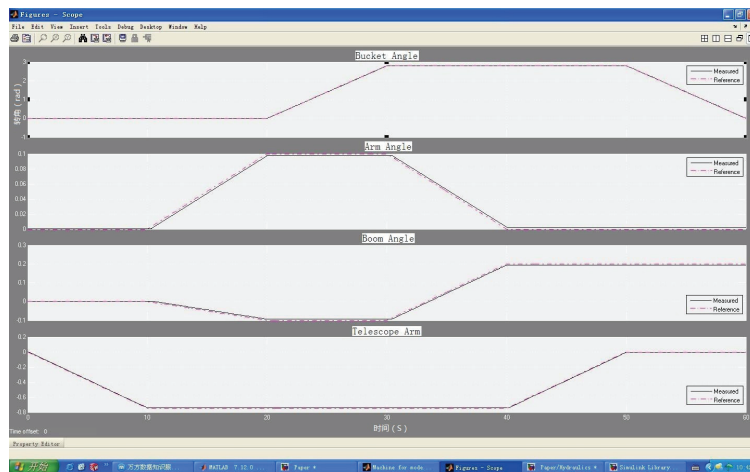


图 6 跟踪反馈信号曲线

4 结论

笔者提出了基于 Matlab 同一仿真平台的多领域复杂系统建模与仿真方法，利用专业建模工具箱对液压挖掘机的机械系统、液压系统和控制系统分别建模，进而通过信号转换实现将各分系统有机集成建立了液压挖掘机多领域联合仿真模型。通过对

仿真结果的分析证明了该方法的可行性。该方法可以在样机设计阶段进行系统整体性能分析，能及时发现错误、减少样机设计错误、提高研制效率、降低开发成本，获得最优的机电液一体化的整机性能。该研究对复杂机电液一体化系统的研究提供了一条便捷、高效的技术途径。

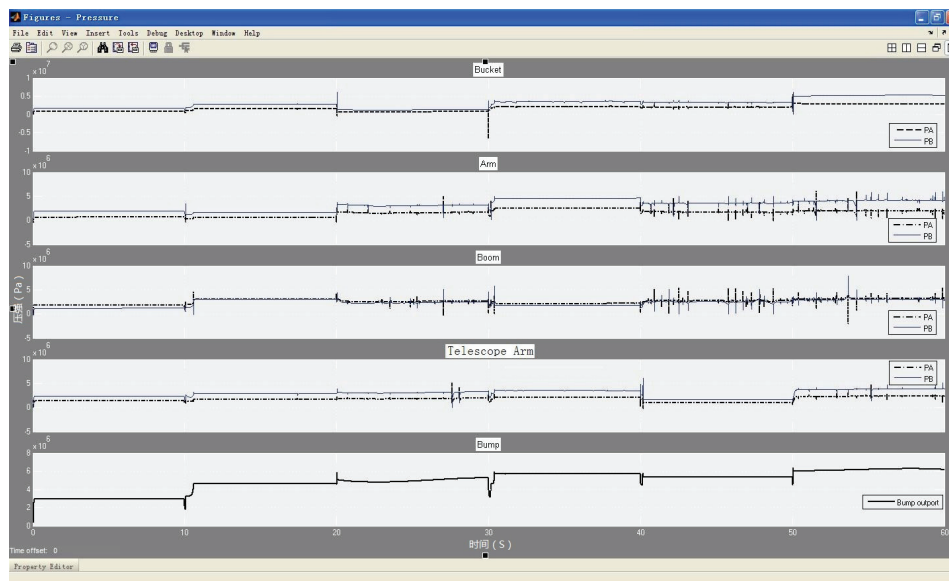


图7 液压缸及泵的压力变化曲线

参考文献:

- [1] 许范. 基于 SOLIDWORKS 典型机构仿真与机械产品 CAD/CAM/CAE 技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [2] 吴正明, 史青录, 等. 基于 AMESim 负载敏感系统的仿真分析[J]. 工程机械, 2013, 44: 38-41.
- [3] 汪君, 赫雷, 周克栋. 基于 ADAMS 与 Simulink 的电动式自动机联合仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 45-48.
- [4] 潘双夏, 刘静, 等. 挖掘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.
- [5] 孙庆华, 刘秀珍, 黄先祥. 多领域建模仿真的软件接口研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18: 203-206.
- [6] 于翠. 某型导弹虚拟样机建模与仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 32(10): 14-16.
- [7] 彭勇. 基于机液联合仿真的挖掘机负载独立流量分配系统动态特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [8] 张立勋, 董玉红. 机电系统仿真与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006: 78-91.
- [9] 葛挺, 王海名, 等. CAD 软件与 Matlab/SimMechanics 接口问题研究[J]. 机电信息, 2011, 24: 201-202.
- [10] 刘勋, 刘玉, 李新有. 基于 Simhydraulics 软件的电液伺服系统仿真分析[J]. 机床与液压, 2009, 37(10): 236-237.
- [11] 李志国, 李夕兵, 王斌. 基于 SimHydraulics 的水力凿机冲击系统动态仿真[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(12): 3835-3843.
- [12] 阮鸿雁, 陈建利, 等. 基于 SimMechanics 的液压挖掘机机构建模[J]. 机床与液压, 2009, 37(12): 182-185.
- [13] 队防空火力分配[J]. 计算机仿真, 2009, 26(6): 10-13.
- [14] 王炜, 程树肠, 张玉芝. 基于遗传蚁群算法的一类武器目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1708-1711.
- [15] 段海滨. 蚁群算法的原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 268-297.
- [16] 傅勉, 张杰, 张军. 武器-目标分配问题的贪心模拟退火算法[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 20-24.
- [17] 曲在滨, 刘彦君, 徐晓飞. 用离散粒子群优化算法求解 WTA 问题[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(3): 67-69.
- [18] Chen H, Flann N S. Parallel simulated annealing and genetic algorithms: a space of hybrid methods[M]. Parallel Problem Solving from Nature 3, Springer-Verlag, 1994: 78-144.
- [19] 罗红英, 刘进忙. 遗传算法在目标优化分配中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(3): 18-28.
- [20] 马良, 朱刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 3-7.
- [21] 王喆. 蚁群算法及其在火力分配问题中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(11): 92-94.

(上接第 11 页)

- [2] 赵师, 孙文纪, 刘洪坤. 基于蚁群算法的火力分配寻优方法研究[J]. 指挥仿真与控制, 2010, 32(2): 66-68.
- [3] Lloy S P, Witsenhausen H S. Weapon Allocation is NP-complete[C]. Proceedings of the IEEE Summer Computer Simulation Conference, Nevada, USA, 1996: 1054-1057.
- [4] Rosenberger J M, Hwang H S, Pallerla R P, et al. The generalized weapon target assignment problem[C]. Proceeding of 10th International Command and Control Research Technology Symposium on The Future of C2. Mclean, VA: Lockheed Martin Corporation, 2005: 1-12.
- [5] Chen J, Xin B, Peng Z H, et al. Evolutionary Decision-makings for the Dynamic Weapon-Target Assignment Problem[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(11): 2006-2018.
- [6] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently Solving General Weapon-Target Assignment Problem by Genetic Algorithm with Greedy Eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2003, 33(1): 113-120.
- [7] 傅调平, 陈建华, 李刚强. 基于遗传蚁群算法的舰艇编