

# 基于 Modelica 的泵车臂架系统多领域 耦合动力学建模与仿真\*

仲作阳<sup>†</sup> 张文明 孟光 荆建平

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要** 主要介绍一种基于 Modelica 语言的泵车臂架系统多领域耦合动力学仿真建模方法. 泵车臂架系统是典型的机械、液压、控制等多领域耦合系统, 在其频繁的启动、制动过程中, 变幅机构和液压元件均承受着强烈的冲击和振动. 传统的单一领域动力学建模方法很难全面反映泵车臂架系统的整体动力学性能, 然而通过几种仿真工具进行联合仿真的方法亦难免存在建模效率、仿真速度等方面的问题. 针对以上不足, 以某型泵车为研究对象, 提供一种基于多领域统一建模语言 Modelica 的机械、液压及控制等多场耦合的泵车臂架系统动力学建模方法, 并对其工作过程进行了动态仿真. 该模型具有模块化、层次化、规范化和参数化, 以及仿真模型互操作性和重用性强的特点.

**关键词** 泵车, modelica, 多领域耦合, 液压, 建模仿真

## 引言

混凝土泵车臂架系统用于混凝土的输送和布料, 其通过臂架油缸伸缩、转台转动, 将混凝土经由附在臂架上的输送管, 直接送达臂架末端所指位置即浇筑点. 在混凝土泵车臂架设计领域, 计算机仿真可以发挥投资少见效快的特点, 由于泵车臂架系统主要由机械、液压和控制等多领域组成, 故而, 对泵车臂架机构合理、科学、全面的多领域并存的动力学建模仿真就显得尤为重要与紧迫<sup>[1]</sup>.

传统的单一领域建模与仿真工具, 显然不能胜任其整体性能仿真分析的任务. 如: 单纯考虑泵车臂架系统自身机械系统的特性, 可以采用多体动力学分析软件(例如 MSC\_ADMAS)来进行仿真, 但在考虑整个系统的动力性、稳定性时, 还涉及液力系统、电子控制系统等, 故采用单一的工具难以对这些由于多个不同领域子系统耦合造成的特性进行准确的分析, 且不能考虑机械、液压及控制的能量耦合效应. 对此典型多领域问题, 工程中也产生了通过对单一领域仿真工具进行集成、或进行多领域延拓的方法, 例如, 将机械系统动力学仿真分析软件 ADAMS 的模型导出成 MATLAB/Simulink 模型, 然后集成到 MATLAB/Simulink 软件中, 并与液压

动力仿真分析软件 AMSim 进行大型联合仿真<sup>[2]</sup>. 虽然这种思路提供了一种解决多能域耦合动力学仿真的方法, 但是此种方法难以做到多种不同工具的无缝集成. 且不同领域的问题采用不同工具建立不同模型进行仿真, 势必要遇到数据传递的复杂问题, 模型重复且不可重用, 会导致仿真精度、建模效率、仿真速度等多方面的问题<sup>[3]</sup>.

Modelica 是一种多领域统一的面向对象的建模语言, 它是为解决多物理系统的统一建模与协同仿真, 在归纳和统一先前多种建模语言的基础上, 于近年提出的一种基于方程的陈述式建模语言. 由于采用数学方程描述不同领域子系统的物理规律和现象, 根据物理系统的拓扑结构基于语言内在的组件连接机制而实现模型构成和多领域集成, 故而具有领域无关的通用模型描述能力, 能够实现复杂系统的不同领域子系统模型间的无缝集成<sup>[4][5][6]</sup>.

## 1 Modelica 模型组件库的建立

### 1.1 臂架多刚体系统模型

本节应用 Modelica. Multibody 多体库, 结合臂架结构, 建立臂架多体系统模型.

#### 1.1.1 泵车举升用液压缸

臂架油缸作为执行机构, 推动臂架进行变幅.

2012-04-20 收到第 1 稿, 2012-06-13 收到修改稿.

\* 国家“863”课题资助项目(2009AA044501)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: zhongzuoyang123@163.com

利用二维多刚体库元件,结合后面将要介绍的变幅液压回路,可以将液压缸力转化为三维机械力,力的三维分解由输入,输出机械结构决定.各臂架变幅油缸输入参数均不同,需结合实际结构进行设置输入.图 1 为封装后的液压缸模型.

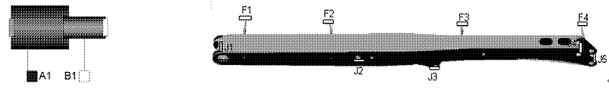


图 1 液压缸模型 图 2 封装后 1#臂模型

Fig. 1 Hydraulic Cylinder Fig. 2 Model of 1# Arm

### 1.1.2 第一节臂模型

1#臂一端和回转平台连接,另一端连接与 2#臂始端.通过变幅液压缸的伸缩实现臂的举升与下降.是臂架系统中承载最大的臂.图 2 为 1#臂架的封装模型,接口  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  用来连接泵送管道,承受管道传来的力及力矩.  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$  和  $J_5$  分别用来连接回转台、1#臂架油缸、2#臂架油缸、连杆 1 以及第 2#臂.通过 fixedtranslation 来设置各接口的位置向量,由 bodyshape 来设置臂架的动力学参数以及外形形状.其它各节臂的建模过程和此类似,只是接口的位置以及各动力学参数有所变化而已.在此便不加赘述.

### 1.1.3 连接件 1 模型

连接件 1 是用以连接 1#臂、2#臂以及 2#臂变幅油缸的关键部件.臂架系统主要通过其实现各节臂架的灵活运动,以及力的传递.图 3 为连接件 1 模型的内部结构,由连杆 1、连杆 2 和三个转动副组成.接口 ia、ib 和 im 分别用于连接 1#臂、2#臂和 2#臂变幅油缸.通过三个 fixedtranslation 来设置各接口的位置向量,由两个 bodyshape 来设置连杆 1、2 的动力学参数以及外形形状.同理,其它各连接件的建模过程和此类似.

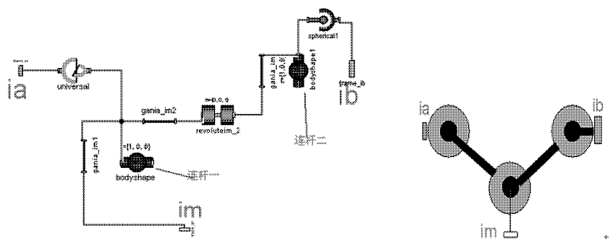


图 3 封装前后的 1#连接件模型

Fig. 3 Model of 1# Connections

### 1.1.4 回转台模型

转台的作用是为臂架系统的旋转提供驱动力,

并且将与臂架反方向的力传导到底盘上,再通过支腿传到地面上,最后这部分力由地面来承受.是臂架系统的支撑机构.图 4 为回转台模型的内部结构.接口 Frame\_a 和 Frame\_b 分别用于连接 1#臂底端和 1#臂变幅油缸活塞杆端.通过两个 fixedtranslation 来设置各接口的位置向量,由 bodyshape 来设置回转台的动力学参数及外形形状.

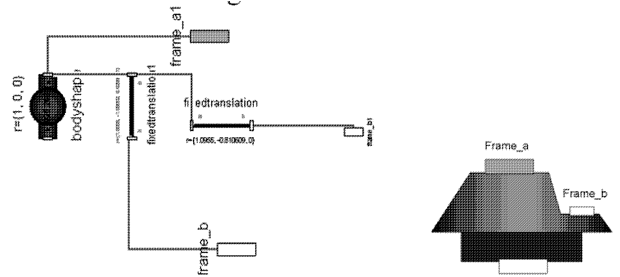


图 4 封装前后的回转台模型

Fig. 4 Model of Rotary Table

## 1.2 臂架系统各液压元件模型

本节中,应用 Modelica 液压元件库 Hylib2.4,结合臂架液压系统原理,搭建液压系统元件级模型.在此着重介绍换向比例多路滑阀、三通流量阀、梭阀的搭建.

### 1.2.1 换向比例多路滑阀

换向比例多路滑阀根据控制信号进行比例换向,进而实现臂架的展开与收回.可以实现臂架动作的无级控制,且与负载变化无关;可以进行多缸组合动作,满足多个执行元件同时工作;集成性高,节约安装空间,整机重量轻.

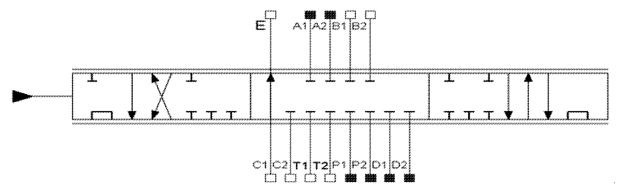


图 5 换向比例多路滑阀功能图

Fig. 5 The proportion multi-slippy Valve

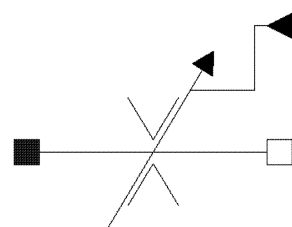


图 6 孔口模型

Fig. 6 Model of Orifice

该多路滑阀功能图如图5所示,为三位十三通滑阀,可以通过如图6孔口出流模型进行构造.模型中,通过孔口出流面积,来控制液压流量.当流体通过流量控制孔的时候,可以用以下两式建模:

$$K = \frac{k_1}{Re} + k_2 \quad (1)$$

$$\Delta P = K \frac{\rho}{2} \frac{Q^2}{A^2} \quad (2)$$

其中,  $Q$  - 孔的流量;  $k_1$  - 为孔的层流部分系数;  $k_2$  - 为紊流的紊流部分系数;  $k_1 = 10$ ;  $k_2 = 2$ ;  $A$  - 孔口出流面积;  $\rho$  - 为流体密度;  $\Delta P$  - 为孔口两端压差;

孔的直径关于阀芯位置是一个线性函数,当阀芯位置被关闭时候流量用泄漏来表示,当阀完全打开时候,用最大直径表示.输入信号下阀芯的位置由下式确定:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 700 \frac{ds}{dt} + 250000s = 250000K \quad (3)$$

$D$  - 孔口直径;  $s$  - 阀芯位置;  $K$  - 输入信号

孔口出流模型,如图6所示.该模型可以通过控制信号  $K$  来改变出流口面积,以改变孔口流量.基本原理为:

$$q = \frac{\pi D (\sqrt{k_1^2 v^2 \rho^2 + 8D^2 k_2 \rho \Delta p} - k_1 v \rho)}{8k_2 \rho} \quad (4)$$

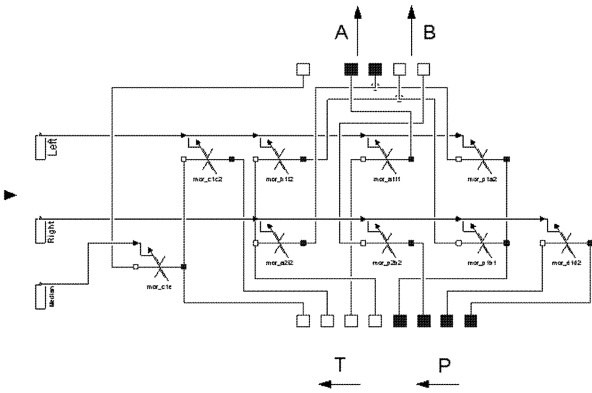


图7 换向比例多路滑阀内部结构图

Fig. 7 Model of the proportion multi-slippy Valve

图7为利用孔口出流模型来构造的换向比例多路滑阀.模型中,控制信号 left, right, median 来分别控制阀芯处于左位、右位或者中位.其中,孔的最大流量设置为  $0.0008333\text{m}^3/\text{s}$ ,压降为  $3.5\text{e}5\text{bar}$ ,泄漏量为  $1.666\text{e}-5\text{m}^3/\text{s}$ .

### 1.2.2 三通流量阀

该阀的功能概括如下:1)卸荷系统总流量;2)控制每片阀的流量;3)建立系统所需压力;4)具有

一定减震作用.因该阀一个进口两个出口故称三通流量控制阀.

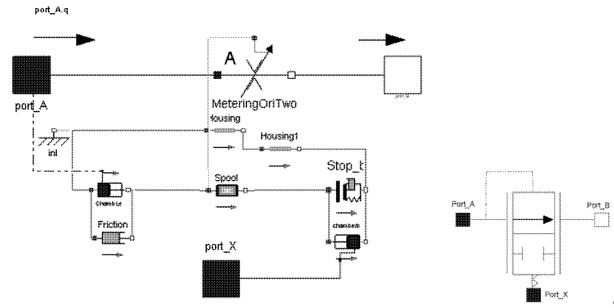


图8 封装前后的三通流量阀模型

Fig. 8 Model of Three links Valve

图8为利用液压元件库 Hylib2.4 来构造的三通流量阀模型.这里,通过两端两个液压缸的压力来控制阀芯 Spool 的位置,进而控制孔的开口面积大小.其中,两个液压缸的活塞面积都设置为  $0.0005$ ,弹簧刚度为  $1.72\text{e}7\text{N/m}$ .

模型中,仍然是通过孔口出流面积,来控制液压流量.其中,接口 Port\_A 与 Port\_B 联通主油路,为主油路提供流量,阀芯在弹簧的作用下为常闭.当系统供油时,在 Port\_A 端控制油路的作用下,阀芯打开,主油路接通.在系统受到负载时,通过梭阀反馈的最大负载压力油到达 Port\_X 端,在其作用下,阀芯重新运动到适当的位置,使孔的出流面积减小.

### 1.2.3 梭阀

梭阀的作用是与其它滑阀的梭阀一起将最大的压力油反馈给三通流量阀4,从而调节主油路流量.图9为利用液压元件库 Hylib2.4 来构造的梭阀模型.这里,孔的最大开口半径为  $0.005\text{m}$ ,孔的开口压力为  $5\text{bar}$ ,泄漏量为  $1\text{e}-16\text{m}^3/\text{s}$ .模型中,也是通过孔口出流面积,来控制液压流量.

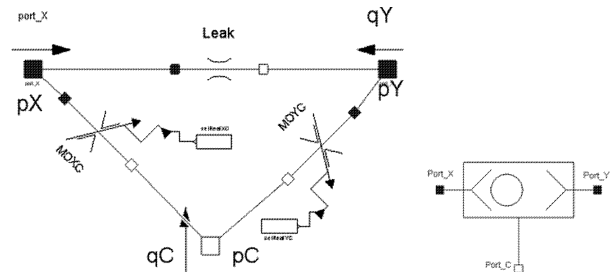


图9 封装前后的梭阀模型

Fig. 9 Model of Shuttle valve

其中,接口 Port\_X 接相应多路滑阀的出口压

力,Port\_Y 接下一阶梭阀的出口压力,最后一阶梭阀的 Port\_Y 接油箱. 通过压力比较,当接口 Port\_X 端压力大于 Port\_Y 压力时,Port\_X 和 Port\_C 导通,将多路滑阀压力作为本阶最高压力传递给上一阶梭阀比较,直至比较到三通流量阀. 当接口 Port\_Y 端压力大于 Port\_X 压力时,Port\_Y 和 Port\_C 导通,同样将其压力作为最高压力传递给上一阶梭阀比较,直至比较到三通流量阀为止.

### 1.3 臂架系统各液压系统回路模型

以下各系统中各液压部件主要是基于 Hylib 2.4 库中的接口、单向阀、阻尼孔、溢流阀、比例伺服阀、平衡阀、液压泵、液压马达以及双向液压缸等各种液压元器件进行变形或二次开发而搭建.

#### 1.3.1 臂架系统液压系统级模型

定量泵供油系统是整个臂架系统的动力源,由它提供各节臂架展开与回收的液压动力,也包括泵车回转支承系统和支腿系统的动力提供. 定量泵供油系统封装后的功能模型图如图 10 所示,共有  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  五个液压油输出口,以及  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 、 $B_5$  五个液压油回油口,它们分别接五个臂架变幅油缸. 通过  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_5$  五个控制端来输入各个多路阀的开口控制信号,实现臂架运动的控制.

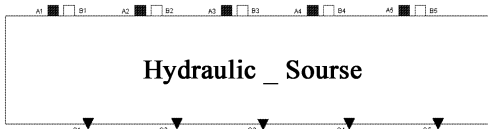


图 10 定量泵供油系统封装模型

Fig. 10 The Dosing Pumps Fuel supply system

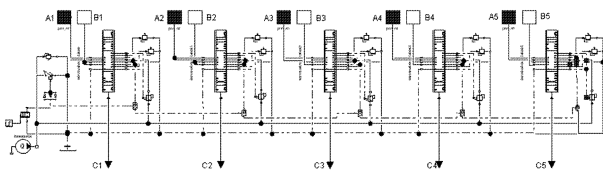


图 11 定量泵供油系统模型内部结构图

Fig. 11 Model of Fuel supply system

图 11 为定量泵供油系统模型内部结构图. 其具体功能原理在此不作详细介绍,这里只对两通流量阀稍加阐述. 两通流量阀为确保多个执行元件同时工作,在片阀之间应进行压力补偿. 对于不同负载的执行元件来说,补偿阀应可以自动实现不同的压力需求补偿,从而各使执行元件运动速度独立于

负载. 多路阀溢流压力是由各溢流阀决定,系统压力由三通流量阀与负载压力匹配,多余流量在相应压力下卸荷. 模型中,泵的最大流量设置为  $Q = 80L/min$ ,主溢流阀压力设置为  $P = 320bar$ .

#### 1.3.2 变幅回路模型

臂架油缸作为执行机构,推动臂架进行变幅. 在此过程中,变幅回路主要是实现臂架油缸运动过程中平衡负载以及控制和稳定运动速度的功能,且在臂架油缸不动作中时起液压锁止作用. 图 12 为利用液压元件库 Hylib2.4 来构造的变幅回路模型. 其中,两个液压接口分别连接定量泵供油系统的出油口和回油口,为变幅液压缸提供动力. 二维机械接口 flange\_aref 和 flange\_b 通过转化三位机械力来实现变幅液压缸的作用. 这里,单向阀的开口压力设置为  $1.25bar$ ,泄漏量为  $1e-12m^3/s$ . 阻尼孔的通流量为  $4.2e-11m^3/s$ . 液压缸的无杆端活塞面积都设置为  $0.05m^2$ ,有杆端面积为  $0.03m^2$ . 行程和活塞杆长根据不同臂架分别进行设置.

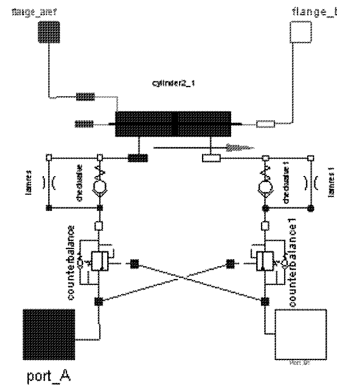


图 12 变幅回路

Fig. 12 Hydraulic Luffing Circuits

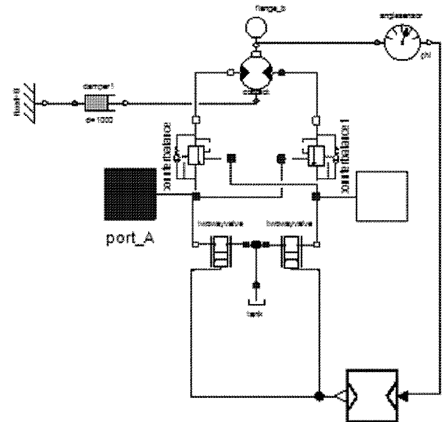


图 13 臂架回转液压回路

Fig. 13 Hydraulic Rotary Circuits

### 1.3.3 臂架回转液压回路模型

液压马达作为执行机构,作用推动臂架系统进行回转.在此过程中,回转回路主要是实现液压马达运动过程中平衡负载以及控制和稳定运动速度的功能,而且在液压马达不动作中时起液压锁止作用.图13为利用液压元件库 Hylib2.4 来构造的臂架回转液压回路模型.

## 2 系统仿真模型及结果

各单元模块建立后,根据泵车臂架系统的工作原理,在 MWorks 或 Dymola 等支持 Modelica 语言的软件平台下通过拖放元件、元件接口连接、元件参数设置等即可实现对臂架系统的建模.图14所示为作者在 MWorks 平台上建立的某型泵车臂架系统仿真模型.

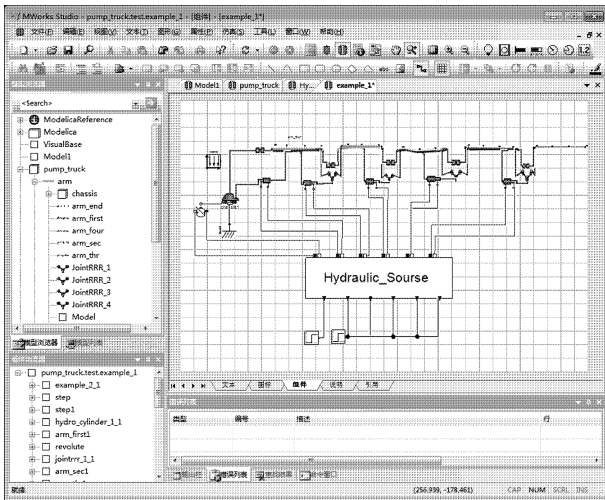


图14 泵车臂架系统动力学仿真模型图

Fig.14 Multi-field Coupling Dynamics model for the Truck System of Pump

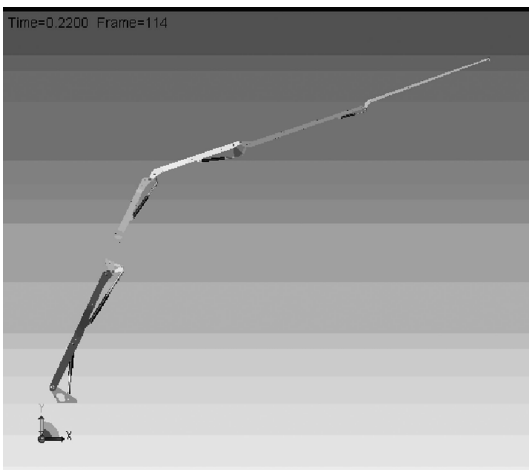


图15 系统3D动画演示

Fig.15 3D Animation of System

进行编译仿真时,用户可以根据需要选择仿真时间、步长与算法.模型中,用户只需双击模块即可弹出参数修改界面,可以对各模块内置参数进行设计修改.整个泵车臂架系统仿真模型支持三位动画与所有参数的曲线输出,如图15所示.

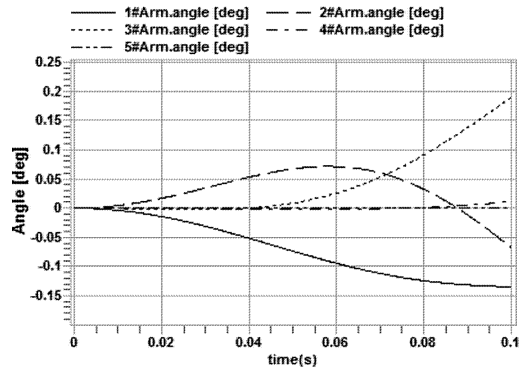


图16 各节臂旋转角度曲线

Fig.16 AngularVelocity of The Arms

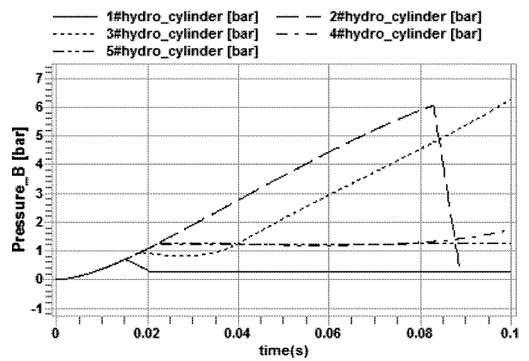


图17 各液压缸B端压力变化曲线

Fig.17 Pressure of The Hydraulic cylinders

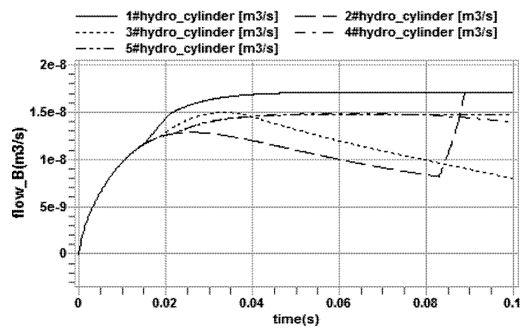


图18 各液压缸B端流量变化曲线

Fig.18 Flow of The Hydraulic cylinders

限于篇幅所限,如图16、图17及图18所示,用户可以选择任意参数输出曲线,同时支持曲线的处理,如求和、导数与FFT等处理.

### 3 结论

(1)本文建立的泵车臂架系统多领域耦合动力学仿真模型三维动画显示的运动特性、动力特性均与实际系统相吻合.将机械、液压和控制等多领域问题通过 Modelica 语言无缝集成,充分考虑了机械、液压和控制的能量耦合效应,避免了普遍采用的单一领域系统动力学分析的不足.

(2)仿真结果表明,系统中合理的控制系统不仅能确保臂架系统在变幅起始和结束时平稳启动和停止,而且确保变幅过程始终保持匀速,使整个系统的稳定性提高,避免产生大的冲击和振动.

(3)仿真结果验证了 Modelica 多领域多物理场耦合模型的科学性与可行性,为泵车臂架系统的工程设计提供了理论依据,其方法和程序可以普遍应用于机、电、液、控、磁等相耦合的大型复杂机械系统的建模与动态特性分析中.

### 参 考 文 献

1 苏小平,殷晨波,王东方等.混凝土泵车布料臂架系统多体动力学仿真.中国工程机械学报,2004,12(2):(Su X P, Yin C B, Wang D F. Simulation of the boom of concrete boom pump truck based on multi-body dynamics. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2004, 12(2):(in

Chinese))

- 2 韩慧仙,曹显利.基于 AMESmi 的混凝土泵车臂架多路阀建模与仿真.机床与液压,2007,37(10):(Han H X, Cao X L. Modeling and simulation of pump truck arm multi-way valve based on AMESim. *Machine Tool & Hydraulics*, 2007, 37(10):(in Chinese))
- 3 王廷兴,孟光,王瑜.基于压气机级的压气机系统的建模与仿真方法.计算机仿真,2004,21(9):(Wang T X, Meng G, Wang Y. Modeling and simulation approach for compressor system based on compressor stage. *Computer Simulation*, 2004, 21(9):(in Chinese))
- 4 Beater P. Modeling of hydraulic systems - tutorial for hylib. in Proceedings of the 2000 Modelica Workshop, Lund, Sweden, 2000:378 ~ 381
- 5 任志彬,孟光,李防战等.基于 Modelica 和 Dymola 的航空发动机建模与性能仿真.燃气涡轮试验与研究,2005,18(4):40 ~ 44 (Ren Z B, Meng G, Li F Z. Modeling and performance simulation for aircraft engine based on modelica and dymola. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2005, 18(4):40 ~ 44 (in Chinese))
- 6 王廷兴,李防战,孟光等.基于 Modelica 和 Dymola 的压气机系统的建模与仿真.燃气涡轮试验与研究,2004,17(3):35 ~ 39 (Wang T X, Li F Z, Meng G. Modeling and simulation approaches for compressor system based on modelica and dymola. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2004, 17(3):35 ~ 39(in Chinese))

## MULTI-FIELD COUPLING DYNAMICS SIMULATION FOR THE TRUCK SYSTEM OF PUMP BASE ON MODELICA \*

Zhong Zuoyang<sup>†</sup> Zhang Wenming Meng Guang Jing Jianping

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** To make a study of Truck System of Pump, a multi-fields coupling dynamic model concerning the mechanical, hydraulic of the mobile Truck System is established using Mworks platform based on the Modelica language. On the basis of the mechanical and hydraulic coupling modeling, a precise model of PD control on the hoisting amplitude and speed is proposed and control program is developed. The luffing working process of the Truck system is simulated and the luffing force curve over time is obtained in the hydrocylinder. The results show that the established coupling model of machine. fluid and control matches well with the practical situation and are of significant practical value to the multi-domain coupling modeling of the Truck System of Pump mechanism.

**Key words** Pump, modelica, Multi-field Coupling, Hydraulic, Simulation

Received 20 April 2012, revised 13 June 2012.

\* Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program, 2009AA044501)

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: zhongzuoyang123@163.com