

doi: 10.7690/bgzdh.2014.09.004

矢量喷管伺服系统联合仿真与控制方案

李锋, 马承利, 王凯, 林阳阳

(第二炮兵工程大学 2 系, 西安 710025)

摘要: 针对矢量喷管位置伺服系统在实际运行过程中容易受到系统外部扰动导致参数不确定的问题, 设计了基于软件接口的机电液系统联合仿真与控制方案, 通过 SolidWorks、ANSYS、ADAMS、EASY5 和 Simulink 之间数据交换分别建立了矢量喷管伺服机构刚柔耦合动力学模型、液压系统动态模型和滑模控制器, 并通过接口实现了矢量喷管位置伺服系统仿真模型的集成。仿真结果证明: 采用自适应模糊滑模控制器有效克服了矢量喷管位置伺服系统参数不确定和非线性的影响, 实现了对矢量喷管伺服机构的高精度控制。

关键词: 矢量喷管位置伺服系统; 联合仿真; 跟踪控制; 软件接口; 自适应模糊滑模控制

中图分类号: TJ765.2+3 **文献标志码:** A

Co-simulation and Control Scheme of Vectoring Nozzle Servo Mechanism

Li Feng, Ma Chengli, Wang Kai, Lin Yangyang

(No. 2 Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In view of the problems that vectoring nozzle servo system is vulnerable to external disturbance in the process of actual operation and then the parameter becomes uncertain, the co-simulation and control method based on software interface is proposed in this paper. The rigid-flexible-coupling dynamic model of vectoring nozzle servo mechanism, hydraulic system dynamic model and the sliding mode controller are established respectively through data exchange of SolidWorks, ANSYS, ADAMS, EASY5 and Simulink, and then integration of simulation models for vectoring nozzle servo system is realized by software interfaces. The simulation results show that adaptive fuzzy sliding mode control strategy could overcome the effect of uncertainty and nonlinearity on system parameter and implement the high accuracy of vectoring nozzle servo mechanism.

Keywords: vectoring nozzle servo system; co-simulation; tracking control; software interface; adaptive fuzzy sliding mode control

0 引言

矢量喷管位置伺服系统由液压控制系统和喷管伺服机构(底座、电液伺服作动器、作动杆、喷管)组成, 为典型机电液一体化系统。由于矢量喷管位置伺服系统对频响、控制精度的要求极其严格, 而且实际运行过程中存在大范围高速运动, 易受振动影响, 控制器设计时系统非线性、时变特性、参数不确定性以及机构结构柔度等因素无法忽略。

为了克服系统外部扰动并保证其性能达到要求, 笔者寻求简单精确建立矢量喷管位置伺服系统的模型并研究其鲁棒控制策略。

1 联合仿真结构

矢量喷管位置伺服系统是典型机电液一体化系统, 如图 1, 电液伺服阀控制作动器使喷管快速准确到达指令位置。对此类复杂系统进行建模仿真时, 一种传统方法是多体动力学系统、液压系统和控制系统分开建模仿真, 由于在建模时未考虑系统之

间的耦合与关联, 造成仿真结果与实际情况不符; 另一种传统方法是在单一建模环境下通过适当简化而直接建立起系统的近似数学模型, 这类方法难以避免对模型大量简化造成的误差, 建模工作量巨大且精度难以满足要求。基于软件接口的机电液系统联合仿真方法可以充分发挥各个领域成熟的商业软件的优势, 建立更接近实际系统的仿真模型, 降低微分方程的求解难度, 得到更加真实有效的仿真结果。

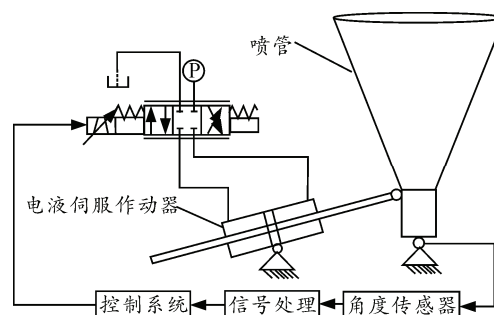


图 1 矢量喷管位置伺服系统结构示意图

矢量喷管位置伺服系统由多体动力学系统部

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-04-24

作者简介: 李锋(1966—), 男, 河北人, 博士, 教授, 从事武器系统仿真与自动检测方面的研究。

分、液压系统部分和控制系统部分组成，联合仿真结构如图 2 所示。对于多体动力学系统部分采用 ANSYS 建立伺服机构关键部件—喷管的柔性体模型，应用 ADAMS 完成刚柔耦合多体动力学系统的组织。液压和控制系统动态模型采用同为波音公司的 EASY5 软件，可以大大简化软件接口配置，降低联合仿真的难度。作动器为多体动力学部分和液压系统部分的连接部件，2 个部分通过油缸驱动力和作动杆反馈的位移和速度信号连接，控制部分输入为喷管的摆角和角速度，输出为伺服阀的控制信号。伺服系统的滑模跟踪控制算法模型在主仿真环境——Simulink 中实现。利用上述软件建立各部分模型的输入输出变量，配置各模型之间的接口以实现动态数据交换，选择合适的求解器，即可进行整个系统的仿真分析。

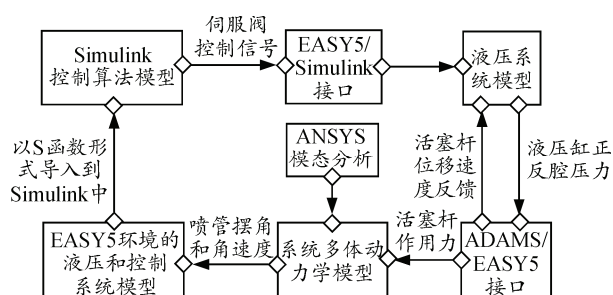


图 2 矢量喷管位置伺服系统联合仿真结构

2 多体动力学系统建模

2.1 伺服机构结构动力学模型的建立

结构动力学模型的建立首先在各子系统层借助相关领域仿真软件进行建模，然后实现各子系统模型之间的数据共享和信息交互，从而进行结构动力学仿真分析^[1]。

在 ADAMS 中进行运动学、动力学计算时，只考虑零件的质心和质量，而对零件的外部形状不予考虑，只要仿真零件的质量、质心位置、惯性矩与实际零件相同，仿真结果是等价的^[2]。复杂零件建模不是 ADAMS 的专长，笔者通过 SolidWorks 对机构建模并进行合理简化，完成机构配合关系和初始状态的定义，得到仿真模型。通过 Parasolid 格式导入到 ADAMS 中，在 ADAMS 下定义各部件之间的约束关系及作用力。

矢量喷管伺服机构是通过螺栓与地面固连的。经由 SolidWorks 导入 ADAMS 的模型，初始状态为悬在建模环境中的物体。如果仅仅应用固定副连接底座和地面就无法真实模拟底座与地面的相互作用

用，因此使用 ADAMS 工具箱中的 Box 创建地面模型，地面与矢量喷管伺服机构底座之间的相互作用力用接触力模拟。在 ADAMS 中接触力的定义^[3]是：

$$F = \begin{cases} K(x_0 - x)^e - Cdx/dt \text{STEP}(x, x_0 - d, 1, x_0, 0), & x < x_0 \\ 0 & x \geq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中：STEP 为阶跃函数； x 为碰撞过程位移量； x_0 为触发接触力的位移量； K 为刚度系数，指定用于计算接触模型法向力的材料刚度； e 为非线性指数，用于计算完全阻尼值； C 为阻尼系数； d 为贯穿深度。

矢量喷管伺服机构为简单的曲柄摇块机构，ADAMS 在定义这种封闭机构约束的过程中往往出现过约束的情况。用基本副替代其中一个低副可消除过约束，但后果是无法定义 2 个构件之间的相互作用力，而本机构中构件相互作用力的计算是必需的。因此文中提出利用点线副替代作动杆与喷管间的转动副，扭簧-阻尼器替代转动副的摩擦力，作动杆与喷管间铰链间隙用接触力表示的方法，既解决自由度问题，又不会对相互作用力的计算产生影响。

2.2 基于 ANSYS 的伺服机构刚柔耦合模型的建立

ADAMS/Flex 模块允许在 ADAMS 模型中根据模态频率数据创建柔性体部件^[4]，所有有限元分析工具都可以生成 ADAMS 所需的模态中性文件。笔者采用 ANSYS 从 SolidWorks 导入 Parasolid 文件建立有限元模型。在 ANSYS 中定义喷管的材料属性，选择 8 节点三维结构实体单元 Solid45，采用智能网格方法进行划分。根据系统中喷管的受力情况，选取喷管与底座、喷管与作动杆铰接处的 4 个界面节点，这样 ADAMS 可以在刚性体与柔性体间添加约束和力。

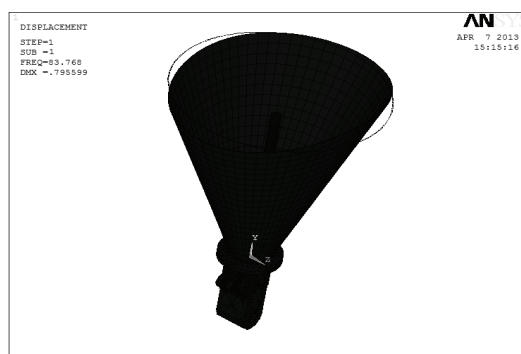


图 3 喷管第一阶振型

根据喷管的实际承载情况加入约束，进行模态分析，生成模态中性文件。模态中性文件包含了柔性体的质量、质心、转动惯量、频率、振型以及对

载荷的参与因子等信息。图 3 为喷管第一阶振型，由图可见第一阶频率为 83.768 Hz，振幅为 0.795 599，振型表现为沿运动方向薄壁结构的拉伸。

将喷管模态中性文件通过 Rigid to Flex 命令导入到 ADAMS 中将原机构中刚体替换为柔性体，替换后构件所受约束和力会自动继承。去除系统中的重力，利用 ADAMS/Linear 模块进行模态求解，求解结果与 ANSYS 模态分析结果比较，以检验模态中性文件的正确性。喷管前 6 阶模态对比如表 1。

表 1 喷管模态对比结果

模态阶数	ANSYS 固有频率/Hz	幅值/mm	ADAMS 固有频率/Hz
1	83.768	0.795 6	83.704
2	84.184	0.797 5	84.101
3	87.051	0.867 1	87.045
4	99.647	1.619 0	99.638
5	103.65	1.590 0	103.52
6	139.87	0.961 6	139.73

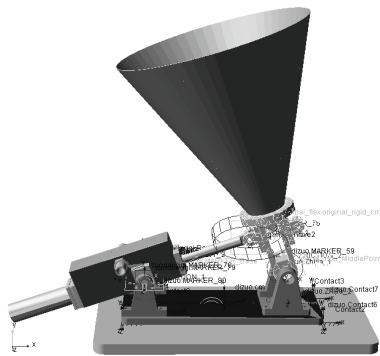


图 4 矢量喷管伺服机构刚柔耦合多体动力学模型

至此，矢量喷管伺服机构的刚柔耦合多体动力学模型建立完毕。如图 4 所示，ADAMS 模型共有 2 个转动副，1 个点线副、1 个移动副，1 个扭簧阻尼力，底座-地面接触力以及作动杆-喷管铰接处间隙接触力。设置 ADAMS-EASY5 仿真接口单位以及输入输出变量后即可将动力学模型引入到 EASY5 环境中。

3 液压及控制系统建模

EASY5 是面向多学科动态系统和控制系统的仿真软件，用于产品的概念和系统初级设计阶段，它的图形化建模环境允许用户直接在计算机屏幕上绘制工程系统原理图或控制理论框图，从而构建仿真模型^[5]。

EASY5 通过 ADAMS Mechanism 接口模块与 ADAMS 中的矢量喷管伺服机构动力学模型实现集成。EASY5 中油缸出力作为 ADAMS 中作动器的驱动力，ADAMS 中作动杆位移和速度反馈给 EASY5 活塞杆，组成局部反馈回路。

应用 EASY5 的热液压库和通用元件库建立总体机械-液压控制系统模型(如图 5)。配置外部模型接口元件并导出模型为 Matlab/Simulink S-Function，在 Simulink 中即可像普通被控对象模型一样设计控制器。

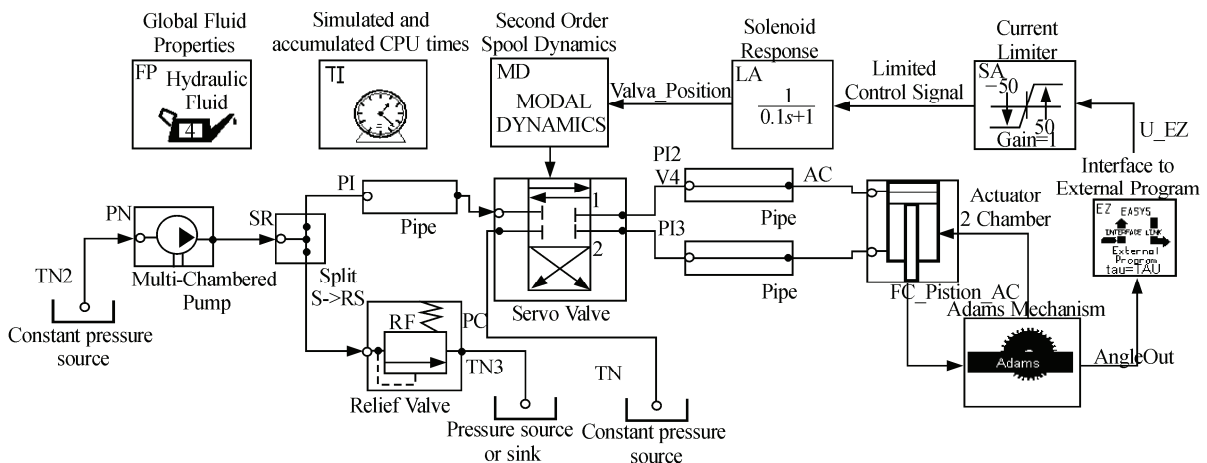


图 5 矢量喷管位置伺服系统机械-液压控制系统模型

4 控制方案设计

矢量喷管位置伺服系统所处领域的环境和任务复杂，系统扰动大，工作范围宽，时变参量多，难以精确建模。这些特点对系统稳定性和动态特性产生了重大影响，特别是控制精度受负载特性的影响

而难以预测^[4]。而且矢量喷管位置伺服系统对频带和跟踪精度要求很高，控制算法必须实时性强，简单可靠。在这种情况下，仅采用传统的液压控制技术难以满足精密控制的要求。

由于滑模变结构控制可以通过控制器结构的不断调整 and 变化，有效地控制具有参数变化和外部扰

动的被控对象，这与矢量喷管位置伺服系统的控制要求是一致的，因此笔者将滑模变结构控制引入到矢量喷管位置伺服系统的控制中。对于控制器抖振现象，可以通过引入模糊理论来消除，但是模糊规则中参数固定不具有自适应能力，难以有效处理系统中的不确定及干扰对系统的影响^[6]。所以考虑应用自适应模糊滑模控制的方案。

自适应模糊滑模控制采用积分滑模面设计切换函数，以减小稳态误差；采用自适应模糊控制逼近滑模控制中的等效控制，采用自适应率对滑模控制器中切换项进行模糊逼近，以平滑不连续控制，削弱抖振，使系统具有较好的动态响应性能、较小的稳态控制精度和强的鲁棒性。积分滑模面和控制器表达式^[7-8]如下：

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \dot{\theta}(t) - \int_0^t [\ddot{r}(t) - k_1 \dot{e}(t) - k_2 e(t)] dt \\
 u(t) &= u_{fz} + u_{vs} \\
 u_{fz}(s, \hat{\alpha}) &= \hat{\alpha}^T \xi \\
 u_{vs} &= -\hat{E}(t) \operatorname{sgn}(s(t))
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中： $s(t)$ 为切换函数， $u(t)$ 为自适应模糊滑模控制器输入， u_{fz} 为自适应模糊控制输出， u_{vs} 为自适应切换控制输出， $\hat{\alpha}$ 、 ξ 为控制器参数， $E(t)$ 为切

换增益， $\operatorname{sgn}(s(t))$ 为滑模面的符号函数。

自适应模糊滑模控制方案的结构如图 6 所示。

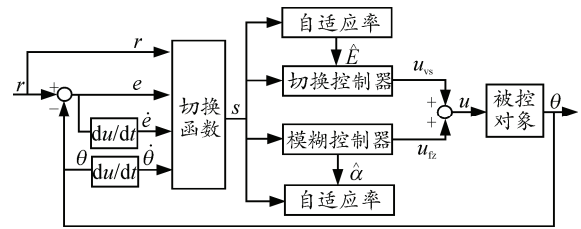


图 6 自适应模糊滑模控制方案结构

根据滑模面和李雅普诺夫函数，定义切换控制器和模糊控制器的自适应率：

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{\alpha}} &= \hat{\alpha} = -\eta_1 s(t) \xi \\
 \dot{\hat{E}}(t) &= \eta_2 |s(t)|
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

定义 5 个模糊子集（负大 NL，负小 NS，零 E，正小 PS，正大 PL），其相应的高斯型隶属函数的中心值分别为(-1,-0.5,0,0.5,1)，宽度为 0.3，采用这 5 条规则来逼近理想滑模控制器输出。

定义自适应率和模糊系统隶属函数后便可在 Simulink 环境中建立的控制系统的总体仿真框图。如图 7 所示，图中名为 Control Plant 的黄色 S-Function 模块即为 EASY5 导入的机械-液压系统模型。

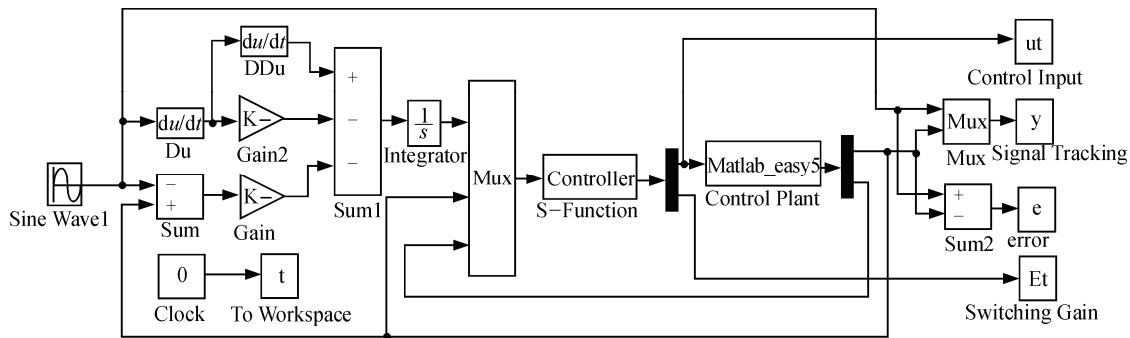
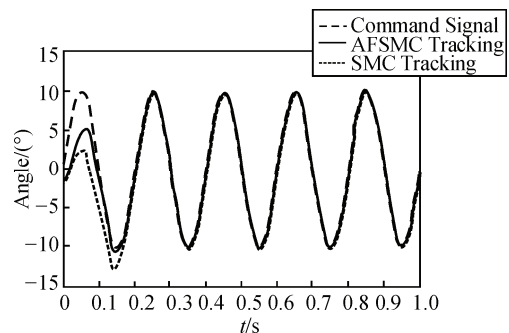


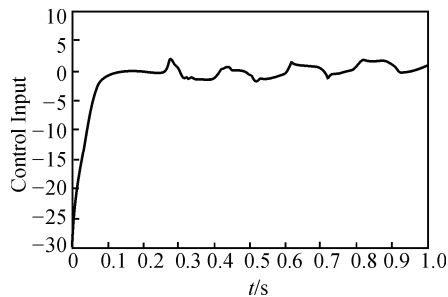
图 7 Simulink 环境下控制系统仿真框图

5 仿真与实验分析

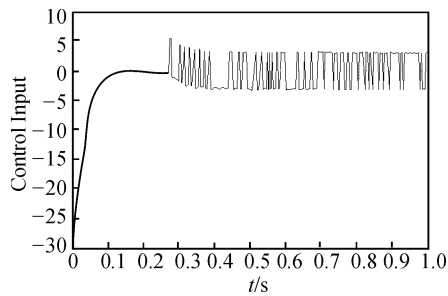
设计好控制器参数后便可开始仿真。本系统中， $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{E}(t)$ 的初值分别为 0.15 和 0.20，倒立矢量喷管的初始状态为 [0,0]。给定角度指令 $r(t) = 10\cos(10\pi t)$ ，采样频率 200 Hz，取切换函数参数 $k_1=12$ ， $k_2=20$ ，控制器参数 $\eta_1=100$ ， $\eta_2=0.4$ 。图 8(a)为正弦信号跟踪曲线，图 8(b)为自适应模糊滑模控制器输出曲线，图 8(c)为普通滑模控制器输出。



(a) 正弦跟踪曲线



(b) 自适应模糊滑模控制器输出



(c) 普通滑模控制器输出

图 8 仿真结果

由仿真结果可见：对于频率为 5 Hz 幅值为 10° 的正弦信号，系统经过 0.3 s 调整后实现了精确跟踪，常规滑模控制的位置跟踪抖动量比较大，而自适应模糊滑模控制基本消除了抖动现象，并具有良好的稳态精度。这主要是参数在线调节可有效处理参数的不确定。由图 8(b)可以看出自适应模糊滑模控制作用较为平滑，有效削弱了切换控制产生的高频抖振；因此，采用自适应模糊滑模控制器有效克服了矢量喷管位置伺服系统参数不确定和非线性的影响，具有较高的稳态控制精度，实现了对矢量喷管伺服机构的高精度控制。说明采用自适应模糊滑模控制器有效克服了矢量喷管位置伺服系统参数时变和非线性的影响，具有较高的稳态控制精度，实现了对矢量喷管位置伺服系统的高精度跟踪控制。

6 结束语

为精确模拟矢量喷管位置伺服系统在实际工况下的动态行为，降低数学建模和求解的难度，笔者探讨了基于软件接口的大型机电液一体化系统联合仿真的一般方法，利用 ADAMS、ANSYS、EASY5、Simulink 建立了机电液系统的虚拟样机模型。联合仿真模型的建立既为矢量喷管位置伺服系统的机械、液压、控制部分分析优化提供了仿真平台，又为系统功能扩展提供了一定的技术准备。

为提高系统的鲁棒性和加快系统响应速度，笔者将自适应模糊滑模控制器应用到系统的正弦位置跟踪控制中，有效克服了系统非线性、参数不确定性和未建模动态等因素的影响，控制器实现简单，具有很高的控制精度，为矢量喷管位置伺服系统实时控制器优化也提供了一定的实现途径。

参考文献：

- [1] 龚苏生, 徐长生. 门座起重机刚柔耦合动力学仿真研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012(4): 419-420.
- [2] 张霖. 多杆内燃机柔性体优化分析[D]. 天津: 天津大学出版社, 2006.
- [3] 黄先祥, 高钦和, 郭晓松. 大型装置起竖过程的动力学建模研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 271-273.
- [4] 沈俊, 宋健. 基于 ADAMS 和 Simulink 联合仿真的 ABS 控制算法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 61-63.
- [5] 李江波, 黄明辉, 赵兴. 基于 ADAMS 与 EASY5 的大型模锻液压机联合仿真[J]. 机械设计与制造, 2011(6): 236-237.
- [6] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 127-206.
- [7] 刘云峰, 缪栋. 电液伺服系统的自适应模糊滑模控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006(7): 141-144.
- [8] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 97-100.