

基于 AMESim 的隔舱式贮箱推进剂 管理仿真研究

苏立超, 刘建勇, 章成亮, 石竟成

(中国航天科技集团公司 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 通过多学科动力学建模方法研究, 利用 AMESim 建立了隔舱式贮箱推进剂输送系统机械、液流与控制动力学模型, 并对不同工况下推进剂输送系统动态特性进行数值仿真, 获得了隔舱式贮箱推进剂动态变化、各个隔舱的推进剂消耗率及质心位移等结果。仿真结果显示隔舱总体布局与初始容积分配、隔舱连通结构、飞行轨迹等均对隔舱式贮箱推进剂动态变化产生影响, 所建立的模型可应用于隔舱式贮箱总体及结构设计。

关键词: 动态仿真; 隔舱式贮箱; AMESim 模型; 推进剂管理; 质心计算

中图分类号: V434.1

文献标志码: A

Simulation research on compartmental tank propellant management based on AMESim

SU Li-chao, LIU Jian-yong, ZHANG Cheng-liang, SHI Jing-cheng

(Science and Technology on Space Physics Laboratory,

China Academy of Launch Vehicle Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: According to the research on the method of multi-subjects dynamic modeling, an AMESim mechanical, hydraulic and control dynamic complicated model of propellant feed system based on the compartmental tank was established, and then numerical simulation was made on the dynamic characteristics of the propellant feed system under different working conditions. The results of dynamic change of the propellant, the consumption rate and the centroid displacement of the propellant were obtained. The simulation results show that the dynamic change of the compartmental tank propellant is influenced by the compartments general layout, initial compartments volume, structure design, flight trajectory and etc, so the simulation model can provide guidance to improve compartmental tank overall and structure design.

Key words: dynamic simulation; compartmental tank; AMESim model;
propellant management; centroid calculation

隔舱式贮箱推进剂管理模式是为了适应大气层内高速机动飞行,特别是较长的循环机动飞行和长径比大的贮箱结构,而开发研制的新型管理模式,该模式既能保证推进剂连续输送又能控制推进剂运动范围^[1-2]。这种隔舱式贮箱推进剂管理模式在美国航空航天验证飞行器 X-15/X-34 上均获得采用,解决了大机载荷适应性、纵横向晃动抑制、

质心位移控制和有效平衡等多项关键技术^[3-4]。

增压输送系统在总体方案设计之初需要参与总体方案论证,并对贮箱气-液输送过程进行仿真研究,以确定贮箱布局、内部隔舱化具体结构能否同时满足推进剂连续输送与控制系统稳定性的要求,避免总体方案出现反复^[5]。目前关于隔舱式贮箱推进剂管理的理论研究和分析报导较少,系统建

模与动态仿真方法有待进行深入探讨和研究。

本文针对隔舱式贮箱推进剂输送系统,对其结构形式及工作原理进行分析,基于 AMESim 建立了某型验证机隔舱式贮箱推进剂输送系统机械、液流与控制动力学模型,并对隔舱式贮箱推进剂动态变化过程、隔舱式贮箱推进剂消耗率、质心变化等开展了仿真计算,仿真计算考虑了飞行轨迹、轴向过载和姿态角等的影响,仿真计算结果为进一步开展隔舱式贮箱结构优化、推进剂加注量分配、制导稳定控制等研究提供依据。

1 隔舱式贮箱结构及其建模

1.1 隔舱式贮箱

隔舱式贮箱是指将长形贮箱内分隔成若干个内部连通的隔舱,发动机工作时,液气按序流动,一个隔舱一个隔舱的液体推进剂输送的设计形

式^[6-7]。隔舱式贮箱设计能够将液体推进剂的晃动影响限制在一个隔舱范围内,减小晃动干扰影响;同时液气按序流动有效抑制了液体推进剂质心变化^[8]。美国航空航天验证飞行器 X-34 采用的环柱形隔舱式贮箱,如图 1 所示^[9]。

下面以美国航空航天验证飞行器 X-34 为例,对隔舱式贮箱结构、工作原理及动态管理仿真过程进行说明。X-34 采用液氧-煤油双组元推进剂,推进剂贮箱均为环柱形隔舱式贮箱,液氧贮箱分为前、后两个贮箱,前液氧贮箱分割为 3 个隔舱,后液氧贮箱分割为 4 个隔舱;煤油贮箱分割为 3 个隔舱,各个隔舱底上分别设置正反惯性式单向活门,隔舱式贮箱出口设置防旋器。隔舱式贮箱内增压气体从最前端隔舱开始充气增压,推进剂从各隔舱按序流进后端隔舱,随后流经流量计、气压阀,经万向接头、过滤器后,进入发动机系统^[10]。

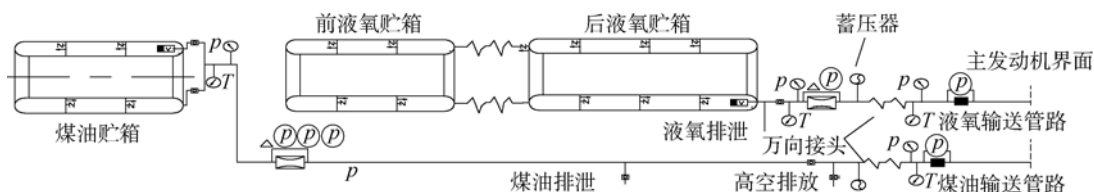


图 1 美国航空航天验证飞行器 X-34 推进剂管理系统原理图

Fig. 1 Schematic of propellant management system of America demonstration aerospace craft X-34

液体推进剂和增压气体按序流动,在机动飞行过程中,由于过载、飞行轨迹和姿态的影响,可能有部分气体窜入下个隔舱,但在综合过载作用下会很快逸出液面^[11-12]。因此,在飞行过程中,会出现多个隔舱液体推进剂与增压气体共存的情况,这种情况带来两个问题:一是推进剂在相邻各隔舱之间窜动导致各隔舱推进剂贮存量发生变化;二是隔舱式贮箱推进剂总质心由于晃动而发生变化,进而影响姿态控制。隔舱式贮箱推进剂管理涉及到的这两个问题均可以通过系统动力学建模进行仿真和研究^[13-14]。

1.2 结构简化

隔舱式贮箱内部被分隔成了若干个内部连通的隔舱,其中空置或充满状态隔舱内的推进剂质心无变化,故在原贮箱复杂结构基础上,对内含部分气枕和部分推进剂的单个隔舱进行如下简化:

- 1) 单个隔舱为平封头直环柱形。
- 2) 不考虑隔舱内部的防旋器、集液环、集液管等结构。
- 3) 重力加速度保持大小不变,方向竖直向下。

在单隔舱简化的基础上,进行隔舱式贮箱结构的简化,如图 2 所示。多个隔舱为串行连接,正反惯性式单向活门简化为连通管结构,推进剂受到大机动过载及姿态的影响,可以通过正反惯性式单向活门在各隔舱之间进行流动。隔舱式贮箱推进剂按照发动机设定的消耗量,通过燃料输送管进入发动机系统。

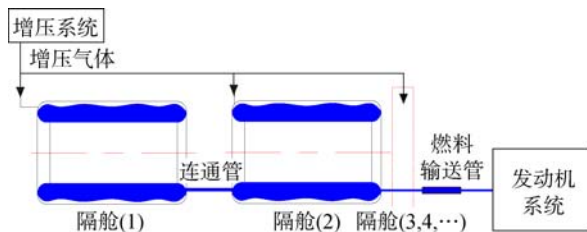


图 2 环柱形隔舱式贮箱简化模型

Fig. 2 Simplified model of ring cylindrical compartmental tank

1.3 仿真模型

仿真采用工程系统高级建模和仿真平台 AMESim^[15]。基于该软件的液压系统,建模仿真

分为4步:①在 sketch 模式下建立系统网络模型,若所需元件不包含在标准库中时,可以在液压元件(HCD)中自行建立;②在 submodel 模式下为系统中的每个元件选择子模型;③在 parameter

模式下为模型中的元件设置参数;④在 run 模式下运行仿真模型,得出仿真结果^[16]。

依据以上步骤,以双隔舱式贮箱为研究对象,建立推进剂输送系统网络模型,如图3所示。

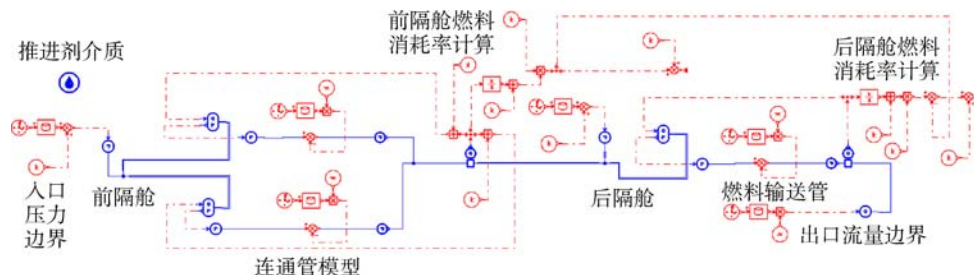


图3 隔舱式贮箱推进剂输送系统网络模型

Fig. 3 Network model of compartmental tank propellant feed system

网络模型主要包括前、后隔舱模型部分、连通管(惯性式单向活门)模型部分、燃料输送管模型部分、控制信号(隔舱式贮箱增压压力、综合过载数据、大气数据等)部分、数据运算处理部分。网络模型用到的模型元件包括时间信号源、推进剂介质源、水力节点、水力管路、压力流量转换、压力信号、流量信号、流量传感器、积分器、运算符号等^[17-18]。

1.4 质心编程

隔舱内的推进剂受到贮箱结构形式、飞行轨迹、过载、重力等的综合影响,造成推进剂质心的动态变化,这种变化幅度与隔舱式贮箱内的推进剂量有关^[19-20]。以系统建模仿真得到推进剂质量变化结果为基础,编制计算程序对质心进行求解,程序流程图如图4所示。

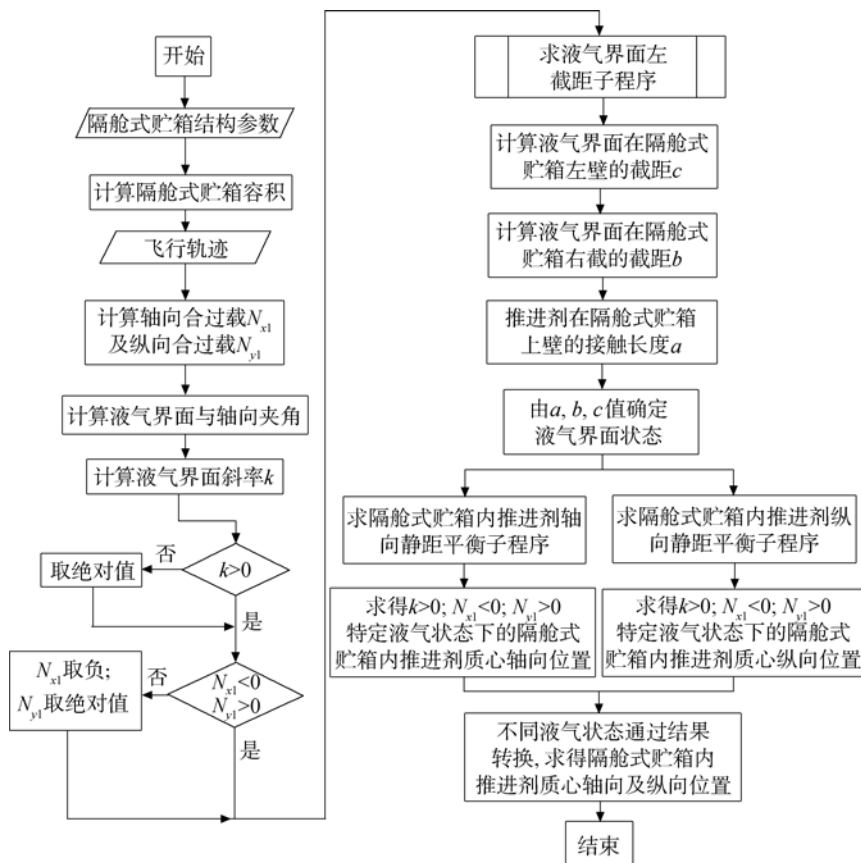


图4 隔舱式贮箱推进剂质心位置计算程序

Fig. 4 Calculation procedure of propellant centroid position in compartmental tank

2 仿真结果及分析

以发动机点火起动开始消耗推进剂为仿真初始时刻,模拟全程机动飞行过程,对隔舱式贮箱推进剂输送与供应过程进行仿真。

2.1 连通管结构的影响

通过系统建模仿真,可以分析各隔舱之间连通管结构对各隔舱推进剂剩余量变化的影响。

设定 d_1 为隔舱之间的连通管内径,针对 d_1 , $1.5d_1$, $2d_1$ 三种连通管内径,分别进行了仿真,结果如图 5 所示。可以看出,连通管不同的内径可以起到控制隔舱之间推进剂剩余量变化的作用。随着连通管内径的增大,使得飞行前段,前隔舱推进剂消耗得较快,后隔舱推进剂消耗得较慢;受到飞行过载的影响,在 $500 \sim 630$ s 时间段,后隔舱推进剂消耗较快,前隔舱推进剂不消耗,并且推进剂从后隔舱倒灌至前隔舱;在 $630 \sim 700$ s 时间段,前后隔舱同时消耗,且后隔舱内的推进剂先消耗完。

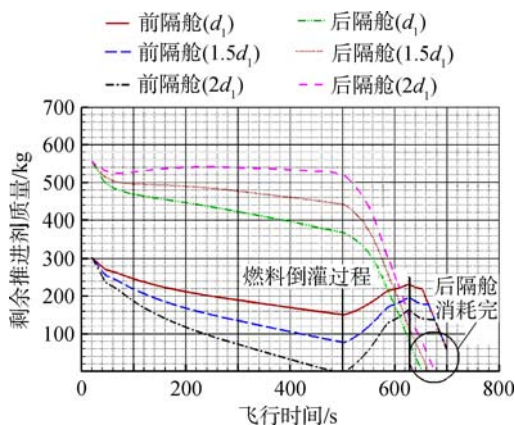


图5 隔舱式贮箱的推进剂剩余量动态仿真

Fig. 5 Dynamic simulation result of propellant remaining amount in compartmental tank

观察飞行末段,可以看到,连通管内径越大,前后隔舱推进剂越接近于同时消耗完,在某种意义上更加有利于飞行末段的质心变化控制。

2.2 推进剂消耗率

通过系统建模仿真,可以进一步分析各隔舱的推进剂消耗率的动态变化过程,从而可避免各隔舱在短时间内发生推进剂流量的大范围窜动。

固定连通管通径为 $2d_1$,前后隔舱的推进剂消耗率如图 6 所示。可以看出: $0 \sim 480$ s 时间段内,发动机主要消耗前隔舱推进剂,后隔舱推进剂基本不消耗;在 $480 \sim 500$ s 时间段内,前隔舱推进剂消耗完毕,后隔舱单独供油; $500 \sim 628$ s 时间段内,轴向

合过载为负,后隔舱推进剂分别流向前隔舱和发动机;在 $628 \sim 700$ s 飞行时间内,前后隔舱推进剂同时消耗,后隔舱在 680 s 左右首先消耗完,此后前隔舱单独供油,直至 700 s 飞行结束。

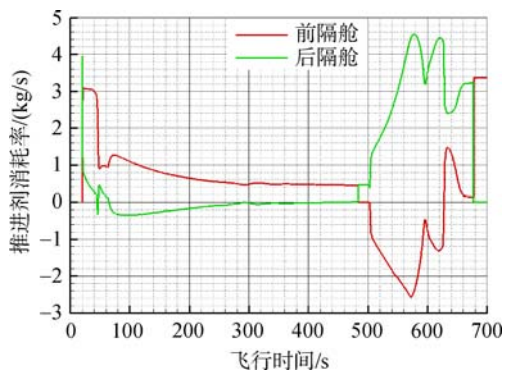


图6 前后隔舱的推进剂消耗率动态仿真

Fig. 6 Dynamic simulation of propellant consumption rate for front and rear compartments

2.3 推进剂质心控制

结合隔舱式贮箱推进剂管理建模仿真以及图 4 所示编程计算方法,可计算隔舱式贮箱推进剂质心的变化情况。经实例计算,某型飞行器双隔舱式贮箱内的推进剂轴向与纵向质心变化结果的计算如图 7 所示。

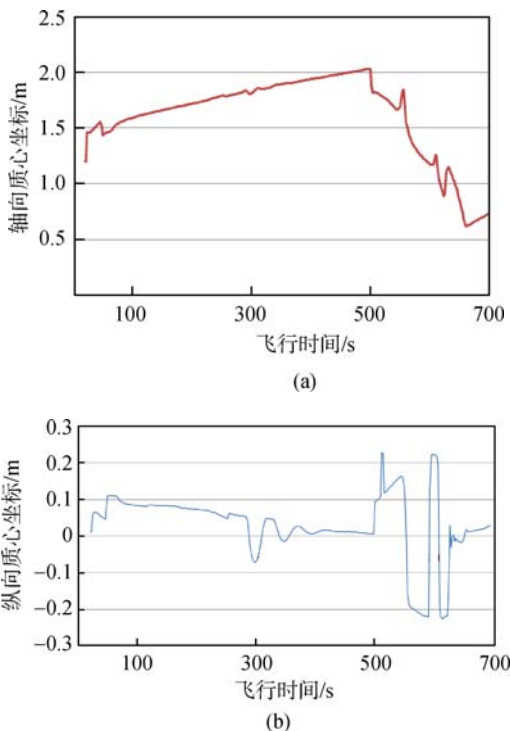


图7 某型双隔舱式贮箱推进剂质心变化结果

Fig. 7 Centroid calculation result of a certain type of compartmental tank (two compartments)

可以看出,在飞行轨迹前半段 0~500 s,姿态较为平稳,推进剂晃动影响小.在飞行轨道后半段 500 s 以后,飞行器姿态及综合过载变化较大,推进剂晃动的影响使得推进剂质心位置的变化开始变得剧烈,而飞行后期推进剂处于半满状态更是加剧了质心位置的这种变化,计算结果验证了这一点.

3 结 论

隔舱总体布局与初始容积分配、隔舱连通结构、飞行轨迹等均对隔舱式贮箱推进剂动态变化产生影响,通过动力学系统建模仿真及综合分析;仿真计算结果为结构总体方案设计与控制系统稳定性分析提供输入支撑.

本文所开展的仿真计算是基于某型飞行器最基本的双隔舱式贮箱,明确了建模过程与建模方法,多隔舱复杂模型可以在此基础上进行相应扩展.仿真研究表明:隔舱式贮箱推进剂管理模式是针对大气层内高机动飞行所采取的一个可借鉴的管理模式,AMESim 建模仿真避免了繁琐的数学模型,操作方便,为隔舱式贮箱等新型输送系统推进剂动态分析及优化提供了良好的平台.

参考文献:

- [1] 廖少英.液体火箭推进增压输送系统[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [2] 廖少英,赵金才.航空-航天飞行器推进增压输送系统设计[M].北京:中国宇航出版社,2012.
- [3] Wiswell R. X-15 propulsion system[R]. AIAA 97-2682,1997.
- [4] Brown T M, Knight K C, Champion R H. X-34 main propulsion system design and operation[R]. AIAA 98-4032,1998.
- [5] 陈嵩禄.飞机设计手册:动力装置系统设计[M].北京:航空工业出版社,2006.
- [6] 廖少英.大气层内高超声速机动飞行器液体推进剂管理[J].上海航天,2005,22(2):34-38.
LIAO Shaoying. Liquid propellant management for the hypersonic mobile vehicle in the atmospheric layer[J]. Aerospace Shanghai, 2005, 22(2): 34-38. (in Chinese)
- [7] 郭斌. X-34 主推进系统输送管路的流动分析[J].火箭推进,2001,27(3):59-62.
GUO Bin. Flow analysis of X-34 main propulsion system feed-line[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2001, 27(3): 59-62. (in Chinese)
- [8] 廖少英.跨大气层和空间区域飞行器的液体推进剂管理[J].上海航天,2006,23(5):38-41.
LIAO Shaoying. Research on liquid propellant management for cross atmospheric layer and space vehicle[J]. Aerospace Shanghai, 2006, 23(5): 38-41. (in Chinese)
- [9] Brown T M, McDonald J P, Hedayat A, et al. Propellant management and conditioning within the X-34 main propulsion system[R]. AIAA 98-3518,1998.
- [10] Champion R H, Jr, Darrow R J, Jr. X-34 main propulsion system design and operation[R]. AIAA 98-4032,1998.
- [11] McDonald J P, Minor R B, Knight K C, et al. Propellant feed subsystem for X-34 main propulsion system[R]. AIAA 98-3517,1998.
- [12] Patrick K S. X-34 propulsion system design[R]. Seattle, WA: 3rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit,1997.
- [13] 潘辉,张黎辉. AMESim 软件在液体火箭发动机系统动态仿真上的应用[J].火箭推进,2011,37(3):6-11.
PAN Hui, ZHANG Lihui. Application of AMESim in dynamic characteristic simulation of liquid rocket engine system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(3): 6-11. (in Chinese)
- [14] 刘靖东,隋国发,娄东亮,等.液体火箭增压输送系统多学科动力学研究[J].中国科学:E辑 技术科学,2009,39(3):474-481.
LIU Jingdong, SUI Guofa, LOU Dongliang, et al. Study on the multidisciplinary dynamics of the liquid rocket pressurization feed system[J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2009, 39(3): 474-481. (in Chinese)
- [15] 付永领,齐海涛. AMESim 系统建模和仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [16] 王定军,袁洪滨,董苑.贮箱充填过程仿真和分析[J].火箭推进,2008,34(2):23-25.
WANG Dingjun, YUAN Hongbin, DONG Yuan. Simulation and analysis of the tank filling process[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(2): 23-25. (in Chinese)
- [17] 尤裕荣,赵双龙,吴宝元,等.基于 AMESim 的冲压发动机燃油调节器动态特性仿真[J].火箭推进,2010,36(4):12-15.
YOU Yurong, ZHAO Shuanglong, WU Baoyuan, et al. A simulation on dynamic characteristics of ramjet fuel regulator based on AMESim[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(4): 12-15. (in Chinese)
- [18] 董春方,朱玉杰,冯国红.基于 AMESim 的长管道液压系统动态仿真[J].煤矿机械,2010,31(1):73-75.
DONG Chunfang, ZHU Yujie, FENG Guohong. Study on dynamical simulation of long pipeline hydraulic system based on AMESim[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(1): 73-75. (in Chinese)
- [19] 司景萍.液类货物运输中质心位置的计算分析[J].内蒙古工业大学学报,2002,21(3):222-226.
SI Jingping. Calculating analysis on the barycenter location in transporting of liquid goods[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2002, 21(3): 222-226. (in Chinese)
- [20] 岳宝增,刘延柱,王照林.求解液体大幅晃动问题的数值方法评述[J].上海交通大学学报,1996,33(6):760-763.
YUE Baozeng, LIU Yanzhu, WANG Zhaolin. Review of the numerical methods for simulating large-scale amplitude sloshing of liquid[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 33(6): 760-763. (in Chinese)

(编辑:陈越)