

直升机燃油系统增压转自吸供油动特性

杨小龙^{1,2} 罗铁苟² 金 华³ 童明波¹

(1. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点实验室, 南京 210016;

2. 中国直升机设计研究所, 景德镇, 333001; 3. 总参谋部路航部驻景德镇地区军事代表室, 景德镇, 333001)

摘要:通过某型燃油系统增压供油转自吸供油试验,研究了发动机入口处的流量历程。在试验研究和直升机燃油系统增压转自吸供油机理基础上,利用 Flowmaster 软件建立了某典型直升机燃油系统仿真模型,仿真结果与试验结果吻合较好,验证了模型的正确性。在此基础上,研究了直升机燃油系统增压转自吸供油动特性。结合仿真结果,分析了增压泵出口单向阀的弹簧预紧力、弹簧刚度对发动机入口燃油流量、压力的影响,为燃油系统零部件选型及参数确定提供参考。

关键词:燃油系统;增压供油;自吸供油;仿真

中图分类号: V215.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)06-0895-06

Transient Process of Helicopter Fuel System Transferred from Boost Fueling to Self-Suck

Yang Xiaolong^{1,2}, Luo Tiegou², Jin Hua³, Tong Mingbo¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen, 333001, China;

3. Military Representative Office of the Army Aviation Department for the Headquarters of the PLA General Staff in Jingdezhen Region, Jingdezhen, 333001, China)

Abstract: With the experiment of fuel system undergoing the boost fueling to self-suck, the study on history rate of fuel flow is conducted. Based on the experimental study and the analysis of operational principle of transient process of helicopter fuel system transferred from boost fueling to self-suck, a simulation model of helicopter fuel system is built with commercial code of Flowmaster. The simulation results and the experimental results are in a good agreement, which reveals the validity of numerical model. By combining with simulation results, the impact of check valve spring preload and spring rate on engine inlet pressure and flow rate is analyzed. Consequently, the reference of components of fuel system is provided.

Key words: fuel system; boost fueling; self-suck fueling; simulation

直升机燃油系统用来贮存机上所需的燃油,并在直升机飞行包线内和工作条件下,按发动机的要求向发动机不间断地供给燃油^[1-2]。通常直升机燃油系统有两种供油方式:增压供油和自吸供油。这两种供油方式主要区别是供油箱内燃油是否通过增压泵增压输到发动机油泵。由于某些直升机燃

油系统的特殊工作要求,在增压泵出口和自吸油口各设有一个开启压力不同的单向阀,自吸油口单向阀开启压力较小,增压泵出口单向阀开启压力较大。在如下状况时,将从增压供油转为自吸供油。

(1)增压供油时,增压泵失效,增压泵出口压力不能维持其出口单向阀开启状态,转为通过自吸油

口由发动机自吸供油。

(2)为满足防弹抗坠毁要求,发动机起动时增压供油,当发动机运行稳定后,关闭增压泵,转为通过自吸油口由发动机自吸供油。

直升机燃油系统从增压转为自吸供油瞬间,燃油系统管路内燃油压力将从正压骤降为负压,增压泵出口单向阀关闭和自吸油口单向阀开启是否匹配将直接影响发动机入口燃油流量和压力变化,这种变化是否满足发动机要求将直接影响直升机的飞行安全。目前,飞机燃油系统动态特性研究主要集中在油泵故障或阀门关闭等方面^[3-6],这些研究均未涉及输油过程中增压泵出口单向阀关闭及自吸油口单向阀开启的动态特性。本文对直升机燃油系统增压转自吸供油的动态过程进行探讨,并在此基础上,分析了增压泵出口单向阀的弹簧预紧力、弹簧刚度对发动机入口燃油流量、压力的影响。

1 燃油系统数学模型

1.1 增压转自吸供油原理

燃油系统及发动机流量控制系统构成一个流体网络,某典型燃油系统简化成如图1所示,由增压泵、增压泵出口单向阀、自吸油口单向阀、流量控制阀、发动机油泵和管路等组成。增压供油时,增压泵工作,燃油通过增压泵出口单向阀、供油管路等进入发动机,供油管路内为正压。当关闭增压泵或增压泵失效时,由于发动机油泵的抽吸作用,燃油管内变为负压,自吸油口单向阀开启压力、流阻均小于增压泵出口单向阀,自吸油口单向阀将迅速打开,增压泵出口单向阀将迅速关闭,燃油经自吸油口单向阀、供油管路等进入发动机,转为自吸供油。

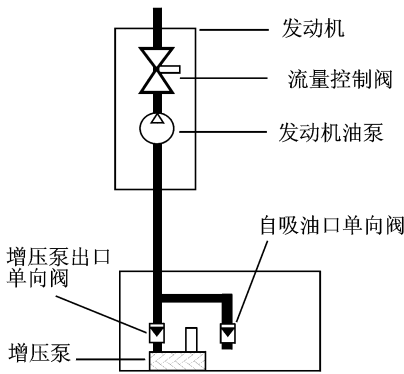


图1 燃油系统及发动机流量控制系统简图

Fig. 1 Diagram of fuel system and engine flow control system

1.2 流体网络总体方程组

流体网络上任意流体节点都要满足连续方程,

对任意节点 m ,有

$$\sum_{i=1}^M q_m = Q_m \quad (1)$$

式中: q_m 为单元连接于节点的节点流量; Q_m 为输入该节点的总流量; $\sum_{i=1}^M q_m$ 为对节点有贡献的所有 M 个单元求和。建立所有节点的连续方程,得到整个流体网络总体线性方程组。

1.3 管内流体的数学模型

对于有压管内流体的流动,通常假定为一维流动,其瞬态过程可用一维管流的连续方程式(2)和运动方程式(3)来描述^[7]

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nu \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial \nu}{\partial x} + \nu \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \nu}{\partial t} + \nu \frac{\partial \nu}{\partial x} \right) + \frac{\lambda}{D} \frac{\nu |\nu|}{2g} = 0 \quad (3)$$

忽略 $\nu \sin \alpha$, $\nu \frac{\partial H}{\partial x}$, $\nu \frac{\partial \nu}{\partial x}$, 并将水头 H 转换成压力 p , 流速 ν 转换成质量流量 \dot{m} , 式(2,3)可化为

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c^2}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \quad (4)$$

$$A \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} - \frac{\lambda \dot{m} |\dot{m}|}{2A\rho D} \quad (5)$$

式中: H 表示水头; ν 表示流速; c 表示波速; g 表示重力加速度; α 表示管轴与水平面的夹角; D 表示管道直径; λ 表示 Darcy-Weisbach 摩擦因数; ρ 表示密度; t 表示时间; x 表示管道坐标; p 表示压力; A 表示管道截面积。

1.4 单向阀数学模型

单向阀结构如图2所示^[8]。图中: h 为阀芯位移; p_1 为阀门入口压力; p_2 为阀门出口压力; F_E 为弹簧力; F_H 为阀芯上下表面所受的液压力; F_F 为阻尼力; F_W 为阀芯重量。

阀芯运动方程为

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} + f \frac{dh}{dt} + kh = F_H - F_W - F_{Epreload} \quad (6)$$

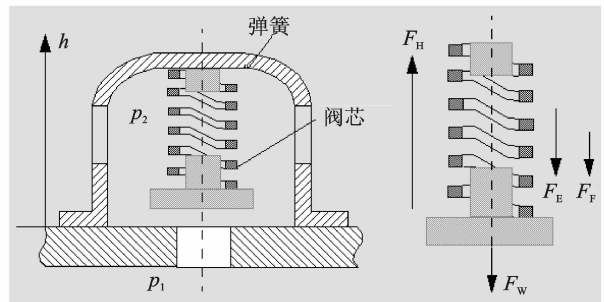


图2 单向阀示意图

Fig. 2 Schematic diagram of check valve

流阻方程为

$$\Delta p = \frac{km}{2\rho A^2} \left| \frac{\dot{m}}{A} \right| \quad (7)$$

式中: m 为阀芯(含液体)质量; f 为阻力系数; k 为弹簧刚度; Δp 为压差; k 为损失系数, $k=f(h)$; F_{Epreload} 为弹簧预紧力。

1.5 离心泵数学模型

增压泵、发动机油泵均采用离心泵。离心泵停泵过程中,可能会经历泵制动耗能、水轮机等运行工况,数值模拟停泵动态过程必须已知离心泵的全特性曲线。泵全特性曲线若采用与泵正常工况性能曲线相近似的绘制方法,以流量 Q 为纵坐标,扬程 H 和转矩 M 为横坐标,绘制不同转速下4个象限的泵特性曲线;或以无因次相对速度 α 为纵坐标,无因次相对流量 $q=v$ 为横坐标,分别绘制等相对扬程曲线(H 为常数)和等相对转矩曲线(M 为常数),则所绘曲线可直接应用于水锤图解法,比较直观、简便,但难于数学表达,不便于数学模型建立。文献[8]根据泵相似原理,提出 $\theta=\pi+\arctan$

$\left(\frac{\omega^*}{H^*}\right)$, $W(\theta) = \frac{H^*}{\omega^{*2} + Q^{*2}}$, $W_\tau(\theta) = \frac{\tau^*}{\omega^{*2} + Q^{*2}}$ 新坐标体系,将水泵全特性曲线在 $[0, 2\pi]$ 区间变换为两条无因次曲线^[9-10],则物理意义明确且有利于数学描述。

离心泵水头微分方程为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (8)$$

对方程线性化

$$\Delta H = \frac{\partial H}{\partial Q} \Delta Q + \frac{\partial H}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} \Delta t \quad (9)$$

其中

$$\frac{\partial H}{\partial Q} = 2W_H Q - \omega \frac{dW_H}{d\theta} \quad (10)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \omega} = 2W_H \omega - \omega \frac{dW_H}{d\theta} \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\tau - \tau_i - \tau_f}{I} \quad (12)$$

式中: H 为油泵水头; ω 为油泵转速; τ 为轴力矩; τ_i 为驱动力矩; τ_f 为摩擦力矩; H^* 为油泵水头量纲一参数; ω^* 为油泵转速量纲一参数; Q^* 为油泵流量量纲一参数。

1.6 流量控制阀数学模型

流量控制阀流阻方程为

$$\Delta p = \frac{km}{2\rho A^2} \left| \frac{\dot{m}}{A} \right| \quad (13)$$

仿真时,首先求解整个流体网络的总体方程

组,得到稳态时候元件的流量、水头参数,再应用特征线法进行瞬态过程计算。

2 增压供油转自吸供油仿真模型

2.1 仿真计算模型

本文建立了某典型燃油系统模型,用于增压供油转自吸供油的仿真研究。Flowmaster2软件航空版中没有提供发动机元件,本文主要研究增压转自吸供油过渡过程中增压泵出口单向阀与自吸油口单向阀的匹配性以及发动机入口燃油流量、压力的特性变化,因此,将发动机简化成一台离心泵和流量控制阀,采用PID进行流量控制,PID控制采用流量反馈。建立仿真模型如图3所示。图中:元件2、16为燃油泵(2为增压泵,16为发动机油泵),元件13为增压泵出口单向阀,元件18为自吸油口单向阀,元件9为流量控制阀,元件3、10、15为油箱,元件14为PID控制器,元件5、7、8为流量测量元件,元件1、12为弹性管,其余管路元件为刚性管^[11]。

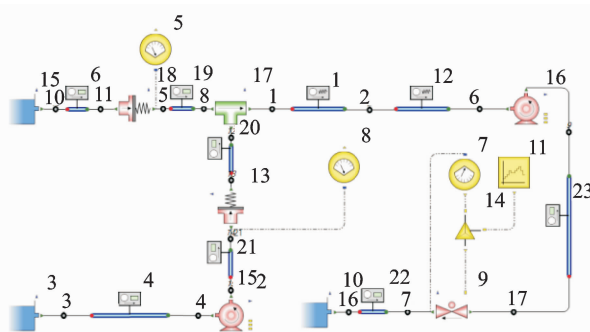


图3 增压供油转自吸供油仿真模型

Fig. 3 Simulation model of fuel system transferred from boost fueling to self-suck

2.2 仿真模型验证

如图4所示模型,取消PID流量控制,将流量控制阀开度设为恒定值,将增压转自吸供油的流量仿真结果与试验数据比较,以验证模型的有效性。

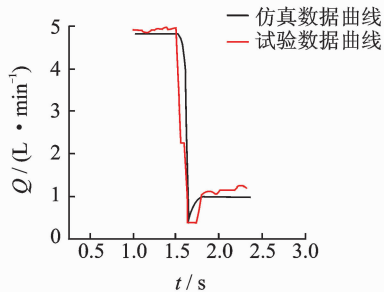


图4 流量曲线

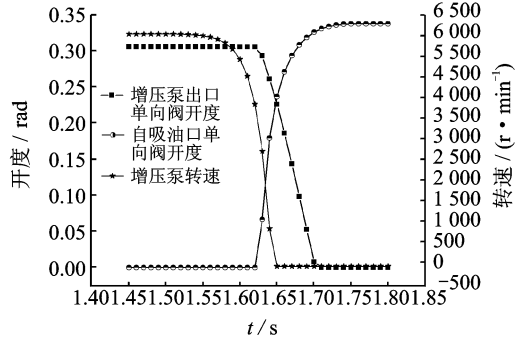
Fig. 4 Flow curve

模拟发动机入口处流量 5.4 L/min;将增压泵关系时间均设在 1.5 s 处。仿真结果与地面模拟试验结果见图 4,仿真结果流量从 5.4 L/min 下降到 3.2 L/min,随后稳定在 3.5 L/min;试验结果从 5.45 L/min 下降到 3.22 L/min,随后流量稳定在 3.625 L/min。误差为 3.4%,表明仿真模型是有效的。试验曲线在最小处有一段平缓区而仿真曲线到达最小值后直接回转上升,其主要原因是试验过程中涡轮流量计本身存在着转动惯性,而且系统采样频率较低。软件仿真则忽略了这些因素的影响。

3 燃油系统特性分析

3.1 增压转自吸供油动特性分析

按图 3 所示模型,采用 PID 控制将流量控制为 4.5 L/min,仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着电机转速下降,自吸油口单向阀压差快速减小至某一值,自吸油口单向阀开始打开、自吸油口流量开始上升;增压泵出口单向阀开始关闭、增压泵出口流量开始下降,使得发动机入口流量下降及超调均小于 2%;发动机油泵入口压力快速下降,随后上升;增压转自吸供油能满足发动机入口处的流量、压力要求。



(c) 单向阀开度随增压泵转速变化图

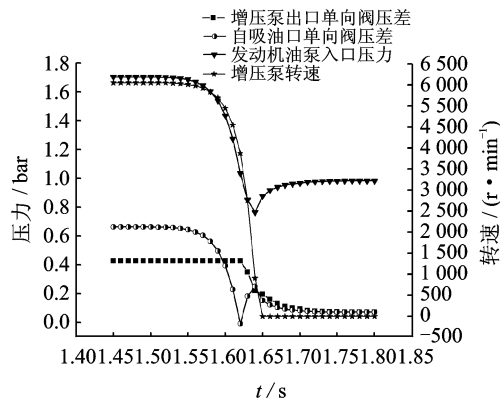
图 5 测量点各个参数随流量变化曲线

Fig. 5 Parameter variation curves at measuring point

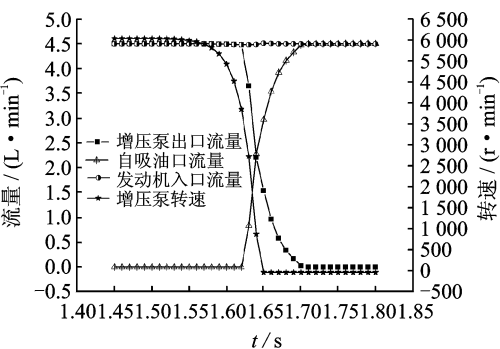
3.2 参数影响分析

3.2.1 流量控制特性

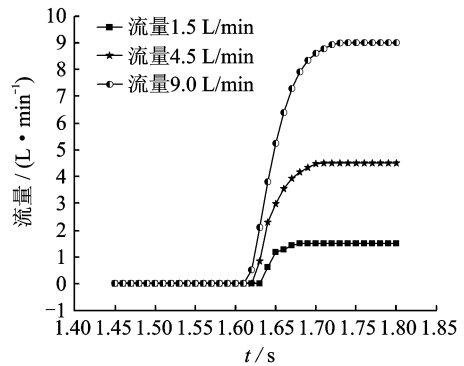
将流量分别控制为 1.5, 4.5, 9 L/min, 仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知,增压泵出口单向阀流量快速下降,自吸油口单向阀流量快速上升,发动机入口流量略有下降及超调,不超过 2%,增压转自吸供油均能满足发动机入口处的流量要求。



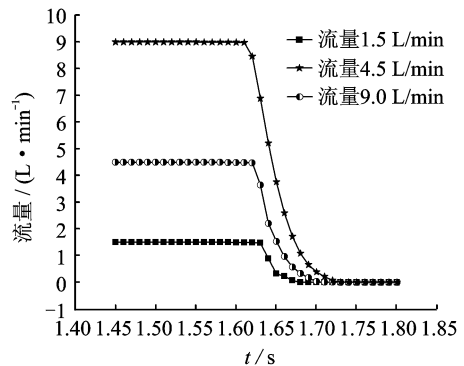
(a) 测量点压力随增压泵转速变化图



(b) 测量点流量随增压泵流量变化图



(a) 自吸油口流量变化图



(b) 增压泵出口流量变化图

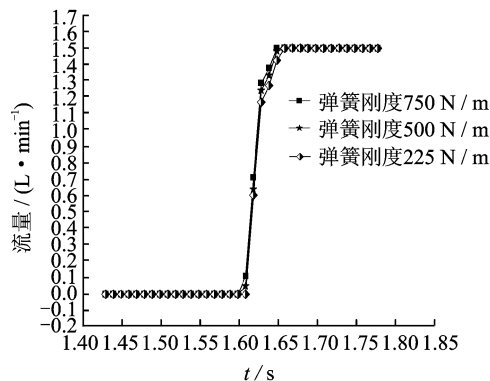
图 6 流量控制特性

Fig. 6 Flow controlling characteristics

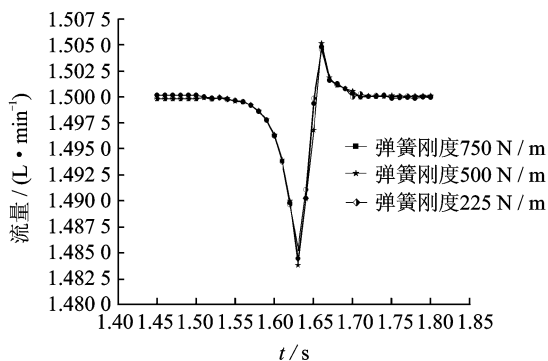
3.2.2 弹簧刚度对流量影响分析

将流量控制为 1.5 L/min,增压泵出口单向阀

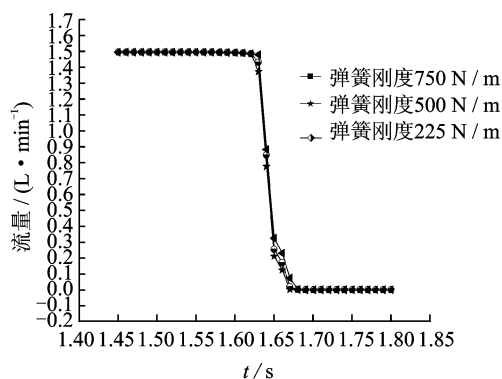
弹簧刚度分别设为 225, 500 和 750 N/m, 弹簧刚度越大, 则在同样的压差下, 阀的开度越小。仿真结果如图 7 所示。由图 7 可知, 弹簧刚度越大, 增压泵出口单向阀关闭速度快, 流量下降快, 自吸油口单向阀打开也快, 流量上升也快, 发动机入口流量略有下降及超调, 不超过 2%。



(a) 自吸油口流量受弹簧刚度变化图



(b) 发动机入口流量受弹簧刚度变化图



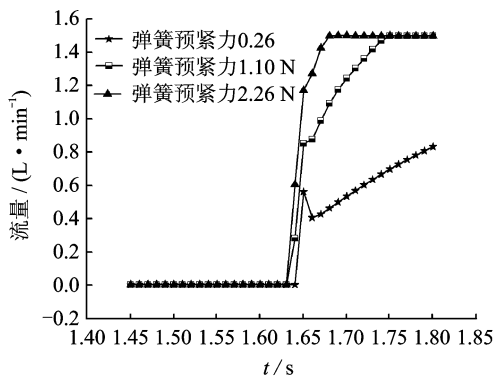
(c) 增压泵出口流量受弹簧刚度变化图

图 7 弹簧刚度对流量影响

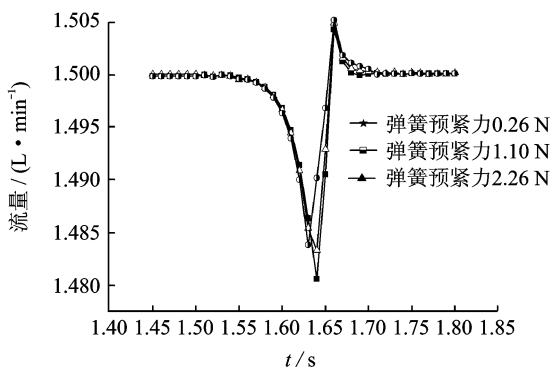
Fig. 7 Effects of spring stiffness on flow rate

3.2.3 弹簧预紧力影响分析

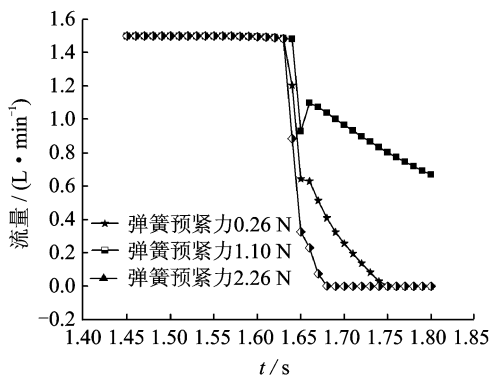
弹簧刚度为 225 N/m, 流量为 1.5 L/min, 将弹簧预紧力分别设为 0.26, 1.10 和 2.26 N, 预紧力越大, 单向阀开启压力越大。仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知, 在弹簧预紧力为 0.26 N 时, 自吸



(a) 自吸油口流量受弹簧预紧力影响变化图



(b) 发动机入口流量受弹簧预紧力变化图



(c) 增压泵出口流量受弹簧预紧力变化图

图 8 弹簧预紧力对流量的影响

Fig. 8 Effects of spring pretension on flow rate

油口单向阀打开, 增压泵出口单向阀开度减小, 但不全部关闭, 两个单向阀同时进油; 当弹簧预紧力增大, 增压泵出口单向阀完全关闭, 且随着弹簧预紧力增大, 增压泵出口单向阀关闭越快, 自吸油口单向阀打开也快, 发动机入口流量略有下降及超调, 不超过 2%。

4 结束语

本文构建了某典型燃油系统模型, 验证了该模

型的正确性,并利用所建模型进行了一系列仿真分析。结果表明,燃油系统增压转自吸供油过渡过程中,整个管路系统内的压力及流量处于快速变化状态,采用合理的流量控制方法,发动机入口的流量、压力可以满足发动机要求;增压泵出口单向阀弹簧刚度以及增压泵出口单向阀弹簧预紧力对发动机入口流量影响较小。利用本文建模和分析方法可直观地对燃油系统各元件的压力、流量参数等进行仿真研究,为部件选型及参数确定提供参考。

参考文献:

- [1] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册第19册标准和标准件[M]. 北京:航空工业出版社,2005.
- [2] 刘小锋. 飞机燃油系统管路连接技术的现状和发展[J]. 飞机工程,2005(3):35.
Liu Xiaofeng. Status and development of pipelines connection in aircraft fuel system [J]. Aircraft Engineering, 2005(3):35.
- [3] 高行山,刘永寿,岳珠峰. 某型飞机燃油输送系统供油稳定性研究[J]. 机械科学与技术,2008,27(12):1541-1544.
Gao Hangshan, Liu Yongshou, Yue Zhufeng. A study of the fuel feeding stability of an aircraft fuel transport system [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27 (12): 1541-1544.
- [4] 李彦江,刘永寿,姜志峰,等. 飞机燃油系统功能仿真分析[J]. 航空计算技术,2009,39(4):113-116.
Li Yanjiang, Liu Yongshou, Jiang Zhifeng, et al. Analysis of functional simulation of aircraft fuel system [J]. Aeronautical Computing Technique. 2009, 39(4):113-116.
- [5] 李彦江,张立圣,刘永寿,等. 飞机燃油管路压力脉动分析[J]. 飞机设计,2009,29(5):37-42.
Li Yanjiang, Zhang Lisheng, Liu Yongshou, et al. Analysis of pressure surge in aircraft fuel pipelines [J]. Aircraft Design, 2009, 29(5):37-42.
- [6] 周瑞祥,王建平,沈燕良,等. 飞机燃油复杂管道压力瞬态特性分析[J]. 系统仿真学报,2004,16(5):887-889.
Zhou Ruixiang, Wang Jianping, Shen Yanliang, et al. Research on pressure transient of the airplane complex refueling pipeline [J]. Journal of System Simulation, 2004,16(5):887-889.
- [7] 齐鄂荣,曾玉红. 工程流体力学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
Qi Erong, Zeng Yuhong. Engineering fluid mechanics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.
- [8] Flowmaster Group. FlowmasterV7 user's documentation [M]. [S. l.]: Flowmaster International Ltd, 2007.
- [9] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调解[M]. 北京:中国水利电力出版社,2000:113-116.
- [10] 郇正能. 飞机部件与系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
Li Zhengneng. Aircraft components and system design [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004.
- [11] 闫克学. 基于 Flowmaster 软件的直升机燃油系统仿真计算[J]. 直升机技术,2008(4):14-18.
Yan Kexue. Flowmaster software based on a certain type of helicopter fuel system simulation [J]. Helicopter Technique. 2008(4):14-18.

