

# 某型飞机机翼油箱输油仿真研究

唐毅, 周洲, 蔡天赐

(西北工业大学无人机特种技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:**研究飞机机翼油箱优化控制问题,燃油系统在飞机上是一个非常庞大而且复杂的系统,传统增压泵输油方案存在重量大、功率需求高的缺点。针对传统方法对燃油系统仿真研究建模复杂、耗时长的缺点,提出了利用油箱间增压压力差向消耗油箱输油的输油方案。利用流体仿真软件 FLOWMASTER 对燃油系统进行建模。对所建燃油系统模型进行仿真,结果表明,燃油系统各项性能指标能够满足系统需求,验证了所提方案的正确性,为改进和优化燃油系统设计提供了新思路和方法。

**关键词:**燃油系统;计算机仿真;机翼输油

**中图分类号:**V228.1 **文献标识码:**B

## Wing Tank Supply System Simulation Study Based by Flowmaster

TANG Yi, ZHOU Zhou, CAI Tian-ci

(Northwestern Polytechnical University, National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Xi'an Shanxi 710065, China)

**ABSTRACT:** Fuel system is an enormous and complicated system in an aircraft, and the existence of traditional oil program was heavy and demanded high power. In this paper, a new program was put forward, which used pressure difference between tanks to deliver oil to consumption tank. In order to overcome the disadvantages of traditional method, such as complex fuel system simulation modeling and time-consuming, this paper used fluid simulation software FLOWMASTER to model the fuel system. Through the fuel system model simulation, the performance of fuel systems can satisfy the system requirements and validate the correctness of this program. This research provides a new idea and method to improve and optimize the fuel system design.

**KEYWORDS:** Fuel system; Computer simulation; Wing tank supply system

### 1 引言

燃油系统主要用于储存燃油,满足飞机在飞行包线内不同高度及各种飞行姿态下对发动机的连续供油要求<sup>[1][3]</sup>,是涉及飞机安全和可靠性的重要系统之一,对燃油系统进行仿真研究具有重要意义。

曹连华、庄达民利用数值方法对燃油流体网络进行了分析<sup>[2]</sup>,但推导过程过于繁琐复杂,难以应用于工程实际。冯震宙利用流体软件对某战斗机燃油网络进行了仿真<sup>[7]</sup>,但仅对燃油系统的启动状态进行了分析,未对输油过程进行全程仿真。

针对传统增压泵输油系统存在的重量大、所需功率高的缺点,本文提出了增压压力输油方案,利用 FLOWMASTER 软件建立了飞机机翼油箱燃油系统仿真模型,并对机翼油箱的输油过程进行了全程仿真,通过对燃油系统模型的稳态和瞬态仿真,对利用油箱间的压力差进行机翼油箱的输油问题

进行了深入研究。

### 2 传统燃油系统建模

在传统的燃油系统建模中,一般采用矩阵方法求解管路的局部损失,进而求出管路中的流量—压力关系<sup>[4][5]</sup>。

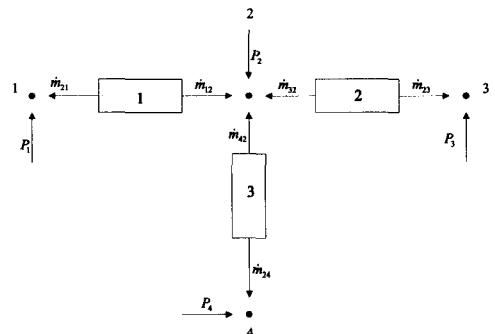


图1 元件连接示意图

如图1所示,3个两臂元件共用一点连接示意图,从图

中可见3个元件共用节点2,在4个节点分别标注有压力,在元件两端标注有流量,经整理,可得到通过4个节点的流量表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{21} &= a_{12}^1 P_1 + a_{22}^1 P_2 + a_{23}^1 \\ \dot{m}_{12} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{42} &= a_{11}^1 P_1 + (a_{12}^1 + a_{12}^2 + \\ &\quad a_{12}^3) P_2 + a_{21}^1 P_3 + a_{11}^1 P_4 + a_{13}^1 + a_{13}^2 + a_{13}^3 \\ \dot{m}_{23} &= a_{22}^2 P_2 + a_{21}^2 P_3 + a_{23}^2 \\ \dot{m}_{24} &= a_{22}^3 P_2 + a_{21}^3 P_3 + a_{23}^3 \end{aligned}$$

结合流量表达式可得到如下求解矩阵:

$$\begin{bmatrix} a_{21}^1 & a_{22}^1 & 0 & 0 \\ a_{11}^1 & a_{12}^1 + a_{12}^2 + a_{12}^3 & a_{21}^1 & a_{11}^1 \\ 0 & a_{22}^2 & a_{21}^2 & 0 \\ 0 & a_{22}^3 & 0 & a_{21}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{21} - a_{23}^1 \\ \dot{m}_{12} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{42} - a_{13}^1 - a_{13}^2 - a_{13}^3 \\ \dot{m}_{23} - a_{23}^2 \\ \dot{m}_{24} - a_{23}^3 \end{bmatrix}$$

由求解矩阵可知,如果想要一个复杂的流体网络的求解矩阵是不现实的。

### 3 在 FLOWMASTER 中燃油系统建模

Flowmaster 是一维流体仿真软件,在进行仿真计算时,流体网络可以看作是由一系列流体管道元件组成,元件模型主要是基于压力—流量关系。管道元件之间以节点相连,网络中各元件的流动由质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律导出的代数方程描述<sup>[6]</sup>。

假设某网络由  $B$  条管段,  $N+1$  个节点构成,则网络的数学模型如下:

$$A \cdot G = \frac{dM}{dt}$$

$$A^T \cdot P = S \cdot |G| \cdot G + \rho \cdot g \cdot Z - DH - L \frac{dG}{dt}$$

$$\bar{A} \cdot q - \underline{A} \cdot (q+r) = \frac{dH}{dt}$$

式中  $A$  为网络的  $N \times B$  阶关联矩阵;  $G$  表示支路流量,为  $B$  阶列向量;  $M$  为节点质量,为  $N$  阶列向量;  $A^T$  为  $A$  的转置矩阵;  $P$  为各节点压力值;  $S$  为各支路阻力系数,为  $B \times B$  阶对角阵;  $Z$  为管段高度差,为  $B$  阶列向量;  $DH$  为各支路上动力源的增压,为  $B$  阶列向量;  $L$  为各管段的流感,等于流量变化一单位时引起的压力变化量;  $\bar{A} \cdot q$  为各支路流入节点的热流量之和;  $\underline{A} \cdot (q+r)$  为流出节点的热流量之和;  $H$  为各节点的焓值。

实际上,上述三个方程即为流体力学中的连续性方程、动量方程和能量方程的网络表达形式, FLOWMASTER 就是联立求解上述基本方程组,来得到问题的解。

某型飞机燃油输油系统如图 2 所示,整个燃油系统分为

四个机身油箱,六个机翼油箱,一个消耗油箱,消耗油箱位于 3 号油箱的下部,载油量为 200kg。

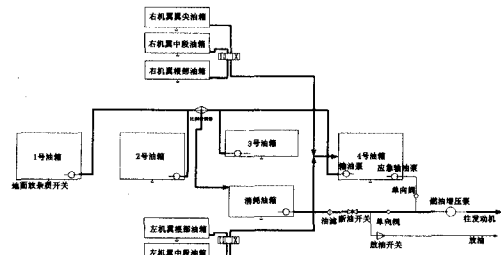


图 2 输油系统原理图

在飞机飞行过程中,最先消耗机翼油箱的燃油,由于飞机操纵性的要求,机翼油箱分为六个小油箱,总储油量为 1000kg,占飞机总储油量的 1/3。本文主要对机翼油箱的输油进行仿真分析,研究其输油规律。

传统的增压泵输油方案存在重量大、功率需求高的缺点,而利用油箱的增压压力差进行输油,可以在相当程度上避免这些缺点,但此种输油方案能否满足燃油系统各项性能指标要求,则是本文仿真所要解决的问题。

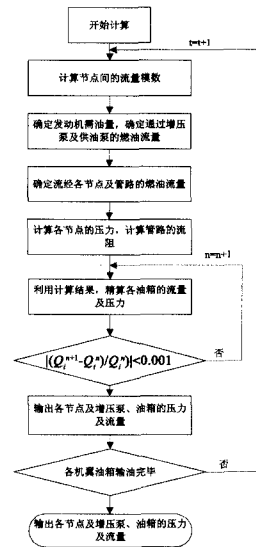


图 3 模型计算流程图

Flowmaster 的解算器利用迭代求解系数矩阵的方式计算出系统的节点压力,然后根据元件的流阻特性及流量守恒原理得到主干和分支的流量,进而得到流速、雷诺数及马赫数等参数。

模型计算流程图如图 3 所示,模型中用一个固定流量源来模拟发动机的耗油量,耗油量为 10L/min,各油箱参数如表 1 所示。

表 1 燃油箱参数设置

油箱	载油量 (kg)	水平截面面积 (m <sup>2</sup> )	底平面高度 (m)	顶面高度 (m)	增压压力 (bar)
机翼翼根油箱	150	1.09	0	0.18	0.6
机翼中部油箱	200	1.73	0.03	0.1826	0.6
机翼翼尖油箱	150	1.83	0.08	0.1876	0.6
4号油箱	522	1.0	0	0.67	0.3
消耗油箱	200	1.0	0	0.26	0.3

#### 4 稳态分析

对模型进行稳态分析,模型各节点的压力值如图所示:

由图(4)可以看到在稳态分析中燃油系统各节点的压力分布。由图可知,机翼油箱节点的压力都为 0.61bar,这是由机翼油箱增压压力和油箱液面高度所形成的压力,由于单向活门存在的压降作用,在单向活门后的压力值会稍微有所降低。4号油箱的两个端口的压力为 0.36bar,这是从发动机来的回油管路造成的4号油箱压力上升。消耗油箱的压力值为 0.33bar,这是由于消耗油箱的初始增压压力只有 0.3bar,消耗油箱在4号油箱输油泵的作用下,压力逐渐升高。供油泵后面的节点压力由于供油泵的增压作用而升高到 0.44bar。由图可知,系统中各节点的压力都在系统允许范围内,没有出现过高或者过低的压力值。

#### 5 瞬态分析

对燃油系统模型进行瞬态分析:仿真步长为 0.01 秒,仿真时长为 80 秒,初始时刻为 0 秒。机翼油箱的输油流量曲线及4号油箱和消耗油箱进出口燃油流量曲线与增压压力变化曲线如图4-图7所示。

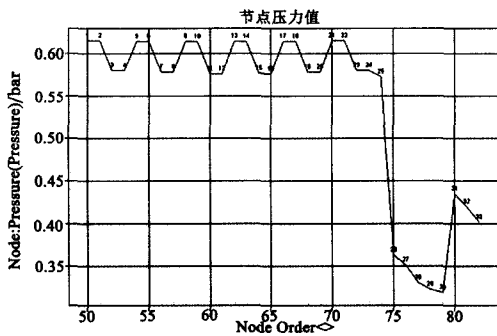


图 4 模型节点压力

由图5可知,在初始输油状态,机翼油箱的输油有一个震荡过程,在50秒时基本达到稳定状态,此时翼根油箱、机翼中部油箱、机翼翼尖油箱的输油流量分别为 2.1L/min,1.9 L/min,1.7 L/min。由发动机入口流量为 10 L/min 可知,此时流入4号油箱的燃油流量要大于4号油箱的燃油流出量。

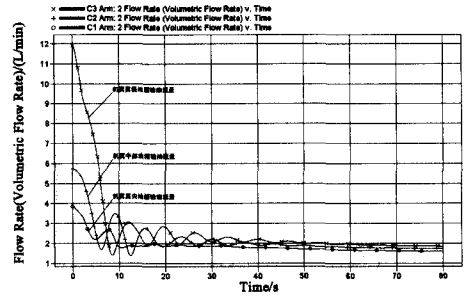


图 5 机翼油箱输油流量

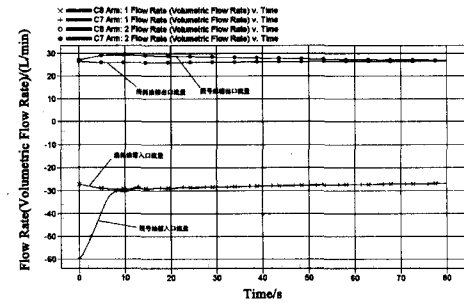


图 6 消耗油箱进出口流量

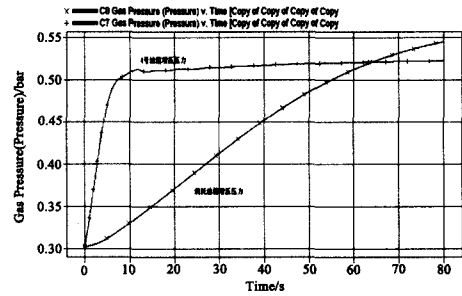


图 7 消耗油箱压力变化曲线

由图6可知,4号油箱和消耗油箱的进出口油量之间存在差值,进口流量要大于出口流量,正是由于4号油箱和消耗油箱的进口流量大于出口流量,使得4号油箱和消耗油箱的增压压力逐渐增大,4号油箱和消耗油箱增压压力的变化如图7所示。由图7可知在机翼油箱开始输油后,4号油箱和消耗油箱的压力逐渐升高,其中4号油箱的压力值在10秒时逐渐稳定在 0.52bar,而消耗油箱的压力逐渐增高,最后稳定在 0.58bar。

由以上可知,在起始输油状态,机翼油箱的输油流量会出现一个流量脉动,此脉动在50秒左右逐渐收敛而趋于稳定。4号油箱和消耗油箱的增压压力逐渐增大,使得系统最终趋于稳定。对机翼油箱输油进行全程仿真,取仿真步长为 0.1 秒,仿真时间为 8000 秒,对系统进行动态仿真分析,三个机翼油箱油面高度曲线和输油流量曲线如图8和图9所示。

由油箱油面高度曲线可知,机翼翼尖油箱在7100秒时,油液液面降为0,结束输油,在机翼翼尖输油结束后,机翼中

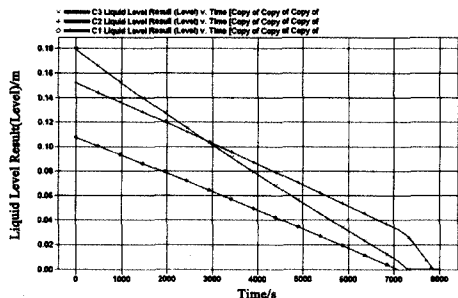


图8 机翼油箱液面高度

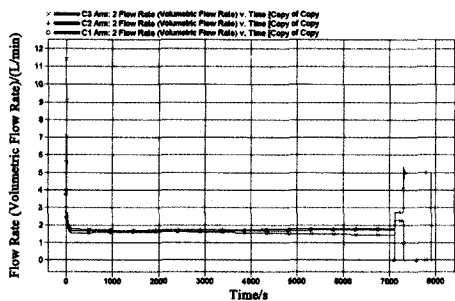


图9 机翼油箱输油流量

部油箱和机翼根部油箱输油增大,在7300秒时,机翼部油箱油液液面降为0,结束输油,在7900秒时刻,机翼中部油箱液面下降为0,机翼邮箱输油结束。从输油流量曲线图上可以看到,初始阶段,机翼根部油箱输油流量最大,这是因为翼根油箱的液面高度高,随着液面的下降,翼根油箱的输油流量也随之下降,而翼尖油箱和机翼中部油箱的输油流量逐渐增加。由图9可见,在翼根油箱结束输油后,机翼中部油箱的输油流量会出现一个幅度不大的脉动,脉动在50秒后收敛。

从以上分析可知,在机翼油箱增压压力为0.6bar,4号油箱和消耗油箱的增压压力为0.3bar的情况下,依靠增压压力差进行机翼油箱输油是可行的,油箱之间的压力差能够实现机翼油箱的输油。在机翼油箱输油阶段,发动机的用油完全由机翼油箱提供,4号油箱和消耗油箱只起燃油转输的作用。在机翼油箱输油结束后,机身油箱按照输油顺序开始输油。

由于机翼油箱之间存在高度差,机翼油箱的输油流量随各个油箱之间的压力差而变化,翼尖油箱是最先输完燃油,其次是翼根油箱输完燃油,机翼中部油箱的载油量较大,所以最后输完燃油。

由于机翼油箱之间的液面差和机翼油箱与4号油箱及消耗油箱之间的压力差,使得系统在初始输油时刻和翼根油

箱输油结束时会出现压力和流量的脉动,但是脉动幅度不大,而且脉动快速收敛,对于系统的影响可以忽略。在仿真时机翼油箱的增压压力不变,而4号油箱和消耗油箱的增压压力随着油箱液面的变化而变化,但是增压压力处于系统承受范围之内。

## 6 结论

本文利用流体仿真软件FLOWMASTER仿真分析了机翼油箱利用增压压力进行输油的分析,分析结果表明,利用油箱间的压力差进行机翼油箱的输油是完全可行的。利用软件仿真有效的模拟了飞机燃油系统的燃油传输过程,比较真实地反映飞机燃油系统的实际工作情况。通过对仿真结果的分析,证明了这种仿真方法的合理性及实用性。并且仿真系统中的参数可以根据具体机型的改变而改变,非常简单、明了,便于对飞机燃油系统的设计以及系统参数的优化。

由于仿真软件的限制,本文没有考虑燃油箱中死油的影响,这一因素在实际系统中是需要考虑的,对于这一点,应在以后的研究工作中进行更加深入的研究。同时在仿真中还略去了直角转弯管路的影响,这些因素在实际系统中应该予以考虑。

## 参考文献:

- [1] 李占国. 未来飞机燃油系统设计和仿真技术[J]. 航空科学技术, 1996, (3).
- [2] 曹连华,等. 战斗机燃油系统流体网络的数值计算[J]. 飞机设计, 2002, 24(4).
- [3] 孟宝堂. 控制理论在飞机燃油系统地面模拟试验中的应用与发展[M]. 西飞科技, 1999, (1).
- [4] Л В 列希涅尔, И Е 乌利亚诺夫. 飞机燃油系统设计[M]. 第三机械工业部第六零九研究所, 1977, (4).
- [5] 吴丁毅. 内流系统的网络算法[J]. 航空学报, 1996, 17(6).
- [6] 罗志昌. 流体网络理论[M]. 北京:机械工业出版社, 1988-11.

## [作者简介]



唐毅(1979-),男(汉族),湖南长沙人,博士研究生,主要研究领域为飞机总体设计与飞机燃油系统设计;

周洲(1966-),女(汉族),湖南长沙人,博士生导师,主要研究领域为飞机总体设计与气动研究;

蔡天赐(1985-),男(汉族),辽宁阜新人,硕士研究生,主要研究领域为飞机总体设计。