

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.02.016

基于复合形法飞机纵向运动供油策略优化

薛锡瑞¹, 黄树彩¹, 张港生¹, 杨心²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 飞机燃油系统是飞机的核心系统之一, 对飞机安全可靠飞行至关重要。为解决飞机纵向飞行时, 因多油箱供油量分配不合理产生飞机质心的偏移问题, 本文通过分析飞机供油原理, 建立飞机纵向运动供油质心模型, 在此基础上, 采用复合形法根据飞机俯仰角和各油箱油量实时确定飞机的最优供油策略。仿真结果表明, 给定飞机要求质心变化后, 通过本文方法确定的供油策略能将飞机质心偏移量控制在合理范围之内, 并实现了供油策略随要求质心的动态调整, 方法具有理论和实际工程应用价值。

关键词: 飞机供油; 质心控制; 策略优化; 流量分配; 复合形法

中图分类号: V233.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)02-0297-07

Optimization of Fuel Supply Strategy for Aircraft Longitudinal Motion Based on Complex Method

XUE Xirui¹, HUANG Shucui¹, ZHANG Gangsheng¹, YANG Xin²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The aircraft fuel system is one of the core systems of the aircraft and is essential to the safe and reliable flight of aircraft. In order to solve the problem of the offset of the aircraft centroid due to the unreasonable distribution of fuel supply from multiple fuel tanks during the longitudinal flight of aircraft, this paper analyzes the principle of aircraft fuel supply and establishes a fuel centroid model for the longitudinal motion of aircraft. On this basis, a complex method is adopted. The optimal fuel supply strategy of aircraft is determined in real time according to the aircraft pitch angle and the fuel volume of each fuel tank. The simulation results show that after the required centroid of a given aircraft changes, the fuel supply strategy determined by the method in this paper can control the offset of the aircraft centroid within a reasonable range, and realize the dynamic adjustment of the fuel supply strategy according to the required centroid. The method has theoretical and practical engineering application value.

Key words: aircraft fueling; centroid control; strategy optimization; flow distribution; complex method

随着飞机执行的任务越来越复杂, 飞机结构愈发多样化, 油箱供油产生的各种问题持续受到飞行器总体设计者的关注。一直以来, 实现稳定持续供油, 降低供油系统带来的不确定性是飞机燃油系统设计持续追求的目标。

就飞机供油而言, 现代飞机燃油系统的主要功能是将油箱中储存的燃油按一定的顺序提供给发动机系统, 供油方式主要有压力供油、动力供油和重力供油^[1]3种。利用 Flowmaster 对飞机燃油供油系统进行建模^[2-3], 是对供油系统进行数学分析

收稿日期: 2020-10-14; **修订日期:** 2020-12-13

通信作者: 黄树彩, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hsc67118@126.com。

引用格式: 薛锡瑞, 黄树彩, 张港生, 等. 基于复合形法飞机纵向运动供油策略优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 297-303. XUE Xirui, HUANG Shucui, ZHANG Gangsheng, et al. Optimization of fuel supply strategy for aircraft longitudinal motion based on complex method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 297-303.

的重要方法。在供油系统性能研究中,文献[4]通过分析燃油系统工况,研究了部件磨损导致的性能退化问题。Narasimhan等^[5]利用键合图研究了飞机供油系统的常见故障,并进行了理论分析。受制于飞机飞行阶段复杂和耗油数据难以获取,对飞机耗油和供油的关系问题研究较少。文献[6]通过对滑行飞机燃料燃烧建模,利用运营飞机的飞行数据信息估算了滑行飞机的燃油消耗。文献[7]利用马尔科夫链蒙特卡洛方法估计了飞机不同姿态下辅助油箱的供油量。文献[8]在大量试车数据基础上对供油控制系统的核心部件进行了系统建模和仿真研究。

当前,对飞机供油系统的研究多集中在提升系统可靠性方面,而对控制飞机供油量及平衡各油箱供油量的研究较少。随着油箱尺寸和载油量的增加,在飞机飞行过程中,由于不同油箱的位置不同,单从某个油箱或按照固定顺序供油会产生飞机质心的偏移,影响飞机操纵或对其控制系统产生干扰。因此,根据飞行任务实时确定不同位置油箱的最优供油策略,能最大程度减少因飞机质心位置变化带来的影响。基于上述背景,本文提出了一种基

于复合形法实时确定最优供油策略的方法,并以一组要求质心为标准进行了仿真实验,以验证所提方法的有效性。

1 纵向运动供油质心模型

1.1 供油原理

飞机燃油系统功用是储存燃油,并保证在任何状态下,均能按发动机所要求压力和流量向发动机持续不间断地供油^[9]。飞机燃油系统一般由燃油箱系统、主燃油系统、地面压力加油系统、应急放油系统、启动燃油系统、通气系统等组成,其中主燃油系统是整个燃油系统最重要的分系统之一。

为保证飞机质心平衡,如图1所示,主燃油系统一般采用两个独立燃油系统对称配置,对于双发飞机,一般而言,左、右燃油系统分别负责左右发动机系统油耗,右燃油系统还向辅助动力装置负责供油。油箱出口通过油泵实现燃油的单向流动,并可防止各组油箱内燃油互相流通,保证一定的供油顺序。必要时,左、右燃油系统可通过连通开关实现交叉供油,即任一主燃油系统均可向任意一台发动机供油。

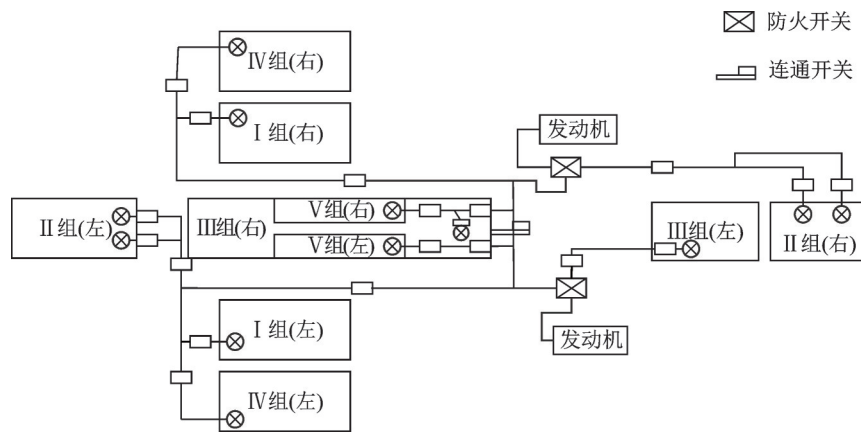


图1 主燃油系统结构

Fig.1 Main fuel system structure

飞机燃油系统供油过程,实时分配各油箱的供油流量,以避免因油箱燃油质量分布不均带来的飞机质心失衡,是飞机燃油系统供油计算面临的问题之一。选择合适的飞机供油策略对飞机控制有重要意义。

1.2 质心模型

飞行器坐标系 $o(t)x_1(t)y_1(t)z_1(t)$ 是实时计算飞机质心的常用坐标系,其定义为 t 时刻,以飞行器(不载油)质心位置 c_0 为原点 $o(t)$,飞行器纵向中心轴为 $x_1(t)$ 轴,以飞行器前方为正向, $y_1(t)$ 轴垂直于 $x_1(t)$ 轴所在的飞行器纵剖面,且 $o(t)x_1(t)y_1(t)$ 组成右手坐标系,通过右手法则确定 $z_1(t)$ 轴。某一确定时刻的飞行器坐标系可直接

表示为 $ox_1y_1z_1$ 。

假设飞机有 n 个油箱,则 t 时刻其质心 $(\bar{x}_t, \bar{y}_t, \bar{z}_t)$ 由飞机自身质量 M 和燃油质量 m_{it} 及各箱燃油质心位置 (x_{it}, y_{it}, z_{it}) 共同决定

$$\bar{x}_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_{it} m_{it}}{\sum_{i=1}^n m_{it} + M}, \bar{y}_t = \frac{\sum_{i=1}^n y_{it} m_{it}}{\sum_{i=1}^n m_{it} + M}, \bar{z}_t = \frac{\sum_{i=1}^n z_{it} m_{it}}{\sum_{i=1}^n m_{it} + M} \quad (1)$$

由式(1)可知,当飞机自重确定时,采用某一供油策略后,飞机质心坐标的求解关键在于确定各油箱燃油的质心位置。

假设燃油油箱为尺寸已定的长方体,中心为 o 点,与飞行器坐标系各轴平行的对称轴分别为 ox_2, oy_2, oz_2 ,各轴上扩展长度分别为 a, b, c ,

则当飞机仅存在俯仰运动时,以俯仰角大于 0 为例,燃油形状有如图 2 所示的 4 种可能情况。

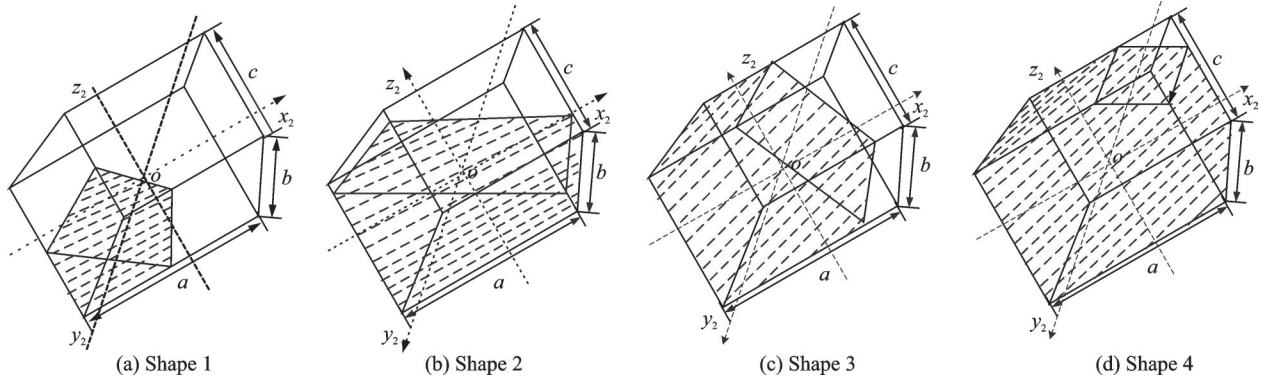


图 2 燃油形状(俯仰角为正时)

Fig.2 Fuel shape (positive pitch angle)

通过比较飞机俯仰角与油箱对角线角度大小关系结合油量多少,可判断油箱内燃油处于何种形状,形状用 shape 表示,shape 的判断方法如式(2)所示

若俯仰角为负,需将俯仰角的绝对值代入式(2),此时燃油集中在油箱的右下部分,具体情况不再赘述。

$$\text{shape} = \begin{cases} 1 & \text{if } \left(\alpha > \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \text{oil_vol} < \frac{bc^2}{2 \tan \alpha} \right) \text{ or } \left(\alpha < \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \text{oil_vol} < \frac{ba^2 \tan \alpha}{2} \right) \\ 2 & \text{if } \left(\alpha < \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \frac{ba^2 \tan \alpha}{2} < \text{oil_vol} < abc - \frac{ba^2 \tan \alpha}{2} \right) \\ 3 & \text{if } \left(\alpha > \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \frac{bc^2}{2 \tan \alpha} < \text{oil_vol} < abc - \frac{bc^2}{2 \tan \alpha} \right) \\ 4 & \text{if } \left(\alpha > \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \text{oil_vol} > abc - \frac{bc^2}{2 \tan \alpha} \right) \text{ or } \left(\alpha < \arctan \frac{c}{a} \text{ and } \text{oil_vol} > abc - \frac{ba^2 \tan \alpha}{2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

飞机仅存在俯仰运动时,燃油关于油箱 ox_2 轴对称,因此在油箱坐标系下,燃油质心为 $(x_g, 0, z_g)$, x_g, z_g 即为 x_2oz_2 面质心。根据文献

[10],在坐标系 xoy 下,关于任意 n 边形 $A_1A_2 \dots A_n$ 的顶点 $A_i(x_i, y_i)$, $(i=1, 2, \dots, n)$ 按逆时针方向排列,则 n 边形的质心坐标为

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i^2 y_{i+1} + x_n^2 y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1}^2 y_i - x_1^2 y_n + \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} y_{i+1} + x_n x_1 y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} y_i - x_n y_1 y_n}{3 \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right)} \quad (3)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1}^2 + x_n y_1^2 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i^2 - x_1 y_n^2 + \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_i y_{i+1} + x_n y_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} y_i - x_n x_1 y_n}{3 \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right)} \quad (4)$$

由式(3,4)可得, $x_g = x_c, z_g = y_c$ 。经过 $ox_2y_2z_2$ 坐标系向 $ox_1y_1z_1$ 坐标系转换后,得到 (x_{it}, y_{it}, z_{it}) 。

$$\begin{cases} x_{it} = x_g + x_v - a/2 \\ y_{it} = y_v - b/2 \\ z_{it} = z_g + z_v - c/2 \end{cases} \quad (5)$$

2 复合形法确定最优供油策略

供油策略的确定包括选择供油方式和流量分配两部分。现实条件下,飞机供油面临多种条件限制。例如,某型飞机第 i 个油箱的供油速度存在上限 U_i ;每个油箱一次供油的持续时间不少于 t_{\min} ;由

于受到飞机结构限制,至多 m 个油箱可同时向发动机供油等。由以上分析可知,最优供油策略的确定实际上是多约束条件下的非线性规划问题。

复合形法是一种应用比较广泛的求解有约束优化问题的搜索算法,较单纯形法更灵活,可保证始终在可行域内寻找最优值,能有效处理不等式约束的优化设计问题^[11-12],其表达式为

$$\begin{cases} \min E(x) \\ \text{s.t. } g(x_i) \leq 0 \\ \underline{x}_i \leq x_i^* \leq \bar{x}_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: $E(x)$ 为目标函数,约束中 \bar{x}_i 、 \underline{x}_i 分别为变量的上下限, x_i^* 为最优解, $g(x_i)$ 为约束条件。

运用复合形法计算供油策略步骤如下。

(1) 根据约束条件确定 n 种供油方式,任意选择第 i 种供油策略进行下一步。

(2) 运用复合形法计算此种供油方式下的具体供油策略。

① 选取 k 个顶点,构造初始复合形;

② 计算各顶点的函数值 $F(X^{(j)})$, $j = 1, 2, \dots, k$, 选出好点 $X^{(L)}$ 与坏点 $X^{(H)}$

$$\begin{aligned} X^{(L)}: F(X^{(L)}) &= \min \{ F(X^{(j)}), j = 1, 2, \dots, k \} \\ X^{(H)}: F(X^{(H)}) &= \max \{ F(X^{(j)}), j = 1, 2, \dots, k \} \end{aligned} \quad (7)$$

③ 计算坏点以外的其余各点的中心点 X_0

$$X_0 = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k X^{(j)} \quad j \neq H \quad (8)$$

④ 计算映射点 $X^{(R)}$ 公式为

$$X^{(R)} = X^{(0)} + \alpha(X^{(0)} - X^{(H)}) \quad (9)$$

判断 $X^{(R)}$ 是否在可行域内。若 $X^{(R)}$ 不在可行域内,将映射系数 α 变为原来的 $\frac{1}{2}$ 后再按照式(9)改变映射点,直到 $X^{(R)}$ 变为可行点为止。

⑤ 构造新的复合形,计算映射点的函数值 $F(X^{(R)})$,并与坏点的函数值 $F(X^{(H)})$ 比较。

若 $F(X^{(R)}) < F(X^{(H)})$,则用 $X^{(R)}$ 代替 $X^{(H)}$,构成新的复合形。

若 $F(X^{(R)}) > F(X^{(H)})$,且经多次减半 α 均不能使 $F(X^{(R)}) < F(X^{(H)})$,则说明映射方向不正确,此

时需取对次坏点 $X^{(SH)}$ 的映射以改变映射方向。

⑥ 终止判断条件

(a) 各顶点与好点函数值之差的均方根值小于误差限,即

$$\left\{ \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [F(X^{(j)}) - F(X^{(L)})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \epsilon_1 \quad (10)$$

(b) 各顶点与好点的函数值之差的平方和小于误差限,即

$$\sum_{j=1}^k [F(X^{(j)}) - F(X^{(L)})]^2 \leq \epsilon_2 \quad (11)$$

(c) 各顶点与好点函数值差的绝对值之和小于误差限,即

$$\sum_{j=1}^k |F(X^{(j)}) - F(X^{(L)})| \leq \epsilon_3 \quad (12)$$

如果不满足约束条件,则返回步骤2中第②步进行下一次迭代;否则,可将最后复合形的好点 $X^{(L)}$,及其函数值 $F(X^{(L)})$ 作为最优解输出。

(3) 对 n 种供油方式进行遍历,重复步骤(2),比较每种供油方式在 $(t, t + \Delta t)$ 时间段内期望函数值,选择最小期望函数值所确定的供油方式作为这一时刻的初始并确定下一时刻约束条件。

由于供油不同约束条件的限制,每一时刻确定的供油方式 n 为变化量,但由于供油持续时间的限制,一段时间内供油方式不会发生改变,此时 $n = 1$ 。

3 仿真分析

实验假定某飞机共有6个油箱,油箱均为长方体且固定在飞机内部。在飞行器坐标系下,飞机(不载油)质心 $c_0 = (0, 0, 0)$,自身质量 $M = 3000 \text{ kg}$,燃油密度 $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ 。各油箱中心位置、初始载油量、尺寸、最大供油速度如表1所示,规定油箱2、3、4、5可直接向发动机供油,油箱1和油箱6作为备份油箱分别向油箱2和油箱5供油,至多2个油箱可同时向发动机供油,至多3个油箱可同时供油,向发动机供油油量不小于发动机所需油量,不大于发动机所需油量的1.1倍,各油箱每次供油持续时间不小于60 s。各油箱分布如图3所示。

表1 各油箱参数

Table 1 Parameters of each fuel tank

油箱	1号	2号	3号	4号	5号	6号
中心位置/m	(8.9, 1.21, 0.62)	(6.91, -1.39, 0.22)	(-1.69, 1.21, -0.28)	(3.11, 0.61, -0.18)	(-5.29, -0.29, 0.42)	(-2.09, -1.49, 0.22)
初始油量/m ³	0.3	1.5	2.1	1.9	2.6	0.8
尺寸/m	(1.5, 0.9, 0.3)	(2.2, 0.8, 1.1)	(2.4, 1.1, 0.9)	(1.7, 1.3, 1.2)	(2.4, 1.2, 1)	(2.4, 1, 0.5)
最大供油速度/(kg·s ⁻¹)	1.1	1.8	1.7	1.5	1.6	1.1

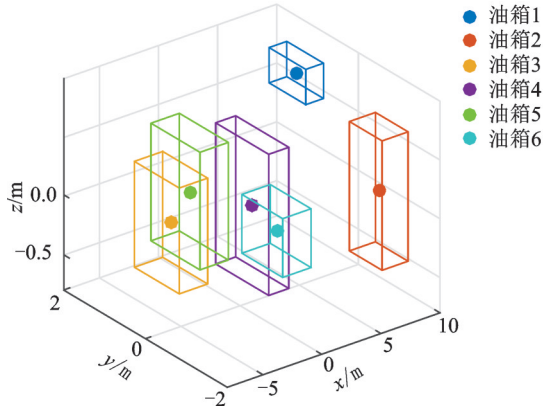


图3 油箱分布

Fig.3 Fuel tank distribution

假设飞机执行任务共需 $t=7\ 200\text{ s}$ 、各时刻发动机耗油速率和俯仰角数据变化分别如图 4、5 所示。

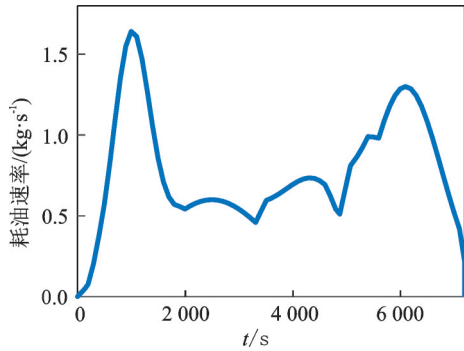


图4 发动机耗油速率

Fig.4 Engine fuel consumption rate

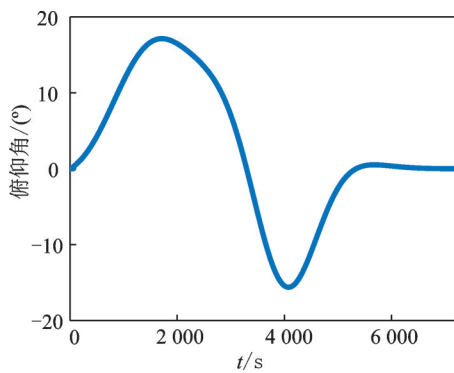


图5 俯仰角变化

Fig.5 Pitch angle change

实验要求通过本文所提算法,确定最优供油策略使飞机瞬时质心 $c(t)$ 与飞机任务要求质心位置的欧式距离小于 0.5 m ,任务要求质心变化如图 6 所示,为证明本文所提算法的有效性,以两者的欧式距离作为评价指标,表达式为

$$\text{dist} = \|c(t) - c_0\|_2 \quad (13)$$

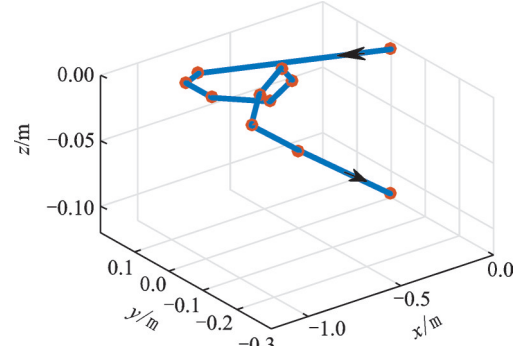


图6 要求质心变化

Fig.6 Change of the required centroid

3.1 供油方式确定

根据以上约束,可确定 9 类 35 种不同的供油方式,每种方式对应一个可行域。

(1) 无油箱打开

(2) 开放一个主油箱

$$\begin{cases} 0 \leq P_j \leq U_j \\ 0 \leq P_j \leq \text{oil}_j(t-1), \quad j=2, 3, 4, 5 \\ R(t) \leq P_j \leq 1.1R(t) \end{cases} \quad (14)$$

(3) 开放两个主油箱

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} + P_{j2} \leq 1.1R(t) \end{cases} \quad (15)$$

(4) 开放一个主油箱一个副油箱,两油箱无供油关系

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} \leq 1.1R(t) \\ P_{j2} + \text{oil}_{j3}(t-1) \leq \text{Max}_{j3} \end{cases} \quad (16)$$

(5) 开放一个主油箱一个副油箱,两油箱有供油关系

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} \leq 1.1R(t) \\ P_{j2} + \text{oil}_{j1}(t-1) - P_{j1} \leq \text{Max}_{j1} \end{cases} \quad (17)$$

(6) 开放两个主油箱一个副油箱,三者无供油关系

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j3} \leq U_{j3} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ 0 \leq P_{j3} \leq \text{oil}_{j3}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} + P_{j2} \leq 1.1R(t) \\ P_{j3} + \text{oil}_{j4}(t-1) \leq \text{Max}_{j4} \end{array} \right. \quad (18)$$

(7) 开放两个主油箱, 一个副油箱, 三者存在供油关系

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j3} \leq U_{j3} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ 0 \leq P_{j3} \leq \text{oil}_{j3}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} + P_{j2} \leq 1.1R(t) \\ P_{j3} + \text{oil}_{j1}(t-1) - P_{j1} \leq \text{Max}_{j1} \end{array} \right. \quad (19)$$

(8) 开放两个副油箱, 一个主油箱, 三者不存在供油关系

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j3} \leq U_{j3} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ 0 \leq P_{j3} \leq \text{oil}_{j3}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} \leq 1.1R(t) \\ P_{j2} + \text{oil}_{j4}(t-1) \leq \text{Max}_{j4} \\ P_{j3} + \text{oil}_{j5}(t-1) \leq \text{Max}_{j5} \end{array} \right. \quad (20)$$

(9) 开放两个副油箱一个主油箱, 三者存在供油关系

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{j1} \leq U_{j1} \\ 0 \leq P_{j2} \leq U_{j2} \\ 0 \leq P_{j3} \leq U_{j3} \\ 0 \leq P_{j1} \leq \text{oil}_{j1}(t-1) \\ 0 \leq P_{j2} \leq \text{oil}_{j2}(t-1) \\ 0 \leq P_{j3} \leq \text{oil}_{j3}(t-1) \\ R(t) \leq P_{j1} \leq 1.1R(t) \\ P_{j2} + \text{oil}_{j1}(t-1) - P_{j1} \leq \text{Max}_{j1} \\ P_{j3} + \text{oil}_{j4}(t-1) \leq \text{Max}_{j4} \end{array} \right. \quad (21)$$

3.2 流量分配

根据复合形法流程, 设置最大迭代次数 10 000

次, 选择终止迭代条件(a)设置 $\epsilon_1 = 0.1$, 计算策略优化平均用时和供油流量分配结果如表 2 所示。

表 2 策略优化平均用时

Table 2 Strategy optimization average time

平均迭代次数	流量分配用时/s	供油方式变更用时/s
27	0.031 77	0.347 2

图 7 给出了主油箱总供油量, 图 8 表示各油箱供油流量, 图 9 甘特图反映了各油箱的开启和关闭时刻。由仿真结果可知, 利用坐标法求解油箱内燃油质心的方法, 较一般积分方法有更低的时间复杂度, 所建数学模型能准确计算不同俯仰角和不同油量下飞机质心位置。基于复合形法确定的最优供

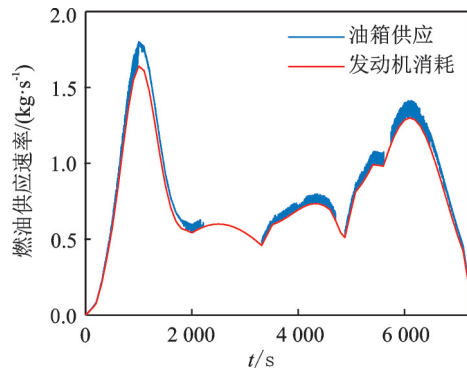


图 7 主油箱总供油量(2,3,4,5)

Fig.7 Total fuel supply of main fuel tank(2,3,4,5)

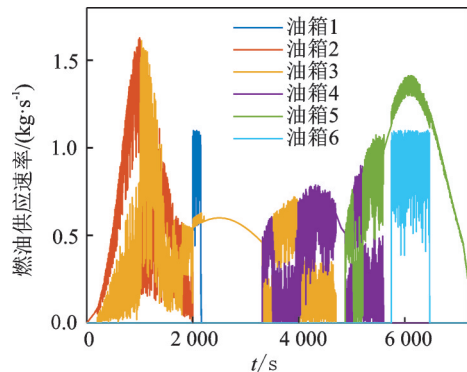


图 8 各油箱供油流量

Fig.8 Fuel supply flow of each fuel tank

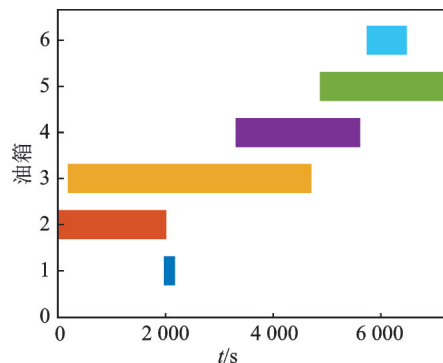


图 9 各油箱供油甘特图

Fig.9 Gantt chart of each fuel tank

油策略能够保证发动机供油系统在不同俯仰角条件下,供油油量满足飞机质心的平衡要求。质心偏移量能维持在较低的水平,如图10所示。计算用时较少,飞机控制系统有实时进行供油策略优化的可能。本文所提出的方法能快速适应飞机质心变化,动态调整供油策略,保证实际质心与标准质心偏差控制在可接受范围内。

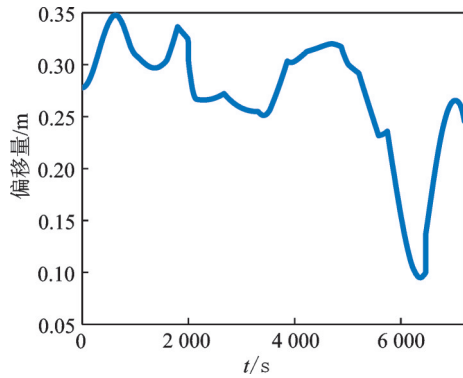


图10 质心偏移量

Fig.10 Centroid deviation

4 结 论

本文针对飞机燃油供油系统,就飞机纵向运动时供油策略进行了分析研究。建立了飞机纵向运动时不同俯仰角和油量下计算质心位置的数学模型,根据该模型提出了基于复合形法确定飞机供油策略的方法。仿真结果表明,该方法确定的供油策略能保证在满足约束条件下,使飞机质心误差在合理范围之内,并能根据要求的质心位置动态调节供油策略。但由于本文算法以误差为参考分段确定供油策略,所得结果不能保证全局最优。

参考文献:

- [1] 曹建华,白冰如.飞机构造[M].北京:国防工业出版社,2014.
CAO Jianhua, BAI Bingru. Aircraft structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [2] SHEN T, WAN F Y, CUI W M, et al. Application of prognostic and health management technology on aircraft fuel system[C]//Proceedings of 2010 Prognostics & System Health Management Conference. Piscataway: IEEE, 2010.
- [3] 刘康.基于Flowmaster飞机重力供油系统计算研究[J].飞机设计,2019,39(3):48-51.
LIU Kang. Research on gravity fuel supply calculation

of aircraft based on flowmaster[J]. Aircraft Design, 2019, 39(3): 48-51.

- [4] 高泽海,马存宝,宋东.飞机燃油供油系统性能退化与故障预测[J].西北工业大学学报,2015,33(2):209-215.
GAO Zehai, MA Cunbao, SONG Dong. Performance degradation and failure prediction of aircraft fuel supply system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(2): 209-215.
- [5] NARASIMHAN S, BISWAS G. Model-based diagnosis of hybrid systems[J]. IEEE Trans on Systems Man Cybernetics: Sysems, 2007, 37(3): 348-361.
- [6] KHADILKAR H, BALAKRISHNAN H. Estimation of aircraft taxi fuel burn using flight data recorder archives[J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2012, 17(7): 532-537.
- [7] LEE J, KIM B, YANG J, et al. Fuel quantity estimation of aircraft supplementary tank using Markov Chain Monte Carlo method[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2019, 20(4): 1047-1054.
- [8] 李杰,段明虎,汪贵平,等.一种发动机供油控制系统仿真研究方法[J].计算机仿真,2014,31(8):78-81.
LI Jie, DUAN Minghu, WANG Guiping, et al. A simulation method for engine fuel control system[J]. Computer Simulation, 2014, 31(8): 78-81.
- [9] 吕亚国.飞机燃油系统计算研究[D].西安:西北工业大学,2006.
LV Yaguo. Calculation research on aircraft fuel system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [10] 常胜利.多边形重心坐标的求法[J].高等数学研究,2005,8(2):21-23.
CHANG Shengli. How to find the coordinates of the center of gravity of a polygon[J]. Studies in College Mathematics, 2005, 8(2): 21-23.
- [11] 舒德健.基于LQG算法和复合形法的深水铺管船动力定位数值模拟[D].天津:天津大学,2018.
SHU Dejian. Numerical simulation of dynamic positioning of deep-sea pipe-laying vessel based on LQG algorithm and complex method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] 陈晗,李林升.基于复合形法的时间最优机械臂轨迹规划[J].机械传动,2019,43(3):72-94.
CHEN Han, LI Linsheng. Trajectory planning of time optimal manipulator based on complex method[J]. Mechanical Transmission, 2019, 43(3): 72-94.