

飞机综合燃油控制系统设计研究

Research on setting up integrated aircraft fuel control system

龙 浩

LONG Hao

(北京联合大学 自动化学院, 北京 100101)

摘 要: 为适应多电/全电飞机发展,根据全电数字化智能燃油综合管理系统发展趋势需求,提出了燃油自动控制系统设计方案,按照其功能分为供油控制系统和质心控制系统,并给出系统结构组成和实现算法,对供油控制,质心位置控制及机动攻击综合控制进行仿真.结果表明系统较好地完成控制目标,便于实现大系统综合,为燃油综合控制系统研究奠定基础并提供研究思路。

关键词: 燃油系统; 供油控制; 质心位置控制; 机动攻击

中图分类号: TP273

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2011)6(下)-0040-04

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2011.6(下).13

0 引言

燃油系统作为飞机一个重要的功能子系统,承担着向发动机稳定可靠供油、控制质心位置和冷却其他系统的功能。为了适应多电/全电飞机发展,全电数字化智能燃油综合管理系统已成为当前飞机燃油系统发展趋势。现在燃油控制系统普遍利用总线技术,采用先进的高精度油量测量系统,运用综合电子控制技术,实现燃油系统与其他功能子系统综合,使燃油系统与其他子系统数据、信息共享,形成全电数字化智能燃油综合管理系统,并将其集成到综合热能量管理系统中,最大程度利用燃油系统散热能力,发挥其最大功效^[1,2]。

国外第四代战斗机如F-22/F-35燃油系统均大量采用数字系统进行燃油系统管理与综合,引入热能量系统以吸收液压、滑油等系统的热量。新一代客机A380燃油系统也采用数字式燃油管理系统,同时为了保障飞机安全,陆续加装了机载惰化系统,采用先进的机载抑爆技术,满足大型客机安全性和经济性要求。在直升机设计上,国外普遍采用了抗坠毁燃油系统设计技术,以满足直升机特点。目前,我国与国外主要差距体现在系统综合和集成上,为保障我国大型飞机和新一代战斗机研制,需加强数字式燃油控制系统设计以及燃油系统综合方面的研究,满足国家重大项目工程研制需求并逐步缩小国内外差距。为此本文提出并设计了一种燃油自动控制系统,具备保障发动机燃油供给、质心位置控制以及满足与其他

子系统综合需求,适应当前飞机燃油系统发展需求趋势,提高了整个系统综合水平^[3-8]。

1 飞机燃油系统结构

飞机燃油系统由燃油油箱,执行元件(油泵),输油管路以及燃油控制计算机等组成,保证飞机在所有飞行状态下,稳定可靠供应并满足飞机质心位置需求。

飞机燃油油箱主要分布在机身和机翼,按照位置大致划分为前组油箱(1号)、后组油箱(3号)、左机翼油箱(4号)、右机翼油箱(5号)以及主油箱(2号)^[9,10]。这种描述燃油油箱的方式是利用油箱大致位置给出的简化理想燃油系统控制对象模型,能够描述飞机整个系统运行情况,作为燃油控制系统设计分析对象是合理合适的,实际燃油油箱是由许多子油箱根据需要分部在飞机各处。该燃油系统工作运行过程为:1号、3号、4号、5号油箱分别向2号主油箱供油,最后由2号油箱(兼作消耗油箱)集中向发动机供油。在飞机质心位置控制系统运行过程为:质心位置后移时,控制1号油箱向3号油箱输油;质心位置前移时,控制3号油箱向1号油箱输油。

设飞机初始质心相对位置为 \bar{x}_{t0} ,飞机燃油控制系统初始质心位置为 \bar{x}_{y0} ,一般可以假设飞机初始质心位置与燃油系统质心位置重合,即 $\bar{x}_{t0} = \bar{x}_{y0}$ 。各个油箱初始最大燃油质量和初始质心相对位置。设飞机在平飞过程中,每个油箱燃油消耗调整过程中只有质量变化,质心位置保持不变。当飞机机动或者倾斜时,由于燃油流动会导致各油箱燃

收稿日期: 2011-01-10

作者简介: 龙浩(1980—),女,河北秦皇岛人,讲师,研究方向为过程控制与智能控制等。

【40】 第33卷 第5期 2011-6(下)

油质心位置发生突变, 这种情况可另行分析。质心相对位置 \bar{x}_{y1} 为各油箱质心纵向距离与平均气动弦长之比。

2 燃油控制系统

燃油控制系统包括两部分: 供油控制系统与质心位置控制系统, 供油控制系统根据发动机燃油消耗量, 控制分配各个油箱燃油的具体燃油消耗量, 保证满足发动机的燃油消耗需求; 质心控制系统根据需要控制飞机质心位置, 减轻舵面操纵负担, 质心控制系统同时可以补偿机载武器投放之后引起飞机质心位置变化, 保证飞机投放前后飞机质心位置基本不变^[10-13]。供油控制系统与质心控制系统通过质量与质心位置计算模块综合, 可实时计算飞机质量与质心位置信息, 提供给飞机动态系统及其他子系统满足其需求。

2.1 供油控制系统

供油控制系统由转换器、燃油控制分配器、各燃油油箱控制单元组成。系统结构如图1所示。

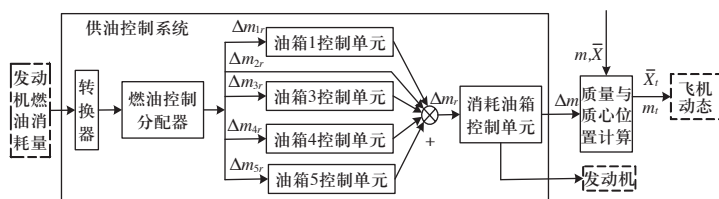


图1 供油控制系统结构图

工作过程如下: 首先由综合飞行控制系统中发动机动态计算模块获得每个采样时刻发动机小时燃油耗油量 $C_y(t)$, 经过转换器, 输出飞机采样时间内发动机燃油消耗量 Δm_y ; 其次经过燃油控制分配器, 以保证燃油自身相对质心位置 \bar{x}_{y0} 不变为原则计算得到每个油箱需要消耗燃油质量, 输入燃油控制单元, 控制每个油箱燃油消耗, 由消耗油箱集中向发动机供油, 保证发动机燃油消耗量。

2.2 质心位置控制系统

质心位置控制系统包括转换器、燃油控制开关器、前组油箱控制单元或者后组油箱控制单元。在进行质心位置调整过程中, 因为调整时间相对较短, 设该过程燃油总质量 m_{y0} 不变, 在质心位置调整时, 通常为前后组(1号、3号)油箱之间进行燃油调整, 其控制结构如图2所示。

质心位置控制系统工作过程如下: 首先接收飞机需要调整的质心位置 $\Delta \bar{x}_{Tr}$ (质心后移 $\Delta \bar{x}_{Tr} > 0$,

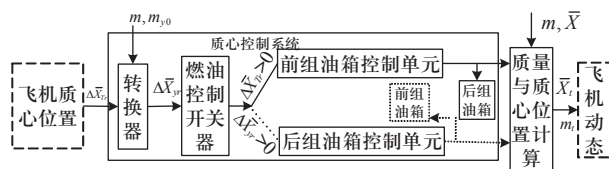


图2 质心控制系统结构

质心前移 $\Delta \bar{x}_{Tr} < 0$), 根据飞机包括燃油在内的实时质量 m 与燃油初始质量 m_{y0} , 转换器计算得到需要调整的燃油质心相对位置 $\Delta \bar{x}_{yr} = \Delta \bar{x}_{Tr} m / m_{y0}$; 其次将 $\Delta \bar{x}_{yr}$ 送入燃油控制开关器, 根据 $\Delta \bar{x}_{yr}$ 符号分别切换质心后移控制通道与质心前移控制通道(图2中实线为质心后移控制通道, 虚线为质心前移控制通道)。若质心后移 $\Delta \bar{x}_{yr} > 0$, 控制1号油箱向3号油箱调整燃油; 若质心前移 $\Delta \bar{x}_{yr} < 0$, 则控制3号向1号油箱调整燃油; 最后根据燃油相对质心移动量 $\Delta \bar{x}_{yr}$, 燃油初始质量 m_{y0} , 前组油箱质心相对位置 $\Delta \bar{x}_{y1}$, 后组油箱相对质心位置 \bar{x}_{y3} , 计算需要调整的燃油质量 $\Delta m_y = m_{y0} \cdot \Delta \bar{x}_{yr} / (\bar{x}_{y3} - \bar{x}_{y1})$ 。若 $\Delta m_y > 0$, 表示由前组油箱向后组油箱调整燃油, 若 $\Delta m_y < 0$, 表示由后组油箱向前组油箱调整。

2.3 质量与质心位置计算

设飞机供油系统运行时飞机燃油质心相对位置 \bar{x}_{y0} 不变, 向发动机供油 Δm_{gy} ; 飞机初始质量 m_0 , 初始质心位置 \bar{x}_{T0} 。当两个控制系统同时运行时飞机实时质量为 $m = m_0 - \Delta m_{gy}$, 则飞机实时质心位置为:

$$\bar{x}_T = \frac{m_0 \cdot \bar{x}_{T0} - \Delta m_{gy} \cdot \bar{x}_{y0} + \Delta m_y (\bar{x}_3 - \bar{x}_1)}{m_0 - \Delta m_{gy}} \quad (3)$$

假设飞机燃油初始质心相对位置与飞机初始相对质心位置重合, 即, 则有:

$$\bar{x}_T = \bar{x}_{T0} + (\Delta m_y (\bar{x}_3 - \bar{x}_1)) / (m_0 - \Delta m_{gy}) \quad (4)$$

则飞机质心位置变化量为:

$$\Delta \bar{x}_T = \bar{x}_T - \bar{x}_{T0} = \Delta m_y (\bar{x}_3 - \bar{x}_1) / (m_0 - \Delta m_{gy}) \quad (5)$$

另一方面, 武器或者副油箱投放前后飞机质心位置将发生剧烈变化, 通过调整飞机燃油, 可抵消由武器或副油箱投放引起的飞机质心位置变化。设投放物质量为 Δm_{tr} , 投放物相对质心位置为 \bar{x}_{tr} 。则物体投放后飞机质量为:

$$m = m_0 - \Delta m_{gy} - \Delta m_{tr} \quad (6)$$

质心位置为:

$$\bar{X}_T = \frac{m_0 \cdot \bar{X}_{T0} - \Delta m_{gy} \cdot \bar{X}_{y0} + \Delta m_y (\bar{X}_3 - \bar{X}_1) - \Delta m_{yf} \bar{X}_{yf}}{m_0 - \Delta m_{gy} - \Delta m_{yf}} \quad (7)$$

又因 $\bar{X}_{T0} = \bar{X}_{y0}$ ，则有：

$$\bar{X}_T = \bar{X}_{T0} + \frac{\Delta m_y (\bar{X}_3 - \bar{X}_1) + \Delta m_{yf} (\bar{X}_{T0} - \bar{X}_{yf})}{m_0 - \Delta m_{gy} - \Delta m_{yf}} \quad (8)$$

3 仿真分析

3.1 燃油质心位置控制仿真分析

在给定飞机质心相对位置的变化量 $\Delta \bar{X}_{Tr}$ 阶跃信号输入条件下，对比燃油控制系统调整飞机质心位置与给定信号，可以分析出燃油质心位置控制系统跟踪结果。设调整质心相对位置 $\Delta \bar{X}_{Tr}$ 为 1% 平均气动弦长，控制结果如图 3 所示。

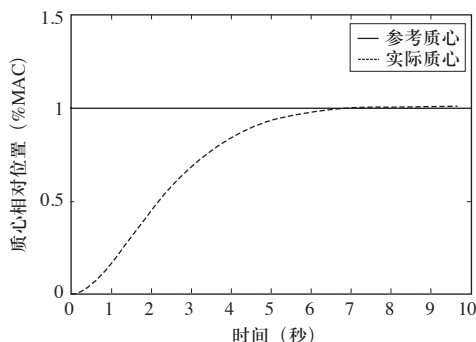


图3 燃油质心位置控制结果图

在调整飞机质心位置变化 $\Delta \bar{X}_{Tr} = 1\%$ 时，系统约 5 秒时间就能够达到稳态，即控制质心达到给定参考质心位置。控制系统能快速准确跟踪给定参考质心位置，系统动态特性好，控制器参数选取合理。

3.2 燃油控制系统动态仿真分析

为了验证燃油控制系统在飞机机动攻击过程中供油及其质心位置控制能力，这里选用一种典型空地攻击方式进行仿真验证，给定机动航迹俯仰角 $\gamma = -15^\circ$ ，攻击飞机初始速度 0.55 马赫，高度 2000 米，地面目标位置（东：8000 米，北：0 米，高度：0 米），对地攻击过程中投射炸弹质量 200 公斤，炸弹相对质心位置位于飞机 40% 气动弦长处，飞机初始质量 9500 公斤，质心相对位置位于飞机 46% 平均气动弦长处。攻击过程动态过程燃油控制系统仿真结果如图 4 所示。

图 4 显示了攻击过程中燃油控制系统控制飞机质心位置结果，初始时刻系统调整到期望质心相对位置，约 18 秒时刻飞机进入拉起机动过程，

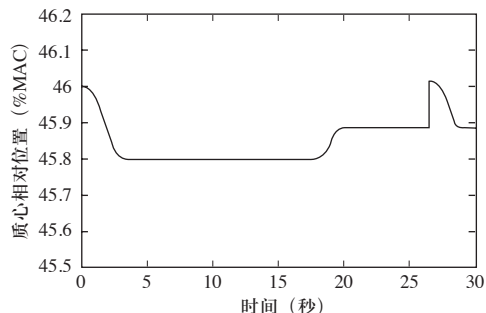


图4 空地攻击过程中质心相对位置曲线

燃油系统根据需求调整质心相对位置，在约 27 秒时刻由于投弹导致飞机质心位置发生突变，燃油控制系统调整燃油，逐渐补偿飞机质心位置恢复原来质心位置。仿真结果显示设计的燃油控制系统在复杂机动攻击过程中能够实时保证发动机燃油消耗，并根据需要调整飞机质心位置，并实时给出飞机所需质心与质量位置信息。

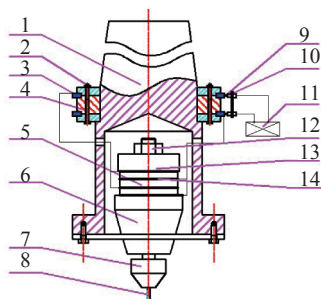
4 结论

根据燃油系统发展需求，设计燃油控制系统，包括供油控制系统和质心控制系统，供油控制系统保证发动机燃油消耗，质心控制系统控制飞机质心来改变飞机动态响应，减轻舵面操纵负担，提高飞行器操纵效率，同时可抵消武器外挂物投放引起的质心变化，保证飞机投放之后平缓配平。对系统组成、控制结构和实现算法进行较详细研究，并与质量与质心位置计算模块综合，可供飞机动态系统及其他子系统使用。仿真验证结果显示，设计的燃油控制系统能够满足设计需求，为燃油系统与其他系统综合，实现飞机的系统大综合和提高系统自动化水平奠定基础并提供研究思路。应该指出，本文依据理想的简化燃油模型，而实际燃油控制系统设计将更复杂，控制参数也需依据实际情况选取。

参考文献：

- [1] HaoLong, Xinmin Wang, "Aircraft fuel system diagnostic fault detection through expert system", Conf.Proc, 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, 6: 7099-7103.
- [2] Hao Long, Xinmin Wang, "Application of aircraft fuel fault diagnostic expert system based on fuzzy neural network", Conf. 2009 WASE international conference on information engineering, 2009, 7: 202-205.
- [3] Beeny. M.A. , "A Review of UK Developments in Aircraft

【下转第55页】



1、刀柄 2、连接螺栓 3、导电环 4、绝缘块 5、压电陶瓷片
6、超声变幅杆 7、钻夹头 8、钻头 9、碳刷 10、碳刷座
11、超声波发生器 12、压紧螺钉 13、后盖板 14、导电片

图1 超声振动钻削装配示意图

挤压作用，减小了孔底材料的变形。同时，振动钻削能够降低轴向力，因而有效地减小了毛刺。

试验中发现，由于普通钻削时存在打滑现象，钻头往往偏离期望钻孔点，不但影响孔的位置精度，也影响了孔的形状和尺寸精度，使入口处呈现椭圆状。而更重要的是，由于孔变为斜孔，钻得越深，钻头弯曲越大，相当于给钻头附加了一个疲劳应力，增加了折断的可能；而振动钻削由于是脉冲式楔入，其钻尖横向振动的固有频率远远高于轴向振动频率，其过程是入钻，偏移，退回，复位一再入钻，在反复的进退中不断地修正上一步产生的入钻误差，因而能够提高入钻精度和保证孔的精度，减少了钻头折断现象的发生。

用此种装置不需要改变孔加工机床的结构，

把改装指直接安装在机床主轴上即可进行小孔振动切削，易于推广使用，特别是给大批量零部件生产中的小孔的加工提供了一种高效、简便和价廉的工艺装置。在某医疗器械有限公司的主要产品——“带线缝合针”孔的加工中，在钻带线缝合针尾部中心微小孔的孔心偏移量、孔扩量、出口毛刺和加工质量等方面与普通钻削对比，证明以上各项指标均高于普通钻削，且工艺过程比较稳定，有效的解决切削温度高、散热难、钻头易引偏、折断、入钻定心难、断屑困难、排屑不畅以及出口毛刺多等缺点。实现了改善劳动条件，减轻劳动强度，保证加工质量，提高生产率，降低生产成本，延长钻头寿命6-8倍的设计要求。

参考文献：

- [1] 唐英, 王红续, 崔华盛. 基于PC机的微小孔振动钻床数控系统[J]. 制造业自动化. 2008, (12).
- [2] 王陈向, 孙丽华, 马玉平, 韩兴言, 聂丹. 超声轴向振动钻削机构的设计与研究[J]. 制造技术与机床. 2010, (6).
- [3] 叶玉刚. 振动钻削技术在深小微孔加工中的应用[J]. 装备制造技术. 2009, (3).
- [4] 崔华胜. 基于有限元法的微小孔振动钻削过程切削力分析[D]. 北京科技大学. 2007. 3
- [5] 张云电. 夹心式压电换能器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 林玉书. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

【上接第42页】

Fuel Management System” 1983.

- [4] 尹雅新, 康欣, “飞机燃油测控及管理技术的现状分析和发展方向” [J]. 四川兵工学报.
- [5] Roemer, M. J.; Nwadiogbu, E. O.; Bloor, G.; “Development of diagnostic and prognostic technologies for aerospace health management applications”, Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings. 2001, 6: 10-17.
- [6] 龙浩, 飞机燃油智能化管理系统故障检测与诊断研究 [D]. 西北工业大学, 2005.
- [7] Juan F. Jimenez, Jose M. Giron-Sierra, C. Insaurralde, M. Seminario, “A simulation of aircraft fuel management system” Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15: 544-564.
- [8] Shujie Song, “Research on aircraft integrated management system” Northwestern Polytechnical University Doctoral Thesis, 2007
- [9] D. Preston, “Aircraft Fuel Control Diagnostic Fault

Detection through Expert Systems” Conf.Proc, IEEE International Symposium on Industrial Electronics’ 93-Budapest. 644-645.

- [10] 伊尔-76燃油系统. 伊尔-76飞机使用维护技术手册.
- [11] Alexandra Ebbinghaus, Peter Wiesen, “Aircraft fuels and their effect upon engine emissions” Air & Space Europe, 2001, 3: 101-103.
- [12] Raffi Babikian, Stephen P. Lukachko, Ian A. Waitz, “The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives” Journal of Air Transport Management, vol. 8, issue. 2002, 8: 389-400.
- [13] Thomas H. Bradley, Blake A. Moffitt, Dimitri N. Mavris, David E. Parekh, “Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft” Journal of Power Sources, 2007, 171: 793-801.