

运输类飞机多油箱加油同时切断概率研究

宋 杨*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘 要: 运输类飞机研制过程中,往往会借鉴已有型号的设计经验,在加速研制进程的同时,也不可避免地造成了局限。以某型运输类飞机加油系统为例,计算分析了在三油箱布局条件下,综合考虑不同加油压力、计算步长、切断时间间隔及加油模式对多油箱加油同时切断概率的影响。结果表明,运输类飞机三油箱同时切断的概率基本为0,而多油箱同时切断概率一般不超过2%,特殊场景下不超过3%;该值随计算步长、切断时间间隔的降低呈现进一步下降趋势;自动加油模式下的多油箱同时切断概率低于手动加油模式。实际运输类飞机加油场景中较难出现三油箱加油同时切断的场景,而两个油箱的同时切断概率也并不高。此外,研究形成的分析思路和方法对其余运输类飞机加油系统设计也具有一定的参考。

关键词: 运输类飞机;燃油系统;加油;同时切断

中图分类号: V271.2

文献标志码: A

OSID:



0 引言

在运输类飞机研制及适航取证过程中,通常为满足条款要求并表明符合性,往往会借鉴已有型号或相似机型的取证经验,这种方式更易取得审查方认可,且可在一定程度上加速飞机取证进程。但不可否认的是,参考历史经验可能造成设计人员受当时的认知或历史经验所局限,而非深纠历史经验背后的设计逻辑,导致在设计新型号时,可能出现各个系统或其子系统裕度偏大的情况。尽管这些裕度可能在系统级设计层面,并非绝对保守,但若作为潜在的输入被引入到设计下游时,从飞机级考虑,则不可避免会产生多级放大效应,综合表现为导致主制造商潜在设计制造成本增高以及飞机经济性降低的情况。因此,历史研制或取证经验应辩证取舍。

以运输类飞机加油系统为例,冲击压力^[1](也称为水锤或水击)是设计过程中不可避免需要考虑的因素。当加油过程中阀门出现正常或非正常突然关闭的情况时,此时管路内燃油流量、速度均会

产生相应的瞬态变化,导致局部压强增大,并通过压力波的形式沿管路轴线传播,进一步造成管道的噪音^[2]和振动^[1],进一步对加油系统管路造成损失或破坏。

根据管路内冲击压力形式的不同,一般可将管路内冲击分为弥合水击^[3]、回流水击^[4]和非棱柱体水击^[5]等形式。冲击压力计算一般可采用传统的数值解析方法^[6]或基于商业软件 Matlab^[7]、FloMaster^[8]计算。

民用运输类飞机研制过程要求考虑冲击压力的确定必须按照各油箱加油切断阀有意或无意关闭的任何组合来确定最大波动压力^[9],同样,军用运输类飞机研制过程也要求考虑系统中多个加油切断阀同时打开或关闭的情况^[10]。

根据设计航程及最大载油量的不同,运输类飞机的油箱布局和加油切断阀数量往往存在差异,典型的运输类飞机采用三油箱布局较多,当然也有两油箱和多油箱布局的设计。加油切断阀的数量往往和油箱数量一致,若设计最大载油量高,要求在较短的时间内完成加油,也可考虑在同一个油箱内

* 通信作者. E-mail: songyang1@comac.cc

引用格式: 宋杨. 运输类飞机多油箱加油同时切断概率研究[J]. 民用飞机设计与研究,2023(4):57-61. SONG Y. Probability of simultaneously shutting off multiple fuel tank refueling for transport aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research,2023(4):57-61(in Chinese).

布置两个切断阀。因此,不同加油切断阀的组合打开或关闭的情况是较多的。

受加油流量和流速影响,运输类飞机最大的冲击压力一般发生在所有加油切断阀同时切断的情况,此情况下由于不同加油切断阀处产生的压力波在管路内相互作用,相互叠加,这种极限载荷工况对管路布置与支架设计是种极限载荷工况,因此需重点考虑。然而,通常运输类飞机具有自动加油和手动加油功能,实际运营从节约人力或简化操作的角度,往往采用自动加油模式,即使采用手动加油方式,由于各油箱设计油量、加油速率和机务操作时间差异,定性来看,很难遇到多个切断阀同时切断的场景,但该场景发生概率究竟为多大,则需要进一步研究。

1 方法简介

以某型运输类飞机加油系统为例,该飞机采用三油箱布局,每个油箱布置有单独加油切断阀,用于实现各油箱单独或同时加油的功能。此外,该运输类飞机还具有自动加油和手动加油两种操作模式。最终考虑不同加油模式和加油压力,计算分析多油箱加油同时切断的概率,为运输类飞机加油系统设计提供参考。

本研究方法及涉及到的输入或假设如下:

1) 油箱油量:该型运输类飞机两侧机翼油箱最大设计载油量为 3 000 kg,中央翼油箱最大设计载油量为 13 000 kg。为便于分析,计算过程中油量取整,不考虑额外的油量限制或零头。

2) 计算步长:每个油箱加油过程中步长分别选取为 100 kg、200 kg、500 kg、1 000 kg,按此步长对每个油箱的油量进行网格划分,分析在此状态下加油至各油箱最大设计载油量的时间。

3) 加油组合:根据三油箱加油特点,在地面加油过程中,可能产生的油箱组合有 7 种,参见表 1。其中,“1”表示该油箱处于加油状态,“0”表示非加油状态。

表 1 加油过程中不同油箱组合

组 合	左机翼油箱	中央翼油箱	右机翼油箱
组合 1	1	1	1
组合 2	1	1	0
组合 3	1	0	1
组合 4	0	1	1

表 1(续)

组 合	左机翼油箱	中央翼油箱	右机翼油箱
组合 5	0	0	1
组合 6	0	1	0
组合 7	1	0	0

4) 加油压力:计算过程中,加油压力分别选取为 55 psig、50 psig、45 psig、40 psig、35 psig、30 psig。

5) 加油速率:采用一维流体管网仿真软件 Simcenter AMESim 进行加油系统建模,按照表 1 计算不同油箱组合条件下及不同加油压力下,各油箱的加油速率,同时根据试验数据校准,形成加油速率矩阵后编写 Python 零维仿真程序,以快速计算指定条件下的加油工况。

6) 同时切断时间间隔定义:根据工程经验,燃油系统加油切断阀打开时产生的冲击压力一般较低,而其关闭时产生的冲击压力基本在 2 s 内会迅速衰减,同时考虑自动加油模式下燃油计算切断顺序及手动加油模式下机务操作加油切断阀的实际时间,此处同时切断时间间隔分别取 2 s、3 s 和 4 s 进行分析。

7) 自动加油逻辑:在指定的初始油量和目标油量下,优先加满机翼油箱,其次当油量达到对应油箱设计状态则切断该油箱加油。

8) 手动加油逻辑:在指定的初始油量和目标油量下,按照每个油箱加油切断阀的状态进行加油,直到油量达到对应油箱设计状态则切断该油箱加油。

2 计算分析思路

对某型号运输类飞机多油箱加油同时切断概率的分析,按下述思路开展:

1) 根据指定的油量计算步长,将不同油箱油量按此进行网格化;

2) 按照指定的加油压力,在不同的加油模式下,计算从当前节点加油至对应油箱最大设计状态;

3) 在上一步骤加油过程中,记录不同油箱加油切断阀的切断时间,将三个切断油箱数值进行比较,若时间差在预期的切断时间间隔内,则进行记录,根据表 1 中的相关油箱组合,此处加油同时切断的类型可分为三油箱同时切断和两油箱同时切断(左机翼油箱和中央翼油箱同时切断、左机翼油箱和右机翼油箱同时切断、中央翼油箱和右机翼油箱

同时切断),多油箱加油同时切断概率定义为三油箱同时切断概率与两油箱同时切断概率之和;

4) 重复2)和3),对1)中的所有油箱网格节点进行遍历,则计算后可统计出总加油次数、三油箱同时切断和两油箱同时切断的次数,记录该值并进行分析。

综上所述,可形成13个工况,参见表2。

表2 计算工况说明

工况	加油压力 /psig	计算步长 /kg	切断时间间隔/s	加油模式
工况1	55	100	2	手动
工况2	50	100	2	手动
工况3	45	100	2	手动
工况4	40	100	2	手动
工况5	35	100	2	手动
工况6	30	100	2	手动
工况7	55	100	3	手动
工况8	55	100	4	手动
工况9	55	200	2	手动
工况10	55	500	2	手动
工况11	55	1000	2	手动
工况12	55	100	2	自动
工况13	50	100	2	自动

3 计算结果展示

根据表2中列出的工况进行计算,以工况1~工况3为例,进行结果展示,分别参见表3至表5。

表3 工况1计算结果

项 目	参 数	同时切断概率
加油压力	55 psig	—
计算步长	100 kg	—
切断时间间隔	2 s	—
总加油次数	125 890	—
三油箱同时切断次数	0	0.00 %
左+中同时切断次数	452	0.36 %
左+右同时切断次数	673	0.53 %
中+右同时切断次数	495	0.39 %
同时切断次数合计	1 620	1.29 %

表4 工况2计算结果

项 目	参 数	同时切断概率
加油压力	50 psig	—
计算步长	100 kg	—
切断时间间隔	2 s	—
总加油次数	125 890	—
三油箱同时切断次数	0	0.00 %
左+中同时切断次数	443	0.35 %
左+右同时切断次数	574	0.46 %
中+右同时切断次数	488	0.39 %
同时切断次数合计	1 505	1.20 %

表5 工况3计算结果

项 目	参 数	同时切断概率
加油压力	45 psig	—
计算步长	100 kg	—
切断时间间隔	2 s	—
总加油次数	125 890	—
三油箱同时切断次数	0	0.00 %
左+中同时切断次数	409	0.32 %
左+右同时切断次数	483	0.38 %
中+右同时切断次数	407	0.32 %
同时切断次数合计	1 299	1.03 %

3.1 加油压力对同时切断概率影响

对比工况1~工况6,可说明不同加油压力对同时切断概率影响,对比参见图1。

由图1可知,当仅有加油压力变化时,三油箱加油同时切断概率基本为0,在30 psig的加油压力下概率达到最大,为0.02%。两油箱的切断概率随加

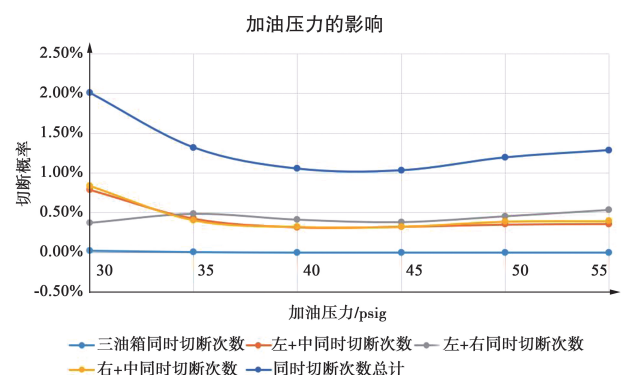


图1 加油压力对同时切断概率影响

油压力的变化趋势及油箱组合的不同而有所不同,但最大概率均低于 1%。当加油压力在 35~50 psig 时,两油箱同时切断的概率低于 0.5%。当加油压力为 30 psig 时,多油箱加油同时切断概率达到最大,并随加油压力增大而呈现降低趋势,当加油压力为 55 psig 时,该值为 1.29%。

3.2 切断时间间隔对同时切断概率影响

对比工况 1、工况 7 和工况 8,可说明在确定的加油压力下(55 psig),切断时间间隔对同时切断概率的影响。

由图 2 可知,随着切断时间间隔的增加,即 2 s 变化至 4 s,可发现所有工况下的加油切断的概率均呈现逐渐增加的趋势。当切断时间间隔定义为 4 s 时,所有油箱组合条件下的切断概率均低于 1%,且多油箱同时切断概率略高于 2%,为 2.17%。此外,当加油压力为 55 psig 时,三油箱同时切断的概率为 0。

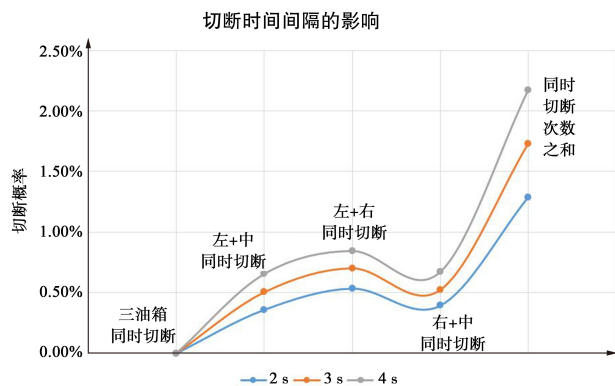


图 2 切断时间间隔对同时切断概率影响

3.3 计算步长对同时切断概率影响

对比工况 1、工况 9、工况 10 和工况 11,可说明计算选用的计算步长对同时切断概率影响。

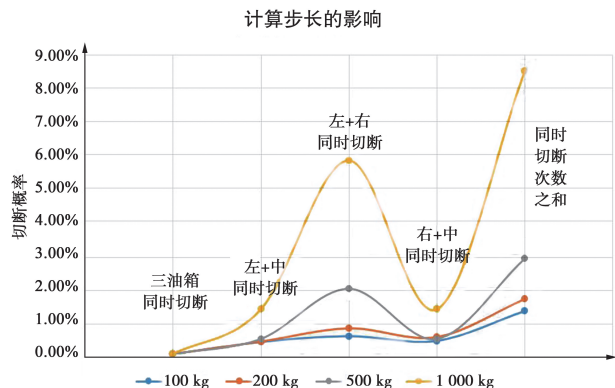


图 3 计算步长对同时切断概率影响

由图 3 可知,随着计算步长的增加,可发现所有工况下的加油切断概率均呈现逐渐增加的趋势,但机翼油箱同时切断的概率增幅最为明显,当计算步长为 1 000 kg 时,此概率接近 6%。当加油压力为 55 psig 时,单侧机翼油箱和中央翼油箱的加油组合同时切断概率之和随步长变化并不明显,均低于 2%;此场景下,三油箱同时切断的概率为 0。

3.4 加油模式对同时切断概率影响

对比工况 1、工况 2、工况 12 和工况 13,可说明不同加油模式对同时切断概率影响。

由图 4 可知,当加油压力一定,采用自动加油模式后,相应的不同油箱组合同时切断概率均有一定降低,这种情况的出现是由于限制了加油顺序,与预期相符。

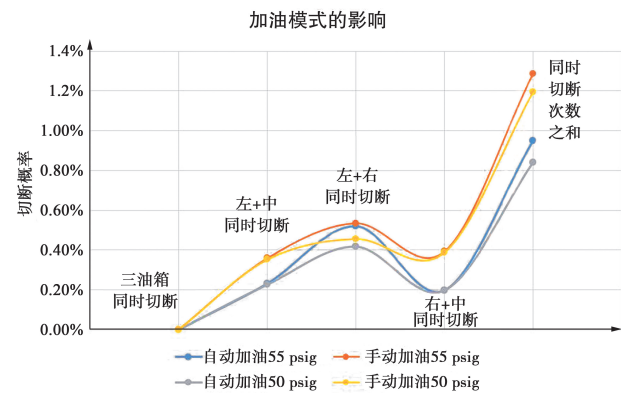


图 4 加油模式对同时切断概率影响

4 结论

本文以某型运输类飞机加油系统为例,对多油箱加油同时切断的场景和概率进行了研究和分析,得出结论如下:

1) 多个场景下,三油箱加油并同时切断的概率均为 0;仅当加油压力为 30 psig 时,其概率达到最大,为 0.02%;

2) 当加油压力或切断时间间隔一定时,所有油箱组合条件下的切断概率均低于 1%,多油箱同时切断概率低于 2%;当切断时间间隔增加时,多油箱同时切断概率略高于 2%。

3) 在计算步长一定的情况下,所有油箱组合条件下的切断概率均低于 2%,多油箱同时切断概率低于 3%,且随着计算步长进一步降低,此概率呈下降趋势。

综合以上分析,实际运输类飞机加油场景中较

难出现三油箱加油同时切断的场景,而两个油箱的同时切断概率也并不高,而以往的设计由于考虑了最严酷情况,对加油系统的管路布置和支架强度提出了很高要求。如何在后续新机型的设计过程中,既参考历史经验,又能在飞机级和系统级要求范围内合理地减小设计裕度,值得进一步考虑。

参考文献:

- [1] 施传家. 飞机燃油系统管路冲击压力问题的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(4): 32-36.
- [2] 马希金, 高永辉. 压力管道工程水锤危害、防护措施及其研究计算方法[J]. 中国水运(学术版), 2007(7): 118-120.
- [3] 雍歧卫, 蒋明, 蒲家宁. 泵-阀压力管道弥合水击的分析与控制[J]. 中国给水排水, 2003, 19(12): 77-79.
- [4] 付六生. 减少管路中回流水击现象[J]. 西南造纸, 2001(6): 6.
- [5] 朱承军, 杨建东. 非棱柱体管道的一维水击计算及分析[J]. 水力发电学报, 1998(2): 59-68.
- [6] 王树人. 水击理论与水击计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [7] 孟安波, 殷豪, 叶鲁卿. 一种新的弹性水击计算方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2003, 24(4): 44-47.
- [8] TU Y, CHEN X R, YIN L, et al. Numerical study on pipeline pressure surge of the large aircraft fuel system[J]. Shock and Vibration, 2022: 7529857.
- [9] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [10] Department of Defense of USA. Joint services specification guide : JSSG-2009[S]. U. S. : Department of Defense, 2009.

作者简介

宋 杨 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机燃油机械系统设计。E-mail: songyang1@comac. cc

Probability of simultaneously shutting off multiple fuel tank refueling for transport aircraft

SONG Yang *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: In the process of development of transport aircraft, we often learn from the design experience of existing models for reference, which accelerates the development process but inevitably causes limitations. Taking a certain type of transport aircraft refuel system as an example, this paper calculates the influence of different refueling pressure, calculation step, shut-off interval, and mode on the probability of shut-off refueling simultaneously in multiple tanks under the condition off three-tank layout. The results show that the probability of three tanks shut-off at the same time of transport aircraft is basically zero, while the probability of multiple tanks shut-off simultaneously generally does not exceed 2%, and this value does not exceed 3% under special scenes. This value shows a further downward trend with the decrease of the calculation step and shut-off interval definition. The probability of multiple tanks shut-off in automatic model is lower than that in manual refueling mode. In the actual refueling situation of transport aircraft, it is quite difficult to have the scene of three fuel tanks being refueled and shut off at the same time, and the probability of two fuel tanks being shut off at the same time is also very low. In addition, the analytical ideas and methods formed by the research also have certain reference for the design of refueling system for other transport aircraft.

Keywords: transport aircraft; fuel system; refuel; shut-off simultaneously

* Corresponding author. E-mail: songyang1@comac. cc