

# 燃油泵电路保护的适航符合性

宋歌\*

上海飞机设计研究院, 上海 201210

**摘要:** 本文对燃油泵电路保护设计和验证技术进行了系统性研究, 对燃油箱点燃防护适航规章中适用于燃油泵电路保护的要求进行了明确, 从工程角度将抽象的适航规章要求详细化、具体化, 提出了燃油泵电路保护的完整验证思路, 对于所需采取的符合性验证方法及其工作内容进行了 MOC4 试验, 并根据试验内容进行分析和总结, 结合条款要求给出等效安全内容。

**关键词:** 燃油泵电路保护; MOC4 试验; 等效安全; 适航; 符合性验证

中图分类号: V37 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 07-0034-05

1996 年 7 月 17 日, 美国环球航空公司 (TWA) 800 号航班波音 747 飞机起飞后不久便发生了爆炸, 导致机上 230 人全部遇难。美国国家运输安全委员会 (NTSB) 在此次事故调查中得出结论, 认为不明原因的点火源导致了中央翼油箱爆炸, 而油箱外电路短路造成高能电流进入燃油箱, 从而产生点火源是最为可能的情况。美国联邦航空管理局 (FAA) 于 2001 年发布有关燃油箱点燃防护的适航规章, 增加了对燃油箱点火源的评估和预防要求<sup>[1,2]</sup>。本文基于适航条款要求, 针对燃油泵电路保护进行了设计特征分析及符合性验证方法研究。

## 1 燃油泵电路适航条款研究

2008 年 9 月, FAA 通过联邦航空条例第 25-125 号修正案, 对 25.981 条款进行了修订, 完善和明确了对燃油箱可燃性的控制要求, 并对原关键设计构型控制限制 (CDCCL) 要求进行了扩展, 以涵盖可燃性减少措施和减轻点燃后果的内容。随同 25-125 号修正案一起发布的还有咨询通告 AC25.981-1C, 为点火源防护起到指导作用<sup>[3-6]</sup>。

本文主要研究燃油泵电路保护问题, 根据分析 AC 25.981-1C 中的内容以及目前国内外先进机型的案例, 从而得出燃油泵电路保护需要满足以下的设计特征:

- (1) 燃油泵供电线路应布置在油箱外。
- (2) 燃油泵供电线路应与油箱壁板分离敷。
- (3) 对燃油泵供电线路加设护套。
- (4) 电路中设置接地故障中断器 (GFI) 或电弧故障断

路器 (AFCB)。

为了满足上述 4 个设计特征, 一般民用飞机针对燃油泵电路保护需要进行以下方面的设计考虑:

目前, 市场上的民用飞机绝大部分都是按 (1)、(2) 两条设计特征进行设计, 因为燃油泵供电线路属于高能电缆, 是不允许在燃油箱内敷设的, 且高能电缆还需要与燃油箱保持一定的隔离间距。

第 (3) 条设计特征可以在燃油泵供电线路增加外屏蔽护套或类似的产品来满足, 如图 1 所示。

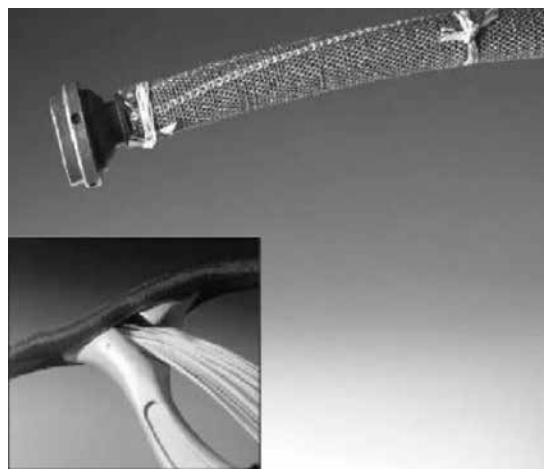


图 1 屏蔽自卷绕编织套产品

Fig.1 Self-wrapping protective sleeve production

第 (4) 条设计特征, 可以采用 AC 25.981-1C 里要求加装在燃油泵供电线路上的 GFI 或 AFCB 等设备。

收稿日期: 2016-02-13; 退修日期: 2016-03-01; 录用日期: 2016-04-15

\* 通讯作者: Tel.: 18616375772 E-mail: songge@comac.cc

引用格式: SONG Ge. Certification compliance about circuit protecting for fuel pump [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(07):34-38. 宋歌. 燃油泵电路保护的适航符合性 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(07):34-38.

2 符合性验证试验

对于本文前面所列的 4 条设计特征,前条设计特征可以用说明性文件报告 (MOC1) 和设备合格证 (MOC9) 来说明对 25.981 条款的符合性,第 (4) 条设计特征考虑到 GFI 能否实现所预期的功能和效果,除了用 MOC1 和 MOC9 外,还需要做试验室试验 (MOC4) 来进一步说明它的符合性,本章将重点介绍 MOC4 试验内容。

在 AC 25.981-1C 里要求加装 GFI 等设备以满足发生短路故障时能快速响应,但是对于发生短路故障的 GFI 响应时间没有定量的要求,要体现 GFI 的快速响应特点,就需要和供电线路上的断路器保护装置进行比较,如果在各种短路故障发生的情况下, GFI 的响应时间都快于断路器的响应时间,说明这款 GFI 产品能够满足适航要求。

不同机型的燃油供油系统的构型也有区别,下面针对典型燃油供油系统构型来进行 MOC4 试验,本文用到的 GFI 产品为 GFI 继电器,包含普通继电器的功能。

在室温下,通过模拟燃油泵供电线路发生短路故障的方法,在分别接入 GFI 继电器和普通继电器的条件下,对模拟燃油泵负载输入端进行对地短路试验,通过对比分析以证明所选的 GFI 具有快速响应的特性。

为了表明 GFI 可以对其下游电路实施全程保护,试验将选取 A 相负载供电电缆上的 3 个典型点 (远、中、近) 模拟短路。图 2 为试验原理框图。试验中测量并记录发生短路故障时的电流值、整个短路故障的持续时间,同时,监测断路器输入端电压、控制继电器输入端电压和输出端电压等参数。

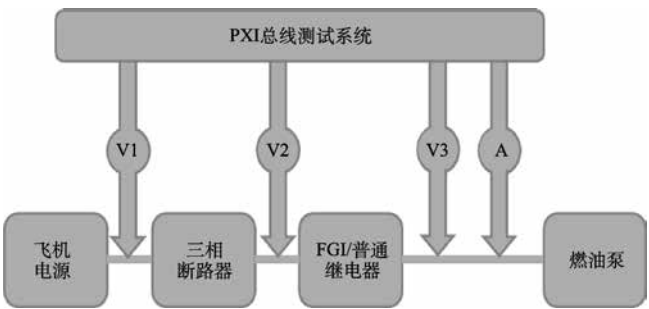


图 2 试验原理框图  
Fig.2 Experiment schematics

将试验分为 10 组不同状态来检测 GFI 继电器和普通继电器的故障反应时间,如表 1 所示。其中,1 ~ 5 组接入 GFI 继电器,6 ~ 10 组接入普通继电器,6 ~ 10 组与 1 ~ 5 组一一对应。

由于篇幅限制,这里列出试验状态 2 和 7,3 和 8,5 和 10 的对比试验数据图,如图 3 ~ 图 8 所示。

表 1 试验状态表  
Table 1 Experiment condition table

| 试验状态 | 短路故障说明     | 短路故障点      | 短路故障前系统状态                                                                    | 备注         |
|------|------------|------------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1    | A 相对地短路    | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |
| 2    | A 相对地短路    | 继电器输入端     |                                                                              |            |
| 3    | A 相对地短路    | 继电器输出端     | 在 GFI 输出电缆末端施加 $1.5\text{kVA} \pm 0.15\text{ kVA}$ , 功率因数 0.75 (滞后), 三相平衡负载。 | 接入 GFI 继电器 |
| 4    | AB 两相对地短路  | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |
| 5    | ABC 三相对地短路 | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |
| 6    | A 相对地短路    | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |
| 7    | A 相对地短路    | 继电器输入端     | 在普通继电器输出电缆末端施加 $1.5\text{kVA} \pm 0.15\text{ kVA}$ , 功率因数 0.75 (滞后), 三相平衡负载。 | 接入普通继电器    |
| 8    | A 相对地短路    | 继电器输出端     |                                                                              |            |
| 9    | AB 两相对地短路  | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |
| 10   | ABC 三相对地短路 | 模拟燃油泵负载接入端 |                                                                              |            |

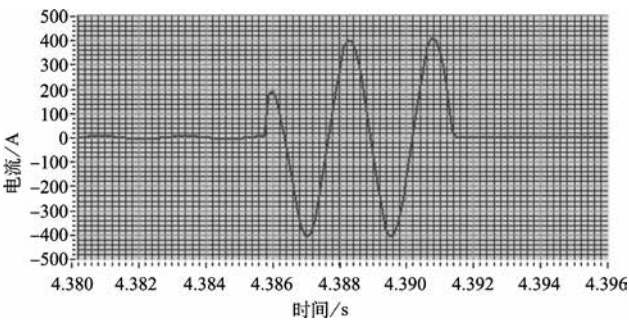


图 3 试验状态 2-GFI 继电器输入端 A 相对地短路电流  
Fig.3 Current of A-phase short to ground at GFI relay input of experiment condition 2

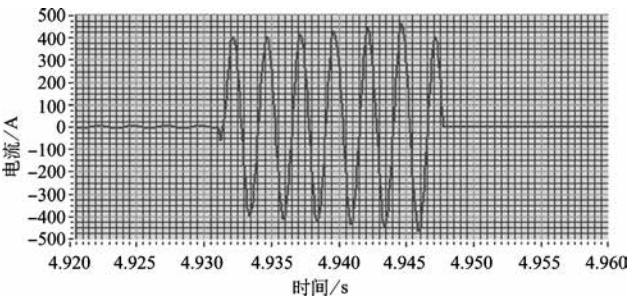


图 4 试验状态 7-普通继电器输入端 A 相对地短路电流  
Fig.4 Current of A-phase short to ground at normal relay input of experiment condition 7





电电缆中的两项电作为内部检测电路的电源,由于燃油泵属于三相平衡负载,则可以通过检测三相供电电缆的不平衡作为判断是否发生短路故障依据,若短路故障值达到设定的阈值时,此时内部电路切断继电器线圈中的回路,从而达到切断燃油泵的供电,有效快速地隔离短路故障,防止对地短路故障所产生的热量对燃油系统造成的危害,如图 10 所示。由于电路短路发生时,电流值几乎是瞬间飙升,而热量的产生相对需要一定的时间,所以 GFI 继电器跳闸的动作时间一定小于断路器的跳闸动作时间。

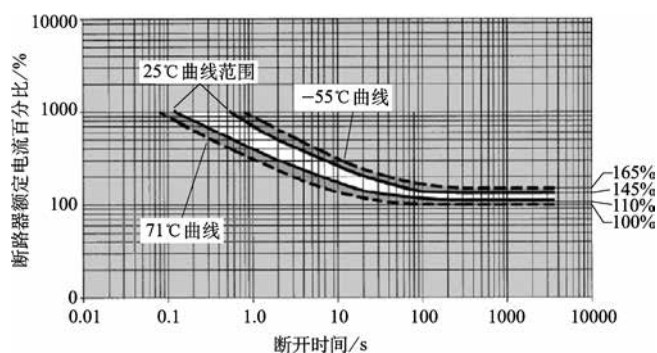


图 10 断路器安-秒特性曲线图

Fig.10 Circuit breaker ampere-seconds characteristic table

### 3 等效安全分析

AC 25.981 (a) (3) 条款内容为“证实点火源不会由每个单点失效、每个单点失效与每个没有表明为极小可能的潜在失效条件的组合,或者所有没有表明为极不可能的失效组合引起。”此条款可分解并理解为以下 3 条要求:

- (1) 每个单点失效,不计概率,绝不能引发一个点火源;
- (2) 每个单点失效,不计概率,与每个没有表明至少为极小可能 ( $10E-7$ ) 的潜在失效条件的组合,绝不能引发一个点火源。
- (3) 所有没有表明为极不可能 ( $10E-9$ ) 的失效结合,绝不能引发一个点火源<sup>[7-9]</sup>。

由于 GFI 继电器集成了普通继电器和 GFI 的功能,它的基础可靠性比普通继电器差。据悉,目前波音公司加装在 737NG 上的 GFI 继电器中的探测对地短路电流功能的失效概率为  $2.26E-07$ ,基于技术与生产成本限制,此功能可靠性提升很困难。GFI 继电器探测对地短路电流功能故障为隐性故障,结合上述条款理解要求 (2), GFI 继电器不能满足探测对地短路电流功能的潜在失效概率 ( $2.26E-07$ ) 小于  $10E-7$ ,波音公司对此问题提出了等效安全的申请并最终得到 FAA 认可,并签订了研究结果备忘录,内容如下<sup>[10]</sup>:

(1) 在波音 707、727、737CL、737NG、747CL、747-400、757、767 和 777 上有 478123000 飞行小时使用电动燃油泵构型的历史数据表明,由燃油泵故障导致的点火源故障的数量是极少的,由燃油泵供电线路相间短路或对地短路导致的点火源隐性故障几率是极低的。

(2) 运行经验的积累使设计不断进步,使针对 GFI 额外的保护功能的显性故障概率降低。不断改进的燃油泵电连接器产品使点火源风险进一步降低。

(3) 每个固定周期对 GFI 继电器功能的检查,根据 GFI 继电器的潜在失效概率数据,最大不超过 4000 飞行小时会针对 GFI 进行维护并检查其功能是否完好。如 737NG 飞机会根据飞行维护手册,每年会进行内部维护,如果 GFI 继电器对地短路探测功能发生故障,则必须要更换 GFI 继电器。GFI 继电器属于关键设计构型项 (CDCCL) 设备,受到适航严格关注,必须按照飞行维护手册进行操作。

如有需要,使用 GFI 继电器构型的飞机在申请 25.981 (a) (3) 条款符合性时可部分引用此备忘录中的内容,以进行等效安全说明。

### 4 结论

本文对燃油泵电路保护适航条款进行了分析和解读,针对适航条款要求给出了燃油泵电路设计时需要考虑的方法,对 GFI 继电器进行了 MOC4 试验,并给出了等效安全分析案例,为等效安全说明提供参考。

AST

### 参考文献

- [1] FAA. Aircraft propulsion system design requirements[S]. Federal Register, 1967.
- [2] FAA. Transport airplane fuel tank system design review, flammability reduction, and maintenance and inspection requirements[S]. Federal Register, 2001.
- [3] FAA. Equivalent safety provisions for fuel tank system fault tolerance evaluations[S]. Federal Register, 2002.
- [4] FAA. Reduction of fuel tank flammability in transport category airplanes[S]. Federal Register, 2008.
- [5] FAA. Fuel tank ignition source prevention guidelines[S]. Federal Register, 2008.
- [6] FAA. Fuel tank flammability reduction means[S]. Federal Register, 2008.
- [7] 陈荣,钟栋梁,傅国如. 空中电缆着火故障分析[J]. 失效分析

- 与预防, 2006(03): 54-56.
- CHEN Rong, ZHONG Dongliang, FU Guoru. Failure analysis on burnt cable in flight[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006(03):54-56. (in Chinese)
- [8] 肖乾. 民用飞机 EWIS 对 CCAR25.1709 的符合性设计与分析研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2014(03): 21-24.
- XIAO Qian. Research on the compliance of CCAR25.1709 for EWIS development of civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2014(03):21-24. (in Chinese)
- [9] 李鹏昌, 刘岩东, 吕明. EWIS 设计中的 PRA 分析 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014(05): 23-28.
- LI Pengchang, LIU Yandong, LV Ming. PRA in EWIS design[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014(05):23-28. (in Chinese)
- [10] FAA. Fuel tank ignition source prevention guidelines[S]. Federal Register, 2008.
- 作者简介**  
宋歌 (1983— ) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 电气线路设计和 EWIS 安全性工作。  
Tel: 18616375772  
E-mail: songge@comac.cc

## Certification Compliance about Circuit Protecting for Fuel Pump

SONG Ge\*

*Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China*

**Abstract:** This paper systematic researched the fuel pump circuit protection design and compliance technology, verified the fuel tank ignition prevention regulation requirements which was applicable for fuel pump circuit protection, showed the detailed specific understanding of abstract regulation requirements in engineering view and proposed a concrete certification process for fuel pump circuit protection, made the MOC4 experiment on compliance demonstration and principle of work, summarized and analyzed the experiment, and gave the equivalent level of safety content combining with the regulation.

**Key Words:** fuel pump circuit protection; MOC4 experiment; equivalent level of safety; airworthiness; compliance verification

Received: 2016-02-13; Revised: 2016-03-01; Accepted: 2016-04-15

\*Corresponding author. Tel. : 18616375772 E-mail: songge@comac.cc