

民用飞机燃油箱固有安全线路设计的研究

Research on Intrinsically Safe Wiring Design for Fuel Tank of Civil Aircraft

上海飞机设计研究院电气系统设计研究部 陈卓 李庆南

[摘要] 针对民用飞机进入燃油箱的固有安全线路进行分析,提出设计思路,并通过试验计算的分析方法验证燃油箱的固有安全线路满足安全性要求。

关键词: 点火源 固有安全线路

[ABSTRACT] To analyze the intrinsically safe wiring into the fuel tank, the design method is put forward and the verification method is put forward to show the satisfaction with safety.

Keywords: Ignition Intrinsically safe wiring

1996年7月,一架具有25年机龄的波音747-100飞机,在从纽约肯尼迪国际机场起飞后发生空中爆炸,导致230人丧生。从美国国家运输安全局(NTSB)的事故调查可知,爆炸的主要原因在于中央翼燃油箱的可燃蒸汽被点燃。

随着民用飞机对安全性的要求不断提高,适航当局逐步认识到燃油箱系统安全性的重要性,同时对飞机燃油箱防爆的问题进行深入调查研究。联邦航空局(FAA)通过对飞机燃油箱爆炸事故的研究总结后发现,引起燃油箱爆炸的原因大多是油箱油面上方空间存在的可燃性蒸汽被电缆失效等点火源点燃,从而引发爆炸^[1]。因此,FAA在此后的第102号修正案中强调要对燃油箱系统(包括其所有部件,如传感器、燃油泵、连接器、电缆等)进行点火源防护,并在咨询通告AC25.981-1C中指出燃油箱可能的点火源以及具体评估和降低燃油箱可燃性的指标和方法^[2-4]。

由于线缆的磨损、腐蚀等均有可能导致电弧、电火花的产生,故对于进入燃油箱线缆的保护以及故障模式就倍受关注。

1 固有安全线路的设计要求

1.1 概述

燃油箱固有安全线路是指所有携带进入或穿过油箱的电能并执行固有安全级别的电缆,该线路具有保护特性,能够阻止超过固有安全水平的能量,同时能阻止或抑制闪电、高强度辐射场(HIRF)等产生过大的瞬态电流或电压。根据此定义,由燃油油量计算机(FQC)、电缆与油箱内传感器组成民用飞机燃油油量指示系统

(FQIS)属于固有安全线路。

FAA于2001年4月发布了FAR25-102号修正案,对§25.981条款进行了修订,增加了对潜在点火源进行安全性评估的要求,具体条款内容如下:§25.981(a)(3)在可能由于燃油或其蒸汽的点燃导致灾难性失效发生的燃油箱或燃油箱系统内的任一点不得有点火源的存在。必须通过以下表明:证实点火源不会由每个失效、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。必须考虑制造偏差、老化、磨损、腐蚀以及可能的损伤的影响^[3]。

AC-25.981咨询通告中明确指出,对于能将瞬态电能引入燃油箱的电子电气系统,认为正常情况下为25mA(均方根RMS)的稳态电流是固有安全的最大设计容限值,失效情况下应限制在50mA(RMS),闪电间接效应所引起的瞬间峰值电流应限制在125mA以内。为了有效控制进入燃油箱的电能,燃油箱固有安全线路的设计要求如下:(1)要求与飞机其他电缆、电路隔离,并屏蔽;(2)具有闪电防护、HIRF防护以及抗电磁干扰(EMI)的能力;(3)安装瞬态抑制装置,阻止电能进入油箱;(4)进入燃油箱内的固有安全线路上不能有死接头;(5)需要考虑维修需求。

燃油箱安全性主要考虑防爆,其核心是避免产生点火源和发生故障。

1.2 固有安全线路电气线路设计

1.2.1 加装保护设备

对于进入燃油箱内的固有安全线路,必须严格控制线路上可能产生的能量,包括正常状态、失效状态下以及因环境引起的瞬态电压或电流,确保在各种情况下线路上的能量都不足以点燃可燃蒸汽。基于此考虑,为了抑制在线路上电弧、电火花以及闪电、HIRF等产生的电瞬态,在靠近油箱外的线路上安装瞬态抑制器来控制进入油箱的瞬态电压、瞬态电流。

1.2.2 隔离

燃油箱的固有安全线路应避免产生影响系统安全的电流,而该电流通常是由闪电、电源系统开关瞬态或者与其他电缆接近产生的电磁干扰而引起。另外,如果固有安全线路存在绝缘层磨损,并与非固有安全线路的

导体接触,可能导致不可预计的电能传导进入油箱,从而在燃油箱内产生点火源。

对于燃油箱的固有安全线路的隔离设计分成2方面:(1)固有安全线路与非供电线路的隔离。国外工业界普遍认为隔离距离应大于1inch(1inch=2.54cm),并保证即使线路中的单个电缆卡箍或支撑失效,临近线路与固有安全线路间隔也不会小于1inch;(2)固有安全线路与供电线路的隔离。国外工业界普遍采用的固有安全线路与邻近供电线路的隔离距离见表1所示。

表1 固有安全线路与邻近供电线路的隔离距离

距离/inch	说明
距离 >6	可不用考虑飞机供电线路对固有安全线路的电弧、着火等物理影响
2 < 距离 < 6	可能会被允许,如果做到:临近线束必须以一定间隔被严格的支撑和绑扎,保证在导线断裂以及卡箍或绑扎失效时,不会接触到固有安全线路。
距离 < 2	必须通过分析和实验证明是可接受的

1.3 固有安全线路屏蔽

燃油箱内的固有安全线路必须考虑由闪电、HIRF、EMI产生的电瞬态的影响,同时还要考虑电缆由于腐

蚀、破损、老化等因素而引起的潜在故障。此外,对于评估固有安全线路由于环境等因素产生电瞬态影响时,燃油箱外的电缆也同样需要考虑其敷设、屏蔽和隔离,因为该类电瞬态可能在油箱外产生并通过电缆、电连接部件耦合到油箱内。值得指出的是由于闪电、HIRF、EMI等环境产生的电瞬态同样可能导致电弧、电火花等点火源,所以对固有安全线路进行闪电、HIRF、EMI的屏蔽防护并进行分析验证。

必须对固有安全线路进行屏蔽防护,同时需要考虑屏蔽防护潜在失效的故障模式。该失效模式通常是由于磨损、腐蚀、老化等因素导致的,所以在设计固有安全线路方面需要考虑对屏蔽状态的监控功能,同时需要对线路维护上提出对应的维修任务要求,从多个方面确保固有安全线路的安全水平。

据此,民用飞机燃油箱系统固有安全线路的屏蔽防护通常采用图1的设计方案。

也就是说,对于燃油箱测量整个线路均采用屏蔽并独立敷设,并且FQC监控经油箱的屏蔽线。此外,FQC的安装应尽可能地接近油箱,同时FQC应具备瞬态抑制功能,这样便可最大限度地避免外部干扰。

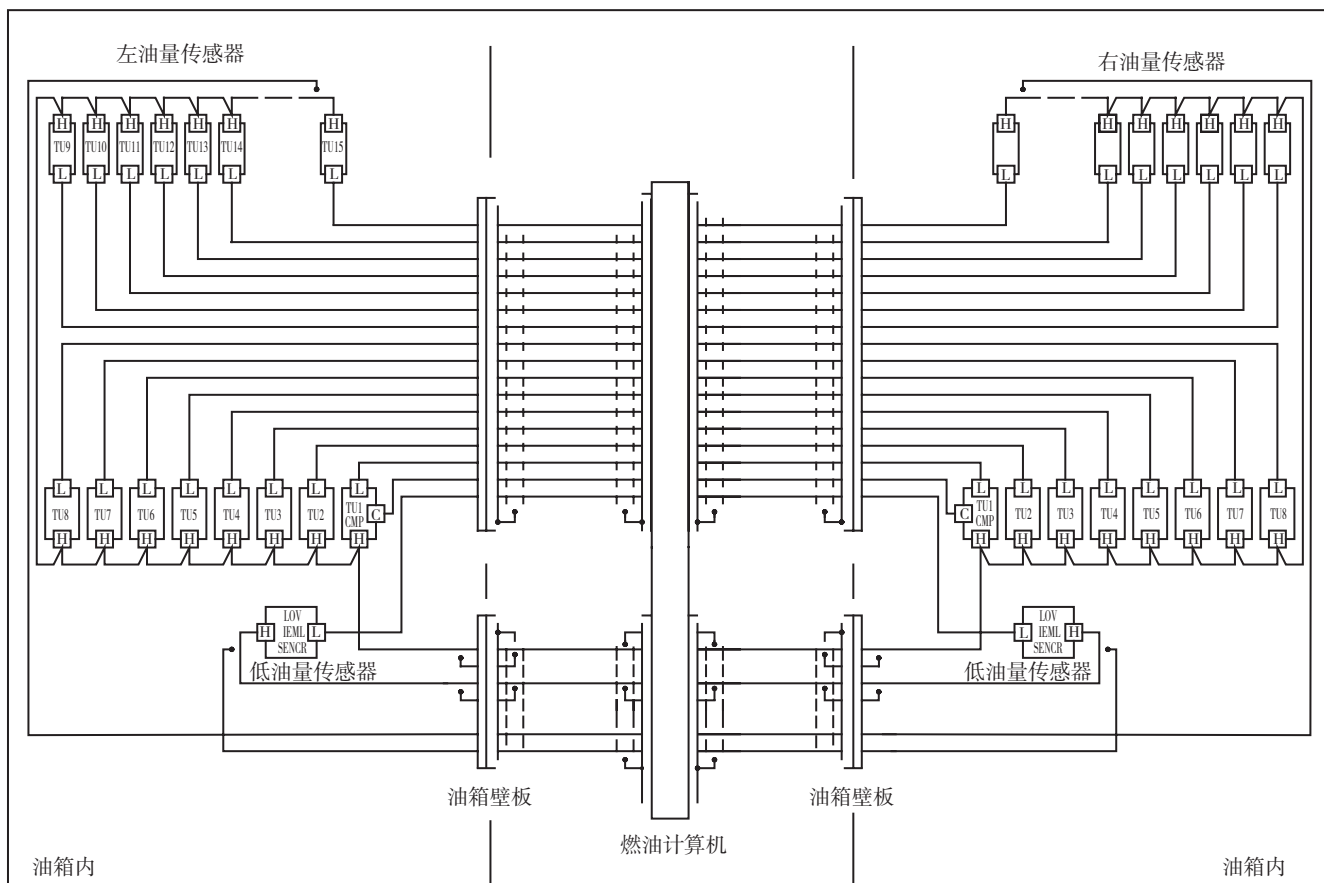


图1 燃油箱系统固有安全线路的屏蔽设计

Fig.1 Shield design of intrinsically safe wiring in fuel tank

2 固有安全线路分析验证

2.1 分析验证基础

由于绝大部分燃油箱固有安全线路安装在油箱内,为了验证 FQIS 线路上电弧、电火花以及闪电、HIRF 等产生的电瞬态影响满足固有安全的限制,需要在试验数据的基础上,对流经燃油量传感器电缆的瞬态电流进行理论计算。

以闪电间接效应为例,探讨燃油箱固有安全线路设计验证方法。

假设民用飞机闪电间接效应的概率为 1,全机闪电间接效应试验是将 FQIS 线路断开(即 FQC 与燃油箱传感器线路断开),通过选取典型的测试点检测 FQC 线路上感应的瞬态电压和电流,即在 FQIS 线路上闪电瞬态电压电流是基于线路无负载的状态下测试纯导线的电流值和 FQC 设备端的电压值,基于闪电间接效应试验的开路电压计算分析带燃油量传感器负载后的瞬间电流。

具体而言,根据 DO160 提到的插针注入式测试方法,检测 FQC 端闪电间接效应的开路电压和短路电流。所谓插针注入试验^[5]是一种借以将所选瞬变(电压、电流)直接施加在瞬变发生器的连接器插针和设备机壳地之间,用于评估设备接口电路电介质耐压和损坏容限。这里,试验注入信号的电平为标准闪电波形电平的 1/100,因此实际闪电环境数据是测试数据的 100 倍。

2.2 计算分析

飞机闪电间接效应试验中燃油量传感器线路图可将燃油传感器电路简化为图 2 所示,为了简化计算做出如下假设:(1)整个飞机为理想导体,且等电势;(2)在闪电频段内,相对于燃油量传感器阻抗来说,设备地与飞机主结构之间的阻抗很小,在进行仿真计算时可将两者视为同一个地。

如图 2 所示,由于 13 孔为燃油量传感器的公共端,5 孔的电压为单个传感器感应燃油量的测量电压,那么试验中所测得开路电压应该大于接上燃油量传感器后的电压,因此在计算中将开路电压作为燃油量传感器的

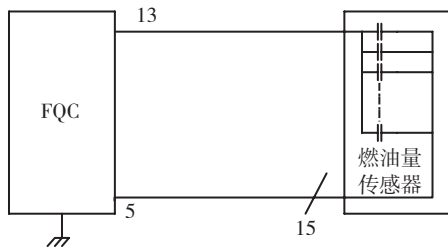


图2 燃油量传感器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of fuel quantity sensor

端口电压进行计算。

按照 DO-160 中给出的插针式测试方法,检测 FQC 电缆的开路电压,根据试验结果可以看出测试数据最大峰值为 20mV,由于模拟瞬态电平是实际闪电瞬态电平的 1/100,经等比例放大后可得在闪电间接效应下燃油量传感器的开路电压为 2V (1 : 100)。燃油量传感器为可变电容器传感器,估算流经传感器电缆上的电流时,可将一个幅值和频率均大于上图曲线的电压函数作为传感器两端的电压。则传感器电缆上的电流可以计算出来。

计算方法如下:

由欧姆定律可知传感器电缆上的电流为:

$$i = \frac{\dot{V}}{X_c} \quad (1)$$

其中,传感器电抗为:

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

公式(1)、(2)中, \dot{V} 为传感器端口间的电压, i 为传感器端电流, ω 为频率, C 为传感器电容值。

整个油箱油量传感器电路是由若干个油量传感器并联组成,所以整个油量传感器线路上的电流应为:

$$\sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \dot{V}/X_{ic} \quad (3)$$

公式(3)中 I_i 为第 i 个传感器上的电流, X_{ic} 为第 i 个传感器电抗。

在估算电流时, \dot{V} 取开路电压, ω 取最高频率,从而得到电流的上限值。

下面对整个油箱传感器上的电流进行估算。闪电电流的能量集中在 20MHz 以内,那么取传感器两端的电压为 2V,频率为 20MHz,假设单个传感器电容最大值 75pF (电容随着频率上升阻抗减小),则根据公式(1)(2),计算所得单个传感器 $I_{i\max}$ 为:

$$I_{i\max} = \frac{2}{1/(20 \times 75)} \times 10^{-6} = 3 \text{ (mA)} \quad (4)$$

根据图 2 所示,根据公式(3)可得 FQC 孔 13 的(假设有 15 路传感器)最大电流 I_{\max} 为:

$$\sum_{i=1}^{15} I_{i\max} = 15 \times 3 = 45 \text{ (mA)} \quad (5)$$

由于计算分析是基于燃油传感器的开路电压,其值(2V)大于在燃油传感器上实际的负载电压,同时考虑电容的频率特性(随频率升高阻抗减小),故 FQIS 线路上闪电间接效应产生的瞬态电流应小于计算分析的电流值 45mA。最后验证 FQIS 线路上闪电间接效应产生的瞬态电流是满足 AC25.981-1C 咨询通告中提到的闪

(下转第 73 页)

规则显示框上面的各种设定选项框来完成规则的建立和修改。

下面是使用该系统进行飞机结构件工艺决策的一般过程:

(1) 输入零件数模,对零件进行特征识别,构造零件的特征模型,得到零件加工特征,并保存相关特征结果;

(2) 启动加工知识编辑器,建立相关规则,或者直接使用模板规则;

(3) 启动自动工艺决策模块,加载零件特征,选择需要添加操作的特征,选择粗精加工之后,进行自动工艺决策;

(4) 计算刀轨,并进行刀轨模拟,确认刀轨正确性。

使用该系统加工如图 10 所示的零件槽特征,生成某槽腔的腹板精加工刀轨如图 11 所示。

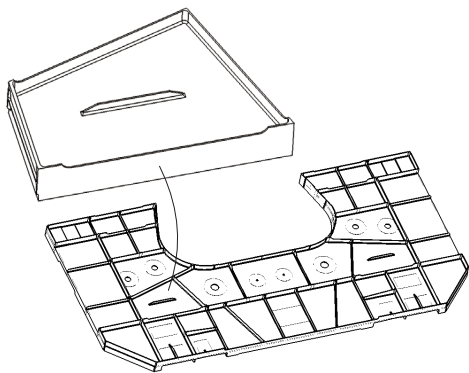


图10 加工零件的槽腔特征
Fig.10 Pocket feature of part

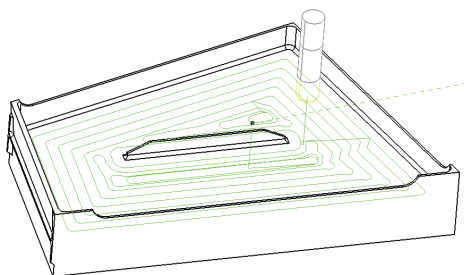


图11 腹板精加工刀轨
Fig.11 Finishing tool path of bottom

4 结束语

本文在分析 NX 系统 MKE 的基础上,针对飞机结构件现阶段工艺决策知识集成、继承和灵活性差等特点,提出了基于特征的飞机结构件加工工艺决策方法与加工工艺知识编辑器构建方法。该方法具有以下优势:

(1) 解决了飞机结构件工艺决策灵活性差、工艺知识继承性差、用户无法集成知识等问题;

(2) 提供了一个具有用户友好界面的加工工艺知识编辑工具;

(3) 有效提高了飞机结构件工艺决策的质量与效率。

参考文献

- [1] 张振明,许建新,贾晓亮,等.现代 CAPP 技术与应用.西安:西北工业大学出版社,2003.
- [2] Li Y G, Ding Y F, Mou W P, et al.Feature recognition technology for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph. Journal of Engineering Manufacture, 2010(224): 271-278.
- [3] 韩雄,汤立民.大型航空结构件数控加工装备与先进加工技术.航空制造技术,2009(1): 44-47.
- [4] 王伟,楚王伟,李迎光,等.面向加工过程的飞机结构件加工特征排序方法.机械科学与技术,2011,29(12): 1638-1645.
- [5] Maropoulos P G, Hinduja S. Intelligent tool selection for rough turning.International Journal of Production Research, 1991,29(6):1185-1024.
- [6] Edalew K O, Abdalla H S, Nash R J. A computer-based intelligent system for automatic toolselection. Materials and Design, 2001(22):337-351.
- [7] Pande S S, Wallvekar M G. A computer-assisted process planning system for prismatic components. Computer-Aided Engineering Journal, 1989(8):133-138.

(责编 亦非)

(上接第 68 页)

电间接效应的 125mA 要求。

3 总结

对于进入燃油箱的固有安全线路的设计需要严格限制瞬态电能能量,所以对燃油箱固有安全线路的保护采取非相似性的设计,即在线路敷设、屏蔽、隔离方面进行保护,同时在线路上设置具有瞬态抑制功能的设备。而瞬态电能是在带负载的条件下产生的,仅仅采用试验的方法是无法验证其是否符合瞬态电能要求的,所以本文在试验的基础上,采用等效建模的分析方法来计算分析固有安全线路是否满足要求。

参考文献

- [1] CFR Parts25, 26, 121 et al. Reduction of Fuel Tank Flammability in Transport Category Airplanes. Final Rule Federal Aviation Administration, 2008-09-19.
- [2] United States. Federal Aviation Administration. Advisory Circular 25.981-1C: Fuel Tank Ignition Source Prevention Guidelines, 2008-09-19.
- [3] 中国民航局. CCAR25: 运输类飞机适航标准,2001-05-14.
- [4] Final Rule: Transport Airplane Fuel Tank System Design Review, Flammability Reduction, and Maintenance and Inspection Requirements. 66 FR 23085, 2001-06-06.
- [5] Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. RTCA/DO-160D, 1997-07-29. Prepared by SC-135.

(责编 亿霖)