

某型飞机整体油箱密封修理工艺研究

Study on Sealing Repair Process of an Aircraft Integral Tank

中航贵州飞机有限责任公司 杨爱清 罗俊 李晓青 关永安

[摘要] 飞机整体油箱的渗漏及密封修理是飞机生产、维护、使用中经常遇到的难题。基于某军用飞机机身整体油箱的渗漏修理,就渗漏的原因、漏源的确定、修补工艺及修补材料进行了深入的研究。通过工艺试验,验证了整体油箱异种胶压力灌封二次粘接喷涂覆盖的综合修补工艺的可行性,为今后完善公司军机油箱修理规范积累了经验素材,同时也可为相关研究提供参考。

关键词: 整体油箱 密封 渗漏 修补 二次粘接

[ABSTRACT] The difficulties in leakage and sealing repair during the production, maintenance and use of aircraft integral tank have been encountered. Based on the analysis of the leakage repairing process for integral tank of a military aircraft, this paper discusses the cause, source detection and repairing material of leakage. Secondary bonding with dissimilar perfusion sealing under pressure and coverage by spray painting for integral tank repairing is proved to be feasible through test, which provides experience for improving the specification of integral tank repairing in Guizhou Aviation Aircraft Corporation Limited and also gives a reference for other corporations or factories.

Keywords: Integral tank Sealing Leakage Repair Secondary bonding

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.112

飞机整体油箱是利用飞机本体结构通过密封施工而形成的油密腔体。在先进飞机设计中,由于重量和外形的限制,燃油箱的设计力求充分利用有限的结构空间,付出较小的重量代价,最大限度增加有效载油量,从而达到减轻飞机结构重量,提高飞机续航能力的目的。

国外很多先进机种采用了整体油箱密封技术,我国的某些机种也很早就采用了机翼整体油箱结构,然而,机身整体油箱结构研究却起步较晚,只是近些年才开始在某些无人机及某有人机上应用。

本公司首次在某型有人机上尝试机身整体油箱。该型飞机在研制生产及交付过程中没有发现整体油箱渗漏,但在飞机试验试飞后,多架/次飞机出现不同程

度的燃油渗漏故障,渗漏最多的部位为油箱前壁板的14框下沿,最严重渗漏部位在加压0.02MPa下渗漏呈间断滴落状态。经过多次密封修理后,故障依旧重复出现,严重干扰生产和试验试飞工作。

经过对渗漏原因的详细分析,借助先进渗漏检测仪器及方法,确定漏源,并设计了一系列试验,通过对不同粘接底涂、不同密封剂以及不同表面状况的正交试验,选取了最快捷、有效的密封修理工艺,最终实现了该型飞机机身整体油箱的密封修理,成功摸索出一套整体油箱渗漏修理的工艺技术,保证了飞机的飞行安全及交付使用。

1 整体油箱漏油原因分析

由于整体油箱设计制造在本公司有人机上首次采用,技术经验缺乏,保障条件不足,事故发生在所难免。

首先,该整体油箱是在既有飞机平台的软油箱基础上更改设计的,不是采用专门的整体油箱设计理念,部分结构不能完全满足整体油箱的设计规范,零件和结构不适合密封铆接,许多部位无法可视施工,结构复杂,空间狭小,封闭区过多等,再加上公司生产线工艺装备以及环境控制方面的缺失,导致整体油箱密封铆接过程质量出现波动。

其次,具体到该型第XXX架飞机,在经历了近70个起落后出现渗漏,最大的可能是在起飞、着陆中,由于该型飞机为特殊用途飞机,降落过程较其他教练机过载大,飞机着陆的巨大冲击导致部分结构变形,超出密封剂断裂伸长率,造成局部缝内/缝外密封的失效而渗漏。

最后,工艺过程控制不严产生假性缝内/缝外密封,致使整体油箱承受频繁起降引起的大应变时密封失效而渗漏。

2 渗漏分级及处置

整体油箱渗漏位置不同,对飞机安全性的影响程度差异巨大,同样的渗漏等级由于出现的位置不同,对处理的要求也不一样。所以,应根据飞机油箱的渗漏类型和渗漏位置,以及现场具体情况等分析,来确定修理状态和修理要求。修理要求一般有以下两种处置:不处理,

只做定期检查和记录,只要渗漏不扩展,允许渗漏继续存在;另一种是立即处理,必须修理到无渗漏状态。

表1是国内军机目前较为通用的渗漏等级划分和处理要求。

表1 渗漏等级划分和处理要求

渗漏等级	渗漏标准(6min内燃油显湿最大直径R/mm)	渗漏部位及处理要求		
		I区	II区	III区
轻微渗漏	$R \leq 8$	不修理	不修理	不修理
一般渗漏	$8 < R \leq 25$	不修理(<2处)	立即修理(<2处)	立即修理
严重渗漏	$25 < R \leq 200$	立即修理	立即修理	立即修理
流出渗漏	$R > 200$	立即修理	立即修理	立即修理

整体油箱渗漏位置不同,对飞机安全性的影响程度也不同。渗漏位置一般分为3种,具体是外部渗漏位置(I区)、内部通风的渗漏位置(II区)和内部不通风的渗漏位置(III区)。前两者因为暴露在空气中,通风良好,燃油渗漏后能很快蒸发,不会积聚,因而不会对飞机安全造成很大影响,例如某型飞机整体油箱上表面;对内部不通风的渗漏位置,燃油渗漏后不易挥发,积聚起来就有潜在危险,对于接近发动机热区的部位,燃油渗漏还易引起燃烧,对安全危害更大,例如某型飞机整体油箱中央翼对接螺栓槽内的渗漏。

该型飞机整体油箱设计选用的框、板材料为2024、LY12铝合金,密封材料为XM22密封剂,其中XM22A用于贴合面密封,XM22B用于填角密封和表面密封等^[1]。该型飞机整体油箱位于飞机中机身机段,油箱上部为进气道下壁板,油箱下部为机腹内系统管道区域,油箱前壁板为第14承力框,渗漏区域为封闭区,渗漏燃油无法挥发。

根据渗漏等级及位置划分,所出现的渗漏属于III区严重渗漏故障,必须立即进行密封修理达到完全无渗漏状态。

3 修理方案

作为飞机整体油箱修理程序,首先必须按照渗漏分级确定是否修补,其次确定外部漏点和内部漏源,然后制定修补方案,最后实施修补。

根据前述分级规则,该类渗漏属于严重的必须修补的等级,剩下的工作是确定漏源和制定修补方案^[2]。

3.1 漏点检查

外部漏点的查找较为容易,采用传统的目视检查、白垩粉和肥皂水就能确定外部渗漏点或区域。部分情况下内部漏源和外部漏点是直观对应的,但是,由于整

体油箱结构复杂,许多情况下是不对应的。在压力下,燃油通过夹层、缝隙和内部结构长距离渗漏至外部漏点。对于后一种情况,修理成功率就很低,修理难度很大,必须采用先进的检漏仪器。

在渗漏检测中,目前最先进的设备为氦质谱检漏仪,由于该飞机整体油箱已经盛装过航油,氦质谱检漏仪效果不理想,为此,在与设备厂商探讨后,采用了氢检漏仪。

检测时,排空油箱,停放并用冷风吹干航油,然后在外部漏点处制作一个密闭罩,往罩内充氦氮混合气(氦含量5%)。氢原子渗透性极强,理论上任何缝隙、气孔都可以通过,在油箱内部用仪器配带的高灵敏吸枪寻找漏源。内部漏源确认后,修补区域也就确定了。

实际检测中,仪器精度很高,最高可以达到 5×10^{-10} (Pa·L)/s。为克服空气中氢本底干扰以及仪器实际检测灵敏度范围确定等问题,进行了大量的模拟试验。航空煤油渗漏临界点为 5×10^{-5} (Pa·L)/s,在本底干扰影响最小的情况下,最后确定采用 5×10^{-6} (Pa·L)/s的设备灵敏度。

现场经过多次反复的实际检测,无论从内向外还是由外向内采用喷氢吸枪检测,确定了最大可疑的内部漏点。然后用内窥镜对可疑部位仔细观察,最终确定了内部漏点和修补区域。

3.2 修补工艺试验

针对该型机的机身整体油箱的燃油渗漏故障进行了多次修理,在第四次修补失败后,根据具体情况,设计了一系列的关联试验方案,以提高工作质量和实物质量。

飞机使用的是XM22密封胶,但是,现场温度、湿度以及仰面施工等因素,迫使采用施工性更好、低温固化指标高、触变性好的异种密封剂来修补。针对不同密封剂、不同处理表面状况、不同粘接底涂以及不同施工方法进行了一系列的试验研究。

研究密封剂表面二次刮涂时,密封剂表面状态(密封剂表面浸煤油与不浸煤油、涂敷粘接底涂与不涂粘接底涂、擦洗与不擦洗及冷风吹等表面处理方法、涂敷QS-7粘接底涂与涂敷NJD-2粘接底涂)对粘接强度与密封效果的影响,测定的“T”形剥离试片的剥离强度数据见表2。

由表2数据可看出,对二次粘接而言,浸泡过3号航空煤油的密封剂破坏型面经航空洗涤汽油清洗2遍+丙酮清洗3遍或冷风吹的表面处理后,经涂刷QS-7粘接底涂或NJD-2粘接底涂后刮涂XM22B室温硫化聚硫密封剂,其硫化后“T”形剥离强度 $\geq 7.3\text{kN/m}$,且破坏形貌均为内聚破坏。该工艺方案完全满足修复使用

表2 不同表面处理的“T”形剥离强度

试片种类	是否浸泡 3 号航空煤油	XM22B 密封胶表面处理方法	破坏形貌	“T”形剥离强度 / (kN·m ⁻¹)
不涂粘接底涂	不浸泡	不清洗	内聚破坏	8.1
	浸泡	汽油清洗 2 遍 + 丙酮清洗 3 遍	以内聚破坏为主,并伴随局部界面破坏	5.9
涂 NJD-2 粘接底涂	不浸泡	不清洗	内聚破坏	6.3
	浸泡	汽油清洗 2 遍 + 丙酮清洗 3 遍	内聚破坏	7.3
	浸泡	用冷风吹 0.3~0.5h	内聚破坏	7.9
涂 QS-7 粘接底涂	不浸泡	不清洗	以内聚破坏为主,并伴随局部界面破坏	4.9
	浸泡	用汽油清洗 2 遍 + 丙酮清洗 3 遍	内聚破坏	7.5
	浸泡	用冷风吹 0.3~0.5h	内聚破坏	7.9

注: (1) 浸泡 3 号航空煤油是指进行过“T”形剥离强度的试片经校直后作为试片浸入 3 号航空煤油中,浸泡 2h 后,取出进行二次粘接试验,不浸泡 3 号航空煤油是指进行过“T”形剥离强度的试片经校直后直接进行二次粘接试验;

(2) 不浸泡 3 号航空煤油的试片密封胶表面处理方法为: 不清洗密封胶破坏型面的表面,直接刮涂 XM22B 密封胶,停放 7 天(环境温度仅为 10℃)之后,进行(70 ± 5)℃加速硫化处理 24h;

(3) 浸泡的 3 号航空煤油的试片表面处理方法为两种:

- 采用滤纸将密封胶破坏型面上的 3 号航空煤油吸附、擦洗干净,然后用航空洗涤汽油清洗密封胶破坏型面两遍,每遍晾置 15~20min,然后用丙酮清洗 3 遍,每遍晾置 15~20min,备用;在清洗好的密封胶破坏型面上涂刷 QS-7 粘接底涂(晾置 10~20min)或 NJD-2 粘接底涂(晾置 15~20min),然后刮涂混炼好的 XM22B 密封胶,停放 7 天(环境温度仅为 10℃)之后,进行(70 ± 5)℃加速硫化处理 24h;

- 采用滤纸将密封胶破坏型面上的 3 号航空煤油吸附、擦洗干净,然后用电吹风的冷风对其表面吹风 0.3~0.5h,而后涂刷 QS-7 粘接底涂(晾置 10~20min)或 NJD-2 粘接底涂(晾置 15~20min),然后刮涂混炼好的 XM22B 密封胶,停放 7 天(环境温度仅为 10℃)之后,进行(70 ± 5)℃加速硫化处理 24h;

(4) 试验用 XM22B 密封胶的活性期为 2.8h;

(5) “T”形剥离强度的测试按 HB 5248-93《室温硫化密封胶“T”形剥离强度试验方法》进行。

要求。

为研究密封胶表面二次粘接时, XM22 室温硫化聚硫密封胶和 HM111 改性聚硫密封胶之间配套使用的可行性,设计了 3 组对照试验(表 3)。第一组: 先在试片上刮涂一层厚度约为 1.5mm 的 XM22 密封胶,分别室温停放 24h 和 48h 后,刮涂 HM111 A-2 密封胶,经室温停放、硫化后测定其“T”形剥离试片的剥离强度;第二组: 先在试片上刮涂一层厚度约为 1.5mm 的 XM22 密封胶,分别室温停放 24h 和 48h,涂 QS-7 粘接底涂后,刮涂 HM111 A-2 密封胶,经室温停放、硫化后测定其“T”形剥离试片的剥离强度;第三组: 先在试片上刮涂一层厚度约为 1.5mm 的 XM22 密封胶,分别室温停放 24h 和 48h,涂 NJD-2 粘接底涂后,刮涂 HM111 A-2 密封胶,经室温停放、硫化后测定其“T”形剥离试片的剥离强度。

由表 3 可以看出,在已硫化的 XM22B 室温硫化聚硫密封胶表面刮涂 HM111 A-2 改性聚硫密封胶,硫化处理后进行“T”形剥离强度测试,其试片破坏形貌均为内聚破坏,未有两种密封胶界面破坏现象。该工艺方案在一定条件下也满足修复使用要求。

为了考察稀释密封胶的喷涂情况,进行了 XM22B 和 HM111 A-2 两种聚硫密封胶的喷涂试验。首先,按

密封胶的配制比例分别将两种密封胶配制好,用丙酮和乙酸乙酯(质量比 1:1)的混合溶剂将密封胶稀释 50%,搅拌均匀后静置 10min,用涂-1 粘度计测其流出时间为 10~15s,备用;然后用喷枪将准备好的密封胶分

表3 XM22B与HM111 A-2的“T”形剥离强度

停放时间	表面涂敷粘接底涂情况	破坏形貌	“T”形剥离强度 / (kN·m ⁻¹)	密封胶表面邵氏硬度
室温停放 24h	不涂粘接底涂	内聚破坏	4.5	21
	涂 QS-7 粘接底涂	内聚破坏	3.9	21
	涂 NJD-2 粘接底涂	内聚破坏	4.3	21
室温停放 48h	不涂粘接底涂	内聚破坏	5.4	31
	涂 QS-7 粘接底涂	内聚破坏	3.7	31
	涂 NJD-2 粘接底涂	内聚破坏	3.2	31

注:(1) 试验步骤: 用丙酮清洗阳极化铝合金试片 3 遍,每遍晾置 15min,然后在试片上刮涂厚度约为 1.5mm 的 XM22B 密封胶,分别室温停放 24h 和 48h,而后涂刷 QS-7 粘接底涂(晾置 10~20min)或 NJD-2 粘接底涂(晾置 15~20min),之后刮涂混炼好的 HM111 A-2 密封胶,室温停放 24h 后,进行(70 ± 5)℃加速硫化处理 24h;(2) “T”形剥离强度的测试按 HB 5248-93《室温硫化密封胶“T”形剥离强度试验方法》进行。

别喷涂于试件(试件为盒形件,数量2件,用XM22密封剂进行贴合面密封、填角密封及表面密封后,在密封面上人为制造3~4个分散的漏点)表面,室温硫化后,将试件注入航空煤油浸泡一个月;最后观察发现,试件表面喷涂的密封剂外表面均非常平整,喷涂的密封剂已将漏点处流平封堵,不再渗漏。试验结果表明,采用稀释密封剂喷涂工艺对漏源区域进行喷涂覆盖施工,可实现对残留空隙、气孔等的再次封堵,完全能满足整体油箱的修复要求。

4 修补方案制定

经过分析修补工艺试验结果,采取了如下的修补方案:异种密封剂压力灌封外加稀胶喷涂覆盖。

经氢检漏仪确定内部漏点范围,为避免挖补带来的密封层撕裂,不采用大规模的挖补,保留旧胶层,仅在小范围内对影响二次胶接的旧密封剂进行谨慎的切除。

为避免仰角施工后密封剂下泻、流淌,采用压力灌封方式进行密封修补。用硬质聚氨酯泡沫塑料制作一个需修补部位的内形模具,等比缩小,预留灌封密封剂的空间。对内形模具表面进行脱模处理,后部设置一个加压顶杆。

按正常程序采用汽油、丙酮清洗后,涂刷NJD-2粘接底涂。配制适量的HM111密封剂,固化剂取上限。用刮胶板在待修补部位刮涂一遍,刮涂厚度加大,然后将内形模具顶入油箱内部,固定加压顶杆并施加压力,使内形模具紧密挤压油箱,将密封剂挤压填补空隙并使多余的密封剂挤出。修补的密封剂硫化后取出工艺内形模具,仔细切除余胶,按正常程序清洗表面后,采用稀释过的HM111进行喷涂覆盖施工。

修补后,采用氢检漏仪检测无渗漏;航空煤油加压试验完全无渗漏。该批次飞机整体油箱类似部位渗漏经过上述修理后,已交付部队飞行了一年多,至今未出现渗漏问题。

5 分析与讨论

在航天领域,由于其产品的特殊性,很早就已开展先进渗漏技术运用,渗漏检测技术及其规范、标准都已经具备一定的雏形,渗漏检测多年前已经纳入无损检测范围,操作人员需要经过培训并考取渗漏检测的一、二、三级资格证。在航空方面,对整体油箱的密封检验,大部分生产单位还是通过传统的气密试验和油密试验,仅有少数单位在某型飞机的整体油箱密封检漏中使用了氮质谱检漏仪和差压法检漏装置,其整体油箱质量控制,已经不仅仅是靠最终的气密试验和油密试验,在工序中进行密封质量控制,对小部件的密封性进行氦检,

使得其飞机整体油箱的一次交检合格率从过去的50%左右,提高到目前的95%以上。

飞机整体油箱渗漏是一个世界性的难题,对已经交付使用的飞机整体油箱,其渗漏检测及修补更是困难重重。对该型机机身整体油箱的渗漏修理过程中也积累了宝贵的经验,同时,其配套的工艺试验也为以后的修理工作提供了强有力的数据支持。

首先是漏源的确定。传统的检漏方法是气密试验和油密试验等,如漏源比较大时可用充气、刷肥皂水的方法检测渗漏点。对使用中的整体油箱,发现外部渗漏后,一般是通过观测及结构连接关系分析,确定内部疑似漏源。实践证明,此法由于无法对内部漏源精确定位,尤其对内部结构复杂的有人机机身整体油箱,仅针对疑似漏源处进行修补,不仅会将某些实际漏源漏掉,不能保证一次修复完成所有的漏源,达到完全密封无渗漏的修复效果,还会造成修复工作的反复进行,延长整体油箱的修复周期。此时,使用必要的检测仪器和可行的检漏方法至关重要。

其次,合理的修复方案。合理选择修复材料,确定一套可行的修复工艺方案,也是整体油箱是否能成功修复的关键点。现阶段,整体油箱密封材料一般选用室温硫化聚硫或改性聚硫密封剂。由于担心残留的航空煤油对密封剂结合力的影响会造成新旧胶层的界面破坏,使得修补失败,本文设计了一系列相关试验。试验结果表明,只要按照施工工艺的要求,对待胶接部位的残留煤油进行充分的清洗,各种密封剂的胶接效果完全可以满足要求。即使是旧的密封胶层无法彻底清除,只要清理、清洗到位,直接涂覆修理也能满足使用要求;如果是未污染的新胶层,短时间内甚至无须涂抹偶联剂。在修补前,根据修补部位,合理选择修补用密封剂。选用密封剂的工艺性能要满足施工需求。对于平面施工,可选用流淌性好(非触变型)的密封剂或稀释后的密封剂,合理调整活性期,保证密封剂对结构的细小缝隙、沟槽等部位充分浸润和流平后达到密封修理的效果。对于仰面及立面施工,要注意选择流淌性小(触变型)的密封剂,以防止因密封剂自身的重力或流淌性造成密封剂的流失,影响密封效果。XM22A、XM22B、XM22C、HM111等密封剂,其基胶都是聚硫橡胶类高分子材料,根据相似相溶理论,它们之间可以相互胶接,试验结果也证实了这一理论的正确性。它们之间交叉涂覆,只要遵照合理的施工工艺操作,胶结力和密封性可以满足修补需要。QS-7、NJD-2粘接底涂与XM22、HM111等密封剂之间的配套试验结果表明,对与XM22配套的粘接底涂QS-7及与HM111配套的粘接底涂NJD-2,进行修补的二次粘接时,差别不大,紧急情况下都可以使用。

最后,慎用挖补。只要原胶层未失效,为避免出现新漏点,尽量不采用大面积清除旧胶的方式。由于挖补不允许使用金属刀具,无法切除旧胶层,反而会因施工环境狭小、视线不佳以及工人疲惫而出现大面积胶层被扯离的现象,带来更大渗漏隐患。

6 结论

在飞机油箱渗漏修理中,最关键的问题是内部漏源的确和修理方案的制定。

首先,从试验、修理实践情况可以看出,应该大力提倡先进的氦/氢质谱检漏仪在航空部装、总装、维修等领域的运用,只要使用合理,该仪器对确定封闭区域内部/外部漏点是非常可靠的。

其次,异种聚硫密封剂配套使用的效果是良好的,相互胶接后的“T”形剥离试片破坏形貌均为内聚破坏,完全满足修复使用要求。

再次,压力灌封对于内部复杂漏源的修补效果理想。

最后,稀释后的密封剂可以采取喷涂覆盖施工,对修补最后的残留空隙、气孔等可实现再次封堵,提高修补可靠性。同时,喷涂密封剂理化指标合格。

参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第8卷). 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 代永朝, 董玉祥. 飞机整体油箱渗漏的粘接修理. 粘接, 2003, 24(2): 34-35.

(责编 李丹)

(上接第 108 页)

国家级科技中介、省级科技中介以及市级、地方性科技中介,并注重科技中介的能力建设,同时加强科技中介的人才队伍建设,为科技中介的市场发展创造良好的环境。另外可设立会员制的科技中介,这种形式的科技中介是由多数大企业组成的行业协会,每年与科研单位举行科技研讨会、交流会、科研单位与企业见面会等。科技中介的参与可降低科研单位的延伸成本和转化风险,加快科技成果产业化和科研单位的价值链延伸。

(5) 提供科研单位价值链延伸的催化剂。

在价值链延伸过程中,科研与中试的每一环节都需要资金投入,并且投资规模越往后越大,资金是价值链延伸的催化剂。政府用于科学成果及技术改造的经费,应当有一定比例用于科技成果转化。为了降低科研单位的资金压力,政府应对价值链延伸活动实施税收优惠政策,并鼓励科研单位的科技成果与金融机构资金、企业资金、风险投资、民间基金和私人资本相互联系,解决价值链延伸过程中资金不足的问题,加速高风险、高收

益科技成果的转化。

由以上分析可以看出科研单位延伸价值链不仅仅取决于科研单位自身的资源和转化意识,而且还需要企业创新的管理意识和对科技的需求、科技中介的牵线搭桥以及政策的引导和资金投入。科研单位价值链的延伸能更好地解决科技与经济的问题,促进经济和社会更好地发展。

参考文献

- [1] 徐冠华. 我国科技中介机构存在五大问题. 中国改革报, 2003(23): 31-32.
- [2] 陆海霞. 对我国科技成果产业化的思考. 科学管理文摘, 2005(3): 17-19.
- [3] 唐五湘, 黄伟. 科技成果转化的理论与实践. 北京: 方志出版社, 2004.
- [4] 黄俏. 科研单位科技成果转化的制约因素及对策建议. 玻璃, 2012(3): 45-47.
- [5] 蒋同明. 企业与高校或科研单位合作创新模式研究. 企业活力, 2010(6): 43-46.

(责编 李丹)

(上接第 111 页)

离为 1.5mm 时达到最小值,金属屏蔽层厚度为 3mm 左右时感应电压达到一个比较平稳的数值,当两个回路平行或者垂直敷设的时候,感应电压最小。研究的结果对相关类型直升机机载数据电缆的合理布线以及提高其电磁兼容性能具有一定指导意义。

参考文献

- [1] NIGEL J C. The past present and future challenges of aircraft EMC. IEEE Trans on EMC, 2003: 1-4.
- [2] 杨彦滨, 曲海波, 王铁军. 直9直升机发展设想. 第十九届全国直升机年会, 2003: 2-6.
- [3] 张寅, 叶志锋, 徐建国, 等. 电子控制器 PCB 板电磁兼容性仿真与试验研究. 航天控制, 2012, 30(1): 49-53.
- [4] 苏东林, 雷军, 王冰切. 系统电磁兼容技术综述与展望. 宇航计测技术, 2007, 9(6): 35-38.
- [5] 赵刚, 李国成. 舰船电磁兼容设计与仿真发展对策研究. 舰船电子工程, 2007, 4(22): 42-46.
- [6] 王九兴, 周清根. 某箭载综合放大器电磁兼容 (EMC) 设计. 航天控制, 2007, 25(2): 82-86.
- [7] 赵剑飞. 总线电缆传输电磁耦合仿真及分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 25-30.
- [8] 董志艳. 漏泄电缆空间场分布特性研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007: 33-34.
- [9] 陈国凡. 电子设备互连电缆的电磁耦合数值结果分析. 安全与电磁兼容, 2008(1): 79-80.
- [10] 唐良宝. 电子设备屏蔽腔体电磁耦合的预测分析. 光学技术, 2005, 31(9): 395-397.
- [11] 钱照明, 程肇基. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2000: 63-69.

(责编 宁军)