

民用飞机最小风险炸弹位置适航 符合性验证方法研究

Verification Method Investigation of Airworthiness Compliance for Civil Aircraft Least Risk Bomb Location Design

陆 鹏 郭忠宝 杨 超 / LU Peng GUO Zhongbao YANG Chao

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

民用飞机最小风险炸弹位置(LRBL)是航空运营面对炸弹爆炸恐怖袭击的最后一道安全屏障,对民用飞机的安全性有重要意义。针对国内民用飞机 LRBL 工作缺乏适航符合性验证方法研究的现状,以 AC25.795-6 为指导,以满足 FAR 25.795(c)(1)中有关 LRBL 的适航要求为目标,首次对 LRBL 的适航符合性验证方法进行研究;通过该工作,一方面明确了 LRBL 周围设备的系统安全性适航符合性验证方法,增强 LRBL 相关系统安全性分析工作在型号设计中的可操作性;另一方面,通过开展爆炸物在 LRBL 发生爆炸对飞机结构的安全性影响分析,得出了 LRBL 周围结构设计的适航符合性验证方法。该研究建立了面向 FAR25.795(c)(1)的 LRBL 适航符合性验证体系,为提高产品的安全性和适航性提供了更为详实、可操作的设计方法。

关键词:民用飞机;最小风险炸弹位置;安全性;25.795(c)(1)

中图分类号:V221+.91

文献标识码:A

[**Abstract**] The least risk bomb location (LRBL) is the last protective screen for civil aviation safety when meeting the terrorism surprise attack with bomb. LRBL has important meaning for the safety of civil aircraft. For the current situation of civil aircraft LRBL work, there is less of detailed and clear design ways in our country. According to the suggestions from AC25.795-6 and engineering design experience, the verification method of FAR 25.795(c)(1) compliance about LRBL is investigated systematically for the first time. On the one hand, through the developing of the LRBL airworthiness compliance work, we can make clear the equipment arrangement ways around the LRBL and corresponding safety analysis ways, which can strengthen the operational method of system safety analysis work. On the other hand, through the developing of aircraft structure safety analysis due to the explosive at LRBL, we can get the airworthiness compliance verification method about structure design around LRBL. This research builds verification system for compliance of FAR25.795(c)(1) about LRBL, and offers detailed and operational design ways for improving the product safety and airworthiness.

[**Keywords**] civil aircraft; least risk bomb location(LRBL); safety; 25.795(c)(1)

0 引言

飞行过程中发生爆炸物爆炸的情况,对航空安

全的伤害是巨大的,1988 年的洛克比空难,该事故导致 270 名乘客和机组人员遇难,因此给航空经济造成的间接损失远大于此,在此后的数年间航空产

业持续低迷。近年来,尽管机场安检工作更为严格,检测方法更为先进,可以检测并消除掉绝大多数的爆炸物安全隐患,但是仍有漏网之鱼可以将爆炸物带上飞机。2009年12月25日,一名尼日利亚青年携带爆炸物成功登上了达美航空公司航班,在降落前20分钟试图引燃爆炸物但没有成功。世界各国的航空管理机构、科研院所、飞机制造商等在过去的几十年中,积极探索了减小飞行过程中爆炸物爆炸对航空安全影响的方法^[1-8],爆炸物对飞机的破坏作用主要来自于炸药爆炸后产生的高速高压的空气冲击波,特别是在密闭机舱内发生爆炸,由于密闭空间的限制造成冲击波的叠加效应,将会使得冲击波超压峰值成倍增加,对民用航空安全的威胁极大^[9-10]。

特别是2001年9月11日,美国遭遇了把劫持的飞机作为武器的恐怖袭击之后,更是证明了改善飞机安保系统的紧迫性和必要性。2002年1月,美国联邦航空局发布了FAR 25-106修正案《运输类飞机驾驶舱设计的安全考虑》^[11],增加了新的§ 25.795“安保事项”,其(a)款提出了对“驾驶舱的保护”的规定。之后针对§ 25.795“安保事项”的内容经各方反复讨论和研究,于2008年11月,美国联邦航空局在FAR 25-127修正案《运输类飞机设计和运行中的安保考虑》中增加了更多针对民用飞机安保工作的适航要求,并将这些要求反映在修改后的§ 25.795“安保事项”^[12]中,该修正案颁布的一系列有关民用飞机安保措施设计要求包括:系统存活性,货舱火情抑制系统,驾驶舱和客舱的烟雾防护,最小风险炸弹位置(Least Risk Bomb Location,以下简称LRBL)设计,驾驶舱抵御轻型武器火力或弹片穿透的保护,探测武器、炸药或其他可疑物品藏匿和便于搜查的内设特征设计。其中关于最小风险炸弹位置工作,要求对于合格审定客座量超过60人或者最大起飞总重量超过100 000lb(45 359kg)的飞机,必须满足该修正案的要求,包括必须设定LRBL。同时,发布了针对LRBL的AC25.795-6 < Least Risk Bomb Location >^[13],通过§ 25.795条款在民用飞机设计工作中的实施,将可以把飞行过程中发生爆炸或爆燃事件对飞机和乘员的伤害降到最低,极大提升航空运营的安全性。同时,国内民航局针对航空飞行中包括发现爆炸物等一些危害飞行安全的意外情况,也提出了相关的适航要求,

例如在CCAR121部121.422条:机组成员的保安训练^[14],以及CCAR332部第二十三条有关机上发现炸弹的处置方法要求^[15],都要求民用飞机必须提供机上发现爆炸物的应对程序和方法,民用客运飞机需通过此类条款的适航审查,方能正式投入航线运营。

在民用飞机中设计最小风险炸弹位置是十分必要的,通过最小风险炸弹位置的设计工作,可以使得爆炸物在此位置爆炸对飞机和乘员的伤害降到最小,最大程度保障民用飞机运营安全^[9]。但是目前国内针对LRBL的适航符合性工作研究,特别是在产品研制中针对适航要求进行符合性验证的设计流程方法,还处于空白状态,对于民用飞机研制、适航取证和安全性保障都是一大障碍,在本文中利用AC25.795-6中关于LRBL的工作建议,结合工程经验,提出了适合我国民机研制特点、面向§ 25.795(c)(1)的LRBL适航符合性验证方法,对于民机的适航符合性验证、系统设计都有一定的促进作用。

1 LRBL 适航符合性验证内容

在FAR 25.795(c)(1)条中对LRBL提出了明确的设计要求:对于合格审定客座量超过60人或者最大起飞总重量超过100 000lb(45 359kg)的飞机必须设计有LRBL,一架飞机必须设计有设定位置,炸弹或者其他爆炸装置可以移动到此位置,在爆炸中可以最大程度地保护飞行关键结构和系统免受伤害。由于该条款是在FAR 25-127修正案中正式发布,因此针对型号取证包含FAR 25-127修正案的民用飞机,必须要满足此条款的要求,而型号取证工作不包含FAR 25-127修正案的民用飞机则不需要开展LRBL设计工作。

该条款的适航符合性验证工作主要包含了五方面的内容:

1)对于合格审定客座量超过60人或者最大起飞总重量超过100 000lb(45 359kg)的飞机必须设计有LRBL;

2)LRBL在进行设计之前要先进行设定工作;

3)LRBL的可达性要有保证;

4)LRBL的设计应当使得一旦在LRBL处发生爆炸后可以最大限度保护飞行关键结构免遭损坏;

5)LRBL 的设计应当使得一旦在 LRBL 处发生爆炸后可以最大限度保护飞行关键系统免遭损坏。

2 LRBL 适航符合性验证方法

该条款的适航符合性验证工作,既包括了 LRBL 的应用范围、选择和选定,也包括了 LRBL 的结构设计和系统设计。在飞机的适航取证过程中,可以将 LRBL 工作归类于共因分析^[1,16-20]中的爆炸物特定风险分析项目,下面对上述五方面的适航符合性验证方法分别进行研究。

2.1 对于合格审定客座量超过 60 人或者最大起飞总重量超过 100 000lb (45 359kg) 的飞机必须设计有 LRBL

该要求涵盖了绝大多数的支线客机和全部的干线客机,对于民用客机来说,只要客座量超过 60 人或者最大起飞总重量超过 100 000lb (45 359kg),并且其适航取证内容包含了 FAR 25-127 修正案《运输类飞机设计和运行中的安保考虑》,那么该类型号的民用客机就必须进行 LRBL 的适航符合性验证工作。

2.2 LRBL 在进行设计之前要先进行设定工作

LRBL 既需要设定也需要经过特殊设计,这两者之间是相辅相成,互相借鉴完成的,设定一个合适的 LRBL 会对后续的设计工作起到事半功倍的效果,而在设定 LRBL 的过程中,要考虑如何有利于后续的设计工作。

首先需要设定一个合适的 LRBL,综合评估 LRBL 对机体结构、强度、系统和乘员的安全性影响。在实施过程中要评估以下几个方面的影响:

1)在设定 LRBL 时,要使得 LRBL 具有足够的可用空间,以便放置操作程序要求的衰减材料。

因为发生爆炸后,要尽量使得爆炸的冲击波压力作用在 LRBL 爆裂区域,因此设计足够的空间,可以在 LRBL 区域放置足够的衰减材料并压实,使得爆炸后的冲击力大部分作用在 LRBL 爆裂区域,并使得该区域蒙皮爆裂,达到释放冲击波和舱内压力的目的。

2)在设定 LRBL 时,应使得疑似爆炸物在 LRBL 处可以放置在离机身蒙皮尽可能近的地方。

通过该考虑,使得爆炸物在 LRBL 处爆炸时,尽可能地将蒙皮破坏达到泄压效果,并且 LRBL 在贴

近机身蒙皮位置,可以使得爆炸物的冲击破坏能量尽可能少地作用在客舱内部。

3)在设定 LRBL 时,要考虑在 LRBL 发生爆炸后,结构损失造成的影响。

在设计时应考虑该位置结构损失后对飞机整体结构、强度性能的影响,是否会造成飞机解体等灾难性事故发生,因此,LRBL 不能设定在关键结构位置,比如龙骨梁等位置。

4)在设定 LRBL 时,要考虑在 LRBL 发生爆炸后碎片进入发动机的可能。

由于爆炸后可能造成 LRBL 处碎片飞出机体,该碎片若进入发动机将十分危险,会造成发动机停机、起火,甚至可能造成发动机解体等灾难性事故,因此在设定 LRBL 时,要将 LRBL 放置在发动机后方尽量远的位置,这样就最大限度降低了爆炸碎片进入发动机的可能,以及碎片飞出撞击发动机的可能。

5)在设定 LRBL 时,要考虑爆炸后产生大质量块撞击机翼、尾翼的可能。

爆炸发生后,如果爆炸威力达到一定程度,还可能会造成 LRBL 的大质量块飞出机体撞击机翼、尾翼(水平安定面、升降舵、垂直安定面和方向舵),对机翼、尾翼等机体结构造成威胁,可能造成飞机失控的灾难性事故,因此在设计选择 LRBL 时要对产生的大质量块进行模拟分析,使得大质量运行轨迹尽量不会碰到机翼、尾翼等关键结构。

6)在设定 LRBL 时,要考虑在 LRBL 发生爆炸后的碎片、烟雾或起火情况,尽量避免对乘员和设备的安全性影响。

爆炸物一般是含能材料,爆炸会产生碎片、高温高压气体和冲击波,在客舱内部可能形成烟雾甚至导致起火,无论是乘员受到碎片冲击、吸入烟雾或者起火,都会对客舱内部乘员和设备的安全性有影响,因此在设计 LRBL 时要考虑到烟雾或起火对乘员和设备的影响,尽量将 LRBL 远离乘客或乘客可以移动到远离 LRBL 的地方。

7)除了设定 LRBL,也可以采用其它方式来应对机上的爆炸物威胁,如采取爆炸抑制系统等,但是 AC25.795-6 中建议对于其他的方法,需要由航空器合格审定办公室和运输机合格审定中心合作,建立适当的标准(此方法难度较大,不推荐使用)。

因此,在设定 LRBL 时,需要考虑到爆炸物在 LRBL 爆炸所产生的一系列问题,包括:放置爆炸物的空间、爆炸后的泄压、爆炸造成的结构损失、爆炸对发动机的影响、爆炸对机翼、尾翼的影响、爆炸对乘客和设备的影响等。

2.3 LRBL 的可达性要有保证

在客舱内部发现爆炸物或疑似爆炸物之后,为了便于在发现爆炸物后尽快地将其移送到 LRBL,要保证 LRBL 的可达性较好,不能使得 LRBL 的移送通道很容易被占据。

比如,将 LRBL 设定在厕所内,如果将厕所锁住,那么该 LRBL 将无法正常使用,即使最后可以通过拆卸厕所门、壁板等操作最终可以将爆炸物放置在 LRBL 处,但是该位置的可达性是十分不理想的,因此关于 LRBL 的可达性方面一定要充分考虑,并向适航当局证明飞机 LRBL 的可达性已经得到最大的保障。

2.4 LRBL 的设计应当使得一旦在 LRBL 处发生爆炸后可以最大限度保护飞行关键结构免遭损坏

爆炸物在 LRBL 发生爆炸后,会对周围的机体结构造成破坏,尽管在 LRBL 设定时,就已经避开了关键结构位置,但是由于爆炸的冲击波、碎片辐射等因素,还需要对 LRBL 进行特殊设计以最大限度保护飞行关键结构免遭损坏。

1) LRBL 选择在紧靠机身蒙皮的地方,要考虑到出现失去 LRBL 附近一部份结构的情况。

需要对失去 LRBL 附近一部分结构的情况进行结构、强度的评估,设计时应该确定 LRBL 出现开口情况下飞机结构的安全性能,是否能满足飞机继续安全飞行和着陆所需的要求。

2) 紧靠机身蒙皮的 LRBL 爆裂区域面积至少应是直径不小于 30in 的圆周,如图 1 所示。

通过对 LRBL 爆裂区域圆周直径的要求,可以使得爆炸发生后产生的压力安全卸载,避免泄压不够造成飞机解体的灾难性事故发生。

根据 AC25.795-6 的要求,如果由于飞机的几何框架和其它原因使得 LRBL 区域实在无法满足直径不小于 30in 的圆周的要求,那么 LRBL 爆裂区域的直径至少要不小于 20in。

(3) LRBL 区域的机身蒙皮应与周围结构中,在 LRBL 区域周围设计结构加强框,使得爆裂区的裂纹不会扩展到周围结构,并且即使该区域结构

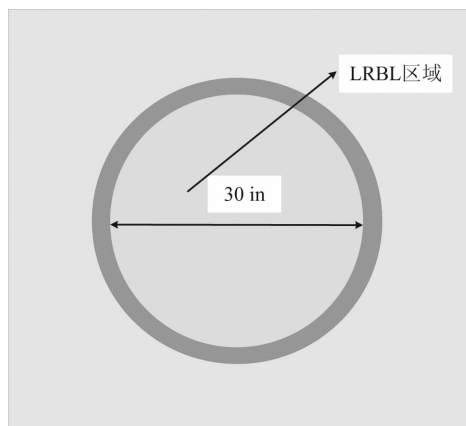


图1 最小风险炸弹位置(LRBL)结构设计示意

丧失也不会影响到整个机身的结构安全,如图1中阴影区域所示,为 LRBL 周围的结构和蒙皮隔断设计。

通过该特殊设计,可以满足爆炸后 LRBL 区域与周围机体结构隔断的要求,不会由爆炸导致机体蒙皮大面积爆裂,保证飞机结构、强度的安全性。

因此,对于 LRBL 除了结构本身的设计以外,在设计时还需要考虑爆炸后的次生影响,在飞机的概念设计阶段,就应当考虑到 LRBL 问题,将尾翼、机翼和发动机等布置在 LRBL 大质量块可能撞击的轨迹之外,使得炸弹在 LRBL 爆炸后对飞机、乘员的安全性影响降到最低。

2.5 LRBL 的设计应当使得一旦在 LRBL 处发生爆炸后可以最大限度保护飞行关键系统免遭损坏

爆炸物在 LRBL 处爆炸除了会对飞机结构造成损坏之外,也会对 LRBL 周围的系统设备造成损坏,因此,在 LRBL 周围不允许飞行关键系统存在或者受到损坏从而导致灾难性事故的发生。满足 LRBL 周围系统布置适航符合性的方法如下:

1) 飞行关键系统(包括燃油系统)必须布置在 LRBL 外周线 18in 以外(如图 2 深色区域所示),而各种电线、电缆、通风管路、空调管路、氧气管路、输水管路等也应该尽量布置在 LRBL 外周线 18in 以外,如图 2 所示。

2) LRBL 投影到地板区域在爆炸时会受到冲击,因此对于该地板区域同样要进行系统设备的安

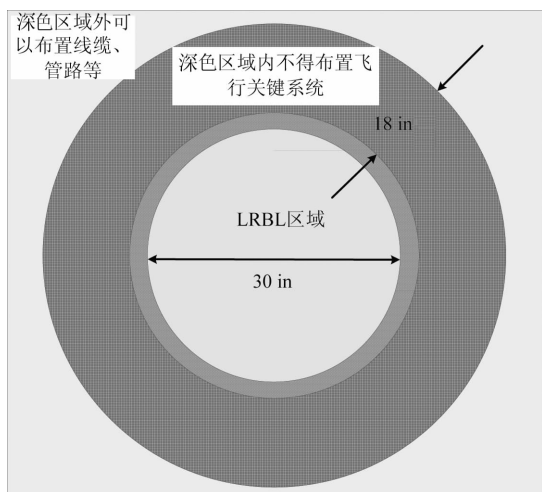


图2 LRBL 周围系统设计示意

如图3所示,在以LRBL在地板投影点为中心30in见方的区域是爆炸危险区域,此区域不允许安装有飞行关键系统,对于安装在地板横梁或者地板底部横梁上的飞行关键系统也应该位于此区域之外。

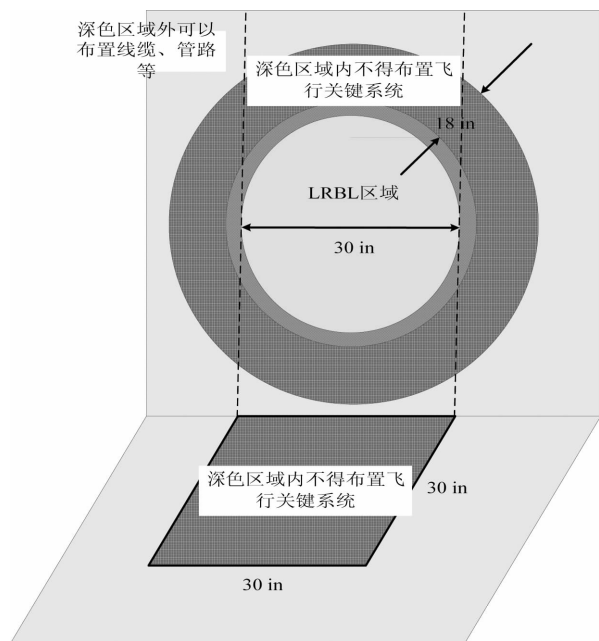


图3 LRBL 投影到地板区域的系统设计

3) 如果LRBL周围系统设备布置准则与§25.795(c)(2)“系统存活性”要求发生冲突,应该优先采取最大系统隔离措施。但是在这种情况下,对于在LRBL附近运行且难以采取隔离措施的飞行关键系统,可以考虑增加针对碎片和大结构变形的防护措施。

系统防护和/或自身防护可接受的抵御碎片冲击能力,至少应该可以在承受0.5in直径的2024-T3铝球以430ft/s的速度撞击后,系统不会失效;根据AC25.795-6,此种情况下,一般使用0.09in厚的2024-T3铝板就可以满足碎片冲击的防护要求。

另外,系统所安装的结构发生相对位移也会导致系统失效,系统设计时应并入可以最小化此类风险的特征。这些特征可以是在系统和/或其安装中包含弹性。在缺乏试验依据和理论支撑或特殊环境的情况下,设计人员应提供在受保护区域内的任意位置(对于一些发生位移后就超出机身外形线的位置除外)受到单点力作用,在任意方向可以至少相对位移6in(即在需要保护区域的任意位置,受到单点力作用在任意方向发生至少6in的位移,仍然处于受保护区域)。允许设计人员也可以采取脆性附件或其它特征来防止系统失效^[12]。

但是,对于LRBL投影到地板区域的设备,特别要避免布置电线、电缆、输油管等各种管路及飞行关键系统,如果实在无法避免将这些飞行关键系统布置在该区域,则一定要加装符合上述要求的防护措施,并且要保证防护该区域设备的防护措施,不与地板合为一体,而是与地板的受力独立,因为爆炸可能会造成地板塌陷、变形等情况,如果防护措施的受力支撑点也在地板上,那么爆炸时就无法起到应有的防护效果。

3 LRBL 周围飞行关键系统分析方法

对LRBL周围系统的布置设计时,需要根据飞机级和系统级的功能危险性评估(FHA),检查在LRBL周围18in内的系统设备丧失,是否会导致I类事件发生,在此工作中,需要从飞机级和系统级I类事件来分别考虑。

1) 系统级I类事件

如图4所示,在丧失发动机推力的I类事件中,可以直接追溯到相应系统的FHA中,由所负责系统专业根据I类事件对应的故障树分析(FTA)找到底事件最小割集^[17-20],然后检查在该区域中是否存在导致顶事件的最小割集,如果存在那么需要将该区域相关设备重新布置,如果不存在则满足安全性要求。

2) 飞机级I类事件

特别需要注意的是,在飞机级FHA中为I类的

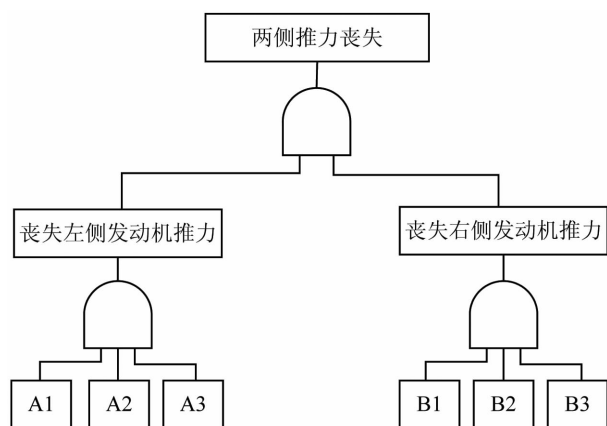


图4 两侧推力丧失故障树分析

顶事件,由初步飞机级安全性评估(PASA)分配到不同的系统中有可能会是几个非I类的事件,如图5所示,在各系统分析的时候,就需要飞机级安全性工程师进行统筹考虑,将FTA多个非I类事件的故障树以与门的形式集成到飞机级I类事件故障树里面,得出故障树中导致顶事件的最小割集,查看LRBL区域相关设备是否存在导致飞机级I类事件的最小割集存在,如果存在那么需要将该区域相关设备重新布置,如果不存在则满足安全性要求。

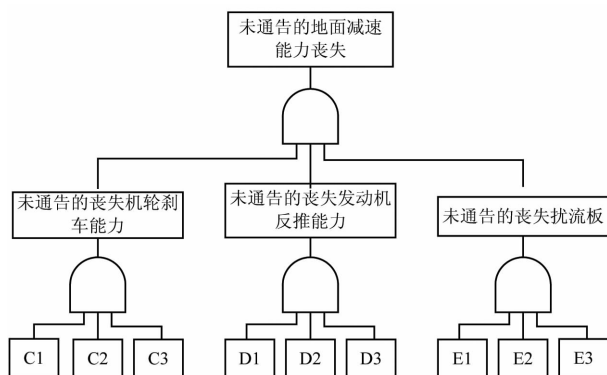


图5 丧失地面减速能力故障树分析

4 满足 LRBL 适航符合性的其他考虑

1)在大多数情况下,最好减小客舱压力,并保持座舱压力与外界大气的压力差为零。爆炸时,减小客舱压力是将结构损坏降至最低的最有效措施。

2)LRBL 程序的目标是通过提前规划、培训和准备可用资源,减缓飞行爆炸的影响,提高飞机的生存力。各国民航局推荐飞行紧急安全程序,为航空公司和机组提供指导,提炼形成专门的处理紧急

情况的程序,加入到飞行操作手册和各项培训中。

3)在飞行过程中,机组应掌握 LRBL 信息,这些信息应简练和易于理解。

4)对于 LRBL 的适航符合性验证工作,不需要考虑炸弹的 TNT 当量问题,只需要按照 AC25.795-6 进行设定、设计即可。

5)对于 LRBL 的效果,基于安全性考虑不需要使用试验验证。

5 LRBL 使用方法

在飞机基本设计完成确定 LRBL 之后,需要采取附加的措施来改进其安全性,例如制定一些针对 LRBL 的机组操作程序等。如果飞机上的客舱不止一层,那么可以有不止一处的 LRBL。

当飞行中发现疑似爆炸物时,将其影响降到最低的措施包括:

1)减小座舱压力或者对座舱完全释压,因为如果舱内完全增压的话,由于和外界巨大的内外压差,爆炸会对飞机造成最大的伤害;

2)应采取措施将爆炸对结构或系统完整性的损失减到最低;

3)需要考虑使用爆炸限制装置,包括防爆袋,或者利用机上坐垫行李等柔软物质将爆炸物紧靠在 LRBL 处;

4)在保证飞机操作安全的条件下,执行相应的 LRBL 应急处置程序。

另外,营运商要知道 LRBL 在何处并熟悉相应操作程序,而在飞机上面则不可以标识出 LRBL 相关信息,或者使得其他无关人员不能很容易地发现 LRBL。在飞机制造商、营运商和航空管理机构之间应当密切配合,以最大程度发挥 LRBL 的应有作用。

6 结论

本文以满足 FAR 25.795(c)(1)条款中关于 LRBL 的适航要求为目标,以关于 LRBL 的 AC25.795-6 为指导,首次系统研究了民用飞机中最小风险炸弹位置的适航符合性研究,关于 LRBL 的结构设计问题,研究了针对炸弹爆炸的结构设计、大质量块撞击机翼、尾翼的预防设计;关于 LRBL 周围设备布置和防护设计问题,研究了故障树分析在设备布置设计中的作用形式,严格地保证了 LRBL 周围设备丧失不会导致灾难性事件;同时还介

绍了LRBL的使用方法等工作。通过本工作的开展,可以对民用飞机的LRBL设计工作起到一定的促进作用,保障民用飞机的运营安全,提升乘客的乘坐品质。

通过最小风险炸弹位置的设计和机组应急操作程序的设立,使得民用飞机在飞行过程中针对已发现爆炸物,可以有紧急应对措施,爆炸物如果在此位置爆炸会对飞机安全性的影响最小,并且爆炸冲击波、碎片等的能量达到一定值,可以将机身炸开一泄压口进行泄压,保护机内乘员和系统的安全,同时该泄压口需经过特殊设计以使得裂纹不会扩展到相邻机身结构,最大限度的保障了飞机结构的完整性、乘员及系统的安全性。

参考文献:

- [1] 郭博智,王敏芹,阮宏泽.民用飞机安全性设计与验证技术[M].上海:航空工业出版社,2015:152.
- [2] 陆文聪,陈念貽,叶晨洲.等.支持向量机方法用于民航安检炸药判别研究[J].计算机与应用化学,2002,19(6):709-711.
- [3] 裴扬,宋笔锋,李占科.爆炸冲击波对目标的毁伤概率算法研究[J].西北工业大学学报,2003,21(6):703-706.
- [4] Society of Automotive Engineers Inc..ARP4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and System.REV[S].USA:Society of Automotive Engineers Inc.,2010:145.
- [5] Society of Automotive Engineers Inc..ARP4761,Guideline and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment[S].USA:Society of Automotive Engineers,1996:336.
- [6] Rao, E. Application of an explosive detection device based on quadrupole resonance (QR) technology in aviation security [C]//Proceedings IEEE 35th Annual 2001 International Carnahan Conference on Security Technology (Cat. No. 01CH37186)

(上接第5页)

为全视场尾旋测量系统,再到包含微型陀螺仪的微型姿态航向参考系统。为需要进行立式风洞尾旋试验研究的飞机型号提供了参考。

参考文献:

- [1] 蒋敏.立式风洞尾旋测量系统研制[D].长沙:国防科技大学,2006.
- [2] 张德久.立式风洞尾旋运动姿态参数计算机视觉测量系

2011;282-288.

- [7] Settles, G. S., Keane, B. T., Anderson, B. W. et al. Shock waves in aviation security and safety[J]. Shock Waves, 2003, 12(4):267-275.
- [8] V. L. Kovalev, A. S. Vetchinkin, A. V. Vagner. Simulation of self-ignition of aviation kerosene by a shock wave[J]. Moscow University Mechanics Bulletin, 2014, 69(2):54-56.
- [9] 杨鑫,石少卿,程鹏飞.空气中TNT爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J].爆破,2008,25(1):15-18.
- [10] 王杨,郭则庆,姜孝海.冲击波超压峰值的数值计算[J].南京理工大学学报(自然科学版),2009,33(6):770-773.
- [11] FAA. Amdt. 25-106; Security Considerations in the Design of the Flight Deck on Transport Category Airplanes[S]. USA: FAA, 2002.
- [12] FAA. Amdt. 25-127; Security Related Considerations in the Design and Operation of Transport Category Airplanes[S]. USA: FAA, 2009.
- [13] FAA. AC25.795-6; Least Risk Bomb Location[S]. USA: FAA, 2008.
- [14] CAAC. CCAR 第121部:大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则[S].中国:CAAC, 2010.
- [15] CAAC. CCAR 第332部:公共航空旅客运输飞行中安全保卫规则[S].中国:CAAC, 2008.
- [16] 孔凡凡,孙有朝,王伟.民用飞机共因失效分析方法研究[J].中国民航大学学报,2008,26(5):49-51.
- [17] 修忠信,成伟.民用飞机系统安全性设计与评估技术概论[M].上海:上海交通大学出版社,2013:123.
- [18] 陆中,孙有朝,周伽.民用飞机适航符合性验证方法与程序研究[J].航空标准化与质量,2007,4:6-8.
- [19] 宗蜀宁,端木京顺,王青,等.飞机整机级系统安全性指标分[J].空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(1):10-14.
- [20] 孔凡凡,孙有朝,王伟.民用飞机共模故障分析方法研究[J].中国民航大学学报,2008,26(5):49-51.

统的研制[D].长沙:国防科技大学,2007.

- [3] 李沛,等.一种基于双目视觉原理的飞机尾旋运动姿态测量方法[J].国防科技大学学报,2008,30(2):111-115.
- [4] 乔熠晖.MTI惯性测量单元及其测试平台的研究[D].太原:中北大学,2012.
- [5] 黄会明,等.飞机尾旋三维测量试验的改进方法[J].实验流体力学,2013,27(2):77-81.
- [6] 张海涛,等.MEMS加速度传感器的原理及分析[J].电子工艺技术,2003,24(6):260-262.
- [7] MEMS传感器的原理和应用[Z].哈尔滨工业大学,2012.