

波音 787 锂电池问题研究

刘春明, 金 英, 张岚岚

(上海飞机制造有限公司情报档案馆, 上海 200436)

[摘要] 波音在 787 项目中首次采用了锂电池这一新技术而非传统的镍镉电池, 但由于锂电池应用于飞机的技术还不成熟, 且锂电池本身容易起火, 给波音造成了一系列的磨合期问题。尽管国产飞机 ARJ21 和 C919 都没有采用锂电池, 但波音应对整个 787 电池故障事件的方式方法仍然对国产飞机有较大借鉴意义。以 787 锂电池起火事故为切入点, 深入分析事故发生后波音、汤浅公司、FAA、NTSB 所采取的应对措施, 以及波音和汤浅公司对 787 锂电池的改进方案, 简要阐述了 787 锂电池起火事故对波音公司造成的影响。

关键词: 波音 787; 锂电池; FAA; NTSB

Research on Boeing 787 Lithium Batteries Problems

LIU Chunming, JIN Ying, ZHANG Lanlan

(Intelligence & Archives Department, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] The Dreamliner is the first airliner in the world to use Lithium battery instead of traditional Nickel-Cadmium battery. As this new technology is not mature enough, Boeing has been suffering from problems with the Lithium batteries reported to be prone to catching fire. Although the domestically-produced aircrafts ARJ21 and C919 do not use Lithium batteries, Boeing's experience is of great significance for reference. Starting with these fire incidents, this paper will focus on the response measures from Boeing, YUASA, FAA and NTSB and the improvements to the 787 Lithium battery design. It also briefly analyses the impact of 787 battery incidents on the Boeing Company.

Keywords: Boeing 787; Lithium batteries; Federal Aviation Administration; National Transportation Safety Board

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.10.106

1 锂电池在飞机上的应用

传统客机使用镍镉电池, 但由于镍镉电池存在体积大、重量大、蓄电量和放电电流不足、充电慢等缺点, 波音、空客开始探索在波音 787 和 A350 上使用锂电池。锂电池和镍镉电池优缺点的比较如表 1 所示^[1]。

波音 787 是全球第一架使用锂电池的民用飞机, 但锂电池在给波音 787 客机带来诸多优势的同时, 也暴露出了安全性差的缺点, 主要体现在以下 4 个方面:

- (1) 锂电池易爆炸。
- (2) 钴酸锂材料的锂电池不能大电流放电。
- (3) 锂电池需保护线路, 防止电池被过充和过放电。
- (4) 生产要求条件高, 成本高。

787 锂电池起火事故发生后, 空客放弃了在 A350 飞机上采用锂电池计划, 而是重新采用此前已在业界广泛使用的并经过充分验证的镍镉电池, 锂电池未来在飞机上应用的可行性还有待重新验证。

2 波音 787 锂电池的基本情况

波音 787 共配有 2 块锂电池, 都是由日本 GS 汤浅公司生产并由法国泰雷兹公司组装。一块置于飞机尾端用于启动 APU (APU 是飞机辅助动力装置, 独立提供电力, 以减少飞机对地面(机场)供电设备的依赖),

表1 锂电池和镍镉电池优缺点比较

	锂电池	镍镉电池
体积和电压	体积小、电压高: 波音 787 的锂-离子电池采用 8 芯, 电压达到 32V	体积大: 波音 777 的镍镉电池采用 20 芯, 电压才 24V
重量和电流	重量轻, 电流大: 波音 787 的每个锂电池重约 28.5kg, 每个锂电池放电电流为 75 A	重量大, 放电电流不足: 波音 777 的每个镍镉电池重约 48.5kg, 但放电电流只有 16A
使用寿命	锂电池使用寿命相对较长, 使用寿命可达到 6 年以上, 磷酸亚铁锂为正极的电池用 ICDOD 充放, 有可使用 1000 次的记录	镍镉电池有记忆效应, 如果长期充满电, 可用容量会越来越小, 需要定期深度放电后再深度充电, 导致其使用寿命较短

2013年1月7日,在波士顿洛根机场出现火情的就是这块启动APU的电池;另一块电池置于飞机前端驾驶舱,即主电池。虽被称为主电池,但在平时飞行过程中很少用到这块电池。主电池的作用是应对紧急状态,比如发电机全部停止工作时,主电池可用来控制飞机完成最基本的降落等操作。2013年1月16日,全日空波音787紧急迫降事件中,发生冒烟的就是这块主电池。APU电池在主起落架后方、客舱门下方,主电池位于电气和电子设备隔舱的前部,两者的位置如图1所示^[2]。

波音787主电池和APU电池均由8个锂电池芯排成两排,如图2(a)所示。每个电池芯安装有3个内部电极绕组,每个电极绕组长838.19mm,每个绕组配有两对电极(阳极和阴极)和分离器,除8个电池芯,电池监视器、霍尔效应电流传感器、接触器、电线等也是波音787主电池和APU电池的基本组成成分,如图2(b)所示。波音787主电池和APU电池的基本参数如表2所示^[3]。

3 波音787锂电池问题回顾

3.1 事故回顾

2013年1月,波音连发两起电池事故,暴露出了波音787锂电池存在的缺陷,并使波音公司陷入787停飞危机。此后,波音对787的锂电池进行了改进,使787得以复飞,但787复飞后不久就再次出现电池安全隐患,且至今波音仍未找出真正根治波音787电池安全问题的有效办法。

3.2 FAA适航指令

事故发生后,FAA于2013年1月16日发布紧急适航指令,称787使用的电池有潜在起火危险,并要求暂时停飞这一型号的客机。2013年2月,FAA又发布了“Special conditions 25-359-SC”以加强对787电池适航审查的严格度,提高787电池的安全性。

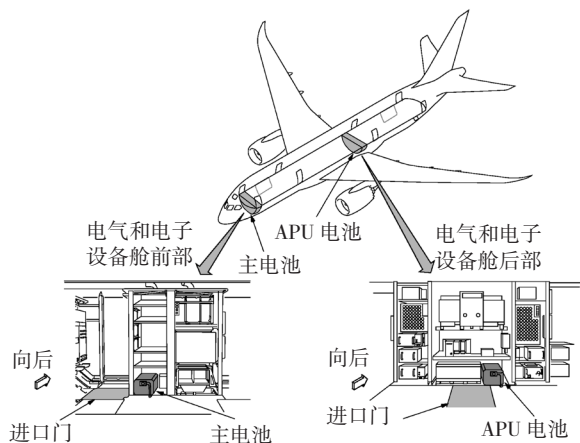
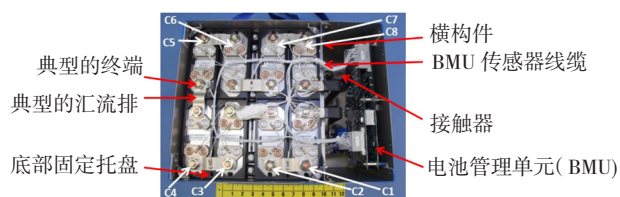
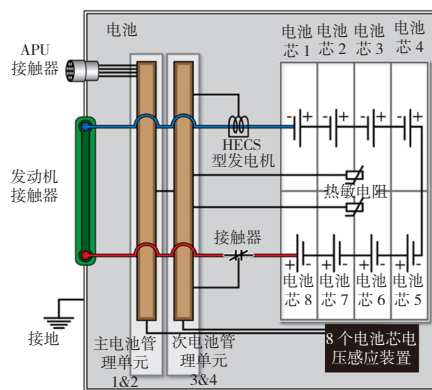


图1 波音787主电池和APU电池的位置

Fig.1 Boyin 787Main and auxiliary power unit battery locations



(a) 8个锂电池芯



(b) 线路图

图2 波音787主电池和APU电池的组成

Fig.2 787 Main and auxiliary power unit exemplar battery

表2 波音787主电池和APU电池的基本参数

参数	整个电池(Battery)	每个锂电池芯(Cell)
额定功率/W	2220	277.5
额定电压/V	29.6	3.7
运行电压范围/V	20~32.2	2.5~4.025
质量/kg	28.03	2.72
宽度/cm	27.67	13.21
深度/cm	36.07	5.08
高度/cm	21.59	19.56

表3 FAA对787电池适航审查的9条要求

序号	适航要求
1	电池芯的温度和压力在任何条件下必须可控,出现问题必须被电池监测系统报告,以防止爆炸
2	必须防止电池的压力和温度自动持续变化
3	在运营过程中不能出现爆炸或有毒气体,出现问题必须被电池监测系统报告
4	必须遵守 FAA 规定的锂电池安装方法
5	不能有腐蚀性的液体和气体从锂电池泄露
6	每个锂电池必须有因短路造成电池过热起火后的防护措施
7	每个电池必须有控制电池自动充电时充电率系统,以防止电池过热或过充
8	必须告知机组人员电池监控信息和警告信息的特征
9	必须遵守 FAA 规定的锂电池持续适航要求,必须在规定的时间内对锂电池进行维护保养

3.3 NTSB对787电池问题的调查

NTSB对787电池事故发生经过和发生原因进行了

调查,并对 787 电池内外部情况、电池各组成部分性能、适航取证情况进行了检查。2013 年 3 月 7 日,NTSB 发布中期报告,公布了对 787 电池的检测结果,但没有公布 787 电池出现故障的真正原因。2014 年 11 月 21 日,NTSB 把事故原因确定为电池芯热失控,并向 FAA 提出了 15 条安全建议,向波音公司提出了 2 条安全建议,向汤浅公司提出了 1 条安全建议^[1],如表 4 所示^[4]。

表4 NTSB对FAA、波音公司和汤浅公司提出的安全建议

对象	安全建议
FAA	建立更有效的生产监督机制 航空业专家一起制定或修改锂电池设计的安全标准 航空业专家一起制定或修改永久安装锂电池相关设计的安全标准 每个锂离子电池芯需通过极端温度条件下的安全测试 锂离子行业专家开展电池监控系统技术的研究,减少电池过热情况下锂电池的破坏性,更新锂电池行业的安全标准 行业专家共同研究锂电池热安全性的测试方法 在安全评估新技术方面为锂电池认证工程师提供指导材料 在安全评估新技术方面对相关工程人员进行培训 在锂电池在特殊条件下的认证测试方面为认证工程师和相关工程人员提供指导材料 对认证工程师和相关工程人员进行培训 召开认证计划会议 完善 787 维护手册 评估 787 飞行记录器中的相关数据,并采取适当的措施纠正发现的问题 提高飞行记录器的质量,增强驾驶员对话装置的信号 确保驾驶舱语音记录器处于有效状态
波音公司	制定或修订工艺流程,建立有效的供应商监督机制,确保产品符合行业标准 对改装后的电源系统所采用的新设计和新技术进行安全评估,确保其符合认证标准,对发现的任何缺陷进行修复
汤浅公司	重新检查公司的电池制造工艺,防止出现影响电池芯安全性的缺陷,并对员工进行适当的培训,使其可以识别这些安全缺陷

3.4 波音对787电池问题的分析结果

事故发生后,波音组织公司内、外部专家对 787 电池存在的问题进行了分析。根据波音的分析结果,其认为电池故障对 787 电池区域和功能的损害有限,787 电池发生故障的原因是过热传导和电解泄露^[5]。

4 波音 787 锂电池改进措施

4.1 波音787电池改进历程

波音在事故发生的第一时间就组织技术团队对 787 电池进行分析,为尽早完成 787 电池的改进和实现 787 复飞赢得了时间,并在第一时间启动了对波音 787 电池的改进,这与波音强大的人力资源储备和位于华盛顿的 787 飞行控制中心(OCC)所发挥的作用密不可分。

4.2 波音787电池改进方案

波音 787 电池改进方案包括以下 4 个层面^[6]。

4.2.1 改进电池设计特性以阻止故障发生,并可对故障进行隔离

(1)波音为更好地将电池中的每个电池芯与其他电池芯及电池盒相隔离,在每个电池芯周围包裹了电绝缘层,即使发生故障时也可使每个电池芯与其他电池芯及电池盒相绝缘。安装在上方、下方及电池芯之间的绝缘层和隔热层将帮助阻止电池芯的热量互相影响。电池芯之间的空隙增加,降低了连锁反应的可能性。(2)波音对电池内部的电线套管和线束进行升级,以增强抗热和防损伤能力,新的紧固件将把连通 8 个电池芯的金属条连接起来,这些紧固件采用锁闭机构。(3)波音更改容纳电池芯和电池管理组件的框架,底部增加的排水孔可以使水汽从电池里排出,侧面较大的孔可以让电池在失效时向外排气,从而减少对其他电池部件的影响。

4.2.2 控制充电电压,防止过度充电

波音公司、泰雷兹公司和汤浅公司将 787 充电系统进一步精细化,以精确控制充电电压,防止过度充电,降低最高充电电压和提高最低放电电压。这一目标通过重新设计电池系统中的两件设备,即电池监控组件和充电器来实现。此外,波音还对充电器进行调整以使充电循环更加平顺,从而降低电池在充电过程中承受的压力。

4.2.3 加强制造、运行和测试工艺,以确保电池及其组件拥有最高水平的质量和性能

波音与 787 综合电源转换系统供应商泰雷兹公司和电池制造商汤浅公司共同合作,发展和建立增强制造标准和试验方法,以进一步降低电池芯和整个电池在运营中出现问题的可能性。

4.2.4 针对发生概率低的电池失效,采用新的电池外部封套,阻止任何水平的电池过热影响到飞机和乘客

电池箱被安装在一个由不锈钢制成的封套中,这个封套可以将电池与电子设备舱中的其他设备隔离开来,还可以确保封套内不会着火,为电池系统增加了另一层保护。封套上设有一个直接排气口,可将电池气体直接排到飞机之外,不仅有效泄放有毒烟雾,还确保电解液受热膨胀后不会溢到其他部分,引起连锁反应,而是把热源带出机外。最重要的是,新的壳体不但隔热,还阻隔了空气,具有窒息火灾作用。在波音试验中,电解液被有意释放,壳体受到强烈加热,但由于缺乏空气,壳体内无法引起燃烧和温度飞升,即使在引入空气后,由于空间有限且后续空气无法进入,燃烧也只持续了 200ms 就熄灭了。同时,波音在电子设备舱中采用了新的钛合金固定装置,以确保电池外部封套获得合适的支撑。

4.3 波音787电池改进存在的问题

改进后,波音 787 电池的壳体得到极大加强,隔离和耐热能力都得到了增强。然而,波音 787 更换新电池并复飞后,仍然再次出现电池问题。其原因是波音的修

改方案只涉及阻止火灾蔓延,并没有达到确保不可能起火的本质安全^[5]。在所有已经发布的报告中,NTSB和波音都明确提到没有发现起火的原因。2013年4月19日,波音负责787的主管莱利洛夫蒂斯承认:“我们有可能永远也不知道(电池起火的)根本原因,只能从别的方面预防起火。”永远也不知道起火的原因,因而不能从根源上杜绝起火可能,这是波音787电池风波中挥之不去的一片阴影。

另一方面,波音787的锂电池还有众多没有引起起火但足够恼人的故障。例如,按照设计,如果锂电池放电过度而导致电压偏低将不能再充电,必须换下后送回工厂复苏。由于很多在设计时没有考虑到的因素,比如尽管机上总电门已经关闭,地勤加油时打开油箱盖,油量表就自动跳动并开始耗电;行李舱门没有关紧,舱内灯也将一直亮着并不断耗电。由于上述因素,波音787电池过度放电现象频繁,送回工厂复苏的频率大大高于波音的预计。

5 客户反应及应对措施

由于停飞给航空公司造成巨大经济损失,波兰航空、全日空航空、日本航空、印度航空等都向波音公司提出索赔^[7],这给波音造成了巨大财政压力。波音一般以在未来购买飞机时给予折扣和现金赔付两种方式来应对索赔,在未来购买飞机时给予折扣是波音首选的赔偿方式,而航空公司则更希望得到波音的现金赔偿。

在交付方面,2013年3月28日,波音787重启交付。从2013年到2015年,波音交付了65/114/135架波音787,而从首架波音787交付(2011年9月25日)到事故发生前的2012年12月底,波音共交付49架波音787。在订单方面,波音787出现电池问题后,波音仍于2013年获得183架订单,即便是在事故刚发生不久的2月,美国航空仍订购了42架波音787,可见其对波音787的信心。在波音787复飞后,订单量再次出现增长趋势,2013年全年共获得183架订单,与2012年相比不减反升(波音787在2012年获得的订单仅为50架)。但在2014年上半年,波音787的订单量明显减少,这可能与波音787复飞后再次发生电池故障有关。表5为波音787历年来的订单情况^[8]。

从表5可以看出,787电池问题并未给波音787的交付量和订单量带来太大影响。

6 结束语

从波音应对787电池问题的方式方法中,我们可以看出,第一时间原则、注重沟通和信息公开、积极配合调查、在处理问题过程中与供应商间的积极合作等都是应

表5 波音787历年来的订单情况

年份	订单量 / 架
2004	52
2005	197
2006	100
2007	284
2008	59
2009	24
2010	36
2011	45
2012	50
2013	183
2014	50
2015	99

对磨合期问题的方式方法。在解决技术问题时,则要从设计和制造工艺两方面入手,且在面对某项新技术无法在短时间内彻底根治时,可采取相应的补救措施来降低事故发生的风险。

参考文献

- [1] 电子产品世界. 锂电池和镍氢电池的区别[EB/OL].[2015-04-14]. <http://m.eepw.com.cn/m/display/id/272532>.
- [2] The World of Electronic Products. Difference between lithium batteries and nickel cadmium batteries[EB/OL].[2015-04-14]. <http://m.eepw.com.cn/m/display/id/272532>.
- [3] NTSB. Interim factual report[EB/OL].[2013-3-7]. <http://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/DCA13IA037-interim-factual-report.pdf>.
- [4] NTSB. NTSB Recommends Process Improvements for Certifying Lithium-ion Batteries as it Concludes its Investigation of the 787 Boston Battery Fire Incident[EB/OL].[2014-12-1]. <http://www.ntsb.gov/news/press-releases/Pages/PR20141201.aspx>.
- [5] NTSB. Aircraft Incident Report[EB/OL].[2014-12-1]. <http://app.ntsb.gov/doclib/reports/2014/AIR1401.pdf>.
- [6] 晨枫. 波音787的锂电池风波[EB/OL].[2013-5-27]. http://www.afwing.com/encyclopaedia/boeing-787-lithium-battery_2.html.
- [7] Cheng Feng. Boeing 787 battery trouble[EB/OL].[2013-5-27]. http://www.afwing.com/encyclopaedia/boeing-787-lithium-battery_2.html.
- [8] 波音公司. 787电池解决方案[EB/OL].[2013-4-23]. <http://zhan.renren.com/kejizhimei?tagId=108244&page=5&checked=true>.
- [9] Boeing. Boeing 787 battery improvement solution[EB/OL].[2013-4-23]. <http://zhan.renren.com/kejizhimei?tagId=108244&page=5&checked=true>.
- [10] 曾忆茗. 波音787停运或引发全球索赔潮[EB/OL].[2013-2-6]. <http://www.qianzhan.com/indynews/detail/242/130206-d3c1a215.html>.
- [11] Zeng Yiming. 787's grounding would cause worldwide claim for boeing[EB/OL].[2013-2-6]. <http://www.qianzhan.com/indynews/detail/242/130206-d3c1a215.html>.
- [12] Boeing. Orders and deliveries[EB/OL].[2015-12-22]. <http://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries>.

(责编 古京)