

波音787项目关键系统评审的问题分析及启示

| 邓中卫 王平利

波音787是美国波音公司研制的超远程双发涡扇宽体运输机，用来取代波音767飞机，波音787-8为基本型。2011年8月26日，美国联邦航空管理局（FAA）为波音787飞机签发了型号合格证，并将波音公司的第700号（No 700）生产型号合格证进行修改，使其包含波音787-8飞机，大约一个月后，首架飞机交付航空公司。

波音787-8投入运营后出现过各种各样的故障，为找出这些故障原因，并对该型飞机的取证过程进行审核，2013年1月31日，FAA和波音公司成立了波音787-8关键系统评审组（CSRT），对波音787-8飞机的研制过程进行了一次为期6个月的全面评审，评审涉及飞机设计、制造和组装等方面。

尽管此次评审的最终结论是波音787飞机项目成功采用“持续运营安全性”（COS）流程，确保了该机满足所期望的安全性水平，但仍发现波音787飞机在关键系统、推进、结构以及制造/质量等方面都存在一些问题，这些问题涉及需求工程、设计、试验、故障分析、运营、工程一致性等各方面。

波音787飞机项目的特点

波音公司在该型飞机的研制上采取了一系列非常规的理念和举措。例如，同时提出了型号合格证和生产合格证取证申请，希望同时取得飞机设计批准和生产许可证，以显示波音公司对新机的性能、质量和前景充满信心；组织虚拟的“全球设计团队”，通过问卷调查方式，广泛听取公众对飞机设计方面的建议。

波音公司在该项目中首次采用全球供应链战略，邀请全球40多家航空公司参与飞机的开发和设计；联合全球范围内主要的厂商，以风险共担的方式研制飞机等。除飞机总体设计和最后总装由本公司完成外，将相当一

部分部件的研制、生产和装配工作转包给了分布在美国14个州和美国之外11个国家的其他厂商，波音公司自己在该项目中只与23个一级分包商/供应商直接打交道。

在机载系统方面，主要的风险共担伙伴和供应商有法国达索系统公司（提供CATIA软件和产品生命周期管理支持）、通用电气航空集团（负责增压装置、起落架作动器、一种发动机和航电系统中的通用核心系统）、法国拉泰科埃集团（负责客舱门）、梅西埃·道蒂英国公司（负责起落架）、法国梅西埃·比加蒂公司（负责电刹车）、日本普利司通公司（负责轮胎）、古德里奇公司（负责电刹车、发动机短舱、反推力装置、燃油系统和货物处理系统）、穆格公司（负责飞控作动器）、派克·汉尼汾公司航空产品集团（负责液压系统）、汉胜公司（负责电动液泵、电源系统、辅助动力装置、冲压空气涡轮应急发电机、空调系统、机载氮气发生系统）、法国泰雷兹集团（负责电源转换系统和备份飞行显示器）、霍尼韦尔国际公司（负责电传飞控系统）、飞机健康监测与管理系统和导航系统）、罗克韦尔-柯林斯公司（负责通信设备、监视与显示系统）。

另外，波音787还采用了很多新技术以及创新的设计和架构。几个比较突出的技术创新包括变频交流起动机/发电机（VFSG）、高功率发电系统、扰流板电动作动器、复合材料机身制造。

波音787关键系统评审

CSRT专家组成员利用其专业知识和经验进行了独立判断，对波音787-8的取证过程进行评审。关键系统评审组（CSRT）分为4个小组，分别对波音787的关键系统、推进、结构以及制造（质量）4个方面进行评审。各评审组对其领域中发现的问题进行评估并对改进措施进行评估。每个评审组还对系统复杂性、供应商责任心、

新技术的应用、已有技术的创新应用等方面进行量化。系统评审小组进行深入评审的部分子系统/部件如图所示。

评审过程中，CSRT评审专家与波音公司的供应商进行了广泛的接触。根据系统评审小组的深入评审，总结出需求、设计、试验、分析以及使用问题等几方面的问题，这些问题都是属于共性问题。在评审中，系统评审小组还注意到与波音787工程一致性检查数量有关的问题。

营问题进行调查时会被识别出。系统评审小组认为，尽管造成这些需求缺陷的原因在高级层面上是相互关联的，在细节层面每一个都是独一无二的且相互隔离的。

在波音787项目中，尽管波音公司的需求是存在的，但在波音公司和下一层供应商之间，以及不同级别的供应商之间的需求验证（确认）（verification/validation）有缺失。很多情况下，需求从波音公司被传递给一个主供应商，然后再传递下一级

求进行适当的评估并文档化。

其次的问题和设计有关。评审中发现存在不正确的假定。错误地认为已经经过证明的设计方案无须经过验证就可以应用于新的设计应用。有些情况下，不正确的设计假定会在部件或系统中造成功能或性能缺陷，而这些缺陷在后续的飞机开发阶段才会被发现。在开发阶段发现这些问题会极大影响飞机开发进度。例如，VFSG油冷却系统中油压的变化及其对系统动力学的影响，以及频率的变化对GCU

系统设计和实现方面的问题通过试验检测出来，这些问题会在后续的开发阶段被发现，而那时修改起来更加困难且代价昂贵。例如，VFSG油冷却的试验环境不是典型的飞机环境，SEMA马达制动器的试验也是如此，它采用了一个实验室电源代替EMCU。其他问题还包括制造、质量、故障分析、运营、工程一致性等。

CSRT认为，尽管波音787飞机某些特定系统的部件存在个别的问题，但整个系统的架构是健全的并具有恰当的冗余度，因此在出现部件故障时，系统仍能安全地工作。通过评审也表明，需要持续改进以使部件、系统和飞机不断成熟和提升。

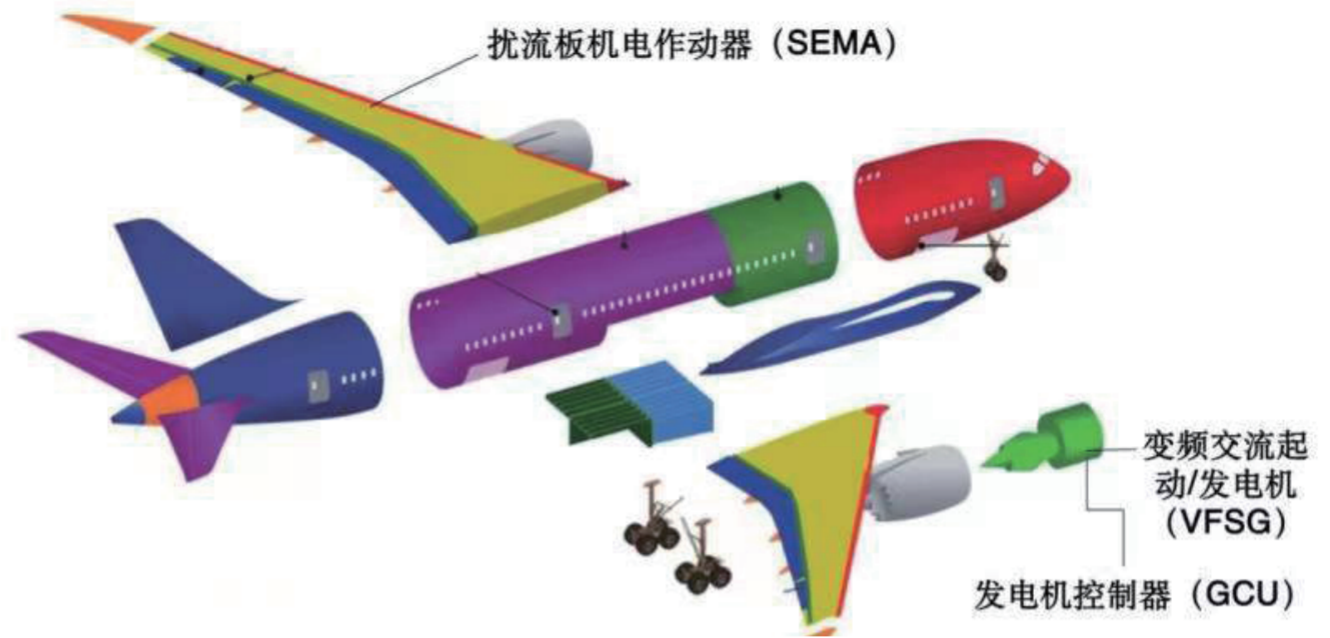
在所有情况下，波音公司和供应商为解决这些问题所采取的措施是充分的、完备的。系统评审小组没有发现任何其他的安全性问题。评审发现尽管很多的部件/系统问题被归类成需求或设计问题，但造成每项缺陷的原因都是独特的。

启示

波音公司的大型民用飞机研制水平居于世界领先地位，有着丰富的研制经验，但在波音787项目研制过程中仍存在许多设计、试验、制造等方面的问题，这些问题进而影响到飞机的品质，并在飞机投入使用后体现出来。波音公司及其供应商从这些教训中获取的对民用飞机设计的新认识纳入其流程文件或设计指南中，以确保将来不再出现类似的问题。

目前我国大型民用飞机仍处于研制过程中，国内相关供应商在民机系统的正向设计方面仍处于起步阶段。波音公司在波音787项目研制过程中出现的上述问题，对于我们具有借鉴意义。

（作者单位系中国航空工业发展研究中心）



波音787飞机机载系统研发过程中存在的问题

首先是需求相关的问题。产生需求是一项工作量极大且富有挑战性的工作，一型飞机有数万条需求，这些需求还要向大量的系统、子系统和部件传递。在评审中发现了一些需求定义存在缺陷的事例，当这些“缺陷”在部件的设计和实现中传递时，就会导致一些问题，这些问题在对飞机运

供应商。或者在波音公司的两个部门间或这些部门与他们各自的主供应商之间传递。这时，需求的拥有者/确认者没有被明确，这就会导致每一方都认为其他方才是该项需求的拥有者。举个例子，在VFSG空气/油热交换器电路的设计中，该电路的不同部分由不同的供应商拥有，而集成起来的综合组件没有清晰的归属。当需求跨越不同的组织或设计边界时，需要明确该项需求的归属，以确保对该项需

上VFSG旋转二极管故障模式的影响等，尽管这些问题会影响项目进度并给航空公司造成负担，但这并不表示它们都是安全性风险。设计评审表明，在随后的正式设计以及设计评审过程中，需要对此给予包括采用设计检查单在内的特别关注。

此外，还会遇到一些与试验有关的问题。主要是试验设计不充分（试验范围不恰当或试验环境不具代表性）。试验设计不充分会导致不能将部件和

Ampaire试飞首架混合电动支线飞机

综合多家媒体消息，当地时间11月底，Ampaire航空旗下的9座混动支线飞机Eco Caravan在美国加州卡马里奥顺利首飞，飞行持续了33分钟。Ampaire航空预计将在2024年完成Eco Caravan的取证，这款飞机将有望成为全球第一款正式投入商业运营的电动支线飞机。

据了解，Ampaire航空获得了美国能源部高级研究计划局（ARPA-E）“有潜力的先进能源技术资助”（SCALEUP）计划900万美元的资金支持，以加快公司混合电推进系统AMP-H570的开发、认证和市场推广。AMP-H570混合电推进系统的第一个商业应用就是该公司的9座飞机Eco Caravan，是赛斯纳“大篷车”的改进型。

总部位于洛杉矶的Ampaire航空成立于2016年，其使命是成为全球最值得信赖的高级实用型电动飞机开发商。目前，公司正在将现有客机升级为混合电动飞机。他们认为，这是利用现有技术实现商业电动航空旅游的最快速、最节省资金的方法。

Ampaire航空的CEO表示：“航空产业是最难实现脱碳的行业。由于最新一代电池的重量和能量容量，全电动飞机的续航里程也会受到限制，而混合电动飞机则可以保持当今飞机的续航里程和实用性。这就是为

什么我们专注于将混合电动推进技术用于一系列能力日益增强的支线飞机。这是航空业更快实现脱碳并从更低运营成本获益的一种方式。”

此前，Ampaire宣布与法荷航集团工程和维护部门（AFI KLM E&M）建立合作关系，开展一系列全球维护服务及支持活动。此外，Ampaire已获得可持续航空支线飞机融资机构Monte Aircraft Leasing租赁公司的25架确认订单，以及另外25架的可选订单，双方还确立了“首选合作伙伴”关系。Ampaire还在研究19座的德哈维兰公司的DHC-6“双水獭”双发涡桨飞机的混合电动推进改装方案，并



计划后续研发全电动机型。

首飞效果“平稳且安静”

试飞当天，试飞员驾驶Eco Caravan飞机从洛杉矶北部卡马里约机场起飞，在压燃式发动机和电动机驱动的共同驱动下，飞机以全功率爬升至1066米的高空。然后，试飞员将油门调回到巡航设置，减少了两个电源的负载。他用了20分钟左右的时间来测试各种电源设置，同时检验相关温度及其他读数，然后以较低功率降落并最终着陆卡马里约机场。试飞员说：“Eco Caravan推进系统的运行状况与预期一致。飞行平稳且安静，所有温度和功率输出读数

均正常。”

航程远且成本低

Eco Caravan飞机的发动机是基于赛斯纳“大篷车”208改装的，混动原型机动力总成的核心是A03航煤内燃发动机，供应商是德国RED航发公司，该发动机已有EASA适航认证，额定功率410千瓦，另有一台160千瓦的电机，采用并联方式共同输出功率。Ampaire公司表示整个混电推进动力总成的净额定功率预计为570千瓦（765轴马力）。此前，该公司表示混动电推改装的赛斯纳208飞机可以节油达70%，同时保持有效载荷能力并提高航程，还可以使用可持续航油（SAF），预计整体运营成本可以降低25%到40%。

Eco Caravan飞机保留了赛斯纳“大篷车”的续航里程，最大续航里程超过1000英里。此外，该机将可以在飞行中为电池充电，这意味着可以使用现有机场设施而无须地面充电基础设施的支持。

值得一提的是，安飞公司的另一款根据赛斯纳336“天空大师”3座飞机改装而成的轻小型混合动力飞机EEL已于2020年完成了548千米的测试飞行。EEL是与夏威夷Mokulele航空公司合作研发，每次只需充电20分钟，就能完成31英

尽早进入市场

目前，Ampaire正在与美国联邦航空管理局（FAA）合作，根据补充型号合格证（STC）将于2024年对Eco Caravan实施认证。Ampaire的认证方法和往常不同，它无须实施完整的飞机认证程序。传统的认证程序耗时且价格高昂。因为其原型“大篷车”已获得FAA认证，所以Ampaire将根据新的推进系统认证Eco Caravan飞机飞行。Ampaire航空的CEO称：“推出混合电动航空技术不是一项简单的任务，但通过升级一架已经认证的飞机，则降低了难度。我们将快速进入市场，让世界各地的航空公司借鉴这种新型推进系统的运行经验。”

“我们还将持续开发更大型混合动力支线飞机，引领可持续航空变革，助力航空业实现碳中和。”Ampaire航空计划尽快推出适用于大型飞机的推进系统，他们认为Eco Caravan搭载的推进技术可扩展到大型支线飞机，并最终扩展到单通道客机。（叶乐）

中国内地空客飞机完成首次SAF商业飞行

据中国民航网消息，近日，空客公司携手多彩贵州航空开启了中国绿色商业飞行的新征程，完成了中国内地空客飞机首个使用可持续航空燃料（以下简称SAF）飞行的载客商业航班。该航班从宁波飞往贵阳，由多彩贵州航空一架空客A320neo飞机执飞，加注了10%的可持续航空燃料。

在此前闭幕的第十四届中国航展上，空客公司与多彩贵州航空以及其他两家中国航企签署了合作协议，将共同推动在中国的商业航班中使用SAF，进一步支持中国航空业的可持续发展。此次SAF的商业飞行是双方在签署协议后首次以实际行动践行可持续航空发展的里程碑。

空中客车全球执行副总裁、空客

中国CEO徐岗表示：“2022年是空客中国在可持续发展方面决定性的一年。今年10月，空客天津交付中心开始在交付飞行中使用SAF，现在我们很高兴携手多彩贵州航空实现空客飞机在中国内地首次使用SAF的商业飞行。在全球范围内，空客正以实际行动引领航空航天的可持续发展。”

目前，多彩贵州航空共运营着8架空客A320neo飞机。与上一代飞机相比，空客A320neo系列飞机的燃油消耗可降低至少20%，噪声降低50%。目前，中国内地在役的空客A320系列飞机数量已经超过了1800架。

