

民用航空发动机新技术应用与适航策略

New Techniques' Applications and Airworthiness Strategies in Civil Aero Engine

■ 单晓明 周淳/中国航发动研所

新技术的应用极大地推动了民用航空发动机的发展，同时也是适航审查的关注重点：一方面，新技术推动了适航规章的发展完善；另一方面，适航规章的修订也引发了新的技术研究热点，促进了适航验证技术的发展。

进入 21 世纪以来，民用航空发动机呈现加速发展态势，欧美几大航空发动机生产巨头在占领全球绝大多数市场的同时，依然持续投入巨额研发资金，推动大量新技术的研发和应用，引领发动机行业的技术发展方向。在气动热力、结构强度、控制和诊断、新材料和新工艺等方面，涌现出全三维气动设计技术、高度集成的高转速小型附件设计技术、双层机匣包容性设计技术、低污染排放燃烧室设计技术、金属基/树脂基复合材料设计及制备技术、增材制造（3D 打印）技术、分布式控制技术等一系列新技术。这些新技术的应用使新一代民用航空发动机性能更好，结构更紧凑，安全水平更高，运营和维修工作更简单，噪声及污染物排放水平更低。可以说，未来民用航空发动机更安全、更可靠、更经济、更环保的发展趋势是依靠不断涌现的新技术推动的。

新技术应用与适航的关系

民用航空发动机，须接受适航管理部门的适航审查，表明产品符合适航法规要求，通过适航认证并取得型号合格证是其进入民机市场的必要条件。适航管理的本质是国家适

航管理部门代表公众对民用航空的安全性进行监管；适航规章实质上是由管理部门制定的航空产品市场准入的最低安全标准，是航空工业多年经验教训的总结。从安全性评估角度，可以认为采用已经过实践检验的成熟技术更容易通过适航审查。然而，民用航空发动机的发展离不开新技术应用，而新技术应用势必会超出现有适航规章要求，带来新的安全课题。因此各国适航法规中都明确规定审查方需将新技术作为审查重点，例如，在我国 AP-21-AA-2011-03-R4《航空器型号合格审定程序》4.2.2“必要的信息”中，要求工业方必须提交“新设计、新技术、新材料、新工艺等有关说明或报告”，将其作为重要问题进行识别和计划。对新技术的审查实际上也是度量新技术与适航规章要求之间差距的过程，无疑会推动适航规章的修订和完善。另一方面，由于适航规章对安全的关注，基于事故总结而新增或修订的条款要求，也会牵引新技术的发展方向，开辟新的研究领域。可以说，新技术的发展是与适航规章的完善相辅相成的。

新技术应用推动适航规章的修订

新技术应用推动适航规章要求的不断完善

新技术虽然是适航审查的重点，但并不会导致适航规章的立即修订。一般来说，采用了新技术，工业方须向适航审查方提交相关符合性验证的说明文件。如果审查方判断新技术未能被现有适航法规要求覆盖，最初均会采用制定专用条件的方式进行审查控制。只有新技术被广泛使用，才会逐步转为适航规章，提出相应的验证方法要求。

控制系统适航条款的修订就是典型的由新技术发展引发适航规章修订的案例。航空发动机控制经历了液压机械式控制、机械和模拟/数字电子控制并存、全权限数字式电子控制（FADEC）几个阶段。20 世纪 70 年代初期，模拟和数字电子控制系统进入应用阶段并得到迅速发展。美国联邦航空局（FAA）从 1977 年即开始关注数字式电子控制系统相关适航条款的制定，多次征求工业方的意见和建议。在 1984 年推出了发动机电子控制系统的相关标准

草案，针对电子控制系统的设计与构造、环境限制、软件等提出要求。在1993年8月16日正式新增第33.28条“发动机电器和电子控制系统”。在此之前，有多款配装FADEC系统的飞机在取证时制定了专用条件。例如，FAA针对配装波音747-400飞机的FADEC系统的发动机，在1987年发布专用条件 No.25-ANM-24，明确要求工业方必须证实电子控制系统的完整性和可靠性与机械液压系统相当。第33.28条推出后，随着FADEC技术的不断推广，不再局限于GE、普惠和罗罗等几大制造商使用时，FAA在2001年推出了辅助条款解读的咨询通告AC28-1，给出了建议的符合性验证指南。

新技术应用逐步提高适航规章要求

新技术在推动适航规章修订的同时，实质上也逐渐抬高了民用航空发动机的市场准入门槛。环保相关的适航要求很明显地反映出这一趋势。随着航空运输活动的急剧增长以及公众环保意识的不断提升，环保相关的污染排放和噪声已纳入适航法规要求。欧美主要航空工业巨头在不断加强低污染和低噪声设计技术发展的同时，也不断推动相关环保适航规章的修订，环保要求日趋严苛。

以污染排放要求为例，国际民航组织（ICAO）于1983年成立了航空环境保护委员会（CAEP），负责研究并提出旨在最大化减少航空业对环境产生影响的方法，包括制定航空器噪声和排放的标准。1986—2010年，共有5个标准先后制定和实行，分别是CAEP/1、CAEP/2、CAEP/4、CAEP/6和CAEP/8。从

CAEP/1到CAEP/8，对氮氧化物 NO_x 的排放要求日趋严格，后一个标准与前一个标准相比，后者分别降低了20%、16.5%、12%和15%。

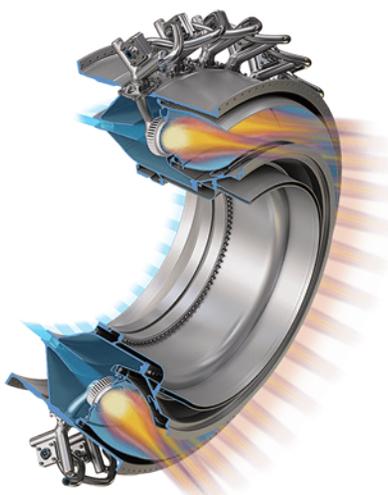
CAEP在 NO_x 排放方面标准的制定原则是紧跟航空发动机燃烧室技术成果。在制定 NO_x 限值标准的时候，将参考近几年来通过验证的新型发动机排放指标。美国和欧洲针对低污染燃烧技术的研究制订了一系列研究计划，例如，美国国家航空航天局（NASA）/GE实验清洁燃烧室项目（ECCP）、NASA/GE节能高效发动机项目（E³）、NASA先进亚声速飞机技术（AST）、超高效发动机技术（UEET）以及欧洲的清洁天空计划等。在这些计划的支持下，GE、普惠和罗罗公司新一代发动机的污染排放水平进一步降低。GE公司2009年认证的GENx系列发动机采用了双环预混旋流（TAPS）低污染燃烧室， NO_x 排放相比CAEP/6标准降低了50%~65.8%。普惠公司在2000年左右推出应用先进低氮氧化物排放（TALON）II燃烧室的发动机， NO_x 排放相比CAEP/6标准降

低了15%以上。罗罗公司2006年通过验证的遑达970-84和遑达972-84的 NO_x 排放相比CAEP/6标准降低了25%左右。在上述航空发动机巨头的技术支持下，ICAO针对未来的 NO_x 排放水平提出的远期目标（2026年）比CAEP/6标准低60%。可以说，未来对于民用航空发动机新入场者，环保的要求已成为一道越来越高的门槛。

适航规章促进新技术发展 适航规章修订引发技术研发热点

由于适航主要关注安全，因此事故的经验教训也是适航规章条款制定或修订的一个重要推手。如果在排故过程中发现有可能导致机毁人亡灾难性事故的因素，适航管理部门将会及时推出适航指令，并规划条款修订。这样的例子很多，例如，FAR-33部中新增的33.70条限寿件要求、33.76条吸鸟的大型群鸟验证要求、25部附录C过冷大粒径水滴（SLD）环境要求，以及欧洲航空安全局（EASA）在2015年CS-E第4号修正案中，针对1050条新增要求考虑发动机暴露在危险火山灰中所受的影响等。

欧美适航当局在规划这些条款修订的同时，会牵头组织几大主要发动机制造商开展一系列的研究工作，这些信息同样也会在其他国家激起相关领域的研发热潮。以新增的33.70条“发动机限寿件”为例，条款推出的动因起源于美国1989年苏城空难和1996年潘城空难。苏城空难是由含有钛合金低密度夹杂的材料缺陷导致发动机风扇盘失效引发，而潘城空难是由于螺栓孔加工缺陷导致盘失效，造成第一级风扇



TAPS低污染燃烧室



航空发动机吸鸟试验

盘解体诱发的。两次空难暴露出，以往寿命分析采用的完美材料假设，无法对由于材料诱发缺陷所导致的潜在失效进行有效评估。

在FAA的倡导下，美国各大高校和研究所从初始损伤、裂纹扩展、断裂条件、随机变量分布等方面开展了大量概率损伤容限设计研究。美国西南研究院联合GE、普惠等航空发动机制造商开发了基于概率的损伤容限设计分析软件DARWIN。我国学者从20世纪末开始也进行了相关研究，例如，针对涡轮盘的裂纹扩展分析、概率损伤容限风险评定程序研究、多裂纹结构的概率损伤容限分析方法研究等。

新技术与适航规章要求共同促进新的适航验证技术发展

一些适航条款要求实质是立足安全目的的原则要求，对于很多新技术仍然适用。为了表明这些新技术的安全水平符合适航要求，需要探索新的验证思路和方法，从而推动适航验证技术的发展。

多功能集成导致符合性验证的复杂化 由于新一代发动机的结构日趋紧凑，高度集成化设计使很多部

件或附件集成了多项功能，由此带来符合性验证的复杂化。例如，中法合作正在研制的第四代先进涡轴发动机WZ16的附件传动机匣集成了传动、滑油箱、功率输出、滑油系统等多方面的功能，大量集成了内部油路、气路，使附件之间全部采用机匣内部油路连接，大大减少了零件数量，相对以往的发动机，外部管路数量减少了25%~30%。

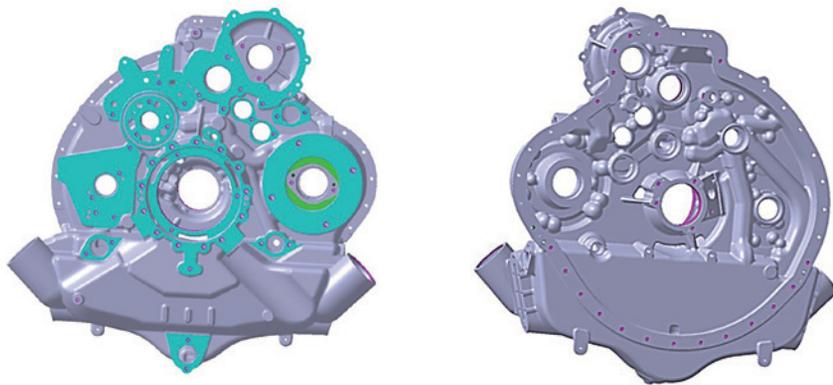
与之相对应的，附件传动机匣需要验证的适航条款也必须覆盖上述功能相关的所有适用条款，例如33.17条“防火”、33.71条“润滑系统”等，因此在安排验证试验时需

要统筹考虑，尽可能地降低验证成本。此外，高度的集成也为单个试验的规划增加了难度，以防火验证为例，附件传动机匣中既有滑油箱也包含多条可燃液体管路，按照咨询通告AC33.17-1A，防火试验的火焰冲击位置应该通过试验件对火的影响最临界特征进行分析或试验确定。显而易见，高度集成的油箱和可燃液体管路增加了分析难度和试验的复杂性。

新材料、新工艺的验证新思路

新材料、新工艺是航空发动机技术进步的重要基础，也是适航审查的重中之重。为确保发动机所用材料的适用性和耐用性，33.15条“材料”要求新材料新工艺的验证建立在充分试验的基础上，通过对大量试验数据的统计分析来表明材料标准和相关工艺规范科学合理，整个加工过程可控，设计中使用的材料性能数据可靠。由于新材料、新工艺往往具有独特的特性，可能与常规金属材料的鉴定方法不同，还需要针对其具体特点规划验证方案。

例如，应用于航空发动机冷端的树脂基复合材料，具有设计、制造、评估一体的特性，每一种新的



WZ16发动机附件传动前机匣组合(含滑油箱)

复合材料都应规划其适用的鉴定程序。鉴定需要以零部件工程化应用为需求，按照积木式验证步骤，逐级开展试样和元件级别试验，用于材料和工艺的选择与验证，并建立材料数据库，然后进行典型结构件、组合件、部件级别的试验，用于结构设计、工艺设计的选择与验证。整个材料的鉴定过程需要适航审查方介入见证。目前比较热门的3D打印技术也存在类似问题，虽然国际上已经有3D打印的部件进入型号服役，但其鉴定思路尚未像复合材料一样形成业内较为统一的方案。

数值仿真验证技术 随着数值仿真技术在航空发动机领域的飞速发展，经试验数据校核的数值仿真分析逐步成为符合性验证不可缺少的组成部分。例如，在进行33.68条“进气系统的结冰”符合性验证时，可以通过数值仿真分析确定关键试验点，结冰的数值模拟用于说明结冰系数和相关空气动力学影响，例如，风扇入口和核心机入口的水收集系数、关键表面的水撞击率、空速影响、发动机结构影响和飞行高度影响等。此外，欧洲的一些公司正推动适航当局接受一些强度方面的试验可用数值仿真验证的方法表明符

合性。例如，欧洲赛峰直升机发动机公司已经采用数值仿真分析的方法替代转子件的低循环疲劳寿命验证试验。

新技术应用的适航策略考虑

对于民用航空发动机，新技术的应用是不可避免的。因此，为确保新技术顺利通过适航审查，有必要针对新技术制定合适的适航策略。

追踪新技术的发展并适时采用

在民用航空发动机市场中，新技术的应用是竞争取胜的重要筹码。欧美各大航空发动机制造商一直持续投入巨资进行新技术研发，不断加大技术领先优势，在引领民用航空发动机发展方向的同时，也推动适航规章要求的不断完善和提升。毫无疑问，对于民用航空发动机市场的新入场者，要获得市场的准入资格，抢占属于自己的市场份额，更应该及时追踪新技术的发展方向，加大新技术的研发力度并适时在产品上应用。

追踪适航规章的修订趋势

我国航空发动机的研制周期通常较长，从研制立项到申请取证往往历时5~10年，在此期间适航规章可能经过多次修订。为确保规章的修订不会影响型号研制进展，在型号研制初期就应该对规章的修订趋势进行追踪。FAA和EASA是世界适航规章编制和修订的引领者，因此工业方可以通过分析FAA和EASA发布的规章修订提案、专用条件、事故调查报告、咨询通告等相关文件，及时掌握适航规章的修订进展，了解适航规章可能的修订方向。

新技术的验证方案应与研制同步规划

由于新技术是适航管理部门的

审查重点，局方不仅关注新技术最终的应用结果，还关注整个新技术的研发过程，以确保新技术具有足够的成熟度。例如，新材料和新工艺，通常要求提供从原材料制备到最终产品相关的一系列规范及过程控制记录，这些程序复杂且时间跨度大。因此，在民用航空发动机的型号研发中，工业方应在研制初期尽早识别新技术，在研发阶段加大验证力度，努力提升新技术的成熟度，同时及早与局方进行沟通，讨论新技术专用条件的制定及验证方法，以降低研制和取证风险。

结束语

航空发动机能力的提升依赖航空发动机各方面新技术的发展。新技术的应用在不断提升发动机性能、可靠性、经济性等的同时，也为航空发动机整体的安全性引入了新的不确定因素，为适航认证带来了新的课题。

总之，新技术的发展促进了适航规章的修订完善，而适航规章的更新也促进了新技术在整个行业内的推广，实质上提高了整个民用航空发动机产业的安全水平。对于有意角逐民机市场的新入场者，既需要不断追踪新技术的发展，规避未来适航认证中因规章修订导致的潜在风险，也需要关注适航规章的修订趋势，及时把握新技术的发展方向。在项目研制初期，尽早规划新技术相关的适航策略，加大适航验证相关技术、设备的研发投入，确保最终产品适航认证的顺利开展。

航空动力

(单晓明，中国航发研所副总设计师，研究员，主要从事航空发动机设计、试验测试以及适航研究。)



GE公司3D打印的薄壁燃烧室火焰筒