DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.04.020

航空发动机下一代适航规章制定策略和技术路径

尹泽勇[1]，丁水汀[2,3]，李果[3]，邱天[3]，刘传凯[3]，周煜[3]，綦蕾[3]

（1. 中国航空发动机集团有限公司，北京 100097；2. 中国民航大学，天津 300300；
3. 北京航空航天大学航空发动机研究院，北京 100191）

摘要：适航规章是民用航空产品安全性的核心保障，是民航强国、航空强国的重要标志。完善的适航规章体系是民用航空工业发达国家合理利用国际民航组织规则，保障民用航空产品安全性和最广泛市场占有率的技术与管理手段；随着我国大型飞机、航空发动机和燃气轮机重大科技专项的实施，进一步完善我国适航规章体系建设必要且紧迫。本文深入剖析了航空发动机适航规章的技术内涵，系统梳理了当前国内外航空发动机适航规章存在的突出问题，在此基础上从国际民航组织和我国民用航空工业两个视角，开展了航空发动机下一代适航规章的制定策略和技术路径研究。本文研究结果明确了以“系统安全要求”为统领，以“安全等效、逻辑清晰、国际兼容、本土适用”为原则的航空发动机下一代适航规章制定策略和技术路径；提出了航空发动机适航规章顶层新架构，该架构在充分继承国际上已有经验教训、安全标准不降低的同时，更加适应航空发动机在系统安全性技术方面的进步，且可灵活适应航空发动机新技术发展和创新。最后，针对我国航空发动机适航规章体系建设，提出了持续深化研究、同步扩大应用、行业协同发展的对策建议。

关键词：下一代适航规章；航空发动机；新规章架构；系统安全要求

中图分类号：V23　　**文献标识码：**A

Formulating Strategy and Technology Path for Next-Generation Airworthiness Regulations of Aero-Engines

Yin Zeyong [1], Ding Shuiting [2,3], Li Guo [3], Qiu Tian [3], Liu Chuankai [3], Zhou Yu [3], Qi Lei [3]

(1. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China; 2. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Airworthiness regulations are key for guaranteeing the safety of civil aviation products and a significant indication of a nation’s aviation power. A well-developed airworthiness regulation system is an effective technical and management means by which a country with an advanced aviation industry ensures the safety of its civil aviation products and occupies the broadest market share while using International Civil Aviation Organization (ICAO) rules. As major national science and technology projects for large aircraft, aero-engines, and gas turbines are implemented, it is imperative for China to further improve its airworthiness regulation system. In this study, we clarify the implications of aero-engine airworthiness regulations and summarize the problems regarding aero-engine airworthiness regulations both in China and abroad. Based on this, the formation strategy and technical path for the next-

收稿日期：2022-04-10；**修回日期：**2022-07-05

通讯作者：丁水汀，中国民航大学教授，研究方向为航空发动机系统安全性与适航；E-mail: dst@buaa.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“航空发动机自主适航规章的制定策略和技术路径研究”(2019-XY-73)，“中国航空发动机自主适航规章的顶层架构和瓶颈技术簇特征研究”(2020-XZ-01)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

generation airworthiness regulations of aero-engines are explored from the perspectives of ICAO and China's civil aviation industry. The formulation strategy emphasizes the requirement for system safety, and specific principles include an equivalent level of safety, clear logic, international compatibility, and local applicability. Moreover, a new top-level framework for the aero-engine airworthiness regulations is proposed; it inherits the international lessons learned, ensures a high safety standard, and adapts to the progress of system safety technologies of aero-engines. Furthermore, we suggest that China should continuously deepen the research, simultaneously expand application, and coordinate industry development, thus to promote the construction of the aero-engine airworthiness regulation system in China.

Keywords: next-generation airworthiness regulations; aero-engines; new regulation framework; requirement for system safety

一、前言

2018年，中国民用航空局印发的《新时代民航强国建设行动纲要》指出，实现民航强国目标，需要重点完成包括增强制定国际民航规则标准的主导权和话语权、培育引领国际民航业发展的创新能力等8项主要任务 [1]。纵观历史，国际民航标准的主导地位和话语权是世界民用航空强国之间竞争的最高层级，也是争夺最为激烈的主战场，为此，拥有标准话语权及主动地位，对一个国家民航业拥有国际和地区市场地位至关重要。

适航规章是民用航空产品安全性的核心保障，是民用航空工业发展核心竞争力的重要组成部分，是民航强国、航空强国的重要标志，也是我国大型飞机、航空发动机和燃气轮机重大科技专项成功实施的关键，具有重要的战略地位。世界民用航空强国无不把适航规章建设置于极为重要的战略高度，最大限度地扩展其影响力。目前，美国、欧洲和我国已分别建立了具有世界最广泛影响力的适航规章体系，即美国联邦航空局（FAA）的联邦航空规章（FAR）、欧盟航空安全局（EASA）的合格审定规范（CS）和中国民用航空局（CAAC）的中国民用航空规章（CCAR）。美国的航空发动机适航规章从1937年《航空发动机适航标准》（FAR-33）的前身《航空发动机适航规章》（CAR-13）产生开始，先后经历了CAR-13的13次修订改版以及FAR-33的34次修订，最终形成了当前的FAR-33最新修正案 [2]。欧洲的航空发动机适航规章最早可追溯到1926年产生的英国民航适航要求（BCAR），从《发动机合格审定规范》（CS-E）的前身《发动机联合航空要求》（JAR-E）产生开始，先后经历JAR-E的12次修订以及CS-E的6次修订改版后，形成了当前CS-E最新修正案 [3]。我国的航空发动机适航规章主要参考的是FAA的FAR-33，初版CCAR-33颁布于1988年2月9日，技术上等效于FAR-33第11修正案，之后经历了2002年3月20日和2011年3月15日两次修订，其中CCAR-33R1技术上等效于FAR-33第20次修正案，现行有效的CCAR-33R2 [4]与FAR-33第30次修正案安全水平一致。整体来看，适航规章在提升安全性、经济性、鼓励竞争、促进技术进步方面作用显著，在保证民用航空产品安全运行的同时，推动了航空产品安全性水平的不断提升。

统计数据显示，20世纪70年代以来，航空器运行事故的发生率已降低到一定的安全水平并逐渐趋稳。但随着近年来航空运输量的迅猛增长，航空器运行事故的绝对数量也在明显上升，这是公众难以接受的。因此，应随着航空运输量的增长进一步降低事故的发生率，提高民用航空产品的安全性水平。适航规章需继续在提升安全性、增强经济性、鼓励竞争、促进技术进步方面发挥更大的作用，从而推动全球航空产业更加繁荣安全的发展。

本文以支撑我国在研民用航空发动机型号适航取证、促进国际民航领域持续健康发展为目标，深入剖析航空发动机适航规章的技术内涵，系统梳理当前国内外航空发动机适航规章存在的突出问题，在此基础上，从国际民航组织和我国民用航空工业两个视角，开展航空发动机下一代适航规章的制定策略和技术路径研究，提出下一代适航规章的中国方案建议。

二、航空发动机适航规章的三大隐含要求

现有的航空发动机适航规章是在国际民航组织的规则框架下，通过长期工业实践经验的积累，吸取使用过程中的经验教训，经过必要的论证、验证和公开征求公众意见不断修订而成，深层次隐含的技术要求主要有以下三方面。

（一）最低安全标准要求

航空发动机在适航领域主要以所代表的安全性水平进行代际划分。FAA依据在型号设计中是否吸

取了相关运行事件的经验教训对民用大涵道比涡扇发动机进行代际划分：第一代定义为具有20世纪60年代末设计特征的涡扇发动机型号；第二、三、四代均定义为具有吸取了上一代发动机运行经验教训设计特征的涡扇发动机型号[5~7]（见表1）。FAA这种代际划分的核心是“经验教训”：首先通过对运行不安全事件的根本原因分析识别出教训，其次通过规章或解释性文件、政策指导文件等的制定/修订将教训转化为经验，最后通过发动机的设计贯彻和符合性验证加以吸取。第一代大涵道比涡扇发动机处于“全面诞生时期”（20世纪60年代末—70年代末）：以JT9D、CF6等型号为代表的发动机的出现，标志着民用大涵道比涡扇发动机时代的到来；该时期FAA新成立，对CAR-13进行了全面重新编排，形成FAR-33第33-0修正案，此时的适航规章条款内容以经验为主。第二代大涵道比涡扇发动机进入“快速发展时期”（20世纪80年代初—90年代初）：随着民用发动机设计技术的迅速发展，出现了以CFM56、V2500、PW4000等型号为代表的一系列民用大涵道比涡扇发动机；FAR-33也相应的经历了两次大规模修订，如首次引入低循环疲劳寿命、电子控制系统、安全分析等条款，此时系统安全要求开始引入适航规章。第三代和第四代大涵道比涡扇发动机进入“精细化设计和一体化发展时期”（20世纪90年代初—21世纪初），出现了以GE90、GEnx、Trent家族等型号为代表的大涵道比涡扇发动机，各类先进民用发动机设计技术层出不穷；随着系统安全性技术的快速发展，适航规章逐渐趋于系统性与经验性并存，同时在EASA成立及其CS-E规章产生后，欧洲和美国开始了适航规章的一体化进程。由此可见，航空发动机适航规章的不断发展，究其根本代表的是适航规章最低安全标准的逐步提高，即符合适航规章要求的取证发动机最低安全水平的逐步提升。

（二）研制过程保证要求

以航空发动机内部典型系统——控制系统为例，20世纪后期发动机控制系统最具革命性的变化是由液压机械式控制向数字电子式控制的转变。随着航空发动机电子控制系统（EECS）等系统复杂程度的日益增加，由于设计错误直接或间接导致EECS失效的可能性显著增加，传统意义上应用于确定性风险或传统非复杂系统的设计和分析技术无法为复杂系统提供足够的安全保障，为此，基于需

表1　FAA的大涵道比涡扇发动机代际划分

代际[7]	定义[7]	典型发动机型号[7]	审定基础的FAR-33修正案范围	典型适航要求特征
第1代	具有20世纪60年代末的设计特征	JT9D、RB211-22B、CF6-6、CF6-50、CF34-3	33-4及以下（少数33-9）	FAA成立，基于CAR-13全面重新编写FAR-33
第2代	具有吸取第1代经验教训的设计特征	ALF502、ALF507、AE3007、CFE738、CF34-8、TFE731-20/40/60、CF6-80、CFM56-2/-3-5、V2500、PW2000、RB211-535C、RB211-524B4、Tay、PW4000 94"	33-4至33-15（少数33-19或33-20）	经历两次大规模规章修订，典型条款变化：首次引入转子低循环疲劳寿命限制要求、电子控制系统要求、安全分析要求、外物吸入要求等；强化了转子包容性验证要求
第3代	具有吸取第2代经验教训的设计特征	GE90、CFM56-7、CF34-10、PW4000 100"/112"、PW6000、Trent 500、Trent 700、Trent 800、BR710、BR715	33-15至33-20	开始欧美规章一体化进程，典型条款变化：细化抗外物撞击和吸入的环境适应性要求，单独成立吸鸟、吸雨和吸雹条款
第4代	具有吸取第3代经验教训的设计特征	GEnx、GP7000、Trent 900、Trent 1000、BR725	33-20及以上	进一步细化完善条款要求：全面细化安全分析要求；提高吸鸟和结冰环境下安全水平要求；首次引入双发延程飞行（ETOPS）的要求；新增限寿件损伤容限评估、瞬时燃油结冰、复合材料风扇叶片、单粒子效应、基于模型的开发方法和工具等要求

求牵引、研制和系统安全性设计及验证的研制过程保证，成为应用于飞机/发动机及其系统的一种有效方法，解决了因系统复杂程度不断增加所带来的问题，满足了发动机适航规章的安全性目标。航空发动机安全性设计的实质技术内涵是按照美国汽车工程师协会SAE ARP4754 [8]和SAE ARP4761 [9]标准的双“V”系统工程（见图1）开展发动机复杂系统的设计与验证、与发动机研制活动相匹配的安全性分析与验证。当前欧洲航空安全局（EASA）已经在其最新的航空发动机型号审定项目中，将欧洲民用航空设备协会的EUROCAE ED-79A标准（与SAE ARP4754对应的欧洲标准）正式确定为发动机控制系统、安全分析相关适航条款的研制过程保证和安全性要求的符合性方法。因此，航空发动机适航规章实质上隐含了对发动机系统安全性设计相伴随的研制过程保证的要求。

（三）全寿命周期要求

适航管理是以保障民用航空产品安全性为目标的技术管理，是在制定各种最低安全标准的基础上，对民用航空产品全寿命周期安全性相关的设计、制造、验证、使用和维修等环节进行科学统一的审查、鉴定、监督和管理，以确保民用航空产品达到并且持续保持安全可用的状态。虽然航空发动机适航规章主要是应用于初始适航阶段，但其条款内容实际上涉及到航空发动机全寿命周期的设计、制造、验证、使用和维修阶段，确保发动机的使用安全所从事的各项活动。以我国现行有效的《航空发动机适航规定》（CCAR-33R2）为例，在第33.4条“持续适航文件”、第33.5条“发动机安装和使用说明手册”中都规定了发动机在使用和维护过程中有关安全性的相关要求；第33.28条“发动机控制系统的FAA咨询通告”[10,11]明确了软件和复杂电子硬件须按照航空无线电技术委员会RTCA DO-178 [12]和RTCA DO-254 [13]标准完成全寿命周期的计划过程、设计开发过程和综合过程的研制过程保证活动；第33.70条“发动机限寿件”要求，制定相应的工程计划、制造计划和使用管理

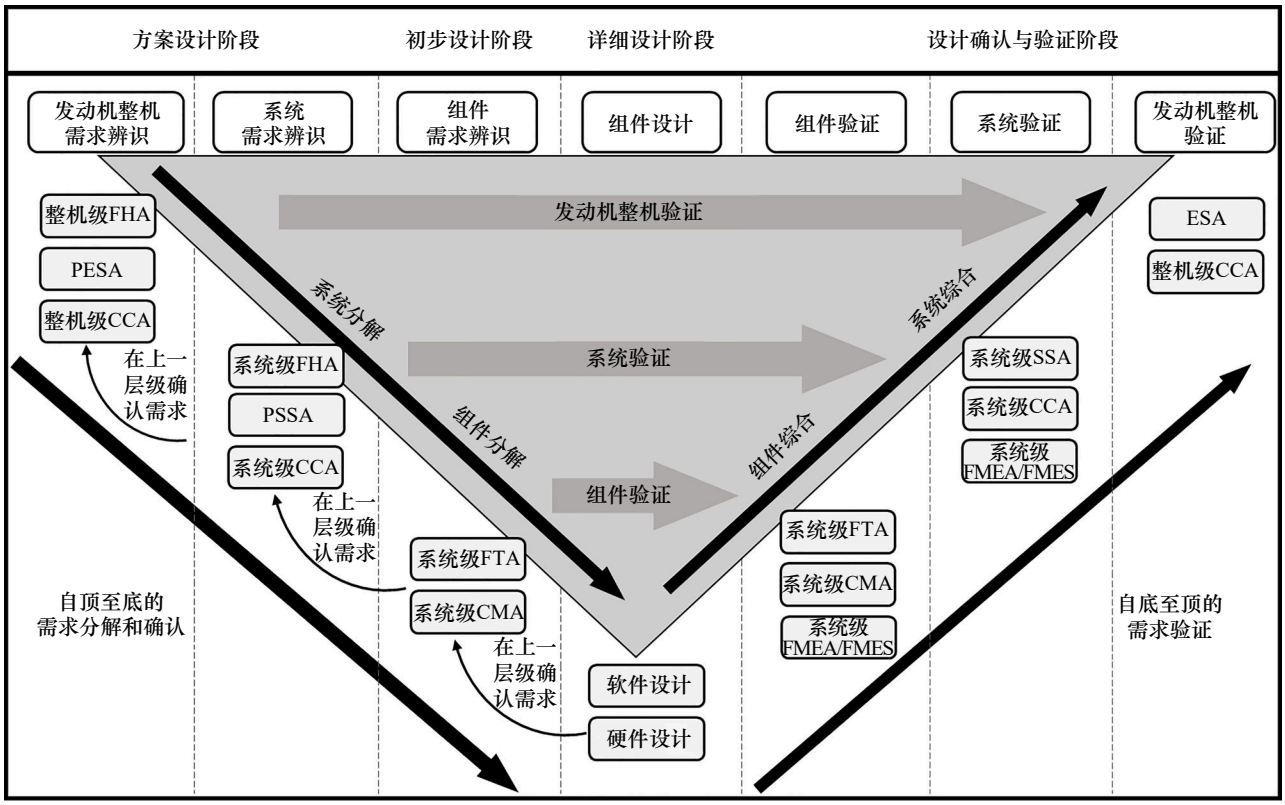

图1　安全性与研制过程相互作用双“V”图 [8]

注：FHA表示功能危险分析；PESA表示初步发动机安全性评估；CCA表示共因分析；PSSA表示初步系统安全性评估；FTA表示故障树分析；CMA表示共模分析；FMEA表示故障模式与影响分析；FMES表示故障模式与影响概要；SSA表示系统安全性评估；ESA表示发动机安全性评估。

计划，以确保发动机结构件具有充分的低循环疲劳寿命，防止发动机在使用过程中发生由于限寿件失效而导致的包括非包容高能碎片、不可控火情等在内的7个危害性发动机后果的顶事件。此外，在开展发动机符合性验证试验时，需要充分考虑使用过程中的结构和性能衰退，以证明发动机整机及其系统、部件在全寿命周期预期工作包线、使用限制范围内功能及耐久性均满足设计预期，能够持续安全运行。

三、当前航空发动机适航规章存在的问题

（一）国际面临的主要问题

纵观全球，FAR-33和CS-E是当前国际上最有代表性的航空发动机适航规章，且在国际主要发动机厂商的推动下，FAR-33与CS-E的条款内容逐渐趋同，但二者的架构始终保持着各自的特色。然而无论是FAR-33还是CS-E，均有较大的历史包袱，虽然在不断发展，但也孕育着危机。

1. 适航规章架构已不适应系统安全性技术进步的要求，系统安全性要求难以贯彻

随着系统安全性技术的快速发展，航空发动机适航规章的系统安全性要求经历了从无到有、从定性到定量的变化过程。1974年FAR-33引入了33.75“安全分析”的定性要求[14]，2007年33.75条款进一步增加了危害性顶事件发生概率的定量要求[15]，这标志着航空发动机适航规章实现从过去的以经验为主向系统性与经验性并存的重大转变。然而，在FAA的法律严谨性和规章逻辑架构历史包袱的双重限制下，FAR-33的逻辑架构仍保持着早期的状态。除了33.75条款之外，其他系统安全性的定量要求因原有架构的局限而分散到其他部分适航条款修订中，导致FAR-33各条款之间交叉重复的内容越来越多，系统安全性要求难以贯彻。

2. 适航规章架构不适应航空发动机技术的发展，缺乏适应新技术和创新的灵活性

在事故案例的经验教训总结、新技术应用、安全性分析技术进步、航空发动机巨头推动的国际一致性等因素的驱动下，FAR-33、CS-E规章经历了多次修订或改版。受早期适航规章架构的限制，在规章修订过程中，各条款为保障自洽性和完备性，条款之间相互关联、交叉重复的内容越来越多，规章也变得愈发臃肿。此外，随着航空动力技术的不断发展，特别是新型动力技术如开式转子、电推进、混合动力等技术的出现，航空发动机设计特征出现了显著的改变，现有规章条款特别是基于符合性方法的条款，已不能很好适应最新的航空发动机设计特征和技术水平，缺乏适应新技术发展和创新的灵活性，为适航审定和取证工作增加了额外的负担。

（二）国内面临的主要问题

FAR-33和CS-E是在欧美工业土壤中成长起来的，其条款划分、技术要求与其工业体系能很好地兼容；而对于俄罗斯、中国等民用航空发动机后发国家来说，客观上存在“水土不服”问题。在后发国家本土特有的工业体系和行业特点下，在以FAR-33和CS-E为蓝本的航空发动机适航规章架构下组织设计、制造、验证、审查和维护航空发动机，面临基础积累不够、符合性表明方法欠缺等问题。

1. 本土数据积累难以支撑现行规章的适航性设计和符合性表明

在表明现行规章，如CCAR-33的33.15“材料”、33.70“发动机限寿件”和33.75“安全分析”条款符合性时，将用到大量材料数据、零部件可靠性数据等。这些数据在欧美数据积累机制下能够获得，且随着欧美民用发动机的长期系列化发展数据库在不断壮大。而对于后发国家，由于本土工业体系和行业特点与欧美规章不十分兼容，本土的数据积累在满足现行规章要求时有的可能不充分或不规范，导致用欧美的方法表明自主或合作研制的民用发动机的适航性困难重重。更为重要的是，没有商业成功后的“反哺”，民用航空发动机研制将成为无源之水，可持续发展的局面难以形成。

2. 本土安全性设计和适航符合性表明方法的创新亟需规章架构的变革

后发国家民用航空产业起步较晚，对图2中的“V”形左侧需求分解部分技术积累相对较少，特别是未全面掌握从系统安全要求向子系统、零部件安全要求的分解方法，安全性要求未能融入并贯穿航空发动机设计全过程。在系统深入研究安全性设计和适航符合性表明方法、逐步完善数据积累机制的同时，充分利用本土已有的研制经验数据和创新研究成果，探索安全性设计和适航符合性表明的新方法和新路径，逐步形成与本土工业水平和技术特点相适应的适航规章体系，是彻底摆脱“跟随”和

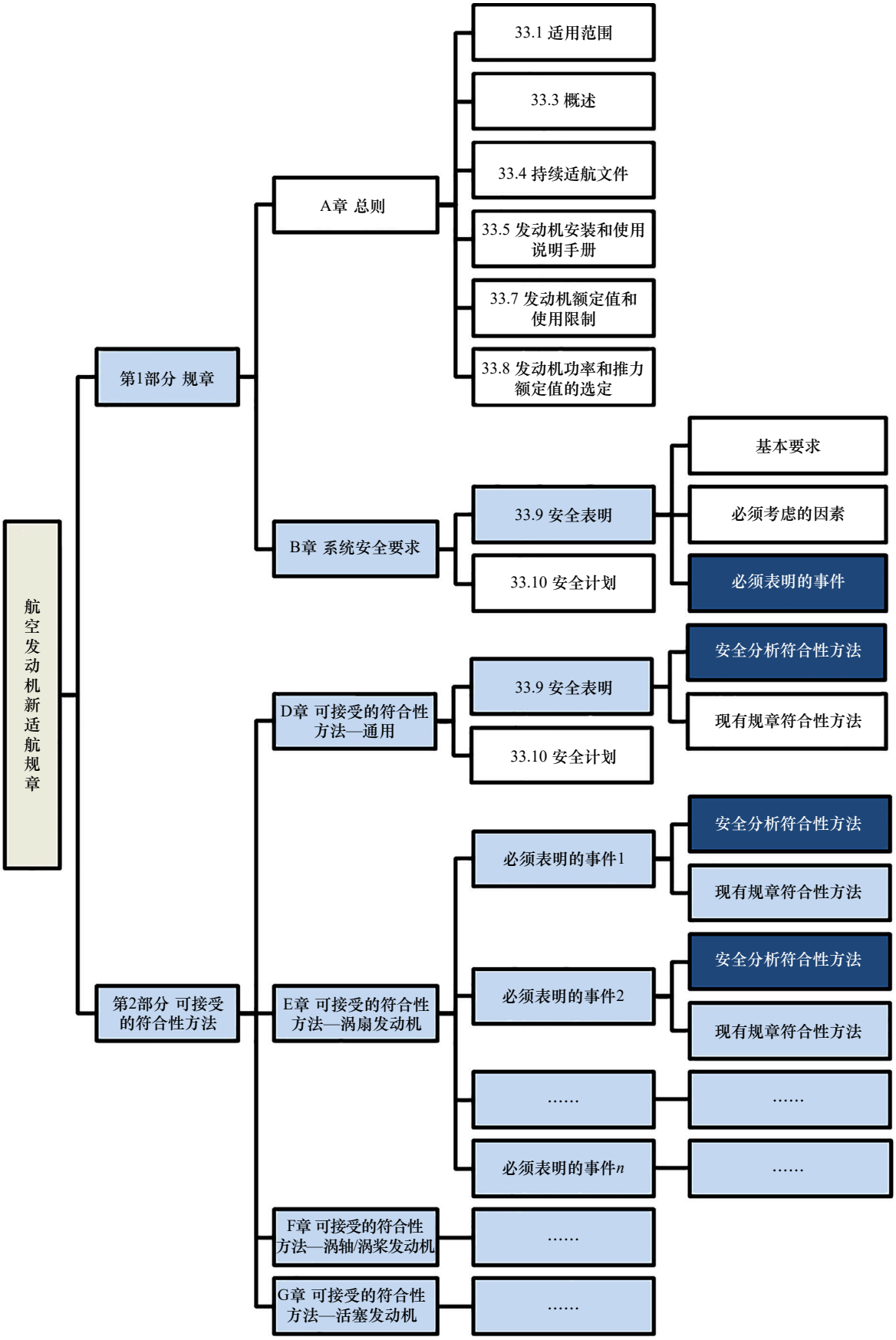

图2　航空发动机适航规章新架构建议

“借鉴”欧美适航规章现状的必经之路。然而，现有规章的架构设计，特别是一些“基于规定”（即明确规定了符合性方法及判定准则）的条款要求在一定程度上限制了安全性设计和符合性表明方法的创新，亟需开展航空发动机适航规章架构的变革。

3. 对适航规章的实质安全意图和基本原理的研究推动规章架构的变革

在本土民用发动机适航取证项目的推动下，后发国家已积累了不少适航规章研究和实践经验。前期这些研究和实践主要集中在欧美现有规章条款要求及其符合性方法和技术层面，对于条款背后所隐含的实质安全意图、基本原理仍缺乏有针对性的系统研究。这导致适航相关的基础理论与工程问题、技术标准有所脱节，本土已有的航空发动机基础研究储备、工程实践数据等无法在实际型号取证，特别是在提出新的适航符合性表明方法和路径方面，未充分发挥其应有的作用，直接阻碍了国产民用发动机型号取证进程和规章的自主编制和修订。随着民用发动机研制实践经验的不断丰富和累积，后发国家已开始注重对适航规章实质安全意图和基本原理的系统深入研究，这将进一步推动航空发动机适航规章架构的优化与变革。

综上所述，为了适应航空发动机行业在系统安全性技术方面的重大进步，促进全球民用航空发动机行业健康发展，同时解决后发国家的适航规章技术要求与本土工业体系、行业特点不适应等问题，开展航空发动机下一代适航规章研究，按照业界的最新认识和最新进展重新梳理航空发动机适航规章架构，已成为当务之急。

四、下一代适航规章的制定策略和技术路径

开展航空发动机下一代适航规章研究将从两个视角出发：一是站在国际民航组织的视角，审视航空发动机适航规章的未来图像，针对当前国际主流航空发动机适航规章存在的问题，从技术发展、立法发展和行业发展的需求出发，形成未来国际发动机适航规章的中国方案，全面促进包括我国在内的国际民航领域的健康发展；二是从我国民用航空工业自身角度出发，针对当前国内民用发动机适航取证和审定中面临的问题，全行业协同联动，共同实现适航标准与基础研究、工程实践深度融合和协同发展的良好格局，逐步形成满足我国民用航空发展需求的适航规章编制和修订体系，积极支撑我国民用航空产业持续高质量发展。

（一）制定策略

针对当前国际和国内航空发动机适航规章面临的问题，本文提出了“安全等效、逻辑清晰、国际兼容、本土适用”的规章制定原则。

1. 安全等效

始终坚守适航的核心要素，即确保民用航空产品的安全性，严守航空发动机适航规章所代表的民用发动机最低安全水平的底线，确保新规章与现有规章相比安全性水平不降低，同时在确保安全水平的基础上考虑安全经济性。

2. 逻辑清晰

以系统安全为统领，重新规划和组织规章的顶层架构设置与条款划分方式，同时整合使用限制条件、等效安全及豁免等适航技术和适航管理难点，实现规章总体架构逻辑更加清晰。

3. 国际兼容

建立促进兼容其他国家工业体系的机制，定期征集全球航空发动机研发、生产企业的意见和建议，以一个核心、多种表述的方式编制规章体系，最终达到新规章的国际互认。

4. 本土适用

紧密结合我国已有和在研军用、民用航空发动机研制实践，按照国内研发、生产特点，形成与现行规章条款符合性方法具有同等安全性水平的其他可接受的符合性方法，逐步实现规章与我国工业水平和技术特点相适应。

（二）技术路径

在安全等效、逻辑清晰、国际兼容、本土适用的原则基础上，采取顶层架构设计先行，以牵引各专业条款的编制与修订，进而完善包括规章和解释性文件等在内的适航规章体系建立的总体思路。具体技术路径如下。

1. 顶层架构设计

系统安全要求统领。将现行欧美规章的“安全分析要求与其他要求并列”的方式，调整为“系统安全要求为统领”的规章新架构（见图2）。同时，

将现有CCAR-33规章的33.75条“安全分析”条款纳入系统安全要求章节，其他条款的安全分析相关事件提取后整合到系统安全要求的总体框架内，对现有其他条款在安全标准等效的前提下进行逻辑重组。

要求与符合性方法分开表述。以“规章+可接受的符合性方法”的结构形式重新组织规章架构（见图3）。对现有规章条款内容进行梳理，区分要求部分和符合性方法部分，第1部分“规章”的系统安全要求主要包含条款要求的内容，采用“基于性能”（即仅明确必须实现的安全结果，而不是如何实现该结果的方法）的表述，侧重安全目标的结果，确保安全标准不降低的同时提供灵活性；第2部分“可接受的符合性方法”主要包含条款符合性方法的内容，采用“基于规定”的表述，侧重安全目标的实现途径和方法，按照不同发动机类型分别进行表述。

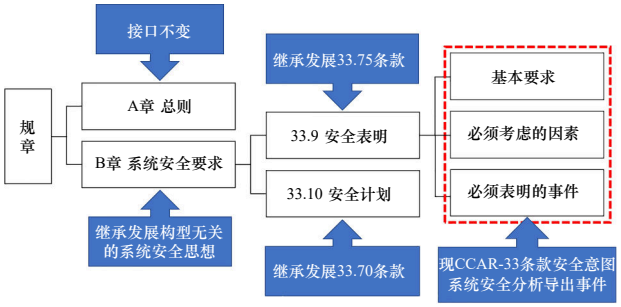

图3　航空发动机适航规章新架构（第1部分 规章）

外部接口保持不变。充分考虑CCAR-33规章与其他管理类、技术类适航规章的相互关联性，如对 CCAR-21、 CCAR-23、 CCAR-25、 CCAR-27、CCAR-29和CCAR-35等规章相关条款的影响，结合这些规章的编制和修订工作同步开展研究，确保与其他规章条款的接口一致或兼容。

2. 条款内容设置

安全意图显性化，安全水平不降低。一方面，深入挖掘条款背后的实质安全意图，重新梳理并转化为系统安全要求中33.9条“安全表明”的必须表明的事件，以条款要求的形式逐条列举，确保与现行适航规章安全等效；另一方面，可通过系统安全分析导出现有规章未覆盖的可能的安全性相关顶事件，确保规章的安全水平不降低（见图3）。

增加符合性表明路径，安全标准不降低的同时提供灵活性。一方面，将现有CCAR-33条款中实质上给出了符合性方法的条款要求内容进行重新梳理，对应33.9条“安全表明”条款中必须表明的事件逐条给出可接受的符合性方法之一，从而保证规章安全标准不降低；另一方面，对于必须表明的事件，还可通过系统安全分析的方法从顶事件发生概率的角度确保其安全性。因此，对应所有必须表明的事件，有3种表明符合性的途径（见图4）：①现有规章导出的符合性方法；②安全分析的符合性方法；③以上两者的结合。3种途径在确保同等安全性水平的前提下具有等价性，同时为适应航空发动

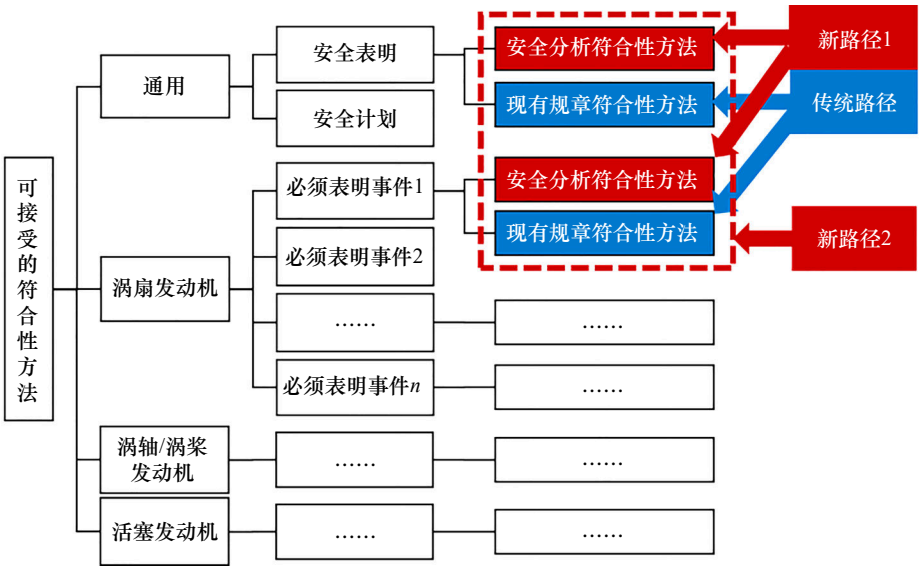

图4　航空发动机适航规章新架构（第2部分 可接受的符合性方法）

机新技术发展和创新提供了新的自由度。

充分借鉴欧美已有经验，严格保证安全标准等效。对体现了当前国际上航空发动机已有研制和运行经验教训的欧美适航规章、解释性文件、政策指导文件等进行全面系统的研究后，消化吸收并转化为新规章架构下的符合性验证方法，纳入以不同发动机类型、必须表明的事件进行划分的可接受的符合性方法框架中，从而严格保证新规章与现行适航规章的安全标准等效。

紧密结合国内研制实践，增强规章本土适用性和反垄断性。国内申请人要深入开展符合性方法研究，加强技术积累，严格按适航规章表明符合性。同时，当发动机型号设计和符合性验证活动无法严格按既有路径表明对现行规章特定条款符合性时，可利用国内已有的军用、民用航空发动机设计、制造、验证、使用和维护相关的经验数据，结合国内实际情况进行总结和凝练，形成与现行规章条款同等安全性水平的要求及其符合性验证方法，纳入新规章条款要求和可接受的符合性方法，在确保安全水平的同时考虑安全经济性，增强规章本土适用性和反垄断性，提高民航标准制定国际话语权和影响力。

（三）规章架构对比

综合下一代适航规章的制定策略和技术路径，新规章与现行规章的架构差异主要体现在4个方面。

1. 总体脉络

现行规章主要根据发动机类型、条款要求或符合性方法类型进行章节划分；新规章架构是在系统安全思想的牵引下，在系统安全要求的统领下进行章节划分。

2. 安全意图体现

现行规章的条款安全意图主要隐藏在条款背后，未明显体现在条款内容中；新规章架构将条款安全意图全面显性化。

3. 符合性方法路径

现行规章符合性方法选择性差（实际上仅有规章要求的一条路径）；新规章架构除了现行规章的符合性方法路径外，新增了利用安全分析表明符合性以及安全分析与现行规章符合性方法二者的结合这两条路径。

4. 编制基础

现行规章是以欧美工业体系和技术路线作为编制基础的，充分吸取了当前国际上航空发动机已有经验教训的积累；新规章将在继承当前国际上已有经验教训的基础上，进一步吸取本土基础研究和型号研制经验。

综上所述，基于本文提出的新适航规章架构和技术路径持续深入开展研究，所形成的航空发动机下一代适航规章中国方案将具备五大特征：以系统安全要求为统领；具有灵活的新技术适应性；可兼容继承国内外已有实践经验；确保安全水平的同时考虑安全经济性；具备适航标准反垄断性。

五、措施与建议

适航规章研究是民航强国建设的重要内容，是我国以民用航空产业高质量发展支撑交通强国建设的一项长期课题，发展适航规章将促进全球航空产业更加繁荣安全。为了保障和推动我国航空发动机适航规章体系建设，持续开展航空发动机下一代适航规章研究，提出以下建议。

（一）持续深化研究

建议适航规章主管部门及民用航空工业主管部门将航空发动机适航规章研究纳入长期科研项目规划。由民机科研项目、民航安全基金项目、“两机”专项共同支持我国航空发动机安全性与适航技术研究，各部委分阶段部署，持续深化开展下一代适航规章的中国方案研究、我国适航规章的制定/修订研究以及基于现有规章的型号研制基础研究等，逐步建立我国航空发动机适航规章体系建设的长效机制。

（二）同步扩大应用

建议工业部门进一步加强“航空发动机适航规章研究”与“民用航空动力研制”的紧密结合。在当前已建立的规章研究团队与型号工程团队联合论证机制的基础上，进一步扩大联合论证的民用航空动力型号工程团队范围，加强联合论证的融合度，以规章制定/修订来牵引工程实践、以型号研制取证促进规章研究，逐步形成航空发动机适航规章制定与型号工程实践协同融合的常态化机制。

（三）行业协同发展

建议中国民用航空局携手工业和信息化部，联合军方适航机构、工业部门、高校和国外相关机构，系统地开展航空发动机适航规章编制及其符合性技术研究。以知识产权、成果转移转化为纽带，建立军 / 民机适航部门、工业部门、高等院校、国际资源“四位一体”的“产学研”深度融合的技术创新体系，协同开展航空发动机安全性设计和适航符合性技术重大瓶颈技术攻关，为我国航空发动机适航规章体系的建立奠定技术基础。

参考文献

[1] 中国民用航空局 . 新时代民航强国建设行动纲要 [EB/OL]. (2018-11-26) [2022-06-20]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201812/t20181212_193447.html.
Civil Aviation Administration of China. Action plan for building a strong civil aviation country in the new era [EB/OL]. (2018-11-26) [2022-06-20]. http: //www. caac. gov. cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201812/t20181212_193447.html.

[2] Federal Aviation Administration. FAR part 33 Amendment 33-34 airworthiness standards: Engines [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2014.

[3] European Aviation Safety Agency. CS-E Amendment 6 certification specifications and acceptable means of compliance for engines [S]. Cologne: European Aviation Safety Agency, 2020.

[4] 中国民用航空局 . CCAR-33R2 航空发动机适航规定 [EB/OL]. (2016-05-17) [2022-06-20]. http: //www. caac. gov. cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201606/t20160622_38639.html.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-33R2 aeroengine airworthiness regulations [EB/OL]. (2016-03-17) [2022-06-20]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/MHGZ/201606/t20160622_38639.html.

[5] Federal Aviation Administration, Aerospace Industries Association. Technical report on propulsion system and Auxiliary Power Unit (APU) related aircraft safety hazards [R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1999.

[6] Federal Aviation Administration, Aerospace Industries Association. 2nd technical report on propulsion system and Auxiliary Power Unit (APU) related aircraft safety hazards [R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2005.

[7] Federal Aviation Administration, Aerospace Industries Association. 3rd technical report on propulsion system and Auxiliary Power Unit (APU) related aircraft safety hazards [R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2017.

[8] Society of Automotive Engineers. SAE ARP4754—2010 guidelines for development of civil aircraft and systems [S]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, 2010.

[9] Society of Automotive Engineers. SAE ARP4761—1996 guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment [S]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, 1996.

[10] Federal Aviation Administration. AC 20-115C airborne software assurance [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2013.

[11] Federal Aviation Administration. AC 20-152 RTCA, Inc., RTCA/DO-document254, design assurance guidance for airborne electronic hardware [EB/OL]. (2007-07-05) [2022-06-20]. https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/22211.

[12] Radio Technical Commission for Aeronautics. Software considerations in airborne systems and equipment certification: RTCA DO-178C-2011 [S]. Washington DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2011.

[13] Radio Technical Commission for Aeronautics. Design assurance guidance for airborne electronic hardware: RTCA DO-254-2000 [S]. Washington DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2000.

[14] Federal Aviation Administration. FAR part 33.75 amendment 33-6 safety analysis [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 1974.

[15] Federal Aviation Administration. FAR part 33.75 amendment 33-24 safety analysis [S]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2007.