

单发失效状态相关发动机适航验证要求

Requirements of OEI Related Engine Airworthiness Verification

■ 查筱晨 张森 / 中国民用航空适航审定中心 苏聚英 卢永强 / 中国航发动研所

配备双发或多发的旋翼航空器通常具备单发失效（OEI）功率状态，即短时高应急功率状态。适航规章对旋翼航空器在遭遇单发失效的情况下能安全结束飞行而不出现意外事故提出了要求。

单发失效（OEI）功率状态是为了双发或多发航空器应对空中运行时由于供油或进气不良、机械故障、云中积冰及防冰系统使用不当等常见原因可能导致的发动机停车现象。旋翼航空器通常是垂直起降，没有足够的跑道或直升机机场，在起飞或着陆等需要大功率的关键飞行阶段出现单发失效时，为确保仍有足够的功率实现安全着陆，剩余发动机需应用短时高功率应急功率状态，其使用场景如图1所示。该状态可能导致发动机零部件损伤或寿命损耗，为确保安全性水平，在CCAR-33部《航空发动机适航规定》中，包含了对OEI状态的设计、验证及适航限制条款要求，规章中提到了5种OEI功率分别是：30s单发失效功率、2min单发失效功率、2.5min单发失效功率、30min单发失效功率和连续单发失效功率，需要对其加以验证。

单发失效功率状态

在对单发失效相关适航规章和相关技术资料的研究过程中发现，美国适航体系针对OEI经历了多次前身概念及现今定义的修订，具有完整的历史演变过程。

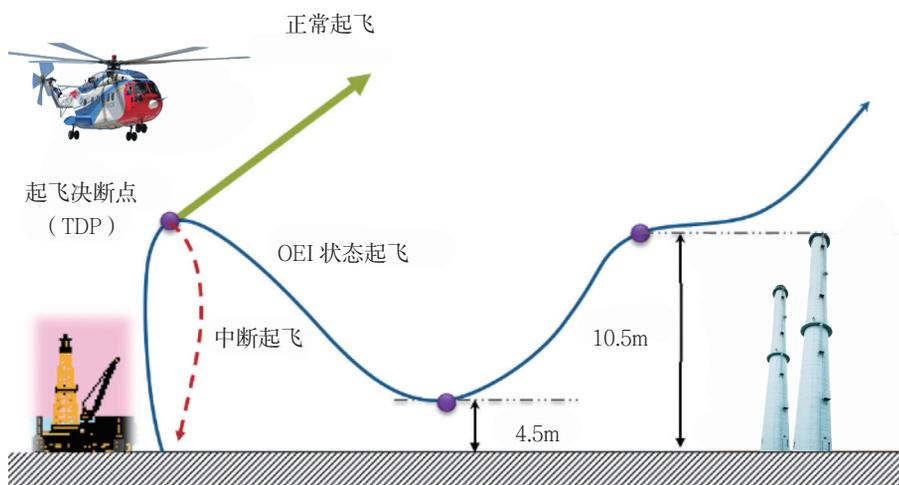


图1 单发失效状态使用场景

30min 单发失效功率

1963年2月12日起生效的CAR-13部第5修正案中，美国联邦航空局（FAA）为多发运输类旋翼航空器建立了一个新的30min额定功率，随后在适航要求中纳入了新的持久试验谱以验证该额定功率。30min额定功率是一项更高的功率，大于最大连续功率以及大于等于起飞功率。这项功率等级建立的来源依据是在多发旋翼航空器的应用中出现了一种使用频率较高的场景，即一台发动机失效，其余发动机以其最大功率运行，在此情况下仍然能够确保旋翼航空器正常的起飞和爬升性能，提升航空器安全运行等级。由此得

出，30min额定功率的建立是必要的。

根据当时工业界的意见，FAA同意这项新的额定功率应是可选的，只适用于多发旋翼航空器，并且只有申请人选择申请这项额定功率，才需要进行相应适航验证。

2.5min 单发失效功率

1964年4月22日起生效的CAR-13部第6修正案，为多发运输类旋翼航空器建立了一个新的2.5min额定功率。2.5min额定功率是一个更高的大于起飞功率的额定功率。使用场景是“起飞开始后的任何时刻，一台发动机失效时，旋翼航空器有可能返回并安全停在起飞区域，或者继续起飞爬升；在着陆进近路径的

任何一点上，当一台发动机失效时，旋翼航空器有可能安全着陆停机，或安全爬升。”因此需要确定一个额定功率，大于起飞功率，使用时间限制为2.5min，以确定多发旋翼航空器单发失效时的起飞和进近性能。随着分析技术的发展，FAA提出了更高的功率等级，是因为根据材料蠕变性能分析来评估既定额定值的可靠性时，发现发动机还可以达到比现有额定功率水平更高的温度和转速。在更高的叶片温度和机械载荷下，通过涡轮叶片蠕变分析发现，叶片的使用寿命仍然可以达标，从而得到了更高的功率和性能的限制，该限制的合理性也能够通过发动机圆满完成持久试验来证实。同时，这一更高的功率等级有着严格的使用限制，在温度和/或转速略高于其既定极限的情况下继续运行特定发动机可能会导致使用寿命显著缩短，只有在起飞或接近着陆时发动机发生故障，才需要2.5min的额定功率，而这一额定功率的建立是必要的。

连续单发失效功率

1988年10月3日生效的FAR-33部第12修正案，首次直接引入了单发失效的概念，具体包括连续单发失效额定功率、30min单发失效额定功率、2.5min单发失效额定功率。新增了连续单发失效额定功率，30min单发失效额定功率和2.5min单发失效额定功率则是在原有基础上加上了“单发失效”短语，目的是为了明确说明使用这些额定值的操作限制，是在多发旋翼航空器的单发出现故障后。在修订说明中，记录了连续单发失效额定功率的需求来源主要是那些为远距离海上石油钻井活动提供服务的旋翼航

空器，它们需要更长一些的航线结构。20世纪80年代末，30min单发失效和连续单发失效在欧洲旋翼航空器中已经存在，都属于中级应急功率。FAA认为如果没有类似的评级，FAA批准的旋翼航空器将面临明显的经济劣势。另外，不能同时使用30min单发失效和连续单发失效这两种评级，推测原因是这两种功率等级比较接近。

30s单发失效和2min单发失效功率

1996年8月19日生效的FAR-33部第18修正案首次建立了30s和2min单发失效额定功率，高于当前所有单发失效功率水平。与2.5min单发失效额定值的功能类似，新的单发失效也是为了保证多发旋翼航空器单发失效时起飞和着陆性能。当旋翼航空器在起飞和着陆时发生单发失效，剩余动力不足以继续飞行时，需要在整个飞行路径上有一个安全着陆区，对安全着陆区需要

有一定的距离范围要求，旋翼航空器要有足够的时间可以到达。30s和2min单发失效额定功率应对的是更恶劣的飞行环境，周围不存在合适的安全着陆区（如山区），这时候就需要一个更大的发动机功率等级。

根据工业界的建议，30s和2min单发失效额定功率应包含一个特定的限制，即在每一次飞行中，这些功率可以使用的次数应有限，FAA采纳了意见，将新功率级别的使用限制为最多3个循环，并增加了使用新功率级别后的强制性检查和规定维护要求。

FAA在AC 33.7-1涡轮发动机的额定值和使用限制的附录2中记录了涡轮发动机额定值定义的修订历史，其中与单发失效额定功率相关的时间节点如表1所示。

相关规章要求

CCAR-33部中与单发失效额定功率相关的适航条款可大致分为手册类、

表1 OEI额定功率修订历史

功率等级	修订时间	修订结果
30min单发失效额定功率	1963年2月12日	30min额定功率
	1965年2月1日	30min功率
	1967年4月3日	额定30min功率
	1988年10月3日	30min单发失效额定功率
2.5min单发失效额定功率	1964年4月22日	2.5min额定功率
	1965年2月1日	2.5min功率
	1967年4月3日	额定2.5min功率
	1988年10月3日	2.5min单发失效额定功率
连续单发失效额定功率	1988年10月3日	连续单发失效额定功率
2min和30s单发失效额定功率	1996年8月19日	2min和30s单发失效额定功率

设计类、试验类与未直接提及OEI短语类。

手册类

手册类条款主要包括33.5、33.7以及附录A33.4，分别涉及发动机持续适航文件、安装和使用说明手册以及型号合格证数据单。

33.5发动机安装和使用说明手册(b)(4)要求手册中必须包括的内容中有“对于有一个或多个OEI额定功率的旋翼航空器发动机，申请人必须提供发动机性能特性和变化的数据，以使航空器制造商能够建立航空器功率保证程序”，即要求发动机申请人向航空器制造商提供发动机数据。对于该功率保证程序，必须通过程序的实际操作来确保该程序具有良好的可操作性。由于功率保证数据不包括由于发动机硬件可能快速劣化而导致的最高单发失效额定功率水平的检查，申请人必须向发动机安装人员提供必要的发动机性能特征和可变性。该数据将使安装人员能够建立功率保证程序，从而能够将功率提升至最高单发失效额定功率。发动机数据应包括热力学模型，在开发和认证测试期间从经验中获得的数据，以及从类似设计发动机的服务经验中获得的数据。

33.7发动机额定值和使用限制要求如果选择了额定30 min单发失效功率、额定2.5min单发失效功率、额定连续单发失效功率、额定2 min单发失效功率、额定30s单发失效功率，必须将功率状态功率值及相关的限制值记录在型号合格证数据单中。

附录A33.4适航限制条款要求中有一个段落用于具有30s和2min单

发失效评级的旋翼机发动机。该功率在服务中使用有限，使用后进行强制检查和维护，原因在于一些发动机零件或部件可能不适合进一步使用，在应用这些额定值后需要更换。使用30s和2min单发失效额定值后的强制性检查和维护措施必须能够识别和纠正任何可能显著降低后续发动机可靠性或阻止发动机达到30s和2min单发失效额定功率的部件损坏，保持发动机处于单发失效安全飞行状态。申请人必须确认所需检查和维护措施的充分性，所需的检查和维护措施通常通过取证试验确定，并辅以取证时具有类似设计的同类型发动机的开发试验和服务经验。

设计类

设计类条款主要包括33.28、33.29，分别涉及发动机控制系统和仪表连接。

33.28控制系统(k)款要求了30s单发失效额定功率控制和自动可用性。具体形式为申请人应在安装说明手册中对30s单发失效功率可用性进行说明，通过试验表明控制系统能够自动控制30s单发失效的额定功率，并且不会出现发动机超限。

33.29仪表连接(c)款和(d)款要求具有30s和2min单发失效功率额定值的旋翼航空器涡轮发动机必须提供方法或措施，以便在进入或退出相应功率状态时，能够提示飞行员；记录每次单发失效功率状态的使用及持续时间；主动提示维修人员已经使用单发失效功率状态，并提供记录数据的输出接口；允许对以上3种方法是否正确运行进行常规的验证；30s和2min单发失效功率状态在飞行中使用的次数和持续时

间等记录参数在飞行过程中不允许被复位，只能由维修人员在检索记录数据后重置。

试验类

试验类条款主要包括33.84、33.85、33.87、33.88、33.93，分别涉及发动机的超扭、校准、持久、超温、部件试验和分解检查。

33.84发动机超扭试验(b)款要求超扭试验的试验条件必须满足：当工作在与30s或2min单发失效功率状态无关的条件下，涡轮进口燃气温度应等于已批准的工作时间长于20s期间的最高稳态温度。

33.85校准试验、33.87持久试验、33.93分解检查是对持久试验进行中及试验前后提出的要求，对于具有30s、2min或2.5min单发失效额定值的发动机，可使用在33.87中规定的持久试验期间进行的测量，以表明其符合限制要求。33.87持久试验条款中，对单发失效功率状态提出了明确的验证时间的要求。如果旋翼航空器需要申请单发失效功率额定值，不同的单发失效功率额定值对应了不同的验证时间，如表2所示。

33.88发动机超温试验(b)款要求带有自动温度控制功能的发动机，如需要申请30s和2min单发失效功率状态，则必须在30s单发失效功率额定值至少超过工作限制温度19℃时，以接通最大功率转速运转4min。在此运转后，只要通过局方认为必要的分析或试验表明发动机能保持涡轮部件的完整性，则在涡轮部件上可以有超出该超温条件限制范围的损伤。

未直接表明类

有一些条款在文字中并未直接

表2 33.87持久试验条款OEI状态的验证时间要求

条款编号	单发失效功率额定值	试验时间
33.87 (c)	要求30min单发失效功率额定值的旋翼航空器发动机	30min
33.87 (d)	要求连续单发失效功率额定值的旋翼航空器发动机	1h
33.87 (e)	要求2.5min单发失效功率额定值的旋翼航空器发动机	两个2.5min以及一个5min, 累计10min
33.87 (f)	要求30s单发失效功率额定值的旋翼航空器发动机	需进行补充试验, 包含8次30s单发失效
	要求2min单发失效功率额定值的旋翼航空器发动机	需进行补充试验, 包含8次2min的单发失效。

提及单发失效字样, 但实际也包含相关要求。

33.4持续适航文件条款, 要求包括修理和维护说明, 选择了30s和2min单发失效功率状态的涡轴发动机必须要向局方提交使用该功率状

态后的修理和维护项目及要

求。33.8发动机功率和推力额定值的选定条款, 要求申请人必须选择功率或推力额定值, 所选额定值必须为该型号的所有发动机在相同条件(用于确定该额定值的条件)下

可能产生的最低功率或推力, 所选额定值包括所有单发失效额定功率。

33.27 涡轮、压气机、风扇和涡轮增压器转子条款, 要求30s单发失效额定值超速试验后转子的状况应确保发动机将有足够的安全裕度, 以便继续运行, 并能够完成30s和2min单发失效功率的3次使用。

航空器规章层面, 单发失效额定功率相关的航空器规章包括CCAR-27正常类旋翼航空器适航规定和CCAR-29运输类旋翼航空器适航规定。以上适航要求可以大致分为两类: 针对航空器(安装具有单发失效额定功率的发动机)自身, 对其安装的发动机并无额外要求, 如爬升率、着陆性能、仪表的标记设置等; 对发动机提出了要求, 但是该要求并未高过发动机规章本身的要求, 如旋翼传动系统和操纵结构试验、爬升冷却试验等, 具体条款编号及名称如表3所示。

表3 航空器规章对OEI状态有验证要求的条款

CCAR-27-R2		CCAR-29-R2		所属章节
27.67	爬升: OEI	29.67	爬升: OEI	B章 飞行
27.75	着陆			
27.87	高度-速度包线			
		29.549	机体和旋翼支撑结构	C章 强度要求
27.923	旋翼传动系统和操纵机构的试验	29.923	旋翼传动系统和操纵机构的试验	E章 动力装置旋翼传动系统
		29.1045	爬升冷却试验程序	冷却
		29.1047	起飞冷却试验程序	
27.1143	发动机操纵机构	29.1143	发动机操纵机构	动力装置的操纵机构和附件
27.1305	动力装置仪表	29.1305	动力装置仪表	F章 设备总则
27.1521	动力装置限制	29.1521	动力装置限制	G章 使用限制和资料使用限制
27.1549	动力装置仪表	29.1549	动力装置仪表	标记和标牌

结束语

单发失效功率的来源为工业应用中实际需要发生使用场景, 并且发动机的相关修订早于航空器规章; 除常规发动机取证试验外, 型号合格证发动机申请人需要建立数据库, 包括航空器功率保证程序所需发动机性能特性和变化的数据、单发失效使用后检查和维护措施数据、发动机转子裂纹增长和损坏工程判据等; 航空器规章中, 发动机配装航空器后无须进一步补充单发失效验证要求。

航空动力

(查筱晨, 中国民用航空适航审定中心, 工程师, 主要从事航空发动机集成专业适航审定工作)