

基于安全性分析的商用航空发动机限寿件制定方法研究及应用

Research and Application of Commercial Aero Engine Life-limited Parts Identification Based on Safety Analysis

■ 韩冰 卢婷婷 吴德龙 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

发动机限寿件是行业公认的最为关键的部件种类之一，一旦失效将导致不可接受的灾难性后果，同时限寿件也是制约发动机使用性与经济性的关键因素。因此，制定合理的限寿件清单可以在保证发动机安全性的同时，提高发动机利用率、降低研制与运行成本。

航空发动机关键转子与主要静子结构件是制约飞机安全性的关键部件，历史上由于此类部件失效引发了数次机毁人亡的事故，为了保障民用航空安全、维护公众安全利益，美国联邦航空局（FAA）及中国民用航空局（CAAC）将原发失效导致危害性发动机后果的转子和主要静子结构件定义为限寿件^[1-2]，并通过《联邦航空条例》（FAR）/《中国民用航空规章》（CCAR）第33.70条对此类部件的设计、制造以及使用管理过程进行了约束，以防止不安全后果的发生。将部件制定为限寿件是保证安全性的重要措施，但也将增加研发与运营的成本。目前，由于我国缺少正向制定发动机限寿件的方法，无法确保限寿件清单的完整性与准确性。基于适航条款要求，针对我国新研商用航空发动机提出基于安全性分析的限寿件正向制定方法，可确保限寿件制定的合理性，在保证发动机安全水平的前提下，提高发动机利用率，避免设计与运营成本被浪费。

限寿件制定概述

制定限寿件清单的目的是明确对安全性有重大影响的发动机结构件，通过约束此类部件的设计、制造及使用，防止不安全后果的发生。恰当的限寿件清单是保证发动机安全性、使用性以及经济性的关键。若将过少的部件作为限寿件，将导致发动机无法达到可接受的安全水平；若将过多的部件作为限寿件，虽确保了发动机安全水平，但因限寿件到寿强制更换导致的发动机大修将严重降低发动机利用率，同时对限寿件的监视、跟踪以及采取的强制性检查也将造成巨大的成本浪费，降低发动机的市场竞争力。

尽管FAA发布的咨询通告（AC）33.70-1指出应通过安全性分析的方法确定限寿件^[3]，但尚未有标准或文献给出基于安全性分析制定限寿件的具体流程。由于我国商用航空发动机研制起步较晚，缺乏研制经验，通常参考相似的成熟机型手册形成限寿件清单，并应用于型号研制中，但此方法存在一定的局限性，新研发动机的材料等关键数据与成熟机

型可能存在差异，无法保证限寿件清单对本型号的适用性，可能导致安全性水平不足或研制及运行成本被严重浪费，同时也难以向适航当局表明限寿件条款的符合性。因此，本文将适航条款要求转化为限寿件判定准则，针对航空发动机的正向设计状态，将限寿件清单的制定融入至安全性分析过程中，提出了基于安全性分析的限寿件制定方法并给出了应用案例，为我国新研商用航空发动机限寿件的制定与CCAR第33.70条（CCAR-33.70）适航符合性的表明提供参考。

制定限寿件判定准则

FAR / CCAR第33.70条明确了发动机限寿件为原发失效可能导致危害性发动机后果的转子和主要静子结构件；同时，AC 33.70-1指明FAR第33.70条所要求识别的限寿件主要关注以低周疲劳为主导失效机理的零部件。例如，发动机通常会设计包容单个叶片的包容结构，单个飞出叶片往往不会导致危害性发动机后果，故叶片通常不作为限寿件；发动机电

子控制器（EEC）虽然对安全有着重要影响，但其失效模式的失效机理并非低周疲劳主导，也无须作为限寿件；再如，燃烧室机匣作为发动机包容结构，也作为压力容器，若具有因内部压力载荷而发生爆裂的风险，则可能产生高能碎片，导致危害性发动机后果，同时其失效机理以低周疲劳为主导，则应作为限寿件。

因此，限寿件的制定必须同时满足两个判定准则：部件原发失效后可能导致危害性发动机后果；该部件失效机理以低周疲劳为主导。

限寿件清单正向制定方法与流程

基于限寿件判定准则，结合航空发动机安全性分析过程^[4]，确定制定限寿件清单的具体流程。

捕获危害性及以上安全性后果

将部件定义为限寿件的首要准则为其原发失效可能导致危害性发动机后果。CCAR-33第33.75条（CCAR-33.75）定义的危害性发动机后果包括非包容的高能碎片、客舱用发动机引气中有毒物质浓度足以使机组人员或乘客失去能力、与飞行员命令的推力方向相反的较大推力、不可控火情、发动机安装系统失效导致非故意的发动机脱开，以及完全失去发动机停车能力。然而，航空发动机作为高度集成复杂系统，在识别限寿件的过程中，若仅仅考虑CCAR-33.75要求的危害性发动机后果，可能存在识别不全面的风险，如发动机控制系统故障可能产生不可控的高推力，将导致飞机两侧出现较大不平衡推力，在特定飞行阶段将造成机毁人亡。因此，应结合系统的评估方法全面识别发动

机故障可能导致的安全性后果。

功能危险性评估（FHA）是安全性分析过程的第一步，通过对系统功能进行全面、综合地检查，识别功能失效状态、评估其失效影响，并根据失效影响确定安全性影响等级。其中，安全性影响等级包括灾难性、危害性、重要的、轻微的以及无安全影响的，限寿件的识别过程中仅需要考虑灾难性及危害性影响等级的安全性后果。因此，基于发动机FHA获得功能失效状态清单，同时结合CCAR-33.75定义的危害性发动机后果，梳理形成完整的发动机安全性后果清单，筛选危害性及以上影响等级的安全性后果，即为可能产生限寿件的安全性后果清单。

识别导致安全性后果的故障模式

捕获可能产生限寿件的安全性后果清单后，以发动机初步系统安全性评估（PSSA）为基础，识别导致危害性及以上影响等级安全性后果的故障模式。

在发动机安全性分析过程中，FHA工作完成后将开展PSSA工作。PSSA是一种自上而下的评估过程，通常采用故障树的分析方法，通过建立故障树模型，确定导致安全性后果的失效原因，分配安全性需求并确定所评估系统预期的设计架构是否满足安全性目标的过程。基于发动机PSSA，确定危害性及以上影响等级安全性后果的故障树模型，生成故障树最小割集；由于2阶及以上最小割集为组合失效，其中的单个底事件发生不会直接导致顶事件的发生，相关零部件无须考虑作为限寿件，因此可通过检查故障树最小割集阶数，筛选1阶最小割集，得到导致危害性及以上影响等级安全性后果的底事件，即

可能产生限寿件的故障模式。

筛选低周疲劳失效机理的零部件

识别导致危害性及以上影响等级安全性后果的故障模式后，需判定故障模式的失效机理是否以低周疲劳为主导。

故障模式及影响分析（FMEA）是识别系统所有可能的故障模式，分析失效机理，确定失效原因，以及分析各故障模式对系统安全、任务等影响的过程，是安全性分析过程中的重要支撑内容。结合发动机FMEA，确定导致危害性及以上影响等级安全性后果故障模式的失效机理，筛选主要失效机理为低周疲劳的失效模式，进而得到以低周疲劳为主导失效机理的零部件。

形成发动机限寿件清单

基于前序分析过程识别到的零部件应作为限寿件，需要关注的是，AC 33.70-1指出如果零部件是由不同的子部件组成，并最终不可分割的形式构成一个独立零部件，只要其中有一个子零部件被确认为发动机限寿件，那么该零部件整体即视为发动机限寿件。最终遍历全部危害性及以上影响等级的安全性后果，形成发动机限寿件清单。

应用案例

为进一步说明上述限寿件清单制定方法，针对商用航空发动机，以部分典型的发动机FHA功能失效状态以及CCAR-33.75定义的危害性发动机后果为例，形成安全性后果清单，针对影响等级不低于危害性的安全性后果进行筛选，作为可能产生限寿件的安全性后果，如表1所示。

表1中可能产生限寿件的安全性后果包括不可控的高推力、完全

表1 可能产生限寿件的安全性后果

安全性后果	影响等级	是否不低于危害性
不可控的高推力	灾难性	是
完全失去发动机停车能力	危害性	是
发动机起动功能丧失	重要的	否
非包容的高能碎片	危害性	是
通告的发动机防冰功能丧失	轻微的	否

失去发动机停车能力以及非包容的高能碎片。其中，导致不可控的高推力以及完全失去发动机停车能力主要为控制系统部件，控制系统具备故障监控措施与冗余设计，根据发动机PSSA，故障树最小割集全部为2阶及以上，即单个零部件失效不会导致不可控的高推力或完全失去发动机停车能力的发生，因此相关的零部件无须考虑作为限寿件。

表2 高压压气机相关限寿件识别过程

识别导致安全性后果的故障模式			筛选低周疲劳为主导失效机理的零部件		
最小割集	是否为1阶	可能产生限寿件的故障模式	故障模式失效机理	是否为低周疲劳	故障模式失效机理为低周疲劳部件
高压压气机1~2级盘破裂	是	高压压气机1~2级盘破裂	局部应力集中引起低周疲劳失效导致破裂	是	高压压气机1~2级盘
高压压气机3级盘破裂	是	高压压气机3级盘破裂	局部应力集中引起低周疲劳失效导致破裂	是	高压压气机3级盘
高压压气机4~9级盘破裂	是	高压压气机4~9级盘破裂	局部应力集中引起低周疲劳失效导致破裂	是	高压压气机4~9级盘
大量高压压气机叶片断裂	否	不适用	不适用	不适用	不适用
高压压气机前轴断裂	是	高压压气机前轴断裂	承受的扭矩和轴向力导致低周疲劳失效	是	高压压气机前轴
高压压气机后封严盘破裂	是	高压压气机后封严盘破裂	局部应力集中引起低周疲劳失效导致破裂	是	高压压气机后封严盘

发动机非包容的高能碎片通常来源于轮盘、轮毂、叶轮破裂，以及高压机匣爆破、大量叶片同时飞出等，涉及的子系统包括风扇增压级、高压压气机、燃烧室、低压涡轮以及高压涡轮。以高压压气机限寿件的识别过程为例，首先结合发动机PSSA，生成非包容的高能碎片故障树高压压气机相关部件的最小割集，检查其最小割集的阶数，得到可能产生高压压气机相关限寿件的故障模式；然后基于FMEA明确故障模式失效机理，筛选以低周疲劳为主导失效机理的零部件，如表2所示。

表2中可以看出，高压压气机1~2级盘、3级盘、4~9级盘、前轴以及后封严盘原发失效后可能导致非包容的高能碎片这一危害性后果，且其失效机理以低周疲劳失效为主导，故以上零部件全部应作为限寿件进行管理。

结束语

航空发动机安全性是影响飞机安全运行的重要因素，制定合理的限寿件清单是保证发动机安全性的重要措施之一。将适航条款要求转化为限寿件判定准则，结合安全性分析过程给出限寿件正向制定方法，通过对限寿件设计、制造及使用过程进行约束，可大大降低此类部件的失效概率，提高发动机安全水平；同时，合理的限寿件清单可提高部件的利用率，避免研制与运营成本被浪费，提高发动机市场竞争力。所提供的方法已应用于型号研制当中，并获得适航认可，可为我国新研航空发动机限寿件的正向制定与适航符合性的表明提供思路。

航空动力

（韩冰，中国航发商用航空发动机有限责任公司，工程师，主要从事航空发动机安全性设计工作）

参考文献

- [1] US department of transportation, federal aviation administration. CFR14 Part33: Airworthiness standards: aircraft engines [S]. Washington DC: FAA,2013.
- [2] CCAR33-R2. 航空发动机适航规定 [S]. 北京: 中国民用航空局. 2012.
- [3] US department of transportation, federal aviation administration. Advisory circular 33.70 -1: guidance material for aircraft engine life limited parts requirements[R]. Washington DC: FAA,AC 33.70-1,2009.
- [4] SAE ARP 4761A, Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment [S].Warrendale:Society of Automotive Engineers, 2023.