

# 航空发动机持续适航文件中的维修间隔研究

王 伟, 刘 帅, 白 杰

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

**摘要:**投入运行的航空发动机主要通过定期维修保持其固有可靠性水平。持续适航文件是以定期维修的维修间隔为核心对维修深度提出要求的法律条款,其中的维修概念与维护手册中的存在差异有待区分;而且手册中只给出维修间隔的具体数值并无其他说明,需要对持续适航文件中的维修间隔进行分析。通过对适航规章的分析揭示了维修间隔的本质,采用定性分析的方法研究了持续适航文件中的维修概念和维修间隔,为航空发动机提供了修正维修间隔的理论依据。

**关键词:**持续适航文件;维修手册;维修间隔;维修深度;航空发动机

中图分类号:V235.13

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.04.018

## Research on Maintenance Intervals in ICA of Aeroengine

WANG Wei, LIU Shuai, BAI Jie

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The aeroengine in operating keeps its inherent reliability using in service maintenance. Instructions for continued airworthiness (ICA) was a legal provision that demands for maintenance depth and taking maintenance intervals in service as core, which maintenance definition was different from that of maintenance manual. The manual only shows exact value rather than other instructions of the maintenance intervals, which needs to be analyzed in the ICA. The essence of the maintenance intervals was revealed by analyzing the airworthiness regulations. The maintenance definition and maintenance intervals were studied by the qualitative analysis in ICA, which provide the theory basis of corrected maintenance intervals for aeroengine.

**Key words:** instructions for continued airworthiness; maintenance manual; maintenance intervals; maintenance depth; aeroengine

## 0 引言

航空发动机的适航管理对于保障飞行器安全运行尤为重要,其目的是保证发动机的适航状态,本质是对航空发动机进行适航性控制的过程[1]。持续适航管理是航空发动机适航管理的一部分,依靠持续适航文件对其适航性进行控制。持续适航文件是用以在航空产品投入使用后,指导运营方正确地使用和维修航空产品,并保持其固有设计水平和可靠性<sup>[1]</sup>,是发动机保证其可靠性水平的重要文件,是发动机型号合格审定的一部分;同时该文件也是制定发动机维修方案的依据,构成了基本维修大纲<sup>[2]</sup>。

航空发动机持续适航文件涵盖维修类型和维修间隔 2 方面。维修类型相对固定,而维修间隔是持续

适航文件的核心<sup>[3]</sup>,在一定程度上选取何种维修类型取决于维修间隔。确定维修间隔一直是维修领域讨论比较激烈的问题。根据 MSG-3 逻辑分析确定,目前确定维修间隔的方法大致分为计算、试验和经验<sup>[3-5]</sup>3 类,其中对分析算法的研究比较广泛,主要是通过建立数学模型,导出间隔的函数关系,最终根据关系式得到维修间隔;试验和经验法分别通过发动机试车试验和以往机型的使用经验确定衍生机型的维修间隔。目前基于案例推理的维修间隔确定方法是在经验法的基础上得到的。尽管确定维修间隔的研究有很多,但对其认识还停留在发动机制造商提供给营运方进行定期检查、维护的 1 个固定的确定间隔。维修间隔是适航法规要求发动机制造商给出并在持续适航

收稿日期:2014-04-22 基金项目:中央高校基本科研业务费专项(ZXH2012J003)和中国民航大学科研启动基金(08QD15X)资助

作者简介:王伟(1977),男,博士,副教授,研究方向为航空发动机适航审定;E-mail:weiwangcauc@126.com。

引用格式:王伟,刘帅,白杰.航空发动机持续适航文件中的维修间隔研究[J].航空发动机,2015,41(4):88-92. WANG Wei, LIU Shuai, BAI Jie. Research on maintenance intervals in ICA of aeroengine[J]. Aeroengine, 2015, 41(4): 88-92.

文件中标明的。维修手册在持续适航文件的基础上编辑而来,维修间隔在文件中和维修手册中的关系和差异尚有待分析研究,对其本质的认识也有待深化。

本文对持续适航文件中维修的概念进行分析,重点从发动机适航条款的角度对持续适航文件中的维修间隔进行阐述并揭示文件和维修手册中维修间隔的关系,并分析其本质,为航空发动机实际维修管理提供理论指导。

## 1 持续适航文件的维修要求

本文分析持续适航文件中的维修概念和任务,同时将持续适航文件与发动机维修手册作比较,论述维修深度和维修间隔的关系。

### 1.1 持续适航文件的维修

词典中解释维修为维护 and 修理<sup>[6]</sup>;日本工业标准中的维修定义为把产品保持在使用及运用状态以及为排除故障和缺陷所进行的一切处置及活动<sup>[6,7]</sup>;对可靠性工程而言,维修是为了确保设备原有的功能与特性,而不是提高其性能<sup>[8]</sup>;FAR43指出,维修是指对飞行器或其部件所进行的任何检测、修理、排故、定期检修、翻修工作<sup>[9]</sup>;FAR1中的维修是指检查、翻修、修理和更换零件,但不包括预防性维修,预防性维修是指简单的或轻微的防腐(保养)操作和更换少量标准件非复杂组件的操作<sup>[10]</sup>。

在不同规章或文献中,维修的含义有所不同,但并不冲突。词典解释是字面意思:维护即维持保护,使不受到破坏;修理即使损坏的东西恢复正常<sup>[6]</sup>。发动机维修的字面含义包括对没有损坏的发动机及其零部件进行维护操作和对损坏的发动机及其零部件进行修理操作。实际上,对发动机维修的研究基本上都是从维修的2方面含义展开的,只是侧重点不同。发动机维修分为修复性与预防性维修,其中修复性维修是指发动机发生故障后使其恢复到规定状态所进行的全部活动;预防性维修通过对发动机进行系统性检查和定期更换以防止功能故障发生,使其保持在规定状态所进行的全部活动<sup>[11]</sup>。FAR43对维修的定义中没有区分预防性维修的概念是由于其适用范围主要针对发动机整机、单元体或零部件即将到寿或已经失效的状态。对于已经达到失效阈值的零部件(FAR43适用范围中涵盖此类)而言,讨论预防性维修没有意义。FAR1区分修复性和预防性维修的概念正是由于维

修一词的2层含义。

因此,投入运行发动机的维修存在恢复和保持,防止故障发生的工作。持续适航文件用于航空发动机使用阶段,其中维修是指包括预防性维修在内的检查、翻修、修理和更换零件的操作。

### 1.2 持续适航文件的维修分析

持续适航文件中的维修概念广义上分为(1)检查的目的是寻找零部件的损伤、故障和不正常的现象,包括目视、详细和特殊详细检查<sup>[8]</sup>;(2)翻修的目的是恢复发动机的使用寿命或适航状态<sup>[12]</sup>,一般针对发动机整机而言,通常根据监控运行中的参数判断翻修时机;(3)修理是对零部件任何损伤或缺陷进行处理使其达到在规定限制范围内继续使用的工作<sup>[9]</sup>,即恢复偏离可用状态的部件;(4)更换零件一般针对发动机限寿件和航线可更换件(LRU);(5)预防性维修是指对发动机及其零部件进行简单的保养和更换少量标准件,目的是为了防止发动机或其零部件失效。

### 1.3 发动机维修手册中的维修要求分析

FAR33.4要求制定发动机持续适航文件,其中包含发动机维护和翻修手册。发动机营运方根据文件并在其基础上编制更为详细的维修手册。与文件不同,手册中的维修分别从5层含义对发动机的维修任务进行规定。

持续适航文件中的发动机维护、翻修手册是针对发动机持续适航的最低要求,发动机营运方编制的发动机维修手册对其维修要求一般会高于文件的要求。手册大致分为维护、翻修、部件修理和装配手册,其中列出整机、零部件的维修间隔(或使用时限)和维修类型。整机的维修主要是返厂翻修。对零部件的维修一般按照能否进行修理进行划分。对不可修理的零部件采取更换操作,进行更换维修的零部件包括限寿件、航线可更换件、封严件和线束等。更换的原因是某些重要件的损伤或缺陷无法通过修理的手段恢复到可用状态。维修性设计理念是为使发动机维修不对飞行器造成延误而提出的航线可更换件的概念。可进行修理维修的零部件需按照手册对其进行相应修理,零部件包括压气机叶片、涡轮叶片、燃烧室和发动机附件等。修理技术主要有焊接、电镀、金属喷涂等。流程一般可以归纳为清洗、检测、修复、后处理(挤压强化或喷丸强化技术)。随着修理技术的发展,对发动机零部件的修理正在向自动化修理的方向发展<sup>[13-14]</sup>。

维修手册更侧重维修类型,对于各种损伤都给出了维修方法(或工艺);在维修间隔的相关内容上,只是给出了定期检查的间隔以及限寿件的时限,在不同间隔执行不同维修任务,此外对维修间隔没有描述。

#### 1.4 发动机维修任务分析

文件体现了发动机适航规章对于保证发动机可靠性的最低标准。FAR33 部规章对维修类型没有做出明确规定,但 FAR33.90 条款针对维修间隔提出了要求<sup>[45]</sup>。

在 FAR33.90 中提到的维修检查间隔即持续适航文件中的维修间隔,且维修检查任务是手册中定期维修任务的主要部分。通过检查可以发现零部件的损伤,判断发动机的状态,确定维修任务,即依据状态给定维修深度。不同的间隔会导致维修深度(维修任务)的差异,所以维修间隔是发动机维修的核心内容,在发动机适航规章的条款中对维修间隔做了明确的要求而未对维修深度有所要求。

### 2 持续适航文件的维修间隔分析

航空发动机有上万个零部件,持续适航文件不会一一列出每个零部件的维修任务;维修间隔是维修任务的核心,但不是一成不变的。文件按部件和时间维度 2 方面阐述。所以为了揭示维修间隔的本质,首先对持续适航文件列出维修任务的零部件进行分析,然后研究其维修间隔以剖析本质。

#### 2.1 关键件、重要件的确定

持续适航文件是保证发动机固有可靠性的基础,其中发动机维修更多的是针对自身失效会对发动机产生重大后果的零部件。

并不是每个发动机零部件的失效都会影响其可靠性水平。例如在燃烧室中,允许范围之内的烧蚀损伤会影响燃油消耗率而不会影响燃烧室生成高温燃气。相反,某些零部件影响发动机的可靠性水平,如防喘系统失效。依据 FAR33.75 条款提出重要性和危害性后果,将发动机零部件分为关键件、重要件和一般件,其中关键件、重要件的失效会导致发动机重要性或危害性后果。

重要性和危害性发动机后果的界定如下<sup>[45]</sup>。

(1)轻微后果是指 1 台发动机失效,其惟一后果是该发动机部分或全部丧失推力或功率(和相关发动机使用状态)。

(2)危害性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行为能力;与驾驶员命令的推力方向相反的较大的推力;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;由发动机引起的螺旋桨脱开;完全失去发动机停车能力。

(3)重要性后果的严重程度介于(1)和(2)之间。

由于关键件和重要件失效会对航空发动机的运行产生重要影响,所以持续适航文件对发动机的维修在很大程度上是指对发动机关键件和重要件的维修。

#### 2.2 关键件、重要件维修间隔

持续适航文件中的发动机维修更多是针对关键件和重要件的,所以讨论持续适航文件中的维修间隔也针对关键件和重要件。

在零部件自身属性与外界因素共同作用下,性能状态会不断退化,当超过一定数值时(失效阈值),零部件已无法完成规定的任务,判断为失效<sup>[46]</sup>。为了避免失效,需要对发动机进行维修检查以防止出现重要性或危害性后果。所以需要给出检查的时间间隔,在时间节点上通过检查判断发动机状态,确定维修任务。

##### 2.2.1 初始维修检查间隔

初始维修检查间隔是指发动机投入运行后第 1 次进行维修检查时的飞行小时数或循环数。FAR33.90 要求申请人进行初始维修检查试验用来模拟预期的发动机工作状态以确定初始维修检查时限<sup>[44]</sup>。AC33.90-1 为涡轮发动机的初始维修检查试验提供审定指导。该咨询通告介绍了全循环和加速任务试验<sup>[47]</sup>方法。通过对试验后的发动机进行拆卸分解,检查各部件是否符合设计和持续运转要求,从而得到 1 个较为适合的初始维修检查间隔。

FAR33 部规章要求申请人通过试验给出初始维修检查间隔,对应的咨询通告给出了试验的指导材料。初始维修检查试验旨在对发动机的实际工作状态进行模拟,使发动机性能在其自身属性与外界因素的共同作用下不断退化。通过分解检查判断发动机的性能状态,从而找到某一状态点(此状态点在持续适航文件的适航性限制章节给出的限制范围内),并进行维修检查,既可以有效的保证发动机的固有可靠性水平又可以降低经济成本。

所以规章中要求的初始维修检查实际上是要求申请人确定 1 个维修检查的基准点,其对应的发动机

性能状态既不会使发动机出现危害性或重要性后果;同时避免在未出现明显性能衰退时进行检查产生不必要的经济花费。

本文定义初始维修检查节点对应的发动机性能状态为设计点维修检查阈值。

### 2.2.2 维修检查间隔

持续适航文件要求发动机型号合格证申请人给出发动机定期维护资料<sup>[4]</sup>,其中包含了对发动机及其零部件的维修检查间隔,该间隔是指2次维修检查之间飞行小时数或循环数,所以不同于初始维修检查间隔。

持续适航文件只给出1个维修检查的荐用周期,一般指初始维修检查间隔的周期,但维修检查间隔并不等同于初始维修检查间隔。后者是前者的参考值,并且每次维修检查的周期都存在差异。在给定的间隔节点对发动机进行维修检查是监控零部件。如果发现损伤,则需要对磨损程度进行测量、评估损伤确定维修工作;同时需要根据检查判断零部件以及相关系统的状态确定下次检查间隔。

因此,在发动机的某次维修检查节点上,需要通过进行周期性维修检查并根据检查时的状态判断是否进行预防性维修。如果零部件的性能状态没有达到预防性维修阈值,仅进行持续适航文件要求的勤务而不进行预防性维修;相反则立即进行预防性维修。当零部件性能状态超过失效阈值时,零部件会失效并因此导致重要性或危害性后果,此时根据情况进行修理或者换件。最后根据此次对发动机定期维修的情况判断下次维修检查的时间。

为了确定设计点维修检查阈值,发动机适航规章只对第1次的维修检查间隔做出了要求。在该检查中,判断发动机状态,确定维修深度,并确定下次检查的间隔即判断其性能衰退到设计点维修检查阈值的时间。持续适航文件给出的维修间隔只是参考值,定期检查的实际间隔是在一定范围内波动的,即根据发动机状态适当延长或缩短参考值。定义初始维修检查节点对应的发动机性能状态为设计点维修检查阈值。如果将持续适航文件中给出的定期维修间隔(参考值)作为1个固定的维修检查周期值写入维修方案,使得依据固定周期进行维修检查时对应的发动机性能状态偏离设计点维修检查阈值。从而造成固定周期的维修间隔相对于设计点维修检查阈值对应的间隔偏大或偏小,可能会造成发动机的维修不足或维修过

多,最终增加维修成本、降低经济性同时还可能导致发动机可靠性下降。

灵活地确定维修检查间隔就是为了寻求1个可靠性与经济性协调的节点(设计点维修检查阈值),每次检查节点的发动机可靠性水平需要参考初始维修检查间隔节点对应的可靠性水平。发动机性能状态受多方面因素影响,性能衰退与使用时间并不存在1个固定的函数关系,即在多个固定的时间间隔内,发动机性能衰退的程度不同。所以定期维修的检查间隔是动态的,根据本次的状态给出下次的间隔。

### 2.2.3 实例分析

以中国某航空公司CFM56-7B发动机机队为例进行分析。根据国际发动机(CFMI)公司提供的持续适航文件,选取维修检查中的反推系统的检查任务。文件要求:检查左、右发动机阻力连杆的球型轴承滚珠,按需更换(Detailed inspection of the left/right engine thrust reverser drag link spherical bearings),给出的间隔为7500飞行小时,实际上为初始维修检查间隔,但发动机营运方将每次维修检查的定为7500飞行小时并写入维修方案中。发动机型号合格证申请人通过规章要求的试验确定该部件的初始维修检查间隔7500飞行小时,即发动机在实际运行过程中,球型轴承的滚珠因不断磨损而导致其性能下降,在7500飞行小时节点对其进行检查,判断滚珠的状态,然后选择做勤务润滑或者换件。

综上所述,零部件初始维修检查节点的状态实际上是型号合格证申请人给出的状态参考点(设计点维修检查阈值),之后每次都与参考点状态进行比较。如果在7500飞行小时节点状态的维修任务是更换球型轴承滚珠或者是预防性的勤务润滑,那么下次确定更换操作或者勤务润滑操作的依据便是零件与参考点状态相近。若是执行换件操作,则可以近似将下次换件的间隔定为7500飞行小时(反推系统不出现意外为前提);若是执行勤务润滑操作,则需要估算球型轴承滚珠从参考点磨损至需要换件状态的时间间隔。下次维修检查间隔需要具体问题具体分析,如果7500飞行小时中零件性能退化较大,可能第2次维修检查间隔需要缩短(小于7500飞行小时)并在此次执行换件操作,那么第3次维修检查时的状态可以依据参考点状态选择7500飞行小时(第3次维修检查进行勤务润滑),可也以参考换件节点的状态将第1次和第

1、2次检查间隔时间的总和作为第2、3次的检查间隔(第3次进行换件),但此间隔的确定还需要考虑经济性因素。以此类推,每次的检查间隔都不固定,根据上次维修检查的状态和给出维修任务来确定下个维修检查的间隔,在状态判断过程中,需要根据某一参考点进行比对,该参考点是初始维修检查节点对应的零部件性能状态点(设计点维修检查阈值)。

因此,通过实例可以更加形象地理解适航规章要求的初始维修检查间隔实际上是适航审定当局要求申请人设定1个性能状态参考点便于在多次维修检查中进行参考比较;同时维修检查的间隔不固定,确定间隔需要依据上次的性能状态和执行的维修任务。

### 3 总结

(1)持续适航文件中的维修包括预防性维修在内的检查、翻修、修理和更换零件的操作的概念。预防性维修、换件或者修理的维修任务是根据维修检查时对发动机状态判断得到并实施的,而不是在一定的维修间隔节点上执行固定的维修任务。

(2)从适航规章的角度分析维修间隔的本质,定期维修间隔是需要根据发动机状态改变的,维修间隔节点的发动机状态表征某种发动机可靠性状态。初始维修检查间隔对应了1种设计点的可靠性状态。适航规章中要求申请人通过试验确定初始维修检查间隔实际是要求给出1个可靠性水平不低于规章要求且维修经济性水平较低的维修检查的基准点。

(3)持续适航文件提到的维修检查间隔是指初始维修检查间隔,第N次维修检查间隔是第N-1次执行维修检查以及执行相应维修任务后得到的间隔。

#### 参考文献:

- [1] 许海峰. 论持续适航文件 [C]// 第四届中国航空学会青年科技论坛文集. 北京:中国航空学会,2010:7.  
XU Haifeng. Research on instructions for continued airworthiness[C]// the 4nd Chinese Society of Aeronautics and Astronautics (CSAA) Science and Technique Youth Forum. Beijing:Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2010:7.(in Chinese)
- [2] 弗洛里奥. 适航性:航空器合格审定引论[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011:187-194.  
Filippo De Florio. Airworthiness:an introduction to aircraft certification[M]. Beijing:Beihang University Press,2011:187-194.(in Chinese)
- [3] 吴昊. 民用飞机系统部件维修间隔确定方法研究 [J]. 飞机设计, 2011,31(6):58-60.  
WU Hao. A study on determining the maintenance task interval of civil aircraft system[J]. Aircraft Design, 2011,31(6):58-60.(in Chinese)
- [4] 吴昊. 基于案例推理的民用飞机系统维修间隔确定方法研究[J]. 航空维修与工程,2011(4):55-57.  
WU Hao. A study on determining the maintenance task interval of civil aircraft system based on CBR[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2011, (4):55-57. (in Chinese)
- [5] 蔡景,左洪福,王华伟. 基于成本的民用航空发动机维修方案优化研究[J]. 机械科学与技术,2007,26(2):167-171.  
CAI Jing, ZUO Hongfu, WANG Huawei. Aviation engine maintenance program optimization based on maintenance cost [J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2):167-171. (in Chinese)
- [6] 徐超群,闫国华. 航空维修管理[M]. 北京:中国民航出版社,2012:1-3.  
XU Chaoqun, YAN Guohua. Aviation maintenance management [M]. Beijing:Civil Aviation of China Press,2012:1-3.(in Chinese)
- [7] 张永生. 民用航空维修工程管理概论[M]. 北京:中国民航出版社,1999:1-17.  
ZHANG Yongsheng. Introduction of aviation maintenance management [M]. Beijing:Civil Aviation of China Press, 1999:1-17.(in Chinese)
- [8] 孙春林,白杰. 可靠性理论[M]. 天津:天津科学技术出版社,2001:1-35.  
SUN Chunlin,BAI Jie. Reliability theory[M]. Tianjin: Tianjin Science Press,2001:1-35. (in Chinese)
- [9] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. CFR14 Part 43:maintenance, preventive maintenance, rebuilding, and alteration[S]. Washington DC:FAA, 2014:1-3.
- [10] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. CFR14 Part 1: definitions and abbreviations [S]. Washington DC: FAA, 2014:14-15.
- [11] 杨懿,王立超,邹云. 考虑预防性维修的离散时间单部件系统的可用度模型[J]. 航空学报,2009,30(1):68-72.  
YANG Yi, WANG Lichao, ZOU Yun. Availability model of one-unit discrete time system with preventive maintenance[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009,30(1):68-72. (in Chinese)
- [12] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. CFR14 Part1 45: repair stations[S]. Washington DC:FAA, 2014:1-3.
- [13] 雷宗山,张莹松,杨武奎. 航空发动机零、部件修理研究[C]// 航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集. 北京:中国科学技术协会,2013:5.  
LEI Zongshan, ZHANG Yingsong, YANG Wukui. The study on the parts and components of aero-engine for repair[C]//Aeroengine Design and Manufacture Symposium. Beijing:Institute of Science Technology,2013:5.(in Chinese)
- [14] 陈文. 航空发动机零部件的自动化修理[J]. 航空维修与工程,2005(4):23-25.  
CHEN Wen. Automated repair of aero-engine components[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2005(4):23-25. (in Chinese)
- [15] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. CFR14 Part 33:airworthiness standards; aircraft engines [S]. Washington DC:FAA, 2013:40-45,86-88.
- [16] 李大伟,张志华,刘天华,等. 基于定期维护的产品维修策略研究[J]. 航空学报,2013,34(5):1101-1107.  
LI Dawei,ZHANG Zhihua,LIU Tianhua,et al. Product maintenance strategy research based on scheduled servicing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(5):1101-1107. (in Chinese)
- [17] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration. Advisory circular 33.90-1:initial maintenance inspection (IMI), 14CFR 33.90, test for turbine engines [S]. Washington DC: FAA, 2004:3-4.

(编辑:肖磊)