

# 基于模型仿真的发动机维修性需求提升方法

## Aero Engine Maintainability Requirement Improvement Method Based on Model Analysis

■ 卢婷婷 白则群 邵传金 陈乃威 / 中国航发商发

发动机在投入运营后的维修性设计改进会导致设计成本的激增以及运营收益的损失，因此在研发阶段可通过提升维修性需求以实现设计优化，即从源头确保设计在“做正确的事”。

良好的维修性对提高发动机性能、经济性及市场竞争力具有重要意义。针对在翼发动机进行维修性设计优化或提升，会产生巨大的设计改进成本及运营经济损失<sup>[1]</sup>。成熟的发动机企业，可基于运营阶段维护维修数据实现维修性需求提升<sup>[2]</sup>。对于无历史产品的企业，只能基于相似机型维修性探索维修性需求提升的方法，但相似产品的信息有限且并非完全可用，无法全面支撑维修性需求提升。因此，对于新研制的民用航空发动机，可以通过模型仿真分析实现维修性需求提升，进而提高维修性设计水平。

### 发动机维修性需求提升概述

产品的维修性会影响系统效能、全生命周期费用等<sup>[3]</sup>。民航领域的维修成本占装置全部运营成本的11%~20%，其中动力装置部分约占40%<sup>[1]</sup>。发动机维修性设计不佳会导致一系列运营经济及安全性问题。提高维修性设计水平，有助于降低全生命周期成本、增强产品性能恢复和运营能力以及推动产品的可持续发展。

基于系统工程原理，通过设计提高维修性水平，首先应明确产品维修性需求，但在实际工作中，存在着需求无法量化、不可验证等问题，不利于需求落实及验证。项目

经验表明，由于需求不明确、不合理导致项目失败的比例高达60%~70%<sup>[4]</sup>，有效的需求捕获、管理以及合理的需求定义与分解，对于设计成功、项目成功以及产品成功意义重大。针对需求不合理的问题开展维修性需求提升的工作，可以确保需求可落实、可验证，实现通过设计提升产品的维修性水平的目标。

在航空发动机研发领域，常用的维修性需求提升的方法有：方法一，基于产品维护经验，提取信息，有针对性地优化需求实现维修性需求提升；方法二，基于相似产品公开的信息，捕获维修性提升的内容，转化为优化的需求条目实现维修性需求提升。但上述方法存在局限性，方法一适用于成熟企业，即具有丰富的历史经验数据，对于无历史产品的企业不适用；方法二捕获的信息存在不完整、不适用的情况，无法全面支撑产品维修性需求提升。

针对新研制的商用航空发动机维修性需求提升，建立相应的工作流程，通过基于数字样机的维修性仿真分析，可以实现维修性需求提升，并将该方法及工作流程在研制型号中应用，已经取得了良好的维修性需求提升的效果。

### 基于模型仿真的维修性需求提升总体框架

产品的使用和维修保障对发动机维修性设计提出了更高的要求，并要求制定的维修性需求具有良好的可实现性和可验证性。在工业4.0大背景下，基于模型定义（MBD）技术在发动机设计中的广泛应用，为基于模型仿真分析的维修性需求提升提供了参考和可行思路<sup>[5]</sup>。该方法普适性强、模型可复用性强，有助于提升设计效率、缩短研发周期、降低成本。

基于模型仿真分析的维修性需求提升方法可在发动机研发阶段的早期介入：通过仿真分析，识别维修性需求定义的不足；针对不可量化、不可验证等需求，识别量化需求、可验证需求的处理方法，优化需求内容，实现维修性需求提升；以需求约束并指导后续设计阶段的维修性设计工作，最终实现维修性提升的目的。

维修性需求提升属于发动机维修性需求迭代与确认工作的重要一环。根据美国汽车工程师协会（SAE）ARP4754A飞机系统需求的验证与确认（V&V）研制流程<sup>[6]</sup>，发动机维修性需求V&V的层次关系如图1所示。

依据维修性需求实现的V&V模型，开展基于模型仿真分析的维修

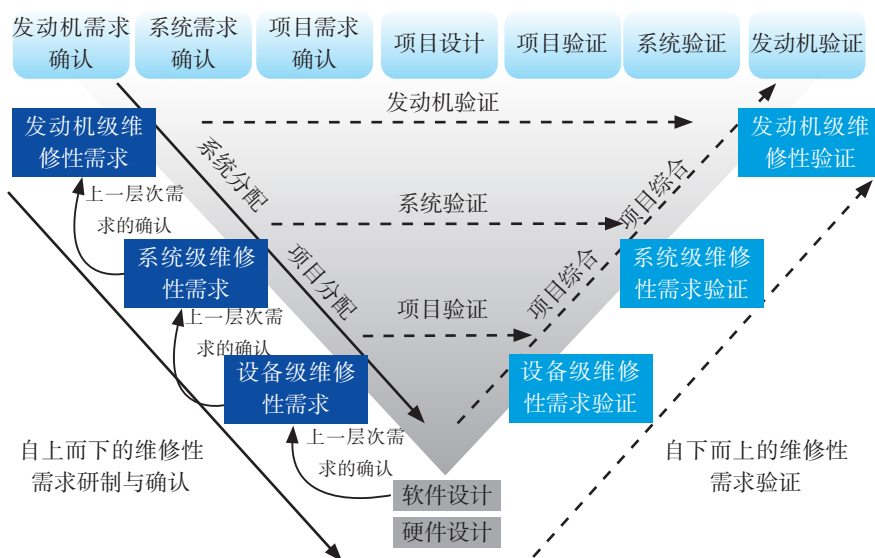


图1 发动机维修性需求实现过程<sup>[4-5]</sup>

需求提升，首先应搭建开展发动机维修仿真分析的平台；在平台基础上，开展维修操作仿真分析，形成优化的维修性需求，作为设计要求进行传递，实现研发过程中的维修性需求提升。

### 基于模型仿真分析的维修性需求提升方法

基于模型仿真分析的发动机维修性

需求提升，在建立完成的虚拟维修仿真环境的基础上开展。工作资源包括创建仿真分析环境、制定模型化的维修操作仿真程序、制定维修仿真分析判定准则及评价标准。在准备资源完成的基础上，开展基于模型的维修仿真操作以及维修性分析。通过量化等方式，优化无法落实的需求，实现维修性需求提升。在设计工作中落实提升后的维修性需求，

最终提高产品维修性设计水平。

基于模型仿真分析的维修性需求提升与落实方法的工作流程如图2所示。

#### 创建仿真分析环境

仿真分析环境是基于模型仿真的维修性需求提升的基础，仿真环境要素包括发动机数字样机、维修仿真资源模型、维修性仿真分析程序及维修性判定准则等，各板块内容如图3所示。

#### 制定发动机维修操作仿真程序

维修操作仿真程序是维修仿真过程中依据的仿真操作步骤。平台中的仿真程序支持定制化和客户化修改，以适应不同维修场景下的分析要求。工作内容包括：制定被分析对象在具体维修场景下的维修程序；基于被分析对象、虚拟人、虚拟工具的数字样机，将维修程序动作要素模型化；形成基于模型的分析对象的维修操作仿真程序。

#### 制定维修性仿真分析判定准则

基于发动机可达性、可操作性及互换性等检查原则，制定维修性

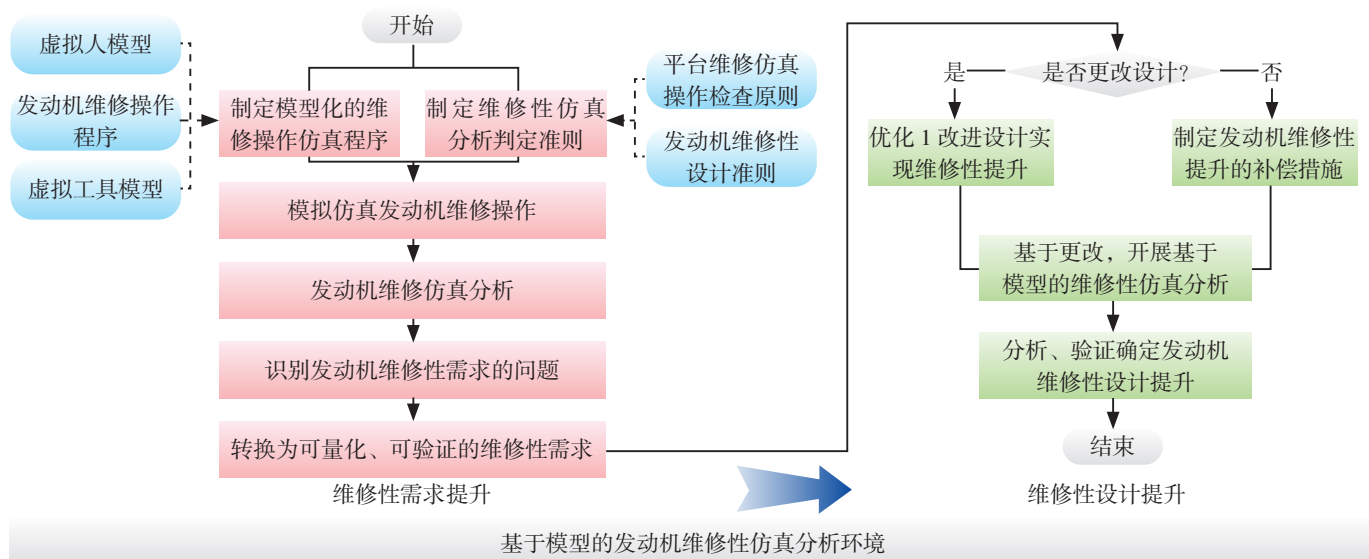


图2 基于模型仿真分析的维修性需求提升工作流程

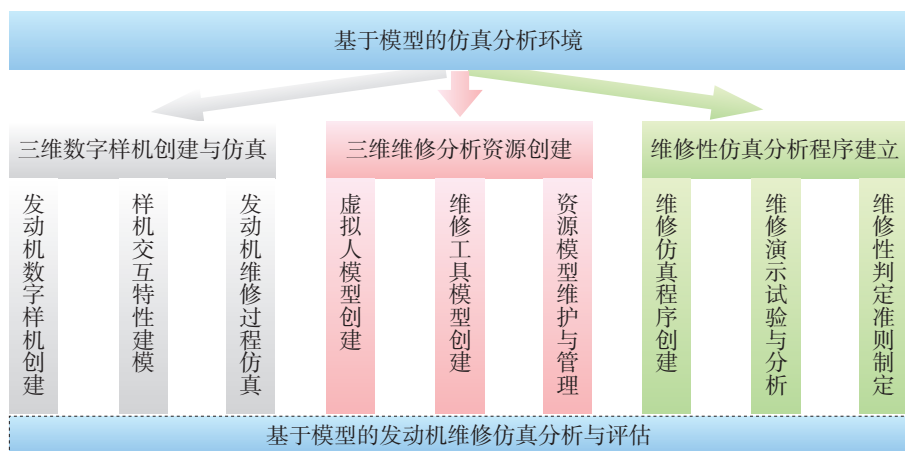


图3 仿真分析环境创建

仿真分析判定准则，即仿真过程中发生何种状态即可判定被分析对象的可达性、可操作性、可视性、操作空间以及维修姿态等设计存在问题。表1为航空发动机短舱系统维修操作空间设计仿真分析判定准则的示例。

如表1所示，仿真分析评分分值越小，表明维修可操作空间设计越好。在仿真分析平台上开展分析工作时，评估分数低于3分是设计可接受的；大于3分则表明被分析对象操作空间设计不佳，应针对性地进行维修性需求提升，以改进维修性设计。

针对航空发动机短舱打开空间的维修操作空间设计，制定了“短舱设计应确保足够的操作空间，以便于维修人员开展发动机维修、维护等操作”这一定性需求。但该需求未量化，存在无法落实与验证的问题。通过开展基于模型仿真分析的维修性需求提升，可解决未量化、难验证的问题。

结合表1中的维修操作空间设计判定准则，基于仿真程序在平台中开展维修操作仿真分析，以不高于3分的操作空间仿真判定准则调整短舱开合角度的具体设计要求值。

### 模拟仿真发动机维修操作

在仿真平台上，基于虚拟人、虚拟工具以及制定的维修操作仿真程序，开展发动机维修演示仿真。图4为针对航空发动机短舱系统开展维修操作空间分析的示例。在航线维修及发动机在翼更换两个维修场景下的操作空间分析，可分别通过风扇罩铰链及后安装节这两个关键位置的维修操作仿真分析覆盖。

指定维修场景下，关键分析点的维修操作仿真分析内容包括以下内容：

- 以生理视锥包络范围仿真分析可知，当风扇罩打开角度不低于46°时，风扇罩连接铰链在上述两

个维修场景下的维修操作可顺利进行，并保证维修操作人员视锥范围覆盖关键分析点；

- 以风扇罩的操作空间分析准则仿真分析可知，当风扇罩打开角度不低于45°时，风扇罩连接铰链在上述两个维修场景下开展维修操作、执行维修动作时，与操作人员肢体发生干涉的对象不多于2处，即按仿真准则分析评定，分数不高于3分；

- 以生理视锥包络范围仿真分析可知，当反推装置打开角度不低于40°时，后安装节在上述两个维修场景下的维修操作可顺利进行，并保证维修操作人员视锥范围覆盖关键分析点；

- 以反推装置的操作空间分析准则仿真分析可知，当反推装置打开角度不低于45°时，后安装节在上述两个维修场景下开展维修操作、执行维修动作时，与操作人员肢体发生干涉的对象不多于2处，即按仿真准则分析评定，分数不高于3分。

### 分析、识别维修性需求的问题

在基于模型的维修操作演示与仿真的过程中，需要结合维修性仿真分析判定准则，分析、识别发动机维修性需求定义不合理存在的问题，如关键参数未量化、需求不可

表1 维修性仿真分析判定准则（维修操作空间设计示例）

维修性仿真分析评分	可操作性分析判定准则
1	执行维修操作时，维修人员、设备及维修对象始终未与周围零组件发生干涉
3	执行维修操作时，维修人员、设备及维修对象累计与周围零组件发生1~2处干涉，但能完成维修操作
6	执行维修操作时，维修人员、设备及维修对象累计与周围零组件发生3~4处干涉，完成维修操作较为勉强
8	执行维修操作时，维修人员、设备及维修对象累计与周围零组件发生5处以上干涉，无法直接操作，需通过增加维修工作内容才能完成维修操作

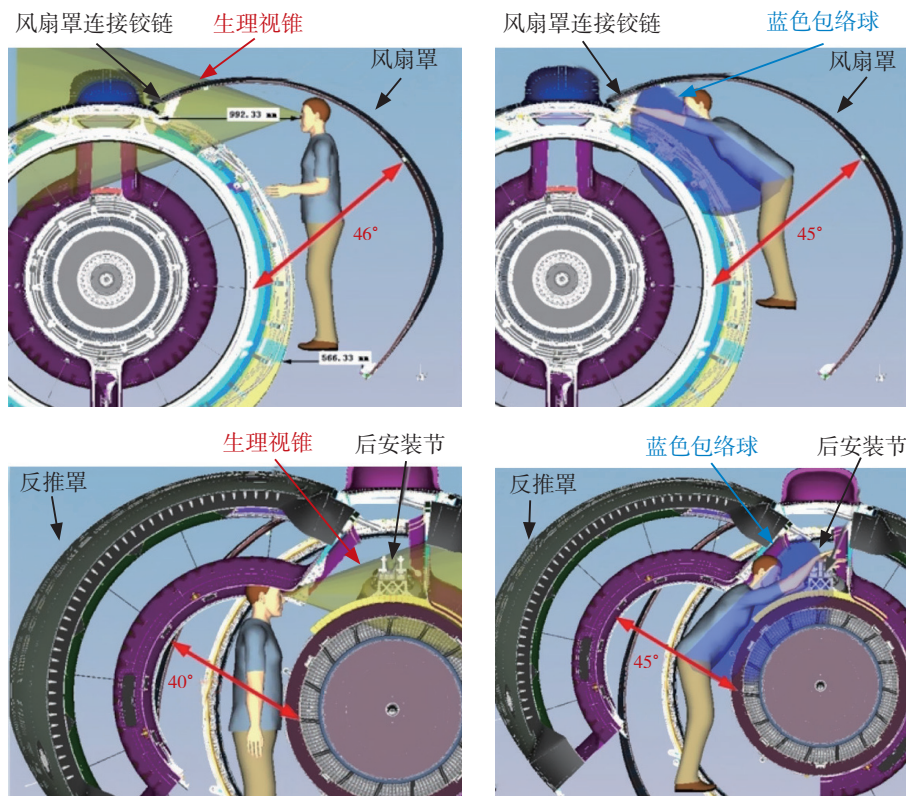


图4 发动机短舱操作空间仿真分析(示例)

验证等。针对“短舱设计应确保足够的操作空间，以便于维修人员开展发动机维修、维护等操作”这一需求，通过基于维修场景的仿真分析，发现该需求无法验证，即对于足够的空间约束，无法直接影响设计；且在评估、验证环节，无法判定需求是否被满足。

通过基于模型仿真分析的维修性需求提升方法，将足够的空间需求转化为短舱打开角度的约束，即将在指定维修场景下短舱打开角度的定量约束，转化为针对短舱操作空间的约束，实现需求提升，有效指导研发阶段的维修性设计工作。

### 制定维修性需求提升和补偿措施

结合模型仿真的分析内容及识别的维修性需求定义问题，针对未量化、不可验证的维修性需求条目，

可以制定需求提升或补偿措施。具体提升方法应结合实际设计进行判断：经综合评估确定可开展设计更改的内容，维修性需求提升可作为设计要求传递，进行设计改进、优化，最终实现产品维修性提升；经综合评估确定不宜开展设计更改的内容，应制定维修性设计补偿措施，即通过提高配套的维修保障资源，确保维修便利。

针对如航空发动机短舱的维修操作空间的维修性需求“短舱设计应确保足够的操作空间，以便于维修人员开展发动机维修、维护等操作”，以航线维修及发动机在翼更换两种场景下关键维修点的维修操作仿真分析，将该需求转化为可支持维修人员开展维修、维护操作的短舱设计开合角度的相关约束。

通过基于模型的仿真分析确定开合角度的设计约束值，形成提升后的维修性需求条目——为确保足够的维修、维护操作空间，短舱设计的开合角度应不小于46°。经与短舱设计专业确认，提升后的需求条目实现量化、可落实、可验证，且避免了超重等设计问题，并已应用于型号短舱维修性设计工作中。

## 结束语

在航空发动机维修性需求提升工作中，引入基于模型的仿真分析，可以在研发过程中及早识别维修性需求的问题，优化维修性需求，实现需求提升，并在设计中落实。该方法目前已在典型的航线可更换单元(LRU)件的维修性提升工作中推广应用，解决了部分维修性需求未量化、无法落实、无法验证等问题。随着该方法在项目工作中全面铺开，对于实现全面的维修性需求提升及维修性设计优化意义重大。 **航空动力**

(卢婷婷，中国航发商发，工程师，主要从事民用航空发动机的维修性体系建设、设计、分析和验证工作)

### 参考文献

- [1] 郭博智,王敏芹,吴昊.航空维修工程学[M].北京:航空工业出版社,2018.
- [2] 王自力,吕川.维修性设计分析与验证[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 左洪福,蔡景,吴昊,等.民用飞机维修性工程[M].北京:科学出版社,2011.
- [4] 罗婷婷.基于系统工程的商用航空发动机研制需求管理方法研究[J].航空制造技术,2015(3):107-109.
- [5] 郭博智,李浩敏.大型客机设计中的需求管理[J].民用飞机设计与研究,2013(4):1-5.