

一种符合ARP 4754B的民用涡扇发动机需求管理方法

An ARP 4754B Compliant Requirements Management Method for Civil Turbofan Engines

■ 黄干明 王旭 龚叶琴 季雁 / 中国航发商用航空发动机有限责任公司

随着民用涡扇发动机的发展和功能复杂度增加，系统研发的复杂度显著提升。为了在设计初期避免研制错误、不良或非预期功能的风险，需要充分做好需求捕获及需求确认工作，保证设计的正确性和完整性。

目前，民用客机主要使用涡扇发动机作为动力，为了满足客机的安全、经济和环保等运营要求，民用涡扇发动机必须具有高可靠性、高安全性、低耗油率、低污染、低噪声和长寿命等技术特点，使得研制的技术难度高、项目投入大、开发周期长、服役时间跨度大。民用涡扇发动机是复杂的安全关键系统，应采用规范的研制过程开展研制。《民用飞机及系统开发指南》（SAE ARP 4754A）是民用航空领域广泛应用与认可的飞机与机载系统研制过程标准，经过十几年的工业实践，于2023年12月更新为版本B，对版本A进行了全面的提升。本文基于ARP 4754B开展民用涡扇发动机需求管理研究，形成了民用涡扇发动机需求管理方法，为民用涡扇发动机基于需求的开发提供方法和思路。

ARP 4754B中需求管理要求 需求管理的范围

ARP 4754B中没有对需求管理进行定义，与需求管理最相关的两个

活动是需求捕获和需求确认。在研制保证策划过程中，需要对需求捕获和需求确认进行策划，需求捕获的策划内容包括需求捕获的形式和需求的管理，而需求确认的策划内容包括如何表明需求的正确性和完整性，以及假设如何管理。在研制保证策划过程中也指出，需求捕获策划可以与需求确认策划合并。所以，ARP 4754B中的需求管理范围包括需求捕获和需求确认两个过程。

需求捕获活动经常会引起误解，部分从业者认为需求捕获是需求从无到有的过程，即需求分析/需求引出，另一部分认为需求捕获是指将已有需求进行文档化的过程。在ARP 4754B的上下文中，需求捕获是需求文档化的过程，依据有以下几点：需求捕获的策划内容是需求的捕获形式与管理方法；需求是在系统研制过程的功能与需求开发活动和完整过程的安全性评估活动中形成的，而不是由需求捕获过程形成的；需求捕获的目标是确保在项目中保持需求集合的一致性，需求捕获过程的主要内容是需求的分类

以及需求捕获形式。

需求管理过程模型

ARP 4754B中与系统需求管理相关的过程目标共有8个，其中7个目标只与需求管理相关，而目标2.4同时与功能和需求开发活动及需求捕获活动相关，需求捕获活动对目标2.4的主要贡献是提供需求捕获标准，以确保整个项目的需求集合的一致性。

综合分析需求管理相关的过程目标，将需求管理活动分为需求管理策划、需求库框架构建、需求捕获、需求追溯性构建与需求确认。ARP 4754B的需求管理过程输入、处理、输出（IPO）模型如表1所示。

需求管理策划

需求管理策划活动以系统研制保证计划作为输入，对需求管理相关活动进行策划，输出需求管理计划和需求捕获标准，共同指导项目的需求管理工作。

需求管理计划中需要明确满足需求管理需要开展的活动、每个活动的输入输出、执行活动的角色、活动使用的工具环境，以及在系统

表1 ARP 4754B 需求管理过程 IPO 模型

| 来源过程 | 输入 | 活动 | 输出 | 目标过程 |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------|------------------------------|
| 研制策划 需求管理 | 研制保证计划 需求确认总结 | 需求管理 策划 | 需求管理计划 需求捕获标准 | 需求管理 过程保证 |
| 需求管理 | 需求管理计划 需求捕获标准 | 需求库框 架构建 | 需求库框架 | 需求管理 |
| 功能与需求开发 安全性评估 | 系统需求 衍生需求 | 需求捕获 | 需求库中的需求 与假设集合 | 需求管理 |
| 需求管理 功能与需求开发 架构定义 实现验证 | 需求库中的需 求与假设集合 需求相关研制 数据 | 需求追溯 性构建 | 需求追溯性数据 | 需求管理 |
| 需求管理 功能与需求开发 实现验证 | 需求追溯性数 据 确认证据 | 需求确认 | 确认结果 确认总结 问题报告 | 架构定义 实现验证 构型管理 过程保证 |
| 使能项 | 需求库框架 需求捕获标准 需求管理计划 | | | |

研制的全生命周期中需求管理活动的工作安排。需求管理计划是一个全生命周期文件，需要在每个阶段结束时进行更新。在需求管理策划活动中，需要明确其他需求管理活动的要求。

需求捕获标准中需要明确需求语句编写规范以及需求文档规范，以确保整个项目的需求集合的一致性。ARP 4754B中，将需求分为安全性需求、功能需求、客户需求、运行需求、性能需求、物理与安装需求、维修性需求、接口需求、取证需求和衍生需求。这种分类方式在完整性上缺少可靠性等需求；而在正交性上，取证需求和衍生需求只是一种需求的来源，并非分类，所以这两种需求与其他需求类型是重叠的，不宜与其他分类放在相同

的维度。因此，在实践中需要在满足ARP 4754B的基础上进行调整，尽量保证需求分类的完整性和正交性。例如，通过文档模板进行需求类型的分类，通过需求属性来区分取证需求和衍生需求。

需求库框架构建

需求库框架构建活动以需求管理计划和需求捕获标准为输入，在需求管理系统中建立需求库框架，输出需求库框架，作为后续所有需求管理工作的使能项。

需求库框架包括整个项目的需求文档组织架构，每个需求文档的模板、属性和视图，以及需求之间的追溯规则。复杂系统的研制过程通常会自上而下形成一个逐层细化的多层级架构，每个层级对应不同的系统元素，每个系统元素都有相

应的需求。在系统研制的全生命周期中，多个活动会产生需求，如功能与需求开发活动产生功能需求、安全性评估活动产生安全性需求和假设、实现活动产生衍生需求等。为了确保不同活动产生的不同层级的需求和假设以一致的方式捕获下来，需要建立有效的需求库框架，进而支持后续的需求捕获、需求追溯性构建和需求确认的开展。有效的需求库框架通常与系统的产品分解结构一致。

需求捕获

需求捕获活动的输入是功能与需求开发、安全性评估等活动产生的系统需求、衍生需求和假设，输出是符合需求捕获标准的需求库中的需求与假设集合。

需求库中的需求与假设集合是需求与假设的描述以及属性的集合体。从功能与需求开发活动或者安全性评估活动产生的需求可能只包含需求与假设的描述，缺少相关的属性，将这些需求与假设捕获到需求库的同时，需要补充这些属性。为满足ARP 4754B的过程目标要求，在捕获的过程中需要同时补充标识（这个属性一般可由需求库自动生成）、依据、类型、验证方法和确认方法属性，以便在需求捕获的开始就最大程度地保证需求的正确性和完整性。

需求追溯性构建

需求追溯性构建活动的输入是需求库中的需求集合和需求相关研制数据（包括功能清单、架构描述和验证结果等），输出是需求追溯性数据。

需求追溯性是指需求与其他数据之间的可识别的联系。需求追溯性数据包括不同层级需求之间的追

溯性，以及需求与其他研制数据之间的追溯性。需求是系统研制其他活动的基础，在系统研制过程中，需要确保需求本身的有效性，确保系统基于有效的需求进行研制，并通过验证证明系统实现满足有效的需求。由于需求与系统研制全生命周期的产物都有关联，以需求为源头可以建立系统研发数据的关联网络。这个关联网络是通过需求追溯性来建立的。

根据 ARP 4754B 的要求，需要建立以下几种追溯：需求与功能之间的追溯，与功能相关的需求（如性能需求、接口需求 and 安全性需求等），需要追溯到相关的功能；需求与其上层级需求或需求依据之间的追溯，自上层分解分配的需求，需要追溯到对应的上层需求，无法追溯到上层的衍生需求则需要提供需求依据；需求与实现验证数据之间的追溯，通过需求与验证数据之间的追溯性能够表明系统实现能否满足需求；需求与需求确认数据之间的追溯，通过需求与确认数据之间的追溯性能够表明需求的确认状态。

需求确认

需求确认活动的输入是需求追溯性数据、需求确认证据，输出是确认结果、问题报告和确认总结。需求确认是一个持续开展的活动，只要需求发生变化，或者需求的确认状态发生变化，都需要对变化的部分重新开展需求确认。

需求确认结果是指经过确认的需求，而不是确认有效的需求，因为复杂系统的需求通常无法在一开始就能保证 100% 的正确性和完整性，而是在研制生命周期过程中不

断提高正确性和完整性。在确认过程中，发现确认无效的需求，需要形成问题报告，说明存在的问题以及解决方案。确认总结是对需求确认工作的总结，需要每个阶段对需求确认工作进行总结。

ARP 4754B 要求对于研制保证等级为 A 级和 B 级的系统，需求确认应具备过程独立性，而标准中也指出只要需求确认人员与需求开发人员不相同，即满足过程独立性。需求的正确性和完整性实际上是由需求开发人员负责的，执行需求确认的目的是进行独立性的检查，以证明需求开发人员的确保了需求的正确性和完整性。在 ARP 4754B 中，可使用追溯性分析、建模、试验、相似性分析和工程评审等方法进行需求确认，其中的追溯性和工程评审是每条需求和每个需求集合必须执行的确认方法。

民用涡扇发动机需求管理方法

民用涡扇发动机需求管理模型

民用涡扇发动机的全生命周期模型包括需求分析与定义、概念设计、初步设计、详细设计与初步验证、验证与确认、产品交付与服务支持和产品退役等 7 个阶段，其中的前 5 个阶段对应于 ARP 4754B 的范围，后 2 个阶段对应于 ARP 5150/5151 的范围。需求管理过程是一种技术管理过程，在生命周期每个阶段执行的活动是相同的，随着产品生命周期的推进和输入的增加，需求管理输出的集合数量不断地增加，成熟度不断地提高，如图 1 所示。

需求分析与定义阶段

需求分析与定义阶段的目标是

对利益相关方需求进行分析形成发动机的产品需求。在此阶段，首先要基于系统研制计划进行需求管理策划，形成需求管理计划和需求捕获标准；然后按照需求管理计划和需求捕获标准的要求，建立需求库框架，在需求库中完成产品需求的捕获，建立产品需求到利益相关方需求的追溯性，完成产品需求的确认后产品需求纳入基线。

需求库框架需要与发动机的产品分解结构一致。典型的民用涡扇发动机的产品分解结构是 1 个 3 层架构，如图 2 所示。顶层是产品层，对象是动力装置；第二层是系统层，包括发动机系统、燃油分配系统、点火系统等 9 个系统，其中发动机系统向下分为风扇增压级系统、压气机系统、燃烧室系统、涡轮系统和附件传动系统 5 个系统；第三层是组件层，将系统层的 14 个系统划分成不同的组件。需要在需求库中给 3 个层次的每个物理实体建立对应的需求文档模板。

民用涡扇发动机的需求文档模板需要综合国际标准 ISO 29148、国军标 GJB 241A 和 ARP 4754B 进行定义。通过章节区分性能需求、设计和结构需求、保障性需求、可靠性需求、维修性需求、主要系统需求、环境适应性需求（包括电磁环境效应）、测试性需求、运输性需求、安全性需求、人机工程需求、物理与安装需求（包含质量）和接口需求。这些需求类型全面覆盖了 ARP 4754B 中的需求分类，而且更加完整，需求分类之间更加独立。衍生需求通过追溯性来区分，而取证需求通过依据属性进行区分。而需求语句的编写规范则可以使用国际系统工程

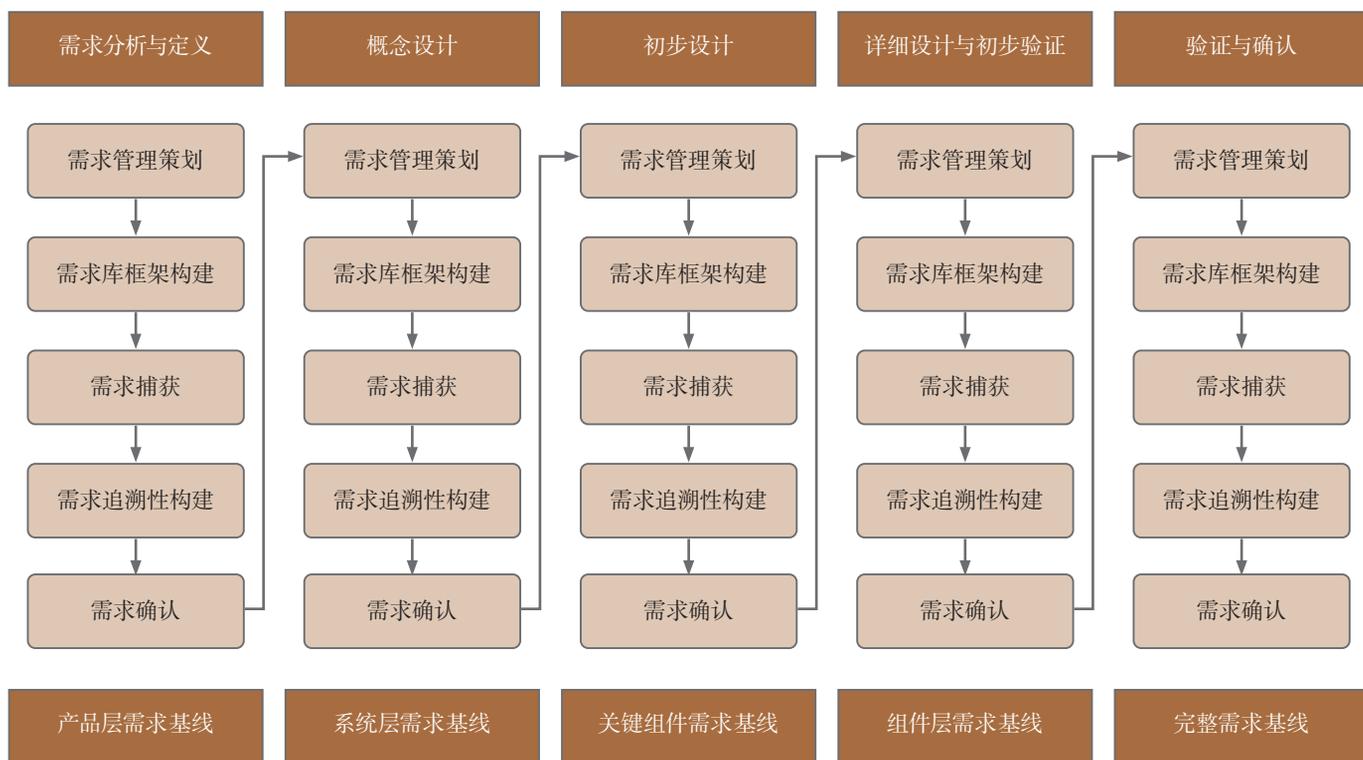


图1 民用涡扇发动机全生命周期需求管理

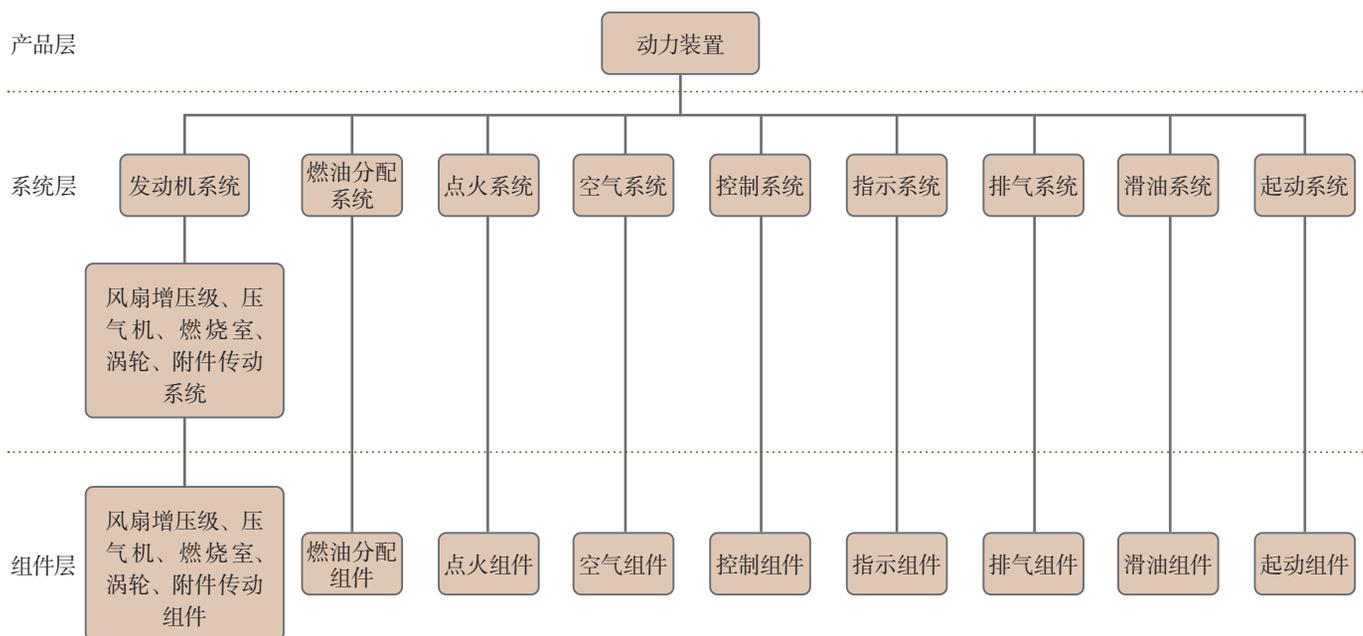


图2 典型民用涡扇发动机产品分解结构

协会（INCOSE）需求捕获指南的需求语句模板。

在建立产品层需求追溯性时，

需要考虑需求库以外需求的追溯性策略。利益相关方需求通常并非发动机研制方所有，如客户需求由客

户所有，适航需求在适航文件中定义。单纯为了建立追溯而将这些需求放到需求库中会增加需求管理的

成本，可以通过依据属性建立到需求库外部需求的追溯性，不过需要确保利益相关方需求的可标识性。

概念设计阶段

概念设计阶段的目标是根据产品需求文档进行产品级方案设计，根据产品级方案定义系统级需求。在此阶段，在产品方案设计过程中对产品需求进行更新，补充因设计过程产生的衍生需求。然后根据产品方案定义系统需求，建立系统需求到产品需求的追溯性。完成产品需求和系统需求的确认后，将产品需求和系统需求纳入基线。

初步设计阶段

初步设计阶段的目标是在概念设计的基础上，完成系统的方案设计，根据系统方案定义关键组件需求。在此阶段，在产品方案细化过程中进行产品层级、系统层级的衍生需求的捕获并进行需求确认。根据系统需求完成系统方案设计，形成关键组件需求。

详细设计与初步验证阶段

详细设计阶段的目标是完成发动机组件的详细设计、实现与验证，完成系统的集成与验证，完成首台发动机的集成与初步验证。在此阶段，补充关键组件相关的衍生需求，定义其他组件的需求，完成组件需求确认后纳入基线，建立初始验证数据与需求的追溯性，对关键需求进行进一步确认。

验证与确认阶段

验证与确认阶段的目标是完成发动机的集成与验证，取得型号合格证，具备申请生产许可证的条件。在此阶段，建立验证数据与所有需求需求的追溯性，根据验证数据对所有需求进行全面的确认。

分析与讨论

完全条目化管理

民用涡扇发动机研制的全生命周期通常比较长，而民用市场的需求变化较快，在全生命周期过程中，需求都有可能产生较多变化，一方面需要及时满足市场需求；另一方面需要有效管制需求的变更，给需求的构型管理带来很大的挑战。传统的基于文档的方式进行需求管理，在每次需求发生变更的时候都需要重新发布整个需求文档，需求的变更管理成本较高。宜采用基于完全条目化的需求管理方式，在需求库中只存储需求条目，非需求条目不进入需求库，并将需求条目作为最低颗粒度的构型管理对象，实现完全基于条目的需求管理。完全条目化的需求管理可以减少管理的内容，提高需求管理的效率，降低了需求的变更管理成本。

全生命周期需求度量管理

民用涡扇发动机的需求管理的过程目标是表明每个需求条目的正确性以及整个需求集合的完整性。在需求管理策划过程中，应围绕 ARP 4754B 的过程目标，在需求管理计划中定义需求度量指标、指标测量要求，以及各个指标在每个阶段转段前应达到的水平，在民用涡扇发动机全生命周期持续对度量指标进行测量，确保指标水平随着研制阶段的推进不断提高，并最终实现过程目标。全生命周期过程的度量数据可以直接作为过程保证的证据，在提高管理效率的同时，降低了过程保证的成本。

需求变更管理与构型管理

需求变更管理是否需要作为需求管理的活动是有争议的，支持者

认为需求管理应该对需求的全生命周期、对变更进行管理；反对者认为需求的变更管理只是一种构型项的变更，属于构型管理的范围，没有必要重复。本文认为需求变更管理不属于需求管理的活动，在 ARP 4754B 中有专门的构型管理过程，而需求是一种构型项，需求变更管理是构型管理的一部分。不过，由于民用涡扇发动机的需求通常使用需求管理系统进行管理，非需求数据通常使用产品管理系统进行管理，需要实现两个流程在两个系统中的有效协同。当前主要有两种做法：将需求管理系统作为开发库，管理需求开发过程，成熟版本放到产品管理系统进行发布与管控；在需求管理系统中进行开发与管控，产品管理系统索引需求管理系统中的版本。从数据唯一性和管理成本考虑，后者有更大的优势。

结束语

在民用涡扇发动机研制过程中，需求管理是一项关键且复杂的工作，需求的正确性及完整性直接决定最终系统设计实现的正确性和产品的安全性。应该在 ARP 4754B 的基础上结合民用涡扇发动机的特点开展需求管理，在系统研制前期应建立需求管理计划来规范全生命周期的需求管理活动，指导民用涡扇发动机在全生命周期进行需求管理。同时，在满足适航需求的基础上，选取更具经济性的管理方法以降低全生命周期的管理成本。

航空动力

（黄干明，中国航发商用航空发动机有限责任公司，高级工程师，主要从事航空发动机研制管理）