

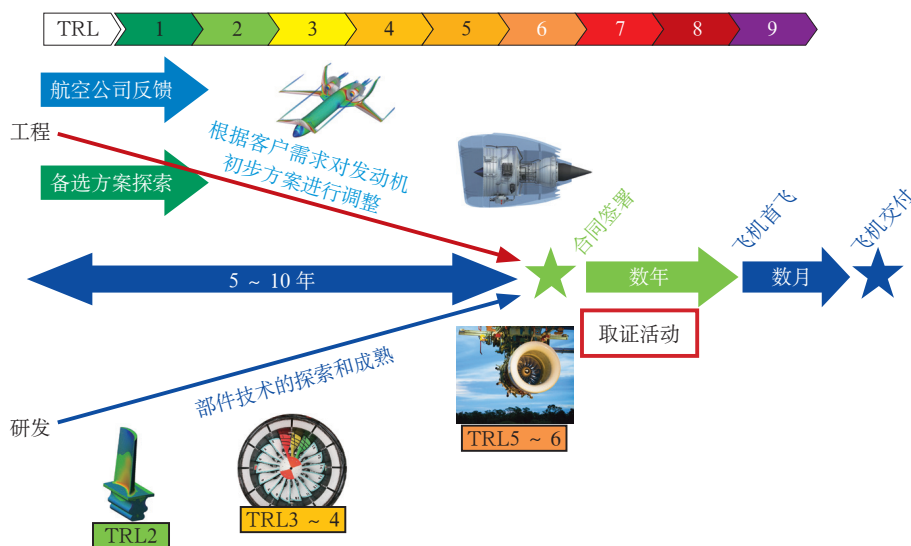
基于跨组织 IPT 的民用飞机发动机一体化工作模式研究

Research on Civil Aircraft / Engine Integration Work Mode Based on Cross-Organizational IPT

■ 曾涛 / 中国航发商发 李婧 / 中国商飞上海飞机设计研究院

为了进一步提高性能、降低风险，通过飞发一体化的工作模式开展飞发联合设计工作已经成为必然的趋势。基于飞发一体化工作的特点，由飞机和发动机双方研发人员共同组成的跨组织集成项目团队（IPT）工作模式是保障飞发一体化工作顺利开展的有效手段。

飞机与发动机之间的集成，并非简单的安装关系，而是需要充分考虑飞发气动匹配、机械安装、功能定义、系统接口等因素的强耦合关系。但飞机和发动机又是两个相对独立的复杂系统，因此必须通过大量的设计和验证工作才能实现飞机和发动机的良好集成匹配。飞发集成方案对飞机的安全性和经济性有着决定性的影响，如何实现飞机与发动机之间的最优匹配，是飞机和发动机工程师需共同解决的问题。



民用航空发动机研制一般过程

飞发一体化

飞发之间的集成设计是飞机和发动机设计的天然组成部分。飞机和发动机分别作为独立的复杂系统，同时又存在强耦合关系。在早期的设计中，飞机和发动机的研制相对独立，由此也衍生出两种典型的工作模式，即为飞机设计合适的发动机和围绕发动机设计合适的飞机。

为了实现飞发匹配，传统设计中一般是将飞机和发动机解耦，飞发需求通过指标分解至发动机制造商。发动机制造商根据飞机需求独

立完成发动机的研制，而后将发动机交付给飞机制造商进行飞发集成。这种设计方法使得飞机和发动机制造商可以分别专注于自己的领域，但也使得设计匹配无法进行充分迭代和沟通，导致飞机和发动机集成后不能充分挖掘飞机和发动机的潜力，在一定程度上削弱了整个飞机系统的性能甚至是安全性。

随着航空产品的发展，飞机和发动机之间的互相影响和融合进一

步加深。飞发联合设计将对发动机的尺寸、质量、性能、接口等产生直接影响，发动机的构型在和飞机制造商完成联合定义之后才能最终确定。而只有当发动机的设计构型确定后，才能完成发动机的CCAR-33部取证。换言之，飞发联合定义工作不仅仅是为了实现发动机到飞机的安装，同时也是发动机确定最终构型开展CCAR-33部适航取证的前置条件之一。



飞行试验台上的LEAP-1C推进系统

由于飞机和发动机之间集成度的不断提高，为了进一步提高性能、降低风险，采用飞发一体化的工作模式开展飞发联合设计工作已经成为必然的趋势。与传统方法相比，飞发一体化是通过系统论的方法和全局的视野来将飞机和发动机的研制、使用过程视为一个整体，寻求飞发组合的全局最优化。在C919项目中，CFM国际公司即提出了一体化推进系统的概念，希望将发动机、短舱和吊挂集成为一个大工作包与飞机开展联合定义。

综合以上过程，可将飞机和发动机之间的联合研制工作划分为3个逐步深化的层次。

第一层是飞发协调。飞发协调是指通过飞机和发动机间数据、方案、安装、验证需求等的充分沟通，实现飞机和发动机设计中对于另一方的充分考虑，飞机和发动机有着清晰的工作界面，各自的主要工作均在自己的工作域内完成，飞机和发动机间的集成更多地体现在指标、接口的匹配上。

第二层是飞发集成。飞发集成是指在综合方案定义、系统构架、功能构架、项目进展等因素的前提下，以发动机和飞机共同的新产品引入过程为工作域，在设计方案、项目安排等方面进行充分迭代，发动机和飞机各自的主要工作仍是在自己工作域内完成，但各自的方案和项目计划均是迭代后的结果，发动机和飞机之间的集成体现在系统方案、系统构架、项目匹配等各个方面。现有的民用航空飞机研制，一般遵循此流程。

第三层是飞发一体化。在飞发集成的基础上，业界进一步提出并实施了飞发一体化的概念和工作模式。飞发一体化，是指采用系统论的方法和全局的视野来实现飞机和发动机项目的一体化融合设计的理念。飞机和发动机之间通过持续的一体化迭代融合过程实现优化匹配，在技术、项目的多重维度下实现飞机和发动机的优化组合，以保证双方的共赢。飞发一体化的工作域覆盖飞机和发动机双方从概念设计到

客户服务的全生命周期，目标是充分挖掘飞机和发动机各自潜力，实现飞发间的全局化最优解。对比传统的飞发协调和飞发集成工作，飞发一体化具备的特点包括设计边界的双向延伸，设计定义和迭代的提前开展以及项目管理上的强融合。

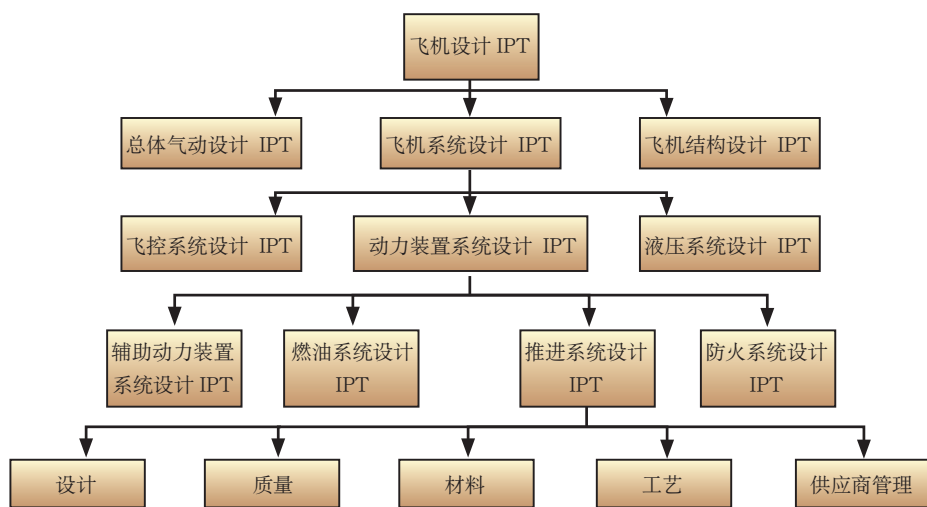
IPT工作模式

飞发一体化意味着飞机制造商和发动机制造商要更紧密地联合在一起开展研制工作，因此有必要引入新的工作模式以支持一体化工作的开展。目前，航空业广泛采用了集成项目团队（IPT）工作模式。波音公司在开发777时成立了238个IPT以完成整个飞机的开发任务。中国商用飞机有限责任公司（中国商飞）在C919项目的研制中也采用了IPT团队的工作模式。

IPT是一个由少量的能力互补的人员组成的小组，所有成员被委托以共同的目的、行为目标和工作方法，并相互负责。由于产品开发的复杂性和多样性，不同的开发团队有不同的组织模式，一般而言，IPT自身的组织结构包括分形组织结构和扁平网络结构两种典型形式。

分形组织结构

IPT组织的最直观结构是根据产品分解结构（PBS）进行团队的组建与分解，将多个IPT组成一个多层次的阶梯型组织结构。在团队内部组织上，该框架是一个分形组织结构。一层的团队领导是上一层的团员。底层IPT由相关各个专业的人员组成，上层IPT的成员包括来自所对应下层IPT的领导和相应的其他人员。在这种体系结构中，上层IPT具有领导和协调的作用，对



飞机研发分形组织结构示例

底层进行初步设计和总体设计，定义底层IPT涉及的零部件之间的接口关系。

扁平网络结构

扁平网络模式将产品开发沿全生命周期和工作分解结构进行彻底的分解，形成一个扁平网络的IPT小组群。它的优点是可将IPT团队嵌入已有的组织框架结构中，对企业的冲击比较小，但由于IPT之间没有固定的关系，其协作效率将受到一定的影响。

以上两种结构模式各有优缺点，对于新产品的开发和已成熟产品的改型，阶梯形的分形组织结构具有明显的优点。当企业原有组织框架结构非常稳固时，使用扁平化的网络结构能很快提高产品开发的效率，避免对原组织结构进行调整所带来的风险和阻碍。在实际操作中，这两种结构模式单独使用，也可以混合使用。对于大型复杂项目，在大的组织层级可采用扁平结构，向下分解采用分形结构。

飞发一体化的跨组织IPT应用实践

如前述，由于飞机和发动机各自在不同的工作域由不同的责任主体负责，原有的组织构架已较难适应飞发一体化工作的开展。为了开展国产动力装置与国产大型客机间的飞发一体化工作，中国航发商发与中国商飞共同成立了跨组织的飞发协同设计IPT。

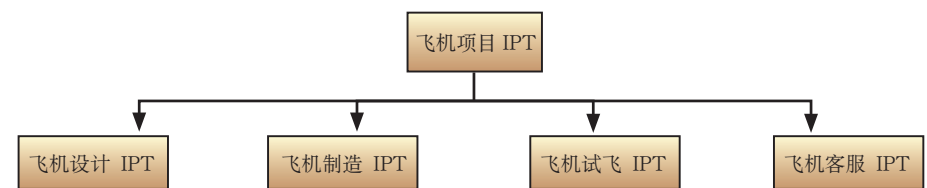
飞发协同设计IPT构架

为了减少对双方原有单位组织的影响，保证一体化研发工作的开展，飞发协同设计IPT采用扁平网络IPT组织结构形式。

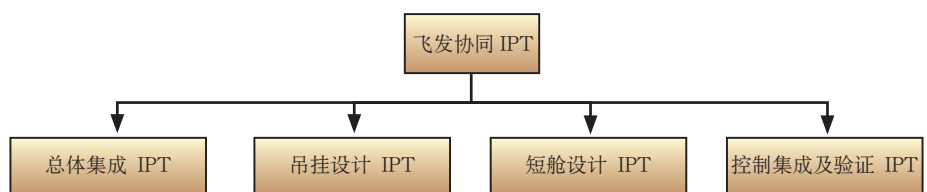
一级IPT由中国航发商发与中国商飞的技术及项目管理人员共同组成。二级IPT 4个，分别为总体集成IPT、吊挂设计IPT、短舱设计IPT和控制集成及验证IPT，每个二级IPT均由两个单位的设计人员共同组成。

基于现阶段飞发一体化设计需求，飞发协同IPT对工作进行了归并和分配，二级IPT的技术责任设置如下：总体集成IPT负责飞发需求、性能、布局、四性、适航、噪声和飞发接口设计定义；吊挂设计IPT负责吊挂结构、系统布置、静强度、动强度设计定义；短舱设计IPT负责气动、结构、强度、载荷、系统（短舱防冰系统、液压系统、灭火探测系统、反推作动系统等）设计定义；控制集成及验证IPT负责发动机控制集成、飞发电气集成、航电半物理仿真台（mini-rig）设计。

为了实现飞发协同IPT与飞发方各自原有设计组织的协调工作，保证一体化工作的开展，飞发协同IPT与飞发原有设计组织的分工是：



飞机研发扁平网络结构示例



飞发协同IPT组织构架

飞发协同IPT负责集成方案、接口设计和设计迭代控制，飞机和发动机原有组织机构负责具体方案的实现。

飞发协同IPT负责一体化方案的集成设计和迭代，飞发协同IPT由飞发双方的工程技术人员和项目管理人员参与，可以对飞发各自的需求和初始方案进行直接对接和快速迭代，挖掘飞发各自的潜力。一体化方案形成后，分发至飞机方和发动机方原有设计组织进行实现，实现过程中的问题和迭代实时反馈至协同IPT进行处理。换言之，飞发协同IPT并非取代原有的设计组织，而是通过对一体化方案及过程的控制实现飞发两个不同设计组织间的有效融合。

飞发一体化实施情况

自2019年成立以来，依托国产民用喷气发动机和国产民用飞机的联合定义工作，飞发协同IPT开展了一体化计划管控、一体化方案设计、飞发接口设计等工作，实现了飞发间的直接快速对接，有效地提高了飞发一体化设计效率。

一体化计划由飞发IPT制订覆盖双方的一体化集成计划，而后将相关计划拆分为两份实施计划，计划的实施由飞发双方各自完成，实施结果和调整需求反馈至飞发IPT进行统一调配和控制。

一体化方案设计以二级IPT为核心，依托飞发各自技术组织，开展了初步的飞发一体化气动方案设计、飞发一体化安装方案设计权衡、飞发一体化性能评估、飞发噪声集成评估等一体化设计和评估工作，形成了初步的集成方案。

飞发之间的接口包括功能接口、机械接口和电气接口3个主要类型。

由飞发协同IPT负责飞发接口设计，对以上3种接口进行管控。其中，功能接口是对系统功能构架、硬件分工、接口需求、接口参数、设计方案进行定义；机械接口是对系统间的机械安装、尺寸特征进行定义；电气接口是对系统间的电气针脚、供电方案进行定义。通过飞发协同IPT，飞发间形成了一系列功能接口文件的初稿，并清理出了飞发接口的重大偏离项，为飞机方的相关方案更改评估和发动机方的相关方案设计提供了基础。

通过飞发一体化IPT的运行有效提高了组织间的集成水平，项目研制获得了如下收益：飞机需求的及时澄清和更新；飞机方设计和试验试飞经验的实时共享和导入；飞发一体化方案的快速迭代；飞发接口偏离项的早期识别和评估。

跨组织飞发一体化IPT运行注意事项

飞发一体化IPT加快了飞发联合定义的设计迭代过程，但由于是不同组织在不同设计领域联合开展工作，须注意相关事项以保证工作的顺利开展。结合飞发协同IPT的运行经验，总结相关注意事项如下。

一是设计语言的统一。不同设计组织在文件体系、设计流程、文件控制、术语、阶段门设置等方面存在不同，容易导致设计和管理上的误解，跨组织IPT应注意通过设计接口和文件传递实现设计流程的融合，通过术语对照表等减少沟通上的误解。

二是计划管理。飞发间存在大量的设计迭代和数据交互工作，飞发一体化的工作必须基于合理的计

划开展。同时，由于大量具体设计和评估工作分别在飞发两个组织内开展，如何保证计划如期开展，如何实现对计划进展的控制，是飞发一体化IPT必须注意的问题。飞发一体化IPT应实现计划的统一管理以保证一体化工作的正常开展。

三是设计数据控制。飞发之间的设计迭代和数据交互将产生大量数据，而这些数据又包括了多种类型，如协调数模、气动数模、有限元模型、性能数据等。如何对数据的有效性和状态变更进行控制，如何实现数据的高效传递和存储是飞发一体化工作必须注意的问题。

四是组织构架的动态管理。随着飞发联合定义项目的进展，飞发一体化的工作内容和参与人员出现变化。例如，概念设计阶段以设计人员为主，试飞验证阶段则需要有设计人员、试验试飞人员、制造人员等的共同参与。飞发一体化的组织也应实现随工作内容和项目阶段的动态化管理。

结束语

采用跨组织的IPT工作模式是保障飞发一体化工作有效开展的重要手段。跨组织IPT应由飞发双方共同组建，开展统一的技术和项目协同工作。初步实践表明，通过飞发协同IPT可以实现飞发间的直接快速对接，有效提高设计效率。同时，跨组织的飞发一体化IPT也应注意设计语言、计划管理、设计数据和组织动态管理等问题，以保证飞发一体化工作的良好开展。

航空动力

(曾涛，中国航发商发，高级工程师，主要从事飞发一体化和发动机集成设计研究)