

面向全生命周期的航空发动机设计方法研究

The Method for DFX in Aero Engine Development

■ 宁怀松 隋岩峰 王艳丽 刘海年 谈梦妮 / 中国航发动动力所

在航空发动机研发中引入面向产品全生命周期的设计 (Design For X, DFX) 的理念, 旨在改变“串行”的研发模式, 使设计人员在设计初期就充分考虑设计决策对后续过程 (包括制造、装配、试验、维修等) 的影响, 以提高发动机设计阶段的工作质量, 减少甚至消除后续问题的发生。

长期以来, 航空发动机的研发工作是按顺序逐次开展 (即“串行”研发) 的, 基本遵循“设计—制造—装配—试验—设计修改”的大循环, 采取的是一种分散的、职能部门负责制的模式。处于发动机研发“源头”的设计部门主要考虑如何实现用户的显性需求 (如功能、性能等), 对研发下游的制造、装配、试验、维修等领域的可行性和成本考虑得很少; 同时, 由于“厂所分离”, 设计人员和工艺人员之间缺乏有效的沟通机制, 彼此之间的协调较为复杂、费时。上述不足使得上、下游活动之间存在不可调和的冲突, 当发动机的可制造性、可装配性等较差时, 就需要回到设计阶段, 重新进行设计, 导致发动机研发中出现了大量的设计更改和返工, 从而增加了研发成本和周期。基于系统工程的研发体系建设实践, 在航空发动机研发中采用面向产品全生命周期的设计 (Design For X, DFX) 理念或将解决这一问题。

DFX的内涵与优点

DFX是“Design For X”的简称, 指面向产品全生命周期的设计, 这里的“X”是指产品全生命周期中的任一环节, 比如制造、装配等。本文

关注的DFX主要包括可制造性设计 (Design For Manufacturing, DFM)、可装配性设计 (Design For Assembly, DFA)、可测试性设计 (Design For Testing, DFT) 和可维修性设计 (Design For Service, DFS)。

按照DFX的要求, 设计人员要将下游过程视为“客户”, 充分理解制造、装配、试验、维修等方面的能力和水平, 识别相关需求或约束, 利用DFX设计指导方法, 通过相关分析工具实现DFX的要求。

DFX设计方法是先进的产品开发技术。华为公司将产品满足质量属性需求的能力称为DFX能力, 包括可靠性、节能减排、可服务性、可安装性、可制造性、维修性、可采购性、可供应性、测试性、成本、性能、安全性等, 充分体现了华为对DFX的重视。

DFX相较于传统的设计方法, 具有如下优点: 确保在产品的设计阶段更加完整地捕获产品研发全生命周期的相关需求, 并统筹考虑、全局优化; 打破不同研发领域 (设计、制造、装配、试验、维修等) 之间的“墙”, 保障高效沟通; 尽早发现设计方案在不同研发领域可能存在

的问题并提前解决, 降低问题解决成本; 提高研发过程的灵敏性, 缩短准备时间; 增强设计人员的成本意识, 在设计之初就为成本控制打好基础; 减少设计更改和返工, 从而缩短研发周期, 降低研发成本, 提高研发质量。

DFX与系统工程的关系

如前所述, DFX中的“X”指产品全生命周期中的任一环节, 在设计过程中, “X”表示相应环节的需求, 而DFX成功的关键则是完整捕获并高质量地实现“X”所代表的环节的需求。因此, 成立跨部门、多学科的集成产品开发团队 (Integrated Product Team, IPT) 来确保各环节需求的捕获和实现是开展DFX的基础, 团队应包括设计、制造、装配、试验、维修等各方面的人员, 负责整个产品的开发工作。同时, 由上述描述可以看出, DFX与系统工程的理念也具有诸多契合之处。

系统工程有不同的定义方式。按照《INCOSE系统工程手册》, 系统工程是一种使系统能成功实现的跨学科的方法和手段, 是一种自上而下的综合、开发和运行一个真实

系统的迭代过程，是一门专注于整体（系统）设计和应用的学科。系统工程专注于：在开发周期的早期阶段定义客户需要与所要求的功能性，将需求文件化，然后再进行设计综合和系统确认；把所有学科和专业群体综合为一种团队的努力，形成从概念到生产再到运行的结构化开发流程；系统工程以提供满足用户需要的高质量产品为目的，同时考虑所有客户的业务和技术需求；考虑完整性问题，即运行、成本、进度、性能、培训、支持、试验、制造和退出等各个方面。因此，系统工程是各学科之间研究方法的综合，是为了合理地进行产品开发、设计和运行而采用的思想、步骤、组织和方法等的总称。

在基于系统工程的研发体系建设中，各方已经充分认识到系统工程对需求和IPT的关注，并按照系统工程的思想开展了需求管理、研发流程建设、技术评审、仿真、IPT建设等工作。这些工作的开展，足以实现DFX的工作要求，而中国商用飞机有限责任公司更是直接将DFX融入了系统工程。在《中国商用飞机有限责任公司系统工程手册》中介绍需求分析的注意事项和经验时指出，鉴于系统的复杂性和需求的重要性，其需求涉及到设计的各个领域，包括各专业工程领域，如可制造性、维修性、环境要求等，应该成立需求分析与定义联合团队，将所有系统需求涉及的专业一起联合工作，确保形成的需求的正确性和完整性。

由此可见，DFX和系统工程关注的内容是一致的，通过开展基于系统工程的研发体系建设，可有效

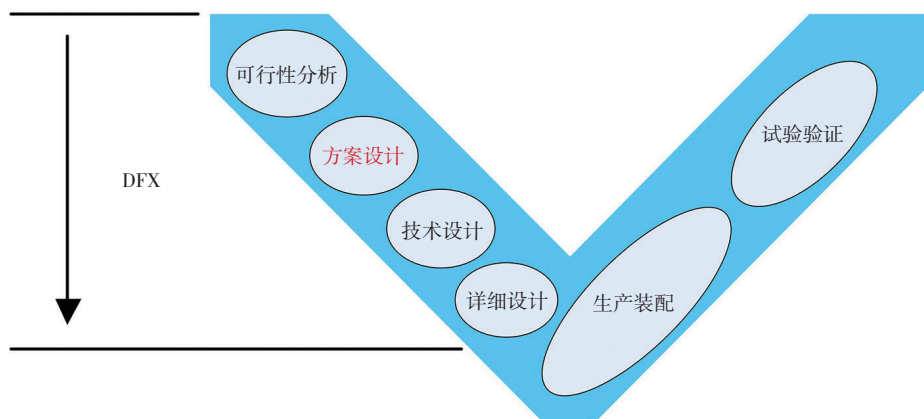


图1 DFX在研发过程中的体现

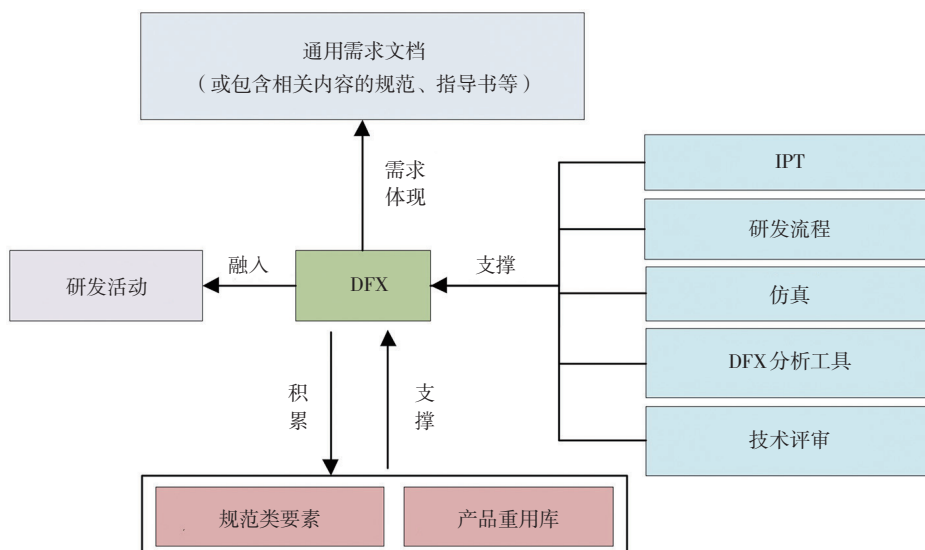


图2 DFX和其他工作之间的关系

支撑DFX相关工作的实现。

DFX的实现方法

根据对DFX和系统工程关系的分析，按照系统工程的方法可以实现DFX相关工作，即通过捕获“X”方面的需求，并予以高质量的实现，从而满足DFX相关的要求。

在航空发动机研发过程中，DFX工作始于可行性分析，结束于生产装配之前（如图1所示），主要工作在方案设计过程中完成，并在后续

设计工作中不断补充。在制造、装配、试验、维修等过程中，对DFX设计结果进一步验证，并将存在的问题或改进建议反馈给设计，积累形成经验，完善相关的DFX要求。

DFX和其他工作的关系如图2所示。DFX的需求体现在发动机各层级产品的通用需求文档（即通用需求库）中，也可以体现在包含相关内容的规范、指导书或设计准则（如各部件的结构设计准则）等资料中；DFX的要求是要融入研发活动

的，在研发活动中构筑DFX的基因；DFX的开展，需要规范类要素（指规范、指导书、示范图、检查单等）和产品重用库（指已有的、可重用的产品）的支撑，以更加快捷地实现设计，同时，相关设计成果也应积累到规范类要素和产品重用库中；DFX的具体实施需要IPT、研发流程、技术评审和仿真的支撑，IPT团队使用研发流程实现DFX，使用技术评审和仿真进行验证。

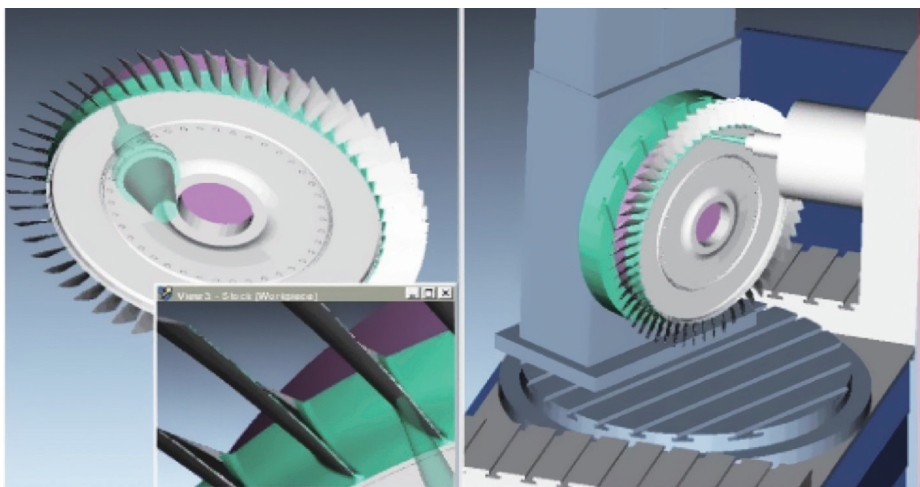


图3 制造仿真示意图

DFX需求的捕获与分析

DFX的需求是和发动机研发相关的其他需求共同捕获与分析的。为了更好地捕获DFX需求，可通过对相关国标、国军标、航标和企业标准的解读，融入型号研发经验，充分征求制造、装配、试验、维修等领域人员的意见，将DFX方面的详细需求体现到发动机各层级研发对象的通用需求文档中。同时，对于不编制通用需求文档的研发对象，要在设计规范、指导书等指导性材料中明确开展DFX需求捕获的方法或注意事项。通过上述文件，支撑设计尽可能充分、完整地考虑DFX需求。

DFX的需求分析工作和常规的需求分析工作相同，由于不同的DFX之间可能会有冲突（如可装配性要求零件数量尽可能少，但同时可能导致可制造性下降），因此需要注意协调需求之间的冲突，按照全局最优的原则，完成DFX的需求分析。

DFX设计工作的开展 IPT负责具体实施

组建由设计、制造、装配、试验、维修等领域的人员构成的IPT，负责DFX需求的捕获、分析和设计活动

的具体实施。IPT应是“重量级”团队，即团队成员应能充分代表其所在的领域，应有所在领域的技术决策能力和权力，并贡献自己及其所属领域的专业智慧，所有成员共同对团队负责。

按研发流程开展设计活动

DFX是融入研发活动中的，因此按照研发流程开展工作即可实现DFX。表1以发动机部件研发为例，说明了研发流程中的主要DFX活动。

使用规范类要素和产品重用库支撑设计

开展DFX设计活动时，为获得更好的结果，必须充分借鉴已有的经验，如设计原则、方法等，具体体现在对规范类要素和产品重用库的使用上。规范类要素中包含大量研发经验，产品重用库中则包含有已完成研发的产品，在二者的支撑下，DFX工作会更加高效。由于DFX和结构设计密切相关，在相关规范类要素建设中，要充分借鉴行业内外总结的结构设计经验，如结构工艺设计手册、机械设计手册、结构设计准则等。产品重用库方面，产品

表1 部件研发流程中DFX活动示例

研发过程	DFX方面的活动
可行性分析	捕获DFX需求，并通过可行性分析确定具体需求
方案设计	在多方方案筛选确定最终方案的过程中，充分考虑DFX需求，作为选择的依据
技术设计	伴随选定方案的细化，明确零组件的DFX设计要求，并约束零组件设计
详细设计	通过图纸及相关文件最终落实DFX需求
生产装配	验证DFX需求的实现情况，将DFX方面需要完善的内容反馈给设计，形成经验积累
试验验证	

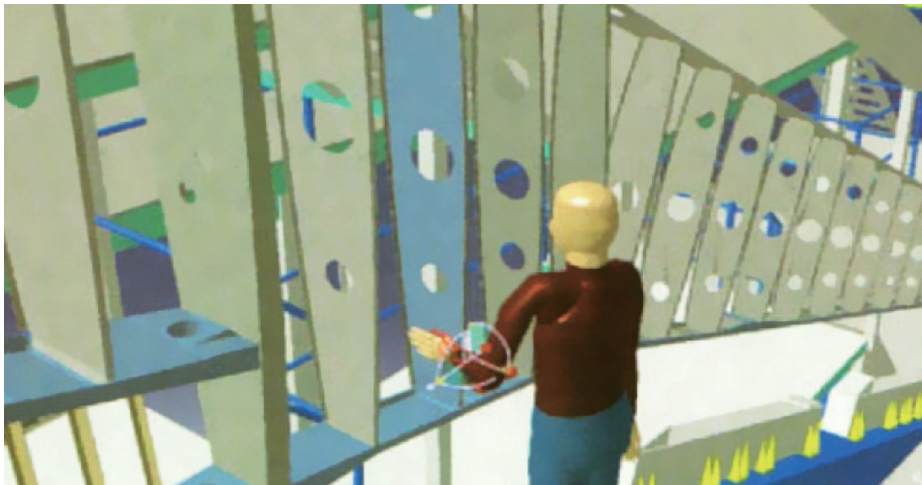


图4 装配仿真示意图

全生命周期管理（PDM）系统中包含了所有产品的数据，可供参考。

DFX的设计验证 仿真

在产品研发中，可充分使用仿真手段，对DFX方面的需求进行设计验证，相关仿真手段有制造仿真（如图3所示）、装配仿真（如图4所示）、试验仿真和维修仿真等。为支撑上述仿真工作的开展，需要构建虚拟样机。以虚拟样机为研究对象，代替物理样机，可开展相关的验证工作。

技术评审

技术评审是对设计结果进行评价的有效手段，可通过技术评审评估DFX工作开展的情况。作为技术评审的重要工具，检查单中应包含DFX相关的问题项。

以可制造性为例，可从以下方面在检查单中设置问题项：根据生产批量（单件、小批、大批等）、当前制造能力以及工艺技术发展的预期，选择合适的制造方式；零件的造型应尽量简单，应尽量减少零件的加工表面数量和加工面积，增加

相同形状和相同元素（如直径、圆角半径、配合、螺纹、键、齿轮模数等）的数量；毛坯的形状和尺寸应尽量接近零件本身的形状和尺寸，力求实现少量或无切削加工；零件的结构特征，如中心孔、圆弧、圆角、倒角、弯曲半径、下陷、螺距、齿距、紧固件孔径、切削半径等应尽量标准化、典型化、规范化、统一化；零件的结构工艺应满足成形方式（铸造、锻造、钣金、焊接、机加等）的要求；尽量使用标准的工具（如切削工具）、工装、夹具、量具、运输装置等使能产品（尽量减少专用器具）；公差、表面粗糙度等要求应能通过多种制造工艺实现，且严格程度不超过功能要求；图样上的尺寸应适当、完整；所用材料的种类应尽可能少，且有备选材料；零件上所有的特征均是必要的（如不能有多余的孔）；采用的新工艺、新材料、新设备等应经过充分的验证；应尽量将差别较小的零件改为同一个零件（减少工艺的工作量）；应便于检验和测量，检验所需方法和设备应成熟。

DFX分析工具

使用DFX分析工具可以快速、准确地对DFX进行设计验证。例如，针对航空发动机结构设计特点和加工工艺要求，基于DFMPro（一种集成于CAD系统的面向可制造性设计的计算机辅助工具）的设计工艺性检查软件，提出定制开发规则（包括机加、装配、管路、钣金、公差等多个工艺方向），并将DFMPro与Teamcenter（一种产品全生命周期管理的软件）平台进行集成，可以实现基于规则驱动的自动化设计工艺性审查，在相关数据库的配合下，能够辅助设计人员在航空发动机产品研制早期阶段尽可能多地发现和评估可制造性问题，达到减少设计反复、降低后期的加工制造成本和缩短产品研制周期的效果。

结束语

通过研究可看出，按照系统工程理念开展发动机研发可以很好地实现DFX要求。为更好地发挥DFX的效果，建议后续重点开展：收集制造、装配、试验、维修等领域的意见，形成详细、完整的DFX需求，并落实到通用需求文档等文件中；在技术流程中，将DFX相关的设计活动补充完整，并根据型号研发经验，及时完善规范、指导书等要素，补充产品重用库；进一步提升制造、装配、试验、维修等方面的仿真能力，在技术评审检查单中进一步丰富DFX相关的问题，并推动DFX分析工具建设。

航空动力

（宁怀松，中国航发动力所，高级工程师，主要从事系统工程、航空发动机研发体系建设，以及喷管和排气装置设计技术研究）