

多学科设计优化在航空发动机领域的应用

The Application of Multidisciplinary Design Optimization on Aero Engine

尹泽勇/中国航发 米栋 钱正明 张立章 吴沛/中国航发动研所

从设计角度讲，航空发动机综合性能的提高在很大程度上来源于两个方面：一是所涉及各学科自身理论及技术的进步；二是能充分、合理地考虑各学科耦合关系的综合设计理论及技术的进步。尽管在第二方面取得的效果迄今远不如第一方面，但越来越多的人认识到，多学科设计优化方法(MDO)作为复杂系统设计的一种有效仿真工具，是解决航空发动机设计难题的最佳途径之一。

航空发动机设计是一项极为复杂的系统工程设计任务，涉及到热力、气动、结构、强度、燃烧、传热、控制、可靠性等众多学科，这些学科内外均存在非线性耦合关系，并且学科之间存在着尖锐的冲突，这给航空发动机的设计带来了巨大的困难。传统的航空发动机设计不能充分考虑学科间的相互耦合作用及相互冲突，迭代改进工作量巨大，设计周期长，很大程度上限制了航空发动机的设计水平。

对于多学科耦合的复杂系统而言，其整体性能不仅仅由各自独立学科中的性能决定，而且与各学科的相互作用有关，因而传统的不能充分考虑学科间作用的设计方法对系统的描述是不精确的。多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)是一种通过充分探索并利用工程系统中各学科间相互作用的协调机制来设计复杂系统和子系统的一种仿真方法，它在考虑各学科耦合和协同作用的基础上，通过采取有效的策略来寻求最优解，从而提高产品质量，缩短研制周期，特别适合处理类似航

空发动机这样的复杂系统设计问题。

MDO发展历程及主要工作内容

1974年，美国国家航空航天局(NASA)高级研究员索比斯基(Sobieski)提出MDO思想后，其广阔的工程应用前景吸引了大型航空航天企业的参与，并促使企业界从传统设计模式向并行化先进设计模式转化。美国航空航天学会(AIAA)、NASA和美国空军(USAF)等于1986年组织了第一届MDO技术大会，并于1991年成立MDO技术委员

会(MDOTC)，后者先后发布了第一份和第二份白皮书。其后，美国机械工程师协会(ASME)也于2013年成立了叶轮机械MDO专题分会。目前，美国、欧洲都将MDO技术作为研究重点，以期解决复杂系统的设计问题。图1分别给出了EI和SCI收录的各年份MDO相关文章数目。从图中可以看出，从20世纪90年代开始，MDO得到广大研究者的关注，并呈现出逐年增长的趋势。

MDO主要工作内容包括系统分解、系统建模以及系统求解三个方面。

系统分解主要通过改变问题的

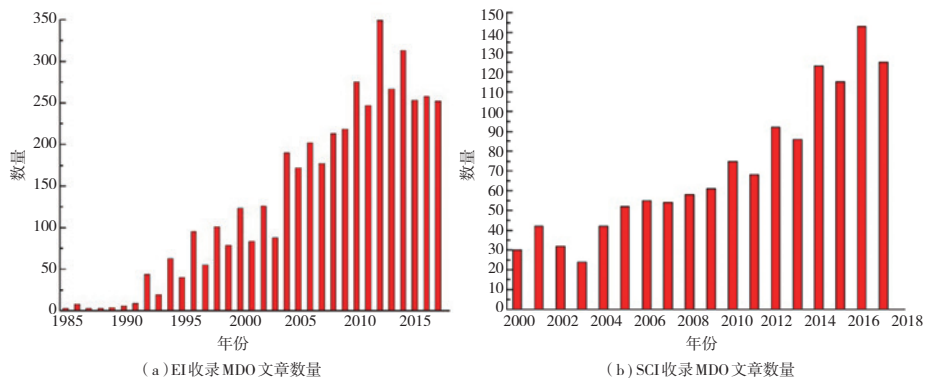


图1 历年MDO研究文献数量

MDO结构,降低问题的复杂性,以减少计算时间。通过系统分解,复杂系统可被重新组织成一个由一系列较小子系统组成但相互关系直接明确的形式。

系统建模是在系统分解的基础上,综合考虑各学科之间的耦合和协同作用,建立合适精度和可靠性的模型。系统建模可分为MDO物理建模和MDO数学建模两个方面。物理建模的主要目的是根据各学科的基础理论建立物理分析模型或采用经验验证有效的代理模型,在给定输入条件下得到各学科的输出,为MDO数学模型的建立提供数据。MDO数学建模是根据物理建模的相关输出数据建立合适的优化数学模型。对于大型复杂系统的数学建模,MDO策略是其中的一项重要技术,它主要研究如何确定一个大系统的各级和各个子系统之间的寻优逻辑,以及相互之间的数据交换和处理方式。

系统求解是利用合适的优化搜索算法和计算框架求解所建立的MDO模型。

MDO在航空发动机上的研究应用进展

笔者曾以大会报告形式在2009年蒙特利尔国际吸气式发动机会议(ISABE 2009)上对航空发动机MDO工作尤其是中国国内所开展的工作做过综述。此后,国内外采用MDO进行航空发动机设计的研究应用日益增多,许多大型航空航天企业及研究机构均已采用MDO技术进行航空发动机零件、部件乃至整机仿真设计,并取得了显著成效。

例如,普惠公司建立了三维轴流气冷涡轮叶片MDO方法,并使

用该方法对F100发动机二级涡轮叶片叶栅内部冷却结构进行了多学科设计优化,选取肋条位置、扰流柱高度等24个参数为设计变量,以叶片材料能承受的最高温度、应力、叶片持久寿命和马赫数等为约束,使用遗传算法进行求解。优化后,截面平均温度降低了50℃,平均冷却效率从原始设计的25.85%提高到29.7%,且应力、寿命和马赫数分布满足要求。

罗罗公司对某低压导叶进行了多学科设计优化,选取了叶型造型参数、叶根倒角等58个参数为设计变量,考虑进口马赫数、进口角、噪声和强度为约束,综合气动损失、出口角等构造气动性能目标函数,结合克里金(Kriging)和贝叶斯方法训练代理模型,经过2600多轮优化,在强度和噪声满足要求的情况下,叶片数从42降低到14,巡航状态、最大爬升状态、最大起飞状态的气动损失系数分别由2.8%、3.7%、4.4%降到2.3%、2.9%、2.8%。

德国宇航中心通过MDO方法对某型对转风扇进行优化,选取106个叶片造型参数作为设计变量,以两个转子的最大位移为目标函数,施加的约束条件包括效率、总压比、马赫数等气动性能指标和应力、应变、频率等强度指标。先使用进化算法和高精度的计算流体力学/有限元法(CFD/FEM)分析对叶片进行初步优化,之后基于初步优化数据作为训练样本点建立克里金代理模型,进行加速优化。经过2923轮优化后,在对转风扇等熵效率保持较高水平(93.4%~93.5%)的基础上,两个转子叶尖的最大位移分别减小了33.3%、66.7%。

俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)对某离心叶轮进行了多学科设计优化,选取流道参数、大小叶片造型参数等33个参数为设计变量,以流量、效率、压比、强度、寿命等为约束条件,优化目标为质量最小。通过近一个月的优化工作,离心叶轮强度、振动及寿命满足要求,压比不变,喘振裕度提高1.3%,级效率增加0.07%,离心叶轮质量减少6.2%。

此外,法国赛峰集团、韩国宇航研究所、德国西门子公司、德国MTU航空发动机公司以及众多高校也对航空发动机MDO开展了研究,其内容涉及系统建模、优化策略、优化搜索算法、代理模型等各个领域,对象分别是开式转子、叶尖容腔、冷却孔、叶片气动弹性、叶栅、燃气轮机低压压气机、高膨胀向心涡轮等各类零部件。

国内,笔者所在的中国航发湖南动力机械研究所(中国航发研究所)MDO团队是最早进行MDO研究的团队之一,自20世纪90年代末开始追踪、分析MDO技术研究动向,并对MDO在发动机领域的工程应用进行了探索。针对先进航空发动机设计面临的各学科间耦合关系复杂、指标冲突严重等困难,团队对航空发动机MDO的各项关键技术开展了研究、开发及应用工作。遵循由易到难、由简单到复杂的原则,团队研究工作大体可分为四个阶段,如图2所示。第一阶段,对发动机关键零件,如压气机转子叶片、涡轮转子叶片、机匣等的MDO进行了研究,重点研究的MDO技术为单级的标准优化策略、可变复杂度建模以及响应面建模技术等;第二阶段,对部件级的MDO

航空发动机MDO亟待突破的关键技术瓶颈

MDO有其巨大的优越性，同时也面临着分析、计算及数据交换高度复杂的困难。众所周知，航空发动机每一学科本身的设计计算就已非常复杂，若考虑多学科综合以及各学科间的耦合性，并在此基础上进行优化设计，其设计分析工作量就不是简单的线性叠加，而是成指数关系增长。若不突破相关关键技术瓶颈，MDO就无法成为实用的技术。

复杂结构参数化建模

参数化建模的主体思想是用几何约束、工程方程与关系来说明产品模型的形状特征，从而形成一簇在形状或功能上具有相似性的设计方案。航空发动机MDO中主要涉及叶片、轮盘、机匣等零件的参数化建模，现有的参数化建模一般是基于商用软件二次开发，已能够实现实心叶片、轮盘及机匣等模型的建模和更新，相关参数化建模技术的研究已经趋于成熟。然而，复杂气冷叶片、带冠叶片等航空发动机复杂零件参数化建模方法仍需不断改进。特别是涡轮气冷叶片，伴随着新的冷却结构的不断提出，涡轮气冷叶片向气膜冷却、扰流柱等组合冷却趋势发展，涡轮气冷叶片结构也越来越复杂，其参数化建模也成为研究热点。

代理模型

代理模型技术，就是以降低可允许范围内一定精度为代价，利用一个简单的输入、输出响应关系代替原本复杂的输入、输出响应关系，以减少计算成本。建立代理模型的主要方法有响应面模型、克里金模型、神经网络模型、支持向量机模型等。在航空发动机多学科设计优

化过程中，建立精确高效的代理模型是提高优化效率的重要途径。从目前已有的代理模型应用经验来看，不同的代理模型适用的范围不同，且每种代理模型都存在一定的误差，从而在一定程度上限制了代理模型在航空发动机MDO中的使用。因此对现有代理模型进行改进及验证，或建立并验证新的代理模型，以提高代理模型精度是今后的研究方向之一。

优化策略

传统的优化问题通常仅有一套优化模型，而MDO数学模型可以含有一套或多套子优化数学模型，这也是多学科设计优化与传统优化的主要区别之一。如何建立多学科优化模型直接依赖于MDO策略技术，求解效率也与MDO策略有直接关系。目前常见的用于航空发动机上的有标准策略、并行子空间策略、协作策略、两级集成系统综合策略等。其中标准策略一般适用于零件级优化，其他可适用于部件及整机级优化，但是优化效率还是不够高，因此很有必要进行改进，并研究建立新的策略。

优化搜索算法

在MDO技术中，优化搜索算法由不同层级优化器使用，不同优化搜索算法各有特点。对于复杂系统而言，优化问题中设计变量的数目多，优化问题的维数高，优化搜索算法研究侧重的是如何进一步提高MDO环境下的搜索效率。

航空发动机MDO未来发展需考虑的问题

除上述航空发动机MDO的关键技术外，还需认真思考研究如下几个方面的问题，以利其未来的发展。

首先是如何处理MDO与发动机设计流程的相互关系。是按基于MDO的协同设计方法建立设计流程，还是在现有发动机设计流程中嵌入基于MDO的协同设计方法。前者从头做起，是一项大工程，后者工作量相对小，但未必能充分发挥MDO的优越性。

其次是在前期利用帕累托非劣解等方法已开展的多目标综合优化工作基础上，考虑在MDO中是否应当及如何包含经济性等“非技术”学科的问题。

第三是各学科领域的新发展会对MDO产生新的影响。例如，增材制造技术可使设计者“无约束”地“自由”设计，不受拓扑约束。这为获得优化结果提供了更大空间，但也为优化工作带来了更大的复杂性及工作量。

最后是作为优化对象的复杂系统的取舍问题，包含规模的广度及学科的深度两个方面。这更多地要在今后的实践中来做出判断。

结束语

作为解决复杂系统设计的有效仿真工具，多学科设计优化方法在航空发动机设计领域具有广阔的应用前景。本文介绍了国内外航空发动机多学科设计优化的发展历程及研究进展，并给出了发动机MDO领域有待解决的问题和未来研究方向。可以预见，随着发动机综合性能需求的提升，MDO在发动机设计工作中将占有更重要的地位。相关关键技术问题的解决将进一步提升航空发动机MDO的能力，为发动机设计者提供更高效的设计仿真方法。

(参考文献42篇，略。) **航空动力**

(尹泽勇，中国工程院院士，中国航发科技委主任、“两机”专项总师。)