



涡轮叶片冷却结构设计中基于 MBSE 的多学科建模方法

王成恩

上海交通大学机械与动力学院, 上海 200240

E-mail: c.wang@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-12-30; 接受日期: 2018-02-14; 网络出版日期: 2018-07-20

摘要 复杂产品设计需要建立多个学科领域模型, 传统设计方法造成大量“模型孤岛”和信息不一致性. 为了优化产品全局运行性能, 必须集成孤立的多学科模型, 实现多学科耦合分析以及多学科设计优化. 本文采用基于模型的系统工程 (model-based systems engineering, MBSE) 方法, 研究复杂产品设计过程中多学科建模方法和模型集成技术. 在 MBSE 方法指导下, 本文研究和建立了涡轮叶片冷却结构设计的几何模型、气动分析模型、传热分析模型以及设计优化模型等. MBSE 建模方法突破了传统的专业界限, 在统一体系架构下建立多学科模型, 可以消除多学科模型不一致性, 以及实现了多学科模型集成. MBSE 方法的应用能够提高复杂产品设计效率和水平.

关键词 基于模型的系统工程, 涡轮叶片, 几何模型, 物理模型, 优化模型

1 引言

系统的概念是现代科学与工程领域的基石. 研究者将研究对象定义为一个系统并将其从环境中“分割”出来, 以便专注于系统内部元素的结构和行为研究. 一个科学或者工程系统主要包括一定相互联系 (作用) 的元素、系统内涵 (定义域)、系统边界及其与外部环境的交互 (如能量、信息或者物质等). 系统的概念使得研究者可以从不同的视角观察一个复杂的对象, 或者分别从多个“局部”研究一个复杂的对象. 这样, 人们从不同研究角度就可能将同一复杂对象定义为不同的学科系统, 形成了复杂对象的多种局部“视图”模型.

传统的系统工程方法主要关注系统结构和元素行为等方面的研究、管理规划、最优化和控制等, 弱化了系统与环境 (或者其他系统) 交互关系及其影响. 传统的设计方法将一个复杂产品系统分解为多个学科的系统, 可以降低系统模型复杂性和计算分析难度. 但是, 随着非线性和动力学特性增加, 这种基于学科分解的产品设计分析方法暴露出明显不足:

- (1) 采用线性模型近似描述非线性系统响应, 导致分析精度较低;

引用格式: 王成恩. 涡轮叶片冷却结构设计中基于 MBSE 的多学科建模方法. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 783-793, doi: 10.1360/N112017-00299
Wang C E. MBSE-based multidisciplinary modeling for designing turbine blade cooling structures (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 783-793, doi: 10.1360/N112017-00299

- (2) 采用确定性规律描述系统激励和响应过程, 无法反映系统不确定性特征;
- (3) 采用边界条件假设对多个学科系统进行解耦, 不能精确描述子系统之间的耦合效应.

例如, 许多流动问题的仿真分析一般假设绝热或者固定壁温条件下计算速度和压强分布; 多数固体导热问题的仿真分析则通常假设壁面流体温度和换热系数为固定值情况下计算固体温度及其梯度分布. 传统产品研制过程中, 工程师按照学科分别独立地研究和解决材料、机械结构、气动、传热以及结构振动等方面技术问题. 然而, 科学技术发展和高性能复杂产品系统研制却不断凸显多学科系统之间非线性耦合作用的重要性. 目前, 为了持续提高复杂产品的性能, 工程师必须同时解决气-热耦合、热-结构耦合、流动-结构耦合等非线性系统动力学问题. 因此, 复杂产品研制成为典型的大系统或者“系统的系统 (system of systems, SoS)”, 工程师必须采用多学科建模、分析、设计和优化的方法才能提高相关产品的性能、可靠性和持久性 (durability).

现代科学研究与工程技术开发在方法论上都是基于模型的 (model-based), 即模型驱动 (model-driven). 所以, 复杂产品研制极大地依赖多学科建模方法、模型管理和模型应用. 模型是对某一系统的抽象和形式化描述, 是系统规划、分析、设计和优化的基础. 复杂产品研制在需求分析、设计、分析、制造、实验测试和评估过程中需要建立大量的异构模型. 工程师依据专业模型开展分析与设计决策活动. 例如, 航空发动机涡轮叶片冷却结构设计包含了几何、叶栅燃气流动、叶片材料导热、内腔冷却流动以及结构强度等多学科模型. 显然, 复杂产品开发项目面临的一个技术挑战就是准确和有效地建立、管理和分析多学科模型. MBSE 方法可以很好地管理和应用系统开发生命周期 (system development life cycle, SDLC) 内的各类模型.

Montgomery^[1] (2013) 认为传统系统工程是文档和事件驱动的, 通过设置里程碑管理系统开发; 而 MBSE 则建立数字化全生命周期的系统模型实现 SoS 系统综合分析、设计和评估等. MBSE 方法采用数字模型取代图纸和文档, 可以促进设计开发者之间的交流, 降低开发风险和系统质量^[2]. 因此, MBSE 方法很快在各种科学研究与技术开发领域, 特别是在复杂产品研制与采购方面得到认可和应用.

早期, 美国国防部在复杂装备研制中采用 C4ISR (command, control, communications and computers intelligence surveillance and reconnaissance) 的模型架构, 后来演变为 DoDAF (department of defense architectural framework) 模型架构, DoDAF 模型架构可以有效地实现 MBSE 方法^[3]. DoDAF 模型架构发挥了示范作用, 各国的装备管理部门和研制单位纷纷推出相应的 MBSE 平台. 最近, 德国航天中心采用 MBSE 方法建立多用途的虚拟卫星模型, 有效地管理设计、制造、运行和维护全生命周期数据^[4]. 为了应对大型装备研制与采购管理的复杂性, 美国国防部在装备综合采购 (研制) 管理领域建立跨技术领域的协作平台, 利用信息技术实现 MBSE 方法^[5].

复杂系统研制不仅包括大量的软件和硬件系统, 更需要组织管理多学科的工程师团队. O'Neil 等^[6] (2013) 采用 MBSE 方法研究了复杂系统开发过程中组织结构、团队交互以及人机交互等问题, 建立组织模型并且进行了仿真. 研究者认为基于模型的 MBSE 方法可以提高复杂系统研制过程中人员的决策能力和水平^[7]. 因此, MBSE 方法被复杂装备制造业广泛接受, 成为包含研制规划、过程管理、系统建模、仿真、制造、测试和运行维护等环节的全生命周期管理体系架构.

本文探讨将 MBSE 方法应用于涡轮叶片冷却结构设计过程, 以“系统的系统”思维模式建立多学科设计分析模型. 涡轮系统是航空发动机的能量转换部件, 它将燃气的动能和热能转换为机械能. 涡轮部件 (尤其转子叶片) 是航空发动机中承受热负荷和动力负荷最大的部件, 其工作条件恶劣, 是发生故障最多的部件之一. MBSE 方法将促进涡轮叶片冷却结构设计过程中的多学科模型集成, 提高仿真分析精度和设计优化水平.

2 涡轮叶片冷却结构设计的 MBSE 模型

涡轮叶片设计包括气动翼型(外形)设计^[8]和内部冷却结构设计两部分,本文研究叶片冷却结构设计过程中多学科建模技术.超音速巡航和高机动性等性能要求航空发动机必须持续地提高推重比.依据 Brayton 循环原理,提高航空发动机的推重比就必须提高其热力循环参数,即增加气体压缩比和涡轮前温度.目前,高推重比航空发动机涡轮前的燃气温度已经超过了叶片材料的承受极限,而且仍然在不断增加.过高的热载荷(温度和温度梯度水平)可以造成金属材料金相变化和性能恶化,引起烧蚀、蠕变、裂纹和断裂等结构失效形式,降低了叶片可靠性和寿命.设计工程师必须采用复合冷却技术来降低涡轮叶片结构温度和温度梯度水平,保证涡轮叶片的可靠性和耐久性.

复杂产品系统研制需要确定合适的系统体系结构,以便更好地规划系统的外延和内涵,确定所采用的方法、技术、过程以及模型等.从系统外延的角度,涡轮叶片冷却结构设计模型需要分析燃气入口条件、转动效应以及功率输出等.从系统内涵的角度,涡轮叶片冷却结构设计模型包括叶片外部冷却与内部冷却两种方式.因此,涡轮叶片冷却结构设计必须建立集成的多学科设计分析模型.如图 1 所示,我们采用 SysML 语言建立了涡轮叶片冷却结构设计过程的主要学科模型,并且表现模型之间层次关系.

MBSE 方法不仅需要建立多学科模型,而且要建立多学科模型之间的联系.在包含众多管理与技术领域模型的复杂产品研制中,集成是实现 MBSE 方法的核心技术^[1].复杂产品研制项目都采用几何模型(CAD 模型)描述产品结构,采用多物理场分析模型(CAE 模型)仿真分析产品的性能.由于设计工程师和分析工程师的关注点不同,CAD 模型和 CAE 模型之间存在较大的异构性,导致设计风险.因此,CAD 模型与 CAE 模型无缝衔接是一个值得重视的技术问题.MBSE 方法可以集成 CAD/CAE 模型,并且管理多领域模型交互,支持复杂装备设计和仿真过程^[9].本文采用 MBSE 方法,提出了一种基于参数映射技术的几何模型与多物理场模型集成方法.

如图 2 所示,本文首先建立全参数化的涡轮叶片冷却结构几何模型,作为设计分析的基础.然后,本文采用推进波前法和 DT(delaunay triangulation)法生成非结构化网格,将连续的参数化几何模型映射为离散化的物理域模型.我们进一步在离散化的物理域模型上加载边界条件与源项参数,映射成为离散化的物理场数值模型(如有限元模型).另外,材料本构模型描述了连续介质尺度上材料物性的各向同性或者各向异性,以及材料物性的线性和非线性特征.因此,材料本构模型直接影响设计分析过程的计算效率、精度和决策准确性.

物理场模型仿真分析过程产生大量的物理性能数据(例如速度、压强和温度等),可以预测装备的运行性能指标.从装备性能指标到装备的几何结构模型是一个逆向设计过程,其技术难度在于物理场参数和几何结构参数之间不存在确定性的映射关系.因此,我们只能采用代理模型(surrogate models)作为中继站来连接物理场模型与几何模型.一般可以采用实验设计和 MBSE 结合方法建立代理模型^[10].由于从性能指标集合到几何参数集合之间不能通过解析式数学逆变换方式实现,涡轮叶片冷却结构逆向设计应该与人工智能和深度学习技术紧密结合.最后,为了支持涡轮叶片冷却结构多学科优化设计,我们在代理模型与几何模型之间增加了多目标优化模型.

在涡轮叶片冷却结构设计中,各专业团队从不同的角度创建领域模型(如几何、流场与温度场模型),很可能产生模型之间的不一致性.因此,全部 MBSE 模型必须是形式化定义的,并且是可以推理的,以便可以自动确定模型之间的不一致性^[11].我们采用了多学科参数映射方法,检测和消除多学科模型之间的不一致性,实现多数据源的互操作^[12,13].

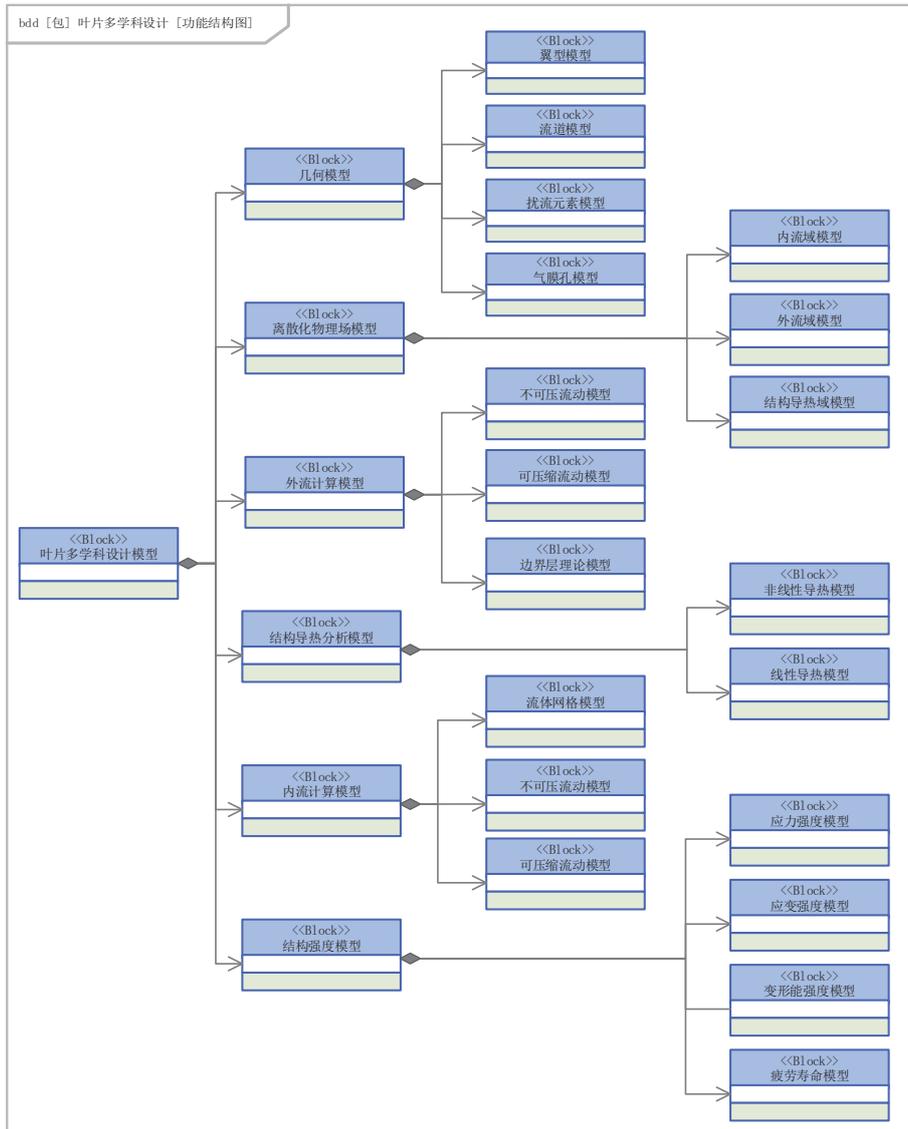


图 1 (网络版彩图) 涡轮叶片冷却结构设计中的 MBSE 模型框架

Figure 1 (Color online) The MBSE model framework for designing turbine blade cooling structures

3 连续几何模型与离散化物理域模型

3.1 连续几何模型

几何模型体现了复杂产品设计方案,也是多物理场分析与性能优化的基础.几何模型在多维空间中采用参数化方程来描述特征、零部件、装配体以及装备系统的几何形状与相互拓扑关系.复杂产品设计过程中需要采用面向对象的思想建立多层次(多粒度)几何模型集.下面,我们简要说明涡轮叶片冷却结构中主要元素的参数化模型.

叶片外部冷却技术通过气膜孔和缝隙使得内部流道中冷却介质流出到叶片表面隔阻和降低高温燃气向叶片的传热.美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的学者开展了涡轮

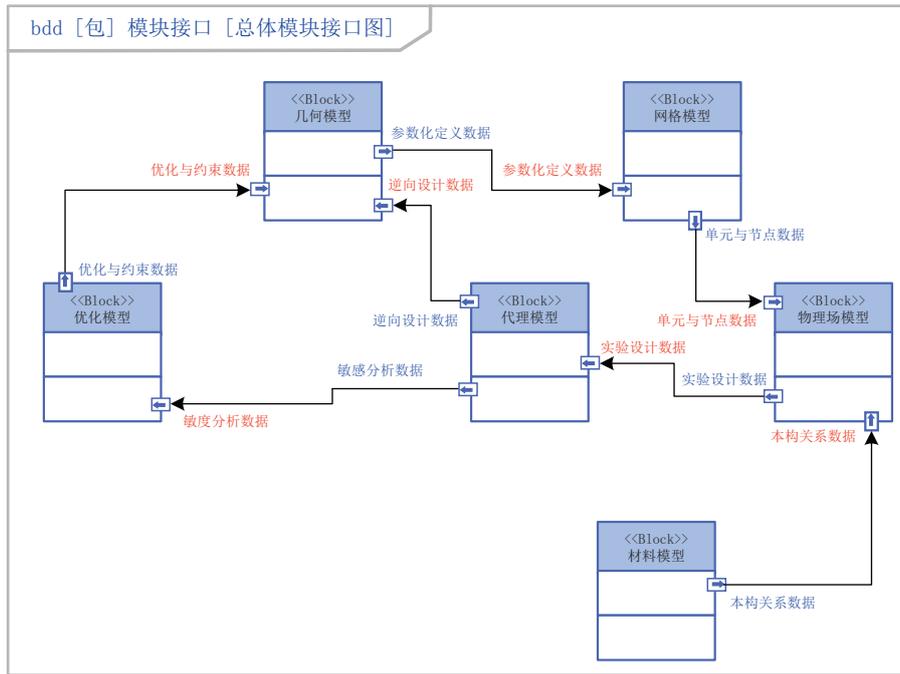


图 2 (网络版彩图) 基于参数映射的多学科模型集成方法

Figure 2 (Color online) Multi-discipline model integration based on parameter mapping

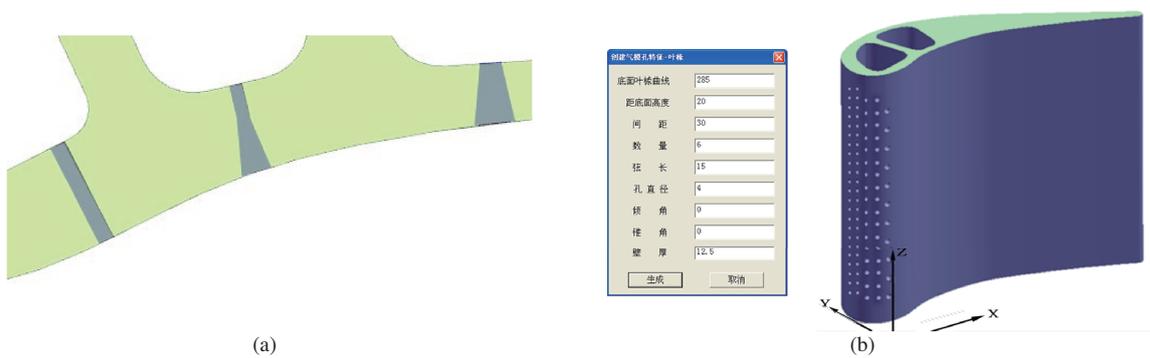


图 3 (网络版彩图) (a) 二维气膜孔参数化模型; (b) 三维气膜孔参数化模型

Figure 3 (Color online) (a) 2D parametric modeling of film-cooling holes; (b) 3D parametric modeling of film-cooling holes

叶片气膜冷却机理研究, 他们的研究表明气膜冷却效果与主流性质、可压缩性、湍流度、气膜孔构型(尺寸、形状、位置和角度)、冷却介质速度和温度分布等诸多因素相关^[14~16]. 因此, 涡轮叶片冷却设计的一个重要内容就是计算分析各类气膜孔对冷却效率的影响. 如图 3 所示, 我们建立了圆孔、渐扩孔和异型孔等多种形式气膜孔的二维和三维参数化模型.

叶片内部冷却的基础是在叶身内引入冷却介质对通道内壁进行对流换热冷却, 因此通道几何形状具有十分重要的意义. 涡轮叶片冷却通道可以采用三角形、矩形和梯形等多种几何形状, 并且需要适应叶片弯扭形状. 如图 4 所示, 我们采用自由曲线(面)构造了多种通道参数化模型, 并且建立了单层隔板和多层壁流道的参数化模型. 冷却通道的参数化模型通过几何参数控制通道形状的变化, 通过拓

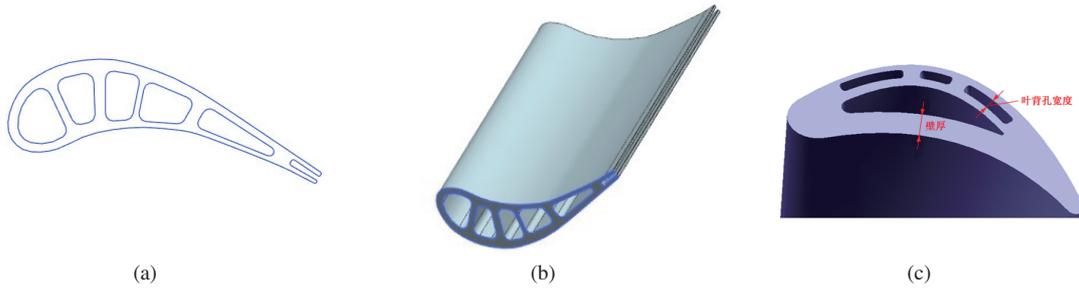


图 4 (网络版彩图) (a) 二维流道参数化模型; (b) 三维流道参数化模型; (c) 多层隔板流道模型

Figure 4 (Color online) (a) 2D parametric modeling of coolant flow channels; (b) 3D parametric modeling of coolant flow channels; (c) parametric modeling of multi-layer baffled coolant flow channels

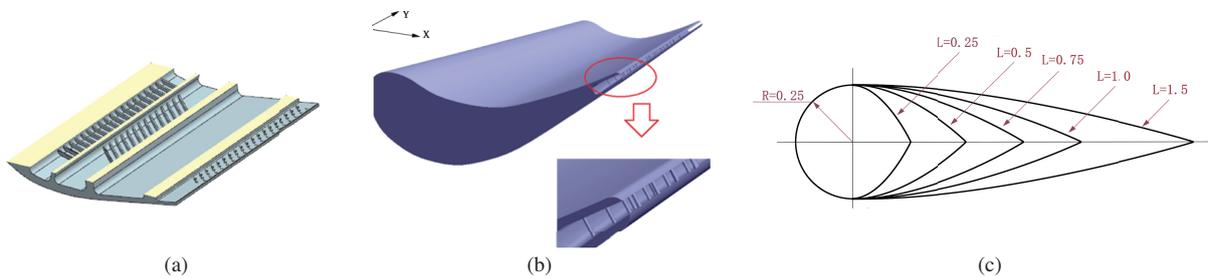


图 5 (网络版彩图) (a) 扰流肋参数化; (b) 扰流柱参数化模型; (c) 水滴形扰流柱参数化模型

Figure 5 (Color online) (a) parametric modeling of ribs; (b) parametric modeling of pins; (c) parametric modeling of teardrop pins

扑参数控制流道在涡轮叶片截面上的分布。

为了提高冷却效率, 冷却流道参数化模型需要灵活地控制流道壁厚, 实现等壁厚或者变壁厚要求. 流道的壁厚控制在很大程度上影响了叶片冷却效果和叶片温度分布. 参数化的冷却流道模型需要与冲击孔和扰流元素等模型集成. 各种孔隙和扰流元素拓扑模型一般以流道模型为基准.

为了强化冷却效果, 涡轮叶片内部冷却进一步采用冲击冷却和扰流强化换热等冷却技术. 最初, 研究者采用垂直肋, 后来 Han 等^[17] (1991) 发现斜肋比垂直肋能够更好地提高冷却流动的换热能力. 近期的研究工作表明非连续 (断裂) 的肋比连续肋在提高冷却效果方面具有更大的优势^[18]. 因此, 我们采用参数化建模方法构建多种扰流肋的几何模型 (如图 5(a) 所示). 并且, 我们建立了圆柱形 (图 5(b)) 和水滴形 (图 5(c)) 等多种扰流柱的参数化模型; 扰流柱可以提升冷却介质在涡轮叶片尾缘部位的换热能力.

限于篇幅, 本文不再详细叙述其他结构元素的几何模型. 总之, 参数化建模奠定了后续多物理场数值仿真和性能设计的基础, 提高了涡轮叶片冷却结构设计效率和智能化水平.

3.2 离散化物理域模型

一套几何模型集构成了一个复杂产品设计方案. 设计决策需要评估许多设计方案的预期性能、可靠性和持久性等, 选择满意的设计方案. 设计方案的评估主要采用数值模拟分析与物理实验两种技术途径. 气动、传热和结构动力学等多物理场数值模拟分析技术的基础是将基于偏微分方程的连续系统

转换为基于代数方程的离散系统. 所以, 连续的参数化几何模型必须分割成大量的离散化的“单元”, 离散化的单元集合构成了物理系统的子定义域集合.

工程师采用网格划分算法将多维度连续的几何模型分割成相应维度离散化的单元集合, 构成了离散化的物理域模型. 一维空间中, 单元形状只有一种形式, 即线段. 二维空间中, 常见单元形状包括三角形和四边形, 也可以采用其他多边形. 三维空间中, 单元形状基本采用四面体和六面体, 也可能采用五面体等形状. 离散化物理域建模一般是一个从低维度几何模型离散化到高维度几何模型离散化过程. 如图 6 所示, 三维的离散化单元 (如四面体) 也包含了二维的离散化单元 (如三角形) 和一维的离散化单元 (线段).

涡轮叶片冷却结构设计需要建立叶片外部燃气流动域、叶片结构导热域以及叶片内部冷却流动域的离散化定义域模型. 这些离散化的物理域模型包括二维空间的三角形和四边形单元模型, 而且包括三维空间的四面体和六面体单元模型. 离散化的物理域模型不仅将几何模型与物理系统模型连接起来, 而且影响数值模拟分析的计算精度和效率.

4 多物理场耦合模型

复杂产品运行过程伴随着多种物理反应和化学反应 (如燃烧), 本文只考虑连续介质尺度的物理过程建模. 物理系统 (过程) 模型描述流动、传热和结构响应过程中质量守恒、动量守恒及能量守恒规律. 如图 7 所示, 物理系统模型从数学形式上采用偏微分方程建立系统控制方程 (governing equations), 描述系统内部变化规律. 在 MBSE 系统建模过程中, 可以采用面向对象概念将多学科系统控制方程区分为椭圆型偏微分方程 (如稳态导热过程)、抛物线型偏微分方程 (如瞬态导热过程) 和双曲线型偏微分方程 (如波动过程).

在系统控制方程的基础上, 物理系统模型还包括边界条件模型, 用于描述物理系统与环境 (或者其他系统) 的物质、动量和能量交换. 虽然, 在工程实践中物理系统可能包含多种边界条件, 但是从数学形式上可以归纳为 3 类, 即 Dirichlet, Neumann 和 Robin 条件. 物理系统数值仿真分析需要给定系统初始状态及全部边界条件, 因此也被称为初始边值问题 (initial boundary problems).

涡轮叶片冷却结构设计主要涉及空气动力学、传热、结构力学 3 种物理场数值建模与仿真分析. 早期的涡轮叶片冷却技术研究一般采取了独立处理叶片内外部流动、叶片内外壁面对流换热, 以及叶片结构内热传导过程. 这些研究工作一般先假设 (或者预估) 壁面温度计算流动特性, 得到对流换热系数和流体边界温度分布等; 然后将这些流动参数作为边界条件, 再计算叶片结构的热传导问题. 这类研究方法一般忽略了叶片结构温度分布和热传导过程对内外部流体特性的影响, 因此计算误差较大. 另外, 早期的研究工作为了提高计算速度, 往往降低流动问题的维度, 将其作为一维或者二维的流动问题进行处理. 为了提高涡轮叶片冷却结构设计水平, 本文不仅建立了叶片外部燃气流动、叶片导热、冷却介质流动, 以及叶片结构响应 (变形和振动) 模型, 而且建立了这些物理场之间的耦合效应模型.

空气动力学系统核心模型是三维纳维斯托克斯方程 (Navier-Stokes equations, 简称 NS 方程), 叶栅燃气流动一般可以采用三维 NS 方程描述. 但是, 鉴于涡轮叶片冷却结构设计的重点是获得叶片结构的温度载荷, 也可以将燃气流动模型简化为边界层理论模型. 涡轮叶片内部冷却介质流动速度较低, 可以采用不可压缩 NS 方程. 现有的设计方法往往将内部冷却介质的流动简化为流体网络模型, 必然影响计算精度. 流动问题分析的难点是描述和计算各类湍流, 湍流现象直接影响流动稳定性和对流换热能力. 虽然, 直接数值模拟与大涡模拟技术持续进步, 但是雷诺平均纳维斯托克斯方程 (Reynolds averaged Navier Stokes equations, RANS) 更具备工程实用性. RANS 在航空发动机应用情况可以参见

最近的综述文献 [19]. 本文在涡轮叶片冷却技术研究中将采用了 RANS、 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型描述流动中湍流现象.

在叶片结构传热分析方面, 一般采用基于 Fourier 导热定律的传热控制方程:

$$\rho c_p \partial_0 T = \partial_i (k \partial_i T) + q_s, \quad (1)$$

其中 ρ : 材料密度, c_p : 定压比热, T : 温度, k : 导热系数, q_s : 内热源.

传热分析模型 (1) 本质上是一种能量守恒方程, MBSE 建模方法可以将其实例化为两个子模型, 即线性传热模型和非线性传热模型. 线性与非线性传热模型的判断条件是材料导热系数是否随温度变化. 热力学系统在方程 (1) 基础上, 采用边界条件模型描述同环境交换能量的多种方式.

叶片冷却结构设计的关键技术挑战之一是气热固多学科耦合, 例如气热、热固耦合、气固耦合等. 限于篇幅, 本文仅简单讨论常见的气体和固体耦合传热 (conjugate heat transfer, CHT) 问题. 通过集成基于有限体积方法 (finite volume method, FVM) 的流体求解器和基于边界元方法 (boundary element method, BEM) 固体导热求解器, 涡轮叶片的耦合传热问题可以采用松耦合迭代求解 [20]. 这是目前工程技术领域普遍采用的一种方法, 其优点是可以充分利用已有的单学科求解器, 不用开发新的求解器; 其缺点是没有实现机理层次的耦合, 迭代计算量大, 可能不收敛.

本文从技术成熟性角度采用了气热松耦合求解方法, 同时从技术先进性的角度采用了基于能量平衡的强耦合求解方式计算分析气体和固体的耦合传热问题. 叶片冷却介质流动可以采用牛顿流体假设和不可压流动 NS 方程描述, 即

$$\partial_i v_i = 0, \quad (2)$$

$$\rho (\partial_0 v_i + v_j \partial_j v_i) - \partial_j [\mu (\partial_j v_i + \partial_i v_j) - p \delta_{ij}] + \rho f_i = 0, \quad (3)$$

$$\partial_0 (\rho e) + \partial_i (\rho e) = -\partial_i q_i - p \partial_i v_i + \tau_{ij} \partial_j v_i, \quad (4)$$

其中, v_i : 速度分量, ρ : 密度, μ : 动力学粘性系数, p : 压强, f_i : 体积力, e : 内能, q_i : 热流量, τ_{ij} : 应力分量.

耦合换热强耦合数值求解方法包括两步: 首先求解连续性方程 (2) 和动量守恒 (3) 获得速度和压强, 然后联立求解流体能量方程 (4) 及固体能量方程 (1). 这种强耦合的求解方法需要在气固界面建立能量平衡约束, 即假设界面处热流量连续. 强耦合换热数值解法需要重新开发求解器, 开发成本高, 但是可以提高叶片冷却设计过程的计算精度、收敛性和稳定性等. 耦合换热数值分析可以得到叶片平均温度、局部最高温度、温度分布、温度梯度分布、局部换热系数、冷却膜冷却效率、冷却效果、Stanton 分布、Prandtl 数和 Nusselt 数分布等. 多场耦合模拟分析奠定了涡轮叶片冷却结构多学科设计优化的基础.

5 多目标设计优化模型

涡轮叶片冷却结构设计的技术挑战是存在大量相互制约的性能要求和优化目标. 虽然冷却技术提高了涡轮部件可靠性和寿命, 但是冷却也造成了系统热效率和气动性能下降. 因为抽取压气机中压缩气体作为冷却介质绕过燃烧室对涡轮叶片进行冷却, 降低了航空发动机整机热效率. 其次, 冷却介质与燃气掺混造成叶片外部流动特性的变化, 有可能降低叶片的气动性能. 而且, 叶片内部流道扰流造成的不稳定性也可能降低系统效率. 第三, 叶片冷却结构中流道、孔槽缝隙和扰流元素等在一定程度上造成应力集中和应力增大等问题, 降低了涡轮叶片的结构强度和可靠性.

目前, 涡轮叶片冷却造成的热量 (能量损失) 在相当大程度上抵消了涡轮前燃气温度提升带来的效益. 为了提高系统热效率, 必须在保证结构可靠性和耐久性的前提下, 最大限度地降低冷却介质流量. 所以, 涡轮叶片冷却结构设计必须同时提高性能指标和可靠性指标, 并且满足相应的约束条件. 这里, 多目标设计优化模型可以在数学上描述为: 选择一组描述冷却结构的几何参数 (如流道、扰流肋和气膜孔形状等) 作为决策变量 $X = x_i \in \mathbb{R}^n$, 然后寻找一组最佳值 x_i^* ($i = 1, 2, \dots, n$), 使得一组目标函数最小化, 即

$$\min f_j(X) \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

涡轮叶片冷却结构优化设计不仅需要考虑传热和气动等方面性能指标, 还必须综合提高结构完整性 (structural integrity) 指标. 目前, 涡轮叶片冷却结构的优化设计目标函数主要包括对气动性能扰动、冷却介质用量、最大温度、结构重量和结构强度水平等. 并且, 涡轮叶片冷却结构的优化设计需要满足一定数量的约束条件, 分为等式约束和不等式约束.

$$\begin{aligned} h_l(x_i) &= 0, \quad l = 1, 2, 3, \dots, \\ g_j(x_i) &\leq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \\ x_i^- &\leq x_i \leq x_i^+, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

涡轮叶片冷却结构包含大量的几何参数, 多学科设计优化过程必须尽量降低优化空间的维度. 所以, 本项研究需要采用敏感度分析技术评估叶片冷却结构参数对冷却效率、温度水平、结构强度和疲劳强度的影响程度; 选择敏感度高的几何结构参数作为决策变量建立叶片冷却结构优化设计的目标函数和约束函数.

正交实验设计方法可以合理地构造叶片冷却过程中气热固耦合响应的样本数据集, 支持建立变可信度的代理模型或者响应面模型. 采用响应面函数的代理模型可以有效地降低计算复杂性; 然后研究基于响应面函数梯度 (差分) 和智能进化相结合寻优算法, 提高优化计算效率.

6 小结

现在和未来很长时期内, 基于对流换热的冷却技术是航空发动机研发的关键核心技术之一. 涡轮叶片冷却结构设计是一个 SoS 系统工程问题, 包含几何结构建模、叶片外部流场、内部流场、叶片结构传热、结构强度等多学科分析问题. 涡轮叶片冷却结构设计面临相互冲突的技术需求: 高可靠性和长寿命指标需要提高涡轮叶片结构冷却效果, 然而高性能指标则要求减少冷却介质流量.

为了实现复杂的系统综合性能指标最优化, 涡轮叶片冷却结构设计必须改变传统的各学科单独分析和设计方法, 采用系统工程的思想实现多学科建模、耦合分析、全局多目标设计优化. MBSE 方法可以在统一系统模型架构下建立多学科模型, 突破现有的专业界限, 建立复杂系统全生命周期模型. 因此, 作者认为 MBSE 方法与经典工程技术的结合是解决涡轮叶片冷却结构设计问题有效技术途径. 作者相信 MBSE 方法将促进多学科耦合数值分析和多学科设计优化技术发展, 可以综合提高装备系统的创新设计水平.

参考文献

- 1 Montgomery P R. Model-based system integration (MBSI) — key attributes of MBSE from the system integrator's perspective. *Procedia Comput Sci*, 2013, 16: 313–322

- 2 Bjorkman E A, Sarkani S, Mazzuchi T A. Using model-based systems engineering as a framework for improving test and evaluation activities. *Syst Eng*, 2013, 16: 346–362
- 3 Piaszczyk C. Model based systems engineering with department of defense architectural framework. *Syst Eng*, 2011, 14: 305–326
- 4 Fischer P M, Lüdtke D, Lange C, et al. Implementing model-based system engineering for the whole lifecycle of a spacecraft. *CEAS Space J*, 2017, 9: 351–365
- 5 Bachman J T. Obtaining a cross-engineering collaborative environment via transition to a model-based system engineering (MBSE) approach. *J Defense Modeling Simul*, 2016. Doi: 10.1177/1548512916646885
- 6 O'Neil D A, Petty M D. Organizational simulation for model based systems engineering. *Procedia Comput Sci*, 2013, 16: 323–332
- 7 Russell M. Using MBSE to enhance system design decision making. *Procedia Comput Sci*, 2012, 8: 188–193
- 8 Wang C E. Integrated aerodynamic design and analysis of turbine blades. *Adv Eng Softw*, 2014, 68: 9–18
- 9 Graignic P, Vosgien T, Jankovic M, et al. Complex system simulation: proposition of a MBSE framework for design-analysis integration. *Procedia Comput Sci*, 2013, 16: 59–68
- 10 MacCalman A, Kwak H, McDonald M, et al. Capturing experimental design insights in support of the model-based system engineering approach. *Procedia Comput Sci*, 2015, 44: 315–324
- 11 Herzig S J I, Paredis C J J. A conceptual basis for inconsistency management in model-based systems engineering. In: *Proceedings of the 24th Cirp Design Conference*, Giovanni Moroni, 2014. 52–57
- 12 Wang C E, Xu L D. Parameter mapping and data transformation for engineering application integration. *Inf Syst Front*, 2008, 10: 589–600
- 13 Wang C E. Insights into developing an MDO environment for complex engineering systems. *Comput Industry*, 2014, 65: 786–795
- 14 Garg V K, Gaugler R E. Heat transfer in film-cooled turbine blades. In: *Proceedings of ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Cincinnati, 1993. V002T08A012
- 15 Garg V K, Gaugler R E. Effect of velocity and temperature distribution at the hole exit on film cooling of turbine blades. *J Turbomach*, 1997, 119: V004T09A002
- 16 Garg V K. Heat transfer on a film-cooled rotating blade using different turbulence models. *Int J Heat Mass Transfer*, 1999, 42: 789–802
- 17 Han J C, Zhang Y M, Lee C P. Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs. *J Heat Transfer*, 1991, 113: 590–596
- 18 Hagari T, Ishida K, Takeishi K I, et al. Investigation on heat transfer characteristics of a cooling channel with dense array of angled rib turbulators. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Copenhagen, 2012. 387–399
- 19 Laskowski G M, Kopriva J, Michelassi V, et al. Future directions of high fidelity cfd for aerothermal turbomachinery analysis and design. In: *Proceedings of the 46th AIAA Fluid Dynamics Conference*, Washington, 2015
- 20 Kassab A, Divo E, Heidmann J, et al. BEM/FVM conjugate heat transfer analysis of a three-dimensional film cooled turbine blade. *Int Jnl Num Meth HFF*, 2003, 13: 581–610

MBSE-based multidisciplinary modeling for designing turbine blade cooling structures

Cheng'en WANG

School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

E-mail: c.wang@sjtu.edu.cn

Abstract Complex engineering design requires building a considerable number of multidisciplinary models, among which a plethora of “isolated islands” and description inconsistencies were created by conventional engineering design approaches. To enhance the global performance measures of a complex engineering system, engineers must bridge these isolated models, eliminate model inconsistencies, and effectively analyze system-model interactions. Systems engineering approaches appear to be essential to multidisciplinary design optimization of complex engineering systems. Here, unified multidisciplinary modeling of complex engineering systems is addressed by using the model-based systems engineering (MBSE) methodology. Following the MBSE principles, this work builds up an integrated hierarchy of geometric, aerodynamics, heat transfer, structure dynamics, and design optimization models, which are used to support the development of turbine blade cooling structures. MBSE approaches break through traditional disciplinary boundaries and adopt a standard modeling language to build coherent models describing various disciplinary phenomena of interest. Implementations of MBSE approaches in conjunction with SysML models are expected to identify and eliminate readily the model inconsistencies, boost integration of multidisciplinary models, and increase engineering design efficiency significantly.

Keywords model-based system engineering, turbine blade, geometric model, physics model, optimization model



Cheng'en WANG is a professor at the School of Mechanical Engineering at Shanghai Jiao Tong University. His research interests include product engineering design, finite-element method, numerical analysis of multiphysics processes, advanced design techniques for aeroengines, and industrial engineering. He is currently a senior IEEE member and ASME member.