

航空发动机变维度仿真技术分析

Analysis of Multi-Fidelity Simulation Technology for Aero Engine

■ 贾梓豪 邵冬 董芑呈 贾志刚 / 中国航空发动机研究院 陈敏 / 北京航空航天大学

航空发动机变维度仿真是整机零维仿真模型与各部件高精度仿真模型耦合匹配的联合仿真技术。变维度仿真能够有效减少航空发动机初始设计阶段整机性能和部件设计之间的往复迭代过程，显著提高设计效率。

随着计算机技术的快速发展，航空发动机变维度仿真技术在发动机研发领域逐渐起到不可替代的作用。该技术利用零维整机匹配约束高精度部件模型边界条件，能够显著加速总体设计和部件设计之间的迭代过程，有效降低研发成本，提高设计结果的可靠性和整机性能的预测能力，是整机全三维仿真和零维仿真的折中。但是变维度仿真也存在计算精度和计算效率之间的矛盾，以及操作难度高、适应性差等问题，进而导致航空发动机变维度仿真技术的研发面临高精度、高速度和高通用性的技术要求。

技术发展历程

自20世纪末期以来，一些面向对象的仿真软件的提出，如面向对象的推进仿真软件（PROOSIS）和推进系统数值仿真（NPSS）软件等，旨在以不同精度水平进行航空发动机的多学科分析，并且促进航空发动机的设计模式从传统设计转变为预测设计。

美国的NPSS软件研发开始于20世纪80年代末期，属于美国国家航空航天局（NASA）与其他政府机构、企业和大学联合提出的高性能计算

和通信程序计划，是一种多学科、多维度的计算仿真工具，其中多学科包含传热学、气体动力学、材料学、结构强度学、控制学、经济学等学科，多维度包含三维、二维、一维、零维等多个仿真精度层次^[1]。NPSS软件使航空发动机制造商能够通过执行详细的发动机整机模拟，在发动机研发过程的早期阶段找到关键的设计参数，并大幅降低研发时间和设计成本。据估计，NPSS软件的使用可以将发动机设计和开发的时间和成本削减35%~50%，相当于每年节省1亿美元。

NPSS软件主要由高性能计算平台、发动机应用模型和仿真环境组成。从软件功能角度出发，NPSS软件实现了工程师从零维到三维组件代码的任意组合，来“即插即用”和“自由替换”发动机的部件，从而避免了传统的冗长复杂且不准确的多学科耦合。除此之外，在NPSS软件中，为了实现不同精度仿真模型间的耦合，研究出3种模型耦合方法，包括特性图替换、特性图修正和部件替换嵌入。其中，特性图替换是使用高精度部件仿真模型计算得到的部件特性图，直接替换传统的通用特性图；特性图修正是使用高精度部件仿真模型不断迭代修

正部件的通用特性图或者性能参数，直至计算收敛；部件替换嵌入是利用高精度部件仿真模型直接嵌入到零维发动机整机模型中，替换对应的零维部件仿真模型，最后进行发动机整机的变维度仿真计算。综上所述，NPSS软件可以实现从零维到三维的不同仿真精度层次，从定常到非定常仿真之间“随意替换”部件，对发动机进行多学科多精度层次的性能分析研究^[2]。

在美国研发NPSS软件之后，欧盟开展了虚拟航空协作企业提升价值计划（VIVACE-ECP），并且在欧盟第六框架计划中的VIVACE航空发动机专项中进行了PROOSIS的开发。该软件是主要应用于航空发动机不同精度层次、多学科、多领域的性能仿真与分析平台，可以整合诸多相关系统，包括燃油系统、电气系统、控制系统等进行一体化联合仿真；并且可以根据飞机的飞行任务需求，进行飞机/发动机一体化设计优化，从而在发动机的研制初期开始大幅降低设计成本、研发风险和缩短生产周期。类似于NPSS软件，PROOSIS同样开发了3种模型耦合方法，包括弱耦合法、半耦合法和完全耦合法，虽然与NPSS软件中的3种耦合方法没有本质上的区别，

但是在发展理念上，NPSS软件更注重部件模型的模块化发展，从而实现高精度部件仿真模型的“自由替换”和“即插即用”，而PROOSIS更注重不同精度的部件和整机模型之间的耦合方法研究，如完全耦合法的应用和发展。国外研究人员还利用变维度仿真技术开展进气畸变传递和叶尖间隙等对风扇和整机性能的影响，并据此探讨变维度仿真在发动机状态监测中的作用^[3-4]。

20世纪90年代末期，国内开展了面向对象的航空发动机性能仿真建模方法的相关研究，但更多的是利用部件法完成的基于部件通用特性图的发动机零维仿真建模研究。进入到21世纪，随着NPSS软件的发展，国内也开始逐步开展航空发动机变维度仿真技术的相关研究，目前已经深入开展了二维发动机整机仿真模型的研究。除此之外，以航空发动机中的蒸发式火焰稳定器作为研究对象建立的三维燃烧室/零维发动机变维度仿真模型，能够对比质量加权平均和面积加权平均两种降维方法对边界参数传递的影响；通过耦合发动机零维性能仿真模型和二维喷管仿真模型，建立变维度仿真模型，利用喷管喉道和出口面积的调节规律优化，能够显著提升发动机安装推力；通过涡轮全三维仿真和发动机整机零维仿真模型组成的变维度仿真模型，能够研究涡轮改型对航空发动机整机性能的影响；通过建立三维仿真模型来研究冲击矢量控制喷管的机理和气动特性，并将其与发动机零维性能仿真模型进行耦合，也可以完成多维度的发动机整机性能仿真。

而在航空发动机变维度仿真技

术研究中，模型耦合方法是整机变维度仿真建模的关键因素。

模型耦合方法

模型耦合方法，作为航空发动机变维度仿真的核心，涉及不同精度层次的整机和部件仿真模型收敛等关键技术。因此，有必要对模型耦合方法的研究现状进行探究分析。

各航空强国投入了大量资源开展模型耦合方法的研究与开发。如美国的NPSS软件中提出的特性图替换、特性图修正和部件替换嵌入，就是3种极具代表性的模型耦合方法；而欧盟开发的PROOSIS中提出的弱耦合法、半耦合法和完全耦合法，与上述的NPSS软件中提出的3种方法没有本质意义上的区别。而且PROOSIS中的3种模型耦合方法也是克兰菲尔德大学研究的3种不同精度部件仿真模型和整机仿真模型耦合方法的迁移和应用。

弱耦合方法

弱耦合方法是利用高精度部件模型仿真得到的部件特性图，直接

代替传统零维发动机仿真模型中的部件通用特性图，从而进行发动机变维度性能仿真。NPSS软件中的特性图替换和PROOSIS中的弱耦合法都隶属于这种模型耦合方法。弱耦合方法的仿真流程如图1所示。

航空发动机弱耦合仿真方法在发动机变维度仿真研究中有诸多成果。如以GE公司的GE90发动机作为研究对象，利用三维和一维部件性能仿真模型生成风扇、增压级、高压压气机、高压涡轮和低压涡轮的局部特性图，完成初步的发动机整机变维度仿真建模研究；以NPSS软件作为仿真基础，利用一维压气机性能仿真模型、一维涡轮性能仿真模型和零维发动机性能仿真模型的弱耦合仿真，搭建发动机变维度仿真模型，在航空发动机初步设计阶段，能够完成发动机关键参数的预测并显著降低设计的不确定性；在VIVACE项目和欧盟财政的支持下，以军用发动机作为研究对象，使用PROOSIS利用低压压气机三维仿真模型生成部件特性图，能够研

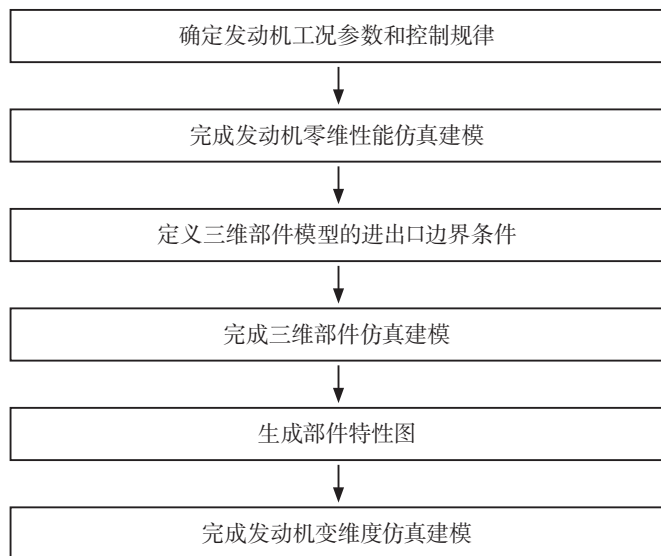


图1 弱耦合方法流程

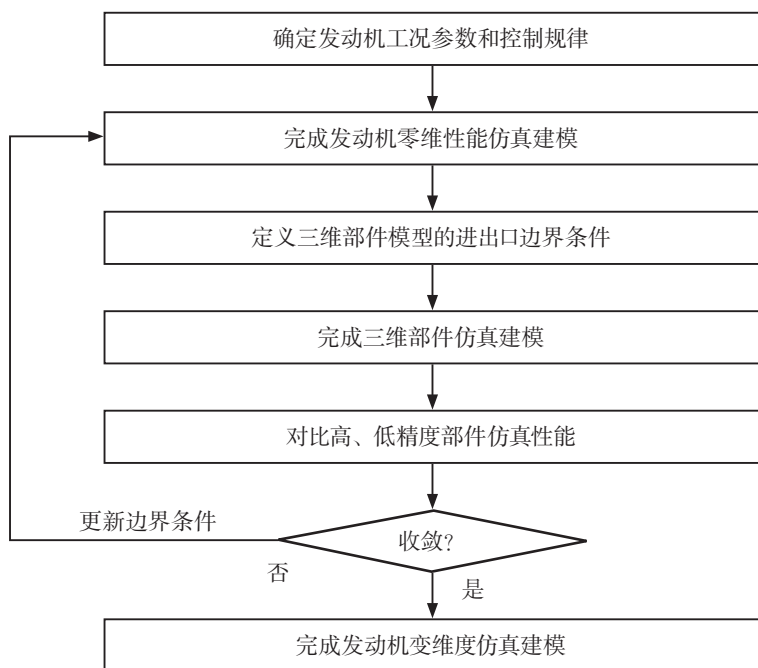


图2 迭代耦合方法流程

究进气畸变条件对低压压气机和发动机整机性能匹配的影响；此外，利用进气道三维仿真模型和面向对象的发动机零维仿真模型，通过弱耦合方法，能够有效分析进气特性对发动机性能的影响。

迭代耦合方法

迭代耦合方法是根据不同精度层次的仿真模型之间的差异，利用高精度的部件仿真模型迭代修正低精度发动机仿真模型中的相关参数（如部件特性图），从而进行发动机变维度性能仿真。NPSS软件中的特性图修正和PROOSIS中的半耦合法都属于这种耦合方法。迭代耦合方法的仿真流程如图2所示。

迭代耦合仿真方法在航空发动机变维度仿真研究中，也做出了诸多贡献。同样以GE90发动机作为研究对象，针对三维、一维和零维仿真模型在不同精度层次上的不收敛现象，通过增加三维和一维的部件

性能仿真模型迭代修正风扇、增压级、高压压气机、高压涡轮和低压涡轮局部特性图的研究过程，能够显著提高GE90发动机变维度仿真模型的仿真精度；再以涡扇发动机为例，利用三维风扇仿真模型和零维发动机性能仿真模型的迭代耦合，能够完成自动化的发动机变维度性能仿真建模研究；通过利用三维进气道仿真模型迭代修正发动机零维性能仿真模型的进气道特性，生成发动机变维度性能仿真模型，能够实现不同飞行工况下发动机进气道的节流特性和进气畸变等对整机性能的影响研究；以双轴混排涡扇发动机作为研究对象，利用风扇、压气机、高压涡轮和低压涡轮三维仿真模型迭代修正发动机零维性能仿真模型的对应部件特性图，并且完成高空试验数据验证校核，能够有效开展高空低雷诺数对部件特性和发动机整机性能匹配的影响研究。

全耦合方法

全耦合方法是将高精度部件仿真模型直接嵌入到零维发动机仿真模型中，替换对应的部件模型，从而进行航空发动机变维度性能仿真。与弱耦合方法和迭代耦合方法不同，全耦合方法中不再存在完整的零维发动机性能仿真模型，而是将高精度部件仿真模型直接替换零维部件特性图，并且代入到发动机整机模型迭代求解计算。NPSS软件中的部件替换嵌入和PROOSIS中的完全耦合法都属于这种耦合方法。全耦合方法的仿真流程如图3所示。

航空发动机全耦合仿真方法在发动机变维度仿真计算的研究领域中也有着不可替代的关键作用。以大涵道比涡扇发动机作为研究对象，通过使用PROOSIS建立风扇三维/整机零维变维度性能仿真模型，能够基于试验数据有效验证发动机变维度仿真模型和数值缩放模拟的准确性；以另一种双转子涡扇发动机作为研究对象，利用全耦合方法建立进气道三维/整机零维变维度性能仿真模型，能够完成该发动机速度特性的相关研究；除此之外，针对军用小涵道比双轴涡扇发动机，基于二维风扇仿真模型和零维发动机性能仿真模型，能够从仿真速度、适用性和潜力等角度出发，分析弱耦合、迭代耦合和全耦合3种模型方法的优缺点，为后续模型耦合方法的对比研究建立基础；利用全耦合方法建立航空发动机主流道零维/风扇二维的变维度性能仿真模型，能够有效研究风扇转静子叶片数目和风扇出口径向参数分布对风扇性能和发动机整机性能的影响^[5]。

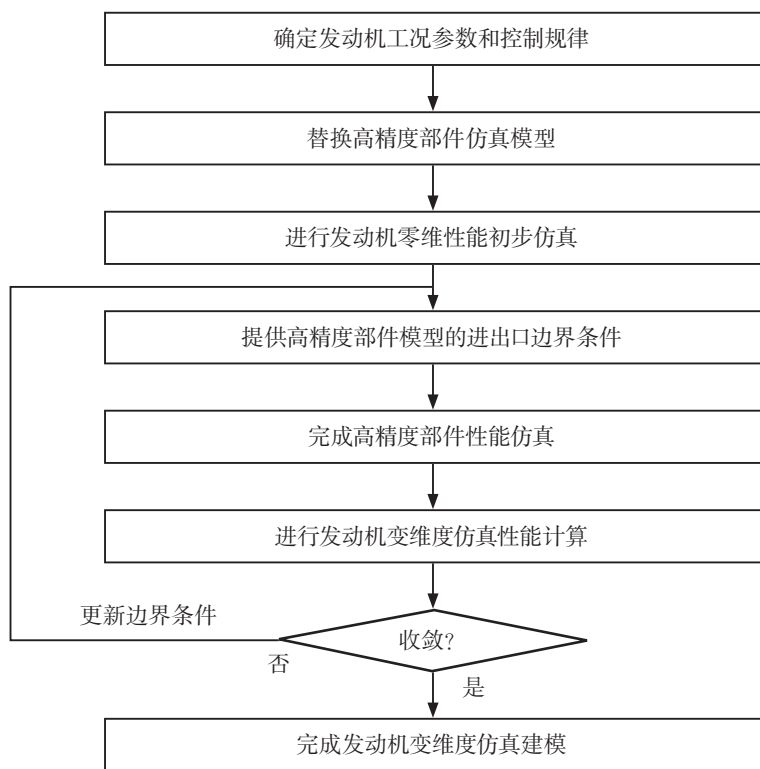


图3 全耦合方法流程

技术难点分析

目前，变维度仿真技术在发动机研发领域开展了许多研究，相比传统的整机零维仿真具备一定的优势，但是大部分研究还停留在学术探讨阶段，目前限制相关技术应用的原因有以下几点。

变维度仿真方法的仿真精度和仿真速度之间存在矛盾

现有的弱耦合方法中数据“单向”传递，仿真精度不足；迭代耦合方法中不同精度的仿真模型差异大，迭代次数多，计算效率低；全耦合方法中高精度部件仿真模型直接参与迭代过程，计算资源消耗大，计算效率低。因此，现有的变维度仿真方法存在仿真精度和仿真速度之间的矛盾，需要在自动化收敛算法上有所更新，为未来的整机全三维仿真奠定基础。

不同精度层次的仿真模型间的参数传递方式存在不足

现有的参数传递过程中多采用均匀边界条件的方式进行升维，使用质量流量平均的方式进行降维。该方式虽然能够节约计算资源，但是在升维和降维过程中，忽略了参数的轴向和周向不均匀分布，对整机变维度仿真模型的仿真精度产生影响。

变维度仿真技术缺少足够的试验数据验证

现有的发动机变维度仿真多利用流场信息开展整机性能分析，包括导向叶片角度、间隙变化对整机性能的影响等。但无论是不同的参数传递方式，还是不同的高精度部件仿真模型，对整机变维度仿真性能的影响，都需要更多的整机和部件试验数据的验证。

结束语

变维度仿真在发动机研发过程中具有举足轻重的作用，我国在变维度仿真技术的发展研究中需要重点关注整机匹配收敛算法、参数传递方式以及试验数据验证，进而为航空发动机整机全三维仿真建立坚实的基础。

航空动力

（贾梓豪，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空发动机总体性能研究）

参考文献

- [1] VU L N, VIJAYAKUMAR N, WILSON D. Overview of studies using the numerical propulsion system simulation at ut-arlington[C]. 2018 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2018.
- [2] CHARLES L. An overview of three approaches to multi-disciplinary aeropropulsion simulation[R]. NASA/TM-107443.
- [3] VEGA L, DUFOUR G, ROSA N. A fully coupled body force-engine performance methodology for boundary layer ingestion[C]. AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, 2019.
- [4] KLEIN C, WOLTERS F, REITENBACH S, et al. Integration of 3D-CFD component simulation into overall engine performance analysis for engine condition monitoring purposes[C]. ASME IGTI Turbo Expo, 2018.
- [5] TEMPLALEXIS I, ALEXIOU A, PACHICIS V, et al. Direct coupling of a turbofan engine performance simulation[R]. ASME GT 2016-56617/.