

耦合空气系统的燃气轮机拓扑自构建建模方法

郑培英¹, 周泽均², 钟易成³, 董威⁴, 刘家兴¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 海装广州局驻广州地区第一军事代表室, 广州 510220;
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016; 4. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了实现通用性强、可扩展性好、灵活高效的整机性能模型通用建模, 提出了一种拓扑自构建的燃气轮机整机性能通用建模方法。基于面向对象思想, 采用模块化技术构建通用部件库, 再通过拓扑接口关联部件组成整机模型, 建立了适用于不同燃气轮机类型的整机性能仿真模型。耦合了多支路复杂空气系统迭代求解模型, 将其作为部件嵌入整机模型, 以取代现有的定比例引气量计算方法。采用跨平台图形开发框架及图像可视化技术, 开发了人机交互友好的整机性能预测平台。采用典型双轴燃气轮机算例, 与试验结果进行了对比验证。结果表明: 对于动力涡轮出口温度, 采用恒定引气比方式和当前耦合方法的计算结果与试验结果对比得到的最大误差分别为 3.36% 和 1.31%; 对于出口压力的计算在多数工况下的计算精度也有所提高。提出的拓扑自构建的燃气轮机整机性能通用建模方法实现了部件自由搭建及整机拓扑自构建, 且耦合空气系统后, 整机性能仿真精度显著提高。

关键词: 拓扑自构建; 空气系统; 整机性能模型; 燃气轮机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.004

Topological Self-construction Modeling Method for Gas Turbine Coupled with Secondary Air System

ZHENG Pei-ying¹, ZHOU Ze-jun², ZHONG Yi-cheng³, DONG Wei⁴, LIU Jia-xing¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. First Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Guangzhou, Guangzhou 510220, China;

3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To achieve a universal, scalable, flexible, and efficient modeling of the whole-engine performance of gas turbines, a general-purpose whole-engine performance modeling method featuring topological self-construction was proposed. Based on object-oriented concepts, a general component library was constructed using modular technology, and then the whole-engine model was formed by associating components through topological interfaces. The whole-engine performance simulation models applicable to different types of gas turbines were established. The iterative solution model of the multi-branch complex air system was coupled and embedded into the whole-engine model as a component to replace the existing constant amount bleed air calculation method. A whole-engine performance prediction platform with a user-friendly human-machine interface was developed using a cross-platform graphics development framework and image visualization technology. A typical twin-spool gas turbine was used as a calculation case and compared with the experimental results. The results show that for the outlet temperature of the power turbine, the maximum errors calculated using the constant bleed method and the present coupling method are 3.36% and 1.31%, respectively. The calculation accuracy of outlet pressure is also improved under most operating conditions. The proposed topological self-construction general-purpose whole-engine performance modeling method can easily realize the construction of components and the topological self-construction of the whole-engine. After coupling with the secondary air system, the accuracy of the whole-engine performance simulation is significantly improved.

Key words: topological self-construction; secondary air system; whole-engine performance model; gas turbine

收稿日期: 2024-05-11 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 郑培英 (1977), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 郑培英, 周泽均, 钟易成, 等. 耦合空气系统的燃气轮机拓扑自构建建模方法[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 33-39. ZHENG Peiying, ZHOU Zejun, ZHONG Yicheng, et al. Topological self-construction modeling method for gas turbine coupled with secondary air system[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 33-39.

0 引言

燃气轮机的整机性能一直是发动机设计制造方和使用方关注的重点,以往通过试验获得其性能参数的方式存在周期长、成本高、风险大等问题^[1]。随着计算机仿真技术的发展,整机性能设计正在分步骤地从“试验设计”向“预测设计”转变。整机模型建模是性能预测的关键,区别于传统的面向过程建模方法,面向对象建模因其具有通用性强、可扩展性好、灵活高效等特点,成为整机性能模型建模的主要方法^[2]。此外,由于部件试验的环境、测试方法、进出口边界条件等与整机的试验环境存在差异,导致部件在单独试验条件下获得的工作特性不完全等同于整机环境下的部件工作特性,采用部件在单独试验条件下获得的工作特性建模会影响整机性能的预测精度^[3]。同时,包括引气、封严装置在内的复杂空气系统的存在,对仿真精度提出了更高要求,使该领域仍具有巨大的研究空间^[4-5]。

目前国内外已经出现了一些较为成熟的整机性能模型建模及仿真软件。Wilfried^[6]开发的软件最具代表性,侧重于离线计算,集成了发动机部件库和控制系统库,可通过界面搭建多种类型发动机及控制系统模型进行稳态和动态仿真;Joachim^[7]将常见的发动机模型固化在程序中,用户从模型库中选取相应的设计模型,可快速得到所需结果;张晓博等^[8]采用VB语言建立了支持发动机抽象模型的界面搭建软件;丛靖梅等^[9]采用C语言开发了一种基于图形化的可灵活组装任意合理结构形式的航空发动机总体性能仿真模型;陶金伟^[10]采用C++语言建立了一个可复用和扩展灵活的航空发动机仿真平台。

通过对比分析发现,中国仿真软件在界面美观性、交互友好性、结果可视化效果等方面与国外仿真软件还存在较大差距。而且,在针对空气系统建模方面均只给定固定引气量建模。但在发动机整机实际工作状态发生变化时,空气系统引气量及流量分配随之变化,其沿程热力参数预测与实际状态产生显著差异,导致整机性能预测的精度降低。本文基于模块化技术和拓扑自构建技术,耦合多支路复杂空气系统,采用面向对象的跨平台图形开发框架和功能库,搭建了整机性能预测平台。

1 部件及整机拓扑自构建建模方法

1.1 部件模块化建模

部件模块搭建采用插槽技术。插槽源于电路板集成,线路板之间通过插槽接口连接成完整系统。如计算机就是将各种板卡、设备(光驱、硬盘)通过专用插槽与主板连接起来并形成完整可运行的系统。

针对燃气轮机的部件,采用面向对象建模思想,按功能划分成不同类型的部件,如进气道、压气机、燃烧室、涡轮等。根据部件特点,可将其对应的部件特性、热力学模型等进行封装,形成独立的部件模型。燃气轮机的部件建模算法已相对成熟,可参考相关文献^[11]。在此基础上,针对不同部件之间的关联关系建立各种通用的接口(插槽),称为插槽式接口,并将这些插槽配置于不同发动机部件上。在工程实际应用中,选择不同的发动机零部件,将不同部件的相关插槽连接起来即可组成可独立运行的子系统或完整发动机系统。

该建模方法具有规范、通用和可扩展等优势。在图形组建时,通过鼠标从部件库中拖动相应的部件至模型构建区中,然后可从部件的输出端口引出气路连线与下游部件连接,也可以移动下游部件使其端口与已有的连线连接,部件间通信方式如图1所示。

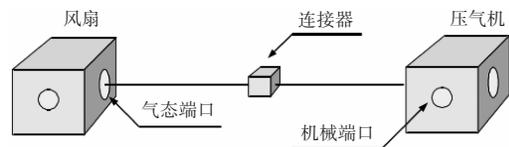


图1 部件间通信方式

1.2 空气系统建模

虽然发动机空气系统结构千变万化,但其流路都是由一些典型的单元组成^[12]。本研究针对燃气轮机空气系统进行高精度建模,应用1维可压缩流动和换热理论,将空气系统常见的流阻和换热现象抽象为若干典型的流阻和换热元件,如节流孔、篦齿封严、旋转盘腔等,并基于已有的经验关联式或半经验理论建立这些单元的计算模型^[13]。下面以节流孔为例说明建模算法。

节流孔广泛存在于发动机空气系统结构中,主要起到节流作用,用以调节冷气流量和压力以满足下游单元需要。例如作用于轴承上的负荷控制可通过节流孔调控相关腔内气流压力来实现。通过孔的气流

流量为

$$\dot{m} = C_d P_{in}^* A \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{1}{RT_{in}^*} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}^*} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}^*} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (1)$$

式中: P_{in}^* 和 T_{in}^* 分别为孔进口的总压和总温; P_{out} 为孔的出口静压; A 为孔的出口面积; C_d 为孔的流量系数。

因此, 计算孔的实际流量归纳为如何得到孔的流量系数, 旋转效应、孔长度、孔入口结构等对冷气流量的影响可以体现在对流量系数的修正上。

当孔进口气流方向和孔轴线方向一致且孔保持静止状态, 试验数据表明普通孔流量系数的主要影响参数为孔长径比、孔进口倒圆和雷诺数。Huning 建议用 McGreen 和 Schotsch 提出的关联式作为基准式计算锐边短孔和 ASME 理想喷嘴(长孔)考虑雷诺数影响的不可压缩流动的流量系数^[14]

$$\begin{cases} \text{锐边短孔: } C_d = 0.5885 + \frac{372}{Re}, Re > 10^5 \\ \text{理想喷嘴: } C_d = 0.9881 + \frac{4.73}{\sqrt{Re}}, Re > 10^5 \end{cases}$$

针对燃气轮机空气系统, 应用节流孔对涡轮外机匣冷气流路建模, 如图 2 所示。从燃烧室外环(即 Inlet 进口)引入的部分气流 $W_{(1)}$, 对机匣和高压涡轮外环进行冷却后, 从涡轮外环两侧的小孔排入主燃气通道, 分别为高压涡轮动叶前叶尖 $W_{(2)}$ (即 Outlet-1 出口)、高压涡轮动叶后叶尖 $W_{(3)}$ (即 Outlet-2 出口)。

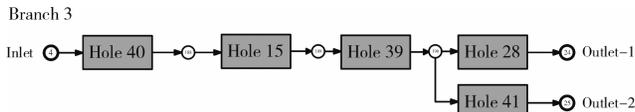


图 2 涡轮外机匣冷气流路

建立上述流路的求解方程, 根据进口总温和总压、出口静压以及旋转轴的转速, 迭代获得 2 个出口流量。将上述过程封装形成涡轮外机匣冷气流路的计算模型, 加入整机性能模型建模中。

1.3 耦合空气系统的拓扑自构建整机建模

在部件模块化和空气系统建模的基础上, 通过模块化拓扑自构建建模即可建立燃气轮机整机性能仿真模型。以典型的双轴燃气轮机为例, 建立耦合空气系统的整机性能模型, 其模型拓扑结构如图 3 所示。

耦合空气系统的整机性能模型拓扑结构与常规的部件模块化建模方法建立的模型的不同之处, 在于空气系统与部件模型之间的参数传递关系。常规的部件模块化建模中空气系统只需要给定引气比例, 如

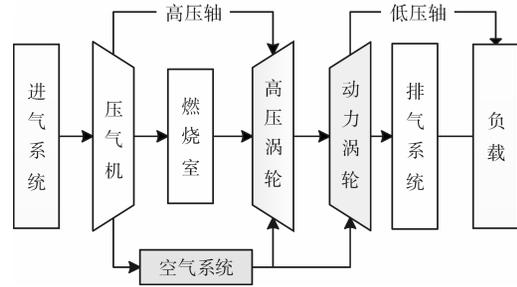


图 3 双轴燃气轮机整机拓扑结构

压气机出口流量比例, 传递给涡轮冷却或外部引气; 而耦合空气系统模型求解引气流量参数需要根据冷却系统进出口气流条件进行求解, 因此空气系统与部件模型之间的参数传递关系相对复杂。

双轴燃气轮机整机性能计算流程及接口如图 4 所示。在设计点计算时, 可沿流动顺序依次计算部件参数, 从而实现整机参数求解; 对于非设计点计算, 由于计算过程中部分参数未知, 因此首先基于部件间共同工作关系构造非线性方程, 并使用牛顿迭代法进行迭代求解。迭代方程包括流路的流量平衡、转子轴功率平衡及静压平衡等, 迭代方程的未知参数即为迭代变量。通过这些平衡方程的建立求解, 便可得到部件工作点, 从而得到发动机整机性能^[14]。

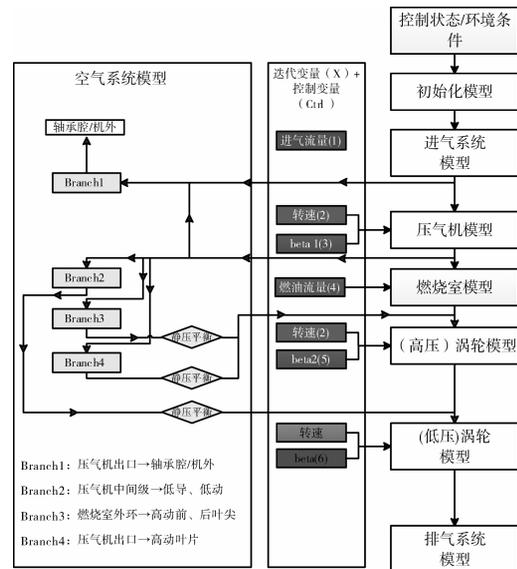


图 4 双轴燃气轮机整机性能计算流程及接口

在与空气系统耦合计算时, 空气系统模型需要输入压气机引气位置气流参数和出口背压, 进而获得引气流量以及空气系统出口气流参数。由于在单次迭代过程中, 空气系统计算所需的背压未知, 因此每添加 1 条汇入主流的空气系统支路, 就要添加 1 组迭代变量和迭代方程。其迭代变量为该支路的空气系统

出口背压,迭代方程则根据预估的背压与在涡轮计算时求得的背压相等构造。

完成空气系统模型与整机性能仿真模型对接,只需要对整机性能仿真模型进行重新编译,并提供界面交互选择,即可将空气系统模型嵌入到整机仿真模型中,从而实现耦合空气系统的发动机整机性能高精度仿真建模。

2 整机性能仿真建模软件设计

2.1 软件架构设计

整机性能建模软件框架设计如图 5 所示。部件层集成了燃气轮机所需要的所有部件,为整机建模做准备。整机模型层定制了整机所需的部件/组件模型,用于构建相应类型发动机仿真模型;应用层主要实现人机交互,包括发动机模型建模、参数输入、性能计算和结果可视化等功能。

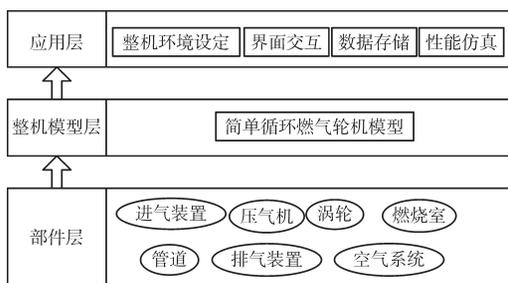


图 5 整机性能建模软件框架设计

2.2 软件类设计

基于面向对象的思想,将燃气轮机的每个部件抽象成类,并对其建模方法和数据进行封装,可以提高每个部件的重用性、灵活性和扩展性,进一步才能自由组装形成各类不同的发动机系统。对于整机性能仿真建模软件,需要进行 2 方面的类设计:一方面是针对底层仿真模型的存储,另一方面是针对建模图形交互的存储。将底层建模求解与界面交互剥离,可以增强程序的可维护性和可扩展性。

2.2.1 底层仿真模型存储体系类设计

对整机性能仿真建模按照功能进行分类、抽象、归纳,可以将整个模型划分为不同的类,各类之间相互联系。底层仿真模型存储体系类设计如图 6 所示。核心思想是对燃气轮机性能仿真系统按照功能进行分类、抽象和归纳,将整个系统划分为不同的相互联系的类。在部件基类、工具类和求解器类等基类的基础上,扩展出其他不同的子类^[15-16]。

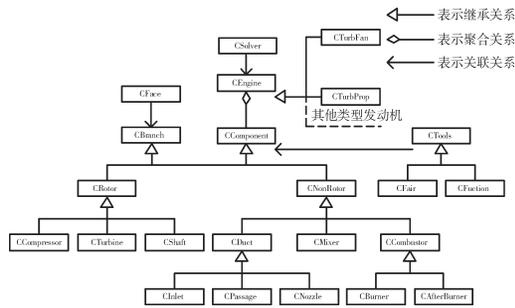


图 6 底层仿真模型存储体系类设计

2.2.2 基于图标的存储体系类设计

对于整机性能仿真建模软件的界面交互,根据功能分区可以分为主窗口(MainWindow)、主菜单管理(MenuBar)、交互功能菜单管理(ToolBar)、建模结构树管理(TreeWidget)、模型交互管理(VTKGraftWidget)、仿真结果管理(ResultWidget)、部件属性管理(ModelPropWidget)。基于图标的存储体系类设计如图 7 所示。其中,模型交互管理中可以进一步细分为轴模型管理(ShaftVTKActor)、截面模型管理(SectVTKActor)以及部件模型管理(ModelVTKActor)。部件模型管理类可以再派生各个部件模型子类,通用自由组装部件模型子类形成整机系统模型(EngineSystem)。仿真结果的表格、曲线、图示等可视化样式均通过 ResultWidget 实现。

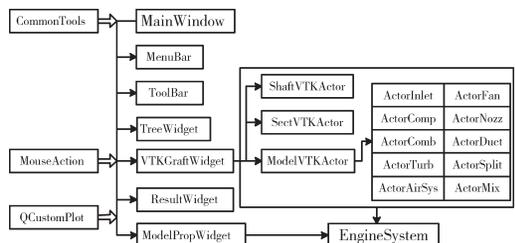


图 7 基于图标的存储体系类设计

2.2.3 2套存储体系的映射关系

从软件开发的视角分析,底层仿真模型存储体系和基于图标的建模图形存储体系相互独立,可以由不同的开发人员分别开发。2套存储体系的映射关系如图 8 所示,通过建立二者的映射关系进行耦合对接,并遵从以下交互顺序:

- (1)用户从界面进行部件建模,并设置属性参数,将建模结果传递给底层部件存储类。
- (2)用户在界面上通过自由组装部件形成整机系统,并将拓扑关系传递给底层系统存储类。
- (3)底层仿真模型存储体系基于部件及整机的建模输入与算法进行性能求解,并将求解结果反馈给界

面模型存储体系用于可视化。

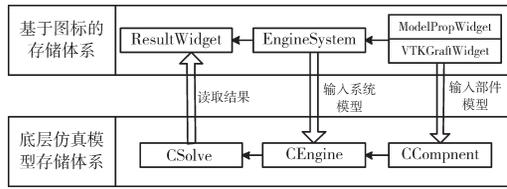


图 8 2套存储体系的映射关系

3 整机性能仿真建模软件实现

3.1 主界面设计及实现

整机性能仿真建模软件的主界面如图 9 所示。菜单栏主要实现项目的常用操作功能,从左到右依次为:新建项目、打开项目、保存项目、一键清空、适合窗口显示、一键截图及回到首页切换其他子程序。模型管理区主要实现整机模型管理及部件模型管理。图形显示及交互区主要实现部件及整机模型的显示与交互,包括部件创建、部件连接、截面编号设置、部件属性设置等模型交互;模型平移、旋转、放大、缩小等图形交互;同时,还可以切换显示计算结果。操作信息显示区主要用于记录用户操作过程。

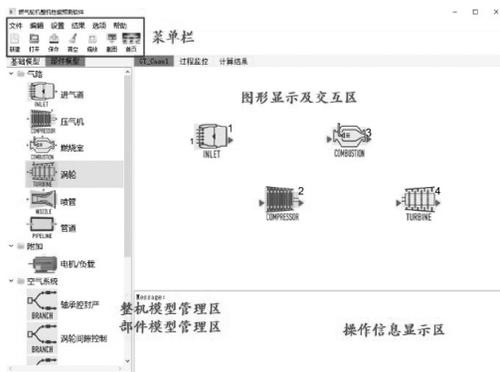


图 9 整机性能仿真建模软件的主界面

3.2 拓扑自构建建模界面设计及实现

拓扑自构建建模包括部件建模和整机建模 2 部分,部件及整机自由建模如图 10 所示。建模方式支持:(1)单击部件图标,默认图形位置并设置部件编号;(2)选中部件图标右键添加;(3)左键按住部件图标,拖动添加;(4)导入工程模板文件添加,工程模板如图 11 所示。部件建模完成后,双击图标可以设置部件设计参数、导入特性曲线、选择监控及输出参数等,压气机属性设置界面如图 12 所示。基于气路传递关系建立部件间的拓扑连接;基于机械结构建立轴的连接关系;基于引气冷却流路建立空气系统连接关

系;三者综合形成整机模型。

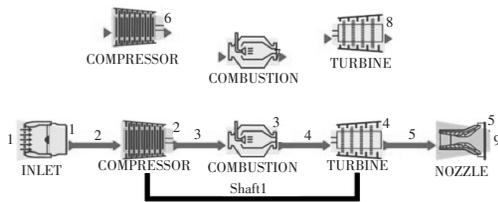


图 10 部件及整机自由建模

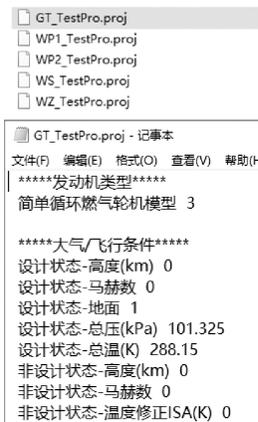


图 11 工程模板

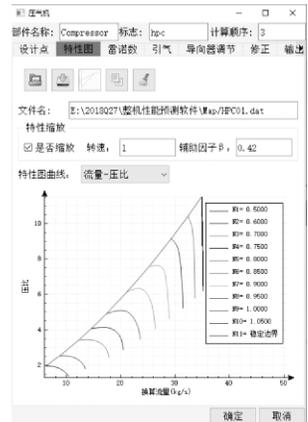


图 12 压气机属性设置界面

3.3 结果可视化界面设计及实现

3.3.1 过程监控可视化

为查看及掌握整机性能求解的收敛过程及精度,可以对求解变量实施监控,以及对过程的流量、功率、压力等平衡方程残差实施监控,过程监控变量可视化如图 13 所示。此外,还可以监控部件的参数随迭代步数的变化,比如空气系统迭代求解的流量情况,实时掌握迭代过程。

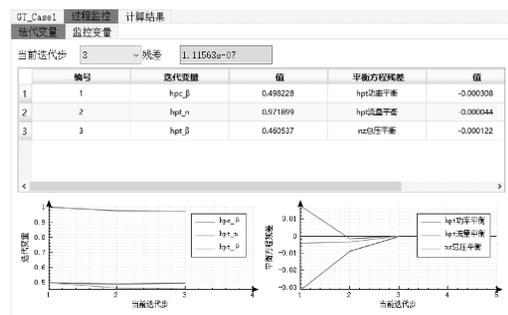


图 13 过程监控变量可视化

3.3.2 部件及整机结果可视化

整机结果可视化如图 14 所示。部件及整机结果主要展示仿真得到的部件进出口参数、各截面参数以及总体性能参数,包括推力、耗油率等。当耦合空气系统后,可对比耦合前后的总体性能参数的差异。

WZJ_Case1		过程监控		计算结果			
总体性能参数		进气道	压气机1	燃烧室	涡轮1	涡轮2	尾喷管
编号	总体性能参数	未修正数值	修正后数值				
1	1	当量功率(kW)	418.2616	400.2603			
2	2	(当量) 耗油率(kg/(kW.h))	0.3313	0.3383			
3	3	(当量) 单位当量功率(kg/kW)	235.1105	224.9917			
4	4	轴功率(kW)	403.4928	386.1138			
5	5	(轴) 耗油率(kg/(kW.h))	0.3434	0.3507			
6	6	(轴) 单位当量功率(kg/kW)	226.8088	217.0398			
截面		流量(kg/s)	总温(K)	总压(kPa)			
1	0	1.7622	288.1500	101.3250			
2	1	1.7622	288.1500	98.7994			
3	2	1.7622	589.7907	834.7642			
4	3	1.6635	589.7907	834.7642			
5	4	1.7011	1372.4400	801.3736			
6	5	1.7478	1353.4340	801.3736			

图14 整机结果可视化

4 典型燃气轮机算例验证及评估

4.1 仿真模型建模

为验证本文建立的整机性能仿真建模软件的计算精度,针对典型双轴燃气轮机的结构形式建立仿真模型,并开展仿真结果分析。双轴燃气轮机软件建模结果界面如图15所示。模型设计点参数值主要参考了LM2500燃气轮机,仿真算例设计点参数值见表1。

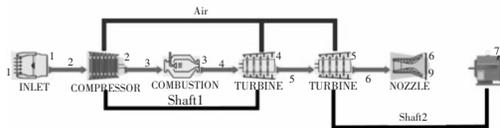


图15 双轴燃气轮机建模

表1 仿真算例设计点参数值

参数名称	数值	参数名称	数值
大气温度/K	288.15	燃烧室总压恢复系数	0.965
大气压力/Pa	101325	燃烧效率	0.995
大气湿度/%	0	高压涡轮效率	0.92
空气流量/(kg/s)	88.4	低压涡轮效率	0.9
进气道总压恢复系数	0.99	高压涡轮导向器冷却引气比例	0.08
压气机压比	23.54	高压涡轮转子冷却引气比例	0.05
压气机效率	0.85	低压涡轮导向器冷却引气比例	0.03
燃烧室出口总温/K	1524	低压涡轮转子冷却引气比例	0.03

燃气轮机非设计点性能计算需要基于部件特性求解,真实部件特性很难直接获得。本文采用基于商用软件提供的通用部件特性进行特性缩放方式^[6]获得压气机、涡轮部件特性。

4.2 耦合空气系统前后仿真结果分析

本文所考虑的空气系统支路的流体网络结构如图16所示。该支路引气点1(Inlet-1)为压气机出口,引气点2和3为压气机扩压器出口。排气点1(Outlet-1)为高压涡轮盘前叶根,排气点2为高压涡轮盘后叶根,排气点3为动力涡轮盘前叶根。

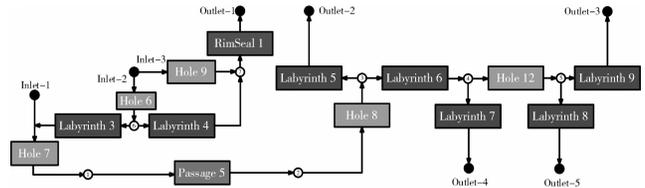


图16 空气系统某支路的流体网络结构

耦合空气系统模型前后,不同工况下该支路的相对总引气比变化如图17所示。当主流参数不与空气系统耦合计算,即采用恒定引气比的方式计算时,不同工况下引气比例始终给定。而当与空气系统耦合时,仿真模型在非设计点计算时的引气比例会随工况变化而改变。耦合空气系统前后整机参数对比如图18所示。由于空气系统引气比例的变化,整机仿真得到的热效率和排气温度均存在一定程度的变化,这为后续的燃机性能分析提供了基础。

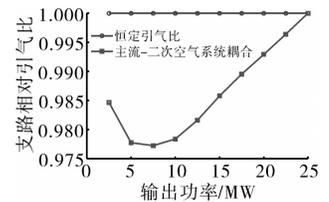


图17 不同工况下耦合空气系统前后支路相对总引气比对比

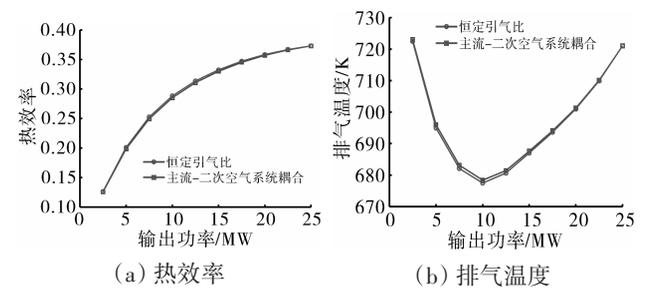


图18 耦合空气系统前后整机参数对比

为了进一步对主流-空气系统耦合的影响进行分析,构建了燃气轮机全部空气系统流路,并使用本文软件实现主流-空气系统耦合求解。在不同工况下使用恒定引气比和当前耦合方法计算得到的动力涡轮出口温度和压力与试验数据对比见表2。结果表明,对于动力涡轮出口温度,采用恒定引气比方式计算的最大误差为3.36%,采用当前耦合方法计算的最大误差为1.31%,计算精度得到了显著提高;对于动力涡轮出口压力,除了0.85工况下误差略有增大外,其他

工况下计算精度均有所提高。因此,通过主流-空气系统耦合仿真的方式,可有效提高燃机总体性能的仿真精度。

表2 不同工况下耦合空气系统前后仿真与试验结果对比

工况	求解方式	动力涡轮出口	动力涡轮出口
		温度误差/%	压力误差/%
1.00	恒定引气比	-2.47	0.10
	当前耦合方法	0.34	0.05
0.85	恒定引气比	-2.80	-0.13
	当前耦合方法	-0.09	-0.17
0.50	恒定引气比	-3.36	0.18
	当前耦合方法	-1.31	0.16
0.30	恒定引气比	-3.33	1.59
	当前耦合方法	-1.50	1.58

5 总结

(1)基于模块化技术建立了一种耦合空气系统的燃气轮机拓扑自构建的整机性能通用建模方法,可适用于不同结构组成的整机建模。

(2)基于整机性能通用建模方法,结合牛顿拉佛森通用求解技术,开发了通用性好、可扩展性好、人机交互友好的整机性能预测平台。

(3)通过典型燃气轮机算例验证,与试验数据对比,表明了本文提出的耦合空气系统的整机性能通用建模方法可以显著提高仿真精度。

参考文献:

- [1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 961-970.
CAO Jianguo. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 961-970. (in Chinese)
- [2] Evans A L, Follen G, Naiman C, et al. Numerical propulsion system simulation's national cycle program[R]. AIAA-98-3113.
- [3] 潘率诚, 李刚团, 丁朝霞, 等. 基于部件特性的航空发动机性能模型修正[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(6): 26-29, 33.
PAN Shuaicheng, LI Gangtuan, DING Zhaoxia, et al. Aero-engine performance model correction based on component performance map[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(6): 26-29, 33. (in Chinese)
- [4] 梁津华, 赵维维, 徐连强, 等. 航空发动机空气系统和热分析的耦合计算与试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(3): 24-29.
LIANG Jinhua, ZHAO Weiwei, XU Lianqiang, et al. The coupling calculation and experiment research of the secondary air system and thermal analysis in aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(3): 24-29. (in Chinese)
- [5] Yang X S, Jian M H, Dong W, et al. Simulation of the secondary air system of turbofan engines: insights from 1D-3D modeling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(1): 231-245.
- [6] Wilfried V. Generic analysis methods for gas turbine engine performance[M]. Holland: Ipskamp Drukkers, 2014: 36-46.
- [7] Joachim K. GasTurb 14 user's manual[M]. Germany: MTU Aero Engines, 2023: 21-33.
- [8] 张晓博, 王占学, 蔡元虎. 面向对象的航空发动机性能仿真系统研究[J]. 机械设计与制造, 2010, 11(11): 133-135.
ZHANG Xiaobo, WANG Zhanxue, CAI Yuanhu. A study of object-oriented aero-engine performance simulation system[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010, 11(11): 133-135. (in Chinese)
- [9] 丛靖梅, 唐海龙, 张津. 面向对象的双轴混排加力涡扇发动机详细非线性实时仿真模型研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 65-68.
CONG Jingmei, TANG Hailong, ZHANG Jin. A study of object-oriented detailed nonlinear real-time performance simulation for a mixed-flow two-spool turbofan engine with afterburner[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 65-68. (in Chinese)
- [10] 陶金伟. 航空发动机组态建模仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
TAO Jinwei. Research on configuration modeling and simulation technology for aeroengine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [11] North Atlantic Treaty Organisation. Performance prediction and simulation of gas turbine engine operation[R]. RTO-TR-044/AVT-018.
- [12] Alexiou A, Mathioudakis K. Secondary air system component modeling for engine performance simulations[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 031202-1-9.
- [13] Sun Z, Amirante D, Chew J W, et al. Coupled aerothermal modeling of a rotating cavity with radial inflow[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(3): 032505-1-11.
- [14] 郑培英, 刘家兴, 钟易成. 基于流体网络拓扑的航空发动机及燃气轮机整机性能通用仿真[J]. 航空发动机, 2023, 49(5): 1-7.
ZHENG Peiying, LIU Jiaying, ZHONG Yicheng. General simulation technology for aeroengine and gas turbine performance based on fluid network topology[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 1-7. (in Chinese)
- [15] 史永运, 钟易成, 龚波, 等. 基于定部件效率的通用航空发动机性能仿真系统构建[J]. 航空发动机, 2019, 45(1): 51-56.
SHI Yongyun, ZHONG Yicheng, GONG Bo, et al. Construction of aeroengine general performance simulation system based on fixed component efficiency[J]. Aeroengine, 2019, 45(1): 51-56. (in Chinese)
- [16] 史永运. 螺旋桨动力系统浆发匹配技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
SHI Yongyun. Research on prop-engine cooperation technology of propeller power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)