

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.028

基于全参数化建模方法的微型燃烧室设计与分析

潘硕,雷雨冰

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:应用 C++ 及 UG Open grip 语言开发从一维设计到参数化建模的全流程微型蒸发管式燃烧室自动化设计软件,实现微型燃烧室的快速设计及重建模。将该方法应用到某微型燃烧室中,设计不同开孔方式的燃烧室构型,通过数值模拟优选出性能达标的方案。

关键词:微型燃烧室;全参数化;软件开发;数值模拟

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0145-05

Design and Analysis of Micro-combustor Based on Full Parametric Modeling Method

PAN Shuo, LEI Yubing

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: C++ and UG Open grip language are used to develop the automatic design software of the whole process micro-evaporation tube combustor from one-dimensional design to parametric modeling, and the rapid design and reconstruction of the micro combustor are realized. The method is applied to a micro-combustor, the combustion chamber configurations with different opening modes are designed, and the scheme of performance standard is optimized by numerical simulation.

Keywords: micro-combustion chamber; full parameterization; software development; numerical simulation

0 引言

随着现代航空发动机技术的发展及科技水平的进步,微型涡扇发动机主要应用在微小型、高效率、高性能动力系统的航空器中,其能够满足动力、质量和空间的要求。为满足发动机总体性能要求,微型燃烧室设计需要经过不断地迭代才能得到性能达标的方案^[1-5]。因此迫切需要引入参数化编程设计方法,以缩短微型燃烧室设计周期。

国外许多发动机制造商已经开展了燃烧室自动化设计,PEGEMANYFAR 等^[6]搭建了采用知识工程的燃烧室设计系统,实现了自动生成燃烧室部件的几何模型。DUDEBOUT 等^[7]开发了 ACT 系统,并运用该先进燃烧室设计工具对 TFE731 型燃烧室进行优化改型。段冬霞等^[8]在 Workbench 和 UG 的基础上提炼出双级旋流器的参数化方法,并通过数值模拟的方法验证了参数化方法的可行性。贾文杰^[9]基于燃烧室设计流程搭建了带 3 级旋流器的燃烧室一体化平台,实现了燃烧室控制参数的提取与数据的传递。对于微小型燃烧室的设计,由于尺寸限制导致其开孔及雾化方式有其独特的特点,为达到性能要求,要不断进行“尺寸设计-建立几何模型-网格划分-求解计算”一系列繁琐过程。目前国内外针对微型蒸发管式燃烧室前处理软件开展的研究工作较少。闫泽华、孙志杰等^[10-11]结合 CRN 模型法与遗传算法对微型燃烧室进行了一维优化设计,对燃烧效率进行了优化,但尚未实现程序的自动设计。

因此,本文针对微型蒸发管式燃烧室开发了专用的设计及前处理软件。首先采用 C++ 及 Qt 软件搭建微型燃烧室一维设计软件界面,根据微型燃烧室进出口参数及尺寸要求对其进行一维设计,并将设计结果中微型燃烧室的重要特征参数保存并传递到参数化模块,然后采用 UG 二次开发语言 Grip 编写燃烧室建模程序,建模过程设计软件自动调用相关插件,实现了微型燃烧室的自动化全参数化建模。

1 微型燃烧室全参数化设计

1.1 微型燃烧室初步设计软件搭建

微型燃烧室一维构型主要通过气动热力公式及经验参数^[12-15]进行设计,在给定燃烧室尺寸限制参数、设计点参数及性能参数等设计要求后,分别进行微型燃烧室整体尺寸设计、流量分配设计、

第一作者简介:潘硕(1999—),男,山东德州人,硕士研究生,研究方向为燃烧室设计,1157644192@qq.com。

蒸发管构型设计和火焰筒构型及开孔设计等设计流程;设计结果传入参数化建模模块从而实现模型构建,初步设计及全参数化设计流程如图1所示。

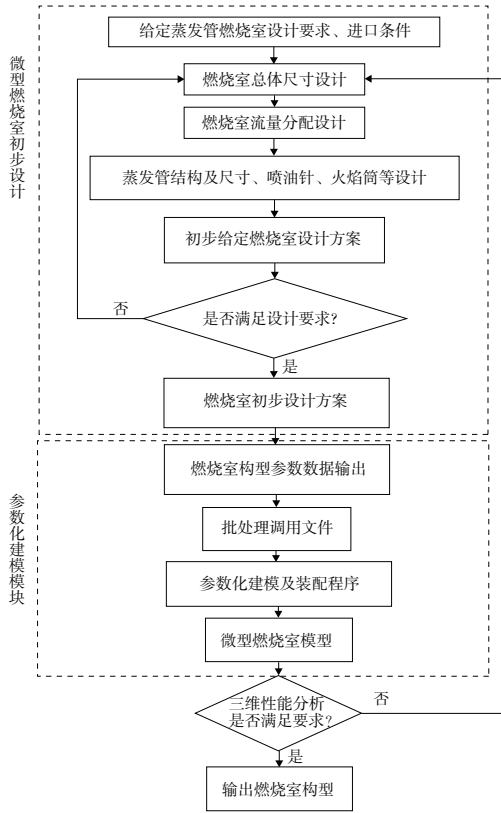


图1 微型燃烧室全参数化设计流程

燃烧室参考截面积 A_{ref} 由机匣外径 D_c 及轴套直径 D_i 确定,如式(1)所示。

$$A_L = K_1 A_{ref} = K_1 \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_i^2) \quad (1)$$

参考微型燃烧室设计经验及构型,选定燃烧室火焰筒截面积 A_L 占比,并给定机匣内外环流量占比,与火焰筒横截面积占比关系式联立可得火焰筒内外环直径,计算公式如式(2)和式(3)所示。

$$A_L / A_{ref} = (D_{Lo}^2 - D_{Li}^2) / (D_c^2 - D) \quad (2)$$

$$W_o / W_i = (D_c^2 - D_{Lo}^2) / (D_{Li}^2 - D) \quad (3)$$

式中: D_{Lo} 、 D_{Li} 分别为火焰筒外、内环直径; W_o 、 W_i 分别为机匣外、内环流量占比。

设计得到燃烧室初步构型后,通过驻留时间、参考截面速度及容热强度等参数进行验证。最终得到燃烧室构型尺寸如图2所示。

燃烧室流量分为3大部分:参与燃料混合燃烧的空气;调节火焰筒内油气比的掺混气;用于冷却火焰筒壁面的空气。在进行流量分配前,根据压降公式 $\Delta p = \rho_3 v_j^2$ 估算火焰筒壁有效开孔面积 A_e ,再根据流量系数对火焰筒的实际开孔面积进

行计算,蒸发管参数可根据火焰筒高度及平均直径确定。

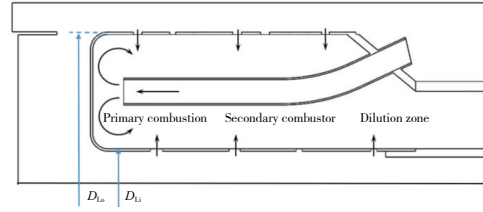


图2 微型燃烧室整体尺寸设计

微型燃烧室主要分为主燃区、补燃区及掺混区,各分区流量分配公式分别如式(4)一式(6)所示。 $\bar{m}_p$ 为主燃区流量,包括蒸发管流量 $\bar{m}_{vt}$ 、冷却气量 $\bar{m}_{p,c}$ 和部分主燃孔进气量 $\bar{m}_{p,h}$; $\bar{m}_r$ 为补燃区流量; $\bar{m}_{mid,c}$ 和 $\bar{m}_{mid,h}$ 分别为补燃区冷却孔进气中参与燃烧的部分以及补燃区其余射流孔进气量; $\bar{m}_{r,MTF}$ 为掺混区流量。

$$\bar{m}_p = \bar{m}_{vt} + \bar{m}_{p,c} + \bar{m}_{p,h} \quad (4)$$

$$\bar{m}_r = \bar{m}_p + \bar{m}_{mid,h} + C_1 \bar{m}_{mid,c} \quad (5)$$

$$\bar{m}_{r,MTF} = \bar{m}_p + C_2 \bar{m}_{mid,h} + C_1 \bar{m}_{mid,c} \quad (6)$$

本文将尺寸设计、流量分配设计及开孔设计采用C++语言编写成设计程序,并利用Qt软件搭建了初步设计软件。各功能区以选项卡的形式显示在界面中,所有经验参数也可在程序中修改。

图3为本文开发的微型燃烧室初步设计软件,输入设计点参数后点击按钮,程序自动计算,在设计得到微型燃烧室尺寸参数后,软件自动保存并输出成grip程序可读的格式。



图3 微型燃烧室初步设计可视化软件

1.2 微型燃烧室全参数化建模软件搭建

由于微型燃烧室内结构较为复杂,因此对燃烧室构型整体进行参数化的方法是行不通的。建模流程如图4所示,将燃烧室构型分解为多部分,包括火焰筒内外环、前后端面以及蒸发管等;为便于在ICEM中进行网格划分,机匣及扩压器设置

为片体,其余部件为实体;在将所有部件模型生成后,根据每个部件在燃烧室中的相对位置进行装配。

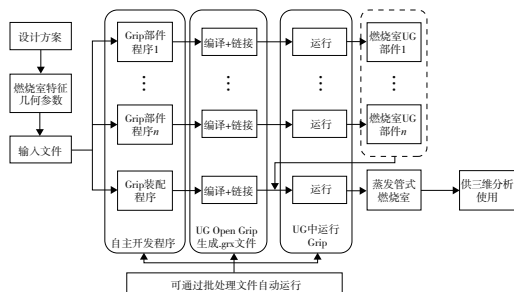


图4 微型燃烧室参数化建模流程

对于机匣及扩压器可通过 grip 程序对坐标点创建二维平面,然后对曲线进行拉伸、旋转和偏置等命令生成片体部件;前后端面部件为实体,程序首先根据坐标点及偏置命令创建二维草图,连接成封闭曲线后,根据轴线作为基准旋转拉伸切除得到三维实体。微型燃烧室参数化建模可视化软件如图5所示。

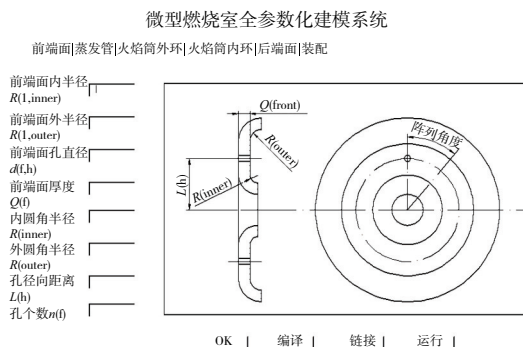


图5 全参数化建模可视化软件

对于火焰筒内外环部件,涉及内外环壁面上的开孔,难点在于各排孔孔径和角度均不同,且在微型燃烧室中同一排不同周向的孔尺寸也存在差异。本文采用圆柱与圆环布尔运算的方式生成各种类型的孔,在 grip 程序中使用二维数组变量来对圆柱进行拉伸、阵列、求差等操作。本文开发的参数化程序可在同一周向位置生成不同孔径交错排布的孔以及不同倾斜角度的孔。所生成的微型燃烧室构型如图6所示。

采用微型燃烧室初步设计模块对燃烧室尺寸及开孔等方案进行设计,将设计得到的数据传递给参数化建模模块,通过软件界面调用并运行 grip 程序得到设计模型,并将模型导入到仿真软件中进行计算分析,大幅提高了燃烧室设计效率。

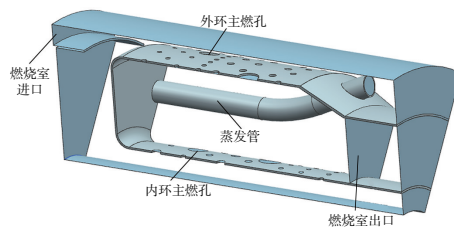


图6 全参数化生成的微型燃烧室

2 微型燃烧室数值方法及验证

微型燃烧室结构具有周期对称性,因此为了减少计算量,根据微型燃烧室结构特点与蒸发管数目,选择单头部蒸发管式燃烧室作为研究对象开展网格划分与计算工作,网格采用 ICEM 软件划分,采用四面体非结构化网格,并对蒸发管区域以及火焰筒壁面进行局部加密,如图7所示。

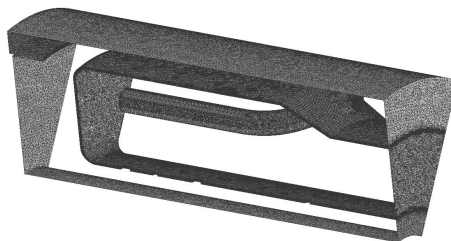


图7 微型燃烧室网格划分

燃烧室内涡系结构复杂,湍流模型选择 $k-\epsilon$ 双方程模型,使用 DPM 离散项模型模拟蒸发管内的燃油雾化蒸发过程,组分输运模型在考虑动力学因素与湍流因素后采用有限速率/涡耗散模型。动量、组分、能量均采用二阶迎风的离散格式,速度、压力修正均采用 Coupled 算法。燃烧室进口采用质量流量进口边界条件;燃油喷射点位于蒸发管内部,油滴颗粒设置为 Rosin-Rammler 分布;周期边界采用零压力梯度的旋转周期边界类型;在火焰筒后方增加一段平直段,设置出口条件为等压力梯度的自由流出口。

3 结果分析与讨论

根据上述数值解法,采用一维设计及参数化建模生成的两组模型,分析对燃烧室总体性能和工作可靠性的影响。

3.1 流量分配及流场分析

气流从扩压器出口进入燃烧室内,分成两股分别流入燃烧室内外环腔道,火焰筒头部的气流主要来源于蒸发管内射流、主燃孔部分回流以及

头部冷却孔射流;掺混区流量主要来自于掺混孔射流及冷却孔射流。首先对火焰筒内流量分配进行对比,如表1所示,各功能区流量分配与程序初步设计预估的流量占比相对偏差在3%以内,证明初步设计与参数化开孔设计误差较小。

表1 各方案功能区流量分配占比 单位:%

功能区	方案1 流量占比	方案2 流量占比
主燃区	28.1	27.6
补燃区	33.8	34.2
掺混区	38.1	38.2
蒸发管	8.5	8.3
燃烧空气量	45.0	44.0
外环腔道	64.0	63.5
内环腔道	36.0	36.5

主燃孔的存在对头部气流的流动起到了阻碍作用,蒸发管射流冲击头部后受到前端面的阻碍,使气流方向发生偏转,与主燃孔射流相互作用共同形成头部涡流区,增加了在主燃区的驻留时间;主流受主燃孔射流挤压作用继续向下游流动,由于掺混孔穿透深度足够大,外环掺混孔射流达到内壁,可以起到良好的掺混效果。

3.2 燃烧室总体性能分析

对燃烧室热态流场进行计算,图8为微型燃烧室轴向沿程平均温度分布。由图8可知火焰筒高温区主要集中在主燃区内,轴向截面平均温度最高达到2192 K,热点温度达到2603 K,高温区均分布在燃烧室主燃区附近,由于主燃孔射流为燃烧室提供了大量新鲜空气,在火焰面附近与上游未充分燃烧的可燃气掺混燃烧。因此火焰锋面处的燃烧反应最为剧烈;针对微型蒸发管式燃烧室火焰锋面的位置主要分布在蒸发管卷吸射流边缘、射流孔气柱的背风面和射流撞壁减速区域。

在补燃区温度呈下降趋势,但沿程也出现了几处峰值,这是由于补燃区射流孔新鲜空气使得高温燃气进一步反应;在掺混孔射流将高温燃气稀释后沿程温度显著下降,在火焰筒出口段温度变化不明显,掺混孔及其他射流孔起到了冷却壁面与调节出口温度品质的作用。

掺混段后方沿程温度分布云图如图9所示(本刊为黑白印刷,疑问之处请向作者咨询)。受外环掺混孔结构影响,高温燃气汇聚至蒸发管附近,又由于内环掺混孔射流遇到蒸发管壁面的阻

碍,气流分散在蒸发管两侧,因此高温燃气主要汇聚在靠近外环的蒸发管壁面两侧,受到蒸发管出口渐缩段的影响,出口温度气流受阻的区域温度较低,高温区主要分布在靠上壁面蒸发管轴线两侧。

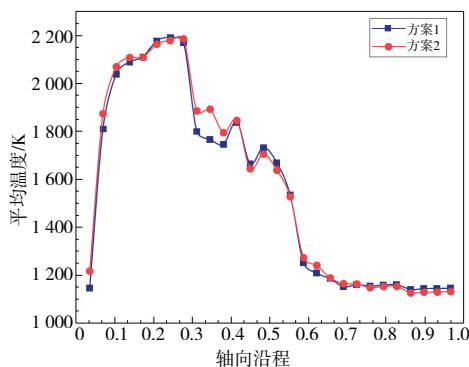


图8 火焰筒沿程平均温度分布

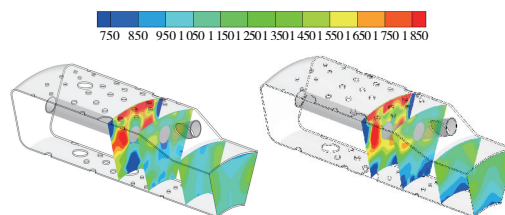


图9 掺混段沿程温度分布云图

图10为燃烧室出口径向温度分布,方案1出口平均温度1148.9 K,燃烧效率为96.72%,方案2燃烧效率96.42%,两方案已满足燃烧室设计要求;方案1的OTDF为0.377,方案2出口温度均匀性较差,OTDF为0.530。通过分析径向温度分布,高温区主要集中在燃烧室出口的55%~80%区域。各方案出口温度分布如图11所示,从图11中也可看出高温区主要分布在出口上方,方案2径向温差约有400 K,而方案1温差仅有175 K,方案1热点分布比较合理,有利于涡轮叶片的载荷均匀性。

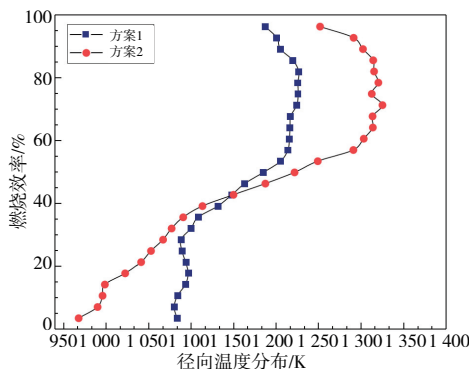


图10 燃烧室出口径向温度分布

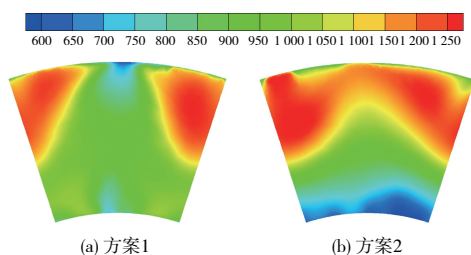


图 11 各方案出口温度分布

3.3 燃烧室工作可靠性分析

后置式蒸发管贯穿了燃烧室主燃区及掺混区,高温燃气从蒸发管外侧流过,工作环境恶劣,在前期的试验研究工作中蒸发管存在烧蚀和断裂的问题,若蒸发管管壁碎屑向下游运动会与涡轮转子碰撞导致发动机故障。因此研究蒸发管与燃烧室壁温工作可靠性是十分必要的。

图 12 为火焰筒及蒸发管各壁面温度云图及峰值分布,方案 1 内外环及蒸发管温度峰值较为平均,主要高温区集中在补燃区附近,蒸发管壁面由于受到内外环主燃孔射流的冲击,壁面温度较低,且热点分布合理;而方案 2 内外环壁面平均温度偏低但存在高温热点,在外环第 5 和第 6 排孔之间温度达到 1 265 K,且蒸发管最高温度达到 1 219 K,超过了材料的耐受温度,存在被烧蚀的风险。

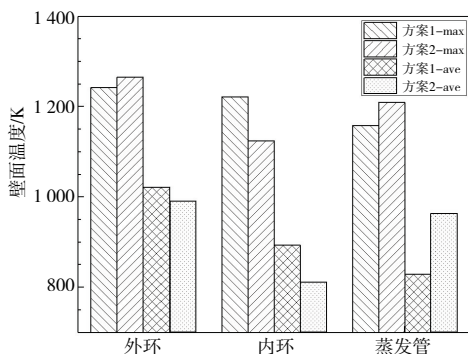


图 12 各壁面温度峰值及平均值对比图

4 结语

本文搭建了微型蒸发管式燃烧室一维设计及全参数化建模软件,并应用到某微型蒸发管式燃烧室设计中,得到如下结论。

1) 结合设计经验及气动热力公式搭建了从初步设计到三维全参数化建模的微型蒸发管式燃烧室设计平台,实现了从一维设计到三维建模的自动化过程,大大缩短了微型燃烧室设计周期。

2) 参数化建模实现了对周向不同孔径的开孔

以及不同偏转角度冷却孔的几何建模,并可通过程序实现不同构型蒸发管的建立,参数化程序操作简单且通用性强。

3) 采用参数化建模软件生成了不同开孔排布方式的燃烧室构型,并开展数值模拟研究。结果表明:当主燃孔与蒸发管对冲时有利于出口温度分布品质的提高,还能对蒸发管壁面起到冷却作用。

参考文献:

- [1] 谭汉清. 国外微型涡喷发动机应用现状及未来发展趋势[J]. 飞航导弹, 2013(3): 76-80.
- [2] 薛然然, 李凤超. 微型涡轮喷气发动机发展综述[J]. 航空工程进展, 2016, 7(4): 387-396.
- [3] 任祝寅, 周华, 张健, 等. 数字孪生在航空发动机燃烧室设计阶段的应用与展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 34-39.
- [4] 金如山, 党进, 刘富强. 新一代航空发动机燃烧室[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(2): 543-552.
- [5] 陈曦, 郑洪涛, 何悟, 等. 燃烧室一维微元法设计和三维校核研究[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(5): 433-439.
- [6] PEGEMANYFAR N, PFITZNER M, SURACE M. Automated CFD analysis within the preliminary combustor design system PRECODES utilizing improved cooling models [C]//Volume 2: Turbo Expo 2007. Montreal, Canada: ASME, 2007: 27409.
- [7] DUDEBOUT R, REYNOLDS B, MOLLA-HOSSEINI K. Integrated process for CFD modeling and optimization of gas turbine combustors [C]//Volume 1: Turbo Expo 2004. Vienna, Austria: ASME, 2004: GT-54011.
- [8] 段冬霞, 崔玉峰. 基于参数化建模方法的双级旋流器流场研究[J]. 燃气轮机技术, 2012, 25(2): 12-20.
- [9] 贾文杰. 航空发动机燃烧室参数化设计[J]. 航空发动机, 2022, 48(6): 56-63.
- [10] 闫泽华, 雷雨冰, 张世权, 等. 基于遗传算法的微型燃烧室一维优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 152-155.
- [11] 孙志杰, 雷雨冰. 流体网络法用于微型燃烧室的一维计算[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 118-121.
- [12] GIERAS M. Computational study of an aerodynamic flow through a micro-turbine engine combustor [J]. Journal of Power Technologies, 2012, 92(2): 68-79.
- [13] 李继保, 索建秦. 航空发动机主燃烧室设计[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [14] 索建秦, 梁红侠, 黎明, 等. 航空发动机燃烧室设计研发体系[J]. 航空发动机, 2021, 47(3): 29-34.
- [15] 李瀚, 索建秦, 梁红侠. 航空发动机燃烧室火焰筒设计验证方法研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 29-32, 37.

收稿日期: 2023-12-13