

基于遗传算法的微型燃烧室一维优化设计

闫泽华¹,雷雨冰¹,张世权¹,李峰²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;

2. 北京动力机械研究所 北京 100074)

摘要:在微型发动机燃烧室初步设计方案的基础上,结合流体网络法、化学反应器网络模型法和遗传算法进行微型发动机燃烧室一维优化设计,对微型发动机燃烧室的燃烧效率进行优化,程序可在预定范围内自动调整火焰筒内外双壁面各排孔孔径,在保证总压恢复系数大于95%的前提下使燃烧效率增加1.7%,达到了微型发动机燃烧室的一维优化设计要求。

关键词:微型发动机;燃烧室;优化设计;遗传算法

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0152-04

One - dimensional Optimization Design of Micro-combustor Based on Genetic Algorithm

YAN Zehua¹, LEI Yubing¹, ZHANG Shiquan¹, LI Feng²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics And Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Based on the preliminary design scheme of a certain type of micro-engine combustion chamber, the one-dimensional optimization design of the micro-engine combustion chamber was carried out by combining the fluid network method, the chemical reactor network model method and the genetic algorithm, and the combustion efficiency of the micro-engine combustion chamber was optimized. The design led to the increase of combustion efficiency by 1.7% under the premise that the total pressure recovery coefficient was assured greater than 95%, which reached the one-dimensional optimization design of the micro-engine combustion chamber.

Keywords: micro engine; combustion chamber; optimization design; genetic algorithm

0 引言

传统燃烧室设计往往通过三维 CFD 数值模拟方法评估燃烧室性能。但是在通过 CFD 方法设计燃烧室时,往往在对燃烧室结构进行微小调整之后,就需要设计人员重新进行燃烧室建模、网格划分、数值计算、后处理分析等工作,这部分工作在 CFD 设计中占据了很大的时间比例。若能在燃烧室一维计算分析阶段开展优化工作,修正或删除不合理的设计因素,并对燃烧室性能进行一定程度的优化,使燃烧室设计更加合理,这样就可以减少后续大量三维 CFD 计算分析工作,进而降低燃烧室设计周期。ROGERO J^[1]基于网络算法的半经验仿真工具和遗传算法开发了一种优化软件,软件可评估燃烧室性能和氮氧化物等污染物的排放水平。陈伟^[2]开发了基于压力修正的流体网络法计算程序,并对微型燃烧室流量分配进行了优化。赵璐等^[3]根据驻点回流燃烧室几何构型和燃烧室流动特点及温度分布的模拟结果,对该燃烧室进行了化学反应器网络模型的划分,并通过遗传算法优化了每个反应器的构型参数。

本文结合流体网络法、化学反应器网络模型法和遗传

算法建立了微型发动机燃烧室一维优化设计方法,使用该方法完成了微型燃烧室燃烧效率的优化。

1 基于流体网络法的流量分配计算

流体网络(network)法是一种流量分配计算方法,可根据流体网络图在节点处使用连续性方程,对两节点之间的单元使用压降/流量关系式,然后基于压力修正方法对压力、流量和密度进行修正,不断地迭代直到满足收敛精度。相关的计算信息和参数均按特定的形式储存在矩阵中,后续修改或增删数据只需修改相应的矩阵即可,具有计算时间短、灵活性强等优点,能够相对快速、准确地模拟复杂结构的流动,因而得到了广泛的应用^[4]。

后进气蒸发管式微型燃烧室结构简图如图1所示。根据微型燃烧室基本构型、开孔方案以及流动特点,构建由单元和节点组成的燃烧室流体网络结构图(图2)。其中编号为42~50的单元表示火焰筒外环壁面各排孔,编号为51~59的单元表示火焰筒内环壁面各排孔;编号为13~16的单元表示蒸发管,节点1和节点43分别表示燃烧室进口和燃烧室出口。

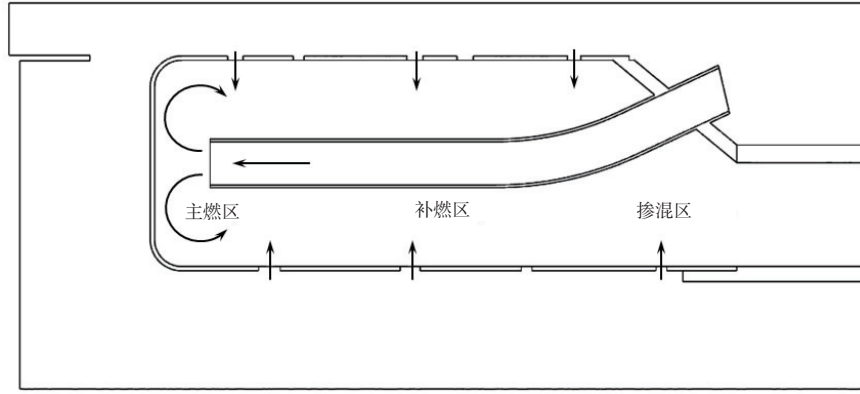


图1 后进气蒸发管式微型燃烧室结构简图

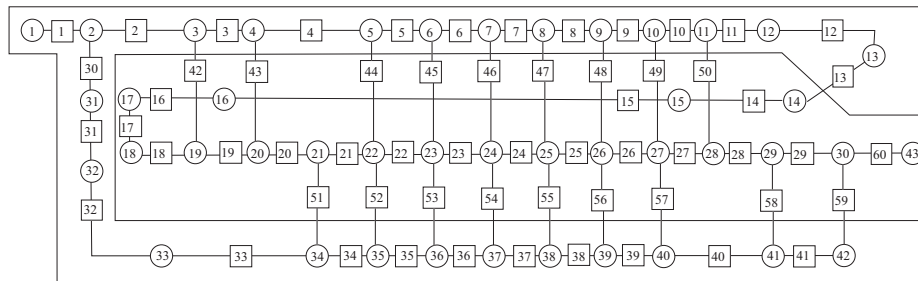


图2 微型燃烧室流体网络图

计算得到的各区域流量占比与预期流量占比相对偏差小于5%(表1),且各排孔孔径、孔数和总开孔面积以及蒸发管直径均符合设计经验。

表1 火焰筒各功能区流量分配 单位:%

功能区	设计流量占比	计算流量占比	相对偏差
主燃区	27.7	27.5	-0.7
补燃区	34.6	33.8	-2.4
掺混区	37.7	38.7	2.7
蒸发管	8.1	8.2	1.1
外环腔道	60.0	60.4	0.7
内环腔道	40.0	39.6	-1.0

2 微型燃烧室化学反应器网络模型

化学反应器网络(chemical reactor network, CRN)模型法依据内部流场、温度场和燃烧室的特性,将燃烧室划分为若干个区域,因而每个区域都可用简单的理想化学反应器来模拟^[5]。对于普通的燃烧室模型,经常使用到的化学反应器有完全混合反应器(perfectly stirred reactor, PSR)、柱塞流反应器(plug-flow reactor, PFR)和气体均相混合器(gas mixer)。该方法具有计算时效高、计算成本低及准确预测污染物排放情况等优点。

根据后进气蒸发管式微型燃烧室流场及主燃孔、掺混孔的位置划分可将火焰筒划分为主燃区、补燃区和掺混区3个主要区域^[6]。

主燃区取火焰筒头部至主燃孔中心截面之间的区域,是微型燃烧室主要的反应区,其主要功能是稳定火焰,使

大部分燃料在此区域进行稳定燃烧。考虑到微型燃烧室结构、成本等因素,本文设计的微型燃烧室利用火焰筒内外环第一排孔射流和蒸发管射流构成头部流场并建立回流区,以形成稳定的火焰燃烧区域。图3为某型微型燃烧室两蒸发管之间截面温度和燃油浓度分布云图。一定流量的燃油经蒸发管喷出后在主燃区与空气迅速且充分混合,快速反应,因此可以用完全混合反应器模拟此区域。考虑到火焰筒主燃区内环空气流量和燃油浓度分布不均匀的现象,将主燃区划分为2个完全混合反应器 PSR1和 PSR2, PSR1代表火焰筒主燃区外环贫油区, PSR2代表火焰筒主燃区内环富油区。

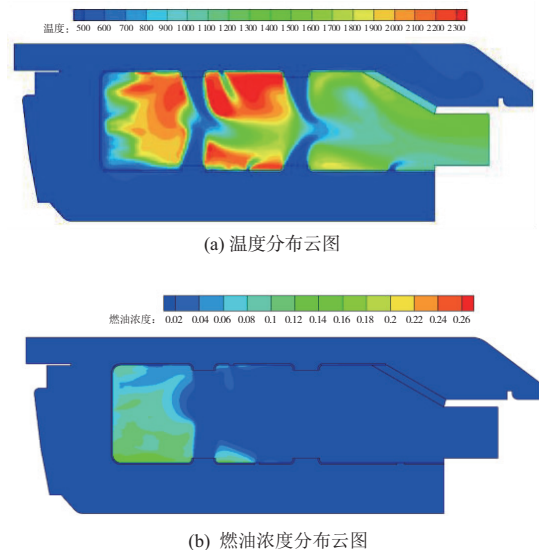


图3 某型微型燃烧室两蒸发管之间截面参数分布云图

补燃区取主燃孔中心截面至掺混孔之间的区域。受限于微型燃烧室结构特点,此时往往仍有部分未蒸发或完全燃烧的燃油进入此区域,因此补燃区的主要功能是使这部分燃料进一步燃烧。由于补燃区位于火焰筒中间位置,上游主燃区产生的高温燃气与未反应的燃油及新鲜空气在此区域快速、充分混合,继续反应,因此可以用完全混合反应器来模拟。根据图3某型微型燃烧室补燃区流场、温度场以及油雾场特性,补燃区仍存在内外环空气流量和燃油浓度分布不均匀的现象,且主燃孔射流在补燃区形成了一个明显的低温区,因此将补燃区划分为3个完全混合反应器PSR3、PSR4和PSR5,来分别表示火焰筒补燃区外环区域、主燃孔射流形成的低温区以及火焰筒补燃区内环区域。

掺混区取掺混孔至燃烧室出口截面之间的区域。掺混区的主要功能是利用掺混孔和下游壁面冷却孔的大量冷气与上游高温燃气充分掺混,控制燃烧室出口温度分布使燃气在进入涡轮前能够降到合理温度范围内,从而保证涡轮及其下游部件安全稳定工作。上游燃气流入此区域基本不发生化学反应,可使用1个柱塞流反应器(PFR)来模拟该区域。引入气体混合器(MIX)给PFR反应器导入燃烧室掺混区进入的空气^[7]。

微型燃烧室化学反应器划分及化学反应器网络模型示意图分别如图4和图5所示。



图4 微型燃烧室化学反应器划分示意图

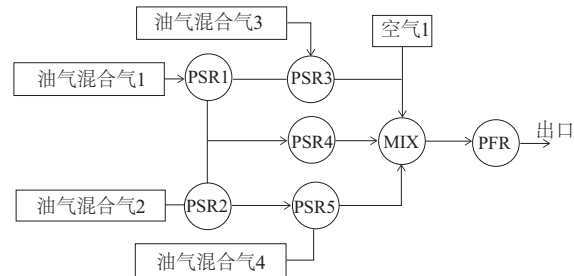


图5 微型燃烧室CRN模型示意图

流入化学反应器的各气流的初始参数如表2所示。

表2 各股气流初始参数汇总

参数名称	油气混合气1	油气混合气2	油气混合气3	油气混合气4	空气1
组分	C ₁₂ H ₂₃ 、O ₂ 、N ₂	C ₁₂ H ₂₃ 、O ₂ 、N ₂	C ₁₂ H ₂₃ 、O ₂ 、N ₂	C ₁₂ H ₂₃ 、O ₂ 、N ₂	O ₂ 、N ₂
相对空气流量	0.148	0.127	0.201	0.138	0.386
相对燃油流量	0.255	0.595	0.045	0.105	0

3 基于遗传算法的优化设计方法

遗传算法基于达尔文进化论和孟德尔遗传学说,将生物体进化的过程抽象化,对自然选择和遗传机制进行最大程度还原,得到了一种具备“生成+验证”特点的搜索算法。遗传算法将问题的参数空间替换为编码空间,将适应度函数做为评估基础,以编码总体为进化基础,实现了总体中单个个体的选择和遗传机制,并以此为基础进行迭代计算。在迭代过程中,依靠遗传算法中选择、变异等操作随机改变个体重要的基因,并从新一代群体中挑选出适应度更高的个体,群体在这个过程中逐渐进化,适应度逐渐接近目标值,最终完成优化^[8]。

采用单目标遗传算法优化,优化目标为最大化燃烧效率,同时保证总压恢复系数 $\sigma_B \geq 95\%$ 。燃烧室燃烧效率 η_B 采用温升法计算,即把燃烧效率定义为燃烧过程的实际温升和理论温升之比。总压恢复系数定义为燃烧室出口总压和进口总压之间的比值。燃烧效率和总压恢复系数的计算公式分别如式(1)和式(2)所示。

$$\eta_B = \frac{T_{t4} - T_{t3}}{T_{t4th} - T_{t3}} \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{P_{t4}}{P_{t3}} \quad (2)$$

优化过程中只改变火焰筒内外环壁面所有孔的孔径,不改变燃烧室其他几何结构。孔直径最大变化幅度为 ± 1 mm。

通过Cantera软件搭建微型燃烧室的化学反应器网络模型,通过Python语言编写基于遗传算法的微型燃烧室一维优化程序,设定种群的大小 n 为20,在迭代100次后停止优化。优化结束时,选择每代优化结果中最接近优化目标的个体作为优化结果(本文选择燃烧效率最大的个体)。

4 优化结果及分析

图6为每代种群中选出的最优个体的燃烧效率随着优化代数增加而变化的趋势图。从图6可以看出,随着迭代次数的增加,燃烧效率逐渐升高,整体呈上升趋势,其中前期迭代燃烧效率波动较大,之后趋于稳定,并在最后几代收敛,优化整体朝着燃烧效率增加的方向进行。

优化前后燃烧室各功能区流量占比如图7所示,优化后燃烧室主燃区流量占比增大,补燃区和掺混流量占比均有所减小。主燃区流量占比越大,用于燃烧的空气流量就越大,燃烧就越充分,燃烧室的燃烧效率也就越高。在划分微型燃烧室化学反应器网络模型时,考虑到火焰筒主燃区内外环空气流量和燃油浓度分布不均匀的现象,将燃烧室主燃区划分为内环和外环两个区域,油气混合气最初分别流入主燃区内环和主燃区外环进行燃烧,其中主燃区内环较主燃区外环分配的燃油流量更多。优化后的燃烧室

内环腔道流量占比增大了 7.03%,其中主燃区内环腔道流量占比增大了 28.47%,PSR2 当量比由 1.27 降至 0.99,即从富油混气变为接近化学恰当比的贫油混气,这表明火焰筒主燃区合理的油气配比是保证燃油高效燃烧的关键,通过调整火焰筒主燃区各排孔孔径可优化主燃区油气配比,从而提高燃烧室的燃烧效率。

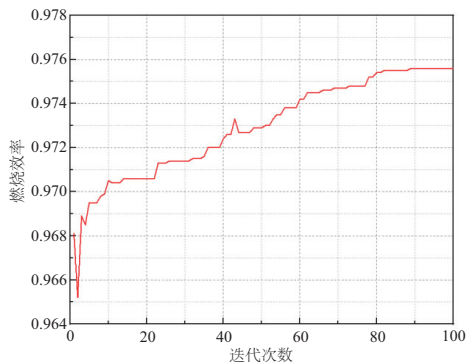


图6 燃烧效率随迭代次数的变化

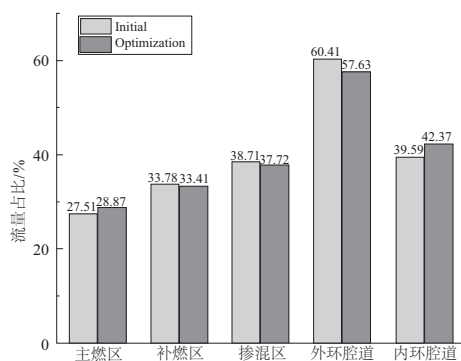


图7 优化前后燃烧室各功能区流量占比

优化后补燃区外环流量占比增大 6.42%,内环流量占比增大了 12.15%,总体流量占比减小了 1.11%。由于燃油燃烧主要在主燃区内进行,补燃区仅对部分未蒸发或完全燃烧的燃油进行补充燃烧,因此适度减小补燃区流量占比有利于燃油的充分燃烧。

优化后掺混区的流量占比减小了 2.55%。掺混区的主要功能是利用掺混孔和下游壁面冷却孔的大量冷气与上游高温燃气充分掺混使其降温,因此掺混区流量减小一定程度上有利于燃烧效率的提高。由于一维优化未考虑蒸发管及火焰筒内外壁面温度和燃烧室出口温度分布,掺混区的流量减小可能会使相应功能区的温度分布恶化。

优化前后的燃烧室性能参数对比如表 3 所示。可以看出,与初始方案相比,优化后燃烧效率增加了 1.7%,总压恢复系数大于 95%,燃烧效率得到了一定程度的提高,说明本文优化方法是有一定成效的。

表3 优化结果与初始方案对比 单位:%

性能参数	优化结果	初始方案
燃烧效率	97.56	95.86
总压恢复系数	96.11	96.70

5 结语

本文在微型燃烧室初步设计方案的基础上,基于化学反应器网络理论通过 Cantera 软件搭建了微型燃烧室的化学反应器网络模型,基于遗传算法优化原理通过 Python 语言编写了微型燃烧室一维优化程序,程序可在预定范围内自动调整火焰筒内外环壁面各排孔孔径,最终在保证总压恢复系数大于 95%的前提下使燃烧效率增加 1.7%。

参考文献:

- [1] ROGERO J. A genetic algorithms based optimisation tool for the preliminary design of gas turbine combustors [D]. England: Cranfield University, 2002.
- [2] 陈伟. 直射流稳焰技术及其燃烧室设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [3] 赵璐, 刘勇, 张祥, 等. 燃烧室化学反应器网络模型优化与性能分析[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(3): 251-259.
- [4] PRETORIUS J J, MALAN A G, VISSER J A. A flow network formulation for compressible and incompressible flow [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2008, 18(2): 185-201.
- [5] 曹志博, 肖隐利, 宋文艳. 基于化学反应器网络模型法的预混气组分对 NO_x 反应路径影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(3): 303-313.
- [6] 李超. 微型蒸发管燃烧室燃油冲击雾化蒸发的分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [7] 江民节. 炮式起动条件下的微型燃烧室烟火点火技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [8] 韩瑞锋. 遗传算法原理与应用实例[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010.

收稿日期: 2022-02-28