

# 自由活塞发动机进气口参数设计

卜祥祺,肖进\*

上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室,上海 200240

**摘要:**针对某 Curtis 型自由活塞发动机扫气性能优化问题,以目标扫气点与轴线的距离、侧向进气口倾角、排气口对侧进气口倾角为设计变量,基于 Box-Behnken 响应面法设计试验方案,构建以充气效率、扫气效率、困气效率、给气化为优化目标的响应面模型;在此基础上引入合意度函数实现多指标综合优化,获得兼顾充气、扫气、困气与短路损失的最优端口几何参数组合。仿真结果表明:当目标扫气点与轴线的距离为 11.86 mm、排气口对侧进气口倾角为 46.01°、侧向进气口倾角为 40.37°时,发动机扫气综合性能最佳,对应的充气效率为 1.061,扫气效率为 0.977,困气效率为 0.331,给气比为 3.205。研究表明,响应面-合意度一体化方法可为自由活塞发动机进气口几何参数的多目标优化提供有效的设计依据与参数选型参考。

**关键词:**自由活塞发动机;扫气;三维 CFD 仿真;响应面法

**中图分类号:**TK401

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2026)01-0011-20

**引用格式:**卜祥祺,肖进.自由活塞发动机进气口参数设计[J].内燃机与动力装置,2026,43(1):11-20.

BU Xiangqi, XIAO Jin. Design of intake port parameters for a free-piston engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026,43(1):11-20.

## 0 引言

自由活塞发动机是一种无曲轴机构的内燃机,其活塞通过直线往复运动直接驱动发电机或压缩机。与传统四冲程发动机相比,自由活塞发动机的活塞运动不受曲轴连杆结构的约束,其行程和频率可根据工况实现自适应调整。这一特性使得自由活塞发动机具有结构简单、摩擦损失较低、压缩比可变、燃料适用性广的优势<sup>[1]</sup>。随着全球对高效率、低排放能源解决方案需求的不断增长,自由活塞发动机作为一种极具潜力的动力系统,获得了广泛关注,并在混合动力汽车、分布式发电以及增程器等应用领域展现出广阔的发展前景<sup>[2]</sup>。

由于缺少曲轴连杆结构的机械约束,自由活塞发动机的运行稳定性在很大程度上取决于燃烧过程和换气过程的耦合效果。与四冲程发动机依靠活塞直接排出废气不同,自由活塞发动机需在短时间内借助新鲜空气将废气排出,难以达到四冲程发动机的扫气效果。由于自由活塞发动机的换气过程不完善,容易导致循环间工况波动,影响燃烧效率和排放<sup>[3]</sup>。在影响自由活塞发动机扫气过程的诸多因素中,进气角度起着关键作用<sup>[4]</sup>,进气角度决定了缸内流场,直接影响缸内废气排出和新鲜空气填充过程,进而影响充气效率、扫气效率、给气比及燃烧稳定性。如果进气角度设置不合理,可能造成扫气不彻底,氧气供应不足或扫气短路损失增加等问题,从而降低有效功率并且恶化排放。合理优化进气口角度对提高自由活塞发动机的充气效率、改善燃烧稳定性以及提高热效率具有重要意义<sup>[5]</sup>。

**收稿日期:**2025-11-24

**基金项目:**上海市科学技术委员会项目(19511108500)

**第一作者简介:**卜祥祺(2001—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为自由活塞发动机扫气系统,E-mail:buxiangqi@sjtu.edu.cn.

\* **通信作者简介:**肖进(1973—),男,湖南安化人,工学博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制、自由活塞式内燃机直线发电混合动力系统、无人机动力系统,E-mail:xiaojin@sjtu.edu.cn.

针对进气口角度优化设计,国内外学者开展了广泛的研究:谭宇航等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法研究了扫气口仰角、平射角对气体流动变化和扫气质量的影响;Mattarelli等<sup>[7]</sup>研究了扫气口倾角对对置二冲程柴油机换气性能的影响,获得了多工况下的进气口角度方案。目前关于自由活塞发动机进气口角度的研究多采用离散式参数分析方法,该方法将进气几何角限定为若干预设值,通过分析扫气效率、困气效率等性能指标以评估其影响<sup>[8]</sup>。然而这种方法无法提供连续的参数-性能映射关系,难以系统性地构建全局优化设计方案,得到的结论通常局限于特定工况。另外,也有研究针对充气效率、扫气效率、困气效率等参数展开独立分析,但缺少对多指标的综合权衡,因而难以得到多目标的综合优化设计方案。

本文中通过单因素仿真分析确定水平目标扫气点、侧向进气口仰角、排气口对侧进气口仰角等因素的最佳工作区间,进一步采用响应面法建立多因素对单一性能指标的响应模型<sup>[9-10]</sup>,结合合意度函数方法对充气效率、扫气效率、困气效率、给气比等性能指标进行综合优化,实现多目标之间的平衡与协调,从而优化自由活塞发动机的扫气过程,为构建高效自由活塞动力系统提供理论基础和技术支持。

## 1 模型建立与研究方法

### 1.1 气口结构布置

本文中采用 Curtis 型自由活塞发动机回流扫气模型,Curtis 型自由活塞发动机扫气示意图如图 1 所示。由图 1 可知:Curtis 型自由活塞发动机回流扫气模型中,进气口布置在气缸壁下部,其轴线与气缸轴线形成一定夹角,新鲜空气沿缸壁上升,流经燃烧室后推动废气从排气口流出,形成回流路径。该结构能够较好地避免新鲜空气直接短路,提高换气效率,同时还可以扩大扫气面积,适用于高速发动机。但这种构型对进气口角度具有高度敏感性,需要精细化设计实现性能优化<sup>[11]</sup>。通过 SolidWorks 建立 Curtis 型回流扫气自由活塞发动机三维模型,如图 2 所示。

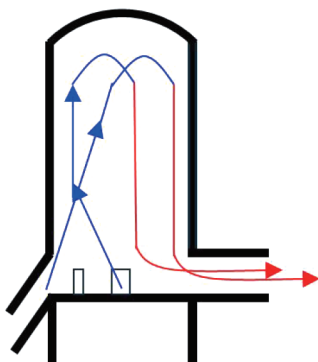


图 1 Curtis 型自由活塞发动机扫气示意图

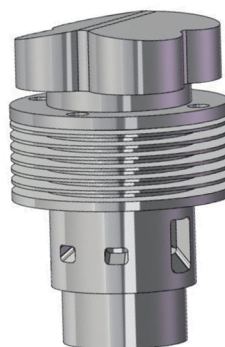


图 2 自由活塞发动机三维模型

本文中自由活塞发动机包括 5 个进气口和 2 个排气口,发动机主要参数如表 1 所示,其中进、排气口位置以缸套顶部作为轴向参考基准。

表 1 自由活塞发动机主要参数

缸径/mm	行程/mm	进气口面积/mm <sup>2</sup>	排气口面积/mm <sup>2</sup>	进气口位置 <sup>①</sup> /mm	排气口位置 <sup>①</sup> /mm
70	90	2 198	3 945	68.25	49.53

①以缸套顶部为轴向参考基准。

将水平目标扫气点定义为水平面上扫气口轴线和对称平面的交点,目标扫气点与轴线距离为  $d$ ,3 个进气口的轴线交汇于水平面上一点,水平目标扫气点位置示意如图 3 所示。水平目标扫气点影响缸内气流的旋流强度,合理设定该参数有助于提高新鲜空气对气缸边缘死区内残余废气的清除能力。倾角是进

气口上表面切平面与水平面形成的夹角,其中水平面为活塞顶部垂直运动方向的法平面。倾角是表征进气口特征的重要几何参数,直接影响进入气缸内新鲜气流的方向和流量。当倾角增大时,气流的轴向分量增强,有助于引导新鲜空气流向缸盖区域,减少短路损失;同时过大的倾角也会减小进气口有效进气面积,从而对扫气性能产生不利影响。因此,进气口倾角需要在减少短路损失和保证足够流通面积之间进行权衡<sup>[12]</sup>。为了实现高效扫气和充气,需要对不同位置的进气口分开设计。为了更好地引导气流向缸盖区域流动,位于排气口对侧的进气口往往采用较大倾角;为了保证进气量,其他进气口倾角通常采用较小倾角<sup>[8]</sup>。由于气缸结构的对称性,仅分析排气口对侧进气口倾角以及另外两个侧向进气口倾角。将进气口倾角简化为两个参数:排气口对侧进气口倾角为 $\alpha$ ,另外两个侧向进气口倾角为 $\beta$ ,如图4、5所示。

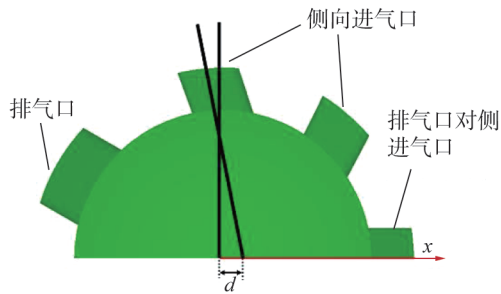


图3 水平目标扫气点

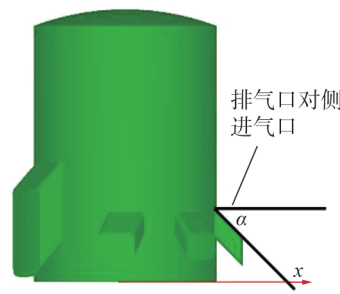


图4 排气口对侧进气口倾角

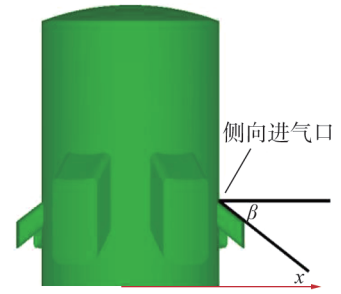


图5 侧向进气口倾角

## 1.2 三维仿真模型建立

采用 Converge 流体动力学软件,利用 SolidWorks 三维模型提取流体域建立自由活塞发动机的仿真模型,仿真模型及边界划分如图6所示。Converge 软件可以利用内置的自动网格划分技术生成计算网格,在活塞、气口开启/关闭等复杂移动条件下保持网格质量和单元数的动态适应性,从而保证计算精度和计算效率之间的平衡<sup>[13]</sup>。湍流模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型,该模型基于雷诺时均纳维-斯托克斯方程(RANS),通过引入重整化群理论修正湍流能耗散项,能够较好地表现缸内流体强旋转、高曲率的流动特性,在计算发动机复杂湍流结构方面具有更高的精度和适用性<sup>[14]</sup>;燃烧模型采用 SAGE 详细化学反应模型,该模型基于化学动力学原理,通过局部瞬时热力学状态逐步求解各组分的反应速率,其化学反应求解和流动计算可独立并行,在保证高精度的同时提高计算效率<sup>[15]</sup>;喷雾破碎模型采用 KH 不稳定模型,能够较准确预测高喷射速度下的液滴剥离及雾化过程;喷雾模型采用 O'Rourke 涡团扩散模型,能够精确描述液滴在湍流作用下的随机运动与扩散<sup>[16]</sup>;液滴蒸发模型采用 Frossling 模型,该模型基于对流传热与传质理论,可有效地预测液滴在高温高压下的蒸发率。边界条件设置如表2所示。

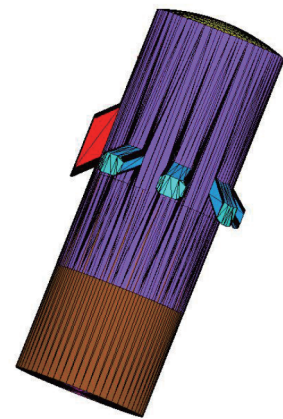


图6 自由活塞发动机仿真模型

表2 边界条件

进气压力 <sup>①</sup> /MPa	进气温度/K	排气压力/MPa	排气温度/K	活塞温度/K	缸壁温度/K	缸盖温度/K
0.14~0.15	300	0.1	300	450	450	500

①由一维模型获得,在0.14~0.15 MPa内波动。

在 Converge 数值模拟中,网格划分对于计算精度和结果收敛性具有重要影响。为确保本研究建立的自由活塞发动机三维模型计算结果的可靠性与独立性,进行网格无关性验证。在相同的物理模型和边界条件下,采用单元尺寸分别为2.5、3.0、3.5 mm的网格进行计算,不同单元尺寸下的缸压曲线如图7所示。由图7可知:采用3种网格进行计算的缸压区别不大,仅在缸压峰值附近区域有微小差异;当网格尺

寸由 3.0 mm 减小到 2.5 mm 时,缸压曲线差异很小,此时可认为计算结果已不再显著依赖于网格密度,即达到网格无关性。综合考虑数值模拟结果的物理合理性和可信度,同时避免因过度细化网格而导致的计算量增加,选择基础尺寸为 3.0 mm 的网格进行计算。

为验证模型的合理性与可靠性,将仿真计算得到的缸压与试验台架缸压传感器测得的缸压进行对比分析。对比工况设定为:发动机转速为 1 000 r/min,每循环喷油量为 18 mg,进气采用缓冲罐供气,扫气压力为 0.14~0.15 MPa,排气背压为大气压,活塞轨迹采用试验中实测的活塞运行曲线。稳定运行条件下,三维仿真得到的自由活塞发动机缸压曲线与试验测得的缸压曲线对比如图 8 所示。由图 8 可知:仿真和试验得到的缸压曲线在整个循环过程中具有较好的一致性,但在压缩上止点和燃烧后期缸压衰减阶段存在一定差异,最大偏差出现在缸压峰值附近,相对误差约为 2.27%,处于合理范围内。说明该三维模型能够有效反映自由活塞发动机的实际工作特性,可以作为后续研究的可靠工具。

### 1.3 研究方法

在对自由活塞发动机性能进行量化分析时,通常关注扫气效率、充气效率、困气效率、给气比等关键指标<sup>[17]</sup>。扫气效率  $\eta_s$  为换气后留在气缸内的新鲜空气质量  $m_0$  与换气后气缸内气体的总质量  $m_g$  之比,即  $\eta_s = m_0/m_g$ ;充气效率  $\eta_c$  为  $m_0$  与大气状态下充满气缸工作容积  $V_s$  的新鲜空气质量  $m_s$  之比,即  $\eta_c = m_0/m_s$ ;困气效率  $\eta_t$  为  $m_0$  与每循环供给的新气质量  $m_i$  之比,即  $\eta_t = m_0/m_i$ ;给气比  $R_D$  为  $m_i$  与  $m_s$  之比,即  $R_D = m_i/m_s$ 。

在自由活塞发动机中,进气口倾角和水平目标扫气点对缸内流动与燃烧过程具有重要影响,这些因素直接决定了发动机的充气效率、扫气效率、困气效率、给气比等关键性能参数。然而,多个因素通常同时作用于单一目标,固定其他参数时获得的最优参数未必适用于所有工况。此外,这些性能指标之间存在复杂的耦合关系,甚至相互制约。例如,优化扫气和充气效率可能导致困气效率下降,并且可能使给气比升高。如何调整多个进气角度参数以实现多目标平衡,成为研究中的关键问题<sup>[18]</sup>。

响应面法是一种用于优化和分析多因素、多响应变量问题的统计学方法。其核心思想是通过试验设计建立自变量与响应变量之间的数学模型,从而揭示各个因素对响应的影响关系。通过响应面法可有效识别影响系统性能的关键因素,优化这些因素以获得最优的性能结果<sup>[19]</sup>。本文中基于 Box-Behnken 方法设计仿真点进行试验。基于仿真结果,拟合单一响应变量与自变量之间的二阶多项式回归响应面模型,分析不同参数对各项性能指标的影响,不仅能够显著减少仿真计算量,还能在较大的设计空间内找到理论上的最佳角度组合<sup>[20]</sup>。

基于响应面法计算的结果,通过合意度函数进行优化是一种有效的多目标综合优化方法。在多因素研究过程中,响应面法能够建立自变量与响应变量之间的数学模型,并揭示各因素对响应的影响。然而,实际工程问题往往涉及多个性能指标,这些指标之间可能存在相互制约的关系,因此需要综合考虑各性能指标的优化。合意度函数是一种将多个响应变量通过标准化处理,转化为单一综合指标的方法,广泛应用于响应面法的优化过程<sup>[21]</sup>。合意度函数的基本思想是为每个响应变量定义一个反映其在给定范围内优劣程度的合意度评分。通过对所有响应变量的合意度评分进行加权平均,可以得到综合合意度函数,作为响应面法优化过程的目标函数。

望大型合意度

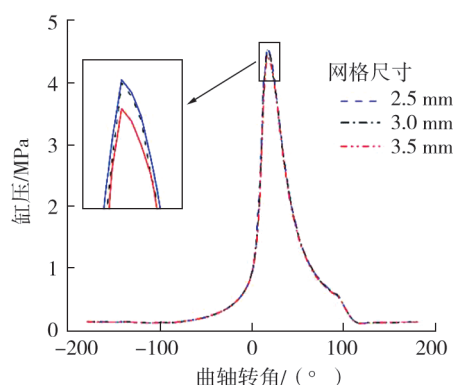


图7 网格尺寸对缸压计算结果的影响

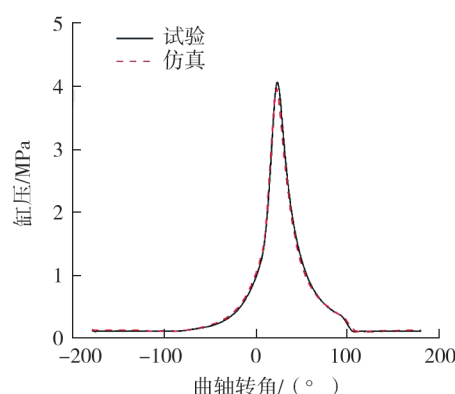


图8 三维仿真与试验测试缸压结果对比

$$d_l(y) = \begin{cases} 0, & y \leq L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s, & L < y < T \\ 1, & y \geq T \end{cases}$$

望小型合意度

$$d_s(y) = \begin{cases} 1, & y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^s, & T < y < U \\ 0, & y \geq U \end{cases}$$

式中:  $y$  为响应变量,  $T$  为目标结果,  $L$  为下限,  $U$  为上限,  $s$  为权重指数。

使用望大型合意度函数拟合充气效率、扫气效率、困气效率的满意程度,使用望小型合意度函数拟合给气比的满意程度。

将个体合意度合并为总体合意度

$$D = (d_{\eta_{ch}}^{w_1} \cdot d_{\eta_{sc}}^{w_2} \cdot d_{\lambda}^{w_3} \cdot d_{\eta_{tr}}^{w_4})^{\frac{1}{w_1+w_2+w_3+w_4}}$$

式中:  $d_{\eta_{ch}}$ 、 $d_{\eta_{sc}}$ 、 $d_{\lambda}$ 、 $d_{\eta_{tr}}$  分别为充气效率、扫气效率、给气比、困气效率的单项合意度;  $w_i$  为各单项合意度在综合评价中的权重,  $i=1,2,3,4$ 。

将充气效率、扫气效率、给气比、困气效率4项性能指标的合意度权重分别设置为5、4、2、2,得到理论最优进气口参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 水平目标扫气点的单因素仿真结果

设置  $\alpha=60^\circ, \beta=30^\circ, d$  分别为-5、0、5、10、15、20、25、35 mm 时,仿真得到设定参数下  $d$  对自由活塞发动机扫气性能的影响,如图9所示。

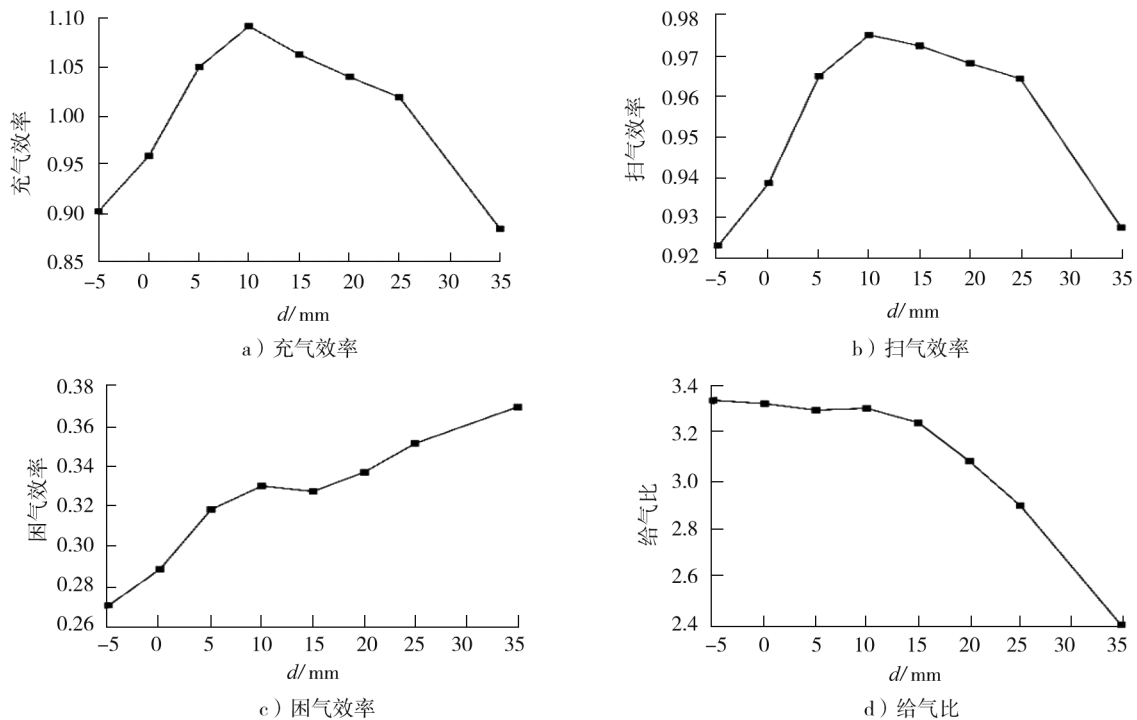


图9 水平目标扫气点与轴线的距离  $d$  对扫气性能的影响

由图9可知:1)当 $d$ 约为10 mm时,系统的充气效率和扫气效率最大,分别约为1.10、0.975,此时缸内残余废气基本被清除,缸内的新鲜空气填充充分,扫气过程较理想;当 $d$ 偏离5~15 mm后,充气效率和扫气效率均快速减小。2) $d$ 由-5 mm增大到35 mm,困气效率逐渐上升,气体在缸内的滞留比例增大; $d$ 为5~15 mm时,困气效率先略微上升然后略微下降,其他位置困气效率增大速度相对一致,变化不显著。3) $d$ 由-5 mm增大到35 mm,给气比逐渐下降,随着扫气目标点后移,进入缸内的新鲜气体减少; $d$ 为-5~15 mm时,给气比轻微下降,变化幅度不大,保持在较高水平; $d > 15$  mm后,下降速度显著增大,给气比大幅减小。

## 2.2 排气口对侧进气口倾角的单因素仿真结果

设置 $d = 10$  mm,  $\beta = 30^\circ$ ,  $\alpha$  分别为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 时,分析排气口对侧进气口倾角 $\alpha$ 变化对自由活塞发动机扫气性能的影响,结果如表3所示。由表3可知:1) $\alpha$ 由 $30^\circ$ 逐步增大至 $60^\circ$ ,充气效率与扫气效率均呈现先升高后下降的趋势;当 $\alpha$ 为 $45^\circ$ 时,充气效率与扫气效率均达到最大,分别约为

表3 排气口对侧进气口倾角对扫气性能的影响

$\alpha / (^\circ)$	充气效率	扫气效率	困气效率	给气比
30	1.079 37	0.972 16	0.281 71	3.831 45
45	1.141 94	0.985 17	0.300 10	3.805 24
60	1.114 01	0.980 87	0.304 50	3.658 51

1.142、0.985,表明此时气流组织较合理,新鲜空气充分进入气缸,同时废气排出也较为顺畅;当 $\alpha$ 继续增大至 $60^\circ$ 时,等效进气面积过小,气流过于垂直,从而使充气效率与扫气效率均有所下降。2)困气效率随 $\alpha$ 增大呈逐渐升高的趋势,表明 $\alpha$ 较大时,部分废气更易滞留在气缸内,导致残余气体排出受阻,这一特性在保证一定充气效率的同时,也可能增加循环中废气残留,对燃烧稳定性和排放性能产生不利影响;与此相对应,给气比随 $\alpha$ 增大逐渐下降,即相同参考空气质量下,进入气缸的实际新鲜空气量减少,这主要是由于 $\alpha$ 增大导致气流通道有效截面积减小,以及气流组织效率下降所致。综上所述, $\alpha$ 适中(约为 $45^\circ$ )时,充气效率、扫气效率和困气效率之间实现较好平衡,从而有效提高气体交换过程的综合性能, $\alpha$ 过大或过小均可能造成性能的双重损失。

## 2.3 侧向进气口倾角的单因素仿真结果

设置 $d$ 为10 mm,  $\alpha$ 为 $30^\circ$ ,  $\beta$ 分别取 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 时,侧向进气口倾角对自由活塞发动机扫气性能的影响如图10所示。

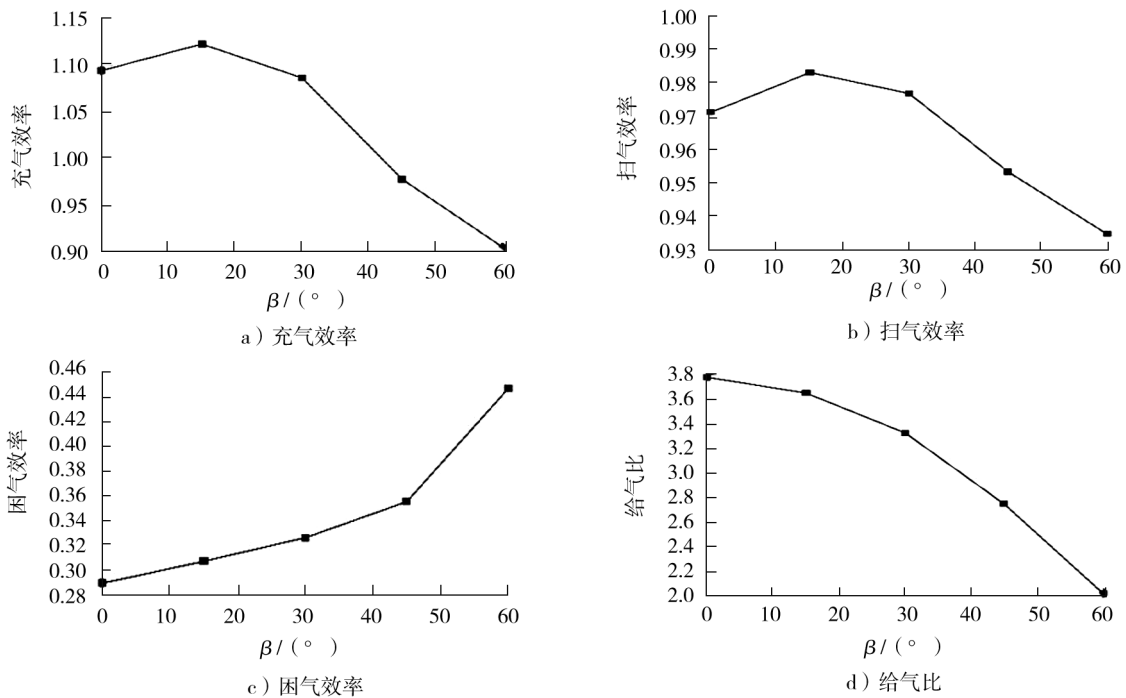


图10 侧向进气口倾角对扫气性能的影响

由图 10 可知:随着  $\beta$  增大,充气效率和扫气效率均呈现出先升高后下降的趋势;当  $\beta$  为  $0\sim 15^\circ$  时,进气流动方向较合理,气缸内新鲜空气充填效果最佳;随着  $\beta$  继续增大,进气流趋向垂直方向,有效进气面积减小,流动损失增加,导致充气效率和扫气效率逐渐降低;困气效率随  $\beta$  的增大而显著增大。较大的倾角可以增强新鲜气体在燃烧室顶部和壁面附近的滞留能力,从而减少随废气一同排出的损失。这一过程中给气比持续下降,即进入气缸的新鲜空气总量减少,说明过大倾角限制整体进气能力。

2.4 响应曲面-合意度函数分析

根据单因素仿真结果,采用响应面设计试验,运用 Box-Benhnken 的中心组合试验设计原理,选择水平目标扫气点、排气口对侧扫气口倾角、侧向扫气口倾角三个因素,进行三因素三水平的响应面分析试验,并且以充气效率、扫气效率、困气效率、给气比为响应变量,响应面试验设计如表 4 所示。

表 4 响应面试验设计

水平	$d/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$
-1	5	30	0
0	10	45	15
1	15	60	30

2.4.1 响应面试验及方差分析

响应面设计与试验结果如表 5 所示。

表 5 Box-Benhnken 响应面设计与结果

编号	$d/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	充气效率 $\eta_c$	扫气效率 $\eta_s$	困气效率 $\eta_t$	给气比 $R_D$
1	5	45	0	0.975 182	0.940 771	0.234 957	4.150 47
2	15	45	0	1.133 630	0.982 292	0.299 347	3.787 01
3	5	45	30	1.000 860	0.960 341	0.297 917	3.359 53
4	5	60	15	0.976 600	0.944 955	0.244 887	3.987 96
5	10	30	30	1.098 110	0.977 994	0.312 600	3.512 83
6	10	45	15	1.141 940	0.985 171	0.300 096	3.805 25
7	5	30	15	0.978 355	0.945 355	0.245 654	3.982 65
8	15	30	15	1.135 200	0.986 020	0.289 318	3.923 71
9	15	60	15	1.121 080	0.973 101	0.313 841	3.572 13
10	10	60	30	1.091 550	0.975 319	0.330 484	3.302 88
11	15	45	30	1.084 690	0.978 570	0.321 447	3.374 40
12	10	60	0	1.093 030	0.971 339	0.289 338	3.777 69
13	10	30	0	1.137 550	0.980 162	0.283 193	4.016 87
14	10	45	15	1.141 940	0.985 171	0.300 096	3.805 25

通过 Design Expert 软件对表 5 进行响应面二次多项式回归分析,得到相应的数学预测模型为:

$$\eta_c = 0.553\ 055 + 0.077\ 416\{d\} + 0.005\ 754\{\alpha\} + 0.002\ 794\{\beta\} - 0.000\ 041\{d\}\{\alpha\} - 0.000\ 249\{d\}\{\beta\} + 0.000\ 042\{\alpha\}\{\beta\} - 0.002\ 912\{d\}^2 - 0.000\ 073\{\alpha\}^2 - 0.000\ 091\{\beta\}^2,$$

式中: $\{d\}$  为以 mm 为单位的  $d$  的数值, $\{\alpha\}\{\beta\}$  分别为以  $(\text{°})$  为单位的  $\alpha,\beta$  的数值。

$$\eta_s = 0.809\ 889 + 0.019\ 666\{d\} + 0.002\ 529\{\alpha\} + 0.001\ 005\{\beta\} - 0.000\ 042\{d\}\{\alpha\} - 0.000\ 078\{d\}\{\beta\} + 6.831\ 11 \times 10^{-6}\{\alpha\}\{\beta\} - 0.000\ 670\{d\}^2 - 0.000\ 027\{\alpha\}^2 - 0.000\ 013\{\beta\}^2.$$

$$\eta_t = 0.113\ 655 + 0.020\ 126\{d\} + 0.001\ 596\{\alpha\} + 0.000\ 819\{\beta\} + 0.000\ 084\{d\}\{\alpha\} - 0.000\ 136\{d\}\{\beta\} + 0.000\ 013\{\alpha\}\{\beta\} - 0.000\ 843\{d\}^2 - 0.000\ 025\{\alpha\}^2 - 0.000\ 042\{\beta\}^2.$$

$$R_D = 4.442\ 87 - 0.016\ 626\{d\} - 0.004\ 436\{\alpha\} - 0.008\ 830\{\beta\} - 0.001\ 190\{d\}\{\alpha\} + 0.001\ 261\{d\}\{\beta\} +$$

$$0.000\ 032\{\alpha\}\{\beta\}+0.001\ 533\{d\}^2+0.000\ 102\{\alpha\}^2-0.000\ 781\{\beta\}^2。$$

在后续方差分析中, $d$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 为一次项,表示单个因素对充气效率的线性影响; $d\alpha$ 、 $d\beta$ 、 $\alpha\beta$ 为交互项,用于描述两个因素同时变化时对响应的耦合作用; $dd$ 、 $\alpha\alpha$ 、 $\beta\beta$ 为二次项,用于反映响应变量的非线性变化趋势和曲率特性。均方为在单位自由度下响应变量的平均波动,均方越大,该因素对响应的影响越显著; $F$ 用于衡量某一因素对响应的影响强度, $F$ 越大,表示该因素对响应的影响力越强; $P$ 用于判断该影响是否具有统计显著性,当 $P$ 小于显著性水平(通常取0.05)时,认为该因素对响应具有显著影响。

充气效率、扫气效率、困气效率、给气比的回归方差分析结果如表6所示。

表6 充气效率、扫气效率、困气效率、给气比回归方程方差分析

方差来源	自由度	均方				$F$	
		充气效率	扫气效率	困气效率	给气比	充气效率	扫气效率
模型	9	0.006 3	0.000 4	0.001 2	0.105 7	40.15	41.45
$d$	1	0.036 9	0.002 1	0.005 0	0.084 7	234.63	234.08
$\alpha$	1	0.000 6	0.000 1	0.000 3	0.079 1	3.56	8.72
$\beta$	1	0.000 5	0	0.003 0	0.595 4	3.27	4.42
$d\alpha$	1	0	0	0.000 2	0.031 8	0.24	4.44
$d\beta$	1	0.001 4	0.000 1	0.000 4	0.035 8	8.84	15.37
$\alpha\beta$	1	0.000 4	0	0	0.000 2	2.29	1.07
$dd$	1	0.017 0	0.000 9	0.001 4	0.004 7	107.73	101.87
$\alpha\alpha$	1	0.000 9	0.000 1	0.000 1	0.001 7	5.42	13.28
$\beta\beta$	1	0.001 4	0	0.000 3	0.098 8	8.58	3.08

方差来源	自由度	$F$		$P$			
		困气效率	给气比	充气效率	扫气效率	困气效率	给气比
模型	9	47.82	43.92	0.001 4	0.001 4	0.001 0	0.001 2
$d$	1	196.05	35.22	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.004 0
$\alpha$	1	11.13	32.87	0.132 3	0.041 8	0.028 9	0.004 6
$\beta$	1	118.05	247.45	0.144 8	0.103 5	0.000 4	< 0.000 1
$d\alpha$	1	6.24	13.23	0.648 0	0.102 8	0.067 0	0.022 0
$d\beta$	1	16.28	14.87	0.041 0	0.017 2	0.015 7	0.018 2
$\alpha\beta$	1	1.34	0.09	0.204 9	0.359 2	0.310 9	0.780 5
$dd$	1	55.45	1.95	0.000 5	0.000 5	0.001 7	0.234 8
$\alpha\alpha$	1	3.90	0.71	0.080 4	0.021 9	0.119 4	0.448 0
$\beta\beta$	1	11.03	41.07	0.042 8	0.154 0	0.029 4	0.003 0

由表6可知:1)充气效率。 $d$ 、 $dd$ 、 $\beta\beta$ 项的 $P$ 小于0.05,对充气效率有重要影响,并且整体模型的 $P$ 为0.001 4,远小于0.05,说明整体模型在统计上是显著的,能够有效预测充气效率。2)扫气效率。 $d$ 、 $dd$ 、 $\alpha\alpha$ 项的 $P$ 小于0.05,对扫气效率有重要影响,并且整体模型的 $P$ 为0.001 4,远小于0.05,说明整体模型在统计上是显著的,能够有效预测扫气效率。3)困气效率。 $d$ 、 $\alpha$ 、 $d\beta$ 、 $dd$ 、 $\beta\beta$ 项的 $P$ 小于0.05,对困气效率有重要影响,并且整体模型的 $P$ 为0.001 0,远小于0.05,说明整体模型在统计上是显著的,能够有效预测困气效率。4)给气比。 $d$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $d\alpha$ 、 $d\beta$ 、 $\beta\beta$ 项的 $P$ 均小于0.05,对给气比有重要影响,并且整体模型的 $P$ 约为0.001 2,远小于0.05,说明整体模型在统计上是显著的,能够有效预测给气比。综上,模型能够有效预测发动机扫气性能。

### 2.4.2 合意度函数分析

根据充气效率、扫气效率、困气效率和给气比的响应面回归模型,并结合第1.3节中的合意度函数,本文中设置了各性能指标的合意度上、下限:充气效率的合意度上限为1.2,下限为0.9;扫气效率的上限为1.00,下限为0.93;困气效率的上限为0.4,下限为0.2;给气比的上限为4.0,下限为2.5。通过最大化总体合意度函数,得到的优化目标对应的参数为: $d = 11.86 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 46.01^\circ$ ,  $\beta = 40.37^\circ$ 。此时,响应面回归模型预测的充气效率约为1.097,扫气效率为0.978,困气效率为0.356,给气比为3.024。实际仿真的结果为:充气效率为1.061,扫气效率为0.977,困气效率为0.331,给气比为3.205。由此可以认为,通过该优化方案,设计能够有效满足性能需求,并且响应面模型与实际测得数据之间的差异在可接受范围内,表明优化设计具有一定的实际应用价值。

## 3 结论

基于自由活塞发动机CFD仿真,对不同进气口参数下的充气效率、扫气效率、困气效率、给气比等关键性能指标进行了研究,结合响应面法对每个响应建立了多因素响应面模型,并且通过合意度函数提出了多响应设计方案。所提出的优化方法能够有效提高发动机的整体性能,为自由活塞发动机的设计提供了科学依据和系统性思路。

1)通过单因素仿真分析,研究发现水平目标扫气点、排气口对侧进气口倾角以及侧向进气口倾角对发动机扫气性能具有显著影响。当水平目标扫气点过小时,扫气短路损失较大,导致缸体边缘部分扫气不完全;而当该目标点过大时,有效进气面积减小,流动损失增加。排气口对侧进气口倾角较小时,缸盖部分的扫气效果不理想;倾角过大时,流动损失加剧,影响了发动机的整体气流分布。此外,侧向进气口倾角对气流分布的影响也表现出一定的非线性特征,倾角过大或过小均可能导致气流分布不均,进而影响发动机的扫气效率。

2)利用响应面进行仿真条件设计,运用Box-Behnken的中心组合设计原理,结合单因素仿真结果,选择水平目标扫气点与轴线的距离、排气口对侧进气口倾角以及侧向进气口倾角进行三因素三水平响应面分析,得到了充气效率、扫气效率、困气效率、给气比关于三因素的响应曲面模型。

3)结合合意度函数,进行扫气口倾角最优设计,得到水平目标扫气点与轴线的距离为11.86 mm、排气口对侧进气口仰角为 $46.01^\circ$ 、侧向进气口仰角为 $40.37^\circ$ 时,合意度函数有最大值。此时,响应面回归模型预测的充气效率约为1.097,扫气效率为0.978,困气效率为0.356,给气比为3.024,与仿真验证结果基本一致,设计能够有效满足性能需求,并且响应面模型与实际测得数据之间的差异在可接受范围内,表明优化设计具有一定的实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] GUO C D, ZUO Z X, FENG H H, et al. Advances in free-piston internal combustion engines: a comprehensive review[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116679.
- [2] MIKALSEN R. An investigation into the free-piston engine concept and its potential for high efficiency and low emissions power generation[D]. Newcastle upon Tyne, UK: Newcastle University, 2008.
- [3] LIU S S, XU Z P, CHEN L M, et al. Comparison of an opposed-piston free-piston engine using single and dual channel uniflow scavenging[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117813.
- [4] 张宇,肖进,张宸.二冲程自由活塞发动机扫气与排放仿真研究[J].内燃机与动力装置,2023,40(1):1-8.
- [5] 柏金,孙思楠,王谦.进排气结构参数对微型自由活塞发动机扫气过程影响的数值模拟研究[J].内燃机工程,2021,42(5):42-51.
- [6] 谭宇航,曹兵,李世金,等.二冲程自由活塞发动机回流扫气仿真研究[J].小型内燃机与车辆技术,2024,53(6):1-5.
- [7] MATTARELLI E, RINALDINI C A, SAVIOLI T. Port design criteria for 2-stroke loop scavenged engines[C]//Proceedings

- of SAE 2016 World Congress and Exhibition. Detroit;USA;SAE International,2016.
- [ 8 ] WU Y N, WANG Y, ZHEN X D, et al. Three-dimensional CFD (computational fluid dynamics) analysis of scavenging process in a two-stroke free-piston engine[J]. Energy, 2014, 68:167-173.
- [ 9 ] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
- [ 10 ] SUSAIMANICKAM A, MANICKAM P, JOSEPH A A. A comprehensive review on RSM-coupled optimization techniques and its applications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering,2023,30:4831-4853.
- [ 11 ] 长尾不二夫. 二冲程发动机的换气[J]. 小型内燃机,1972(2):1-22.
- [ 12 ] 邓凯强. 氢燃料自由活塞发动机换气系统设计与仿真分析[D]. 南京:南京理工大学,2023.
- [ 13 ] RAO G P, DHYANI V, KUMAR D, et al. Investigating optimal operating parameters of DI diesel engine; a CFD approach using CONVERGE[J]. World Journal of Engineering,2016,13(4):356-363.
- [ 14 ] 林煜. 基于 CONVERGE 软件的发动机燃烧室模型构建[J]. 汽车实用技术,2019(20):40-43.
- [ 15 ] ZHANG W. An introduction to automotive engine combustion modeling[J]. Current Journal of Applied Science and Technology,2024,43(6):168-172.
- [ 16 ] 耿超,张玉银,徐斌,等. 喷雾特性 CFD 仿真的准确性与效率的探讨[J]. 内燃机工程,2015,36(6):130-136.
- [ 17 ] 郭文翠. 回流扫气自由活塞发动机的设计与换气过程模拟[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [ 18 ] 李思佳. 液压自由活塞发动机回流扫气系统的设计与优化[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [ 19 ] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2005(3):236-240.
- [ 20 ] REJI M, KUMAR R. Response surface methodology (RSM): an overview to analyze multivariate data[J]. Indian Journal of Microbiology Research,2022,9(4):241-248.
- [ 21 ] SHI X S, ZHANG C, WANG X Q, et al. Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash-GGBS based geopolymers mortar[J]. Construction and Building Materials,2022,315:125644.

## Design of intake port parameters for a free-piston engine

BU Xiangqi, XIAO Jin\*

Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract:** To address the optimization of scavenging performance in a Curtis-type free-piston engine, the horizontal scavenging target point, the inclination angle of the lateral intake ports, and the inclination angle of the intake ports opposite the exhaust port are selected as design variables. An experimental design is constructed using the Box-Behnken response surface methodology, and response surface models are established with charging efficiency, scavenging efficiency, and trapping efficiency as the optimization objectives. On this basis, a desirability function is introduced to achieve multi-objective comprehensive optimization, yielding optimal port geometric parameters that simultaneously account for charging, scavenging, trapping, and short-circuiting losses. Simulation results indicate that when the horizontal scavenging target point is 11.86 mm, the inclination angle of the intake ports opposite the exhaust port is  $46.01^\circ$ , and the inclination angle of the lateral intake ports is  $40.37^\circ$ , the engine achieves the best overall scavenging performance. Under these conditions, the corresponding charging efficiency, scavenging efficiency, trapping efficiency, and delivery ratio are 1.061, 0.977, 0.331, and 3.205, respectively. The study demonstrates that the integrated response surface-desirability approach provides an effective design framework and parameter selection reference for the multi-objective optimization of scavenging port geometry in free-piston engines.

**Keywords:** free-piston engine; scavenging; 3D CFD simulation; response surface methodology (RSM)

(责任编辑:刘丽君)