

基于灰色关联分析的柴油机气道结构参数 对气道性能的影响

包广元¹, 张 韦², 何 超¹, 王东鸽¹, 李加强¹

(1. 西南林业大学 云南省高校高原山区机动车环保与安全重点实验室, 昆明 650224; 2. 昆明理工大学 云南省
内燃机重点实验室, 昆明 650500)

Influences of Diesel Engine Intake Port Structure Parameters on Intake Port Performances Based on Grey Relational Analysis

BAO Guangyuan¹, ZHANG Wei², HE Chao¹, WANG Dongge¹, LI Jiaqiang¹

(1. Key Laboratory of Vehicle Environmental Protection and Safety in Plateau Mountain Area of Yunnan Provincial
Colleges, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Internal
Combustion Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the performance of diesel engine helical intake port, the influences of helical chamber height, intake port eccentricity and intake port deflection angle on airway performance was systematically studied through grey relational analysis. The results show that the airway structural parameters with the strongest influence to the weakest influence on swirl ratio and intake mass are helical chamber height, intake port eccentricity, intake port deflection angle and helical chamber height, intake port deflection angle, intake port eccentricity. When helical chamber height is 5.04 mm and intake port eccentricity is 2.82 mm, the swirl ratio reaches the maximum value of 2.102. Meanwhile, when helical chamber height is 5.04 mm and intake port deflection angle is 5.2°, the intake mass reaches the maximum value of 0.715 g. Through the polynomial approximation algorithm, the explicit expressions of the swirl ratio model and the intake mass model were established. The two models performed well in terms of prediction accuracy and fit. The root mean square errors for the swirl ratio and the intake mass are 0.04 and 0.05, respectively, and the coefficients of determination for the swirl ratio and the intake mass are 0.95 and 0.93, respectively.

摘要: 为提升车用柴油机螺旋进气道的性能,通过灰色关联分析,系统研究了螺旋室高度、气道偏心距及气道偏转角对气道性能的影响规律。研究表明,气道结构参数按照对涡流比和进气量的影响权重由高到低排序依次为螺旋室高度、气道偏心距、气道偏转角。当螺旋室高度为 5.04 mm 而气道偏心距为 2.82 mm 时,涡流比达到最大值 2.102。当螺旋室高度为 5.04 mm,气道偏转角为 -5.2° 时,进气量达到最大值 0.715 g。通过多项式逼近算法,建立了

第二十七届中国科协年会学术论文

收稿日期: 2025-03-24

修回日期: 2025-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52166007, 22362018); 云南省科技厅农业联合专项项目(202301BD070001-077); 云南省教育厅科学研究基金项目(2024Y605)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (52166007, 22362018); Yunnan Provincial Science and Technology Department Agricultural Joint Project (202301BD070001-077); Scientific Research Fund Project of Yunnan Provincial Department of Education (2024Y605)

作者简介: 包广元(1993—),男,博士生,主要研究方向为机动车排放, E-mail: 2546296009@qq.com;

何 超(通信作者), E-mail: chao.he@swfu.edu.cn。

涡流比模型和进气量模型。这两个模型在预测精度和拟合度方面表现优异,涡流比与进气量的均方根误差分别为 0.04 和 0.05,拟合优度分别为 0.95 和 0.93。

关键词: 柴油机;螺旋进气道;结构参数;灰色关联分析;多项式逼近算法

Key words: diesel engine; helical intake port; structural parameters; grey correlation analysis; polynomial approximation algorithm

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.03.009

中图分类号: TK474

0 概述

近年来,随着内燃机技术的持续发展,能源危机和环境污染问题日益严峻。作为工程机械的主要动力源之一,柴油机的燃油消耗与排放控制已成为亟待解决的关键技术难题^[1]。柴油机的燃烧质量及其排放特性直接受到气缸内气流状态和燃油喷射过程的显著影响。在柴油机中,进气道内的空气流动主要表现为涡流和滚流两种形式,这些气流特性对油气混合过程及燃烧效率起着至关重要的作用。由于柴油机采用扩散燃烧方式,这需要在燃油喷射、油气混合和燃烧过程中实现高效的协调。为了快速实现燃油与空气的充分混合^[2],必须在气缸内形成良好的涡流。柴油机进气道的流动特性在进气过程中对气缸内的进气量、涡流强度及流场分布等起到决定性作用,从而直接影响混合气的均匀性和燃烧效率^[3]。

针对气道结构参数对气道性能的影响,文献[4]中通过开展气道稳流试验,对气道流通截面、直流段及螺旋段等结构参数进行了优化设计,结果表明,相比原始气道,经过优化设计后的气道流量系数提高了8%。文献[5]中针对螺旋气道结构参数进行正向优化,结果表明:气道出口处壁面对缸内涡流比存在较大的影响,当气缸中心线与气道出口中心线垂直时,缸内涡流比达到最大值。文献[6]中研究了螺旋气道关键结构参数对涡流比和流量系数的影响,结果表明,螺旋气道关键参数对涡流比和流量系数的影响权重依次为收缩段长度、凸台高度、气道螺旋坡度。文献[7]中针对螺旋进气道和切向进气道进行研究,同时定义了13个基本结构参数,并实现螺旋/切向进气道的参数化建模。文献[8]中研究螺旋气道的结构参数,并研究了其结构变化对进气性能的影响规律。文献[9]中通过气道稳流试验,对气门流通截面、直流段及螺旋室进行了优化设计,结果表明优化后的进气系统流量系数提升了8%。文献[10]中针对螺旋进气道的结构参数进行了优化研究,结果表明进气道出口壁面对缸内涡流比有显著影响。

当气缸中心线与进气道出口中心线垂直时,涡流比达到最大值。文献[11]中研究了螺旋进气道参数对流动特性的影响,结果表明增加螺旋终止角会降低缸内平均涡流比,同时提高流量系数。文献[12]中设计了可控进气涡流系统,并研究了不同涡流比对喷雾扩散和燃烧过程的影响,结果表明当涡流比为1.5~2.0时,柴油机的油气混合效果最佳。

综上所述,现有的研究大多集中于单一气道结构参数对气道性能的影响分析,忽略了各参数之间的交互作用对气道整体性能的综合影响。基于灰色关联性分析的气道结构参数对气道性能影响的研究鲜有报道。本研究旨在探究柴油机螺旋进气道的三个关键结构参数(进气道偏转角、螺旋室高度和进气道偏心距)对缸内进气量和涡流比的影响。通过灰色关联性分析与多项式逼近算法,系统分析了螺旋进气道结构参数对缸内涡流比和进气量的影响规律,并建立了涡流比、进气量与气道结构参数之间的函数关系式。研究结果揭示了气道结构参数之间的相互作用对气道性能的综合影响,为进一步优化气道设计提供了新的理论依据和方法。

1 可视化气道稳流试验台与气道测试方法

1.1 可视化气道稳流试验台

本研究自主搭建了可视化气道稳流试验台,旨在为进气道优化设计和结构优化提供试验支撑。气道可视化稳流试验台的结构如图1所示,主要由气道芯盒模型、气门升程调节装置、石英玻璃气缸套、叶片风速仪、稳压箱、空气流量计和罗茨风机等核心部件组成。在试验过程中,采用叶片风速仪测量叶轮转速,并计算缸内的涡流比,从而获得气道流动特性数据,为进气道的性能评估与优化设计提供进一步支持。

气道稳流试验台通过罗茨风机将外界空气吸入气道芯盒模型,并通过气门升程调节装置精确控制气门的开闭程度,从而调节进气流量。气流从进气道进入气缸后,沿着气缸下止点向下流动,随后流入稳压箱和空气流量计,最终通过罗茨风机排至大气中。

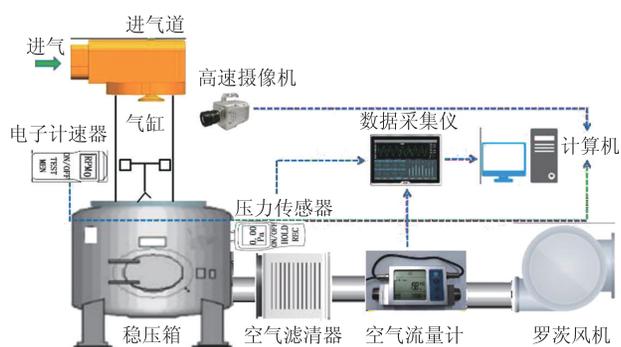


图1 气道可视化稳流试验台

Figure 1 Airway visualization steady flow test bench

在完成试验台的组装、调试及安全检查后,首先调节稳压箱内的压力,并确保其稳定,保持与大气压力的差值恒定。随后,启动试验并实时记录相关数据。试验结束后,对数据进行处理,计算流量系数和涡流比,以评估气道的流动特性。

1.2 气道测试方法

本文采用 AVL 气道测试评价法^[13]对气道模型进行测试与验证,重点分析流量系数和涡流比这两个能够宏观反映气道和缸内流场特性的关键参数。AVL 评价方法通过测量无量纲系数来评估气道的进气性能,主要包括流量系数 $\mu_{R,AVL}$ 与涡流比 $S_{R,AVL}$,其计算公式如式(1)和式(2)所示。

$$\mu_{R,AVL} = m_{\text{actual}} / m_{\text{theo}} \quad (1)$$

$$S_{R,AVL} = N_D / N \quad (2)$$

式中, m_{actual} 为实际空气进入气缸的进气质量流量测量值, kg/s; m_{theo} 为进气理论值, kg/s; N_D 为叶片风速仪转速, r/min; N 为发动机转速, r/min。

2 气道模型构建及验证

以车用 D19TCI 4 缸柴油机为研究对象,主要技术参数见表 1。利用 SolidWorks 2023 软件构建了包含稳压箱、螺旋进气道和气缸的三维实体模型,并通过 CONVERGE 3.0 软件生成了以六面体网格为主的高质量正交网格。基础网格尺寸设定为 4.0 mm,同时针对气流运动敏感区域(如气门顶部、气门锥角和气门座)进行三层局部加密,网格尺寸为 1.5 mm。湍流模型采用 RNG k -epsilon 模型^[13]。稳压箱-气道-气缸的稳态网格模型如图 2 所示,主要边界条件见表 2。

图 3 为不同气门升程下流量系数和涡流比的计算值与试验值对比。由图 3 可知:随着气门升程的增大,流量系数和涡流比均呈现出持续增加的趋势。当气门升程为 4 mm 时,流量系数计算值与试验值

表 1 D19TCI 柴油机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of D19TCI diesel engine

项目	参数
型式	立式直列水冷四冲程
缸径/mm	80
行程/mm	92
排量/L	1.85
压缩比	18.5
燃烧室型式	ω 型燃烧室
升功率/(kW·L ⁻¹)	60
标定功率/kW	110(4 000 r/min)
最大扭矩/(N·m)	350(1 600~3 000 r/min)

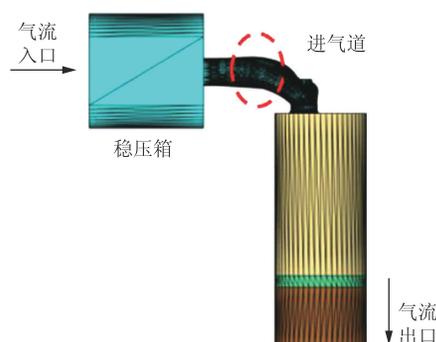


图2 稳压箱-气道-气缸稳态网格模型

Figure 2 Steady-state grid model of pressure stabilization chamber-intake port-cylinder

表 2 气道稳流边界条件

Table 2 Intake port steady flow boundary conditions

项目	参数
入口边界压力/Pa	81 600
出口边界压力/Pa	79 100
进气温度/K	293
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.058
壁面速度	绝对无滑移、无渗透

之间的最大偏差为 3.00%,而涡流比的计算值与试验值之间的最大偏差为 3.73%。随着气门升程的逐渐增加,流量系数和涡流比的计算值与试验值之间的一致性显著提高。这表明,所构建的计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模型及设定的边界条件能够准确模拟实际气道流动特性,且计算结果满足所需的精度要求。

3 结果与讨论

螺旋进气道的关键结构对缸内气体运动及分布起着决定性作用,其结构参数的微小变动将对缸内涡流比产生显著影响。气道偏转角、螺旋室高度和气道偏心距是本研究选取的关键结构参数。气道偏转角决定了气流在气道中的旋转强度,直接影响涡

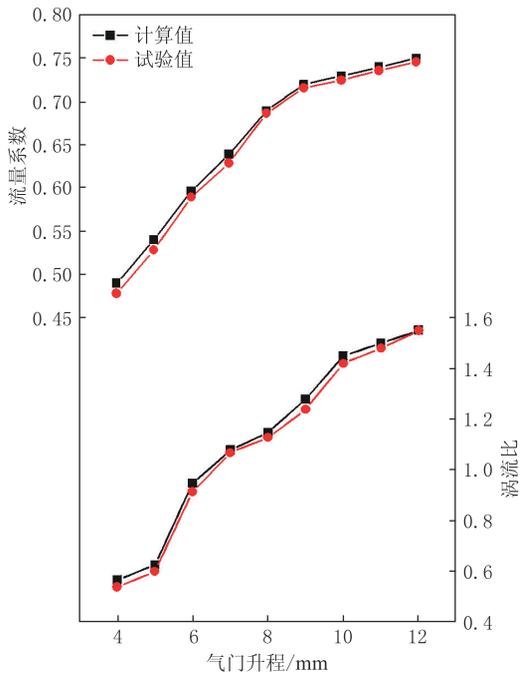


图3 气门升程对流量系数和涡流比的影响

Figure 3 Effects of valve lift on flow coefficients and swirl ratio

流的形成和流体的混合效果。较大的偏转角有助于增强气流的旋转,促进油气混合,尤其是当进气道的主气流方向在气道出口处与气缸壁相切时,气流相对气缸中心产生的动量矩较大,可以有效加强涡流强度^[14-15]。螺旋室高度则影响气道的截面积,进而影响气流的流速和压力损失,增加螺旋室高度有助于减少气流的压缩,降低压力损失,气道流通面积的变化会对涡流比产生较大影响^[16-17]。气道偏心距影响气道的形状和气流分布,改变气流的动态特性,进而影响涡流的形成位置和强度,最终对油气混合效率和燃烧性能产生重要影响^[18]。

图4为进气道关键结构参数。将气道偏转角、螺旋室高度和气道偏心距分别采用 θ 、 h 和 e 表示。进气道偏转角定义为绕气门中心轴线顺时针旋转为正,逆时针旋转为负,如图4(a)所示。在本研究中,选取了 -5° 、 -10° 、 -15° 、 -20° 、 -25° 共5种偏转角方案。螺旋室高度定义为高度增加为正值,减少为负值,如图5(b)所示,选取了增加3 mm、2 mm、1 mm,及减少3 mm、2 mm、1 mm共6种方案。进气道偏心距定义为偏离气缸中心轴线为负值,靠近气缸中心轴线为正值,如图4(c)所示,选取了靠近气缸中心轴线3 mm、2 mm、1 mm共3种方案。

3.1 进气道偏转角对进气性能的影响

图5为气道偏转角对涡流比的影响。本文中, 0° 曲轴转角表示上止点,曲轴转角负值表示上止点前,曲轴转角正值表示上止点后。由图5可知,当进

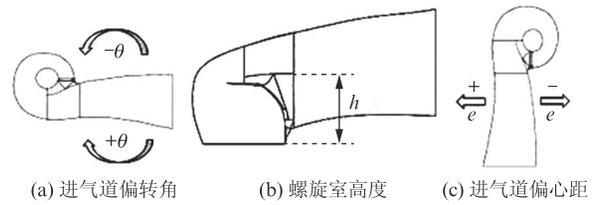


图4 进气道关键结构参数

Figure 4 Key structural parameters of the intake port

气道绕气缸轴线逆时针旋转时,缸内涡流比呈现出先增大后减小的趋势。当进气道逆时针旋转 15° 时,涡流比达到最大值1.85。较大的气道偏转角会改变气流进入气缸的方向和速度分布,从而影响涡流的生成和旋转。当螺旋进气道逆时针旋转时,更多的主气流与气缸壁面相切进入气缸,使得涡流比得到加强。然而,当偏转角达到 20° 时,涡流比出现临界值,此时气流的旋转动能无法有效地转化为涡流动能,导致涡流的形成和维持受到抑制,从而使涡流比下降。图6为气道偏转角对进气量的影响。由图6可知,随着曲轴转角的增加,进气量先增大,随后趋于平稳。在不同气道偏转角下,进气量的变化较为平缓,在 50° 曲轴转角时刻,进气量的最大值与最小值之间的差异仅为0.3%,表明偏转角对进气量的影响较小。

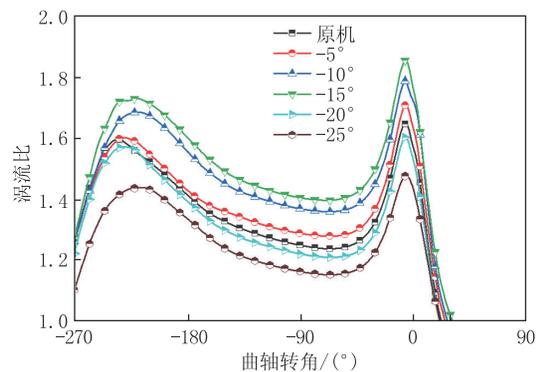


图5 气道偏转角对涡流比的影响

Figure 5 Effects of intake port deflection angles on swirl ratios

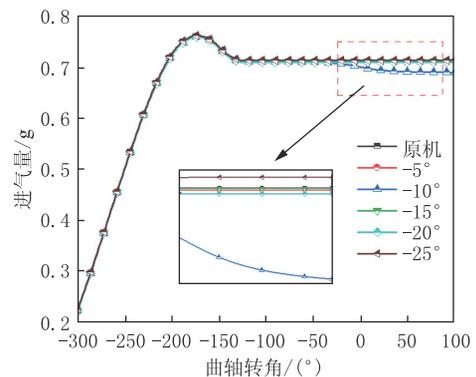


图6 气道偏转角对进气量的影响

Figure 6 Effects of intake port deflection angles on intake mass

3.2 螺旋室高度对进气性能的影响

图7展示了螺旋室高度对涡流比的影响。由图7可知,当螺旋室高度增加3 mm时,缸内涡流比达到最大值1.42。螺旋室高度的增加会改变气流在进气道中的运动路径。较高的螺旋室使得气流在进入气缸之前能够更充分地与螺旋室壁面相互作用,从而形成更加强烈的涡流。当气流进入螺旋室时,螺旋室壁面的导向作用能够将气流的动能转化为旋转动能,进而增强涡流的形成,提升缸内涡流比。图8为螺旋室高度对进气量的影响。由图8可知,螺旋室高度的变化对进气量的影响较小。

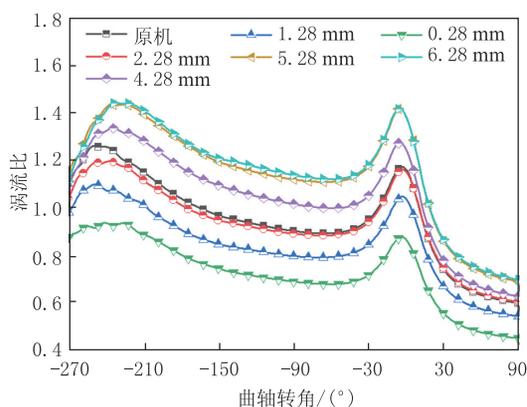


图7 螺旋室高度对涡流比的影响

Figure 7 Effects of helical chamber heights on swirl ratios

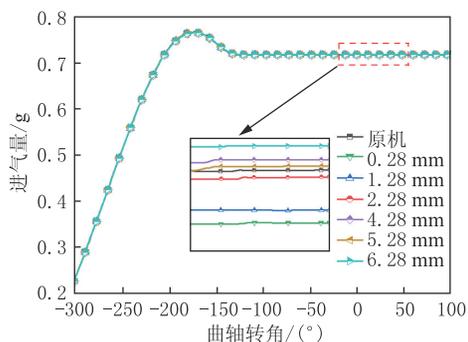


图8 螺旋室高度对进气量的影响

Figure 8 Effects of helical chamber heights on intake mass

3.3 气道偏心距对进气性能的影响

图9为气道偏心距对涡流比的影响。当气道偏心距为3 mm时,缸内涡流比达到最大值1.97。气道偏心距通过气流与气缸壁的相互作用影响涡流比。当进气道靠近气缸中心轴线时,气流与气缸壁之间的距离减小,气缸壁的导流作用增强,导致气流的旋转能力减弱,从而使涡流比减小。然而,当进气道远离气缸中心轴线时,气流与气缸壁之间的摩擦作用增大,促进了气流旋转并增强涡流比。图10为气道偏心距对进气量的影响。由图10可知,随着偏

心距的增加,进气量变化较小。在50°曲轴转角时刻,进气量的最大值与最小值相差0.23%。

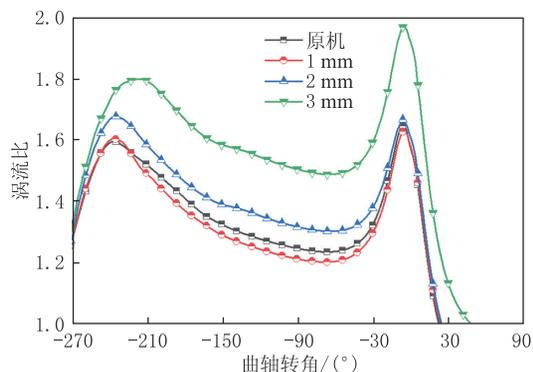


图9 气道偏心距对涡流比的影响

Figure 9 Effects of intake port eccentricities on swirl ratios

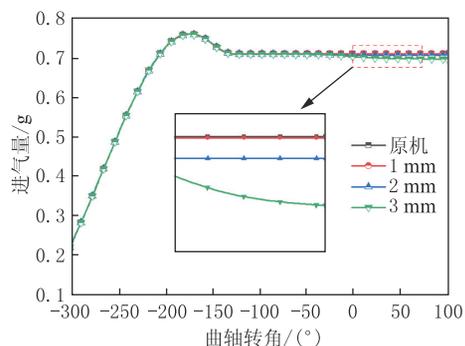


图10 气道偏心距对进气量的影响

Figure 10 Effects of intake port eccentricities on intake mass

综上所述,根据进气道结构与涡流比的关系,涡流比在进气和压缩过程中保持一致的变化趋势。通过分析进气行程和压缩行程可以发现,涡流比存在两个峰值,分别出现在-240°曲轴转角和0°曲轴转角时刻。由于空气作为可压缩的弹性体,具有一定的运动惯性,因此在气门开度达到最大值(-247°曲轴转角)时,缸内涡流比并未立即达到最大,而是在经过7°曲轴转角后,涡流比才达到进气阶段的最大值。进入压缩行程后,随着活塞上行,涡流逐渐减弱。当活塞接近上止点时,涡流被压缩并挤入燃烧室凹坑,形成更加紧凑的涡流结构,涡流的旋转半径减小,从而使涡流比增强并达到峰值。

3.4 结构参数对气道性能影响的灰色关联分析

3.4.1 灰色关联度计算

上述研究表明,所考察的结构因素对气道性能(涡流比和进气量)产生了不同程度的影响。为进一步分析各类结构因素与气道性能之间的相关性,采用了灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)方法^[19]。GRA是一种有效的统计分析方法,广泛应用于复杂系统的发展趋势分析。该方法能够对多变量

混沌系统进行定性和定量分析,特别适用于评估不同序列之间的相似性与关联性。其主要优势在于能够综合评估多个因素之间的相互影响关系,揭示各因素的相对重要性。在多个领域,尤其是在复杂的工程问题中,GRA 已得到广泛应用。气道性能受多种因素的影响,GRA 能够有效揭示各因素对气道涡流比和进气量的具体影响,从而为优化气道工作特性提供理论支持。然而,在发动机气道领域,尤其是对螺旋气道与气道性能关系的研究中,GRA 的应用仍较为少见。

GRA 方法的具体计算步骤如下。(1) 确定系统中的参考序列及比较序列。本研究所考虑的影响因素包括偏转角、螺旋室高度和偏心距,目标输出为涡流比和进气量。将这 3 个因素对两个指标的影响作为研究重点,首先定义系统中的参考序列和比较序列。将参考序列与比较序列用矩阵形式表示。参考序列 x_0 为涡流比和进气量。比较序列 x_i 为三个影响因素对涡流比和进气量的影响序列。参考序列与比较序列具体如式(3)和式(4)所示。

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_0(1) \\ x_0(2) \\ \vdots \\ x_0(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x_i = \begin{bmatrix} x_i(1) & \cdots & x_i(n) \\ \vdots & & \vdots \\ x_m(1) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, m 为研究的结构因素总数; n 为研究的工况总数; x_i 为第 i 个结构因素对参考指标的影响序列, $i \in [1, 2, \dots, m]$ 。(2) 数据序列无量纲化处理。由于不同序列的数据维度和数量级存在差异,因此需要对原始数据进行无量纲化处理。本文中采用均值法对数据序列进行无量纲化,具体如式(5)所示。

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k) - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (5)$$

式中, $x'_i(k)$ 为经过无量纲化处理后的数据; $x_i(k)$ 为第 i 个序列在第 k 项的原始数据; $\min(x_i)$ 为第 i 个比较序列的最小值; $\max(x_i)$ 为第 i 个比较序列的最大值。(3) 计算灰色关联系数。根据标准化后的数据,计算每个序列与参考序列之间的灰色关联系数,计算公式如式(6)和式(7)所示。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |\Delta_i(k)| + \rho \max_i \max_k |\Delta_i(k)|}{|\Delta_i(k)| + \rho \max_i \max_k |\Delta_i(k)|} \quad (6)$$

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (7)$$

式中, $\Delta_i(k)$ 为参考序列与对比序列在第 k 项的绝对差值; $\xi_i(k)$ 为灰色关联系数; $x_0(k)$ 为参考序列的值; ρ 为分辨系数; \min 和 \max 分别为所有序列中的最小值与最大值; $k=1, 2, 3, \dots, n$ 。(4) 计算灰色关联度。通过计算每个因素的灰色关联度 R_i ,可以量化每个因素对涡流比和进气量的影响强度。灰色关联度越大,表示该因素对气道性能的影响越显著,其计算公式如式(8)所示。

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (8)$$

式中, R_i 为第 i 个比较序列与参考序列的灰色关联度; n 为灰色关联系数的数量。 $R_i \in [0, 1]$,数值越大表示序列之间的关联性越强。

3.4.2 参数正交试验设计

正交试验设计(orthogonal experimental design, OED)是一种处理多因素、多水平试验的有效方法,已在多个领域取得成功应用,可显著提高获取最优参数组合的试验效率^[20]。基于 OED 方法^[21],选取 3 个螺旋气道结构参数(θ 、 h 和 e)作为研究对象,作为 3 个影响因素。针对每个影响因素设置 3 个水平,以涡流比和进气量作为评价指标,采用 $L_9(3^3)$ 正交表进行试验设计。表 3 为 $L_9(3^3)$ 正交表。在该试验中,螺旋气道结构参数被定义为因子,不同参数的取值则作为水平进行设置。

表 3 $L_9(3^3)$ 正交表

Table 3 $L_9(3^3)$ orthogonal table

试验号	结构参数			评价指标	
	$\theta/(^\circ)$	h/mm	e/mm	涡流比	进气量/g
1#	-15	6.28	3	2.035	0.698
2#	-15	5.28	2	1.959	0.711
3#	-15	4.28	0	1.494	0.710
4#	-10	6.28	0	1.830	0.683
5#	-10	5.28	3	1.966	0.710
6#	-10	4.28	2	1.816	0.709
7#	-5	6.28	2	2.073	0.710
8#	-5	5.28	0	1.619	0.711
9#	-5	4.28	3	1.637	0.710

3.4.3 参数灰色关联分析

以偏转角、螺旋室高度和偏心距作为比较序列,以涡流比和进气量作为参考序列,开展气道结构参数对气道性能的灰色关联性分析。图 11 为气道结构参数对气道性能的灰色关联度。由图 11 可知,螺旋室高度对涡流比的影响最为显著,其灰色关联度达到 0.852,表明螺旋室高度是影响涡流比的关键

结构参数;其次为偏心距,其对涡流比的影响较为显著。相比之下,偏转角对涡流比的影响程度最小,其灰色关联度仅为 0.520,表明该参数的优化对涡流比的改善效果有限。

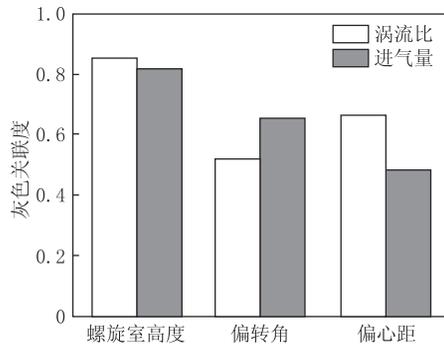


图 11 气道结构参数对气道性能的灰色关联度

Figure 11 Grey relational analysis of intake port structural parameters on intake performance

螺旋室高度对进气量的影响极为显著,其灰色关联度为 0.815,表明该参数在调控气道流通能力方面具有关键作用。偏转角对进气量的影响也较为显著。相比之下,偏心距在这 3 个因素中对进气量的影响最小,灰色关联度为 0.486,表明该参数对进气量的调控作用相对较弱。

综上确定各特征指标的显著性排序,影响权重由大到小依次为螺旋室高度、气道偏心距、气道偏转角。

在螺旋气道的结构设计过程中,各结构参数对缸内气流组织和进气性能的影响具有显著差异。螺旋室高度直接决定了气道对进气涡流运动的组织能力,对气流的涡流强度与湍动能具有重要影响,进而显著作用于混合气形成质量和燃烧过程的强化程度。因此,在气道结构设计优化中,螺旋室高度应作为优先考虑的关键参数。此外,偏转角和偏心距结构参数对进气流动的导向特性和稳定性也具有重要影响。需要通过系统性的参数耦合优化实现涡流强度与进气效率之间的协调匹配。同时,在提高涡流比的过程中,必须有效控制进气量波动,避免因单一参数优化而导致进气效率下降,确保气道整体性能的稳态提升及实际应用中的可靠性和可行性。

3.5 气道结构参数交互影响

由 GRA 分析结果可知,气道结构参数对涡流比和进气量的影响权重由高到低依次为 h 、 e 、 θ 。其中, h 和 e 对涡流比的影响效果显著, h 和 θ 对进气量影响效果显著。因此,重点研究 h 和 e 之间的交互作用对涡流比的影响,及 h 和 θ 之间的交互作用对进气量的影响。

图 12 为螺旋室高度和偏心距对涡流比的交互影响。由图 12 可知,当 $5.0 \text{ mm} \leq h \leq 6.3 \text{ mm}$ 且 $0.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$ 时,涡流比处于较高水平。当 $h=5.04 \text{ mm}$ 且 $e=2.82 \text{ mm}$ 时,涡流比达到最大值,为 2.102。

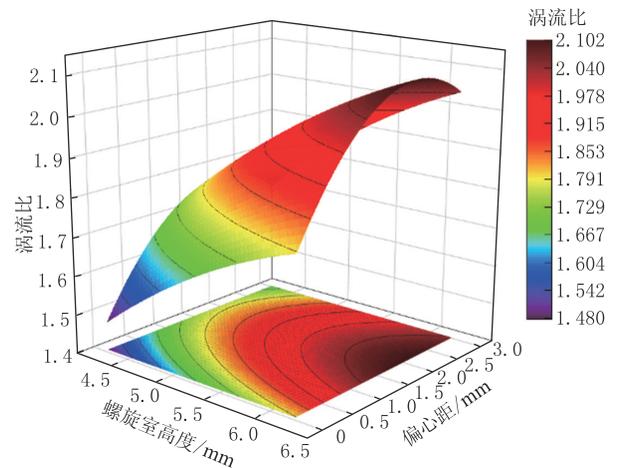


图 12 螺旋室高度和偏心距对涡流比的交互影响

Figure 12 Interactive effects of helical chamber heights and eccentricities on swirl ratios

图 13 为螺旋室高度和偏转角对进气量的交互影响。由图 13 可知,当 $4.5 \text{ mm} \leq h \leq 5.5 \text{ mm}$ 且 $-10^\circ \leq \theta \leq -5^\circ$ 时,进气量处于较高水平。当 $h=5.04 \text{ mm}$ 且 $\theta=-5.2^\circ$ 时,进气量达到峰值 0.715 g。

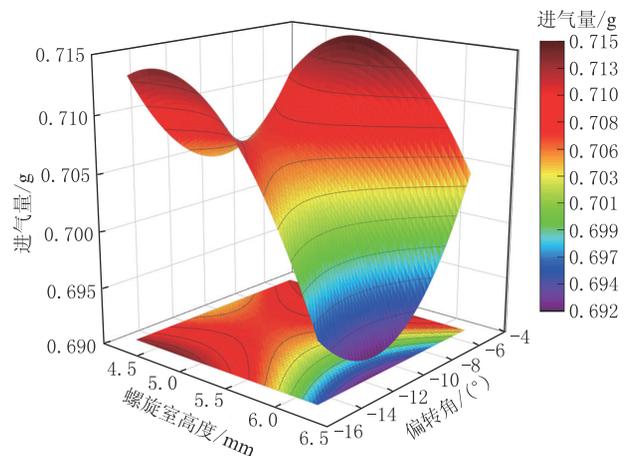


图 13 螺旋室高度和偏转角对进气量的交互影响

Figure 13 Interactive effects of helical chamber heights and deflection angles on intake mass

因变量与自变量之间的关系本质上是一个复杂的隐函数,难以直接获得其精确解析式。为了求解该隐函数,采用多项式逼近算法 (polynomial approximation algorithm, PAA)^[22-23]。该算法的核心思想是通过多项式基函数的线性组合,构建一个多项式函数来近似自变量与因变量之间的隐函数关系。通过选择

适当的多项式阶数和基函数,可以有效拟合因变量对自变量的响应特性,具体数学表达式如式(9)所示。

$$U(p) \approx \tilde{U}(p) = \sum_{j=1}^{N_b} c_j \varphi_j(p) \quad (9)$$

式中, U 为随 p 变化的因变量; $\tilde{U}(p)$ 为 $U(p)$ 进行的多项式逼近表达; $\varphi_j(p)$ 为第 j 个基函数; c_j 为第 j 个基函数的权重系数; N_b 为所选基函数的数量。

在模型预测精度的评估中,常使用均方根误差(root mean square error, RMSE)和拟合优度(R^2)这两个指标。RMSE用于量化模型预测值与实际观测值之间的平均偏差,其值越小,表明模型的预测误差越小,预测精度越高。 R^2 则用于衡量模型对数据的拟合程度,是一种常用的统计指标。 $R^2 \in [0, 1]$, R^2 取值越接近1,表示模型对数据的拟合程度越好。均方根误差 R_{RMSE} 和拟合程度 R^2 的计算公式如式(10)和式(11)所示。

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^L (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

式中, y_i 为实际观测值; \hat{y}_i 为模型的预测结果; L 为样本数量; \bar{y} 为实际观测值的均值。

将涡流比和进气量分别定义为因变量 y_1 和 y_2 ,将螺旋室高度、偏心距和偏转角定义为自变量。基于PAA,构建涡流比和进气量的函数关系模型,具体函数表达式分别见式(12)和式(13)。

$$y_1 = -0.092 + 0.512h + 0.266e - 0.034h^2 + 0.006he - 0.074e^2 \quad (12)$$

$$y_2 = 0.538 + 0.077h + 0.003\theta - 0.007h^2 + 0.001h\theta \quad (13)$$

图14为PAA对涡流比和进气量的预测值与试验值对比。由图14可知,拟合曲面与试验数据高度吻合,涡流比和进气量的RMSE分别为0.04和0.05, R^2 值分别为0.95和0.93。这表明,PAA在预测精度和泛化能力方面具有优异的表现。在工程实践中,该算法能够有效捕捉气道结构参数对涡流比和进气量的影响规律。通过对试验数据的拟合分析,建立了一个精确且高效的数学模型,该模型不仅提高了对结构参数与气道性能之间相互关系的理解,还为工程应用提供了可靠的理论依据,有助于气

道优化设计。

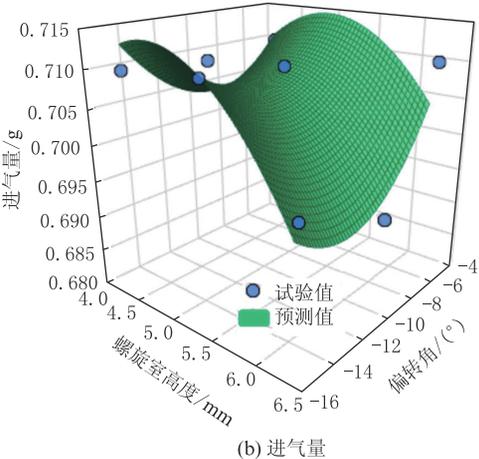
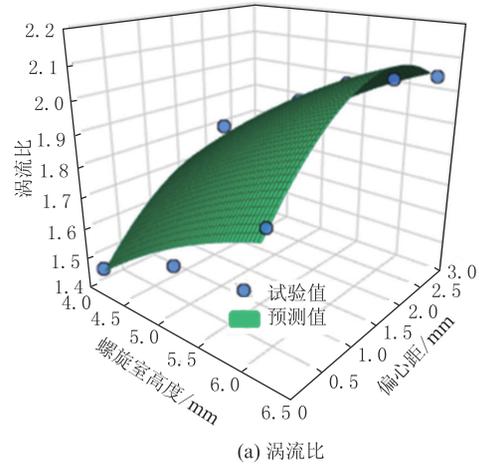


图14 涡流比与进气量预测值与试验值对比

Figure 14 Comparison of predicted and experimental values of swirl ratios and intake mass

4 结论

(1) 以气道偏转角、螺旋室高度及气道偏心距作为关键结构参数,系统分析其对气道性能的影响。结果表明:当 θ 逆时针旋转 15° 时,涡流比达到最大值1.85;当 h 增加3 mm时,缸内涡流比达到最大值1.42;当 e 为3 mm时,缸内涡流比达到最大值1.97。

(2) 通过GRA,气道结构参数对涡流比的影响权重由高到底依次为 h, e, θ ,气道结构参数对进气量的影响权重由高到底依次为 h, θ, e 。其中, h 和 e 对涡流比的影响显著, h 和 θ 对进气量的影响显著。

(3) 当 $5.0 \text{ mm} \leq h \leq 6.3 \text{ mm}$ 且 $0.5 \text{ mm} \leq e \leq 3.0 \text{ mm}$ 时,涡流比处于较高水平。当 $h=5.04 \text{ mm}$, $e=2.82 \text{ mm}$ 时,涡流比达到最大值,为2.102。当 $4.5 \text{ mm} \leq h \leq 5.5 \text{ mm}$ 和 $-10^\circ \leq \theta \leq -5^\circ$ 时,进气量处于较高水平。当 $h=5.04 \text{ mm}$, $\theta=-5.2^\circ$ 时,进气量达到最大值,为0.715 g。

(4) 基于 PAA,建立了涡流比模型和进气量模型。涡流比和进气量的 RMSE 分别为 0.04 和 0.05, R^2 值分别为 0.95 和 0.93。这表明, PAA 在预测精度和泛化能力方面表现优异,能够有效描述气道结构参数对涡流比和进气量的影响规律。

参考文献:

- [1] BAO G Y, HE C, ZI T X, et al. Analysis of gas flow and PM movement characteristics inside diesel particulate filter channel [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 186: 1134 - 1148.
- [2] WANG G X, YU W B, LI X B, et al. Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine [J/OL]. *Fuel*, 2020, 262: 116548 (2019-11-06) [2024-04-14]. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116548.
- [3] WANG D G, BAO G Y, HE C, et al. Investigation of the impact of combustion chamber geometry on engine combustion and emission performance under various fuel injection timings with biodiesel blending [J]. *Energy Science & Engineering*, 2025, 13(1):268 - 289.
- [4] 徐玉梁,杨跃滨,祖炳锋,等. 车用柴油机进气道的优化计算与试验研究[J]. *内燃机工程*, 2013, 34(S1):65 - 71.
XU Y L, YAGN Y B, ZU B F, et al. Optimizing calculation and experimental research of intake port of automobile diesel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2013, 34(S1):65 - 71.
- [5] 韩义勇,鲁祯,王天友,等. 柴油机切向气道参数化设计与研究 [J]. *内燃机工程*, 2012, 33(6):77 - 82.
HAN Y Y, LU Z, WANG T Y, et al. Parametrized design and research of diesel engine direct port [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 33(6):77 - 82.
- [6] 高玉川. 四气门柴油机进气道参数优化研究[D]. 天津:天津大学, 2021.
GAO Y C. Study on the parameter optimization of intake ports of four-valve diesel engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [7] 王勇,韩志玉,邓鹏,等. 柴油机螺旋进气道设计参数优化的数值模拟研究[J]. *内燃机工程*, 2012, 33(5):79 - 86.
WANG Y, HAN Z Y, DENG P, et al. Helical intake port numerical simulation of design parameter optimization of diesel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 33(5):79 - 86.
- [8] 雷基林,申立中,毕玉华,等. 柴油机螺旋气道结构参数对其流动特性的影响[J]. *内燃机工程*, 2012, 33(5):87 - 92.
LEI J L, SHEN L Z, BI Y H, et al. Influence of structural parameters of diesel engine helical intake port on its flow characteristics [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 33(5):87 - 92.
- [9] ZHANG W, JIAN W D, CHEN Z H, et al. Influence of intake valve structure combined with valve lift dissimilitude on intake performance of diesel engine [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2023, 16(6):1243 - 1255.
- [10] CHOE T H, KANG S G, RI M C, et al. Effect of the helical-spiral shroud intake valve on flow in cylinder of internal combustion engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2023, 24(5): 2251 - 2259.
- [11] MALAIPERUMAL V, SARAVANAN C G, RAMAN V, et al. Effect of intake port design modifications on diesel engine characteristics fuelled by pine oil-diesel blends [J/OL]. *Sources Energy, Part A: Recovery, Utilization, and Effects Environmental*, 2022 (2022-02-19) [2024-04-14]. DOI: 10.1080/15567036.2022.2038312.
- [12] WANG G X, YU W B, LI X B, et al. Experimental and numerical study on the influence of intake swirl on fuel spray and in-cylinder combustion characteristics on large bore diesel engine [J]. *Fuel*, 2019, 237:209 - 221.
- [13] 张韦,包广元,彭益源,等. 单气道柴油机气缸内近壁面流场与不同截面涡流比分析[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(5):40 - 47.
ZHANG W, BAO G Y, PENG Y Y, et al. Visual measurement of near-wall flow field and swirl ratio of different cross sections in the cylinder of single port diesel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2020, 41(5): 40 - 47.
- [14] GUO Y Z, KUI H L, SHAO C S, et al. Flow characteristics of a dual-intake port diesel engine with guide vanes[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2022, 15(3):709 - 722.
- [15] LU Z, WANG T, LI X, et al. Parametric design of the tangential intake port in diesel engines[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2013, 227(3):409 - 421.
- [16] HE C M, XU S C, ZUO C F, et al. Multivalve intake port parametric design and performance optimization of the horizontal diesel engine[J]. *Mechanics*, 2011, 17(6):643 - 648.
- [17] JIANG S S, ZHU S W, WEN H, et al. Parameter analysis of diesel helical intake port numerical design[J]. *Energy Procedia*, 2012, 16:558 - 563.
- [18] CHOE T H, KANG S G, RI M C, et al. Effect of the helical-spiral shroud intake valve on flow in cylinder of internal combustion engine[J]. *International Journal of Engine Research*, 2023, 24(5): 2251 - 2259.
- [19] BAO G Y, HE C, WANG D G, et al. Effects of carrier structure parameters on diesel particulate filter capture performance based on grey relational analysis [J]. *Particulate Science and Technology*, 2025, 43(1):104 - 119.
- [20] 孙秀秀,胡茂爽,景国玺,等. 柴油机复式油气分离器设计与试验验证[J]. *车用发动机*, 2024(5):55 - 60,70.
SUN X X, HU M S, JING G X, et al. Design and experimental verification for compound oil-gas separator of diesel engine [J]. *Vehicle Engine*, 2024(5):55 - 60, 70.
- [21] WANG P, BI Y H, SHEN L Z, et al. Soot particle distributions inside a diesel particulate filter during soot loading in plateau environment[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(7):2201 - 2212.
- [22] SHEN D F, WU H, LIANG H, et al. Accurate polynomial approximation of bifurcation hypersurfaces in parameter space for small signal stability region considering wind generation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6):4512 - 4524.
- [23] 李旭军,石娜,龙科莅,等. 基于多项式逼近算法的精确浮点除法器的设计[J]. *微电子学与计算机*, 2023, 40(5):90 - 96.
LIU X J, SHI N, LONG K L, et al. Design of an exact floating-point divider based on polynomial approximation algorithm [J]. *Microelectronics & Computer*, 2023, 40(5):90 - 96.