

线、节能设备等信息的高度统一和参数化管理。BIM 平台的冲突检测、碰撞分析和参数关联工具，能够自动识别机电管线与结构的空间冲突、功能区布局与设备布置的矛盾、节能系统与建筑结构的耦合问题等。

### 4.3 协同设计流程的智能化与自动化发展

随着人工智能、自动化与数据挖掘等新技术的应用，既有建筑改造的协同设计流程逐步向智能化和自动化方向演进。点云驱动的自动建模技术实现了从实地扫描到数字模型的高效转换，大大缩短了建模周期。AI 算法应用于缺陷检测、空间优化与参数推演，能够自动识别结构隐患、设备干扰、空间不足等问题，为设计优化提供智能建议。BIM 平台通过开放 API 和插件体系，集成各类智能分析工具，实现参数自适应调整、设计优化方案自动生成以及施工工艺智能匹配。未来，点云采集、BIM 建模、冲突检测、设计优化到施工出图、工艺指导等环节有望实现全流程自动化与智能决策。

## 5 既有建筑改造协同设计的应用实践与成效分析

### 5.1 典型项目的应用案例与技术成效

在当前既有建筑改造领域，BIM 与点云协同设计模式已成为提升项目精度与效率的重要技术支撑。例如，某大型公共建筑改造项目，采用高密度点云扫描实现建筑现状的全方位数字化采集，准确还原了老旧建筑的空间结构与构件细节。在点云数据基础上，各专业团队基于统一 BIM 平台协同建模，快速开展结构复核、功能分区、机电排布等设计工作。通过 BIM- 点云一体化模型，设计团队能够在三维视图下进行空间碰撞检查、数据共享与意见交互，极大提高了问题发现与解决效率。平台支持下，设计周期较传统模式缩短 30% 以上，方案变更、冲突调整更加便捷。最终形成的点云 -BIM 综合模型贯穿方案设计、施工图深化、工程量统计及运维规划等全流程，为项目的精细化管控和全生命周期管理提供了坚实基础，显著提升了建筑改造的科学性、可控性与经济性。

### 5.2 复杂空间与特殊构件改造的创新实践

对于形态复杂、结构特殊的既有建筑改造，如异形空间、历史文物建筑和地下工程等场景，BIM 与点云的协同应用价值尤为突出。点云扫描能够高精度捕捉曲面、斜面及

复杂装饰构件的几何特征，真实反映建筑的历史细节与现状状态。BIM 建模则在此基础上实现参数化表达，便于多专业协同分析和性能模拟。以某文物保护修缮工程为例，项目团队利用点云数据高保真重建历史空间形态，结合 BIM 对结构安全性、材料选型及工艺流程进行模拟与优化。

### 5.3 改造项目管理与运维一体化探索

BIM 与点云协同不仅局限于前期测绘和设计环节，还贯穿改造项目的全过程管理与后期运维。借助 BIM 平台，项目各参与方能够在统一数字环境中协同管理进度、质量、安全和成本，实现多目标、全周期精细化管控。点云扫描可定期应用于改造区域变形监测、施工偏差检测，为工程管理提供动态数据支持。BIM 模型则实时更新反映施工进展，集成设备信息、管线布局、维修记录等运维数据，为管理者实时掌握工程状态和优化决策提供直观依据。

## 6 结语

基于 BIM 与点云扫描技术的既有建筑改造协同设计方法，是实现建筑数字化、智能化升级的重要途径。两者协同应用不仅解决了传统改造中信息采集难、建模慢、协作低效等瓶颈，还促进了多专业深度融合与数据全生命周期管理。未来，随着人工智能、物联网等新兴技术的不断嵌入，BIM 与点云协同设计将进一步向智能化、自动化、平台化发展，成为推动城市更新与既有建筑高质量改造的核心动力。为实现建筑行业的绿色转型和可持续发展，应持续完善标准体系、提升软硬件能力、强化人才培养，不断拓展协同设计的应用深度与广度。

## 参考文献

- [1] 王浩.基于三维扫描技术的建筑物点云数据处理方法研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(06):188-191.
- [2] 王智,薛慧艳,薛晓.SLAM 扫描点云用于异形建筑房产面积计算的方法[J].测绘通报,2025,(01):180-184.
- [3] 周波阳,莫少杰,郑育文.基于三维激光扫描点云数据的建筑物外立面 BIM 建模[J].广东建材,2024,40(11):160-164.
- [4] 龚巧艳.基于三维激光扫描与倾斜摄影测量点云数据的古桥 BIM 模型构建及应用研究[J].广东土木与建筑,2025,32(04):18-21.
- [5] 宋洪英,曹坤.结合三维激光扫描点云生成 BIM 模型技术在建筑中的应用[J].粉煤灰综合利用,2021,35(02):136-140.

# Exhaust System Design of the KTM 690 Engine

Xuhui Yang Jingzhi Zhu Hongzhuo Peng Junlin Wu Anqi Li

School of Automotive and Transportation Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510800, China

## Abstract

This paper takes the exhaust system of the KTM 690 single-cylinder engine as the research object, and explores its structural design and performance optimization under the premise that the 2025 Formula Student China Competition (FSCC) rules impose restrictions on noise and air inlet size. The acoustic characteristics and fluid mechanics performance of the KTM 690 exhaust design were analyzed using ANSYS. In addition, GT-SUITE was employed to analyze the exhaust system's impact on engine power, torque, noise, and temperature. Combined with practical noise testing using a C-weighted sound level meter, the final conclusion shows that this design significantly improves the control of engine power, torque, and noise, further enhancing the engine's fuel economy and efficiency. Moreover, the application of this design can promote the development of the competition, control the impact of noise on residents while ensuring vehicle performance, and play a positive role in cultivating more innovative talents. The research of this article is as follows:

## Keywords

FSCC; KTM690; Exhaust system; noise

# KTM690发动机的排气设计

杨旭辉 朱静芝\* 彭弘焯 吴峻霖 黎安淇

广州城市理工学院汽车与交通工程学院, 中国·广东广州 510800

## 摘要

本文以KTM690单缸发动机排气系统作为研究对象, 在2025年中国大学生方程式大赛规则对噪音和进气口大小有限制的前提下, 探究其结构设计和性能优化。通过ANSYS分析KTM690排气设计的声学特性, 流体力学表现。以及GT-SUITE分析其对发动机功率, 扭矩, 噪音和温度的影响。结合实际使用C加权分贝仪对噪音测试。最终得出结论该设计对发动机的功率, 扭矩和噪音的控制有明显的提升, 使得发动机的燃油经济型和效率进一步提升。此外本项设计的应用可以推动该赛事的发展及其保证车辆性能的前提下控制噪音对居民的影响, 以培养更多创新型人才做出积极作用。

## 关键词

FSCC; KTM690; 排气系统; 噪音

## 1 引言

中国大学生方程式汽车大赛 (FSCC) 培养大学生自主创新, 实事求是设计制造力的实验平台。规则限制发动机排量 710cc 下, 大学生车队可选发动机为 KTM690, CBR600, Spring breeze700, Spring breeze650,

HuangLong600, Victory 675, 本文所选对象为 KTM690 发动机。原厂排气系统根据原厂车架设计, 大学生车队车架与其匹配度低, 选用同排量其他车型消音器与该机器匹配度低, 以至排气阻力大, 废气流速迟缓, 通过自主研发排气系统, 针对 KTM690 排气脉冲规律, 实现轻量化, 及提高发动机经济性。

## 2 排气系统

### 2.1 设计目的

24 年采用回旋盒式中鼓及 VTF800 消音器组合, 结构复杂导致头端积温严重, 虽噪音控制方面表现优异但扫气效率低, 导致发动机怠速达 2200 转, 高转区间动力输出迟滞, 影响整体加速性能, 并且该款消音器体积大, 影响整车布局及重量分布。因此本文设计主要针对该问题做出改变如下, 改变中鼓结构, 避免回旋弯带来的积温、排阻, 选用 U 型结构消音器设计。

【项目名称】基于 FSCCKTM690 的排气设计 (项目编号: 51108009)。

【作者简介】杨旭辉 (2004-), 男, 中国湖南永州人, 在读本科, 从事车辆工程研究。

【通讯作者】朱静芝 (1993-), 女, 中国陕西渭南人, 硕士, 助理讲师, 从事汽车结构设计、轻量化设计及创新设计等相关的教学和研究。

## 2.2 排气头段

头段直接连接发动机排风口，管径大小，长短和弯头决定排气阻力大小，直接影响排气脉冲利用率、废气速度、低转扭矩和高转功率。24 年采用与原厂头段相同管径，由于进气具有限流阀导致进气受限，所以需要更改头段管径以提升排气流速。通过 GT-SUITE 仿真进行不同管径排气模型分析。

## 2.3 头段仿真分析

方案一分别选用使管径为 45mm、48mm、50mm。对比发现三个管径仿真数据 48mm 和 50mm 管径均可以对发动机高转扭矩有提升同时存在发动机低扭损失，方案二采取 45mm-48mm、45mm-50mm 和 48mm-50mm 变径管的方式来解决低扭损失问题。变径管设计可在低转速时利用较小管径提高排气流速，增强脉冲能量利用率，改善低扭输出；高转速时大管径段降低排气背压，提升容积效率。仿真结果显示，45mm-48mm 变径管方案在 2000rpm 以下扭矩优于等径 45mm 头段，4000rpm 以上功率接近 50mm 等径管水平，综合性能最优，确定为最终头段结构方案。

## 2.4 中鼓优化

中鼓设计原为回旋盒式结构，气流从发动机排风口流出需经过 360° 转弯再流向消音器。对于比赛调教发动机排气应以减少排气阻力为主，为废气可以顺畅排出。KTM690 单缸机中鼓与歧管保持同一条线上为最优设计，因此将原回旋盒式结构改为直线型中鼓，有效避免头段积温并降低排气背压，提升扫气效率。该结构可缩短排气路径，减少气流滞留与能量损耗，有效改善发动机高转动力输出迟滞问题。同时中鼓容可作为变径管过度腔，减少气流突变带来的扰流。由于该 FSCC 赛事赛道转弯中低转是我们的常用区间。我们参考美国 Nelson 消声器公司推荐公式  $V = \frac{Q \times n \times Vst}{1000 \times (\tau \times i)^{0.5}}$ 。式中，V 代表消声容积；n 为发动机转数 (r/min)；i 是缸数； $\tau$  是冲程数；Vst 是发动机排量 (L)；Q 是与消声效果有关的修正系数，取值范围通常在 2 - 6 之间”算出来的容积约为 0.55L。中鼓内部设计为半径 45mm 长度 135mm 不锈钢管多孔管，孔径为 4mm，开孔率为 75%。使用 GT-SUITE 进行 0.55L 的模型离散化，仿真结果显示该区间低扭并不理想。通过多次更改发现中鼓的容积最总决定为 0.4L，并且中鼓中心和发动机排风口中心直线距离 115mm 可以达到预估的扭矩曲线。分别如图 1 图 2

## 2.5 消音器

发动机在运行过程中排出的废气伴随高温高压气流，会产生噪音。消音器通过内部结构使以及吸音材料使气体在腔内反射、摩擦和干涉以达到减少噪音的目的。消音器结构选型分为阻抗消音器、抗性消音器、阻抗复合式消音器、微穿孔板消音器、小孔消音器和有源消音器。基于 FSCC 规则规定“在包含发动机、传动系统、排气系统和燃油系统的舱室内，禁止使用吸附性材料 / 纤维质 材料和开放式收集装

置（不论材料如何）”限制。选择抗性消音器，通过内部结构使噪音达到规定分贝。消音器内部气流路径设计为“U型”和“Z型”双结合回绕通道。如图 3 所示

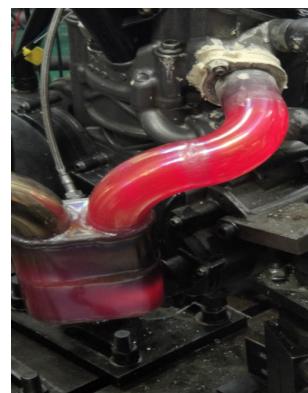


图 1 回旋盒式中鼓结构示意图



图 2 直线型中鼓

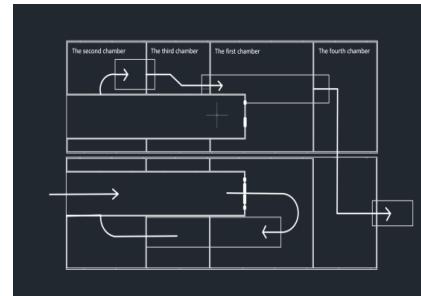


图 3 排气气流走向图

消音器外壳材料选择分别为钛合金和不锈钢，材料密度钛合金为  $4.51 \text{ g/cm}^3$  不锈钢为  $7.93 \text{ g/cm}^3$ ，钛合金做外壳可以使用壁厚 0.8-1.0mm，304 不锈钢则需要 1.2mm-1.5mm，两种材料在消音方面存在差别。选用钛合金做外壳会因壁薄导致高频噪音外泄；选用 304 不锈钢外壳厚、结构刚性强，对低频噪音有抑制作用且对发动机与车架的振动也有抑制作用。

依托 GT-power 这款软件进行 KTM690 发动机的整机建模仿真和对排气进行一维建模仿真，通过 DOE 的方式和结合实车的可用空间在初期对排气歧管的长度，直径和消音器