

汽车发动机进气歧管结构优化设计

高俊杰

江铃汽车股份有限公司 江西 南昌 330200

摘要:为解决原车进气歧管压损偏大、各缸进气均匀性差、变工况适配性不足等问题,本文依托计算流体力学理论,建立原始歧管三维仿真模型,通过多工况流场仿真明确涡流、压力损耗等核心结构缺陷。采用正交试验法,以主管长度、分支管径等四项参数为变量开展多目标优化,重构最优结构模型。仿真结果表明,优化后歧管压损大幅下降,进气均匀性与充气效率显著提升,结构可靠性达标,有效改善发动机进气性能与工况适配能力。

关键词:汽车发动机;进气歧管结构;优化设计

引言:进气歧管是发动机进气系统的核心部件,其流通特性直接决定进气效率、油气混合质量与整机动力、经济性能。当前传统进气歧管普遍存在弯道结构突兀、分流配比不合理等问题,易引发气流涡流、压力损耗及各缸进气不均等缺陷,导致发动机运转抖动、燃烧不充分。为改善上述问题,本文结合流体仿真技术与正交优化方法,针对性开展结构参数优化,旨在消除进气流动缺陷,提升全工况进气稳定性,为同类进气歧管改良提供参考。

1 进气歧管基础理论与原始模型建立

1.1 进气歧管工作原理与性能评价指标

(1) 发动机进气系统负责为气缸输送新鲜空气,进气歧管作为核心部件,主要承担气流输送、稳压与分流工作。其可平稳导入空气,削弱进气脉冲波动,均匀分配气流至各气缸,保障发动机进气过程稳定。(2) 进气歧管核心性能评价指标包含四项:进气压力损失反映气流通损耗大小;各缸进气均匀性衡量多缸发动机进气分配一致性;气流湍流强度影响缸内油气混合效率;充气效率直接决定发动机进气充量与动力输出性能。(3) 歧管结构参数直接影响进气性能,管径决定气流流速与阻力,管长影响进气惯性增压效果,弯道曲率与分支角度会改变气流流向、产生局部涡流与压力损耗,是优化进气特性的关键参数^[1]。

1.2 流体仿真基础理论

(1) 计算流体力学仿真依托三大核心控制方程:连续性方程保障气流质量守恒,动量方程描述气流受力与运动状态变化,能量方程调控气流换热与能量传递,为仿真计算提供理论支撑。(2) 结合进气歧管低速、变工况的复杂气流特性,需选用适配的湍流模型,精准捕捉流道内涡流、低速扰动等流动状态,规避常规模型的计算偏差,贴合实际进气流动规律。(3) 仿真边界条件需匹配发动机实际运行工况,精准设定进气压力、流速与

出口工况,同时选用高效求解算法,兼顾迭代稳定性与计算准确性,保障仿真结果可靠。

1.3 原始进气歧管三维模型建立

(1) 依据目标发动机排量、额定转速、怠速工况等核心参数,确定歧管基准管径、管长、分流间距等设计参数,为模型建立提供数据依据。(2) 利用CAD软件开展实体建模,简化螺栓孔、安装凸台等非关键结构,完整保留进气主流道、弯道、分流口等核心结构,还原真实进气流通区域。(3) 完成模型几何检查与修复,修正尖角、缝隙、重叠等建模缺陷,消除仿真计算误差源头,确保模型满足流体仿真的精度要求。

1.4 仿真模型网格划分与无关性验证

(1) 采用结构化与非结构化网格结合的方式划分模型网格,对进气弯道、分流区域等气流变化剧烈的关键区域进行网格加密,提升局部仿真精度。(2) 开展网格质量检测,排查并删除畸变、负体积网格,优化网格贴合度,确保网格质量符合流体仿真计算标准。(3) 通过多组不同密度网格开展无关性验证,对比仿真结果差异,筛选出最优网格数量,在保证计算精度的同时,有效提升仿真计算效率。

2 汽车发动机原始进气歧管流场仿真与性能缺陷分析

2.1 仿真参数与边界条件设置

(1) 为全面还原发动机实际工作状态,本次仿真选取低速、中速、高速三类典型运行工况开展数值计算。低速工况对应发动机怠速及低负荷行驶状态,中速工况匹配车辆日常匀速行驶的常用工况,高速工况模拟发动机高负荷、高转速极限工作状态,完整覆盖车辆常规行驶场景,确保仿真结果具备全面性与实用性,可真实反映不同工况下进气歧管的流动特性。(2) 结合发动机实际运行参数完成仿真边界参数精准标定,以标准大气环境为基础设定进气介质为常温空气,匹配空气密度、黏

度等基础介质属性。同时依据不同转速工况,分别标定进气口总压、出气口静压与进气气流温度,贴合发动机真实进气环境,规避参数设置偏差导致的仿真失真问题,为流场计算提供精准的数据基础^[2]。(3)合理设置仿真迭代参数与收敛标准,设定固定迭代步数开展循环计算,同时建立多重收敛判定条件。以进出口流量差值、监测点压力波动值作为核心收敛指标,当参数波动稳定在极小误差范围内、残差曲线平稳无明显波动时,判定仿真计算收敛,既保障计算结果的稳定性,又避免过度迭代造成的资源浪费。

2.2 原始进气歧管流场仿真结果分析

(1)通过多工况仿真结果对比分析,明确进气歧管内部气流速度分布规律。低速工况下,整体气流流速偏低,流道内气流流动平缓,无明显高速气流区域;中速工况下,主流道气流流速稳步提升,分流段气流速度出现小幅差异化分布;高速工况下,整体流速大幅上升,歧管弯道、分支过渡区域出现局部高速气流聚集现象,流速分布均匀性显著下降。(2)对歧管内部压力场分布特性进行系统分析,结果显示进气主流道压力分布相对均匀,压力损耗较小。而在管道弯道、分流接口等结构突变区域,易形成局部高压区与负压区,气流在此处发生挤压、分离现象,是进气压力损失的主要集中区域。且随着发动机转速提升,压力梯度差异逐渐增大,压力损耗问题进一步加剧。(3)统计不同工况下各气缸进气流量数据,横向对比各缸进气量差异。数据表明原始进气歧管工作时,各缸进气流量存在明显偏差,低速工况下均匀性偏差相对较小,高速变工况状态下,分流不均问题突出,部分气缸进气量不足,直接影响发动机各缸工作一致性,易造成发动机运转抖动、动力输出不均衡等问题。

2.3 原始结构核心缺陷总结

(1)原始进气歧管流道设计存在不足,弯道曲率与分流过渡结构不合理,气流流经结构突变区域时,流动方向急剧改变,气流贴合性变差,极易产生涡流与回流现象。该现象会扰乱主流进气气流,消耗进气动能,降低气缸充气效率,同时加剧气流紊乱程度,影响缸内油气混合效果,制约发动机燃烧性能。(2)各缸进气不均匀、压力损失过大的核心结构根源为歧管分支角度、分流管道长度与管径配比不合理。原始结构分流对称性较差,气流分配路径长短不一,导致各缸进气流量出现差值。同时弯道结构突兀,气流流通阻力大,局部能量损耗严重,长期工况下会降低发动机进气效率与燃油经济性^[3]。(3)原始进气歧管变工况适配性较差,低速工况下

流动缺陷不明显,但随着转速与负荷变化,流场均匀性、压力损耗、气流稳定性均出现大幅波动,进气性能稳定性不足。综合仿真结果,确定后续优化重点,主要聚焦流道结构优化、弯道与分流结构改良,消除涡流回流问题,提升各缸进气均匀性与全工况进气稳定性。

3 汽车发动机进气歧管结构多参数优化设计与验证

3.1 优化方案与优化参数确定

(1)本次进气歧管优化设计遵循多维度综合优化原则,全面兼顾气动性能、结构强度、轻量化与生产工艺性。在气动性能层面,以降低气流损耗、优化流场状态为核心;结构强度上保证歧管在高温、负压交变工况下无变形、开裂问题;轻量化设计以降低整机负重、减少进气惯性为目标;同时优化结构需适配常规注塑、压铸生产工艺,避免复杂异形结构,兼顾工程落地性与经济性。(2)结合前文原始模型仿真缺陷,筛选四大核心优化参数:进气管长度、分支管径、弯道曲率半径、分流角度。原始模型主管长度210mm、分支管径32mm、弯道曲率半径28mm、分流角度42°,上述参数是造成气流阻力大、分流不均、涡流严重的关键因素,参数可调空间充足,对进气性能影响敏感度高,适合作为本次多参数优化变量。(3)结合发动机进气性能需求设定多目标优化指标,核心优化目标包含三项:实现进气压损最小化,将原始平均压损480Pa降至400Pa以内;最大化各缸进气均匀性,将原始各缸进气量偏差6.2%控制在3%以下;全面提升全工况充气效率,使低速、中速、高速工况充气效率平均提升3%~5%,改善发动机高低速工况适配性^[4]。

3.2 多目标优化设计与模型重构

(1)本次采用正交试验法开展多参数优化方案设计,以主管长度、分支管径、弯道曲率半径、分流角度为4个试验因素,每个因素设置3个水平,设计L9(3⁴)正交试验组别,共得到9组参数组合方案。通过正交试验可大幅减少仿真计算量,精准筛选各参数对进气性能的影响权重,高效锁定最优参数匹配组合。(2)对9组试验方案分别开展流体仿真计算,提取各组压损值、进气均匀度、充气效率核心数据进行对比分析。结果显示,主管200mm、分支管径34mm、弯道曲率半径35mm、分流角度36°的参数组合综合性能最优,压损、均匀性、充气效率指标均大幅优于其他组别,基于该最优参数完成进气歧管三维结构模型重构,修正原始流道突变结构。(3)优化前后结构几何参数差异显著,具体对比结果如下表所示。优化后缩短主管长度10mm、增大分支管径2mm、提升弯道曲率半径7mm、减小分流角度6°,有效改善了原始结构流道狭窄、弯道过急、分流角度偏大的问题,流道过渡

更加平缓顺滑，从结构层面消除气流流动缺陷。

结构参数	原始模型	优化模型	参数变化量
进气主管长度	210mm	200mm	-10mm
分支管径	32mm	34mm	+2mm
弯道曲率半径	28mm	35mm	+7mm
分流角度	42°	36°	-6°

3.3优化后结构仿真性能对比分析

(1) 多工况仿真对比结果表明，优化后流场性能大幅改善。低速工况平均压损由220Pa降至165Pa，降幅25%；中速工况压损由480Pa降至372Pa，降幅22.5%；高速工况高压损问题显著改善，压损由850Pa降至663Pa，降幅22%。同时流道内高速气流聚集现象消失，速度场分布更加均匀，无局部气流突变问题。(2) 量化分析进气均匀性与充气效率提升效果，原始模型各缸进气量最大偏差为6.2%，优化后偏差降至2.8%，满足发动机进气均匀性设计标准。全工况充气效率实现稳步提升，低速工况提升4.8%、中速工况提升3.5%、高速工况提升4.1%，平均提升幅度达4.13%，有效改善了发动机进气充量不足的问题^[3]。(3) 优化后歧管流道过渡顺滑，结构突变问题基本消除，气流流动状态得到显著改善。仿真结果显示，弯道及分流处的涡流、回流区域面积缩减90%以上，气流可平稳、顺畅流经各分支流道，气流紊乱度大幅降低，彻底解决了原始结构因气流分离、回流涡流造成的进气动能损耗问题，进气流畅性大幅提升。

3.4 优化结构可靠性验证

(1) 通过ANSYS开展结构强度仿真校核，模拟发动机高温、负压、振动复合工况，优化后进气歧管最大应力值为18.6MPa，远低于材料许用应力35MPa，最大变形量仅0.12mm，结构无应力集中、变形超标等问题，完全满足发动机实际工况受力与形变要求。(2) 开展全工况适应性验证，分别测试低、中、高转速工况下的进气性能，优化结构在各工况下均保持稳定的低损耗、高均匀性特性，无工况适配性差、性能波动大的问题，相较于

原始结构，全工况进气稳定性提升显著，可适配车辆各类行驶工况。(3) 从工程角度分析，本次优化仅调整流道尺寸参数，未改变歧管整体外形、安装接口及装配尺寸，无需修改模具与生产工艺，结构轻量化效果小幅提升，同时气动性能、可靠性同步优化，具备极强的工程可行性与实用价值，可直接应用于同类型发动机进气系统改良。

结束语

本文完成了进气歧管建模、仿真分析、多参数优化与可靠性验证的完整研究，有效解决了原始结构进气阻力大、分流不均等核心问题。优化后的进气歧管流场分布更均匀，全工况压损显著降低，充气效率与进气均匀性大幅提升，且结构强度、装配工艺均满足工程应用要求。本次优化兼顾性能与实用性，可有效提升发动机综合工作性能，对进气系统结构优化设计及工程落地具备一定参考价值。

参考文献

[1]麻向军.塑料进气歧管的研究进展[J].模具技术,2023,16(5):58-62.

[2]王莉.发动机塑料进气歧管的应用现状与发展趋势[J].小型内燃机与车辆技术,2024,36(3):83-86.

[3]纪峻岭,汪伟.基于AVLBOOST发动机配气正时的优化设计[J].黑龙江哈尔滨:黑龙江工程学院学报,2021,(1):9-12.

[4]刘鑫,段明德.汽车发动机气道结构优化与性能提升研究[J].机械设计与制造,2023,23(2):194-196.

[5]杨燕勤,唐爱红.汽车发动机气道设计与制造技术的研究与应用[J].机械设计与制造工程,2023,7(2):31-34.