

FSCC 赛车侧置式进气系统的优化仿真

张宇, 续彦芳, 许磊

(中北大学 能源动力工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: FSCC 赛车空间布置的改变及进气系统加装限流阀会使其发动机动力性能下降, 为削弱此影响, 设计一种侧置式进气系统。采用 Fluent 软件对不同进出口锥角的限流阀流场进行仿真模拟。利用 GT-Power 对内燃机工作过程进行一维仿真, 分析进气系统几何参数对内燃机性能的影响规律, 提出合理的设计方案。对比分析表明: 在赛车常用转速时, 采用侧置式进气系统的内燃机功率和转矩分别增加 3.42% 和 2.85%。

关键词: FSCC 赛车; 内燃机; 侧置进气; 优化

中图分类号: TK41 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)02-0131-04

Optimization and Simulation of Side Intake System in FSCC Racing Car

ZHANG Yu, XU Yanfang, XU Lei

(School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To reduce the degradation of engine power performance caused by the change of the space arrangement of FSCC racing car and the addition of the flow limit valve in the intake system, a side-mounted intake system is designed. Fluent software is used to simulate the flow field of the throttle valve with different inlet and outlet cone angles. The one-dimensional simulation of the working process of internal combustion engine is carried out by GT-Power to analyze the influence law of the geometric parameters of intake system on the performance of internal combustion engine, and put forward a reasonable design scheme. The comparative analysis shows that the power and torque of the internal combustion engine with side-mounted intake system are increased by 3.42% and 2.85% respectively at the normal speed of the race car.

Keywords: FSCC racing car; internal combustion engine; side air intake; optimization

0 引言

中国大学生方程式大赛 (FSAE) 按其赛事规则^[1] 的要求, 使用汽油为燃料的内燃机车在其进气系统中必须安装流通截面直径为 20 mm 的限流器。由于截面大小的突变会使进气系统流动阻力增加, 单位时间内充气量减少, 内燃机中高转速时功率和转矩输出不稳定, 故进气系统的优化设计对发动机性能的提高尤为重要。

西安理工大学采用三维 FLUENT 限流阀流场分析与 GT-Power 建立内燃机工作过程仿真模型相结合, 对限流阀垂直布置的进气系统进行优化, 使得内燃机动力性能有了极大的提升^[2]。西华大学通过内燃机整机一维仿真模型, 分析了垂直进气式进气系统中进气歧管几何参数对内燃机动力性能的影响规律, 得出其几何参数对高速运转的发动机的性能影响比较突出^[3]。南京工业大学基于流体力学理论以及利用 GT-Power 发动机二维模型进行模拟分析, 使得中高转速的充气效率提高 5%^[4]。

以上车队都针对的是限流阀垂直布置的进气系统。为了合理规划新赛季赛车的空间布局及动力性能的提升, 本文设计一种侧置进气式的进气系统, 并对其优化设计。

1 进气系统的设计方案

根据大赛规则和以往车队的参赛经验, 发动机进气形式采用自然吸气, 新赛季发动机进气顺序: 外界环境—空气滤清器—节气门—限流阀—进气总管—稳压腔—进气歧管—发动机。

1.1 限流阀的设计与优化

1) 限流阀结构参数的确定

节气门选择双滚筒式节气门, 因为其在节气门全开的条件下 (仿真要求) 中间结构为一个通孔, 气流通过时不会产生额外的能量损失。限流阀进口端的直径为 28 mm (节气门口径限制), 喉口处直径为 20 mm (赛事规则), 出口端直径为 48 mm (整车空间布置限制), 本文初步设定限流阀进出口锥角分别为 14° 和 6°。

2) 限流阀优化

为了减少限流阀形状突变带来的进气压力和进气流速的损失以及提高进气系统的质量流量, 需对限流阀进出口锥角进行优化处理, 通过 ANSYS Fluent 对不同进口锥角的限流阀流场进行仿真, 结果如图 1 和图 2 所示。

第一作者简介: 张宇 (1996—), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 研究方向为动力机械性能及流体力学仿真。

通信作者简介: 续彦芳 (1968—), 女, 副教授, 博士, 研究方向为发动机整体设计。

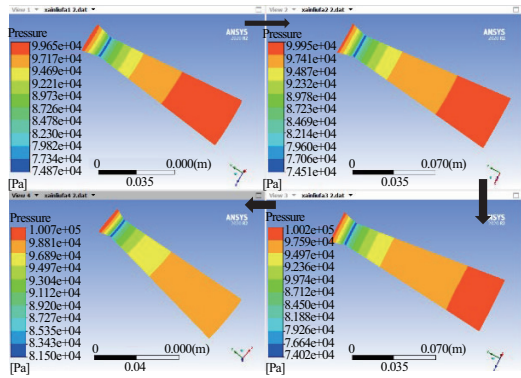


图1 不同进口锥角限流阀的压力云图

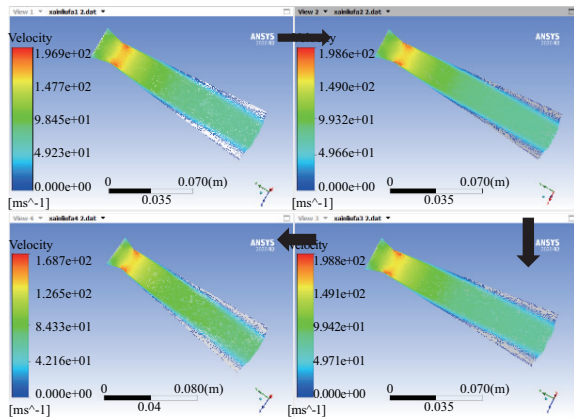


图2 不同进口锥角限流阀的速度矢量图

从图1可以看出,按照箭头所指方向分别对应的限流阀进口锥角度为14°、16°、18°、20°的压力云图,最小压力出现在限流阀喉口处,随着进口锥角角度的增加,喉口处压力呈现先减小后增大的趋势。

按照逆时针方向,每个图对应的限流阀进口锥角度数分别为14°、16°、18°、20°的速度矢量图,可以看出最大流速出现限流阀喉口处,最大流速在18°时达到峰值,为198.8 m/s。从图2可以得出限流阀进口锥角度数较大时,气体流速在喉口处会变慢,增加进气能量的损失。

结合上述分析,在不考虑进口锥角为20°的情况下,本文接下来只对进口锥角14°、16°、18°的限流阀渐扩端端口的质量流量进行计算,结果如表1所示。

表1 不同进口锥角限流阀出口末端的质量流量

限流阀进口锥角/(°)	出口质量流量/(kg/s)
14	0.066 745 554
16	0.066 144 481
18	0.065 760 899

综合不同进口锥角限流阀流场仿真结果及分析,选择限流阀进口锥角为14°。

由于前期已对出口锥角为6°限流阀进行了仿真,因此以下只针对出口锥角角度为5°、7°限流阀进行Fluent仿真,仿真结果的压力云图和速度矢量图如图3、图4所示。

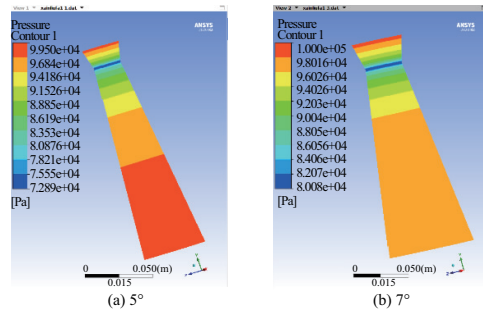


图3 不同出口锥角限流阀的压力云图

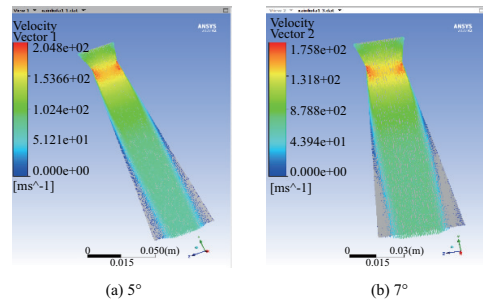


图4 不同出口锥角限流阀速度矢量图

图3中,结合已仿真过的6°出口锥角,可以发现限流阀出口锥角角度与喉口处压力变化成正线性关系,由于出口锥角角度为7°时限流阀进出口压力不一样,说明此时限流阀整体存在压力损失,故在设计中将对该角度不作考虑。

图4中,结合已仿真过的6°出口锥角,限流阀出口锥角角度与喉口处流速成负相关。当出口锥角为7°时,因流速较慢会增加流动过程中能量损失。

综合图3、图4分析,确定本次设计不考虑出口角为7°的情况,接下来只对出口锥角5°和6°的出口端面质量流量进行计算,结果如表2所示。

表2 不同出口锥角限流阀出口端质量流量

出口锥角角度/(°)	出口端质量流量/(kg/s)
5	0.069 720 256
6	0.066 745 554

结合上述仿真结果及分析,出口端质量流量数据,因此选择限流阀出口锥角为5°。

1.2 进气系统结构形式

为了避免进气总管与赛车车身的干涉,最后将进气总管设置成一段弯曲角度为90°、半径为100 mm、直径为70 mm的弯管。

为了减弱因加装一段弯管造成稳压腔内波动效应的紊乱程度增加及每个气缸进气效率不平衡的影响,故将稳压腔设置为一种圆台与半球的组合体。稳压腔初始容积设定为3 L,进气歧管初始长度设为260 mm。进气系统简化的三维模型如图5所示。

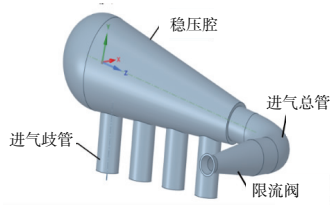


图5 进气系统的三维模型

2 仿真模型的建立

2.1 数学模型的建立

利用 GT-Power 软件建立内燃机整机仿真模型,采用有限容积解析流体流动控制方程;燃烧模型采用 Wiebe 模型^[5]模拟放热规律;缸内传热模型采用 WoschniGT 模型^[6]。

1) 流动方程

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\rho u}{f} \frac{dF}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{4f}{D} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{u}{|u|} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - a^2 \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} \right) - (k-1) \rho \left(q + u \frac{4f}{D} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{u}{|u|} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: u 为气体流速; ρ 为气体密度; p 为气体压力; F 为管截面积; f 为管壁摩擦阻力; D 为当量直径; a 为气体流速加速度; k 为传热系数; q 为辐射能。

2) 燃烧模型

$$\frac{dx}{da} = \frac{a}{\Delta a_c} \cdot (m+1) \cdot y^m \cdot e^{-ay^{m+1}} \quad (4)$$

式中: $dx = \frac{dQ}{Q}$, $y = \frac{a-a_0}{\Delta a_c}$, 其中 Q 为总的燃烧放热量, a_0 为燃烧起始角; m 为形状因子; Δa_c 为燃烧持续期。

3) 传热模型

$$h_g = \frac{1}{2} C_f \rho U_{eff} C_p P_r^{-2/3} \quad (5)$$

式中: C_f 为气体流速; U_{eff} 为边界层外有效速度; C_p 为气体比热容; P_r 为普朗克数。

2.2 发动机基本参数

本赛季以 Honda CBR600 发动机作为动力源,其基本参数如表 3 所示。

表 3 CBR600 发动机基本参数

名称	参数值
发动机形式	直列四缸、四冲程
发动机排量/cm ³	599
冷却形式	水冷
压缩比	12.0
气门数	8 个进气门, 8 个排气门
点火顺序	1—2—3—4
进(排)气门直径/mm	27.5(23)
缸径×行程/(mm×mm)	67.0×42.5

2.3 发动机整机一维模型的建立

内燃机整机仿真模型主要由进气系统、气缸、曲轴箱和排气系统组成。基于内燃机进排气门几何参数以及内燃机基本参数,建立了内燃机进排气门、进气道、气缸及曲轴箱模型。内燃机 GT-Power 仿真模型如图 7 所示。

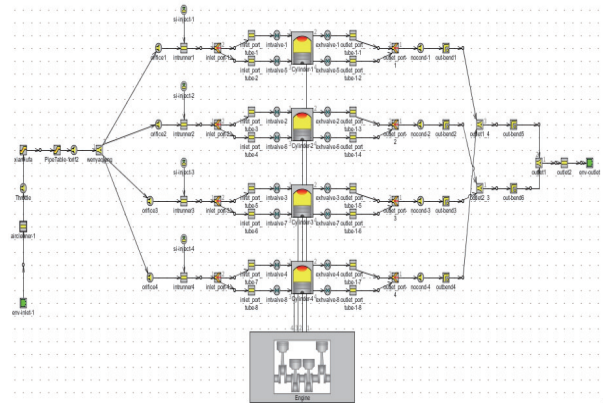


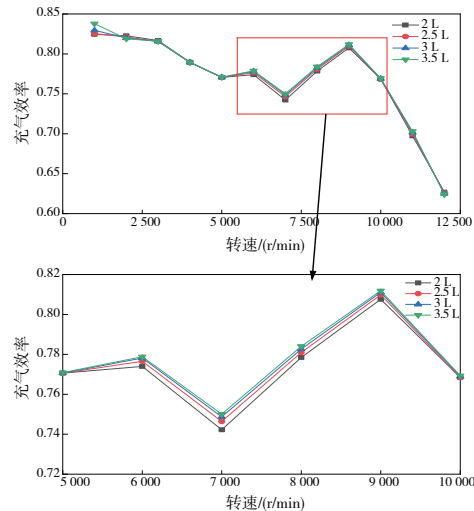
图6 发动机整机一维仿真模型

在发动机整体一维模型中,以空滤器进口和发动机排气歧管出口为边界,边界压力为 0.1 MPa,温度为 300 K,进气系统仿真模型是其初始的三维模型通过 GM3D 离散得到的。

3 仿真计算与分析

3.1 稳压腔容积对发动机性能的影响

稳压腔是进气系统中气流稳定中枢,如果设计不合理,稳压腔中的波动效应会使得各缸进气不均匀,造成发动机进气效率降低,影响发动机性能的输出,严重时还会缩短发动机的寿命。所以将稳压腔容积作为目标优化参数,分析容积分别为 2 L、2.5 L、3 L、3.5 L 时对内燃机性能的影响,选出适合本次设计的稳压腔容积。仿真结果如图 7 所示。



(a) 稳压腔容积对内燃机充气效率的影响

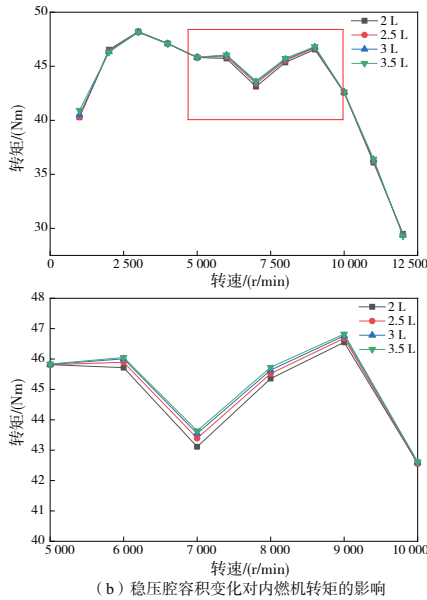


图7 稳压腔容积对发动机性能的影响

由图7可得,发动机转速在6 000~7 000 r/min 区间内,充气效率和转矩的曲线均呈现下降趋势,在7 000 r/min 时充气效率和转矩均降到低谷。但在7 000~9 000 r/min 区间内转矩和充气效率都有了显著的提升且在9 000 r/min 达到中高转速区间内的首个峰值。从而得出,稳压腔容积变化主要影响高转速时的发动机性能,考虑到赛车比赛常用转速为8 000 r/min 左右,故选择3.5 L 的稳压腔为设计参数。

3.2 进气歧管对发动机性的影响

根据动态效应的理论研究可知,合理设计进气歧管的长度会对发动机充气效率的提高有一定促进作用,故以其长度作为目标优化参数。分析进气歧管长度为80 mm、140 mm、200 mm、260 mm、320 mm 时对内燃机动力性能的影响,选出最佳的歧管长度。仿真结果如图8 所示。

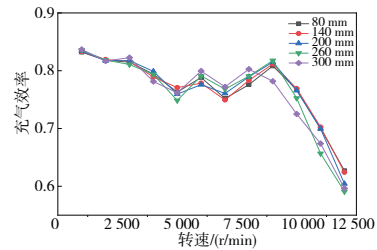
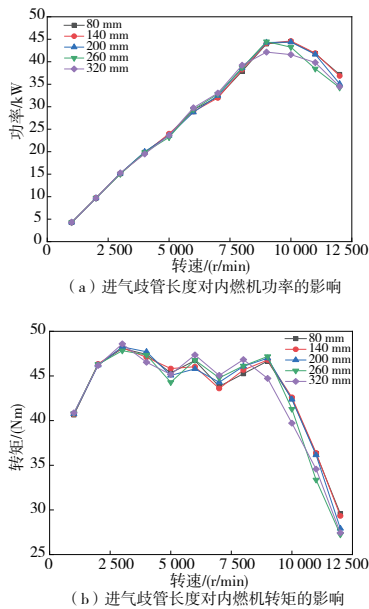


图8 进气歧管长度对发动机性能的影响

由图8 可知,进气歧管长度从80 mm 增加320 mm 时,在5 000~10 000 r/min 区间内对内燃机动力性能有着显著的影响;在5 000~7 000 r/min 区间内,随着进气歧管长度的增加,转矩和充气效率的峰值也在增加;转速在7 000~10 000 r/min 区间内,内燃机的功率随着长度的增加反而降低。由此可以得出,歧管长度主要对内燃机进气效率和转矩的输出造成影响。综合赛车实际的运行工况以及曲线走势的平稳性,当歧管长度为140 mm 时,内燃机动力性能输出更为稳定。

3.3 改进前后对比

综合上述分析结果及整车的空间布置,最终的设计结果将限流阀进出口锥角分别设置为14°和5°,进气歧管长度为140 mm,进气总管是一段直径为100 mm 的弯管,稳压腔容积为3.5 L。与2020 赛季限流器垂直布置的进气系统对比结果如图9 所示。侧置进气式进气系统在7 500~10 000 r/min 速区间内,内燃机性能均有明显的改善,其中转矩的涨幅为3.42%,功率涨幅为2.85%,充气效率涨幅为2.98%。

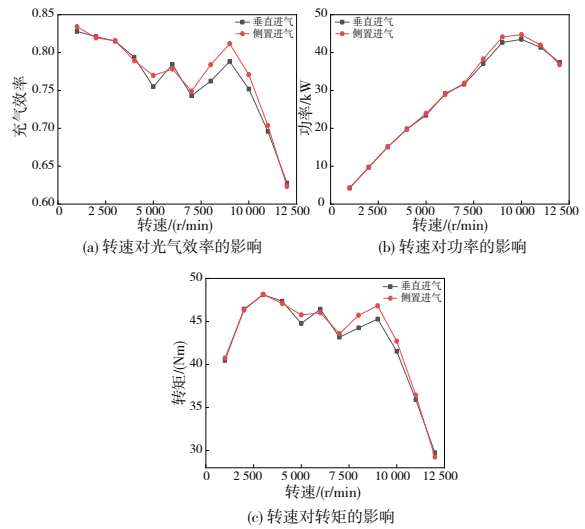


图9 改进前后系统性能对比结果

4 结语

本文针对新赛季赛车整车空间布局的设置和限流阀加装造成的发动机性能降低的影响,构建出侧置进气式进

(下转第145页)

3 系统开发与测试

该系统软件开发过程中,3 个处理器均采用了 Linux 操作系统,逻辑数据管理使用了 MySQL 平台软件,视频与激光点云驱动为探头内置软件,软件开发使用了 Java 编译系统。数据训练过程采用了遥控训练法,使用人工遥控的方式操作该轮对驱动系统,神经网络系统根据操作指令和探头输入数据进行训练,其自主训练路径长度 100m,设计拐点 6 个,运行过程中设计额外障碍物及行人闯入等应急状态。根据训练时长测试其效率,得到测试结果如表 5 所示。

表 5 系统开发测试结果表

训练时长/h	设计距离/m	绕行距离/m	通过时间/s	平均速度/(m/s)
遥控时长	100	9.3±0.5	11.4±0.2	9.59±0.62
1	100	15.2±1.7	29.8±0.9	3.88±0.34
5	100	11.8±1.2	18.2±0.7	6.17±0.53
25	100	9.1±0.5	11.8±0.3	9.29±0.53
100	100	7.3±0.4	9.6±0.3	11.19±0.55
300	100	7.2±0.3	9.4±0.3	11.35±0.51

表 5 中,当训练达到 25 h 时,该系统的自主寻迹能力已经与人工遥控操作时长保持持平;当训练达到 100 h 时,该系统的平均车速 11.19 m/s 较人工遥控的 9.59 m/s 提升 16.7%。考察行人侵入的制动效率,人工遥控制动最终位置距离行人平均 1.92±0.36 m;训练 25 h 时制动最终位置距离行人平均 1.23±0.24 m;训练 100 h 时制动最终位置距离行人平均 0.73±0.18 m。可以推测自主寻迹避障功能,更倾向于贴近异常点进行制动,且所有机器人操作在训练 5 h 后均未发生意外碰撞事故。

4 结语

使用 4 个激光点云探头构建自主寻迹避障主视觉系统,使用 4 个 3 通道可见光摄像头构建自主寻迹避障辅助视觉系统,采用机器人自主视觉系统,在轮对驱动 AGV 车辆底盘上,构建驱动系统。该系统使用 3 个嵌入系统运行 8 个深度卷积神经网络和 2 个数据库辅助多列卷积神经

网络,最终构建针对 2 个驱动轮的 8 挡位控制系统,给出 4 个前进策略、2 个倒退策略、10 个转向策略、1 个停车策略和 1 个计划内制动策略。最终开发测试中,该系统在遥控训练 25 h 时,达到与人工遥控近似的自主寻迹能力;遥控训练 100 h 时,控制效率超出人工遥控 16.7%;但后续训练未发现有控制效率的显著提升。该系统通过提升神经网络系统的节点数量、增加控制器的硬件配置,可以得到更高的控制效率。

参考文献:

- [1] 戴福全,刘路杰. 基于视觉引导的机器人抓取分类系统设计[J]. 福建工程学院学报,2020,18(6):530-534.
- [2] 杨涛,李祎,陈晶华,等. 基于背景差分的巡检机器人视觉识别方法[J]. 机械与电子,2020,38(12):60-64.
- [3] 张伟,陈栋,赵进慧. 金属铣削件视觉检测与机器人分拣系统[J]. 工业控制计算机,2020,33(12):91-93,96.
- [4] 郑耿峰. 地面移动机器人视觉系统成像性能检测方法[J]. 大众标准化,2020(24):253-254.
- [5] 周自更,黄修乾,胡昌斌,等. 基于长期度量学习和图像匹配变换的机器人视觉定位研究[J]. 电子器件,2020,43(6):1396-1402.
- [6] 方华丽,吴晴. 采摘机器人定位导航系统设计——基于无线传感网络和机器视觉[J]. 农机化研究,2021,43(9):199-203.
- [7] 李丽,张晓亮. 基于机器视觉的采摘机器人果实三维模型重构与识别[J]. 农机化研究,2021,43(10):231-235.
- [8] 王书剑,周诗薇,邓文兵,等. 一种小型 AGV 运输小车的设计[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊),2018(12):176-177.
- [9] 吴航. 移动机器人地形分类的视觉方法研究[D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院,2017.
- [10] 秦雪涵. 基于粒子群算法与人工势场法的移动机器人路径规划研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [11] 黄西利,覃鑫. AGV 小车在车身车间应用[J]. 装备制造技术,2015(4):201-203.
- [12] 沈治. 基于蚁群算法的 AGV 路径规化的实现[J]. 信息技术,2011,35(11):103-106.

收稿日期:2021-01-18

(上接第 134 页)

气系统并初步选定进气系统结构参数;通过限流阀流场仿真与一维内燃机工作过程仿真相结合,对侧置进气式进气系统进行优化处理,得出将限流阀进出口锥角分别设置为 14°和 5°、进气歧管长度为 140 mm、稳压腔容积为 3.5 L 时,内燃机在赛车常用转速区间内转矩和功率输出更加稳定,且进气效率也有明显的改善。

参考文献:

- [1] 李理光. 2020 中国大学生汽车大赛规则[Z]. [S.I.:s.n.], 2020.
- [2] 芮宏斌,张帅帅,史洋鹏,等. FSAE 赛车发动机进排气系统优

化设计[J]. 汽车文摘,2019(10):34-39.

- [3] 谭正平,黄海波,王永忠. FSAE 赛车发动机进气系统结构参数优化[J]. 西华大学学报(自然科学版),2017,36(1):82-87.
- [4] 施佳辉,王东方,王燕,等. FSAE 赛车发动机进气系统设计与流场分析[J]. 轻工学报,2017,32(5):66-73.
- [5] 林少辉,任志英. FSC 赛车进气限流阀研究与优化[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2015,31(12):37-39.
- [6] 魏春源. 高等内燃机学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001.

收稿日期:2021-05-12