

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.09.011

基于台架试验的碳纤维赛车进气系统优化设计*

朱发旺¹, 尉庆国¹, 石绍彬¹, 刘新华²

(1. 中北大学机械与动力工程学院, 太原 030051; 2. 中国北方发动机研究所, 山西大同 037036)

摘要:为改善安装限流阀后的发动机的动力输出,应用三维建模软件 CATIA 建立中北大学 2015 年国际学生方程式赛车竞赛 (FSAE) 赛车发动机进气系统的模型,采用 FLUENT 软件对进气系统模型进行优化分析,通过分析选出最佳模型;在此基础上,使用碳纤维材料加工制造出进气系统实物部件,对改造后的 FSAE 赛车发动机进行台架试验。通过台架试验获得实验结果与原机数据进行对比,改造后的发动机的扭矩和功率为原机的 70% 左右,性能较往年有了较大提升,验证了设计方案的合理性。

关键词:国际学生方程式赛车竞赛;赛车;进气系统;优化分析;碳纤维;台架试验

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)09-0053-04

Design Optimization of Carbon Fiber Intake System for Race Car Based on Engine Bench Test

Zhu Fawang¹, Wei Qingguo¹, Shi Shaobin¹, Liu Xinhua²

(1. School of Mechanics and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China North Engine Research Institute, Datong 037036, China)

Abstract : To improve the engine power output after installing the restriction, the engine's intake system model of 2015 Formular SAE (FSAE) race car for North University of China was established by the three dimensional modeling software CATIA. The optimization analysis for intake system model was conducted based on fluid calculation software FLUENT, then the optimal model was selected through the analysis. After that, the air intake system physical components was made by using carbon fiber material, and the engine experiment was carried out on the reformed engine to achieve the experimental results. Compared the experimental results with original data of engine, the reformed engine's power and torque is about 70% of the original engine. The reformed engine's performance is also improved greatly over previous year. It demonstrates the rationality of the design.

Keywords : Formular SAE ; race car ; intake system ; optimal analysis ; carbon fiber ; engine bench test

中国大学生方程式汽车大赛是由高等院校汽车工程或汽车相关专业在校学生组队参加的汽车设计与制造比赛。大赛规则对赛车动力系统提出以下要求:(1)赛车须由排量 610 cc 以下的四冲程发动机来驱动;(2)最大直径为 20.0 mm 的限压阀须安装于节气门与进气门之间且全部进气气流须流经此阀。加装限流阀之后,发动机的功率与扭矩相对于原机均有不同程度的降低^[1],因此,在满足大赛规则的前提下,如何改善发动机进气限流后赛车的动力性是设计者须考虑的重点。

1 发动机进气系统几何模型的建立

FSAE 赛车进气系统一般由空气滤清器、节气门、限流阀、稳压腔组成,因为空气滤清器对进气系统内的流场的影响很小,所以在进气系统模型的建立过程中并未考虑空气滤清器^[2]。

根据相关文献,最佳限流阀开口锥角角度为 40°。由于安装限流阀,造成了发动机进气压力和进

气流速的损失,为了将限流阀造成的损失降至最低,在限流阀后应安装扩散器,它是有一定角度且截面积逐渐增大的经典文丘里管^[3]。结合国内外相关设计经验,将出口的锥角定为 7°,限流阀示意图如图 1 所示。

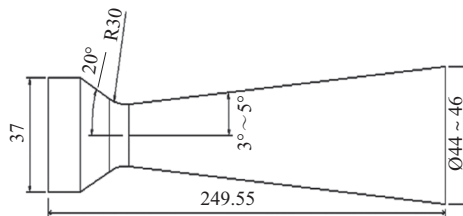


图1 限流阀示意图

关于稳压腔体积的选取,对于乘用车而言,一般为其排量的 0.5 ~ 1.5 倍,但是这个体积对于大学

* 国家自然科学基金项目 (50606014)

联系人: 朱发旺,硕士研究生,主要从事车辆动力学与控制研究

收稿日期: 2016-07-02

生方程式赛车而言较小,因为 FSAE 规则规定了进气系统须加限流阀,所以对于自然吸气的发动机一般采用 2~4 倍。鉴于本次采用的发动机的排量小于 600 cc,所以稳压腔的容积定为 1.2~2.4 L。考虑到加工制作的方便性,选用半径 100 mm 的球壳来制作稳压腔。

由于发动机在发动机舱的布置位置已确定,其进气口朝向车尾,为了充分利用气流的迎风效应提高进气量,需要保证进气系统进气入口面向车头。目前的设计主要有上部进气和侧部进气。上部进气,空气滤清器在车手头部以上,主环顶部以下,此外,由于头枕高度的限制,致使进气管道必须达到一定高度超越头枕,才能实现一定的迎风面的要求,但是进气管设置的长度不宜过长,而且这种布置一定会与迎风面有一定角度差。侧部进气,空气滤清器在主环侧面,相比较上部进气,进气口到侧部的距离远小于进气口到顶部的距离,迎风角度小,若侧部进气,进气部件高度不高,在固定方面会更加简便^[4]。

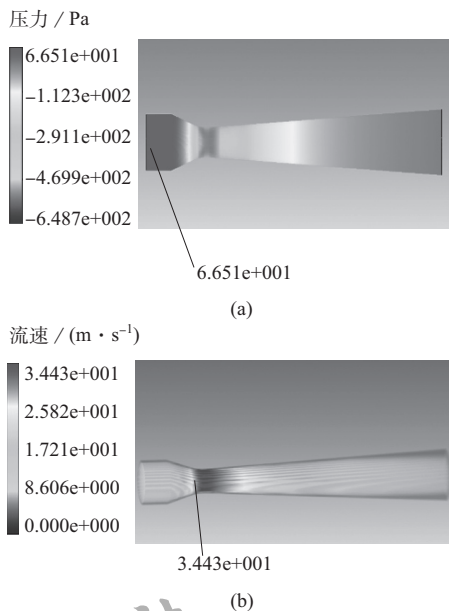
比较之后,最终选择侧部进气的布置方式,运用三维建模软件 CATIA,对进气系统与发动机进行装配。

2 发动机进气系统 Fluent 仿真分析

由于大学生方程式赛车是一项大学生为主导的赛事运动,考虑到车手的安全因素,对发动机加装限流阀,因此发动机的功率与扭矩受到很大的限制,赛车的动力性受到影响。考虑到稳压腔的形状容积已选择好,因此使用 Fluent 软件对限流阀进行流体仿真。赛车可认为处于低速行进中,进入进气系统中的气体可认为是不可压缩的气体,气体的密度不发生变化,因此选用标准模型进行求解。

首先对模型进行前处理,使用 mesh 模块划分网格,考虑到边界层对限流阀的影响,使用 inflation 功能进行网格膨胀处理。为了求取进出口的空气质量流量,在 mesh 界面设置命名边界,设置边界选项 inlet, outlet, wall 以及 fluid,将划分的网格导入 fluent 求解器计算处理。

设置边界条件,进口压力为大气压,出口压力为 98 kPa,湍流强度为 5%,湍流黏度比为 0.5。设定进、出口流量值为要查看的结果。计算到 139 步求解完成后,在后处理中查看限流阀静压图以及流速图,结果如图 2 所示^[5]。由图 2 可知,最大压力出现在限流阀开口端,最大流速位于渐变口处,符合流体力学相关知识要求。



a—静压图; b—流速图

图2 限流阀静压、流速图

限流阀进出口质量流量数值见表 1。

表1 限流阀进出口流量值

位置	质量流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
进口	0.074 119 715
出口	-0.074 113 508
差值	6.2 067 702e-6

进口质量流量的绝对值大于出口的绝对值,说明存在沿程损失,损失小于 1%。

以上结果主要针对进口锥角为 4°,出口锥角为 7°的限流阀,为了得出最佳进气量的模型,下面采用 ANSYS Workbench 里面的响应面优化设计进行分析求解。

3 响应面优化设计

为了求解出最优模型,需要设置优化模块,可以根据前面的 Fluent 分析结果,选择一个初始设计点,做一次仿真,然后依据相关性原则,找到另一个设计点,再做一次仿真,发现设计变量和目标变量之间的数学关系,并绘制出响应面。通过反复仿真,直到目标值收敛,得出最优解。

根据优化原则,设定进口锥角和出口锥角为输入参数变量,设定进口质量流量和出口质量流量为输出参数,然后将输入、输出参数传递到响应面优化设计模块。设定进口锥角的范围为 30°~50°,出口锥角的角度范围为 5°~9°,将实验设计类型设为 Central Composite Design,仿真分析结果见表 2。

为了使分析结果更具参考性,设置多组样本参数,并从中选择 3 个候选设计点,通过响应面仿真,

选取的三个候选点见表3。

进口锥角/(°)	出口锥角/(°)				
	5	6	7	8	9
30	-2.98	-9.43	1.54	4.55	-2.35
35	-2.86	-3.10	4.40	9.48	-5.68
40	-3.01	-4.94	-9.54	6.07	-1.47
45			5.59	-2.38	-4.60
50		-2.21	4.19	-2.05	4.97

项目	点1	点2	点3
进口锥角/(°)	30	35	40
出口锥角/(°)	5	5	5

考虑到发动机安装限流阀,为了保证发动机的功率要求,满足赛车的动力性能要求,选择能保证限流阀进气质量流量最大以及沿程损失最小的设计,即点2,此时进口质量流量为0.098 366 413 kg/s,出口质量流量为-0.098 369 269 kg/s。

4 进气系统制作

4.1 材料选择

考虑到整车布置时,各零件总成之间结构紧凑,使得进气管道与热源较近、管道工况较恶劣等情况,因此采用碳纤维制作进气系统的限流阀与稳压腔。碳纤维材料一般是由聚丙烯腈、粘胶纤维等材料经过氧化与碳化作用处理形成的^[6]。由于组分的特殊性加上工艺处理,使得碳纤维在具有密度小的同时,可塑性好,同时耐高温。基于这些特性,碳纤维适合用来制作进气系统。

4.2 模具制作

根据上文已经确定好的限流阀与稳压腔尺寸,结合加工设备以及经费等因素,使用数控机床制作限流阀模型,由于稳压腔结构的特殊性,可以直接购买球形结构。并对球形结构直径两端进行打孔处理,孔径由进出口大小决定。模具渲染图如图3所示。

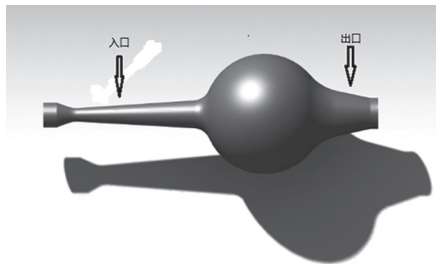


图3 三维渲染图

4.3 碳纤维模型制作

相对玻璃纤维,碳纤维材料在制作时不用分成表面毡、短切毡并按顺序放置,减少了加工程序。

(1) 在将机床加工的限流阀模具表面的金属细屑清理好后,为了方便后续脱模操作,在模具上使用透明胶带,在胶带上面加涂脱模蜡,在一定程度上弥补模具因为外界因素造成的不光滑。

(2) 由于实验室设备限制,使用人工处理制作。将碳纤维布按照(0/45/90/-45)角度铺置,铺好一层,用细刷将环氧树脂一层层顺着铺放的碳纤维布的纹路刷,由于没有真空泵的作用,需要手工将碳纤维布压实,让树脂更好的渗透^[7]。

(3) 由于模具结构的特殊性,边角过渡不平滑,因此使用小块的碳纤维布贴补,避免后期使用过程中产生局部强度不够的因素,同时由于碳纤维材料的优异性能,留下了打磨的空间。

(4) 将模型放在阳光下加热,加速固化进程,等到模型树脂完全与碳纤维结合,进行脱模操作。

(5) 将模具进行手工修剪、打磨等一系列后续处理,得到制作的模型。

通过碳纤维材料的使用,制作出符合设计要求的进气系统,为下面的台架试验打下基础。将制作好的模型安装在发动机上,如图4所示。

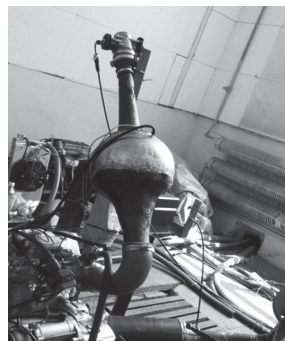


图4 实物装配图

5 仿真结果的验证

为了验证设计系统的可靠性,使用发动机台架试验来检测改造后的发动机性能指标及可靠性,检验发动机进气系统设计的是否合理,同时也对进气系统的后续的改进有着指导性的意义[8-9]。由于使用设备的限制,台架试验在太原理工大学发动机动力实验室进行。

本次台架试验使用的实验设备: 诚邦 DW160 电涡流式测功机、ET2100 发动机测控仪、ET2200 油门励磁驱动仪、ET2300A 数据采集仪等,实验发动机为改造后的嘉陵 JH600 发动机。嘉陵 JH600 原机的基本技术参数见表4。连接台架试验设备如图5所示。

表4 嘉陵 JH600 发动机基本技术参数

形式	排量/ cm ³	压缩比	缸径/ mm	行程/ mm	最大功率/ kW	最大扭矩/ (N·m)
单缸、单 顶置式 凸轮轴	589.9	9.7:1	94	85	30	51

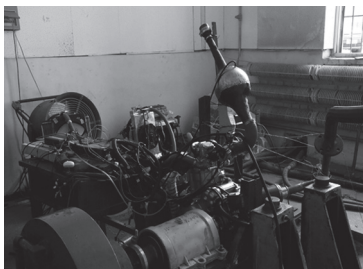


图5 台架试验图

考虑到发动机启动的时候,发动机自身会产生剧烈的振动,为了不影响进气效果,进而影响实验的准确性,对于进气管道进行固定,如图6所示。

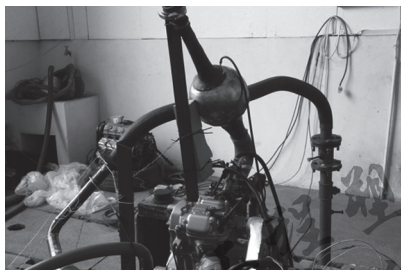


图6 安装固定图

通过实验过程中,调节节气门开度,来测定并记录对应转速的数值,使用制表软件对数据进行分类处理,得出结果^[10]。

图7、图8分别为不同的节气门开度(5%,10%,15%,20%,25%,30%,35%,40%,45%)下发动机部分负荷特性的功率和扭矩曲线。节气门百分比如图标示,相应曲线是各个节气门开度下的发动机功率和扭矩^[11]。由图7、图8可知,进气系统经优化后发动机最大功率为21.061 kW,最大扭矩为36.98 N·m,与原机的功率与扭矩相比下降了30%左右。

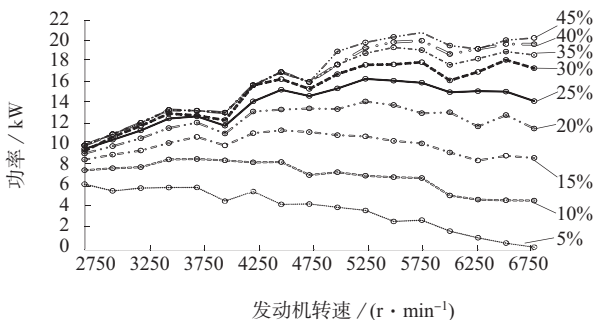


图7 发动机部分负荷特性的功率曲线

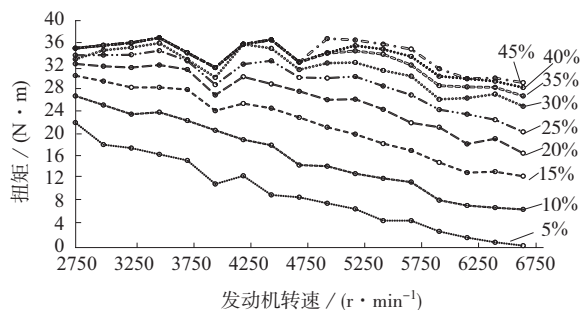


图8 发动机部分负荷特性的扭矩曲线

6 结论

依据大赛规则对赛车进气系统加装限流阀之后,造成了发动机充气效率下降,发动机的动力输出降低,笔者对发动机进气系统进行Fluent流场分析,优化了发动机的进气系统,从一定程度上改善了进气限流后发动机的动力性。使用碳纤维材料制作限流阀,保证了进气系统的功能的同时,减少了整车的质量,符合轻量化设计要求。验证了碳纤维材料在汽车制作设计上的应用。并且通过发动机台架试验,得出实验数据,通过与原机数据对比,经过改造后的发动机的扭矩和功率为原机的70%左右,性能较去年有了较大的提高,进一步验证了设计方案的合理性,这为以后中北大学行知车队赛车发动机进气系统的设计与优化提供一定的参考。

参考文献

- [1] 庞圣桐,曾东建,付凯,等. FSC赛车发动机进气系统设计[J]. 机械设计与制造,2015,53(2):89-92.
Pang Shengtong, Zeng Dongjian, Fu Kai, et al. The design of air intake system of fsc racing engine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, 53(2):89-92.
- [2] 贺彤阳,何山,黎杰,等. 大学生 FSAE 赛车发动机进气系统设计[J]. 机械工程师,2012,44(11):20-23.
He Tongyang, He Shan, Li Jie, et al. Design and manufacture of the engine intake system in the FSAE racing car of SCUT[J]. Mechanical Engineer, 2012, 44(11):20-23.
- [3] 柳威,师忠秀,于渊. 基于 ANSYS/Fluent 的 FSAE 赛车限流阀的仿真优化研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2013, 28(4):76-80.
Liu Wei, Shi Zhongxiu, Yu Yuan. Optimization of flow-limiting valve for FSAE racing car based on ANSYS/Fluent[J]. Journal of Qingdao University(E & T), 2013, 28(4):76-80.
- [4] 黄海波. 基于进气限流下的 FSAE 赛车发动机进气系统优化设计与仿真研究[D]. 成都: 西华大学,2012.
Huang Haibo. The optimization and simulation of intake system for the FSAE racing based on intakelimiting[D]. Chengdu: Xihua University, 2012.

(下转第 61 页)

对于含有多嵌件的接插件类零部件,由于一次成型的注塑成型工艺可能使嵌件发生变形,可以采用包塑成型的嵌件定位技术,实现嵌件之间的精确定位,提高产品的成型质量。

参考文献

- [1] 黄俊东,金杨福,钱欣.一种基于 Moldflow 和 ANSYS 耦合技术的钢塑复合材料在注塑过程中钢网形变的分析方法[J].塑料,2011,40(4):93-95.
Huang Jundong, Jin Yangfu, Qian Xin. A method of analysis of steel net deformation in steel-plastic composite material during the injection process based on Moldflow and ANSYS[J]. Plastics, 2011, 40(4):93-95.
- [2] 李林楠,杨音文,李庆,等.嵌件注射成型工艺的分析与优化[J].塑料工业,2012,40(3):84-87.
Li Linnan, Yang Yinwen, Li Qing, et al. Analysis and optimization on injection insert molding processing[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(3):84-87.
- [3] 黄俊东.钢网增强 HDPE 球阀注射成型的 CAE 分析[D].杭州:浙江工业大学,2011.
Huang Jundong. Analyzing of injection molding steel net reinforced hdpe ball valve by CAE software[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.
- [4] 孔繁余,陈浩,王婷,等.基于流固耦合的减压塔底泵泵体强度分析[J].机械工程学报,2013,49(2):159-164.
Kong Fanyu, Chen Hao, Wang Ting, et al. Strength analysis of decompression tower bottom pump's pump casing based on fluid-solid coupling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2):159-164.
- [5] 甘书峰,祁艳会,曹伟,等.一种带有导电片嵌件塑料件的二次成型方法[J].工程塑料应用,2014,42(9):46-48.
Gan Shufeng, Qi Yanhui, Cao Wei, et al. A method for two-stage molding of plastic part with electric inserts[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(9):46-48.
- [6] Qiu J, Tsuboi A, Izumi K, et al. Effects of interfacial morphology on the welding strength of injection-molded polyamide[J]. Polymer Engineering Science, 2007, 47(12):2164-2171.
- [7] Jiang Genjie, Wu Hong, Yan Bowen, et al. Reinforcement of solid-melt interfaces for semicrystalline polymers in a sequential two-staged injection molding process[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2009, 47(11):1112-1124.
- [8] 王进文.TPV 注塑料件、把手及二次成型件的设计[J].世界橡胶工业,2010,37(1):25-28.
Wang Jinwen. TPV injection molded parts, the handle and the second molded parts design[J]. World Rubber Industry, 2010, 37(1):25-28.
- [9] 陈茂顺,孙玲,辛勇,等.双色高光成型塑料件的结构设计技术[J].塑料工业,2012,40(2):34-37.
Chen Maoshun, Sunling, Xin Yong, et al. Structure design technique of double-injection high-gloss surface plastic parts[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(2):34-37.
- [10] 潘丽娜.微型汽车发动机台架实验实时监测及预警系统研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
Pan Lina. Research on the real-time monitoring and early warning system for the engine bench test[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [11] 王泽众.热管理系统在发动机台架试验的优化应用[J].内燃机工程,2015,37(3):30-32.
Wang Zezhong. Optimization and application of thermal management system in engine test bench[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 37(3):30-32.
- (上接第 56 页)
- [5] 王樵,马朝臣,施新.应用三维 CFD 计算发动机进气门流量系数[J].车用发动机,2012,35(6):18-20.
Wang Qiao, Ma Chaochen, Shi Xin. Utilizing 3D CFD to calculate ICE inlet valve flow coefficient[J]. Vehicle Engine, 2012, 35(6):18-20.
- [6] 张方超,杨建忠,乔卉,等.碳纤维及其复合材料在汽车行业的应用及展望[J].合成塑料,2013,42(6):26-29.
Zhang Fangchao, Yang Jianzhong, Qiao Hui, et al. Application and prospect of carbon fiber and CFRP in automobile industry[J]. Synthetic Fiberin China, 2013, 42(6):26-29.
- [7] 任昌义.碳纤维增强复合材料在汽车副车架中的应用[J].工程塑料应用,2015,43(1):69-71.
Ren Changyi. Application of carbon fiber reinforced composites on automotive auxiliary frame[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):69-71.
- [8] 廖明明,林伟键.发动机台架试验浅析[J].装备制造技术,2010,38(4):167-169.