

运用一维热力学仿真分析改善汽油机低速扭矩

IMPROVE LOW-END TORQUE OF GASOLINE ENGINE USING 1D THERMODYNAMICS SIMULATION

王占峰¹ 尹伊郡¹ 杜维明¹

中国第一汽车股份有限公司技术中心发动机部

摘要: 为了提升车辆的动力性能,且维持良好的车辆经济性,本文运用一维热力学分析工具对某 A 级车匹配的汽油机低速扭矩特性进行系统分析,从进气歧管、排气歧管、进排气凸轮型线、进排气道等几个方面研究了提升汽油机低速扭矩的可行性。验证了发动机低速扭矩提升后,对车辆动力性及经济性带来的优势。

关键词: 热力学、仿真、扭矩

ABSTRACT: In order to enhance the vehicles' dynamic performance meanwhile maintaining a fair economic performance as well, we analysis low-end torque characteristics of gasoline engine matching A class car using 1D thermodynamics software. We study on the feasibility of improving low-end torque including intake manifold, exhaust manifold, camshaft curve and port. Finally, the fact that vehicle dynamic performance could be improved when low-end torque of gasoline engine has been risen.

KEYWORDS: Thermodynamics、Simulation、Torque

1. 概述

在中国,随着城市道路交通越来越拥挤,车辆的启停也越来越频繁,发动机的低速性能直接影响车辆的起动和加速性能。提升发动机低速扭矩的理论依据是加大发动机低转速的扭矩储备系数,扭矩储备系数越大,扭矩增大的越快,发动机克服短期超负荷的能力越强,自适应能力越强。对于自然吸气汽油机,提高低转速充气效率、增强低转速进入缸内气体的滚流进而改善低转速的燃烧以及提高压缩比等措施都可以改善发动机的低速扭矩特性。本文运用一维热力学分析软件 GT-Power 优化发动机性能参数,提出提高发动机低速扭矩的策略。

2. 汽油机主要参数

发动机主要的参数如下表 2.1 所示:

表 2.1 发动机主要参数

发动机主参数	
缸径 (mm)	76.5
冲程 (mm)	86.9
排量 (L)	1.598
缸数	4
发火顺序	1-3-4-2
压缩比	10.5
燃油标号	RON 93
性能目标	

额定功率/转速 (kW/ r/min)	80/5500
最大扭矩/转速 (N m/ r/min)	155/3800
升功率 (kW/L)	50
升扭矩 (N m/L)	97
排放水平	欧 V

3. 热力学仿真模型

通过对原机的性能试验测取原机性能及标定仿真模型所需要的气缸内压力、进排气歧管压力等数据。应用 GT-Power 软件建立并校核发动机的仿真模型。下图 3.1 为热力学仿真模型示意图。针对该汽油机的气门型线、进气歧管参数、排气歧管型式及参数、进排气道结构等参数进行调整与优化，分析各种参数对发动机低速性能的影响，提出最终的优化方案。

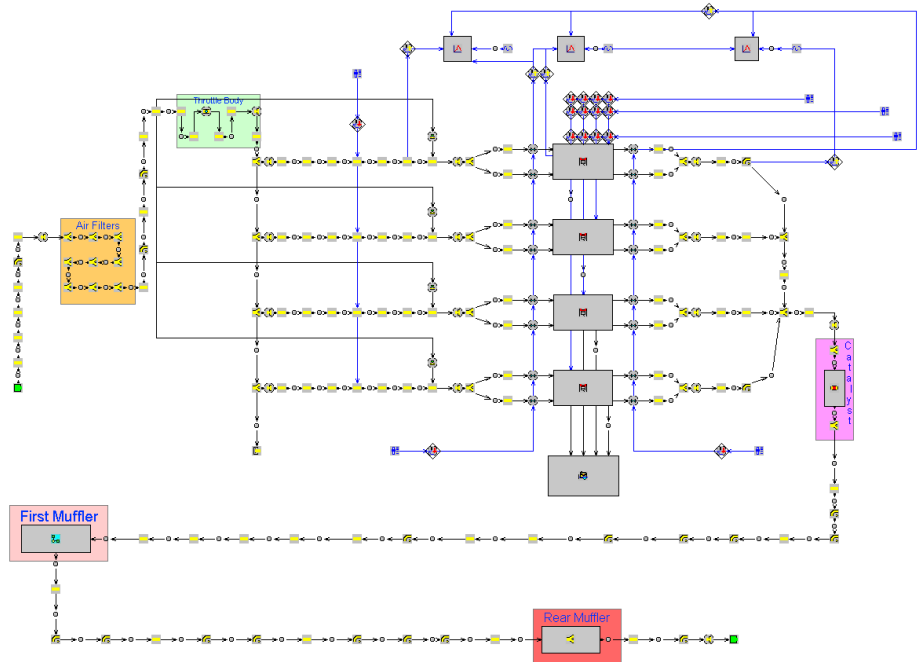


图 3.1 热力学仿真模型示意图

4. 提高低速扭矩策略研究

4.1 进气歧管参数

汽油机的进气歧管对于发动机的性能影响是非常大的，发动机的进气是通过进气歧管内的压力波动作用完成换气。歧管长度和直径改变会改变进气歧管内压力波动，一般长度越长、直径越小，发动机的低速充气效率会越高。但是同时，相应的会降低发动机中、高转速的充气效率。因此在优化进气歧管参数提高提速扭矩的同时需要兼顾发动机中、高转速的性能。

本论文选择低端转速 1000 r/min、扭矩点转速 3800 r/min、功率点转速 5500 r/min 进行长度和直径的两变量 DOE 优化，并最终在保证额定功率和最大扭矩的同时选择对发动机低

转速最有利的参数。图 4.1 为进气歧管参数的 DOE 优化结果，图中蓝色虚线所围成的区域为满足额定功率要求的参数范围，红色虚线所围成的区域为满足最大扭矩要求的参数范围，绿色实线所围成的区域为既满足额定功率要求又满足最大扭矩要求的重叠区域。从 1000 r/min 工况下歧管参数的 DOE 优化看，随着歧管长度的增加、歧管直径的减小，低端的性能会略微有所提升，同时需要考虑发动机在车辆空间的布置，最终选择歧管长度为 500 mm、歧管直径为 48mm，而原机的进气歧管长度为 480mm、直径为 50mm。

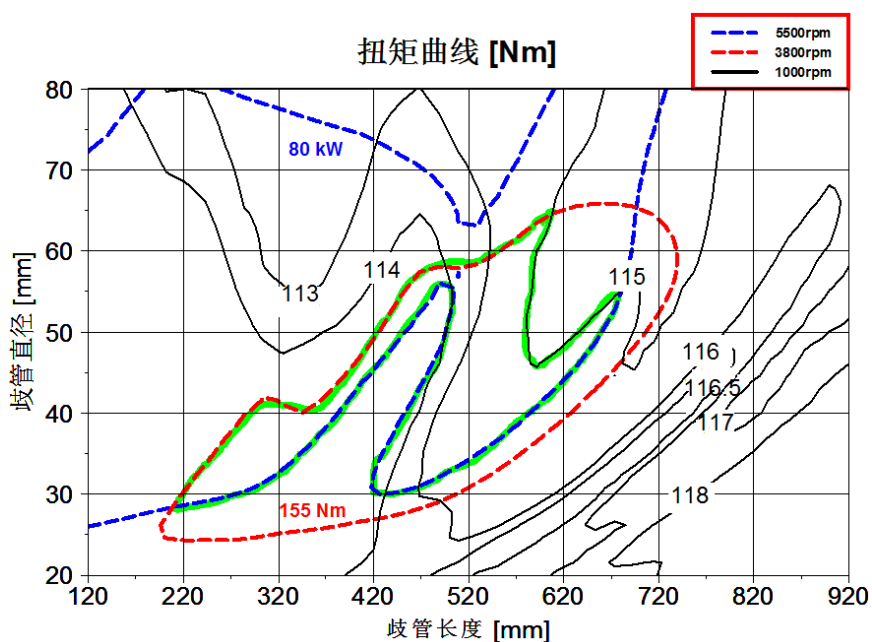


图 4.1 进气歧管参数优化结果

图 4.2 为新的进气管参数与原进气歧管参数的外特性能比较，可以看出通过进一步优化进气歧管参数，发动机低端扭矩会有 1~2 Nm 的提高，对扭矩点的性能基本没有影响，而额定功率仅仅损失 0.3 kW，仍然满足目标要求。

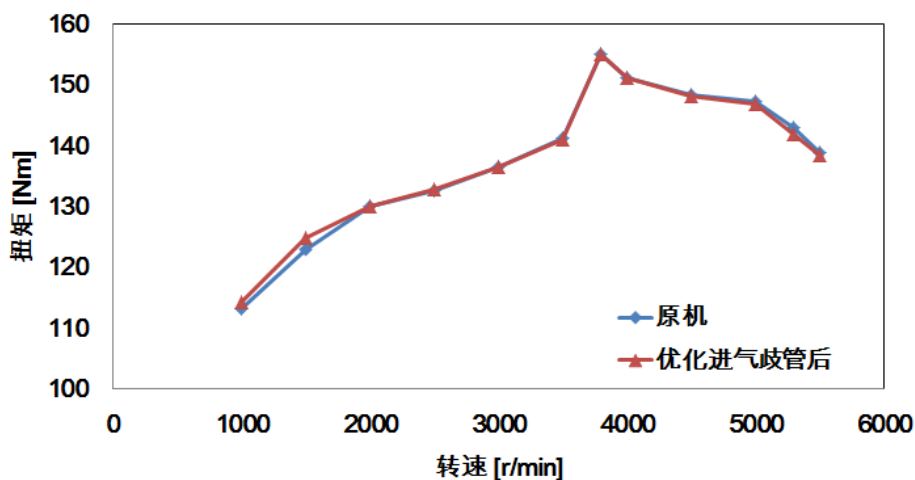


图 4.2 进气歧管优化前后性能比较

4.2 排气歧管型式

排气歧管的结构型式及参数，决定着各气缸间排气互相干扰的程度和排气的流畅程。排气歧管设计的好，可以更加合理的利用发动机的排气能量，对发动机动力性能的提升和经济性的改善都有帮助。原机的排气歧管方案长度比较短且 1 缸与 2 缸的歧管交汇、3 缸与 4 缸的歧管交汇，这样会产生比较严重的排气干扰，如下图 4.3 所示。经过优化设计，综合考虑车辆布置情况，改变排气歧管的结构型式为 4 个独立的歧管，且长度较长，如下图 4.4 所示。这样可以减少各缸间的排气干扰，充分利用发动机的排气能量。考虑到三元催化器的快速起燃，排气歧管的长度也不宜过长。

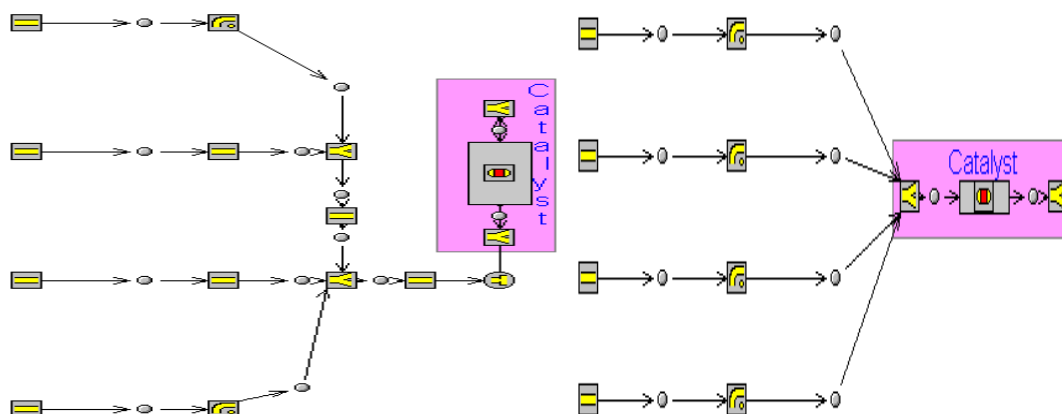


图 4.3 原机排气歧管结构型式图 4.4 优化后排气歧管结构型式

图 4.5 为改变排气歧管型式后的外特性比较，可以看出优化后的排气歧管对 3000 r/min 和 3500 r/min 工况扭矩提升明显，由于降低了各缸之间的排气干扰，对整个外特性曲线都略有提升。3000 r/min 工况下的扭矩提升 7.7 Nm，因此下面对 3000 r/min 工况的压力波变化进行详细的分析。

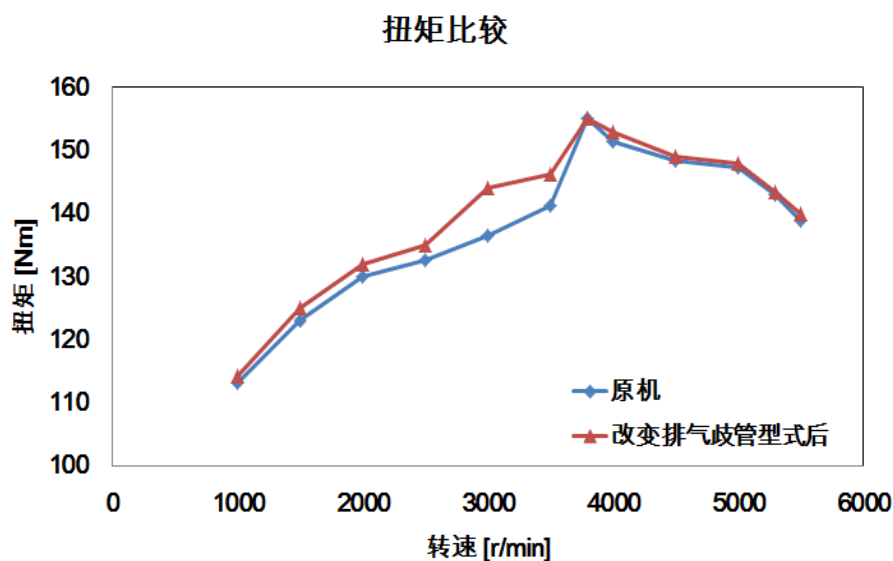


图 4.5 排气歧管型式改变前后性能比较

图 4.6 和 4.7 是两种排气歧管 3000 r/min 工况的压力波曲线, 从图中可以看出, 优化后的排气歧管, 当进气门开启 0-1mm 时, 进气压力大于缸内压力; 进气门开启 2.5mm 时, 进气压力与缸压差值较大。使进气顺畅, 充气效率提高。另外进气门开启初期, 优化后排气歧管的进气压力大于排气压力, 残余废气少, 利于燃烧稳定。

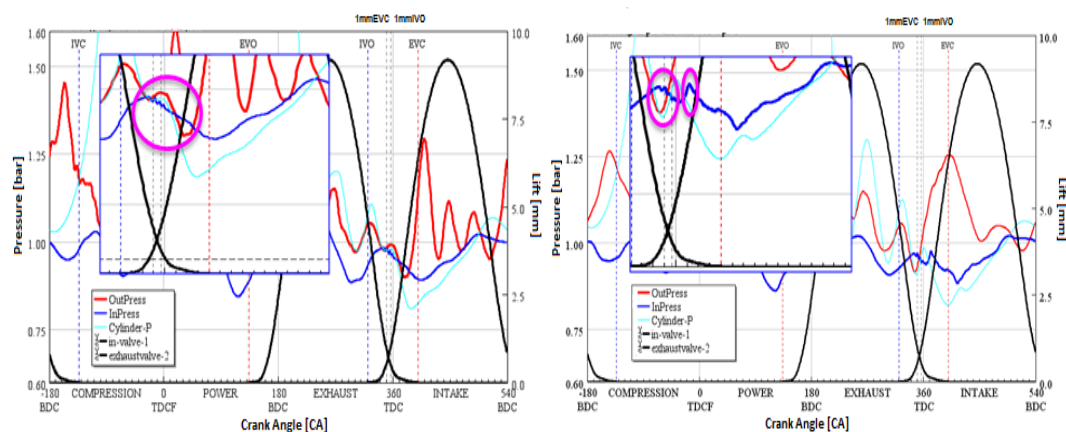


图 4.6 原机排气歧管压力波图 4.7 优化后排气歧管压力波

4.3 气门型线

进排气门型线和相位影响着发动机的充气效率和泵气损失, 因此, 它是提高发动机性能很重要的参数。应用热力学软件对气门升程和气门包角进行 DOE 优化, 下图 4.8 为优化后的气门型线与原型线的对比图, 减小包角和降低升程可以降低发动机低转速工况的泵气损失, 但会降低高转速工况的充气效率。

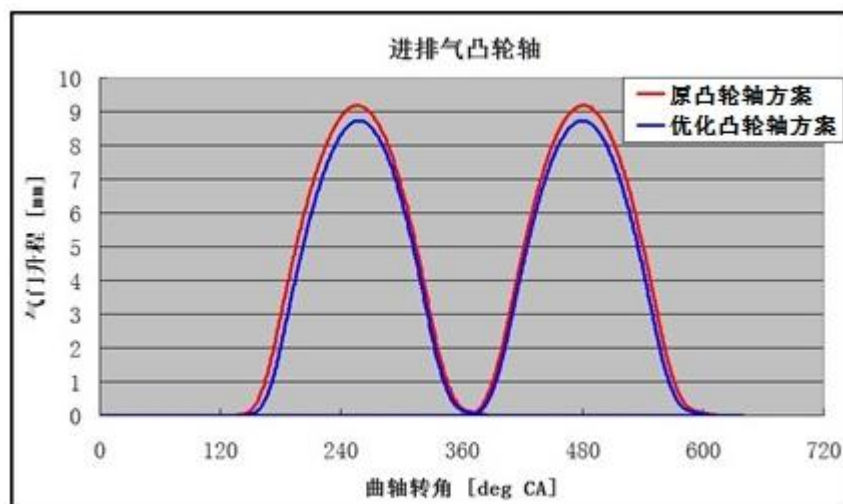


图 4.8 气门型线对比图

图 4.9 为优化后凸轮轴的性能对比图, 可以看出优化后的凸轮型线使得发动机低转速工况扭矩提高 3Nm 左右, 但同时高转速工况的性能下降 2 Nm 左右。

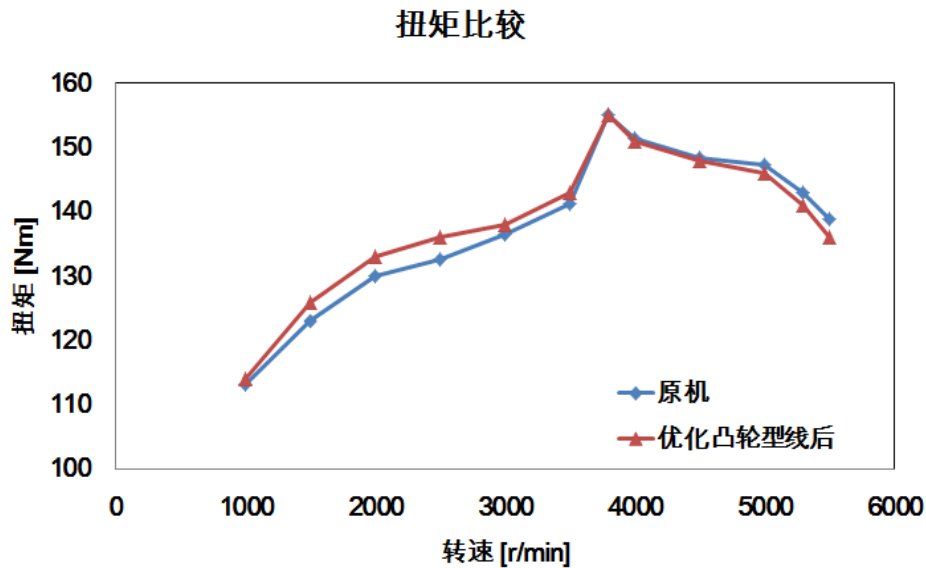


图 4.9 优化后凸轮轴的性能对比图

4.4 气道结构参数

气道的结构参数对发动机的充气效率和缸内燃烧有非常重要的影响。高流量的气道能够提高发动机的充气效率，在发动机的高转速工况尤为明显；高滚流的气道能够增强缸内混合气的流动，改善燃烧，能够提高发动机低转速工况的性能并改善部分负荷工况的燃油经济性。图 4.10 和图 4.11 为优化前后的气道参数比较，为了使高转速工况的动力性能不降低过多，在保证气道流量特性的前提下尽量提高气道的滚流。优化后的平均气道流量系数降低 0.01，而平均滚流比提高 0.5。

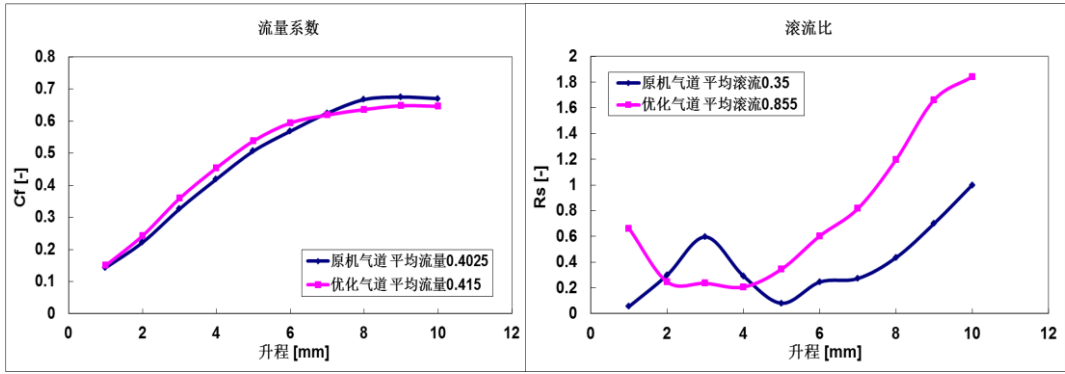


图 4.10 气道流量系数比较图 4.11 气道滚流比比较

图 4.10 为优化后气道的性能对比图，可以看出优化后的气道除了高转速性能略微下降外，其余工况的性能基本没变化。

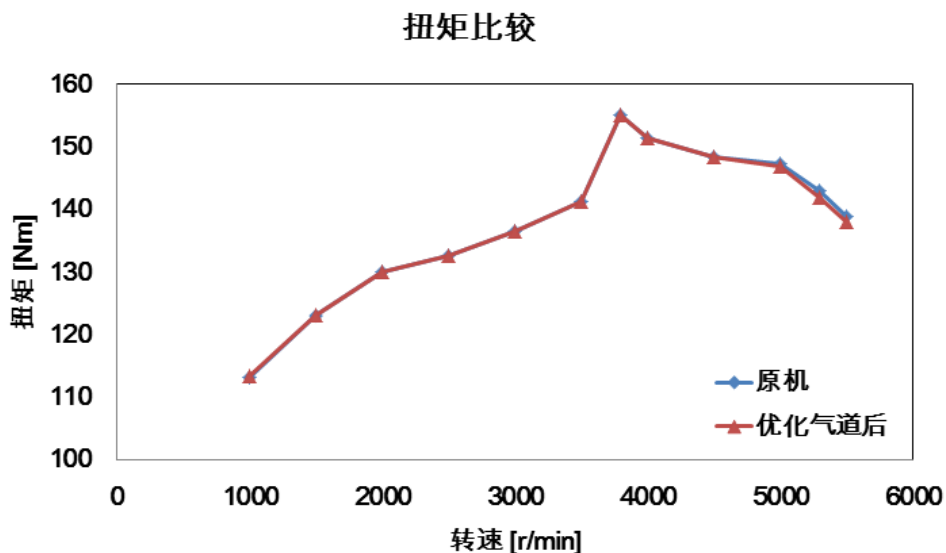


图 4.10 优化后气道的性能对比图

5. 最终性能及车辆仿真结果

将上述所有改进低速扭矩的技术措施应用到发动机后再进行热力学仿真。图 5.1 为最终优化方案与原机的性能对比图，通过优化进气歧管、排气歧管、进排气凸轮型线、气道后发动机的低转速扭矩提升 7% 左右，高转速工况性能基本没有损失。

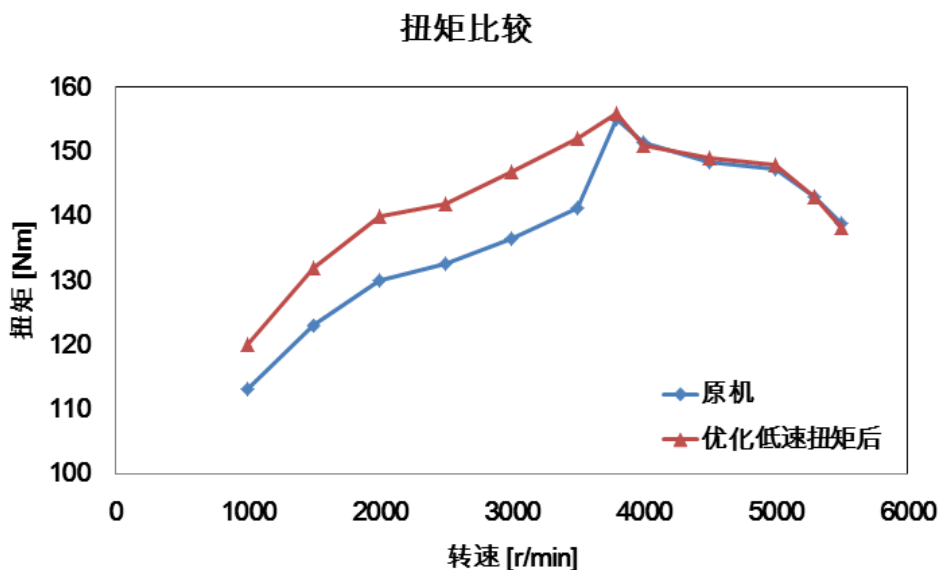


图 5.1 优化低速扭矩的性能对比图

表 5.1 是车辆的动力性能模拟计算结果，可以看出，车辆的最高车速基本保持一致，0~100km/h 加速时间及最高档、次高档加速时间均减少，最低档的最大加速度增加 0.11 m/s^2 。表明通过改善发动机的低速扭矩可以明显的提升车辆的动力性能。

表 5.1 车辆动力性能仿真结果

项目	单位	原机车辆性能	提高低速扭矩后性能
最高车速	km/h	186	186
加速时间 [0~100 km]	s	14.7	14
最低档最大加速度	m/s ²	3.44	3.55
最高档 50~100km/h 加速时间	s	29.4	25.7
次高档 50~100km/h 加速时间	s	18.3	16.6

6. 总结及不足

经过热力学仿真分析,在保证发动机高速性能不损失的前提下,通过进一步优化进气歧管参数、改变排气歧管型式、进一步优化进排气门型线以及气道的结构参数,最终将原有发动机的低速性能提高 5%。基于优化后的结果,进行车辆动力性能的仿真分析,使得车辆的 0~100 km/h 加速时间减少 4.8%,车辆最大加速度时间提高 3.2%。

基于热力学分析结果,我们仅仅完成了针对发动机低速扭矩改善的方案设计与车辆仿真模拟,具体的改善效果还需要进一步的试验进行验证。

参考文献

- [1] 吴建华. 汽车发动机原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 邓康烟, 方适应, 朱义伦. 汽油机进气结构参数对换气过程的影响研究 [J]. 内燃机工程, 2000. 4.
- [4] 许元默, 帅石金, 王建昕. 进气歧管对电喷汽油机充气效率的影响 [J]. 内燃机工程, 2004. 1.