

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.10.001

# 直喷汽油机涡轮增压性能匹配的三线工况数值模拟法

李祖成<sup>1</sup>, 张青<sup>1,2</sup>, 钟德妹<sup>1</sup>, 瞿尚胜<sup>2</sup>, 张力<sup>1</sup>, 张韬<sup>1</sup>

(1.重庆大学汽车工程学院, 重庆400044; 2.重庆长安汽车股份有限公司, 重庆400023)

**摘要:**涡轮增压器与汽油机数值匹配的传统研究主要侧重于外特性工况,但单一的外特性工况匹配合理不能保证涡轮增压器与汽油机在整个工作范围都匹配合理。针对涡轮增压器数值匹配过程中仅研究外特性工况的局限,阐述了三线工况法的基本原理,通过GT-Power软件建立一款直喷涡轮增压汽油机的全负荷热力学模型,并将该模型向部分负荷工况扩展为适用于三线工况法的热力学模型,最后将热力学模型应用于3款增压器的匹配研究。结果表明:三线工况法可直观地反映出原增压器与发动机在整个工作范围的匹配问题,利用此评价方法重新选配增压器后,可提升增压器与发动机在整个工作范围的匹配性能。三线工况法克服了仅研究外特性工况的局限,为预选及优化增压器提供了一种数值评价方法。

**关键词:**直喷;汽油机;涡轮增压器;三线工况;数值匹配

**中图分类号:**TK411.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2018)10-001-08

## The method of three-line condition numerical simulation of turbocharger performance matching for GDI gasoline engine

LI Zucheng<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>1,2</sup>, ZHONG Demei<sup>1</sup>, QU Shangsheng<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>

(1.College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China;

2.Chongqing Changan Automobile Company Limited, Chongqing 400023, P.R.China)

**Abstract:** The traditional research of turbocharger and gasoline engine numerical matching focuses on full load condition, but the reasonable matching for single working condition of full load cannot guarantee reasonable matching of turbocharger and gasoline engine throughout the scope of work. For the limitation of turbocharger and gasoline engine numerical matching on single full load condition, the basic principle of the three-line condition method was introduced. The full load thermodynamic model of direct injection turbocharged gasoline engine was built by using GT-Power software, and the model was extended to part load condition to be applied to the thermodynamic model of the three-line condition method. The thermodynamic model was applied to the matching research of three turbochargers. The results indicate that the three-line condition method can directly reflect the problem of the original turbocharger and engine matching throughout the scope of work, and the matching performance can be improved by using this evaluation method to rematch turbochargers. The method of three-line condition overcomes the limitation of

**收稿日期:**2018-05-12

**基金项目:**重庆市重点产业共性关键技术创新专项资助项目(CSTC2015ZDCY-ZTZX60014)。

Supported by the Key Technology Innovation Special Project of Chongqing Key Industry Generic (CSTC2015ZDCY-ZTZX60014).

**作者简介:**李祖成(1991—),男,重庆大学硕士研究生,主要从事内燃机工作过程及其控制研究,(E-mail)dljxfdj@163.com。

张力(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)cqucl@163.com。

studying only on single full load condition, and provides a numerical evaluation method for the preselection and optimization of turbochargers.

**Keywords:** direct-injected; gasoline engine; turbocharger; three-line condition; numerical matching

涡轮增压器与发动机的匹配是影响增压发动机性能的重要因素<sup>[1-3]</sup>,其匹配的优劣直接影响到增压发动机的动力性、燃油经济性、排放和 NVH 品质<sup>[4-7]</sup>。相比于柴油机,汽油机因其热负荷高、易爆震、转速负荷变化宽以及涡轮增压技术在汽油机上应用时间短等问题<sup>[8-10]</sup>,使得如何保证涡轮增压器与汽油机在整个工作范围都合理匹配,成为汽油机涡轮增压器匹配研究的关键和难点之一。

为实现涡轮增压器与汽油机的合理匹配,相关学者在汽油机涡轮增压器匹配方面展开了一系列的研究:如文献[11]为改善一款自然吸气汽油机的动力性和燃油经济性,提出通过数值模拟对该汽油机选配合适型号增压器的方法;文献[12]为克服涡轮增压器与汽油机单工况点匹配的局限,提出基于整车动力性要求匹配涡轮增压器的理论;文献[13]为降低增压汽油机残余废气量以减小爆震倾向,提出通过匹配脉冲增压系统以提高扫气效率降低残余废气量的方案;文献[14]为实现增压直喷汽油机低速高扭矩特性,提出匹配单涡道涡轮增压器并结合 VVT 联合控制的方案。

但以上研究主要侧重于涡轮增压器在汽油机外特性工况的匹配,不能反映涡轮增压器在汽油机部分负荷工况及整个汽油机工作范围的匹配情况,而关于涡轮增压器与汽油机在整个工作范围的匹配研究鲜见报道。笔者通过三线工况法研究一款直喷增压汽油机与其增压器在整个发动机工作范围的匹配,根据研究后发现的问题选配两款新的增压器进行重新匹配,最终找出其中性能最佳的增压器匹配发动机。

### 1 三线工况法的基本原理

如图 1 所示为增压器与发动机联合运行特性图,图中发动机低速稳定运转线(增压器介入时发动机最低转速的负荷特性)、外特性线和额定转速线(额定转速的负荷特性)“三线”所包围的面积为发动机稳定运行范围<sup>[15]</sup>。增压器与发动机的合理匹配应当使该运行范围处于增压器的高效工作区,且该范围的边界线距增压器的喘振线、最高转速线和阻塞线有足够的安全距离,如图 1(a)所示。当发动机的工作范围较宽时,若仅考虑外特性工况的匹配,有可能会出现问题如图 1(b)和(c)所示。如图 1(b)所示,虽压气机在发动机外特性工况的效率很高,但就整个发动机工作范围看,压气机在发动机中、低负荷工况的效率偏低;再看图 1(c),虽发动机外特性低速点距压气机喘振边界有较宽的距离,但该转速点的负荷特性线已穿越压气机的喘振边界,压气机在这些工况点极易发生喘振现象。所以在增压器数值匹配过程中,单一的外特性工况匹配是有局限的。而运用三线工况法匹配增压器只需考虑增压器工作时发动机最低转速的负荷特性、外特性和额定转速的负荷特性,便可以直观地反映整个发动机运行范围与增压器的匹配情况,相对于仅研究外特性工况该研究方法更全面。

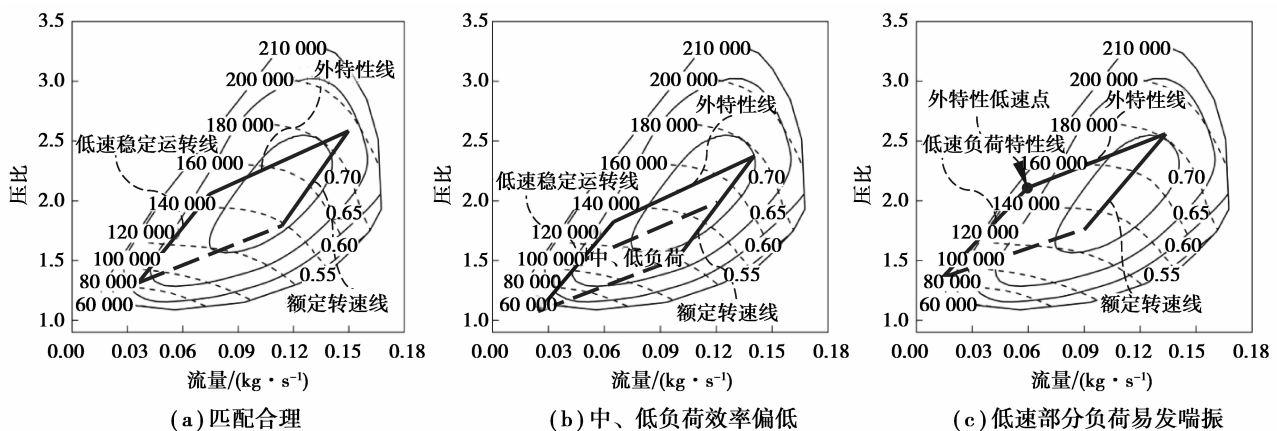


图 1 增压器与发动机联合运行特性

Fig.1 Joint operation characteristic of turbocharger and engine

## 2 三线工况法的热力学模型

### 2.1 热力学模型建立的主要思路及其预期效果

本研究的目的是运用三线工况法克服增压器数值匹配中仅研究外特性工况的局限,并为预选及优化增压器提供一种数值评价方法。由于三线工况法涉及到发动机全负荷工况和部分负荷工况,所以所建热力学模型应当适用于这两种工况的特性研究。为此,三线工况法的热力学模型建模思路为:根据一款直喷增压汽油机稳态台架测试数据,先建立发动机的全负荷热力学模型,再将该模型扩展为适用于发动机部分负荷工况研究的部分负荷热力学模型。最终的预期效果是:将不同增压器的特性数据输入以上模型中,便可通过模型计算结果直观地评价不同增压器与同一发动机三线工况的匹配特性。

### 2.2 全负荷热力学模型

笔者利用 GT-Power 软件根据一款 1.5 L 直喷增压汽油机的结构参数、增压器特性数据、机械损失测试数据、气门升程测试数据、气阀气道稳流测试数据、空燃比测试数据和空滤器阻力特性测试数据等作为边界条件建立了如图 2 所示的直喷增压汽油机热力学模型。该模型的控制模块主要包括增压压力控制模块、爆震控制模块和中冷器控制模块。其中,增压压力控制模块通过对排气旁通阀开度的调节实现对压气机出口压力的控制,模拟实际发动机增压压力的控制过程;爆震控制模块通过对燃烧参数的调节实现对爆震因子的控制,模拟实际发动机爆震的抑制过程;中冷器控制模块通过对换热参数的调节实现对中冷后流体温度的控制,模拟实际发动机中冷器的工作过程。

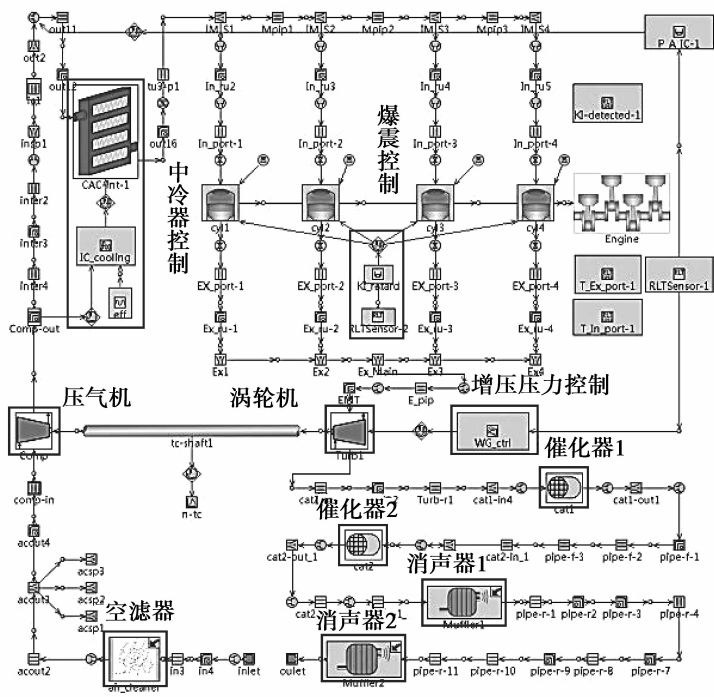


图 2 直喷增压汽油机热力学模型

Fig.2 The thermodynamic model of GDI turbo-charged gasoline engine

为保证模型的准确性,利用全负荷测试数据对发动机的扭矩、油耗、增压压力、涡后压力、涡前温度和中冷后温度等多参数进行标定,具体标定情况如图 3 所示。从图中可以看出各参数模拟值与测试值基本一致,偏差控制在工程计算允许的范围内,表明该模型可以很好地表征该发动机的全负荷性能,利用该模型可计算增压器与发动机全负荷工况的匹配特性。

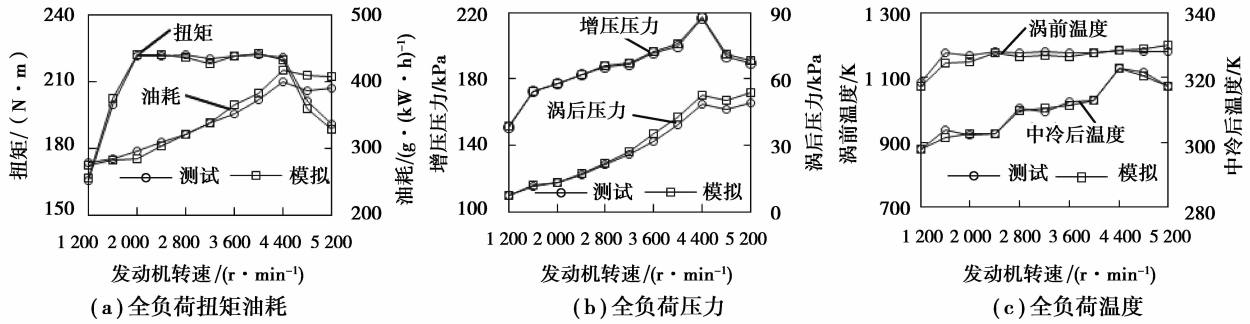


图 3 发动机全负荷多参数标定

Fig.3 Multi-parameter calibration of engine on full load condition

### 2.3 热力学模型向部分负荷工况的扩展

三线工况法与传统外特性工况法最大的区别是考虑了发动机的部分负荷工况,这是热力学模型最关键的地方。因此,需要将校正后的全负荷热力学模型向部分负荷工况扩展。在扩展建模中需要先将发动机各转速下部分负荷的目标爆震因子、进气可变气门正时、排气可变气门正时、喷油器特性参数、燃烧模型参数和中冷器换热参数等转化成随转速和负荷变化的 MAP 数据,并将这些 MAP 数据输入 GT-Power 软件中,然后各模块通过直接调用相关 MAP 数据升级为最终的部分负荷热力学模型。计算某一转速的负荷特性时,只需输入计算转速和不同负荷度所对应的节气门开度参数即可。为保证部分负荷热力学模型的准确性,现利用各转速负荷特性测试所得数据对部分负荷热力学模型进行标定,如图 4 为发动机 1 200 r/min 和 5 200 r/min 的部分负荷多参数标定情况,从图中看出部分负荷各参数模拟值与测试值基本一致,偏差控制在工程计算允许的范围,表明该模型可以很好地表征该发动机的部分负荷性能,可利用该模型计算增压器与发动机部分负荷工况的匹配特性。

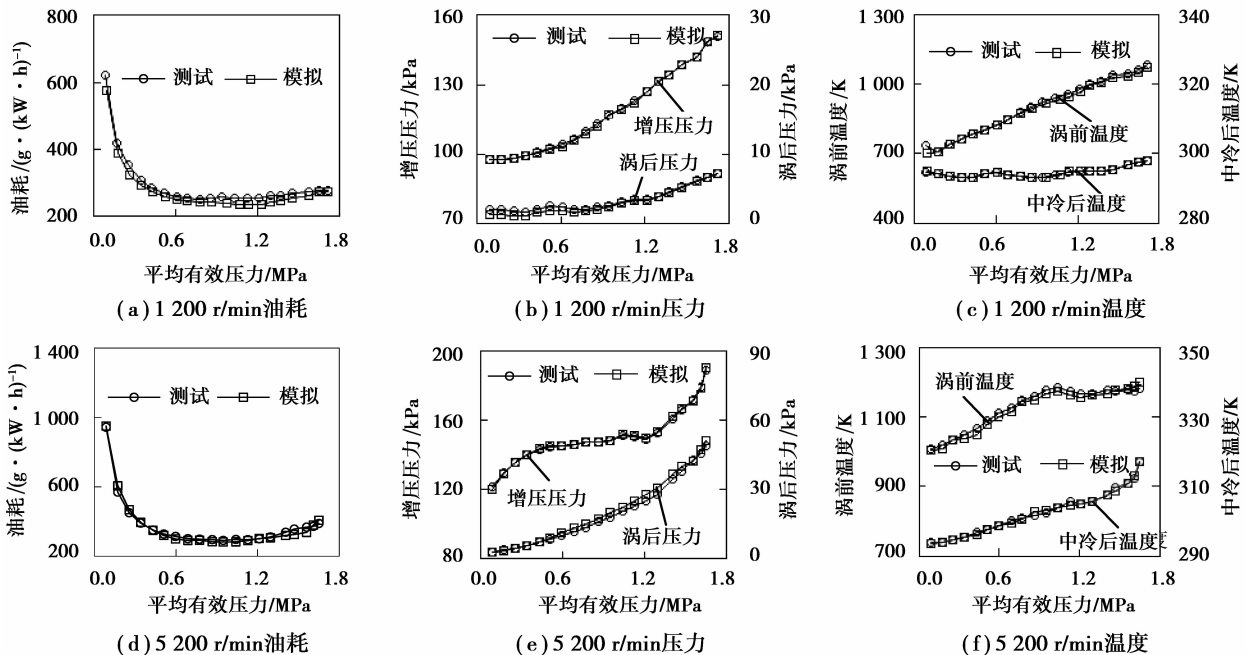


图 4 发动机部分负荷多参数标定

Fig.4 Multi-parameter calibration of engine on part load condition

## 3 三线工况法的应用

### 3.1 原增压器的匹配特性

笔者运用三线工况法对原增压器的匹配特性进行研究。由于增压器在发动机 1 200 r/min 中、高负荷才完全介入工作,所以为了计算方便,低速负荷特性线选取发动机 1 200 r/min 中、高负荷段(55%~100%负荷

度间隔为 5% 的 10 个负荷点)的负荷特性;额定转速线为发动机额定转速 5 200 r/min 的负荷特性(5%~100%负荷度间隔为 5% 的 20 个负荷点);外特性线为发动机 1 200 r/min 到 5 200 r/min 的外特性。如图 5 为原增压器与发动机的联合运行特性,从图中可以看出原增压器与发动机的匹配存在以下问题。首先,虽“三线”包围的范围处于压气机的高效区,但这款压气机的总体效率偏低(最大效率只有 70%,且高效区范围小);其次,发动机外特性线高转速点(4 400 r/min 时)距压气机最高转速线太近,很容易在发动机极端工况引起压气机超速;再者,发动机 1 200 r/min 时的负荷特性线过于靠近压气机的喘振边界,特别是负荷度相对较低的工况(接近 55% 负荷的工况)几乎接近喘振边界,这样会造成压气机在这些工况点极易发生喘振现象。为分析原增压器的压气机在低速时发生喘振现象的可能性,现通过喘振裕度<sup>[16]</sup>对其进行评价。其中,喘振裕度的公式定义为

$$\phi_{\text{surge}} = \frac{m_{\text{actual}} - m_{\text{surge}}}{m_{\text{surge}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $\phi_{\text{surge}}$  为喘振裕度; $m_{\text{actual}}$  为实际运行点的质量流量,kg/s; $m_{\text{surge}}$  为同增压比下压气机喘振线所对应的流量,kg/s。为保证增压器在不同场合都能稳定工作,公式(1)要求压气机的喘振裕度在 20% 以上<sup>[16]</sup>。

如图 6 为发动机 1 200 r/min 时原增压器的压气机喘振裕度,从图中可以看出发动机 1 200 r/min 时只有 2 个高负荷点压气机的喘振裕度在 20% 以上,其他负荷点都低于 20%。若仅评价外特性工况,则原增压器的压气机在发动机 1 200 r/min 最高负荷工况点(外特性点)的喘振裕度满足规定要求,但实际上原增压器的压气机在发动机 1 200 r/min 其他负荷点的喘振裕度都低于 20%,在这些工况点极易发生喘振现象。总的来看,原增压器与发动机的匹配还有一定的提升空间,需要通过匹配新的增压器来挖掘这款发动机的性能。

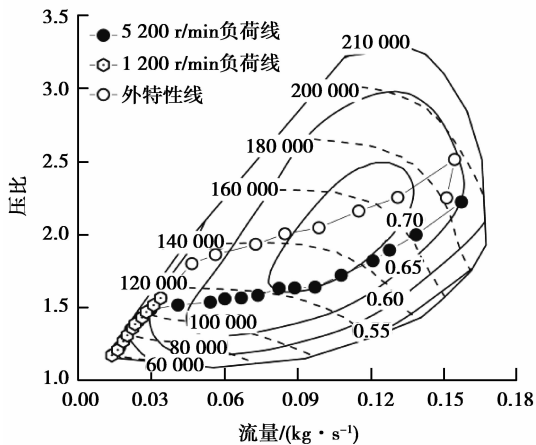


图 5 原增压器与发动机联合运行特性  
Fig.5 Joint operation characteristic of original turbocharger and engine

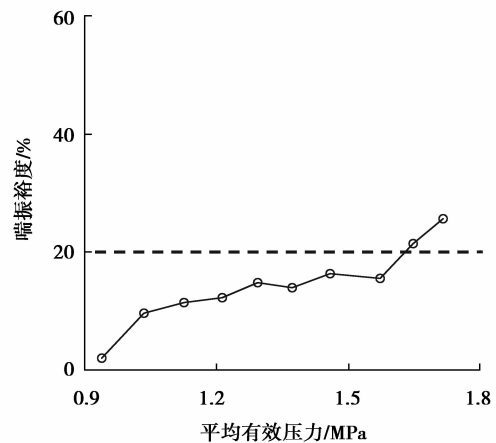


图 6 发动机 1 200 r/min 时原压气机喘振裕度  
Fig.6 Original compressor surge margin at 1200r/min engine speed

### 3.2 新增压器的匹配特性及发动机性能测试

#### 3.2.1 新增压器的选型

根据计算结果,笔者选择了 2 款新增压器(增压器 1 和增压器 2)对发动机进行重新匹配。如图 7 所示为 2 款新增压器的工作范围,从图中看出这 2 款新增压器的工作范围与原增压器基本相近,但喘振边界相对于原增压器均向左移动,可提高与发动机匹配后的喘振裕度。此外,这 2 款增压器的总体效率都略高于原增压器(具体详见后续 MAP 图),合理匹配后可提升发动机的性能。

#### 3.2.2 新增压器的匹配特性对比

如图 8 和图 9 为 2 款新增压器与发动机的联合运行特性。从图 8 和图 9 中可以看出发动机的工作范围都处于 2 款新增压器的高效区,且发动机 1 200 r/min 时的负荷特性线

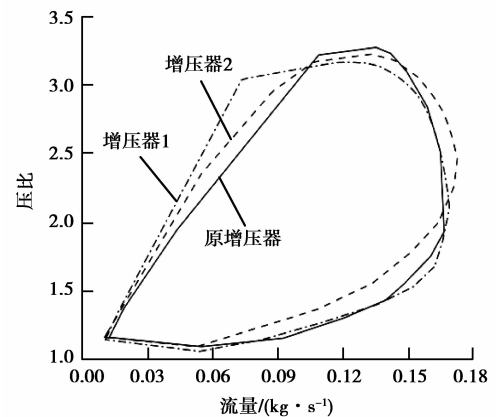


图 7 新增压器工作范围  
Fig.7 The working scope of the new turbocharger

更偏离 2 款新增压器的喘振边界。此外,从图中还可以看出发动机外特性线高转速点距离 2 款新增压器的最高转速线都有充足的安全距离。

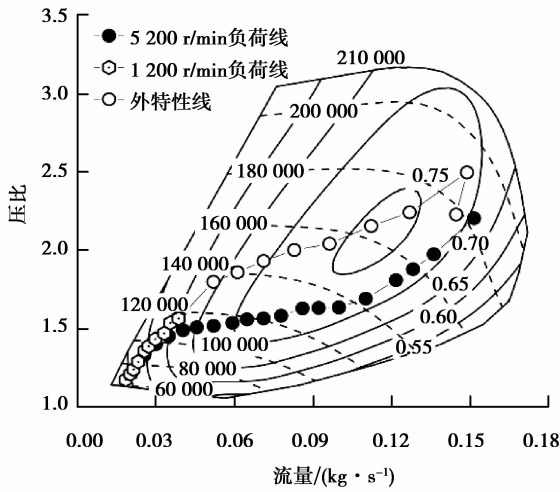


图 8 增压器 1 与发动机联合运行特性  
Fig.8 Joint operation characteristic of turbocharger 1 and engine

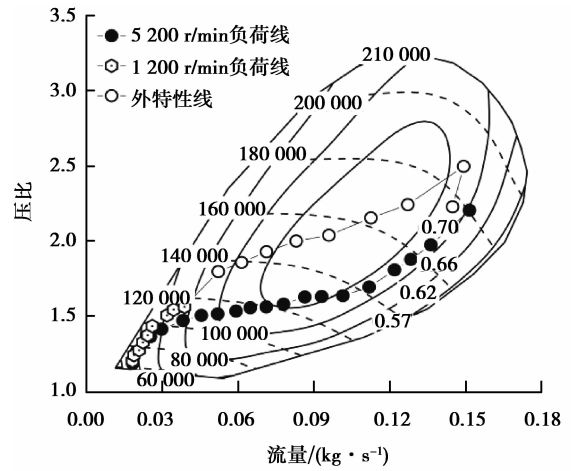
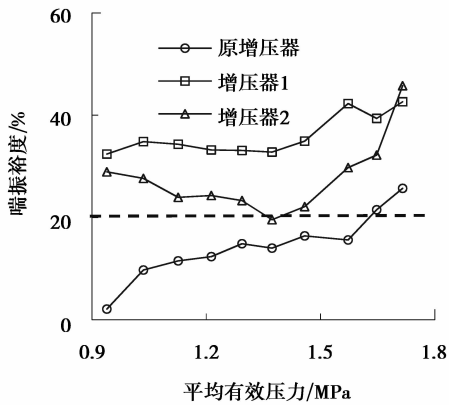
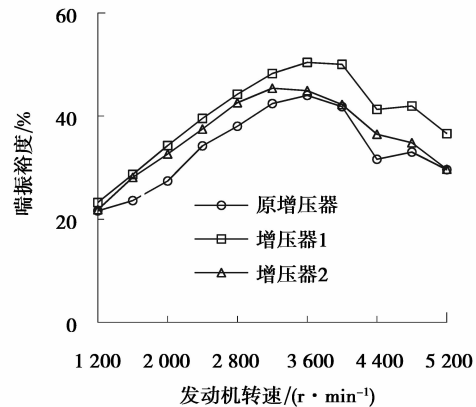


图 9 增压器 2 与发动机联合运行特性  
Fig.9 Joint operation characteristic of turbocharger 2 and engine

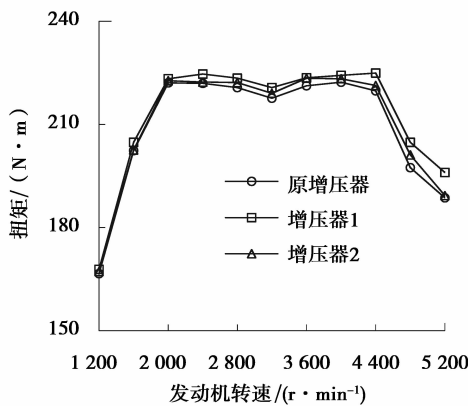
为直观地对比 2 款新增压器的匹配特性与原增压器的差异,现详细对比 3 款增压器发动机 1 200 r/min 时的压气机喘振裕度、外特性压气机效率以及外特性扭矩和油耗,具体对比如图 10 所示。



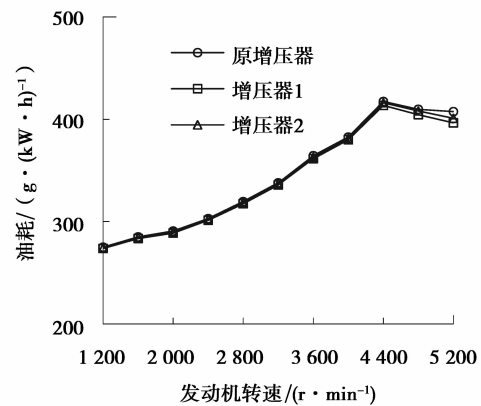
(a) 1 200 r/min 压气机喘振裕度



(b) 外特性压气机效率



(c) 外特性扭矩



(d) 外特性油耗

图 10 3 款增压器与发动机匹配结果对比

Fig.10 The comparison of matching results of three turbochargers and engine

从图 10 中可以看出,匹配 2 款新增压器后,虽油耗改善不明显,但发动机 1 200 r/min 时的压气机喘振裕度、外特性压气机效率以及外特性扭矩都有不同程度的提升,且增压器 1 提升最明显。其中,匹配增压器 1 后发动机 1 200 r/min 时压气机的喘振裕度最大提升 30.2%(图中第 1 个负荷点时);外特性压气机效率匹配点最大提升 4.8%(发动机 4 400 r/min 时);外特性扭矩最大提升 3.9%(发动机 5 200 r/min 时)。从计算结果可知,增压器 1 不仅可以改善原增压器与发动机匹配存在的问题,还可提高发动机的动力性,故可选择增压器 1 代替原增压器匹配发动机。

### 3.2.3 发动机性能测试

从前面的计算可知增压器 1 的总体性能最优,现选择增压器 1 作为新增压器匹配发动机。为对比发动机匹配增压器 1 后的实际效果,对发动机进行了台架性能测试。如图 11(a)和(b)分别为匹配增压器 1 后发动机台架测试的外特性扭矩和油耗,从这 2 个图中可以看出,匹配增压器 1 后发动机实测扭矩和油耗与预测情况基本一致。其中,发动机外特性扭矩实测最大提升 4.4%(发动机 5 200 r/min 时),而油耗无明显变化。可见,匹配增压器 1 后发动机的动力性得到了改善。

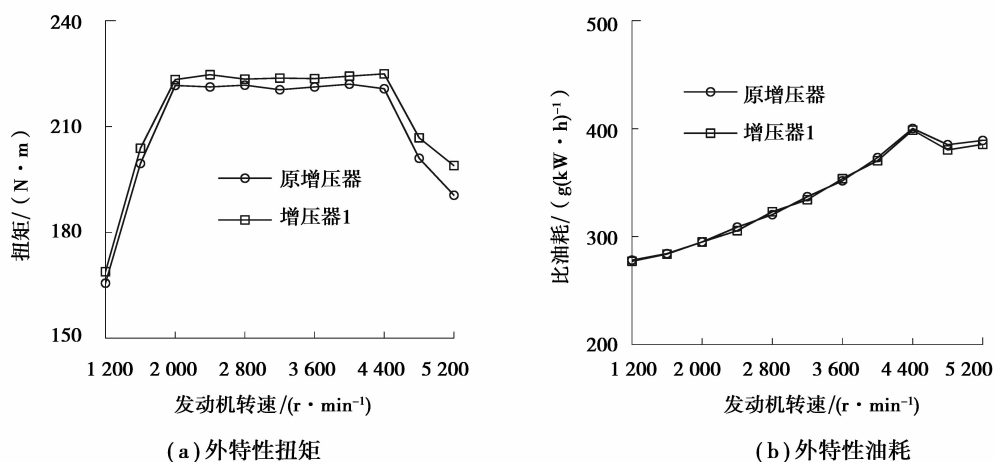


图 11 发动机性能测试对比

Fig.11 The comparison of the engine test performance

## 4 结 论

1) 三线工况法兼顾了发动机的外特性工况和部分负荷工况,可以直观地评价增压器在整个发动机工作范围的运行效率,同时预测增压器在整个发动机工作范围发生喘振、阻塞和超速的可能性,克服了仅研究外特性工况的局限,为预选及优化增压器提供了一种数值评价方法。

2) 通过三线工况法的应用发现:原选配的增压器总体效率偏低、发动机外特性高转速点距增压器最高转速线太近且发动机低速负荷特性线过于靠近增压器的喘振边界,三线工况法能直观地反映出原增压器在整个发动机工作范围的匹配问题。

3) 运用三线工况法选型的增压器 1,其匹配结果:发动机 1 200 r/min 时压气机的喘振裕度最大提升 30.2%;压气机与发动机的联合运行曲线高效率范围扩大;外特性扭矩实测最大提升 4.4%。发动机匹配增压器 1 后不仅改善了原增压器与发动机匹配存在的问题,还提高了发动机的动力性。在今后的研究中需将三线工况法应用于多款汽油机乃至柴油机的增压器匹配选型中,使该方法得到进一步的发展。

### 参考文献:

- [1] Watson N, Janota M S. Turbocharger Matching[M]// Watson N, Janota M S. Turbocharging the Internal Combustion Engine. Palgrave, London: Springer, 1982: 340-377.
- [2] Shingne P, Assanis D, Babajimopoulos A, et al. Turbocharger matching for a 4-cylinder gasoline HCCI engine using a 1D engine simulation[C/OL]//SAE 2010 Powertrains Fuels & Lubricants Meeting. [S.l.]: SAE, 2010[2018-04-02]. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2143>.

- [ 2 ] Liu R L, Zhang Z, Dong S, et al. High-altitude matching characteristic of regulated two-stage turbocharger with diesel engine[J/OL]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2017, 139 (9) [2018-04-02]. paperuri: (faf060c9038fbd1668e2d00567b3c7e8). DOI: 10.1115/1.4036283.
- [ 4 ] Pesiridis A, Salim S I W, Martinez-Botas R F. Turbocharger matching methodology for improved exhaust energy recovery [C/OL] // IMechE. 10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging. [S.l.]: 2012 Woodhead Publishing Limited, 2012: 203-218 [2018-04-02]. <https://doi.org/10.1533/9780857096135.4a.203>.
- [ 5 ] Mutta S, Narayanan M S, Gupta P, et al. Thermodynamic study of turbocharger matching and combustion optimization for better low end torque and high speed power [C/OL]//International Mobility Conference. [S.l.]: SAE, 2016[2018-04-02]. <https://doi.org/10.4271/2016-28-0015>.
- [ 6 ] Rao H K S, Raviteja S, Kumar G N. Computational analysis of unsteady flow in turbine part of turbocharger[C]// Saha A, Das D, Srivastava R, et al. *Fluid Mechanics and Fluid Power-Contemporary Research. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. New Delhi: Springer, 2017:811-820.
- [ 7 ] Emara K, Emara A, Sayed E, et al. Turbocharger selection and matching criteria in a heavy duty diesel engine[J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017, 7(12): 609-615.
- [ 8 ] 王宇翔,林富,胡明辉.高原环境下 AMT 汽车动力性换挡规律分析[J].*重庆大学学报*,2018,41(2):10-20.  
WANG Yuxiang, LING Fu, HU Minghui. Analysis on the dynamic gear shift schedule of AMT vehicles in plateau environment[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(2):10-20.(in Chinese)
- [ 9 ] 周龙保.内燃机学[M].北京:机械工业出版社,2011.  
ZHOU Longbao. *Internal combustion engine*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 张力,郑仁蔚,张青,等.移动窗口域的 VDO 爆震燃烧识别扩展算法[J].*重庆大学学报*, 2017, 40(8):19-26.  
ZHANG Li, ZHENG Renwei, ZHANG Qing, et al. VDO knock diagnosis expansion algorithm based on moving window domain[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(8):19-26.(in Chinese)
- [11] Zhang P Q, Zhao D H, Wu P, et al. 465Q gasoline engine turbocharger matching and performance calculation[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 500: 223-229.
- [12] Wang Q, Ni J, Shi X, et al. Gasoline engine turbocharger matching based on vehicle performance requirements[C/OL]// SAE 2015 World Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2015[2018-04-02]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1283>
- [13] Ismail M I, Costall A, Martinez-Botas R, et al. Turbocharger matching method for reducing residual concentration in a turbocharged gasoline engine[C/OL]//SAE 2015 World Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2015[2018-04-02]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1278>.
- [14] Shinagawa T, Kudo M, Matsubara W, et al. The new Toyota 1.2-liter ESTEC turbocharged direct injection gasoline engine[C/OL]// SAE 2015 World Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2015[2018-04-02]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-1268>.
- [15] 朱大鑫.涡轮增压与涡轮增压器[M].北京:机械工业出版社,1992.  
ZHU Daxin. *Turbocharge and turbocharger*[M]. Beijing: China Machine Press, 1992. (in Chinese)
- [16] 张元华.联合循环机组压气机喘振裕度低事件分析[J].*燃气轮机技术*, 2013,26(2):57-61.  
ZHANG Yuanhua. Analysis of air compressor surge margin low of CCPP[J].*Gas Turbine Technology*, 2013,26(2):57-61. (in Chinese)

(编辑 张 莘)