

基于多目标控制的高性能低油耗增压直喷汽油机热力学性能仿真优化

Optimization of Thermodynamic Behavior in a T-GDI Engine with Higher Performance and Lower Fuel Consumption Based on Multi-objective Control Strategy

刘岳兵 叶伊苏 王伟民 陈克朋 严冬 张文龙

(东风汽车公司技术中心 湖北武汉 430058)

摘要: 本文以某 1.2L 新型(可变压缩比、连续可变气门升程、两级增压)三缸直喷汽油机的开发为背景,首先对其中所涉及新技术的原理及功效进行了简单介绍,其次对该发动机开发过程中新技术方案参数的选定过程和方法进行了相应的说明,并对其中扭矩目标的达成、爆震以及排温限值问题的控制调节进行了重点研究。提出了一种联合应用节气门、增压器废弃旁通阀、可变气门升程以及电动增压等技术达成动力性能目标的有效控制方法。同时对利用可变压缩比和 CA50 控制爆震以及喷油过程控制排温的方法也给出了有效的建议。

研究表明,通过一维仿真分析手段,可以在发动机开发前期对各技术方案参数的初步选定提供全面的指导,并在此基础上通过优化分析得到满足工程动力性经济性开发目标的技术方案,最终结果显示,该新型汽油机采用选定的技术方案时,升功率具有做到约 110kW,同时万有特性最低比油耗低至 210g/kw.h 的潜力。

关键词: 汽油机; 新技术; VCR ; CVVL; E-boost

Abstract: The development of a 1.2L three cylinder T-GDI gasoline engine with variable compression ratio, continuous variable valve lift and two stage turbocharging technologies was the background for this paper. Firstly, the principle and function of these new technologies (VCR\CVVL\electric supercharger) were introduced. Secondly the process and method on how to choose the parameters of these new technologies in the engine development were explained. The control strategies of torque achievement, knock prevention and exhaust temperature overweight prevention had been studied as well. An effective method was presented for the load control through the combined use of the throttle, waste-gate, variable valve lift and E-supercharger. At the same time, the method for the knock prevention through the combined use of the variable compression ratio with CA50 had been also presented. In addition the exhaust temperature control method was introduced as well.

Research shows that one-dimensional simulation technology can provide comprehensive guidance for the preliminary selection of the technical parameters in the early stage of engine development. And on the basis of this analysis, the technical scheme to meet the engineering target is obtained through optimization analysis. The final result shows that the new gasoline engine has the potential to achieve the performance greater than 110kW/L and the minimum Brake Specific Fuel Consumption less than 210g/kW.h when the technical scheme was adopted.

Keywords: Gasoline Engine, new technology, variable compression ratio, continuous variable valve lift, E-boost

0 引言

为应对日趋严格的油耗与排放挑战，开发更加高效更低排放的发动机成为世界各主机厂研发的重点。目前国内车用发动机以点燃式汽油机为主，因此通过提高发动机燃烧热效率而改善其燃油经济性成为各公司关注的焦点。可变压缩比技术（VCR）能够大幅度改善燃烧热效率与排放^{[1]-[3]}。过去诸多主机厂和机构都在这方面开展了大量的先行研究，随着技术的不断成熟，采用可变压缩比技术的发动机已经开始逐步地从幕后走向台前，搭载可变压缩比技术发动机的英菲尼迪 QX50 即将量产，可以预见，不久的将来这一技术还将迎来一个快速发展的阶段。

本文将要介绍的发动机为东风汽车公司与咨询公司联合开发的一款新型可变压缩比发动机。在开发前期，为了配合可变压缩比技术的应用，尽可能地挖掘其潜力，我们通过仿真计算，探讨了可变压缩比技术与其他主要技术（包括电动增压（双增压），连续可变气门升程（CVVL），停缸技术，外部冷却 EGR，米勒循环等）组合后在动力性、经济性方面的表现效果，并对各技术方案两两组合后的降油耗效果进行了对比说明，具体情况如下表 1 中所示。

由表 1 可知，VCR 技术+CVVL 技术组合的油耗最低，低于其他任意两种技术组合。综合油耗与高动力性能的需要，本项目最终选择采用 VCR+CVVL+电动涡轮两级增压的技术组合方案进行开发。

表 1 不同技术路线组合 NEDC 油耗降低率对比表（基于 Base 技术路线）

Vehicle	EGR	VVL	Cylinder de-activation	2 stage turbo+super charge	VCR
EGR	3.4%				
VVL	3.6%	3.0%			
Cylinder de-activation	7.8%	6.2%	4.1%		
2 stage turbo+super charge	3.5%	3.1%	4.1%	0%	
VCR	4.9%	10.1%	4.2%	1.6%	1.5%

1 新技术的特点及原理介绍

1.1 可变压缩比（VCR）技术的特点及原理介绍

如下图 1 中所示，跟传统汽油机相比，可变压缩比技术可以很好地提升发动机的热效率，降低油耗^{[4]-[5]}。采用可变压缩比技术后，发动机无论在什么工况都能在爆震限制条件下工作，从而获得最佳的热效率。同时可变压缩比技术也能够在一定程度上降低有害排放，通常发动机的有害排放很大一部分是冷启动以及暖机时产生的，而废气催化转换器的工作温度通常高达 400° C，通过可变压缩比技术可以在启动时采用较低的压缩比，发动机在较低压缩比时的热效率低，废气的温度较高，使得催化器能够得到更快的加热以达到最佳的工作温度。

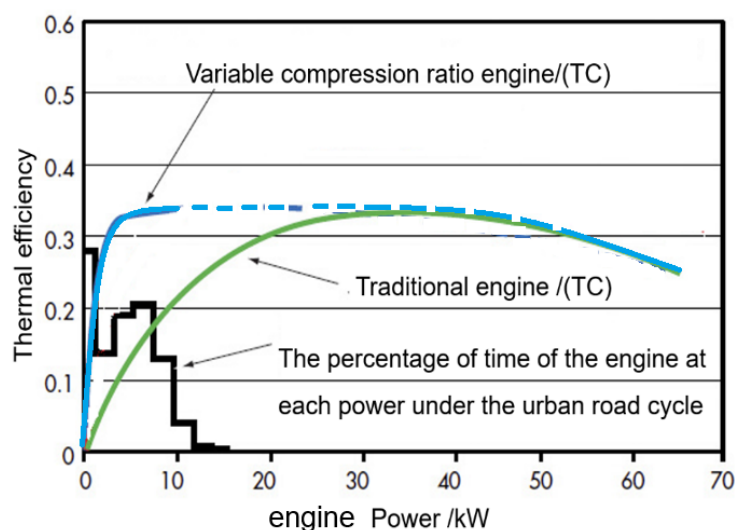


图 1 VCR 发动机跟传统发动机热效率对比简图

1.2 连续可变气门升程 (CVVL) 技术的特点及原理介绍

理论上, 发动机不同的工况均对应有其最佳的配气系统 (包括配气相位和气门升程以及包角), 而传统的发动机只有一个确定的凸轮型线, 这个确定的凸轮型线一般是为了适应最大动力性输出需要而选取的。因而, 在部分负荷工况下, 为了限制过多的进气量, 通常只能利用节气门的开度来调节负荷^{[6]~[9]}。这样一来, 由于节气门的节流作用导致的泵气损失将使得发动机的热效率降低, 从而对应的燃油转化效率也会降低, 具体如图 2 中所示, 并且随着负荷的减小, 有效热效率 (燃油转化效率) 降低的趋势也会更加明显。

连续可变气门升程 (CVVL) 技术可以很好地克服单一凸轮型线的不利影响, 通过气门型线 (升程和包角) 的变化来使得发动机在每个工况下都能“呼吸”得更顺畅^{[5]~[6]}。经济性改善方面, 由图 3 可知, 采用 CVVL 技术后, 由于弱化了节气门的作用, 绝大部分工况下均可通过调节气门升程和包角的大小来控制进气量, 发动机总的泵气损失较原来大大减小, 且负荷越小, 泵气损失改善的程度将越大, 从而燃油经济性也将大大改善。与此同时, CVVL 技术对动力性能的改善也非常有利, 低转速时系统使用较小的气门升程, 这样有利于增加缸内紊流提高燃烧速度, 增加发动机的低速扭矩, 而高转速时使用较大的气门升程则可以显著提高进气量, 进而提升高转速时的功率输出。

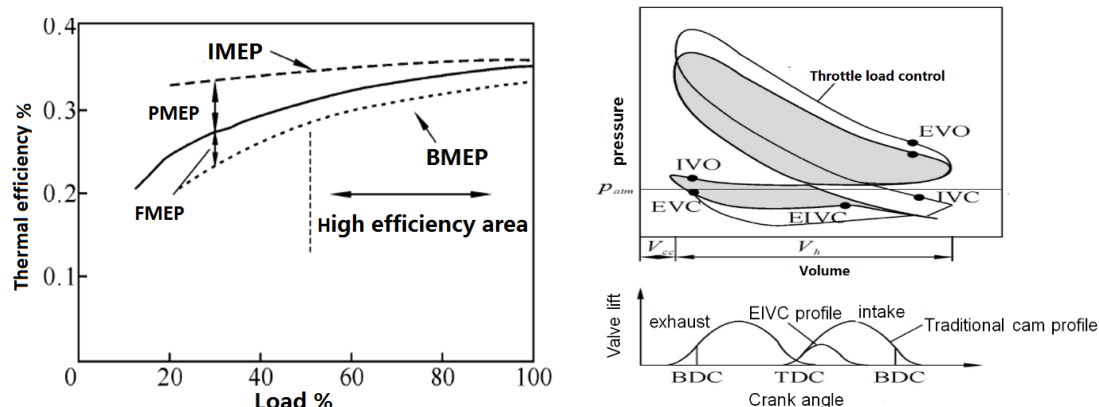


图 2 汽油机燃油转化效率随负荷变化示意 图 3 采用 VVL 前后凸轮型线和示功图变化示意

1.3 两级增压的技术特点及原理介绍

随着发动机小型化的程度进一步增加, 为了兼顾高低转速动力性能的需求, 采用两级增压系统是一种主要的解决办法。两级增压系统主要包括 (涡轮+涡轮、电动+涡轮、机械+涡轮) 三种, 不同方案的基本构型和主要优缺点如下图中 4 所示。其中电动+涡轮增压的方式以其特

有的潜在优势越来越受到大家的关注，可以预测的是随着电动增压技术的不断成熟（成本降低、可靠性充分验证），电动+涡轮将是汽油机两级增压的主要技术路线^[10]。

本文所介绍的发动机也采用电动+涡轮的两级增压技术，当发动机在启动或加速工况时，电控单元控制电动机起动，驱动压气机转动，压气机对进气充量进行增压；以提高发动机启动和加速初期的进气充量，改善发动机的瞬态相应特性，同时提高发动机的低速扭矩。

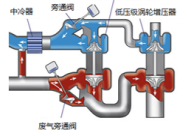
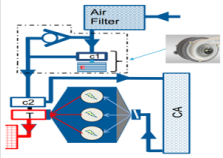
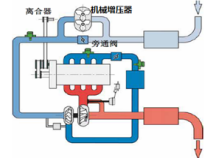
增压方案	涡轮+涡轮	电动+涡轮	机械+涡轮
图示			
主要优点	提高发动机升功率和扭矩	响应性好；与发动机转速解耦，优化空间大	响应性好
主要缺点	成本高；排气背压大	量产机型少，可靠性存在风险；需增加电池	占用空间大；需要离合器；对发动机改动较大

图 4 两级增压不同方案的基本构型和主要优缺点对比图

2 仿真模型的建立及计算说明

2.1 发动机基本技术参数及仿真模型构成介绍

图 5 为该发动机进行一维热力学性能仿真计算的模型图，跟传统发动机的模型相比，模型的差异主要体现在一下几个方面。首先是增压器回路较传统发动机有较大的不同，由图 5 可知，在指定的工况下，当电动增压器不工作时，由于电动压气机叶轮的阻力较大，大部分气体都经由主回路的旁通阀直接进入涡轮增压器进行增压，而当电动增压器介入工作时，由于电动增压器出口处的压力比进口处的高，再加上旁通阀的回流限制作用，使得此时新鲜空气都只能经由电动增压器增压后再进入涡轮增压器进行二级增压。其次，该模型中的重点和难点就是关于连续可变气门升程技术、VCR 技术的模型化以及它们的联合控制问题。其中控制模型部分后续会重点进行介绍。

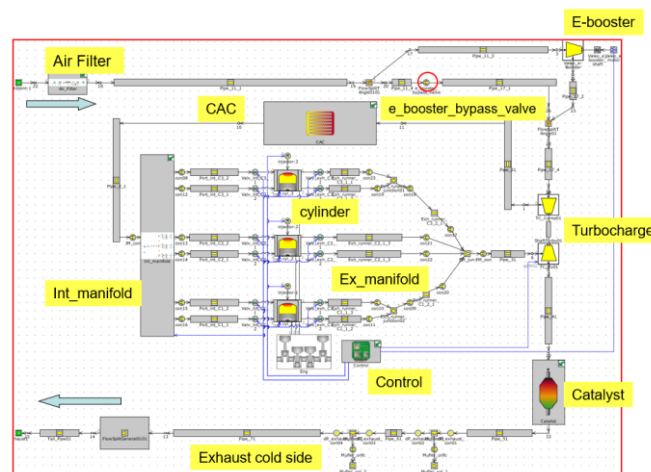


图 5 一维性能计算模型图

2.2 联合控制模型介绍

由前面介绍可知，本项目中包含了诸多变量系统，因此有必要建立一种有效的控制策略，一方面可以让计算的工作量大为减少，同时还能使得发动机在满足动力性能需求的基础上得到较优化的油耗效果。本项目中涉及到的控制模块主要包括 BMEP 的调节控制、爆震的调节控

制、喷油对排温的调节控制、传热系数的修正控制、燃烧持续期的修正控制等五大部分，具体如下图 6 中所示，后续针对各控制模块展开详细介绍。

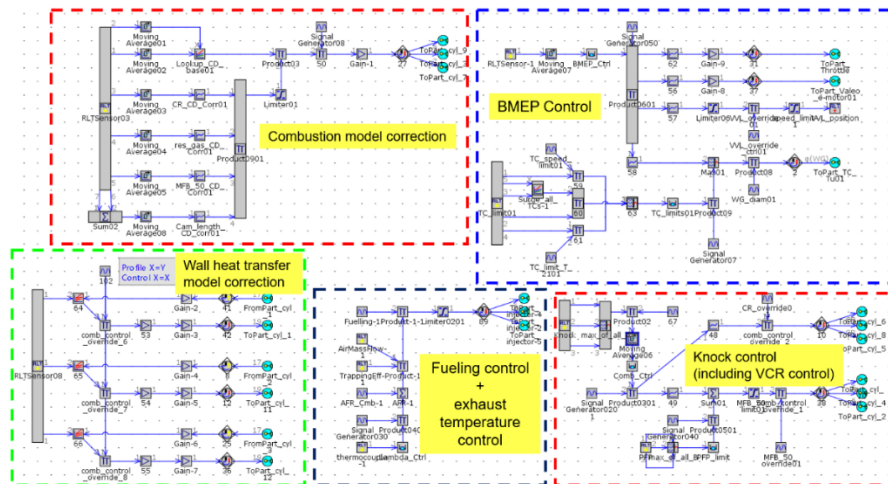


图 6 联合控制模块总体示意图

2.2.1 BMEP 的调节控制介绍

由于本项目中采用的涡轮增压、电动增压以及 VVA 等新技术均可用于调节 BMEP，因此需要综合考虑不同的调节方式对动力性能的达成和油耗的影响。通过仿真探讨研究，本文介绍了一种有效的顺序控制调节方法。由图 7 中所示可知，随着负荷增大，首先调节节气门的开度，此时其他调节措施均处于初始状态，当节气门全部打开后，若不能达到目标负荷，则开始调节废气旁通阀（关小），当废气旁通阀全部关闭后若负荷还需增加，则接着调整 VVA（凸轮包角和升程），最后若负荷还需进一步增加，则调节电动增压的功率输出至最后达到所需的 BMEP 目标。需要说明是，在利用废气旁通阀进行负荷调节时还需要综合考虑增压器本身的一些限制条件，如喘振、压气机出口温度超标以及增压器超速等问题。具体的控制模型框图如下图所示 8 中所示，包含了 BMEP 控制以及涡轮增压器限制条件控制两大部分。

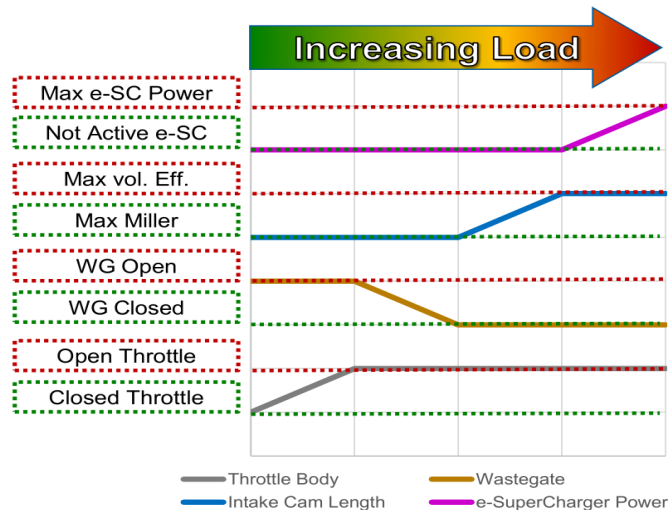


图 7 BMEP 控制模块调节顺序示意图

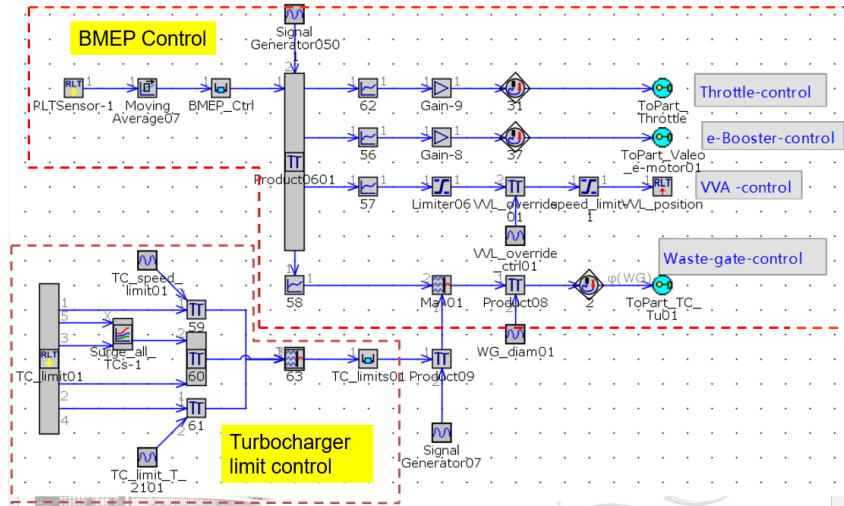


图 8 BMEP 以及增压器限值控制调节模块框图

2.2.2 爆震现象的调节控制介绍

跟传统的固定压缩比发动机相比，该发动机可以通过推迟点火角度以及调节压缩比的大小两种方法来解决爆震问题。基于开发者的经验，本文介绍了一种有效的控制方法如下图 9 所示。随着爆震倾向的增加，首先推迟点火角度到一个特定的范围内，若此时爆震现象依然存在，则开始减小压缩比，当压缩比调节到最小压缩比后若爆震仍然存在，则接着进一步推迟点火角度。

需要强调的是这里提到的特定的点火角度是一个相对比油耗最低的优化的点火角度。下图 10 为开发者经过大量的试验测试后总结出来的经验结果。由图可知，对于不同的压缩比，当燃烧角度（MFB50%）约为 18° 曲轴转角左右的时候，可以综合获得最佳的比油耗效果。

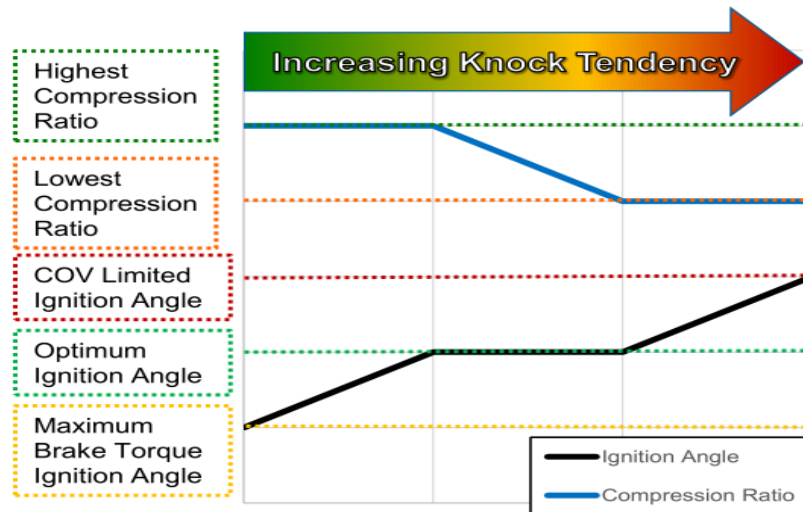


图 9 爆震控制模块调节顺序示意图

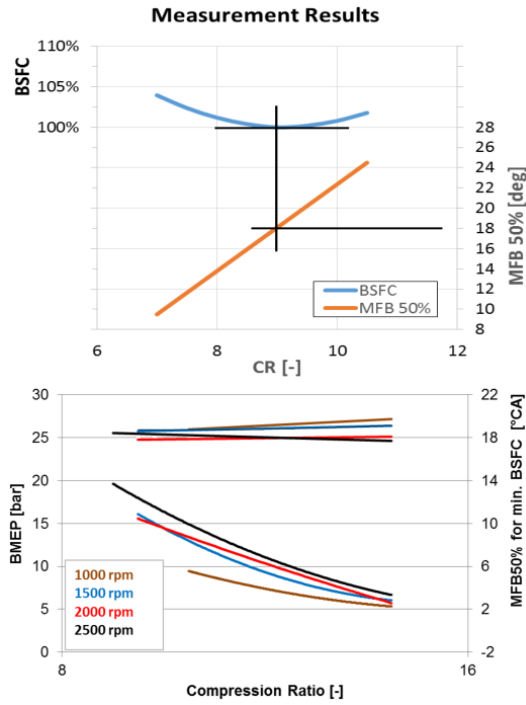


图 10 压缩比以及 CA50 对比油耗的影响试验研究结果

跟 BMEP 控制调节时需要综合考虑涡轮增压器的（喘振、超速等）相关限值一样，在利用点火角度和压缩比控制爆震现象时，为了考虑发动机可靠性（包括整机强度及密封等）方面的限制，同样需要对最大爆发压力进行控制。如图 11 中所示，当最大爆发压力高于设定的限值时，控制模块会自动推迟点火角度，此时若检测到没有发生爆震现象，控制模块还能适当调节增加压缩比以获得更好的热效率。

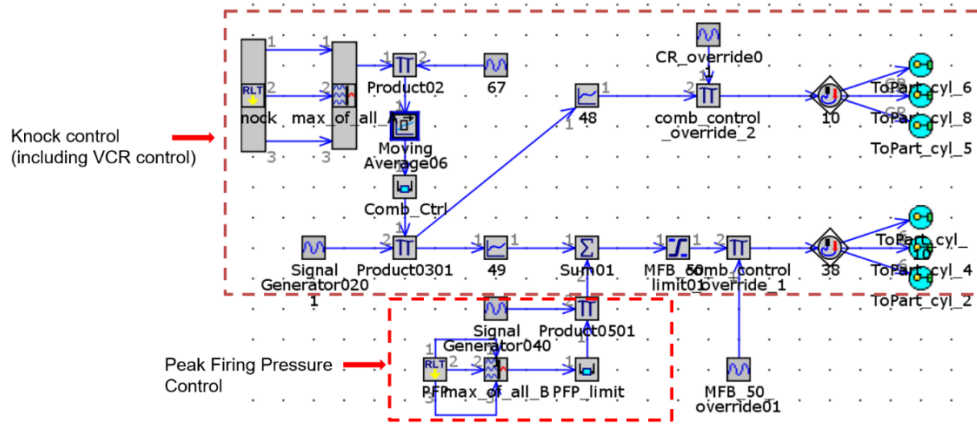


图 11 爆震及最大爆压控制调节模块框图

2.2.3 喷油及排温控制调节介绍

由图 12 可知，该控制器主要是通过控制喷油量的大小来调节排气的温度，当涡轮入口排气温度超过设定的限值（本项目为 980°C ）时，PID 控制器会自动增加喷油量来控制排气温度不超过限值。

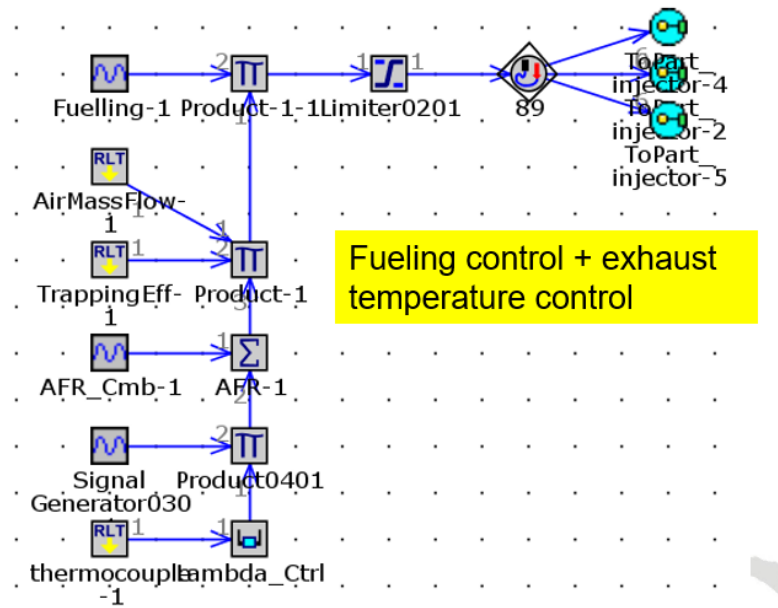


图 12 排温控制调节模块框图

2.2.4 气缸壁面传热模型修正调节介绍

由于 GT-Power 软件中气缸壁面传热通常应用的是经典的 Woschni 传热模型, 其不允许上止点的中心间隙发生变化。因此对于可变压缩比发动机来说需要对传热参数进行修正。图 13 为本项目中传热模型修正调节模块的框图, 该控制器会自动根据不同的压缩比和活塞的位置对发动机所处工况对应的气缸壁面传热系数进行修正。其中修正的参考值是依据开发者的研究试验结果总结所得到的。

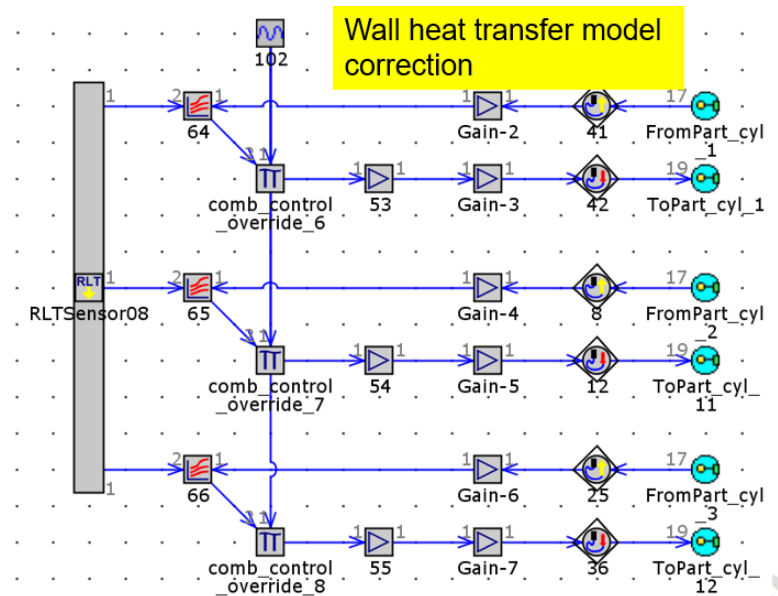


图 13 传热模型修正调节模块框图

2.2.5 燃烧持续期修正调节介绍

在进行仿真计算时, 采用 GT-power 中最常用的韦伯函数模型, 考虑到新技术的应用会给燃烧参数带来影响, 因此需要对经典韦伯函数中的燃烧参数 (由于 CA50 在前面爆震模块中已进行了综合考虑, 这里主要是指燃烧持续期) 进行修正。根据开发者前期的研究经验, 本文初步考虑了压缩比、残余废气系数、MFB50 以及 VVA (凸轮包角) 对燃烧持续期的影响修正, 修正方式如下图 14 中所示 (经验修正公式为 $F(D10-90)=F(\text{initial map}) * f(CR) * f(\text{resid}) * f$

(CA50)*f(VVL))。具体的修正影响系数如下图 15 至 18 对应所示，研究发现，残余废气系数对燃烧持续期的影响最大。

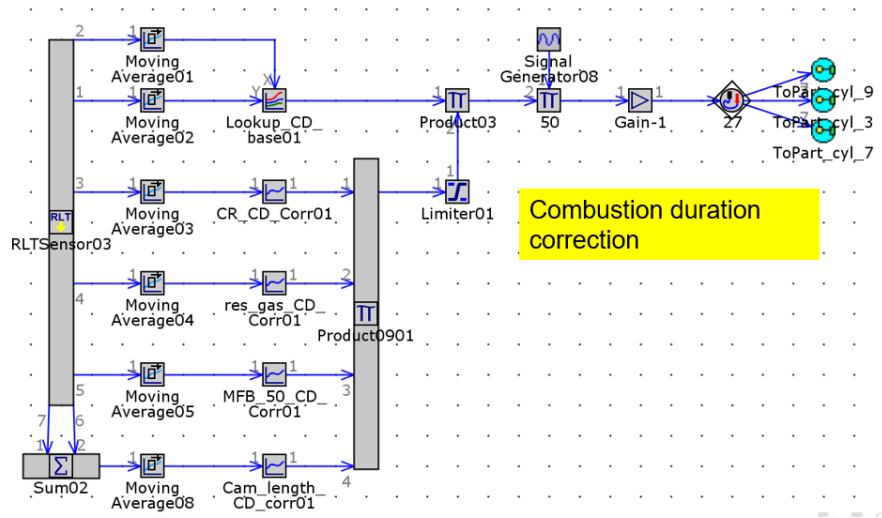


图 14 燃烧持续期修正调节模块框图

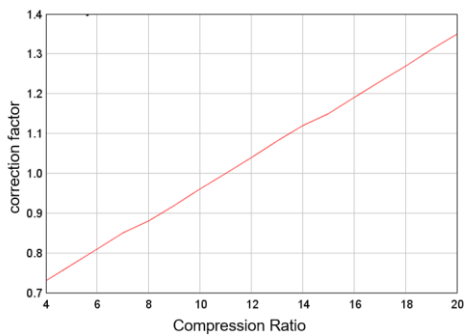


图 15 压缩比对应燃烧持续期修正系数

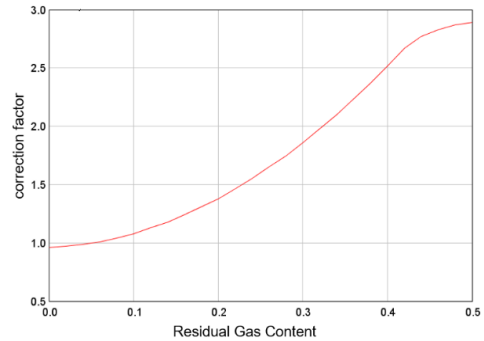


图 16 残余废气对应燃烧持续期修正系数

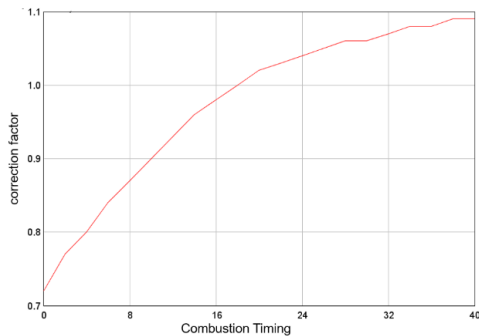


图 17 CA50 对应燃烧持续期修正系数

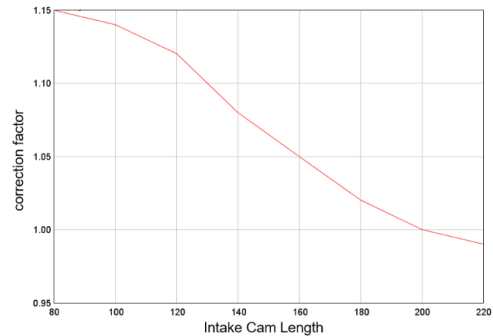


图 18 VVA 对应燃烧持续期修正系数

3 主要技术方案选择与参数优化

3.1 连续可变气门升程 (CVVL) 技术方案的选择及参数优化说明

如何获得 CVVL 机构在不同气门升程时对应的凸轮型线，以确保发动机更“舒畅”地进气是整个进气 CVVL 机构开发最核心的内容。本项目中，针对欧洲和日本几家供应商提供的 CVVL 型线进行了选型分析，在保证动力性能的前提下，分析各 CVVL 型线在降油耗方面的潜力，然后择优选取。在 GT-power 软件中，CVVL 型线是以指针变量的形式进行输入的，先将供应商提供的有限的凸轮型线依次输入软件模块中，后续计算过程中软件会根据需要自动进行差值计算以获得其他相应的凸轮型线数值，最终得到的进排气凸轮型线及相位情况如下图 19 所示。

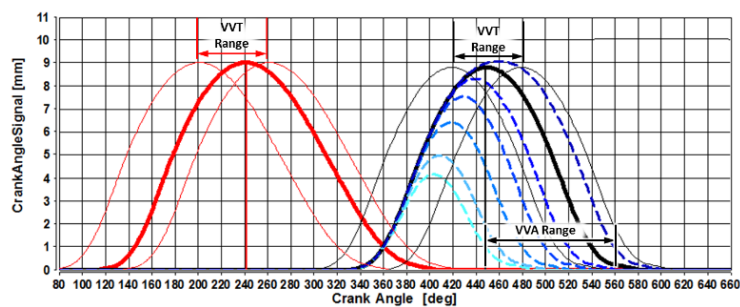


图 19 进排气凸轮型线效果示意图

3.2 可变压缩比（VCR）技术方案的选择及参数优化说明

有前文介绍可知，该项目应用的是一种新型的连续可变压缩比机构，但是受其尺寸及运动机构的限制，压缩比的调节范围也是一定的，只能在有限的范围内进行连续调节。为了确定压缩比的最终调节范围，需要综合考虑油耗和动力性能的需要进行优化选取。其中最小压缩比的确定对动力性能特别是低俗扭矩目标的达成影响较大。确定压缩比的起始调节范围后，不同工况下具体的压缩比值则是根据比油耗最低的原则在 BMEP 以及爆震控制等限制范围内优化后所得。本项目中初步的压缩比随负荷及转速的变化情况如下图 20 中所示。

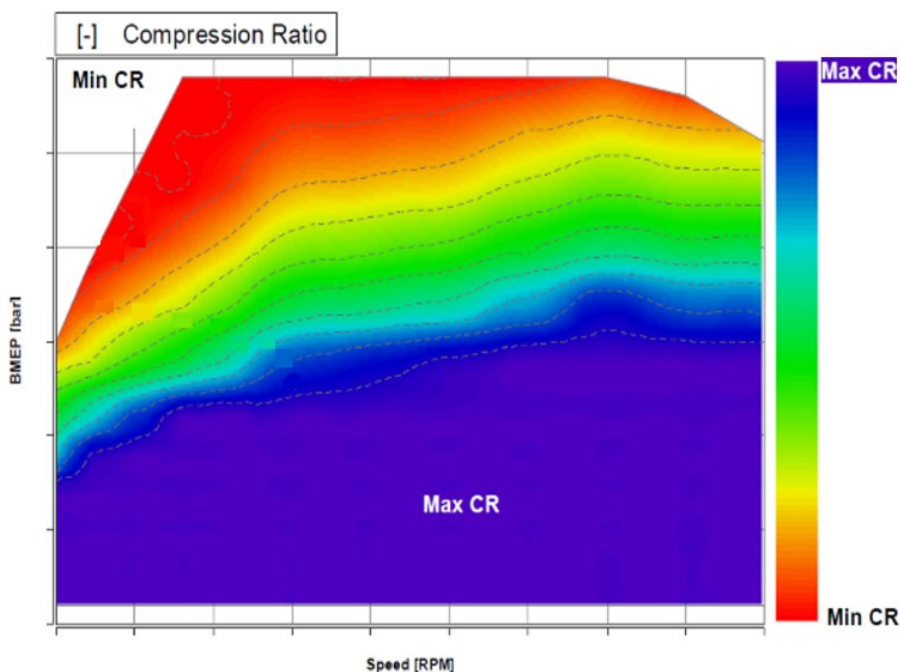


图 20 压缩比随负荷及转速变化分布云图

3.3 两级增压（电动+涡轮）技术方案的选择及参数优化说明

图 21 为优化后得到的电动增压器匹配结果图。由图 21 中所示可知，本项目中在 2000rpm 以下转速内电动增压器才处于工作状态，2000rpm 及以上范围内电动增压器不工作，此时完全由涡轮增压器和 CVVL 来调节动力性能。电动增压器作为对动力性能补充的装置，其在发动机全工况下的运行分布情况如下图 22 中所示。

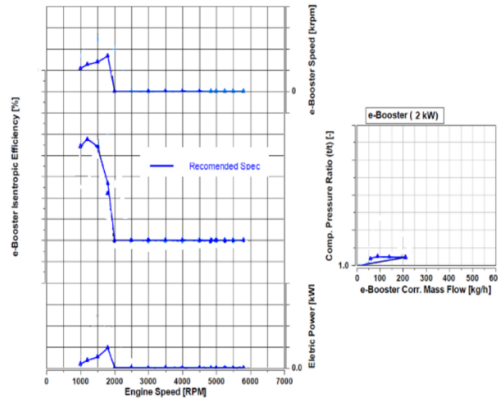


图 21 发动机电动增压器匹配计算结果介绍

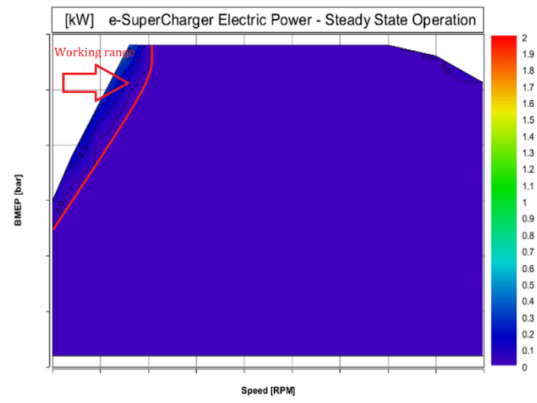


图 22 电动增压器在发动机全工况下运行分布图

图 23 为涡轮增压器匹配结果图。由图中所示可知，该款涡轮增压器离喘振线和超速线均有一定的余量，并且匹配也基本能够达到较好的效率，符合增压器匹配选型的基本要求。

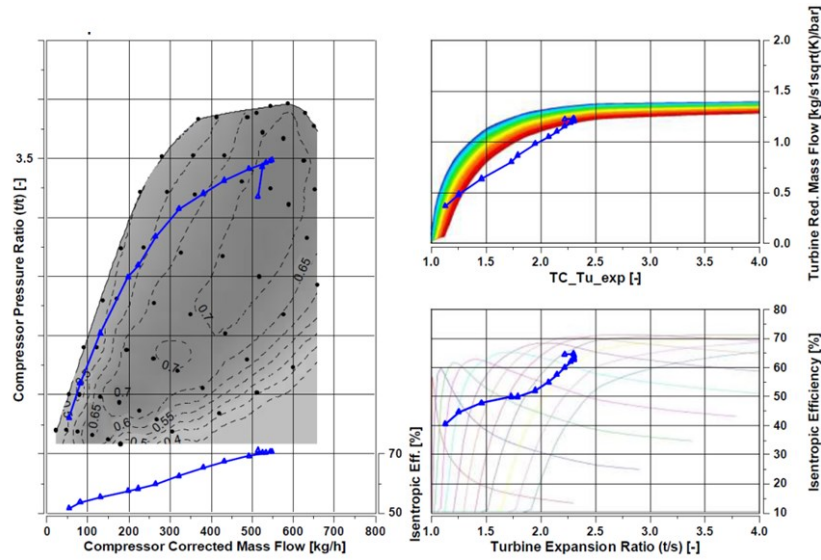


图 23 发动机涡轮增压器匹配情况计算结果介绍

4 模拟计算性能达成情况介绍

图 24 为在上述仿真模型的基础上，经过优化计算后得到的发动机外特性性能情况。由图中所示可知，优化后发动机的外特性扭矩、功率以及比油耗值都能满足开发目标的要求（动力性能方面升功率达到约 117kW/L、升扭矩达到约 231N·m/L）。

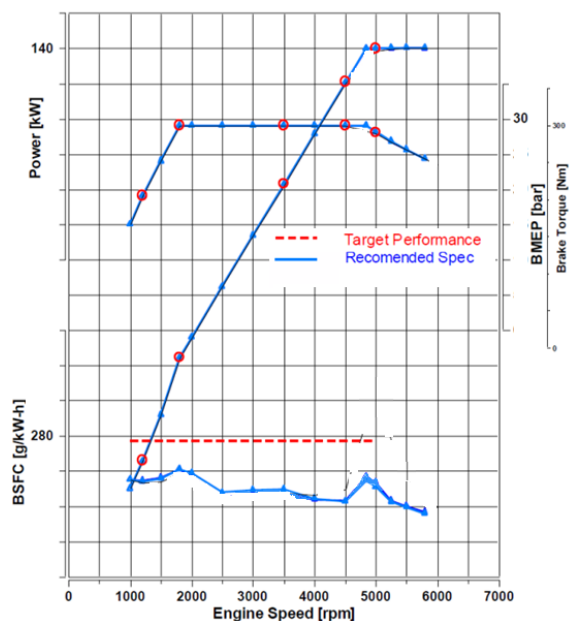


图 24 发动机外特性动力性经济性计算结果介绍

图 25 为计算得到的发动机瞬态响应性结果。由图中所示可知，在 1500rpm（最大扭矩起始）处，发动机 BMEP 从 1bar 加载到 90%最大扭矩时所需要的时间约为 1.2S 左右，较传统涡轮增压汽油机的瞬态响应性优势明显。

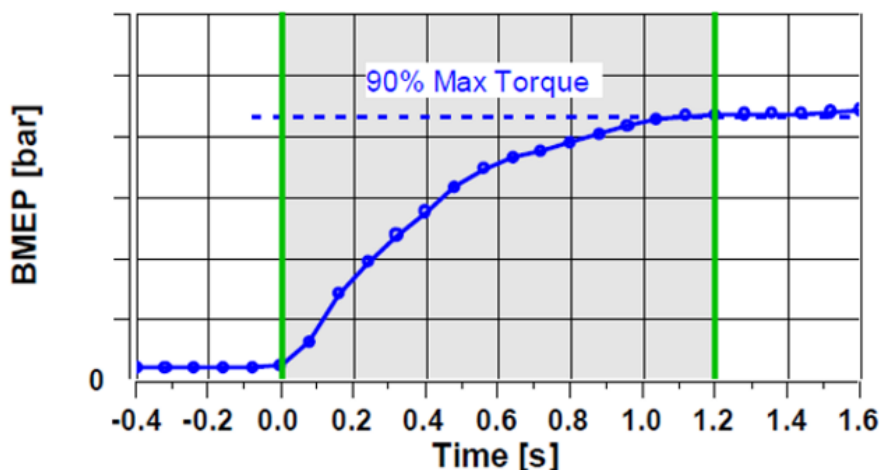


图 25 发动机瞬态响应性计算结果介绍

图 26 为最后优化后得到的整个发动机万有特性比油耗 map 图。由图中所示可知，采用新技术组合后，整个发动机的油耗将处于一个非常好的水平，最低比油耗甚至可以达到 210g/kW.h，这对于应对将来越来越严格的油耗和排放法规来说是一种很有潜力的措施。

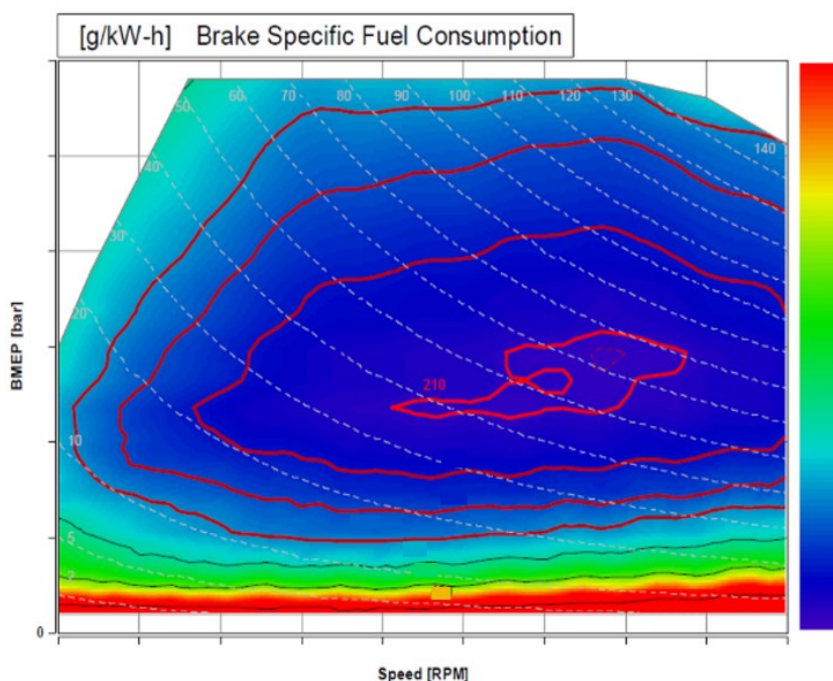


图 26 发动机万有特性比油耗计算结果介绍

5 结论

1) 研究发现, VCR、CVVL、EGR 以停缸等新技术两两组合时对燃油经济性和排放的效果各不相同, 其中 VCR+CVVL 的组合在降油耗和排放方面的潜力最佳。

2) 应用仿真软件对东风某高性能低油耗增压直喷汽油机的热力学性能达成的过程进行了模拟分析, 并重点研究了多目标联合控制的策略和方法。优化结果显示, 采用 (两级增压+VCR+CVVL 等) 新技术组合后, 整个发动机的动力性经济性将处于一个非常好的水平, 升功率可以达到约 110kW/L, 同时最低比油耗有达到 210g/kW.h 的潜力。

3) 针对 BMEP、爆震以及排温等限值的多变量系统, 分别介绍了一种有效的控制策略, 并对 VCR 技术导致的传热和燃烧方面的修正进行了深入研究, 给出了相应的修正方法和参数。

4) 本发动机尚处于相关的试验准备阶段, 后续需重点关注上述分析结果的试验验证情况, 进一步改善这种新型发动机的性能。

参考文献

- [1] Wolfgang, S., Sorger, H., Loesch, S., Unzeitig, W. et al., "The 2-Step VCR Conrod System - Modular System for High Efficiency and Reduced CO₂," SAE Technical Paper 2017-01-0634, 2017, doi:10.4271/2017-01-0634.
- [2] Asthana, S., Bansal, S., Jaggi, S., and Kumar, N., "A Comparative Study of Recent Advancements in the Field of Variable Compression Ratio Engine Technology," SAE Technical Paper 2016-01-0669, 2016, doi:10.4271/2016-01-0669.
- [3] Ferrey, P., Miehe, Y., Constensou, C., and Collee, V., "Potential of a Variable Compression Ratio Gasoline SI Engine with Very High Expansion Ratio and Variable Valve Actuation," *SAE Int. J. Engines* 7(1):468-487, 2014, doi:10.4271/2014-01-1201.
- [4] Constensou, C. and Collee, V., "VCR-VVA-High Expansion Ratio, a Very Effective Way to Miller-Atkinson Cycle," SAE Technical Paper 2016-01-0681, 2016, doi:10.4271/2016-01-0681.

- [5] haudhari, A., Kulkarni, V., and Sahoo, N., "Effect of Variable Compression Ratio and Intake Charge Dilution on Fuel Efficiency and Emission for a Spark Ignition Engine," SAE Technical Paper 2015-01-0772, 2015, doi:10.4271/2015-01-0772.
- [6] Malkhede, D., Jadhav, S., and Dhotre, A., "Kinematic Analysis of Continuous Variable Valve Lift Mechanism for SI Engine," SAE Technical Paper 2017-26-0033, 2017, doi:10.4271/2017-26-0033.
- [7] Jain, A., Tikar, S., Ramdasi, S., Thipse, S. et al., "Design and Development of Variable Valve Actuation (VVA) Mechanism Concept for Multi-Cylinder Engine," SAE Technical Paper 2015-26-0021, 2015, doi:10.4271/2015-26-0021.
- [8] De Simio, L., Gambino, M., Iannaccone, S., Borrelli, L. et al., "Experimental Analysis of a Natural Gas Fueled Engine and 1-D Simulation of VVT and VVA Strategies," SAE Technical Paper 2013-24-0111, 2013, doi:10.4271/2013-24-0111.
- [9] Bernard L, Ferrari A, Rinolfi R, et al. Fuel economyImprovement potential of uniair throttleless technology[C]// ATA International Conference on Spark Ignition Engine: The CO 2 Challenge. Venezia, Italy, 2002.
- [10] Vitek, O. and Macek, J., "Thermodynamic Potential of Electrical Turbocharging for the Case of Small Passenger Car ICE under Steady Operation," SAE Technical Paper 2017-01-0526, 2017, doi:10.4271/2017-01-0526.