

涡轮增压汽油机废气旁通阀瞬态控制研究*

龚金科¹,范文可^{1†},刘冠麟¹,陈长友¹,胡辽平²,廖笑影¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南长沙 410082;

2. 湖南天雁机械有限责任公司,湖南衡阳 421005)

摘要:在不同瞬态工况下使用不同的废气旁通阀PID目标控制策略,建立涡轮增压汽油机瞬态计算模型.对发动机定转矩加速工况下的瞬态响应进行模拟计算,并与原机响应特性做对比分析.结果表明,在定转矩加速工况下,以适当增大的各固定转速下增压压力作为瞬态控制目标值,可以显著改善发动机的瞬态响应.在发动机定转矩减速工况下,采用前期适当延长废气旁通阀全开的时间,待转速下降到1.25倍目标转速后,控制目标切换到增压压力的控制策略能够缩短发动机的响应时间.与此同时,采用废气旁通阀瞬态控制方法,不仅能够提升涡轮增压汽油机瞬态响应性能,而且可以防止瞬态工况下增压器超速和喘振.

关键词:汽油机;涡轮增压;废气旁通阀;PID控制;瞬态响应;控制策略

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

Research on Transient Control for Waste-gate of Turbocharged Gasoline Engine

GONG Jinke¹, FAN Wenke^{1†}, LIU Guanlin¹, CHEN Changyou¹, HU Liaoping², LIAO Xiaoying¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Tyen Machinery Co Ltd, Hengyang 421005, China)

Abstract: The different PID control strategies of waste-gate were used under different transient conditions to establish the transient calculation model of turbocharged gasoline engine. The transient response under constant torque acceleration and deceleration conditions was simulated and compared with the transient response of original engine. The results show that the transient response is improved remarkably when the transient control target value takes the greater boost pressure at each fixed speed. In constant torque deceleration condition, transient response time is shorten when using the strategy that makes the waste-gate fully open in early stage until the speed reaches 1.25 times of the target speed, and then switches the control target to the boost pressure. At the same time, this way not only improves the transient response performance of the engine, but also prevents the turbo-charger from surging and overspeeding under transient conditions.

Key words: gasoline engine; turbocharging; waste-gate; PID control; transient response; control strategy

* 收稿日期:2017-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276056), National Natural Science Foundation of China (51276056); 2014年湖南省科技重大专项项目(2014FJ1013), Major Science and Technology Project of Hunan Province in 2014(2014FJ1013)

作者简介:龚金科(1954-),男,湖南临澧人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: fanwenke01@163.com

近些年随着汽油机排量逐渐减小,涡轮增压技术在汽油机上的使用也越来越普及,但汽油机应用废气涡轮增压技术,在瞬态工况下与涡轮增压器匹配方面会存在一定问题,即工况突变时,涡轮增压器对突变的响应会有些延迟,影响汽油机的瞬态加速性能^[1-2].针对这一问题,国内外学者开发了复合增压、二级增压、废气旁通涡轮增压等新技术,以使增压汽油机在突变工况下的瞬态响应性能得到改善^[3-7].其中废气旁通涡轮增压技术因具有结构简单、成本较低等优点,在涡轮增压汽油机上得到了广泛应用.废气旁通涡轮增压通过调节涡轮端废气旁通阀开度使增压汽油机达到不同工况下所需的进气要求,从而实现增压器与汽油机良好匹配.同时,通过对废气旁通阀进行瞬态控制可实现涡轮增压汽油机在突变工况下快速达到性能目标值,并在保证不发生爆燃和增压器喘振及堵塞的情况下提高汽油机的瞬态性能^[8-9].综上,涡轮增压汽油机在突变工况下采用废气旁通阀瞬态控制对改善增压汽油机瞬态响应特性具有很大实际价值.

本文在建立的增压汽油机瞬态仿真模型的基础上,研究了定转矩加速工况下废气旁通阀瞬态控制的目标增压压力对汽油机瞬态加速响应特性的影响规律以及定转矩减速工况中增压器与汽油机匹配运行的变化规律,确定了瞬态工况下废气旁通阀的控制策略,进而对涡轮增压汽油机瞬态加速减速工况的性能进行了优化.

1 发动机模型的建立

1.1 发动机基本参数

本研究基于一款小排量涡轮增压汽油机,其基本参数见表1.

表1 发动机基本参数
Tab.1 Basic parameters of the engine

项目	参数
型式	四缸直列
气门数	4气门
缸径×行程/(mm×mm)	60×71
排量/L	0.8
压缩比	9.5
吸气方式	增压中冷
喷油方式	缸内直喷
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000
最大扭矩/(N·m)	125 (1 650 r/min)

1.2 发动机仿真模型建立

图1为在GT-Power发动机性能开发软件中构建0.8 L带废气旁通阀的增压汽油机模型^[10].

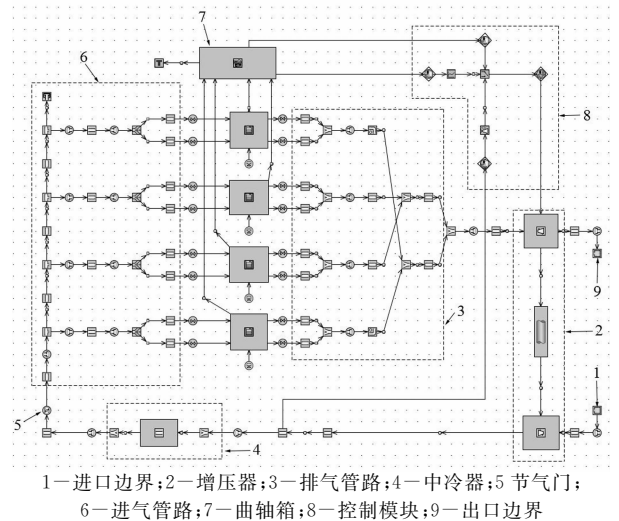


图1 涡轮增压汽油机模型

Fig.1 Turbocharged gasoline engine model

依据研究机型的相关尺寸设置中冷器、节气门、进排气管路、气缸、曲轴箱系统、喷油器等几何模型的参数值;合理设置进、出口边界中的环境温度和压力,以模拟空气滤清器、消声器及尾气后处理系统等压力损失元件对发动机动力性能的影响^[11];在进、排气门模块升程阵列中输入进、排气门升程随曲轴转角变化的规律曲线,分别设定各转速下的进气正时和排气正时;在喷油器模块中输入喷油压力随曲轴转角变化的规律曲线,并设定不同转速下的喷油率和空燃比;发动机的点火顺序和点火间隔角在曲轴箱系统中设置,并使用摩擦损失模块计算发动机的摩擦损失随转速变化;在压气机和涡轮机单元中输入选配增压器对应的试验MAP,经插值后模拟增压器的相关参数;设置目标增压压力为废气旁通阀控制系统模块(PID控制器)的控制目标,并设定外特性工况下不同转速对应的目标增压压力值.PID能够对废气旁通阀开度大小实时调控以使压气机出口压力达到目标值.

气缸模块内使用Woschni模型求解换热量,缸内单位曲轴转角换热量为:

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = \frac{1}{6n} \sum_{i=1}^3 \alpha_w A_i (T - T_{wi}) \quad (1)$$

式中: n 为发动机转速, r/min ; α_w 为工质与发动机气缸壁间瞬时平均传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A_i 为壁面换热面积, m^2 ; T 为工质瞬时温度, K ; T_w 为壁面平均温度, K ; $i = 1, 2, 3$ 分别为气缸盖, 气缸套, 活塞.

式(1)中工质与发动机气缸壁面间瞬时平均传热系数 α_w 可由公式(2)、(3)计算得出:

$$\alpha_w = 130 D^{-0.2} P_c^{0.8} T_c^{-0.53} \times \left(C_1 c_m + C_2 \frac{V_D T_{cl}}{\rho_{cl} V_{cl}} (P_c - P_{co}) \right)^{0.8} \quad (2)$$

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \frac{c_u}{c_m}; C_2 = 0.00324 \quad (3)$$

式中: P_c 为工质的压力, Pa ; T_c 为工质的温度, K ; c_m 为活塞平均速度, m/s ; c_u 为涡流速度, m/s ; P_{co} 为气缸内初始压力, Pa ; T_{cl} 为进气结束时刻气缸内的平均温度, K ; ρ_{cl} 为进气结束时刻气缸内压力, Pa .

调试影响发动机性能的参数, 并结合增压汽油机的外特性实验数据对该计算模型进行校正, 结果如图 2 所示. 由图 2 可知, 发动机各转速下功率和比油耗的计算结果与试验结果曲线比较吻合, 误差均在 5% 范围内, 因此, 可以利用该计算模型对改善增压汽油机瞬态工况下响应性能的废气旁通阀瞬态控制策略进行研究.

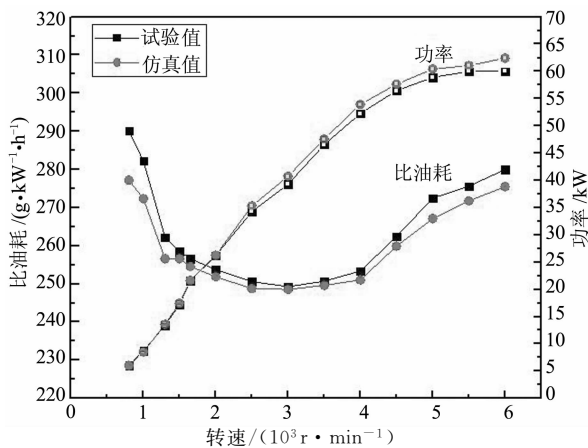


图 2 汽油机外特性工况下计算值与试验值对比
Fig. 2 The contrast between the simulation value and the test value under outer engine characteristics

1.3 发动机瞬态计算模型参数设置

对所建立的可靠稳态仿真模型进行瞬态设置. 使用指针变量将进排气正时、空燃比、稳态外特性计算所得废气旁通阀开度等设置为随发动机转速变化的量^[12-13]. 由于旁通阀的实际开闭速度对发动机瞬态响应有较大影响, 需要在执行器中对最大开闭

速度进行设定.

2 瞬态工况计算与分析

Turbine 模块中 Wastegate Diameter 使用 Profile Transient 形式设定不同时刻废气旁通阀开度值, 根据增压压力在不同废气旁通阀开度下的变化规律, 编写相关程序, 从而实现废气旁通阀及时有效的 PID 瞬态控制.

2.1 瞬态加速工况计算

使汽油机瞬态模型在速度模式下运行, 将发动机转速有效控制在固定转速下. 分别将倍数梯度变化的增压压力设定成 PID 控制器目标值对模型进行瞬态计算. 得到各固定转速下达到目标转矩所用时间的对比.

由图 3 可知, 不同固定转速下, 随着目标增压压力的提高, 达到目标转矩的时间不断减少. 同时, 在固定转速相对较小时, 通过增大增压压力改善转矩响应的效果更加明显. 因为当转速较低时, 驱动增压器做功的废气流量很小, 通过提高目标增压压力能够相应延迟废气旁通阀在加速过程中的开启时刻, 增压器获得更多的废气能量从而实现增压压力快速上升. 因此, 增大目标增压压力能够显著减少汽油机定转矩加速工况下的响应时间. 但由于增压汽油机容易发生爆燃, 且增压器可能发生超速, 故对增压压力有一定限制, 通常不大于 200 kPa^[14]. 采用这种方法确定发动机不同固定转速对应的适当增大后的最佳增压压力.

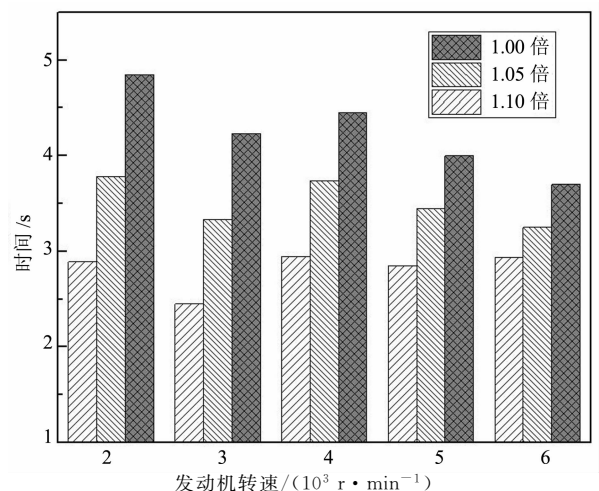


图 3 不同转速下转矩瞬态响应对比
Fig. 3 The contrast of torque transient response under different engine speed

在PID控制模块中将目标控制值设置成XYTable定义的不同固定转速下最佳增压压力随转速变化关系的指针变量。瞬态模型负载模式下,节气门部分开启时汽油机稳定于2000 r/min,25个运转循环后节气门突然增大到最大开度,发动机自2000 r/min起进行定转矩加速。图4为定转矩加速时发动机转速瞬态响应的对比。

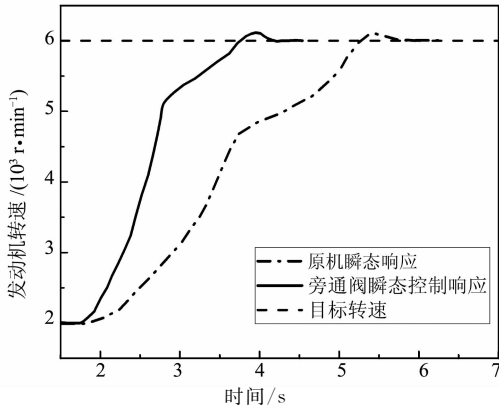


图4 定转矩加速工况下发动机加速响应特性对比
Fig. 4 The contrast of transient response characteristics under the acceleration condition

由图4可知:定转矩加速过程中,对废气旁通阀采用以不同转速下最佳增压压力为目标控制值的PID控制,发动机转速在0.32 s内就开始上升,整个加速过程所用时间比原机缩短了1.5 s,性能提高36.1%。汽油机在定转矩加速下的瞬态响应显著改善。

图5、图6分别为定转矩加速工况下增压器转速、废气旁通阀开度随时间变化的对比。

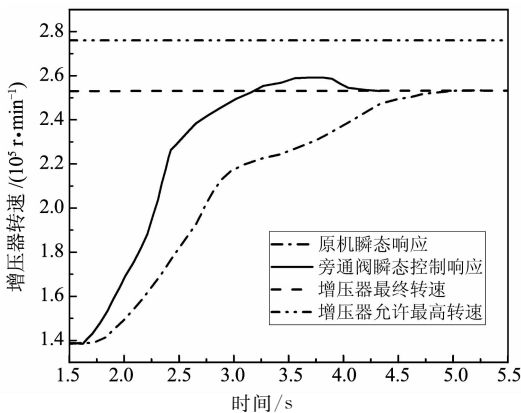


图5 定转矩加速工况下增压器转速响应特性对比
Fig. 5 The contrast of turbocharger speed response time

图7为定转矩加速工况增压器与发动机的联合运行线对比图。

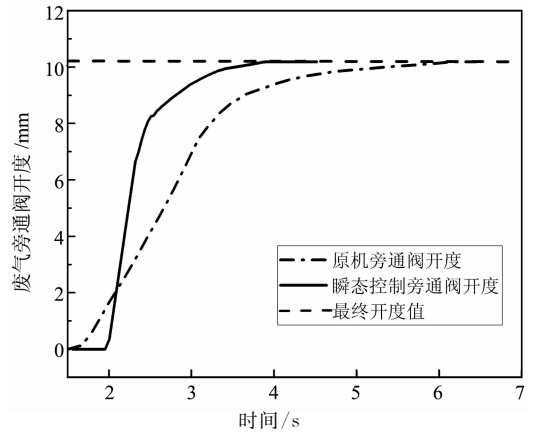


图6 定转矩加速工况下废气旁通阀开度随时间变化的对比
Fig. 6 The contrast of wastegate opening along with the change of time in accelerated operation with constant torque

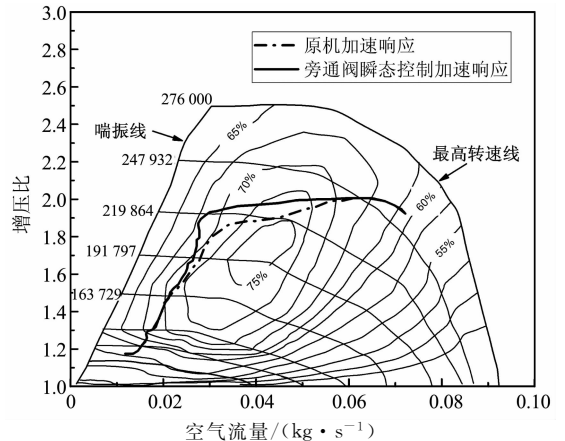


图7 定转矩加速工况下增压器和汽油机联合运行线对比
Fig. 7 The contrast of joint operation line between supercharger and gasoline engine in accelerated operation

通过对比可以看出,定转矩加速工况下,采用PID对废气旁通阀进行瞬态控制,在相同空气流量下其增压压力上升更快。这是因为在固定转速下,随着增压压力目标值的增大,当空气流量相同时,涡轮端废气旁通阀的开度则相对减小,更多废气能量用以驱动增压器工作,压气机出口压力也随之增大。同时,其联合运行线依然远离喘振线,增压器转速始终在增压器正常运行转速范围内,发动机与增压器匹配良好。

2.2 瞬态减速工况计算

汽油机在额定转速(6000 r/min)下全负荷稳定运转,而后在加载转矩不变的情况下,节气门突然关闭到一定开度,此时发动机进入定转矩减速工况。

在仿真计算时设定瞬态模型处于负载模式下,节气门保持最大开度,发动机在额定转速平稳运行 50 个循环后,节气门在 0.02 s 内急速减小到目标转速(2 000 r/min)对应的开度值,发动机在定转矩减速工况运行.为防止发动机减速工况下进气量快速减少而引起的增压器喘振,PID 控制采用前期适当延长废气旁通阀全开的时间,待转速下降某一值后,目标控制值切换为压气机出口增压压力的控制策略.由于发动机在定转矩减速时,前期发动机转速下降很快,为使控制策略切换后能实现良好的效果,需要确定适合的转速切换点,本文中选定为 1.25 倍目标转速.

图 8 为定转矩减速工况下废气旁通阀开度变化的对比.图 9 为定转矩减速工况下发动机转速响应特性的对比.由图 8、图 9 中可以看出,当采用此控制策略时,定转矩减速前期废气旁通阀快速增大到最大开度并持续一段时间,发动机转速也随之快速下降.同时在整个定转矩减速过程中采用该控制策略达到目标转速的时间为 3.1 s,而原机达到目标转速的时间为 5.6 s,瞬态响应提高了 44.6%.

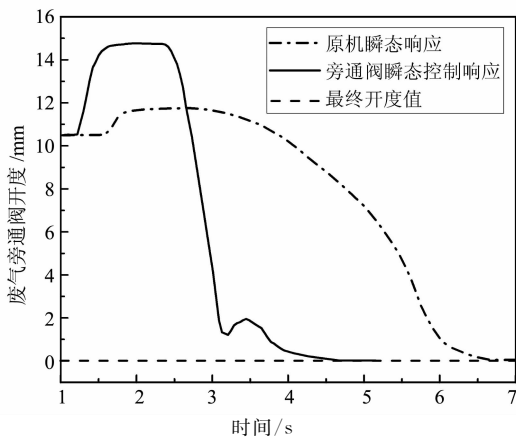


图 8 定转矩减速工况下废气旁通阀开度随时间变化的对比

Fig. 8 The contrast of wastegate opening along with the change of time in decelerated operation with constant torque

图 10 为定转矩减速工况下增压器和汽油机之间联合运行线的对比.

由图 10 可知,定转速减速工况下,联合运行线向高效率区偏移,同时逐渐远离喘振线.这是由于前期适当延长废气旁通阀全开的时间,在相同发动机转速和空气流量下,旁通阀开度相应增加,废气旁通量占比提高,增压器对进气的做功能力减弱,增压比

下降.整个减速过程中增压器未发生喘振和超速,能够正常高效运转.

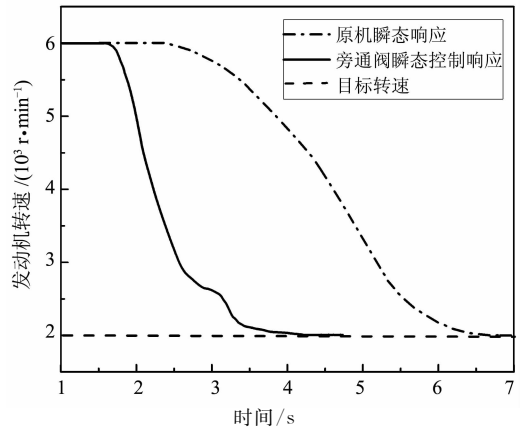


图 9 定转矩减速过程中发动机转速响应特性对比
Fig. 9 The contrast of engine speed response characteristics in decelerated operation with constant torque

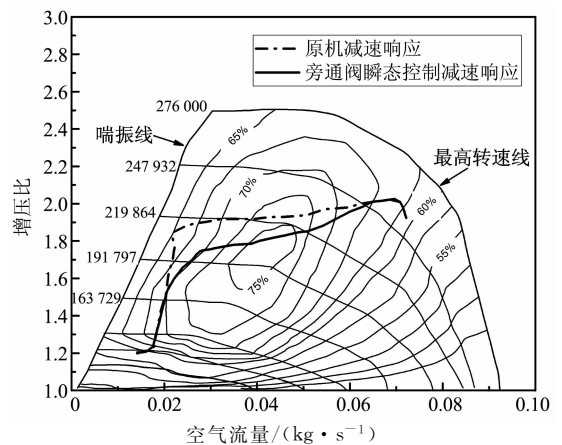


图 10 减速工况下增压器和汽油机联合运行线的对比
Fig. 10 The contrast of joint operation line between supercharger and gasoline engine in decelerated operation

3 结论

1) 涡轮增压汽油机在定转矩加速工况时瞬态性能较差,达到目标转速的响应时间为 4.15 s,采用适当增大各转速下增压压力作为瞬态控制目标值对废气旁通阀进行瞬态控制的方法,达到目标转速的响应时间仅为 1.5 s,瞬态加速性能提升了 36.1%,同时发动机与增压器之间能够实现高效的匹配.

2) 在定转矩减速工况采用前期适当延长废气旁通阀全开的时间,待转速下降到 1.25 倍目标转速后,控制目标切换到增压压力的控制策略.结果表明这能够使发动机转速快速下降到目标值,同时联合

运行线逐渐远离喘振线,保证了增压器正常运行,同时极大地改善了定转矩减速工况下增压汽油机的瞬态响应。

参考文献

- [1] 张俊红,李志刚,王铁宁. 车用涡轮增压技术的发展回顾、现状及展望[J]. 小型内燃机与摩托车,2007,36(1):66-71.
ZHANG J H,LI Z G,WANG T N. Retrospect status and expectation for turbocharger technology of vehicle[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle,2007,36(1):66-71. (In Chinese)
- [2] 陈红. 汽油机废气涡轮增压技术的研究及发展前景[J]. 内燃机,2008(1):1-3.
CHEN H. Research and development prospects on turbocharging technology of gasoline engine[J]. Internal Combustion Engines,2008(1):1-3. (In Chinese)
- [3] 付建勤,刘敬平,陈玉龙,等. 蒸汽辅助涡轮对增压汽油机瞬态响应特性影响的模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(4):13-18.
FU J Q,LIU J P,CHEN Y L, *et al.* A simulation study on the effect of steam assisting turbo on the transient response of turbocharged gasoline engine[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(4):13-18. (In Chinese)
- [4] 孙万冲,韩水强,刘忠长,等. 可变喷嘴涡轮增压器对车用柴油机瞬态性能的影响[J]. 汽车工程,2006,28(2):122-124.
SUN W C,HAN Y Q,LIU Z C, *et al.* Effect of variable nozzle turbocharger on transient performance of automotive diesel engine[J]. Automotive Engineering,2006,28(2):122-124. (In Chinese)
- [5] BUMBY J,CROSSLAND S,CARTER J. Electrically assisted turbochargers their potential for energy recovery[C]//The Institution of Engineering and Technology Hybrid Vehicle Conference,2006:43-52.
- [6] 刘博,邓康耀,张哲,等. 可调二级增压柴油机增压压力控制策略计算研究[J]. 内燃机工程,2011,32(4):17-22.
LIU B,DENG K Y,ZHANG Z, *et al.* Computational study on boost pressure control strategy for regulated stage turbocharged diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2011,32(4):17-22. (In Chinese)
- [7] MASSIO C,SILVIA M. Waste-gate turbocharging control in automotive SI engines effect on steady and unsteady turbine performance[R]. Washington DC:SAE International,2007:2007-01-3543.
- [8] KLEEBERG H,TOMAZIC D. Future potential and development methods for high output turbocharged direct injected gasoline engines[C]//2006 World Congress. Detroit, Michigan:SAE,2006:2006-01-0046.
- [9] 马明芳. 电控废气涡轮增压系统的结构和工作原理[J]. 汽车运用,2008(7):33-35.
MA M F. Structure and working principle of electric control turbocharging system[J]. Auto Application,2008(7):33-35. (In Chinese)
- [10] 龚金科,陈长友,胡辽平,等. 电控旁通阀涡轮增压器匹配计算研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(8):1-7.
GONG J K,CHEN C Y,HU L P, *et al.* Matching simulation of an electrically controlled waste valve turbocharger[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2016,43(8):1-7. (In Chinese)
- [11] ANTOINE A,CORDE G,KNOP V. 1D simulation of turbocharged gasoline direct injection engine for transient strategy optimization[R]. Washington DC:SAE International,2005:2005-01-0693.
- [12] WESTIN F,ANGSTROM H. Optimization of turbocharged engines transient response with application on a formula student engine[R]. Washington DC:SAE International,2005:2005-01-2113.
- [13] 肖茂宇,石磊,邓康耀. 增压直喷汽油机增压系统瞬态过程建模计算与优化[J]. 上海汽车,2010(5):12-17.
XIAO M Y,SHI L,DENG K Y. Turbocharged direct injection gasoline engine turbocharging system transient process modeling and optimization calculation[J]. Shanghai Auto,2010(5):12-17. (In Chinese)
- [14] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:80-81.
ZHOU L B. Internal combustion engine principle[M]. Beijing:China Machine Press,2005:80-81. (In Chinese)