

可调两级增压系统的动态性能研究

张宝川¹, 崔 毅¹, 邓康耀¹, 石 磊¹, 李先南², 王新权², 祁 平³

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 七一一研究所, 上海 037036;

3. 中国北方发动机研究所, 山西 大同 037036)

摘 要: 以一款 6 缸增压发动机为对象, 对可调两级增压系统在推进特性下变工况的动态性能进行研究。利用 GT 模型耦合优化算法, 对两级增压系统的匹配方案和调节规律进行优化; 通过推进特性下动态性能的分析, 确定了旁通阀的动态控制规律, 在增压压力超调限制的条件下, 显著提高了增压压力响应速度; 建立了积分分离的 PI 控制算法, 通过与普通 PI 控制对比发现: 积分分离的 PI 控制算法可以保证增压系统的抗干扰性, 使得增压压力的波动明显减小。

关键词: 柴油机; 可调两级增压; 动态; 旁通阀

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)03-0014-05

Dynamic Characteristics Study of Regulated Two Stage Turbocharging System

Zhang Baochuan¹, Cui Yi¹, Deng Kangyao¹, Shi Lei¹, Li Xiannan²,
Wang Xinquan², Qi Ping³

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200240;

3. China North Engine Institute, Shanxi Datong, 037036)

Abstract: Taking a 6-cylinder turbocharged engine as the research object, the dynamic characteristics of a regulated two stage (R2S) turbocharging system was studied under variable working condition in the propulsion mode. Using the GT simulation model and optimization method, the matching of R2S system and the regulation rules were optimized. Through dynamic characteristics study under propulsion mode, the dynamic control rules of bypass was determined, and the turbocharging response rate was significantly enhanced under overshoot limitation. The integral separation PID control was built up, compared with traditional PID control, it could guarantee the anti-interference characteristics of the turbocharging system, and reduce fluctuation of turbocharging pressure significantly.

Key words: diesel; regulated two stage turbocharging; dynamic; bypass valve

0 引 言

可调两级增压系统是目前内燃机领域中一种极具潜力的涡轮增压技术^[1-3], 其不仅能够为内燃机提供足够的增压压力和进气量, 满足米勒循环^[4-5]和废气再循环^[6-8]对高压比的需要, 以此解决日益

严格的排放法规, 还能解决增压系统在加速过程中的进气迟滞性, 提高加速性能。目前对于可调两级增压系统的研究多为稳态工况下旁通阀控制规律的分析, 通过全工况下不同开度的稳态仿真或试验, 得到旁通阀在不同指标下各个工况的最佳开度。本文的研究重点在于推进特性下变工况的动态性能分

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2014-12-04

作者简介: 张宝川(1989-), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机增压, E-mail: bczhang111@163.com。

析，制定了旁通阀在动态过程中的变化规律，在不超过最高燃烧压力和排温的限制条件下达到较快的响应性。

1 计算模型及验证

以一台 6 缸增压柴油机为研究对象，其基本参数见表 1。

表 1 柴油机基本参数	
标定功率/kW	220
标定转速/ (r · min ⁻¹)	2 200
最大扭矩 / (N · m)	1 160
最大扭矩转速/ (r · min ⁻¹)	1 500
缸径/m	108
冲程/m	130
连杆长度/m	209.7
压缩比	18: 1

利用 GT-power 建立发动机仿真模型。其中，缸内燃烧采用实测放热规律拟合的三韦伯燃烧模型。

由于要进行推进特性的两级增压系统研究，将原机 1 500 (r · min⁻¹) 最大扭矩点做为推进特性的 100% 工况点，推进特性曲线见图 1。

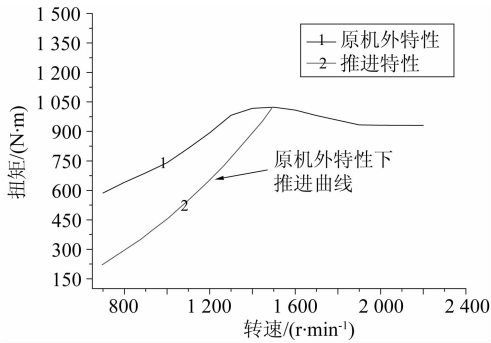


图 1 单级与两级的推进特性曲线

从验证结果对比（图 2）中可以发现：GT 模型和试验结果吻合度较高，油耗率、涡前排温和中冷后压力三个参考量的误差值均在 5% 以内，可以认为原机的 GT 模型符合实际，可以进行推进特性两级增压系统的性能仿真研究。

在稳态工况计算模型的基础上，建立了原机的动态分析模型。由于试验台架无法准确实现柴油机螺旋桨工况，并且在试验过程中测功机的转速和转矩以及油门开度都受到内部 PID 调节的控制，这些因素都将对模型验证造成很大的影响。因此在模拟过程中，将实测的循环喷油量和瞬时扭矩作为输入条件，其中循环喷油量通过试验过程中的 ECU 系统进行采集获取，并对瞬态过程其他参数进行计

算。瞬态加速加载过程计算和试验的对比见图 3 和图 4。

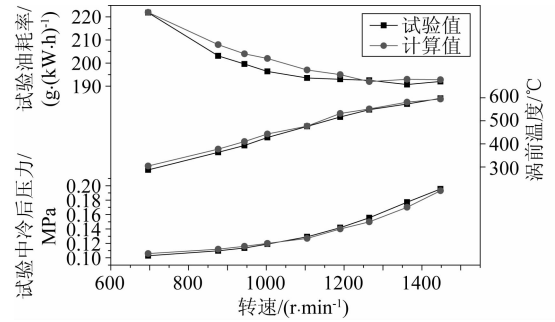


图 2 推进特性下 GT 计算与试验对比

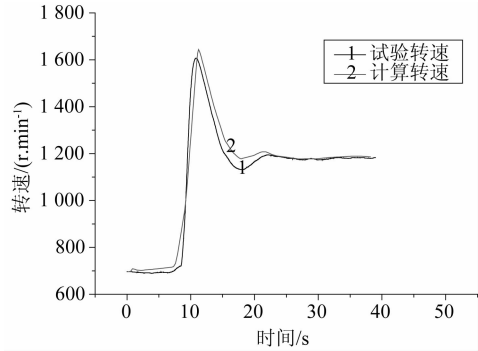


图 3 推进特性 10% ~ 50% 工况加载过程转速验证

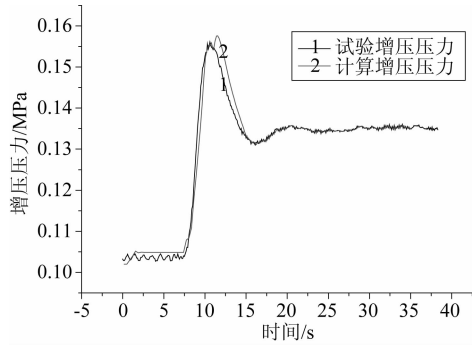


图 4 推进特性 10% ~ 50% 工况加载过程增压压力验证

2 推进特性可调两级增压系统的匹配及调节规律研究

为了确定可调两级增压系统的匹配方案和旁通阀的开度随工况的变化规律，建立了与 GT 耦合的优化分析模型，其中 GT 模型见图 5。

优化模型中，涡轮增压器图谱选用理论分析初选的增压器图谱，并将高低压级涡轮和压气机的流量参数、高压级涡轮旁通阀的开度作为优化参数。以综合油耗率或综合 NO_x 排放作为优化目标，其定义为：

$$\text{综合油耗} = \frac{\sum BSFC_i \times P_i \times W_{Fi}}{\sum P_i \times W_{Fi}} \text{ (g} \cdot \text{(kW} \cdot \text{h)}^{-1}\text{)}$$

$$\text{综合 NO}_x \text{ 排放} = \frac{\sum (Bs\text{NO}_x) \times P_i \times W_{Fi}}{\sum P_i \times W_{Fi}} (\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$$

式中: W_{Fi} 为推进特性工况 i 对应的权重。在同一推进特性下计算时, 流量参数不随工况变化, 而旁通阀开度随工况变化, 从而保证综合指标的正确性。在优化过程中还要考虑到一些运行约束条件, 如: 最高燃烧压力、缸内燃烧最低

过量空气系数、涡轮前排温、涡轮增压器转速、喘振域度等的限制。根据优化分析, 可以得到最佳的涡轮增压器匹配方案和旁通阀开度规律。但是, 由于实际可选的增压器型谱有限, 因此只能选择较优方案。最后选取了两个博格华纳增压器, 并根据实际的增压器图谱, 确定了调节规律, 见表 2。

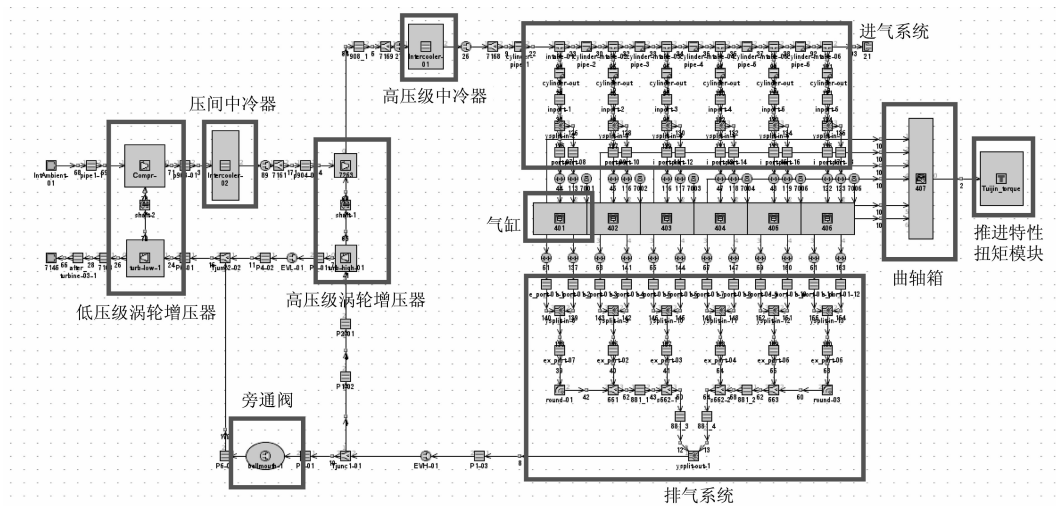


图 5 可调两级增压柴油机 GT 模型

表 2 旁通阀调节规律

综合油耗最低			
工况	阀门当量直径/mm	旁通比/%	增压压力/MPa
25%	0	0.1	0.17
50%	3.2	1.5	0.21
75%	8.9	10.5	0.25
100%	18.1	34.5	0.28
NO _x 排放最低			
工况	阀门当量直径/mm	旁通比/%	增压压力/MPa
25%	0	0.1	0.17
50%	2.1	0.6	0.20
75%	8.5	9.6	0.26
100%	19.1	37.2	0.27

注: 旁通比为流经旁通阀的气体流量与柴油机总排气流量之比

3 可调两级增压柴油机动态性能分析

3.1 推进特性下不同控制规律的动态分析

本次研究主要考虑可调两级增压柴油机从推进特性 25% 加载到 75%; 以及从 20% 先加载到 50%, 再到 100% 负荷的两级加载动态响应性能。

仿真模拟了柴油机在 4 s ~ 8 s 的时间内由推进特性的 25% 工况加载到 75% 工况的动态过程。由上一节的计算结果可知: 以经济性指标为主, 在 25% 和 75% 工况下旁通阀的最佳开度 (当量直径)

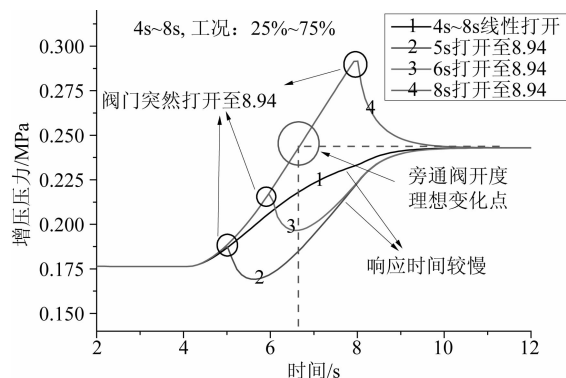


图 6 旁通阀开度理想变化点示意图

分别为 0 和 8.94 mm, 增压压力分别为 0.173 MPa 和 0.251 MPa。由于考虑到实际推进特性加载过程较为缓慢, 故动态分析时采用了开环控制。从图 7 可以发现: 当旁通阀分别在 5 s、6 s 和 8 s 的时候突然打开至 8.94 mm, 增压压力存在明显的突降, 然后再逐渐达到目标增压压力。对于增压压力的动态分析, 主要考虑对象为响应性与超调量。在动态加载过程中, 关闭旁通阀门使得当量流通面积减小, 增压压力的响应性得到最大限度的提高, 但如果加载过程中一直关闭旁通阀 (如图 6 中 8 s 打开的动态曲线所示), 又将使得增压压力过大, 最高燃烧压力超限 (如图 8 所示)。然而在图 6 中还可

以发现: 旁通阀在 5 s、6 s 的时候突然打开, 以及 4 s ~ 8 s 随时间线性打开, 这三种控制规律使得增压压力的响应明显变慢。综上分析, 存在着一个旁通阀开度变化的理想时刻点, 在此理想时刻点之前, 旁通阀保持关闭, 提高增压压力的动态响应性; 在这一时刻之后, 为了使得增压压力的变化光顺柔和, 设定旁通阀随时间线性打开至 8.94 mm, 如图 7 所示。

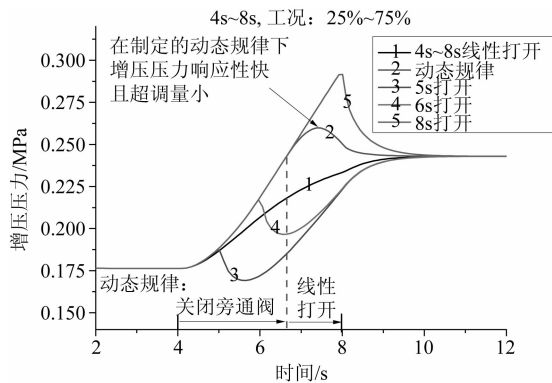


图 7 不同控制规律下增压压力动态对比

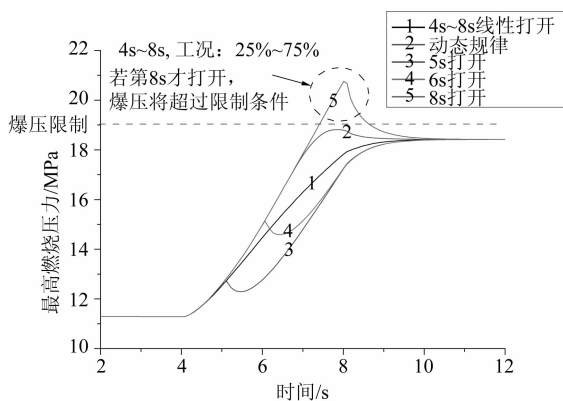


图 8 不同控制规律下缸内最高燃烧压力动态对比

按照上述的旁通阀变化动态规律的寻求方法, 对船用柴油机 25% ~ 50% ~ 100% 这两段加载过程进行仿真对比分析, 结果如图 9 所示。从图中可以发现: 在 25% ~ 50% 阶段, 不同的控制规律对增压压力的动态响应性没有明显的影响, 而在高负荷阶段, 不同控制规律的影响情况与 25% ~ 75% 相似。

3.2 稳定工况下系统抗干扰性分析

对于稳态控制, 普遍采用基于各工况最佳增压压力 MAP 图的闭环反馈控制, 之所以选择增压压力作为反馈信号, 因为它能很好地反映发动机气路对于高压级涡轮旁通阀开度的响应, 而且对燃烧和整机性能又有直接的影响^[9]。

稳态控制多采用 PI (比例 - 积分) 控制算法。控制系统根据存储在控制器中的最佳增压压力与由

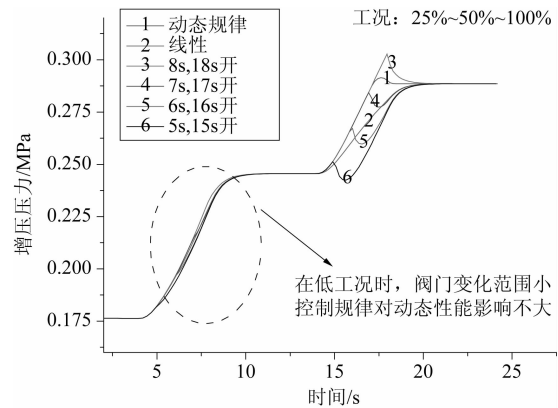


图 9 不同控制规律下两段加载的动态对比

传感器测定的实际增压压力的差值计算旁通阀的开度, 其表达式为:

$$\theta_{\text{com}} = K_p \left((P_{\text{set}} - P_{\text{real}}) + \frac{1}{T_i} \int (P_{\text{set}} - P_{\text{real}}) dt \right)$$

式中: θ_{com} 为开度控制值; P_{set} 为最佳增压压力, P_{real} 为实际增压压力; K_p 为比例常数, T_i 为积分时间常数。

为了研究闭环控制算法对整机性能的影响, 建立了 GT 与 Simulink 的耦合仿真模型^[10], 见图 10。

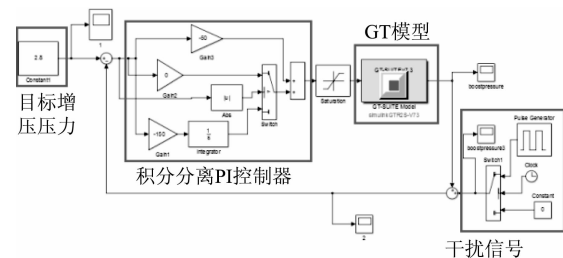


图 10 Simulink 中耦合 GT-power 模型的结构图

以 100% 负荷为例, 在稳态工况下达到了目标增压压力 0.28 MPa, 在运行过程的某一时刻 (如图 11 所示的第 4 s 和第 8 s), 输入一个幅值为 0.04 MPa 的干扰信号, 考察不同闭环控制算法的调节响应过程。

控制器的设计过程中, 加入积分调节的目的是为了消除静差和提高控制精度。但在稳态过程中, 往往会受到干扰信号的影响, 这将使系统在短时间内输出很大的偏差, 造成控制运算积分积累, 导致超调量过大, 引起系统的较大震荡, 这是实际过程中所不允许的。本次研究采用了积分分离的 PI 控制方式。其基本思路为: 当被控量与目标值偏差较大时, 取消积分调节, 以避免由于积分作用使系统稳定性降低, 超调量增大; 当被控量接近目标值时, 引入积分控制, 以消除静差, 提高精度。积分分离的 PI 控制算法可以表示为:

$$u(k) = K_p \text{error}(k) + \beta K_i \sum_{j=0}^k \text{error}(j) T$$

式中, T 为采样时间, β 为积分项的开关系数

$$\beta = \begin{cases} 1 & |\text{error}(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |\text{error}(k)| \geq \varepsilon \end{cases}$$

采用积分分离和普通 PI 算法对扰动的响应过程见图 11。

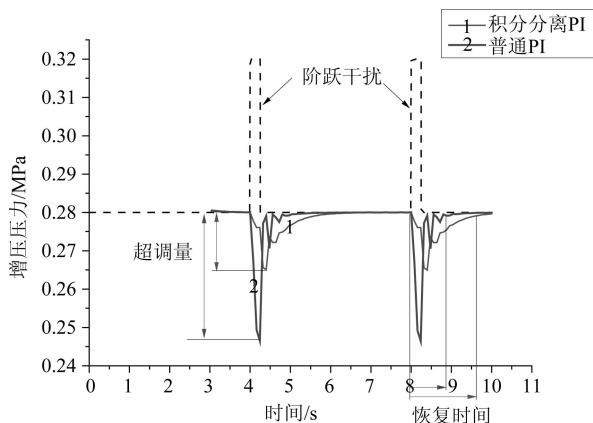


图 11 100%工况不同控制算法对正干扰信号的响应

从计算结果可以看出, 积分分离 PI 控制算法的超调量远小于普通的 PI 控制, 但也牺牲了一定的恢复时间。当干扰信号为正, 则系统响应的超调量为负, 而过小的增压压力必将导致该工况下过量空气系数的减小, 燃烧恶化, 碳烟增加。

当干扰信号为负 (如图 12), 则系统响应的超调量为正, 如果不进行超调量的控制, 那么必将导致增压压力过高, 导致缸内最高燃烧压力超限。

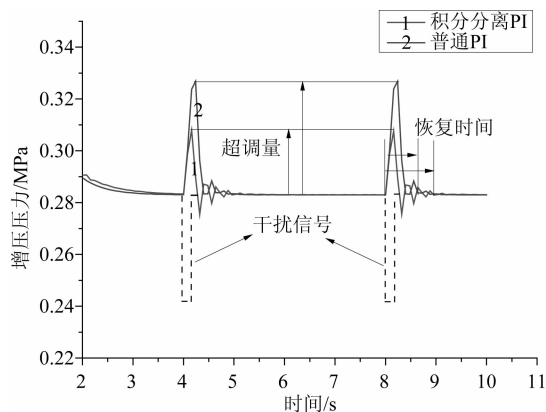


图 12 100%工况不同控制算法对负干扰信号的响应

动态过程特性的研究得到以下结论:

(1) 利用 GT 模型耦合优化算法, 可以对两级增压系统的匹配方案和调节规律进行优化, 以达到最佳的经济性和排放性能。

(2) 通过推进特性下动态性能的分析, 确定了旁通阀的动态控制规律, 在增压压力超调限制条件下, 显著提高了增压压力响应速度, 对两级增压的推进特性试验具有一定的指导意义。

(3) 建立了积分分离的 PI 控制算法, 通过与普通 PI 控制对比发现: 积分分离的 PI 控制算法可以保证增压系统的抗干扰性, 使得增压压力的波动明显减小。

参考文献

- [1] Steinparzer F, Stutz W, Kratochwill H, et al, BMW's new six-cylinder diesel engine with two-stage turbocharging [J]. MTZ worldwide Edition, 2005, 66 (05): 2-5.
- [2] 青山. BorgWarner 博格华纳 R2S 两级可调涡轮增压系统 [J]. 汽车与配件, 2012 (11): 56-57.
- [3] Mallamo F, Badami M, Millo F. Effect of compression ratio and in-jection pressure on emissions and fuel consumption of a small displacement common rail diesel engine [C]. SAE paper 2005-01-0379, 2005.
- [4] 大江博海, 人见光夫, 岩田典之. 关于米勒循环增压发动机的未来展望 [J]. 柴油机设计与制造, 1997 (3): 13-20.
- [5] 汪齐富, 崔毅, 邓康耀, 等. 船用柴油机米勒循环两级增压系统的设计研究 [J]. 柴油机, 2012, 34 (2): 26-53.
- [6] 陈贵升, 郑尊清, 尧命发, 等. 不同增压方式下 EGR 对高压共轨柴油机燃烧和排放的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2011 (6): 512-520.
- [7] 陈贵升, 马帅营, 毛斌, 等. 基于 EGR 技术的低排放重型柴油机燃烧系统开发 [J]. 内燃机学报, 2013 (4): 309-317.
- [8] 郑尊清, 张文强, 尧命发, 等. 高/低压 EGR 对两级增压柴油机性能和排放影响的实验研究 [J]. 内燃机工程, 2014 (1): 1-7.
- [9] 刘博. 柴油机可调二级涡轮增压系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院. 2011.
- [10] 隋菱歌. 增压柴油机瞬态工况性能仿真及优化 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.

4 结论

通过对可调两级增压系统的匹配、调节, 以及