doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.049

柴油机可调两级增压系统高原自适应控制策略*

李华雷[1]　利　奇[1]　石　磊[1]　邓康耀[1]　邢卫东[2]　刘　莹[2]

(1. 上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 中国北方发动机研究所柴油机增压技术重点实验室, 天津 300400)

摘要: 为提升某 V 型柴油机的高海拔性能,通过可调两级增压系统的匹配计算,确定了高低压级涡轮和压气机的特性。基于变海拔稳态工况性能目标,进行了柴油机全工况最佳阀门开度和最佳增压压力的标定计算。建立了柴油机的瞬态响应仿真模型,计算分析了海拔高度对增压压力瞬态响应特性的影响规律。根据最佳增压压力 MAP 图设计了开环和闭环控制策略,在不同海拔高度下研究其改善增压压力瞬态响应特性的能力。结果表明:与开环控制策略相比,闭环控制策略能更好地改善柴油机变海拔的瞬态响应性能。通过采用增压压力的闭环控制策略,平原工况的增压系统响应时间由 2.82 s 减少到 2.41 s,海拔 3 000 m 时由 3.20 s 减少到 2.32 s,响应时间减少了 27.5%;海拔4 500 m 时由 3.41 s 减少到 2.25 s,在很大程度上减弱了海拔高度对发动机瞬态响应特性的影响。

关键词: 柴油机　可调两级增压系统　高原　自适应　控制策略

中图分类号: TK421.8　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0335-08

Self-adapting Control Strategy of Diesel Engine with Regulated Two-stage Turbocharging System on Highland

Li Hualei[1]　Li Qi[1]　Shi Lei[1]　Deng Kangyao[1]　Xing Weidong[2]　Liu Ying[2]

(1. *Key Laboratory for Power Machinery and Engineering*, *Ministry of Education*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*
2. *National Key Laboratory of Diesel Engine Turbocharging Technology*, *Chinese North Engine Research Institute*, *Tianjin* 300400, *China*)

Abstract: To improve the dynamic performance of a V-type diesel engine at high altitude, the matching calculation was carried out between the diesel engine and regulated two-stage turbocharging system, and the two-stage turbines and compressors were determined. The calibration results of optimum valve opening and optimum boost pressure were achieved at all operating conditions according to the steady performance target at different altitudes. The transient simulation model was constructed, and the effect of different altitudes on the transient response characteristic of boost pressure was investigated. The open-loop and closed-loop control strategies were designed based on the MAP diagram of optimum boost pressure to improve the transient response of boost pressure at different altitudes. The results showed that the closed-loop control strategy can achieve better transient response compared with the open-loop control strategy. With the closed-loop control strategy of boost pressure, the response time was reduced from 2.82 s to 2.41 s at the altitude of 0 m. The response time was reduced from 3.20 s to 2.32 s at the altitude of 3 000 m, and it was reduced from 3.41 s to 2.25 s at the altitude of 4 500 m. The effect of different altitudes on transient response characteristic was largely weakened with the closed-loop control strategy.

Key words: Diesel engine　Regulated two-stage turbocharging system　Highland　Self-adapting Control strategy

收稿日期: 2014-11-27　修回日期: 2015-01-05

*国防基础科研计划资助项目(B0920110003)

作者简介: 李华雷,博士生,主要从事内燃机增压研究,E-mail: lihualei@sjtu.edu.cn

通讯作者: 邓康耀,教授,博士生导师,主要从事内燃机增压与性能研究,E-mail: kydeng@sjtu.edu.cn

引言

我国地域辽阔,高原、山地地貌分布广阔。其中,海拔超过 1 000 m 以上高原地区约占全国总面积的三分之二;2 000 m 以上高原地区约占三分之一;3 000 m 以上高原地区约占四分之一。当柴油机运行于高海拔地区时,由于大气压力的降低导致进气量不足,会出现功率下降,燃油消耗率增加,最大扭矩点对应转速向高转速偏移等问题[1-7],采用增压技术可以有效改善柴油机的高原性能。目前国内外的研究人员主要采用废气放气、可变截面和可调两级等能实现高压比、大流量的涡轮增压系统以及辅助系统来进行柴油机的高原功率恢复[8-14]。

可调两级增压系统采用两个增压器的串联运行方式,在低压级增压器流量范围的基础上通过高压级增压器的二次压缩来提升整个增压系统的压比水平,从而实现高压级和宽流量范围的兼顾。可调两级增压系统一般是在某一设计工况点进行增压器的匹配和选型,在其他工况点则需要通过调节涡轮旁通阀来适应所需压比和流量的变化。在变海拔工况下由于环境压力的变化,使得可调两级增压系统需要满足柴油机不同转速、负荷和海拔高度对增压压力和进气量的不同需求,系统变量多,控制难度加大。而在匹配方案已经确定的条件下,可调两级增压系统只能通过调整涡轮旁通阀的控制策略来满足柴油机的需求,因此研究柴油机可调两级增压系统的高原自适应控制策略具有非常重要的意义。

本文搭建某 V 型柴油机的 GT-Power 仿真模型,并在可调两级增压系统匹配计算和稳态模型的基础上,通过与 Simulink 耦合,搭建发动机的瞬态仿真控制模型,通过仿真计算比较开环和闭环控制策略对不同海拔高度下柴油机瞬态响应特性的影响规律。

1 仿真计算模型

1.1 GT-Power 稳态模型的建立与校核

以某 V 型涡轮增压 6 缸四冲程中冷柴油机为研究机型,其性能参数为:标定转速 2 200 r/min,最大扭矩转速 1 500 r/min,标定功率 404 kW,最大转矩 1 930 N·m。采用 GT-Power 软件建立原机的稳态计算模型,用于发动机响应参数的模拟计算。进排气管路采用一维简化方式,采用韦伯模型来模拟缸内燃烧并通过缸内数据进行校核,通过 woschni 模型来模拟缸内传热,涡轮增压器采用图谱离散数据形式输入,并对柴油机功率、燃油消耗率和增压压力等参数进行试验数据校核,其对比结果如图 1 所示。

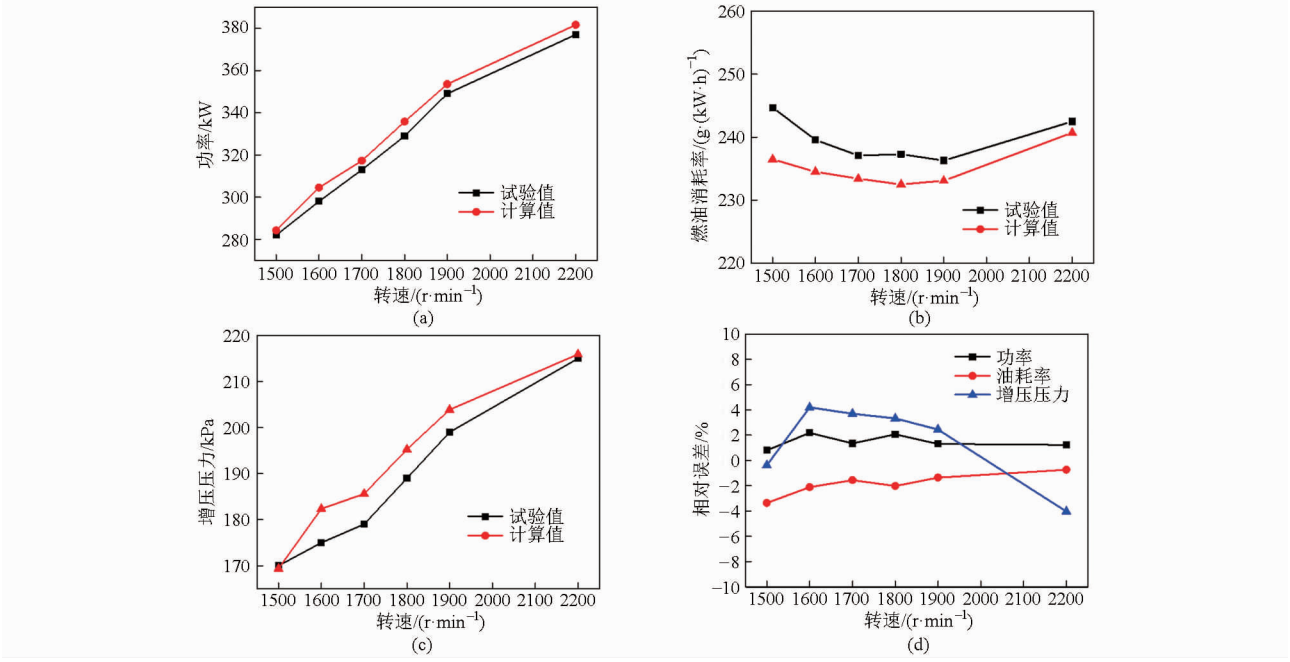

图 1 计算结果与原机试验数据对比

Fig. 1 Comparison of simulation and measured results

(a) 外特性功率校核 (b) 外特性燃油消耗率校核 (c) 外特性增压压力校核 (d) 主要性能参数的相对误差情况

可以看出,计算结果与试验数据整体趋势一致,燃油消耗率在低转速部分误差稍大,最大为 3.35%;而增压压力在转速 1 600 r/min 时误差最大,为 4.2%;但所有计算值的相对误差都在 5% 以内,因此计算模型能很好地反映发动机真实的性能,满足计算分析要求。

1.2 可调两级增压系统匹配

本文采用可调两级增压系统解决柴油机高原功

率恢复问题，并将目标定为从平原到海拔 3 000 m 保持原机性能不变，4 500 m 海拔时功率可恢复到平原时的 85%。针对变海拔运行工况，选择海拔 4 500 m 的最大扭矩点作为可调两级增压系统的匹配点，通过柴油机功率、燃油消耗率和空燃比等性能参数，计算得到增压系统所需提供的增压压力和进气流量。通过理论分析，在总压比相同的情况下，高低压级压气机进气温度相同时高低压级压比相同可以使得进气端所需的总压缩功最小，因此将匹配点的高低压级压比分配定义为 50∶50。而在标定转速工况，进气流量较大，此时可调两级增压系统通过高压级涡轮旁通阀门的调节，希望效率更高的低压级增压器承担更大比例的压缩工作，所以将高低压级的压比分配定为 40∶60。

通过两个转速下的高低压级压比分配关系，计算得到高低压级的压比和折合流量，再根据压比和折合流量结果，选择合适的高低压级压气机，结果如图 2 所示。在确定高低压级压气机以后，通过柴油机的涡前温度和两级增压器的功率平衡关系，计算得到高低压级涡轮膨胀比和相似流量，结果见图 3。再根据高低压级压气机和涡轮特性，校验之前计算过程中需要假定的高低压级压气机和涡轮效率，当效率相差较大时，采用迭代的方式进行计算，最终完成可调两级增压系统的匹配过程。

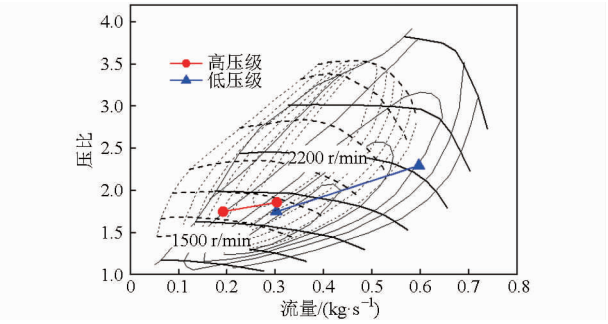

图 2　高低压级压气机选配结果

Fig. 2　Matching results of two-stage compressors

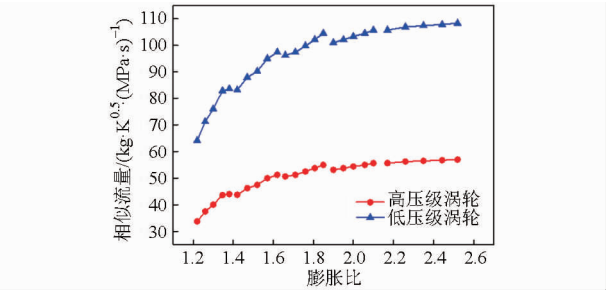

图 3　高低压级涡轮选配结果

Fig. 3　Matching results of two-stage compressors

1.3　柴油机可调两级增压系统瞬态仿真模型

在原机仿真模型的基础上，进行仿真模型的可调增压系统改建，增加高低压级涡轮增压器间的连接管路，并在高压级涡轮旁并联一个涡轮旁通阀门，并将图 2 和图 3 中的高低压级压气机和涡轮特性输入仿真模型，对柴油机进行可调两级增压系统的高原匹配，最后得到的整体模型如图 4 所示。

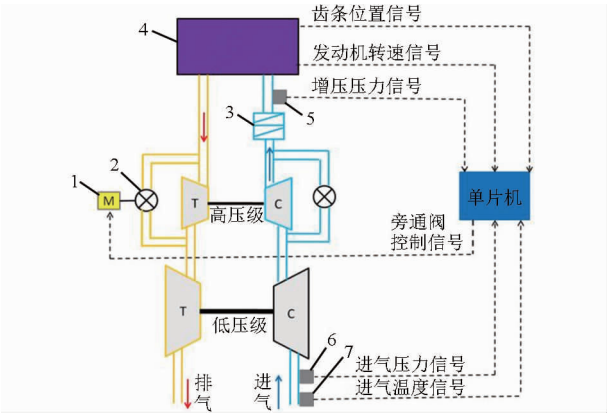

图 4　可调两级增压系统整体结构图

Fig. 4　Structure diagram of regulated two-stage turbocharging system

1. 步进电机　2. 涡轮旁通阀门　3. 中冷器　4. 柴油机　5. 增压压力传感器　6. 进气压力传感器　7. 进气温度传感器

在稳态模型基础上，将与柴油机瞬态响应特性关系密切的涡轮增压器、曲轴的转动惯量等参数进行相应的设置，将与气体流动相关的部件采用物理模型，以便能反映气体的滞后性。采用 Matlab/Simulink 建模方法来搭建可调两级增压系统的信号监控采集和涡轮旁通阀的控制部分，并通过数据接口与 GT－Power 仿真模型进行数据交换，从而实现 GT－Power 与 Simulink 的耦合仿真计算，最终组成带有控制器的柴油机可调两级增压系统瞬态仿真模型，其整体仿真模型如图 5 所示。

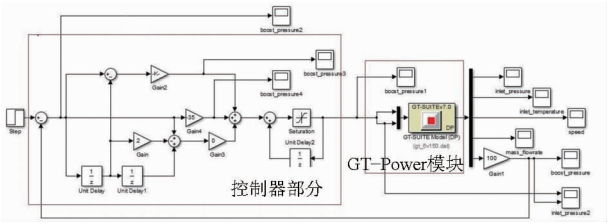

图 5　带控制器的瞬态仿真模型

Fig. 5　Transient simulation model with controller

2　可调两级增压系统变海拔全工况控制策略

2.1　柴油机变海拔工况瞬态响应规律

为了研究海拔高度的上升对柴油机瞬态响应的影响，分别在平原、海拔 3 000 m、海拔 4 500 m 下进行了柴油机可调两级增压系统的定转速加变载荷瞬态响应特性仿真。采用单一变量法，在不同海拔高度下，柴油机的高压级旁通阀开度采用匹配时的开度，转速为标定转速 2 200 r/min，负荷喷油量从

25% 瞬时增加到 75%，分析进气压力的瞬态响应情况，由于不同海拔高度下进气压力响应曲线的初态和终态不同，为了方便比较其响应快慢，将增压压力无量纲化，如图 6 所示。

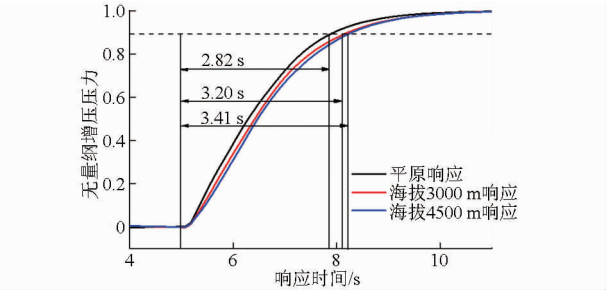

图 6 海拔高度对发动机瞬态响应的影响

Fig. 6 Effect of altitude on transient response of diesel engines

可以看出，当不采取控制措施时，海拔高度对涡轮增压柴油机的瞬态响应有较大影响。随着海拔的升高，大气环境压力的下降导致进气量减少，涡轮可获得的能量也随之减少，响应变慢。将从初始增压压力增加到 90% 的最终稳定压力所需要的时间定义为响应时间，从图中可知，在平原增压压力的响应时间为 2.82 s，海拔 3 000 m，响应时间增加到了 3.20 s，增幅为 13.4%；而到海拔 4 500 m，其响应时间为 3.41 s，增幅高达 20.9%。海拔的影响使得从平原到海拔 4 500 m 的最大响应时间差为 0.59 s。这说明随海拔增加，增压压力的瞬态响应时间变长，柴油机响应特性恶化。

2.2 可调两级增压系统变海拔全工况控制策略制定

可调两级增压系统变海拔全工况的控制策略，既要满足柴油机在不同海拔、全工况下的稳态特性，使发动机在稳态运行时，具有良好的经济性能；又要兼顾发动机在瞬态响应时的动力性，即在稳态工况发生变化时，发动机瞬态响应时间短，能很快到达平衡状态，超调量小，以防止发动机最高爆发压力超过极限值或压气机喘振等不良现象。

根据柴油机变海拔的运行要求，可采用基于最佳阀门开度 MAP 图的开环控制策略或者基于最佳增压压力 MAP 图的闭环控制策略。

2.2.1 最佳阀门开度和最佳增压压力 MAP 图制定

最佳增压压力 MAP 图和最佳阀门开度 MAP 图是一一对应的。其最佳增压压力，即为发动机在各个工况稳定运行时，其最佳阀门开度下的增压压力。而最佳阀门开度则采用穷举法计算标定得到，以燃油消耗率最低为原则得到最佳阀门开度，即在各个工况下，通过改变阀门的开度，计算得到发动机的油耗率，并选取燃油消耗率最低时的阀门开度作为该工况点的最佳阀门开度。由于研究时没有找到合适的阀门流量特性，因此在模拟旁通阀门的旁通效果时，采用了在直径为 55 mm 的连接管路中间添加一个变径部件来模拟旁通阀门的开度效果，并将其直径定义为阀门旁通直径，旁通直径为 0 mm 时表示旁通完全关闭，旁通直径为 55 mm 时表示旁通阀完全开启，因此文中最佳阀门开度时的直径表征了柴油机性能最优时所需要实现旁通量时对应的直径。直径越大，表示旁通阀开度越大，旁通量越大。其不同海拔下最佳阀门开度时的直径如图 7 ~9 所示。

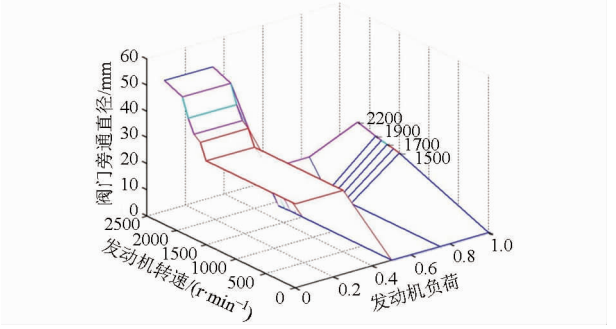

图 7 平原最佳阀门开度时的直径

Fig. 7 Optimum valve opening at altitude of 0 m

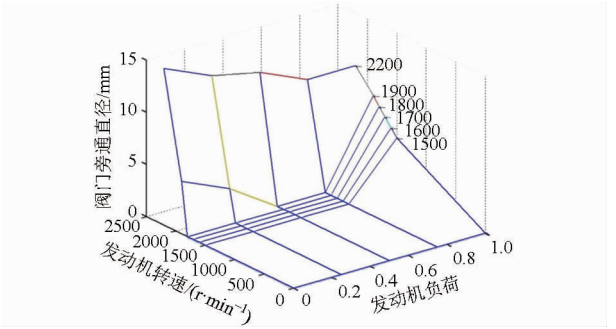

图 8 海拔 3 000 m 最佳阀门开度时的直径

Fig. 8 Optimum valve opening at altitude of 3 000 m

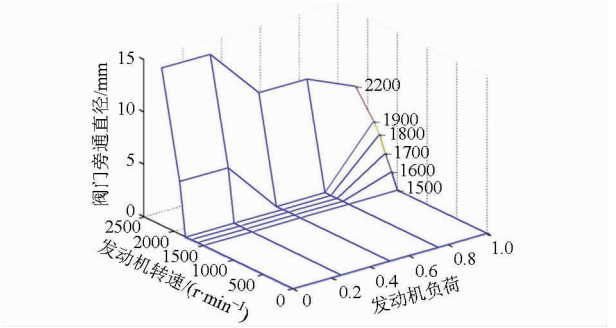

图 9 海拔 4 500 m 最佳阀门开度时的直径

Fig. 9 Optimum valve opening at altitude of 4 500 m

可以看出，以最低燃油消耗率为目标来确定最佳阀门开度时的直径时，在平原低负荷区域以及发动机的高转速区域开度较大；而在高原、部分负荷的中低转速，最佳阀门开度都为零。这是因为在平原低负荷区域以及发动机的高转速区域，发动机的进气量较充足，当阀门开度减小时，由于可调两级增压

系统的等效涡轮喷嘴面积减小，导致进气压力增大，进气量增加，反而增加了发动机的排气背压，增大了泵气功损失，因而此时需要增大阀门开度以降低发动机的油耗率；而在高原的部分负荷区域，由于大气环境压力的降低，发动机进气量减少，须减小阀门开度时的直径来减小可调两级增压系统的等效涡轮喷嘴面积，增加进气量。

2.2.2　开环控制策略

基于柴油机经济性的要求，开环控制策略通过实时采集发动机运行时对应海拔变化的进气压力、发动机转速和发动机喷油量，并根据这 3 个参数查询最佳阀门开度 MAP 图，直接得到阀门开度，作用于可调两级增压系统，从而实现不同海拔高度、不同工况的切换。其控制方案如图 10 所示。

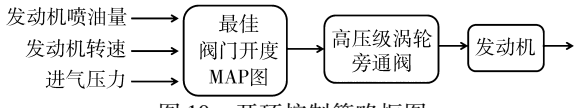

图 10　开环控制策略框图

Fig. 10　Open-loop control strategy

2.2.3　闭环控制策略

由于发动机的转速范围变化大，不同转速往往控制对象相差很大，因此闭环控制策略根据发动机不同的转速，以增压压力为目标，采用不同的控制方法。

当发动机转速小于 1 900 r/min 时，除了满负荷工况和平原时低负荷工况外，其余稳态工况运行的最佳阀门开度时的直径基本为零。因此当发动机在此区域运行时，从一个工况点切换到另一个工况点，阀门应该处于全程关闭状态，此时的涡轮增压系统没有可控性，若仍采用 PID 控制，由于工况切换时偏差的存在，则执行器就有一定的输出，此时反而使执行器频繁动作，导致系统稳定性降低，执行器寿命减少。

为了简化控制，在发动机中低转速区域（转速小于 1 900 r/min）瞬态响应时，当转速或负荷增大时，阀门应完全关闭，当实际增压压力达到目标增压压力 90% 时，采用查表直接得出阀门开度作为最终阀门开度输出值。

而当发动机转速大于等于 1 900 r/min 时，涡轮高压级旁通阀稳态开度在不同工况下都较大，增压系统可控性强，因此此时应采用基于最佳增压压力 MAP 图和 PID 控制相结合的方法。此时，控制系统通过实时采集发动机的油门位置、发动机转速和大气环境压力参数，并根据 3 个参数查询最佳增压压力 MAP 图，得到中冷后的目标增压压力，并通过与实际增压压力对比，得到增压压力的误差，通过 PID 控制器运算，得到高压级涡轮旁通阀的阀门开度，并作用于发动机，从而消除稳态误差，使实际增压压力达到目标增压压力，实现发动机在两个不同稳态工况的切换。其 PID 闭环控制部分如图 11 所示。

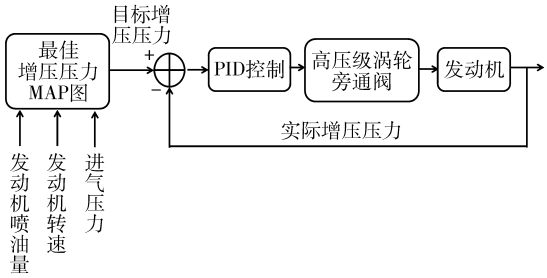

图 11　闭环控制策略框图

Fig. 11　Closed-loop control strategy

控制策略中的 PID 控制器采用增量式 PID，以防止积分饱和。其 PID 参数的选取可根据控制对象和工程设计要求的不同，选用不同的整定方法，本文采用的是归一参数整定法。首先选取一个合适的采样周期 T_0，要求其小于柴油机最高转速时的循环周期，同时也满足 Shannon 采样定律；其次，去掉积分和微分作用，使控制器变为纯比例控制，然后逐渐增大比例系数，直到系统发生临界振荡，根据曲线得到系统临界振荡周期 T_k；根据 Ziegler-Nichle 条件，则令采样周期 $T=\min(0.1T_k, T_0)$；积分时间常数 $T_i=0.5T_k$；由于执行器为电动机，为了延长电动机的寿命，控制中不包含微分环节，因此 $T_d=0$；由此可得简化后的增量式 PID 算法为

$$\Delta u(k)=K_p(2.45e(k)-3.5e(k-1))$$

在参数整定过程中 $T=\min(0.1T_k, T_0)$，调整 K_p，观察控制效果，直到得到响应曲线响应迅速、曲线有轻微超调，但超调量小，且稳态误差为零。

3　可调两级增压系统不同海拔下瞬态响应特性仿真结果与分析

对于车用发动机的加速过程，更多的是定转速加负荷过程[15]。因此对开环控制策略与闭环控制策略分别进行不同海拔下，柴油机定转速变负荷的瞬态响应的仿真，分析并比较其控制策略对高原柴油机瞬态响应特性的改善效果。

3.1　开环控制瞬态响应特性

定转速加载荷仿真中，发动机转速 2 200 r/min，喷油量从 25% 瞬时增加到 75%，分析此时增压压力的瞬态响应情况，其响应时间仍以增压压力增加到压力增幅的 90% 为响应时间，无量纲化增压压力响应特性和阀门动作响应结果如图 12 和图 13 所示。

比较图 12 和图 6 得知，采用最佳阀门开度 MAP 图查表开环控制时，发动机在高原的瞬态响应

性能有所改善,在海拔 3 000 m 时,瞬态响应时间从原来的 3.20 s 减少到 2.95 s,响应时间减少 7.8%;而在海拔 4 500 m 时,响应时间由 3.41 s 减少到 2.73 s,响应时间减少 19.94%;但在平原时,响应特性反而变差,响应时间由原来的 2.82 s 增加到 3.20 s,响应时间增加了 13.47%。这是因为在低负荷时,由于进气量较充足,为了减小泵气功损失以提高燃油经济性,最佳阀门开度 MAP 图中,此区域的阀门开度较大,导致可调两级增压系统的等效涡轮喷嘴面积变大,因此响应变慢;而随着海拔高度的升高,最佳阀门开度也随着减小,等效涡轮喷嘴面积变小,因而响应变快,且海拔高度越大,瞬态响应改善作用越明显。海拔高度的变化对增压系统瞬态性能的影响仍较大,最大响应时间差为 0.47 s。

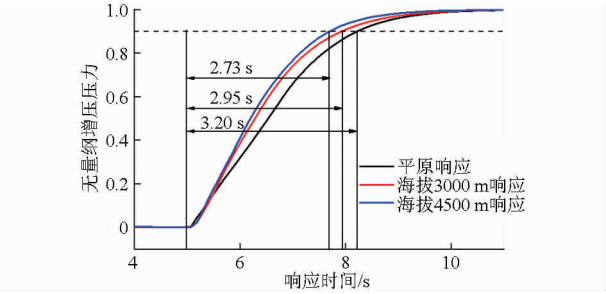

图 12 增压压力开环控制变海拔瞬态响应特性曲线

Fig. 12 Transient response of boost pressure with open-loop control at different altitudes

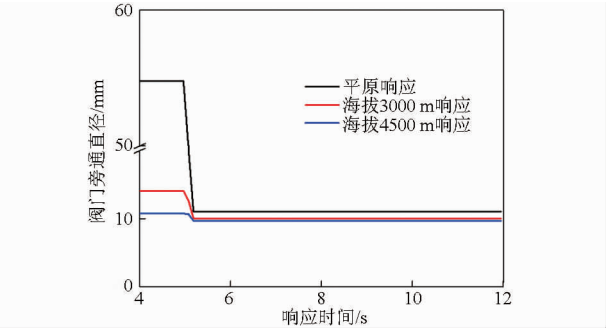

图 13 不同海拔下开环控制的相应阀门动作响应结果

Fig. 13 Corresponding valve action with open-loop control at different altitudes

3.2 闭环控制瞬态响应特性

采用与开环控制策略相同的仿真条件进行闭环控制策略瞬态性能计算,得到无量纲增压压力和阀门动作的瞬态响应结果如图 14 和图 15 所示。

由图 14 可以看出,采用闭环控制策略后,发动机的瞬态响应变快,有小幅超调,并很快达到稳态。与图 6、图 12 比较得知,采用闭环控制策略进行可调两级增压系统变海拔适应性控制时,发动机的瞬态响应特性比不用控制策略时有了较大幅度的提高。在平原时,响应时间由原来的 2.82 s 减小到 2.41 s,响应时间减少 14.54%;海拔 3 000 m 时,响应时间由 3.2 s 减少到 2.32 s,响应时间减少 27.5%;而在海拔 4 500 m 时,响应时间由 3.41 s 减少到 2.25 s,响应时间减少 34.02%。且与单纯的查表开环控制不同,采用闭环控制除了能提高高原柴油机的瞬态响应特性外,其平原的瞬态响应特性并没有恶化,响应时间反而减少了 17.4%。

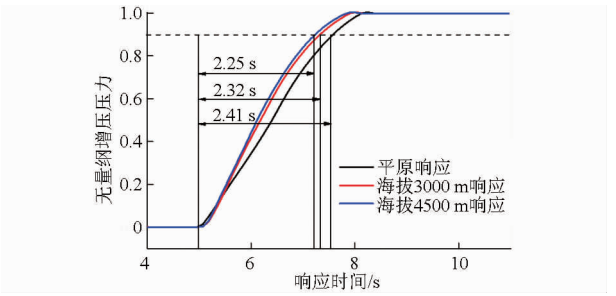

图 14 增压压力闭环控制变海拔瞬态响应特性曲线

Fig. 14 Transient response of boost pressure with closed-loop control at different altitudes

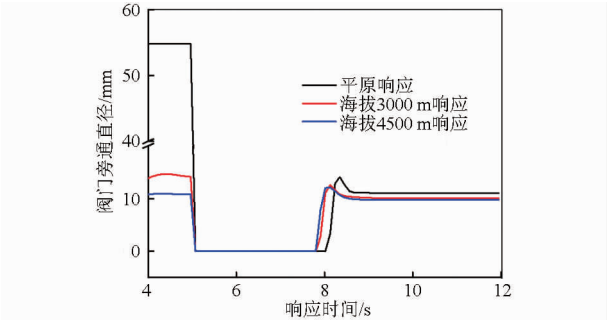

图 15 不同海拔下闭环控制的相应阀门动作响应结果

Fig. 15 Corresponding valve action with closed-loop control at different altitudes

闭环控制策略对柴油机高原瞬态响应特性的提高随着海拔的升高,改善幅度变大。这同样与稳态时,高压级旁通阀在高原的开度变小有关。且采用闭环控制策略后,海拔高度的变化对发动机瞬态响应的影响也大幅减小,最大响应时间差仅为 0.16 s,远小于无控制策略时的 0.59 s 和采用开环控制策略时的 0.47 s。

比较图 13 和图 15 可得,在瞬态响应过程中,采用闭环控制策略时,阀门在响应初始阶段运算输出使阀门开度为零,这将使可调两级增压系统的等效涡轮喷嘴面积减小到最小,因此系统以最快的速度提高增压压力,而当实际增压压力接近目标值时,阀门开启,经过小幅振荡,稳定在最佳增压压力 MAP 图中压力所对应的阀门开度。而采用开环控制时,阀门在瞬态响应过程中,只是从一个稳态的最佳阀门开度线性减小到另一个稳态的最佳阀门开度,在响应过程中,可调两级增压系统的等效喷嘴面积并没有优化到最小,因此响应比闭环控制慢,但阀门动作少,且控制相对简单。

3.3　闭环控制瞬态响应压气机运行线

从图 14 可知，采用闭环控制策略后，发动机瞬态响应迅速，增压压力响应在到达目标增压压力后，有少许超调，且可能会导致压气机在瞬态响应过程中运行不稳定，因此在确保瞬态响应迅速时，必须确保压气机在响应过程中运行良好。由于不同海拔下，同一控制策略，发动机-压气机联合运行线较相似，各个海拔下的运行线相差不大，为减少篇幅，仅研究海拔 4 500 m 时的瞬态响应运行线，其高低压级的发动机-压气机联合运行线如图 16、17 所示。

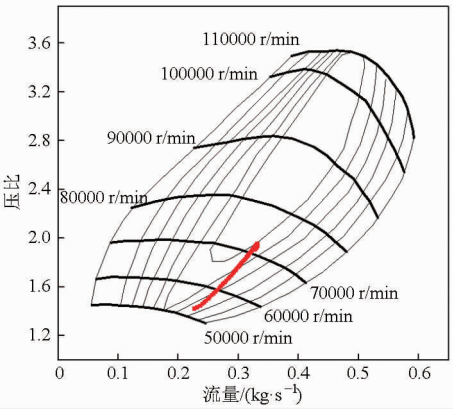

图 16　海拔 4 500 m 高压级压气机运行线

Fig. 16　Operating line in high pressure compressor at altitude of 4 500 m

可以看出，发动机-压气机联合运行线在发动机瞬态响应过程中都位于压气机图谱效率较高的区域，且远离喘振线，可满足发动机负荷进一步提高的需求，运行性能良好。

4　结论

（1）对于匹配可调两级增压系统的某 V 型柴油机在变海拔工况稳态运行时，最佳阀门开度在高原中低负荷、中低转速区域，为了进气更充分，应处于全关状态；而在平原低负荷、以及各个海拔的高转速区域，应适当开启以减小泵气损失，降低燃油消耗率。

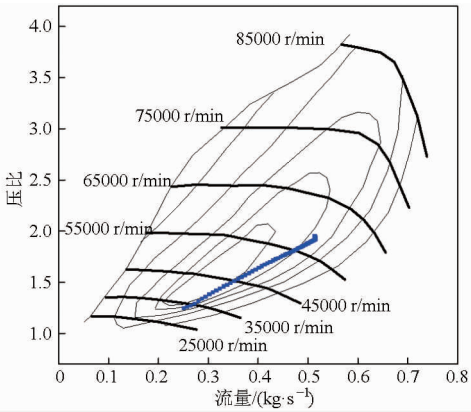

图 17　海拔 4 500 m 低压级压气机运行线

Fig. 17　Operating line in low pressure compressor at altitude of 4 500 m

（2）海拔高度对于定阀门开度的增压系统瞬态响应的影响规律为：海拔越高，柴油机的瞬态响应时间越长。相对平原，海拔 3 000 m 时响应时间增加 13.4%；海拔 4 500 m 时响应时间增加 20.9%；瞬态响应特性恶化。

（3）采用开环控制策略能满足柴油机在变海拔运行时全工况稳态运行的经济性能，且能改善柴油机高原的瞬态响应特性，但在平原时，瞬态响应时间增加。

（4）采用闭环控制策略比采用开环控制策略对变海拔柴油机瞬态响应的改善幅度更大。平原响应时间减少 14.54%；海拔 3 000 m 响应时间减少 27.5%；海拔 4 500 m 时响应时间减少 34.02%；且能在很大程度上减弱海拔高度对发动机瞬态响应特性的影响，使不同海拔下的最大响应时间差由 0.59 s 减小到 0.16 s。在瞬态响应过程中，发动机-压气机联合运行良好，可满足匹配可调两级增压系统的柴油机在变海拔运行时全工况性能优化的要求。

参　考　文　献

1　Fosberry R A C, Holubecki Z. Some considerations of the effect of atmospheric conditions on the performance of automotive diesel engines[C]. SAE Paper 660744, 1966.

2　Wu T, McAulay K J. Predicting diesel engine performance at various ambient conditions[C]. SAE Paper 730148, 1973.

3　杨勇，李志刚，沈宏继，等. 风冷柴油机高原恢复功率台架模拟试验研究[J]. 车用发动机，2005(2)：13－15.
Yang Yong, Li Zhigang, Shen Hongji, et al. Simulated experimentation research of power recovery in the plateau based on wind-cooled diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2005(2): 13－15. (in Chinese)

4　刘瑞林，刘宏威，秦德. 涡轮增压柴油机高海拔（低气压）性能试验研究[J]. 内燃机学报，2003，21(3)：213－216.
Liu Ruilin, Liu Hongwei, Qin De. An experimental study on performance of turbocharged diesel engines at high altitude (low air pressure)[J]. Transactions of CSICE, 2003, 21(3): 213－216. (in Chinese)

5　刘刚，刘瑞林，张恒超，等. SOFIM8142.43 柴油机增压器高原匹配模拟试验研究[J]. 军事交通学院学报，2010，12(1)：47－50.
Liu Gang, Liu Ruilin, Zhang Hengchao, et al. Experimental study on turbocharger matching with SOFIM8142.43 diesel engine simulating high altitudes[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2010, 12(1): 47－50. (in Chinese)

6 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔(低气压)燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2012, 30(3): 220-226.
Zhou Guangmeng, Liu Ruilin, Dong Surong, et al. Combustion characteristics of common rail diesel engine under high altitude (low pressure) conditions[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(3): 220-226. (in Chinese)
7 姜泽浩, 张付军, 董长龙, 等. 涡轮增压柴油机高原性能试验研究[J]. 车用发动机, 2014(6):59-63.
Jiang Zehao, Zhang Fujun, Dong Changlong, et al. Experimental study on performance of turbocharged diesel engine on plateau [J]. Vehicle Engine, 2014(6): 59-63. (in Chinese)
8 靳嵘, 张俊跃, 胡力峰, 等. 高原自适应柴油机涡轮增压技术研究[J]. 内燃机工程, 2011, 32(4): 27-31.
Jin Rong, Zhang Junyue, Hu Lifeng, et al. Study on varying altitude self-adaptive turbocharging system for diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, 32(4): 27-31. (in Chinese)
9 朱振夏, 张付军, 韩恺, 等. 柴油机高原功率恢复供油参数调节方法[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 583-589.
Zhu Zhenxia, Zhang Fujun, Han Kai, et al. Adaption of fuel injection parameters for turbocharged diesel engines working at high altitude[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(5): 583-589. (in Chinese)
10 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究[D]. 北京:清华大学,2008.
11 郭猛超, 王宪成, 袁善勇, 等. 高原环境车用柴油机与辅助系统耦合仿真[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 17-22.
Guo Mengchao, Wang Xiancheng, Yuan Shanyong, et al. Coupled simulation on vehicle diesel engine and auxiliary system in plateau environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):17-22. (in Chinese)
12 施新, 李文祥. 匹配二级顺序增压系统的柴油机高原特性仿真[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 397-402.
Shi Xin, Li Wenxiang. Simulation on plateau performance of diesel engine matched with two-stage sequential turbocharging system [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4): 397-402. (in Chinese)
13 刘系昌, 魏名山, 马朝臣, 等. 不同海拔下单级和二级增压柴油机的仿真[J]. 内燃机学报, 2010,28(5): 447-452.
Liu Xihao, Wei Mingshan, Ma Chaocheng, et al. Simulation on one-stage and two-stage turbocharged diesel engines at different altitudes[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(5): 447-452. (in Chinese)
14 韩恺, 朱振夏, 张付军, 等. 可调复合增压柴油机高原功率恢复方案研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 129-136.
Han Kai, Zhu Zhenxia, Zhang Fujun, et al. Research on composite adjustable supercharged program of diesel engine for power recovery at plateau[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(2): 129-136. (in Chinese)
15 Sui Lingge, Liu Zhongchang, Han Yongqiang, et al. Realization of the simulation platform of turbo-charged diesel engine with EGR loop under transient conditions[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modeling(ICCASH), 2010,8:274-279.

(上接第 324 页)

11 van Den Berg A K, Perkins T D. Nondestructive estimation of anthocyanin content in autumn sugar maple leaves [J]. HortScience, 2005, 40(3): 685-686 .
12 Gitelson A A, Keydan G P, Merzlyak M N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(11): 1-5.
13 Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigmerit content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages[J]. Remote Sensing of Envrionment, 2002, 81(2-3): 337- 354.
14 刘秀英,王力,宋荣杰,等. 黄绵土风干过程中土壤含水率的光谱预测[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 266-272.
Liu Xiuying, Wang li, Song Rongjie, et al. Prediction of soil moisture content in air-drying loess using spectral data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 266-272. (in Chinese)
15 熊庆娥, 叶珍, 杨世民, 等. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 94-95.
16 Hu Xueyu. Application of visible/near-infrared spectra in modeling of soil total phosphorus[J]. Pedosphere, 2013, 23(4): 417-421.
17 Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. Soil Science, 2002, 167(2): 110-116.
18 Yang H, Kuang B, Mouazen A M. Quantitative analysis of soil nitrogen and carbon at a farm scale using visible and near infrared spectroscopy coupled with wavelength reduction[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(3): 410-420.
19 唐启义, 冯明光. DPS 处理系统[M]. 北京:科学出版社, 2007.
20 林辉, 臧卓, 刘秀英, 等. 森林树种高光谱遥感研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
21 Merzlyak M N, Chivkunova O B, Solovchenko A E, et al. Light absorption by anthocyanins in juvenile, stressed and senescing leaves[J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59(14): 3903-3911.
22 Viña A, Gitelson A A. Sensitivity to foliar anthocyanin content of vegetation indices using green lectance[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 463-467.
23 邹小波, 陈正伟, 石吉勇, 等. 基于近红外高光谱图像的黄瓜叶片色素含量快速检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 152-156.
Zou Xiaobo, Chen Zhengwei, Shi Jiyong, et al. Rapid detection of cucumber leaves pigments based on near infrared hyperspectral image technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 152-156. (in Chinese)