

变海拔柴油机增压系统涡轮面积 优化调节研究

Control the Turbo Area of Diesel Engine Turbocharging System at Different Attitudes

冷冷, 汤旭阳, 石磊, 邓康耀

(上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiaotong
University, Shanghai 200240

摘要: 基于某增压柴油机, 建立了变海拔一维性能仿真模型, 分析了不同增压系统的海拔适应能力, 探讨了增压系统调节量的影响因素, 建立了多因素耦合对变海拔气系统调节需求分析模型。研究表明自然吸气柴油机通过燃烧调节能够适应约 2500m 的海拔高度, 固定截面增压系统通过增压系统的自调节可以实现 3700m 海拔的运行需求。采用可调增压系统后, 柴油机的海拔适应能力进一步增强, 燃烧裕度从 0.1 增加到 0.4 时, 调节量需求从 82% 减低至 28%, 柴油机功率密度增加, 燃烧裕度越小, 气系统调节量需求的增加值越大。

关键词: 增压系统, 等效面积, 调节规律, 变海拔

Abstract: Based on a turbocharged diesel engine, a one-dimensional performance simulation model of variable altitude is set up. The altitude adaptabilities of different turbocharging systems are analyzed, the factors affecting the regulating amount of the turbocharging system are discussed, and the analysis model of the adjustment demand of the variable altitude gas system with multi factor coupling is established. The research shows that the natural inspiratory diesel engine can adapt to the altitude of about 2500m through the combustion regulation. The self-regulation of the turbocharging system through the turbocharging system can realize the operation demand of the 3700m altitude. When the adjustable turbocharging system is adopted, the adaptability of diesel engine is further enhanced. When the combustion margin is increased from 0.1 to 0.4, the demand for adjustment is reduced from 82% to 28%. The power density of diesel engine increases, the combustion margin is smaller and the increasing value of the regulation demand of the gas system is greater.

Keywords: Turbocharging system, Equivalent area, Regulation law, Different attitude

1. 引言

随着海拔上升, 空气密度降低, 发动机的进气量减少, 导致燃烧恶化, 发动机性能下降^[1-2]。过量空气系数降低导致燃烧恶化, 但燃烧过程有一定的容忍度, 即燃烧裕度, 能够适应一定的海拔高度。匹配增压系统后, 海拔上升, 蜗后压力下降和蜗前温度升高, 涡轮的膨胀功有所增加, 使得增压系统有一定的海拔自适应能力^[3]。但是, 燃烧自适应和增压系统的自适应能力只能满足较低海拔的运行需求, 且以柴油机的经济性和碳烟排放恶化等性能指标下降为代价, 不能满足柴油机在高海拔运行的需求。为了满足高海拔的运行需求, 通常在高原匹配的增压系统, 但是在平原运行时, 容易出现气缸内爆压过高的现象, 影响发动机的正常工作。因此, 必须采用可调增压系统, 一方面提高

了增压系统的高海拔适应能力，另一方面，兼顾了柴油机平原的稳定运行需求。

采用可调增压系统需要确定不同海拔不同工况气系统的调节量。而柴油机的变海拔运行需求，使得柴油机的运行范围从二维的全工况升级到不同转速、负荷和海拔高度的三维空间，这给增压系统调节量的制定提出了很大的难题。目前，大多数厂商采用变海拔试验标定的方法来确定，工作量较大^[4]。北京理工大学采用不同结构的调节机构，开展了增压系统调节能力的实验研究，表明旁通阀的形式相对于废气放气方式，具有更高的调节能力^[5]。上海交通大学设计了涡轮旁通阀等关键部件，实现了从0度到90度的无级调节，并进行了稳态试验研究，提出了经济性和动力性两种调节量的控制策略^[6-7]。但是，这些研究都只针对柴油机平原运行工况，没有考虑海拔变化对增压系统的调节的影响。李华雷^[8]等开展了变海拔柴油机增压系统全工况控制策略研究，采用仿真计算的研究手段，缩短了试验周期，但缺乏试验验证，调节量的准确度依赖于仿真模型的精度，不能对变海拔增压系统的涡轮面积需求提出准确预测。

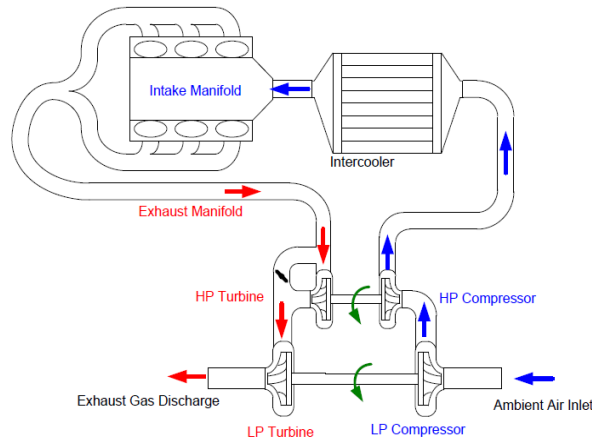


图1 可调两级增压柴油机

本文建立了可调两级增压柴油机一维性能仿真模型，分析了不同增压系统的海拔适应能力，探讨了增压系统调节量的影响因素，建立了多因素耦合对变海拔气系统调节需求模型。获得了不同因素作用下，增压系统的调节量。

2. 仿真模型的建立

发动机的主要参数如表1所示。原机采用V型布置方式，普通单级增压方案，有两个对称安装的增压器和两个中冷器。采用一维性能仿真软件 GT-Power建立了仿真模型，如图1所示。根据柴油机的管系尺寸，采用一维简化方式建立进排气管路模型；采用韦伯模型来模拟缸内燃烧过程，woschni模型来模拟传热过程，涡轮增压器通过涡轮和压气机特性图谱离散形式输入，从而建立了原机仿真模型，如图2所示。

表1 发动机主要技术参数

参数	取值
型式	V 型6 缸
冲程	4
进气方式	增压中冷
单缸排量	2.83 (L)

升功率	$23.78 \text{ (kW L}^{-1}\text{)}$
最大扭矩点转	$1500 \text{ (r min}^{-1}\text{)}$
额定点转速	$2200 \text{ (r min}^{-1}\text{)}$

原机的动力性和经济性能参数的计算结果与试验数据如表2所示，可以看出最大误差都在5%之内，所建立的仿真模型具有足够高的精度，可以满足计算分析要求。

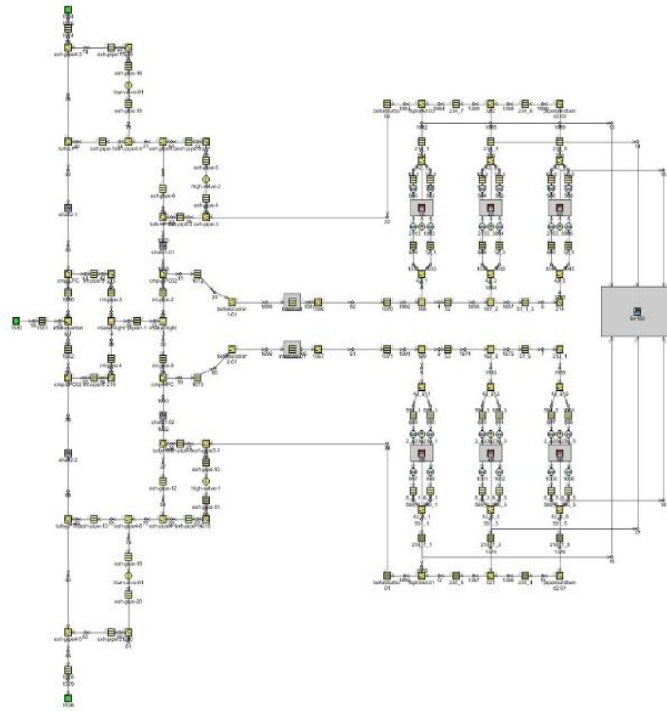


图2 可调两级增压系统性能仿真模型

表 2 原机性能计算结果与实验数据对比

	1500r/min			2200r/min		
	计算结果	实验数据	误差	计算结果	实验数据	误差
功率 kW	299	296	1.01%	394	394	0%
转矩 N m	1905	1885	1.06%	1710	1709	0.06%
燃油消耗率 g/kW h	230.9	233.4	1.07%	233.7	234.4	0.3%
中冷前压力 kPa	192	194	1.03%	268	258	3.88%
最大爆发压力 MPa	12.1	12.2	1.15%	12.4	12.7	2.36%
中冷后温度 K	353	362	2.32%	366	371	1.21%
涡前排温 K	946	958	1.32%	897	908	1.27%
涡后排温 K	864	846	2.13%	760	783	2.90%
增压器转速 r/min	76290	75000	1.72%	100152	95400	4.98%
压比	2.15	2.06	4.37%	3.03	2.89	4.84%

3. 不同增压系统的变海拔适应能力

3.1 自然吸气柴油机变海拔适应能力分析

自然吸气柴油机的海拔适应能力取决于燃烧裕度，如图3所示，随着过量空气系数降低，柴油机指示效率降低。图4为海拔、过量空气系数与指示效率的关系图，如图所示，过量空气系数变化为0.19/km，当燃烧裕度为0.5时，自然吸气能适应的最大海拔高度约为2500m，如所示。如果柴油机有足够的过量空气系数下降域度，可以适应较高的海拔工况。

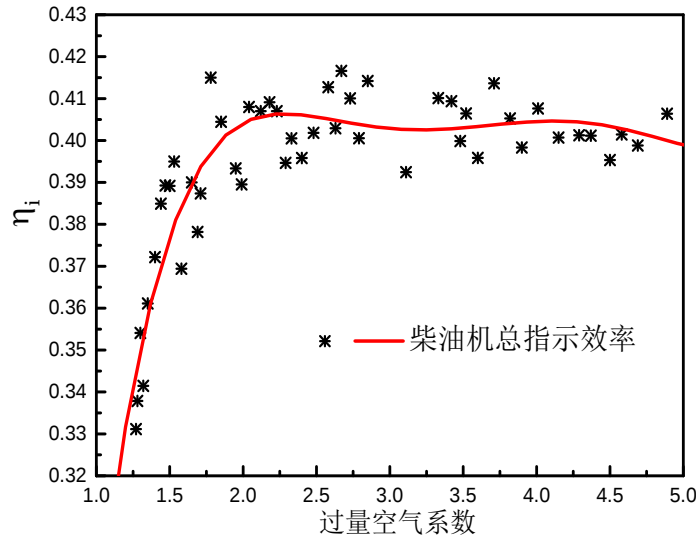


图3 热效率与过量空气系数的关系

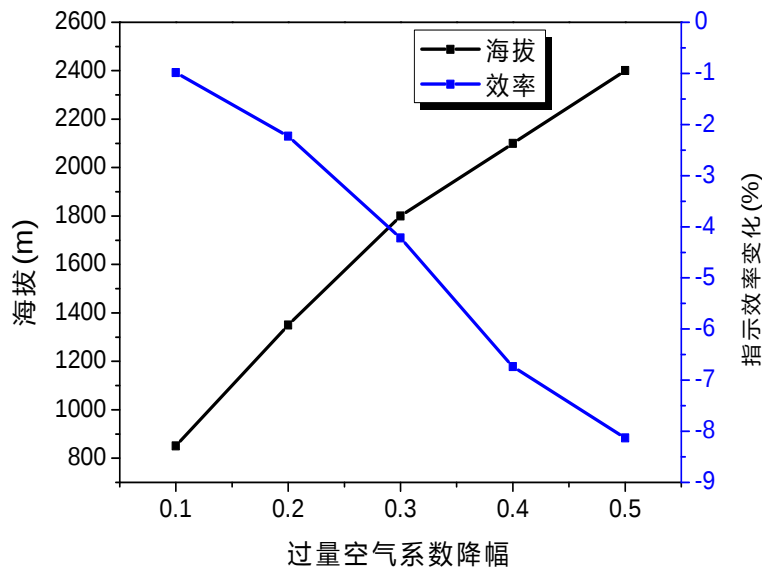


图4 自然吸气柴油机变海拔适应能力

3.2 固定截面涡轮增压柴油机变海拔适应能力分析

单级固定截面增压系统的变海拔适应能力，如图5所示。对于单级增压柴油机，其海拔适应能力由燃烧过程自适应能力和增压系统自适应能力组成，故优于自然吸气柴油机。选取不同涡轮面积的增压系统进行计算，获得不同截面增压系统的海拔适应性，涡轮面积对海拔自适应能力影响明显。可以看出，较大涡轮截面对应所适应的海拔高度较低，较小涡轮截面能够适应的海拔高度较高。故在一定范围内采用较小的涡轮面积能够提高柴油机的海拔适应性。

涡轮增压器匹配时，需考虑涡轮的做功能力与柴油机进气需求的对应关系。涡轮增压器的等效涡轮面积与柴油机的排量有关，而固定转速下排量取决于气缸的缸径和行程等结构参数。采用无量纲当量涡轮面积 A ，表征不同柴油机的涡轮等效面积：

$$A = \frac{A_T}{i \cdot A_s} \quad (1)$$

式中： A_T 为等效涡轮面积， A_s 为气缸面积， i 为与涡轮相连的气缸数。

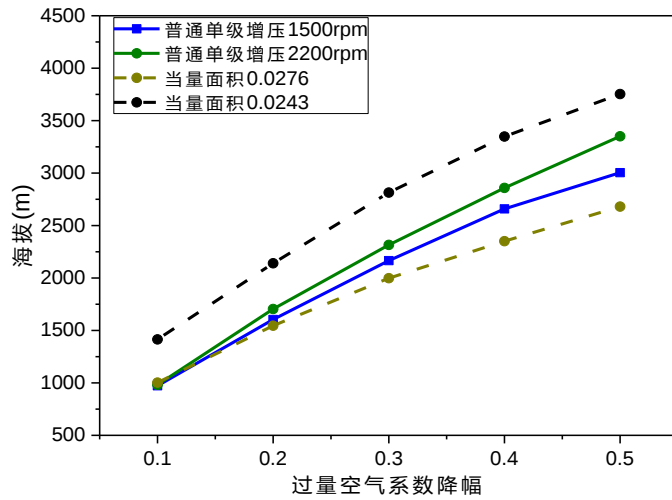


图5 固定截面增压系统的海拔适应能力

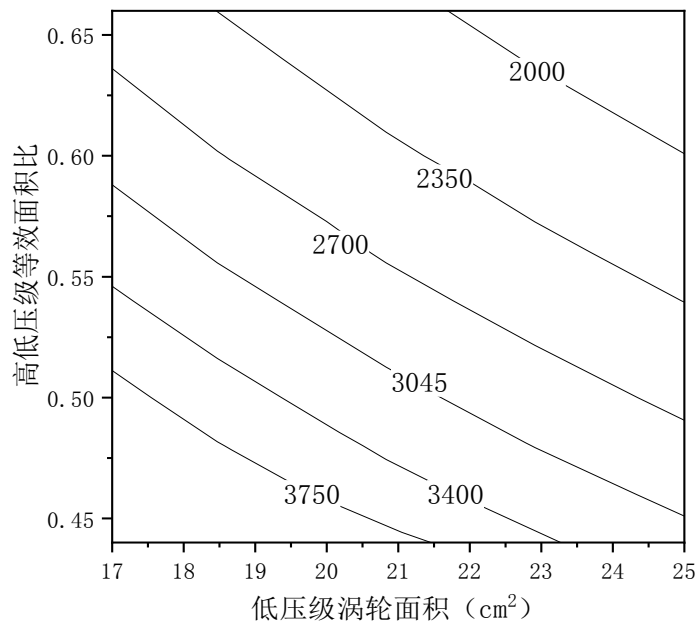


图6 不同两级增压系统的两级增压柴油机海拔适应性

从图6可知，在相同的低压级涡轮面积时，较小的高压级面积能够实现较高的柴油机的海拔适应能力。但是，过小的高压级面积使得涡轮前压力较高，泵气负功增加，柴油机性能下降。在高低压级面积比固定的情况下，即两级的压比分配固定时，较小的低压级等效面积能够实现较小系统的等效面积，从而使柴油机实现较高的海拔适应能力。

4. 气系统变海拔调节量需求影响规律

不同海拔下，柴油机过量空气系数的恢复程度对增压系统的调节量需求存在显著影响。从图7可知，随着海拔的升高，柴油机对增压系统的调节量需求逐渐增加。若4500m海拔过量空气系数的恢复指标为1.8，需要增压系统在全海拔范围内具有82%的调节能力；4500m海拔过量空气系数的为1.5，增压系统在全海拔范围的调节能力只需要28%。随着海拔的升高，不同过量空气系数恢复目标对应的调节量需求差异增大。

气系统的效率同样对调节量的需求有着重要的影响。对涡轮的调节最终体现在涡轮膨胀功的变化，气系统效率的降低将导致所需涡轮面积的减小。如果4500m海拔的气系统效率下降，将导致匹配点的涡轮面积减小，在全海拔范围内的调节量需求增大。同时，若柴油机的功率密度增加，将使得高海拔的涡轮面积减小，而低海拔时涡轮端废气流量增大，做功能力更强，故需要更大的调节能力。从图8可知，气系统效率降低，使得涡轮调节量需求增加，且随着燃烧裕度的降低，调节量需求的差异增大。在过量空气系数恢复指标为1.5时，调节量增加16%，而在过量空气系数恢复指标为1.8时，调节量增加了35%。功率密度增加，即进气需求增加45%时，在过量空气系数恢复指标为1.5对应的调节量增加22%，而在过量空气系数恢复指标为1.8对应的调节量需求增加了105%。

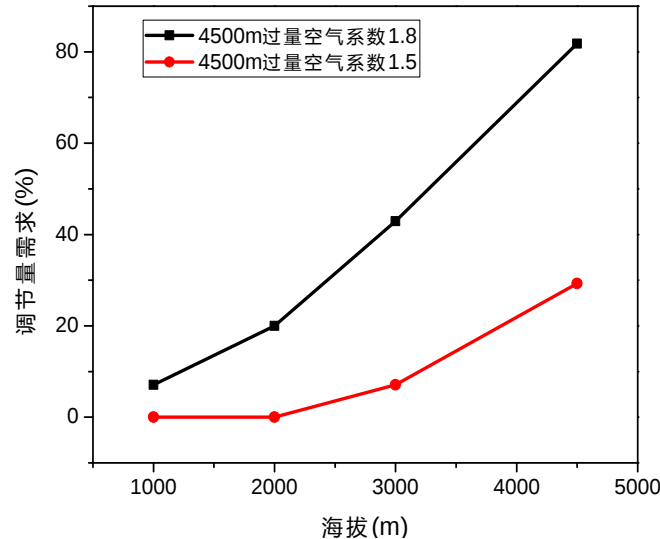


图7 高原过量空气系数需求对调节量的影响

图9为不同燃烧裕度下的变海拔涡轮面积的调节目标。可以看出，通过燃烧调节，可以实现较低的海拔运行，此时，过量空气系数降低，燃烧过程恶化，油耗率和排放指标下降。匹配固定界面的增压系统后（单级），海拔适应能力有所提升，但是不能满足4500m海拔的运行需求。为了适应更高的海拔运行范围，采用可调增压系统。4500m海拔时，不同过量空气系数对应的等效涡轮面积（虚线）即为涡轮的调节目标。可以看出，随着燃烧裕度的降低，涡轮的调节量需求增大了约3倍。

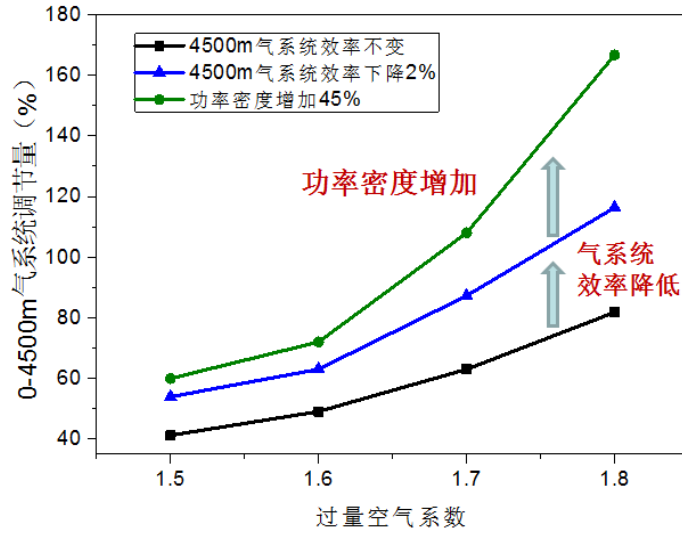


图8 系统效率和功率密度对增压系统调节量的影响

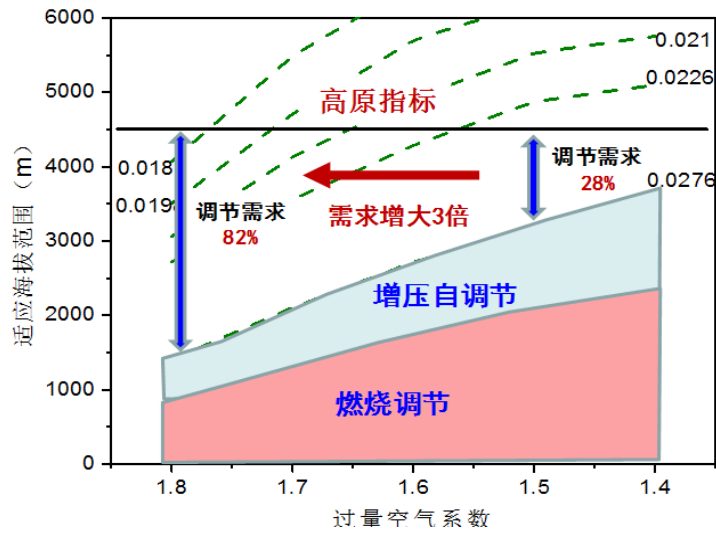


图9 海拔和燃烧裕度对调节量需求的影响

5. 结论

1. 变海拔柴油机增压系统的等效面积调节量需求与海拔适应高度、燃烧裕度、气系统效率、强化程度等因素有关。

2. 分析了不同增压形式的柴油机海拔适应能力。自然吸气柴油机通过燃烧调节能够适应2500m的海拔高度，固定截面增压系统通过增压系统的自调节可以实现3700m海拔的运行需求，采用可调增压系统后，柴油机的海拔适应能力增强。

3. 采用建立的气系统调节需求模型和柴油机性能仿真模型，获得不同条件下的气系统调节量需求。计算表明，燃烧裕度从0.1增加到0.4时，调节量需求从82%减低至28%，柴油机功率密度增加，燃烧裕度从0.4减小到0.1，气系统调节量需求从22%增加到105%。

参考文献

- [1] Johnson T V. Review of diesel emissions and control[J]. International Journal of Engine Research, 2009, 10(5), 275-285
- [2] 张宝川. 可调两级增压系统的动态特性及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [3] Choi H, Kwon S, Cho S, Development of Fuel Consumption of Passenger Diesel Engine with 2 Stage Turbocharger, SAE paper 2006-01-0021, Detroit, Michigan: 2006
- [4] 李华雷, 石磊, 邓康耀, 等. 两级可调增压系统变海拔适应性研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 1-5.
- [5] 魏名山, 尹于明, 马朝臣. 高速柴油机二级可调增压系统的设计计算方法[J]. 内燃机工程, 2007, 27(6): 11-14.
- [6] 魏名山, 张志, 何永玲, 等. 带不同类型调节阀的二级增压系统结构与性能对比[J]. 内燃机工程, 2009, 30(1): 51-54.
- [7] 刘博, 胡志龙, 李华雷, 等. 可调二级增压柴油机旁通阀特性和调节规律的试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(1): 72-78.
- [8] 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, 2011.
- [9] 张哲. 柴油机大小涡轮三阶段相继增压系统稳态与瞬态性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

- [10] Li H, Zhang G, Zhang H, et al. Equivalent matching model of a regulated two-stage turbocharging system for the plateau adaptability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(12): 1654-1669.