

可调复合增压柴油机高原性能匹配与优化

Matching and Optimization on Plateau Performance of Diesel Engine with Composite Adjustable Supercharging System

刘杨杨 朱振夏 罗国良 张林晖

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 本文以 DEUTZ 公司的 8V2015 柴油机为对象, 利用 GT-Power 软件在对原机模型进行试验校核的基础上, 建立了可调复合增压柴油机模型。重点研究了高原环境下复合增压系统的匹配, 对比分析了可调复合增压柴油机高原功率恢复的能力。计算结果表明: 柴油机高原低速性能 (1600r/min 以下) 能够恢复到平原状态, 标定功率在海拔 3000 米和海拔 4500 米分别可恢复至平原的 89% 和 83%。

关键词: 柴油机、GT-Power、高原性能匹配、可调复合增压、优化

Abstract: Taking DEUTZ 8V2015 charged diesel engine as research archetype, engine models equipped with mechanical auxiliary supercharging system were established to study composite supercharging matching at different altitudes. This paper mainly studied the adjustable supercharging system matching in the plateau environment. The results demonstrate that high performance at low speed (below 1600 r/min) can recover to that on the plain, nominal power at an altitude of 3000 meters and 4500 meters above sea level can restore to 89% and 83% of that on the plain respectively.

Key words: diesel engine、GT-Power、plateau performance matching、adjustable supercharging system、optimization

引言

由于我国地域的特殊性, 随着海拔高度的增加, 大气状态发生很大的变化, 使发动机的进气量、燃烧、热损失、燃油消耗率、涡轮增压器的性能等都发生变化^[1]。涡轮增压具有一定的高原功率恢复的能力^[2]。但是受增压器转速、压比和工作点等的限制, 增压器的进气补偿作用有限。为提高高海拔下发动机的功率, 需要采用高增压技术。常用的高增压技术有两级增压、相继增压、辅助增压装置和复合增压等。

目前主要复合增压系统的形式有机械-涡轮复合增压、谐振复合增压、电动辅助增压等形式。谐振复合增压技术利用进气谐振效应提高进气压力, 对原机改动较小, 增压比低, 适用转速范围狭窄。电动辅助增压技术将高速电机与涡轮增压器同轴相连, 解决增压器的加速滞后及加速过程排放的问题, 高速电机难以连续工作限制了电辅助增压在改善发动机性能方面的应用^{[3][4][5]}。在国外民用车辆上已经开始应用, 以大众的 1.4TSI (T+S) 发动机为代表的汽油机机械涡轮复合增压技术较为成熟^[6]。

机械-涡轮复合增压中机械增压器与发动机曲轴以固定的传动比相连，所以机械增压器本身具有一定的工况适应性。

因此，本文采用一种可调转速的复合增压方案，实现不同海拔和不同发动机工况下增压系统的连续平稳调节。并通过建立可调复合增压柴油机模型，研究高原环境下复合增压系统的匹配，进而对比分析可调复合增压柴油机高原功率恢复的能力。

1 可调复合增压系统方案及原理

如图 1 中所示，可调转速的机械复合增压系统由两级压气机和一级涡轮组成。第一级压气机为可调转速的机械增压器，其转速可以通过电机调节；第二级为涡轮增压系统。环境中的空气首先通过机械增压器进行一级增压，然后再进入涡轮增压器中进行二级增压。经过增压后的空气进入中冷器中进行冷却，最终再进入发动机气缸内。可调增压器旁设有进气旁通阀，涡轮增压器的涡轮上带有废弃旁通阀。可调增压器旁通阀只有全开和全关两个开度。

当废气能量较大时，涡轮增压器的增压比也大，若达到满足系统需要的增压压力时，已经不需要机械增压器参与增压，此时进气旁通阀全部打开，并使机械增压器停止工作，只有涡轮增压器单独工作。若排气能量继续增大，为避免系统增压压力过高损坏涡轮增压器，可以开启废气旁通阀，降低涡轮转速，使系统保持正常的增压压力。在高海拔环境或者低排气能量时，涡轮增压器不能满足发动机对增压压力的要求，此时进气旁通阀关闭，两级压气机串联工作，机械增压器主要起着增加压比的作用。通过调整机械增压器的转速来适应不同海拔和工况，提高总压比恢复发动机功率^{[7][8]}。

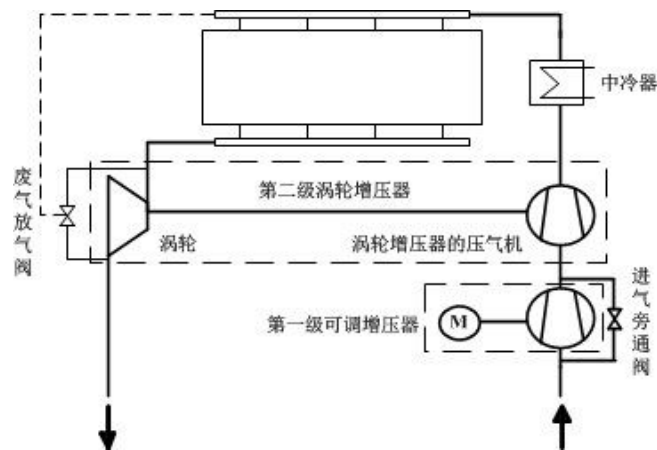


图 1 机械复合增压系统方案原理图

2 可调复合增压柴油机仿真建模

本文以 DEUTZ 公司的 8V2015 增压中冷柴油机进行机械复合增压方案的高原特性仿真研究。首先对原增压柴油机用 GT-Power 软件进行建模，在此基础上建立可调复合增压柴油机仿真模型。

2.1 原机模型的建立与校核

本文基于热力学定律、质量守恒、一维流动及气体状态方程等基础理论在 GT-Power 软件环境下搭建了该 8V 增压柴油机的仿真模型。发动机的部分几何和性能参数如表 1 所示。

表 1 该 8V 增压中冷柴油机的部分几何和性能参数。

参数名称	数值
缸径 (mm)	132
行程 (mm)	145
压缩比	15
排量 (L)	15.9
标定转速 (r/min)	2500
最大扭矩点转速 (r/min)	1800

仿真中采用的燃烧模型为 Wiebe 预测模型，可根据进气终了时刻气缸内工质的压力和温度，按多变过程计算出喷油时刻缸内的状态，据此计算燃烧的滞燃期、预混比例、燃烧持续期等参数，放热规律能够根据不同的进气状态做出相应的调整^[9]，使模型具有预测高原环境下缸内燃烧情况的能力。

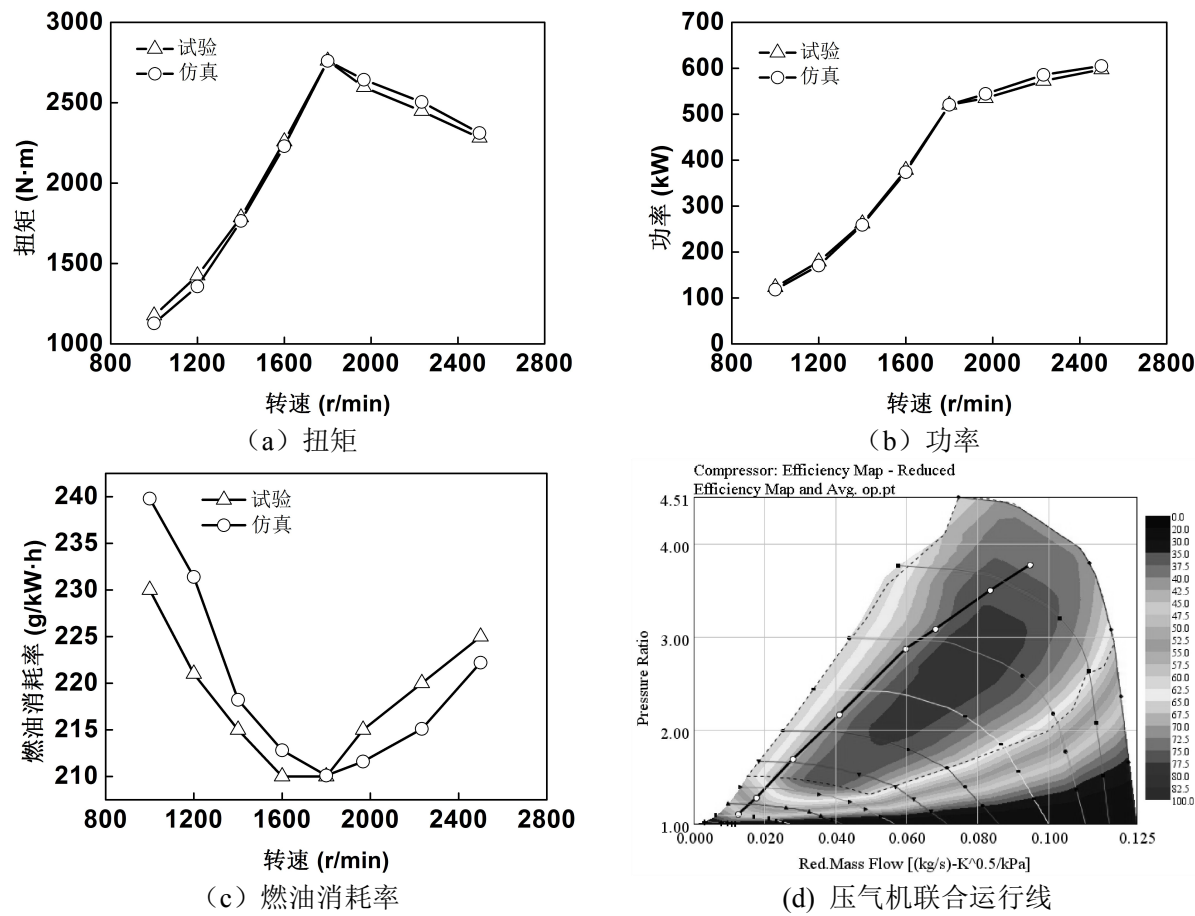


图 2 100%负荷时模型的校核

如图 2 所示。从发动机试验数据和仿真结果的对比可以看出，模型计算出的柴油机外特性扭矩、功率和燃油消耗率与原机试验结果接近，计算误差小于 5%。证明增压柴油机模型具有足够的仿真精

度，可以在此模型基础上开展复合增压方案的仿真研究。从压气机的运行线上可以得出，该发动机与增压器的匹配属于低速匹配型，低速段喘振裕量较小，由此可预测在高原环境下增压器的功率补偿能力非常有限。

2.2 可调复合增压柴油机模型

在原机模型校核的基础上利用 GT-Power 软件并依据本文所提出的可调复合增压系统的方案建立的可调复合增压柴油机仿真模型，可调复合增压发动机仿真模型如图 3 所示。

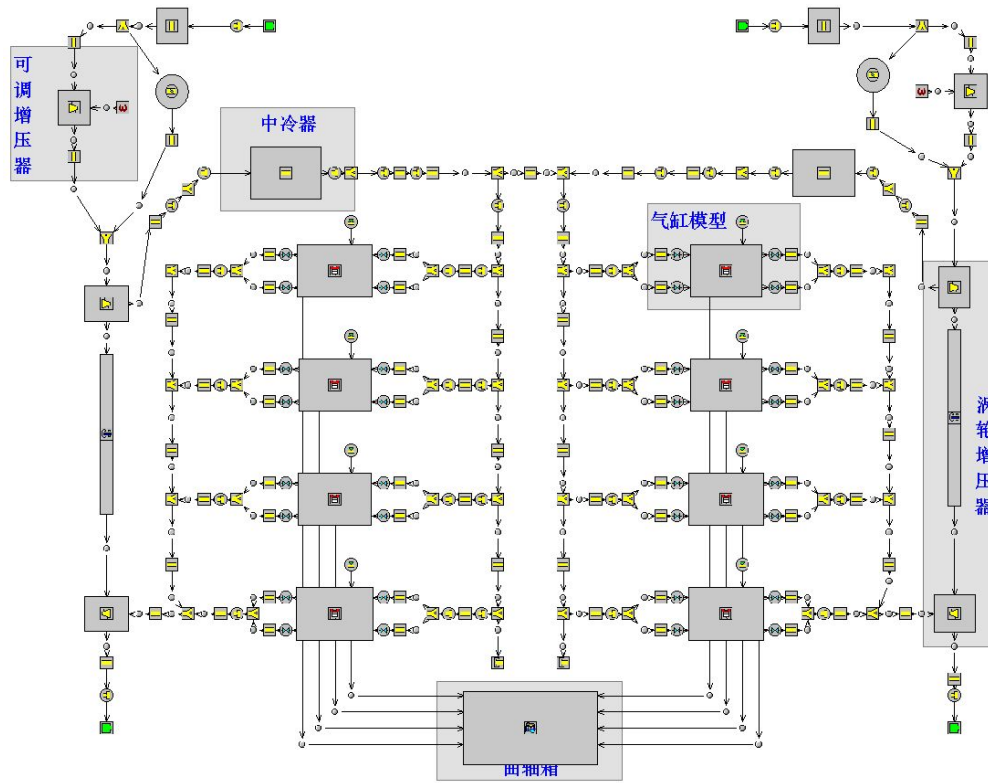


图 3 可调复合增压柴油机仿真模型

3 可调压气机工作点随海拔高度的变化规律

在低转速、中转速、高转速分别选取工况点 1000rpm、1600rpm、2500rpm 在 1000m、2000m、3000m、4000m 海拔高度下进行仿真计算。仿真方案如下：

单级增压方案：开启进气旁通阀，可调增压器被短路。仿真过程中保证排气温度不超过 750℃ 和涡轮压气机不超速，可以通过降低喷油量和打开废气放气阀进行调节；

复合增压方案：关闭进气旁通阀，开启可调增压器，使用复合增压系统进行仿真，仿真过程中保证循环喷油量不变，排气温度不超过 750℃，以最大净功率（发动机输出功率减去可调增压器消耗功率）为目标通过调节可调增压器转速和废气放气阀的开度进行仿真。

依据上述仿真方案进行仿真，仿真结果如下图所示：

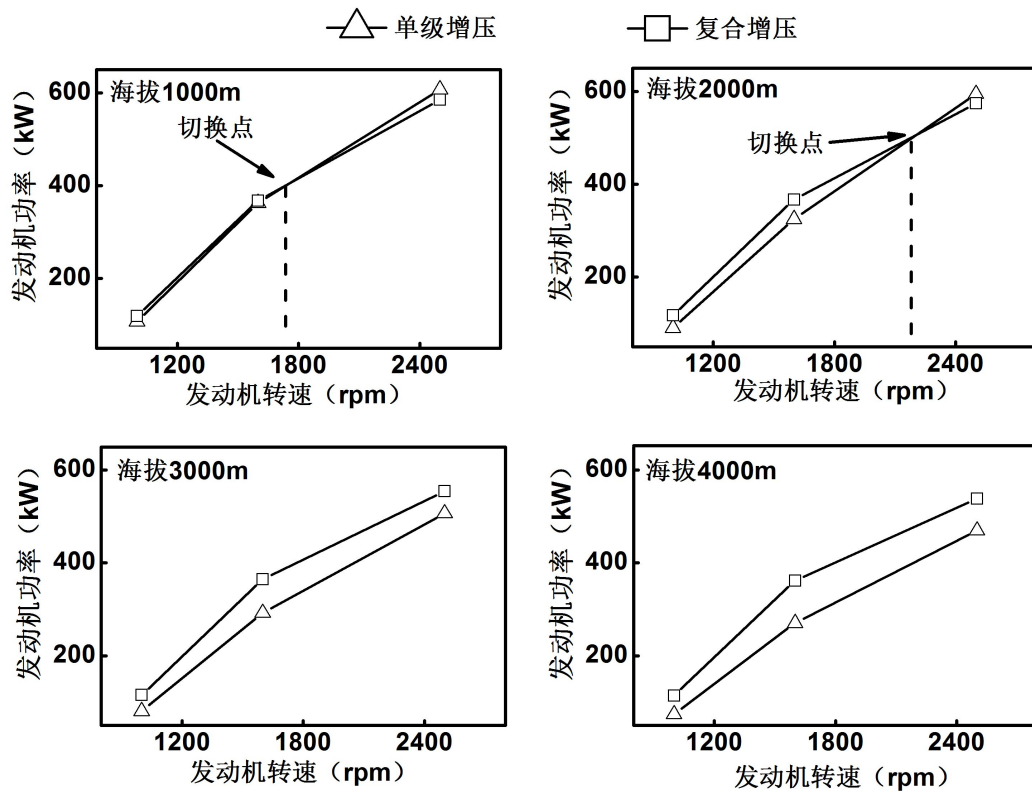


图6 不同转速在不同海拔高度下发动机功率

在图6中可以看到随着海拔高度的增加复合增压系统的高原功率恢复能力逐渐增加。在较低海拔环境下(1000m、2000m海拔高原环境)，低转速区的复合增压系统高原功率恢复能力优于单级增压。但在高转速区复合增压系统恢复能力较弱。随着海拔高度的增加，复合增压系统的功率恢复的能力逐渐增加。

在低转速时，由于发动机排气能量较低，单级涡轮增压器效果不显著。发动机进气量较低，空燃比较小，燃烧不完全。随着海拔高度的增加，低转速空燃比进一步的降低，导致发动机功率的降低。复合增压系统能够通过调节可调增压器的转速有效的增加进气量，从而增加发动机的空燃比，使燃烧充分进而增加发动机功率同时弥补因高原环境而导致的发动机进气量不足的问题。

在高转速时，发动机排气能量富裕，体现在空燃比较高。随着海拔高度的增加，由于涡轮膨胀比的增加使涡轮压气机压比增加，从而弥补大气压降。此时，复合增压系统虽然能够增加进气量，但对燃烧的改善不明显，同时由于高转速空气流量增大，可调增压器的耗功增加，使得复合增压系统在低海拔、高转速不能发挥作用。随着海拔高度的进一步升高，涡轮膨胀比增大，涡轮压气机压比增大工况点接近超速线，这时为了防止压气机超速，开启废气旁通阀。废气能量不能够有效地利用，导致空燃比降低，为了保证排气温度不超过 750°C ，需要降低喷油量来增加空燃比。

通过以上分析可得到：随着海拔高度的增加机械增压器恢复功率的效果更加显著。当单级增压发动机功率超过复合增压发动机的功率的时候，即可关闭可调增压器开启旁通阀。以单机增压和复合增压发动机相同工况下功率相同的点作为可调增压器的切换点，随着海拔的上升，在发动机外特性线上机械增压器的切换点向高转速偏移。

4 高原环境下的仿真计算

基于上面的可调增压器的转速调节原则和不同海拔高度可调增压器工作的特点进行仿真研究。

在海拔 3000m 环境条件和海拔 4500m 环境条件下,在原 8 缸柴油机模型基础上开展仿真计算,研究复合增压发动机的高原恢复能力。分别对单级增压和可调复合增压方案分别进行了仿真。在仿真过程中通过调整可调增压器转速、发动机循环喷油量来进行仿真。仿真过程中保证其他参数不变,同时保证发动机的最高爆发压力和排气温度在规定的限值之内。对发动机进行高原功率恢复。仿真结果如下图所示。

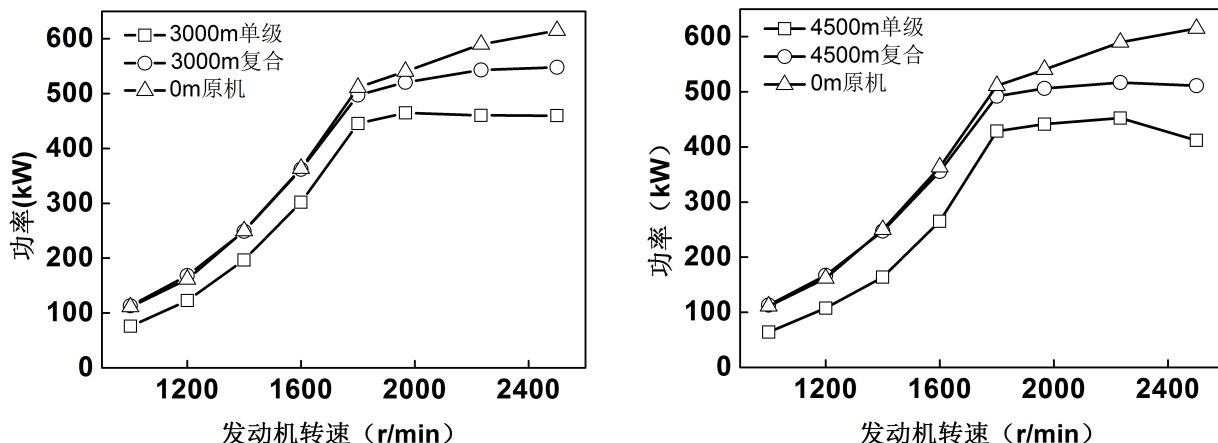


图 7 3000m 和 4500m 海拔环境下单级增压和复合增压的发动机功率

在图 7 中看到,复合增压明显的改善了发动机的高原功率恢复能力。对于单级涡轮增压柴油机,由于压气机匹配的余量不足,在高原环境下考虑采用减油和废气放气的方法防止涡轮增压器超速。

3000m 海拔环境下,复合增压发动机标定点功率达到平原的 89%,而单级增压(涡轮增压)发动机标定点功率为平原的 75%。在海拔 4500m 海拔环境下,带有复合增压系统的发动机标定点功率达到平原的 83%,单级增压(涡轮增压)发动机标定点功率为平原的 67%。可以看出复合增压相对于单级增压具有更好的高原功率恢复能力。

4 结论

本文通过开展相应的仿真计算,得到以下结论:

(1) 可调复合增压器在低海拔低速段和高海拔环境效果明显,在低海拔高速区由于涡轮增压器的高原补偿能力,仅适用涡轮增压即可满足发动机功率要求。

(2) 可调增压器的切出点随着海拔高度的增加向高转速偏移。

(3) 可调增压系统可以有效地改善柴油机的高原功率恢复能力。标定功率在海拔 3000 米和海拔 4500 米分别可恢复至平原的 89%和 83%。

5 参考文献

- [1] 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, (03): 213-216.
- [2] 梁利干, 蒋德明. 涡轮增压高速柴油机的高原性能预测[J]. 内燃机学报, 1983, (02): 1-18.

- [3] 王文阁. 应用电动增压器提高车辆高原行驶的动力性[J]. 汽车技术, 2004, (09): 5-8.
- [4] 刘系鬲, 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, (05): 447-452.
- [5] 王振彪, 田伟, 邓春龙, 等. 某大功率柴油机顺序增压系统切换过程试验研究[J]. 车用发动机, 2009, (05): 80-84.
- [6] 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]; 上海交通大学, 2010.
- [7] 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, (02): 129-136.
- [8] 高思远, 赵长禄, 陈振南, 等. 增压柴油机耦合条件下的环境影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, (10): 1157-1161
- [9] GT-Power tutorials, Gamma Technologies, 2009.09.