

柴油机二级涡轮增压系统匹配研究

张代国¹, 丁 艳², 李瑞发², 孟亮虎², 刘 威²

(1. 海军驻 407 厂军代表室, 河南 洛阳 471039; 2. 河南柴油机重工有限责任公司, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 采用 AVL-Boost 仿真软件对某型船用高速柴油机预混合燃烧性能进行仿真分析。分析显示: 柴油机采用二级涡轮增压系统能有效提升功率, 提高低速扭矩性能, 改善加速性, 降低发动机油耗, 改善排放。同时指出: 二级增压系统构成较为复杂, 体积和质量都较大, 安装和连接较难实现, 针对这个问题探讨了合适的解决方案。

关键词: 船用柴油机; 二级增压; 性能; 结构

中图分类号: TK421⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)01-0008-05

Research on the Matching of Two-Stage Turbocharging Systems
with Diesel EnginesZhang Daiguo¹, Ding Yan², Li Ruifa², Meng Lianghu², Liu Wei²

(1. Naval Deputy Office of Henan Diesel Engine Industry Co., Ltd., Henan Luoyang 471039;

2. Henan Diesel Engine Industry Co., Ltd., Henan Luoyang 471039)

Abstract: AVL-Boost simulation software is employed to simulate the premixed combustion performance of a certain marine high-speed diesel engine. The analysis shows that the diesel engine with the two-stage turbocharging system could effectively improve the power, low-speed torque performance, acceleration performance, and decrease the fuel consumption, and improve the emissions. It is also pointed out that the two-stage turbocharging system is complex, has relatively big size and quality, thus is hard for installation and connection. The solutions to deal with these problems are also discussed.

Key words: marine diesel engine; two-stage turbocharging; performance; structure

0 引 言

柴油机二级涡轮增压系统是一种新技术, 主要应用在高速大功率柴油机上, 可以改善柴油机各负荷运行工况的性能, 对提升功率、降低油率有明显的效果, 已成为柴油机节能减排的核心技术。某高速柴油机采用均质预混合燃烧方式, 以实现高效、低温燃烧, 有效降低 NO_x 和 PM 排放。为了实现柴油均质预混合燃烧, 不能仅靠压缩着火, 同时要降低预混合燃烧过程中的放热率, 因此在燃烧系统中采取降低有效压缩比、EGR 等技术手段。EGR 技术降低 NO_x 排放的同时, 增加了废气再循环功率,

导致循环进气量降低, 气缸内氧浓度降低, 从而使柴油机功率下降, 油耗增加。为保证气缸内足够的氧气浓度, 则必须采用更高的增压压力。理想的增压系统是: 在柴油机低转速时可以达到较高的压比, 高转速时压比又不至于超出限值; 压比最好在一定范围内可以调节。显然, 单级增压系统已经不能达到上述要求。基于上述原因, 在柴油机上匹配二级增压系统, 并研究其对柴油机各项性能指标的影响, 具有实际意义。

1 二级增压系统工作过程

二级增压系统是将两个不同级的增压器串联起

来,使空气在二个增压器中相继受到压缩,以提高其压比;高压级涡轮安装旁通阀以调节总的增压压比。二级增压系统的工作原理如图 1 所示。

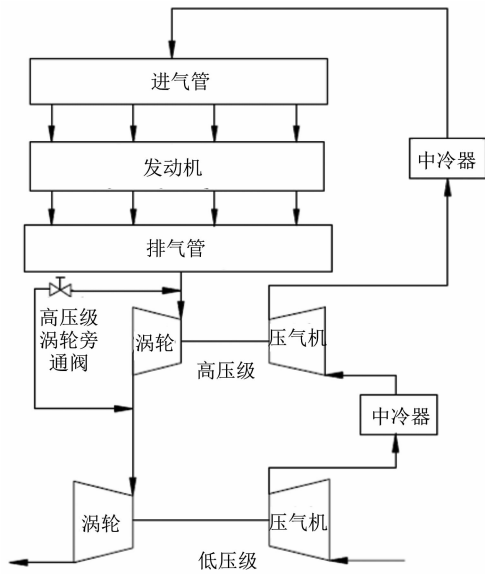


图 1 二级增压系统工作原理

在进气管路,新鲜空气经低压级压气机压缩后,进入第一级中冷器,然后进入高压级压气机进一步压缩,再进入第二级中冷器,冷却后经进气管进入气缸。柴油机低速时,高压涡轮的旁通阀完全关闭,所有的废气先经过高压级涡轮膨胀,再经过低压级涡轮膨胀,低压废气涡轮增压器提供的废气量较少,只承担一小部分增压任务,必须充分利用废气的能量来压缩高压压气机中的新鲜空气;柴油机高速时,高压涡轮的旁通阀打开,一部分废气不经过高压级涡轮,直接经低压级涡轮膨胀后排出,此时的废气能量完全供给给低压涡轮工作,以降低高压级的涡轮功和进气压比,使得进气压比不至于越过设定的限值。外部旁通阀一般采用电控,对进气压比进行连续调节。

2 二级增压器的设计与匹配计算

本文研究的对象为某高速预混合燃烧柴油机,其主要技术参数如表 1 所示。

二级增压系统一般使用两台质量、流量相同而尺寸不同的增压器串联,通常在低压级匹配一个流量范围大、高速性能较好的废气涡轮增压器,而在高压级串联一个流量范围小、低速匹配性能较好的带废气放气阀的增压器。从结构上看,在柴油机整个运行工况范围内,二级增压器系统都可以达到很高的增压压力,使得空气供给量较大,过量空气系数较大。

表 1 某柴油机主要性能参数

发动机型式	四冲程
缸径×行程/(mm×mm)	132×140
型式	V 型 60°夹角、8 缸
曲轴转向	逆时针(从飞轮端看)
(功率/转速)/(kW/(r·min) ⁻¹)	300/1 500
燃烧系统	预混合燃烧
最高燃烧压力/MPa	15
压缩比	12:1
增压方式	废气涡轮二级增压
平均有效压力/MPa	1.72

2.1 二级增压系统的压比分配与参数计算

采用二级增压器后,高、低压增压器的压比分配对发动机性能有很大的影响。如何确定发动机在各个工况下高压级与低压级的压比关系,以及如何选择相应的高、低压涡轮增压器显得尤为重要。一般来说,发动机性能参数确定后,可以采用流通模型计算各工况下发动机所需的压比和流量。可以将二级增压器作为一个系统整体考虑,将计算所得的压比、流量作为二级增压系统的输出量,然后分析压比和流量在高、低压增压器中的合理分配。单级增压所用到的计算方法也适用于二级增压系统。

设低压级压气机所消耗的功为:

$$W_{ch1} = \frac{k}{k-1}RT_0[1 - (\frac{P_1}{P_0})^{\frac{k-1}{k}}] \frac{1}{\eta_{ch}} \tag{1}$$

高压级压气机所消耗的功为:

$$W_{ch2} = \frac{k}{k-1}RT_1[1 - (\frac{P_2}{P_1})^{\frac{k-1}{k}}] \frac{1}{\eta_{ch}} \tag{2}$$

当总压比 P_2/P_0 为定值的情况下,求出使总压缩功最小的 P_1 值。也即总压比一定, $W_{ch1} + W_{ch2}$ 的和为最小,则

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{P_2}{P_1} \tag{3}$$

从上式可知,当二级压比均匀分配时,所耗的总压缩功最小。

从公式 (1)、(2) 可以看出:只有当两个压气机效率相等,进口温度相等的条件下才能得出上述结论。这种情况下,压比均匀分配意味着二级增压器的压缩功是均匀分配的。但事实上,这些条件是不可能达到的,即使是型号相同的两台压气机,在性能上也不可能完全一样;且使高压级压气机入口的空气温度恢复到环境温度也是难以实现的。当高压级入口温度超过环境温度时,如果仍保持二级压气机压比均匀分配,则高压级压气机的压缩功就要增大,而在两台型号相同的压气机串联系统中,

只有在压缩功均匀分配时所消耗的总压缩功最小。因此,在实际的二级涡轮增压系统中压比并不是均匀分配的,而是低压级分配的比例较大。

在实际情况下研究二级增压的压比分配时,仅仅考虑发动机全负荷工况是不够的,必须兼顾部分工况。随着负荷的变化,二级增压系统的能量分配会发生剧烈变化。当负荷下降时,涡轮进口处的压力和温度下降,此时高压级中的焓降变化较小,但低压级涡轮背压保持不变,涡轮机内的膨胀功减小。一般,比较合理的压比分配比例是 4:6,即高压级的压比占总压比的 40%,低压级的压比占总压比的 60%,这样在部分负荷时,二级压比可保持基本相等。

选定柴油机 100% 负荷、1 500 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 作为增压系统的匹配设计点,根据原机配单级增压器的试验数据及目标 EGR 率对增压系统参数进行计算。

进气密度:

$$\rho_c = \frac{120M_c}{\eta_v \varphi_H V_H n (1 - EGR\%)} \quad (4)$$

式中: M_c 为进气流量; n 为标定点转速; η_v 为容积效率; φ_H 为扫气效率; V_H 为气缸工作容积; $EGR\%$ 为发动机总 EGR 率。

根据进气温度和中冷器压降计算增压压力,确定总压比。由理想气体状态方程计算高压级中冷器出口压力:

$$P_c = \rho_c R T_c \quad (5)$$

式中: T_c 为进气温度。

高压级压气机出口压力:

$$P_k = P_c + \Delta P \quad (6)$$

式中: ΔP 为中冷器压降。

$$\text{总压比为: } \pi = \frac{P}{P_0} \quad (7)$$

根据所确定的高、低压比分配,计算高压级压气机进口参数,并计算出折合流量。分别选取 JP78 和 JP95 为低压和高压增压器,其压气机特性曲线分别如图 2、3 所示。低压级增压器:转速 85 333.80 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),压比 2.29,出口温度 406.52 K;高压级增压器:转速 89 333.29 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),压比 1.957 0,出口温度 404.17 K。

2.2 柴油机模型的建立与验证

使用 AVL-Boost 仿真软件,根据发动机的配置结构,建立发动机单级涡轮增压系统的一维计算模型,如图 4 所示。对 1 500 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)、300 kW

额定工况进行计算,仿真结果与试验数据对比如表 2 所示。

表 2 匹配单级增压系统的柴油机试验与仿真参数对比

性能参数	功率/ kW	扭矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)	油耗/ ($\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	最高燃 烧压力/ MPa	涡轮 排温/ K	涡轮 排温/ K
试验结果	300	1 910	211.4	11.8	884	724
计算结果	300	1 908	209.8	11.96	879	723.8

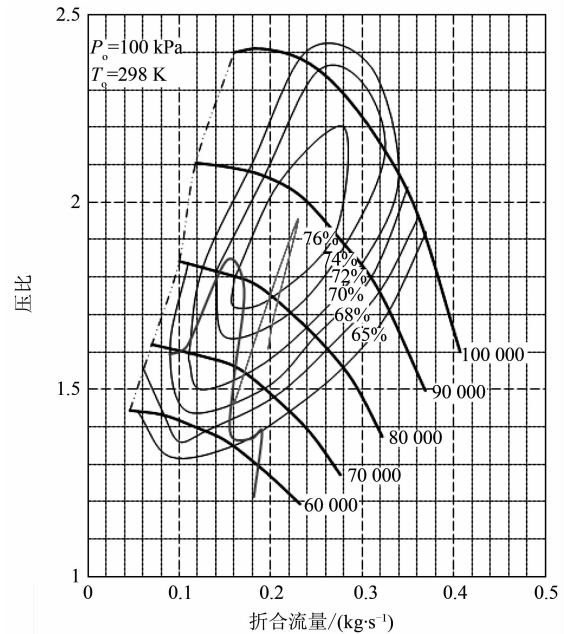


图 2 低压压气机特性曲线

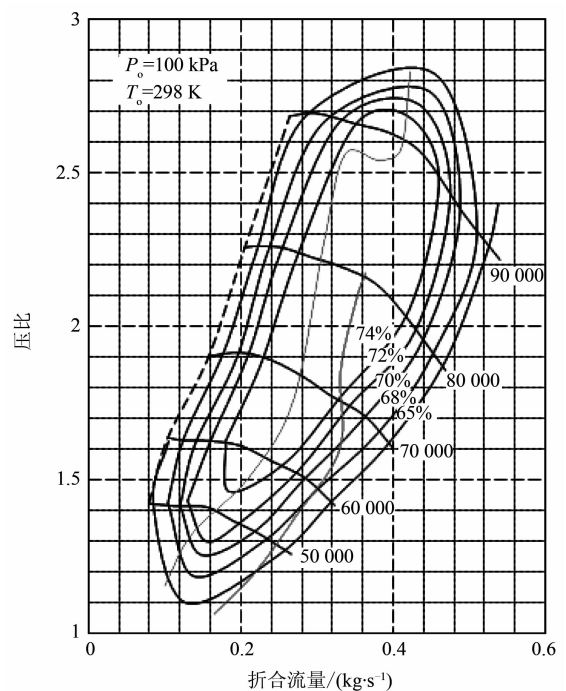


图 3 高压压气机特性曲线

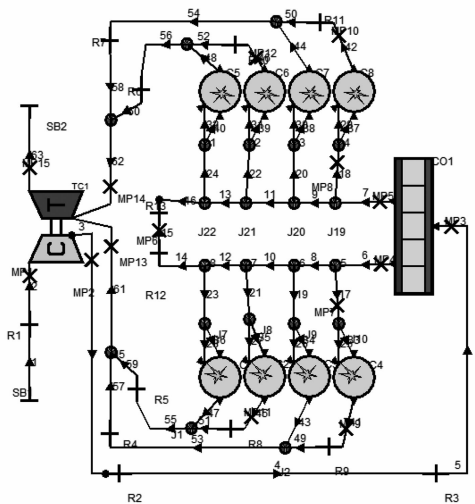


图 4 单级增压系统 BOOST 一维模拟计算模型

计算结果与试验结果的吻合情况较好，表明所建立的发动机模型是合理可用的。在此模型的基础上，建立二级增压器串联模型，并在二级增压器之间增加中冷器。所建立的二级增压系统 BOOST 一维模拟计算模型如图 5 所示。

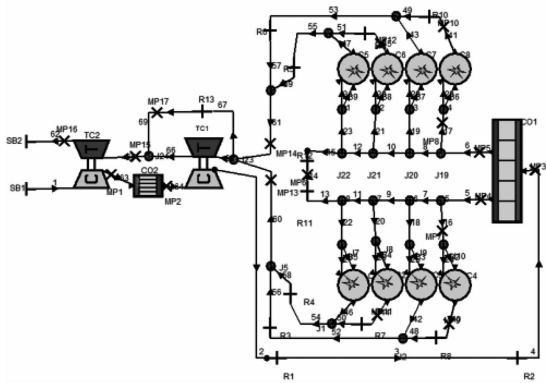


图 5 二级增压系统 BOOST 一维模拟计算模型

输入二级增压系统相关参数，中冷器参数选用与原机中冷器的相同，对柴油机在 $1\,500\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ ， 300 kW 工况时各项性能参数进行仿真计算，如表 3 所示。

表 3 柴油机二级增压与单级增压性能参数对比

性能参数	功率/ kW	扭矩/ (N · m)	油耗/ (g · (kW · h) ⁻¹)	最高燃 烧压力/ MPa	涡轮 前温/ K	涡轮 后温/ K
单级增压	303	1 908	209.8	11.96	879	723.8
二级增压	372	1 935	206.7	12.42	864	715.9

图 6 ~ 图 13 分别给出了柴油机在 300 kW 、 $1\,500\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 工况匹配单级和二级增压系统时缸内压力、压力升高率、气缸温度、涡轮进口压力波曲线。

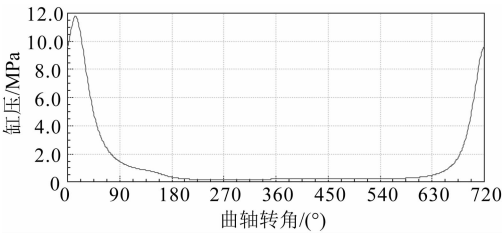


图 6 单级增压缸压曲线

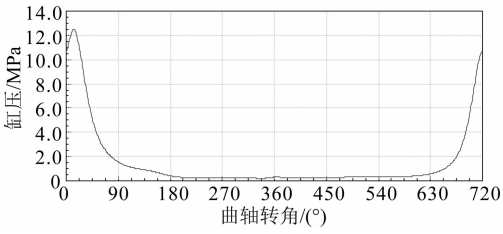


图 7 二级增压缸压曲线

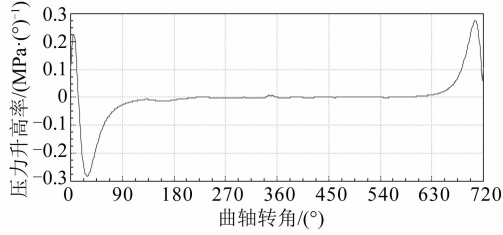


图 8 单级增压压力升高率曲线

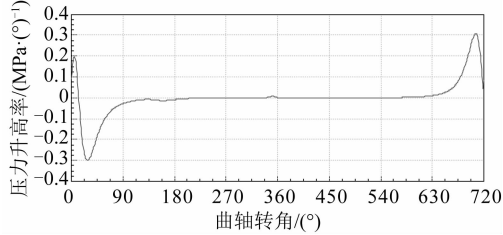


图 9 二级增压压力升高率曲线

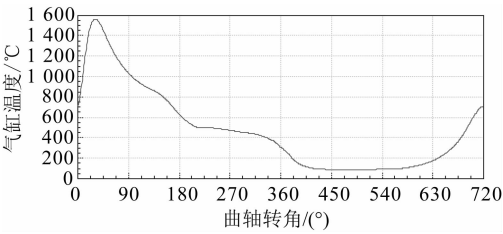


图 10 单级增压气缸温度曲线

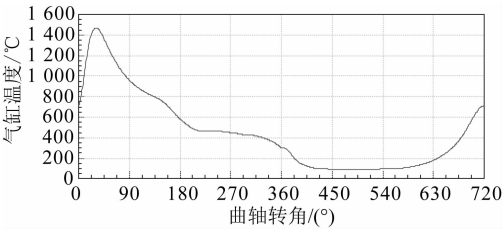


图 11 二级增压气缸温度曲线

可以发现：匹配二级涡轮增压系统后气缸内进气量明显增加，柴油机最高燃烧压力有所提高，气缸内最高温度受到一定的限制，为柴油机实现均质预混合燃烧提供了一定的条件。采用二级增压后，进气压力、进气量增大，使气缸内空燃比提高，混合气由较浓状态转为较理想的燃烧混合比例，使燃烧效率提高，燃料的能量得到充分利用，对改善柴油机的性能有促进作用。富氧条件对 HC 排放有降低作用；同时可大幅提高柴油机的低速扭矩特性，降低最大扭矩点转速，提高扭矩储备系数，使其具有较好的瞬态响应速度。柴油机标定功率提升幅度较大，油耗降低，使增压器与柴油机的匹配能够在更为宽广的区域内优化。

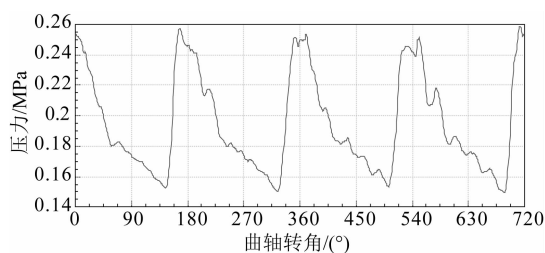


图 12 单级增压涡轮进口压力波曲线

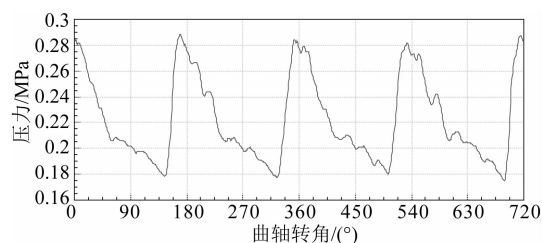


图 13 二级增压涡轮进口压力波曲线

3 二级增压系统安装

二级增压系统并不是简单地将二个增压器和二个中冷器连接起来，而是要从进、排气系统的整体出发，寻求体积与质量的最小化和效率的最大化。充分利用计算机辅助设计和结构分析系统对结构进行优化设计，可以考虑将部分管路与涡轮壳体或压

气机壳体铸造在一起，减少管路连接，提高安装可靠性。该预混合燃烧柴油机匹配二级涡轮增压系统后性能上体现了一定的优势，但是其复杂的结构在安装上存在很大的困难。该柴油机布局结构紧凑，采用二级涡轮增压器和二级中冷器后尺寸和质量增加很多，进、排气系统管路和增压器进、回油路连接复杂，给安装和管路配置带来了很大的困难。为尽可能保证与原型机零部件通用，减少零部件及安装管路中铸件的数量，原机 A、B 列排气管、排气三通管接及中冷前进气管安装位置均保持不变，即采用高压涡轮与原增压器涡轮出口连接保持一致，高、低压涡轮并排对齐布置，二级增压器级间冷却器安装在二个压气机中间的方式，实现了二级涡轮增压系统在该柴油机上的安装。

4 结 论

使用 AVL-Boost 性能仿真软件对某高速预混合燃烧柴油机匹配二级涡轮增压系统进行仿真分析，表明：通过匹配二级增压系统可以获得较高的增压压比，增加了燃烧室的进气量，改善了柴油机部分工况的经济性和动力性能，使柴油机在全工况范围内运行良好，满足柴油机均质预混合燃烧的条件。同时，对二级涡轮增压器的安装和连接进行了评估，表明：该预混合燃烧柴油机二级增压系统的匹配和安装满足设计要求。

参考文献

- [1] 何义团, 马朝臣, 魏名山, 等. 二级增压系统压比分配试验研究 [J]. 车辆与动力技术, 2007 (2): 1-3.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 陆家祥. 柴油机涡轮增压技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [4] 曹孝谨. 涡轮增压器与柴油机的匹配 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.