

某船用柴油机增压系统的匹配研究计算

The Calculation and Analyze of a Marine V Type High-speed Diesel

Engine Matching Turbocharger system

刘俊龙 冯新刚 庞斌

潍柴动力股份有限公司

摘要: 利用 GT-Power 软件建立了某船用 V 型柴油机采用两台增压器相继增压的计算模型, 为了验证计算模型和所选参数的正确性, 对常规增压器进行了计算, 并与试验结果进行了对比, 两者基本吻合。对两台相继增压器进行了计算分析, 结果表明, 该机型采用相继增压其低工况性能得到了明显的改善, 扩大了该机作为船用主机的运行范围。

关键词: 柴油机; 相继增压器; 性能; 计算

Abstract A calculating model for a marine V type diesel engine with 2 turbocharger(2TC)using sequential turbocharging(STC), is set up with GT-Power in this paper. In order to validating the model, a calculation to the general turbocharging has been performed first, and the calculated result tend to be in agreement with the experimental ones. Then, the STC system has been calculated and analyzed also. From the result, it can be seen that not only the low load performance is improved, but also the running scope is enlarged by the marine diesel engine after using STC.

Key words: Diesel engine; Sequential turbocharging; Performance; Calculation

1. 前言

提高柴油机功率, 降低油耗以及减少排放一直是柴油机研究与发展的主要目标, 提高增压压力是提高柴油机功率的最主要方法。随着高压比、高效率涡轮增压器产品的开发与应用, 涡轮增压柴油机的增压程度越来越高。而回转运动的涡轮增压器与往复运动的柴油机联合运行时, 难以同时满足柴油机高、低工况运行的要求, 而且增压程度越高, 其矛盾越突出。为了改善高增压或超高增压柴油机的低工况性能, 开发了各种涡轮增压系统, 如: 可变截面涡轮、可变气门正时机构、进排气旁通及高工况放气、低压缩比补燃、相继增压等。其中, 高工况放气、进排气旁通是对经济性和性能的有效折中, 可用于对经济性要求不高和增压比变化不大的场合。可变截面涡轮与相继增压虽然都是改变涡轮的进口面积, 但却有很多不同之处: 可变截面涡轮只改变涡轮的进口面积, 改变幅度较小, 是连续的, 但在低工况时涡轮增压器的综合效率低; 相继增压是同时改变涡轮及压气机的进口面积, 涡轮进口面积的改变是不连续的, 改变幅度较大, 可保持增压器较高的综合效率。故可变截面涡轮增压适用于缸数较少, 平均有效压力较低的柴油机, 相继增压系统适用于工作范围宽, 负荷变化大, 增压比较高, 对低速大扭矩要求较高, 经济性要求好的场合。

目前船用中高速大功率柴油机, 多为 V 型 12~20 缸, 按 $N_e=Cn3$ 或 $N_e=Cn2$ 来运行。为了改善它们的低工况性能, 大多采用相继增压系统, 低压缩比补燃或米勒系统等。如有代表性的德国 MTU595 型 20 缸高速柴油机, 法国 PA6—280STC12 缸、16 缸柴油机均采用了相继增压系统(简称为 STC 系统) [1][2]。STC 系统是在标定工况时, 柴油机的每台增压器都在高效区工作, 效率高、标定工况油耗低; 在部分工况时减少投入使用的涡轮增压器数量, 使得投入使用的涡轮增压器仍然在高效区附近工作, 最大限度地增加气缸的进气量, 从而改善了柴油机的性能。

2. 相继增压系统

相继增压的基本工作原理是采用两台及两台以上的涡轮增压器，在标定工况下每台增压器都工作在高效率区，部分工况时，通过减少投入使用的涡轮增压器数量，使得工作的增压器处在高效率区，从而达到改善柴油机部分工况性能的目的，使柴油机在全工况范围内运行良好。在国内，相继增压研究的对象都是采用两台增压器构成的系统。这种两台增压器组成的相继增压，柴油机在低工况时一台增压器运行，相当于涡轮流通面积是标定工况时的 1/2，涡轮截面减小了一半，使柴油机的低工况性能得到了明显的提高；若采用多台增压器相继增压，则涡轮喷嘴截面变化幅度将会更大，且变化的连续性得到加强，能实现柴油机不同工况下的平稳过渡，保证全工况范围内柴油机的运行参数达到更佳值，而且能有效改善柴油机的加速与起动机性能。本文对某船用 V 型高速柴油机采用两台涡轮增压器相继增压进行了模拟计算与分析[3]。计算研究结果可用于高速增压柴油机多台增压器相继增压系统的性能预测与理论分析，以提高柴油机的工作性能与技术水平。

图 1 为某船用 V 型高速柴油机常规增压系统示意图，该机型的基本参数如下：标定功率为 1100kW，标定转速为 2200r/min，单缸排量为 2.65L，气缸数为 12，V 型夹角 90°，采用两台增压器，增压器形式为常规脉冲增压。采用 STC 系统后示意图如图 2 所示，在 A 列排气管与 B 列排气管（靠近涡轮端）之间用一管路连通，在 B 列压气机出口处安装一空气阀，B 列涡轮入口前安装一燃气阀。当柴油机运行在高工况时，空气阀、燃气阀都开启，两增压器都投入运转(2TC)，当柴油机运行在低工况时关闭空气阀和燃气阀，切除 B 列增压器，使 B 列的排气与 A 列的排气一起进入 A 列增压器(1TC)，使 A 列增压器运转在高效区，提高了增压压力，使柴油机在低工况运转时进气充分，燃烧更加充分，使动力性、经济性得到了有效的改善。

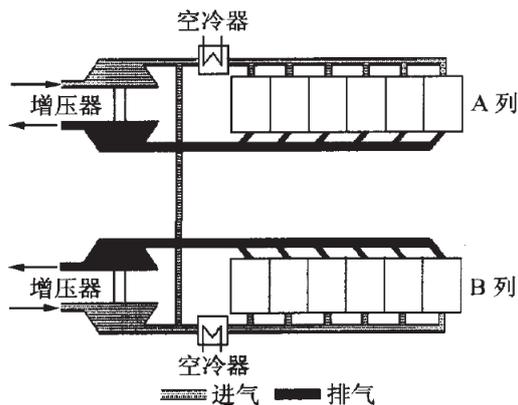


图 1 常规增压系统示意图

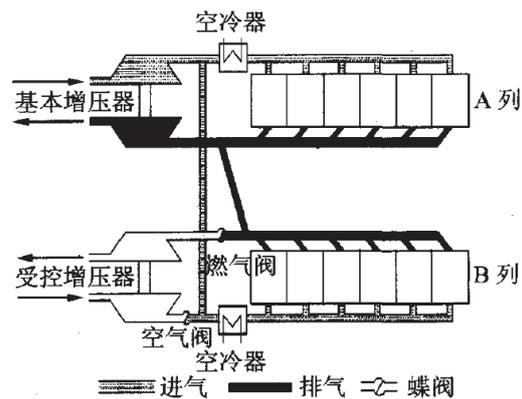


图 2 相继增压系统示意图

3. 计算模型

本文采用 GT-Power 软件根据柴油机实际结构建立一维热力学模型，如图 3 所示，其中 R1 和 R4 为燃气阀，R2 和 R3 为空气阀，R5 和 R6 为进排气旁通阀，进排气旁通阀的作用是通过开启旁通阀使通过压气机的一部分空气不经过气缸而直接进入涡轮，通过合理地控制旁通空气量，可在部分负荷时防止喘振，同时降低排气温度。当 R1 和 R2 打开，其他全部关闭时，该系统即为常规的增压系统，当 R1 和 R2 关闭，R3 和 R4 打开，R5 和 R6 选择性打开时该系统即为相继增压系统。

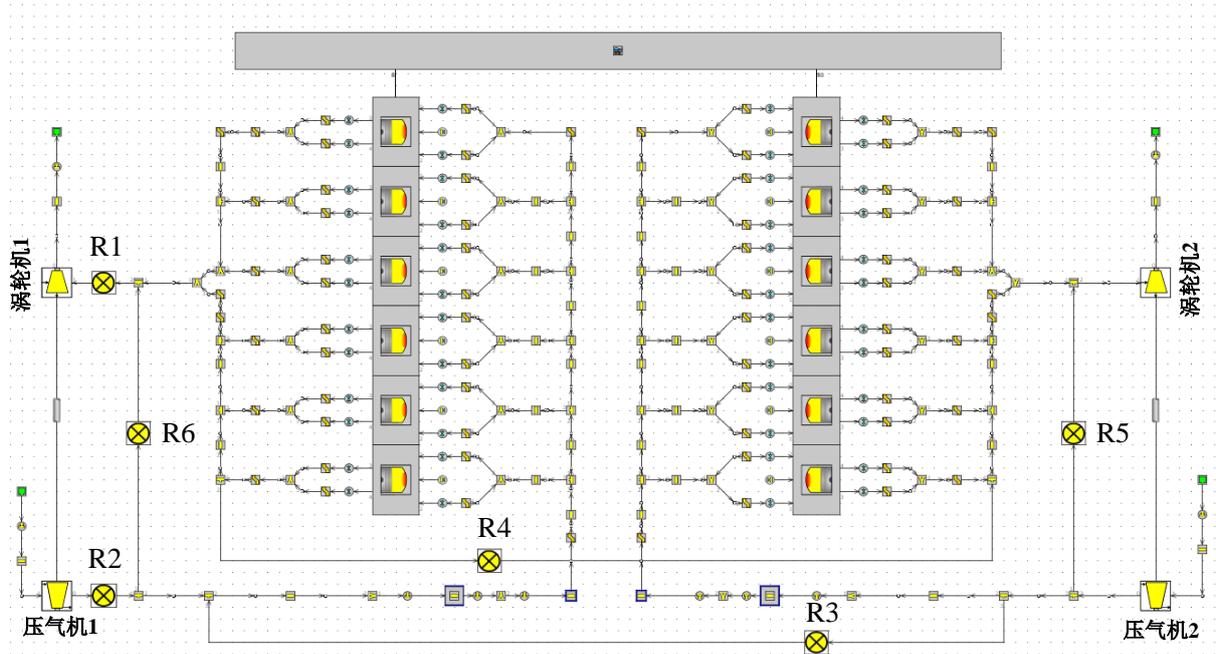


图3 一维热力学模型

4. 计算结果及分析

4.1 常规增压系统计算

采用上述建立的一维热力学模型对该机型以常规增压方式进行模型标定，分别对该机型的外特性和推进特性进行标定，保证柴油机的主要性能参数的计算结果和试验数值的相对误差在 5% 以内，说明本文所建立的计算模型及计算分析是合理实用的。推进特性及外特性的增压器运行线如图 4 和图 5 所示，可以看出该增压器匹配相对较好，推进特性运行线经过压气机的高效区，但外特性上运行线在中低转速时偏离高效区，而且现在很多船机在特殊工况下也会运行外特性工况，所以有必要对外特性进行优化，因此针对外特性进行常规增压系统（TC）和相继增压系统（STC）的比较计算分析。

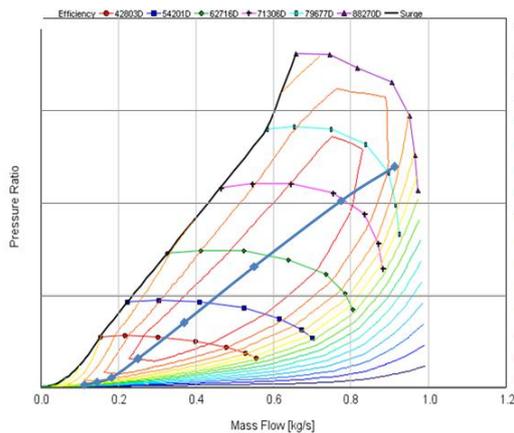


图4 常规增压系统推进特性运行线

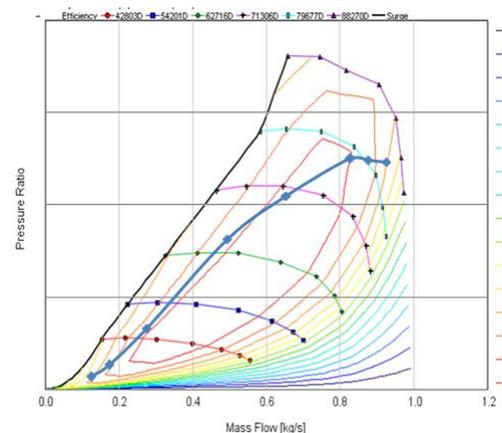


图5 常规增压系统外特性运行线

4.2 常规增压系统（TC）与相继增压系统（STC）计算结果分析对比

将热力学模型切换到相继增压系统，并对各控制阀进行流量控制，对该机型的外特性进行计算分析，并与常规增压系统的计算结果进行对比。由于 TC2 增压器和 TC1 增压器的状态基本一样，因此随机选择 TC2 进行低转速工况的计算分析，对 TC1 进行控制。

表 1 为各运行工况下各阀的流量控制系数，其中 0 表示全部关闭，1 表示全部打开。在高转速时（1800r/min—2200r/min）保持原常规增压系统的运行状态，在中间转速时（1200r/min—1600r/min），保持 R1 和 R2 打开状态，并将 R5 和 R6 部分打开，目的是为了使经过压气机的部分空气直接进入排气管中，这样不仅可以增加经过压气机的空气流量，使运行线远离喘振线偏向压气机的高效区，还可以降低排气温度；在低转速时（800r/min-1000r/min），只打开 R3 和 R4，其他控制阀全部关闭，使该柴油机的进排气全部只经过 TC2 增压器，提高增压器的运行效率，改善低转速的性能。

表 1 各工况下各控制阀的流量系数

工况	R1	R2	R3	R4	R5	R6
2200	1	1	0	0	0	0
2000	1	1	0	0	0	0
1800	1	1	0	0	0	0
1600	1	1	0	0	0.02	0.02
1400	1	1	0	0	0.04	0.04
1200	1	1	0	0	0.15	0.15
1000	0	0	1	1	0	0
800	0	0	1	1	0	0

计算结果如图 6-图 12 所示，从图中可以看出，在 1800r/min—2200r/min 时由于保持原常规增压系统所以计算结果完全相同，在 1200r/min—1600r/min 时在常规增压系统的基础上打开 R5 和 R6，使涡轮机和压气机的效率都有所增大，进气量也随之增大，但涡轮机效率增幅较小，只增加了 5% 左右，增压压力也有小幅度增加，而油耗率与常规增压系统基本一样，由于进气量增加使得排气温度有 50℃-250℃ 的减小；从增压器的运行线上可以看出，1200r/min—1600r/min 这三个工况点的运行线都偏向于压气机的高效率区，有力的说明了进排气旁通阀不仅可以使各工况的运行线偏离喘振区偏向高效区，还可以使柴油的排气温度有大幅度的降低。

在 1200r/min 工况切换到相继增压系统时，会造成涡轮增压器超转速而无法运行，因此，大致可以将 1200r/min 的工况点作为该机型柴油机运行外特性时，常规增压系统和相继增压系统切换的工况点。

在 800r/min-1000r/min 工况时，将系统完全切换到相继增压系统，此时只打开 R3 和 R4 阀，其他全部关闭。从计算结果可以看出，压气机的效率增加接近 20%，涡轮机效率增加 12%，增压压力和进气量也有大幅度的增加，油耗率降低 15g/kWh 左右，排气温度降低幅度较大，增压压力提高了 1bar 左右，增压器运行线全部处在高效率区，使低转速性能得到了大幅度的提升和改善。

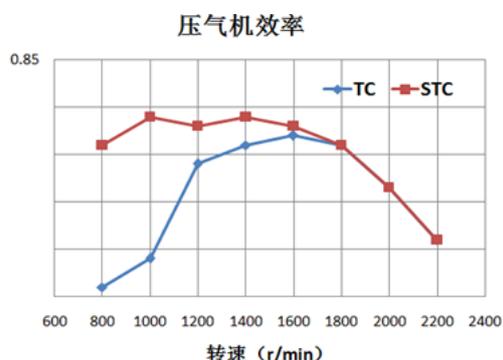


图6 各工况的压气机效率线

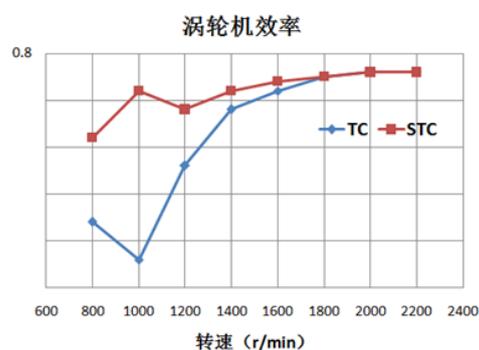


图7 各工况的涡轮机效率线

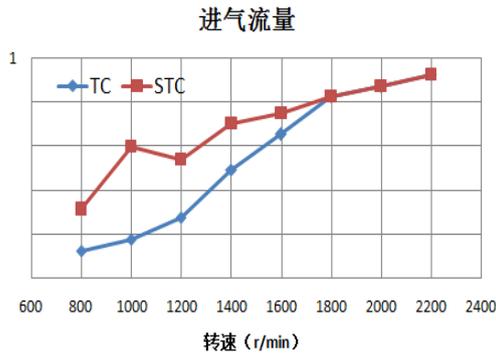


图8 各工况的进气量

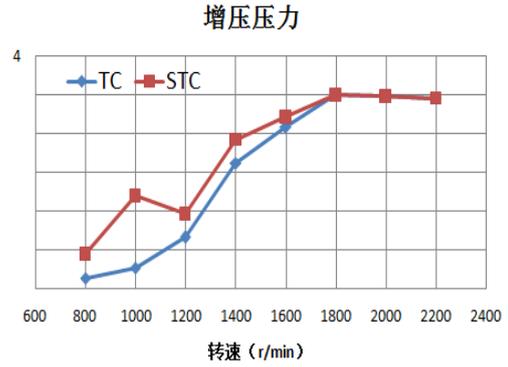


图9 各工况的增压压力

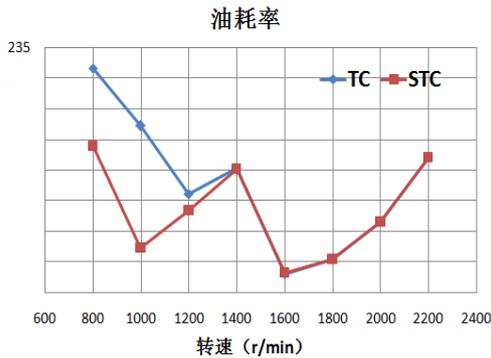


图10 各工况的油耗率

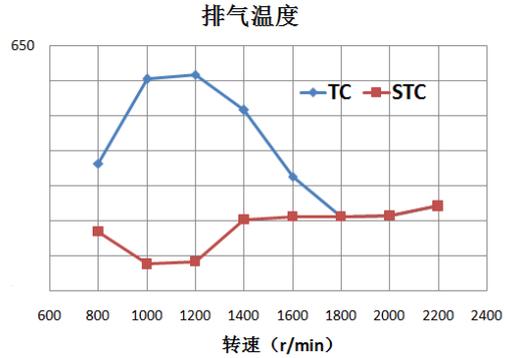


图11 各工况的排温

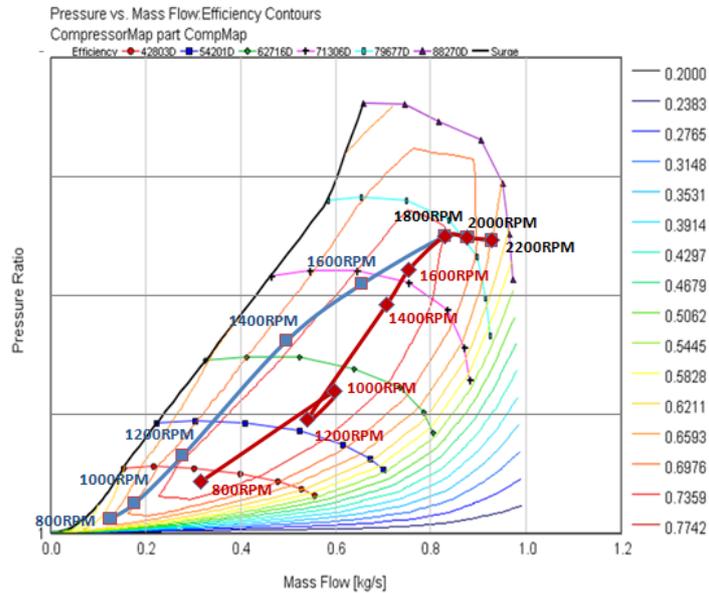


图 12 两种增压系统的联合运行线

5. 结论

(1) 本文所建立的计算模型能较好地反映该船用 V 型高速柴油机常规增压和相继增压的工作过程，常规增压的计算结果与试验数据基本吻合，证明了计算模型、计算方法及相关参数选择的合理性；相继增压的计算可用于其性能的预测。

(2)与其它对低工况性能的改善方法相比,将V型机改造为两个增压器的相继增压,结构简单且易于实现,计算表明具有明显的效果,低工况下,油耗下降了15g/kWh左右,增压压力提高了1bar左右,排气温度降低幅度较大;在中间转速时进排气旁通阀的开启可以使增压器运行线偏离喘振区偏向高效区。

(3)限于现有条件无法对增压器进行选配,目前所做的只是在原配增压器的基础上进行的相继增压计算。如能重新选配涡轮增压器,一方面可将工作的配合点上移,将使发动机在设计工况点发出更大的功率,另一方面,在全工况范围内,使柴油机与增压器能得到更好的配合,进一步扩大柴油机的运行范围,改善其低工况性能。

6 参考文献

- [1] 王银燕. 高维成, 应用 MPC 一相继增压系统改善船用柴油机低负荷性能的研究[J]. 内燃机学报, 1999(1): 13~17
- [2] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] 朱小慧. MIXPC 涡轮增压系统非定常流动研究[D]. 上海交通大学博士学位论文, 2001.