

某特种废气旁通式涡轮增压柴油机功率提升分析

孙潇琪, 郭丰泽, 戎志祥

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 针对某特种柴油机在特殊环境工作时存在进气不足、排气受阻、燃烧恶化、排温升高、功率及燃油经济性下降严重等问题, 提出匹配废气旁通式涡轮增压系统的方案。基于 GT-Power 平台构建了该特种柴油机一维性能仿真模型, 并进行试验标定; 在此基础上对废气旁通式涡轮增压系统进行了匹配仿真分析并试验验证。结果表明: 该特种柴油机匹配废气旁通式涡轮增压系统后可达到功率提升 10% 的要求, 同时, 涡前排温和最高燃烧压力均满足限制条件。

关键词: 特种柴油机; 功率; 废气旁通式增压系统

中图分类号: TK421⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)02-0001-06

Power Raising Analysis of a Special Diesel Engine With Exhaust Bypass Turbocharging System

Sun Xiaoqi, Guo Fengze, Rong Zhixiang

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: In particular environment, a special diesel engine had the problems of insufficient intake, blocked exhaust, worsening combustion and high exhaust temperature, which led to serious decline in power and fuel economy. To solve these problems, the exhaust bypass turbocharging system was proposed as the solution. The GT-Power software was used to construct the one-dimensional simulation model of the special diesel engine, and the model was calibrated by test. On this basis, the matching simulation analysis of the exhaust bypass turbocharging system was carried out and demonstrated by experiments. The results show that the exhaust bypass turbocharging system can realize diesel engine power improvement of 10%, and both the temperature in front of turbine and the maximum combustion pressure are within the limits.

Key words: special diesel engine; power; exhaust bypass turbocharging system

0 引言

某型(16V170Q)特种柴油机在特殊环境下工作, 具有高真空度、排气阻力高及排气阻力波动的特点。该柴油机在进气过程中会形成一定的真空度, 进气压力仅为 96 ~ 98 kPa (绝对压力); 同时, 由于排气阻力及管路阻力的影响, 会形成两种高排气阻力 (分别为 134%、164% 大气压力), 且两种排气阻力差值达 30 kPa 的典型工况; 此外, 由于环境变化还会导致阻力周期不定波动, 波动幅

值可达 20 kPa。而排气阻力过大会导致进、排气困难, 进气量减小, 燃烧恶化, 从而引起排气温度过高, 超出柴油机的热负荷承受范围。

因此, 该特种柴油机须兼顾两种排气阻力差异均较大的运行工况, 并确保都能可靠运行。如果选用常规增压器, 难以同时兼顾多个工况点的功率提升要求, 同时易导致排温及最高燃烧压力超标。有研究表明: 废气涡轮增压系统优化在柴油机总体结构优化中对功率提升的贡献度可达 60% ~ 70%。因此, 为克服高真空度、高排气阻力环境对柴油机

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-10-24

作者简介: 孙潇琪(1995—), 硕士研究生, 主要研究方向为柴油机动力模块设计, 2815584219@qq.com。

性能的影响,达到提高功率密度的目的,对该特种柴油机增压系统进行优化。本文将常规涡轮增压系统改为废气旁通式可调增压系统,研究废气旁通式增压系统对该特种柴油机性能的影响。

根据柴油机结构参数,基于GT-Power软件搭建一维系统仿真模型并进行标定,在此基础上,开展不同排气阻力下的稳态仿真分析及试验验证,并对排气阻力波动时的瞬态特性进行分析;在保证涡轮前排温和最高燃烧压力不超限的前提下,通过改变废气旁通阀开度得到该特种柴油机在各个工况下的最佳运行状态,以分析废气旁通式可调增压系统满足柴油机功率提升10%的可行性。

1 16V170Q 柴油机仿真平台搭建和验证

根据柴油机结构将仿真模型分为环境模块、进排气模块、气缸、喷油器、增压器、中冷器及曲轴箱等模块;按照实际结构设置参数,并将模块按顺序连接。完成的模型如图1所示。

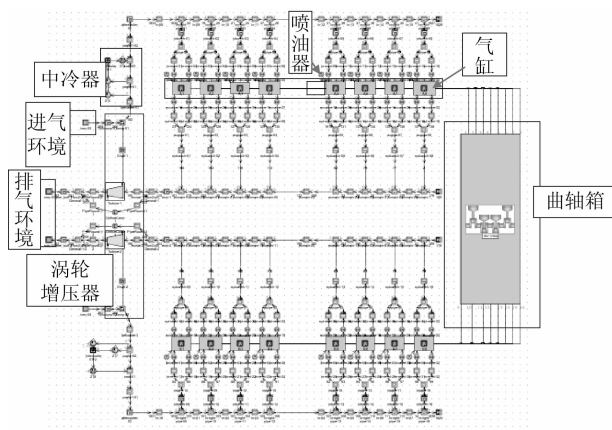


图1 16V170Q 发电柴油机仿真模型

对所搭建的模型进行标定。燃烧模型是模型标定的重中之重。为了更有预测性,本仿真模型中的燃烧模型采用DI-JET模型^[1]。该模型通过模拟喷油、混合及燃烧过程来预测燃烧放热率,能够在单一输入参数规律变动的情况下,响应不同工况(如负荷和排气阻力)的变化。前述两个典型排气阻力下的燃烧模型标定结果如图2所示。可见,实测值和仿真值的曲线吻合性较好,尤其是在燃烧后期,两条线基本重合。标定结果表明仿真模型精度较高。

此外,还须对搭建的一维系统仿真模型进行试验数据验证。由于所研究的柴油机为发电用柴油机,其常规运行工况为定转速、定负荷,主要变化是排气阻力,所以可将排气阻力作为自变量,比较运行功率为定值时性能参数的仿真结果和试验结果。

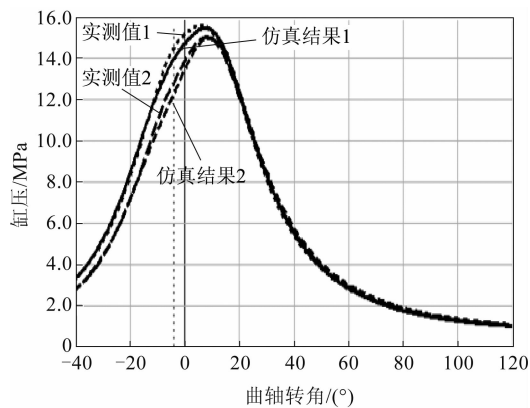


图2 燃烧模型标定

根据该特种柴油机的工作特点,选取排气阻力分别为114%、134%、144%、154%、164%、174%大气压力的几个典型工况。仿真和试验结果如图3所示。可见:在154%工况时,功率仿真值和试验值的差值最大为3.4 kW,误差0.22%;油耗差值最大为4.1 g/(kW·h),误差1.8%。114%工况时,最高燃烧压力差值最大为0.48 MPa,误差2.7%;涡轮前排温差值最大为12.9 °C,误差2.6%;增压器转速差值最大为1 072 r/min,误差2.16%;柴油机转速最大误差为0.17%;进气流量和增压压力最大误差分别为4.8%和2.02%。综上,这些关键性能参数最大误差均不超过5%,故该模型可用。

在建立好柴油机整机模型后,须建立废气旁通涡轮增压系统模型。废气旁通阀布置可分为外置式和内置式。相对而言,外置式废气旁通阀在发动机高功率工况下具有更高的调节精度和调节效率,因此本文采用外置式布置。在GT-Power中没有专门的旁通阀模型,采用孔口来代替旁通阀,通过改变孔口直径调节旁通阀开度,其他结构不变。废气旁通可调增压系统仿真模型如图4所示。

2 特种柴油机增压系统匹配分析

根据废气旁通涡轮增压系统的工作原理,选择等效流通面积较小的涡轮,在高排气阻力时可实现较高的增压度,推动涡轮做功;当排气阻力减小时增大旁通阀开度,部分气体不流经涡轮,增压器转速降低,增压压力减小,可避免增压器出现超速现象。排气阻力164%为该特种柴油机的主要运行工况,因此,在164%工况进行增压器匹配,可使匹配效果最佳。原常规涡轮增压器已经在164%工况进行了匹配优化,柴油机功率提升10%时柴油机的性能参数仿真分析结果如图5所示。

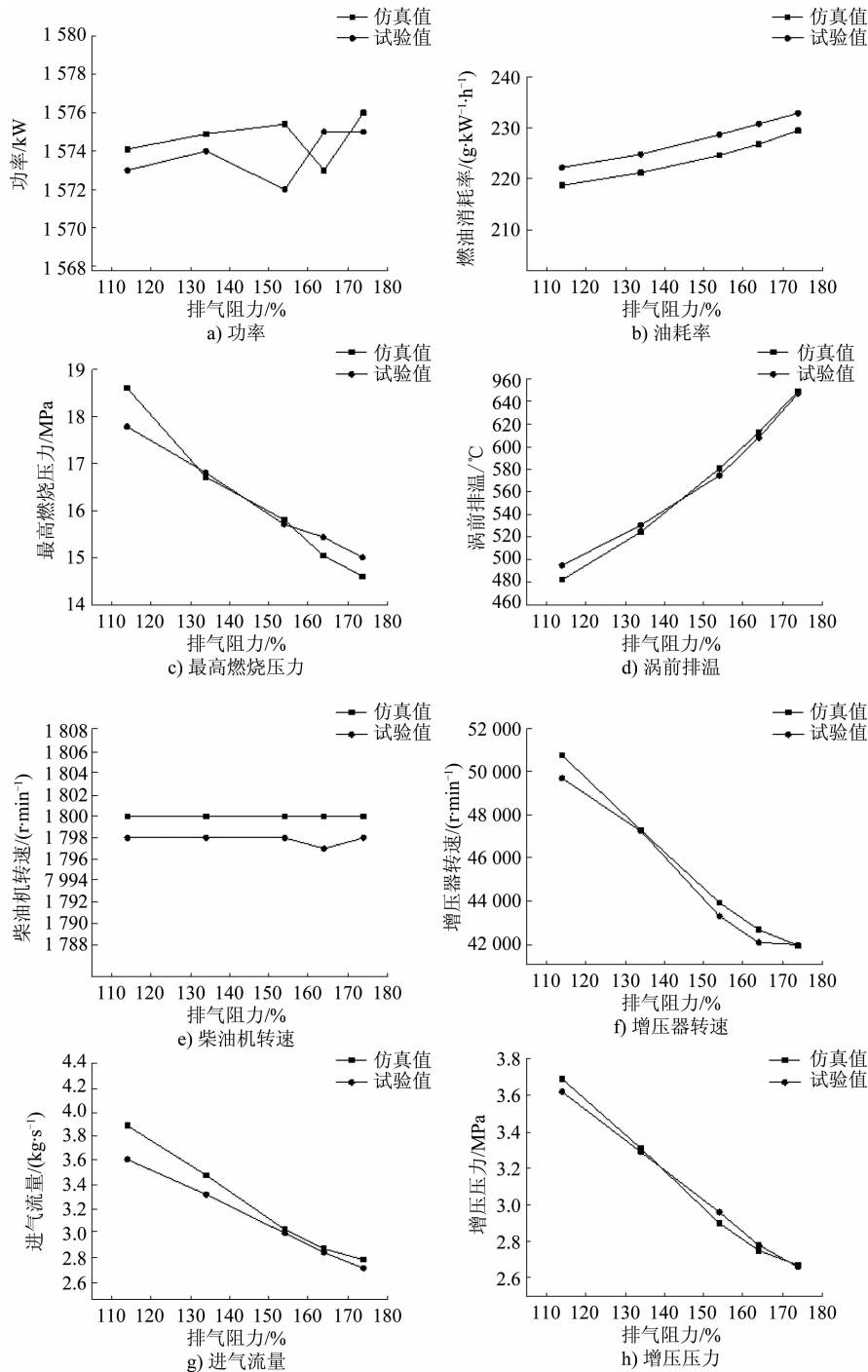
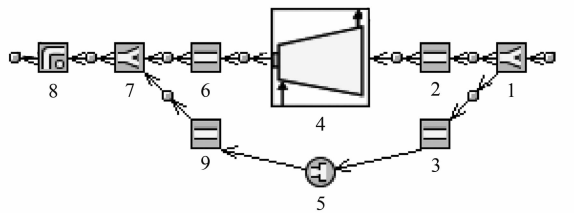


图3 柴油机标定过程试验和仿真结果对比



1、2、6、7、8-排气管道；3、9-旁通管道；4-涡轮；5-旁通阀
注：4和5组成废气旁通涡轮增压器。

图4 废气旁通可调增压系统仿真模型

根据功率提升后该特种柴油机的机械负荷和热负荷须与原机型相当的原则：最高燃烧压力不能超过 18 MPa、涡前排温不能超过 650 ℃。可以发现：该柴油机在高排气阻力时可以满足功率提升的要求，而在低排气阻力时会出现最高燃烧压力超限的现象。因此，常规涡轮增压器不能在全工况满足柴油机功率提升的要求。在原增压器上匹配废气旁通阀，在低排气阻力时打开废气旁通阀，可减小最高燃烧压力。考虑到燃油经济性，选择燃油消耗率最

低点作为对应排气阻力下的最佳阀门开度。各排气阻力下对应的最佳旁通阀开度仿真计算结果如表1所示。

表1 各排气阻力下对应的最佳旁通阀开度

排气阻力/%	114	124	134	144	154	164	174	184
旁通阀开度 (孔口直径)/mm	25	20	16	8	4	0	0	0

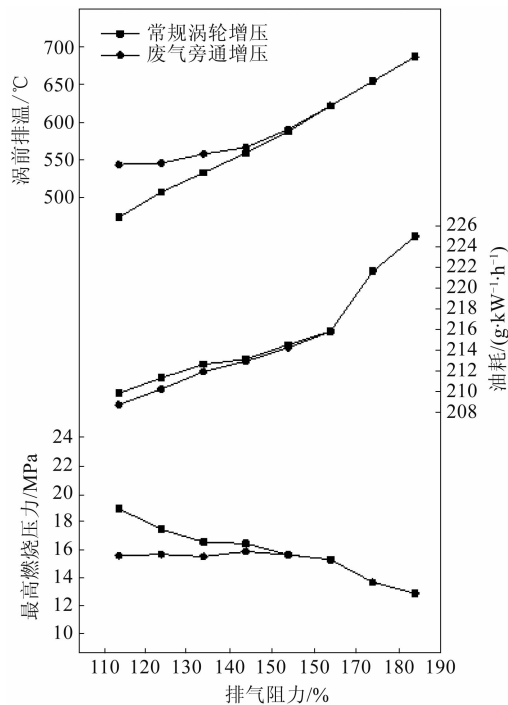


图5 各排气阻力下常规涡轮增压和废气旁通增压柴油机性能对比

该特种柴油机采用废气旁通涡轮增压系统和常规增压器,各排气阻力下的性能对比如图5所示。采用废气旁通阀后,随着排气阻力增大,油耗逐步增大,但增大幅度不大,且比常规增压方式时油耗略小,可见经济性有所提高。常规涡轮增压方式下最高燃烧压力随着排气阻力升高逐步降低,114%时高达18.6 MPa,超出了限制条件;而废气旁通涡轮增压方式由于旁通了部分废气,使低阻力区的最高燃烧压力远低于限制条件。这是因为部分废气从旁通阀流出,进入涡轮端的废气流量降低,限制了涡轮的输出功,从而降低了增压压力^[2],进气量减少。在高排气阻力区时,涡前排温成为限制因素。随着排气阻力的增大,涡前排温增长加剧。这是因为随着排气阻力的升高,柴油机进气困难,缸内燃烧恶化,扫气质量下降,导致涡前排温上升速度加快。在164%、

174%、184%排气阻力时,废气旁通增压和常规涡轮增压方式柴油机的性能参数一致。这是由于高排气阻力时进、排气困难,增压器转速降低,旁通阀关闭,废气全部流经涡轮,所以废气旁通增压和常规涡轮增压状态是一致的。

此外,两种增压方式下的压气机性能对比如图6所示。从压气机的Map图可以看出:废气旁通增压方式下柴油机在各工况都处于高效运行区域,低阻力时柴油机转速降低,压气机效率提高,明显改善柴油机的性能。

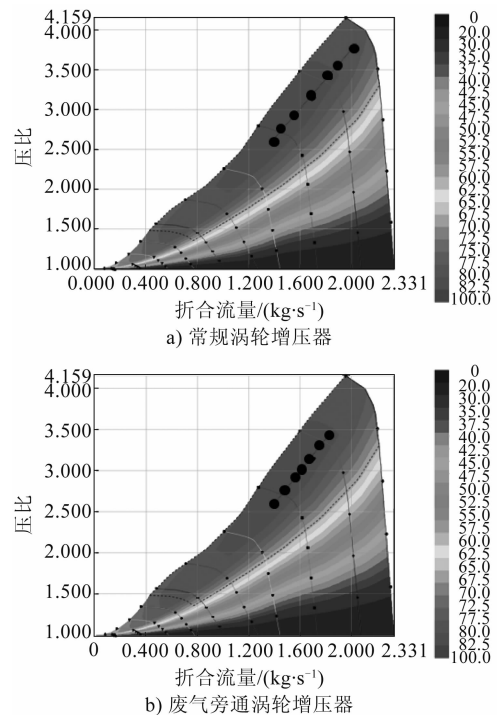
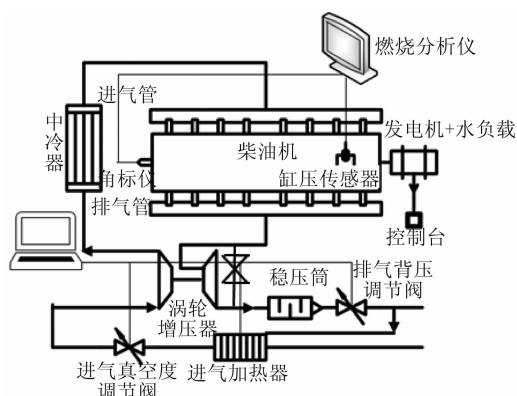


图6 两种增压方式压气机性能对比

3 试验验证

试验系统如图7所示。为了模拟该柴油机实际的工作环境,在进气真空度调节阀前安装进气加热器,将柴油机废气导入进气加热器,通过控制废气导入口的阀门来控制进气温度,并通过集控台计算机控制进气真空度调节阀、排气调节阀、旁通阀开度,并对进气加热器进行调节。为了调节柴油机负荷,发电机连接水负载;此外,为了监测和采集柴油机运行时的各项性能参数,在柴油机相应部位安装缸压传感器、中冷器前后温度传感器和压力传感器、涡轮前后温度传感器和压力传感器、进气流量计、进气温度传感器、燃烧分析仪等。

图7 柴油机试验台位系统图^[3]

3.1 稳态试验验证

根据仿真得到的旁通阀开度，在柴油机不同排气阻力下进行稳态试验。通过改变柴油机喷油量将功率维持在110%左右，试验结果和仿真结果对比如图8所示。在124%排气阻力时功率误差最大，为1.4%；在114%排气阻力时误差最小，为0.4%。当功率提升10%时，实际燃油消耗率与仿真结果趋势一致，随着排气阻力增大，燃油消耗率上升；174%排气阻力时误差最大，为1.5%。涡轮前排温的仿真值略小于试验值，155%排气阻力时最大误差为3.5%。最高燃烧压力在排气阻力为174%时最大误差为4.8%；随着排气阻力降低，最高燃烧压力没有明显的增长趋势，这是因为随着排气阻力增大，废气旁通阀开度加大，流经涡轮的废气量减少，增压器转速降低，增压压力降低，使得进入气缸的空气流量降低，充量系数减小，燃烧相对恶化，缸内压力下降。

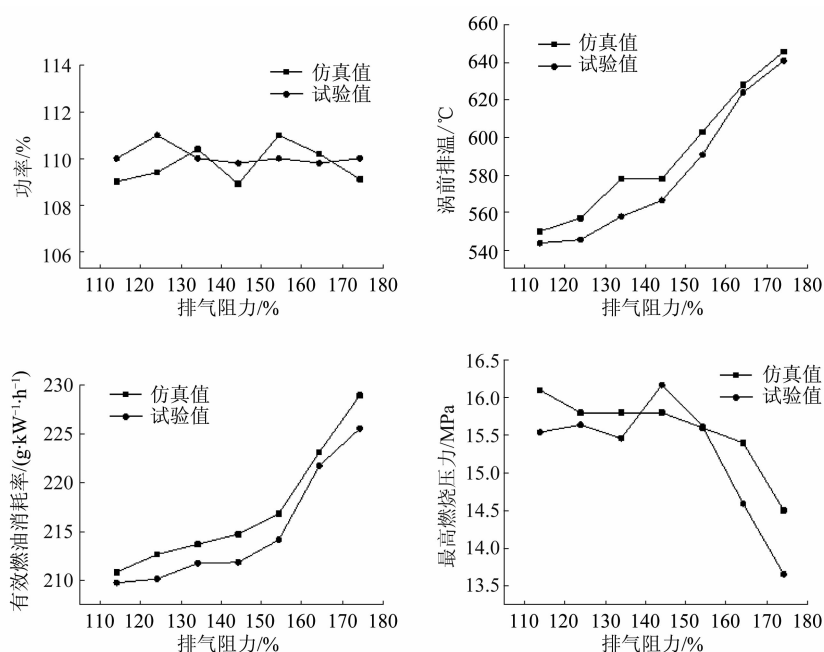


图8 柴油机稳态试验结果和仿真结果对比

从图8中可见：试验值和仿真值的误差均在5%以内。表明：所建立的废气旁通增压柴油机模型能够真实地反映实际增压器和柴油机的匹配情况。同时表明：该特种柴油机缸内排温和最高燃烧压力均没有超过限制值，满足柴油机安全运行的要求。

3.2 瞬态试验验证

该特种柴油机在实际工作时，由于工作环境变化，其排气阻力处于波动状态，不是一个固定值。为了模拟排气阻力波动对柴油机性能的影响，建立瞬态仿真模型，并将模型中的排气环境模块中的压力模块设置为正弦波动曲线：排气阻力前10s为稳定值，为134%排气阻力或者164%排气阻力，从第10s开始按周期为30s、振幅为20kPa的正弦曲线波动。

在排气阻力波动时，旁通阀开度选择有两种方案：一种是固定开度，另一种是旁通阀开度随着排气阻力波动。在满足柴油机机械负荷和热负荷要求的前提下，固定旁通阀开度是在根据稳态试验结果标定的旁通阀开度MAP图中选择一个最佳开度值，使柴油机满足功率提升10%的前提下燃油经济性最佳。而旁通阀随动则是根据稳态结果标定的增压压力Map图，通过监测和控制实际增压压力实时调整旁通阀开度。由于旁通阀固定开度具有提高装置可靠性，延长旁通阀寿命的优点，本试验采用固定开度的方案。根据使用要求，柴油机转速波动率须控制在±0.3%以内。在瞬态波动情况下，为保持转速稳定，采用线性PID控制柴油机喷油量。在134%排气阻力时转速波动情况如图9所示，可以看出，未超过转速波动率限值。

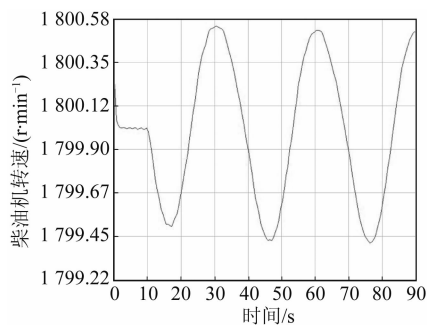


图9 转速波动情况

排气阻力波动时柴油机性能参数波动情况如图10、图11所示。可以看出：瞬态试验结果和仿真结果接近。随着排气阻力周期性波动，柴油机的涡前排温、最高燃烧压力以及有效燃油消耗率等性能参数也周期性地波动，波动周期以及形状与排气阻力波动曲线相似；在阻力波动过程中涡前排温和燃油消耗率都随着阻力增大而增大，最高燃烧压力随阻力增大而减小，这和稳态试验结果一致。在柴油机刚启动时，其性能参数迅速向稳定运转时的值靠近，之后在该值附近小幅度波动。

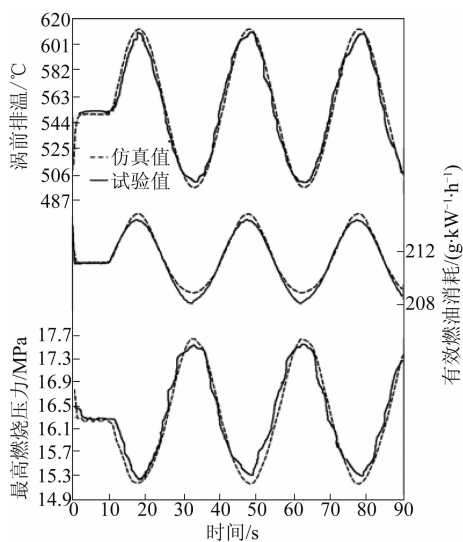


图10 134% ± 20%排气阻力下柴油机瞬态试验结果和仿真结果的对比

对比图10、图11可以看出：瞬态30 s周期中最高燃烧压力波峰值为17.43 MPa，跟稳态结果（114%排气阻力，最高燃烧压力17.6 MPa）非常接近；而瞬态涡前排温峰值为611.7℃，与之对应的154%涡前排温稳态试验结果为620℃，瞬态结果远小于稳态值。这是因为温度传递存在迟滞效应，排气阻力波动时排温更大程度靠近排气阻力稳定值对应的排温；而压力传递不存在迟滞效应，在整个波动过程中最高燃烧压力波峰、波谷值和与之对应的排气阻力下的最高燃烧压力稳定值相差不大。

从瞬态性能试验结果来看：功率达到目标值，排气阻力在134%附近波动时，所有波动周期的最高燃烧压力均未超过18.0 MPa的限制值；排气阻力在164%附近波动时，柴油机的涡前排温也未超过650℃的限制值，所以该方案可行。

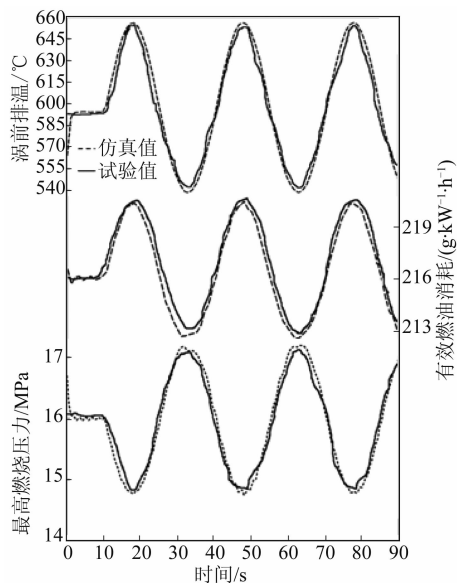


图11 164% ± 20%排气阻力下柴油机瞬态试验结果和仿真结果的对比

4 结论

本文采用一维仿真计算和试验验证相结合的方法，分析采用废气旁通可调增压系统后特种柴油机在不同工况下的性能，得出以下结论：

- (1) 要使该特种柴油机功率提升10%，且满足热负荷和机械负荷的限制条件，可采用废气旁通式增压系统，并匹配等效流通截面较小的涡轮。
- (2) 在排气阻力波动时，采用废气旁通阀固定开度的方案可满足转速波动精度要求。
- (3) 特殊环境下废气旁通阀打开可明显降低柴油机最高燃烧压力，在低排气阻力区废气旁通增压系统对柴油机性能参数有明显的改善效果。
- (4) 由于温度迟滞效应，背压波动对柴油机性能提升的影响远小于稳态时排气阻力过大带来的影响。

参考文献

- [1] 黄伟, 赵同宾, 李静芬, 等. 高排气阻力柴油机配气相位优化仿真及试验研究 [J]. 舰船科学技术, 2016 (S1): 127-133.
- [2] 柴智刚. 柴油机低温燃烧瞬态过程闭环控制研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [3] 黄伟, 李静芬, 朱奎, 等. 特殊阻力下高增压柴油机增压器匹配性能研究 [J]. 柴油机, 2016, 38 (2): 5-10.