

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

某船用柴油机相继增压瞬态切换过程仿真分析

IDAJ中国

中国船舶重工集团公司第七一一研究所

作者简介

- 毛金龙，博士，2011年6月毕业于北京理工大学车辆工程学院，目前在中国船舶重工集团公司第七一一研究所研发中心新技术部担任技术经理职务，主要负责船用发动机总体性能设计、燃烧系统设计、单缸机及整机性能试验开发等工作，拥有超过10年的发动机1D热力学及3D CFD仿真分析经验，参与了多型船用柴油机开发。



目 录

一、概述

二、柴油机1D热力学模型建模及标定

三、相继增压瞬态切换过程仿真分析

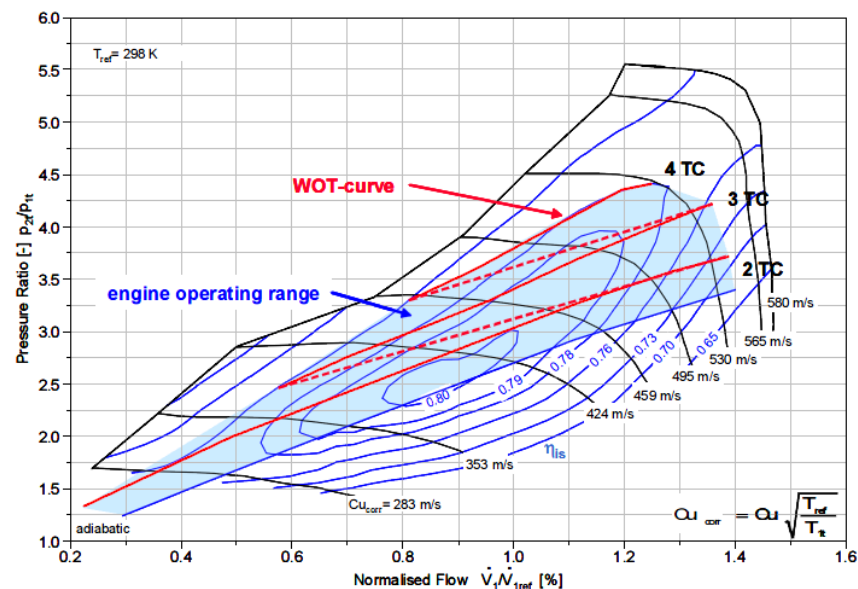
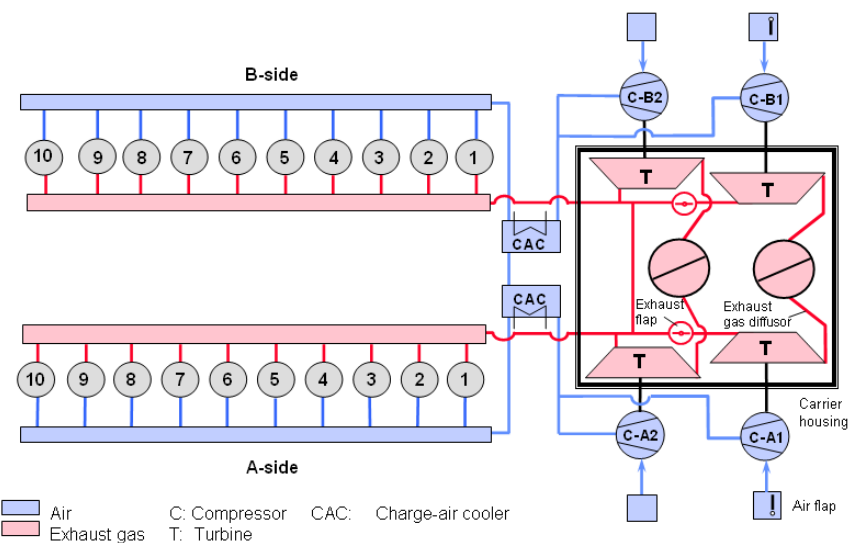
五、结论

1. 概述

- 大型船用柴油机作为船舶的主推装置时，由于柴油机的运行工况变化范围很大，难以实现在各种工况条件下涡轮增压器的良好匹配，特别是在**低负荷**，压气机和柴油机匹配点远离压气机的高效率区，**增压压力降低**、进气流量下降，造成**燃烧不良**、**碳烟排放升高**和**油耗增加**，长时间运行会造成**缸内积碳严重**，造成受热零部件**热负荷高**以及**拉缸**等问题。
- 为改善船用柴油机部分负荷的性能，经常用的措施有：**匹配小涡轮+高工况放气**、**低工况进排气旁通**、**可变涡轮喷嘴截面**（VGT）技术和**相继增压技术**等。
- 对于大型船用柴油机，一般采用多台增压器设计，为改善柴油机中低负荷的性能，国外的大型船用柴油如PA6B-STC、MAN28/33D、MTU396、MTU1163、MTU2000、MTU4000和MTU8000系列柴油机均采用相继增压控制技术。

1. 概述

- 相继增压系统是采用**多台涡轮增压器**，随着柴油机的转速和负荷的增加，相继增压控制系统根据柴油机运行工况的变化，自动控制空气阀和燃气阀的开闭，**在低负荷切断部分增压器运行，在高负荷使全部增压器投入运行**，在更大的负荷范围达到柴油机和增压器的最佳匹配，使柴油机在整个运行区域内都能够达到比较大的增压压力和增压器匹配效率，获得较好的经济性和排放性。
- MTU8000柴油机采用**4台相同的增压器**布置，包括**2台基本增压器**和**2台受控增压器**，通过**2组空气阀和燃气阀**的开闭控制基本增压器的切入和切出。如图 2所示，在低负荷，只有两台基本增压器工作；在中等负荷，3台增压器投入工作；在高负荷，4台增压器全部投入工作。



2. 研究内容

- 针对某采用相继增压控制技术的大型船用柴油机，为深入研究相继增压瞬态切换过程中各项性能参数的变化情况并改善相继增压切换过程的平稳性、稳定性，采用GT-power搭建柴油机瞬态计算模型，并考虑相继增压控制阀门的动态响应过程，对相继增压切入、切出过程（从1TC切换至2TC、从2TC切换至1TC）的瞬态性能进行模拟。

目 录

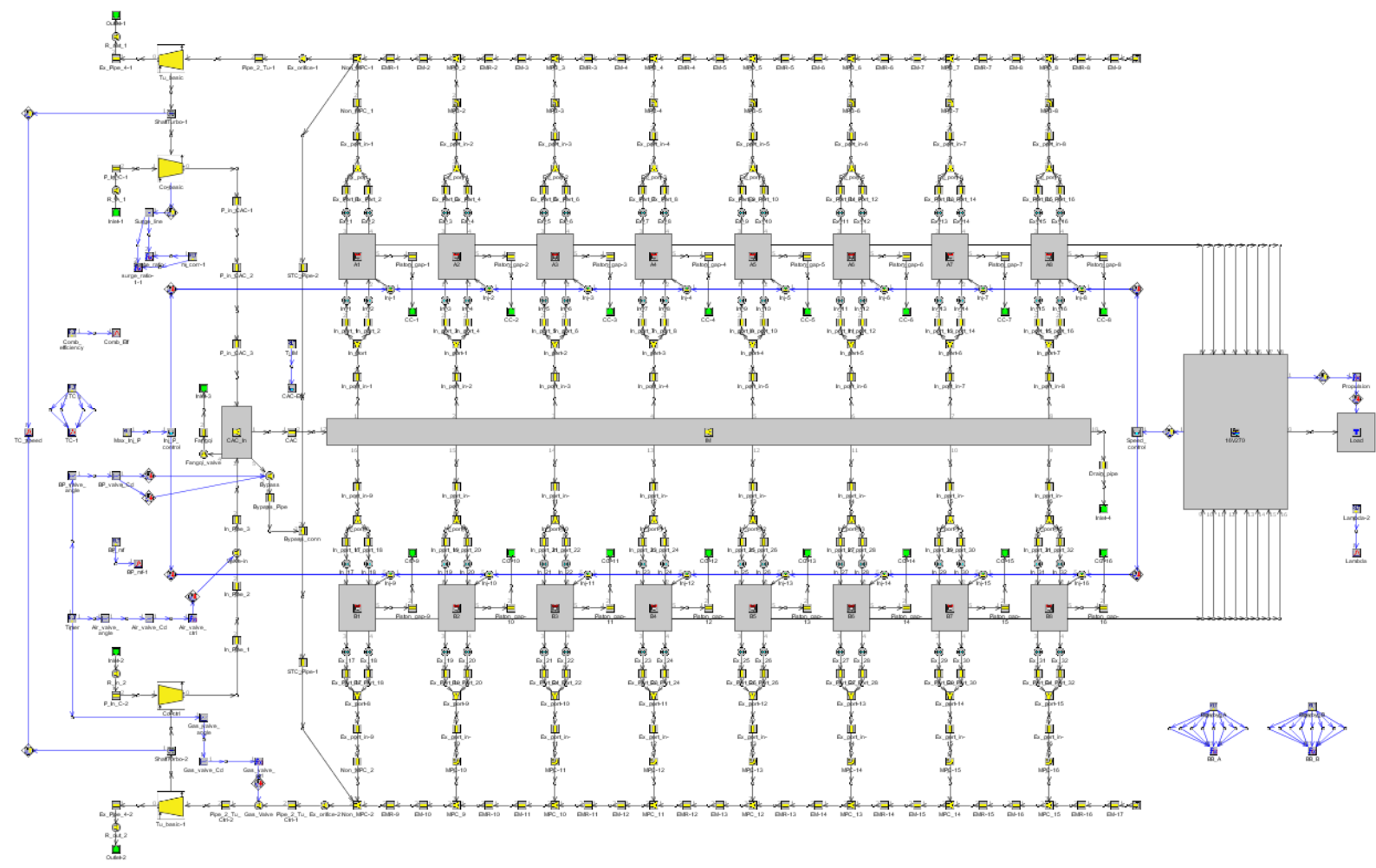
一、概述

二、柴油机1D热力学模型建模及标定

三、相继增压瞬态切换过程仿真分析

五、结论

1.柴油机1D热力学模型建模



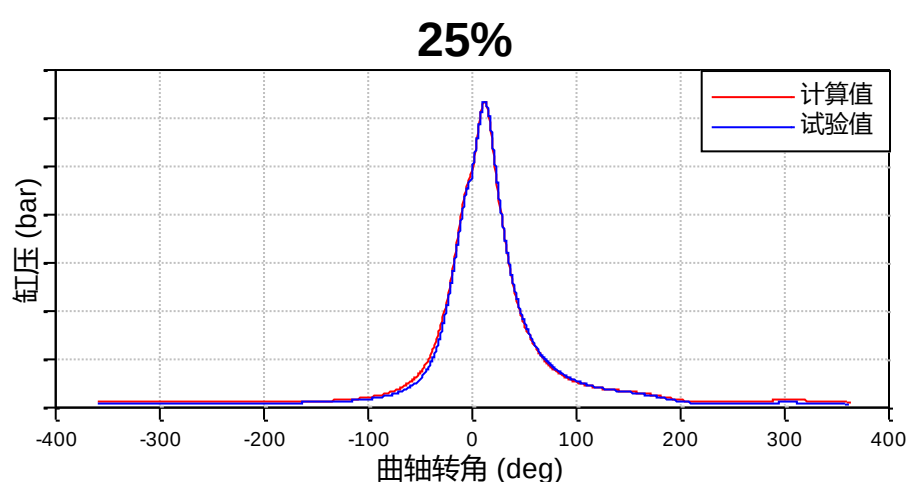
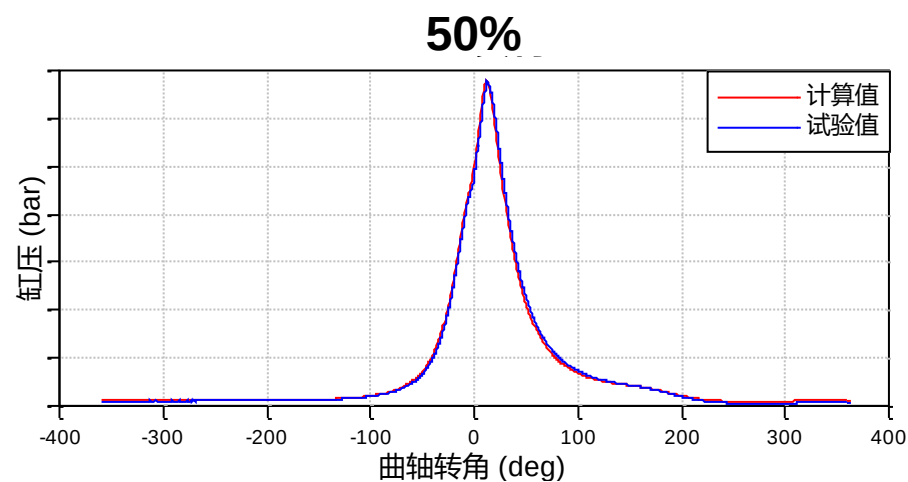
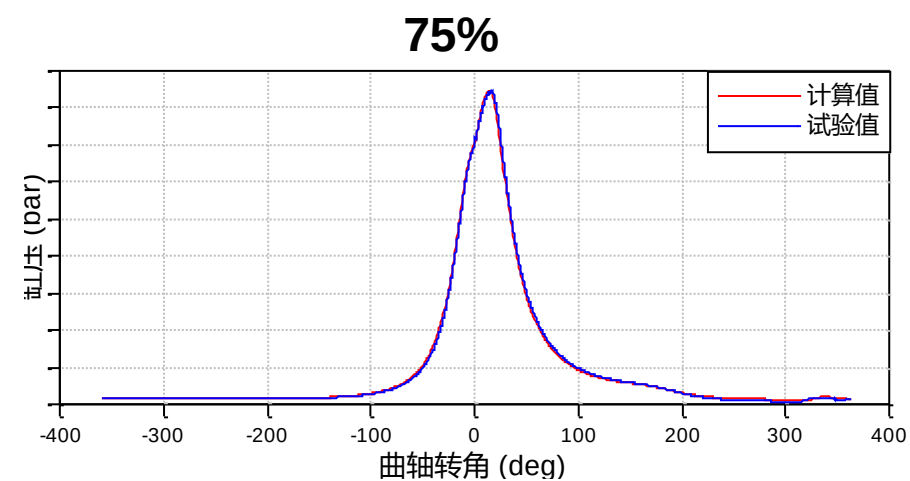
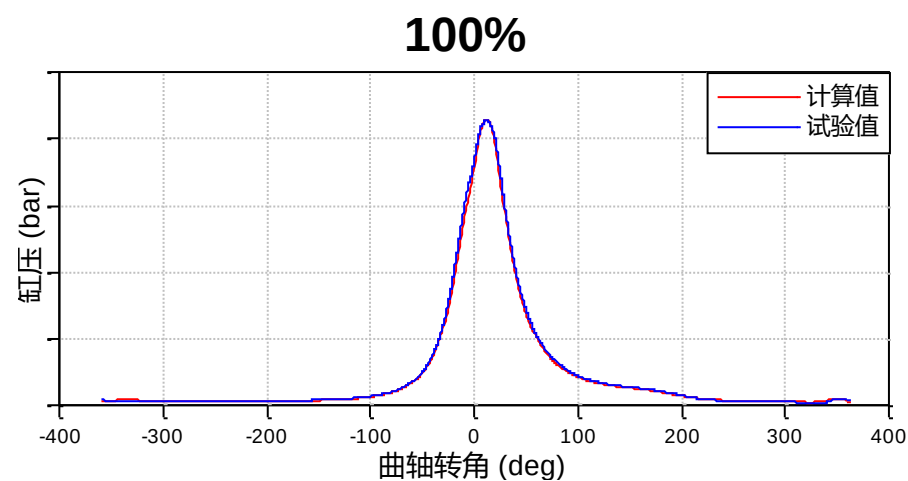
特征	说明
冲程数	四冲程
用途	船舶推进
燃油供给	高压共轨、直喷
增压系统	废气涡轮增压、中冷、相继增压
配气正时	米勒循环
排气系统	多脉冲排气管

2. 柴油机1D热力学模型标定说明

根据柴油机1D热力学模型及台架测试数据，对整机模型进行标定：

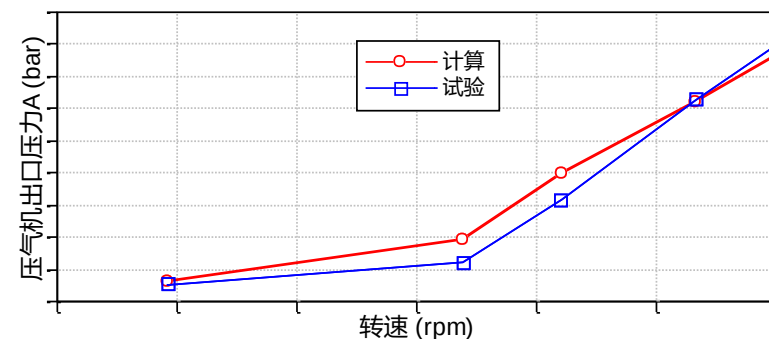
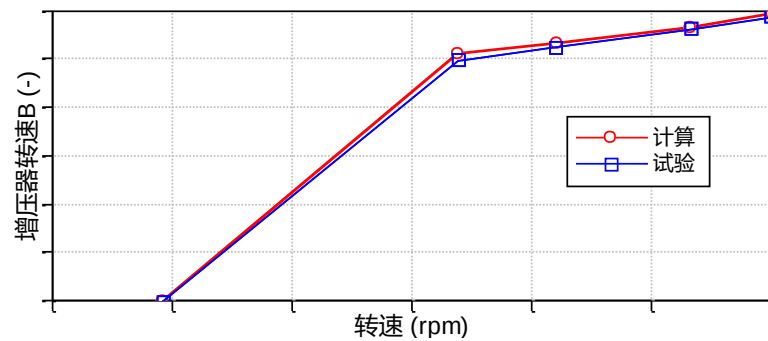
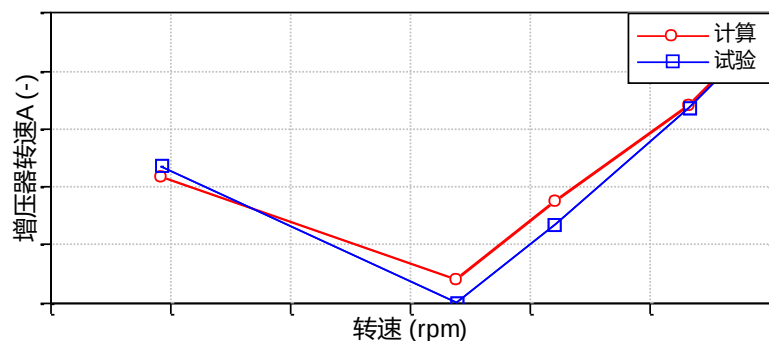
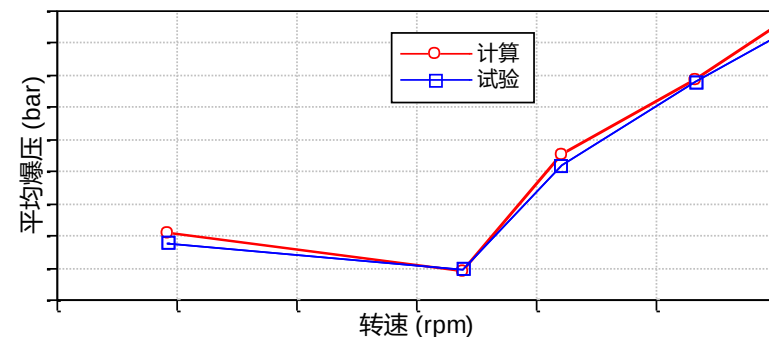
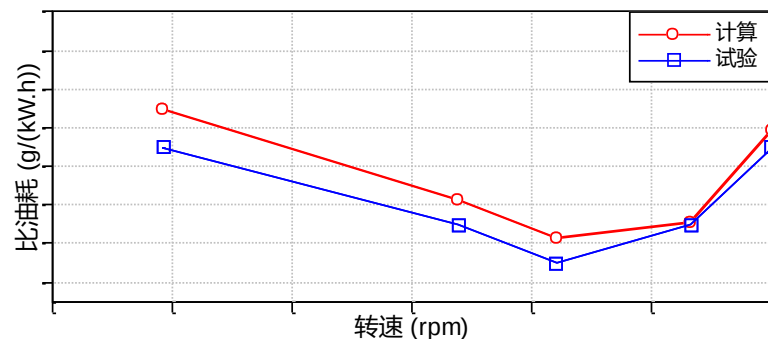
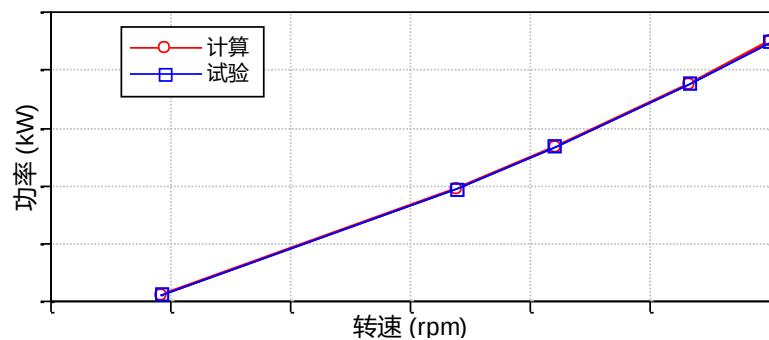
- 采用整机台架实测燃烧放热率曲线；
- 采用PID控制器微调着火时刻，使爆压与试验相等；
- 根据额定工况CAC出口温度和压损，标定中冷器的Heat transfer multiplier和Friction multiplier，其他工况采用相同的参数设置；
- 根据额定工况的压气机出口压力、温度、涡前压力等数据，标定压气机和涡轮机的Mass Flow multiplier，其他工况采用相同的数值；
- 根据额定工况的进气真空度和排气背压，标定进气压力调节阀和背压阀的流量系数，其他工况采用相同的数值。

3. 缸压曲线对比



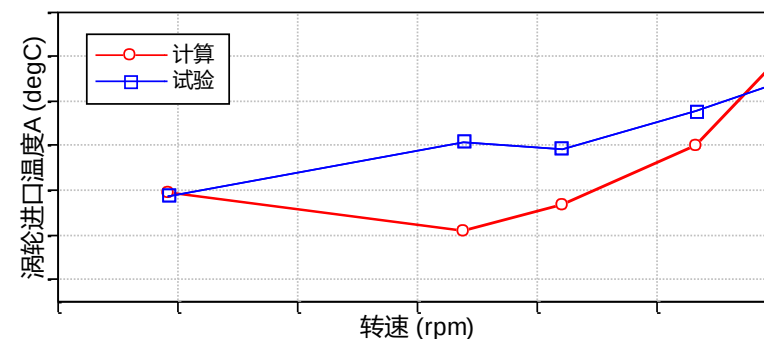
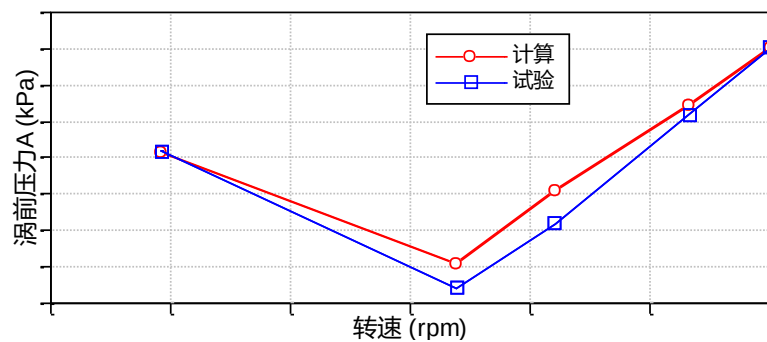
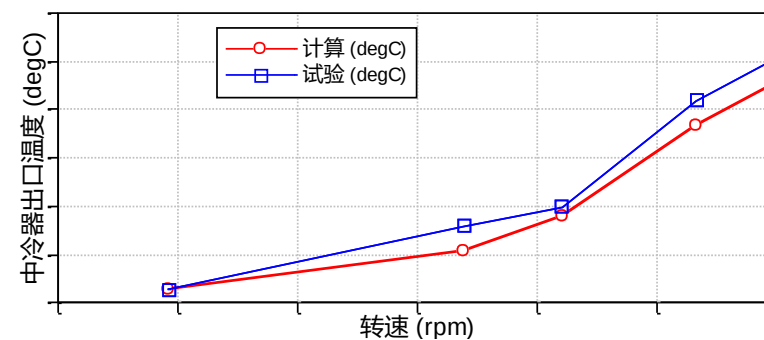
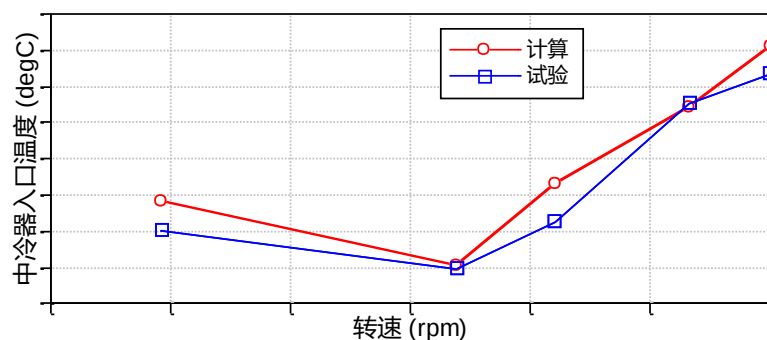
4. 柴油机1D模型标定结果（1）

- 柴油机1D热力学模型标定后的大部分整机性能预测结果和试验值的误差控制在3%以内。



4. 柴油机1D模型标定结果（2）

- 柴油机1D热力学模型标定后的大部分整机性能预测结果和试验值的误差控制在3%以内。



目 录

一、概述

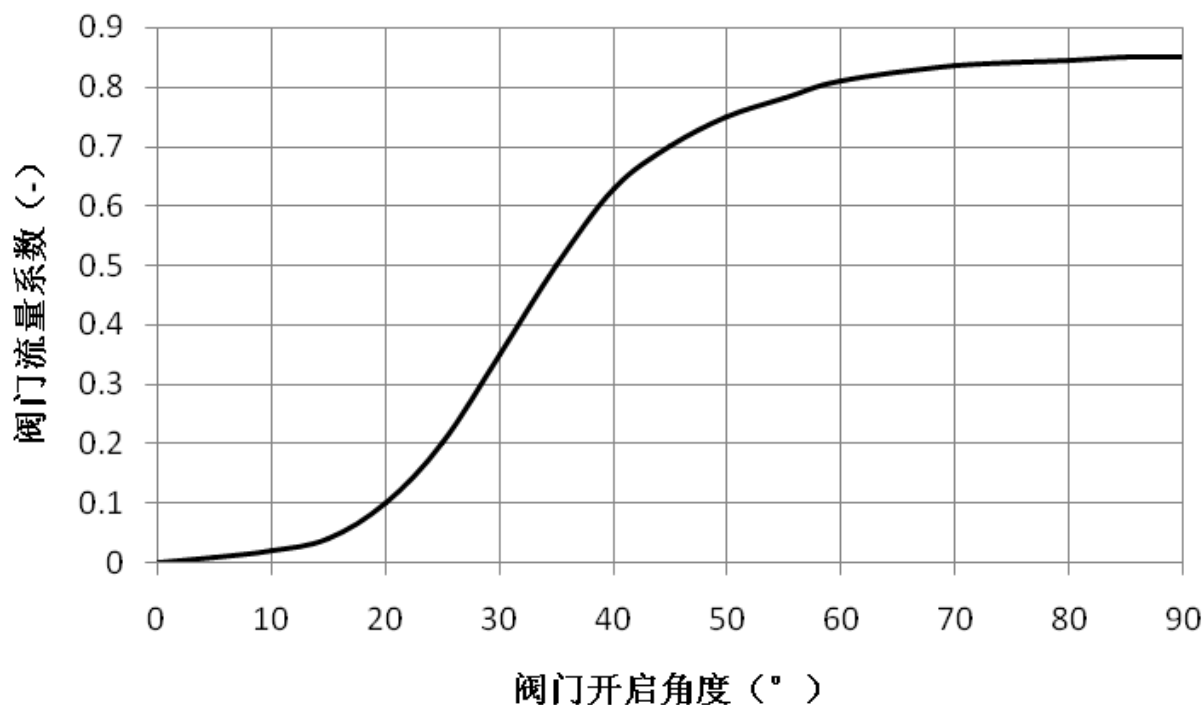
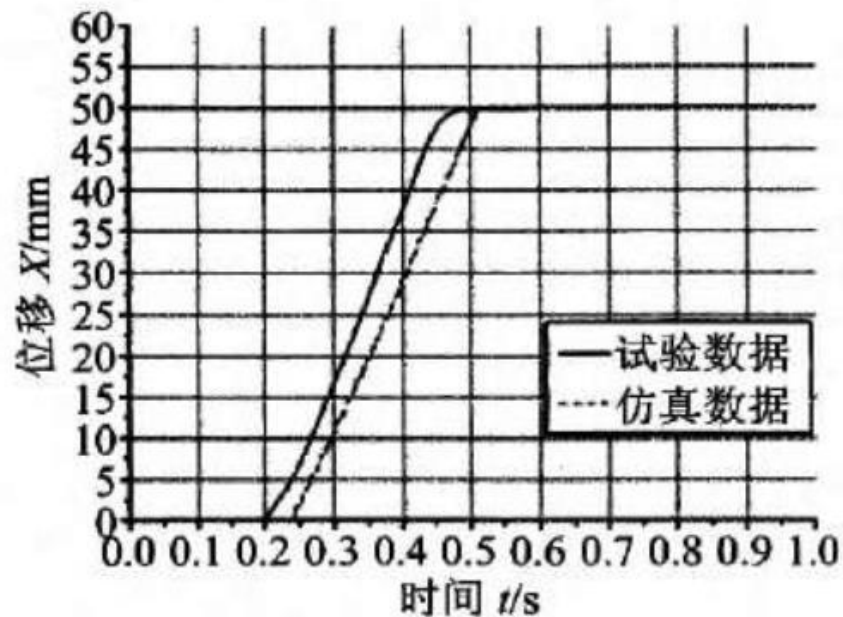
二、柴油机1D热力学模型建模及标定

三、相继增压瞬态切换过程仿真分析

五、结论

1. 瞬态计算模型说明——气动阀门动态特性设置

- 为了考虑空气阀、燃气阀的开启和关闭过程的动态特性影响，在模型中定义不同阀门开启角度对应的流量系数曲线。通过定义阀门开启（从 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ ）和关闭（从 $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ ）的时间，考虑阀门的动态特性对瞬态性能的影响。



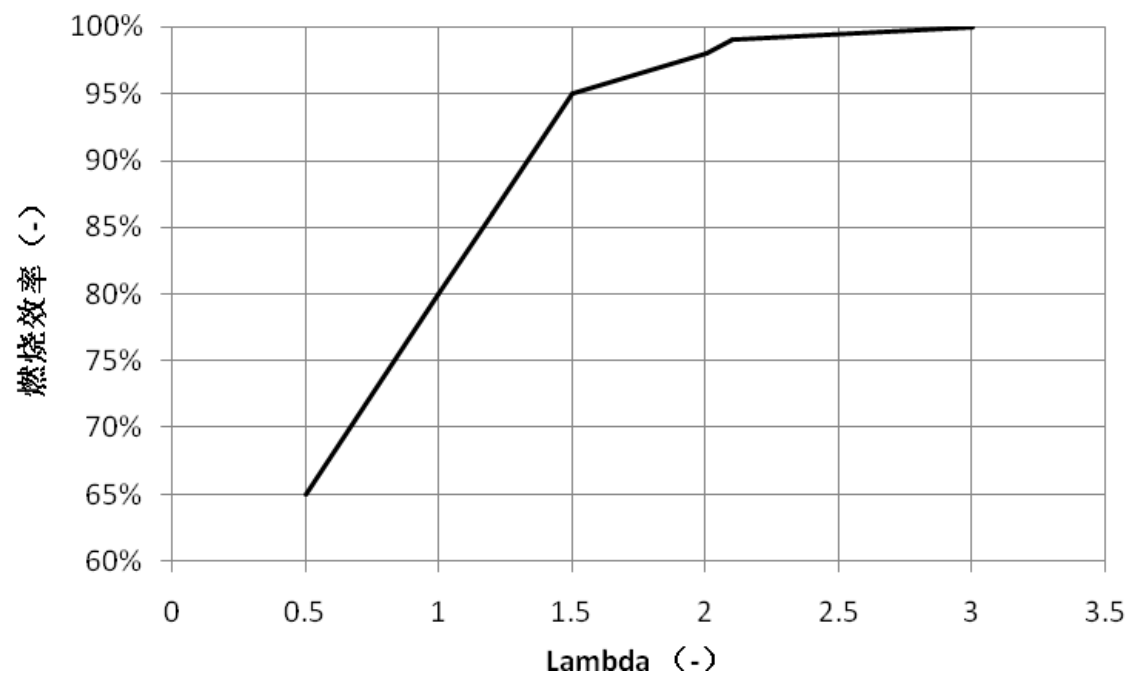
1. 瞬态计算模型说明——燃烧模型设置

- 根据整机台架稳态试验获得的不同转速、不同负荷燃烧放热率曲线，在1D热力学模型中将燃烧放热率模型定义为负荷率和转速与额定转速比的map图。

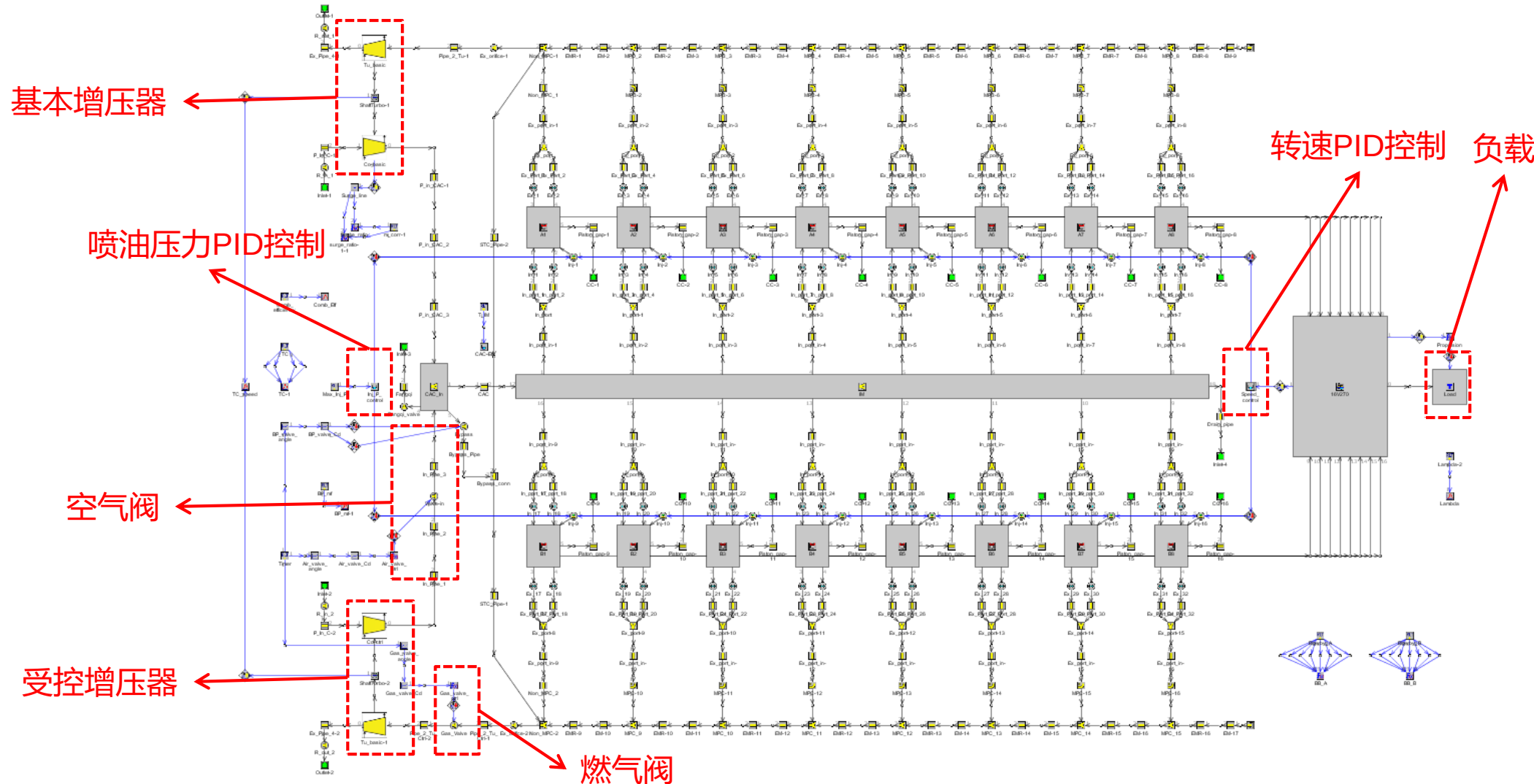
Z Data	Y Data ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
XD...		0.46 ...	0.53 ...	0.59 ...	0.63 ...	0.67 ...	0.74 ...	0.77 ...	0.79 ...	0.84 ...	0.89 ...	0.93 ...	0.97 ...	1 ...
1	0.42 ...	R1700-12 ...	R1700-16 ...	R1700-19 ...	R1700-23 ...	R1700-27 ...	R1700-38 ...	R1700-50 ...	R1700-58 ...	R1700-66 ...	R1700-74 ...	R1700-85 ...	R1700-92 ...	R1700-99 ...
2	0.62 ...	R2510-12 ...	R2510-16 ...	R2510-19 ...	R2510-23 ...	R2510-27 ...	R2510-38 ...	R2510-50 ...	R2510-58 ...	R2510-66 ...	R2510-74 ...	R2510-85 ...	R2510-92 ...	R2510-99 ...
3	0.81 ...	R3310-12 ...	R3310-16 ...	R3310-19 ...	R3310-23 ...	R3310-27 ...	R3310-38 ...	R3310-50 ...	R3310-58 ...	R3310-66 ...	R3310-74 ...	R3310-85 ...	R3310-92 ...	R3310-99 ...
4	0.89 ...	R3605-12 ...	R3605-16 ...	R3605-19 ...	R3605-23 ...	R3605-27 ...	R3605-38 ...	R3605-50 ...	R3605-58 ...	R3605-66 ...	R3605-74 ...	R3605-85 ...	R3605-92 ...	R3605-99 ...
5	1 ...	R4060-12 ...	R4060-16 ...	R4060-19 ...	R4060-23 ...	R4060-27 ...	R4060-38 ...	R4060-50 ...	R4060-58 ...	R4060-66 ...	R4060-74 ...	R4060-85 ...	R4060-92 ...	R4060-99 ...
6														
7														

1.瞬态计算模型说明——燃烧效率设置

- 柴油机在相继增压瞬态切换过程中，通过PID控制器控制转速，当转速跌落时，通过喷油加浓将转速拉升至目标转速。在此过程中，会造成瞬间过量空气系数较大幅下降、排气烟度增加，即燃烧效率降低。在柴油机1D热力学模型中，将燃烧效率定义为Lambda的曲线，考虑喷油加浓对瞬态性能的影响。

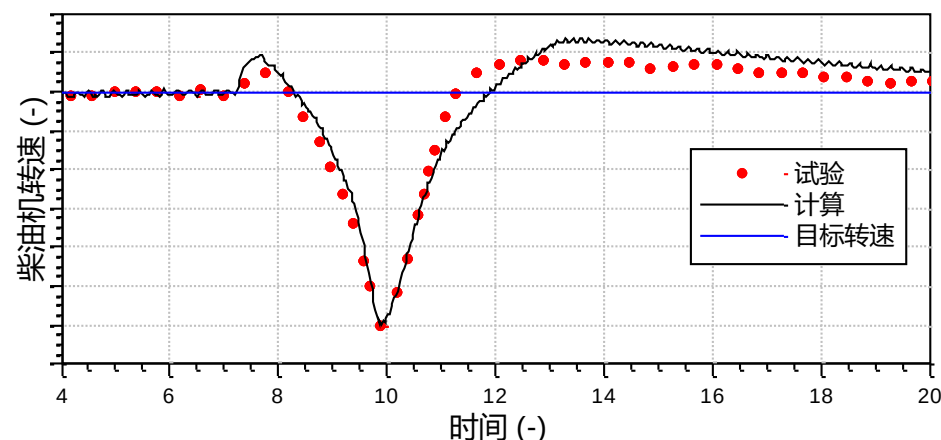


1.瞬态计算模型说明——1D计算模型设置



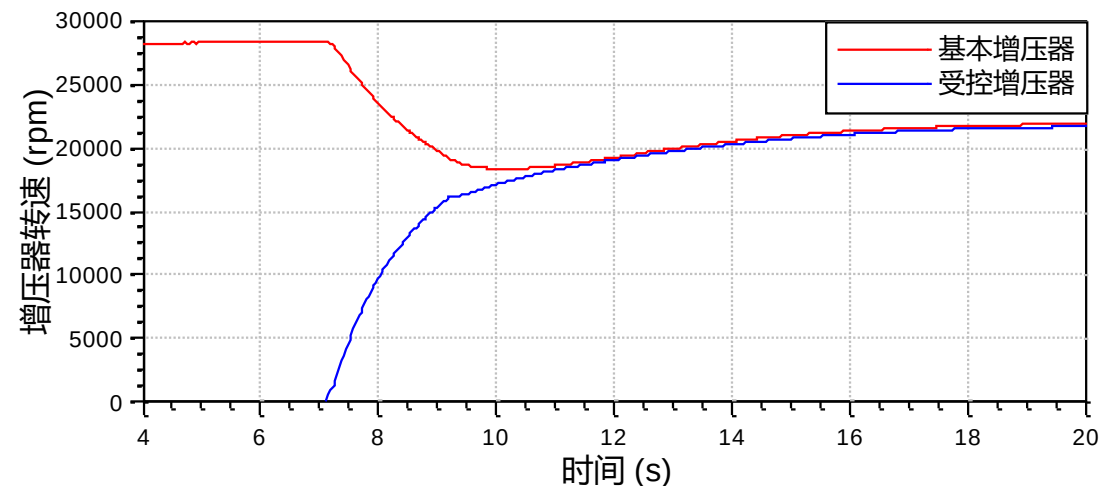
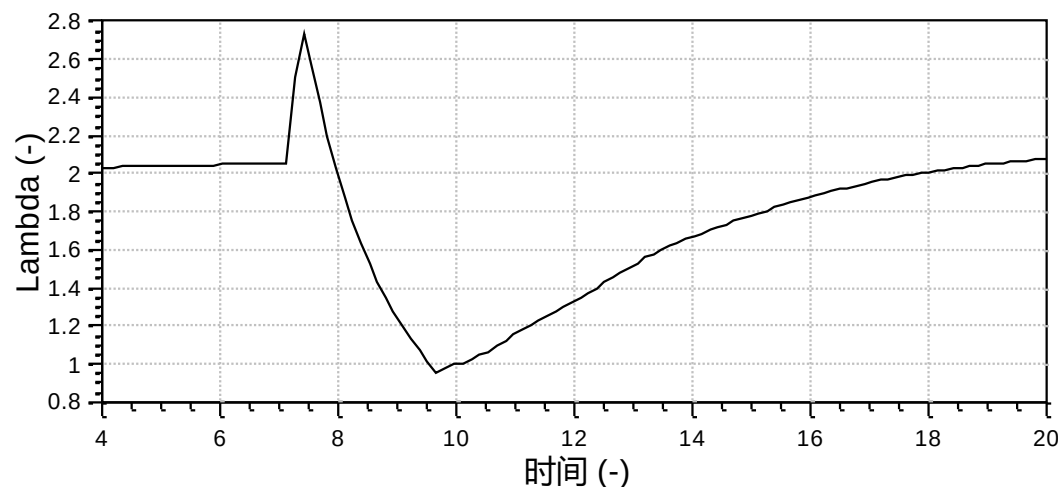
2.受控增压器切入过程仿真分析

- 受控增压器切入过程即柴油机从1TC运行模式切换至2TC运行模式，燃气阀和空气阀相继打开，受控增压器开始投入工作。
- 受控增压器切入过程中，当受控增压器的燃气阀突然打开时，排气管的压力迅速下降，柴油机缸内扫气得以改善，柴油机的有效效率变大，有效功率增加，导致柴油机的转速有一个小的窜升。随后，由于受控增压器燃气阀打开，废气能量被两台增压器共享，到达基本增压器涡轮的废气能量减少一半，使基本增压器的转速明显降低，基本增压器的增压压力也明显降低。虽然受控增压器的转子在燃气吹动下转速迅速上升，但由于空气阀尚未打开，受控增压器尚未投入工作，进入柴油机气缸内的空气流量明显下降，柴油机有效功率降低，从而使转速迅速下降。最后，随着受控增压器开始投入工作，转速控制使喷油量增加，柴油机的转速逐渐增加至目标值。



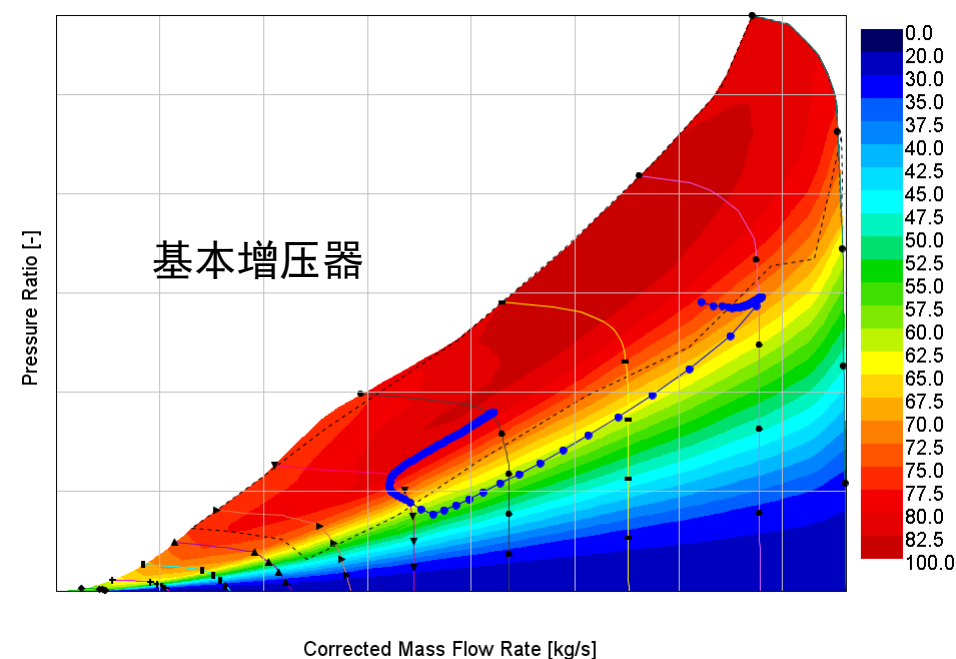
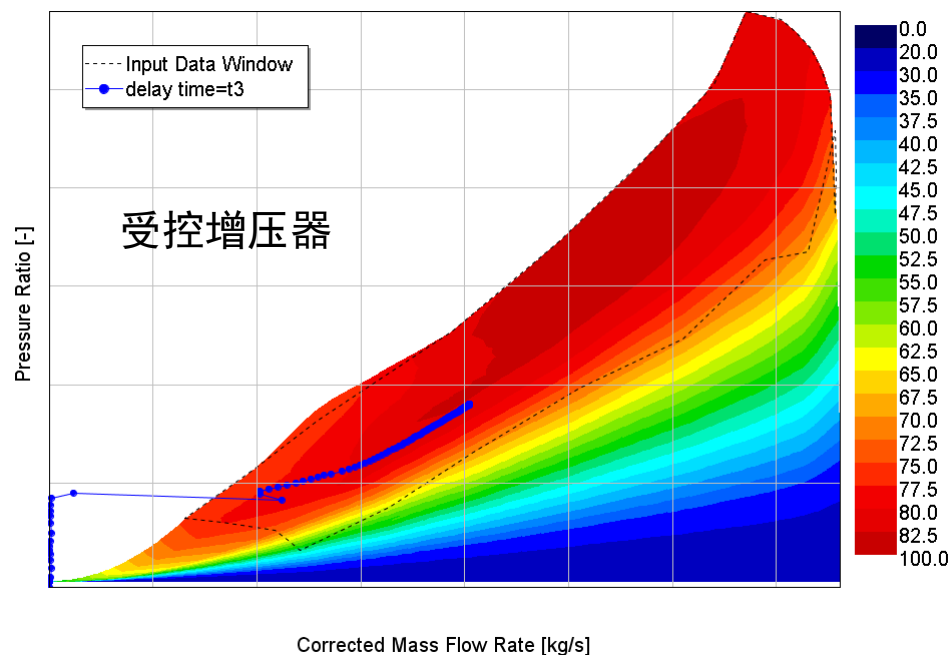
2.受控增压器切入过程仿真分析

- 相继增压器切换过程中，由于相继增压切换过程中Lambda大幅降低至1.0左右，燃烧效率下降，造成瞬时碳烟排放增加，试验过程中瞬态切换过程也出现冒黑烟现象。
- 相继增压器切换过程中，基本增压器和受控增压器的转速变化如图，当燃气阀打开之后，一半废气流入受控增压器涡轮入口，造成基本增压器转速不断下降然后再逐渐增加，受控增压器转速不断上升，直至两台增压器的转速达到平衡。



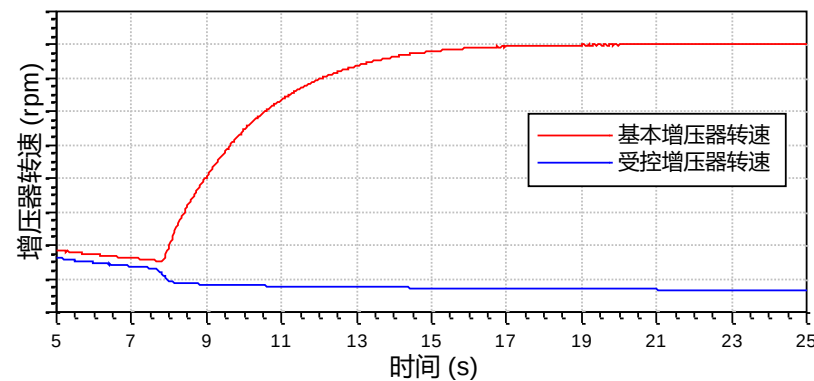
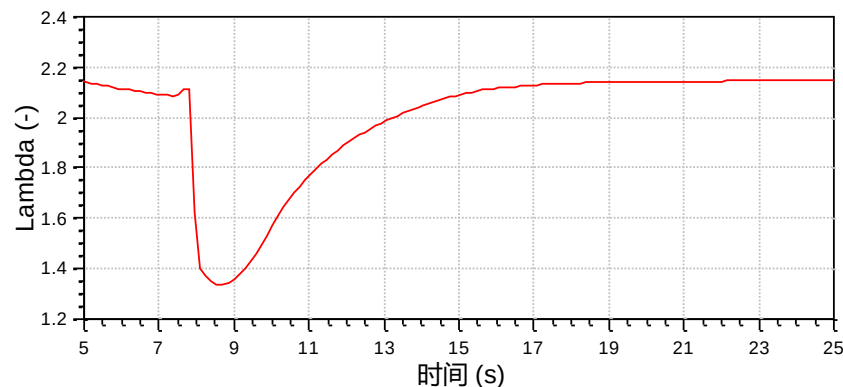
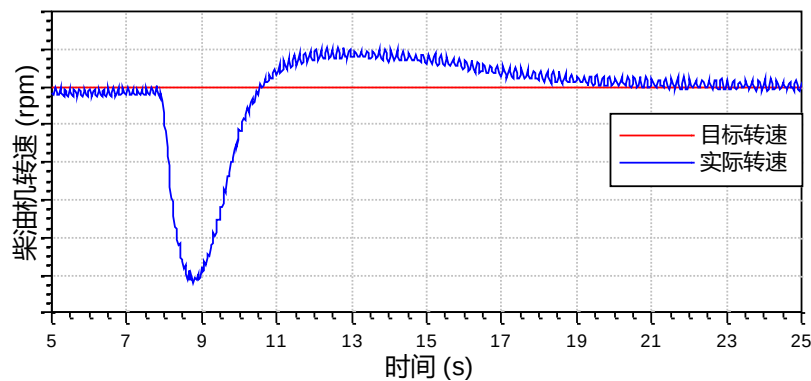
2.受控增压器切入过程仿真分析

- 相继增压器切换过程中，空气阀打开瞬间受控增压器匹配点处于喘振区，但立即进入压气机正常工作区，喘振风险很小，试验中也无喘振现象发生。
- 在相继增压器切换过程中，基本增压器的压气机的运行点一直处于有效工作区域内，无喘振、超速等风险。



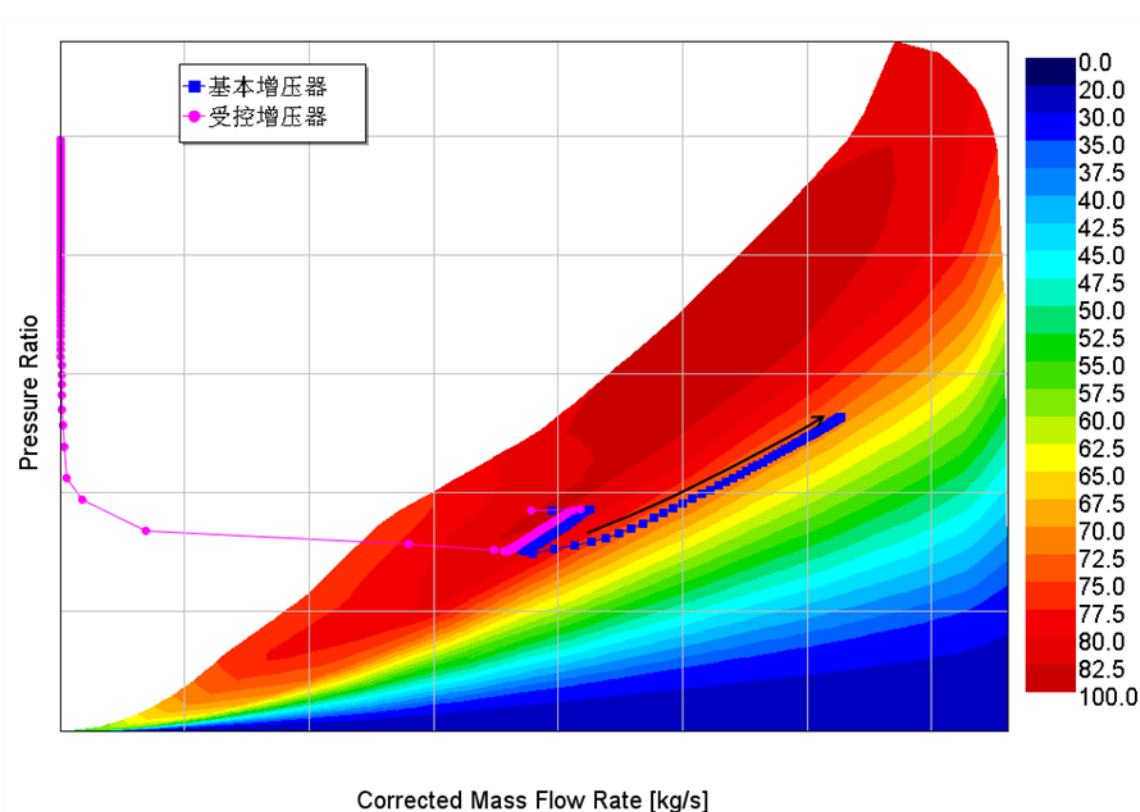
3.受控增压器切出过程仿真分析

- 受控增压器切出过程即柴油机从2TC运行模式切换至1TC运行模式，燃气阀和空气阀相继关闭，受控增压器停止工作。
- 受控增压器切出过程中，燃气阀和空气阀关闭后，瞬间进气流量降低50%左右，所有的废气均流入基本增压器涡轮入口，造成排气背压增加，扫气变差，柴油机的转速下降，Lambda降低。随着基本增压器转速增加，进气流量逐渐增加，Lambda增加，柴油机的转速缓慢增加至目标转速。受控增压器的转速在摩擦的作用下，缓慢减小到0。



3. 受控增压器切出过程仿真分析

- 受控增压器切出过程中，基本增压器的压力和流量逐渐增加，且没有喘振或超速现象发生。



目 录

一、概述

二、柴油机1D热力学模型建模及标定

三、相继增压瞬态切换过程仿真分析

五、结论

结论

- 通过GT-power软件搭建某船用柴油机瞬态计算模型，考虑控制阀门的动态特性，对相继增压器瞬态切换过程进行仿真分析，研究相继增压柴油机瞬态过程中主要参数的变化规律，与参考文献中的试验结果有基本相同的特征。
- 基于相继增压瞬态计算模型，可以进一步开展相继增压控制策略优化等工作。

感谢您的聆听！