

基于GT-Power进行某高增压柴油机发电机组动态调速特性影响参数分析

中船重工第七一一研究所

2016. 11

毛金龙 博士

目 录

- 七一一研究所简介
- 船用柴油机调速系统介绍
- 某船用柴油机1D计算模型介绍
- 瞬态调速特性影响参数分析
- 总结及讨论

七一一研究所简介



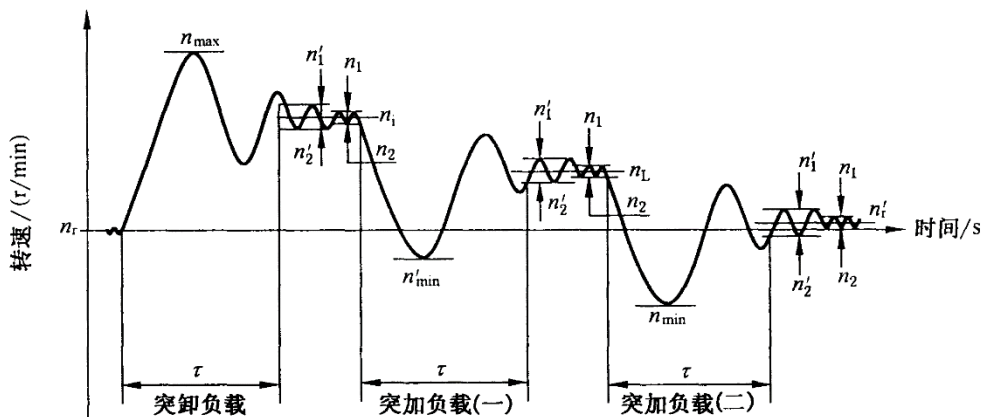
- 七一一所（SMDERI）创建于1963年，隶属于中国船舶重工集团公司，是中国唯一的国家级船用柴油机研发机构。
- 拥有船用柴油机、热气机、动力系统集成、船舶自动化、节能环保装备、能源服务等六大战略业务。
- 结合新型柴油机开发，成功应用了电控高压共轨、米勒循环、燃烧过程优化等新技术，目前已超越了IMO Tier II，并为实现Tier III 阶段排放积极探索。

目 录

- 七一一研究所简介
- 船用柴油机调速系统介绍
- 某船用柴油机1D计算模型介绍
- 瞬态调速特性影响参数分析
- 总结及讨论

船用柴油机调速系统介绍

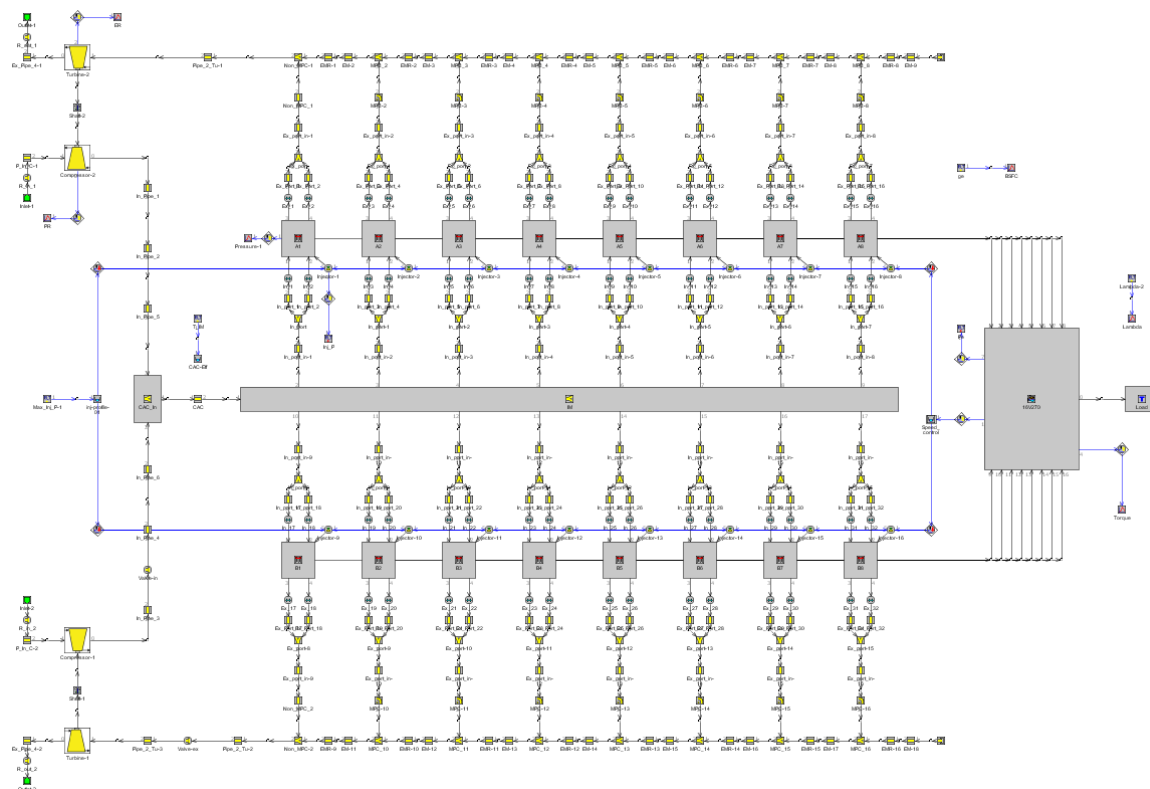
- 调速系统指由调速器和调节对象组成的系统。调速器包括位置控制式燃油喷射系统和时间控制式燃油喷射系统，调节对象包括柴油机及其负载装置。
- 瞬态调速率是柴油机于稳态调速率后，突卸或突加（一次或分段）额定负载后的最大或最小转速与负载变化前稳定转速的差对额定转速的百分比。
- 所研发的某柴油发电机组要求通过3次加载从空载加至全负荷，且加载过程中各级加载和突卸全负荷过程均满足2级电站调速精度要求，即瞬态调速率 $\leq 7\%$ ，转速稳定时间 $\leq 3s$ ，稳态转速波动率 $\leq 0.4\%$ 。



目 录

- 七一一研究所简介
- 船用柴油机调速系统介绍
- 某船用柴油机1D计算模型介绍
- 瞬态调速特性影响参数分析
- 总结及讨论

某船用柴油机1D计算模型介绍



型式	V16
用途	发电
冲程数	四冲程
燃油供给	高压共轨、直喷
增压系统	废气涡轮增压、中冷
配气	米勒正时
排气系统	模块化MPC排气系统

摩擦功模型定义

1D模型中采用Chen-Flynn预测柴油机整机的摩擦功：

$$FMEP = FMEP_{const} + A \cdot P_{max} + B \cdot c_m + C \cdot c_m^2$$

其中， $FMEP_{const}$ 为摩擦功的常数项；

P_{max} 为发动机的爆压；

A为爆压对摩擦功的影响因子；

c_m 为活塞的平均速度；

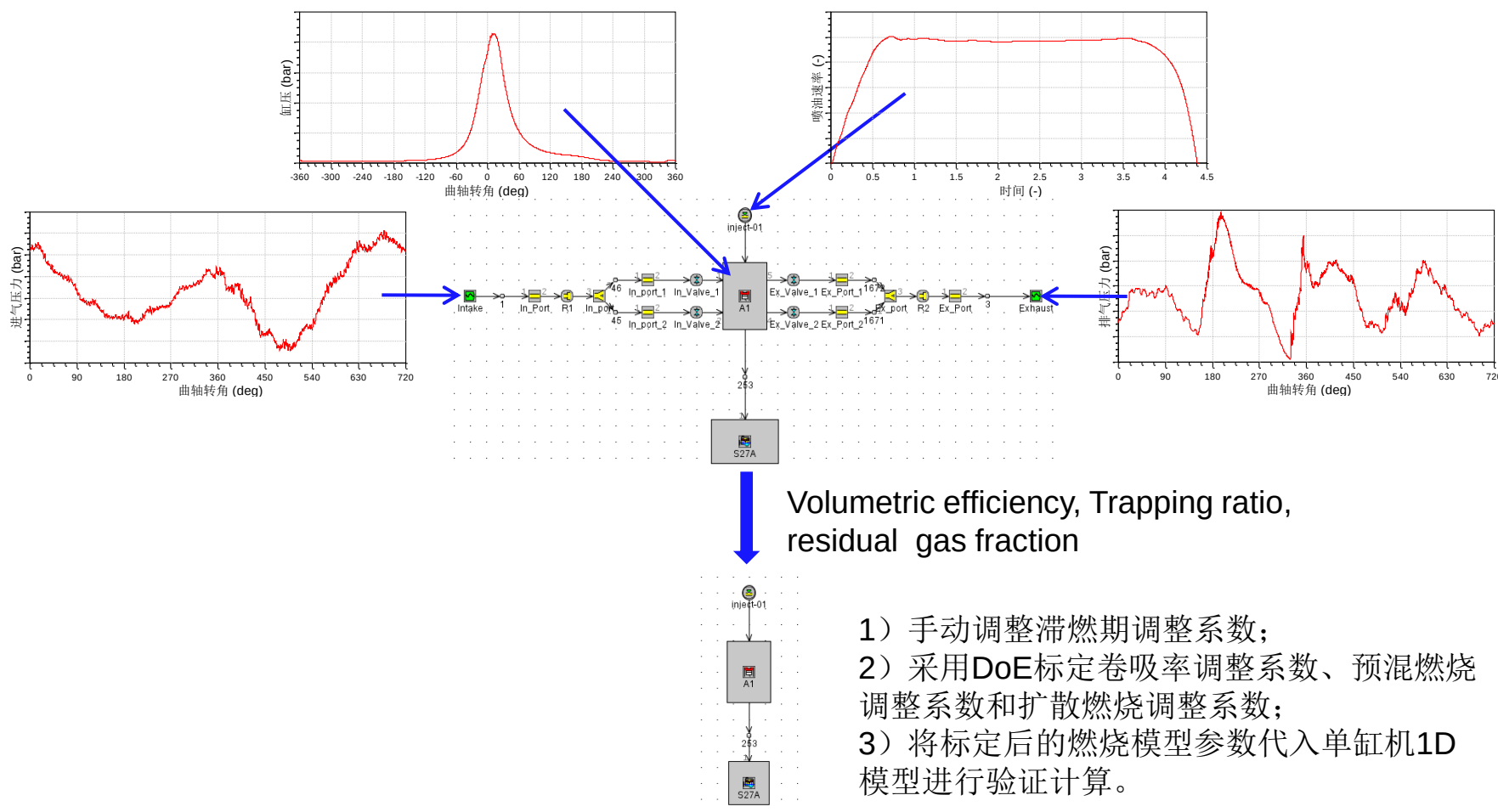
B为活塞平均速度对摩擦功的影响因子；

C为活塞平均速度平方对摩擦功的影响因子。

根据柴油机总体设计要求确定的整机机械效率以及采用油耗线法测定的单缸机摩擦功，确定式中摩擦功计算模型的主要参数。

准维燃烧模型标定

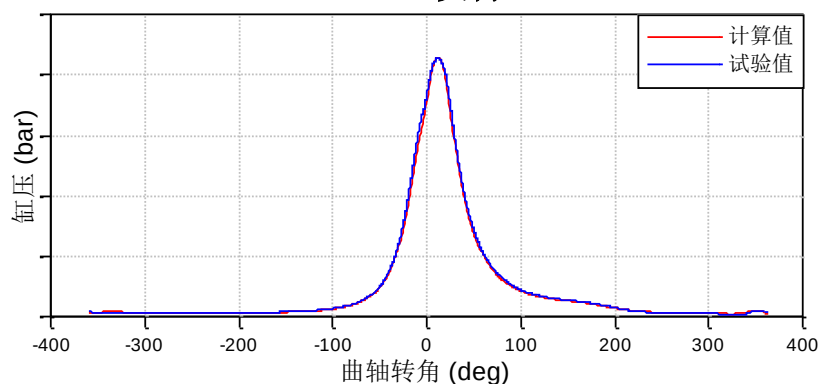
基于单缸机台架测试得到的110%、100%、75%、50%和25%负荷的进排气压力波、缸压曲线和放热率曲线数据，对单缸机模型中所采用的DI-Pulse准维燃烧模型进行标定。



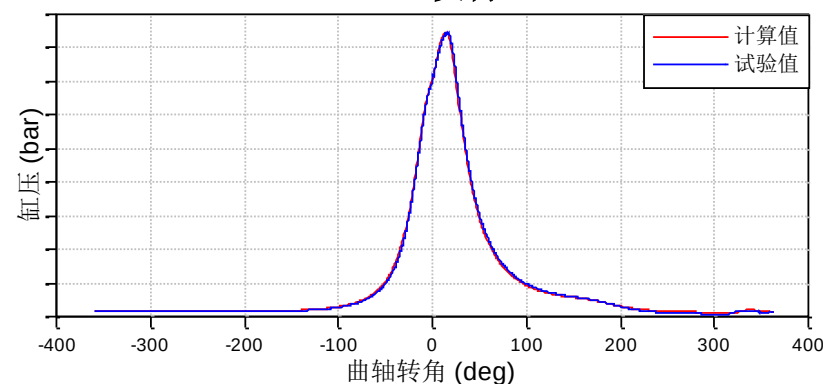
准维燃烧模型标定结果

单缸机1D热力学模型采用标定后的准维燃烧模型预测得到的缸压曲线和试验缸压曲线能够较好的吻合，在柴油机整机模型中直接采用该标定好的的准维燃烧模型。

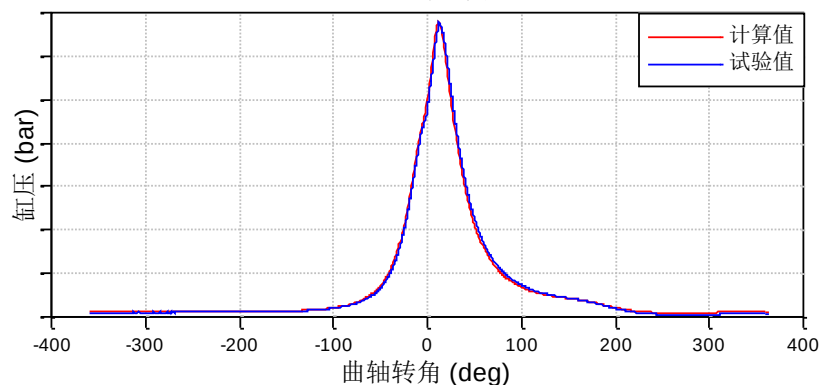
100%负荷



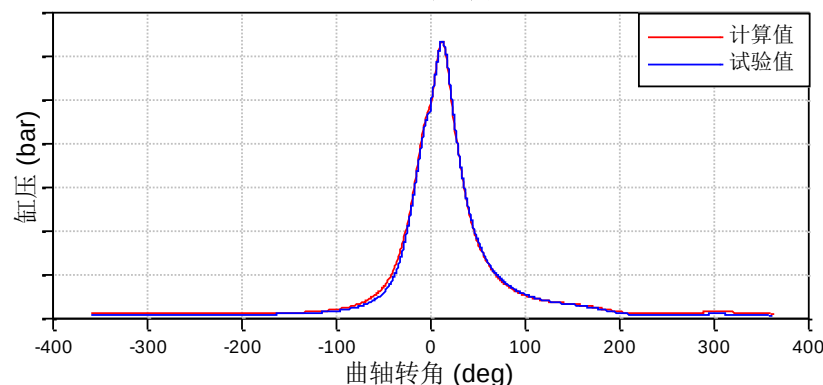
75%负荷



50%负荷



25%负荷



瞬态调速计算模型设置

进行发动机瞬态特性计算前，先根据发动机稳态计算模型搭建发动机瞬态计算模型。首先将Engine单元从Speed控制模式修改为Load控制模式，然后设置柴油发电机组总的转动惯量，在模型中增加Torque单元，设置每一级加载所需达到的负载扭矩。

柴油机控制系统调速控制单元采用PID控制器控制目标转速，在1D热力学模型中，采用PID控制单元，根据发动机实时转速和目标转速的差值计算各缸的实时循环喷油量。

$$m_{fuel} = K_p \cdot e_i + K_i \int_0^t e_i \cdot d\tau + K_d \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t}$$

$$e_i = n_{GV} - n_{SVi}$$

其中， K_p ， K_i 和 K_d 分别为PID控制器的比例系数、积分时间常数和微分时间常数；

n_{GV} 为发动机目标转速；

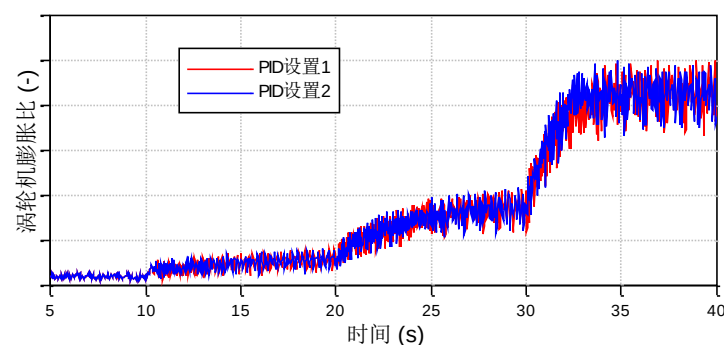
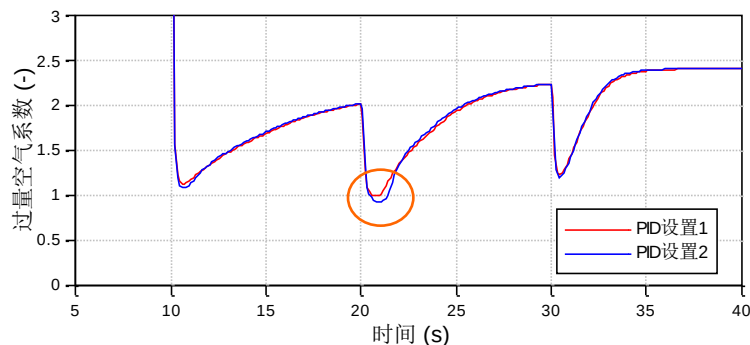
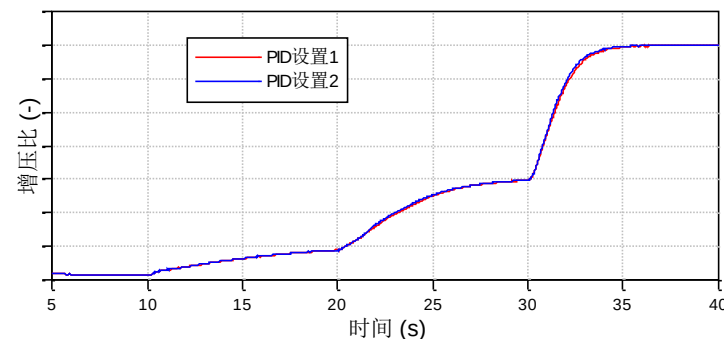
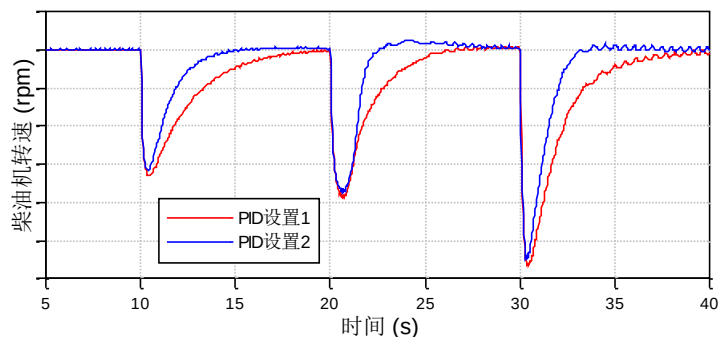
n_{SV} 为发动机实时转速。

目 录

- 七一一研究所简介
- 船用柴油机调速系统介绍
- 某船用柴油机1D计算模型介绍
- 瞬态调速特性影响参数分析
- 总结及讨论

1.调速控制模块PID参数影响分析

PID参数对加载过程中的增压器增压比和膨胀比影响较小，采用第2组PID参数设置，系统的瞬态响应速度较快，喷油量响应速率较快，造成第二级加载过程中短时间内过量空气系数小于1，冒黑烟现象会更严重。

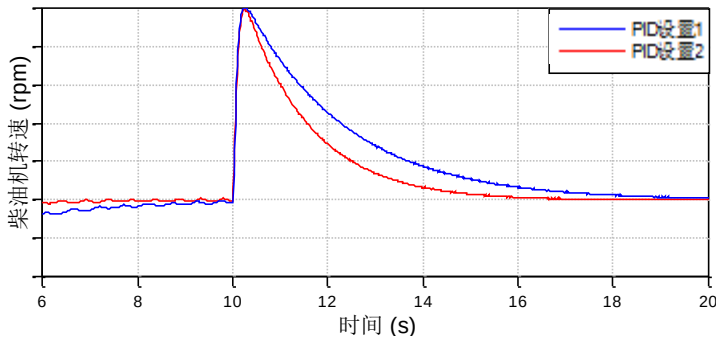


1.调速控制模块PID参数影响分析

从调速特性参数可以看出，PID参数设置对突加负荷时柴油机的瞬态调速率及转速稳定时间有较大的影响。

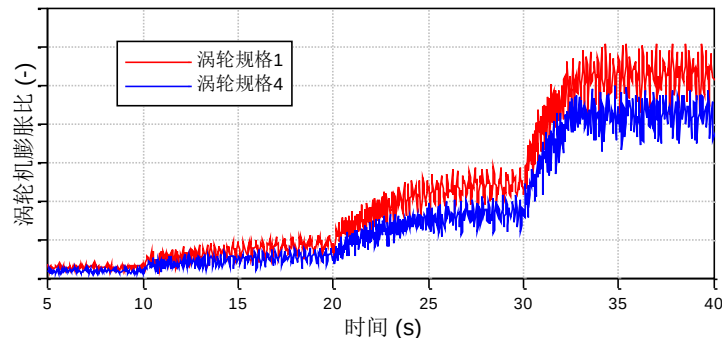
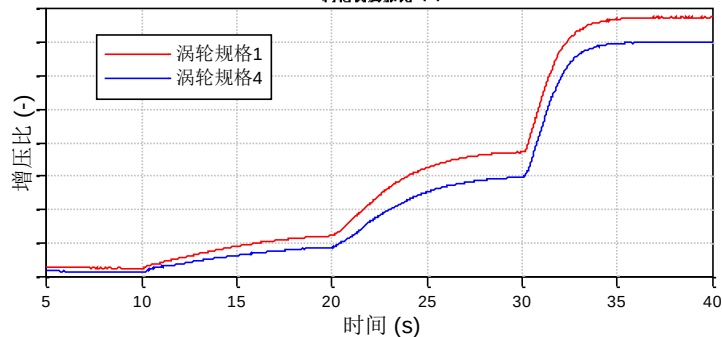
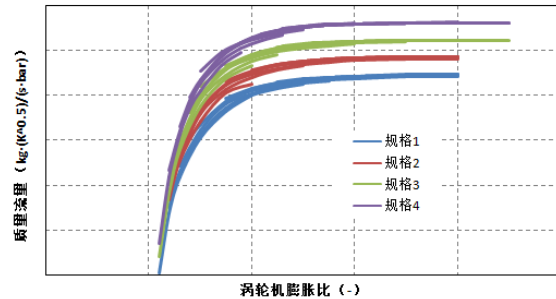
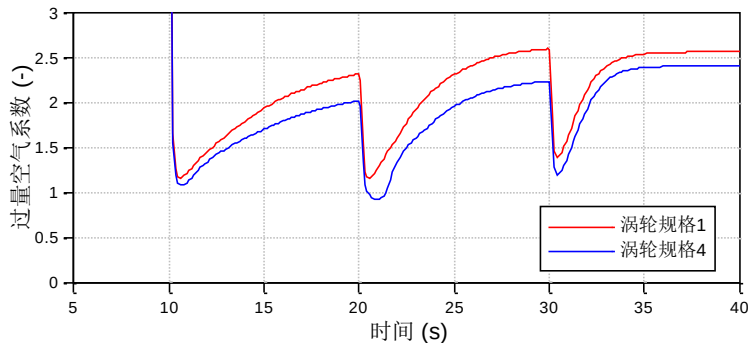
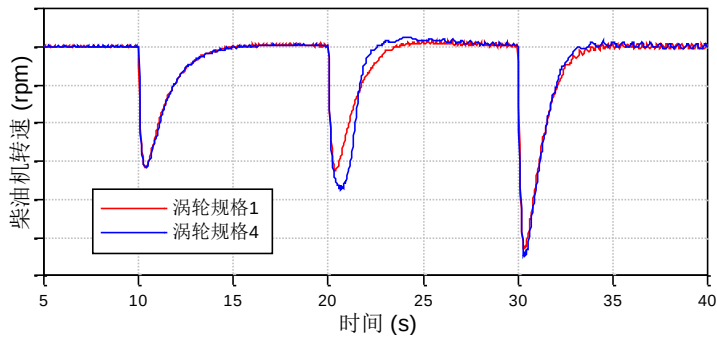
PID设置	加载级数	瞬态调速率	转速稳定时间
-	-	%	s
PID设置1	第一级	0.97	2.24
PID设置2		0.95	1.53
PID设置1	第二级	2.3	3.04
PID设置2		2.1	1.80
PID设置1	第三级	2.5	3.35
PID设置2		2.0	2.40

采用不同的PID参数设置，突卸全负荷至零时，采用第1种PID参数设置，瞬态调速率为5.0%，转速稳定时间为5.6s；采用第2种PID参数设置，瞬态调速率为4.9%，转速稳定时间为2.5s。



2. 涡轮机喷嘴环影响分析

采用较小的涡轮喷嘴环，在三级加载过程中压气机的增压比和涡轮机的膨胀比升高的速度更快，相应的过量空气系数较大，可以明显改善加载过程中冒黑烟的现象，瞬时调速率也略有改善。

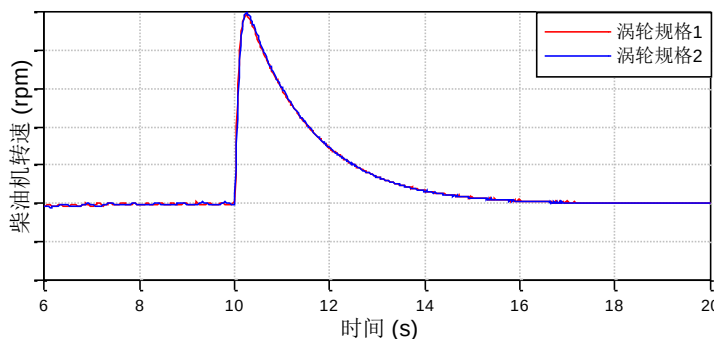


2. 涡轮机喷嘴环影响分析

采用较小的涡轮，瞬态调速率略有降低，转速稳定时间略有增加。但采用较小涡轮有助于提高加载过程中的增压压力和过量空气系数，提高燃烧效率，改善瞬态调速特性。

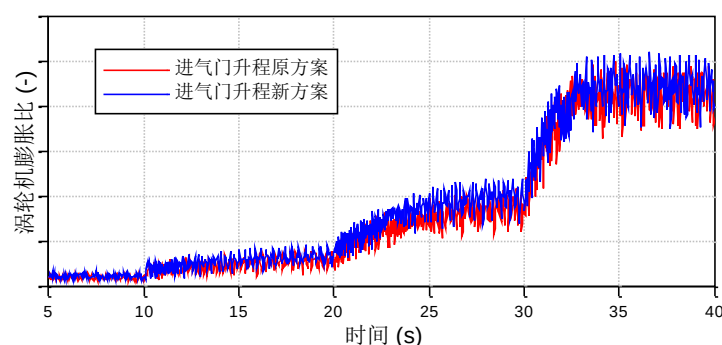
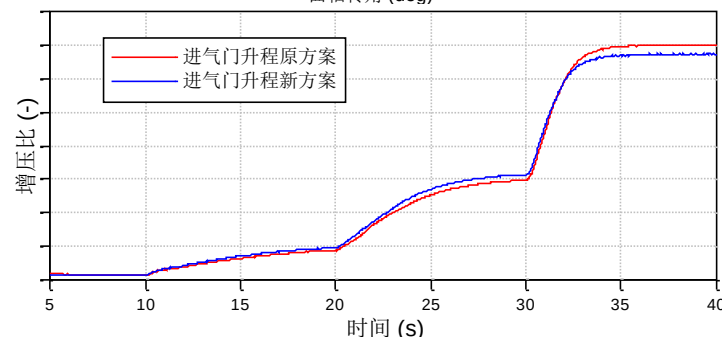
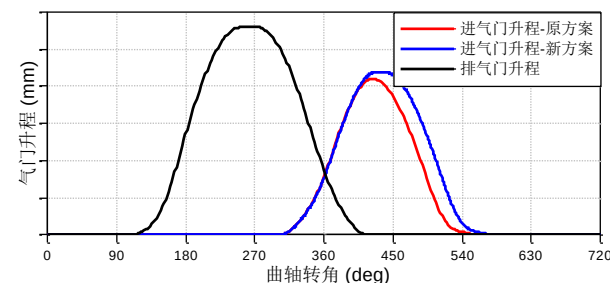
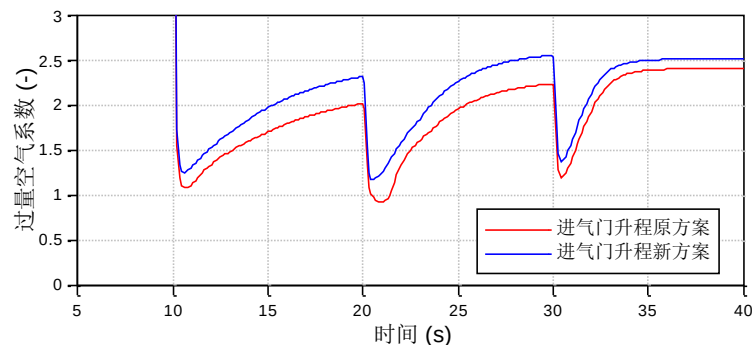
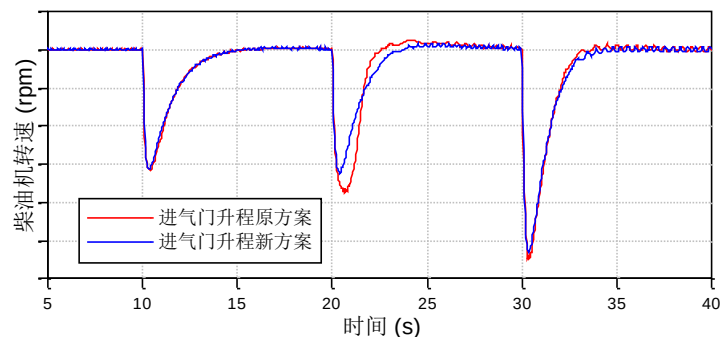
涡轮机规格	加载级数	瞬态调速率	转速稳定时间
-	-	%	s
涡轮规格1	第一级	1.76	2.17
涡轮规格2		1.8	2.06
涡轮规格1	第二级	2.37	1.88
涡轮规格2		2.45	1.91
涡轮规格1	第三级	2.62	2.28
涡轮规格2		2.73	2.15

采用不同规格的涡轮机喷嘴环对突卸负载时柴油机的瞬态调速性能影响很小，瞬态调速率均为4.9%，转速稳定时间均为2.7s。



3.进气门关闭时刻影响分析

IVO推迟10deg，加载过程中涡轮的膨胀比较大，使第一级和二级加载过程的增压比较大，加载过程中过量空气系数较大，有助于改善加载过程中的燃烧效率和冒黑烟的现象。

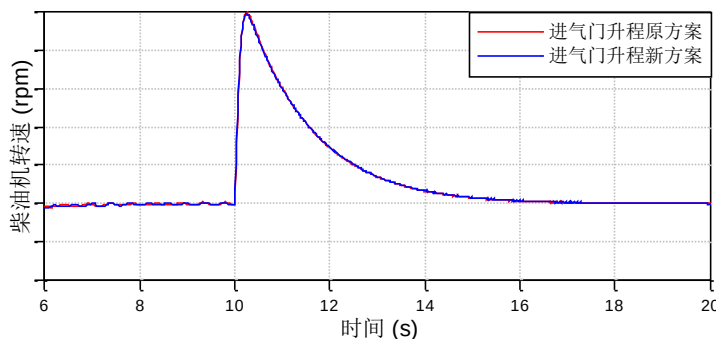


3.进气门关闭时刻影响分析

进气门关闭时刻推迟10deg后，在三级加载过程中，瞬态调速率略有改善，但转速稳定时间略有增加。

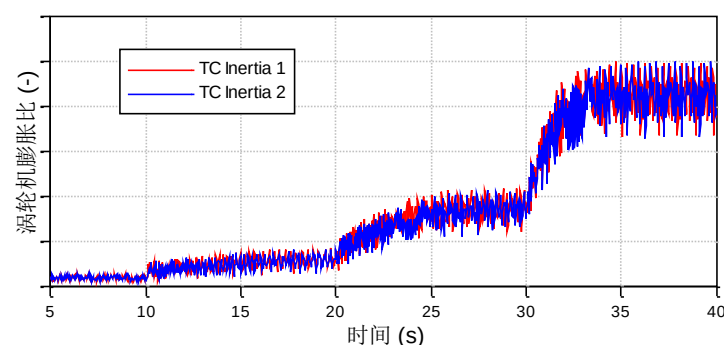
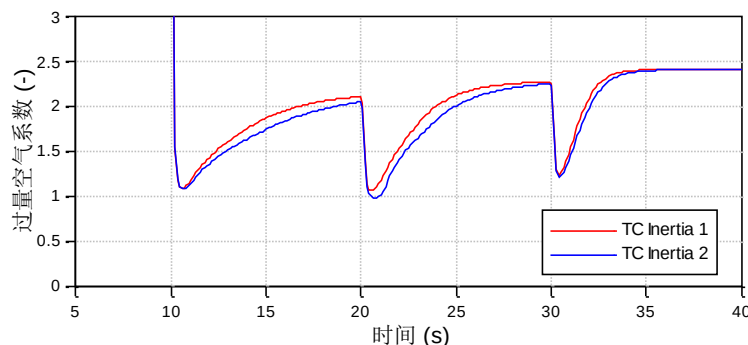
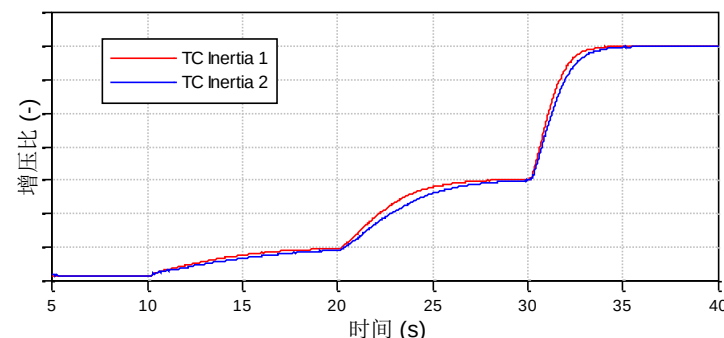
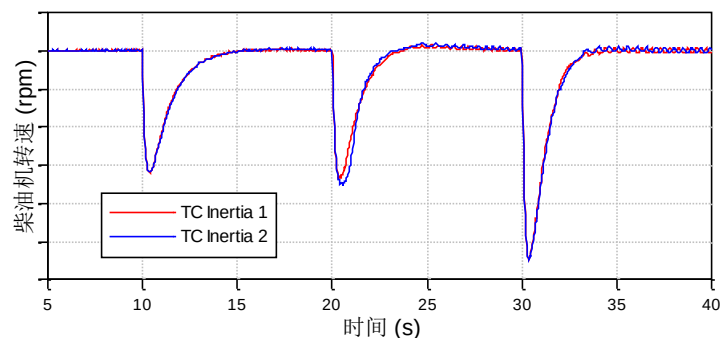
涡轮机规格	加载级数	瞬态调速率	转速稳定时间
-	-	%	s
原进气方案	第一级	1.58	2.14
进气门关推迟		1.57	2.15
原进气方案	第二级	1.97	1.73
进气门关推迟		1.74	1.98
原进气方案	第三级	2.74	2.15
进气门关推迟		2.63	2.3

采用不同的进气门关闭时刻，气门关闭时刻对突卸负载过程的调速精度影响不大，瞬态调速率均为4.9%，转速稳定时间均为2.7s。



4. 涡轮增压器转动惯量影响分析

采用较小的涡轮转动惯量能改善第二级加载过程的瞬态调速率，对第一级加载和第三级加载影响不大；还能增加加载过程的增加比和过量空气系数，有助于提高燃烧效率和改善冒黑烟现象。

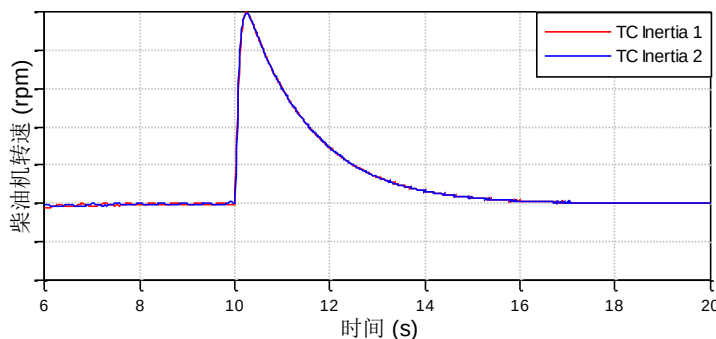


4.涡轮增压器转动惯量影响分析

第二级加载转速稳定时间增加了0.05s，第三级加载转速稳定时间降低了0.12s。

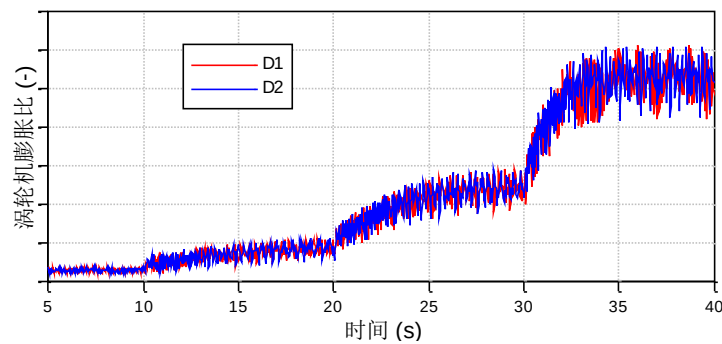
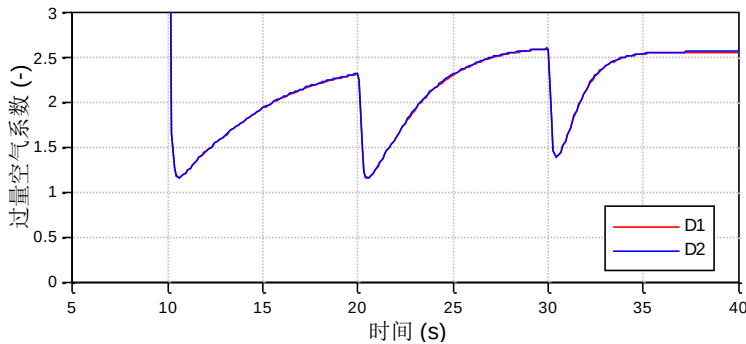
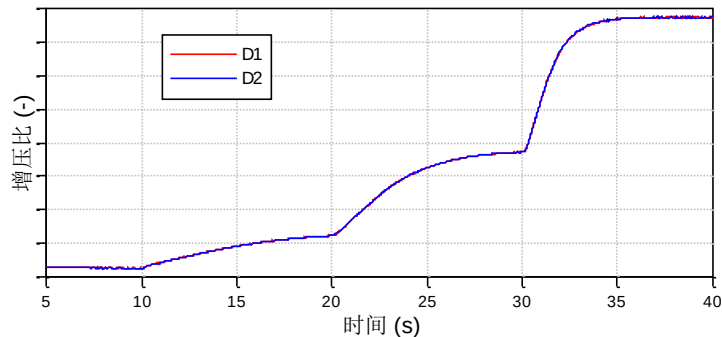
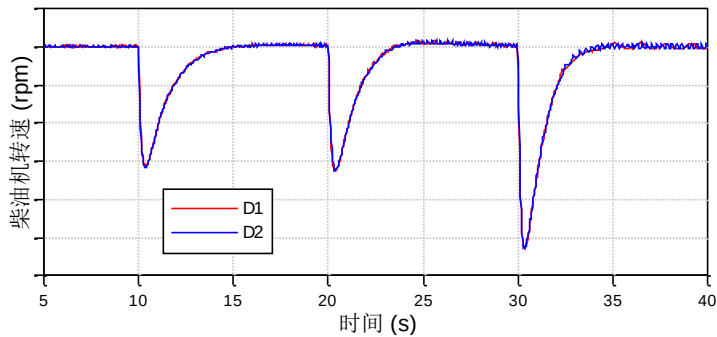
涡轮机规格	加载级数	瞬调速率	转速稳定时间
-	-	%	s
TC转动惯量1	第一级	1.6	2.1
TC转动惯量2		1.6	2.1
TC转动惯量1	第二级	1.55	1.88
TC转动惯量2		1.75	1.83
TC转动惯量1	第三级	2.75	2.08
TC转动惯量2		2.75	2.2

增压器转动惯量对突卸负载过程的调速性能影响不大，瞬调速率均为4.9%，转速稳定时间均为2.7s。



5.排气总管直径影响分析

排气管直径D1比D2减小了10mm，排气管总容积降低了约8%，在三级加载过程中，发动机的转速、增压比、过量空气系数和涡轮机膨胀比对比差别均不明显。

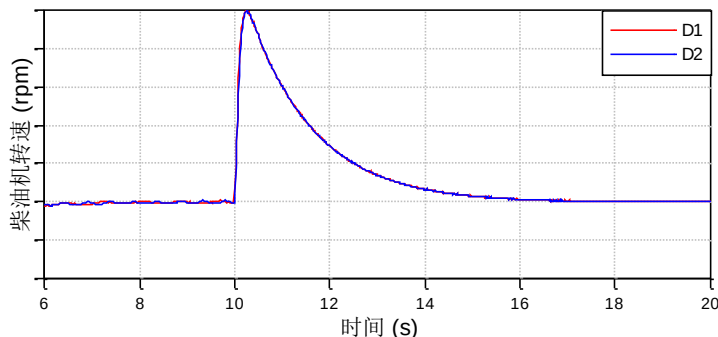


5.排气总管直径影响分析

从调速特性参数可知，采用较小的排气管直径，瞬时速调率基本无变化，但转速稳定时间略有降低。

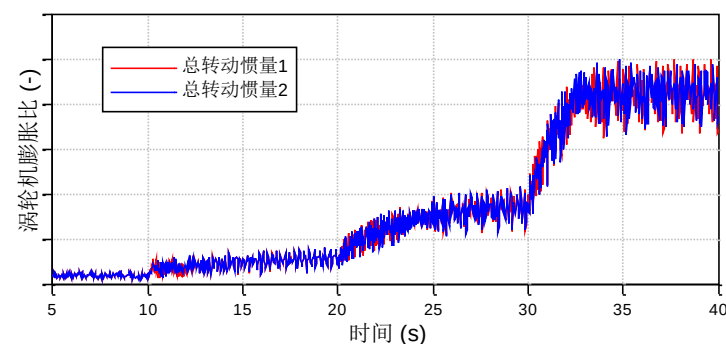
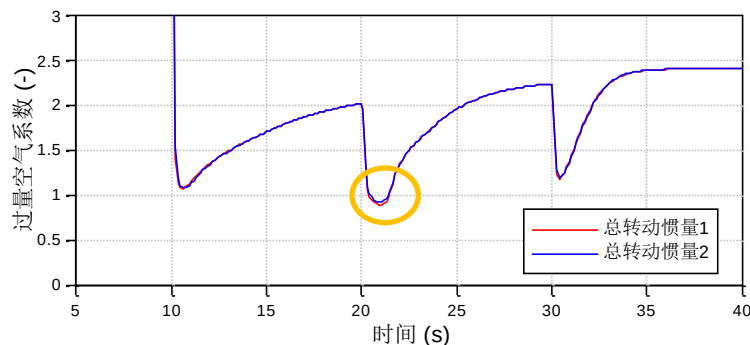
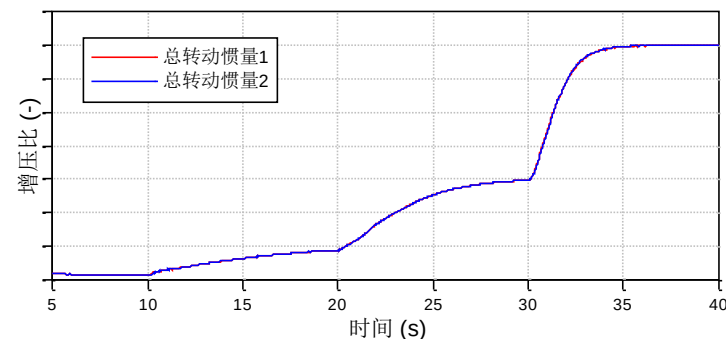
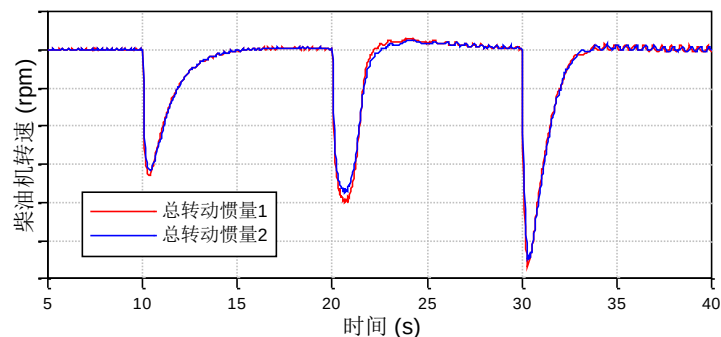
排气总管直径	加载级数	瞬时速调率	转速稳定时间
mm	-	%	s
D1	第一级	0.95	1.44
D2		0.92	1.53
D1	第二级	2.4	1.75
D2		2.4	1.80
D1	第三级	2.4	2.30
D2		2.4	2.38

排气总管直径对突卸负载过程的调速精度影响不大，瞬时速调率均为4.9%，转速稳定时间均为2.7s。



6.柴油发电机组转动惯量影响分析

柴油发电机组总转动惯量2比总转动惯量1增加约15%，机组的转动惯量对加载过程中的瞬态增压比、涡轮机膨胀比和过量空气系数影响较小。

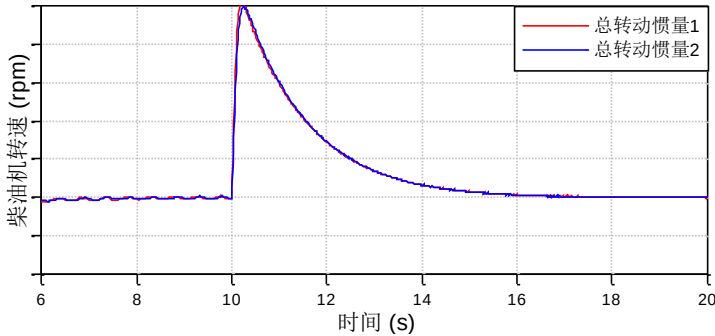


6.柴油发电机组转动惯量影响分析

采用较小的机组转动惯量，加载过程中瞬态调速率略有增加，第二级加载的转速稳定时间略有降低。

涡轮机规格	加载级数	瞬态调速率	转速稳定时间
-	-	%	s
总转动惯量1	第一级	1.64	2.13
总转动惯量2		1.58	2.13
总转动惯量1	第二级	2.0	1.67
总转动惯量2		1.87	1.73
总转动惯量1	第三级	2.84	2.16
总转动惯量2		2.74	2.16

不同的柴油发电机组总转动惯量对突卸负载时柴油机的瞬态调速性能影响较小，瞬态调速率分别为5.1%和4.9%，小的转动惯量瞬态调速率略大，转速稳定时间均为2.7s。



调速特性各参数影响程度总结

参数	加载过程	突卸负荷
PID参数	★★★	★★★
涡轮机喷嘴环	★★★	★
进气门关闭正时	★★	★
涡轮增压器转动惯量	★★	★
排气总管直径	★	★
柴油发电机组转动惯量	★	★★

目 录

- 七一一研究所简介
- 船用柴油机调速系统介绍
- 某船用柴油机1D计算模型介绍
- 瞬态调速特性影响参数分析
- 总结及讨论

总结及讨论

- ❑ 调速控制模块的PID参数对突加负载和突卸负载过程中的瞬态调速参数具有较大的影响，通过优化调速控制模块的PID参数Map，能明显改善机组的瞬态调速性能；
- ❑ 采用小流量的涡轮喷嘴环有助于提高加载过程中的增压压力和过量空气系数，提高燃烧效率，改善瞬态调速特性。在满足柴油机稳态性能的前提下，优先选择小的涡轮喷嘴环；涡轮喷嘴环对突卸负载时的瞬态调速性能影响很小；
- ❑ 推迟进气门关正时有助于提高加载过程中的过量空气系数，提高燃烧效率，从而改善瞬态调速特性；进气门关闭时刻对突卸负载过程的调速精度影响不大；
- ❑ 采用较小转动惯量的涡轮增压器能够增加加载过程的增加比和过量空气系数，提高燃烧效率和改善冒黑烟现象，对加载过程的瞬态调速特性也略有改善，但对突卸负载过程的调速参数影响可忽略；
- ❑ 当前柴油机的排气总管直径在较小范围内调整时（排气管容积减小约8%），对加载过程和突卸负荷过程中的瞬态调速参数影响均较小；
- ❑ 柴油发电机组的转动惯量在15%范围内调整时，对加载过程和突卸负荷过程中的瞬态调速参数影响均较小。

谢谢!

七一一研究所
SINERI
2016/12/2

