

IDAJ CAE
Solution
Conference

Your True Partner for CAE&CFD

ICSC 2015

余热利用系统对主机性能影响研究

公司名称： 中船动力研究院有限公司
研发部 朱骏

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

→ 研究背景

- 在船舶余热利用系统（WHR）中，对主柴油机排气能量的利用是十分重要的一个环节。
- 柴油机排气能量的利用主要有两种基本的方式
 - 利用排气直接驱动动力涡轮做功
 - 通过余热锅炉回收排气中的热能，用以产生蒸汽来发电或者直接提供船舶中其他设备使用
- 目前所有有关于船舶动力系统排气余热利用的方案都是对这两种基本方式的组合与改进。

本文仅供学习参考，不得转载和商用。

→ 研究背景

- 存在的问题：船用大型低速二冲程柴油机的排气温度在经过涡轮增压器做功后，其温度一般都在 $215\sim 260^{\circ}\text{C}$ 范围内。因为温度较低，给排气的余热利用带来了困难。
- 解决的方案：余热利用主机调制的核心思想是通过较小的过量空气系数，在主机油耗略有增加的情况下，将主机排气温度提高，满足余热锅炉酸露点温度参数限制的要求，同时尽可能提高余热利用系统和整个动力系统的能量利用效率。
- 主要研究内容：在标准主机模型的基础上调制建立了WHR主机，并研究了旁通率的变化对主机性能的影响。

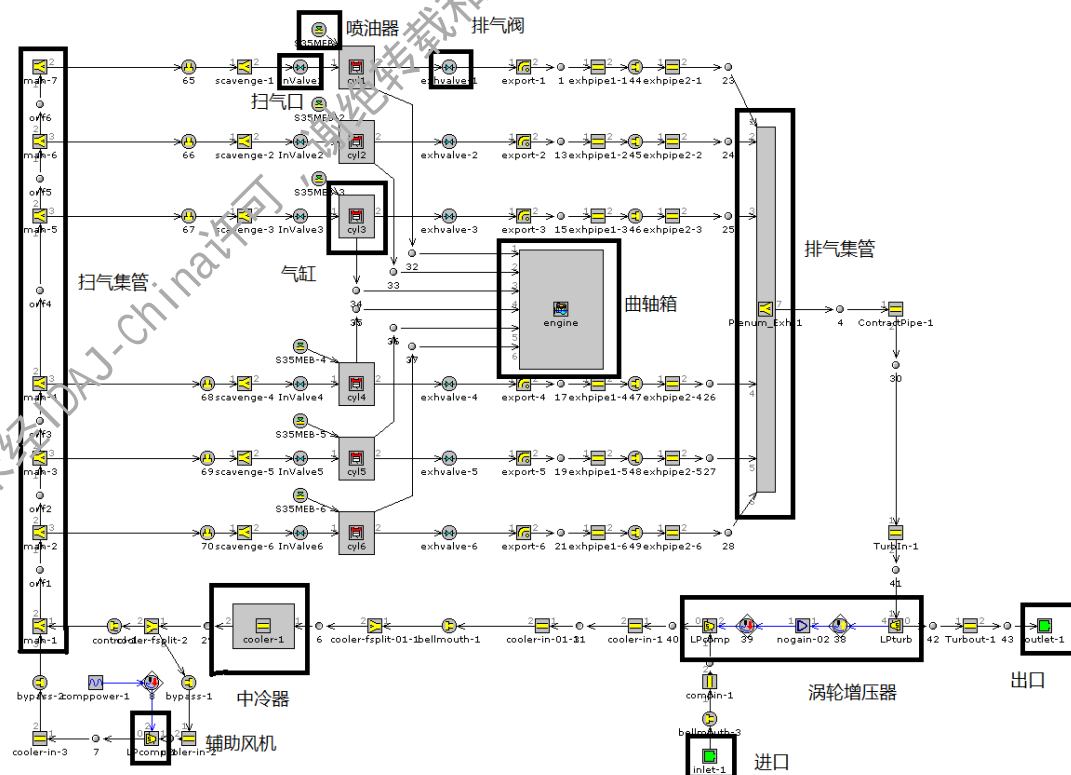
本文仅供学习参考，未经许可，不得转载。

→ 柴油机原机模型建立及验证

■ 柴油机主要技术参数

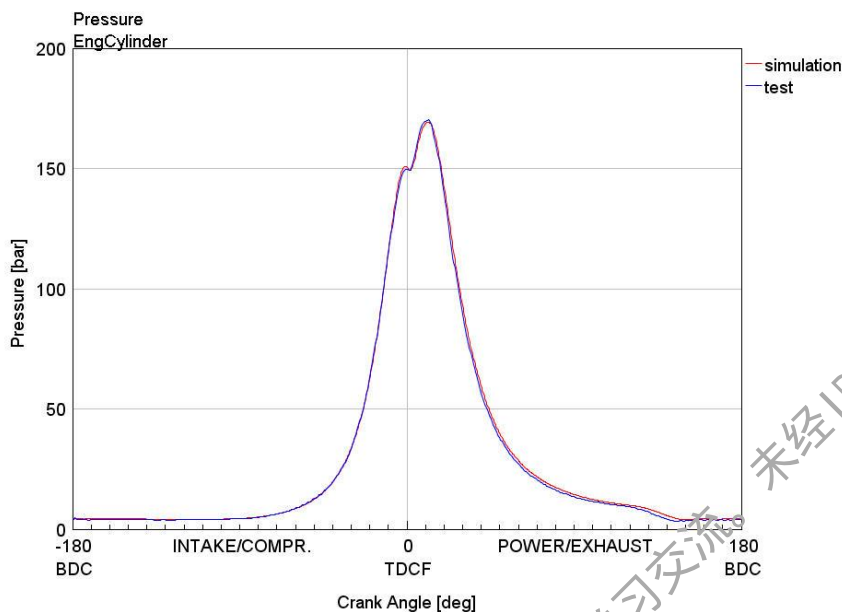
参数名称	参数描述
额定功率	9960kW
额定转速	127r/min
缸径	500mm
冲程	2000mm
冲程数	2

■ GT-Power仿真模型



→ 柴油机原机模型建立及验证

■ 仿真模型的验证



柴油机100%工况点缸内压力的
试验值与仿真值的对比

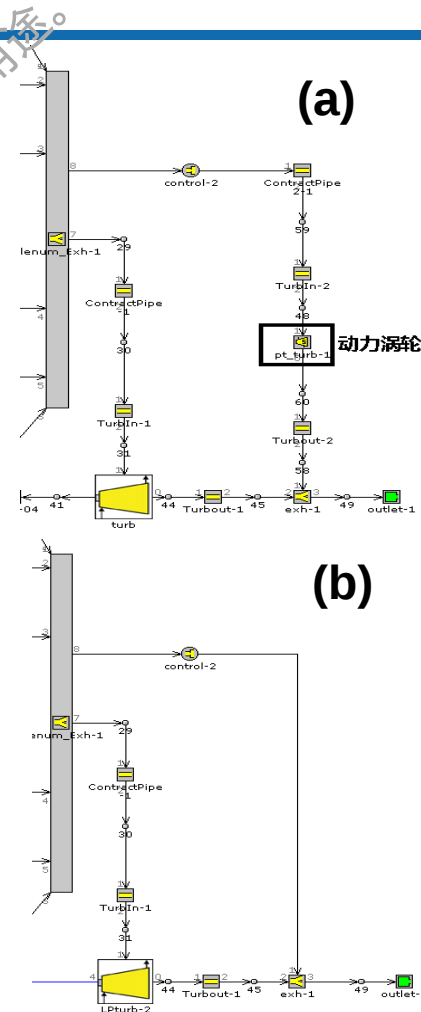
负荷		100%	85%	75%	50%
功率 (kW)	试验	9960	8466	7470	4980
	计算	9938	8454	7459	4973
油耗率 (g/kW. h)	试验	179.8	175.3	176.1	178.4
	计算	181.2	176.9	174.9	178.2
扫气压力 (bara)	试验	4.36	3.76	3.40	2.38
	计算	4.23	3.71	3.36	2.47
涡轮后排气 温度(°C)	试验	232	218	211	230
	计算	239	220	209	217

柴油机不同工况下仿真数据
与试验数据对比

→ WHR对主机性能影响

■ WHR主机建模

- WHR主机通过旁通一部分进入涡轮增压器的废气使得总空气流量和排气流量减少,这增加了涡轮增压器后的排气温度,于是增加了余热锅炉的最大蒸汽输出功率。
- 标准主机模型的基础上,旁通一部分废气成为WHR主机,有两种方案(如右图所示): a为有动力涡轮,可利用排气旁通的压降来发电; b为没有动力涡轮。
- 涡轮后的排气和旁通的排气汇合后进入余热锅炉用以产生蒸汽,蒸汽用来发电或者直接提供船舶中其他设备使用
- 计算动力涡轮和汽轮机的功率。



→ WHR对主机性能影响

■ 排气旁通率对主机性能影响

➤ 涡轮增压器不变的仿真结果

● 计算边界条件

- ✓ 保证WHR主机其他各参数不变
- ✓ 调整a方案中动力涡轮模块的喷嘴环直径和b方案中孔板直径使得旁通率分别为0、2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%
- ✓ 动力涡轮效率设为75%
- ✓ 锅炉排气温度设为160℃
- ✓ 汽轮机热效率设为20%

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。

→ WHR对主机性能影响

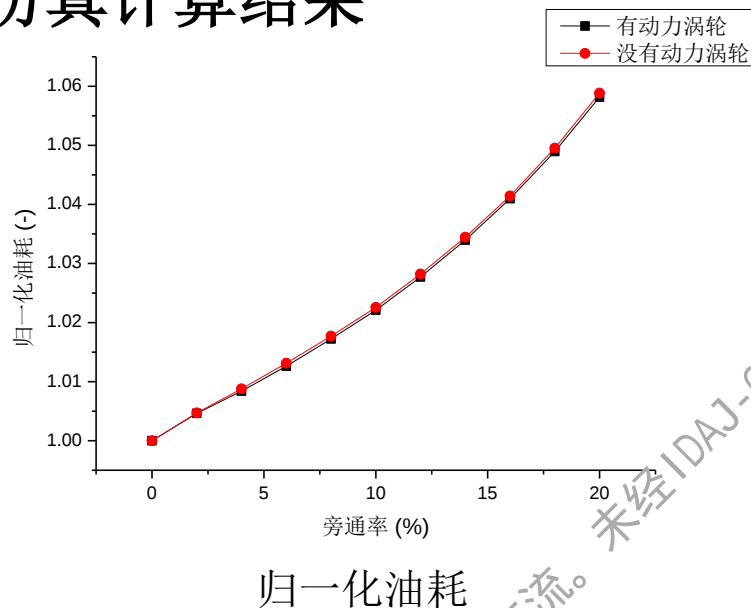
● 仿真计算结果

- ✓ 等效总油耗为单位有效主机功率、动力涡轮功率和汽轮机功率之和的耗油量。其中对油耗、排气流量、爆发压力、空燃比、等效总油耗以旁通率为0时，即原机的性能参数进行了归一化处理。

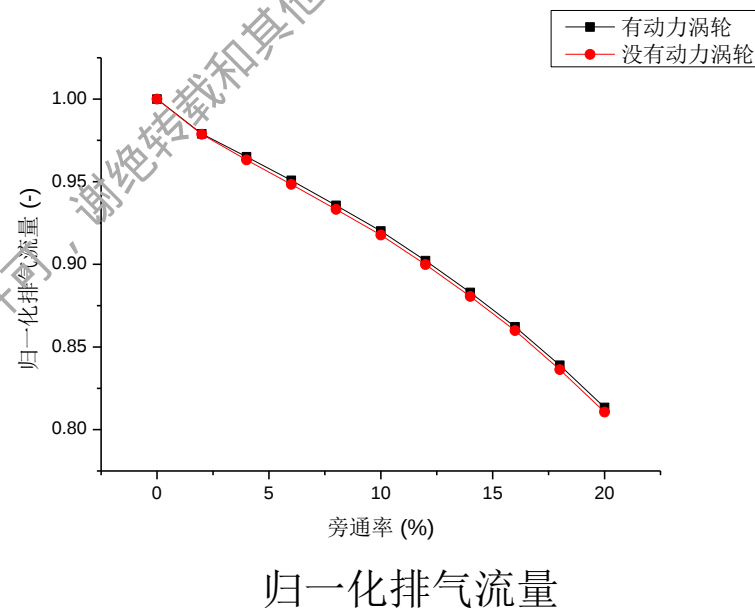
本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，不得用于其他用途。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



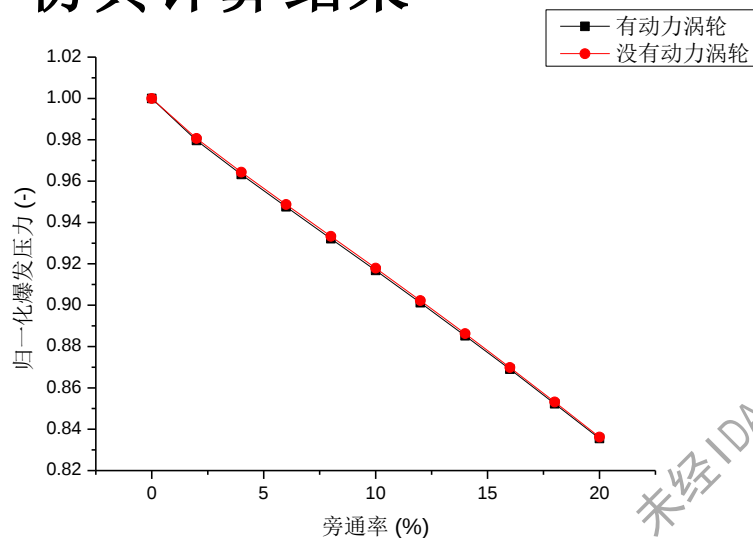
主机油耗随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，油耗比原机增加接近6%。



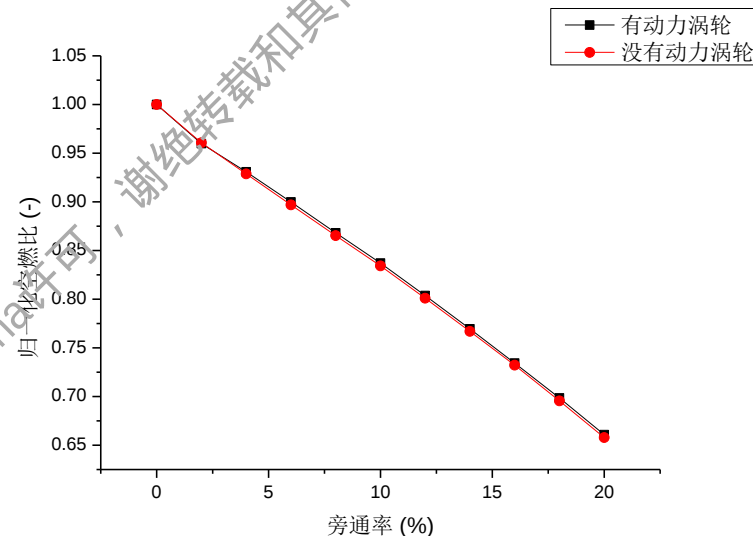
排气流量随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，排气流量比原机减小接近19%。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



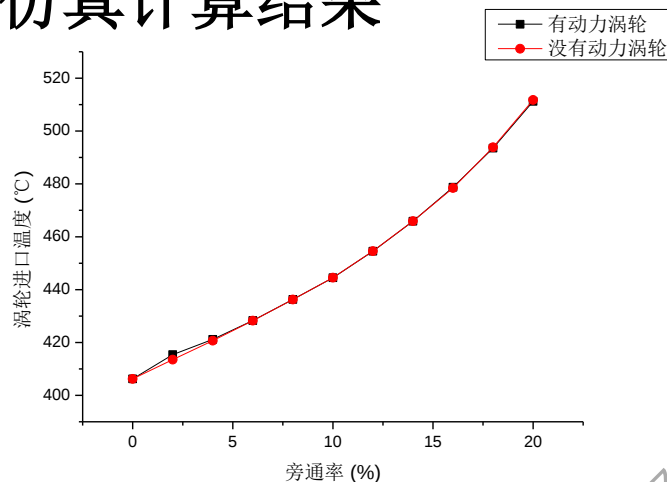
爆发压力随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，爆发压力比原机减小接近17%。



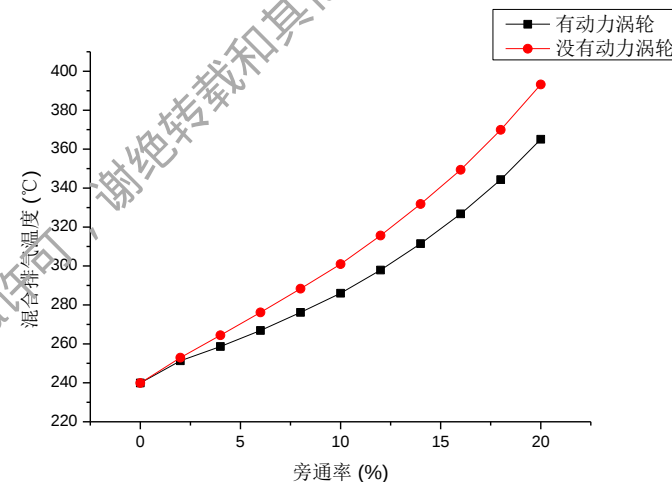
空燃比随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，空燃比比原机减小接近44%。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



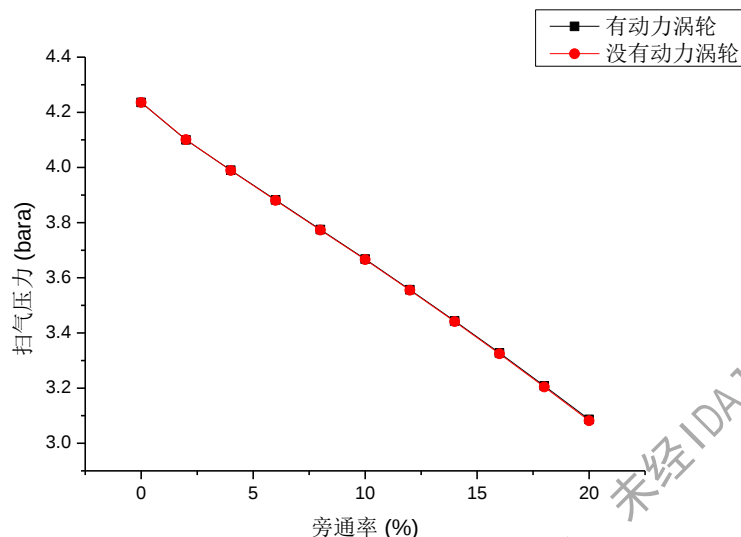
涡轮进口温度随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，涡轮进口温度比原机增加接近105℃。



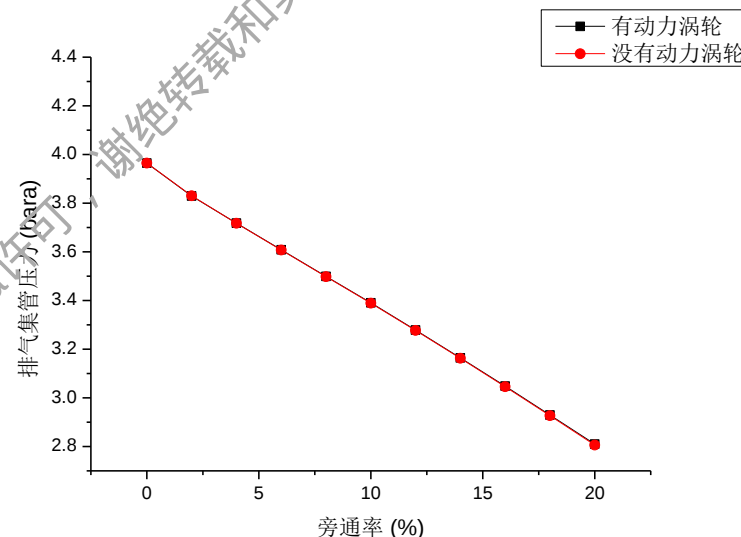
混合排气温度即涡轮后排气和旁通的排气混合后温度随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，有动力涡轮的混合排气温度比原机增加接近125℃，没有动力涡轮的混合排气温度比原机增加接近155℃，此状态下，没有动力涡轮的混合排气温度比有动力涡轮的混合排气温度高约30℃。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



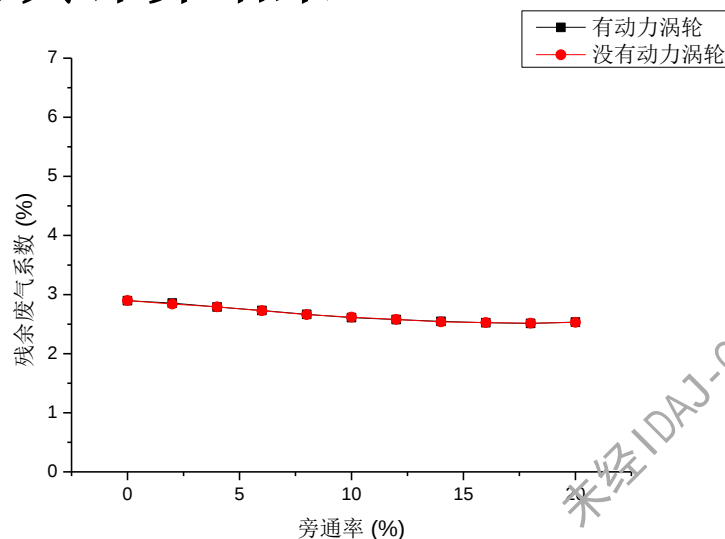
扫气压力随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，扫气压力比原机减小接近1.15bar。



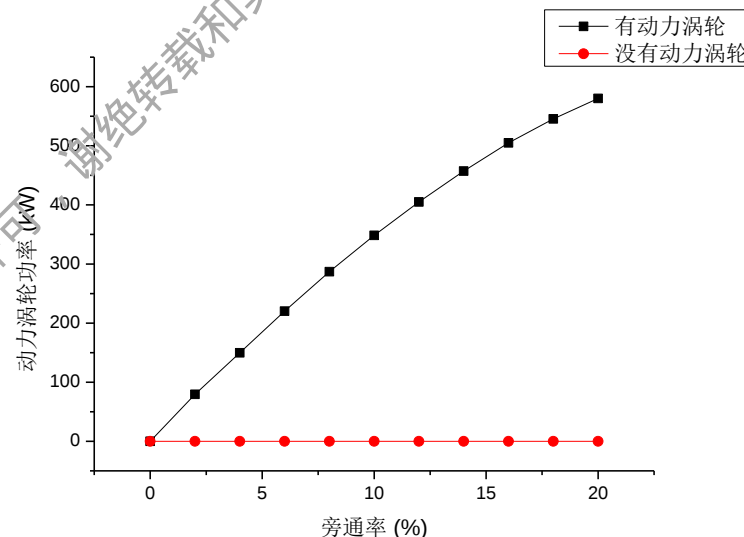
排气集管压力随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，排气集管压力比原机减小接近1.15bar。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



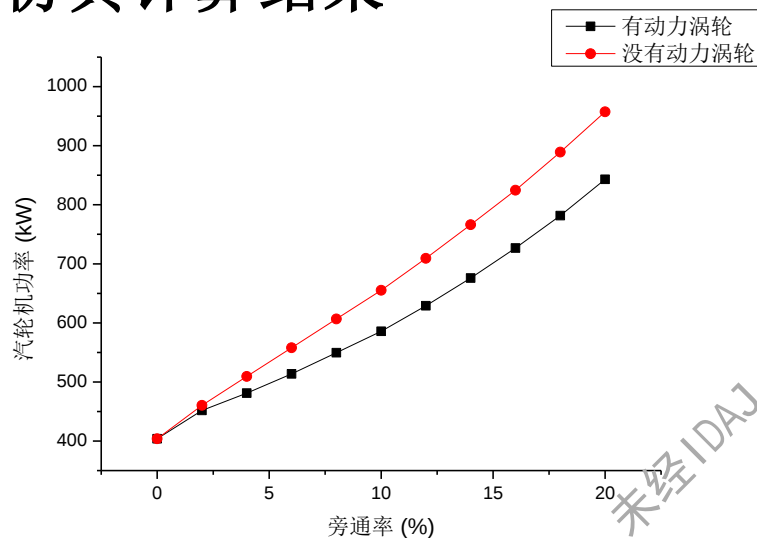
残余废气系数随着旁通率的增加基本保持不变。



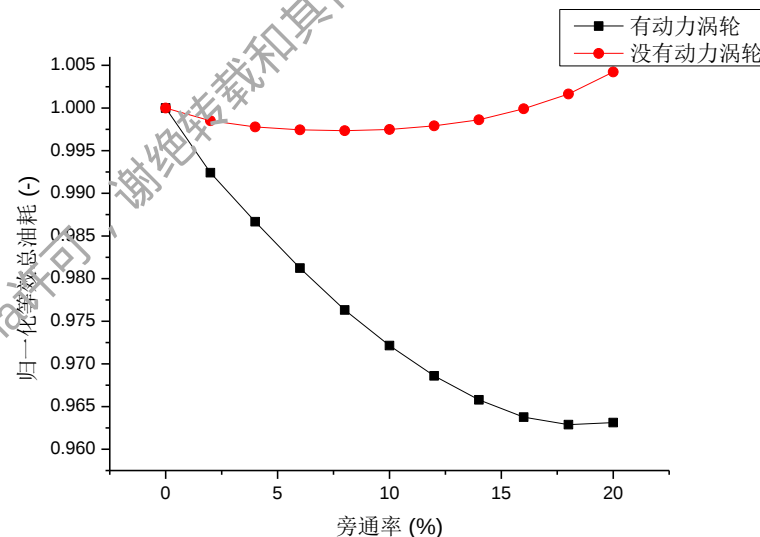
a方案动力涡轮功率随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，动力涡轮功率可达580kW，b方案没有动力涡轮，动力涡轮功率为0。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



汽轮机功率随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，有动力涡轮的汽轮机功率比原机增加接近440kW，没有动力涡轮的汽轮机功率比原机增加接近550kW，此状态下，没有动力涡轮的汽轮机功率比有动力涡轮的汽轮机功率高约110kW。



没有动力涡轮的等效总油耗随着旁通率的增加而先减小后增加；有动力涡轮的等效总油耗随着旁通率的增加而减小，在旁通率为18%和20%时，等效总油耗基本相等为0.963。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真结果分析

- 随着旁通率的增加，方案a和方案b的油耗、排气流量、爆发压力、空燃比、涡轮进口温度、扫气压力、排气压力等性能参数几乎一致；混合排气温度、汽轮机功率和动力涡轮功率是不一样的。
- 涡轮增压器不变，随着旁通率的增加，通过涡轮增压器的流量减小，扫气压力减小，空燃比迅速减小，爆发压力迅速减小，油耗迅速增大，因此应该根据所要求的旁通率匹配涡轮增压器，使得扫气压力不变。

本文仅供学习交流。未经IDAJ Co., Ltd. 许可，不得用于其他用途。

→ WHR对主机性能影响

■ 排气旁通率对主机性能影响

➤ 扫气压力不变的仿真结果

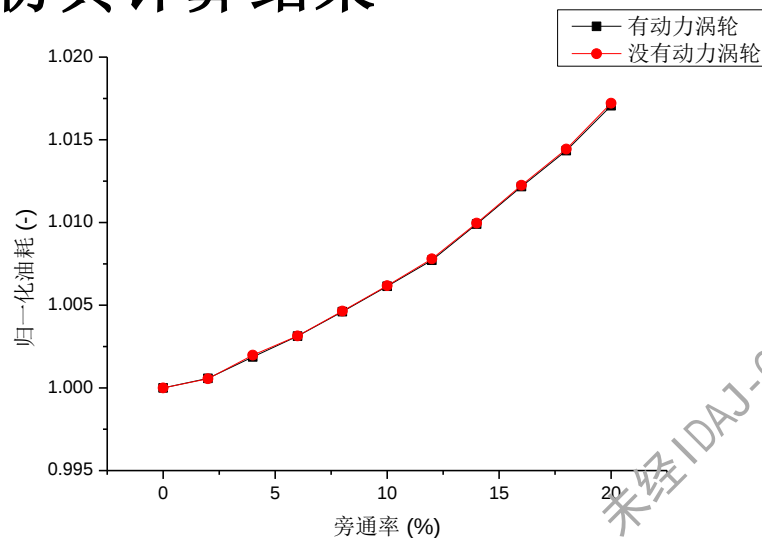
● 计算边界条件

- ✓ 保证WHR主机其他各参数不变
- ✓ 缩放涡轮增压器及调整a方案中动力涡轮模块的喷嘴环直径和b方案中孔板直径使得旁通率分别为0、2%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%及各旁通率下扫气压力保持不变
- ✓ 动力涡轮效率设为75%
- ✓ 锅炉排气温度设为160℃
- ✓ 汽轮机热效率设为20%

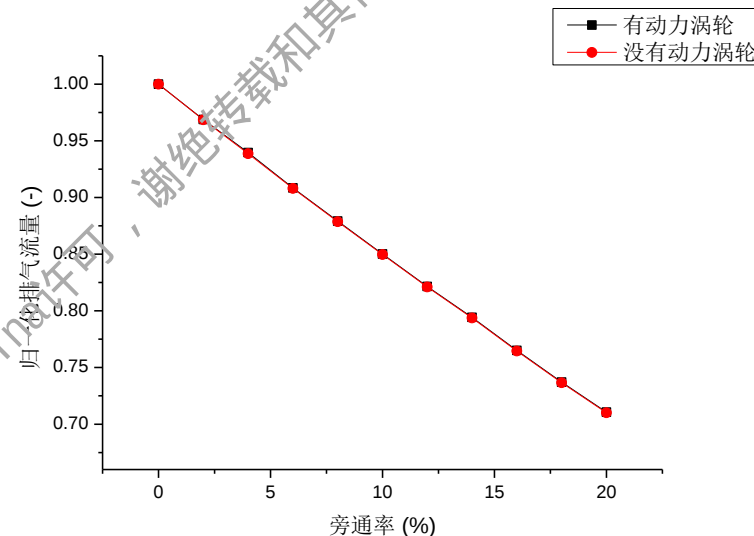
本文仅供学习交流，谢绝转载和其他用途。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



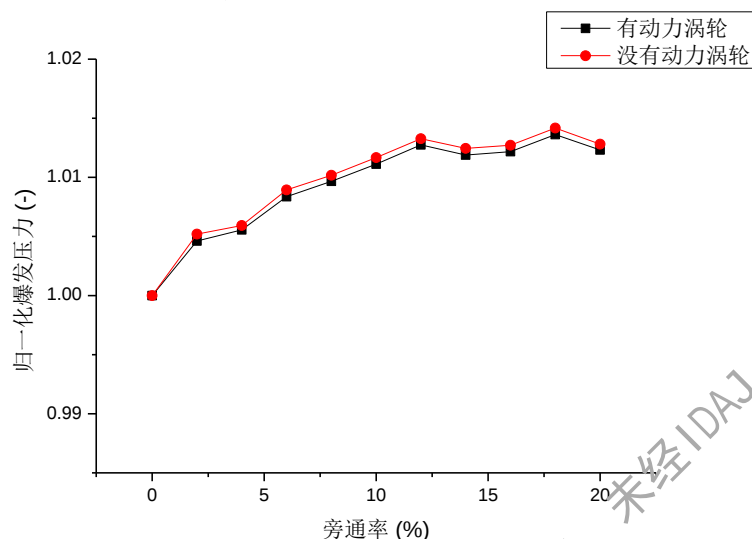
主机油耗随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，油耗比原机增加接近1.7%。



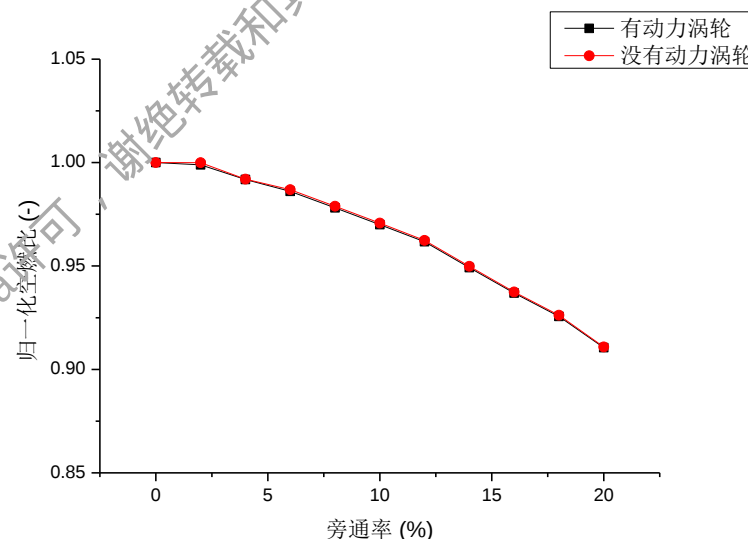
排气流量随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，排气流量比原机减小接近29%。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



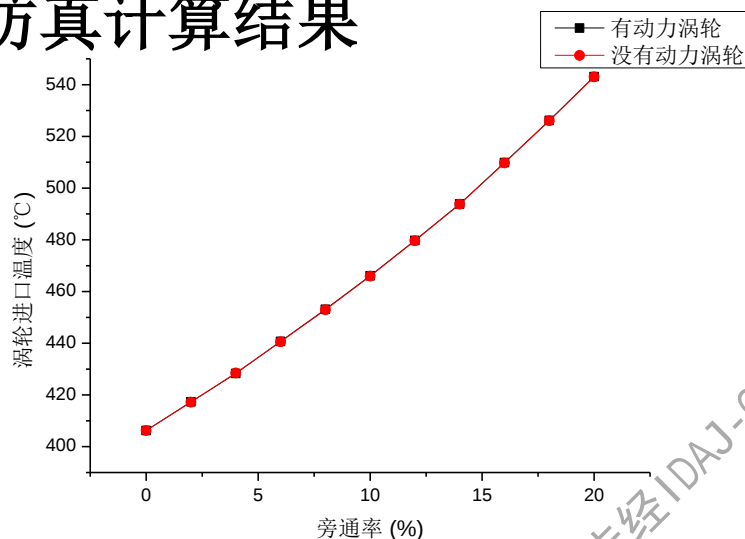
爆发压力随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，爆发压力比原机增加约1%。



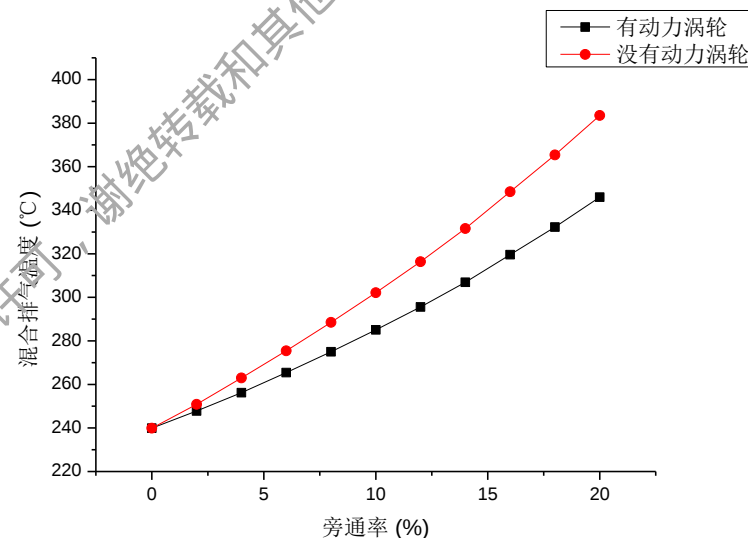
空燃比随着旁通率的增加而减小，旁通率20%时，空燃比比原机减小接近9%。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



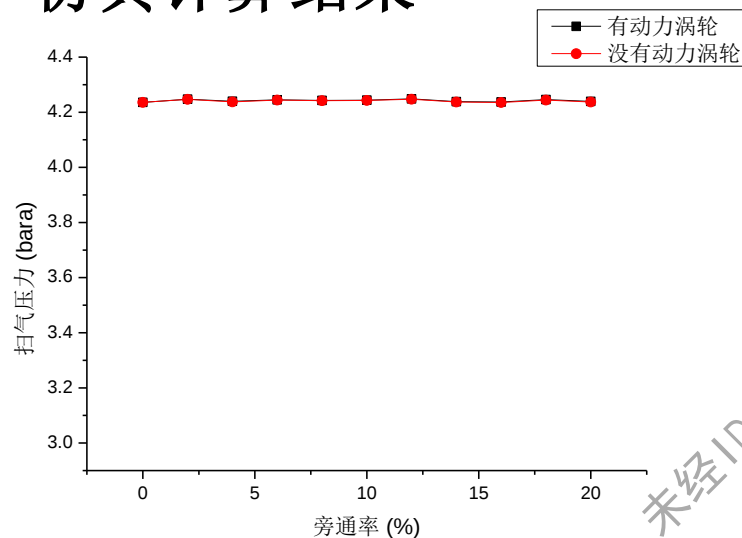
涡轮进口温度随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，涡轮进口温度比原机增加接近140℃，高达543℃。



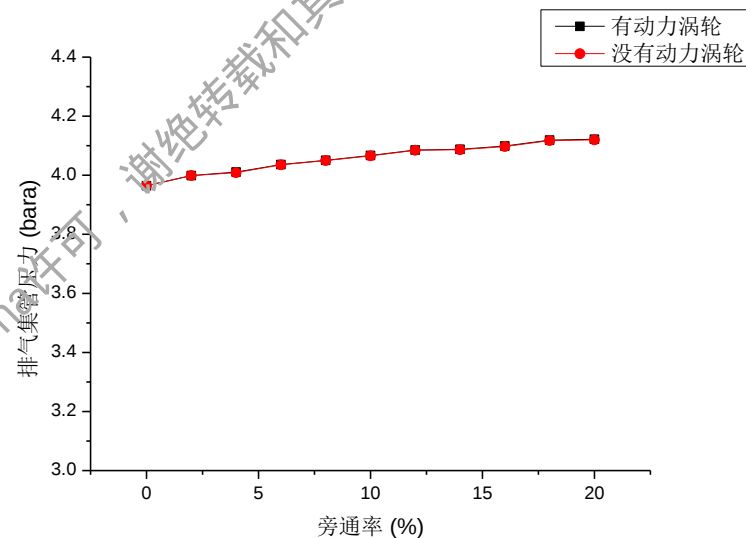
混合排气温度即涡轮后排气和旁通的排气混合后温度随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，有动力涡轮的混合排气温度比原机增加接近105℃，没有动力涡轮的混合排气温度比原机增加接近145℃，此状态下，没有动力涡轮的混合排气温度比有动力涡轮的混合排气温度高约40℃。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



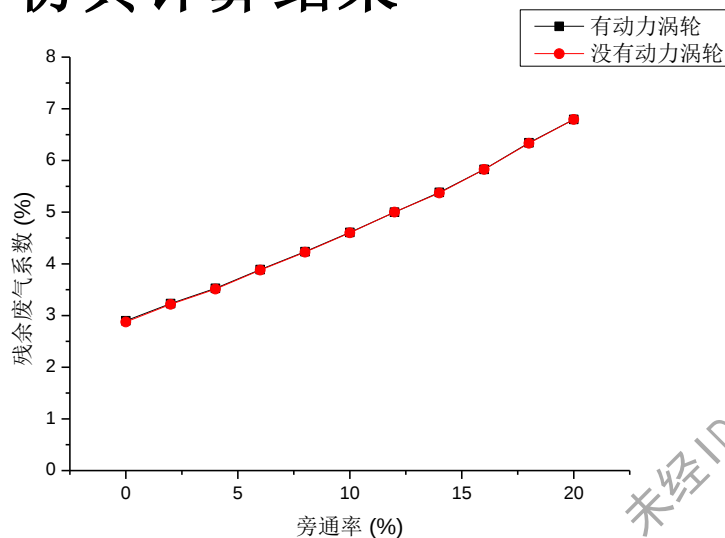
扫气压力随着旁通率的增加而保持不变。



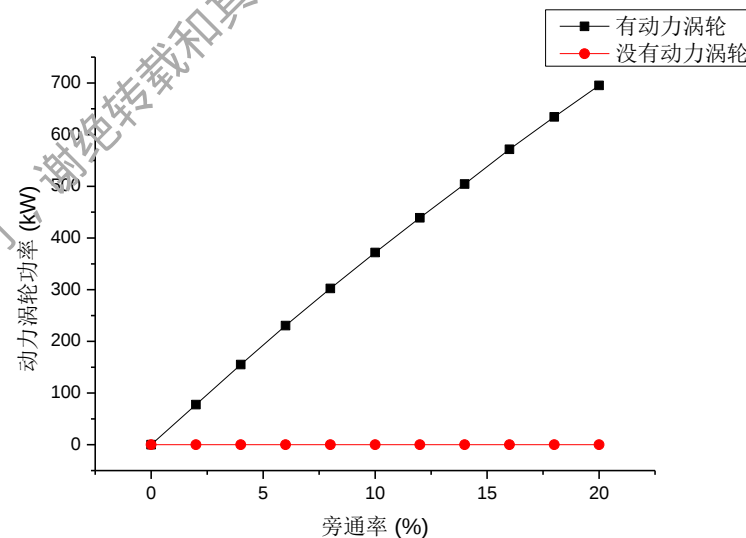
排气集管压力随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，排气集管压力比原机增加接近0.16bar。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



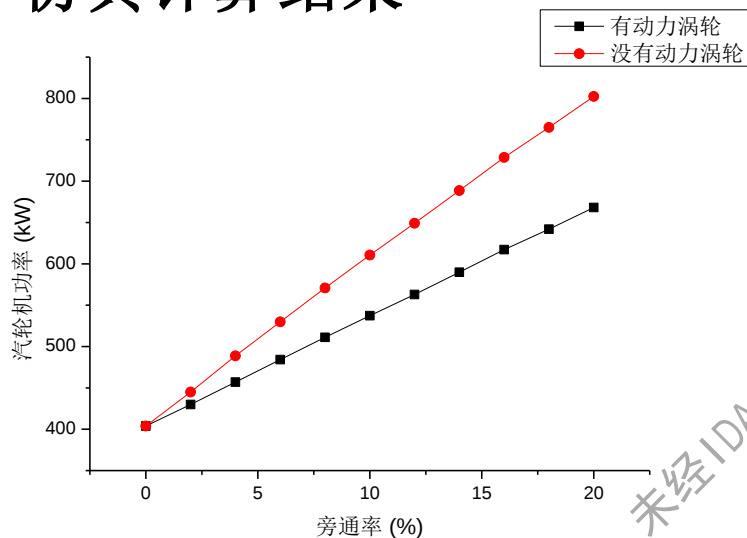
残余废气系数随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，残余废气系数为6.8%。



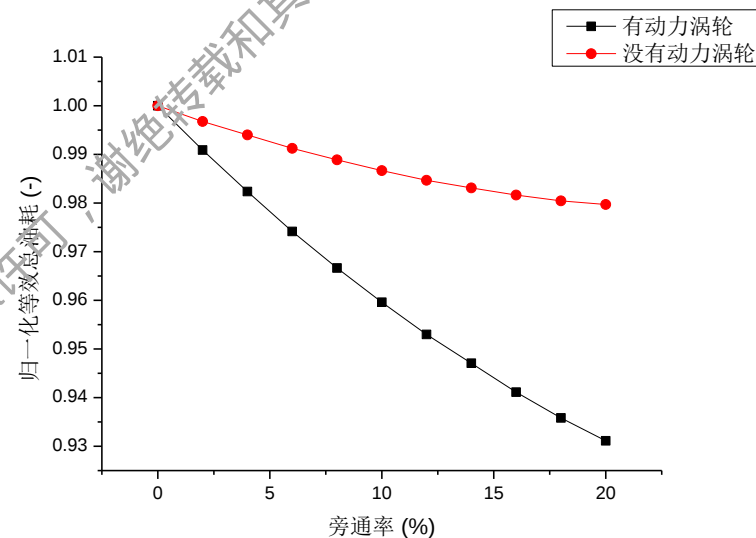
a方案动力涡轮功率随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，动力涡轮功率可达695kW, b方案没有动力涡轮，动力涡轮功率为0。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真计算结果



汽轮机功率随着旁通率的增加而增加，旁通率20%时，有动力涡轮的汽轮机功率比原机增加接近265kW，没有动力涡轮的汽轮机功率比原机增加接近400kW，此状态下，没有动力涡轮的汽轮机功率比有动力涡轮的汽轮机功率高约135kW。



等效总油耗随着旁通率的增加而减小。旁通率为20%时，有动力涡轮的等效总油耗为0.93，没有动力涡轮的等效总油耗为0.98。

→ WHR对主机性能影响

● 仿真结果分析

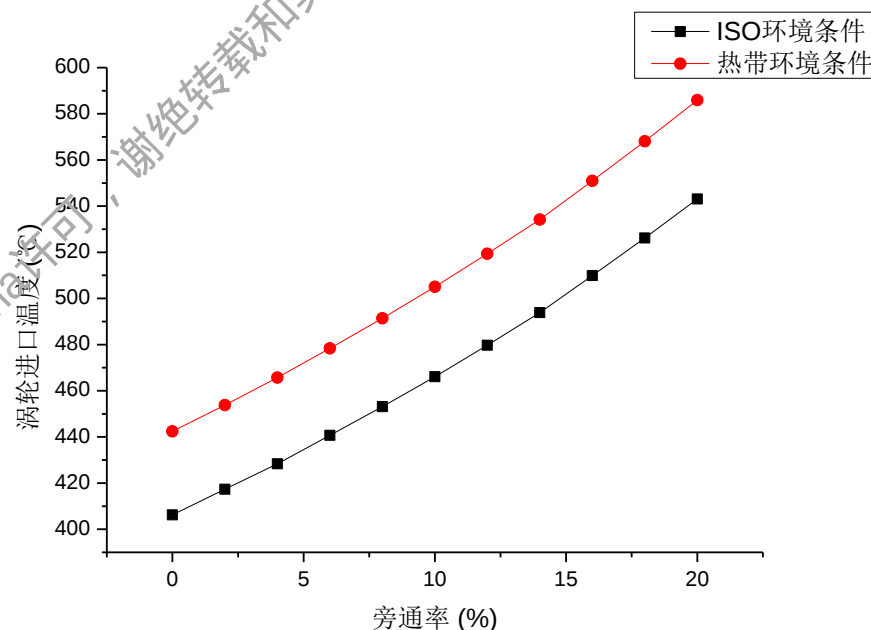
- 有无动力涡轮基本只影响混合排气温度、汽轮机功率和动力涡轮功率这些性能参数。
- 改变涡轮增压器保持扫气压力不变，随着旁通率的增加，通过涡轮增压器的流量减小，排气集管压力增加，扫气压差减小使得扫气稍有不畅，空燃比稍有减小，爆发压力增大少许，油耗稍有增加，而等效总油耗下降。而在旁通率为20%时，涡轮进口温度为543℃，高于一般的涡轮进口温度限制值530℃。

本文仅供学习交流。未经IDAJ Co., LTD. 许可，谢绝转载和其他用途。

→ WHR对主机性能影响

■ 旁通率限制值的计算

- 为得到旁通率的限制值, 对WHR主机在热带环境条件下的运行开展仿真计算研究
- 在ISO环境条件下和热带环境条件下旁通率对涡轮进口温度的影响如右图所示。
- 在相同的旁通率下, 热带环境条件下涡轮进口温度比ISO环境条件下涡轮进口温度高。
- 以涡轮进口温度530℃为限制值, 旁通率应小于13%。



→ 结论

- 利用GT-POWER 建立了原机的仿真模型，模型能够良好的反映真实发动机的稳态特性。
- 在原机仿真计算模型的基础上，旁通一部分废气成为WHR主机。
- 不同的旁通率下用同一个涡轮增压器对主机性能有很不利的影响，应该根据所选用的旁通率匹配不同的涡轮增压器。
- 根据涡轮进口温度限制值得到旁通率应小于13%。

本文仅供学习交流。

谢谢大家！

本文仅供学习交流。未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。