

某 EGR 结合两级增压船用柴油机的控制策略研究

Research on the Control Strategy of an EGR Combined TSTC Marine Diesel engine

李新瑞 李先南 胡志龙

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 本文利用 GT-Power 软件搭建了某中速船用柴油机的工作过程模型, 基于该一维仿真模型, 通过调整喷油参数、EGR 率、高压级涡轮旁通阀的开度等措施, 制定了柴油机的基本 MAP 以及在“低排放”、“低油耗”模式下的进排气系统控制策略和喷油控制策略。控制策略的研究结果表明, 柴油机在“低排放”模式下的加权油耗为 242.5 g/kW·h, 加权 NO_x 排放为 2.1 g/kW·h, 满足 Tier III 阶段排放指标要求; 在“低油耗”模式下的加权油耗为 230.0 g/kW·h, 加权 NO_x 排放为 5.1 g/kW·h, 满足内河二阶段指标要求。

关键词: 中速船用柴油机, GT-Power, 控制策略

Abstract: In this paper, the working process model of a marine diesel engine was established in GT-Power, based on which the control strategies of the "Low-Emission" and "Low-BSFC" modes, was made through adjusting injection parameters, EGR rate, the by-pass valve's opening angle of high level turbocharger, etc. Including basic MAP, intake and exhaust strategy, and injection strategy. By adjusting the control strategy, the weighed fuel consumption and NO_x emission of the diesel engine in the "Low-Emission" mode can be 242.5 g/kW·h and 2.1 g/kW·h respectively, meeting the requirement of the Tier III. While in the "Low-BSFC" mode, the weighed fuel consumption and NO_x emission can be 230.0 g/kW·h and 5.1 g/kW·h respectively, meeting the requirement of the Inland River Ships' 2-stage emission standards.

Key words: Middle-speed Diesel Engine, GT-Power, Control Strategy

1. 概述

为了满足船舶柴油机高功率密度、低油耗和低 NO_x 排放的应用需求, 两级增压系统应运而生^[1-2]。两级增压系统具有高压比、宽运行范围、结构可靠等优点^[3-4], 匹配两级增压技术后, 柴油机的升功率、低速大扭矩也大幅提高^[5]; 另外, 较大的空燃比允许柴油机采用更大的残余废气量, 实现更大的 EGR 率, 从而进一步降低 NO_x 排放^[6-7], 因此将两级增压技术与 EGR 技术相结合, 可以使柴油机兼具较好的燃油经济性和排放性能。

本文以某中速 EGR 结合两级增压船用柴油机为研究对象, 通过调整 EGR 率、高压级涡轮旁通阀的开度以及喷油参数等措施, 给出了目标柴油机在“低排放”和“低油耗”两种运行模式下各因素的调节策略, 并制定了不同策略的相互切换逻辑。

2. 研究目标

本文的研究对象为 6CS21/32 柴油机, 为了满足 IMO Tier III 和内河近海第二阶段排放要求, 在不影响柴油机经济性的前提下, 6CS21/32 柴油机在采用 EGR 和两级增压技术后应具有两种运行模式, 即“低排放”模式和“低油耗”模式, 具体的技术性能指标如下:

1) 当以“低排放”模式运行时, 与原机相比, 柴油机的加权 NO_x 排放降低 75%, 满足 IMO Tier III ($\leq 2.26\text{g/kW}\cdot\text{h}$), 且燃油消耗率不增加;

2) 当以“低油耗”模式运行时, 能满足内河近海第二阶段排放法规 (加权 NO_x+HC 排放 $\leq 6.2\text{g/kW}\cdot\text{h}$, 加权 PM 排放 $\leq 0.14\text{g/kW}\cdot\text{h}$), 且柴油机的综合油耗下降 1-3%。

由于目标机型的用途为发电辅机, 根据 IMO 法规和内河近海排放法规要求, 其对应的排放测试循环为 ISO8178 规定的 D2 循环, 即各工况下的 NO_x 排放所占权重如图 1 所示。

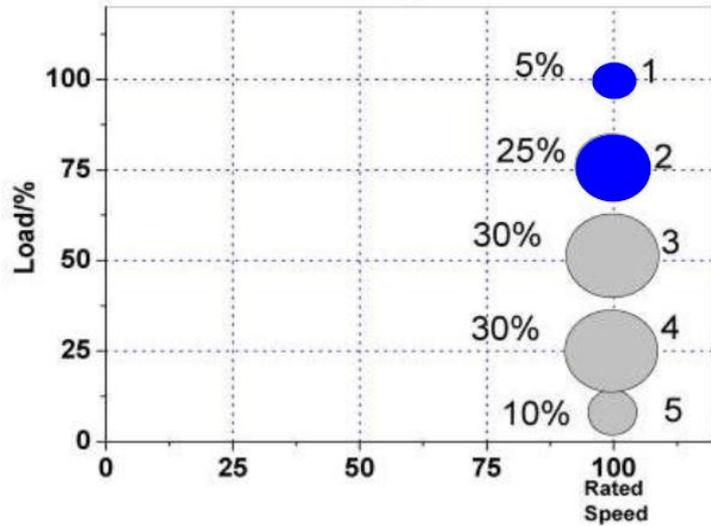


图 1 D2 测试循环 NOx 权重

根据 D2 测试循环的 NOx 权重分配，初步确定了负荷特性点上不同工况的 NOx 排放目标，如图 2~图 3 所示。图中蓝色表示各工况的 NOx 排放量，红色表示为该工况 NOx 的质量流量占各工况 NOx 总质量流量的百分比。针对“低排放”和“低油耗”两种运行模式下的 NOx 分配权重，以及两种模式的设计目标，制定了喷油参数、EGR 率、废气旁通阀开度等因素的相关控制策略。

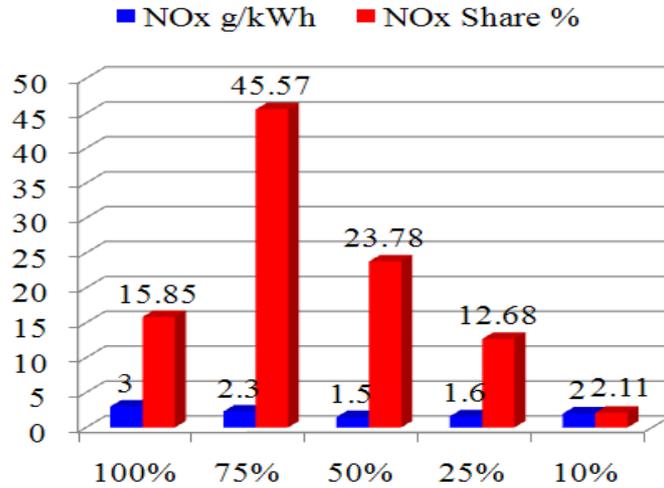


图 2 低排放模式下各工况 NOx 分配

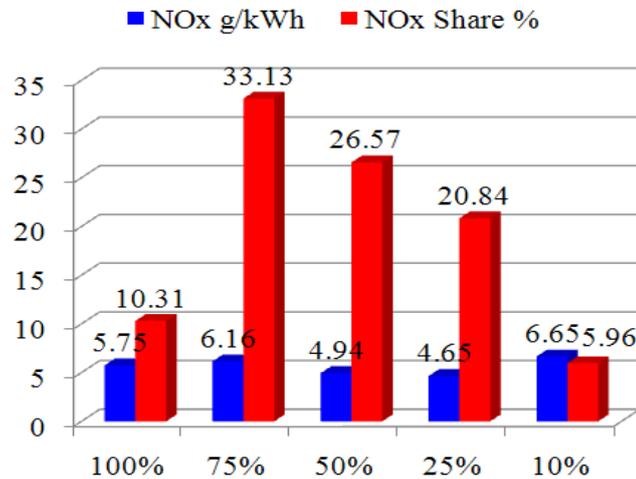


图 3 经济型模式下各工况 NOx 分配

3 仿真模型与计算边界

3.1 模型说明

图 4 是柴油机采用 EGR 结合两级增压系统后的仿真计算模型，相较于原机模型，本模型新增了两级增压系统和 EGR 系统，在仿真计算时，为了便于调节和优化柴油机的 EGR 率，添加了 EGR 率控制模块，即通过调节 EGR 阀的开度来改变循环废气量，从而实现不同的 EGR 率。仿真模型的标定基于“十二五”EGR 和两级增压项目，并且，分别经 EGR 和两级增压配机试验验证，仿真模型精度较高，可用于 EGR+两级增压系统仿真计算。

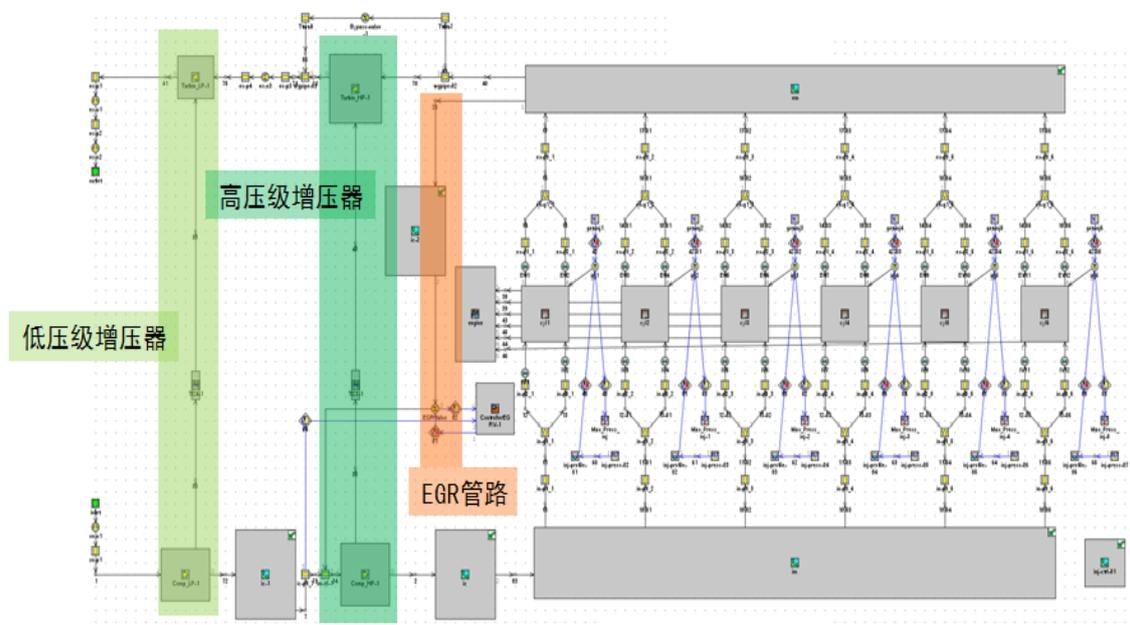


图 4 6CS21/32 柴油机 EGR 结合两级增压系统仿真计算模型

3.2 柴油机边界参数

目标机型的主要性能参数边界及计算指标要求。

表 1 6CS21 柴油机性能参数边界及要求

性能指标	参数值	备注
缸径×冲程/(mm×mm)	210×320	
额定转速/(r/min)	1000	
单缸额定功率/(kW/cyl)	220	
设计爆压/(MPa)	25	运行限值 22MPa
加权 NO _x 排放/(g/kWh)	≤ 2	T III 指标, 低排放模式
	≤ 5.58	经济型模式指标

综合 BSFC/(g/kWh)	≤ 245.7	T III 指标, 原机 245.7
	≤ 240.8	经济型模式指标, 降低 2%

4 主要设计原则及思路

4.1 主要设计原则

柴油机在制定控制策略时, 应遵循的主要设计原则如下:

(1) 控制策略简单化。在满足柴油机的功率、排放、燃油经济性等技术指标的同时, 应尽可能采用简单的控制策略。在能够通过单一或多种调节手段满足指标要求时, 为了降低控制策略的复杂程度, 应优先选择单一的调节方式;

(2) 充分利用两级增压系统优势。两级增压系统的增压压比能达到 6.0 以上, 具有更大的进排气压差, 可以增加扫气量, 在满足功率提升要求的前提下, 应充分利用该优势, 有效控制热负荷。

(3) 策略切换简易、平顺。由于本文的研究目标主要针对“低排放”和“低油耗”两种运行模式, 因此在控制策略制定时, 应首先保证柴油机在上述两种模式下稳态性能指标的实现, 在负荷切换时, 还应考虑加速加载的时间、负荷切换的平顺以及边界条件的限制等。

4.2 主要设计思路

根据设计目标及设计原则, 柴油机在“低排放”和“低油耗”两种运行模式下的主要设计思路如图 5 所示, 具体如下:

(1) 控制策略的调节与优化

根据“低排放”和“低油耗”两种运行模式的技术指标差异, 分别制定相应的控制策略。但考虑不同工况点可调参数的多样性与复杂性, 应优先调整喷油策略, 其次再考虑调整 EGR 阀、旁通阀的开度等参数;

(2) 控制策略及性能边界的控制

为了满足“低排放”和“低油耗”两种运行模式的不同工况, 在策略制定后, 需要根据预先设计好的 EGR 率控制 MAP 调节 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀门的开度, 并根据柴油机试验具体情况, 在保证性能边界参数可控的情况下, 为了保证上述两种运行模式的实现, 对控制策略进行相应调整。

(3) EGR 系统关键零部件性能监测

由于 EGR 气体存在一定的腐蚀作用, 因此在柴油机 EGR 系统运行过程中, 需实时监测 EGR 冷却器前后压差、EGR 冷却水前后压差以及 EGR 冷却温度信号, 保证 EGR 冷却器能高效工作。同时, EGR 系统需要实施监测 EGR 阀的工作状态, 当 EGR 阀门或 EGR 冷却器等关键部件出现异常, EGR 控制系统能及时向柴油机 ECU 发出相应故障代码, ECU 能够根据故障代码执行相应的安全保护动作。

(4) 其他应急状态控制

当柴油机本体相关参数产生报警时（如高温冷却水出机温度、滑油进机温度、滑油进机压力、增压器滑油进口压力、增压器滑油出口温度、高温水进机压力、低温水进机压力），EGR 控制系统应根据要求实现对 EGR 系统相应执行器动作。

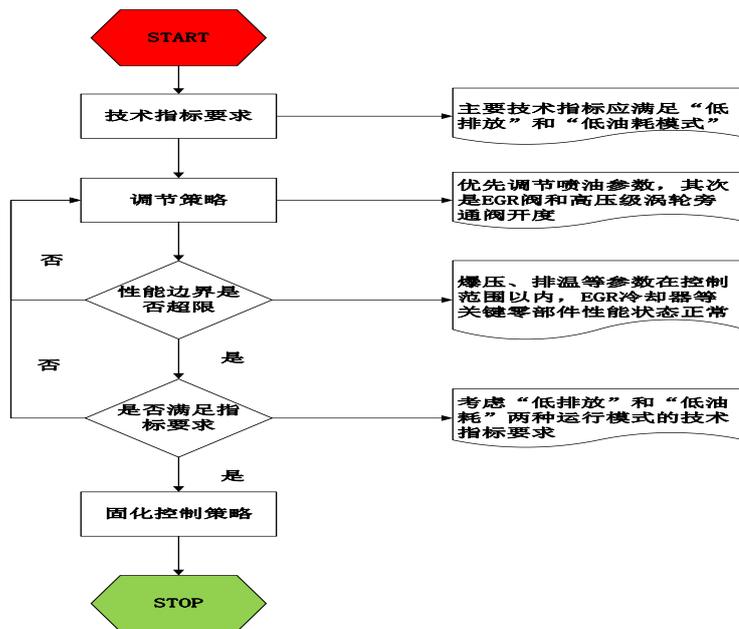


图 5 主要设计思路流程图

5 EGR+两级增压柴油机控制策略的制定

5.1 控制策略的基本框架及切换条件

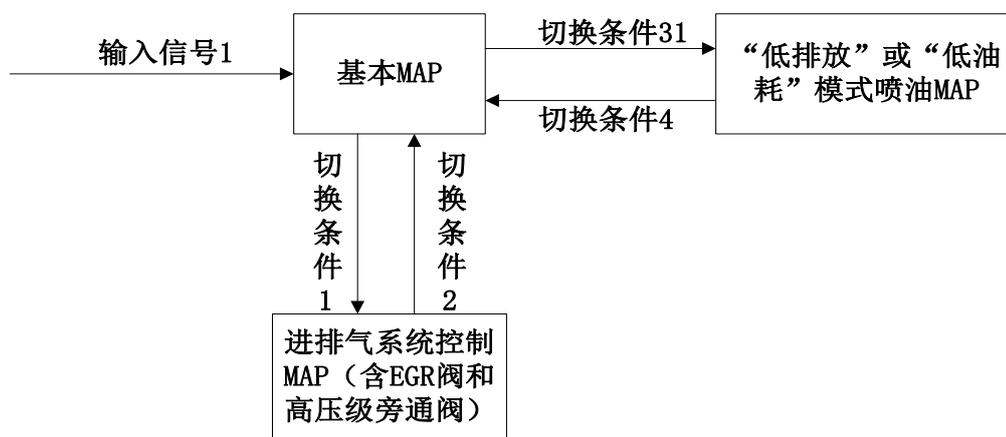


图 6 柴油机控制策略及运行状态切换条件

输入信号 1：当给定输入信号 1 时，柴油机能过触发基本 MAP，输入信号 1 主要包括柴油机的转速、扭矩等；

切换条件 1：满足 EGR 系统或高压级涡轮旁通阀的使能条件、满足燃油系统使能条件、满足发动机工况稳定条件、满足其他相关参数条件要求；

切换条件 2：EGR 系统或高压级涡轮旁通阀的使能条件不满足要求，或柴油机的转速、扭矩等

参数发生变化时，触发切换条件 2；

切换条件 3：满足“低排放”或“低油耗”目标运行模式时，柴油机的喷油参数控制 MAP。切换时，主要以柴油机的转速、扭矩同时满足切换条件，且 EGR 阀或高压级涡轮旁通阀开始动作后，柴油机的执行机构才开始从基本 MAP 切换至目标模式喷油 MAP；

切换条件 4：当柴油机的转速、扭矩、EGR 阀、高压级涡轮旁通阀，其中任一参数不满足“低排放”或“低油耗”模式要求时，执行机构直接从目标模式的喷油 MAP 切换至初始状态，随后关闭 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀；

基本 MAP：主要指以满足安保措施的前提下，柴油机在不开启或尽可能晚开启 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀时，从起动到额定负荷的全工况初始 MAP。柴油机在从稳定工况切换至另一工况时，对于未覆盖的工况点，主要以基本 MAP 的线性插值得到；

进排气系统控制 MAP：该策略主要为 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀的相关控制 MAP。柴油机由于采用了两级增压系统，进气压力和进气质量流量较大，在不开启 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀时，存在中高工况爆压超限等问题。因此，在加载过程中，当柴油机的转速和扭矩满足 EGR 系统或高压级涡轮旁通阀的切换条件时，切换至相应控制 MAP；

“低排放”或“低油耗”模式喷油 MAP：该策略表征柴油机满足 EGR 系统和高压级涡轮旁通阀的使能条件，且在发动机工况稳定后，柴油机燃油系统的切换至相关控制 MAP。在该状态条件下柴油机的转速、扭矩信号进行发动机工况判断，随后 EGR 阀和高压级涡轮旁通阀发出相应控制信号，最后燃油系统相关执行器动作。

根据上述分析，柴油机在初始状态下执行基本 MAP，在“低排放”或“低油耗”模式下，执行进排气系统控制 MAP 和目标模式喷油 MAP，在加减载过程中，通过基本 MAP 线性插值得到相关控制策略。

5.2 基本 MAP 的制定

当柴油机系统处于初始化状态时，控制模块将根据转速和扭矩信号，查 MAP 图，从而确定 EGR 阀、高压级涡轮旁通阀开度以及喷油策略。根据上述分析，基本 MAP 的主要功能为满足柴油机爆压、涡前排温等限值时，柴油机能够可靠运行的初始化状态，因此基本 MAP 的制定，应以爆压、排温等参数为计算边界，以油耗和 NOx 排放最低、EGR 率或高压级涡轮旁通阀尽可能不开或开启角度最小为原则。仿真计算时，爆压限值为 220 bar、涡前排温为 650℃。

通过开展仿真计算，最终得到如表 2 所示的基本 MAP。计算结果显示，由于采用两级增压后进气压力的增加，柴油机在 85% 及以上工况时，需通过开启高压级涡轮旁通阀以降低爆压。

表 2 柴油机初始化状态基本 MAP

工况点	扭矩	旁通阀开度	EGR 率	轨压	喷油正时	循环油量
%	N.m	°	%	bar	°CA	mg/cyl
110%	13874	34	0	1672	-8	1630
100%	12649	32	0	1555	-10.8	1474

工况点	扭矩	旁通阀开度	EGR 率	轨压	喷油正时	循环油量
%	N.m	°	%	bar	°CA	mg/cyl
90%	12621	31	0	1555	-10.8	1353
85%	12633	30	0	1555	-10.8	1247
75%	9453	0	0	1585	-11.9	1183
60%	6285	0	0	1375	-8	1056
50%	6316	0	0	1375	-8	924
40%	3151	0	0	1325	-8.4	777
25%	3151	0	0	1325	-8.4	519
15%	1260	0	0	1300	-10	352
10%	1259	0	0	1300	-10	352

5.3 目标模式控制 MAP 的制定

对于柴油机的“低油耗”和“低排放”两种运行模式，100%工况为柴油机的常用工况，75%工况为油耗及 NO_x 排放的权重点。根据方案设计阶段排放指标，以及全工况的权重分配比例，开展柴油机在不同工况点的优化匹配分析，并制定相应的控制策略。

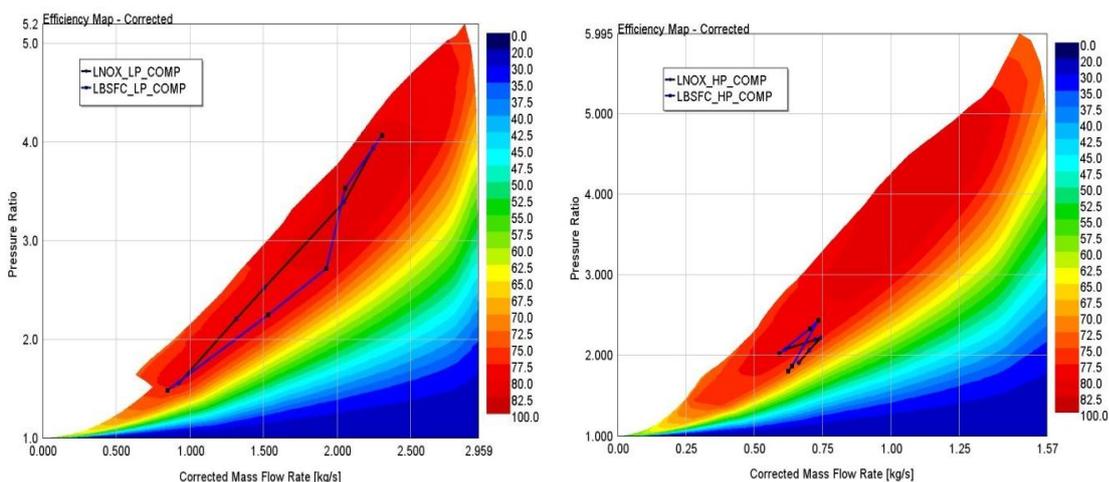
以“低排放”和“低油耗”两种运行模式的主要技术指标为目标，通过调整 EGR 率、进排气旁通阀开度以及喷油参数设置等方式，开展了柴油机在全工况优化匹配计算，得到的计算结果如图 7 和表 3 所示。根据计算结果可以看出：

(1) 根据计算结果，在两种运行模式下，柴油机在不同工况下的联合运行线均处于增压器的高效区，且有超过 13% 的喘振裕度。

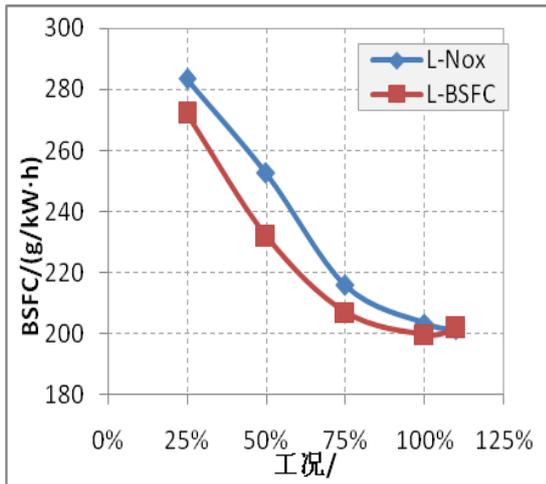
(2) 对于两种运行模式，随着工况的降低，柴油机的油耗逐渐降低，涡前排温逐渐增加，柴油机的最高爆压不超过 220bar，涡前排温最高不超过 590℃；

(3) 由于 75%、100% 工况的权重较大，所以在“低油耗”模式下，将爆压用足以降低柴油机的油耗，在“低排放”模式下，牺牲部分油耗以降低缸内的 NO_x 排放；

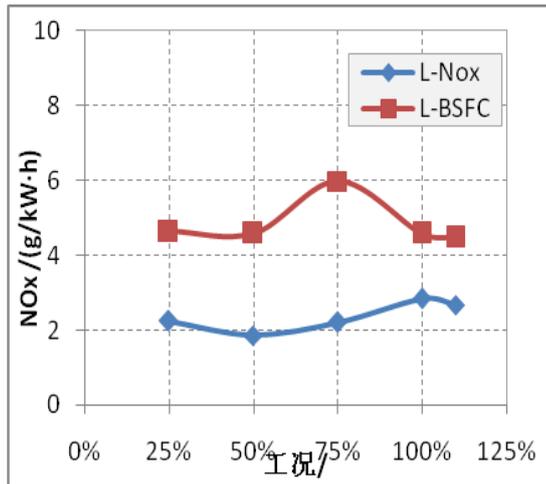
(4) 对于“低油耗”模式，柴油机的加权 NO_x 排放为 2.1g/kW·h，加权油耗为 242.5g/kW·h；对于“低排放”模式，柴油机的加权 NO_x 排放为 5.1g/kW·h，加权油耗为 230.0 g/kW·h，均满足项目建议书要求。



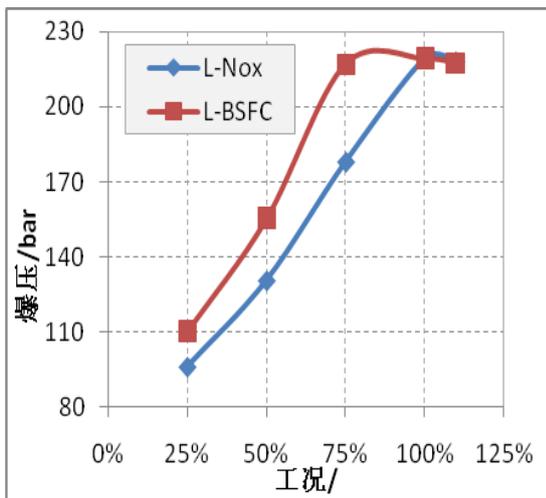
(a) 低压级压气机匹配结果



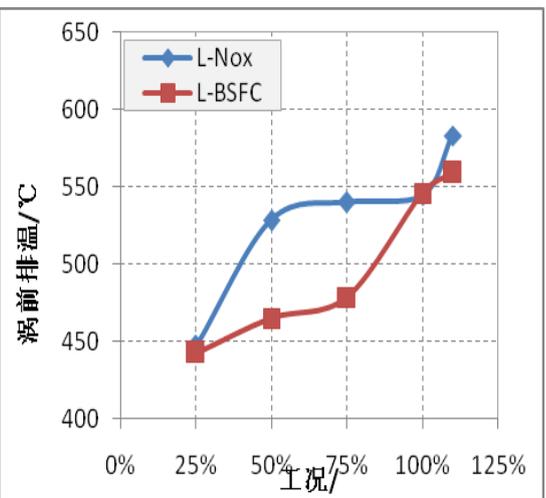
(b) 高压级压气机匹配结果



(c) 油耗变化



(d) NOx 排放变化



(e) 爆压变化

(f) 涡前排温变化

图 7 柴油机全工况的综合性能分析

表 3 综合性能匹配结果

类别	工况点	轨压	功率	NOx	加权 NOx	BSFC	加权 BSFC
/	%	bar	kW	g/kW-h	g/kW-h	g/kW-h	g/kW-h
低排放	110%	1793	1455	2.7	/	201.3	/
	100%	1555	1322	2.8	2.1	203.4	242.5
	75%	1585	990	2.2		215.9	
	50%	1375	662	1.9		252.6	
	25%	1325	330	2.2		283.4	
	10%	1300	132	0.289		478.9	
低油耗	110%	1780	1456	4.5	/	201.7	/

类别	工况点	轨压	功率	NO _x	加权 NO _x	BSFC	加权 BSFC
/	%	bar	kW	g/kW-h	g/kW-h	g/kW-h	g/kW-h
	100%	1725	1322	4.6	5.1	199.8	230.0
	75%	1680	991	6.0		207.0	
	50%	1510	662	4.6		231.8	
	25%	1600	330	4.6		272.1	
	10%	1496	132	0.397		469.8	

根据上述计算结果，在“低排放”和“低油耗”两种运行模式下，柴油机的进排气系统控制 MAP 和喷油控制 MAP 如表 4、表 5 所示。而基本 MAP、目标模式进排气系统控制 MAP 以及喷油控制 MAP 的切换逻辑如前文所述，即柴油机默认状态为基本 MAP，加载时，转速、扭矩达到稳态工况要求、同时满足切换条件时，优先切换进排气系统控制 MAP，其次再切换喷油控制 MAP；在卸载时，优先调整目标模式喷油 MAP 至基本 MAP，然后再切出进排气系统控制 MAP。

表 4 进排气系统控制 MAP

类别	工况点	转速	扭矩	旁通阀开度	EGR 率
/	%	r/min	N.m	°	%
低排放	110%	1000	13892	24.16	13
	100%	1000	12622	16.76	11
	75%	1000	9455	0	17
	50%	1000	6320	0	15
	25%	1000	3150	0	0
	10%	1000	1256	0	0
低油耗	110%	1000	13901	30	6
	100%	1000	12623	26.8	6
	75%	1000	9458	0	0
	50%	1000	6324	0	0
	25%	1000	3149	0	0
	10%	1000	1256	0	0

表 5 目标模式的喷油控制 MAP

类别	工况点	转速	扭矩	轨压	喷油正时	循环油量
----	-----	----	----	----	------	------

/	%	r/min	N.m	bar	°CA	mg/cyl
低排放	110%	1000	13892	1793	-11.4	1627
	100%	1000	12622	1555	-10.8	1494
	75%	1000	9455	1585	-11.9	1187
	50%	1000	6320	1375	-8	929
	25%	1000	3150	1325	-8.4	519
	10%	1000	1256	1300	-10	351
低油耗	110%	1000	13901	1780	-8	1631
	100%	1000	12623	1725	-11	1467
	75%	1000	9458	1680	-10.6	1139
	50%	1000	6324	1510	-10.3	853
	25%	1000	3149	1600	-14.6	499
	10%	1000	1256	1496	-11	345

6 小结

根据“低排放”和“低油耗”两种运行模式的性能指标要求，本文通过一维仿真分析的方法，确定了柴油机的基本 MAP、进排气系统控制 MAP 以及目标模式喷油控制 MAP，并得到以下结论：

(1) 通过调整 EGR 率、高压级涡轮旁通阀的开度、优化喷油参数设置等方式，柴油机在“低排放”模式下的加权油耗为 242.5 g/kW·h，加权 NO_x 排放为 2.1 g/kW·h，在“低油耗”模式下的加权油耗为 230.0 g/kW·h，加权 NO_x 排放为 5.1 g/kW·h，均满足项目建议书的指标要求；

(2) 基本 MAP 为柴油机的默认状态，柴油机在 85%及以上负荷时，需通过提前开启高压级涡轮旁通阀来降低爆压的限制；而对于加、减载状态，则通过对基本 MAP 线性插值的方式得到瞬变工况的喷油 MAP；

(3) 在转速、扭矩达到稳态工况要求，同时柴油机满足切换条件时，在加载时，优先从基本 MAP 调整至进排气系统控制 MAP，其次再调整目标模式喷油控制 MAP；在减载时，优先切出目标模式喷油 MAP 至基本 MAP，然后再关闭进排气系统控制 MAP。

7. 参 考 文 献

- [1] 张晋东, 李洪武. 车用柴油机涡轮增压技术的新发展[J]. 车用发动机, 2002 (1): 1~4.
- [2] Michel R. Honeywell Turbo Technologies. Future Diesel PV Technical Trends[R]. The Beijing 2006 Forum on Sustainable Development of Internal Combustion Engines, April, 2006, Beijing.
- [3] 袁锋, 郑尊清, 尧命发, 等. 二级增压重型柴油机排放和燃烧特性的试验研究[J]. 内燃机工

程, 2012, 33(4):9-16, 21.

[4] Unemasa Hashimoto. BSFC Improvement and NO_x Reduction by Sequential Turbo System in a Heavy Duty Diesel Engine[C]. SAE paper 2012-01-0712.

[5] Pflüge F, Regulated Two-Stage Turbocharging-3K-Warner's New Charging System for Commercial Diesel Engines, Imech: The Sixth International Conference on Turbocharging and Air Management System, London, UK :1998.

[6] Lü L, Wang L. Model-based optimization of parameters for a diesel engine SCR system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, (14):13-18.

[7] 李胜达, 石磊, 邓康耀. 两级增压柴油机增压器匹配方法及压比分配研究[J]. 铁道机车车辆, 2011. 10.