

基于 GT-POWER 的电控高压共轨柴油机开发

The electronic control common rail diesel development based on GT-POWER

刘威 张波涛 邓礼建 李勇

(东风康明斯发动机有限公司 湖北襄阳 441004)

摘要: 文章通过 GT-POWER 软件模拟仿真, 辅助开发电控高压共轨柴油机。主要工作包括发动机硬件选型 (包括活塞强度、燃油系统、增压器)、ECM 电控标定 (ECM 为发动机电控模块, 电控标定控制了柴油机燃油喷射参数, 如喷油提前角、喷射压力、预喷、后喷等) 开发两个部分。结果显示, 通过模拟准确的进行了硬件选型, 并较为准确地开发了 ECM 电控标定。本文创新点在于通过在模型中建立 ECM 电控标定逻辑, 实现模拟仿真与试验开发过程的一致; 模型能够准确预测发动机大部分负荷区的性能; 模型能够直接预测输出发动机 ECM 电控标定。

关键词: GT-POWER 电控高压共轨柴油机 硬件选型 电控标定开发

Abstract The paper introduces a Electronic-Control-Common-Rail-Diesel development based on GT-POWER software, including the hardware selection (piston strength\fuel system\turbocharger); ECM electronic calibration development (ECM— engine electronic control module. The electric control calibration controls the engine fuel injection parameters, such as the start of injection, injection pressure, pilot injection, post injection and so on). It is proved that hardwares were chose and the calibration of ECM was performed successfully by the simulation. The followings are the innovation points: Reconcile simulation with test development by establish ECM logic in model; The model could accurately predict performance in most engine operating points; The model could output engine ECM electronic calibration parameters.

Key words: GT-POWER Electronic-Control-Common-Rail-Diesel Hardware-Selection Electronic calibration development

1 前言

随着柴油机技术发展, 电控高压共轨技术逐渐成为柴油机的主流技术之一^[1-2]。电控高压共轨柴油机通过写入 ECM 中的电控标定, 实现了燃油喷射的柔性控制, 大幅优化了发动机的性能。但随之而来的开发过程需要综合考虑更多的变量, 使开发的时间与成本呈指数关系增加。为了减少发动机开发的时间与成本, 考虑采用 GT-POWER 建立了一种“自动化”的电控高压共轨柴油机模型^[3-4], 方便、快捷、准确的辅助发动机开发^[5]。模型按照传统试验开发方法建立, 同时将模拟的中间过程实

现自动辨识、控制，使模拟开发过程与传统试验开发一致，以供非模拟专业的发动机性能工程师使用，该类型模型已成为成熟，并广泛使用的工具。本文研究内容主要包括发动机硬件选型、ECM 电控标定开发两个部分。

2 模型建立及验证

2.1 GT-POWER 模型建立

本文研究对象为某 8.3L 的电控高压共轨柴油机。文中建立的 GT-POWER 模型在结构上分为两个部分：发动机本体部分和 ECM 电控标定部分。其中，发动机本体部分用于描述发动机的硬件结构，包括进气系统、气缸体、排气系统、增压器等；ECM 电控标定部分用于描述部分发动机的电控策略，计算输出发动机燃油喷射参数，主要包括以下功能块：

- 1) 燃油系统标定策略：用以描述发动机燃油系统的固有特性，包括喷油器“加电时间\喷射压力\喷射油量”三者的关系、喷射开启延迟特性、喷射关闭延迟特性、多段喷射间的油量补偿特性等。
- 2) 平原\高原稳态标定策略：用以描述平原\高原稳态条件下的喷油提前角、喷射压力、预喷、后喷、喷射油量等参数。
- 3) 发动机保护标定策略：描述发动机因某些参数超出机械限值而进行降低功率的保护策略。
- 4) 虚拟传感器标定策略：描述某个不存在传感器的测量结果，提供某些参数的参考值。

ECM 电控策略部分计算燃油喷射参数（如喷油提前角、喷射压力、预喷、后喷等），并输出给发动机本体部分控制其燃油喷射特性。

2.2 GT-POWER 模型验证

模拟开发之前，需要对模型的准确性进行验证。考虑到模拟需求输出 ECM 电控标定，模型需在发动机全工作转速、全工作负荷上具有良好的精度。本文模型采用 DIJET 燃烧模型，对发动机全工作转速、全工作负荷的工况点进行了验证。

结果显示，模型各工况点缸压曲线符合良好，限于篇幅，本文仅给出额定点、最大扭矩点缸压曲线验证结果，如图-1；输出的性能参数方面，在 900rpm（转每分钟，后文中均使用 rpm）以上转速范围、30%负荷以上的工况范围内，最大误差小于 5%，平均误差约为 2%左右（（模拟值-实测值）/实测值*100%）。其中误差考察的性能参数包括功率、扭矩、比油耗、空气消耗量、各关键位置温度\压力、增压器转速、缸内爆发压力等等，如表-1（文中仅给出比油耗误差结果，表中带下划线数据为误差超出 5%的工况点）。

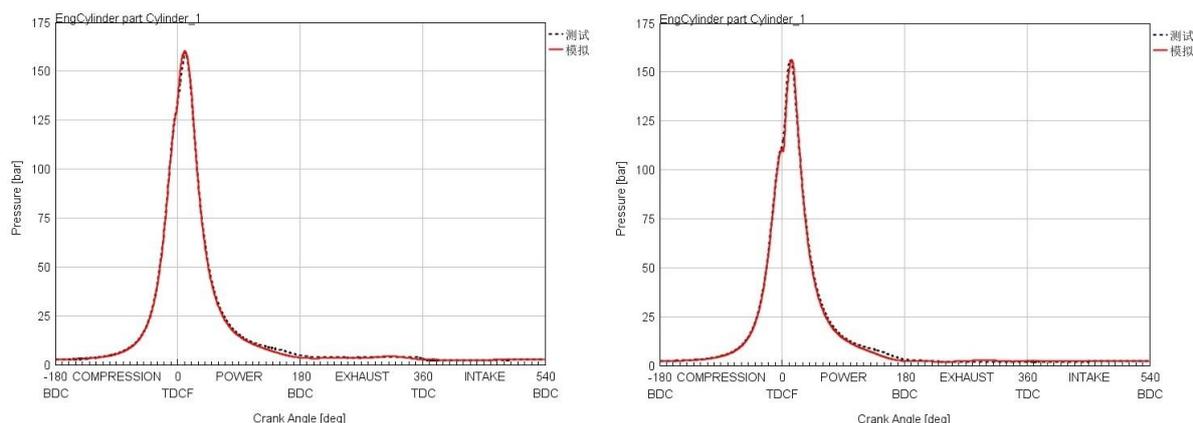


图-1 额定点（左）、最大扭矩点（右）缸压曲线对比结果

表 1 发动机比油耗误差表 (单位%)

负荷率(%)							
转速 (rpm)	100%	80%	60%	40%	30%	20%	10%
2100	0.00%	0.13%	1.10%	2.19%	1.76%	0.41%	4.88%
2000	0.01%	0.45%	1.10%	2.43%	1.11%	1.27%	<u>7.60%</u>
1900	0.18%	0.61%	0.36%	1.06%	0.07%	2.73%	<u>10.17%</u>
1800	0.24%	0.50%	0.62%	0.83%	0.58%	3.78%	<u>11.89%</u>
1700	0.37%	0.55%	0.70%	0.79%	0.34%	4.19%	<u>13.60%</u>
1600	0.72%	0.89%	1.16%	0.73%	0.99%	4.84%	<u>16.75%</u>
1500	0.96%	1.40%	1.55%	1.04%	1.06%	<u>5.29%</u>	<u>15.13%</u>
1400	1.17%	1.46%	1.91%	0.82%	1.22%	<u>5.38%</u>	<u>14.77%</u>
1300	1.46%	1.15%	1.85%	0.73%	1.21%	<u>5.74%</u>	<u>13.16%</u>
1200	1.79%	2.27%	2.47%	0.84%	0.95%	<u>5.95%</u>	<u>11.24%</u>
1100	2.88%	4.96%	3.25%	1.32%	0.55%	<u>6.02%</u>	<u>18.21%</u>
1000	4.19%	4.00%	4.82%	1.52%	1.70%	<u>7.66%</u>	<u>18.74%</u>
900	<u>5.88%</u>	<u>5.66%</u>	4.06%	1.46%	2.54%	<u>10.81%</u>	<u>23.17%</u>
800	<u>6.80%</u>	<u>7.29%</u>	4.59%	0.98%	3.27%	<u>11.41%</u>	<u>26.24%</u>

综上所述显示,模型在 900rpm 以上转速范围、30%负荷以上的工况区具有足够的精度,可以在该工况范围内开展下一步工作。

3 发动机硬件选型

在柴油机开发过程中,首先需要按照设计目标进行发动机硬件选型,继而在固化的硬件结构下进行 ECM 电控标定的开发,如调整喷油提前角、喷射压力、多段喷射等等,以满足排放、经济性等指标。考虑到实际客户需求,本文主要关注 1200~1700rpm 的发动机燃油经济性。

值得注意的是,在硬件选型的过程中,同时也伴随着对 ECM 电控标定的调整,旨在确认各硬件结构下能达到的最优性能,并据此进行最终的硬件对比选型。本文中对活塞强度、燃油系统、增压器进行了选型研究。

3.1 活塞强度选型

在发动机工作过程中,活塞强度在很大程度上决定了发动机的最高爆发压力限值,而爆压限值是影响发动机经济性的重要指标之一。一般而言,爆压限值越高,发动机中高负荷区的经济性越好^[6]。同时,发动机支持爆压限值越高,其成本越高,可靠性风险也越大。因此需要针对爆压限值对发动机燃油经济性的影响程度进行研究,推荐合适爆压限值的活塞。研究基于发动机外特性展开。

研究方法:以爆压限值作为限制条件,通过对电控标定中喷油提前角、喷射压力两个变量的配试寻优,确定各爆压限值下最优经济性,继而进行发动机爆压限值选型。考虑到发动机的实际硬件情况,本文研究三个爆压限值的活塞:158bar、165bar、175bar。结果如图-2 所示:

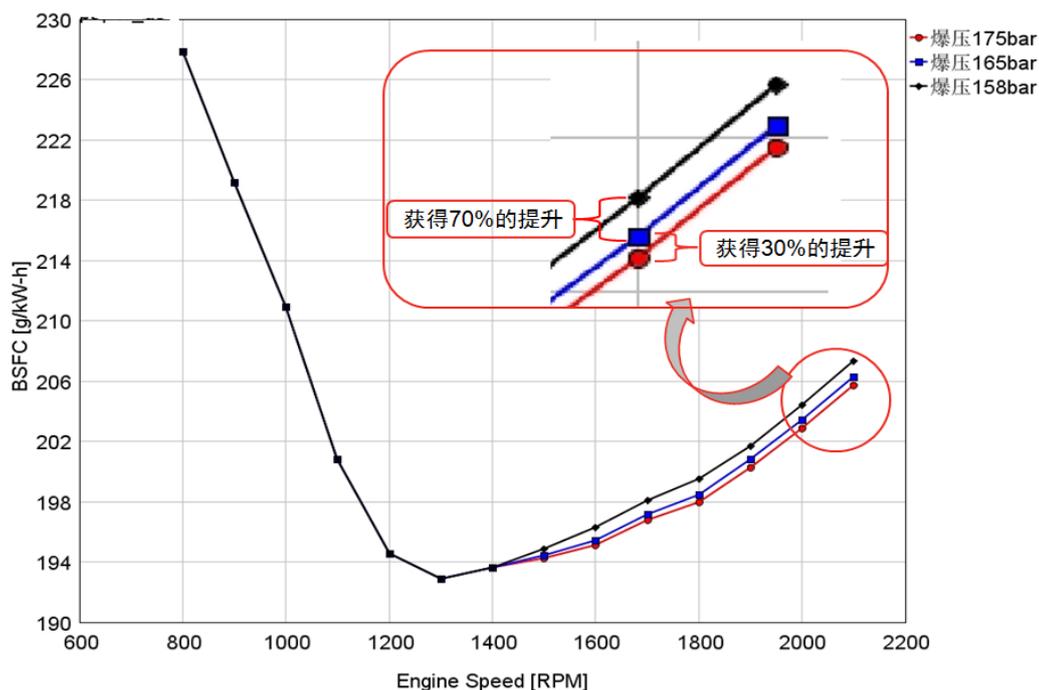


图-2 各爆压限值下外特性最优经济性对比结果

结果显示, 1400rpm 以上转速区, 经济性优劣依次为: 175bar 优于 165bar、优于 158bar; 1400rpm 以下转速区, 由于最优燃油经济性状态下的爆压值低于 158bar, 因此爆压限值对经济性无影响。在优化幅度上, 爆压限值从 158bar 提升 7bar 至 165bar, 获得约 70% 的经济性收益; 继续将爆压限值再提升 10bar 至 175bar, 仅获得约 30% 经济性收益。综合考虑燃油经济性与缸内载荷, 最终推荐 165bar 的爆压限值的活塞。

3.2 燃油系统选型

燃油系统决定了发动机的燃油喷射特性, 是影响发动机性能的最主要系统之一。对于电控高压共轨柴油机而言, 燃油系统的固有特性可以通过 ECM 电控标定中的燃油系统标定表征。

研究方法: 模拟通过更改 ECM 策略中的燃油系统标定部分来表征不同的燃油系统, 再进行喷油提前角、喷射压力两个变量进行正交配试, 确定各燃油系统下的最优外特性燃油经济性, 作为燃油系统选型依据。鉴于产品系列, 本文考虑两组燃油系统 A 与 B, 两者的主要区别表现为喷油器流量 (固定喷射压力、固定喷油器加电时间的喷油量) 不同, 即喷油器“加电时间\喷射压力\喷油量”三者的关系不同。本文中, 燃油系统 A 喷油器流量大于燃油系统 B, 两者喷油器流量为 1.4 倍关系。结果如图-3 所示:

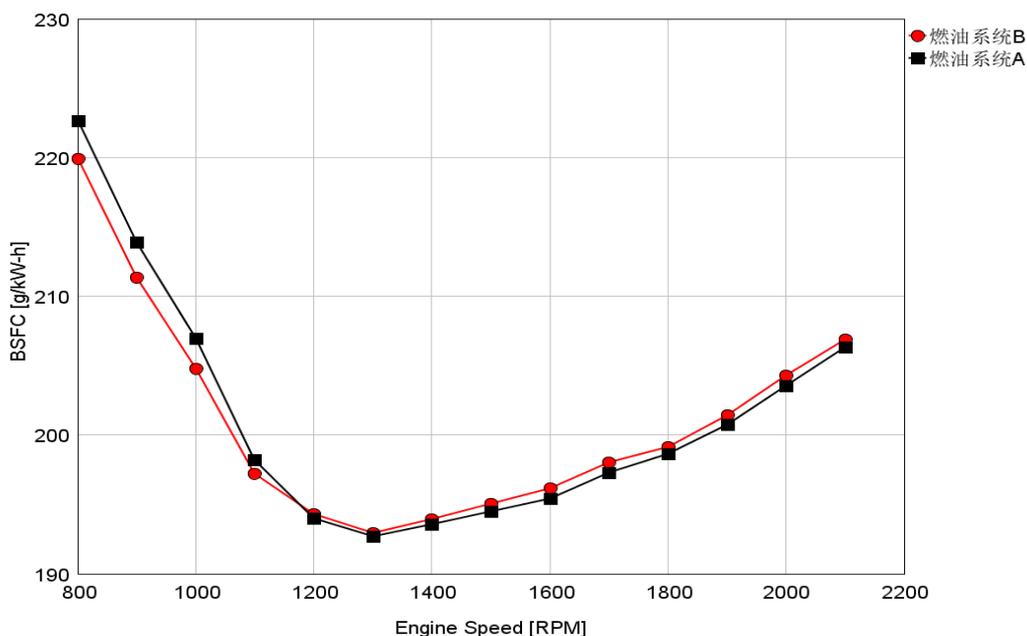


图-3 燃油系统外特性上最优经济性对比结果

结果显示, 1200rpm 以上转速范围, 燃油系统 A 燃油经济性优于 B; 1200rpm 以下转速区内反之。即大喷油器流量的燃油系统在 1200rpm 以上转速区经济性优于低流量燃油系统。

分析原因, 是由于喷油器流量更高的燃油系统在相同喷油量条件下的喷射时间较短, 可以在更短的时间内将燃油喷入气缸内组织燃烧, 有利于经济性的提高。但同时带来的问题是喷射雾化变差, 不利于经济性的提高。具体而言, 在 1200rpm 以上转速范围, 发动机进气充足, 缸内气体扰动强烈, 喷射时间短的影响大于雾化变差的影响, 导致经济性优化; 1200rpm 以下范围反之, 发动机进气不足, 缸内气体扰动不足, 导致经济性劣化。由于设计关注 1200rpm 至 1700rpm 转速范围, 因此推荐采用燃油系统 A。

3.3 涡轮增压器选型

涡轮增压器作为发动机主要性能零件, 很大程度上影响了发动机的动力性、经济区位置等性能。本文研究对象为机械废气旁通涡轮增压器, 针对增压器涡轮机喉口截面积及旁通阀开启压力进行选型。限于增压器供应商产品系列, 本文研究三款不同的增压器 A、B、C。三者区别在于涡轮机喉口截面积不同, A、B、C 喉口截面积依次变大。在涡轮机特性图上表现为随着喉口截面积的变大, 涡轮机特性图高效区向高流量方向移动。

研究方法: 首先根据增压器转速限值(三款增压器均为 105000rpm)确定各增压器旁通阀最大开启压力(见表-2)。在涡轮机不发生堵塞的前提下, 旁通阀开启压力越大, 发动机可利用的废气能量越多, 增压器转速越高, 进气量越大。确定旁通阀最大开启压力的目的是保证增压器在不超出转速限值的条件下, 最大程度提高进气量, 以满足动力性、经济性的要求。确定旁通阀开启压力后, 对喷油提前角、喷射压力进行配试寻优, 确认各增压器外特性上最优燃油经济性, 以此进行选型, 结果见图-4:

表 2 各增压器旁通阀开启压力、额定点增压器转速模拟结果

模拟结果	单位	增压器 A	增压器 B	增压器 C	限值
增压器最高转速	rpm	104395	104637	103321	105000
旁通阀开启压力	bar	2.03	2.25	2.3	

结果显示，三款增压器增压器转速均低于限值 105000rpm。随着涡轮机喉口截面积的增加，增压器允许的最大旁通阀开启压力逐渐增加，即增压器 A 开启压力小于增压器 B 小于增压器 C。分析原因是由于涡轮机喉口面积越小，更利于利用废气能量，较小的旁通阀开启压力已获得相对较高的增压器转速，最终导致最大开启压力随涡轮机喉口面积的增加而增加。

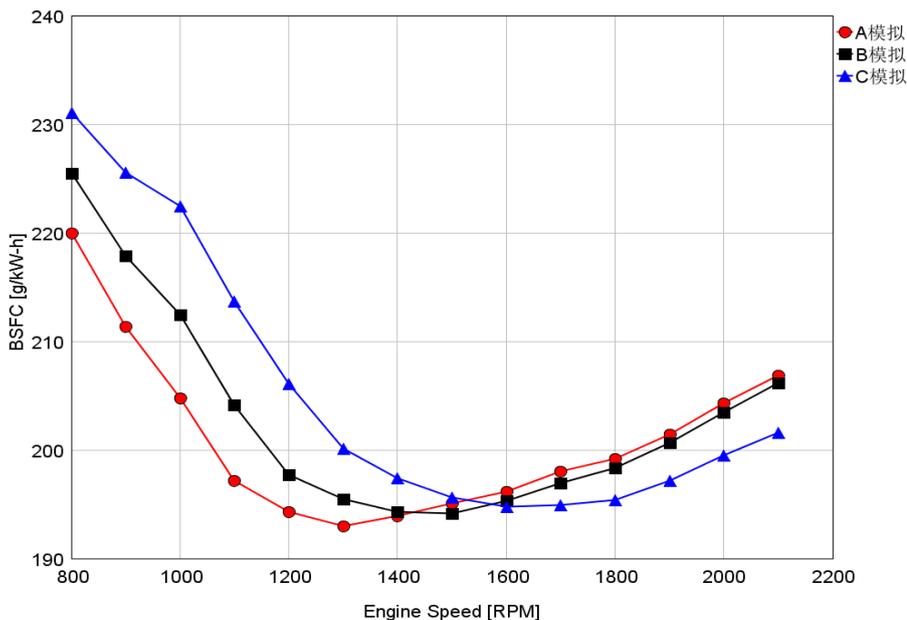


图-4 各增压器外特性上最优经济性对比模拟结果

图 4 结果显示，基于各开启压力，随着涡轮机喉口截面积的增加，经济区逐渐向高速区移动。其中，1450rpm 以上转速，增压器 A 劣于增压器 B，1450rpm 以下反之；1550rpm 以上转速，增压器 B 劣于增压器 C，1550rpm 以下转速反之。综合考虑设计转速范围 1200rpm 至 1700rpm，推荐发动机使用 A 增压器，即涡轮机喉口截面最小的增压器方案。

分析原因，增压器对发动机燃油经济性的影响在宏观上主要有进气量、泵气功两个方面。一般而言，在合适的空燃比范围内，进气量越大，发动机燃烧效率越高，做功冲程输出的功更多，但伴随而来的进排气冲程的泵气损失增加，在配试过程中需要权衡两者的影响。在发动机高速区，由于在该工况区进气充足，燃烧效率提高低于进排气阻力/泵气功的增加，因此涡轮机喉口面积越大，燃油经济性越好；低转速区，由于发动机常常对低速动力性要求较高，导致低速区空燃比显著低于高速区，即进气量相对较低，燃烧效率变化的影响大于排气阻力/泵气功的影响，因此涡轮机喉口面积越大，燃油经济性越差。

基于前文模拟结果开展了后期验证试验。验证试验首先按照模拟推荐的旁通阀开启压力进行试验研究，得到额定点增压器转速结果如表-3，外特性燃油经济性结果见图-5：

表 3 各增压器旁通阀开启压力、增压器转速试验结果

	单位	增压器 A	增压器 B	增压器 C	限值
增压器转速 (实测)	rpm	102683	104883	101854	105000
增压器转速 (模拟)	rpm	104395	104637	103321	105000
误差 (模拟-实测/实测*100%)	%	-1.67	-0.23	1.44	
旁通阀开启压力	bar	2.03	2.25	2.3	

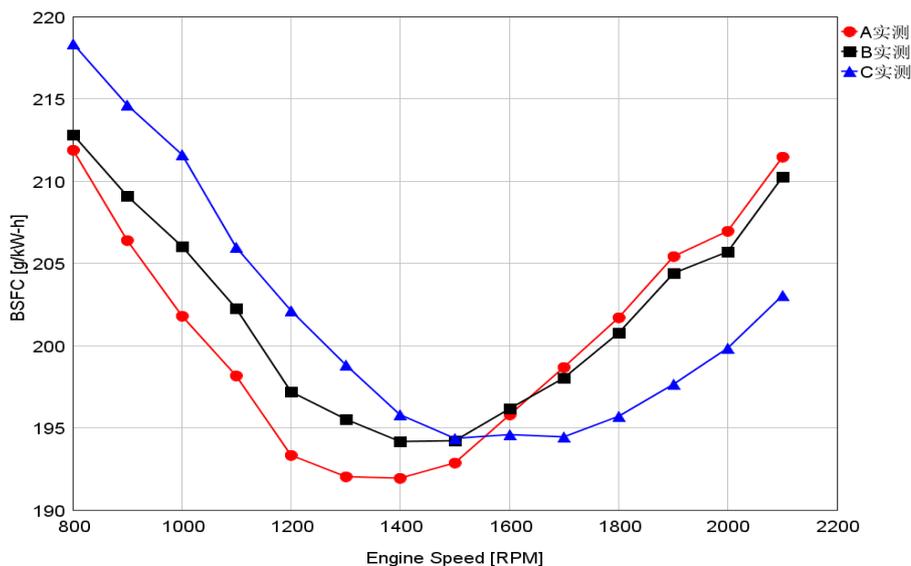


图-5 各增压器外特性上最优经济性对比实测结果

结果显示，模拟推荐的增压器旁通阀开启压力结果准确。在外特性燃油经济性方面，实测结果与模拟结果基本一致。不同的是 1600rpm 以上转速，增压器 A 经济性劣于增压器 B，1600rpm 以下转速反之；1500rpm 以上转速，增压器 B 经济性劣于增压器 C，1500rpm 以下转速反之。试验结果基本与模拟结果一致，在经济性优劣的分界转速上存在 100 rpm 左右的差异。

4 ECM 电控标定开发

通过模型中构建 ECM 电控策略，可以方便的模拟输出 ECM 电控标定。该功能旨在贴近传统试验开发，减少通过试验台架调整 ECM 电控标定的时间，同时扩大 GT-POWER 的使用者范围。

研究方法：模拟研究根据《GB-17951 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方式》国四 ESC 十三工况（怠速工况未模拟）NO_x 排放目标^[7]进行发动机端（发动机出口、后处理系统前）全转速范围、全负荷范围内的标定开发，开发过程关注喷油提前角、喷射压力两个参数。

在后期实际的试验开发过程中，基于模拟结果进行了喷油提前角、喷射压力两个参数的微调，得到模拟结果与试验结果的差异见表-4（以下仅给出 ESC 中 12 工况的差异）。

表-4 ESC 中工况点喷射提前角、喷射压力误差表

喷油提前角差别 (度曲轴转角)				喷射压力差别 (bar)			
负荷率	A 转速	B 转速	C 转速	负荷率	A 转速	B 转速	C 转速
100%	-1.2	-0.1	0.4	100%	88	62	47
75%	0.4	1	0.4	75%	-150	28	-120
50%	2.1	2	-1.5	50%	-149	-126	-112
25%	0.1	0.2	0	25%	-62	-33	115

通过上表 ESC 上误差结果显示,喷油提前角差异在 1 度曲轴转角左右,轨压差异在 100bar 左右。模型较为准确的输出了国四发动机端稳态标定。

另外,模型通过构建 ECM 高原逻辑,可以进行高原标定的模拟。

5 结论

- 1) 建立的 GT-POWER 模型可以有效、快捷地进行电控高压共轨柴油机的硬件选型。本文中推荐 165bar 爆压限值的活塞、喷油器流量较大的燃油系统、涡轮机喉口截面积最小的增压器。
- 2) 建立的 GT-POWER 模型可以较为方便、快捷、准确地进行 ECM 电控标定开发。

6 参考文献

- [1] Endo S, Adachi Y. Development of J-series engine and adoption of common-rail fuel injection system [J]. SAE 970818, 1999.
- [2] Tanaka T, Ando A, Ishizaka K. Study on pilot injection of DI diesel engine using common-rail injection system [J]. SAE Review, 2002, 23:297-302
- [3] 韩强, 杨福源, 张京永, 欧阳明高. 用于标定和优化的高压共轨柴油机建模. 清华大学学报(自然科学版), 2004 (11).
- [4] 邱森, 黄锦成, 张志强, 范毅. 仿真计算软件在高压共轨电控柴油机标定优化中的应用[J]. 内燃机与动力装置, 2008 (06).
- [5] 郑广勇. 工作过程计算在发动机开发中的应用[J]. 汽车技术, 2003 (09).
- [6] 白敏丽, 邵治家, 吕继组. 6106 柴油机性能研究及优化[J]. 工程热物理学报, 2008 (02).
- [7] GB17951-2005 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方式.