

整车瞬态加速时间影响因素分析

Analysis of Influencing Factors on Vehicle Transient Acceleration Time

马克, 刘系嵩, 豆佳永, 张秀英, 王一聪, 张静
(北京汽车股份有限公司汽车研究院 动力中心)

摘要: 以北汽某车型搭载一款增压汽油机为对象, 建立 GT-SUITE 仿真模型 (为了体现出发动机增压迟滞等效应, 发动机模型为详细的性能计算模型), 研究发动机采用不同技术措施对整车加速时间的影响。计算结果表明: 电子增压器对加速时间的影响最大, 增压器转动惯量、增压器摩擦次之。

关键字: GT-SUITE; 增压发动机; 电子增压器; 加速时间

Abstract: A vehicle simulation model is built by GT-SUITE (in order to reflect the effect of turbo lag and so on, the engine model is a detailed performance calculation model), investigating the effects on vehicle acceleration time after engine using different measures. The simulation result shows, eSC have the greatest effect on vehicle acceleration time, followed by inertia of turbocharge and friction of turbocharge.

Key words: GT-SUITE; turbocharged gasoline engine; electric supercharge (eSC); acceleration time

1 前言

车辆瞬态加速特性的好坏与用户驾驶感受直接相关, 为车辆动力性重要评价指标之一, 好的车辆加速特性, 能带给驾驶员更多的驾驶乐趣, 提升用户满意度, 因此, 在项目前期阶段使用 CAE 手段了解车辆加速特性显得十分有必要。在仿真计算中, 常规的整车动力性计算, 用稳态 WOT 扭矩作为发动机输出扭矩, 无法体现进排气系统气动、增压迟滞、发动机转动惯量、驾驶行为等对整车瞬态响应产生的影响, 并且在实际加速过程中, 发动机由于增压器迟滞等原因, 瞬态扭矩在低速并不能达到 WOT 状态^[1], 这使得如果使用稳态 WOT 扭矩作为发动机加速时的输出扭矩, 加速时间往往偏小, 这部分计算只能依靠经验修正。

基于以上原因, 本文建立了详细发动机模型下的整车联合仿真模型, 发动机输出扭矩是通过与整车耦合的详细发动机模型计算得到的, 能够体现出增压迟滞等瞬态效应, 并用此模型来研究发动机采用不同技术措施对整车加速时间的影响。

2 GT-SUITE 仿真模型建立

2.1 基本参数和模型

本文的研究对象为一辆 1.3 吨重的轿车和一台 1.5L 四缸涡轮增压发动机。在 GT-SUITE 中搭建该车和详细的发动机性能计算模型, 如图 1 所示。其中, 增压器转动部分的转动惯量, 对于发动机瞬态响应特性有着非常重要的影响, 需要准确输入, 可从增压器供应商处获得。如果发动机带有电子增压器, 还需输入电子增压器相关的特性参数。

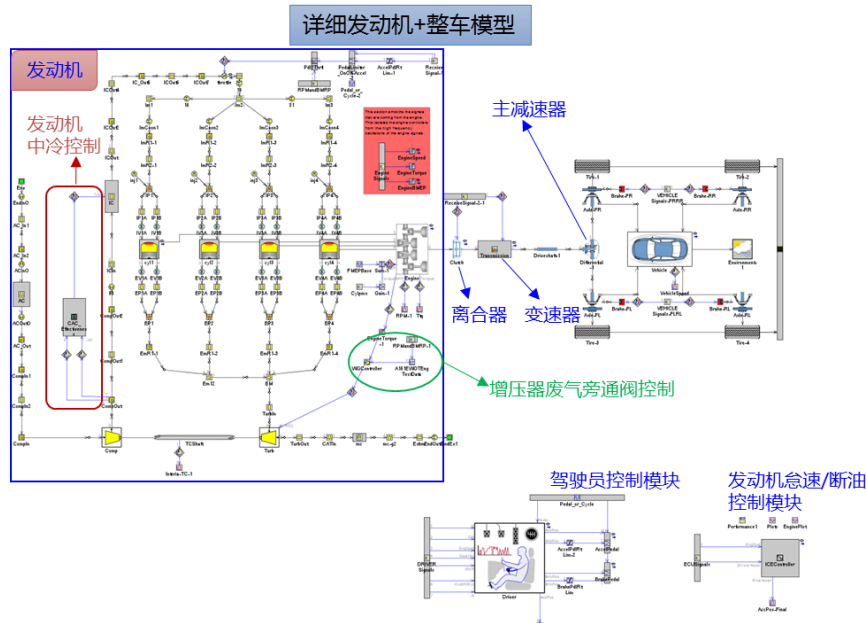


图 1 详细发动机+整车动力性计算模型

2.2 模型设置

在前期发动机性能计算中，中冷后温度结合试验结果设为转速、负荷相关的 MAP，转速、负荷一定，中冷后温度随之确定。瞬态计算时，即使同等负荷下进气状态也与稳态不完全一样，尤其是使用电子增压器后，压后气体温度更高，为使计算更加合理，中冷后温度通过中冷效率计算得到，中冷效率在中冷介质温度一定的情况下（计算中，中冷介质温度设为 25℃）与进气流量相关，若已有中冷效率试验数据，直接使用试验数据，若没有中冷效率试验数据，可根据性能试验中冷后温度和中冷介质温度反推得到一个估计的中冷效率，本文的中冷效率即是按后者的处理方式得到的。

$$\eta_{\text{中冷}} = \frac{T_{\text{压后}} - T_{\text{中冷后}}}{T_{\text{压后}} - T_{\text{中冷介质}}} \quad (1)$$

2.3 与常规整车计算模型的区别

- 图 2 为常规整车动力性分析计算模型，即用稳态 WOT 扭矩作为发动机输出扭矩，图 1 为详细发动机模型下的整车模型，即发动机输出扭矩是通过与整车耦合的详细发动机模型计算得到的，能够反映出增压迟滞等瞬态现象，使整车加速计算更合理；
- 相比常规模型，计算开始阶段，发动机输出扭矩为负且波动较大，因此必须要先进行一段时间的稳态计算，待发动机输出扭矩平稳后再进行瞬态计算。
- 相比常规模型，在提高计算精度的同时，计算时间也大幅度攀升，对此，发动机模型可以采用 FRM 模型^[2]折衷解决。FRM (Fast Running Engine Model)，是 GT-SUITE 中为加快计算速度而对发动机模型进行的一种简化处理，如图 3 所示，主要有两种转化方式：增加计算步长；减少每个步长的计算量。即通过损失一定的计算精度来节省大量的计算时间，计算精度及模型简化的程度可根据实际需要进行灵活的控制，对于关心的发动机输出结果，可保留较高的计算精度，对于无关重要的发动机输出结果，则可允许较大的误差。

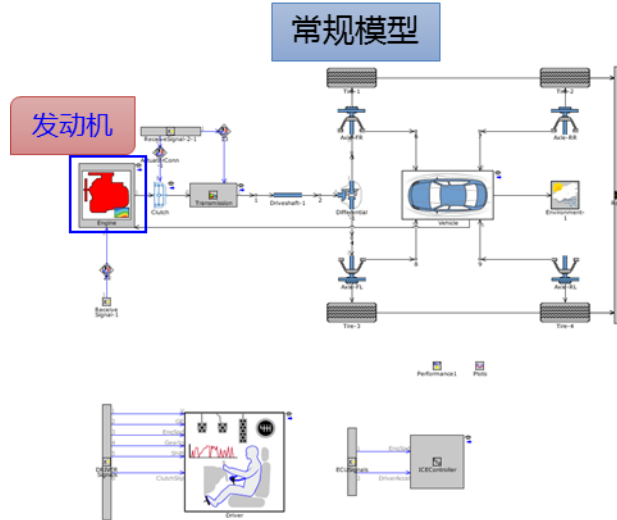


图 2 常规整车动力性计算模型

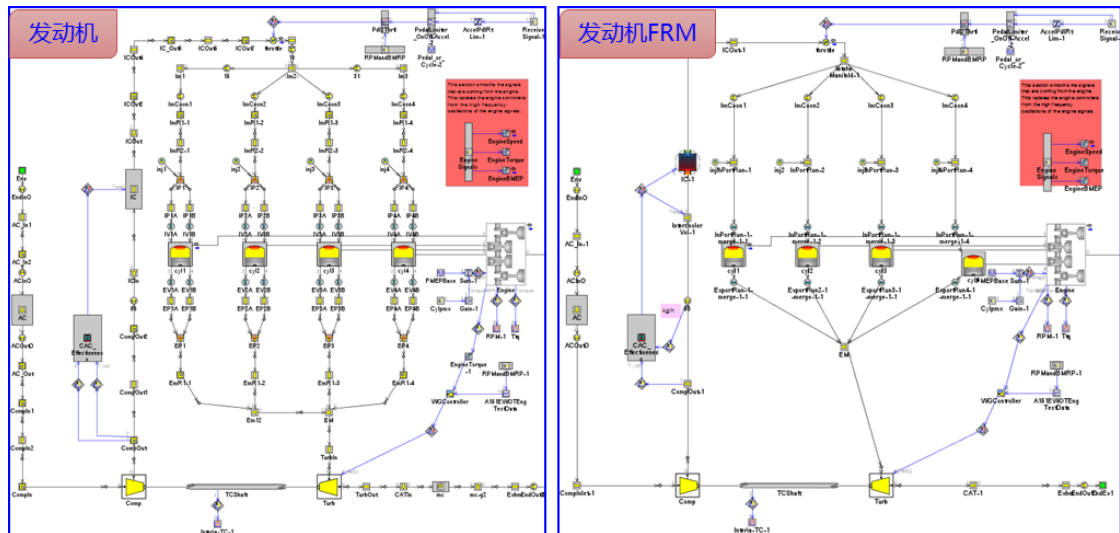


图 3 发动机模型转化为 FRM 模型示意

2.4 模型标定

根据整车 1、2 档加速试验数据结果进行模型标定，计算与试验吻合良好，如图 4 所示。

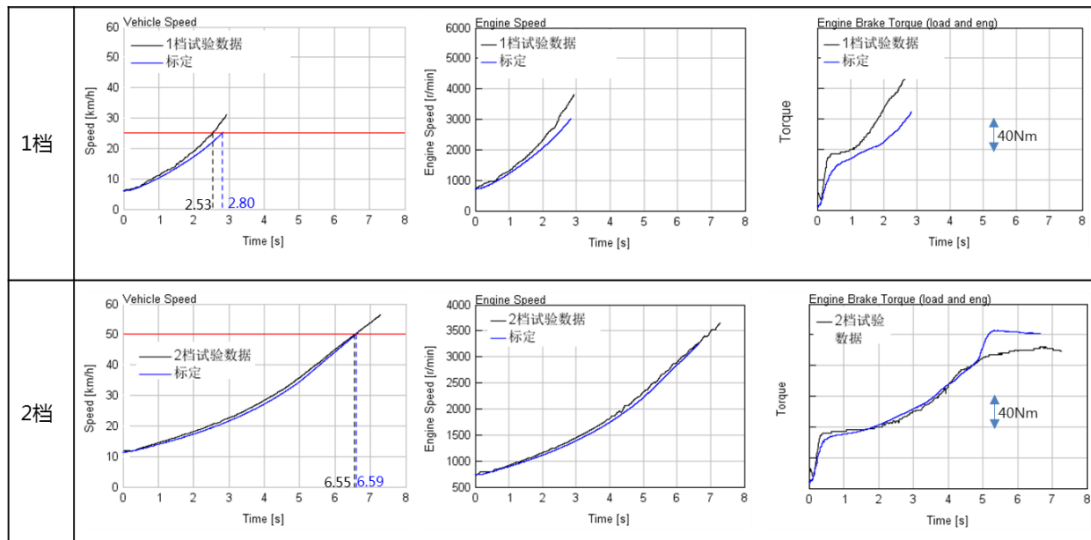


图 4 1、2 档加速时间标定结果

3 分析流程

详细发动机模型下的整车动力性分析，可进行 0-100km/h 加速、0-400m 加速和各档位定档加速的计算。与常规整车动力性计算模型主要区别为，发动机输出扭矩是通过与整车耦合的详细发动机模型计算得到的，而不是稳态 WOT 扭矩。计算模型搭建完成后，由于详细发动机模型在计算开始阶段得到的扭矩波动较大，可先进行稳态计算使发动机输出扭矩平稳，并将稳态计算结果作为瞬态计算的初始边界，然后进行瞬态计算。

以 2 档加速计算为例，其分析流程如所示：

- 1) 稳态计算（初始化）：计算开始阶段，发动机输出扭矩为负且波动较大，通过调节油门踏板位置、刹车踏板位置，最终使发动机输出平稳的扭矩，车速达到瞬态计算初始值，为瞬态计算做准备；
- 2) 瞬态计算：加速过程开始，油门踏板位置全开，刹车踏板位置为零，车速增加直到达到目标车速。若是进行 0-100km/h 加速、0-400m 加速等涉及到换挡行为的动力性分析，在换挡期间还需要进行油门踏板松开和离合器断开的操作。若发动机带有电子增压器，在瞬态计算时需增加电子增压器的控制逻辑（电子增压器转速和电子增压器旁通阀）。

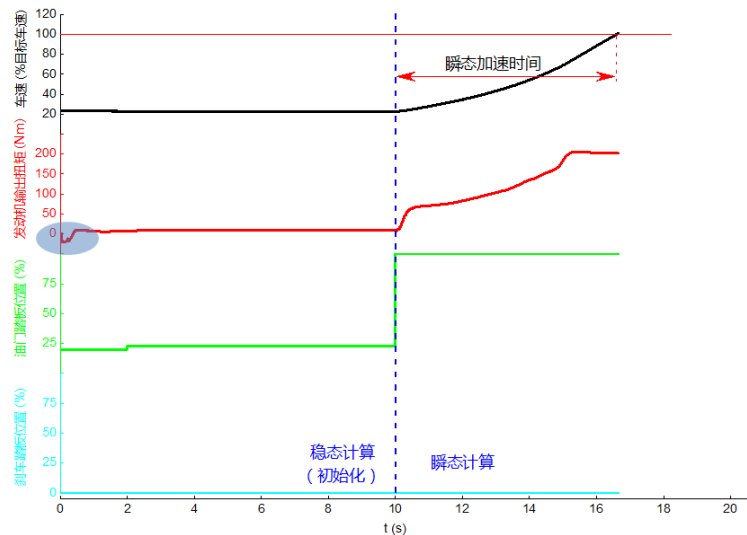


图 5 详细发动机模型下的整车动力性分析流程示意图（以 2 档加速为例）

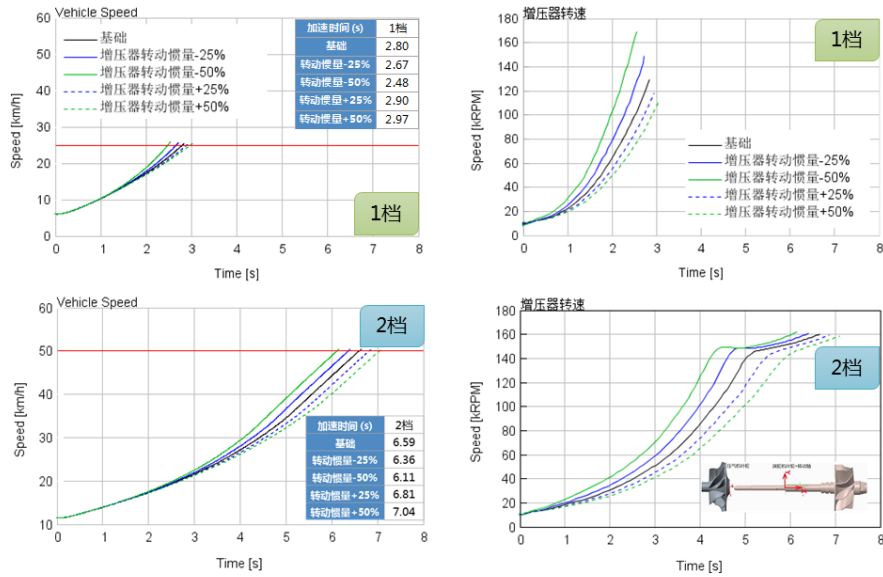
4 计算结果与分析

本文采用一系列可能会影响发动机瞬态响应特性的技术措施，如改变增压器转动惯量、改变增压器摩擦、使用电子增压器、优化 EVO、改变进/排气系统等^[1]，观察其对整车加速性能（本文计算 1、2 档加速）所造成的影响，分析原因，并评价各因素对整车加速性能的影响程度。

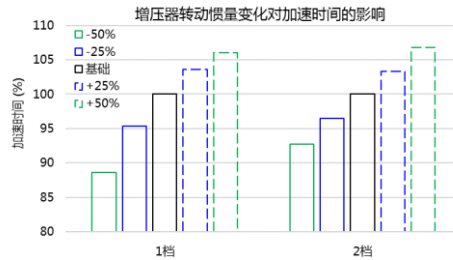
4.1 增压器转动惯量

增压器转动惯量小，增压迟滞小，增压器转速上升快，因此加速时间减少。

1 档，增压器转动惯量增加/减少 25%，加速时间平均增加/减少 4.2%；2 档，增压器转动惯量增加/减少 25%，加速时间平均增加/减少 3.5%，如图 6 所示。



a)



b)

图6 增压器转动惯量对加速时间的影响

4.2 增压器摩擦

增压器摩擦增加，怠速时增压器转速低且转速上升慢，增压器效率低，从而加速时间增加。

增压器摩擦增加，发动机怠速时增压器转速降低 61%，1、2 档加速增压器效率平均降低 4.8%、2.9%，1、2 档，加速时间分别增加 7.9%、7.6%，如图 7 所示。

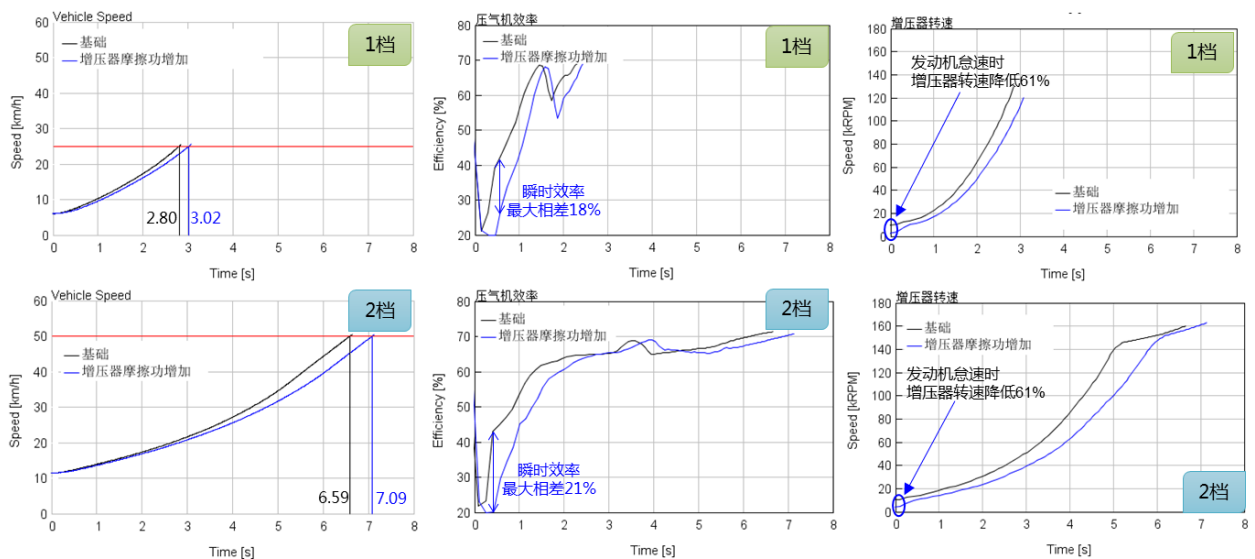


图7 增压器摩擦增加对加速时间的影响

4.3 电子增压器 (eSC)

4.3.1 计算模型

电子增压器有多种布置方式,不同布置方式性能表现也不同^[3],本文考虑到整车实际布置情况只研究电子增压器布置在压前的形式,发动机模型如图 8 所示。

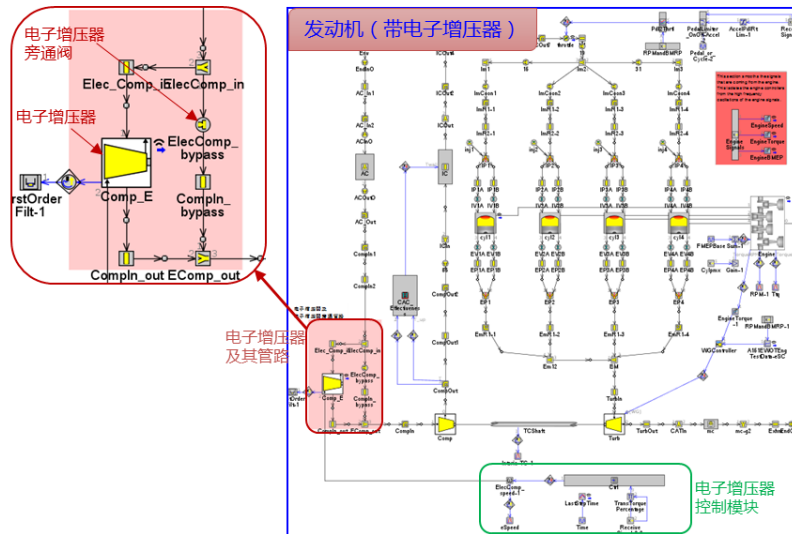


图 8 带 eSC 的发动机模型

4.3.2 基础发动机更换大涡轮增压器

为了更大程度发挥电子增压器性能,基础发动机应该匹配更大的涡轮增压器^[4],这样低速时进气量可由电子增压器补充,并且由于涡轮机增大,背压降低,可使高速功率增加和油耗降低。

基础发动机+电子增压器,扭矩在 2000r/min 以前比基础发动机好,基础发动机更换大涡轮增压器+电子增压器,扭矩在整个转速范围内都比基础发动机好,如图 9 所示。

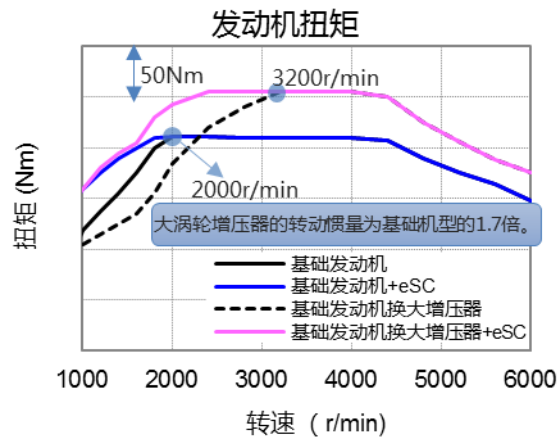


图 9 带 eSC 的发动机 WOT 性能计算结果

4.3.3 电子增压器基本参数

电子增压器基本参数如表 1 所示,电子增压器加减速特性如图 10 所示。由于已经直接定义了电子增压器加减速特性,因此不需要输入电子增压器的转动惯量。

表 1 发动机电子增压器基本参数

基本参数	转速	时间	说明
	r/min	s	
怠速	5000	常怠速	避免频繁启动降低电机使用寿命
最大转速	60000	允许运行的最长时间 (在计算中未考虑)	实际中需要考虑电机最大转速下运行 时间及可长时间运行的最大转速
加速特性	5000→60000	0.35	查阅文献和与供应商交流,此时间一般 介于 0.25~0.5s 之间

减速特性	60000→5000	5	一般减速度小于加速度，根据计算结果合理调整。
------	------------	---	------------------------

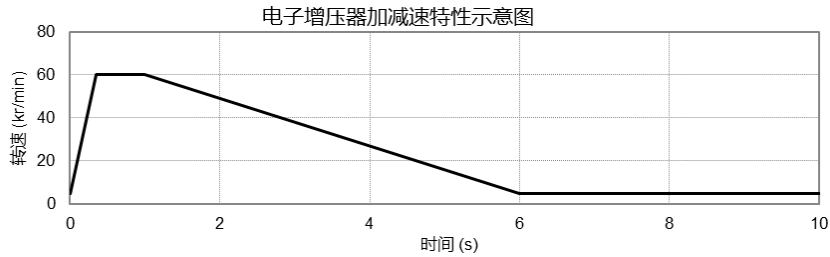


图 10 eSC 加减速特性示意图

4.3.4 电子增压器控制

根据发动机转速和输出扭矩控制电子增压器转速，如表 2 所示，控制逻辑^[5]不同，最终车辆加速时间会有所差异。

基础发动机+eSC，电子增压器在发动机低于 2000r/min 且发动机输出扭矩小于 95% WOT 扭矩时发挥作用，否则电子增压器减速至怠速；基础发动机换大增压器+eSC，电子增压器助力范围更大、程度更深，电子增压器在发动机低于 3200r/min 且发动机输出扭矩小于 95% WOT 扭矩时发挥作用，否则电子增压器减速至怠速。

表 2 电子增压器控制方案

方案	电子增压器状态	发动机转速	逻辑关系	发动机输出扭矩/WOT 扭矩
		r/min		
基础发动机 +eSC	加速 (最大加速至 60000r/min)	<2000 (参考图 9)	并且	<0.95 (具体需要电控标定确定)
	减速 (最低减速至怠速 5000r/min)	其余情况		
基础发动机换大增压器 +eSC	加速 (最大加速至 60000r/min)	<3200 (参考图 9)	并且	<0.95 (具体需要电控标定确定)
	减速 (最低减速至怠速 5000r/min)	其余情况		

4.3.5 计算结果

增加电子增压器，电子增压器能在很短的时间内增加转速并建立起压比，并推动涡轮增压器做功，从而加速时间减少，如图 11 所示。

1 档，电子增压器 1、2 加速时间平均减少 36.3%、33.4%；2 档，电子增压器 1、2 加速时间平均减少 29.1%、27.8%。匹配电子增压器 1，比匹配电子增压器 2，加速快 1~3%。基础发动机更换大增压器+电子增压器，比直接加电子增压器，加速快 2~6%。

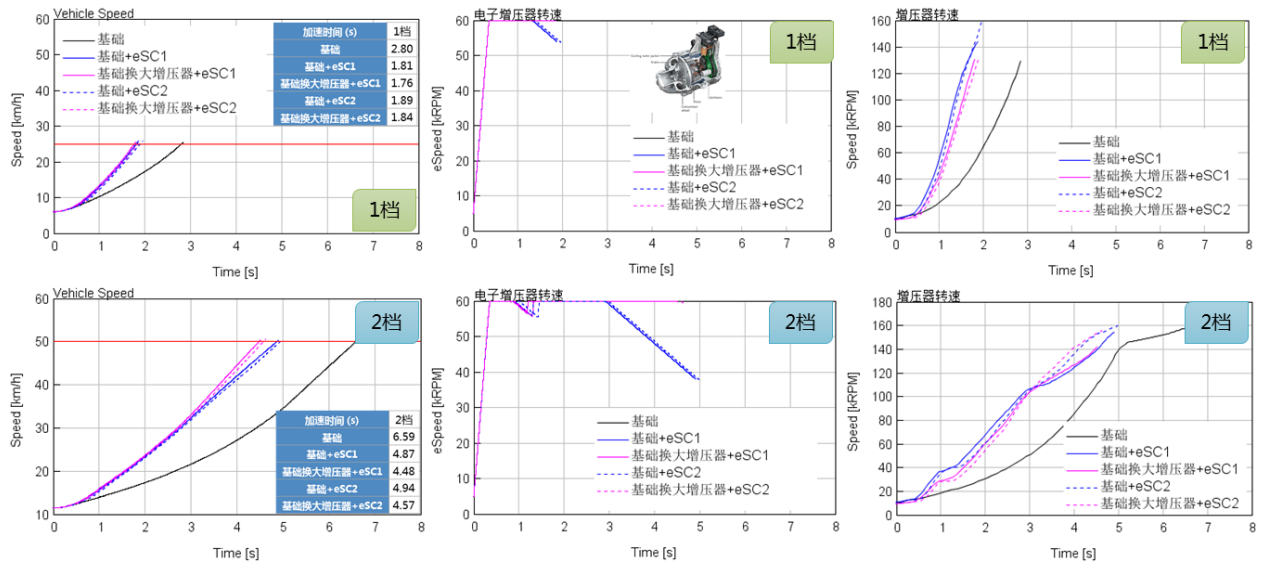


图 11 电子增压器匹配对加速时间的影响

对于某一特定的电子增压器匹配方案，研究了电子增压器本身加速特性对加速时间的影响，默认电子增压器加速特性为 0.35s，在此基础上进行了 0.25s、1s 电子增压器加速特性的计算，如图 12 所示。0.25s 电子增压器加速特性，相比 0.35s 电子增压器加速特性，1、2 档加速时间减少约 1%，1s 电子增压器加速特性，相比 0.35s 电子增压器加速特性，1、2 档加速时间增加 3~6%。

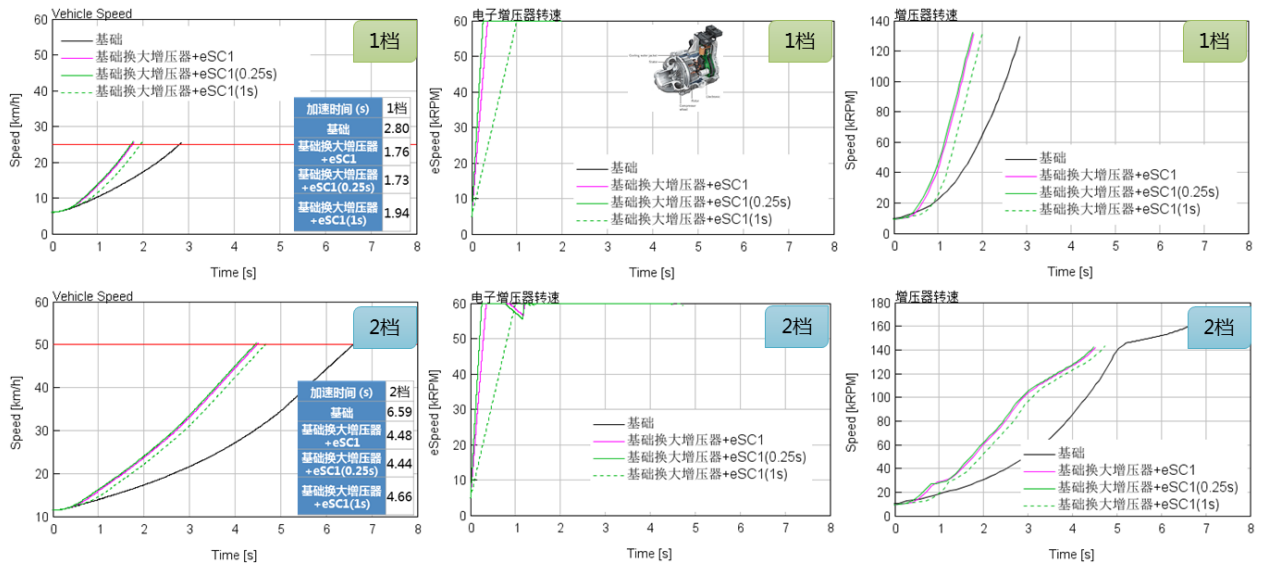


图 12 电子增压器加速特性对加速时间的影响

4.4 排气门早开角 (EVO)

EVO 会影响涡轮前压力和温度，使得增压器做功能力不同，从而影响加速时间，如图 13 所示。

1 档，EVO 提前/推迟 10° CA，加速时间减少 1.4%/增加 2.5%；2 档，EVO 提前/推迟 10° CA，加速时间增加 0.2%/增加 0.8%。

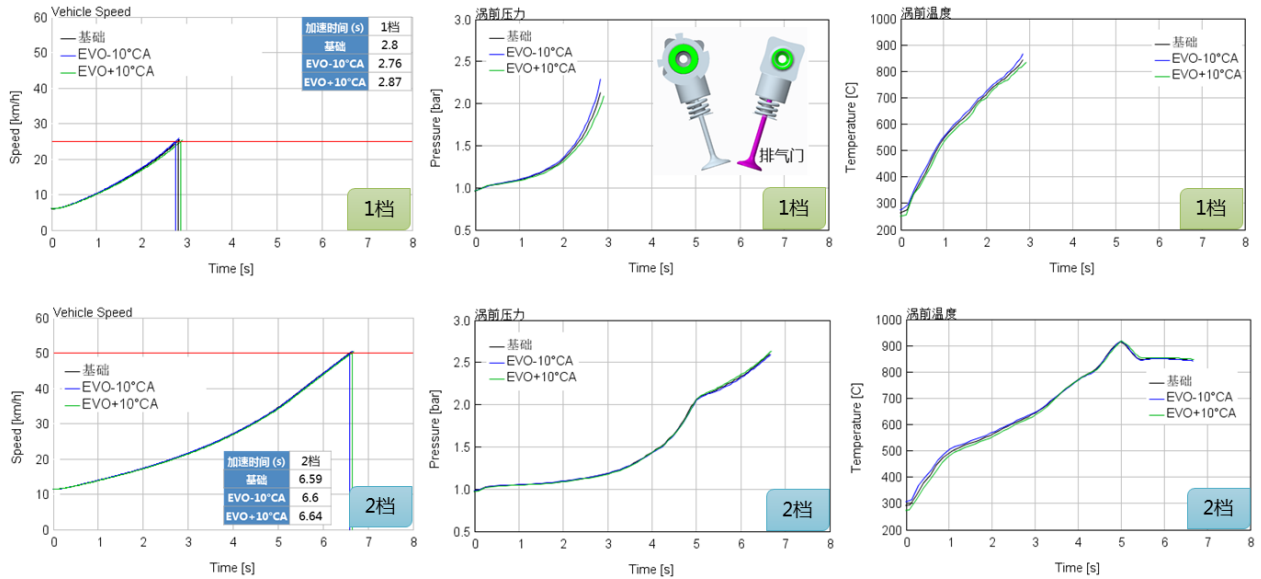


图 13 排气门早开角（EVO）变化对加速时间的影响

4.5 进气歧管稳压腔容积

进气歧管稳压腔容积（表征进气系统容积），会影响进气速度，使得增压器转速的增加不同，从而影响加速时间，如图 14 所示。

1 档，容积减少/增加 50%，加速时间减少/增加 1.8%；2 档，容积减少/增加 50%，加速时间减少/增加 0.8%。需要注意的是，进气歧管稳压腔容积减小有利于整车加速特性，但是会对发动机各缸进气均匀性造成不利影响。

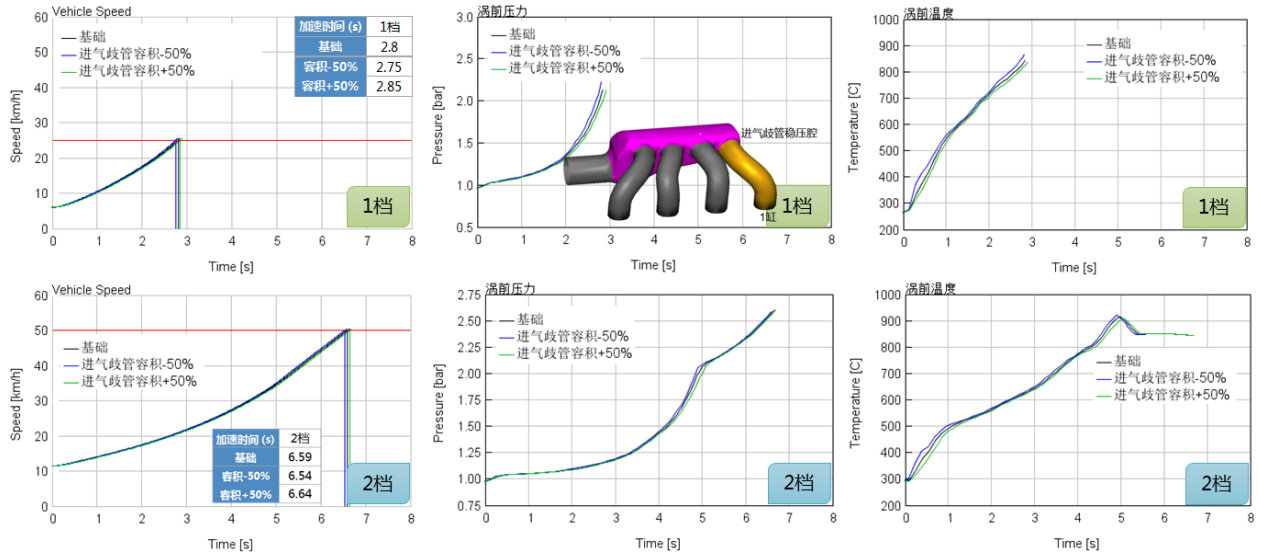


图 14 进气歧管稳压腔容积变化对加速时间的影响

4.6 排气歧管容积

排气歧管容积变化对加速时间的影响很小，如图 15 所示。

1 档，容积减少/增加 50%，加速时间不变；2 档，容积减少/增加 50%，加速时间增加/减少 0.3%。

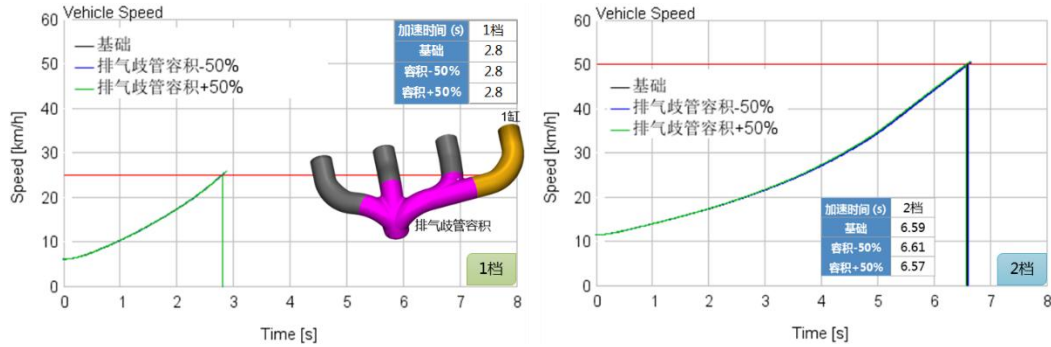


图 15 排气歧管容积变化对加速时间的影响

4.7 排气歧管长度、型式

排气歧管长度变化对加速时间的影响，如图 16 a)所示。1 档，长度增加，加速时间增加~1%；2 档，长度增加，加速时间增加~0.7%。

排气歧管型式变化对加速时间的影响很小，如图 16 b)所示。1 档，换成对称 4-1 排气歧管，加速时间不变；2 档，换成对称 4-1 排气歧管，加速时间减少 0.2%。

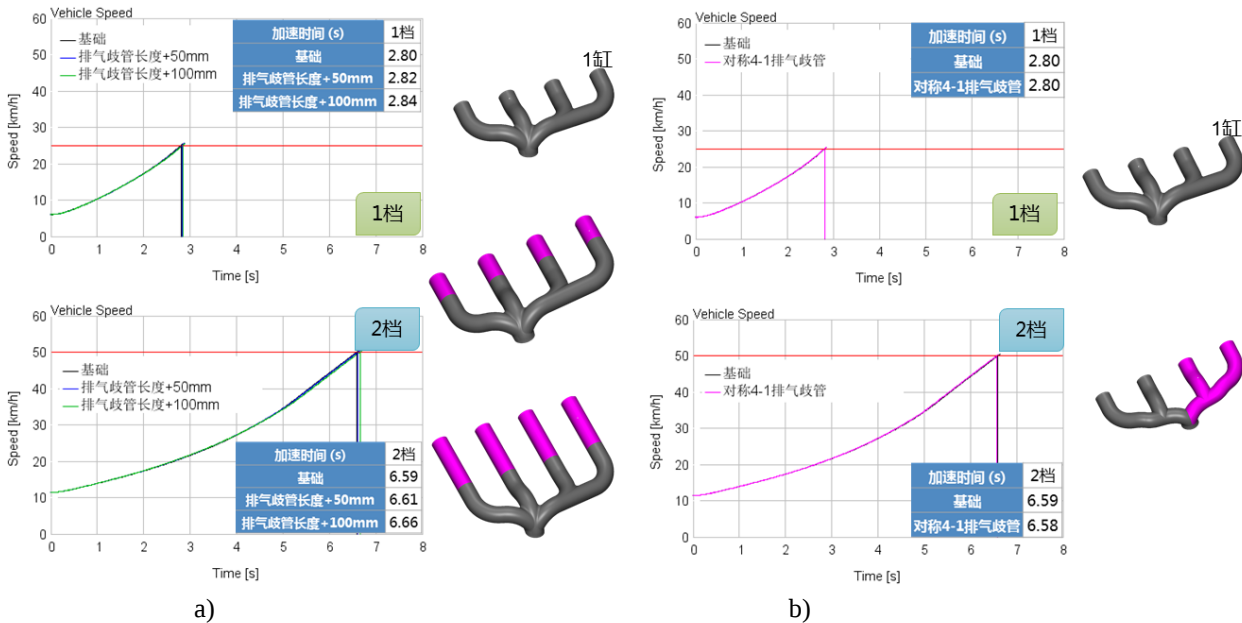


图 16 排气歧管长度、型式变化对加速时间的影响

5. 结论

本文研究了发动机采用不同技术措施对整车加速时间的影响，结果如表 3、表 4 所示：

- 1) 电子增压器对加速时间的影响最大，增压器转动惯量、增压器摩擦次之；
- 2) 电子增压器加速特性、排气早开角 (EVO)、进气歧管容积、排气歧管长度对加速时间有中等至较小程度的影响；
- 3) 排气歧管容积、排气歧管型式对加速时间几乎无影响。

表 3 各因素对加速时间的影响

		加速时间 (s)		加速时间变化百分比 (%)	
档位		1档	2档	1档	2档
模型标定	试验	2.53	6.55	—	—
	计算 (基础)	2.80	6.59	—	—
电子增压器 (eSC) 匹配	基础+eSC1	1.81	4.87	-35.4	-26.1
	基础换大增压器+eSC1	1.76	4.48	-37.1	-32.0
	基础+eSC2	1.89	4.94	-32.5	-25.0
	基础换大增压器+eSC2	1.84	4.57	-34.3	-30.7
电子增压器 (eSC) 加速特性	基础换大增压器+eSC1, eSC加速时间0.25s	1.73	4.44	-38.2	-32.6
	基础换大增压器+eSC1, eSC加速时间1s	1.94	4.66	-30.7	-29.3
增压器转动惯量	-25%	2.67	6.36	-4.6	-3.5
	-50%	2.48	6.11	-11.4	-7.3
	+25%	2.90	6.81	3.6	3.3
	+50%	2.97	7.04	6.1	6.8
增压器摩擦	增加	3.02	7.09	7.9	7.6
EVO	提前10°C A	2.76	6.60	-1.4	0.2
	推迟10°C A	2.87	6.64	2.5	0.8
进气歧管容积	-50%	2.75	6.54	-1.8	-0.8
	+50%	2.85	6.64	1.8	0.8
排气歧管容积	-50%	2.80	6.61	0.0	0.3
	+50%	2.80	6.57	0.0	-0.3
排气歧管长度	+50mm	2.82	6.61	0.7	0.3
	+100mm	2.84	6.66	1.4	1.1
排气歧管型式	对称4-1排气歧管	2.80	6.58	0.0	-0.2

表 4 各因素对加速时间的影响程度

	对加速时间 的影响
电子增压器	★★★★★
电子增压器加速特性	★★
增压器转动惯量	★★★
增压器摩擦	★★★
EVO	★★
进气歧管容积	★★
排气歧管容积	☆
排气歧管长度	★★
排气歧管型式	☆

6. 参考文献

- [1] C. D. Rakopoulos, E. G. Giakoumis. Review of Thermodynamic Diesel Engine Simulations under Transient Operating Conditions[J]. SAE paper, 2006-01-0884.
- [2] GT-SUITE Engine_Performance-tutorials[Z]. VERSION 2016.
- [3] Dr. Holger Paffrath, Dr. Frank Seifert, Stefan Dewenter, et al. The Electrical Air Charger Implemented in a Multi Stage Charging System - Technical Challenges and Application of the eAC[C]. 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015, 2015.
- [4] Dr. Michael Bassett, Benjamin Hibberd, Jonathan Hall. Dynamic Downsizing for Gasoline Engines[C]. 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015, 2015.
- [5] Dr. Jan Ehrhard, Johannes Beer, Martin Götzenberger, et al. Future Emission Legislation Requirements - Contribution of Electrically-Assisted Charging Systems[C]. 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2016, 2016.