

# 发动机电子增压器瞬态响应特性研究

## Study of Engine Electric Supercharger's Transient Response Characteristic

马克, 刘系嵩, 张静, 王一聪, 豆佳永, 张秀英  
(北京汽车动力总成有限公司)

**摘要:** 以北汽某款增压汽油机为对象, 建立 GT-SUITE 仿真模型, 研究采用电子增压器后发动机瞬态响应改善情况。匹配结果表明: 该发动机采用电子增压器, 布置在压气机进口, 能够有效改善发动机瞬态响应特性, 发动机转速越低, 改善效果越明显。1200r/min 定速加负荷工况, 加速时间从 2.1s 最大可缩短至 0.5s, 减少了 76%; 2000r/min 加速时间从 1.67s 最大可缩短至 1s, 减少了 40%。

**关键字:** GT-SUITE; 增压发动机; 电子增压器; 瞬态响应

**Abstract:** A turbocharged gasoline engine simulation model is built by GT-SUITE, investigating the transient response of engine after used electric supercharge (eSC). The result shows, the eSC which installed before compressor can effectively improve the transient response of the engine. In 1200r/min load increasing under constant speed operating condition, the acceleration time can be reduced from 2.1s to 0.5s and decreased by 76 percent at most by using eSC, and in 2000r/min operating condition the acceleration time can be reduced from 1.67s to 1s and decreased by 40 percent at most by using eSC.

**Key words:** GT-SUITE; turbocharged gasoline engine; electric supercharge (eSC); transient response

## 1 前言

增压小型化是当前汽油机发展的一个主流方向, 在动力性方面, 人们希望达到最大扭矩的转速越低越好并且瞬态响应要足够快。但是由于低速废气流量很小, 增压器转速很低增压效果有限, 当发动机达到一定转速时, 废气流量足够, 但是原本转速较低的增压器由于惯性, 转速并不会马上增加, 而是会延后一段时间, 即所谓的增压迟滞现象, 使得发动机低速瞬态响应不尽人意, 影响驾驶感受。通过匹配较小的增压器可以适当改善这种情况, 不过需要以牺牲高速功率为代价, 电子增压器可以很好地解决这一问题, 它的出现已有一段时间, 可以应用于传统 12V 电压的汽车上, 但要达到较好的使用效果, 需要一定的输出功率, 这需要更大的工作电压来保证, 而单独为了电子增压器而增加电压使得成本增加改动较大并不现实, 这使得电子增压器的应用受到一定限制, 但是随着国家日趋严苛的油耗法规, 混动逐渐兴起, 且随着混动程度的增加, 系统电压升高, 因此在将来, 电压将不再是电子增压器应用的阻碍, 电子增压器的应用前景会越来越好。

本文建立了某四缸汽油机的 GT-SUITE 仿真模型, 对比研究了电子增压器对发动机瞬态响应的影响。

## 2 电子增压器

### 2.1 电子增压器结构

电子增压器结构如图 1 所示, 由压轮、转子、定子、冷却水套(采用风冷则无冷却水套)和电动机组成。

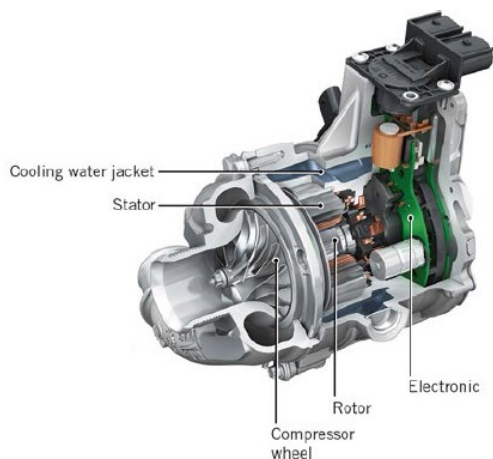


图 1 电子增压器结构示意图

## 2.2 电子增压器 MAP

电子增压器流量范围和压比一般小于与其匹配的压气机<sup>[1]</sup>，其 MAP 如图 2 所示。

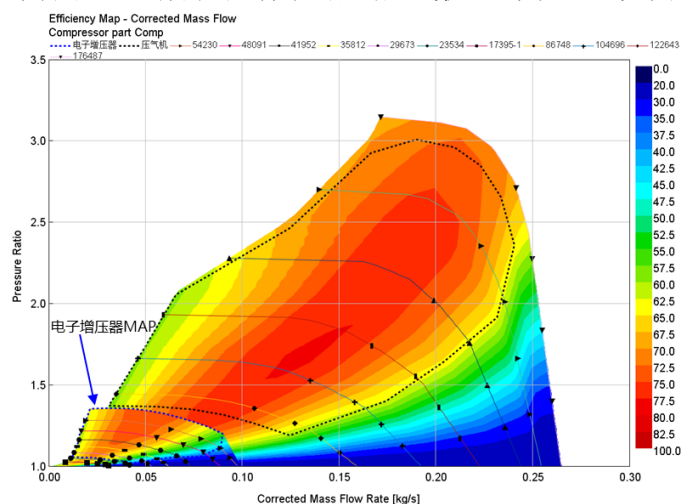


图 2 电子增压器结构示意图

## 2.3 电子增压器特性

在匹配电子增压器时需要知道它的加、减速特性。加速特性为电子增压器从怠速加速到最大转速的时间，一般为几百毫秒，如本文研究的电子增压器从 5000r/min 怠速加速到 60000r/min 最大转速，用时 350ms；减速特性需要根据控制策略相应设置，做对比计算时，也可以采用估计值。一般减速度小于加速度，需根据计算结果合理调整，减速度偏大或偏小都会延长稳定到目标负荷的时间，减速度过大，电子增压器迅速退出工作，此时压气机压比还未充分建立，会导致负荷低于目标值；减速度过小，电子增压器退出慢，会导致负荷高于目标值。

另外实际应用中，还需要关注电子增压器各个约束限制：

- 应用电压（如 12V、48V 等）；
- 峰值输出功率，电子增压器瞬态计算侧重关注峰值输出功率；
- 长时间运转输出功率；
- 运行温度。

## 2.4 电子增压器布置

电子增压器布置方案主要有三种，如图 3 所示：a) 压气机入口，b) 压气机出口，c) 中冷器出口，并可根据实际需求给电子增压器配备单独的中冷器，此处未列出示意图。

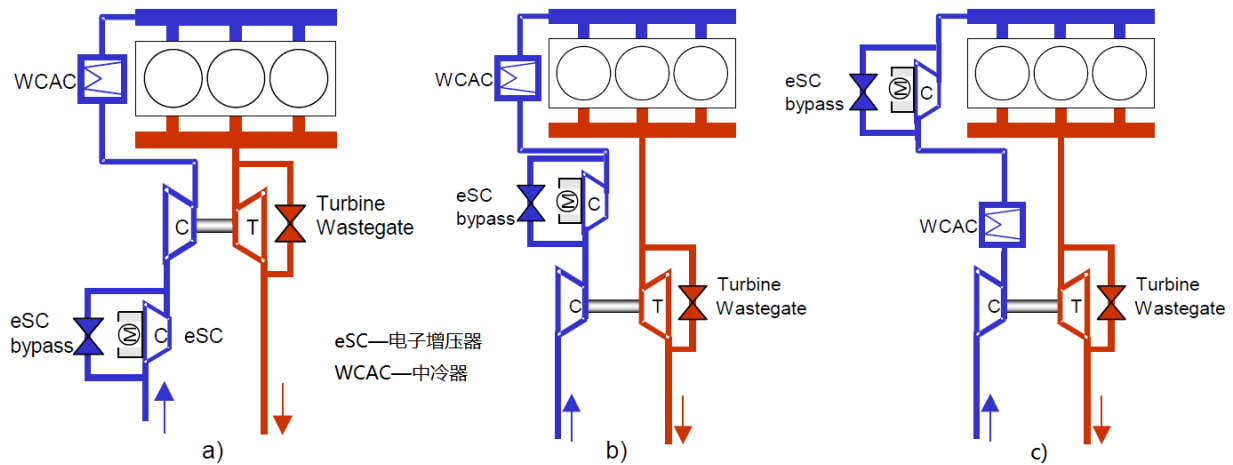


图 3 电子增压器布置形式示意图

压气机出口的布置方案瞬态匹配结果较好，各布置形式对比见表 1，具体采用哪种布置形式，还需要综合考整车空间布置等情况。

表 1 电子增压器各布置形式对比

| 布置方案     | 优点       | 缺点                                             |
|----------|----------|------------------------------------------------|
| a) 压前布置  | 布置相对方便   | 运行点流量范围宽，使得一些工况运行在电子增压器低效率区域                   |
| b) 压后布置  | 瞬态特性好    | 电子增压器需承受更高温度、更高压力和压力波动                         |
| c) 中冷后布置 | 增压压力建立最快 | 会导致进气温度显著增加，可增加独立的中冷器改善（未列出示意图），但布置空间需求增加，成本增加 |

## 3 GT-SUITE 仿真模型建立

### 3.1 基本参数和模型

对象为一台 2.3L 四缸涡轮增压发动机。在 GT-SUITE 中搭建该发动机的计算模型，本文考虑到整车实际布置情况，电子增压器布置在压气机入口，如图 4 所示。

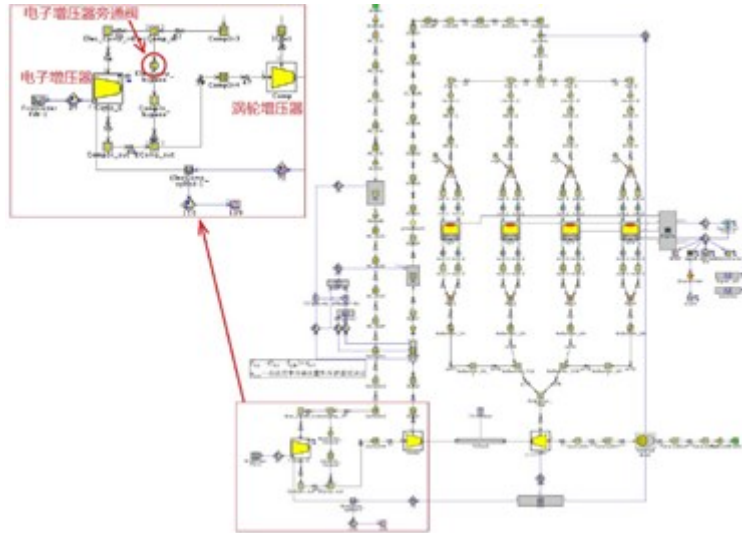


图 4 压前布置电子增压器 GT-SUITE 计算模型

### 3.2 模型设置

#### 3.1.1 中冷后温度

在前期计算中未使用电子增压器时，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。使用电子增压器后，经过电子增压器增压后的气体流入后面的压气机进行二次增压，压后（中冷前）的温度会比单纯使用压气机的高，为使计算更加合理，中冷后的温度根据中冷效率计算得到，压前、压后和中冷后温度与中冷效率之间的关系可按式处理，其中中冷效率在中冷介质温度一定的情况下与压后温度和流量相关，通过中冷效率并根据下式，对中冷后的温度进行预测。

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

#### 3.1.2 电子增压器旁通阀

电子增压器旁通阀开度应参照实际部件的特性进行设置，在缺少输入的情况下，用假设的简单函数关系表示，如图 5 所示，其最大开度同上下游管路直径。

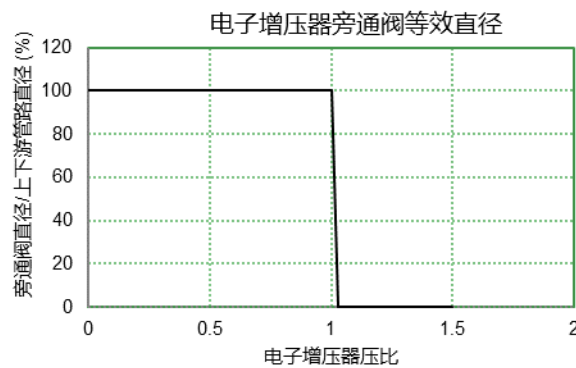


图 5 电子增压器旁通阀设置

## 4 电子增压器瞬态计算分析流程

本文电子增压器瞬态分析主要进行瞬态定速加负荷计算。其计算流程与增压匹配瞬态计算流程

类似，计算模型搭建完成后，先进行稳态计算，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。与增压匹配瞬态计算流程有所区别的是，计算中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）。

实际情况中，根据控制策略匹配优化的差异，电子增压器的分析流程会有所不同，本文分析流程如图 6 所示：

- 1) 稳态初始工况，废气旁通阀开启最大，电子增压器处于怠速状态，节气门控制使负荷稳定在 2bar 或 10%外特性负荷；
- 2) 瞬态状态 1：加载过程开始，节气门全开，电子增压器迅速提升至最大转速，随着电子增压器增压压力的建立，电子增压器旁通阀关闭；
- 3) 瞬态状态 2：电子增压器工作在最大转速，直至接近目标负荷；
- 4) 瞬态状态 3：发动机工作在目标负荷，电子增压器逐渐减速，退出工作过程，此时，涡轮增压器转速继续上升，电子增压器与涡轮增压器的联合工作使发动机工作在目标负荷；
- 5) 瞬态状态 4：电子增压器退出工作过程，电子增压器旁通阀打开，通过涡轮增压器控制扭矩。

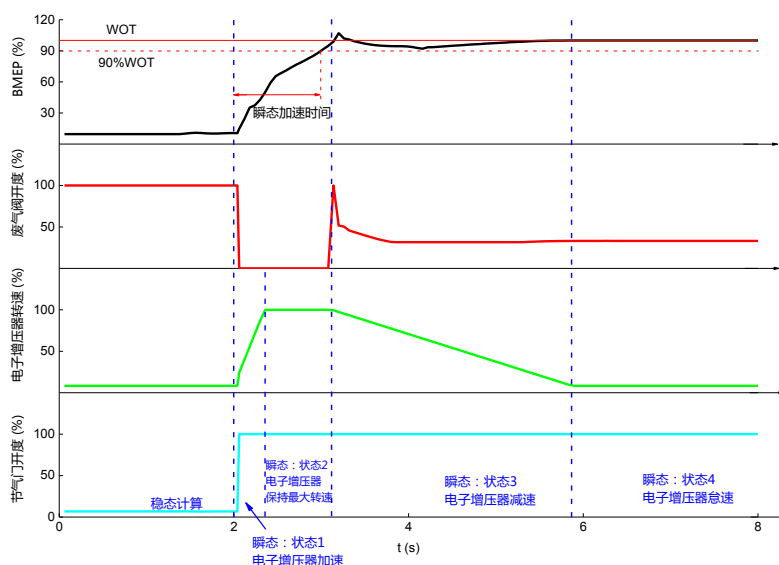


图 6 电子增压器瞬态响应分析流程

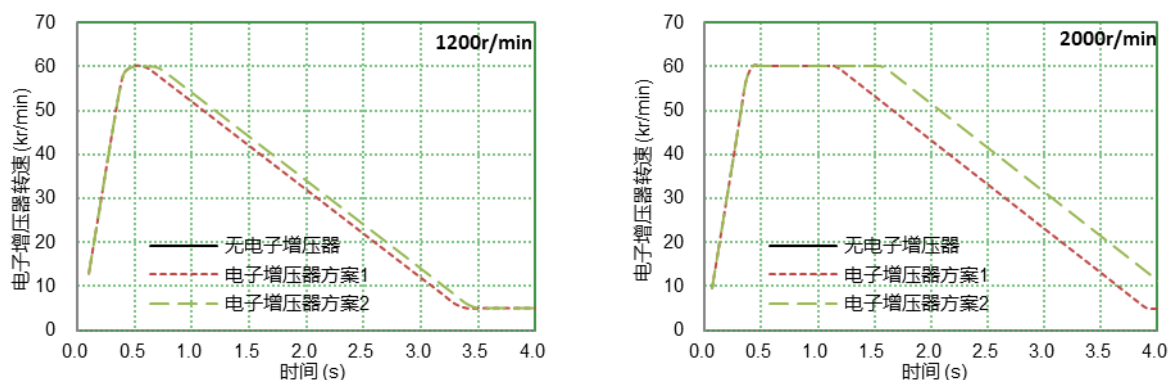
## 5 计算结果与分析

### 5.1 瞬态加速时间结果分析

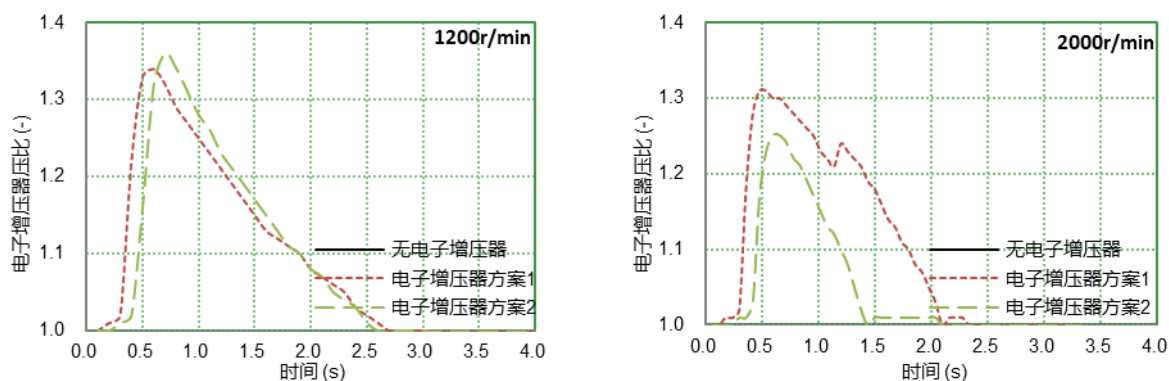
因为稳态计算只是为瞬态计算提供初始边界，因此进行结果分析时，只针对瞬态工况。本文进行了 1200r/min 和 2000r/min 两个转速下瞬态加速的计算。

有电子增压器方案，电子增压器转速迅速上升，能在很短的时间内迅速建立起增压压力，空气经过电子增压器的初级增压后，再流经压气机进行二次增压，增压压力比无电子增压器方案明显上升得更快，尤其在低转速时，电子增压器一般工作 1~3s<sup>[1]</sup>。如图 7 所示，进气歧管压力达到 1bar 后，

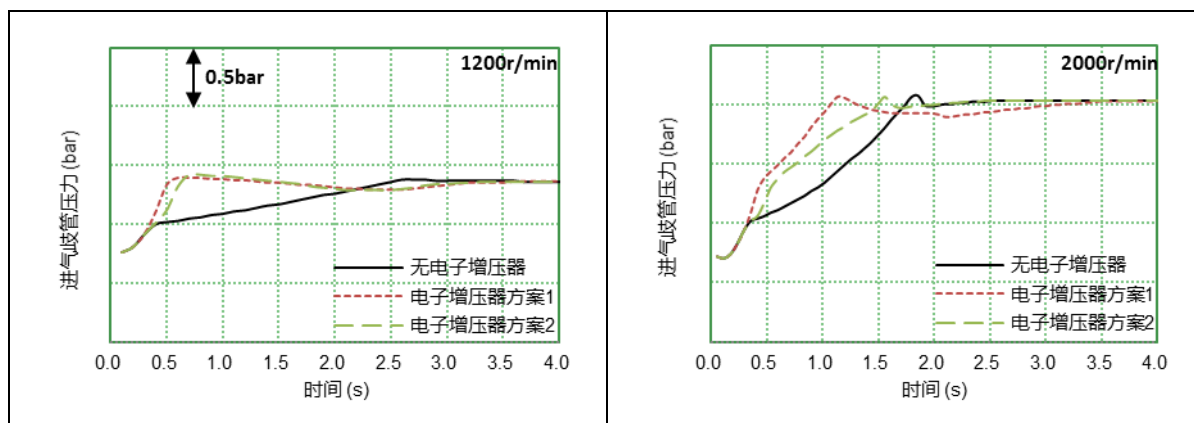
有电子增压器的方案进气歧管压力明显上升得更快，即在曲线图上开始出现“分叉”。



a) 电子增压器转速



b) 电子增压器压比



c) 进气歧管压力

图 7 电子增压器转速、电子增压器压比和进气歧管压力计算结果

有电子增压器方案，增压压力建立后，空气流量也随之增加，如图 8 所示。由于进入压气机的空气被电子增压器进行了初级增压，进气压力和温度比无电子增压器方案要高，当空气再进压气机增压后，压气机出口温度明显高于无电子增压器方案，1200r/min 瞬时最大温差 40℃，2000r/min 瞬时最大温差 65℃，但是经过中冷器的冷却之后，瞬时最大温差则减小到了 5℃ 以内，但是如果电

子增压器布置在中冷器后且没有针对电子增压器增加相应的中冷器时，到中冷器之后进气歧管处的瞬时最大温差仍会达到几十度<sup>[2]</sup>，会削弱电子增压器的使用效果。

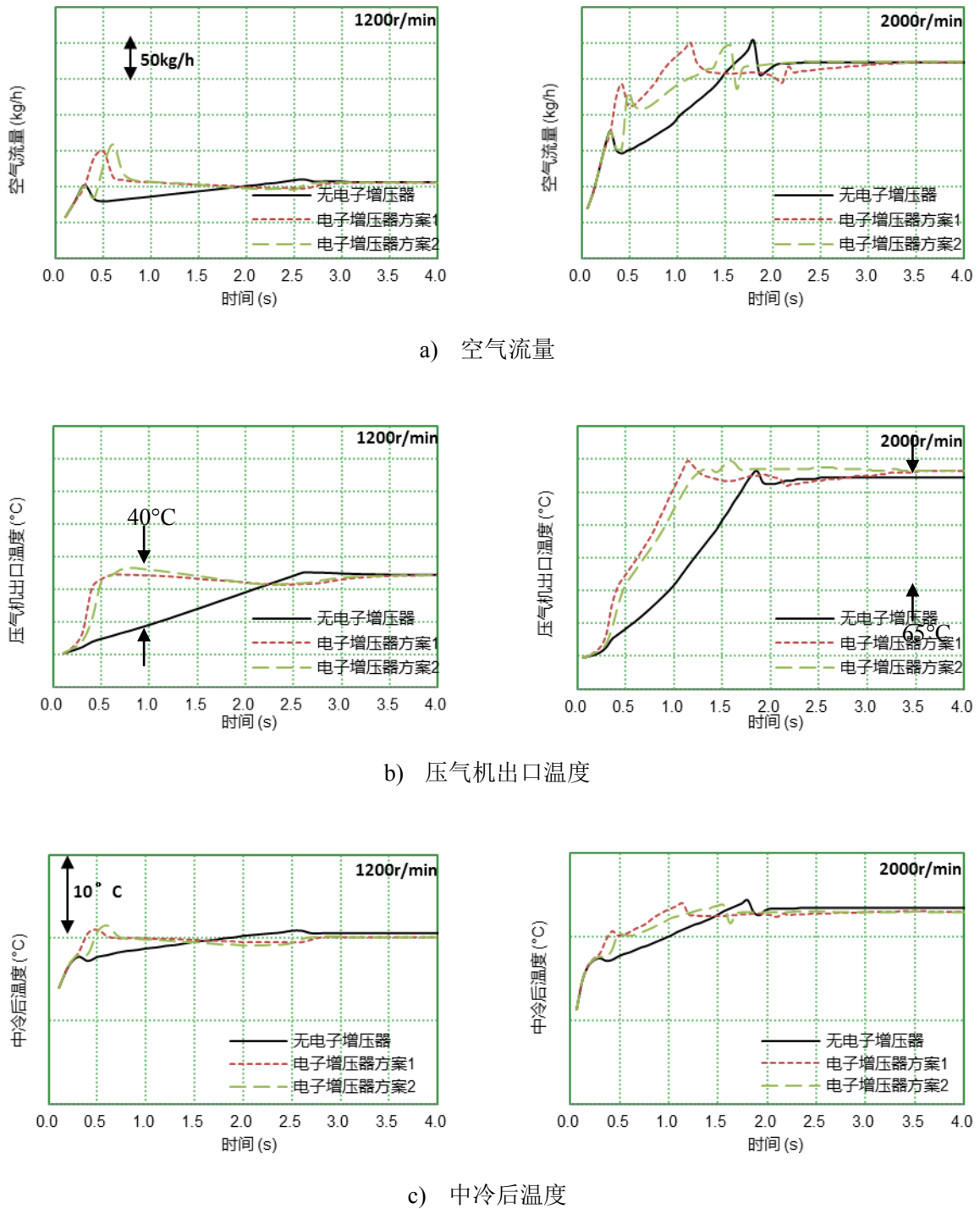


图 8 空气流量、压气机出口温度和中冷后温度计算结果

本文瞬态加速时间与大多数相关研究的定义一样，即从 2bar 加速到 90%WOT 负荷的时间，瞬态加速特性如图 9 所示，加速时间见表 2。1200r/min，有电子增压器，加速时间从 2.1s 最低可以减少至 0.5s，加速时间减少了 76%；2000r/min，有电子增压器，加速时间从 1.67s 最低可以减少至 1s，

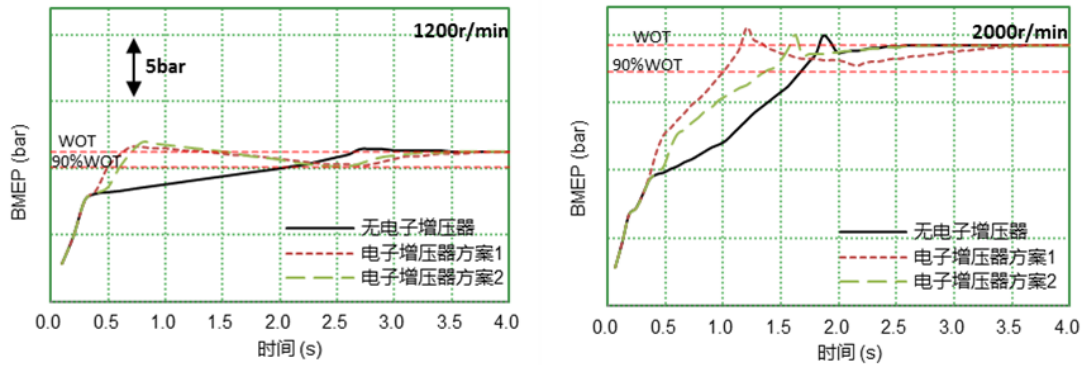
加速时间减少了 40%。由此可以看出，电子增压器在发动机转速较低时，优势十分明显。

从图 9 可知，由于电子增压器方案 2 运行点效率较低，电子增压器方案 1 优于方案 2。1200r/min 工况，方案 1 电子增压器峰值输出功率 2.07kW，方案 2 电子增压器峰值输出功率 1.87kW，约为方案 1 的 90%；2000r/min 工况，方案 1 电子增压器峰值输出功率 2.38kW，方案 2 电子增压器峰值输出功率 1.97kW，约为方案 1 的 83%。

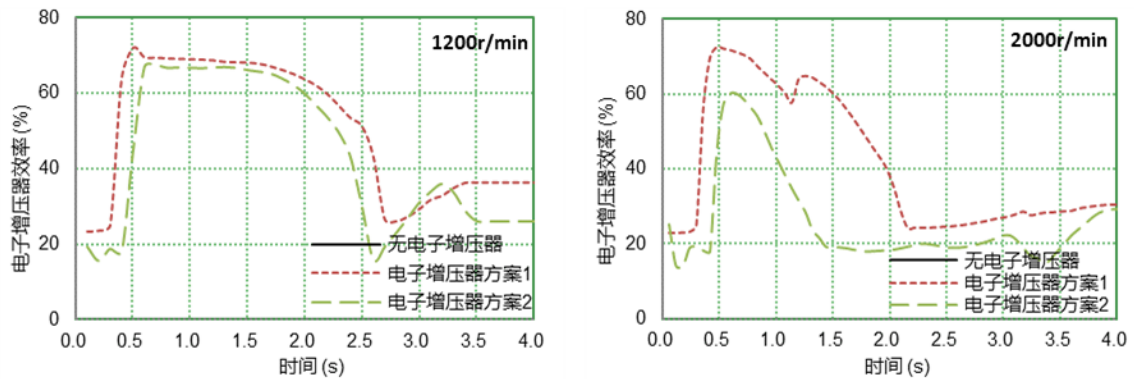
电子增压器额外提供的功率在发动机转速较低时作用十分显著，这也使得在应用电子增压器时，可以匹配更大一些的传统增压器，低速依靠电子增压器提供额外的增压压力，高速由于增压器更大，可以达到更大的功率，做到高低速兼顾。并且在经济性方面，由于使用大的增压器，泵气损失减小，油耗会有所降低。

表 2 瞬态加速时间

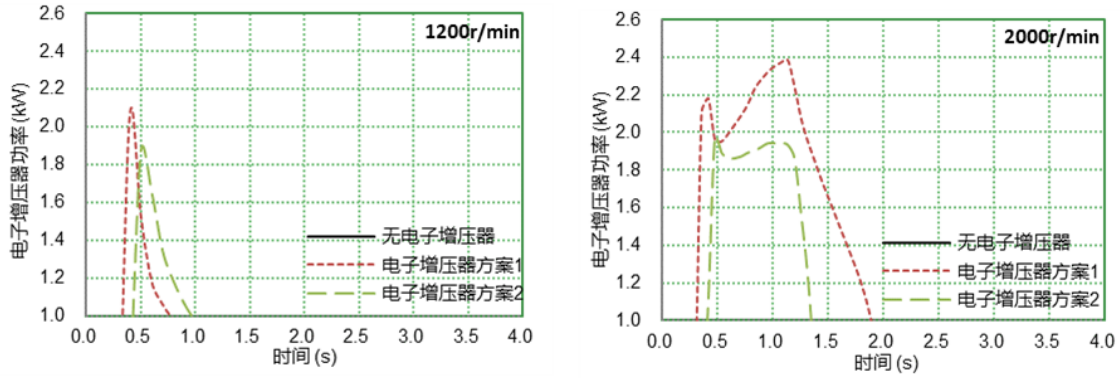
| 转速<br>r/min | 瞬态加速时间（加速时间减少百分比） |             |             |
|-------------|-------------------|-------------|-------------|
|             | 无电子增压器            | 电子增压器方案 1   | 电子增压器方案 2   |
| 1200        | 2.10s             | 0.50s（↓76%） | 0.61s（↓71%） |
| 2000        | 1.67s             | 1.00s（↓40%） | 1.36s（↓19%） |



a) BMEP



b) 电子增压器效率



c) 电子增压器功率

图 9 BMEP 电子增压器效率和电子增压器功率计算结果

## 5.2 运行点结果分析

图 10 所示为电子增压器方案 1 在 1200r/min 瞬态加速时的运行点，从图中可以看出电子增压器的介入分为 3 个阶段：电子增压器从怠速迅速加速至最大转速、电子增压器保持最大转速直至接近目标负荷和电子增压器减速至怠速然后退出工作。其中第一个阶段又可以分为两个子阶段，子阶段 1 由于节气门迅速打开，流过电子增压器的流量迅速增加，但是此时电子增压器转速较低，未建立起压比；子阶段 2 电子增压器转速达到一定程度，压比迅速上升。

两电子增压器方案运行点对比如图 11 所示，电子增压器方案 2 效率较低，在电子增压器达到一定转速后，压比的增加相对方案 1 更加缓和。研究电子增压器布置位置的相关文献显示，电子增压器运行点还与其布置位置有很大关系，电子增压器布置在压前、压后和中冷后运行点会向左移动，即电子增压器在进气系统中布置位置越靠后，电子增压器运行点越靠左<sup>[2]</sup>。

压气机运行点如图 12 所示，电子增压器介入后，流过压气机流量增加，压比建立更快，相比无电子增压器，压气机运行点向右上方移动，在压比较小时尤为明显。

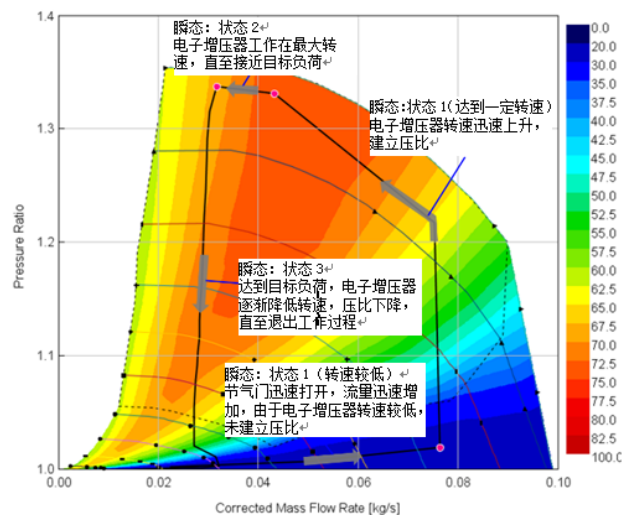


图 10 电子增压器方案 1 运行点 (1200r/min)

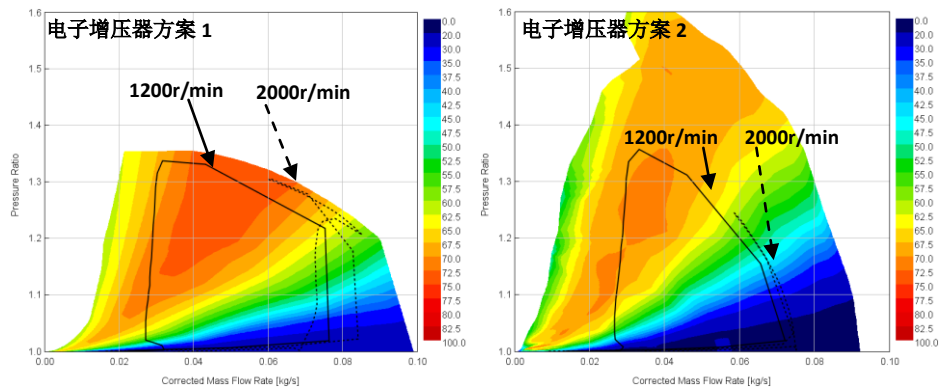


图 11 电子增压器运行点

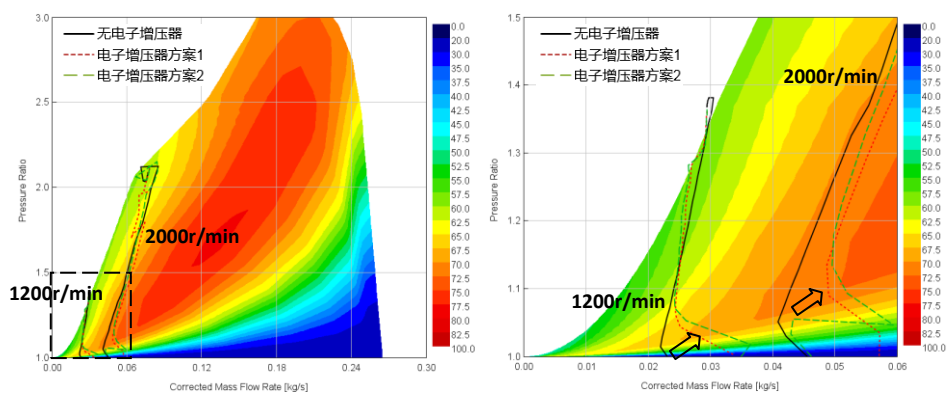


图 12 压气机运行点

## 6 结论

本文研究了电子增压器布置在压前的瞬态响应变化情况，使用电子增压器能够有效改善发动机瞬态响应特性，发动机转速越低，改善程度越明显。

- 1) 1200r/min 工况，使用电子增压器，加速时间从 2.1s 最低可以减少至 0.5s，加速时间减少了 76%。
- 2) 2000r/min 工况，使用电子增压器，加速时间从 1.67s 最低可以减少至 1s，加速时间减少了 40%。

## 7 参考文献

- [1] JASON KING, ANDREW FRASER, GUY MORRIS, et al. ELECTRIFICATION OF A DOWNSIZED BOOSTED GASOLINE ENGINE[J]. MTZ, 2012, 73(7-8):12~18.
- [2] 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.