

# 通过 GTPower 模拟研究增压汽油机瞬态响应

## Research on turbocharger gasoline engine transient response by GTPower simulation

尚上 刘金玉

一汽技术中心

**摘要:** 本文尝试利用GTPower软件模拟研究增压发动机瞬态响应,评价不同参数对增压发动机瞬态响应的影响大小。通过计算评价了压气机后进气系统容积,涡轮前排气管容积,增压器效率和增压器叶轮转动惯量对发动机扭矩瞬态响应的影响大小,并将该计算方法应用到了增压器评价计算中。

**关键词:** 增压汽油机, 瞬态响应模拟, GTPOWER, 气门相位优化

**Abstract:** This paper tries to use GTPower simulation to study the turbocharger gasoline engine transient performance and evaluates different parameters' effect on transient response. Following parameters are evaluated: the volume of compressor downstream intake system, the volume of turbine upstream exhaust pipe, the efficiency and inertia of turbocharger. This simulation method also had been applied in turbocharger evaluation calculation.

**Key words:** Turbocharger gasoline engine, transient response simulation, GTPOWER, valve timing optimization

### 1 简介

为降低整车油耗,涡轮增压发动机近些年逐渐流行,但由于扭矩响应较慢,采用涡轮增压发动机的整车扭矩响应常被用户所诟病,因此增压发动机的扭矩响应能力成为发动机开发过程中不得不考虑的问题。通常评价增压发动机的扭矩瞬态响应,需要等到性能试验阶段中,使用试验的方法来评价。试验时,采用恒定转速(例如 2000r/min)下发动机扭矩从小负荷到外特性的响应时间来评价发动机瞬态响应。但如果在这个阶段发现发动机瞬态响应性较差,将难以重新设计开发,因此存在较高的开发风险。

本文探索了使用 GTPower 软件计算的方法来模拟发动机恒定转速的扭矩响应,并研究了单一因素对发动机瞬态响应影响的大小,同时还将该瞬态模拟计算的方法应用到了增压器匹配计算中,评价了增压器的瞬态响应能力。使在发动机概念设计阶段评价瞬态响应能力成为可能。

另外,由于扭矩瞬态响应过程是一个变负荷的过程,因此计算中还需要优化不同负荷的 VVT 相位,因此本文还同时探索了使用 GTpower 软件优化部分负荷相位的计算方法。

### 2 计算方法和模型

模拟计算基于一汽 CA3GA10TD 1.0T GDI 发动机的计算模型。

#### (一) 评价方法和工况

评价增压发动机的瞬态响应通常是通过评价 2000r/min 扭矩 0~90% 的响应时间来评价的。因此本次模拟计算也同样选择了这个过程作为评价过程。

如上小节所述,在进行扭矩响应计算之前需要先优化不同负荷点相位。在挑选这些负荷点时,参考以往开发机型万有特性,在非爆震区选取了 2 个负荷点作为相位优化计算点,大负荷爆震区选取了 2 个负荷点作为相位优化计算点。而其它负荷相位则通过这 4 个负荷点的相位插值获得。

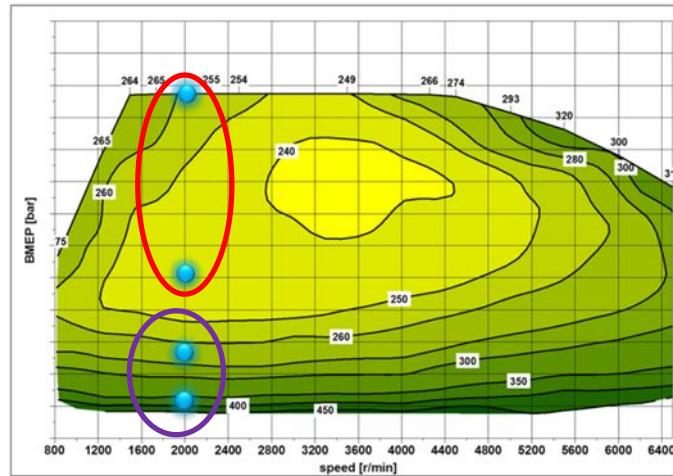


图 1 2000r/min 爆震区和非爆震区相位优化的工况点

## (二) 计算方法

发动机的扭矩瞬态响应过程是一个扭矩逐渐提高的变工况过程。因此模拟计算需要设定发动机的进排气门相位（DVVT 发动机），燃烧放热率，空燃比，增压器旁通阀等随负荷变化而变化。其它参数如壁温，表面传热系数等参数，由于扭矩响应时间很短（1.5s 左右），这些参数随负荷变化与否对计算结果影响不大，因此模拟计算时假定这些参数并未发生变化。

其中随负荷变化的参数中，燃烧放热率和空燃比可以参考以往发动机开发经验设定，旁通阀大小可以通过稳态计算确定。只有 VVT 相位不能参考以往发动机开发经验设定，需要在做瞬态响应模拟计算之前进行优化选定。

## (三) 计算模型

下图是 GTPower 计算模型示意图。

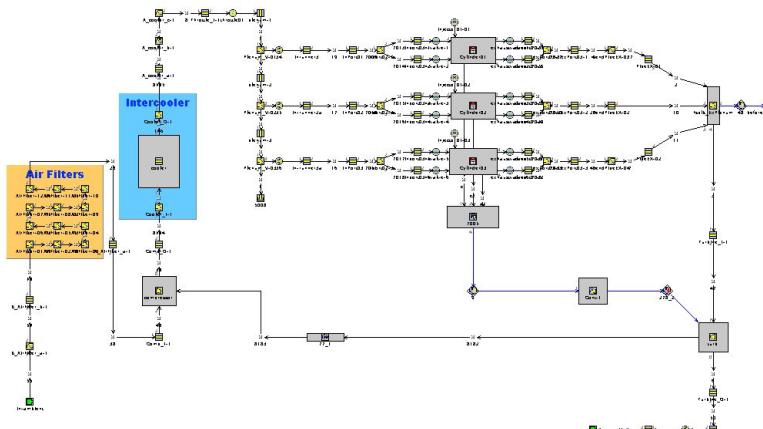


图 2 GTPower 计算模型

## 3 瞬态模拟计算结果

### (一) 相位优化计算结果

#### 1) 非爆震区的工况点一

该工况点相位优化的重点是降低泵气损。由于该工况负荷较小，泵气损占油耗比例较大，降低泵气损可以有效降低油耗。

从下图可以看出，随着排气门推迟关闭和进气门提前开启，气门叠开角逐渐加大，残余废气量逐渐增加，容积腔压力逐渐提高，泵气损逐渐降低，油耗也随之下降。但受限于燃烧稳定性，残余废气量并不能无限制增加，根据经验一般该工况下残余废气达到 25% 左右就已经达到稳定性边界。

因此使发动机油耗最低的最佳相位是残余废气量控制在 25% 左右且泵气损失最小的相位。

基于以上分析，最终选择的相位为：IVO：340°CA，EVC：345°CA

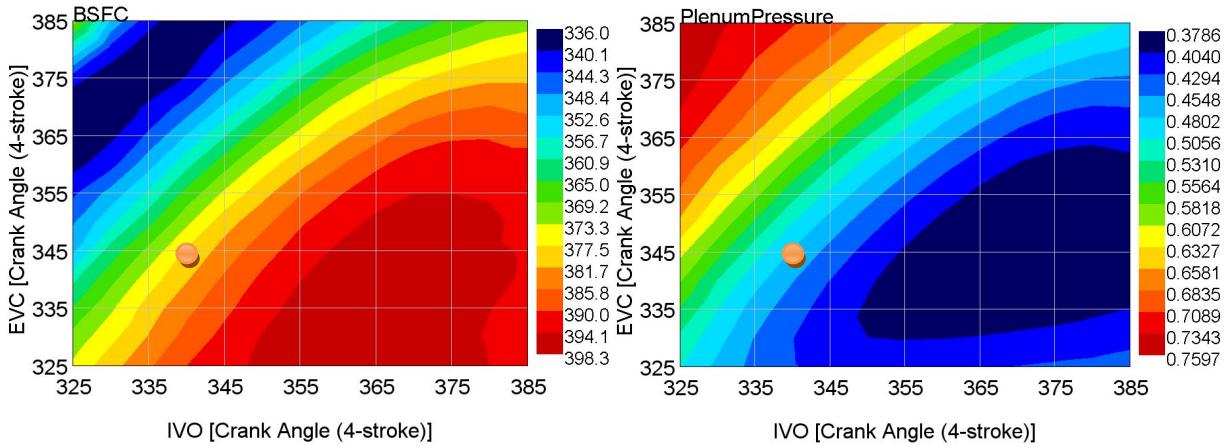


图 3 工况点一比油耗（左）和容积腔压力（右）随气门相位变化

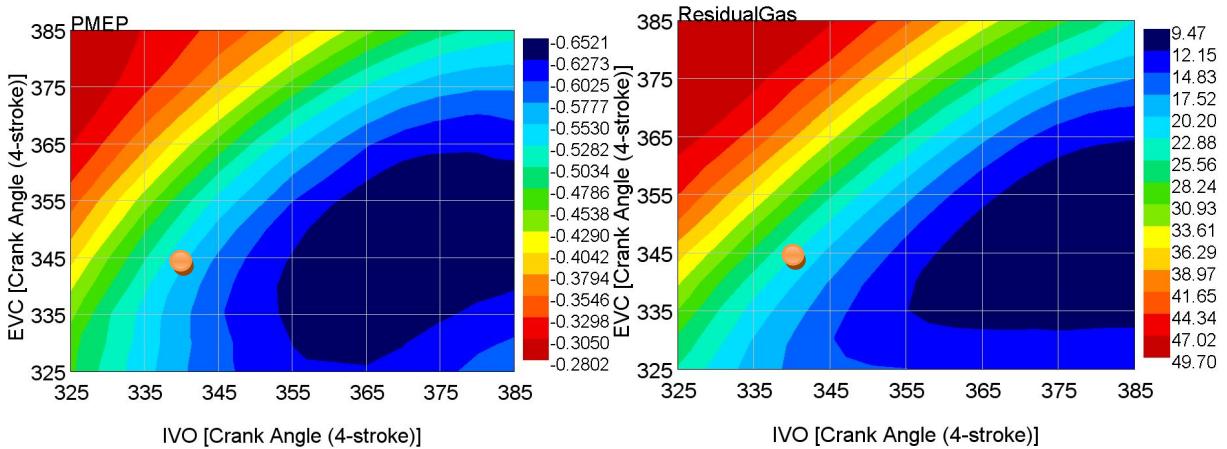


图 4 工况点一泵气损失（左）和残余废气（右）随气门相位变化

## 2) 非爆震区的工况点二

该工况的相位选择方法基本与上一个工况点相同，略有不同的是该工况残余废气限制大约为 15% 左右。

依据这个残余废气量，最终选择的相位为：IVO：340°CA，EVC：350°CA

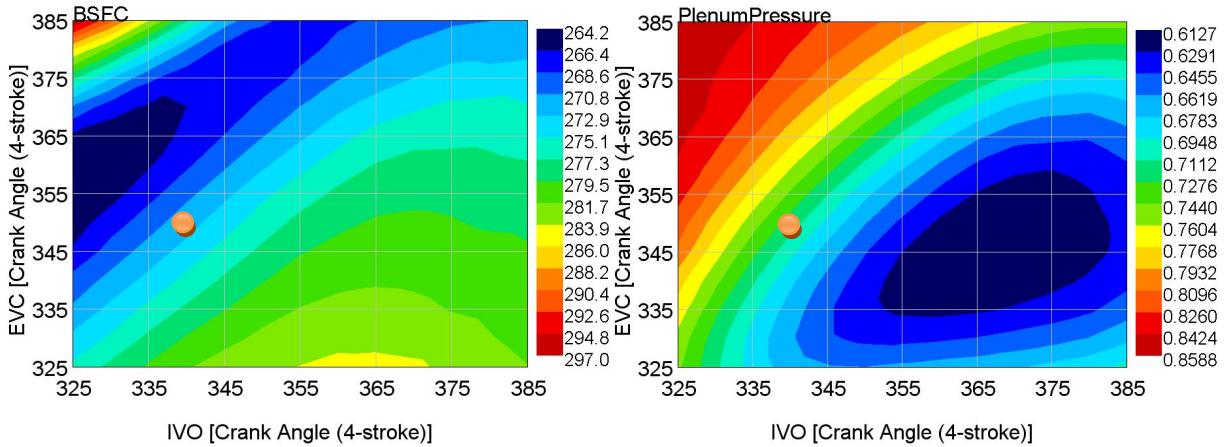


图 5 工况点二比油耗（左）和容积腔压力（右）随气门相位变化

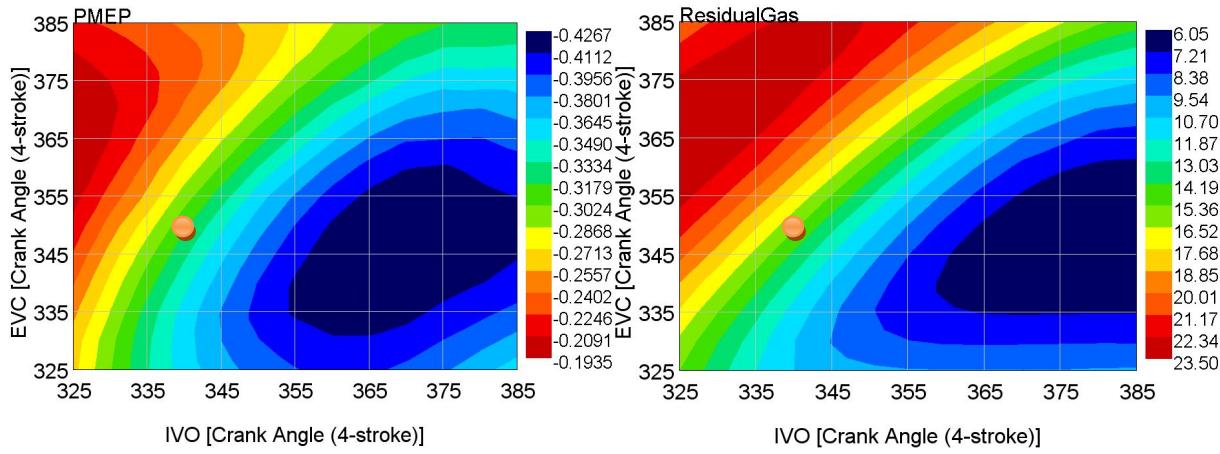


图 6 工况点二泵气损失 (左) 和残余废气 (右) 随气门相位变化

### 3) 爆震区的工况点三

该工况点由于负荷较大, 泵气损占油耗比例较低, 因此泵气损已不是相位优化的侧重点。由于较大的负荷, 燃烧已出现爆震现象, 因此该工况点相位优化的侧重点是在控制泵气损不太高的前提下, 尽量降低缸内残余废气量, 降低爆震倾向, 提高燃烧指示热效率, 降低油耗。

依据这个准则, 最终选择的相位为: IVO: 365°CA, EVC: 345°CA

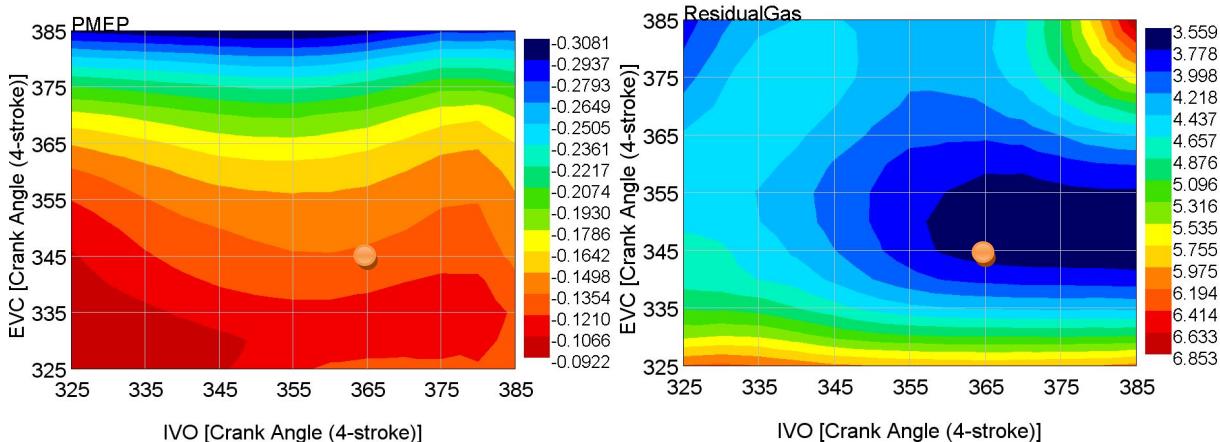


图 7 工况点三泵气损失 (左) 和残余废气 (右) 随气门相位变化

### 4) 爆震区的工况点四 (外特性)

外特性相位需要在确保达到外特性动力性开发目标的前提下, 控制残余废气量降低爆震倾向。

基于上述考虑, 最终选择的相位为: IVO: 350°CA, EVC: 340°CA

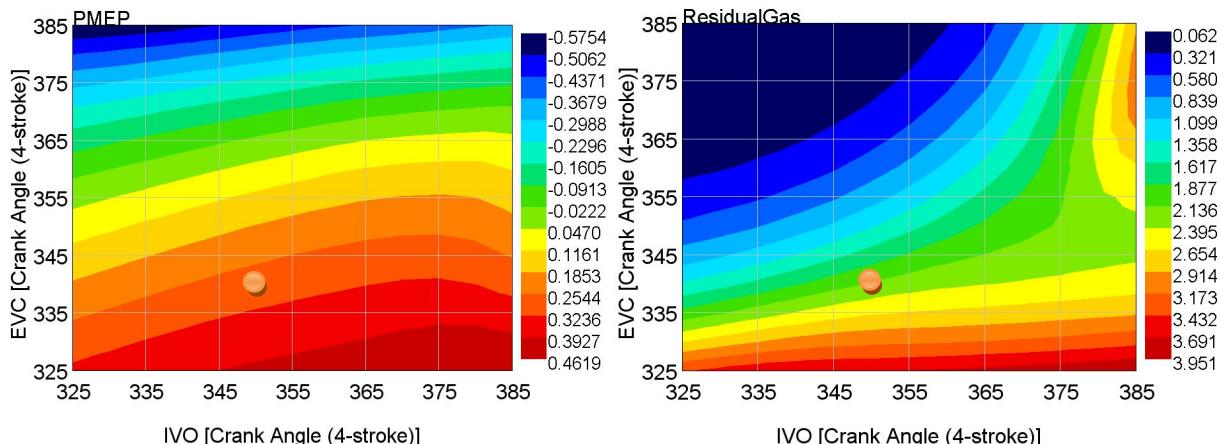


图 8 工况点四 (外特性) 泵气损失 (左) 和残余废气 (右) 随气门相位变化

## (二) 发动机瞬态响应计算结果

根据以上相位计算结果设置发动机不同负荷下的进排气相位, 对比不同参数对发动机扭矩瞬态响应性影响大小, 结果如下。

### 1) 压气机后进气系统容积对瞬态响应影响

压气机后进气系统容积越大, 增压器就需要工作更长时间来建立压力, 相应的发动机的响应性也就越差。

模拟计算对比了增加 5L (整个进气系统容积约 25L) 压气机后进气系统容积后, 发动机瞬态响应变化。从计算结果来看, 进气系统容积增加 5L (20%), 会使发动机 2000r/min 扭矩 0~90% 响应时间从 1.31s 延迟到 1.46s, 增加了 0.15s, 增加了 11.5%。

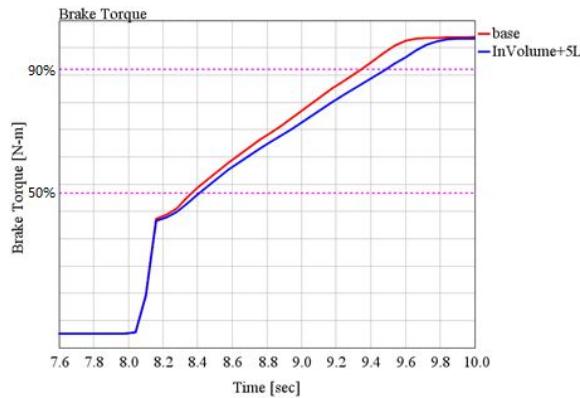


图 9 进气系统容积对发动机瞬态响应性影响

### 2) 涡轮机前管路容积对瞬态响应影响

和进气系统容积增加类似, 增加涡轮前排气系统容积会延迟涡前压力建立的时间, 延迟涡轮对废气能量的利用时间, 相应的增压器转速上升的也就越晚, 发动机的响应性也就越差。

模拟计算对比了增加 0.3L 涡前排气管容积发动机瞬态响应性变化。从计算结果来看, 涡轮前管路容积增加 0.3L, 会使发动机 2000r/min 扭矩 0~90% 响应时间从 1.31s 延迟到 1.61s, 增加了 0.3s, 增加了 22.9%。

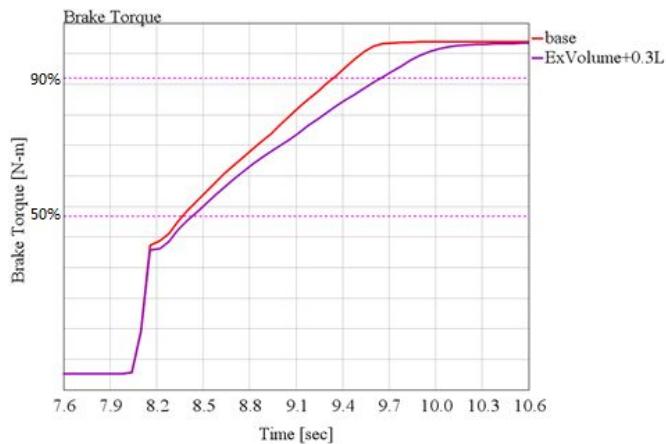


图 10 进气系统容积对发动机瞬态响应性影响

### 3) 增压器效率对瞬态响应影响

#### ① 压气机效率对发动机瞬态响应影响

通常压气机效率越高后气体温度也就越低, 发动机扭矩也就越大, 扭矩瞬态响应也就越好。

计算时设置了压气机 map 效率提高到原来的 1.05 倍, 使它的最高效率区效率大约能提升 3.5 个

百分点。计算结果表明，效率提升后，发动机 2000r/min 扭矩 0~90% 瞬态响应时间从 1.31s 降低到 1.25s，减少了 0.06s，减少了 4.6%。

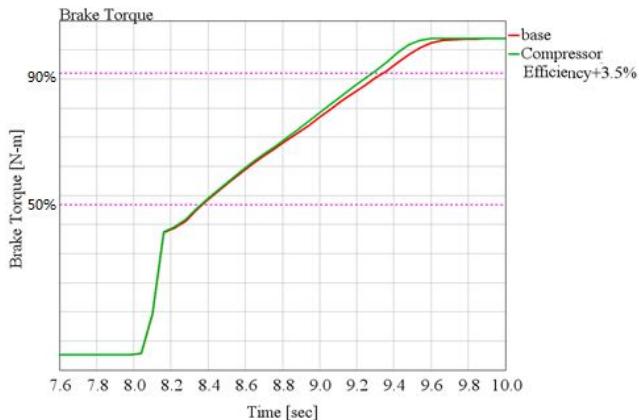


图 11 压气机效率对发动机瞬态响应性影响

## ② 涡轮机效率对发动机瞬态响应影响

提高涡轮机效率，可以提升涡轮从废气中回收能量的能力，响应的叶轮加速也就越快，增压压力也就提升的越快，发动机瞬态响应性也就越好。

计算时设置涡轮机 map 效率提高到原来的 1.05 倍，使它的最高效率区效率大约能提升 3.5 个百分点。计算结果如下图所示，效率提升后，发动机 2000r/min 扭矩 0~90% 瞬态响应时间从 1.31s 降低到 1.22s，减少了 0.09s，减少了 6.9%。

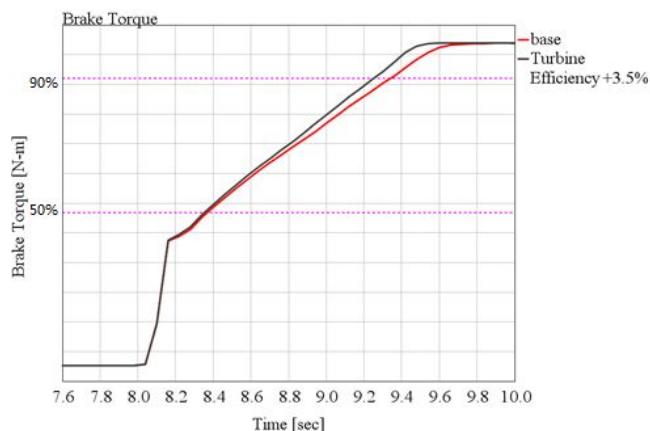


图 12 涡轮机效率对发动机瞬态响应性影响

## 4) 不同增压器叶轮转动惯量对瞬态响应影响

一般增压器叶轮转动惯量越大，叶轮惯性也就越大，转速提升也就越慢，增压压力增加的速度也就越慢，发动机瞬态响应性也就越差。

模拟计算对比了增压器叶轮转动惯量提高 15% 对发动机瞬态响应影响（增压器转动惯量从  $4.2\text{kg/mm}^2$  提高到  $4.8\text{ kg/mm}^2$ ）。计算结果表明，叶轮转动惯量增加后，发动机 2000r/min 扭矩 0~90% 瞬态响应时间从 1.31s 延迟到 1.40s，增加了 0.09s，增加了 6.9%。

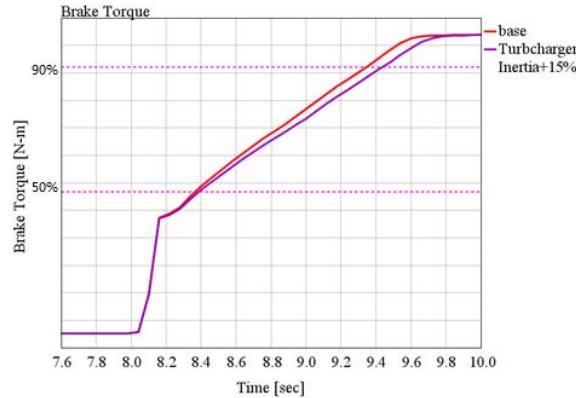


图 13 增压器转动惯量对发动机瞬态响应性影响

下表总结了上述各个参数对发动机扭矩瞬态响应影响。

表 2 不同参数变化对发动机瞬态响应性影响

瞬态响应性对比	基础机	压气机后进气系统容积增加 5L	涡轮前排气管容积增加 0.3L	增压器效率提升		增压器转动惯量提升 15%
				压气机效率提升 1.05 倍	涡轮机效率提升 1.05 倍	
0~90% 扭矩瞬态响应时间	1.31s	1.46s	1.61s	1.25s	1.22s	1.40s
和基础机相比	-	增加 0.15s (11.5%)	增加 0.3s (22.9%)	减小 0.06s (4.6%)	减小 0.09s (6.9%)	增加 0.09s (6.9%)

模拟计算中以上所有参数的变化均为正常范围的参数变化。通过模拟计算可以看到采用不同设计方案，一款响应性设计优秀的增压发动机和一款响应性设计较差的发动机其瞬态响应最大能相差约 50% 以上。

因此在增压发动机概念设计阶段时就需要特别注意瞬态响应性设计。在进行进排气系统设计的时候，需要在保证进排气阻力目标的前提下，尽量减小进排气管路系统容积；在进行增压器匹配计算选型的时候，除了传统的评价稳态工况的增压器性能外，还需要评价瞬态工况下增压器效率和增压器叶轮转动惯量大小综合对响应性的影响。基于这方面的考虑，这种模拟计算方法被应用到了发动机概念设计阶段的增压器匹配计算中。

#### 4 在发动机概念设计阶段应用瞬态响应计算

从上节可以看出，在发动机概念设计阶段增压器匹配计算时，仅评价增压器的稳态性能，无法保证发动机的瞬态响应性。还需要同时评价增压器瞬态响应性，选出不仅稳态性能较好，而且瞬态性能同样优秀的增压器样件，降低后续增压发动机的瞬态响应性开发风险。因此，这一评价方法被应用到了 CA3GA10TD 的增压器匹配计算中。

首先通过 GTPower 稳态计算选出了三款性能较好的增压器，按照性能优劣分别命名为方案 1~3。然后按照上述发动机瞬态响应计算方法进行了瞬态响应性评价。计算结果如下图所示。增压器方案 1 和 3 的 2000r/min 扭矩 0~90% 瞬态响应时间为 1.31s 左右，相差不大，但方案 2 增压器的瞬态响应性则达到了 1.42s，较其他 2 款增压器方案差 0.11s，因此排除了该款增压器方案，降低了瞬态响应性开发风险。

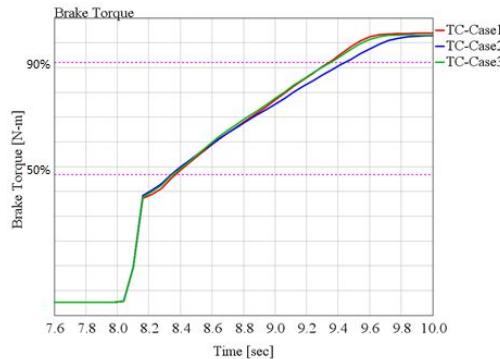


图 14 不同增压器方案的发动机瞬态响应性

## 5 结论

从以上分析可以看出，提高增压发动机瞬态响应性需要从以下几方面着手优化：

在保证进排气阻力的前提下，减小进排气管路系统容积。可以从以下几方面着手：

关注中冷器容积的大小是否合理，它的容积占进气系统容积近一半；

采用进气容积腔集成中冷器可以有效缩短整车进气管路容积；

优化涡前管路长度设计，减小涡前管路容积；

采用缸盖集成排气管或一体式涡轮壳集成排气管，减小涡前管路容积。

在概念设计阶段增压器匹配计算时，除关注增压器稳态性能外，增压器的瞬态响应性也同样需要关注。因此，在概念设计阶段，除以往的增压器稳态匹配计算外，还应加入瞬态模拟计算来评价增压器的瞬态响应性。通过采用这种方法可以有效降低瞬态响应性开发风险，节约开发成本。

## 参考文献：

- [1] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器. 北京：机械工业出版社，1992 年 11 月.
- [2] 周龙宝, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学. 北京：机械工业出版社, 1999.
- [3] R. Flierl, M. Klüting. The Third Generation of Valvetrains - New Fully Variable Valvetrains for Throttle-Free Load Control. SAE paper 2000-01-1227.