

GT-POWER 在机械增压汽油机闭缸和 VVL 节油潜能的应用

Cylinder Deactivation and VVL technology

research on reduction of BSFC for mechanical supercharge gasoline by GT-Power

马俊杰 刘金玉

中国第一汽车股份有限公司技术中心发动机部

摘要: 随着 CO₂ 排放法规的日益严格, 追求最佳燃油经济性能成为汽油机重要开发目标。本文利用热力学模拟, 计算分析了闭缸及 VVL 等技术对机械增压汽油机油耗的影响, 同时计算分析了闭缸技术带来的负面因素。计算分析结果显示, 闭缸能使发动机 2000rpmBMEP=2bar 的油耗改善 13.5%, VVL 技术能使该机型 2000rpmBMEP=2bar 的油耗改善 5.5%。对于机械增压直喷汽油机, 闭缸只能改善低速小负荷区域的油耗, 但 VVL 技术可以改善发动机整个 MAP 区域。但闭缸会导致扭矩波动变大, NVH 恶化等负面影响, 而 VVL 没有该负面影响。

关键词: 闭缸, 可变气门升程, 机械增压, 燃油油耗率, GT-power

Abstract: With the increasingly stringent emission standards and the implementation of the third stage fuel consumption regulations, ...

Key words: Cylinder Deactivation, VVL, supercharge, BSFC, GT-power

1、引言

汽油发动机改善燃油经济性的技术措施有很多, 目前国内外主流技术方向是闭缸和 VVL 技术, 这两种技术拥有各自的优缺点。闭缸技术通过降低泵气损失, 同时负荷点转移会提升热效率, 但是闭缸会使得发动机扭矩波动变大。VVL 适用范围广, 在改善经济性的同时可以兼顾改善动力性, 但对应结构较为复杂。针对开发发动机的燃油经济性的目标, 本文详细计算分析了两种技术的在机械增压发动机上改善燃油经济性的优劣, 并给出了建议。

2、发动机基本情况介绍

本文计算分析的对象为 FAW 新研发机型 V6 机械增压发动机, 该机型的基本参数如表 1 所示:

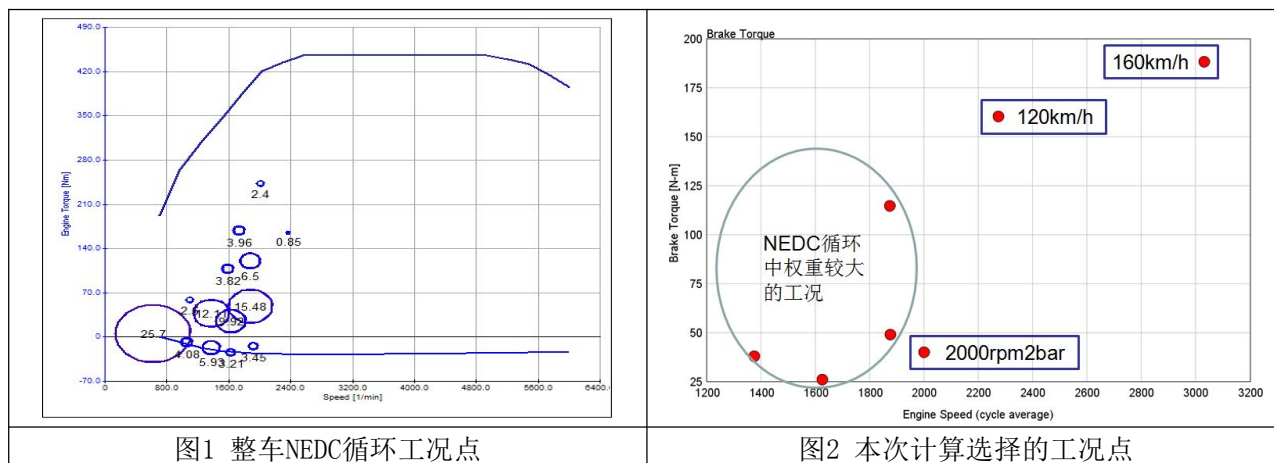
表 1 基本参数简介

基本参数			
几何参数	缸径	mm	82
	冲程	mm	78.8
	S/D	-	0.96
	缸数		6
	排量	cm ³	2497
全负荷	额定功率	kW	225
	最大扭矩	Nm	430

3、闭缸和 VVL 计算分析

3.1 计算工况的选择:

为了全面分析燃油经济性能的改善程度,选择的计算工况为整车NEDC循环中时间权重较大的几个工况,及燃油经济性能重要的评价点2000rpmBMEP=2bar,车速为120km/h和160km/h对应的工况点。图1是整车NEDC循环对应的发动机工况点,图2是NEDC中权重较大的对应工况点及本次计算的另外3个工况点位置。



3.2 计算结果分析

本文对比了闭缸及VVL技术的多种组合形式在上述工况的油耗改善的分析,具体包括闭缸技术、可变气门升程技术(VVL)、关闭一侧进气门技术、闭缸+可变气门升程技术。

3.2.1 采用闭缸技术对油耗的改善计算分析

3.2.1.1 闭缸及闭缸节油原理:

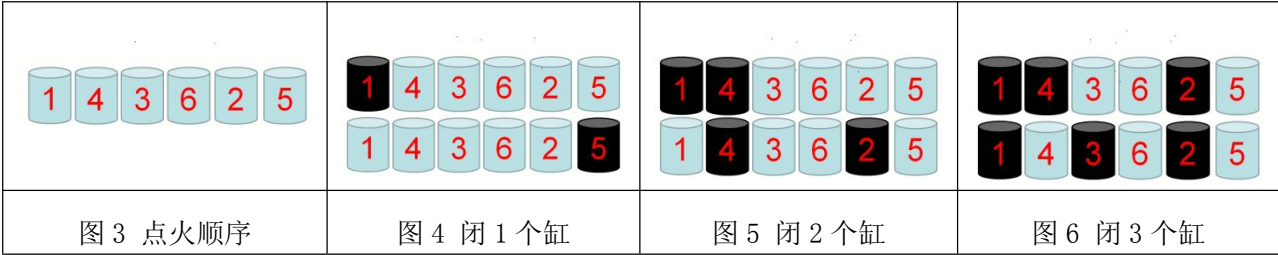
闭缸:指发动机在运行中,关闭一个或者几个缸,使得部分气缸处于停止状态,故也叫停缸技术,闭缸时,进排气门处于关闭状态,被闭缸停止供油和点火,使得工作缸负荷率提高。

闭缸节油原理:汽油机负荷率越高,机械效率就越高,若在部分负荷时关闭部分气缸,就必须供给工作气缸更多的可燃混合气以达到闭缸前发动机的功率,这样可增加工作缸的负荷率,从而提高发动机的机械效率^[2] (η_{nm} =满负荷的机械效率, η_m =部分负荷的机械效率, ξ η_{nm} =负荷率)。同时闭缸后节气门开度会增大,从而泵气损失会有一定下降,从而改善了燃油经济性。

$$\eta_m \leq \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_m}{\xi \eta_{nm}}} \leq \eta_{nm}$$

3.2.1.2 闭缸方式选择

对于V6发动机来说闭缸的选择有多种,下图列举了本次计算的闭缸方式。图3为发动机的点火顺序,图4为闭一个缸的两种方式,图5为闭两个缸的两种方式,图6为闭三个缸的两种方式。其中黑色部分代表计算中关闭的汽缸。



3. 2. 1. 3不同闭缸方式计算结果

图 7 表示，采用不同的闭缸方式，发动机达到了相同的工况，相互之间有可比性；图 8 显示了不同闭缸方式的 BSFC 的变化，不同颜色的圆点代表不同的闭缸方式，例如红色圆点代表不闭缸，绿色圆点代表闭 123 缸，其他可参考图列中的具体说明。

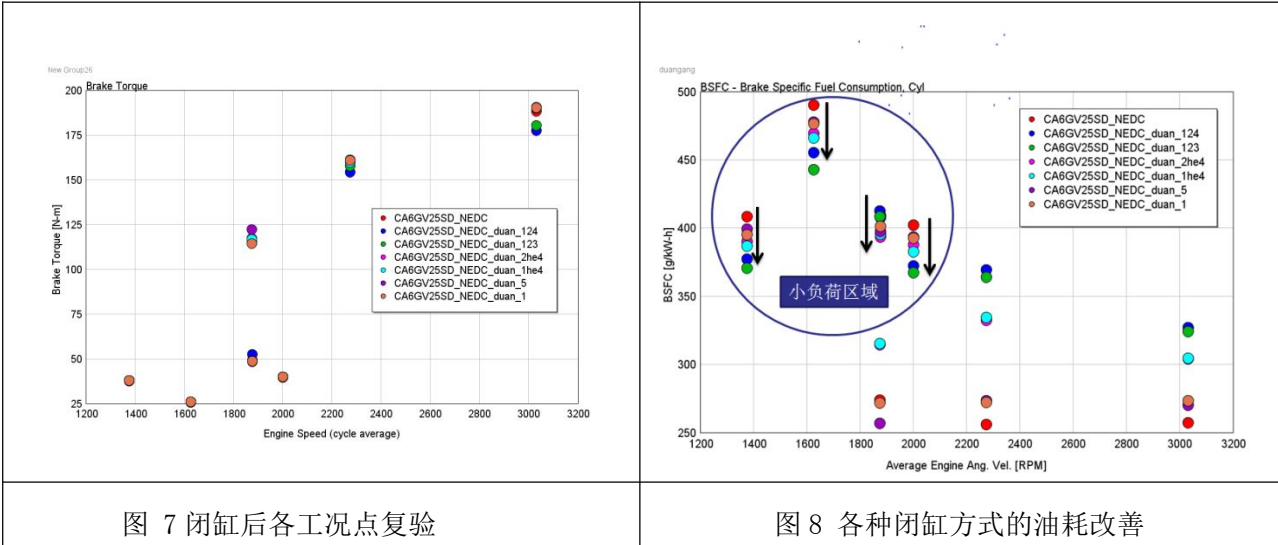


图 9 是各种闭缸方式相对比不闭缸的油耗变化结果的总揽，不闭缸的油耗做为基准值 0%。正数代表油耗改善，负数代表油耗恶化。

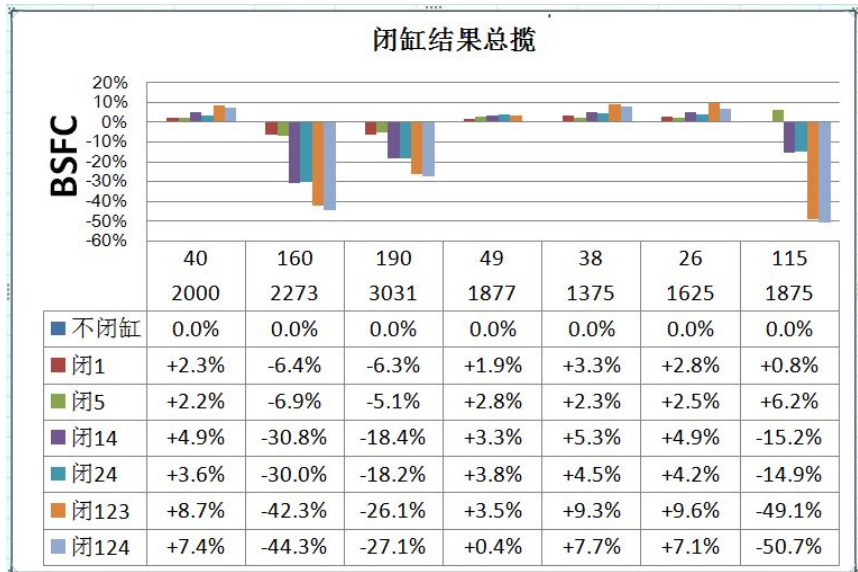


图 9 闭缸结果总揽

对于机械增压发动机，闭缸对于小负荷区域油耗有大幅改善，但是会使大负荷区域油耗恶化，闭的缸数越多，恶化越发严重，这主要因为发动机闭缸后为了达到相同的扭矩必须增加增压压力，机械增压

器就要消耗更多的附属功,虽然也能降低泵气损失,但是消耗的附属功更多,所以恶化了油耗。对于低速小负荷,在诸多闭缸方式中,闭同侧123缸的降油耗效果最好,其次是闭124缸,接下来是闭两缸,再下来是闭1个缸,最差是不闭缸;对于高速大负荷,闭缸会使油耗恶化。结合发动机闭缸工况悬置力计算结果,最终选取闭123缸(正好是V6的单侧一列)作为闭缸的最终方案,之后若无特殊说明,文中所讲的闭缸都是这种闭缸方式。

图10对比了BSFC(有效燃油消耗率)、PMEP(泵气损失)、AMEP(附属件功)和扭矩在不同工况采用不同闭缸方式(图中不同颜色圆点代表不同闭缸方式,例如:红色代表不闭缸,绿色代表闭123缸,其他可参考图例)的对比,可以看出无论哪种工况,采用闭缸都会带来泵气损失的减小,但是,大负荷由于机械增压器的介入,附属功迅速增大,造成油耗反而恶化。

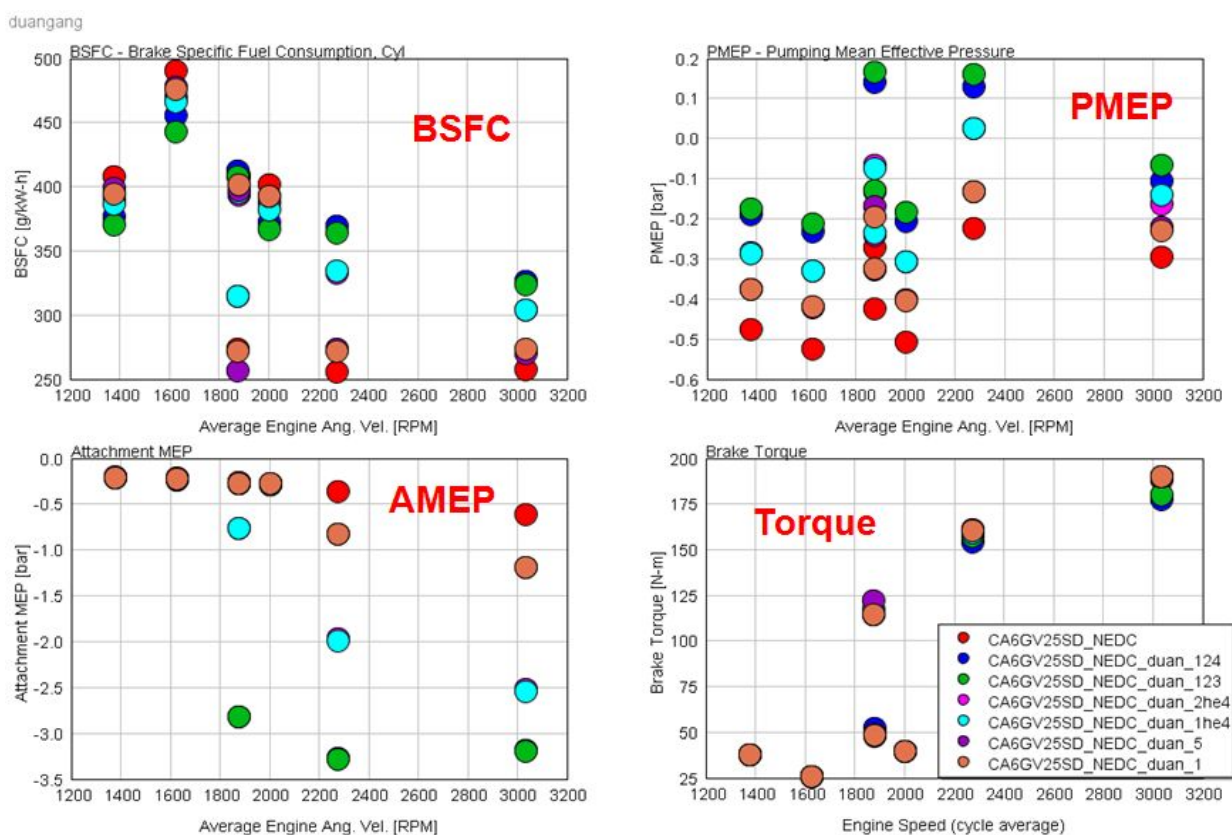


图 10 其他参数对比

3.2.1.3 闭123缸相位优化后计算结果

上述结果是没进行相位优化的结果,采用闭缸后,工作缸的废气残余系数减小,燃烧稳定性提高,气门重叠角可以进一步加大,泵气损失将会进一步降低。采用闭123缸后,经过相位优化后,2000rpmBMEP=2bar油耗降可以进一步改善,在小负荷区域平均改善3%左右。图11展示了闭123缸后不同工况的燃油改善度。

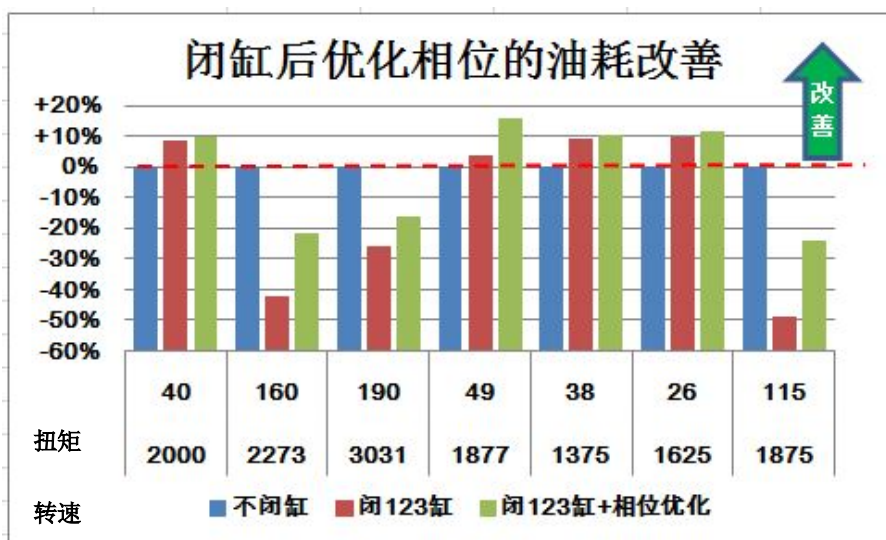


图 11 闭 123 缸+相位优化后 BSFC 结果

3.2.1.4 同时闭缸和分别闭缸对油耗的影响

上述结果是采用同时闭缸方式，即在某一时刻，3个气缸同时关闭，此时由于各缸内封存的气量不同，会使得这3个缸在压缩过程中缸内压力不同，气门封闭时，活塞位置离上止点越近，缸内封存的气体越少，压缩过程中所做的负功就越少，由此会造成各缸缸压不同，1缸和2缸压缩负功较大，如图12所示。针对上述问题，计算了分别闭缸方式，即每缸在活塞运行到上止点附近时关闭气门，使得3个缸内的封存气体量近似一致。图13对比了油耗改善情况，例如在2000rpmBMEP=2bar，采用分别闭缸+相位优化，可以使得该工况的BSFC改善幅度近14%。相比同时闭缸，分别闭缸的油耗能改善2.5%左右。

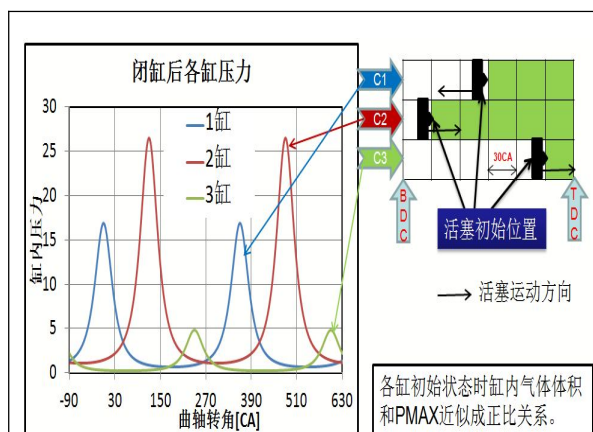


图 12 闭缸后缸压及活塞状态

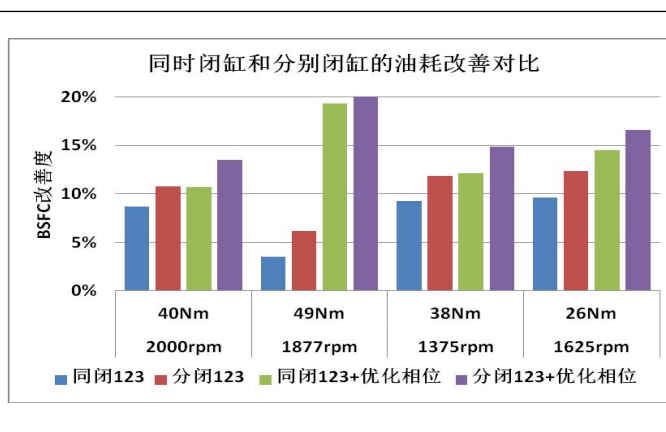


图 13 同时闭缸和分别闭缸相对不闭缸的燃油改善度

3.2.1.5 闭缸带来的负面影响

依据计算分析，闭缸后会造成扭矩波动变大，NVH变差。图14是分别闭缸和同时闭缸对扭矩波动的影响的结果，图中的红线是分别闭缸的计算结果，蓝线是同时闭缸的计算结果，可以看出采用分别闭缸技术可以使得扭矩波动变小，扭矩波动也比较均匀。

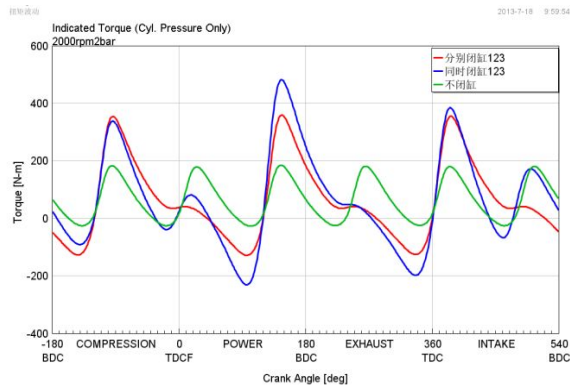


图 14 不同闭缸方式的扭矩波动

3. 2. 2采用VVL技术对油耗影响的计算分析

VVL技术有多种实现的方式，有凸轮包角不变只变化升程方式，有升程和包角都变化的方式，还有其他的实现方式，本论文的计算采用以下两种方式：

VVL1：只降低升程，包角保持不变如图15所示

VVL2：包角和升程可随意改变如图16所示

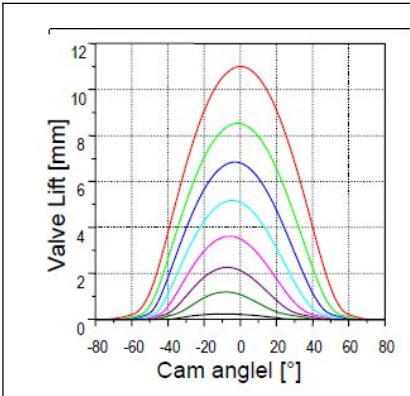


图 15 VVL1(包角不变升程降低)

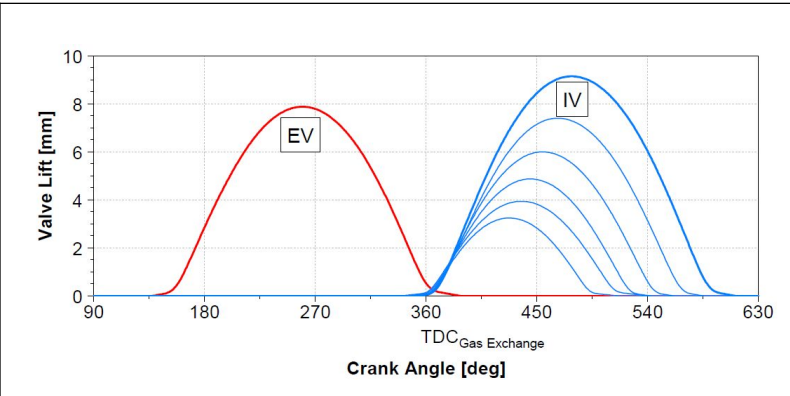


图 16 VVL2(包角升程同时降低)

图17是VVL1的计算结果，表18是VVL2的计算结果。

从计算结果可以看到，第一种VVL型式对油耗的改善基于废气残余系数的增大，具体增大程度如图17所示，如果调节相位使得废气残余系数达到原来水平，油耗基本没有改善。

本文主要介绍第二种VVL对油耗的改善效果，图18展示了VVL中采用不同包角系数对不同工况的改善程度，为了有可比性，只计算了低速小负荷区域，采用此类VVL油耗平均可以改善8%，其中2000rpmBMEP=2bar可以改善5.5%左右。（包角系数说明：原型线包角系数为1，包角系数0.8代表包角变为原来的80%，升程变为原来的64%，以此类推。）

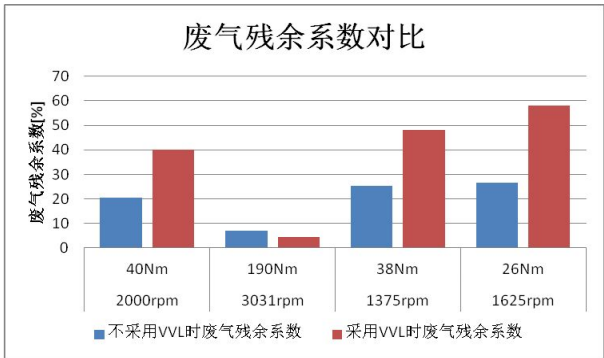


图 17 采用 VVL1 对废气残余系数的影响

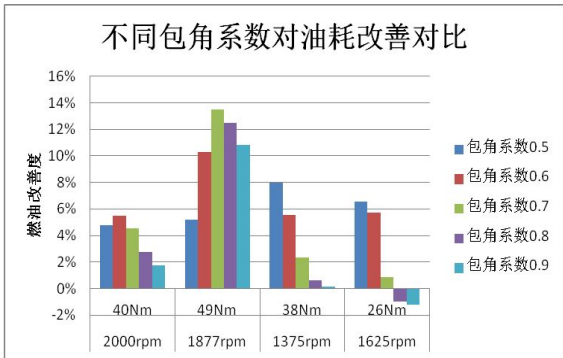


图 18 不同包角系数对油耗改善的影响

3.2.3 采用关闭一侧进气门技术对2000rpmBMEP=2bar的油耗改善计算分析

对于4气门发动机，在小负荷时，由于进气量不大，可以只用单侧气门进气，使得气体进入缸内会产生涡流，提高混合均匀性，改善燃烧效率。本计算分析只从换气角度来计算，关闭一侧进气门后对性能的影响，本次计算只选择2000rpmBMEP=2bar这一个工况点。图19、20是对应气门启闭的状态。



图 19 气门开启时状态（蓝：进气门；橙：排气门）

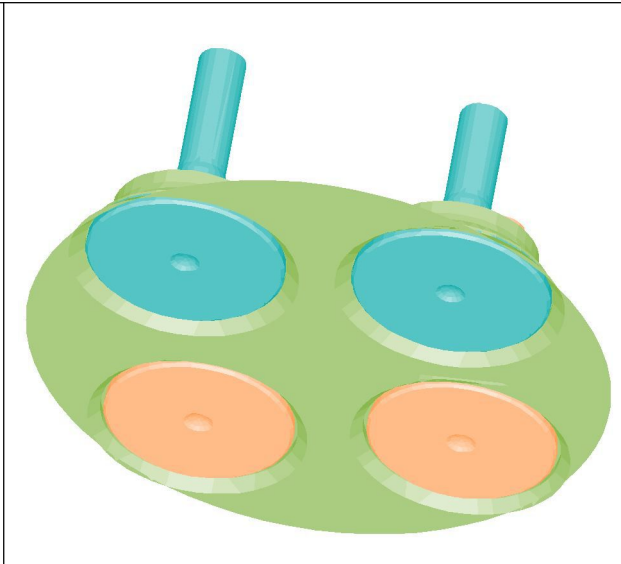


图 20 气门关闭时状态（蓝：进气门；橙：排气门）

图21、22是关闭一侧气门后进排气相位对废气残余系数和泵气损失的影响。从计算结果可以看到，关闭一侧进气门，通过相位优化，可以使2000rpmBMEP=2bar的泵气损失下降0.04bar，油耗改善4g左右，如果结合对燃烧效率的提升改善程度应该会更大。需要通过CFD计算或者试验验证，本文不再赘述。

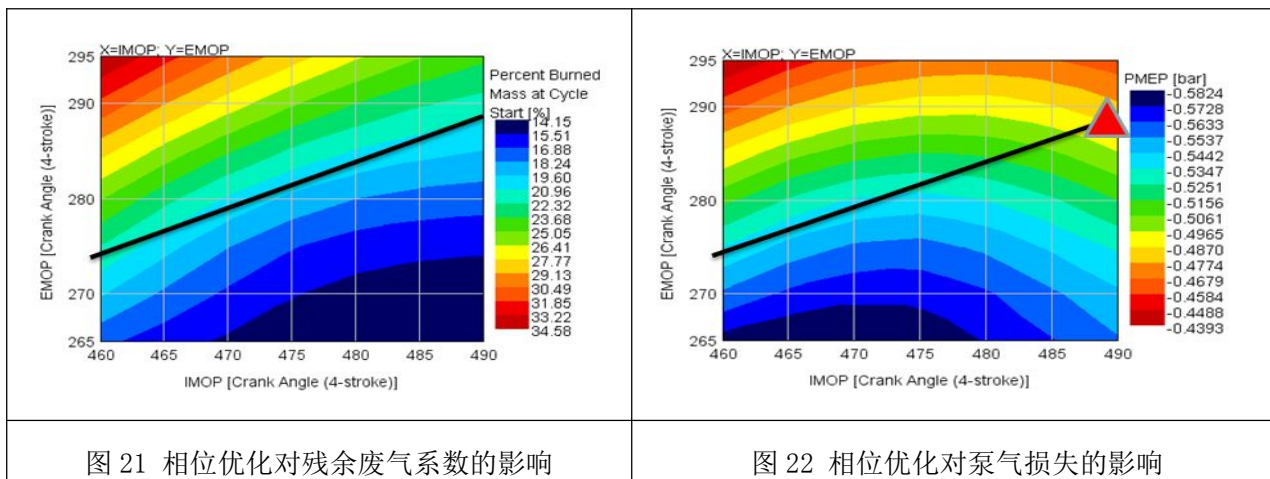


图 21 相位优化对残余废气系数的影响

图 22 相位优化对泵气损失的影响

3.2.4 采用闭缸+VVL技术对小负荷区域油耗的改善计算

同时采用闭缸+VVL技术。闭缸和VVL技术都是通过降低泵气损失来节油，二者同时使用也无法让泵气损失无限降低，所以同时使用上述两种技术并不能使得油耗进一步降低，计算结果表2也验证了这一点，所以在小负荷区域，不建议同时使用。

表 2 闭 123 缸和闭 123 缸+VVL 的 BSFC 改善对比

转速[rpm]	扭矩[Nm]	同闭 123	同闭 123+VVL
2000	40	10.7%	11.5%
1877	49	18.4%	18.4%
1375	38	11.6%	11.9%
1625	26	13.7%	14.1%

四、结论

通过计算对比闭缸、VVL、关闭一侧进气门和闭缸+VVL四种技术措施对FAW的V6机械增压直喷发动机部分负荷的油耗改善情况，汇总结果如图23所示

通过上述计算，可以得出下列结论：

1、在诸多闭缸模式选择中，分别闭单侧123缸对性能改善最好，这种闭缸方式的扭矩波动相对较大，需要整车NVH做进一步评价，从性能计算的角度推荐的最佳闭缸方式为分别闭单侧3缸，使得留在缸内的气体尽可能少，但不能是真空状态，以免抽机油。

2、闭缸仅对低速小负荷区域油耗有改善，在2000rpmBMEP=2bar这一个工况点闭缸最多可改善13.5%左右，

3、VVL在2000rpmBMEP=2bar 这一个工况点VVL可改善5.5%左右。但VVL可以应用于发动机map大范围区域^[3]，可针对不同需要选择不同技术。

4、关闭一侧进气门从换气角度来讲改善幅度在1%左右，从理论分析会对燃烧有好处，但这需要CFD计算或者试验来验证。

5、闭缸+VVL技术同时使用和只采用闭缸技术对低速小负荷油耗的改善相差不大。

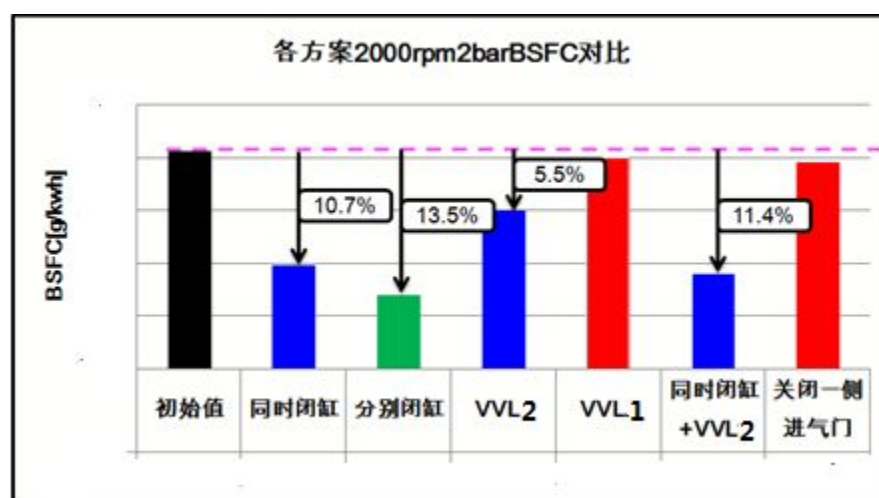


图 23 各种技术措施在 2000rpmBMEP=2bar 油耗的改善程度

参考文献:

- [1]. 刘志忠, 韩宗奇, 马玉环, 王展, 苏丹丹. 电喷发动机闭缸循环工作排放与经济性试验研究. 汽车工程 2007110, 2007.
- [2]. 张登攀 袁银南 崔 勇. 车用汽油机的闭缸节油技术. 小型内燃机与摩托车, 2007年第6期
- [3]. Paul **Kapus**, Kurt **Prevedel**, Josef **Wolkerstorfer**, Matthias **Neubauer**, AVL List GmbH, Graz, Austria, 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2013