

米勒循环在天然气发动机上的应用

Application of Miller Cycle on Natural Gas Engine

钟博, 刘林龙, 郭立新

(一汽解放发动机事业部前瞻技术研究院)

摘 要:采用 GT-power 软件, 对天然气发动机进行了米勒循环应用的计算分析, 结果表明, 在原机压缩比下, 通过进气门晚关可实现油耗 0.6% 的降低, 但对排温影响较小; 通过提高压缩比至 13, 采用进气门晚关和排气门晚开的米勒循环技术, 可使油耗有 2% 以上的降低, 排气温度降低幅度达 21°C;

关键词: 天然气发动机, 米勒循环、气耗、排气温度, GT-power

Abstract: The application of miller cycle on natural gas engine is analyzed by GT-power. The results show that, under the same compression ratio, the miller cycle can reduce the BSFC by 0.6%, but little effect on exhaust temperature. When the compression ratio increases to 13, the miller cycle can reduce the BSFC more than 2%, and exhaust temperature decreased by 21 degrees.

, keep compression ratio constant,

Key words: Gas Engine, Miller Cycle, BSFC, Exhaust temperature, GT-power

1. 引言

随着能源的日益枯竭和排放法规的日趋严格, 天然气作为一种替代燃料成为近年来国内外发动机行业的研究热点[1]。天然气发动机主要有稀薄燃烧和当量比燃烧两种路线, 当前欧 VI 天然气发动机开发中大都选择了当量燃烧路线。而当量燃烧路线中, 发动机缸内爆震风险明显增加, 同时也使燃油经济性变差, 排气温度明显升高。当前采用高压 EGR 技术降低爆震风险和排气温度的主要措施。米勒循环[2]通过改变发动机压缩比与膨胀比的不对称, 通过减小压缩过程增加气体的膨胀过程, 可有效降低发动机爆震风险、并影响到发动机的排气温度; 本研究采用 GT-power 一维计算软件建立了天然气发动机计算模型, 分析了米勒循环对发动机进气效率、燃油经济性及排温方面的影响。

2. 计算模型

以某天然气发动机为计算对象, 基于 GT-power 软件建立了一维计算模型。计算模型如图 1 所示, 计算工况主要与外特性为主, 因此模型中保持节气门全开, 通过控制增压器放气保证输出扭矩。EGR 阀开度则由 PID 根据目标 EGR 率自动控制。

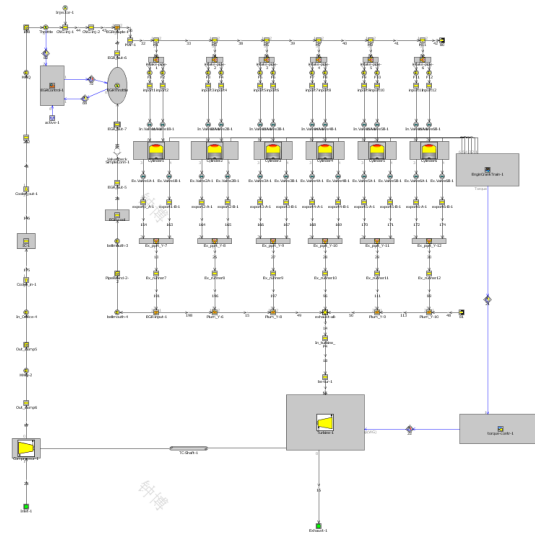


图 1 计算模型

3. 原机压缩比下米勒循环应用

在原有发动机基础上，为保证发动机不生活塞干涉、气门飞脱等问题，方案设计中保持进气门开启时刻和排气门关闭时刻不变，同时保持气门加速度不发生变化。因此在原机压缩比下对进气门晚关方案下的米勒循环模式进行分析。

文中首先对进气门晚关下的米勒循环进行计算，为保证进气门型线的变换不会引起活塞干涉、气门飞脱等问题，方案制定中保持气门叠开角及气门加速度不变，只对气门最大升程部分进行了调整，分别设计图 2 所示三组方案，进气门晚关角度分别延迟 10°CA 、 20°CA 、 30°CA ，记为 case1、case2、case3。由于气门晚关后会造成部分进气倒流，因此其有效压缩比会发生变化，图 3 所示为不同方案下有效压缩比的变化曲线，随着进气门晚关角度的增大，有效压缩比明显降低。原机进气门型线下有效压缩比为 11.56 左右；而在进气门晚关 30°CA 时，有效压缩比仅为 10 左右。计算中保持排气门升程与原机一致。

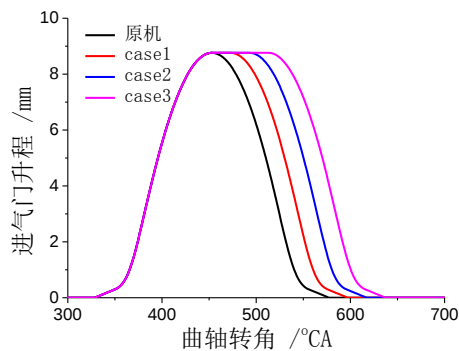


图 2 进气门升程曲线

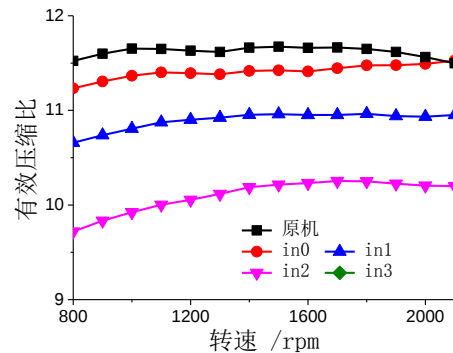


图 3 有效压缩比变化曲线

在天然气发动机的燃烧过程中，为降低爆震风险及排气温度，对系统 EGR 率有较高的要求，因此在各方案的设计中，需考虑各方案下的 EGR 率是否满足要求。图 4 所示为各方案下 EGR 变化曲线，由图可知，在 case1、case2 下发动机 EGR 率基本达到目标 EGR 率，而在 case3 下低转速可提供 EGR 率有限，达不到 EGR 率要求，因此 case3 方案不可用。

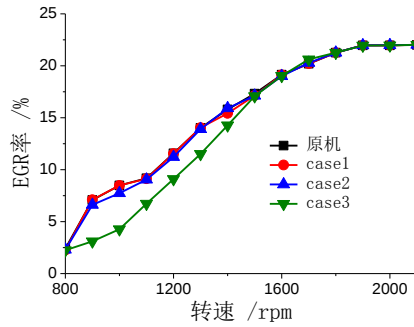


图4 EGR率变化曲线

图5所示为各方案下充气效率变化曲线，由图可知随着进气门晚关角的增加，进气回流现象增强，从而使充气效率逐渐降低。在原机方案下充气效率基本在0.9左右，case1方案下充气效率较原机略有降低，而case2下充气效率降低幅度明显增大，充气效率基本在0.2~0.85范围内。

图6所示为进气压力变化曲线，由于随着进气门关闭时刻的延迟，其充气效率明显降低，因为为保证发动机的扭矩输出，其进气压力则随之增加，在case2下进气压力较原机增加了5%左右。

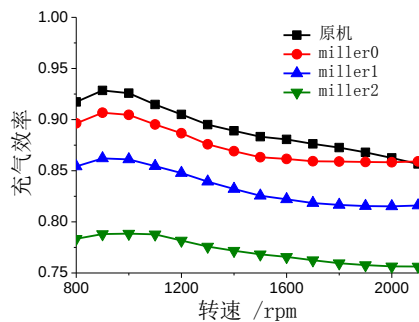


图5 充气效率曲线

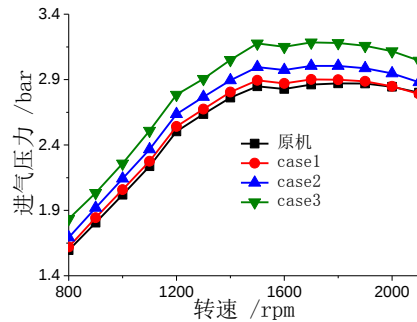


图6 进气压力曲线

图7所示为各方案下油耗变化曲线，随着进气门关闭时刻的延迟，发动机油耗有所降低，其中低转速（1200rpm以下）下时，case1、case2油耗低于原机油耗，但case3方案油耗有明显升高，其原因在case3下低转速工况发动机可实现EGR率较低，此时其排气背压较高，使其泵气损失增加，进而影响该工况下的油耗。而在高转速下随着进气门关闭时刻的延迟，其进气压力逐渐升高，使其泵气损失逐渐降低，因而油耗也有所降低。

图8所示为各方案下的排气温度变化曲线，由图可知在计算方案下，case1、case2的涡前温度基本与原机一致，而case3下由于部分工况EGR率未达到目标EGR率，因此使其排温有所升高。表明在原机压缩比下，米勒循环模式可在一定程度降低发动机的泵气损失，进而提高发动机的燃油经济性，但对发动机的膨胀做功过程没有影响，因此其对排气温度的作用有限。

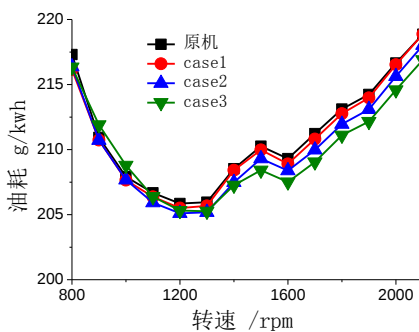


图7 油耗变化曲线

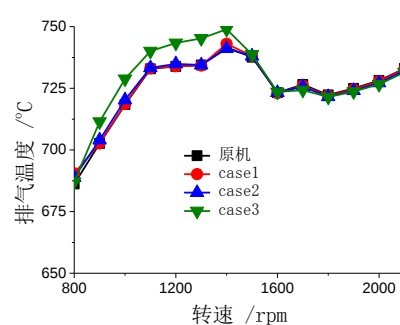


图8 排气温度变化曲线

4. 高压缩比下米勒循环应用

将发动机压缩比提高后,发动机的爆震风险明显增高,因此为降低发动机的爆震风险,通过进气门晚关方案降低发动机的有效压缩比,在发动机压缩比提高至不同水平时,文中设计了不同的进气门晚关方案,以保证发动机有效压缩比与原机相近。

将发动机压缩比提高至 13 后,设计了图 9 所示的进气门晚关方案,主要是通过增加最大升程持续角的方法,增加进气门包角,从而实现进气门的晚关。各方案分别将进气门关闭时刻后延 0°CA 、 10°CA 、 20°CA 、 30°CA ,分别记为 in0、in1、in2、in3 方案。图 10 所示为统计的各进气门晚关方案下对应的有效压缩比变化曲线,由图可知在压缩比提高至 13 后,原机气门型线下对应的有效压缩比提高 12.5 左右,随着进气门晚关角的增大,有效压缩比逐渐减小,在 in2 方案(进气门晚关 20°CA)下有效压缩比与原机相近,基本在 11.7 左右。因此在压缩比为 13 的条件下,进气门型线选择 in2 开展后续计算。

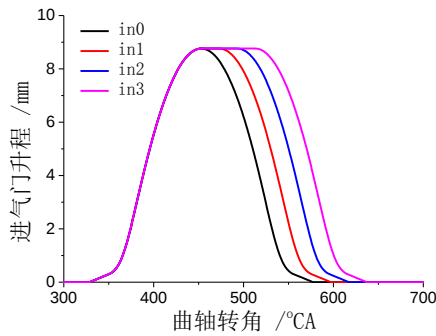


图 9 进气门升程曲线

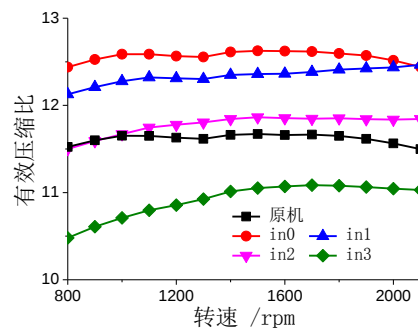


图 10 有效压缩比变化曲线

为进一步增加发动机的几何膨胀比,本文在上文确定的进气门型线基础上,对排气门开启时刻进行延迟方案设计,如图 11 所示,将进气门开启时刻分别延迟 0°CA 、 10°CA 、 20°CA 、 30°CA 、 40°CA ,分别记为 miller0、miller1、miller2、miller3、miller4。方案设计中同样保证气门叠开角和气门加速度不变,只对最大升程部分型线进行了调整。图 12 所示为不同排气门开启时刻对应的几何膨胀比变化曲线,由图可知,原机的几何膨胀比仅为 8.6,在压缩比提高至 13 后,原机几何膨胀比提高至 9.4 左右,而随着排气门开启时刻的延迟,几何膨胀比明显增加,在 miller4 方案下几何膨胀比增大为 1.2

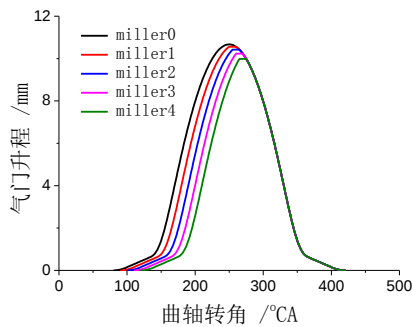


图 11 排气门升程曲线

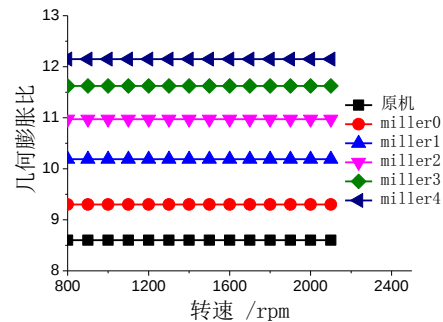


图 12 几何膨胀比较

在天然气发动机的燃烧过程中,为降低爆震风险及排气温度,对系统 EGR 率有较高的要求,因此在各方案的设计中,需考虑各方案下的 EGR 率是否满足要求。图 13 所示为不同方案下 EGR 率变化曲线,由图可知压缩比提高至 13 后,在计算方案内发动机的 EGR 率基本达到了目标 EGR 率,表明在该计算方案下对 EGR 的提供满足要求。

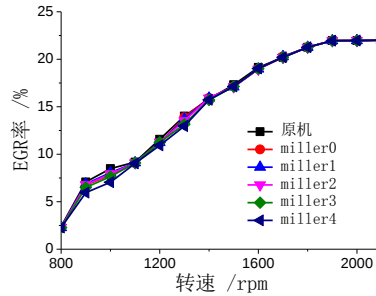


图 13 EGR 率变化曲线

图 14 所示为充气效率变化曲线，由图可知，在压缩比提高后，进气门晚关 20°CA 时充气效率有明显的降低，最高充气效率由原机的 0.93 降至 0.87 左右。而随着排气开始时刻延迟角的增大，充气效率则进一步降低。为保证发动机的输出扭矩一致，在 miller 循环模式下，进气压力则有明显升高，以保证做够的进气量，图 15 所示为各方案下进气压力的变化曲线，由图可知，原机方案下进气压力最低，在压缩比提高后，进气门关闭时刻延迟 20°CA 后，进气压力有所增大；而随着排气门的开启时刻的延迟进气压力进一步增高。

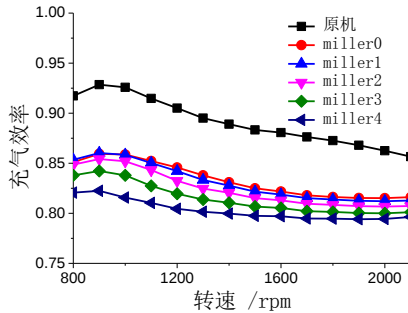


图 14 充气效率变化曲线

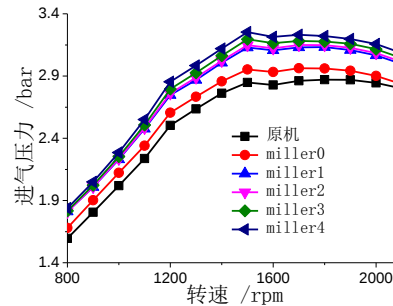


图 15 进气压力变化曲线

图 16 所示为各方案下 BSFC 变化曲线，由图可知，在提高压缩比后的 miller 循环模式下，发动机油耗较原机均有明显的降低。比较各 miller 循环方案表明，随着排气门开启时刻的延迟，油耗呈先降低后增大的趋势，即排气门开启时刻适当延迟，可有效增加发动机膨胀做功，同时不引起泵气损失明显增加；而排气门延迟角过大时，泵气损失将明显增大，且加大幅度高于膨胀功的增加，因此会引起油耗的升高。因此油耗最低方案为 miller1 方案，即排气门开启时刻延迟 10°CA ，此时发动机外特性工况下的油耗降幅均在 2% 以上。

图 17 所示为排气温度的变化曲线，由图可知，压缩比为 13 时，在米勒循环模式下排气温度均明显低于原机，且随着排气门开启时刻延迟角的增大，排气温度逐渐降低，在 miller4 方案下排气温度最低，最大排气温度较原机降低了 23° 。在最低油耗方案 miller1 方案下最大排气温度也有 21° 的降幅。

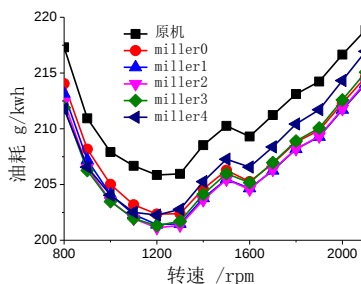


图 16 油耗变化曲线

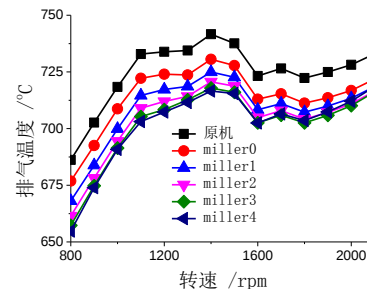


图 17 排气温度变化曲线

5. 结论

1、在原机压缩比下采用进气门早关方式实现米勒循环时，体积效率会有所降低，从而使进气压力增大。同时进气门关闭延迟角为 30°CA 时，会使发动机低转速下可提供 EGR 率降低，从而使排温升高。

2、在原机压缩比下，米勒循环模式（进气门晚关 20°CA 时）可在一定程度降低发动机的泵气损失，进而提高发动机的燃油经济性，油耗有 0.6% 左右的降低，但对发动机的膨胀做功过程没有影响，因此其对排气温度的作用有限。

3、提高发动机压缩比至 13 后，通过进气门晚关 20°CA 可保证有效压缩比与原机相近，同时采用可排气门开启时刻延迟 10°CA ，可使几何膨胀比由原机的 8.6 增至 10.2。该方案下随使体积效率明显降低，使进气压力升高，但同时会使发动机油耗降低 2% 以上，且最大排气温度降低 21° 。

6 参考文献

- [1] 马义，王晓辉，李红洲 欧 VI 天然气发动机关键技术研究[J] 车用发动机 2016. 4, 71-75
- [2] 付中伟，滕勤，刘青林 阿特金森/米勒循环发动机的技术与应用[J] 小型内燃机与车辆技术 2017. 5, 75-82