

进气压力波动机理的研究和利用

The Analysis and Application of Intake Wave

陶鸿莹 徐志梅 裴梅香

(泛亚汽车技术中心有限公司 上海 201201)

摘要: 本文使用计算机模拟、理论分析和试验等方法,较深入地研究了发动机进气压力波的产生机理和传播规律。根据进气压力波和发动机工作的特点,有针对性地提出了若干种措施,这些措施改变了进气压力波的频率、强度和利用率等,从而为实现发动机充气效率的最优化提供了方向,部分措施得到了试验的验证并用于量产汽油发动机。这些研究将有助于发动机的性能开发。

关键字: 压力波 膨胀波 压缩波 充气效率

Abstract: Based on the method of the computer simulation, theory analysis and test, the author investigates the generation mechanism and propagation rule of the engine intake wave. Utilizing the intake wave and engine work characteristic, provide several technical solutions to improve the engine volume efficiency and performance. These solutions can optimize the frequency, strength and efficiency of the intake wave. Some of the solutions are validated in test, and be applied in new generation engine. The paper can help engineer to development higher performance engine.

Key Words: Pressure Wave, Expansion Wave, Compression Wave, Volumetric Efficiency

概述

发动机的进气属于瞬态过程,在进气系统和气缸中存在明显的压力波动。进气压力波的特性影响了发动机的充气效率,特别是汽油机,充气效率的大小决定了发动机的做功能力,在部分负荷时,进气压力波还影响发动机的油耗。基于理论分析和试验的方法可以初步探讨进气压力波的特性,在此基础上,引入计算机模拟技术研究进气压力波具有高效和低成本的特点。在实践中发现,一维热力学计算机模拟技术可以用于研究进气压力波,计算精度也是比较好的。

本文使用计算机模拟、理论分析和试验等方法,较深入地研究了发动机进气压力波的产生机理和传播规律,提出了优化发动机充气效率的若干措施,部分措施得到了试验的验证并用于量产汽油发动机。

1 进气系统压力波的产生机理

在发动机进气门打开的初始阶段，由于活塞的向下运动和气流的惯性作用，使得气缸内的压力下降形成负压，新鲜空气通过进气门流入气缸，形成的膨胀波通过进气门、进气道向进气歧管支管的入口端传播。当膨胀波到达支管入口端后，由于歧管谐振腔的压力比较稳定，就会产生异类的压缩波，该压缩波向气缸方向传播。由于压力波传播速度相对稳定，支管长度和发动机转速影响了压缩波返回气缸的时刻，如果设计得当，可以使压缩波在进气门关闭前的合适时刻到达，利用较高的压力将更多的空气压入气缸，增加了气缸的充气效率，形成一定程度的增压效果。这种由进气门开启引起的压力传播通常称为进气的惯性效应。

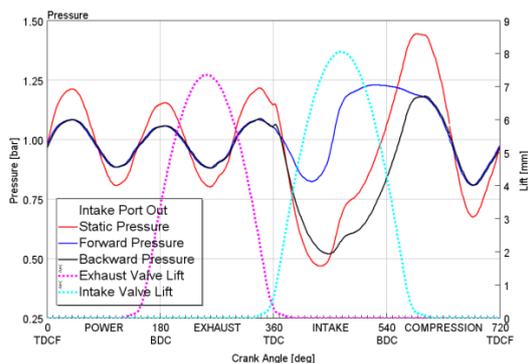


图 1 进气道出口处的压力

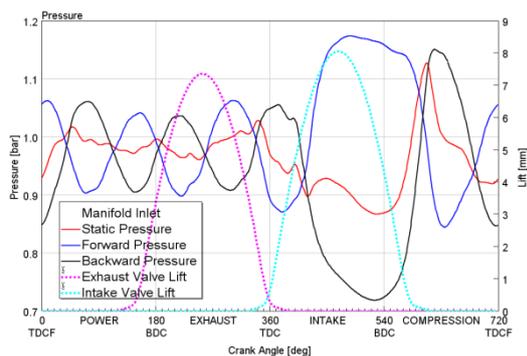


图 2 进气歧管支管入口处的压力

图 1 和图 2 是一款汽油发动机的一维热力学计算结果，分别是某转速下进气道出口和进气歧管支管入口处的压力，红色的静压根据特征线法^[1]分解成蓝色的正向压力和黑色的反向压力，横坐标表示了不同的冲程阶段。如图 1 所示，在进气冲程中，进气道出口处产生了一个较强的反向膨胀波，如图 2 所示，延迟一定角度后该膨胀波到达在歧管支管入口处，产生了一个较强的异类正向压缩波，如图 1 所示，该压缩波在进气门关闭前到达进气道出口处。

在进气门关闭后，空气由于惯性继续流向气缸，遇到气门的阻滞形成压缩波。在下一个循环进气门打开前，压力波将在进气门和支管入口之间来回传播，处于关闭状态的进气门反射了与入射波同类的压力波。在下一循环进气门打开时，如果返回气门的正压力波与进气过程重合，那么就可以增加进气量，反之则降低进气量。这种循环之间存在的压力传播通常称为波动效应。

如图 1 所示，进气门关闭后，进气门的反射了同类的压缩波，如图 2 所示，延迟一定角度后传播到支管入口处的压缩波反射了异类的膨胀波，在进气门关闭期间，压力波在进气管里来回传播。

2 进气系统压力波与发动机设计参数的关系

发动机的设计参数不仅影响压力波的传播规律，而且影响压力波的强度和利用程度。

四冲程发动机的进气频率： $f_1 = \frac{n}{60 \times 2} = \frac{n}{120}$ (公式 1)

在进气门开启时，惯性效应的压力波的固有频率： $f_2 = \frac{a}{2L}$ （公式 2）

在进气门关闭时，波动效应的压力波的固有频率： $f_3 = \frac{a}{4L}$ （公式 3）

其中：n 为发动机转速（转/分），a 为当地音速（米/秒），L 为进气歧管支管入口到进气道出口的长度（米）。

进气频率与发动机转速相关，进气压力波的频率与进气管的长度以及当地声速相关。

定义 $q_1 = \frac{f_2}{f_1} = \frac{60 \times a}{n \times L}$ （公式 4） 和 $q_2 = \frac{f_3}{f_1} = \frac{30 \times a}{n \times L}$ （公式 5）

q_1 和 q_2 分别表示惯性效应和波动效应的波动次数，惯性效应的波动次数是波动效应的两倍。由于当地声速变化不大，通过调整进气管长度 L，可以获得合适的 q_1 和 q_2 值，使得正向压缩波正好在进气门关闭前的合适时刻到达，从而提高充气效率。

对于同一台发动机，进气压力波的强度主要是与进气管的直径、发动机转速有关，还与管子弯曲程度、管子长度、管子表面粗糙度、歧管谐振腔容积、各缸干扰等有一定的关系。此外，通过优化进气门正时及升程曲线，可以提高压力波的利用率，对压力波的形成和发展也有一定的影响。

由于惯性效应的压力波是在一个冲程中，所以衰减小，振幅大，而波动效应经过多次的反射，所以衰减大，振幅小，因此，惯性效应的影响更加显著，应该重点研究如何充分利用惯性效应。由于一维热力学计算是发动机完整工作循环的分析，所以计算结果涵盖了惯性效应和波动效应。

3 利用进气压力波提高发动机性能的技术措施

根据发动机进气压力的特点，已经发展出了多种技术措施利用进气压力波，提高发动机的性能，比较可行的是进气歧管长度可变、进气门正时可变、进气门升程可变和进气道通流面积可变，进气歧管通流面积可变等技术，下面选择了部分技术措施进行研究。

3.1 改变压力波频率—进气歧管长度可变技术

根据公式 2 可知, 在进气管长度 L 不变的条件下, 随着发动机转速 n 的上升, 惯性效应的压力波的固有频率 f_2 保持不变, 但由于相同曲轴转角对应的物理时间减小, 使得正向压缩波返回进气门对应的曲轴转角延迟。根据公式 4, 为了使惯性效应的波动次数 q_1 保持在相对固定的最佳值, 也就是说压缩波返回的曲轴转角保持稳定, 那么随着转速 n 的上升, 需要减小进气管的长度 L , 以缩短压力波传递所需的物理时间。图 3 是不同进气管长度对发动机影响, 进气管长度 L 的单位为毫米, 压力值是进气道出口处的数据。可以看出, 反向膨胀波基本不变, 但返回的正向压缩波随着进气管长度的缩短而提前, 通过调整进气管长度可以实现最优的充气效率。

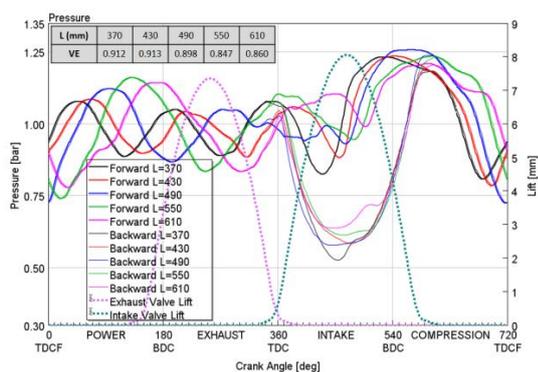


图 3 不同进气管长度对发动机影响

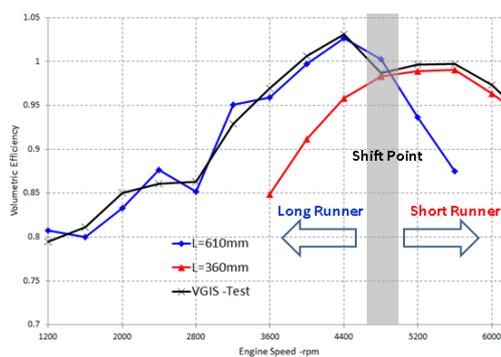


图 4 进气歧管长度可变的充气效率

理论上, 随着发动机转速改变而长度连续可变的进气歧管可以充分利用压力波的增压效应, 但在工程应用中, 考虑到成本、可靠性等因素, 两级长度可变的方案较为可行。图 4 是进气歧管长度可变 (VGIS, Variable Geometry Intake System) 的充气效率, 蓝线和红线为计算值, 黑线为试验值。基于多轮优化计算, 为 VGIS 选择了两种长度的支管, 其中, 长度为 610 毫米的长管在低于 4800 转/分时有较好的充气效率, 长度为 360 毫米的短管在高于 4800 转/分时有较好的充气效率, 所以长短管的切换点定为 4800 转/分, 试验结果进一步验证了上述模拟分析的有效性和精度。

3.2 改变压力波利用率

3.2.1 进气门正时可变技术

在进气冲程中, 当返回进气门的压缩波相同的情况下, 通过优化进气门的关闭时刻, 可以增加发动机的进气量。当进气门正时不变时, 随着发动机转速的升高, 返回进气门的压缩波对应的曲轴转角有所延迟, 所以随着转速的升高适当推迟进气门的关闭时刻可以提高发动机的充气效率。此外, 排气门的正时对缸内残余废气和扫气过程有影响, 由于本文主要探讨进气压力波的问题, 所以没有展开分析排气门的影响。

图 5 是不同进气门正时对发动机的影响，压力值是进气道出口处的数据。当进气门 MOP (Max. Open Position) 为上止点后 128 度曲轴转角时，发动机的充气效率达到最大值。因此，装备了进气门正时可变 (VVT, Variable Valve Timing) 的发动机，可以在不同转速下充分利用压力波从而提高发动机的充气效率。基于此理论，开发了带有 VVT 的发动机，具有良好的动力性和燃油经济性。

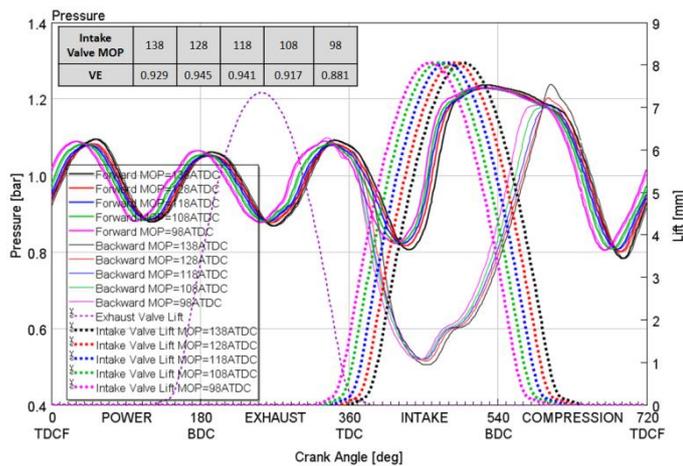


图 5 不同进气门正时对发动机的影响

3.2.2 进气门升程可变技术

图 6 是不同进气门升程曲线对发动机的影响，随着转速的降低，进气冲程的曲轴转角对应的物理时间延长，导致反向膨胀波提早转化为反向压缩波，反向压缩波的产生说明缸内压力已经接近进气压力，进气不畅，为了避免提早生成的反向压缩波影响充气效率，所以需要缩短进气门升程曲线的持续期，相应的，其最大升程也需要减小。

为了获得高速高功率和低速大扭矩，在发动机高速时，需要升程高、持续期长的气门升程曲线，而在低速时需要最大升程低、持续期短的气门升程曲线。进气门可变升程 (VVL, Variable Valve Lift) 可以实现上述目的。理论上，随发动机转速连续可变的 VVL 具有最优的性能，在工程上，比较容易实现的是两段式 VVL，也就是说高低速各一套升程曲线，有时为了进一步提高性能，VVL 还与 VVT 组合成更优的气门控制方式。通过试验的验证，VVL 除了可以同时提升发动机高低速的性能，还能降低低速的油耗，提高怠速稳定性。

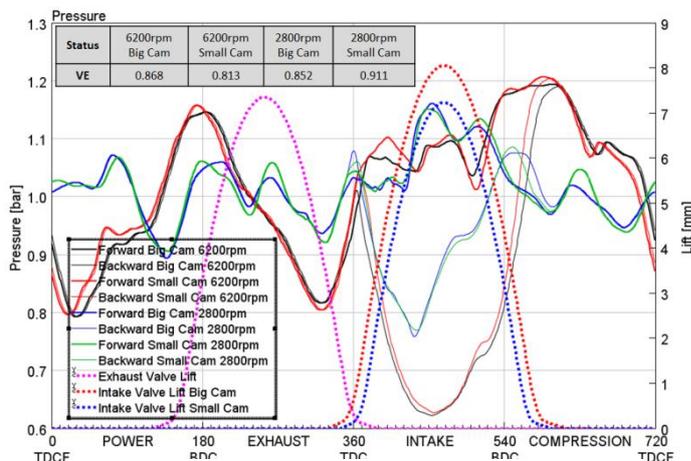


图 6 不同进气门升程曲线对发动机的影响

3.3 改变压力波的强度—进气道通流面积可变技术

在相同的工况下，发动机进气的流速和压力大小与进气管的有效通流面积有关，可以通过改变进气道或进气歧管支管截面积的方式实现。图 7 是不同进气道通流面积对发动机的影响，使用了进气道通流面积可变 (PDA, Port DeActive) 技术，PDA 应用于每缸多于一个进气道的发动机中，是在每个气缸的一个进气道上安装阀门，由控制系统关闭或开启该阀门。PDA Off 状态表示阀门不工作，两个进气道正常进气；PDA On 状态表示阀门关闭，只有一个进气道进气，通流面积减少一半。

如图 7 所示, PDA On 提高了进气冲程反向膨胀波的强度, 同时返回进气门的正向压缩波的强度也有所增加; PDA On 提高了 2800rpm 的发动机充气效率, 但在 6200rpm 时充气效率反而明显下降, 这是由于流通面积的减小使得空气流速加快, 在发动机高转速时流动损失显著增加。所以, 只有在进气流速较小的工况, 比如低转速、低负荷时, PDA 才能起到较好的效果。除此之外, 当 PDA On 时, 由于进入气缸的空气流速较高, 增强了气缸的涡流强度, 提高了缸内的混合和燃烧速度, 所以发动机的燃烧的稳定性 and 效率有所改善, 使得发动机部分工况的油耗降低、怠速稳定性提高^[3]。PDA 已经应用于自主开发的量产发动机, 效果比较好。

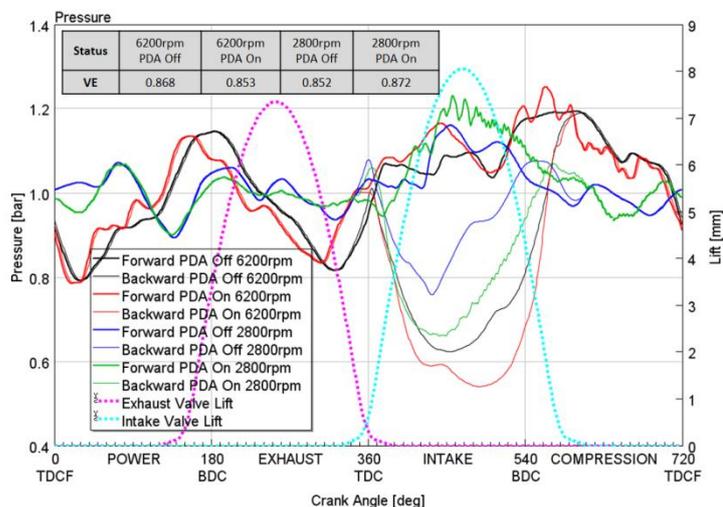


图 7 不同进气道通流面积对发动机的影响

4 结论

本文结合计算机模拟、理论分析和试验等方法, 为开发人员提供了较全面的进气压力波研究、应用原理和效果等信息, 有助于提高发动机开发人员认识进气压力波的产生原理和传播规律, 有助于进一步提升发动机的性能和竞争力, 有助于发现和应用新的发动机技术。

参考文献

- [1]. Gamma Technologies, GTISE Help, 2012
- [2]. 周龙保. 内燃机学 (第 3 版). 北京: 机械工业出版社, 2011
- [3] 李明, 刘德新 汽油机可变涡流进气管的循环模拟研究 内燃机工程 2009 年 10 月 第 30 卷第 5 期