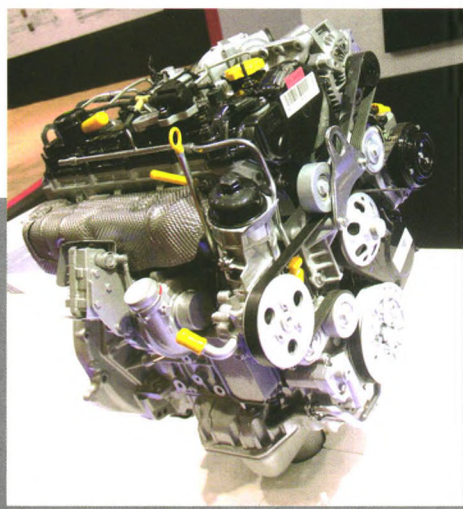


柴油机：降耗、减排都不能少

□ 上汽集团商用车技术中心/虞展 李翌

□ 上汽集团乘用车技术中心/肖广飞

二氧化碳(CO₂)排放对全球变暖的影响正日益引起各国政府的重视,为此,整个汽车工程技术界正在竭力寻找和尝试满足未来汽车排放要求的方法和技术。幸运的是,除了单纯依靠降低油耗以外,降低CO₂排放的要求还可以依靠其他技术来进行,如降低气态污染物和颗粒排放,提高发动机耐久性和可靠性等。作为交通运输能源的主要消耗者之一,减少商用车的CO₂排放对于减少对环境目标实施具有重要意义。



从现阶段的内燃机技术发展来看,实施严格的排放法规与降低油耗两者之间存在明显的权衡取舍和冲突。而且,汽车行业还要面对世界不同地区的各种测试循环,这会对产品开发工作和应用技术产生复杂而重要的影响。应汽车和发动机行业的请求,很可能在2015年引入世界通用瞬态循环(WHTC),其特征是从低速低负荷工况测试到接近全负荷工况,期间有38次急加速。这将使NO_x排放增加30%以上,PM颗粒物排放将增加15%以上。任何循环的瞬态排放都远高于稳态排放,且这种情况在规定的排放限值越低时越严重。所以,优化柴油机的瞬态性能,并避免加速时排放过高是满足未来排放法规的关键。

为了达到未来高性能、低能耗的柴油机开发目标,必须进一步研究燃烧热力学,对发动机基本结构和力学性能等方面进行总体考量,以优化生产和运行成本。对基本型发动机的成本(包括最高燃烧压力的承载能力、高喷油压力,以及昂贵的废气再循环或增压空气冷却等诸多方面引起的成本增加)与排气后处理系统成本之间寻找最佳的平衡点。排气后处理系统有可能导致基本型发动机尺寸和布置的改变,以及成本的增加,这对降低发动机成本也是一种挑战。

新型柴油机的总体技术考量

在商用车用柴油机的进一步研发过程中,在降低燃油消耗的前

提下,必须满足苛刻的排放限值要求,以致需要采取一系列技术措施,以应对某些技术彼此冲突的挑战。针对柴油机的开发,除了发动机小型化,还需要采取以下措施:

(1) 降低摩擦(采用滚针轴承凸轮轴、电动水泵、镜面级珩磨气缸结构)。

(2) 优化气道几何形状。

(3) 借助于电子控制气门升程切换获得可变涡流。

(4) 燃烧室几何形状、喷油系统和喷嘴的进一步开发。

(5) 提高废气再循环效率,以及利用高增压加强增压冷却。

(6) 改进排气后处理系统的优化和平衡。

(7) 进一步发展混合动力技术,提高制动能量的回收和废气热

量的再利用等。

图1所示列出了为满足未来要

求所需采取的相关技术措施，当

然，这些技术的成熟度各不相同。

图1 降低燃油耗和CO₂排放的潜在技术

发动机小型化技术

附表和图2为商用车用6缸柴油机两种设计方案的比较。可以看出,在保持行程缸径比不变的情况下,发动机在小型化过程中需采用二级增压,这会使最高燃烧压力提高约3MPa,而缸内平均压力仍保持不变,轴承直径、轴承摩擦、通过轴承的机油流量并不会减少,只有活塞行程略微减小。降低了活塞平均速度,使摩擦有所减小,但这一获利部分被二级涡轮增压器所需的较大机油流量,以及机油泵消耗

的更大传动功率所抵消。曲轴、气门机构、冷却系统和发电机的摩擦均保持不变。摩擦评估表明,两种设计方案的摩擦扭矩差异很小,只是因运行工况点的移动而在热力学方面对燃油耗产生有利影响。只有减少气缸数,才有可能显著减小发动机摩擦。采用二级增压,以及为控制较高的燃烧压力及热负荷而必须采用的技术措施,势必导致发动机成本的增加。图3清晰表明,只有在同时减少气缸数量的前提下,发动机的缩缸强化在经济上才具有

中型商用车用6缸柴油机两种设计方案的比较

项目	参数	
机型	基本型	小型化机型
增压类型	单级增压	两级增压
排量/L	7.01	5.91
缸径/mm	110	104
行程/mm	123	116
行程缸径比	1.12	1.12
活塞平均速度/m·s ⁻¹	9.0	8.5
气缸压强在22MPa时的 气体压力/kN	209	—
气缸压强在25MPa时的 气体压力 /kN	—	212

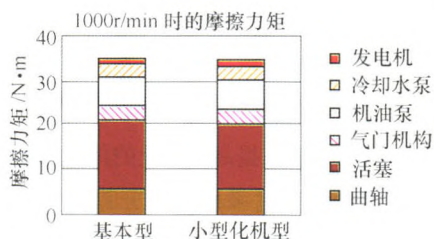


图2 发动机缩缸强化对降低摩擦的效果对比

优势。即使为了优化4缸机的噪声—振动—平顺性(NVH)性能,应用平衡轴消除二阶惯性力,4缸机相对6缸机在成本上仍具有优势。

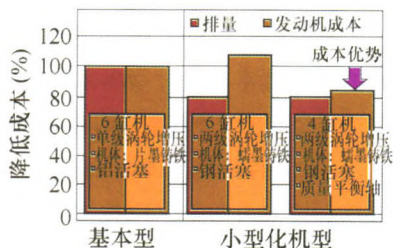


图3 发动机缩缸强化和减少气缸数对降低发动机成本的影响

基于上述结果,选用大排量4缸机替代6缸机是一种理想方案,长度缩短的4缸机在发动机舱内节省出的空间可以用于布置排气后处理系统及冷却系统。此外,即使在采用平衡轴的情况下,减轻的发动机质量仍有利于提高有效车载质量。目前,在轿车领域,正在全面趋向于用4缸机(甚至3缸机)取代6缸机的做法。而在不久的将来,在中型商用车上,大规模采用高功率的4缸机替代6缸机的做法将会盛行。

进排气系统的优化和 改善燃烧技术

在保证较低的基本涡流水平基础上,通过优化进气道的几何形状,能够进一步提高气道流量,减少换气功损失(尤其是增压机

型)。将优化进气和提高涡流气门升程的可变性技术相结合,可以大大增加涡流比和进气效率。与利用关闭气道来提高涡流比的传统做法相比,通过采用气门升程可变技术,可以使提高涡流强度、降低换气损失及提高涡流均匀性之间的矛盾得到合理优化。这种能够进一步提高喷油压力和扩大喷油变化自由度的新型进排气系统,结合燃烧室几何形状的优化,可以显著达到降低燃油消耗和改善排放的效果。

为在所有运行工况下实现更高的进气效率,通过增压系统、EGR系统和进气冷却系统的有效协同,可以确保清洁、高效的燃烧。其核心技术为低压EGR技术的采用,它是降低柴油机燃油消耗最有效的机内措施,在欧洲新行驶循环(NEDC)工况要求下燃油消耗可降低3%。

表面热喷涂工艺的应用

近年来,表面热喷涂工艺作为一种减摩技术,已经广泛应用于内燃机各大零部件,而应用最多的还是轿车用发动机气缸工作表面的热喷涂工艺方法。目前,这种轿车用发动机的成熟技术已逐步应用于商用车柴油机,并且已经适应各种气缸工作表面材质。因此,商用车用柴油机的无缸套设计将成为主流。在中型商用车柴油机上应用无缸套的气缸体曲轴箱替代原先采用湿式气缸套曲轴箱后,在降低气缸体曲轴箱生产成本和缩小缸心距方面具有巨大优势。此外,采用热喷涂工艺的曲轴箱在维修时无需更换气缸套,而是对已磨损的气缸壁进行镗缸和重新热喷涂,因而不存在因更

换尺寸加大的活塞而对发动机性能和排放产生不利影响。当然,进行这种维修时,必须具备相应的加工设备,在现今具有良好基础设施及技术高度发展的市场上,这种技术方案已经产生了相当好的社会和经济价值。

柴油机高压共轨喷射系统

近年来,随着柴油机喷油压力持续不断地升高,柴油机高压共轨喷射系统正在逐渐取代迄今仍在使用的泵喷嘴系统。在最近的几年中,共轨喷射压力已经从200MPa快速提高至250MPa。尽管面临材料特性要求和需满足极小制造公差的要求,但已经有最高喷油压力300MPa的共轨喷射系统进入小规模量产阶段。由于共轨系统的喷油持续期较短,且提供了缩小喷油器喷孔的可能性,由此改善了喷射油束的雾化,实现了更快速的燃烧。但是,必须考虑到因喷油压力的提高,有可能导致高压燃油泵的驱动功率增大,以及喷油器的泄漏量增多,从而会对燃油消耗产生不利的影响。

即使存在上述相互制约的影响因素,但随着喷油压力提高到300MPa,排放和燃油消耗都会有所降低。据了解,新开发的300 MPa喷油系统不仅消除了静态时的燃油泄漏,并且动态时的燃油泄漏量也得到了显著降低。因此,当从传统的燃油系统转换到几乎无燃油泄漏的先进喷油系统时,在废气排放保持不变的情况下,无论是部分负荷工况,还是全负荷工况的燃油消耗都能得到降低。只要发动机在设计上

存在提高最高燃烧压力的可能性,采用合适的喷油策略就能将减排优势转化为进一步降低燃油消耗的策略。

排气后处理

由于联合国和欧洲经济委员会已通过了全球技术规章,从2013年12月31日起,实施全球统一的稳态行驶循环(WHSC)和瞬态行驶循环(WHTC)。为测定污染物排放制定了统一的标准。在这新一轮的排放收紧大环境下,为了既能满足日益收紧的排放标准要求,又能有利于降低燃油消耗和制造成本,商用车和发动机企业都面临巨大的挑战。无论测试循环及相关的排放限值怎样变化,为了满足这些新要求,都必须进一步开发减排技术。图4显示了欧盟和美国商用车为满足排放限值所采取的各项减排技术方案。

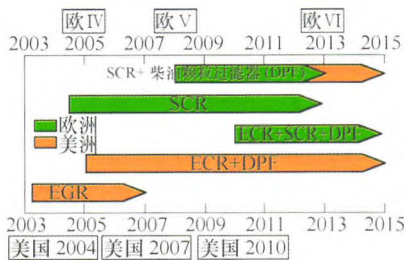


图4 欧盟和美国商用车采取的减排技术方案

大多数商用车制造商选择基于尿素的选择性催化还原(SCR)技术,这种技术能在不影响功率输出同时降低燃油消耗的情况下,满足更为严格的排放限值。这种清洁无害的人工合成附加溶液Ad-Blue能降低30%的PM(可吸入颗粒物)排放和90%以上的NO_x排放,而且成本低廉。采用SCR技术的重要原因之一是东欧、亚洲等地区的柴油含硫

量较高,会增加PM的生成,缩短DPF的再生周期,甚至会导致DPF的失效。

也有部分商用车制造商采用EGR与DPF相结合的方案,这样可以不再需要使用附加的尿素水溶液。这种方案使用较高的EGR率,甚至全负荷时EGR率可达40%。在采用高EGR率的同时,必须改善再循环废气的冷却,以降低气缸中的燃烧内混合气温度,降低燃烧时产生的 NO_x 。气缸中所希望达到的空燃比需要高的增压压力,而带中间冷却的二级增压必然产生较高的爆发压力,严重影响到发动机的机械结构,而且,大量返回到发动机中的废气对冷却装置(较高的冷却效率,需采用二级冷却系统)提出了极高的要求。为了能部分补偿因提高EGR率而引起的PM排放量增加,应使用共轨压力高达250MPa以上的高压共轨喷油系统,但这对DPF系统提出了较高的要求。与SCR系统相比,这种方案的基本优点是系统质量可减轻100kg以上,系统成本可降低50%,但这种系统必须要有非常大的冷却面积,而且成本昂贵。因此,这两种减排方案各有利弊。

柴油机混合动力化

除了上述柴油机自身净化措施之外,还可以采取缩缸强化、降低转速和混合动力技术相结合的措施,来降低 CO_2 的排放。后者具体包括并联电动混合动力、串联电动混合动力和液压混合动力。

例如,典型的12L重型载货车用发动机被8L中型发动机取代时,且其道路负荷点的转速从1400r/min

降到1200r/min。这样,运行点被转移到燃油消耗率较低的区域,燃油消耗下降达8%。当然,用常规设计的发动机做不到这一点,因为常规设计的小排量发动机无法提供必要的转矩和额定功率。发动机的设计必须确保能在平均有效压力2.8~3.0MPa下可靠运行,而大排量发动机只需2.0~2.2MPa。从道路负荷点运行至全负荷点时,小型发动机有60~80kW的功率缺口。这意味着,为使采用缩缸强化发动机车辆具有可接受的加速性能,需要附加使用1台功率为80kW的电动机。为了获得很高的平均有效压力和理想的发动机瞬态特性,必须采用二级涡轮增压,可缩短25%的瞬态响应时间。

如前文所述,新阶段的排放控制重点在于加速期间不增加 NO_x 和PM排放。这意味着在加速期间必须采用复杂的EGR率瞬态控制。12L常规发动机和缩缸强化8L发动机的瞬态功率需求是相同的,因为用户不会接受瞬态响应较差的车辆。此外,对EGR的控制必须既能保持低 NO_x 排放,又要保证低PM排放。因此,在相同的瞬态响应条件下,内燃机提供的功率较小,需要采用电动机来进行补偿(见图5)。所以,混合动力不仅用来保持响应时间,更是为了控制排放。

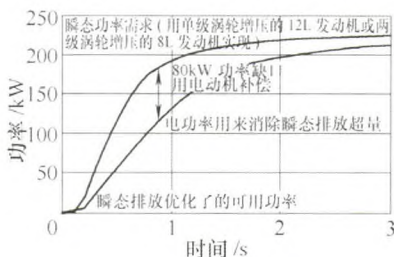


图5 采用缩缸强化与混合动力相结合以降低瞬态排放

并且,回收的能量可以用来给蓄电池充电。在各种混合动力类型中,并联混合动力优势比较明显,因为它能提供最大的转矩和瞬态响应效果(见图6)。通过采用缩缸强化和混合动力,道路负荷运行燃油消耗和 CO_2 排放可降低17%。

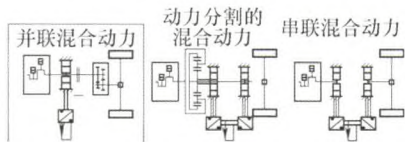


图6 降低 CO_2 排放的混合动力策略

结语

迄今为止,为了满足日益收紧的柴油机 NO_x 及PM等排放法规限值,对改善燃烧和后处理技术的研发做了大量工作。将来,出于满足抑制地球暖化等社会需求的目的,随着 CO_2 排放及燃油消耗的相关法规开始实施,相应的技术开发将更重要。

由于柴油机相比汽油机在 CO_2 排放方面具有更大的优势,被认为是更为环保的动力装置。中小型商用车用柴油机也在不断适应排放法规要求的过程中改善其燃油经济性。以缩缸强化和提高平均有效压力为前提,利用高压多次燃油喷射、可变气门正时及可变涡流等技术改善柴油机的燃烧。同时,通过有效的可变EGR率、流量控制和高增压等控制技术,力求调解原本互为矛盾的降低 NO_x 排放与降低燃油消耗之间的关系,在不断改进相关测试技术的同时推进柴油机的研发工作。此外,通过采用柴油机混合动力化、废热回收等能量再生等新技术,提高柴油机热效率的研究工作正在不断向前发展。 **AME**