

**编者按:** 节能减排是现代乘用车发动机发展的永恒主题和不懈追求的目标。12年来, 大众公司在EA111系列1.4L汽油机平台的基础上, 运用汽油缸内分层直接喷射和增压等现代新技术, 开发出了1.4L-FSI自然吸气机型和1.4L-TSI废气涡轮与机械式复合增压机型。2012年, 大众公司又应用统一的标准部件实现模块化结构型式, 开发出新一代EA211汽油机系列1.4L-TSI涡轮增压直喷式汽油机, 大大降低了大批量生产和用户维修保养的成本。本文以翔实的资料系统地介绍了大众公司1.4L汽油机全系列各机型的结构和性能, 旨在使读者了解世界著名跨国公司的现代新技术、新工艺、新材料及其创新思路, 并以节能减排为主线, 展示乘用车汽油机系列机型的演变过程, 作为相关乘用车发动机使用、维修与保养的借鉴。

# 大众公司EA111和EA112系列 1.4L燃油分层直喷式汽油机(五)

◆文/江苏 范明强



范明强

(本刊专家委员会委员)

教授级高级工程师, 曾任中国第一汽车集团公司无锡研究所发动机研究室主任、湖南奔腾动力科技有限公司轿车柴油机项目部总工程师、无锡柴油机厂高级技术顾问和多所高校客座教授。

(接上期)

## 4. 汽缸盖-排气歧管模块

汽缸盖在开发时十分重视热管理的创新, 以及进一步利用废气能量来加快发动机暖机, 并保留了四气门-滚轮摇臂汽缸盖方案, 这种设计方案具有较小的摩擦损失功率。

排气歧管完全集成在汽缸盖中, 相当于一个非常高效的热交换器(见图71), 因此发动机在暖机阶段能迅速加温, 并能提供足够的热量使车辆舒适地采暖。在全负荷工况下, 该排气歧管可使废气温度降低约100K(1K=-272.15°C), 在高负荷工况下, 燃油耗最多可降低20%。与传统的外部排气歧管相比, 这种整体式排气歧管的废气流动途径明显缩短了, 因此发动机在瞬态运行时的壁面热损失保持在较低的水平。

在使用代用燃料和中等品质燃油时, 为了提高气门座的耐磨性, 气门座锥角已加大到120°, 气门杆直径也减小到5mm, 这样因气门质量减轻而优化了气门机构的动力学性能, 同时因气门弹簧力减小而减少了

摩擦损失。同时, 火花塞已改用M12螺纹, 从而使火花塞螺纹与气门座之间的鼻梁获得最佳的强度。通过有限元法的精确计算, 即使汽缸盖的几何形状比以前复杂, 但是其质量却增加了不到1.2kg。EA211-TSI汽油机的汽缸盖-排气歧管模块采用铝-金属模铸造工艺生产, 并采用AlSi10Mg(Cu)铝合金材料以及热处理技术。

## 5. 曲柄连杆机构和活塞组

在开发新一代汽油机系列时, 要优先考虑减小摩擦, 其中最重要的措施是在新汽油机的不同机型上将主轴承直径从EA111系列的54mm减小到42~48mm。连杆在其大头轴承部位实现轴向导向, 以便使曲轴更坚固, 补偿了因主轴承直径缩小而引起的刚度方面的损失, 最终由于较大的弹性变形以及摩擦系数的降低而获得了与EA111系列机型相当的曲轴声学性能, 曲轴和连杆都由钢模锻造而成。通过运用最新的有限元和噪声-振动-刚度(NVH)计算方法, 曲轴质量成功地减少了20%(见图72)。



图71 带有整体式排气歧管的汽缸盖

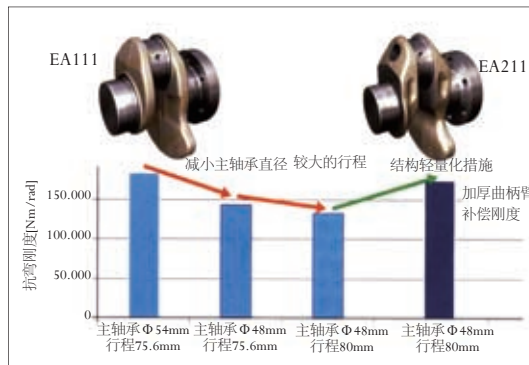


图72 重量优化的曲轴的刚度开发

连杆小头被设计成梯形。连杆的几何形状和尺寸在锻模中就已成型,它是根据连杆的承载能力优化质量设计而成的,质量最多减轻了30%(见图73)。在发动机进气行程期间,连杆小头上顶面将活塞向下拉,此时所产生的力相对较小,因此上顶面被设计得非常单薄,而传递爆发压力的下半部分则被设计得相当坚固。

活塞是全新设计的,其顶面几乎是平的,因为目前的设计方案是缸内混合气的形成不采用活塞顶壁面导向,因而既能减轻活塞的质量,也能使活塞顶面的温度比较均匀。为了优化摩擦和降低机油消耗,活塞环已经过仔细的匹配而确认其有效性。为了减小摩擦,其装配间隙已被放大,同时略微加大活塞销的偏心度和精致的活塞外圆表面磨削几何形状也能进一步改善活塞运行的声学性能。



图73 重量优化的连杆

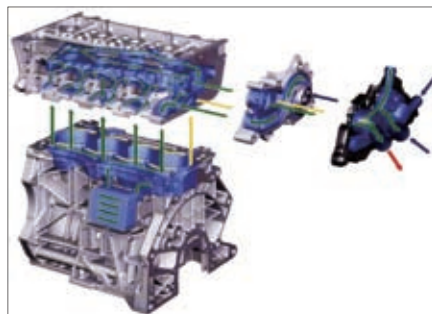


图74 汽缸盖与汽缸体冷却分开的冷却水双回路

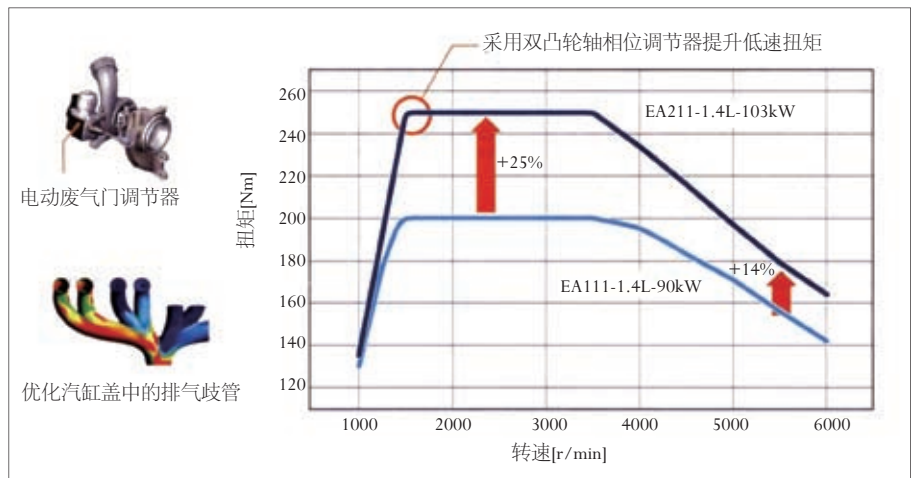


图75 EA211系列TSI汽油机扭矩的提升

### 6.冷却水回路

新型EA211汽油机系列所有TSI机型的冷却系统都具有用于发动机冷却的高温回路和用于间接冷却增压空气的低温回路(见图74)。低温冷却液回路由一个电动冷却液泵进行循环,因而可按需要进行控制,在车辆惯性滑行行驶时或发动机停机后可用于冷却废气涡轮增压器。

高温冷却液回路具有冷却发动机的功能,它由机械式冷却液泵来循环,而机械式冷却液泵被设计成带整体式冷却液温度调节器的冷却液泵模块,该模块被直接安装在汽缸盖靠近变速器一侧。用于汽缸体冷却的膨胀石蜡式节温器能确保汽缸套恒定在一个较高的温度水平,并与主冷却液回路无关。第二个节温器调节与汽车散热器的通断,它将冷却液温度调整在87℃,以有利于降低摩擦和达到最佳的点火正时。冷却液泵的总效率被提高了50%以上,这就意味着比现有冷却液泵的效率最多改善了40%,而且整个冷却液循环回路已对节流损失进行了优化。

### 7.废气涡轮增压器

新一代EA211汽油机系列所有机型都使用全新开发的单涡道废气涡轮增压器,排气歧管集成在汽缸盖中,由此所形成的独特的废气流动状况是开发新涡轮增压器最重要的边界条件。这种涡轮增压器已针对低速高扭矩以及以丰满的扭矩特性曲线获得良好的瞬态性能进行了优化。EA211系列中功率

为103kW的1.4L-TSI机型在转速1500r/min时就已达到250Nm的最大扭矩,这比老机型改善了25%(见图75)。增压器按3种功率等级(1.2L-TSI机型、功率为90kW的1.4L-TSI机型、功率为103kW和110kW的1.4L-TSI机型)进行设计和优化,所有增压器的变型转子都是按最高950℃的废气温度设计的,其特点是转子直径较小,相应的惯性矩也就较小,从而达到较高的效率水平。

涡轮增压器的废气门由新开发的电动调节器来控制,与其所处的压力环境无关并且在任何时候都能调到所期望的位置。这种调节器动作迅速且精确,它在关闭位置与最大开度之间的调节时间仅110ms,这对改善增压器的声学特性和发动机的加速响应性能产生了很好的效果。

废气涡轮增压器与发动机外围设备的接口在各个机型上都是相同的,这样所有机型都能使用相同的汽缸盖、废气装置以及机油与冷却液管路。由于排气歧管集成在汽缸盖中,因此能成功地将废气涡轮壳的4孔连接法兰设计得比较轻薄,与传统型相比,增压器的质量减轻了2kg以上。

### 8.进气道的开发

该机型新设计的进气道以EA111系列中1.4L-TSI汽油机的进气道为基础,运用计算流体动力学(CFD)模拟计算查明EA211系列TSI机型的流量系数和滚流值,其目的是寻找到高流量和强烈充量运动的最佳值。通过数学模型寻找到5种进气道,并用

三维模拟方法对它们进行评价, 将其中3种进气道浇铸成实体模型, 并在流动试验台上进行测量来确认预选方案。所选择的这些进气道方案在燃油耗、运转平稳性和排放等方面显示出了较好的试验结果, 它们的滚流值明显高于EA111系列TSI机型, 而流量系数却略有逊色。

### 9. 燃烧过程的优化

进气道的设计成为了优化EA211系列机型燃烧过程的基础, 并运用计算流体动力学(CFD)模拟计算方法支持其优化工作, 其中的重点是使燃油喷射特性与缸内充量运动匹配。

基于小型TSI汽油机的单位负荷较高, 再加上多孔喷油嘴与高喷油压力相结合, 不仅在最小喷油量时, 而且在全负荷工况下都为混合气的准备获得了最佳的状态, 运用模拟技术能够优化多孔喷油嘴的喷束特性、喷油器的喷油节拍(指每循环的喷油次数及其间隔)及其他与缸内充量运动相配合因素等。

每次循环最多能进行3次燃油喷射, 从怠速运转直至高达4000r/min转速范围内的全负荷都进行多次喷射, 喷油压力最高可达200bar(1bar=100kPa)。新进气道产生的稳定的充量滚流与圆周上不对称分布的5孔喷射油束相结合, 能够放弃在最小复合以及在催化转化器加热运行等特殊工况下用于引导混合气形成的活塞顶凹坑。

火焰前锋从火花塞开始沿着径向均匀传播, 即使在边界运行范围内也不会产生爆燃。因此, 紧凑的燃烧室设计具有较短的火焰传播途径、向四周伸展的火花形态以及燃烧室中的高扰流等因素综合改善了部分负荷范围内残余废气的相容性, 降低了爆燃倾向, 提高了燃烧效率。

EA211系列TSI汽油机的燃烧过程具有较高的燃烧速率, 从而降低了爆燃倾向, 这非常有利于降低燃油耗。由于全负荷特性曲线燃烧持效期缩短了约10°曲轴转角, 因而混合气准备时间可以大大缩短, 即使压缩比从10.0提高到10.5(在按ROZ95高辛烷值设计情况下), 燃烧重心也处于较早

的位置, 同样爆发压力也要比EA111系列机型出现得早些, 同时也要高些。总体来讲, EA211系列机型的比燃油耗最多可降低20%(见图76)。

即使在部分负荷情况下, 燃烧过程也能使燃油耗降低, 主要是通过提高压缩比和残余废气相容性来实现的。因为进一步避免了壁面润湿现象, 所以即使在发动机很冷的情况下也能形成较浓的混合气。

### 10. 燃油耗和废气排放

新EA211系列汽油机成功降低了燃油耗, 1.4L-TSI汽油机的新欧洲行驶循环燃油耗比EA111系列机型降低了8%~10%。装备标准部件的横置式模块化发动机与车辆的全面优化相结合可使紧凑型轿车(Golf或Audi-A3)的平均燃油耗处于大约5.0~5.2L/100km范围内, 这相当于CO<sub>2</sub>排放量为120~125g/km, 而功率为103kW的1.4L-TSI汽油机在具备汽缸切断功能同时节油最多可达20%, 这种新的汽缸管理功能作为单项措施可使燃油耗降低大约0.4L/100km, 特别是在低负荷和低速行驶情况下还能发挥更大的潜力。

如果车辆的发动机经常在高负荷工况下运行, 那么排气歧管因集成在汽缸盖中能降低全负荷燃油耗而获得很大的收益。这种新设计方案还有另一个效果就是改善了乘客车厢的采暖效果。

## 六、具备汽缸切断功能的1.4L-TSI直喷式汽油机

在部分负荷工况下切断部分汽缸是一种非常有前景的节能减排的途径, 但现在仍然应用的很少。大众公司最新一代1.4L-TSI增压直喷式汽油机首次在直列4缸发动机上

选用了这种技术, 在适合使用这种技术的发动机特性曲线场范围内切断第2和第3汽缸进排气门的操纵, 同时相应地停止喷油。

新一代1.4L-TSI汽油机选择汽缸切断技术的主要原因是, 汽油缸内直接喷射有利于汽缸的切断, 与进气道喷射不同, 它能将换气和混合气清晰地分开, 因而避免了两者转换过程中的麻烦。另外, 这种新机型具有良好刚性的铝汽缸体曲轴箱和轻量化的曲柄连杆机构(活塞、连杆和曲轴), 为新技术的应用提供了极其有利的前提条件。与此同时, 这种新机型在大众集团内的应用很广, 因此这种新技术能够被广泛地运用, 而且能够在生产制造中达到最佳的组合效果。这种具备汽缸切断功能的最新一代1.4L-TSI增压直喷式汽油机首先应用于Polo运动型乘用车和Audi-A1乘用车上。

这种新机型在设计过程中的要求是十分苛刻的, 主要包括以下几个方面: ①燃油耗达到2缸机的水平, 而又要具备4缸机的运转的平稳性和相应的性能; ②新欧洲行驶循环燃油耗要降低0.4L/100km; ③城市交通的行驶燃油耗要降低1L/100km, 相当于降低了20%; ④技术转换的成本能够被认可。

1.4L-TSI汽油机汽缸切断功能的应用标志着大众公司已经进入了一个新的技术领域。由于汽缸切断技术对控制振动激励提出了很高的要求, 因此之前这种新技术在欧洲还从未在4缸机型上使用过。这种新机型的开发目标是发动机在每个运转工况点的振动水平要与大TSI汽油机相当, 为此必须进行极其精细的工作。

### 1. 结构转换和工作原理

奥迪气门升程系统(AVS)作为气门机构可调技术已应用于各种不同的4缸和6缸发动机上, 这种技术已按需要用来分两级改变进气门或排气门的升程。

最新一代1.4L-TSI增压直喷式汽油机为了实现汽缸切断功能, 应用了奥迪气门升程系统技术的工作原理, 但必须应用一个双销执行器对其进行进一步开发, 以便能够在最新一代1.4L-TSI 4缸机型的结构空间

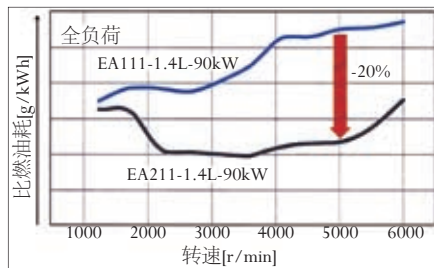


图76 全负荷燃油耗





图77 集成汽缸切断功能的汽缸盖罩盖模块

中集成可调的控制功能(见图77)。零部件是由德国Wolfsburg的动力总成开发部门与Salzgitter制造厂的零部件开发部门共同设计的,并确定了制造工艺。除了制造成本低之外,高的机械可靠性和耐久性以及较轻的质量也是十分重要的,通过不断地减轻质量,并运用先进的模拟技术,能将过大的质量减轻到2kg左右。

用于切断第2和第3汽缸的凸轮组件被设计成长度为68.65mm的可移动的内花键轴套(见图78),并灵活地套在由C35R级调质钢制成的外花键心轴上,能够轴向移动6.25mm。这种具有24个齿的渐开线花键由齿侧面承载,凸轮组件上的内花键由拉削工艺制造成型,而花键轴则由加工成型。第1和第4汽缸的固定凸轮组件同样也是用花键啮合,组装时在花键轴上推入到位后,用1个圆柱销进行轴向定位。

每个凸轮组件上有两组凸轮,各驱动两个进气门。每组凸轮中的两个凸轮片紧挨着并列排列,其中一个凸轮片具有常规的凸轮廓线,它可获得与标准发动机相同的气门升程曲线,而另一个凸轮片则具有360°基圆的零升程凸轮,它们的材料均采用100Cr6类滚动轴承钢。转换滑环连接在凸轮组件的端部,它由42CrMo4合金钢制成。

在转换滑环的外表面上铣削出Y形螺旋槽,集成在汽缸盖罩上的双销执行器的两个销嵌入螺旋槽中,这种结构型式是在奥迪气门升程系统的基础上发展而来的,而后者则是将分开的单销执行器分别作用于凸轮组件前后端的S形槽中,因此新的结构型式能够缩短凸轮组件的结构长度,这对于小型化的4缸1.4L汽油机十分必要。

缩小的空间状况使Y形销槽的结构形式更紧凑,同时两个转换销之间的距离缩

短,这是大众公司汽缸切断装置的另一个结构设计特点。对执行器的另一个要求是线圈组件的模块化结构型式。

每个圆柱形转换销的直径为4mm,同样也是由滚动轴承钢制成,它的轴向行程为4.2mm。转换滑环外表面上的Y形螺旋槽轮廓确保了转换销始终单侧接触,这样就避免了转换销在槽中来回摆动。执行器被设计成双稳定系统,无论转换滑环的推入终端还是推出终端都是很可靠的,并且能牢固地定位,这样通过衔铁组件的电磁止点就能可靠地停止在两个终端位置上。

机械转换过程发生在凸轮轴旋转半圈内,为了切断第2和第3汽缸,控制实施切断功能的转换销在槽中沿着斜面移动,将凸轮组件上的零升程凸轮推入,而将零升程凸轮的推出则由线圈的惯性转换来实现。机械转换过程的控制时间非常短,在72ms(1400r/min时)和28ms(4000r/min时)之间,取决于发动机的转速,这对衔铁组件脱离终端位置已经足够,此时转换销处于前端位置。

当凸轮组件轴向移动结束时,转换销又被推回到推入端,这是通过位于螺旋槽末端的止推斜面发生的,同时在执行器内产生了一个止推力,它被发动机电控单元采集用来进行评估,并被用于汽缸切断系统的诊断,这样的设计方案能够取消附加的用来证实转换过程成功的传感器。

一旦第2和第3汽缸的凸轮组件抵达其切断汽缸的终端位置,它就被弹簧力控制的钢球锁定。系统处于该状态时,零升程凸轮

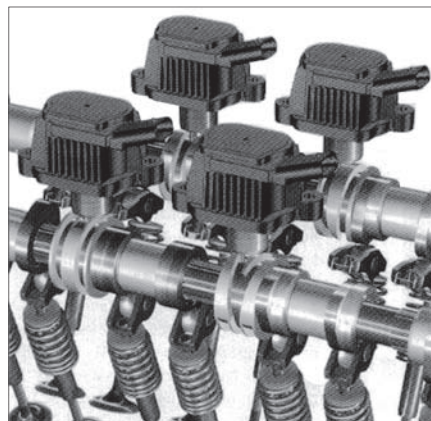


图78 切断第2和第3汽缸的控制装置

廓线在滚轮摇臂上转动,气门弹簧使进排气门保持关闭状态,此时气门机构的驱动力矩大约减小一半。

为了结束部分汽缸切断状态以恢复所有汽缸的正常工作,控制转换销退出切断汽缸的位置,使凸轮组件向其原始位置返回移动。一旦这种轴向移动结束,转换销就被螺旋槽末端的止推斜坡恢复到执行器的原始位置,此时滚轮摇臂又重新按照正常凸轮的完整廓线运动。

为了运用汽缸切断功能,滚轮摇臂也重新进行了开发,其凸轮滚轮直径改为21.0mm,而宽度仅为5.1mm,它们被支承在14针的滚针轴承上,其中淬透的销轴直径为6.39mm。凸轮轴前端轴承使用两个滚动轴承,成功地减小了摩擦,因为凸轮轴前端轴承承受着发动机正时传动机构较高的负荷。

通常,具备汽缸切断功能的发动机汽缸盖罩(见图77)被设计得可与标准发动机汽缸盖罩互换,差别主要在容纳执行器和内置式凸轮轴轴承框架上,该框架与汽缸盖罩一样也是由AlSi9Cu3铝合金压铸而成,而且为了在发生碰撞时保护行人,在布置执行器时还注意保持发动机与发动机舱罩盖之间所必需的间距。

## 2.智能化充量调节机构

为了开发汽缸切断装置,采用了新型智能化充量调节机构。在整个转换过程(从4汽缸运行模式转换到部分汽缸切断运行模式,再返回)中,发动机不应发生扭矩波动。为了达到这个目标,进气管中的压力应调整到汽缸切断运行所必需的水平。在进气管充气期间,点火角应适应充气状况朝晚的方向移动,以便保持扭矩不发生变化。

在达到额定充量状况时,首先关闭第2和第3汽缸的排气门,然后再关闭它们的进气门,在最后一次换气后就不再喷油了,因此新鲜空气被封闭在燃烧室中,这样下一次压缩行程燃烧室中的压缩压力就较低,从而可舒适地实现转换。

在第2和第3汽缸切断后,正常运行的第1和第4汽缸的效率得以提高,因为它们的

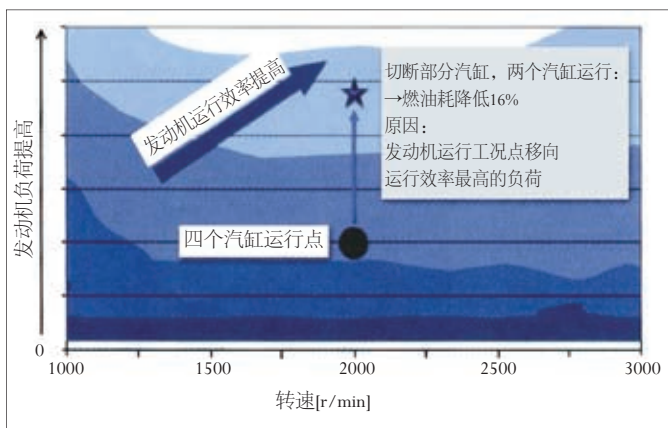


图79 在发动机特性曲线场中汽缸切断的效果

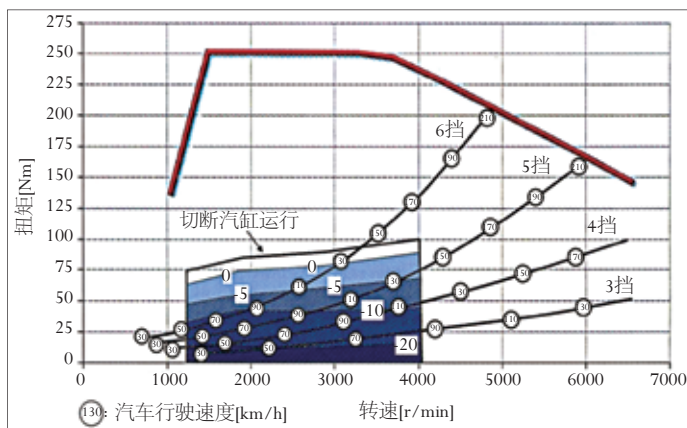


图80 在发动机特性曲线场中汽缸切断的运行范围

运行工况点移向了较高的负荷(见图79)。发动机摩擦与转速的关系在很大程度上保持不变,但是输出的有效功率提高了,发动机运行时的节流大大降低,从而使换气损失减小、燃烧改善、壁面热损失降低。

第2和第3汽缸是按汽缸切断时相同的次序恢复正常运行的,排气门和进气门依次正常工作,使原先被封闭在汽缸中的新鲜空气进入排气管路,由此稀释的废气将通过第1和第4汽缸中的燃油喷射予以补偿,因此基于传感器的过量空气系数 $\lambda$ ,调节功能仍能继续正常工作。

### 3. 发动机控制和行驶性能的调整

一般在频繁使用的发动机特性曲线场范围内实施汽缸切断功能。选择1250r/min作为切断汽缸的转速下限,若低于该转速实施汽缸切断功能将会出现太大的运转不均匀性,同时规定4000r/min作为切断汽缸的转速上限,以保持适当的执行器转换力。在第3挡位时,汽缸切断从大约30km/h车速开始,而第5和第6挡位时,汽缸切断功能在130km/h左右的车速终止。

切断汽缸运行时所能输出的扭矩根据转速的不同被设计成上限处于75~100Nm之间,因为在扭矩较高的情况下,由于切断汽缸运行时的爆燃极限和点火角的移动,就不能再达到最佳的燃油耗,因此在这种情况下就又恢复4个汽缸运行。在停车状态下,发动机通过自动启动-停车系统完全停止运转。

为了充分发掘节油潜力,不仅在部分负荷时而且在倒拖运行阶段也实施汽缸切断,

此时由于制动力矩减小,倒拖运行阶段会明显延长,在这种情况下将中断喷油。驾驶员一旦操纵制动踏板,汽缸切断就会立即中断,4个汽缸在倒拖时都发挥制动效果。同样,在下坡滑行时也取消汽缸切断功能,因为通常在这种情况下都期望能获得整机所有汽缸的制动效果。

多功能信息显示屏会给驾驶员显示实时的发动机运行模式,当显示屏上出现瞬时燃油耗值时,就显示2个汽缸运行。如果没有显示这些信息,那么切断汽缸运行是几乎察觉不到的,因为1.4L-TSI汽油机的运转噪声即使在这个时候也保持在一个非常好的水平上。

对这种新型汽油机良好的振动性能起决定性作用的是其基础结构和刚性良好的动力传动系统、轻量化的曲柄连杆机构以及发动机相对于车辆行驶方向的横向安装位置等。可以利用TDI柴油机上使用的发动机支架作为支承,而双质量飞轮是根据扭簧特性曲线专门设计的,其非常软的第一级用于汽缸切断运行,而其刚性较好的第二级则用于4汽缸运转模式的高负荷运行。

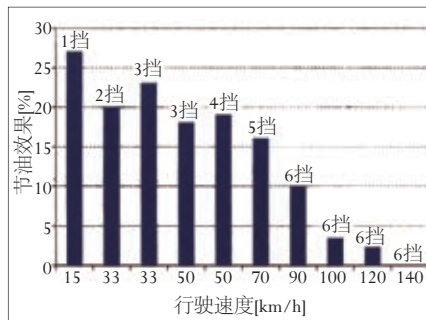


图81 汽缸切断降低燃油耗的效果

为了减小全汽缸运行与切断部分汽缸运行之间排气脉冲的差异,废气管路中前置、后置消声器的谐振器和容积相差很大,并且对废气管路的长度进行了专门的调整以作补充。

### 4. 节油效果

具备汽缸切断功能的最新一代1.4L-TSI增压直喷式汽油机以其优异的特性,在TSI技术策略范围内完全能够将燃油耗目标与高功率、高牵引力结合起来(见图80)。汽缸切断技术是达到大众公司平均CO<sub>2</sub>排放目标的一项重要措施,该机型满足了设计任务书中提出的所有目标要求。在新欧洲行驶循环中,其燃油耗降低了0.4L/100km,相当于CO<sub>2</sub>排放降低了8g/km。如果将发动机处于怠速运转状态的启动-停车功能一并计算在内,其节油效果可达到约0.6L/100km。

在相同的行驶状态下,切断汽缸行驶还能获得比标准燃油耗高的燃油耗优势。特别是在城市和市郊行驶时,在适当的行驶速度下能够节油10%~20%(见图81)。仅仅在超过120km/h较高的行驶速度下,反而4个汽缸运行倒能获得最佳的燃油耗值。

切断部分汽缸的运行功能是2012年首先在Polo运动型轿车和Audi-A1轿车上运用的,其中搭载的1.4L-TSI汽油机的功率为103kW,全部汽缸运行时其最大扭矩从转速在1500~3500r/min之间保持250Nm不变。同时,基础发动机也进行了进一步开发,在这种型号为EA211的新型汽油机系列中,切断汽缸的功能可以灵活地应用。(全文完)