

V型发动机产品及技术发展综述

王德平¹ 梁贵友¹ 韩令海¹ 宫艳峰¹ 解方喜² 李华¹

(1.中国第一汽车集团有限公司,长春 130013; 2.吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022)

【欢迎引用】王德平,梁贵友,韩令海,等.V型发动机产品及技术发展综述[J].汽车文摘,2024(3):1-8.

【Cite this paper】WANG D P, LIANG G Y, HAN L H, et al. Overview on V-Type Engine Products and Technology Developments [J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(3): 1-8.

【摘要】为进一步促进我国V型发动机产品性能提升及核心技术发展,通过对宝马、奔驰、奥迪及一汽红旗等V型发动机产品研发情况的文献资料进行归纳和总结,分析了其在燃烧组织、进排气管管理、高效增压、燃油喷射及冷却与润滑等方面的技术发展变化;同时,结合双碳任务需求提出了V型发动机产业及核心技术未来发展与布局方向。

关键词:V型发动机;产品性能;技术进展;发展展望

中图分类号:U463.46;U467.3 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230212

Overview on V-Type Engine Products and Technology Developments

Wang Deping¹, Liang Guiyou¹, Han Linghai¹, Gong Yanfeng¹, Xie Fangxi², Li Hua¹

(1. China FAW Group Corporation Limited, Changchun, 130013; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022)

【Abstract】To further enhance the performance and technology development of V-type engines in China, technical evolution on combustion formation, intake and exhaust management, efficient turbocharging, fuel injection, cooling and lubrication are analyzed by summarizing the researches of V-type engines of BMW, Mercedes-Benz, Audi, and FAW Hongqi. Meanwhile, the future development directions and strategies for the V-type engine industry and its key technologies are proposed, by fully considering the needs of carbon peaking and carbon neutrality.

Key words: V-type engine, Product performance, Technology development, Perspectives

0 引言

V型发动机是用于豪华品牌车辆的高端发动机,也是车企技术先进性的一项重要标志^[1]。V型发动机将气缸分成2组,将相邻气缸以一定夹角布置在一起,从侧面看气缸呈V字形布置的发动机。这样便于通过扩大气缸直径来提高排量和功率并适用于较高的气缸数^[2]。现代汽车重视空气动力学性能,要求汽车迎风面积越小越好,也就要求发动机舱越低越好,V型发动机在这方面优势明显。并且,如果将发动机长度缩短,能为乘员舱留出更大的空间,提高乘坐舒适性。此外,V型发动机气缸对向布置,还可抵消一部分振动,使发动机运转更平顺^[3]。但V型发动机的缺点

是必须使用2个气缸盖,结构较为复杂、成本较高。另外,其宽度加大后,发动机两侧空间较小,不适合再布置其他装置^[4]。几十年来,国内外主要豪华品牌汽车公司为了提高V型发动机的性能做了大量研发工作,并推出了多个系列产品^[5]。

为推动我国V型发动机产品性能及技术的进步,通过对宝马、奔驰、奥迪及一汽红旗V型发动机产品及技术应用情况进行综述,分析了其在燃烧组织、进排气管管理、高效增压、燃油喷射及冷却与润滑等方面的技术发展现状,并对低/零碳化、电动化汽车产业需求下的V型发动机未来发展进行展望,旨在为我国V型发动机产业发展及核心技术的布局方向提供指导和参考。

1 V型发动机产品及技术进展

1.1 宝马V型发动机技术进展

20世纪50年代开始,宝马汽车公司502 Barock-engel和507 Roadster车型就开始使用V8汽油发动机。2018年,通过不断改进全可变气门机构“VALVETRONIC”和涡轮增压系统,新款V8发动机功率能够达到390 kW^[6],图1所示为宝马V8发动机发展演变过程。同时,宝马公司的7系M760Li型轿车一直匹配V12发动机,而且宝马旗下劳斯莱斯品牌全系均为V12发动机^[7]。此外,宝马经典的V12发动机S70/2还装配在迈凯伦F1赛车上,该发动机排量为6.1 L,最大功率为461 kW(7 400 r/min),峰值扭矩为650 N·m(5 600 r/min),最高转速为7 600 r/min。目前,宝马最新的V12发动机编号为N74TU,其排量为6.6 L,采用双涡轮增压,最大功率为448 kW、峰值扭矩为800 N·m。这款发动机目前已装配在M760Li xDrive车型上。该款车型的0~100 km/h加速时间仅为3.7 s,最高时速可达305 km/h。

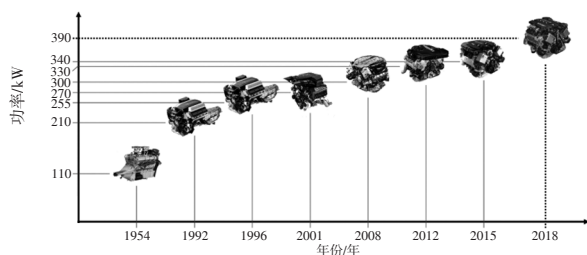


图1 宝马V8发动机演变过程^[6]

1.1.1 进、排气系统技术特征

2008年以来,除了不断推进全可变气门机构“VALVETRONIC”应用外,宝马公司对涡轮增压系统也做出了重大改进,通过采用“Hot-V”增压器布置方案,优化了宝马V型发动机性能^[8]。

废气涡轮增压器经过完全重新设计和优化匹配,实现了发动机的性能目标,低速扭矩性能尤其出色。通过双涡轮增压器和可变凸轮轴正时系统组合应用,改善缸内废气率,同时改善了泵气损失,降低了发动机燃油消耗。废气涡轮增压器的废气旁通阀设计为一体式部件。

1.1.2 燃油供给和点火系统特征

为了满足严格的排放法规,宝马V8双涡轮增压发动机匹配中置燃油喷射系统,每个气缸组均配备最新一代高压燃油泵,使燃油喷射压力高达35 MPa(前代车型:20 MPa),2个高压燃油泵通过新设计的排气凸轮轴驱动,如图2所示。

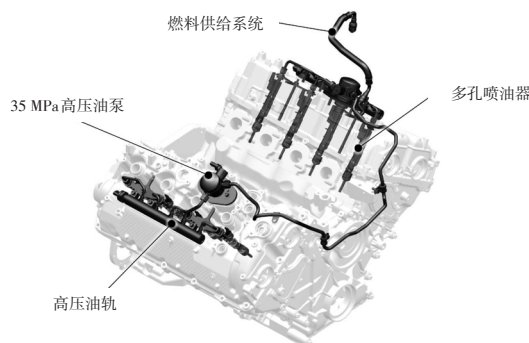


图2 宝马燃油系统^[6]

宝马V8汽油发动机采用新型点火系统,点火能量增加40%以上,点火电压范围增加30%以上,改善了燃料-空气混合物的点火性能,这种增强的点火系统使得发动机的输出扭矩也显著增加^[8]。

1.1.3 分体冷却技术

为了减少发动机机油和部件温度升高引起的壁面热损失和摩擦,改善燃油消耗,宝马公司在模块化设计技术中使用了分体式冷却技术,如图3所示。除了带有集成排气歧管的气缸盖外,在冷却系统的设计中,为气缸盖和曲轴箱设计了可实现单独冷却的冷却回路。集成在热管理模块中的电动分流冷却阀能够调节从气缸流入曲轴箱的体积流量。根据不同的气缸壁温度,按需设置为零流量、3种中间流量或全流量^[9]。

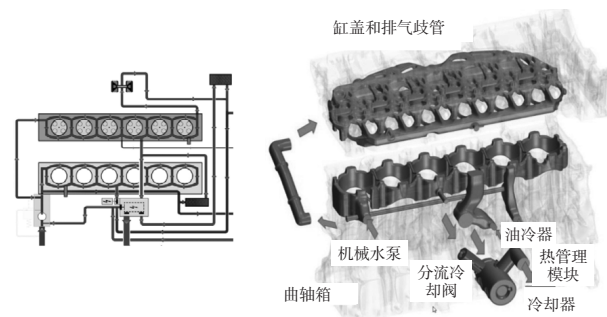


图3 宝马分体冷却系统^[9]

1.2 奔驰V型发动机技术进展

2015年,奔驰公司推出了2款4.0 L的V8发动机M177 LS1和M178,分别用于AMG C63和AMG GT车型。2016年,其发动机家族又增加了一个变体,用于AMG G系列的M176。后期,奔驰公司推出用于E级和S级的M177 LS2,扭矩从700 N·m增加到900 N·m,功率从375 kW增加到450 kW,且具有停缸功能^[10]。随着动力输出的增加,该系列发动机也在AMG GTR跑车领域得到了进一步应用。2017年,奔驰公司推出了V12发动机,该发动机冲程增加了12.2 mm,最终排

量达到7.3 L,发动机最大功率为386 kW,峰值扭矩为750 N·m。这款发动机随后被意大利超级跑车制造商帕加尼购买并使用到Zonda系列跑车上。

1.2.1 机械气门升程调节系统

为了降低泵气损失,减少发动机的燃油消耗,奔驰公司开发了一种机械气门升程调节系统(Camtronic),是戴姆勒集团CCT模块化系统的一部分,结构如图4所示。该系统可以通过执行器来操作进气和排气凸轮轴上的可移动凸轮实现停缸,通过停用V8发动机系列的气缸组1的气缸2和气缸3以及气缸组2的气缸5和气缸8实现,从而使得发动机在相同扭矩输出下,燃油消耗率降低。8缸和4缸工作模式之间的最大切换速度为3 250 r/min^[11]。

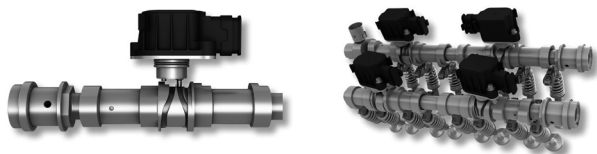


图4 机械气门升程调节系统^[11]

1.2.2 双涡轮增压器

为了提高输出功率,重新设计了涡轮增压器。针对单涡轮增压器的功率输出不足,提出了双涡轮方案,如图5所示。该方案具有输出功率高,响应良好的特点。为了实现双涡轮增压器的最佳运行,交替向每个涡轮提供排气脉冲,并与指定的点火顺序相结合。同时对排气管进行了优化配对,以实现良好的响应及降低气缸间的交叉影响^[11]。



图5 排气歧管和双涡轮增压系统^[11]

1.2.3 高滚流气道

为了增加进气道的流速,加快可燃混合物的形成,并在火花塞区域提供浓度适度的均匀混合气,奔驰公司对进气道端口的横截面形状进行了重新设计。设计的重点在于增加进气滚流运动以及在点火区域的滚流破碎,滚流、湍流水平的变化如图6所示。

增加的湍流水平还可提高部分负荷时残余废气的容忍度,允许更高的内部废气再循环,有助于减少节流效应,降低油耗^[11]。

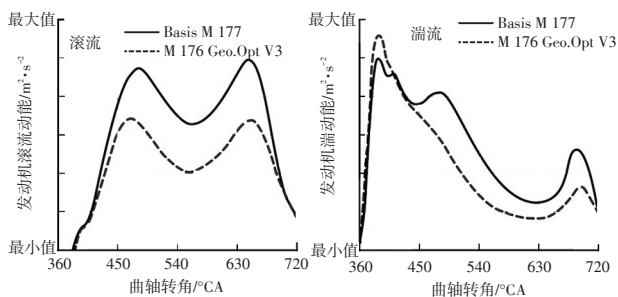


图6 M176和M177 LS2的流动性性能比较^[11]

1.2.4 燃烧系统

奔驰V8发动机采用了Mercedes-Benz BlueDIRECT燃烧系统,结合多火花点火、压电喷油器(位于燃烧室中央),以满足喷雾引导系统在油耗、排放和燃烧稳定性方面的要求。燃油喷射系统使用了外开式Bosch HDEV4.2压电式喷油器,其特点是喷射稳定性高,混合物形成良好。

1.2.5 NVH系统优化

为了满足豪华轿车的噪声和振动舒适度要求,对多个部件进行了NVH优化。利用一个专门设计的声学发动机罩来控制向上的噪声辐射。通过使用贴近发动机的复合材料油底壳罩,进一步改善了噪声辐射。还对高压燃油泵、进气系统和涡轮增压器采取了NVH措施,具体结构如图7所示^[11]。



图7 NVH优化部件^[11]

1.3 奥迪V型发动机技术进展

2016年,奥迪在RS5车型中使用了新款3.0 L排量的V6 TFSI发动机,该发动机具有2个涡轮增压器,可实现更短的气体流道和更快的响应能力,在1 900~5 000 r/min的转速范围内可以输出600 N·m的扭矩^[12]。2019年,奥迪推出了搭载电动压气机(Electrically Powered Compressor, EPC)的新款3.0 L V6 TDI Gen.3,该发动机输出功率为257 kW,最大扭矩为700 N·m。其结合了单级废气涡轮增压、电动压气机以及48 V轻度混合动力系统,使整个转速范围内的动力响应更加快速,性能满足新的WLTP和RDE测试循环许可条件以及EU 6d TEMP排放标准^[13]。

自2007年起,兰博基尼 Gallardo 和奥迪 R8 就开始使用奥迪 V10 汽油发动机,并展示了卓越的驾驶性能。奥迪 R8 LMS 赛车凭借此动力系统,在知名的耐力赛中赢得了超过 20 个冠军头衔。2014 年,奥迪公司通过优化进气系统和配气机构,在现有直喷系统的基础上引入进气道燃油喷射,并且采用了新一代发动机控制单元,推出了新款 V10 汽油发动机。该发动机排量为 5.2 L、最大输出功率为 449 kW (8 250 r/min)、最大转速为 8 700 r/min,并且能够满足 EU6 排放限值^[14]。

1.3.1 HSI 技术与双涡轮增压技术

为了获得更好的扭矩性能以及出色的动态响应能力,奥迪 3.0 L V6 TFSI EA839 发动机采用了 HSI (Hot Side Inside) 设计和双涡轮增压技术^[15],如图 8 所示。HSI 技术的特点是气缸盖具有一体式的排气歧管(Integral Exhaust Manifold, IEM),气缸盖的进气口呈现喇叭形状且进气歧管在气缸盖的外侧,这种设计的主要目的是使进气路径最短。为了实现动态增压压力的快速建立,配备了双涡轮增压技术。涡轮增压器安装在气缸 V 型布置夹角内,与 IEM 技术相结合能够实现缩短排气路径、降低流量损失的目的。涡轮增压器上的 2 个废气旁通阀能够实现增压压力可调和催化转化器的快速预热。

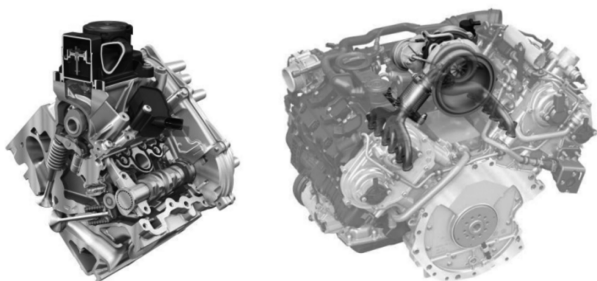


图 8 奥迪 V6 EA839 发动机^[15]

1.3.2 燃油喷射系统

为了提高发动机效率,3.0L V6 TFSI 发动机在进气侧使用了奥迪可变气门控制系统实现米勒(Miller) 循环,结合中间布置的喷油器能够在小负荷下产生足够的湍流并具有良好的废气耐受性。喷油器在中心位置有利于小气门升程对燃烧室内部流动的影响。喷油器的中心布置还可给进气侧腾出更多的空间,有助于开发出更佳的燃烧室形状来弥补小气门升程的弊端^[15]。

为在低速行驶工况下改善混合气的形成以及满足 EU6 排放标准中的颗粒物限制,V10 发动机在直喷系统中配备了进气道燃油喷射系统。为了保证两个

喷射系统独立运行,即使在气道喷射模式下,高压泵也要保持燃油循环,这样可以冷却高压泵,防止形成燃油蒸汽^[16]。

1.3.3 冷却和热管理系统

为降低油耗并优化暖机过程,V6 TFSI 发动机采用了新型的热管理系统,如图 9 所示^[15]。水泵布置在发动机缸体前端,带有离合器,由 V 形皮带驱动。冷却液由发动机中部向左右两侧分配到发动机缸体和气缸盖的冷却回路中。涡轮增压器、机油冷却器和乘员舱加热由气缸盖冷却回路作为热源。通过发动机缸体的冷却液流量不超过总冷却液流量的 25%,节温器采用低流阻电加热节温器。在部分负荷运行中,采用 105 °C 的最佳水温。在冷启动时,通过关闭水泵,使冷却液停止循环,在此阶段,热交换器通过将油与水侧隔离来加速机油预热。在暖机阶段,热量流经 IEM,气缸盖中的冷却液工作温度可更快达到要求。当发动机达到设定的工作温度,缸体开关阀就会打开,冷却液再流过缸盖和发动机缸体。

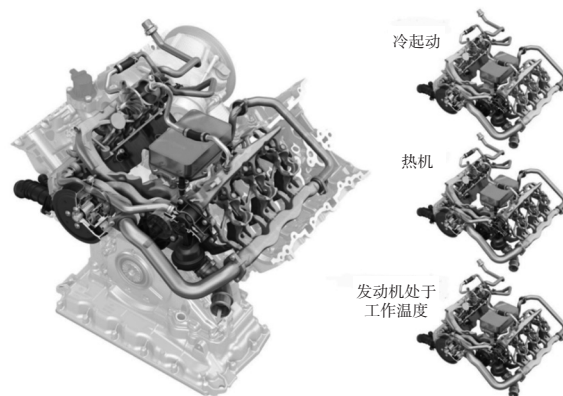


图 9 奥迪热管理系统^[15]

1.3.4 电动压气机

为满足严格的排放要求,实现良好的动力性和经济性,3.0L V6 TDI Gen.3 采用了单级废气涡轮增压和电动压气机技术^[17],如图 10 所示。涡轮增压器吸入的新鲜空气通过增压压力输送到发动机左侧至车载增压空气冷却器的管道。冷却的增压空气根据所需的动态响应通过一个节流阀流向 EPC 或者发动机。如果在启动和加速时请求 EPC 的支持,则阀门关闭直接流向发动机的气流,并将涡轮增压器压缩的增压空气输送至 EPC, EPC 将增压空气进行二次压缩。之后,增压空气与高压 EGR 直接混合,然后通过带有中央涡流控制阀瓣的双流进气歧管流向气缸。通过 EPC 的使用,最大空气质量流量提高,不仅直接增加了发动机最大扭矩,涡轮增压器的压力建立速度也大大加

快,提前达到最大进气压力,发动机扭矩攀升率显著增加。

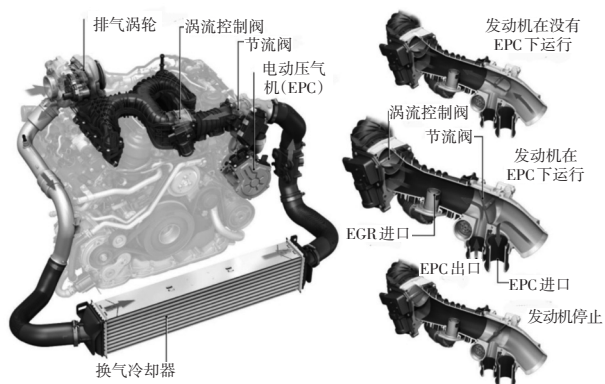


图10 奥迪EPC系统^[17]

1.3.5 进排气系统

为增加进气流量并保持较低的进气压力损失,奥迪V10发动机采用了双侧独立的进气系统,并优化了车身结构内的原始空气管道。为进一步提升性能,优化了进、排气门升程曲线,并将进气道长度减少了10 mm。在排气侧,燃烧室设计了导向结构,使排气更流畅,这也有助于减少换气过程中的节流损失,降低残余废气系数^[18],如图11所示。



图11 奥迪V10发动机^[18]

1.4 其他V型发动机技术进展

丰田公司曾推出一款排量为5.0 L的V12发动机(1GZ-FE),应用在1997~2017年生产的第二代丰田世纪车型上。2018年,通用汽车也推出了一款4.2 L双涡轮直喷双顶置凸轮轴V8发动机,该发动机专为凯迪拉克CT6 V-Sport 顶级轿车使用^[19]。

跑车公司对V型高端发动机的研发也极为关切。自保时捷推出V8涡轮增压Cayenne和Panamera发动机之后,就开始为其公司顶级车辆提供动力。2016年,Panamera中的新型4 L排量的V8双涡轮发动机功率达到404 kW,扭矩达到770 N·m^[20]。1999

年,阿斯顿·马丁公司首次将V12发动机引入DB7型超级跑车中。2016年,伴随着DB11型超级跑车的推出,新款双涡轮5.2 L V12发动机的功率输出达到了同级领先水平,并且能够满足污染物排放指标要求^[21]。鉴于在F1赛事中的成功表现,法拉利公司将赛车项目中的技术应用在民用超级跑车上。1992年,法拉利公司推出了一款排量为6.0 L的V12发动机(F140),其最大功率达485 kW,峰值扭矩达657 N·m。法拉利ENZO是首款搭载F140发动机的车型。在最新推出的812 Competizione系列中,这款F140发动机最新版本排量增至6.5 L,功率和扭矩分别为610 kW和692 N·m。

2 一汽红旗V型发动机关键技术与产品发展

2.1 红旗V型发动机产品发展

为填补国内高端V型发动机的产品空白,一汽红旗在国内率先开展了相关产品和技术研发工作。经过多年的努力,目前形成了三代V型6缸、V型8缸、V型12缸3个基础平台产品,排量覆盖3.0~6.0 L,支撑了红旗高级、豪华、礼宾等6款顶级车型产品。图12所示为一汽红旗主要V型发动机产品谱系。



图12 一汽红旗V型机产品谱系

围绕V型发动机动力性、排放性、安全性及舒适性等高端目标定位,一汽红旗突破了多项关键核心技术,全新V型发动机升功率超过120 kW/L,升扭矩超过230 N·m/L,且热效率达到39.02%,达到了国际领先水平。表1所示为红旗三代V型发动机的主要技术配置。图13所示为红旗V型发动机与其他品牌发动机性能对比。

2.2 进、排气系统技术进展

高动力性是高端V型发动机的重要技术指标,红旗发动机创新采用高分离双流道增压器、非对称交叉排气歧管、短进气道与小气门夹角极限设计、低阻力文丘里气门座圈技术及高滚流与高流通能力进气道构型设计,如图14、图15所示,实现了V型米勒循环发动机1 800 kg/h超高气流量和120 kW/L超大升功率的目标需求。

表1 新一代红旗的主要技术配置

技术配置	V6TD	V8TD	V12TD
米勒循环	√	√	√
高压压缩比	√	√	-
35 MPa缸内直喷	√	√	√
热管理模块	√	-	-
气缸盖集成排气歧管	√	-	-
低摩擦	√	√	√
全工况可变机油泵	√	√	√
双涡轮增压	√	√	√
超高耐温增压器材料	√	√	√
进排气可变配气机构	√	√	√
NVH性能优化	√	√	√
外观精良性提升	√	√	√

注：“√”采用；“-”未采用

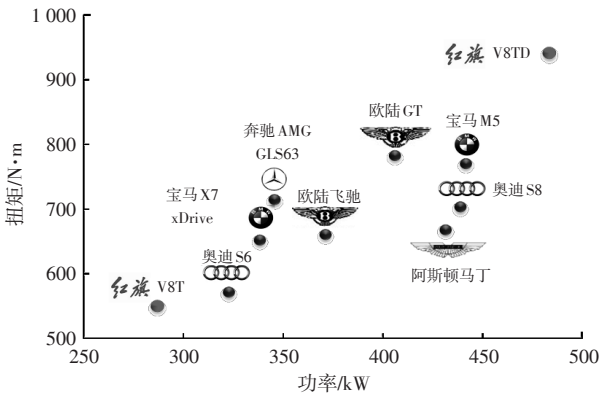


图13 红旗V型发动机与其他品牌发动机性能对比



图14 高滚流弯刀型气道

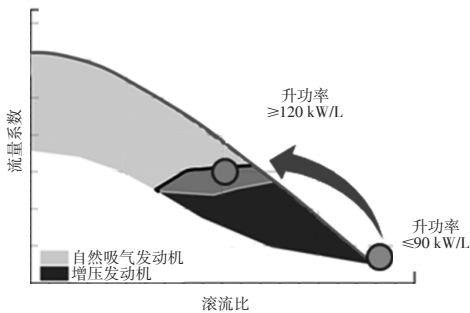


图15 进气系统滚流比与流量系数结果

同时,针对V型发动机点火间隔不均匀导致的各

缸换气差异问题,采用了单缸负荷控制方案,设计了非均匀进排气型线,协同各缸的进气量、空燃比、残余废气系数及燃烧状态等,使各缸之间的负荷差异显著降低。如图16所示,通过一致性设计优化,方案二使各缸负荷差异显著改善,提高了发动机NVH水平。

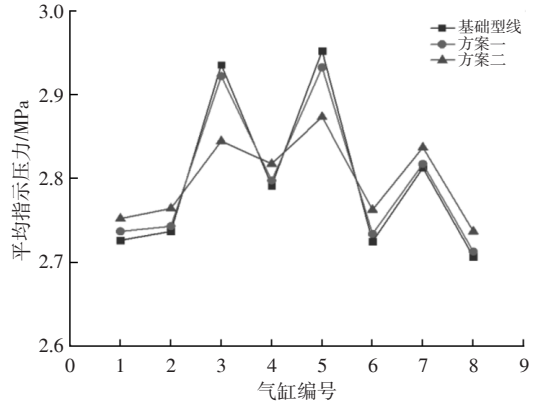


图16 5000 r/min外特性各缸平均指示压力变化情况

2.3 燃油供给与喷射系统技术进展

V型机高功率需求必然会使燃油喷射量增大,易于诱发油-气混合不均匀及喷雾碰壁问题,红旗发动机采用了35 MPa高压喷射,并创新设计了非均匀喷嘴孔径与锥角的油-气混合技术,如图17所示。喷油器喷孔按布置形状分为了头部、肩部、腰部和尾部4个部分,头部喷孔采用小孔径设计,肩部喷孔采用大孔径设计,腰部喷孔为小孔径,尾部喷孔为大孔径,调节整体喷油器流量。

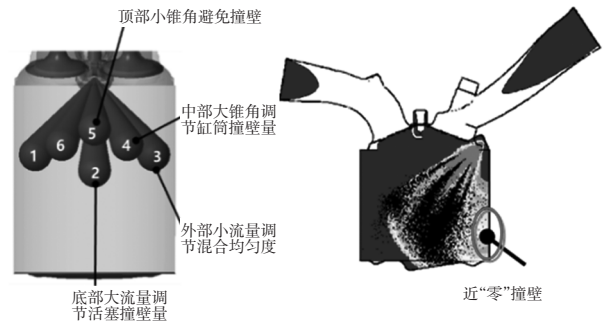


图17 非均匀孔径及非均匀锥角效果

2.4 结构设计及制造技术进展

高动力V型发动机结构强度设计极为困难和复杂,一方面高动力需求对发动机缸体、缸盖等的强度提出了更高的要求,另一方面为了整车搭载的便利,其空间尺寸又极为受限,一汽红旗提出了分区定位高强度高刚度设计方案,依据缸体砂型铸造生产的顺序凝固特点,采用冷铁进行分区性能强化。并且,针对缸体铸造砂芯产气量大易导致气孔类缺陷问题,创新研发出无温差整体制芯技术,降低了砂芯的含气量,

显著改善了铸件质量。图 18 所示为新旧 V 型发动机缸体表面质量对比。



(a)旧缸体

(b)新缸体

图 18 新旧缸体表面质量

同时,针对 V 型机普遍存在的缸体、缸盖等关键部件热负荷偏高的行业难题,采用了基于阶梯换热理论的环境式缸体水套和宽域缸间冷却结构,实现了高动力发动机缸体分区精准冷却。并且,采用了多流道量化可调一体式全横流气缸盖冷却水套技术,通过结构设计实现冷却液流量和流速的“按需分配”,实现了气缸盖水套的小体积、高流速、全横流强化冷却。

2.5 电控系统技术进展

长期以来,电控系统开发是我国发动机开发领域的薄弱环节,为提高 V 型发动机及搭载整车的工作安全性及需求特殊性,一汽红旗采用了基于 CANFD 的双电子控制器单元(Electronic Control Unit, ECU)联控架构,如图 19 所示,针对缸间做功不平衡难题设计了缸点火修正与喷油修正策略;同时,构建了以 1/2 缸断缸效率为单元的多级扭矩速降技术,进一步提升了扭矩控制精度。

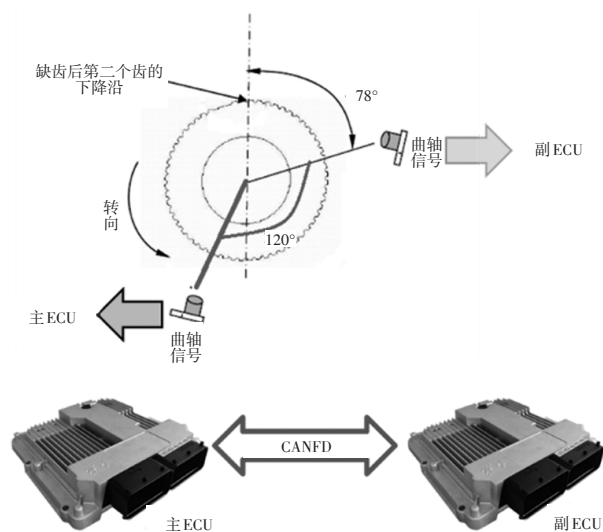


图 19 双 ECU 联控架构

3 结论与展望

作为豪华汽车品牌的主要标志,宝马、奔驰、奥迪、一汽红旗等国内外重要汽车厂商均长期将 V 型发动机视为核心关键产品,并基于发动机燃烧、增压、换气、混合气形成及冷却与润滑等方面的持续优化改进,实现发动机性能水平的不断提升和进步。为推动我国自主 V 型发动机产品性能的进一步提升,相关发动机本体优化技术仍需进一步精细化发展。

面向碳达峰、碳中和全球性任务,V 型发动机若想延续其技术引领和领导地位,需要加快在低/零碳化道路上的进步与发展,积极推进其关键部件电动化、动力系统混动化及低/零碳燃料替代应用化的发展,实现 V 型发动机更加高效与低/零碳化运转工作。

本文主要综述了 V 型发动机本体性能提升相关的燃烧系统优化、缸内气流运动组织、燃油喷射及高效冷区与润滑等方面的技术发展情况。针对整机排放控制技术、关键部件电动化技术及动力系统整体混动化技术等方面的论述不足,今后将进一步进行相关方面的归纳总结与补充。

参考文献

- [1] ENDERLE C, RAMSTEINER T, VENT G, et al. Downsizing in the High-Performance Segment-Not a Contradiction in Terms for AMG! The New V8 Engine Family from AMG[C]//23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2014.
- [2] 廖曼宏. 直列式和 V 型发动机的对比以及新能源时代发动机的发展趋势[J]. 中国设备工程, 2018(23): 163-166.
- [3] BARETZKY U, DIEHL H, KOTAUSCHEK W, et al. The 4.0 L V6 TDI Engine for the 24 hrs of Le Mans-Victory of Efficiency[C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2018.
- [4] HARTMANN O, RÜLICHE M, DURST B, et al. The New 6-Cylinder Gasoline Engine of the BMW Group[C]//27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2018.
- [5] 王占峰, 闫涛, 刘金玉. V 型六缸汽油发动机性能开发[J]. 北京汽车, 2016(2): 12-16+20.
- [6] HAHN J, KÜGLER D, DURST B, et al. The new BMW 8-cylinder gasoline engine Der neue BMW 8-Zylinder Ottomotor[C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2018.
- [7] LANDERL C, MIRITSCH J, BROWN M. The New BMW 12-Cylinder Gasoline Engine - Outstanding Comfort and Superior Performance[C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2016.

- [8] LANGEN P, BROX W, BRÜNER T, et al. The new BMW V8 gasoline engine with twin turbo[J]. MTZ, 2008, 69: 4–10.
- [9] HARTMANN O, RULICKE M, DURST B, et al. The New 6–Cylinder Gasoline Engine of the BMW Group[C]//27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2018: 7–26.
- [10] TSCHAMON B, ENDERLE C, RAMSTEINER T, et al. Extension of the Most Efficient and Most Powerful V8 Engine Family for Mercedes–AMG and Mercedes–Benz[C]//26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2017.
- [11] TSCHAMON D B, ENDERLE D C. Extension of the Most Efficient and Most Powerful V8 Engine Family for Mercedes–AMG and Mercedes–Benz [C]//27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2017.
- [12] KÖNIGSTEDT J, ARDEY N, FRÖHLICH A, et al. The continued development of the new Audi V6 TFSI engine [C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2018.
- [13] REUSS T, ARDEY N, SCHOBBER M, et al. The new generation of the Audi 3.0 L V6 TDI Gen.3 engine with electric compressor[C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2019.
- [14] BRINKMANN C, KNIRSCH S, KÖNIGSTEDT J. Perfected Dynamics of a Sports Car Engine—Further Development of the V10 High–Speed Engine in the New Lamborghini Huracán[C]//23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2014.
- [15] KÖNIGSTEDT J, BONN G, BRINKMANN C, et al. The new 3.0L V6 TFSI engine from Audi—The next milestone in TFSI technology[C]//37th Internationales Wiener Motorensymposium, 2016.
- [16] EISER A, FITTEN M, HEIDUK T, et al. The New Top–of–the–Range V6–Engine from Audi[J]. MTZ, 2009, 70: 10–18.
- [17] REUSS T, ARDEY N, SCHOBBER M, et al. The new generation of the Audi 3.0 L V6 TDI engine[J]. MTZ, 2010, 71: 40–47.
- [18] BRINKMANN C, KNIRSCH S, KÖNIGSTEDT J, et al. Perfected Dynamics of a Sports Car Engine – Further Development of the V10 High–Speed Engine in the New Lamborghini Huracán[J/OL]. (2014–10) [2023–12–30]. <https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/en/content/conf2014-04.004/>.
- [19] GARDNER D, BOWYER S. The New 4.2L Twin Turbo V8 Engine from General Motors[C]//27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2018.
- [20] KERNER J, GÜNTHER T, WERNER M, et al. The new V8 turbo engine from Porsche[C]//Internationales Wiener Motorensymposium, 2016.
- [21] RENDELL J. Aston Martin DB11: first all–new V12 engine built[EB/OL]. (2016–06–21) [2023–12–30]. <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/aston-martin-db11-first-all-new-v12-engine-built>.

(责任编辑 明慧)