

# 应理性评估内燃机的挑战、潜力与机遇(上)

■赵福全 刘宗巍 郝翰 陈康达

当前,能源消耗、环境污染以及气候变化给汽车产业带来的压力日益加剧,在传统汽车动力技术中占据绝对主体地位的车用内燃机,也因此面临日益增大的严峻挑战。同时,以纯电动汽车为代表的新能源汽车近年来取得了长足进步和快速发展,成为中国乃至全球范围内备受瞩目的焦点,也对传统内燃机汽车形成了巨大冲击。不断有报道称,一些国家或地区正在出台或制定禁售内燃机汽车的政策,一些车企则提出了到某个时间点完全停产纯内燃机汽车的计划。尽管其中多数消息并不确切或者存在误读,但是带给内燃机产业的影响是显而易见的。一时之间,围绕着车用内燃机的未来走向,形成了针锋相对的激烈争论,也让很多汽车产业的管理者、参与者和利益相关者感到无所适从。当此之际,科学分析和准确判断车用内燃机的定位与前景不仅意义重大,而且异常紧迫,这既涉及拥有100多年历史的内燃机产业后续如何发展,也与汽车动力技术的路线选择与未来方向息息相关,从而影响整个汽车产业的可持续发展。

毋庸置疑,汽车产业正在经历前所未有的全面重构,其中的重要驱动力之一就是能源革命。如果说,此前一直是单一以内燃机为主的“汽车动力1.0时代”,那么今后很长一段时期都将处于多种动力源并存的“汽车动力2.0时代”。而展望未来,人类或许终会进入以电驱动为主的“汽车动力3.0时代”,但那将是一个远景目标,并且届时处于主流地位的很可能并非今天的锂电池系统,而是固态电池或是氢燃料电池,或者是其他现在还未知的新型电池。显然,我们不能以“汽车动力3.0时代”的终极目标和可能情景,来简单断言当前内燃机和电动汽车的优劣。更进一步说,人类社会对于能源的需求是一个永恒的话题,而人类的能源利用史从来都是一个不断进步、交替成长的过程。因此,关于车用内燃机的判断,绝不是非此即彼的简单取舍,必须进行系统全面的综合评估。

站在产业转型关键期的历史节点,笔者对车用内燃机面临的挑战、拥有的潜力、具备的优势以及可能的机遇,进行了深入分析与客观解读,以期澄清事实、明确判断、达成共识、凝聚合力,从而为车用内燃机乃至整个汽车产业未来的可持续发展提供参考。

## 一、车用内燃机面临严峻挑战

车用内燃机当前确实面临空前严峻的挑战,主要体现在以下三点。

### 挑战一:油耗法规日益严苛

随着全球汽车保有量的不断增长,汽车消耗的石油资源与日俱增。为此,各国不断升级限制汽车油耗水平的法规。对于中国来说,还面临着能源安全的严重问题。最新数据显示,2018年中国石油净进口高达4.4亿吨,石油对外依存度已升至69.8%,远超国际上50%的能源安全警戒线。而汽车行业的油耗量目前已占到中国石油消耗总量的一半左右。同时相对而言,在石油消费量最大的几个产业中,汽车产业更容易改变动力形式和降低产品油耗。正因如此,国家汽车油耗法规不断收紧,以乘用车CAFC(企业平均燃油消耗量)法规为例,从正在实施的四阶段2020年5升/100公里,到即将颁布的五阶

段2025年4升/100公里,再到目标已定的六阶段2030年3.2升/100公里。日益严苛的油耗法规不仅带来技术成本的大幅提升,也对内燃机的热效率极限提出了严峻的实际挑战,仅靠内燃机自身优化提升已经越来越难以达标。

### 挑战二:环保标准不断提升

当前,中国的环保形势日益严峻,很多城市饱受雾霾肆虐之苦。因此,绿色环保不仅是长期重要的发展策略,也成为近期紧迫的政治任务。具体到汽车产业,一方面为了有效降低有害气体和颗粒物排放,国家不断加快汽车排放法规的升级,即将实施的国六(第六阶段机动车污染物排放标准)被誉为全球最严格的排放法规之一,不仅延续了欧洲标准的基本内容,还增加了美国标准的一些考核指标,并且很多地区将提前实施。内燃机汽车必须增加更先进的后处理技术才有可能达标,这也带来汽车成本的大幅提升。此外,越来越多的地区和城市除了为缓解交通拥堵问题,也基于环保考虑,已经或计划实施内燃机汽车限行甚至限购的政策。另一方面,气候变化使二氧化碳排放成为全球关注焦点,作为碳排放第一大国,中国在《巴黎协定》上做出了庄严承诺,汽车工业早日实现碳排放达到峰值是大势所趋,这对消耗碳基燃料的传统内燃机汽车来说也是无法回避的难题。所有这些不断提升的环保要求,给内燃机汽车带来了巨大的生存挑战。

### 挑战三:新技术带来新可能

随着新能源以及混合动力汽车技术的快速进步,纯内燃机驱动不再是车用动力源的唯一可选方案。因此,且不论车用内燃机在技术极限上能否满足未来的油耗和环保法规,仅从技术经济性角度出发,不计成本地使用日趋复杂的内燃机也不再是最佳的商业选项。以电能驱动主导的新能源汽车,不仅有助于降低石油对外依存度和有害物污染,而且在使用阶段无任何排放物,因此受到了全世界的高度重视。同时,对于国家建立低碳能源系统具有战略意义的可再生能源发电及制氢,发展潜力巨大,也将为基于电驱动的汽车动力系统开发及产业化提供重要的原动力。

未来,随着电动汽车保有量的不断增加,及其作为供能储能装置接入能源互联网即V2G技术的逐步成熟,电动汽车所具有的电网削峰填谷的巨大潜力将进一步放大其战略价值。尤其在中国,发展新能源汽车已上升为国家战略,政府专门出台了诸如“双积分”政策等旨在推动新能源汽车快速市场化的产业政策,明确要求所有在华车企必须生产一定比例的新能源汽车。一些观点认为,新能源汽车将很快突破拐点、实现高速发展,这意味着汽车动力源将发生重大转变。电动化相关技术的快速进步以及相关基础设施和商业模式的进一步成熟,将对车用内燃机的生存提出最为根本的挑战。

综上所述,面对未来节能、能源转型、环保、低碳等方面的发展要求,内燃机技术的发展潜力、进步速度以及经济有效性,将决定其与其他技术竞争时的生存空间。

## 二、车用内燃机的发展潜力不容小觑

尽管面临严峻挑战,但内燃机的发展潜力也不容小觑,以下从四个方面展开分析。

### 潜力一:内燃机的热效率远未达到极限

当前根据各车企公开数据,国际上量产汽油机峰值热效率最高已达41%,实验室汽油机峰值热效率达到50%以上,而备受关注的马自达第二代创驰蓝天发动机,据报道峰值热效率可达51%,并且即将在全新马自达3上量产应用;量产柴油机峰值热效率最高已达50%,实验室柴油机峰值热效率可达55%以上。日本早稻田大学大圣泰弘教授的研究表明,对点燃式汽油机而言,通过稀薄燃烧、增压直喷、冷却EGR(废气再循环)、长冲程、低摩擦、高效涡轮增压器、氢+强滚流、绝热等技术组合,可将其峰值有效热效率提升到50.12%。对于压燃式汽油机而言,通过MPCI(多次喷射及燃烧控制)、增压+EGR、燃烧室优化、Miller(米勒)循环、低摩擦、低散热损失、高压缩比(CR=18)等技术组合,可将其峰值有效热效率提升到51.05%。由此可见,内燃机的热效率远未达到物理极限,在节油方面还有很大的提升空间。

### 潜力二:内燃机汽车能够实现近零排放

在排放方面,早在2006年,笔者编著的英文著作《汽油车近零排放技术》一书,就对相关技术进行过系统阐述(此书中文版由清华大学帅石金教授翻译,于2010年出版)。目前,内燃机汽车在技术上已经可以做到氮氧化物和颗粒物的近零排放,未来通过内燃机技术的进一步优化、动力系统的电气化(混合动力技术)、更加先进的后处理技术以及可持续性的脱碳策略(回收利用大气中的二氧化碳),内燃机汽车有望实现真正的零污染。即污染物排放量可以降低到不再与环境相关的水平,不会对空气质量产生负面影响,甚至车辆排放的尾气比空气本身还要清洁。根据德国斯图加特实时空气质量检测模型的计算,符合欧VI d-TEMP标准(约相当于中国国六b标准)的车辆对总污染的贡献约为0.2~0.5 μg/m<sup>3</sup>,几乎可以忽略不计。而内燃机汽车满足下一阶段更严苛排放标准的技术路线是明确可行的,所需衡量的主要要素是成本。

### 潜力三:内燃机汽车并不绝对高碳

比较不同动力总成车辆的碳排放必须基于全生命周期的测算,而不能只看使用阶段。从这个意义上讲,电动车并不一定比内燃机汽车低碳,主要取决于其所用电能的来源。众所周知,电能是二次能源,尽管在使用阶段电动车本身的碳排放为零,但其所用的电能因来源不同,有不同的碳排放量。同时,还应考虑车辆生产及报废回收阶段产生的碳排放。唯有系统对比、评估各种车用动力系统全生命周期内的碳排放总量,才能指导产业及企业科学、合理地选取技术路线,满足未来碳排放的法规要求。根据我们对不同动力总成车辆全生命周期碳排放情况的最新研究结果,目前较长续驶里程的电动车在全生命周期内的碳排放并不低于汽油车,中低续驶里程的电动车相对汽油车确实具有一定的碳减排收益,但仍然很难达到深度混合动力汽车的碳排放水平。如果考虑不同地区和季节的差异,电动车的碳排放还可能更高。此外,在生产阶段,电动车的碳排放显著高于汽油车,这是因为制造电池系统要比制造内燃机的碳排放高很多。

当然,上述评估结果不是一成不变的,尤其受到两个关键因素的影响。一是电池能量密度的提升,二是外部电能的清洁度。中国的能源结构一直以高碳的煤电为主,这在短期内难以彻底扭转,毕竟可再生能源的大量导入和有效利用不可能一蹴而就。在此情况下,通过“去内燃机”来迅速实现汽车低碳化,其实是一个大难题。当然从长远来看,电动汽车相较于内燃机汽车的碳减排优势会日趋明朗,但是在今后相当长一段时间内,只关注电动车的发展而忽略内燃机低碳技术的攻关是不利于产业整体低碳化发展的。

### 潜力四:动力系统电气化带来本质改变

实际上,在本轮汽车能源革命中,内燃机并不是旁观者,而是重要的参与者。通过传统动力总成的全面电气化,内燃机发挥作用的形式、方向和能力都将发生质的改变。过去,内燃机独自承担驱动任务,需要工作在较宽区间以满足复杂工况,提升其热效率则需增加各种可控技术以扩大最佳工作区域,这同时也带来了成本的大幅增加。内燃机最终的热效率是各个工作区域热效率的综合平均值,其最高热效率并未得到有效体现。在本质上,这是以机械可变的方式实现动力输出可变带来的结果。沿着这条技术路线发展,将不可避免地造成系统日益复杂、控制日益困难、成本日益攀升,直至抵达内燃机热效率的物理极限。因此,单独使用内燃机驱动的车辆越来越难以满足后续的油耗和排放法规。

但是,内燃机完全可以借助电池、电机和电控技术的进步,转向动力系统电气化的发展方向,从而获得更大的潜力。未来,内燃机将与电池电机有效组合承担驱动任务。尽管整车对动力总成的需求并未改变,但由于动力系统中耦合了电池电机单元,可通过电池充放电来适应不同工况。内燃机则始终工作在较窄的高热效率区域,甚至最终可以只追求有效热效率的单点最高值,并力争只在这个“甜蜜点”上工作。而动力输出的可变调节则由电池与电机的有效组合( $\alpha$ )来完成。这样内燃机将大幅简化,成本将显著降低,从而补偿引入电池电机所带来的成本增加。在本质上这是以机电耦合即“内燃机(ICE)+ $\alpha$ ”的方式来实现动力输出的可变,也即混合动力的技术路线。区别于传统的混合动力技术方案,这种“新”混动技术路线提出了全新的内燃机设计理念,并进一步强化了电池电机的作用。

传统内燃机动力系统的全面电气化将是一个渐进的过程,随着法规约束的不断增强和“三电”技术的持续进步,这一进程将不断加快。由此,企业将逐渐放弃单独以内燃机驱动车辆的技术路线,而是转向根据混合动力、插电式以及增程式等各种机电耦合动力系统的需求来进行内燃机的优化。当然在具体技术决策中,企业需要评估电池电机成本及控制难度增加与内燃机成本节省之间的平衡点,不同的企业在不同的时间点和不同的技术储备下,会有不同的最佳选择。但无论如何,内燃机本身都将发生质的改变。面向满足机电耦合需求的专用内燃机开发,产业界和学术界还有很多重要工作亟需开展和深入,这将极大地扩展内燃机在节能、减排及降碳方面的潜力,从而使内燃机重新焕发青春。

(作者单位:清华大学汽车产业与技术战略研究院)

# 应理性评估内燃机的挑战、潜力与机遇(下)

■赵福全 刘宗巍 郝翰 陈康达

## 三、车用内燃机可助力电动车克服短板

内燃机不仅潜力巨大,而且还有很多优势,可以助力尚不成熟的电动车克服发展短板并不断走向成熟。

首先,当前电动车面临的核心瓶颈是电池成本和续驶里程。电池成本的降低不是短期内就能实现的,长期来看还将受到原材料供需关系的影响,存在不确定性。续驶里程焦虑也是一个大问题,在充电设施完全满足需要之前,只能通过增加电池来提升续驶里程,但这又意味着成本的激增。而且在本质上电池属于能源载体,其作用相当于油箱,即便未来电池成本有了显著下降,车辆搭载着大量电池运行带来的能耗增加仍然对节能减排不利,因为电池是有重量的,且生产电池本身是以增加碳排放为代价的。在这种情况下,如能充分挖掘内燃机的潜力,与电池电机形成性价比最优的技术组合,不仅可以有效控制成本,而且也很容易化解里程焦虑,从而在满足严苛法规的同时,为消费者提供体验更好的汽车产品,在全生命周期内实现更加节能、减排、低碳的高性价比运行。实际上,“汽车动力2.0时代”既是各种动力技术相互竞争的时代,更是其相互融合、互为补充的新时代。

其次,电动汽车的使用环境存在很大局限,这是由电池属性决定的,很难彻底解决。一般来说,气温低于-15℃时,电动车的性能会急剧衰减。而中国冬季日间平均气温在-15℃以下的区域约占国土面积的5%,夜间平均气温在-15℃以下的区域约占35%。毫无疑问,电动车在这些地区的推广面临额外的挑战。相比之下,内燃机具有极强的适应性,在高温和高寒等极端情况下都可以正常运行。在纯电动汽车难以适应的区域,与其勉为其难地提升电池的低温性能(必然随之带来产品性价比的恶化),不如充分利用内燃机的优势,通过内燃机与电池电机的有效组合来为电动车冬季运行保驾护航。一些常年特别寒冷的地区,则根本不宜推广电动车,使用纯内燃机汽车就可以满足移动出行的需要。实际上,内燃机在一些恶劣条件下的高可靠应用,远不是其他动力技术可以简单替代的,即使最终能够找到满足这些使用条件的新技术,也需要较长时间的持续攻关。

最后,内燃机经过100多年的发展,拥有了完整的产业链条、明确的分工关系和深厚的技术积累。坚实的产业基础决定了完全取代可靠性高、成本低的内燃机,代价是高昂的、过程是漫长的。对于幅员辽阔、自然条件千差万别且各地经济发展不平衡的中国来说,要全面替换车用内燃机将比一些体量较小的国家困难得多,也缓慢得多。此外,对于如何满足汽车对动力的需求,内燃机从业者有深刻的理解和丰富的经验。作为汽车中最复杂的总成系统,内燃机的电控技术十分精细,内燃机的制造涉及到包括工艺、

材料等在内的大量共性核心技术。这些技术,过去有效支撑了内燃机汽车的持续进步,未来则将助力汽车动力系统逐步电气化以及电动化的不断发展。

## 四、车用内燃机优化迎来机遇

当前,车用内燃机在面临严峻挑战的同时,也正迎来前所未有的优化机遇。

### 机遇一:动力系统全面电气化的机遇

内燃机热效率提升的巨大潜力,与电池电机有效结合后将得到充分释放。一方面,当前内燃机峰值热效率本身仍有10%(绝对值)以上的提升空间。另一方面,通过将内燃机的高热效率区由较大区间收窄到较小区间直至单点运行,综合热效率还可以进一步提升20%(绝对值)以上。在此过程中,内燃机将逐步摆脱多种机械可变的复杂技术,成本不升反降。伴随着汽车动力总成的全面电气化,内燃机将作为机电耦合系统中的组成部分,长期发挥重要作用。这也意味着内燃机的存在方式、性能需求和开发理念都将发生根本性的改变,未来的内燃机将向高效、宽工况、简单、低成本的方向不断进化,并与高效的电机、变速器、电池等紧密结合,从而给整个产业带来全新的发展机遇。

当内燃机由“机械实现可变”向“机电耦合实现可变”转变时,掌握各种高度复杂的机械可变控制技术将不再是必然选项,从而相对削弱了该领域曾经的领先者优势,为后来者提供了赶超的新机遇。而在追求较窄乃至单点区域最高热效率的技术路径上,中国可以和各国同时起步并力争在此方面有更大的作为。

### 机遇二:燃料改质设计与多元化的机遇

燃料改质与多元化使用也是当前重要的发展趋势之一,而内燃机则是全球燃料革命的重要载体。内燃机经过多年的发展,在技术上已经足够成熟,通过对燃烧过程及燃料特性的协同改善与控制,几乎可以有效使用任何种类的不同燃料。未来通过燃烧系统的进一步优化与智能控制,同时对燃料进行有针对性的改质设计,将有更多不同种类的燃料,特别是碳中性燃料、低辛烷值燃料以及基于可再生能源制备的燃料,提供给内燃机使用,从而延长内燃机的寿命,并使其更加高效、绿色、清洁地服务人类。

### 机遇三:智能网联化的机遇

当前汽车正向低碳化、网联化和智能化方向不断升级,而智能网联技术的应用并不局限于整车层面。对于汽车动力系统而言,借助智能网联技术,可以面向节能、环保、低碳目标,实现更有效的优化控制。显然,这不仅有利于纯电动力系统的优化运行,搭载内燃机和电池电机单元的复杂机电耦合系统对此同样有紧迫需求。未来动力系统将通过网联实时获取车辆自身信息以及与车辆相关的交通环境信息,并基于对车辆内外部状态的感知和预测,实施高度智能化的精准控制,以最大限度地降低汽车能耗和排放。

## 五、“汽车动力2.0时代”

### 正在到来

当前,汽车产业正快速进入能源多元化时代。ICEV(纯内燃机汽车)、HEV(混合动力汽车)、PHEV(插电式混动汽车)、REV(增程式电动汽车)、BEV(纯电动汽车)及FCV(燃料电池汽车)等将长期并存,分别占有不同的市场份额并随时间推移逐渐发生变化。不同动力形式各有优缺,法规将成为推动此消彼长最关键的因素。

由于技术成本的原因,简单依靠内燃机难以满足4升/100公里的油耗目标,ICEV将在2025年前后逐渐接近应用极限。此后,HEV将占据较大比例,几乎所有内燃机都将匹配电池电机系统,形成ICE+α的混动形式,借助电机调整内燃机的工作区域,以提升效率、降低油耗。随着法规进一步强化,HEV也将面临节油极限,PHEV和REV将随之获得快速增长。在此过程中,一方面,PHEV的电池将越来越大,即通过增加纯电行驶里程来满足日益严苛的油耗法规;另一方面,内燃机将向全新的设计方向演化,即通过定区域乃至定点工作来进一步提升综合热效率,并通过简化设计来降低系统成本。在PHEV技术方案中,内燃机简化设计带来的成本降低一定程度上补偿了引入大电池所带来的成本增加。而在REV技术方案中,内燃机的导入同时解决了里程焦虑和电池成本的双重矛盾。由于法规的不断加严,BEV和FCV的占比也将稳步提升,其发展速度除受技术本身影响之外,还取决于成本下降速度以及基础设施建设情况。当电池成本大幅下降、充电基础设施充分普及后,PHEV及REV将逐步退出市场。

由此可见,虽然单独使用内燃机驱动的车辆会越来越少,但是内燃机并不会就此退出历史舞台。搭载内燃机的HEV、PHEV、REV的市场份额将逐步扩大。在可预期的未来,带有内燃机的汽车产品仍将远远多于没有内燃机的汽车产品。从这个意义上讲,内燃机在汽车动力源中的主体地位虽有下降,但仍然具有强大的生命力。

对于内燃机的潜力、优势和产业基础,国家、产业界和学术界都应有清醒的认识。内燃机在汽车可持续发展的进程中已经并且还将继续发挥重要作用,这一点不应也不容否定。对国家而言,将产业基础雄厚的内燃机轻易舍弃,还意味着社会资源的巨大浪费,并将对整个国民经济产生冲击。因此,全国范围内出台限制内燃机汽车发展的政策必须慎之又慎,个别区域根据自身情况采取类似措施也应该经过充分的科学评估。否则不仅不会立竿见影地取得节油减排降碳的明显效果,还会影响汽车以及众多相关产业的健康发展。至于不同企业的技术路线决策,则应根据技术储备的不同、产品组合的不同、品牌价格承载力的不同以及发展时期的不同,做出最适合自己的正确选择。需要强调的是,对于各种动力技术的未来发展,企业从各自的情况及利益出发,可以有不同的认识和战

略。而产业的决策者和研究者理应站在国家和行业整体的高度,基于全生命周期的视角,从技术成熟度、成本、进步速度、攻关投入以及产业支撑、政策导向等多个维度,对汽车动力技术进行持续、系统、全面、客观的评估,以此来指导产业的健康可持续发展。

实际上,内燃机的存在可以让机电耦合系统的电动部分更好地发挥作用。反过来,电动技术的进步也为内燃机产业带来了更大的发展空间。因此,内燃机和电动汽车彼此并非割裂和排斥的关系,而是相互拥抱和融合的互补关系。内燃机从业者需要转变思想,要承认汽车动力系统电动化是大势所趋,内燃机独挑大梁的时代已经过去了。为了更好地发展,内燃机必须主动转型、积极“触电”,调整技术攻关和产业应用方向,最大限度地满足新时期对内燃机的新需求。与此同时,新能源汽车的从业者也不要轻视内燃机的发展潜力,要明白在相当长的一段时间内只靠电池尚难以承担起汽车动力源主角的任务。因此,新能源汽车应充分接纳内燃机,利用内燃机的长处补足自己的短板,为消费者提供性价比和体验更优的产品,也为自身的发展成熟赢得时间。总之,双方完全没有必要相互争论、彼此否定,更没有必要刻意站队、敌视对方。在新旧技术交替的变革期,我们既要以开放的心态看待“新”事物的发展,也要以客观的态度审视“旧”事物的“余威”。最重要的是,双方一定要互相借鉴、取长补短、共同进步。这既是车用动力系统向电动化转型并逐步取代内燃机的辩证法,也是自然界内其他新旧技术交替的必然规律。

展望未来,多种动力源长期共存的“汽车动力2.0时代”正在到来。在节能与新能源汽车技术的发展过程中,开源与节流必须并重。多种动力形式并非简单的竞争关系,而是互为补充的竞争关系,唯有优化组合才能获得最佳的汽车动力解决方案,以期满足日益严苛的法规标准和日益升级的出行需求。在多种动力形式中,作为各种机电耦合系统中不可或缺的组成部分,内燃机仍具有继续发挥重要作用的空间和进一步完善的潜力。这也意味着车用内燃机将出现重大转型,未来将朝着定点高效、系统简化、成本下降的新方向发展。为此,在大力推动新能源汽车快速发展的同时,无论国家还是产业,都必须高度重视车用内燃机的优化升级:一方面,一定要把内燃机的产业基础、特色优势和技术潜力用足,并且结合不同动力形式的特点,科学制定近、中、远期的技术路线。另一方面,应针对内燃机技术方向的转变,做好前瞻布局,提供基础支撑,持续加大投入,充分挖掘内燃机的最大潜能。此外,还应采取切实措施防止内燃机人才流失和断层,避免产业出现后继无人、发展乏力的被动局面。唯有如此,才能有效支撑汽车产业的可持续发展。

(作者单位:清华大学汽车产业与技术战略研究院)