

燃料电池电动汽车 (I)

胡 骅¹, 宋 慧²

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉科技大学)

摘要: 燃料电池电动汽车 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) 是汽车工业可持续发展的主要方向之一。本文重点介绍现代燃料电池电动汽车的燃料、质子交换膜燃料电池, 燃料电池发动机和燃料电池电动汽车的结构和原理等, 阐述我国自行开发的燃料电池电动汽车和国外新一代燃料电池电动汽车。

关键词: 燃料; 燃料电池; 燃料电池组; 燃料电池发动机; 燃料电池电动汽车 (FCEV)

中图分类号: U469.722 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-8639(2007)01-0051-05

Fuel Cell Electric Vehicle (I)

HU Hua¹, SONG Hui²

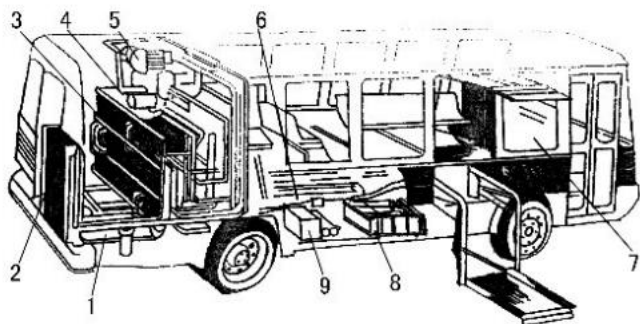
(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan University of Science and Technology)

Abstract: The FCEV is one of the major directions in the sustainable development of automotive industry. The author mainly introduces the fuel of FCEV, the proton exchange membrane fuel cell, the fuel cell engine, the structure and principle of FCEV; elaborates FCEV developed at home and new generation abroad.

Key words: fuel, fuel cell, fuel cell unit, fuel cell engine, fuel cell electric vehicle (FCEV)

1 概述

采用燃料电池作电源的电动汽车称为燃料电池电动汽车 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle), 最早的 FCEV 是燃料电池大客车 FCEB (Fuel Cell Electric Bus)。由图 1 可以看出, 早期的 FCEV 的燃料电池本身和它的附属设备的质量重, 体积大, 占据了大客车很大部分的装载空间, 几乎没有乘客乘坐的空间, 给 FCEV 的总布置带来很大的困难。近年来燃料电池不断地向小型化方向发展, 使得燃料电池成功地装置到各种类型的车辆上。



1. 甲醇储存罐 2. 散热器 3. 改质器 4. H₂、CO 分离器 5. 循环泵 6. 燃料电池组 (雄) 7. 控制系统 8. 蓄电池组 9. DC/DC 转换器

图 1 早期的 FCEV

修改稿收稿日期: 2006-10-08

作者简介: 胡 骅 (1931—), 男, 江西九江人, 副教授, 研究方向为汽车及电动汽车; 宋 慧 (1963—), 女, 河南商丘人, 副教授, 研究方向为工业电气自动化和电动汽车。

1.1 FCEV 的总布置形式

FCEV 是一种地面车辆, 仍然保留了车辆的行驶系统、悬挂系统、转向系统和制动系统等。

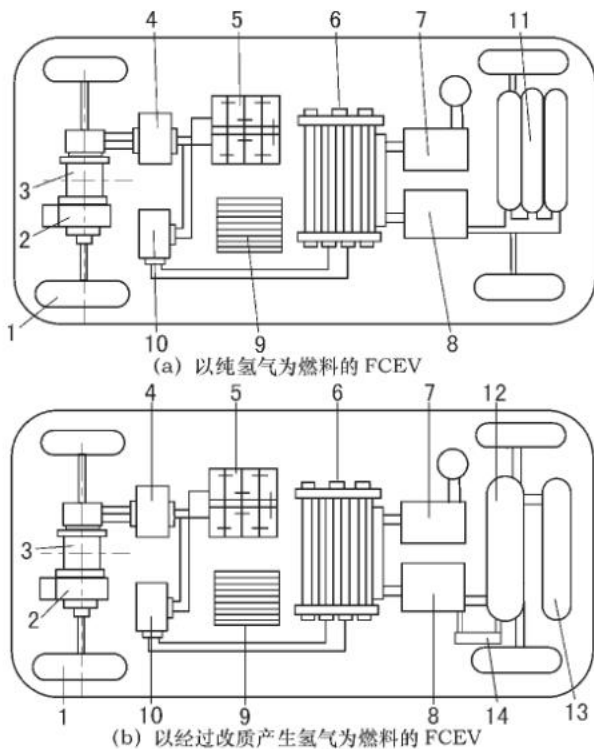
FCEV 是以电力驱动为惟一的驱动模式, 其电气化和自动化的程度大大高于内燃机汽车, 早期用内燃机汽车底盘改装的 FCEV, 在汽车底盘上布置了氢气储存罐或甲醇改质系统, 燃料电池发动机系统, 电气控制系统和电机驱动系统等总成和装置, 在进行总布置时受到一些局限。

新研发的 FCEV 采用了滑板式底盘, 将 FCEV 的氢气储存罐和供应系统、燃料电池发动机系统、电能转换系统、电机驱动系统、转向系统和制动系统等, 统统装在一个滑板式的底盘中, 在底盘上部可以布置不同用途的车身和个性化造型的车身。采用多种现代技术, 以计算机控制为核心和电子控制的“线传”系统 (Control-by-wire), CAN 总线系统等, 使新型燃料电池电动车辆进入一个全新的时代。

1.2 FCEV 类型

FCEV 按主要燃料种类可分为: ①以纯氢气为燃料的 FCEV; ②以甲醇改质后产生的氢气为燃料的 FCEV (图 2)。

如图 3 所示, FCEV 按“多电源”的配置不同, 可分为: ①纯燃料电池 FCEV; ②燃料电池与蓄电池混合电源的 FCEV; ③燃料电池与蓄电池和超级



1.驱动轮 2.驱动系统 3.驱动电动机 4.逆变器 5.辅助电源(蓄电池、超级电容器) 6.燃料电池发动机 7.空气压缩机和空气加湿装置 8.氢气管理系统 9.中央控制器 10. DC/DC转换器 11.氢气储存罐 12.燃烧器和改质器 13.甲醇储存罐 14. H₂净化器

图2 FCEV的基本类型

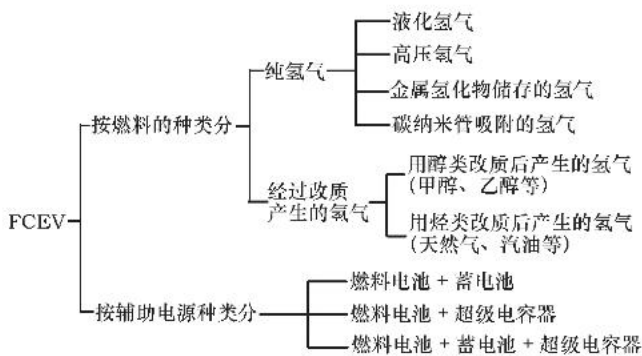


图3 FCEV采用的主要电源和辅助电源分类

电容器混合电源的FCEV。后2种多电源的配置方式是FCEV的主要配置方式。辅助电源用于提供启动电流和回收制动反馈的电能。

1.3 FCEV对燃料电池性能的基本要求

FCEV对燃料电池性能基本要求有以下几方面。

a 燃料电池组(堆)的比能量不低于150~200 Wh/kg 比功率不低于300~400 W/kg。要求达到或超过美国先进电池联合体(USABC)所提出的电池性能和使用寿命的指标。

b 可以在-20℃的条件下启动和工作,有可靠的安全性和密封性,不会发生燃料气体的结冰和燃料气体的泄漏。

c 各种结构件有足够的强度和可靠性,可以在负荷变化情况下正常运转。并能够耐受FCEV行驶时的振动和冲击。

d FCEV除排放达到零污染的要求外,动力性能要求基本达到或接近内燃机汽车的动力性能的水平,性能稳定可靠。

e 各种辅助技术装备的外形尺寸和辅助技术装备的质量应尽可能地减小,以符合FCEV的装车要求。

f 燃料充添方便、迅速,燃料电池能够方便地进行电极和催化剂的更换和修理。

g 所配置的辅助电源,应能满足提供启动电能和储存制动反馈电能的要求。

1.4 燃料电池性能与普通蓄电池性能的区别

a 燃料电池是将燃料的化学能转变为电能的装置。但燃料电池在产生电能时,参加反应的反应物质在经过反应后,不断地消耗且不再重复使用,因此,要求不断地输入反应物质。燃料电池的技术性能确定后,只要源源不绝地供给燃料,就可以源源不绝地产生电能,其放电特性是连续进行的,但是燃料电池是不可以充电的“电池”。

b 普通蓄电池是一种能量储存装置,不产生电能。蓄电池的活性物质随蓄电池的充电和放电反复进行可逆性化学变化,活性物质并不消耗,一般只需要适当地添加一些电解液等。普通蓄电池的技术性能确定后,必须先充电,将电能储存到电池中,才能在工作时输出电能,而且在电能消耗完后,必须在重复充电后才可能重复使用,其放电特性是循环进行的。

2 FCEV的燃料(Fuel)

氢气H₂是FCEV的惟一燃料,FCEV采用的氢气一种是来自地面固定的制氢系统,另一种是来自车载移动的制氢系统,当前主要采用地面固定的制氢系统生产的氢气作为FCEV的燃料。

2.1 地面固定的制氢系统

工厂化氢气的制备方法有:①用裂解法从天然气或石油气中制取氢;②用水煤气法从焦炭或白煤中制取氢;③用“改质法”从醇类或烃类中制取氢;④用电解法或太阳能从水中制取氢;⑤从含氢的工业尾气中提取氢;⑥生物制氢等。直接使用氢燃料可以使FCEV的辅助系统大大简化,效率提高。

燃料电池所使用的气态或液态氢是一种无气味的透明气体,泄漏到大气中后,一般不容易发觉,气态或液态氢的生产、储存、保管、充加、携带和运输的各个环节中可能存在氢气的泄漏。在试验中

表明，在一定的条件下，空气中氢气达到一定浓度时，其危险性超过了汽油。如果处理不慎，就会存在火灾和爆炸的隐患。商品化的氢气对各个环节安全性能的要求更加严格。氢气供应是一个严格的系统工程，在整个氢气供应系统中，都应该采取有效的安全防范措施和救援设施。在 FCEV 上采用的氢气有：①压缩氢气；②液化氢气；③储氢合金储存的氢气等。

2.1.1 压缩氢气

FCEV 采用的压缩氢气用纤维增强的高压密封容器储存，以保证氢气储存的安全性。我国用普通钢材制造的罐体氢气压力约为 15MPa 氢气的质量仅占储存容器总质量的 1%；在国外用特制高强度奥氏体钢材制造的罐体，氢气压力可达 25~35MPa 氢气的质量占总质量的 2%~6%。目前大多数 FCEV 采用了压缩氢气。压缩氢气的容器，要求强度高，结构复杂、体积大、质量重，安全性差，罐装时能耗大。轿车一般将压缩氢气储存罐 图 4 装在底盘后部，客车一般将压缩氢气储存罐装在车身的顶部。



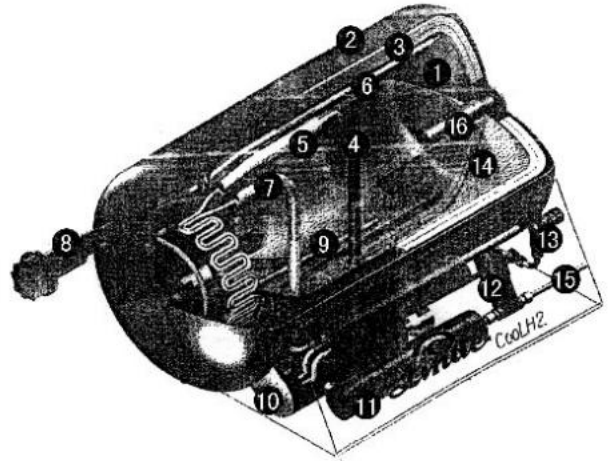
图 4 压缩氢气储存罐

不同压力的氢气对储存罐的容积有不同的要求。例如：排量为 3 L，质量为 1 500 kg 的 FCEV 行驶 560 km 需要 6.8 kg 的氢气。如果压缩氢气的压缩压力为 25MPa 则需要氢气罐的容积为 340 L，如果压缩氢气的压缩压力为 52MPa，则需要氢气罐的容积为 160 L，但同类型的内燃机汽车的汽油箱的容积仅仅 70 L。氢气的灌装需要复杂的灌装设备，灌装时间也很长，还需要消耗一定的能量。在同类型的内燃机汽车灌装一箱汽油时，不需要特殊设备，只需要几分钟。

2.1.2 液化氢气

液化氢气具有最高储存密度，但需要采用高压—超低温技术来保持氢气呈液态。液态氢气的温度保持在 -253°C 的低温时，可以在 1mL 的容积内储存 800 mL 氢气。液态氢储存在特制的用碳纤维增强、双层金属或塑料内衬、耐爆破压力达到

94.8MPa 的圆柱形的储氢罐中 图 5，在罐壁之间要抽成真空，以减少热传导，如果出现细微热量的热传导，也会使液态氢蒸发而造成能量损失。高压储氢罐的结构复杂，管理和维护比较困难。



- 1.内层 2.外层 3.超级绝缘材料 4.水平传感器 5.气体抽出管 6.液氢注入管 7.注入接头 8.液氢抽出管 9.电加热器 10.气体 液体换向阀 11.冷却水热交换器 12.减压阀 13.安全阀 14.液态氢 (-253°C) 15.气态氢 (20~80°C) 16.悬架

图 5 液化氢气的储存罐

2.1.3 储氢合金储存的氢气

氢吸附合金有： $FeTiH_2$ 、 MgH_2 、 $LaNi_5H_6$ 、 $NaBH_4$ 、活性炭、碳纳米管等材料。一般吸附合金可能的储藏氢的量为 1 000~1 100 mL。日本所开发的钛基吸附合金氢的储藏量达到 1 600 mL。在冷却状态和 10MPa 的压力下压入氢气，在使用时加热将氢释放出来。美国 ECD (Energy Conversion Devices) 公司所开发的镁基吸附合金，氢的储藏量可达到 3 500 mL。戴—克汽车公司采用世纪电池公司 Millennium Cell 开发的 $NaBH_4$ 氢吸附合金安全可靠，一次充氢后续驶里程达到 483 km。碳纳米管吸附材料有较大的吸附能力，还有待进一步开发。吸附合金的储氢装置如图 6 所示。

2.1.4 氢气燃料的特点

2.1.4.1 优点

氢气是燃料电池最理想的燃料，纯度高，在 FCEV 上可以直接使用，用氢气为燃料的燃料电池



图 6 吸附合金的储氢装置

系统设备较简单, 起动快、性能稳定, 对负荷变化的响应快, 排放为零污染, 相对成本较低。随着氢气储存装置的改进, 氢气储存装置在 FCEV 上的布置问题将进一步得到解决。

按轿车或客车车型的不同, 用高压气态氢气, 一般一次充氢的行驶里程 200~250 km。用液态氢一次充氢的行驶里程可达 400~500 km。用储氢合金一次充氢的行驶里程可达 400 km 左右。

2.1.4.2 缺点

工厂化地面固定的制氢系统是一个庞大、复杂的系统工程, 需要建立大规模的氢气制造厂、灌装厂、运输系统、储存系统和添加网络, 以及系统的安全防护体系等, 建立起来需要大量的投资和较长的时间。

2.2 车载移动的制氢系统

在 FCEV 研究和开发过程中, 车载移动的制氢系统是用醇类或烃类经过改质来取氢气。最常采用的是甲醇和汽油。

2.2.1 甲醇 CH_3OH

用天然气为原料生产的甲醇, 具有单一的成分和高纯度, 可以在较低的温度条件下改质为氢气, 使改质工艺和设备简化。甲醇的储存、保管、添加、携带和运输都比氢气方便, 采取有效的防腐措施, 提高各种管道阀门和泵的防腐能力后, 甲醇可以利用现成的汽油储运系统。

2.2.1.1 甲醇的性能

甲醇在室温和常压下为液态, 不会发生自燃、爆炸, 毒性比汽油小, 不会发生人身中毒现象。甲醇的生产、储存、保管、充加、携带和运输的各个环节不需要特别的储存和运载装置。

甲醇分子结构简单, 氢-碳比例最高, 没有难以分离的碳-碳原子共价键, 比其他醇类燃料更容易释放氢。不需要对燃料进行二次转化, 能够减少氮氧化物 (NO_x) 和碳氢化合物 (HC) 的排放。甲醇中不含硫, 不会引起燃料电池的催化剂中毒, 用甲醇为燃料的燃料电池车的燃油经济性比传统内燃机的燃油经济性高 2.1~2.5 倍。

2.2.1.2 用甲醇制氢的方法

甲醇经过改质操作后, 从碳氢化合物中分解出氢气。当前采用的改质技术有: ①蒸气改质技术; ②局部氧化改质技术; ③废气改质技术等。

2.2.1.3 甲醇燃料的优点

a 甲醇可以用天然气和有机物生产, 摆脱了对石油的依赖。甲醇不易燃烧, 不会发生燃烧与爆炸的危险, 安全性好。

b 甲醇的改质技术较成熟, 改质时操作温度较低 ($<300^\circ\text{C}$), 目前一些燃料专业公司已有商品化的甲醇改质装备系统出售, 适合装配各种不同的车型。

c 甲醇添加速度快, 不需要特殊的安全装置, 只要燃料箱有足够的容量, 就可以使 FCEV 的行驶里程大大地延长。

2.2.1.4 甲醇燃料的缺点

a 用甲醇制氢的制造装备复杂。在 FCEV 上用甲醇改质的氢气为燃料的系统中, 增加了甲醇的加热器和改质器, 在氢气中还混杂少量的 CO_2 、CO、HC 等有害气体, 特别是 CO 会对燃料电池的催化剂铂 P 产生毒害作用, 因此, 用甲醇产生的 H_2 还需要用净化器来除去 CO。整个改质系统装有较复杂的泵、阀和管道等附属装置, 体积大, 结构复杂, 对 FCEV 的总布置较困难。

b 在改质反应过程中有 300°C 的高温, 需要有热管理系统, 对其产生的热量进行管理。

2.2.2 汽油

汽油作为汽车的燃料已有 100 多年历史, 但作为内燃机汽车的燃料, 汽油热量转换的效率仅为 12%~15%。如果将汽油改质为氢气供燃料电池作为燃料, 汽油热量转换的效率可以达到 34% 左右。汽油采用和甲醇相似的改质装置与设备, 将汽油经过改质处理可以获得氢气。用汽油改质为氢气作为燃料电池的燃料的特点如下。

2.2.2.1 优点

a 汽油已经有完善的生产、储存、保管、运输系统, 添加十分方便, 不需要重复进行投资。

b 汽油的质量比能量高, 比甲醇改质转换为氢气所需要的辅助设备更紧凑和更轻巧。

2.2.2.2 缺点

a 汽油是石化燃料, 仍然需要依赖石油能源。

b 汽油经过改质转换为氢气作为燃料电池的燃料时, 在改质器中转换为氢气时的反应温度高达 900°C , 对热能的控制和热量的利用都比较复杂, 对系统材料的高温性能提出更高的要求, 冷却系统也更复杂。

2.3 其他种类的燃料

除常用的氢和甲醇等燃料外, 美国宾西法尼亚大学经过研究和试验, 证明甲烷、乙烷、甲苯、丁烯、丁烷、液化气和煤油等碳氢化合物都可以经过改质来转换 H_2 作为燃料电池的燃料, 但工艺有所不同。

2.4 改质技术和改质 (重整) 器

甲醇改质为氢气时, 改质技术和改质器是必须的关键技术和关键设备, 由于采用的改质技术和改质器的不同, 改质工艺过程也有所不同, 且在改质时的化学反应过程也各不相同。

2.4.1 改质器的工作原理

2.4.1.1 甲醇在蒸气改质器中的化学反应

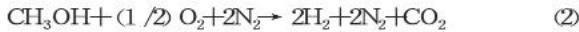
甲醇在蒸气改质器中的分解反应在 621°C 的高温下进行, 转化反应在 200°C 左右的温度下进行。

甲醇在蒸气改质法中的分解和转化反应为



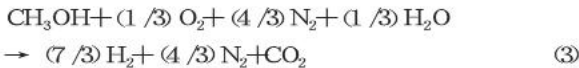
2.4.1.2 甲醇在部分氧化改质法中的化学反应

甲醇在部分氧化改质法中进行分解和转化反应时，温度为 982℃ 的高温。



2.4.1.3 甲醇在自生热法改质时的化学反应

甲醇在自生热法改质时的转化中，燃烧反应过程中的反应温度为 980℃，在转化反应过程中的反应温度为 250℃ 左右。



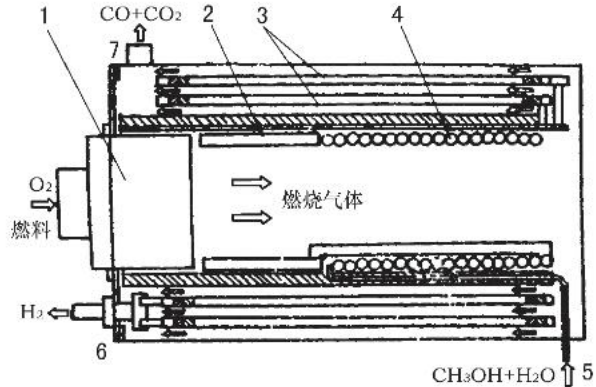
当前在 FCEV 上，甲醇主要采用了蒸气改质法来产生氢气。在应用蒸气改质法对甲醇进行改质时，将甲醇和纯水的混合物，一起进入蒸发器中，蒸发成甲醇和纯水蒸气的混合气，然后进入改质器中，经转化反应后成为 H₂、CO₂ 和少量的 CO，在 H₂ 净化器中将 H₂ 与 CO 分离，使 CO 的含量降低到 FCEV 所允许的范围。

2.4.2 改质器的结构

改质器有多种结构形式，图 7 为蒸气改质法的改质器。在改质器的中部为蒸发器，由燃烧器、加

热器和蒸发器 3 部分组成，甲醇气体与水混合后，在加热器中加热为甲醇和纯水的混合物，并在蒸发器中汽化为甲醇和水蒸气的混合气，然后进入改质器的外腔，高温的甲醇和水蒸气的混合气在催化剂的催化作用下，转化为 H₂ 和 CO₂，H₂ 经过净化器（CO 处理器）净化后输送到燃料电池中，CO₂ 作为废气排出。

不同燃料在 FCEV 上的总的能量转换效率见表 1。



1. 燃烧器 2. 加热器 3. 蒸发器 4. 甲醇和纯水的混合物进口
5. CH₃OH+H₂O 的入口 6. H₂ 的出口 7. CO、CO₂ 的出口

图 7 蒸气改质器

表 1 不同燃料在 FCEV 上的总的能量转换效率

燃料	状态及条件	理论比能量和能量密度		能量转换的 燃料电池类型	从燃料传到车轮计算 比能量和能量密度		从燃料到车轮 总的能量转换 效率%
		Wh/kg	Wh/L		Wh/kg	Wh/L	
氢气	气态 17MPa	360	345	PEMFC	145	151	42
	气态 17MPa	760	430	PEMFC	319	176	41
	液态 -253℃	2380	700	PEMFC	1000	294	42
	储氢合金	660	1230	PEMFC	277	517	42
甲醇	液态、常温	6200	4950	PEMFC	2380	1870	38
汽油	液态、常温	1334	1230	PEMFC	4530	2970	34
汽油	液态、常温	1334	1230	内燃机卡诺循环	1467	961	11

(待续，本文分 4 期连载) 责任编辑 文 珍)

车师傅汽车技术工作室

A 60 汽车编程器：是本部最新开发的一款汽车数码维修仪器。以实用功能为主，支持汽车上各种常见器件，性能更稳定，功能更强大，数据读写、修改快速准确，是专为汽车电器维修人员量身定做的专用设备。主要功能：液晶里程表调校、汽车音响解码、车身防盗解码、挖掘机时间表调校、发动机电脑维修、安全气囊修复、有免拆调表功能、带里程计算器，解除手工换算烦恼。配套数据库光盘包含各种车型音响、仪表、防盗原始数据、仪表拆装、调校图片。配自锁型贴片适配器。全套配置 880 元（自备家用电脑）。送培训教材光盘《汽车数码维修全集》内容包括：汽车数码基础知识，液晶里程表调校技术，音响、防盗解码技术等，单独购买 100 元。

高级版汽车编程器，可调高档 CPU 仪表，全自动调校里程数，万能脚驱动，芯片型号自动识别，网上数据自动升级，标准配置 380 元。

新版 5051 大众 奥迪故障诊断仪：配大众 奥迪诊断适配器，与家用电脑连接，功能与原厂诊断仪相同。赠送全套大众 奥迪原厂维修资料，特价：150 元。

本部经销各种汽车原厂维修手册、原厂培训资料和 VCD 光盘几百种。详情请到公司网站查询或来电咨询。

地址：哈尔滨市南岗区宣化街 477 号 奔马汽配城 C 区 15 号 网址：www.hao-ok.com 汽车图书资料网

邮编：150001 电话：0451-82565051 88898709 传真：83183858 手机：13895791951 联系人：韩惠军