

DOI: 10.3901/JME.2009.02.018

串联式混合动力系统在公交客车中的开发与应用*

王 成¹ 郭淑英² 刘 凌²

(1. 中国汽车技术研究中心 天津 300162;
2. 湖南南车时代电动汽车有限公司 株洲 412001)

摘要: 介绍了国内外串联式混合动力公交客车应用现状以及串联式混合动力系统的结构特点、工作模式和主要优点,目的是对公交工况下串联式混合动力系统的应用特点进行分析,得出今后适合我国城市公交系统发展使用的技术方案之一。在中国典型城市工况下,通过采用仿真计算与车辆实际运行数据相结合的方法,对串联式混合动力系统在公交工况下的系统效率、制动能量回馈、怠速停机、辅助系统电动化等方面进行系统分析和对比。通过对比,试验结果验证了串联式混合动力公交车的节油与环保的特点,说明串联式混合动力技术是混合动力电动汽车的发展方向之一,特别是该系统是比较适用于城市公交客车的动力系统。

关键词: 串联式混合动力 环保 动力系统

中图分类号: U469

Development and Application of Serial Hybrid Electric Powertrain System in the Bus

WANG Cheng¹ GUO Shuying² LIU Ling²

(1. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162;
2. Hunan CSR Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412001)

Abstract: The application of series hybrid buses at home and abroad, its mechanism, operating mode and advantages are introduced. It aims to sort out one technique scheme suitable for Chinese public transport system development, through analyzing features of the application of series hybrid system to buses under public transport working condition. Both simulation calculation and the actual operating statistics are adopted for the analysis and comparison of efficiency, braking energy feedback, idling and others. The result proves that series hybrid buses are fuel-saving and eco-friendly. Series hybrid technique is one of the solutions for hybrid electric vehicles. Series hybrid system is applicable for city buses.

Key words: Serial hybrid Environmental protection Power system

0 前言

当今世界,汽车保有量已经超过 8 亿辆,预计到 2020 年全球汽车保有量将达到 12 亿辆。近年来,随着我国经济的高速发展,汽车保有量也在逐年快速上升,致使能源消耗迅速增加,石油供需矛盾日益突出,大量汽车尾气的产生,导致环境质量不断恶化,交通能源消耗和温室气体排放成为社会普遍关注的焦点。因此,发展节能环保的电动汽车已纳

入我国“十一五”重点节能工程之中,是我国汽车产业发展的一次重大机遇与挑战^[1]。

由于动力蓄电池和燃料电池发动机技术成熟度和成本等因素的限制,纯电动汽车和燃料电池汽车等清洁能源汽车的产业化进程较为缓慢。而混合动力汽车是一种介于普通汽车和纯电动车辆之间的过渡型车辆,兼有两者的一些优点,如超低排放、高效率 and 续航里程长等特点,同时,其技术相对较为成熟,并在各国优惠政策的鼓励下,逐步进入商业化推广应用阶段。因此,混合动力车是近期发展清洁能源车辆比较可行的主要技术路线之一。考虑到技术成熟度及市场接受能力两大因素,我国发展

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA11A111)资助项目。
20080330 收到初稿, 20081008 收到修改稿

混合动力汽车, 应优先发展城市公交客车, 再逐步推广到轿车领域。这一发展思路已经在国家《“十一五”十大重点节能工程实施意见》中得到明确。

混合动力汽车根据动力系统构成的不同, 主要分为串联式混合动力、并联式混合动力、混联式混合动力三类。不同类型的混合动力系统各有其优缺点, 其方案的选择取决于多种因素, 例如应用环境、驾驶工况、成本考虑等。串联式混合动力公交客车具有节能、环保、能源多样化、通用性强等突出特点, 已在国内外公交客车领域逐步得到推广应用。

1 串联式混合动力公交客车的特点

行驶在城市内部的公交客车, 一般具有以下特点。

(1) 车辆平均运行速度低, 启停频繁, 起步加速快, 制动及停车时间长。如图 1 所示为中国典型城市公交工况。

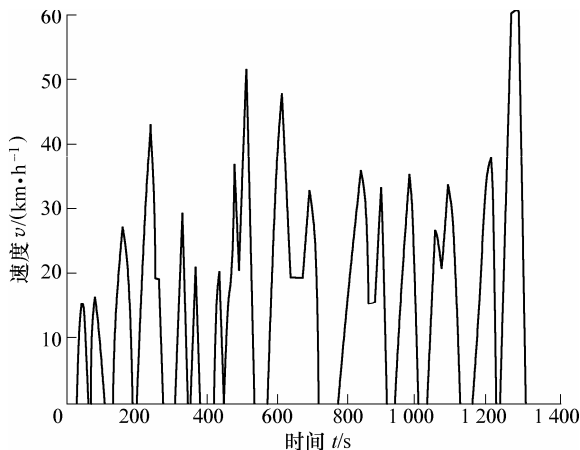


图 1 中国典型城市公交工况

(2) 在不同时段车辆载荷变化大。

(3) 运行时间长(每天运行时间一般在 8 h 以上), 对可靠性要求高。

(4) 由于城市内部道路条件复杂, 导致司机劳动强度大, 公交客车的操作性要求简单、方便, 以减少司机操作失误, 避免人为事故发生。

(5) 公交客车集中管理, 统一采购, 要求客车部件系统通用化、系列化、平台化, 便于维护及改造。

1.1 串联式混合动力系统结构

串联式混合动力系统结构如图 2 所示。

(1) 发动机与发电机构成辅助动力单元(Auxiliary power unit, APU)系统, 发动机驱动发电机发出三相交流电, 经过整流器转换为直流电, 同时与动力电池组并联, 形成串联式动力系统两个能量

源, 为整车提供电能来源。

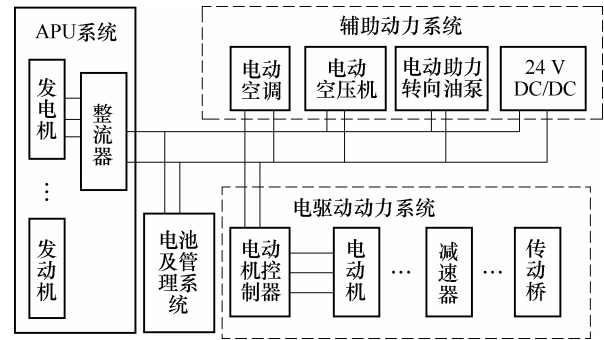


图 2 串联式混合动力系统结构框图

(2) 电动机控制器将直流电逆变为三相交流电向电动机供电, 并实现对电动机的控制, 通过电动机输出转矩, 驱动车轮, 其中电动机、电动机控制器及减速箱构成电驱动系统, 形成串联式动力系统唯一动力源。

(3) 辅助系统则包含了电动空调、电动液压力转向、电动空压机等系统, 实现传统车辆辅助系统电动化。在发动机停机条件下, 车辆能以纯电动方式运行。

(4) 整车控制总成单元通过对司机行为智能解释, 由通信网络协调控制各种能量源及动力单元, 从而实现车辆能量的分配及车辆总体控制。

1.2 串联式混合动力系统工作特点

串联式动力系统主要包含两个能量源及一个动力源。在能量源方面, 发动机与发电机构成车载发电机组即 APU 系统, 为系统提供电能; 动力电池作为另一个能量源, 既可提供电能又可储存电能。而电动机作为唯一的动力源驱动车辆。

串联式混合动力系统的工作特点如下。

(1) 电动机的输出功率根据工况动态变化。

(2) 当 APU 输出功率小于电动机需求功率时, 电池系统提供部分功率。

(3) 当 APU 输出功率大于电动机需求功率时, 电池系统将多余部分功率变为化学能储存。

(4) 车辆制动时, 电动机作为发电机运行, 电池将制动能量转换为化学能储存, 也称之为再生制动。

1.3 串联式混合动力系统工作模式

串联式混合动力系统有三种基本的工作模式。

(1) “恒温器式”工作模式: 主要利用电池能量来驱动车辆, 仅当电池荷电状态(State of charge, SOC)降低到最小限值时, 内燃机才启动, 并使内燃机在最高效率区以输出恒定功率的方式工作, 当 SOC 回升到最大限值时内燃机停机。这种策略的主要缺点是内燃机的启动和停机会贯穿于车辆运行的

整个过程, 由于内燃机每次停机期间, 内燃机的温度降低, 会导致效率降低。

(2) “负荷跟随”工作模式: 保持电池的 SOC 在规定范围内, 内燃机带动发电机工作并尽可能地提供接近车辆行驶所需的电能, 电池只起到调节装置的作用。这种模式电池的充放电量较小, 电池充放电能量损失最小。这种模式的缺点是内燃机难以工作在最佳转速和负荷下, 因此其排放会变差, 效率会降低。

(3) “动态模式变换”工作模式: 上述两种模式或控制策略的一个折中方案是电池 SOC 较高时, 主要用纯电动模式, 而当 SOC 降低到设定范围内时, 内燃机带动发电机工作。考虑到内燃机的排放和效率, 将其输出功率严格控制在一定的变化范围内^[2]。

1.4 串联式混合动力系统主要优点

由于串联式动力系统结构所具有的工作特点, 为车辆运行带来以下优点。

(1) 不需要换挡机构和变速装置, 就可以实现无级变速, 像传统的带自动变速箱的汽车一样, 操作简便。

(2) 发动机不直接驱动车轮, 因此发动机的转速范围较窄, 可以始终在最佳工作区域内稳定运行, 即低油耗区和低排放区, 达到节能与环保的效果。

(3) 因为电动机功率、电池容量较其他类型的混合动力系统大, 制动能量可回收再利用的潜力大, 从而提高能量效率。

(4) 发动机可实现启停控制, 车辆可实现纯电动运行, 拓展了车辆应用范围。

(5) 串联式混合动力系统极易实现城市公交客车混合动力系统的平台化、通用化、系列化。发电机组+驱动电动机+储能装置构成了串联式混合动力系统的基本技术平台。通过更换不同的 APU 系统即能适应从汽、柴油内燃机到氢能燃料电池等各种不同的能源的动力转化装置, 形成油—电、气—电、电—电各种不同类型的混合动力形式。

(6) 更适合于城市内低速运行工况, 符合城市公交车运行特点。

(7) 串联式混合动力系统还具有运行平稳、噪声低等特点。

(8) 更易于实现车辆的地面充电而更加节能^[3]。

1.5 串联式混合动力系统节油性分析

1.5.1 系统效率分析

从中国城市典型公交工况图中可以看出公交工况具有以下特点: ① 怠速时间长。② 频繁起动—加速—制动—停车。③ 重载, 最高车速低, 平均速度低。

车辆大部分时间处于低功率运行, 对于一台 12 m 公交车来说, 功率小于 10 kW 的时间超过 50%, 平均需求功率也都在 20 kW 以下, 而这些工况则不是柴油机的经济运行区间。

在实际公交运行过程中, 传统车发动机的工作效率是比较低的。应用 ADVISOR 软件对公交工况进行仿真, 得到某一 12 m 车辆用发动机在中国典型城市工况下运行的工作点如图 3 所示(图 3 内数字为工作效率)。

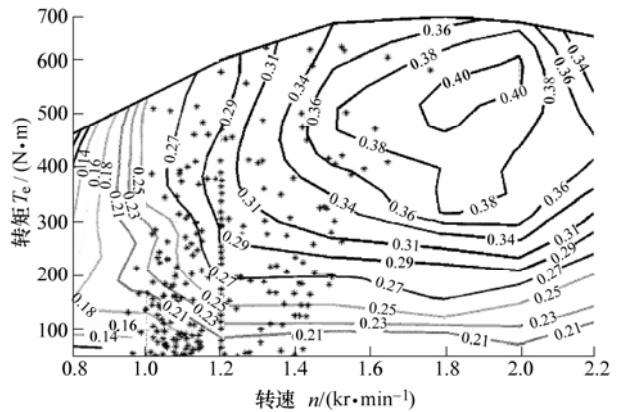


图 3 传统车发动机油耗特性图

* —— 车辆运行过程中发动机工作点

从图 3 中可以看出, 发动机的实际工作效率比较低, 发动机平均工作效率为 18.8%。根据多种车辆用发动机的统计结果, 公交工况下, 发动机的平均工作效率为 15%~20%。

当采用串联式混合动力方案时, 一方面可以采用较小排量的发动机; 另一方面, 发动机可以始终工作在高效区。在中国典型城市工况下, 采用 12 m 串联式混合动力车模型, 进行仿真, 得到串联式系统中发动机的工作点如图 4 所示。

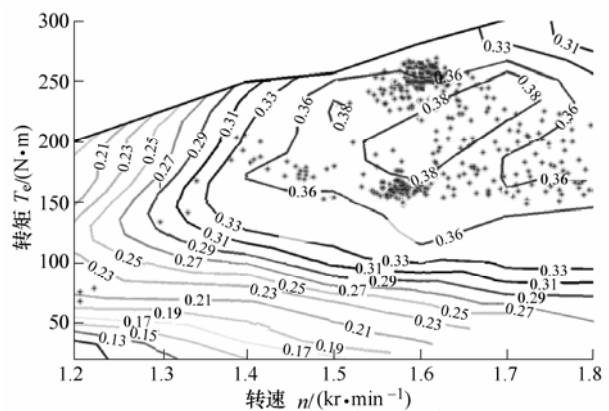


图 4 串联式混合动力发动机油耗特性图

* —— 车辆运行过程中发动机工作点

从图 4 中可以看出, 发动机的工作区域比较集中, 该工况下平均工作效率为 34.2%。根据工况不

同，发动机平均工作效率在30%~36%。

从图5中的对比可以看出，虽然串联式混合动力系统增加了能量转换环节，但由于发动机工作效率的明显提高，使得总驱动效率高于传统车的驱动效率。

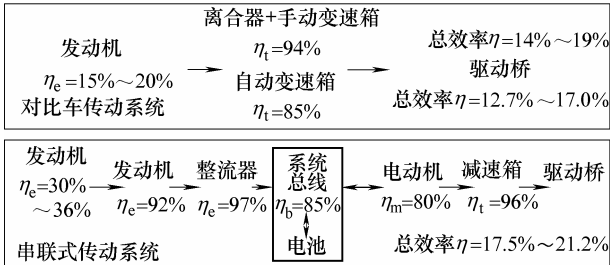


图5 传统车与串联式混合动力效率对比图

η_e——发电机效率 η_t——变速器效率
η_m——电动机效率 η_b——电池效率

1.5.2 制动能量回馈分析

对于行驶在城市工况的混合动力城市客车来说，车辆制动过程中通过电动机再生制动能量回馈是提高整车燃油经济性的一个重要途径。

此再生制动能量一方面直接给整车辅助系统(如电动空调、电动空压机、DC/DC电源等)供电，另一方面，可以通过电能转化为化学能，存储到动力电池组中(图6)。

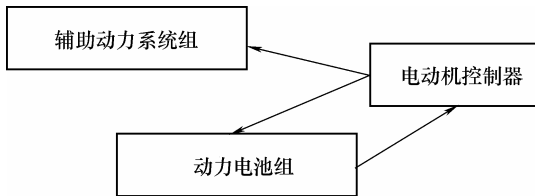


图6 制动能量回馈示意图

以一辆12 m串联式混合动力公交客车(总重量按14 000 kg计算，采用75 A·h的铅酸电池)运行在中国典型城市工况下进行仿真分析，可知在中国典型城市工况中，制动时间占总运行时间22.4%，总制动能量占总牵引能量的53.9%，经回收可用于牵引的再生制动能量占牵引总能量10%~18%(不同的控制策略及电驱动部件选型导致结果不一样，但大致分布在此区间)^[4]。

采用株洲所JD147交流电动机(峰值功率150 kW，额定功率100 kW)，按照中国典型城市工况进行仿真，无能量回馈策略40.05 L/100 km，有能量回馈策略34.24 L/100 km。从中可以看出，采用制动能量回馈使整车燃油经济性提高14.5%。

1.5.3 怠速停机分析

由于串联式混合动力车辆可采用电辅助系统，实现纯电动工况运行，则发动机可以怠速停机，进

一步节省油耗。在实际公交工况下，传统车发动机的怠速时间一般占工况运行总时间的50%左右，如全部实现怠速停机，可以对油耗指标进行明显改善。

以中国典型城市工况为例，进行怠速停机仿真分析。相应参数如下：SOC初始值为0.4，发动机怠速转矩设为30 N·m，怠速转速为800 r/min，怠速燃油消耗率为380 g/(kW·h)。发动机怠速与停机两种情况下百公里油耗分别为28.65 L和27.17 L。仿真分析结果显示发动机怠速停机可提高整车燃油经济性5.2%。

1.5.4 辅助系统电动化

在传统的传动系统中，辅助设备都是由发动机驱动，在发动机怠速时一般辅助设备不能停止工作，导致发动机进入低速小负荷状态。当发动机工作在低速小负荷时，发动机的效率很低，其油耗率会大大上升，排放也相应增加。在公交工况下，发动机30%~40%工作时间处于怠速，由上分析可知，此时发动机实际为低速小负荷状态，对车辆油耗及排放是不利的。

在串联式混合动力系统中，辅助设备可完全电动化，全部由电能驱动，此电能一方面来自驱动电动机再生制动电能，大约占辅助系统消耗电能的20%~30%，另一方面来自APU系统发出的电能，而这部分电能是由控制系统控制发动机工作在高效区时产生，尽管存在着蓄电池的充放电效率、APU系统效率等问题，但是总体效率依然高于传统的动力系统，此效率分析如下。

(1) 假设传统车在怠速时，需要带动10 kW的辅助设备，此时比油耗为330 g/(kW·h)，则得出的油耗为330×10=3 300 g/h。

(2) 串联式混合动力系统中，带动10 kW的辅助设备，发电机供给蓄电池能量时的效率为90%，系统总线效率为85%，比油耗为220 g/(kW·h)，则需要的油耗为220/0.85/0.9×10=2 876 g/h。

可见，在发动机怠速条件下，不考虑再生制动能量，辅助系统电动化可实现节油。

应用同一模型进行仿真，考虑再生制动能量，对辅助系统进行电动化改造的整车节油效果可以达到10%以上。

1.5.5 串联式混合动力系统的节油率分析

串联式系统在城市公交道路情况下，总效率提高，可节油10%~15%。辅助动力系统电动化改造，可节油10%~12%。实现怠速停机可节油5%~8%。电制动能量回收可节油10%~15%。

因此，理论上串联式系统可比传统系统节油40%以上。

1.6 串联式混合动力系统环保性分析

串联式混合动力系统的整车排放优于安装同样型号发动机的传统车辆,如图7、8所示,主要分析如下。

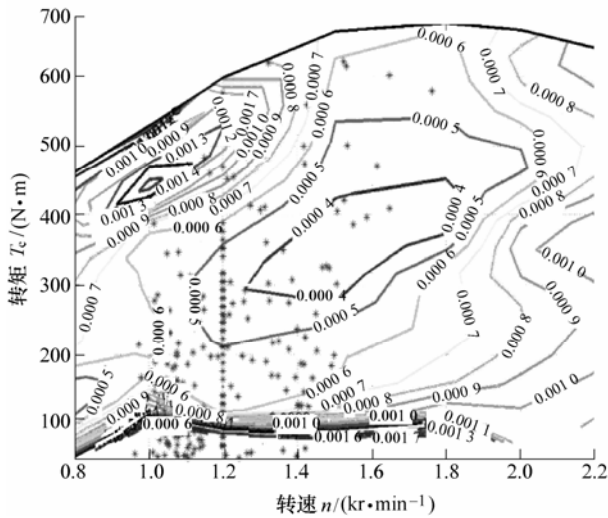


图7 传统车发动机PM分布图

* —— 车辆运行过程中发动机工作点

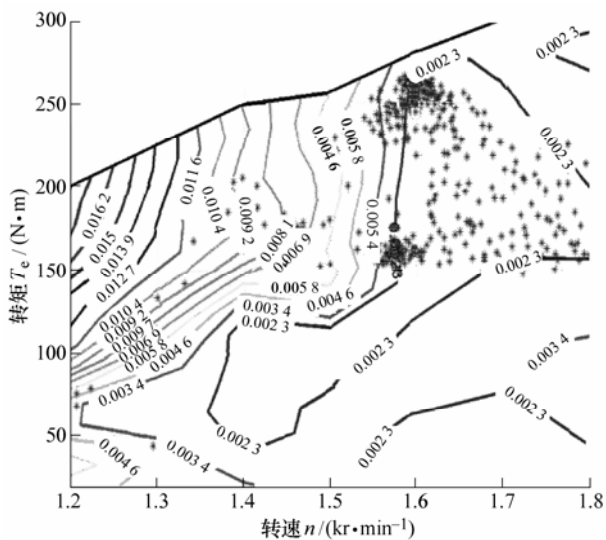


图8 串联式混合动力发动机PM分布图

* —— 车辆运行过程中发动机工作点

(1) 串联式混合动力采用较小排量的发动机。整车控制策略可将发动机工作区间优化在中高效率区,这样可大大降低发动机的颗粒物(Particle matter, PM)的排放。

(2) 发动机可怠速停机。当整车电池SOC较高时,整车完全由电池提供能源,发动机可怠速停机,此时发动机为零排放。

(3) 发动机工作在合理工作范围内。原因为:

① 发动机既不参与整车驱动也不直接带动整车辅助系统(空调、压缩机、转向泵等),避免了排放较差工况,如低速小负荷及高速小负荷。② 在串联式混合动力中,发动机的工况变化变化平稳,发动机不参与整车的驱动,避免出现当车辆急加速、急减

速时,发动机工作恶劣,因此降低了发动机工况突变下产生的污染物排放。

综上所述,串联式混合动力整车排放性能将明显优于传统车辆。图9显示了12 m传统公交车和串联式混合动力车在城市道路循环工况(Urban dynamometer driving schedule, UDSS)下 NO_x 的排放对比情况。其循环时间为1367 s;行驶路程为11.99 km。图10为UDSS工况下PM排放比较图。

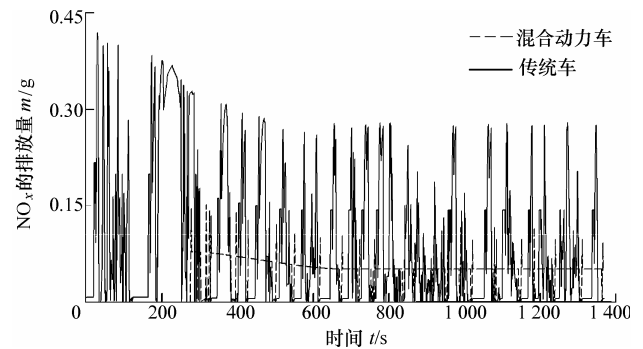


图9 UDSS工况下 NO_x 排放比较图

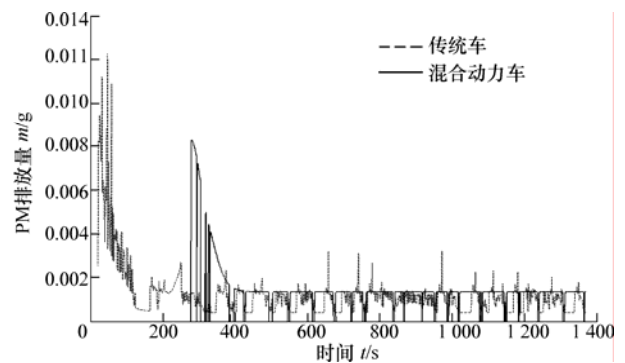


图10 UDSS工况下PM排放比较图

相对于传统车,串联式混合动力车PM值为0.350 g,传统车为0.675 g,降低了48%; NO_x 值为41.25 g,相对传统车的106.25 g,降低了60%。

1.7 串联式混合动力系统成本分析

与传统内燃机汽车相比,串联式混合动力系统虽然采用了较小的发动机,取消了自动变速箱,但由于增加了发电机、电动机、控制器、辅助电动系统,采用电动空调等,所以与同类型的传统公交车相比,目前的成本要高出30%以上(视车辆的绝对价格不同而变化)。

但是,随着社会对环保要求的提高,乘客对公交车辆舒适性要求的增加,燃油税的实施,国家对环保车辆优惠政策的实行,以及串联式混合动力公交客车的批量化使用,将会逐步缩小两者之间的差距,使得用户在车辆使用寿命周期内,通过燃油费用的节省,收回初次购车所增加的成本。另外串联式混合动力系统优越的环保性能,所带来的社会价值也是不可忽视的。

2 国内外串联式混合动力电动汽车的应用状况

1998年,清华大学与厦门金龙公司合作研制了国内第一辆串联式混合动力客车。

“十五”期间,湖南南车时代电动汽车有限公司(简称南车时代电动)、武汉理工大学及中国航天设计院等单位,相继推出了串联式动力系统产品样车。“十一五”期间,开展串联式客车动力系统研究的单位逐渐增多,如东风电动、天津清源等。

随着科技部“十五”期间电动汽车重大科技专项和“十一五”期间节能与新能源汽车重大项目的开展,国内已经推出了一批串联混合动力客车,标志着国内在串联式混合动力客车研究方面已经步入一个新的阶段。

美国能源部可再生能源实验室调查的美欧日近50个10 m以上混合动力客车项目中有37个采用串联式混合动力结构。美国能源部对美国纽约柴油串联式混合动力公交车试验运行评估报告指出,混合动力客车比传统柴油公交客车节油30%以上,排放明显下降。

美国开发中型及重型混合动力车主要统计数据(截至2006年)表明,美国目前混合动力中型及重型混合动力车辆共有2426辆,其中,串联约1498辆,占总数的62%,开发串联系统的主要公司为BAE Systems公司(Hybridrive™系统)公司及ISE Research公司,主要应用于美国纽约等城市公交车辆^[5]。

在美国纽约,从1998年始,截至2007年,已经有500多辆串联式混合动力公交客车在运营,并计划到2008年,达到近1000多辆规模使用。美国纽约的应用表明,串联式混合动力公交客车的可靠性能已超过传统车辆,无故障间隔运行里程达到8000 km,达到比传统车辆节油35%指标,排放比传统车辆下降超过60%,同时,延长了近2倍的刹车片寿命。纽约公交系统通过成功应用串联式混合动力公交客车,不但赢得了市民及政府认可,树立了串联式混合动力电动汽车良好形象,而且,正逐步放弃拟采用的压缩天然气(Compressed natural gas, CNG)车辆更新计划,避免大量CNG气站建设所需资金的浪费,因为,按其城市净化计划,本希望通过应用CNG车辆达到目标,但是,通过低耗油、低排放的串联式混合动力公交车辆的使用与比较,发现应用串联式混合动力公交客车更节省、更容易实现环保目标^[6]。

3 南车时代电动公司串联式混合动力电动汽车的开发及应用状况

3.1 动力系统的基本构成

南车时代电动研制的串联式混合动力客车动力系统结构主要分为四个平台。

(1) 电驱动系统平台:由电池及管理系统、电动机及控制器、减速器等构成,主要用于车辆驱动。

(2) APU系统平台:由发动机、发电机及其控制器组成。

(3) 整车控制总成平台:包含整车控制器、高低压配电、整流、网络控制等构成,用于整车电能分配、算法控制。

(4) 电动辅助系统平台:由电动空压机、电动空调、电驱动油泵、低压电源及其控制器组成,提供整车制动气源、转向动力、空调等。

串联式系统通过四个平台建设,能实现系统集成,简化结构,方便今后的升级改造及维护。

3.2 研发概况

株洲所将自己在轨道交通领域长期积累的核心技术拓展至电动汽车领域,承担了多项十五、十一五“863”电动汽车重大科技专项课题,主要有纯电动大客车、燃料电池城市客车用电动机及其控制系统、燃料电池城市客车多能源动力总成控制系统、串联式混合动力客车动力系统平台技术研究开发、DC-DC变换器、电池管理系统、株洲市工况下电动汽车运行考核试验研究、湖南省电动汽车运行考核试验研究等。

2003年,研制出第一台纯电动样车。

2004年,开发了第二代纯电动车,研制出第一代混合动力公交车样车。

2005年,开发了第二代串联式混合动力公交车样车,开通了株洲电动汽车示范线。3台纯电动公交车和4台混合动力公交车已在株洲市公交线电2路投入商业示范运行。迄今已安全运行50多万公里。

2006年,开发了第三代串联式混合动力系统,并与安凯客车、中通客车合作,推出整车,相继通过国家试验,登录国家光盘目录。

2007年,开发了第四代串联式混合动力系统,用于北京环保局的混合动力车的示范运行。

2008年,为株洲市公交公司小批量提供12 m串联式混合动力公交车。

3.3 应用情况

从2003年开始至今,南车时代电动共推出了五代串联式混合动力客车动力系统产品。经过试运营考核和不断的改进,产品性能得到很大提高,

主要可靠性及节油实现指标如下表所示。

表 株洲所串联式混合动力客车动力系统主要指标表

动力系统	平均无故障间隔里程 /km	节油率 $\eta/\%$	应用环境
第一轮	500	-2	株洲电 2 路公交线
第二轮	1 000	5	株洲电 2 路公交线
第三轮	3 000	10~18	聊城环城公交线及上海 92B 公交线
第四轮	4 000	15~25	株洲电 2 路公交线
第五轮	5 000~6 000	20~25	株洲市 T2 路公交线

注：节油率为典型城市公交工况下的试验数据。

3.4 主要技术特点

3.4.1 全局智能优化整车控制算法

司机行为均衡解释、工况动态协调控制技术、模糊控制的功率分配算法、电动机和发动机的智能预测和协调控制、APU 系统匹配及控制技术、智能故障分类检测处理技术等。

3.4.2 电磁兼容及安全保障技术

整车电气系统采用先进的抗电磁干扰技术及高压安全保护方案。

3.4.3 故障分析与监测技术

各关键部件可以对自身故障进行自检，并通过 CAN 总线向整车控制总成柜发送故障代码和相关运行数据，总成柜将收到的故障信息进行综合分析，生成系统故障代码，并向仪表和手持设备发送故障信息及关键系统运行数据，同时可以记录历史故障信息。

3.4.4 动力系统集成设计和制造

对系统产品集成设计和专业化制造，为整车提供了全套动力系统解决方案。

3.4.5 成熟可靠的电驱动系统技术

采用异步驱动电动机，电动机采用适合逆变器供电的耐电晕绝缘技术，可靠性高，恒功范围大。电动机控制器则采用矢量控制算法，运用区间优化技术提高电动机的效率，电动机控制器具有智能故障监测及保护技术，具有短路、欠压、过压、过流、超温等保护功能，同时通过 CAN 总线发出故障代码，以便监控。

3.4.6 整车热管理技术

对于发动机及电池系统，采用专门的热设计及管理策略，以减少系统热损失，提高系统总体效率。

4 结论

串联式和并联式混合动力技术一样，都是混合动力电动汽车的发展方向之一，但是，针对城市公

交车辆的运行特点，结合串联式动力系统所具备的上述优点，即环保性能、节油性，操作简便等，可知串联式混合动力系统是一种比较适合于城市公交特别是繁忙城市公交车辆的动力系统。

但是，串联式混合动力电动汽车成功应用于我国城市公交，还需要企业持之以恒的努力，以更成熟的技术，不断提高的产品性能，得到用户的充分认可。同时更需要社会和政府对于环保公交车的大力推动，以形成批量生产，进一步降低成本，反过来促进其性价比的提高，形成良性循环。

参 考 文 献

- [1] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车与新能源汽车发展战略与对策[J]. 汽车工程, 2006, 28(4): 317-318.
OUYANG Minggao. Development strategy and counter-measures of the energy saving and the vehicle with new energy in our country [J]. Automobile Engineering, 2006, 28(4): 317-318.
- [2] 刘明辉, 赵子亮, 李骏. 混合动力汽车节油机理研究[J]. 汽车技术, 2005(5): 11-13.
LIU Minghui, ZHAO Ziliang, LI Jun. A study on fuel-saving mechanism for hybrid electric vehicles [J]. Automobile Technology, 2005(5): 11-13.
- [3] 陈全世, 朱家琏, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
CHEN Quanshi, ZHU Jialian, TIAN Guangyu. The technology of the advanced electric vehicle [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [4] 李雪峰. 串联式混合动力客车制动能量回收的研究[J]. 变流技术与电力牵引, 2007(3): 45-48.
LI Xuefeng. Series hybrid bus brake energy recovery study [J]. Converter Technology and Electric Traction, 2007 (3): 45-48.
- [5] Hybrid diesel-electric buses from New York city transmit [EB/OL]. [2007-08-28]. http://www.ott.doe.gov/out/field_ops/pdfs/nycy_final_results.pdf.
- [6] Heavy-duty hybrid vehicle projects [EB/OL]. [2007-07-13]. <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/overview.html>.

作者简介：王成，男，1975 年出生。主要研究方向为节能与新能源汽车整车技术。

E-mail: wang_ch@126.com

郭淑英，女，1957 年出生，教授级高级工程师。主要研究方向为电动汽车相关理论、设计、试验、制造，以及电动机驱动及其控制系统技术。

刘凌，男，1974 年出生，高级工程师。主要研究方向为各型机车和电动汽车网络控制系统的软硬件系统设计。