

混合动力牵引调车机车的研发

叶顶康, 彭长福, 刘顺国, 任 聪

(南车资阳机车有限公司, 四川 资阳 641301)



摘 要: 阐述了混合动力牵引调车机车的概念和样车的结构性能, 重点论述了样车主要研制内容及技术措施、节油减排效果、节油试验情况, 从评估计算和试验验证两方面论证了混合动力技术能实现能量高效利用和循环利用的双重目标, 总结了样车的研制成果。

关键词: 调车机车; 混合动力; 节油; 减排

中图分类号: U260.9*3

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)05-0017-04

作者简介: 叶顶康 (1965-), 男, 硕士, 高级工程师 (教授级), 长期从事内燃机车的研发工作。

Development of Hybrid Power Traction Shunting Locomotive

YE Ding-kang, PENG Chang-fu, LIU Shun-guo, REN Cong

(CSR Ziyang Locomotive Co., Ltd, Ziyang, Sichuan 641301, China)

Abstract: Concept and prototype structure performance of hybrid power traction shunting locomotive were expounded, emphasis on prototype development contents, technic measures, oil-saving and emission reduction effect and oil-saving test. By both calculation evaluation and test verification, hybrid power technology was proved realized the dual targets of energy high-efficiency and cyclic usage. Achievements of prototype developing were summarized.

Key words: shunting locomotive; hybrid power; oil saving; emission reduction

1 混合动力牵引调车机车的概念

随着化石能源日益枯竭, 人居环境日益恶化, 节约化石能源和开发替代能源已经成为国家可持续发展的重大战略课题。交通运输是能源消耗大户, 而铁路运输一直都是我国现代化交通运输体系中最为重要的运输手段。作为铁路主要牵引动力的内燃机车如何实现节能减排、绿色环保已成为当前铁路机车研究的热点领域。

在铁路站、场以及在工矿企业内部承担调车兼小运转任务的内燃调车机车, 其特殊的工作特点是: 机车启动、加速、换向、制动频繁, 导致机车柴油机负荷变化频率高; 柴油机满负荷工作时间平均只有10%左右, 约50%的工作时间处于空载运行状态; 柴油机平均使用功率只有额定功率的30%~50%。

鉴于上述工作特点, 调车机车普遍存在以下问题: 柴油机功率得不到充分发挥, 大部分时间工作在部分负荷状态, 实际油耗比标定油耗一般要高5%~

10%; 柴油机空载运行造成的燃油浪费比较严重。柴油机负荷频繁变化造成柴油燃烧不充分、冒黑烟, 废气中炭化物含量高, 对环境污染严重。

目前, 仅国内工矿企业用调车内燃机车保有量大约有3 500台左右, 路内调车内燃机车约2 700台, 每年因以上运用状况浪费的燃油及额外增加的废气排放总量相当惊人。承担调车任务的内燃调车机车一般运行在城市、工厂、码头等人员稠密区, 因此调车内燃机车实现节能、减排、降低噪声的研究就更加紧迫。

为此需要找到一种两全其美的办法: 既能满足机车使用要求, 又能充分发挥柴油机功率。借用混合动力汽车的技术成果, 在铁路内燃调车机车上采用“柴油发电机组+储能装置”共同作为机车牵引动力, 即: 采用较小的柴油发电机组和大功率动力蓄电池组联合组成机车牵引动力。通过混合动力牵引控制系统使柴油发电机组大部分时间工作在额定功率或经济运行区, 既提供牵引动力又可为动力蓄电池组持续充电; 而当调车所需短时大功率时, 则由“柴油发电机组+储能装置”共同提供所需功率; 当机车处于待命状态或低负

收稿日期: 2012-08-10

荷时则由储能装置提供所需动力,让柴油机停止工作。这就形成了“柴油发电机+动力蓄电池”的混合动力机车概念。这种新型的混合动力机车既能满足机车的牵引需要,又能大幅降低油耗、减少废气排放、降低噪声,达到节能、减排、降噪目的。

2 混合动力牵引调车机车研制概况

2.1 样车研制概况

混合动力汽车技术的迅猛发展使动力蓄电池技术逐渐成熟,机车交流传动技术的普遍采用也为混合动力机车提供了很好的技术平台。2008年南车资阳机车有限公司(简称“南车资机公司”)开始了混合动力牵引调车机车系统集成技术及工程化的研究。课题组首先对国内主要工矿企业用户进行了机车使用情况调查,调查涉及机车使用功率范围、工况占比、牵引吨位,以及机车的平均使用时间、常用挡位、平均油耗等。调查表明,工矿用户中1 000 kW功率等级需求最多,数量占50%左右。同时考虑到混合动力机车比较适用于地铁调机、工程检修车等用户群,因此,样车以1 000 kW功率等级为技术平台进行开发,以该技术平台为基础可形成300~2 000 kW中各种功率的混合动力机车产品。

2.2 样车的结构与性能

机车总体布局分上、下两部分。上部为车体及设备,车体下方布置有蓄电池箱、转向架等。机车车体采用外走廊、底架承载式车体。机车上部分为5部分:从前至后依此为冷却-辅助室、动力室、电气室、司机室和后机室。机车下部采用2个两轴转向架,轴式 B_0-B_0 ,轴重23 t。机车最大运用功率1 000 kW,最大速度80 km/h,持续速度9 km/h,启动牵引力350 kN,持续牵引力240 kN。2010年底完成样车研制和功能调试,样车总体布置如图1。

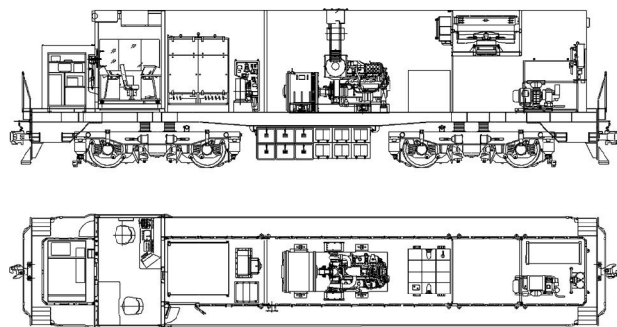


图1 混合动力机车总体布置图

2.2.1 主传动方式和混合动力供能模式选择

与传统的交直流传动相比,交流传动技术具有高效节能、低维护、易于实现制动能量回收的优点,故样车主传动和辅助传动均采用了交流传动,主辅共中间直流环节(DC 750 V)。混合动力供能模式:600 kW柴油发电机组+400 kW动力蓄电池组。机车作业时根据牵引

功率需求及最佳节油模式的控制要求,自动或手动选择柴油机单独提供动力、蓄电池单独提供动力或柴油机和蓄电池共同提供动力的混合动力供能模式。

2.2.2 动力蓄电池选型

根据调车机车作业特点,机车动力蓄电池应具有以下性能:能量密度高,比功率大;允许大电流充放电且持续时间长、电压波动小,并具有“快充快放、随充随放”特性;能耐高温抗低寒;寿命长、安全环保。

对比铅酸、镍镉、镍氢及锂离子等类型蓄电池及超级电容的比能量、充放电特性、性价比、寿命和环保性能^[1],超级电容的充放电倍率高,寿命长,特别适合制动能量回收,但其比能量低,大电流充放电持续时间长、电压波动大,较难通过地面充电来提高其能量储备。锂离子蓄电池能量密度高,放电特性硬,允许的充放电电流大,比较适合作为动力蓄电池,在电动汽车领域应用广泛。

磷酸铁锂电池的优点是其材料安全可靠,高温性能较优异,使用温度可达60℃,常温下全充放循环3 000次后可用电量还可保持70%以上。缺点是能量密度较低,低温性能差,需要较高的工艺水平来保证电池的一致性^[1]。综合考虑,磷酸铁锂电池的性价比和安全性都比较适合用于混合动力机车,通过适当加大蓄电池的装车容量,可以兼顾制动能量回收和节油率两项指标。因此,样车选择磷酸铁锂电池装车试验。

2.2.3 混合动力机车控制系统的研发

混合动力控制是混合动力机车的关键技术之一。能量是否按要求分配、蓄电池充放电是否安全可控、机车各种工况是否在经济节油模式下工作是混合动力机车研制成功与否的关键。它依靠机车微机系统和蓄电池管理系统协同配合,对不同混合度(蓄电池功率与柴油机功率比)或不同运用场合的混合动力机车,根据实际情况确定选用何种最佳的混合动力控制策略。图2为样车采用的控制系统框图。

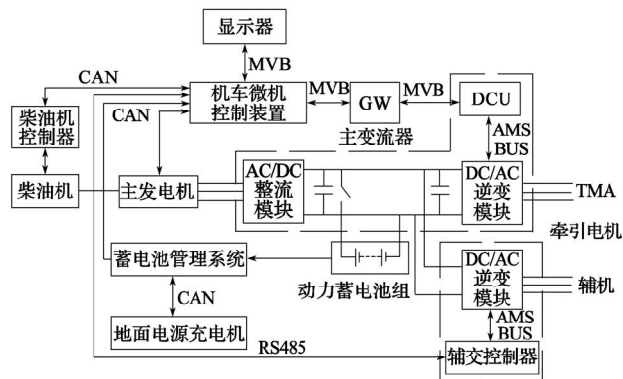


图2 样车控制系统组成

机车蓄电池管理系统主要承担蓄电池组的充放电管理、电池模块的智能维护和容量的精确估算等功能。研究小组立足创新原则,充分考虑机车的各种运用工况,通过建模仿真和地面试验验证,建立了一套机车

蓄电池管理系统。该系统由多个子模块和 1 个主模块组成,子模块负责单体电池电压、温度测量,并适时与主模块通信;主模块负责电池模块的智能维护和容量估算,并将数据传输给机车微机,微机根据运用要求和蓄电池状况实现充放电控制、过充过放保护等功能。

2.2.4 制动能量回收功能实现

以“节能、减排”为主要优势的混合动力机车,制动能量回收是其必须具备的功能。机车制动时交流牵引电机可转换为发电机,发出的交流电经主变流器转换为直流电,通过中间直流母线直接向蓄电池充电和向辅助系统供电,实现制动能量回收利用。在此重点研究了机车各种速度下控制蓄电池充电电流的控制策略。由于样车蓄电池允许较高的充电电流,并充分考虑了蓄电池组的通风散热,因此调车作业常用制动工况制动能量均可由蓄电池吸收。

2.2.5 地面充电功能实现

为实现混合动力机车“节油、减排”的优势,机车牵引能量应尽可能由高效清洁的地面电源提供。样车上设置了一套专用充电系统,通过该系统可用 380 V、50 Hz 的地面电源为车载蓄电池组充电。

3 样车节油减排能力分析

混合动力调车机车与传统内燃调车机车相比,节油、减排的潜力究竟如何,以下将样车同我国工矿企业使用较多、装车功率同为 1 000 kW 的 GK1c 型机车作对比分析,按一台机车每天工作 20 h 进行估算。

空载油耗:调车机车 50% 的工作时间处于空载运行状态,空载油耗约为 7.5 kg/h^[2],10 h 耗油 75 kg;样车预计空载运行可降到 2 h 左右,样车采用的 CAT3412E 柴油机空载油耗约为 3.65 kg/h,2 h 耗油约 7.3 kg,每天空载节油 67.7 kg。

部分负荷油耗:调车机车柴油机满负荷工作时间约占 10%,其余工况均不在最佳效率区。按平均运用功率 350 kW (负荷率约 1/3) 和每天工作 10 h 计算,GK1c 型机车油耗 235 g/kW·h^[2],耗油 822.5 kg;样车柴油发电机组功率 600 kW (考虑剩余功率给动力蓄电池充电),最佳油耗 208 g/kW·h,每天折合满负荷工作 4.5 h (考虑制动能量回收充电节省 1 h) 计算,耗油 561.6 kg;每天部分负荷节油 260.9 kg。

以上两项估算表明:样车的燃油消耗较 GK1c 型机车可节油 36.6%。GK1c 型机车的辅助功率约占装车功率的 8%,而样车的辅助功率仅占装车功率的 3%~5%,再考虑辅助功率降低节油,样车的节油能力应超过 40%。据国外混合动力机车资料显示,加拿大绿山羊系列机车节油率达到了 30%~60%^[3];法国阿尔斯通重载牵引节油率 35%,轻载调车节油率 60%^[4];日本 JR 系列节油率 30%~40%^[5]。

样车的燃油消耗较传统机车低 40% 以上,燃烧废

气排放量也同比降低 40% 以上。传统机车大部分时间工作在非高效区,机车运用工况处于反复交变过程,燃油燃烧极不充分,导致废气中炭化物含量高,对环境污染严重;而采用混合动力牵引的调车机车主要工作在高效率区,燃烧状况好,处于柴油机的最佳排放区。因此,样车的废气排放估计比 GK1c 型机车低 60% 以上。据资料显示,绿山羊系列机车的 NOX 排放减少了 80%~90%^[3]。

4 样车试验情况

2011 年至今,样车在南车资机公司线路上进行性能优化和运用考核试验。期间对蓄电池及管理系统进行了充放电性能试验和运用性能测试;通过对比试验优化了混合动力控制策略;进行了不同混合度方式下的油耗、制动能量回收率的对比试验。本文主要介绍制动能量回收利用试验和节油对比试验情况。

4.1 制动能量回收利用试验

表 1 列出了动力混合度为 30% 时制动能量回收的试验数据。试验表明:制动时可将机车动能中 50% 左右的能量回收蓄到蓄电池中。不同混合度下的试验还表明:制动能量回收率与动力混合度成正比,蓄电池组的容量越大,允许的充电电流就越大,对制动能量的吸收速度和收储量就越高。

表 1 制动能量回收数据记录 (混合度 30%)

机车速度/ km·h ⁻¹	机车质 量/t	牵引电机转 速/r·min ⁻¹	机车动 能/kJ	制动回收 能量/kJ	制动能回 收率/%
13.34	86.934	390	597	334	56
12.83	86.934	375	552	272	49
12.66	86.934	370	537.5	258	48
10.95	86.934	320	402	217	54

4.2 节油对比试验

节油试验按纯柴油机工况与混合动力工况 (使用地面充电机充电) 的耗油量进行对比,表 2 列出了动力混合度为 30% 的统计结果。与纯柴油机工况相比,在约 30% 的混合度下样车节油率最高可达 45%,制动能量回收再利用是节油的主要途径。不同混合度下的试验还表明:节油率与动力混合度成正比,混合度越高节油效果越好。

表 2 3 种典型工况油耗统计 (混合度 30%)

机车控 制模式	试验时间 (2011 年)	牵引输出 功/kW·h	耗油 量/L	油耗率/ L·(kW·h) ⁻¹	节油 率	蓄电池 充电方式
纯柴油 机工况	3.8~3.31	834	414	0.496	基准	/
混合动 力工况	6.7~6.23	1 637	663	0.405	18.4%	地面补 充充电
混合动 力工况	10.5~10.11	286	78	0.273	45.0%	制动能量 回收,地 面充电

*: 指机车牵引时主发电机输出的能量。

样车运用试验表明,混合动力调车机车节油、减排的有效途径是:

①配置适宜的蓄电池组,结合运用工况制定最佳控制策略,以大幅减少柴油机惰转时间、让柴油机始终工作在最佳油耗点,提高机车能量转化效率,降低有害物质排放量。

②制动能量回收,机车实现电制动功能,减少车轮和制动片磨损的同时,实现能量循环利用。

③充分利用地面充电,使机车用上高效清洁的电能。

5 样车研制成果

1) 机车各项指标基本达到设计目标

样车近1年安全运行表明:机车技术性能稳定,运行安全可靠,节油效果显著,各项指标基本达到设计目标,这标志着我国首台混合动力机车研制初步取得成功。

2) 动力混合方式能根据牵引需求控制

样车最大技术创新点是混合动力能量的动态控制已实现,能灵活安全地控制蓄电池充电、放电和柴油机的发电特性。该技术的实现为混合动力机车系列化开发奠定了基础。

3) 构建了开放性的蓄电池管理系统

作为混合动力机车特有的和关键的系统,样车蓄电池管理系统的各项性能基本满足设计要求,与机车微机系统通信快捷,对蓄电池参数的检测和容量估算较精确,能有效控制蓄电池充放电。该系统采用模块化设计,能适应各类蓄电池的特性和各种组合。

4) 基本掌握了混合动力机车的系统集成技术

采用交流传动、微机控制、蓄电池管理、混合动力控制、制动能量回收等技术有效结合的系统集成技术,实现了能量高效利用和循环利用的双重目标,提升了整车效率,使机车的燃油消耗比同功率等级内燃调车机车大幅降低,体现了混合动力牵引调车机车节油、减排、环保的优势。

6 下一步研究的重点及推广运用展望

1) 储能技术深化研究

混合动力机车是否有市场和生命力,主要取决于储能系统技术的发展和完善。随着新能源汽车的迅猛发展,牵引电池的性能、可靠性及安全性得到不断提升。混合动力机车需要的电池功率比新能源汽车大得

多,高温、低温、粉尘等运用环境及机车连续工作时间等运用要求也比新能源汽车苛刻得多,为新能源汽车研发的动力电池无论是单体容量还是组合方式目前与混合动力机车的要求都还有较大差距。目前市场上还没有专门为混合动力机车研发的大功率大容量电池。因此,对于大功率电池的环境适应性、安全性、使用寿命等还将作进一步研究和试验,选用或与电池厂家共同研发适合混合动力机车用的蓄电池组。

2) 控制技术持续优化

下一步将运用仿真技术对混合动力机车控制系统进行仿真优化,并利用样车作试验验证平台,针对不同的运用要求确定最佳的柴油机动力及蓄电池匹配方案,优化各种混合度下混合动力控制策略,以达到最佳的节油减排效果。

3) 运用展望

混合动力机车在继承传统内燃机车方便灵活、持续牵引能力强、与电力牵引相比无需投入高成本架设和维护供电网等优点的基础上,更具有高效、节能、低排放的特点。混合动力牵引技术的发展已受到世界各国铁路用户的广泛关注。目前南车资机公司的用户多数为国有钢铁企业、矿山、码头,这些企业都是国家节能、减排的重点单位,它们大多都承担着所在地、市、州的节能减排指标,因此这些企业对混合动力牵引调车机车的需求是肯定的。对减排、降噪要求很高的城市地铁调车作业而言,采用混合动力牵引调车机车是较理想的选择。但混合动力机车相对较高的制造成本及后续蓄电池的更换成本将是推广运用的主要障碍。因此,建议国家相关部门将对混合动力汽车的优惠政策及资金支持延伸到混合动力机车领域,使混合动力牵引技术在铁路调车机车升级换代中得到推广运用。

参考文献:

- [1] 宋永华,阳岳希,胡泽春.电动汽车电池的现状及发展趋势[J].电网技术,2012(4).
- [2] 许有忠.GK1C型0003号调车内燃机车牵引热工性能试验[R].北京:铁道部产品质量监督检验中心内燃机车检验站,1993.
- [3] 苏明.加拿大研制出一台新颖的环保型调车机车[J].Railway Age,2002(9):60.
- [4] J Oostra.混合动力调车机车的技术和运用[J].国外内燃机车,2010(4).
- [5] 添田正.日本HD300-901型混合动力机车样车[J].国外内燃机车,2011(5).

(2021轨道电力牵引技术创新论坛主题论文)