

2 000~2 500 kW 混合动力机车开发

何国福, 孟玉发, 叶顶康, 刘顺国, 郭力

(中车资阳机车有限公司 研发部, 四川 资阳 641301)

摘要: 为改善传统调车内燃机车的经济、环保性能, 通过调车机车应用数据分析, 确定了2 000~2 500 kW油-电混合动力机车参数, 并经过中国铁道科学研究院型式试验、专项研究性试验及用户现场应用考核。结果表明混合动力机车节油、减排效果显著。

关键词: 混合动力; 调车机车; 型式试验; 技术参数; 机车研制; 节能减排; 环保

中图分类号: U267.1; U262; U260.9^{†3}

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.005

Development of 2 000~2 500 kW Hybrid Diesel Locomotive

HE Guofu, MENG Yufa, YE Dingkan, LIU Shunguo, GUO Li

(R & D Department, CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang, Sichuan 641301, China)

Abstract: To improve the economic and environmental performance of traditional diesel locomotives, with the operation data analysis of shunt locomotive, parameters of 2 000~2 500 kW hybrid diesel locomotive were determined, which could achieve remarkable fuel-saving and exhaust-reducing efficiency proved by CARS type test, earmark research test and operator practical commissioning.

Keywords: hybrid power; shunt locomotive; type test; technology parameter; fuel-saving and exhaust-reducing; environment protection

0 引言

随着各行业碳排放的降低, 作为我国铁路运输站场调车作业的内燃机车, 因拥有2 700台以上的数量, 对环境会造成一定的污染, 尤其是工作在人口稠密地区的调车机车, 扰民、减排问题已引起人们的高度关注。因此, 如何提高内燃机车的经济性、减少排放是制造和运营企业面对的课题。

在国外, 采用经济、环保的混合动力调车机车取代传统调车内燃机车已成为主流。

中车资阳机车有限公司多年来一直同步致力于这方面的工作, 于2013年6月与中国铁路总公司签订了《2 000~2 500 kW 混合动力机车研制》项目合同, 开始该机车的研制工作。目前该机车已通过型式试验和专项研究性试验及应用考核。

1 机车总体布置和技术参数

2 000~2 500 kW 混合动力机车用途为调车机车, 其动力源由大容量动力蓄电池组和柴油发电机组共同组成, 采用主辅共中间直流环节的交流传动系统。

1.1 机车总体布置

机车车体采用外走廊、底架承载式结构。机车总体布置如图1, 从前至后依次为冷却室、动力室、电气室、蓄电池室、司机室和后机室。

冷却室前部主要布置有辅助变流柜、空气干燥器, 冷却室上部布置有冷却装置、冷却风扇及其驱动电机, 冷却室下部布置有螺杆式空气压缩机组、制动柜、前牵引电机通风机组等。

动力室装有柴油机及主发电机, 柴油机自由端上部布置有膨胀水箱, 下部为柴油机辅助装置, 输出端有柴油机进气系统, 顶部为排气系统, 并装有消声器。

电气室主要布置有后牵引电机通风机组、牵引变

流器柜、隔离变压器、接触器及电阻制动装置等。

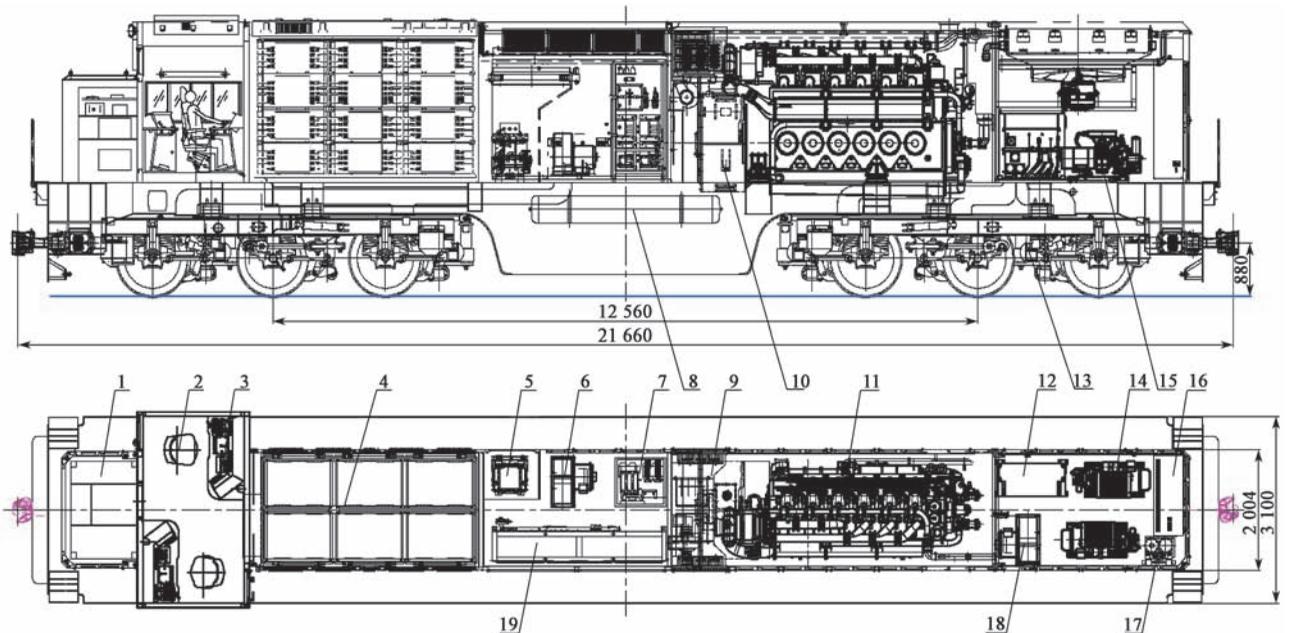
蓄电池室布置 22 组动力电池单元、1 个控制蓄电池组和 1 个启动蓄电池组。

司机室设双向操纵台，其设备和布置符合规范化

司机室要求，并设有通向后机室的检修门。

后机室主要布置有低压电器柜、行车安全设备等，并预留 6A 系统、平调、STP 等设备的安装接口。

走行部为 2 台可以互换的三轴转向架。



1—低压电器柜；2—司机室座椅；3—操纵台；4—动力蓄电池组；5—隔离变压器；6—后通风机；7—接触器及电阻制动装置；8—总风缸；9—柴油机进气装置；10—主发电机；11—柴油机；12—制动柜；13—转向架；14—空气压缩机；15—冷却装置；16—辅助交流柜；17—干燥器；18—前通风机；19—牵引变流器柜

图 1 机车总体布置图

1.2 机车主要技术参数

1) 柴油机功率值及动力蓄电池容量选取

对大型编组站调车作业各工况下牵引功率需求计算，结果见表 1。

表 1 大型编组站调车作业各作业工况下牵引功率需求计算值^[1]

作业工况	要求与计算功率
驼峰溜放作业	按 6 辆车在 42‰坡道上，其余在平直道、牵引 6 000 t 推峰，推峰速度 10 km/h，计算需要轮周功率 1 046 kW。驼峰溜放前平直道 6 000 t，3 min 内提高到目标速度 20 km/h，需要轮周功率 840 kW
平面溜放作业	平均牵引 5 500 t 在平直道 3 min 内（或 1 km 内）加速到 30 km/h 最大需要轮周功率 1 620 kW
整列牵出	平均牵引 5 500 t 在平直道 3 min 内（或 1 km 内）加速 30 km/h 或在最大坡道 6‰平衡速度大于持续速度计算，计算需要轮周功率 1 620 kW

根据表 1 牵引功率需求计算结果，初步确定动力蓄电池组采用容量 1 068 Ah、标称电压 1 408 V，其 1.5C 放电时可实现中间直流环节功率 2 200 kW、轮周牵引功率为 1 860 kW；结合国内柴油机现状，柴油发电机组装车功率为 1 500 kW 或 1 250 kW，混合牵引时最大小时轮周功率 2 000 kW 或 1 860 kW。这样选取保证了轮周功率大于 1 620 kW 的要求，同时也是对目前替换的调车机车功率覆盖：纯柴油机工作方式等

同东风 7C 机车工作；纯动力蓄电池工作方式（分别以 1C、1.5C 放电时）等同东风 7C、东风 7G 工作。

2) 牵引能力设定

主要考虑了在低速段获得与 HX_N3B 及 HX_N5B 交流传动调车机车相同牵引和加速能力，可实现 6 000 t 调车作业。

3) 技术参数

样车主要参数如下^[2]：

使用环境温度	-40~40℃；
传动方式	交流电传动
尺寸限界	符合 GB 146.1—1983 中车限 -1A、车限 -1B、车限 -3 限界的要求
轨距	1 435 mm
轴式	C ₀ -C ₀
机车功率	
最大小时功率（中间直流环节）	≥ 2 200 kW
柴油机最大运用功率（装车功率）	1 250 kW
动力蓄电池电量	1 500 kW·h
机车轮周功率	≥ 1 850 kW（小时功率） ≥ 890 kW（纯柴油机工况，持续制）
机车轮周峰值动力制动功率	≥ 2 400 kW
电阻制动功率	≥ 1 200 kW
机车速度	

最高运行速度 100 km/h
 持续速度 ≤ 13 km/h
 (混合动力工况)
 ≤ 8 km/h (纯柴油机工况)
 机车牵引特性
 启动牵引力 (计算轮径 1 200 mm)
 ≥ 560 kN
 持续牵引力 ≥ 540 kN
 轴重 25 t
 轮径 (新轮) 1 250 mm
 燃油箱容积 (可用燃油量) $\geq 5 500$ L
 机车具有地面充电功能, 能减少燃油消耗和排放量。

1.3 机车性能曲线

机车牵引特性见图 2, 峰值动力制动特性曲线见图 3。

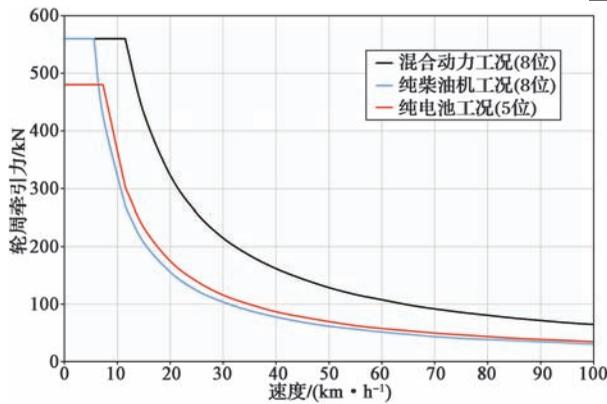


图 2 牵引特性曲线

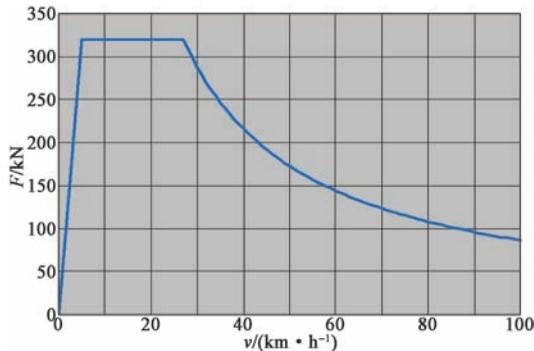


图 3 峰值动力制动特性曲线

2 混合动力机车结构与控制设计特点

2.1 采用双动力, 降低燃油消耗

采用了双动力, 使其各自在经济区工作, 降低了燃油消耗。

通过对铁路各编组站、场监控记录数据分析 (见表 2、表 3), 不难看出: 调车作业时, 高达 75% 以上时间里机车在低手柄位或惰转工作 (其中惰转约占 50% 的比例), 柴油机燃油消耗率高达 240~280 g/(kW·h)。因此, “柴油机+动力蓄电池”混合动力机车, 可将该段工作由动力蓄电池承担, 让柴油机停止工作; 当动力蓄电池电量下降到一定程度时, 启动柴油机在

表 2 部分大型编组站各功率段作业时间分布情况^[1]

柴油机 功率范 围 /kW	编组及牵出作业时柴油机各 功率下作业时间占比 /%			堆峰作业时柴油机各 功率下作业时间占比		柴油机燃 油消耗率 /(g·(kW·h) ⁻¹)
	苏家屯站 (车型 DF ₇ B)	新丰镇 (车型 DF ₇ B)	武汉北车 站 (车型 DF ₇ C)	武汉北车 站 (车型 DF ₇ C)	新丰镇 (车型 DF ₇ B)	
	0 ≤ 功率 < 200	83.6	81.7	93.7	75	
200 ≤ 功率 < 300	-	3	-	20	3.90	260~270
300 ≤ 功率 < 500	8.33	2.62	0.32	5	1.40	240~260

表 3 多变坡道西部机务段各功率段作业时间分布情况^[3]

柴油机 功率范 围 /kW	DF ₇ C 的柴油机各功率下 作业时间占比 /%				DF ₇ G 的柴油机各功率 下作业时间占比 /%		柴油机燃 油消耗率 / (g·(kW·h) ⁻¹)
	乌鲁木 齐西机 务段	重 庆 机 务 段	贵 阳 机 务 段	哈 密 机 务 段	乌鲁木 齐 西机 务段	成 都 机 务 段	
	0 ≤ 功率 < 180	88.71	87.67	93.75	86.74	84.96	
180 ≤ 功率 < 300	8.96	5.85	4.22	8.08	7.67	8.29	260~270
300 ≤ 功率 < 500	1.93	2.56	1.09	3.12	4.34	3.77	240~260

760~920 r/min、211~202 g/(kW·h) 燃油消耗率的高效、经济区工作且提供高电压 (也为主发电机高效率) 为动力蓄电池充电, 而动力蓄电池在机车低手柄位或惰转工作时具有低放电倍率和高效率, 从而避免了传统调车内燃机车柴油机长期在低效区及惰转工作造成的浪费, 节约大量燃油。当机车需在高功率段工作时则启动柴油机, 让柴油机在高效经济区工作, 不足部分由动力蓄电池补充, 用“小柴油机+动力蓄电池”替代了较大功率柴油机完成调车牵引, 柴油机功率小, 其辅助功率消耗也减少, 但动力蓄电池的能量是经过转换而来的, 因此油耗基本相同。机车在低手柄位需要启动柴油机牵引时, 让柴油机在高效经济区工作, 一方面为机车牵引提供动力, 另一方面将多余能量为动力蓄电池充电, 此时由于燃油消耗率低、辅助功率也小, 也较节油。

另外, 作为调车机车有时需要完成小运转作业, 此时则采用柴油机优先提供动力。柴油机工作在高效区, 功率过剩时为动力蓄电池充电, 尽量保持电池在较高电量状态, 保证牵引需求。

以上方案的实施在 3 方面减少油耗和排放: 机车待命时, 实现柴油机停机减少惰转油耗; 柴油机始终工作在高效区, 燃油消耗率显著降低; 用“小柴油机+动力蓄电池”替代了较大功率柴油机完成牵引, 柴油机功率小, 其辅助功率消耗也减少。

2.2 双动力源驱动主电路

为了让动力蓄电池组充放电及柴油机使用功率得到控制, 主电路系统集成设计将牵引模块的斩波支路串入充放电回路, 见图 4。

2.3 机车制动能量回收再利用

制动能量回收可通过操作司机控制器, 以较大动力制动功率回收能量, 也可通过操作大小闸以空-电混合制动方式回收能量。峰值动力制动时的轮周制动功

率高达 2 400 kW；而空 - 电混合制动时，机车优先实施电制动，当制动力不足时由空气制动补充，减少了外来能量需求。

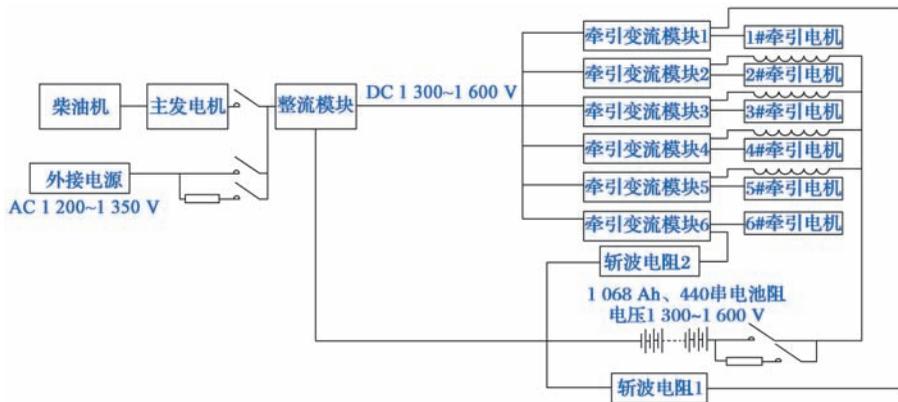


图4 主传动系统原理图

2.4 设置地面电源充电接口

为加强机车“减排”，机车设有地面电源充电接口。机车牵引能量由高效清洁的地面电源提供，可以实现机车的零排放。

无论是地面电源充电还是车载柴油发电机组充电，正常补电时间约在 45 min，极限条件下约 1 h。

3 试验结果

机车于 2016 年 5 月开始在中国铁道科学研究院按试验大纲进行了型式试验和专项研究性试验。2017 年初开始了在哈尔滨铁路局寒冷地区应用考核并于 2017 年 6 月结束，从 2017 年 7 月开始在成都铁路局进行夏季应用考核。试验和应用考核已经取得了如下的初步成果。

3.1 机车节油、减排效果明显^[4]

同等线路、环境条件下，编组作业时相比于当前油耗较低的 HXN5B、HXN3B 机车平均节油在 28.34%~31.55%。

同等条件下推峰作业时，相比当前油耗较低的 HXN5B 机车平均节油 24.63%~27.8%。

在哈尔滨南站经哈东站到绥化的小运转作业试验中，HXN6 0001 号机车万吨公里油耗 14.67 L，而该线路同期小运转机车 HXN5B 0200 号每万吨公里油耗为 23.56 L，DF₄C 5135 号机车万吨公里油耗为 26.3 L。

同等线路、环境条件下，编组作业时相比于 DF₇G 机车平均节油在 35.14%~38.87%。

因此，机车燃油消耗量显著减少，排放量也相应减少，且柴油机始终在经济区工作，排放减少效果更显著。

3.2 机车噪声减少

1) 减少了柴油机噪声对周围环境的影响时间

通过在哈尔滨机务段推峰、编组运用考核表明：柴油机每天的工作时间可由传统调车 22~24 h 缩减至 2~5 h，柴油机废气和噪声对司机和周围环境的影响

时间将大幅减少，见图 5~ 图 8。

该车柴油机工作时，司机室噪声测试最大值 72 dB(A)，空调、柴油机不工作时为 62.5 dB(A)，司乘人员工作环境显著改善。

2) 为机车在人口密集区实现低辐射噪声作业及隧道内安全作业提供了解决方案

随着城市化的不断扩展，调车场逐渐被居民区包围，调车机车作业时柴油机噪声扰民问题比较突出，特别是夜间调车作业，如何降低机车作业噪声对周围环境的影响尤为重要。2 000~2 500 kW 混合动力机车可以实现停止柴油机

机，夜间全部由动力蓄电池纯电牵引作业，降低了机车作业时辐射噪声，如果需要补电时运行至相对较偏远地段，由机车上的柴油机快速充电后继续牵引作业。

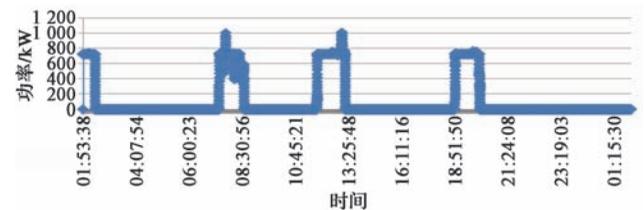


图5 推峰作业柴油机工作时间分布^[5]

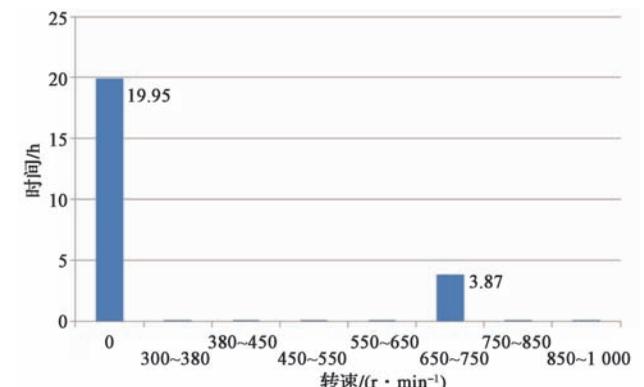


图6 推峰作业时柴油机不同工作转速下时间分布^[5]

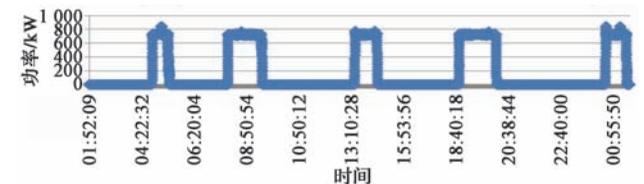


图7 编组作业柴油机工作时间分布^[5]

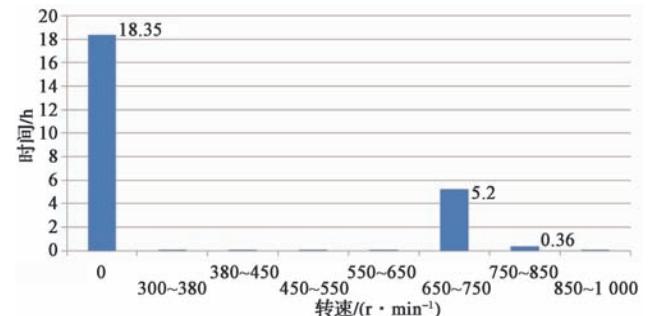


图8 编组作业时柴油机不同工作转速下时间分布^[5]

同样, 该机车也可满足隧道内安全作业需要, 实现停止柴油机、纯动力蓄电池牵引, 避免了柴油机在隧道内工作时燃烧不充分带来的对工作人员安全危害问题。

3.3 机车经济性好

1) 柴油机充电或牵引始终工作在较佳油耗区间

调车作业时柴油机充电或牵引始终工作在 760~1 000 r/min 较佳油耗区间, 柴油机工作转速及试验油耗如表 4 (未扣除泄漏量)。

表 4 柴油机工作转速及试验油耗

转速/(r·min ⁻¹)	760	840	920	1 000
油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)	211.80	205.75	202.83	205.50

2) 机车全寿命周期成本低

混合动力机车节油效果明显, 闸瓦消耗也减少, 尽管存在动力蓄电池更换时的成本增加, 与同等功率的传统内燃调车相比, 其全寿命周期成本费用也显著降低。

收集了新丰镇 DF₇G 型机车相关修理周期、费用参数, 评估了 2 000~2 500 kW 混合动力机车全寿命周期成本 (30 年 LCC) 在提供 1 天 1~2 次地面充电时将降低 20%~30%, 在不提供地面充电时降低 10%~15%。预计随着动力蓄电池技术发展, 其使用寿命得到延长、成本降低, 使用该混合动力机车经济效益将更加明显。

3.4 机车制动能量回收技术得到验证

试验表明机车能在长大坡道实施动力制动, 能快速回收整列车的制动能量。

在不改变司机操作习惯的条件下, 司机操作机车大小闸进行制动时, 机车自动优先实施动力制动回收能量, 在动力蓄电池电量已快充满或动力制动失效时, 空气制动自动追加以保证机车制动安全。

3.5 机车具有与 HXN5B、HXN3B 相近的启动加速能力

机车启动牵引力和持续牵引力与 HXN5B、HXN3B 相同, 由于动力蓄电池能短时超功率放电, 因此其启动加速能力与 HXN5B、HXN3B 交流调车内燃机车相当。

4 结语

通过对机车型式试验和专项研究性试验及应用考核, 验证了 2 000~2 500 kW 混合动力机车的开发及各系统集成技术是成功的, 机车节油、减排效果显著, 各项指标达到要求。

下一步通过全年应用考核数据分析, 完善相关部分程序与参数。

参考文献:

- [1] 中车资阳机车有限公司. 2 000-2 500 kW 混合动力机车应用工况分析报告 [R]. 资阳: 中车资阳机车有限公司, 2013.
- [2] 中国铁路总公司科技管理部. 2000-2500 混合动力技术验证调车机车暂行技术条件 [R]. 北京: 中国铁路总公司科技管理部, 2014.
- [3] 中车资阳机车有限公司. 3000 马力节能环保型调车机车调研数据 [R]. 资阳: 中车资阳机车有限公司, 2016.
- [4] 中车资阳机车有限公司, 哈尔滨铁路局. HXN6 型混合动力调车机车运用考核月度简报 [R]. 资阳: 中车资阳机车有限公司, 2017.
- [5] 中国铁道科学研究院机车车辆研究所. 型式试验简报 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院机车车辆研究所, 2016.

作者简介: 何国福 (1967-), 男, 教授级高级工程师, 从事机车车辆总体研发工作。

动态消息

欢迎订阅《机车电传动》

《机车电传动》期刊为双月刊, 由邮局发行, 国内邮发代号 42-17, 欢迎读者到当地邮局订阅 (国内定价 15 元, 全年 6 期 90 元)。国外发行代号 BM353, 国外由中国国际图书贸易集团有限公司总发行。