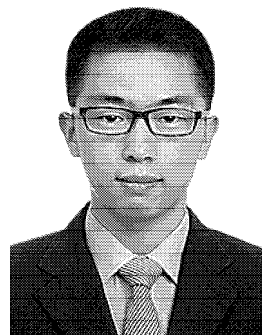


研
究
开
发

SS4B型与HXD2型电力机车 电气负荷性能对比分析

王实山¹, 吴命利¹, 薛 蛟²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;
2. 神华集团有限责任公司 神朔铁路分公司, 陕西 榆林 719316)



作者简介: 王实山(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事牵引供电理论与技术的研究。

摘 要: 针对用于铁路货运的直流传动SS4B型电力机车和交流传动HXD2型电力机车, 结合线路实测数据, 从工作原理、功率因数、谐波电流、机车能耗等4个方面进行了电气负荷性能对比, 说明了交流传动电力机车的技术优势。随着直流传动电力机车的停产和交流传动电力机车的大量投运, 在设计牵引供电系统时, 必须充分考虑交流传动机车功率因数高、谐波电流小、能全功率范围再生制动的特点, 同时, 应尽快通过实测掌握各型交流传动电力机车的谐波特性, 为牵引供电设计提供基础数据。

关键词: SS4B型电力机车; HXD2型电力机车; 功率因数; 谐波; 交流传动; 直流传动

中图分类号: U264

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2014)03-0057-05

Comparison of Electrical Load Performance between SS4B and HXD2 Electric Locomotive

WANG Shi-shan¹, WU Ming-li¹, XUE Jiao²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Shenshuo Railway Branch, Shenhua Group Corporation Limited, Yulin, Shaanxi 719316, China)

Abstract: HXD2 and SS4B were selected as the representative of AC drive and DC drive electric locomotive respectively. Based on the actual measured data, their electrical load performance were compared in four aspects, i.e. working principle, power factor, harmonic current and the locomotive consumption. The technical advantages of AC drive electric locomotive were illustrated. With the production halts of DC drive electric locomotive and more and more AC drive electric locomotive putting into service, the properties of high power factor, low harmonic current and regenerative braking ability should be fully considered when designing the traction power supply system of electric railway. Meanwhile, it was also necessary to know the harmonic characteristics of AC drive electric locomotive in detail so as to provide the basic data for the designing of traction power supply system.

Keywords: SS4B electric locomotive; HXD2 electric locomotive; power factor; harmonics; AC drive; DC drive

0 引言

为满足不断提高的运输要求, 近年来, 我国各条煤运重载铁路都开始投运新型交流传动电力机车, 逐渐替代原有的直流传动电力机车。本文以神朔铁路原有主力机型SS4B型与新投入的HXD2型2种不同传动方式的电力机车为例, 利用现场测试数据, 从工作原理、功率因数、谐波电流、机车能耗等4个方面进行了对比。用实测数据说明了交流传动机车的技术优势和取代直流传动机车的效益。

收稿日期: 2013-10-19

基金项目: 铁道部科技开发计划项目(2012J012-A); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012JBZ006)

1 主要技术参数及测试情况

表1给出了用于神朔重载电气化铁路的SS4B型与HXD2型2种机车的主要技术参数。本文所提供的测试

表1 2种机车主要技术参数对比

项 目	SS4B	HXD2
用户	神华集团	神华集团
轴式	2(B ₀ -B ₀)	2(B ₀ -B ₀)
轴重/t	23	23(25)
额定功率/kW	6 400	9 600
电制动方式	加馈电阻制动	再生制动
制动功率/kW	5 300	9 600
持续制速度/km·h ⁻¹	50	70(65)
最高速度/km·h ⁻¹	100	120

数据均取自神朔线上行列车,由神木北运行至义井,为重车方向。测试列车编组情况如表2所示。

表2 测试列车编组信息

车次	940	352
牵引形式	SS ₄ B 双机重联	HXd ₂ 双机重联
总质量/t	5 675	5 676
载质量/t	4 158	4 158
重车/辆	66	66
空车/辆	0	0

2 工作原理

2.1 SS₄B 型机车

SS₄B 型直传动电力机车是由完全相同的2节4轴机车通过内部重联组成的8轴机车,并采用由大功率晶闸管与二极管组成的不等分三段半控桥相控整流调压电路^[1]。机车工作时,同一转向架的2台电动机并联,由同一套整流装置供电,工作原理如图1所示。其中VD1、VD2、VT1、VT2组成Ⅰ桥,VD3、VD4、VT3、VT4组成Ⅱ桥,VD3、VD4、VT5、VT6组成Ⅲ桥^[2]。半控整流电路只能调节直流电压的平均值,而不能改变电压的极性,所以SS₄B型电力机车不能进行再生制动。

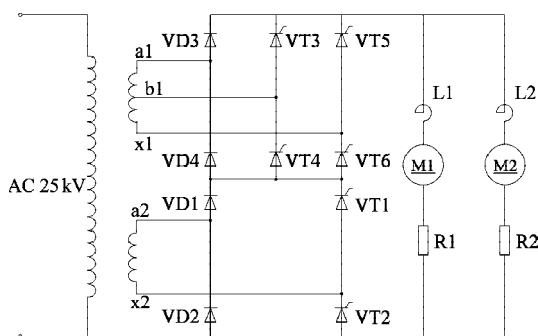


图1 SS₄B 电力机车主电路

假设 U_{D0} 为所有桥均满开放时的整流输出电压,则不等分三段半控桥相控整流调压电路的工作过程如下:

①绕组a2-x2投用。Ⅰ桥工作,VD3、VD4续流,调节VT1、VT2的触发角 α_1 进行调压,直流输出平均电压 U_D 为:

$$U_D = \frac{1}{4}U_{D0}(1 + \cos \alpha_1) \quad (0 < \alpha_1 < \pi) \quad (1)$$

②绕组a1-b1、a2-x2投用。Ⅰ桥、Ⅱ桥工作并保持 $\alpha_1=0$,调节VT3、VT4的触发角 α_2 进行调压,直流输出平均电压 U_D 为:

$$U_D = \frac{1}{2}U_{D0} + \frac{1}{8}U_{D0}(1 + \cos \alpha_2) = \frac{1}{8}U_{D0}(5 + \cos \alpha_2) \quad (0 < \alpha_2 < \pi) \quad (2)$$

③二次绕组全部投用。相当于Ⅰ桥、Ⅲ桥工作,保持 $\alpha_1=0$ 、 $\alpha_2=0$ 调节VT5、VT6的触发角 α_3 进行调压,直流输出平均电压 U_D 为:

$$U_D = \frac{3}{4}U_{D0} + \frac{1}{8}U_{D0}(1 + \cos \alpha_3) = \frac{1}{8}U_{D0}(7 + \cos \alpha_3) \quad (0 < \alpha_3 < \pi) \quad (3)$$

在机车运行过程中,各晶闸管的工作情况由机车牵引控制系统决定,通过对牵引手柄的控制调节机车的运行速度。SS₄B型机车具有恒流启动准恒速运行控制的牵引特性和恒制动力准恒速控制的制动特性。

2.2 HXd₂ 机车

HXd₂交流传动电力机车采用单轴独立驱动方式,每台电机都有自己独立的牵引变流装置。牵引变流装置的组成如图2所示,由1个四象限整流器、1个中间直流环节和1个三相PWM逆变器组成。

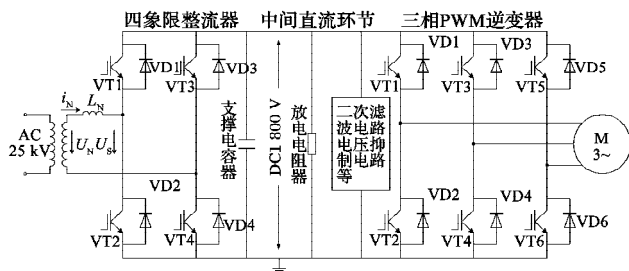


图2 HXd₂ 机车牵引变流装置电气原理

四象限整流器实际上就是单相PWM整流器,PWM整流与相控整流相比可以减少低次谐波含量、提高系统功率因数。四象限整流器与支撑电容器将牵引变压器二次侧的950 V交流电压变换为1 800 V直流电压。中间直流环节除支撑电容器外,还包括二次滤波电路、测量与保护电路、电压抑制电路以及放电电阻器等^[3]。中间直流环节的主要作用有:将直流电压稳定在规定范围内、降低谐波含量。三相PWM逆变器将直流电压变换为电压和频率可变的三相交流输出,为牵引电机提供电能,并进行速度特性控制。

由于PWM整流器能够实现电能的双向流动,既可以工作在整流工况又可以工作在逆变工况,所以HXd₂机车能够将制动时产生的电能回馈到电网,从而实现再生制动^[4]。

3 功率因数

电力机车产生的功率因数是衡量机车性能的一个重要指标,它表明了机车作为负荷时对供电设备容量的利用效率。机车主电路结构与控制方式是决定功率因数的最主要因素。功率因数的定义为:

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \phi_1 + U_2 I_2 \cos \phi_2 + \dots}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots} \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}} \quad (4)$$

由于牵引供电系统的电流和电压的谐波畸变率都要明显大于公用电网,在计算功率因数时如果采用简化公式(忽略电压谐波含量)计算误差过大,本文的功率因数采用式(4)计算,考虑到50次以内的谐波。

机车功率因数过低会带来诸多危害,主要有:

①增加整个牵引供电系统的电压损失, 降低电压水平;

②增加整个牵引供电系统的功率损耗, 增加运营成本;

③降低牵引变压器等供电设备的容量利用率;

④变电所功率因数若低于0.9, 会引起罚款, 增加电费支出。

3.1 使用SS4B机车的功率因数

整流电路中的平波电抗器以及电机绕组使机车成为感性负载, 平均功率因数偏低。为此直流传动电力机车经常装设PFC设备以提高机车对应的功率因数, 同时起到滤波作用。SS4B电力机车主电路设有4组完全相同的PFC装置, 并联于各牵引绕组, 并通过滤波电容和滤波电抗器的串联谐振来降低机车的3次谐波含量、提高机车对应的功率因数^[5]。但实际运行中PFC装置的晶闸管由于过电流以及晶闸管误导通产生的过电压等原因经常烧毁, 致使绝大多数机车的PFC装置被弃用。本次测试机车的PFC装置没有投用。

通过对测试数据的计算整理得到图3功率因数与机车有功功率的关系以及图4功率因数与机车速度的关系。从图中可以看出SS4B机车在有功功率小于2 MW或者速度小于30 km/h时对应的功率因数很低。因此司机操作应尽量避免出现长时间的小功率运行, 减少频繁启停和持续低速运行。

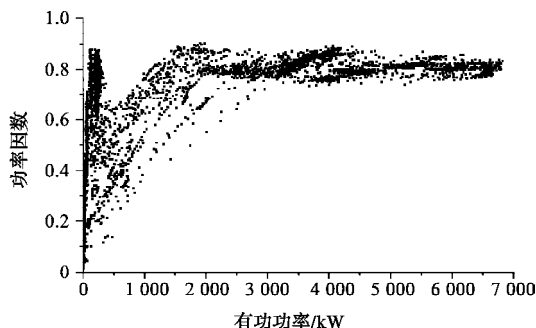


图3 SS4B机车功率因数对有功功率散点图

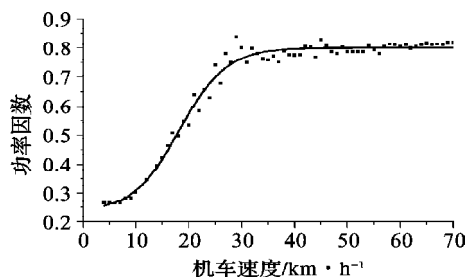


图4 SS4B机车功率因数与机车速度关系

3.2 使用HXD2机车的功率因数

HXD2机车的四象限整流器采用正弦脉冲宽度调制技术, 可以在其网侧得到幅值、相位、频率可控的正弦电压 U_s 。如图5所示(未考虑变压器的电阻)只需控制电压矢量 U_{s1} (网侧电压 U_s 的基波分量), 使其端点在与牵引变压器二次侧电压 U_N 垂直且与其端点相交的直

线上, 则可获得机车牵引工况时接近1.0和制动工况时接近-1.0的功率因数。

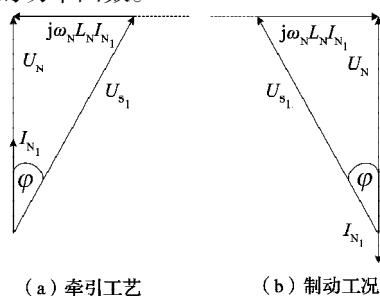


图5 基波矢量图

图6为HXD2机车功率因数与有功功率的关系, 其中负值功率表示机车再生制动功率。从图中可以看出HXD2机车仅当有功功率在0附近时才会出现功率因数较低的情况。制动工况的功率因数略低于牵引工况, 但当再生制动功率超过2 MW后功率因数也接近1.0。

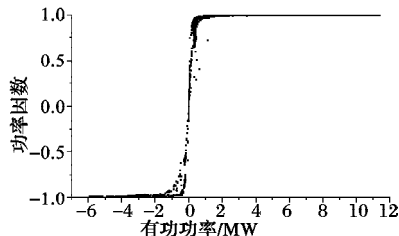


图6 HXD2机车功率因数对有功功率散点图

功率因数的提高可以大大减小无功电流, 减少牵引供电系统的电压损失。在设计交流传动机车占主导地位的线路时, 可以适当延长供电臂, 减少甚至不设无功补偿装置。

4 谐波电流

电力机车的整流器是一种典型的单相非线性设备, 因此电力机车在运行时必将产生谐波电流。由于不同型号的机车, 工作原理、电路结构以及控制策略均有所不同, 所以各类型机车的谐波分布有着各自的特点。机车在运行过程中各次谐波电流含量可看作是动态随机变化的, 本文利用实测数据给出谐波电流的主要统计值, 绘制谐波含量频谱图所用的数据均为机车在相近工况下多组统计数据的平均值。

4.1 SS4B机车产生的谐波电流

直流传动电力机车的特征谐波主要为低次谐波, 对各次谐波含量影响最大的因素是机车运行级位。3、5、7、9次谐波含量一般最大。图7给出了当机车电流为额定值时50次以内的谐波平均含量。图8给出了SS4B机车的3、5、7、9次谐波与基波电流有效值的关系。

从图7、图8中可以发现谐波含量随着谐波次数与电流有效值的增加而减少。直流传动电力机车的谐波产生机理以及分析计算方法有较多文献做了深入研究。例如, 通过建立机车主电路的数学模型, 导出机车电流的数学表达式, 利用快速傅立叶变换计算机车电流的谐波分量^[6]; 考虑机车运行时的主要随机因素,

应用蒙特卡罗法, 对大样本进行取样, 计算出随机谐波电流分布函数^[7]。本文只给出SS4B电力机车谐波电流的实测数据分析结果, 不再对谐波产生机理及计算方法做深入讨论。

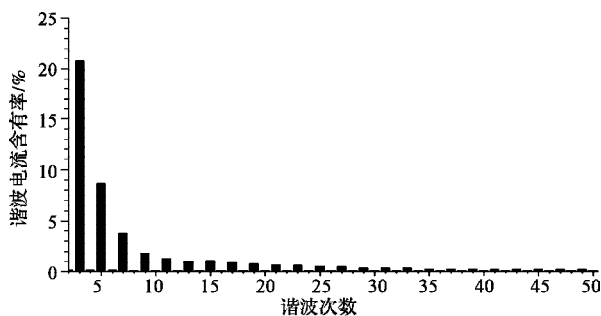


图7 SS4B 机车电流为额定值时谐波频谱

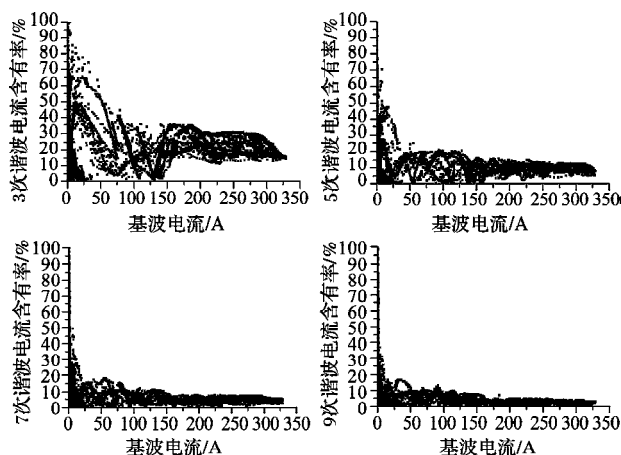


图8 3、5、7、9次谐波含量

4.2 HXd2交流传动电力机车产生的谐波电流

交流传动电力机车对应的谐波含量比直流传动电力机车小得多, 但高次谐波丰富, 主要集中在载波频率倍数附近。当机车在牵引工况下电流为额定值时统计的平均谐波含量如图9所示。

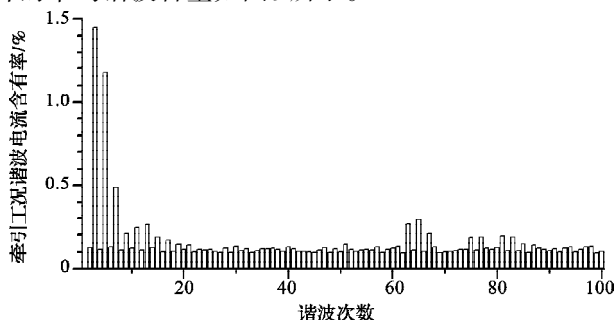


图9 HXd2 机车牵引工况电流为额定值时谐波频谱

神朔铁路采用上下行并联供电, 同一供电臂的上、下行方向有运行的SS4B 机车, 会使牵引网电压畸变增大, 而牵引网谐波电压会导致单相PWM整流器网侧谐波电流的增大^[8]。因此当线路上全部运行交流传动机车时, 由于谐波电压的减少, 谐波电流含量也会有所降低。从图9中可以看出HXd2 机车的最主要谐波依然是3、5、7次谐波, 但63、65次谐波也比较明显。图10为3、5、63、65次谐波电流含量与机车基波电流的关系。

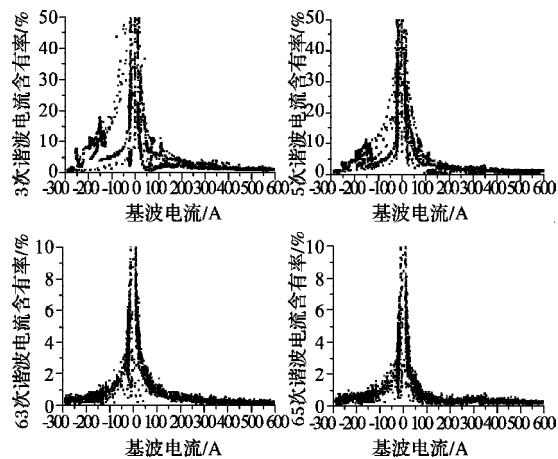


图10 3、5、63、65次谐波含量

图11对HXd2机车50%额定电流时各次谐波含量做了对比。可以看出制动时的谐波含量明显大于牵引工况。

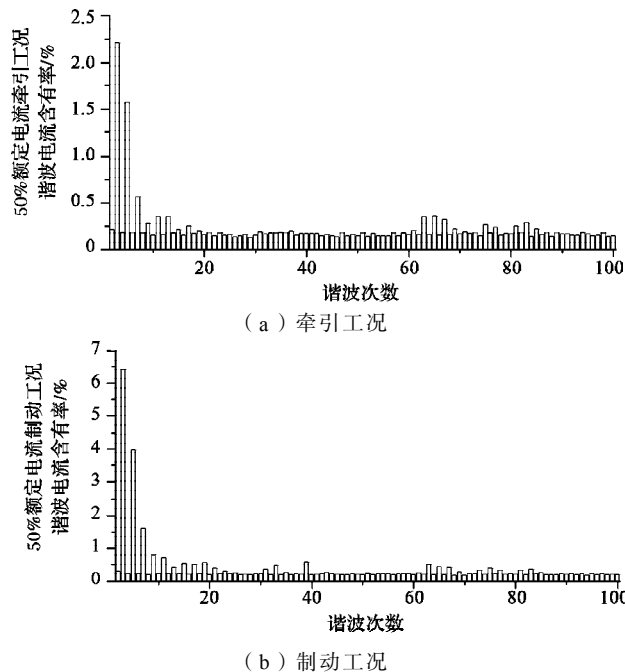


图11 HXd2 机车50%额定电流时谐波频谱

不同类型的交流传动机车因为主电路和控制策略的不同, 谐波特性有着各自的特点, 如文献[9-10]介绍的HXd3电力机车和CRH380AL动车组的谐波频谱就与HXd2存在一定差异。建议有关部门尽快对我国各新型机车做一次系统的测试分析, 掌握各型机车对应的谐波频谱, 为电气化铁道供电设计和车网谐振等问题研究提供准确基础数据。

5 能耗

机车能耗与诸多因素有关, 主要包括机车属性、线路属性、运行状态、编组情况、天气情况、司机操作等其他相关因素^[11]。

由于本文分析机车能耗时, 列车是在同一条线路上运行且编组情况基本相同, 在忽略天气情况、司机操作等因素后, 机车能耗的差异主要是由机车效率以

及电气制动方式不同引起的。SS_{4B}机车的制动原理是在制动时将原来驱动轮对的电动机改为发电机运行, 并将电流通过专门的电阻器, 消耗列车动能产生制动作用。制动时列车仍需从接触网吸收功率供给列车辅助用电并提供牵引变压器空载电流。HXD₂机车采用再生制动, 除去列车辅助用电外全部回馈到电网, 节能效果非常明显。

将测试的2列列车按供电臂分别进行能耗统计, 统计结果以柱状图的形式在图12中列出。图中正值表示列车消耗电能, 负值表示列车进行再生制动(线路为下坡区段时)向电网反馈的电能。可以看出在上坡区段2种机车的能耗是基本相等的; 而在下坡区段HXD₂机车再生制动回馈的电能是很可观的。表3给出了测试的2列列车由神木北上运行至义井过程中的能耗统计值, 可以得知采用HXD₂机车比SS_{4B}机车节能将近20%。我国煤运重载线路的主要任务是将煤炭从西部山区运送到东部沿海港口, 因此重车方向多为长大下坡道, 采用交流传动电力机车后能够节约大量电能, 减少运营成本。

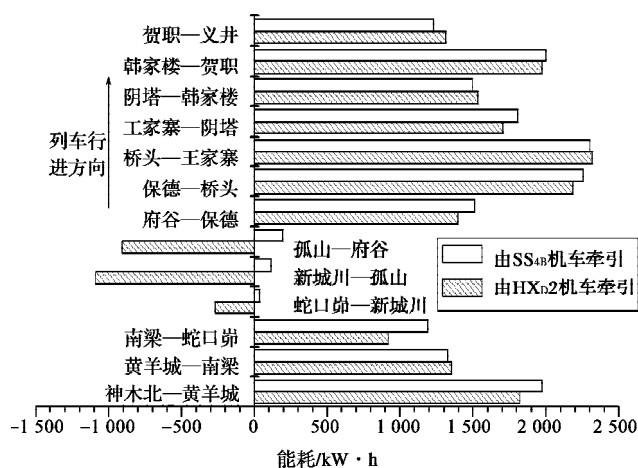


图12 列车各供电臂能耗对比

表3 列车能耗对照 kW·h

牵引机车	牵引能耗	再生制动	总能耗	万t·km 能耗
SS _{4B}	17 458	0	17 458	185
HXD ₂	16 534	2 263	14 271	149

6 结语

通过上文的对比分析可以知道, 以HXD₂为代表的交流传动机车, 在任何运行状态下对应的功率因数都明显高于直流传动机车。我国直流传动机车已停产, 今后投运的机车均为交流传动, 这一点应在今后的牵引供电系统设计中加以注意, 充分考虑机车功率因数的提高对供电系统的影响。

交流传动机车的谐波电流含量也明显减少, 但其存在的高次谐波对供电系统的具体影响, 目前还有待深入研究, 近几年的运行实际表明, 交流传动机车产生的高次谐波可能会引发车网谐波谐振, 危害比较大。对各种新型机车的谐波特性进行系统的实测分析是十分必要的。具备再生制动能力的交流传动机车相比直流传动机车在大坡道重载铁路上节能效果明显。

参考文献:

- [1] 周光海. SS_{4B}型电力机车(1)[J]. 机车电传动, 1996(3): 12-14.
- [2] 李建华, 豆凤梅, 夏道止. 韶山IV型电力机车谐波电流的分析计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 10-13.
- [3] 张中, 张金平, 李国锋. HXD₂型大功率交流传动货运电力机车牵引电传动系统[J]. 机车电传动, 2008(6): 5-8.
- [4] 刘志刚, 叶斌, 梁晖. 电力电子学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 181-182.
- [5] 周光海, 叶彪. SS_{4B}型电力机车(4)[J]. 机车电传动, 1996(6): 17-20.
- [6] 徐春侠, 李庚银, 赵成勇, 等. 韶山IV型电力机车谐波分析[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 40-46.
- [7] 韩奕, 李建华, 黄石柱, 等. SS₄型电力机车的动态模型及随机谐波电流计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 31-36.
- [8] 高吉磊, 张雅静, 林飞, 等. 单相PWM整流器谐波电流抑制算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 32-39.
- [9] 宋可荐, 吴命利. 基于实测数据的HXD₃型电力机车电气负荷特性分析[C]//第六届电能质量国际研讨会论文集. 北京: 中国标准出版社, 2012: 86-90.
- [10] 宋可荐, 吴命利. CRH380AL动车组电气负荷特性分析[C]//第七届中国高校电力电子与电力传动学术年会论文集. 上海: 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育重点实验室, 2013: 216-220.
- [11] 薛艳冰, 马大炜, 王烈. 列车牵引能耗计算方法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 84-87.

动态消息

中国南车研发世界最大功率混合动力机车

4月28日, 中国南车资阳公司正式启动2 500 kW混合动力机车研究。与同等功率内燃机车相比, 该混合动力机车可减少燃油使用量50%以上, 全年可减排SO₂、CO、NO_x等有害物质500余吨。

混合动力机车具备多个能量源, 具有低油耗、低排放两大优势, 能够有效减少煤炭、石油等高碳能源的使用, 减少温

室气体排放, 被称为节能环保“绿色”机车。据了解, 美国、德国、法国、日本等国相继进行了混合动力机车的技术研发和样机试制。目前已知的世界上投入运用的混合动力机车的最大功率为1 200 kW。

据了解, 中国南车资阳公司此次启动的2 500 kW混合动力机车是装用大功率动力电池组和6L280电喷柴油机、采用交流传动技术的六轴大功率调车内燃机车。它将实现柴油发电机组、蓄电池组单独或两者混合向牵引电动机提供动力, 具备传动交流化、制造标准化、组装模块化、维护简单化等特点。

(朱一迪)

