

HXN6 型大功率混合动力机车电传动及控制系统

尚 敬^{1,2}, 何 良¹, 刘顺国³, 李小文¹, 王平华³

- (1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;
3. 中车资阳机车有限公司, 四川 资阳 641301)

摘 要: HXN6 型机车是为我国铁路研制的大功率交流传动混合动力内燃机车, 也是目前全世界功率最大的混合动力内燃机车。机车采用了大容量磷酸铁锂电池作为动力电池, 与柴油机联合提供动力, 采用新型主辅传动一体化电路及控制技术。文章对 HXN6 机车牵引主传动系统、微机网络控制系统、辅助传动系统等的构成和技术特点进行了详细介绍。机车在试验及应用考核过程中表现出了卓越的节能减排性能。

关键词: 交流传动; 牵引系统; 混合动力; 动力电池; HXN6 型内燃机车

中图分类号: U267.1; U262

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.004

Electrical Driving and Control System of HXN6 High-power Hybrid Diesel Locomotive

SHANG Jing^{1,2}, HE Liang¹, LIU Shunguo³, LI Xiaowen¹, WANG Pinghua³

- (1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Zhuzhou, Hunan 412001, China;)
3. CRRC Ziyang Co., Ltd., Ziyang, Sichuan 641301, China)

Abstract: HXN6 locomotive is a high-power AC drive hybrid diesel locomotive developed for railways in China, and it is also the largest power hybrid diesel locomotive at present. Large capacity lithium iron phosphate battery was used as power battery for locomotive, and power supply was combined with diesel engine. The new main auxiliary drive integrated circuit and control technology were adopted. The structure and technical characteristics of HXN6 locomotive traction main drive system, microcomputer network control system and auxiliary drive system were introduced in detail. Locomotive in the test and application of the appraisal process showed excellent performance in energy saving and emission reduction.

Keywords: AC drive; traction system; hybrid power; power battery; HXN6 hybrid diesel locomotive

0 引言

随着现代工业技术高速发展, 能源和环境对人类生活和社会发展的影响越来越大, 节能减排、低碳经济已经越来越受到各行业的重视。

蓄电池技术以及应用技术的进步, 成本的不断下降, 能量密度的持续提升, 电池空间、重量的降低, 使得动力电池在轨道交通机车车辆装车成为可能, 动力电池在轨道交通机车上的装车, 尤其是在内燃机车上的应用, 具备明显的优势, 一方面可以补充内燃机车柴油发电机组动力的不足, 大幅降低柴油机装车功

率要求，机车设计可以选择小型柴油机，降低排放；另一方面可以回收牵引电机制动反馈能量，更好地满足机车短周期作业要求，减少柴油机怠速等待时间，机车整车应用经济性增强。

2013 年，中国铁路总公司与中国中车签订了科技研发计划课题合同《2 000~2 500 kW 混合动力机车研制及双燃料机车技术方案研究》，中车资阳机车有限公司和株洲中车时代电气股份有限公司联合，开始了 2 000~2 500 kW 混合动力调车机车的研制。2015 年，厂所联合完成样机出厂。2015 年至 2016 年，铁道科学研究院组织对机车进行了长达 1 年多的整车型式试验，顺利通过了在北京环形铁道牵引性能试验、在新疆的夏季高温试验、在加格达奇的冬季低温试验等，机车型号为 HXN6，样机机车编号为 0001#。

1 机车主传动系统

1.1 机车主要性能参数

HXN6 型机车用于调车牵引，机车设计运行速度 100 km/h，采用了柴油机与大容量动力蓄电池混合动力，柴油机装车功率 1 250 kW，动力电池采用磷酸铁锂电池，

电池装车电量 1 500 kW·h。

机车主要性能参数如下：

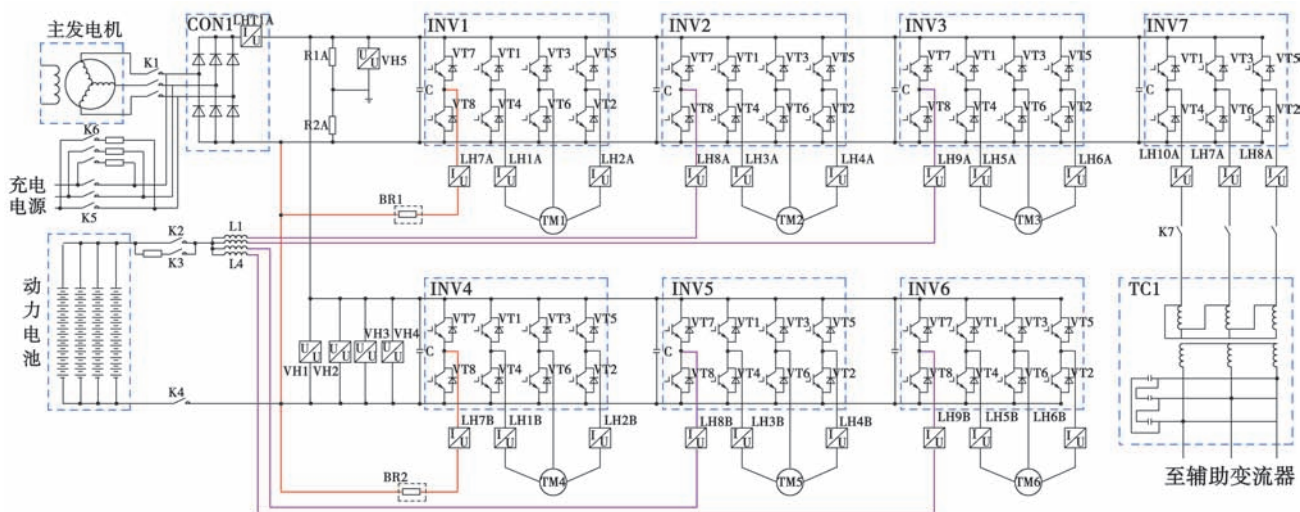
传动方式	交流电传动
轨距	1 435 mm
轴式	C ₀ -C ₀
机车最大小时功率（中间直流环节）	≥ 2 200 kW
柴油机最大运用功率	1 250 kW
蓄电池电量	1 500 kW·h
机车轮周功率	1 850 kW（小时功率） 890 kW（纯柴油机工况，持续制）

机车制动

最大制动功率	≥ 2 400 kW
最大制动力（计算轮径 1 200 mm）	≥ 320 kN
最大运营速度	100 km/h
持续速度	≤ 13 km/h（混合动力工况）
最大恒功速度	100 km/h
最大启动牵引力（计算轮径 1 200 mm）	≥ 560 kN
持续牵引力（计算轮径 1 200 mm）	540 kN

1.2 机车主传动系统

机车主传动系统原理图如图 1。



⑤机车具备电阻制动工况牵引电机反馈能量存储和再利用功能, 牵引电机反馈能量除小部分给辅助系统供电外, 大部分由动力电池充电存储, 主发电机设计为不发电状态。

⑥动力电池分 4 路接入中间直流环节, 通过 4 个滤波电感器、4 个逆变模块 IGBT 斩波元件与中间直流环节耦合, 具备大电流充电和放电能力, 能瞬间回收机车全部 2 400 kW 牵引电机制动反馈能量。

⑦机车设置外接充电电路, 通过整流器整流为中间直流, 通过逆变模块 IGBT 斩波元件控制动力电池充电电流。

⑧机车具备 2 路制动斩波、机车快速放电以及中间过电压抑制等功能。

1.3 电传动系统主要部件及参数

1) 主发电机

主发电机采用卧式、轴向强迫通风的三相凸极同步发电机, 由柴油机直接驱动。主发电机为机车提供牵引动力, 绝缘等级均为 H 级。

主发电动机主要参数:

额定容量	1 500 kVA
定子结构	单绕组
额定转速	1 000 r/min
额定效率	95% (含励磁功率, 不含风扇)
额定功率因数	0.95
整流后额定输出电压	1 500 V
整流后额定输出电流	950 A
励磁方式	他励
冷却方式	径向自通风

2) 动力蓄电池组

机车动力电池系统由 22 个磷酸铁锂动力电池模块串联组成, 每个动力电池模块标称电压 64 V, 额定容量 1 068 Ah, 每个模块具有自己的蓄电池检测系统, 其采集的主要参数包括单体电池电压、电池温度等。动力电池安装在机车内部的专用蓄电池室, 采用强迫风冷。动力电池可以单独实现机车牵引功能, 也可以和柴油机共同实现牵引功能。

动力电池主要参数:

蓄电池类型	磷酸铁锂电池
单节电压	DC 3.2 V
蓄电池组额定电压	DC 1 408 V
蓄电池容量	1 068 Ah

3) 牵引电动机

牵引电动机采用三相鼠笼式异步牵引电动机, 滚抱结构, 200 级绝缘。牵引电机根据电压型 PWM 逆变器供电的特点进行特殊设计, 能保证在 PWM 逆变器的整个输出电压、频率范围内电机的脉动转矩、损耗和噪声均满足相关标准要求。牵引电动机能够承受由于机车运行时所产生的振动和冲击, 以及由于电气突

然短路时产生的短路转矩。

牵引电机主要参数:

工作制	连续
额定功率	520 kW
额定电压	805 V (基波有效值)
额定电流	478 A (基波有效值)
恒功率转速范围	473~2 630 r/min
额定频率	26.4 Hz
额定转速	513 r/min
效率	0.915
额定转矩	9 670 N·m
启动转矩	10 500 N·m
极数	6
最大启动电流	545 A (基波有效值)
最高电压	1 326 V (基波有效值)
最大工作转速	2 630 r/min
最高运行频率	1 33 Hz
绝缘等级	H 级
绕组接线方式	星形
冷却方式	强迫风冷

4) 牵引变流器

牵引变流器为大功率 IGBT 模块组成的 PWM 变流器, 采用电压型、二电平电路结构。牵引变流器的中间直流环节主要由中间直流环节支撑电容、主接地保护电路组成。主接地保护电路用于变流器主电路接地检测。牵引逆变器设有过压、接地、过流、过热、短路等保护功能。

牵引变流器整流器主要参数:

额定侧电压	AC 1 200 V
额定整流电压	DC 1 500 V
额定整流电流	DC 950 A
冷却方式	水冷

逆变器主要参数:

电路形式	二点式 VVVF
额定直流输入电压	1 500 V
最大输出电压	AC 1 326 V
最大输出电流	AC 6 × 545 A
额定输出电流	AC 6 × 478 A
输出频率	133 Hz
冷却方式	水冷

1.4 牵引制动特性曲线

机车具备纯柴油机工况、纯电动工况、混合动力工况 3 种运行作业模式。纯柴油机工况由柴油机单独提供牵引动力, 轮周牵引功率为 900 kW。纯电动工况由动力电池提供牵引动力, 柴油机不工作, 按照电池 1.5C 最大放电倍率, 轮周功率可达 1 900 kW。机车柴油机和动力电池混合供电情况下, 最大轮周功率可达到 2 800 kW。牵引特性曲线如图 2 所示。

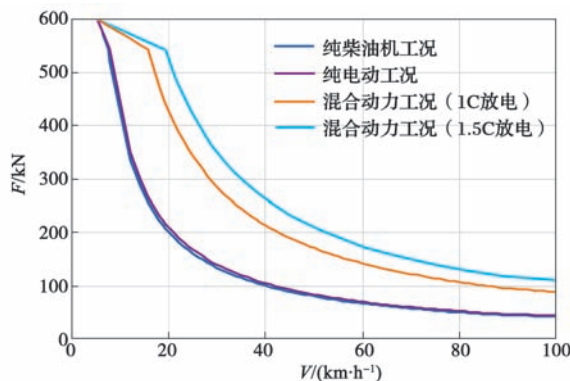


图2 牵引特性曲线

机车电阻制动特性曲线如图3，分为3段：机车速度100~27 km/h为恒功制动区，轮轴制动功率2 800 kW，制动力从100 kN升至360 kN；机车速度27~5 km/h为恒制动力区，保持最大制动力360 kN；机车速度5~0 km/h，电阻制动力线性下降至0。

在机车制动时，采用电制动优先的原则，优先执行电制动，尽可能多回收能量，给动力电池充电，达到节能的目的，电制动不足部分由空气制动系统补充制动力。

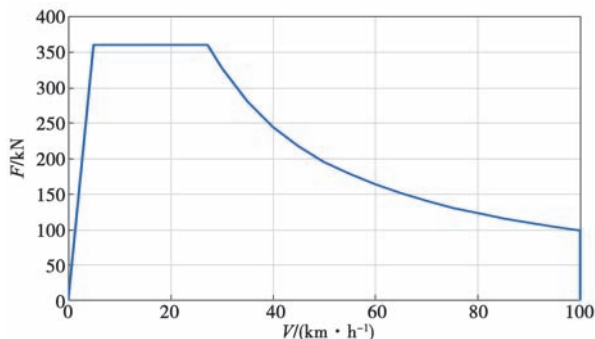
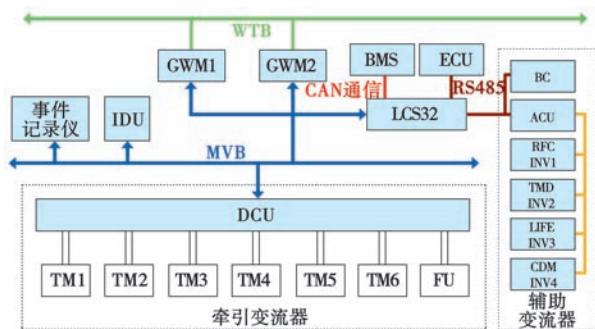


图3 电制动特性曲线

2 机车网络控制系统

机车网络拓扑图如图4所示。



GWM1/ GWM2—TCN 网关；LCS32—机车级微机控制系统；DCU—传动控制单元；BMS—动力电池管理系统；ACU—辅助控制单元；BC—充电器；IDU—机车显示器；ECU—柴油机电喷控制器；RFC—冷却风扇电机控制单元；TMD—牵引电机通风机控制单元；LIFE—380 V 其他辅助负载逆变控制单元；CDM—空压机控制单元

图4 机车网络拓扑

机车采用分布式控制系统，多网络通信，通信主网采用TCN网络，机车级通信采用MVB网络。网关模块GWM与机车主控制设备，包括机车级微机

LCS32、传动控制单元DCU、人机智能接口单元IDU等采用MVB总线通信，交换机车实时数据信息和状态信息。机车预留了WTB总线作为车辆级通信，传递重联机车的指令信息、状态信息以及故障事件信息。

机车采用了CAN、RS485等多总线与其他第三方控制设备通信。机车级微机LCS32与电池管理系统BMS采用CAN总线通信，与柴油机电喷控制器ECU采用RS485总线通信，与辅助控制单元ACU采用RS585串行通信。语音报警器AAP、燃油监视仪FTM采用RS485通信，机车采用以太网用于设备的调试和网络数据的监视以及与部分6A设备的通信。

机车配置了大容量事件记录仪用于运行故障与状态数据的记录。

通过网络控制系统协调，混合动力机车具备完善的控制策略，采用动力电池优先的工作模式，依据蓄电池剩余容量和司机控制器手柄位的不同，确定柴油机的工作状态，既保证了机车的牵引能力，充分发挥混合动力调车机车的性能，又兼顾了蓄电池工作的最佳状态，达到最佳的节能以及动力电池循环使用效果。

2.1 机车级微机 LCS32

机车装备一套LCS32微机，LCS32为多处理器控制系统，基于内燃机车32位微机控制平台进行适应性设计，主控制器采用32位MC68332微处理器、标准EXP机箱结构。机箱插箱为母板总线结构，所有外围插件、板卡均通过连接器经母板总线互连。板卡包括数字输入板、模拟量处理板、频率及串口通信板、数字输出及斩波控制板、柴油机调速板等。

机车级微机LCS32接收来自司机操纵台或其他车重联通信发来的指令信号，按照机车运行特性要求，结合机车的运行状态，与传动控制单元DCU、辅助控制单元ACU、动力电池管理系统BMS等一起，共同完成机车的运行控制和保护。

机车级微机LCS32主要功能有柴油机启动控制、柴油机调速、柴油机停机控制、动力蓄电池过充和过放保护、动力蓄电池温度过低和过高保护、主发电机输出功率控制、牵引/制动逻辑控制、牵引/制动特性计算、机车轴重转移补偿控制、机车输出功率手动控制、机车重联控制、通信管理、故障诊断与记录、故障切换管理、无人警惕功能、机车加载电路逻辑控制、空电联锁控制、空气制动系统状态检测、柴油机保护、主发电机保护等。

2.2 传动控制单元 DCU

机车装备1台牵引变流柜。牵引变流柜设有1套DCU，控制2台转向架的6台牵引逆变模块和1台辅助逆变模块。牵引逆变模块和辅助逆变模块采用集中控制方式，可以精确地平衡各类负载的功率需求与分配，系统匹配性强，响应实时性高，更好地满足柴油机在各个手柄挡位下的恒功率控制要求。

DCU采用TEC3000平台，内部采用32位的高速

微处理器 CPU 及 32 位的数字信号处理器 DSP 芯片, 60R 标准机箱结构, 从各插件的前面板输入/输出信号, DCU 与 IGBT 变流器模块之间通过屏蔽电缆传输触发脉冲和反馈信号, 实现对 IGBT 变流器模块控制。机箱内插件主要由开关电源板、SMC 单板、电机控制板、电机信号板、模拟输入板、脉冲转换板、数字入出板及通信接口板等组成。各插件上均有 LED 指示灯及测试孔, 可以方便地完成 DCU 运行状态监视和内部变量实时检测的功能。

传动控制单元 DCU 主要功能有: 牵引变流器的逻辑控制; 动力蓄电池充电和放电电流控制; 机车动力制动能量回收控制; 接受机车微机给定的力矩指令和机车状态, 利用直接转矩控制策略, 完成对电机的牵引力或制动力控制; 完成斩波器控制/直流电压过电压控制; 完成对变流器模块脉冲分配逻辑控制; 根据轮轨的粘着状态, 辨识粘着参数, 控制机车的牵引力/制动力, 使其不超过轨面可利用的最大粘着力; 根据中间直流环节的电压情况, 完成对中间直流环节的过压

保护调节控制。

2.3 电池管理系统 BMS

机车运行时, 电池管理系统 (BMS) 对动力电池进行实时检测, 在维护时, 提供地面分析软件与通信接口, 通过地面便携设备可以读取蓄电池管理系统中电池的性能参数数据, 并对数据进行分析与存储。

BMS 由主控、从控单元组成。主控单元作为电池管理系统总成的控制与管理核心单元, 负责对从控单元检测的数据进行实时处理, 匹配硬件完成信号采集、解析和处理, 对内网 CAN 总线进行管理。同时, 负责为 LCS32、DCU、IDU 和地面充电机的数据交换与过程控制。从控单元主要负责各单体电池电压信息采集, 电池模块温度采集以及电池模块内的散热风机控制。BMS 和电池模块内的风机供电都来自于整车提供的 DC 110 V。由于机车电源系统电压级别高, 采取了将整车提供的 DC 110 V 分别通过 4 个电池箱体内的 DC/DC 隔离电源转化为 24 V, 为 BMS 供电, 保证了 BMS 的供电可靠性, 增强了电源系统的绝缘隔离等级。

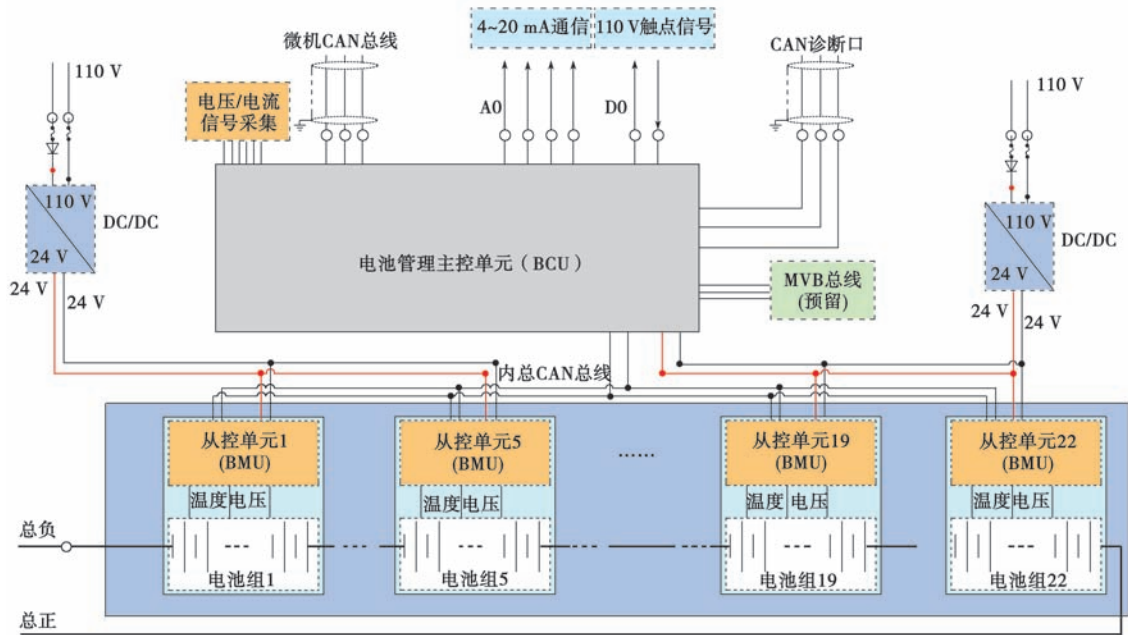


图5 蓄电池组管理系统原理框图

除了软件通信, 蓄电池管理系统 BMS 还设置了硬连线传输 BMS 的相关信息给机车控制系统, 如故障、容量报警信息、单体电压异常、松动报警等, 由机车控制系统设置保护功能, 避免磷酸铁锂电池深度放电。

蓄电池管理系统功能有: 剩余电量 SOC 估算; 放电深度 DOD 估算; 单体、电池组电压监控及显示; 充放电电流监控及显示; 电池模块温度监控; 过充、过放、欠充、过热、过流诊断; 单体电池状态异常报警 (在蓄池组容量不低于额定容量的 20% 允许值内, 单体电压超出设定的阈值时, 准确定位, 并输出报警信号; 在阈值限定内, 对所有单体进行综合评估, 对电压异

常的单体定位, 并输出相应提示信息); 电池组 SOH 估算; 故障分析与在线报警。

3 辅助传动系统

辅助变流系统从中间直流环节取电, 中间直流通过辅助逆变、隔离、滤波后提供集中的 480 V/87.4 Hz 三相交流电源, 为整车辅助电机及辅助负载提供电源。机车主要辅助负载包括 2 台 40 kW 牵引电机通风机、1 台 75 kW 冷却风扇电机、2 台 25 kW 空压机电机、380 V 空调及生活电源等。机车辅助系统原理框图如图 7 所示。

辅助系统主要参数如表 1。

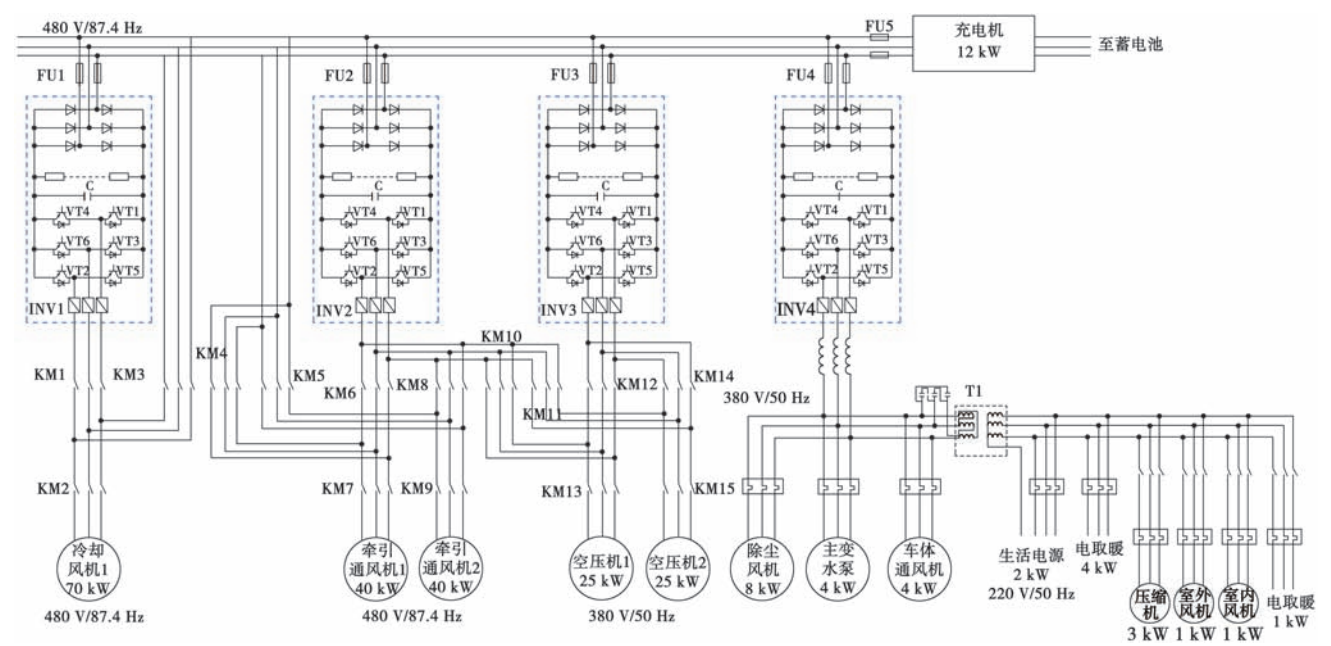


图 6 机车辅助系统原理图

表 1 辅助系统主要参数

电机	额定功率 / kW	额定电压 / V	功率因数	额定转速 / (r·min ⁻¹)	额定频率 / Hz	效率
牵引通风机电机	40	480	0.90	2 622	87.4	92%
冷却风扇电机	75	480	0.87	1 311	87.4	92%
空气压缩机电机	25	380	0.85	2 955	50	85%
主变冷却水泵电机	3.7	380	0.95	2 900	50	95%

辅助系统主要特点：

- ①主要辅助电机变频控制。机车冷却风扇电机、2 台牵引电机通风机采用变频变压方式供电。配置 2 台辅助变流模块，采用 480 V/87.4 Hz 三相电源，按照冷却温度要求提供恒压频比 PWM 波电源，进行辅助电机精确转速调节，恒定负载温度控制，最大限度节约辅助功率。
- ②空压机变频启动。每台机车配置 2 台空压机，额定功率 22 kW，工作电压 380 V/50 Hz。空压机启动频繁，为减小空压机启动对系统带来的冲击，辅变系统为空压机配置 1 台辅助变流模块，并采用变频变压启动，定频定压工作。
- ③380 V 生活供电。辅变系统为生活用电配置一台辅助变流模块，通过交直交变换将 480 V/87.4 Hz 三相电源转换为 380 V/50 Hz 三相电源，给机车除尘风机、水泵电机、车体通风机等提供电源，并经过 LC 正弦滤波器和升压变压器后输出三相四线额定 380 V/50 Hz 的正弦电压，为空调机组、电取暖、220 V/50 Hz 生活用电等负载提供电源。
- ④机车辅助系统冗余设计。系统为每个大功率负载独立配置接触器，方便直投或备用切换时的相互延时处理，以减少负载突变对电源端的冲击，有利于机车系统稳定。同时主要辅助电机变流模块具备了故障冗余降级运行功能，当模块故障时，可以采用直投电路将相关负载切换至 480 V/87.4 Hz 电源，直接供电。

当某一辅助变流模块故障时，可以将相关负载切换至由其他辅助变流模块供电。

⑤机车设置了 1 台 12 kW 充电机，为机车 110 V 蓄电池进行充电，为控制设备提供工作电源。

4 结论

2016 年，HXN6 型机车顺利通过铁道科学研究院为期 1 年的整车型式试验考核，包括北京环铁牵引性能试验、夏季高温试验、冬季低温试验等，各项指标表现良好。2017 年，HXN6 机车在哈尔滨机务段运用半年，累计运行里程 27 144 km，全勤通过编组作业、推峰作业和小运转作业等考核。中车资阳机车有限公司联合哈尔滨机务段统计了 HXN6 机车燃油消耗后得出结论：较 HXN5、HXN3 机车，HXN6 机车在编组、推峰等作业时节油 24.36%~31.55%；在哈尔滨至绥化线路上，同等情况下万吨公里油耗 HXN6 0001 机车比 HXN5 0200 机车节油 37.73%，较 DF₄C5135 机车节油 44.22%。

相比传统内燃机车，该机车节能减排优势明显，随着电池技术的进一步发展，混合动力机车必然成为后续新型能源机车的发展方向。

参考文献：

[1] 丁荣军, 黄济荣. 现代变流器技术与电气传动 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[2] 何良, 姚晓阳. CKD6E 混合动力机车电传动及控制系统 [J]. 机车电传动, 2012(4): 18–22.

[3] 陈智豪, 张义, 杨格, 等. HXN5 型大功率交流传动内燃机车电传动系统 [J]. 大功率变流技术, 2010(3): 46–50.

[4] Лувишис А Л. 国外混合动力机车的发展 [J]. 国外铁道机车与动车, 2015(6): 38–41.

[5] Kache M. 混合动力机车 [J]. 国外铁道机车与动车, 2016(4): 16–19.

作者简介：尚 敬（1977–），男，博士，教授级高级工程师，长期从事动车组和机车牵引控制技术与工程化研究。