DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.121

动力集中动车组电气系统关键技术分析与验证

李　鹏[1]，邹志超[1,2]
（1.株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲 412001；
2.沈阳铁路局安监特派办公室，辽宁 沈阳 110000）

摘　要：文章介绍了国外动力集中动车组的研究进展和典型应用，对各种车型的系统配置进行初步对比分析，结合中国动力集中动车组的研发技术水平和应用现状，提出了研制动力集中动车组技术的总体目标、技术特点、技术难点、技术方案，重点围绕动力集中动车组在牵引系统、DC 600 V 列车供电和网络控制系统等设计项点，开展关键技术分析与研制。地面试验和现场运营情况表明，该电气系统性能表现良好，能够满足动力集中动车组电气系统各项指标要求，其成功研制为完善国内“复兴号”动车组谱系和高铁“走出去”提供坚实的装备支撑。

关键词：动力集中动车组；电气系统；主电路拓扑；网络系统；DC 600 V；耦合发电

中图分类号：U266.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0109-13

0　引言

为了进一步发挥在既有线开行旅客列车的效益，提高运输效率，研发了速度 160 km/h 的动力集中动车组，其关键设备和动力装置集中安装于动车组的其中一端或两端的动力车上，实现列车牵引功能。列车编组模式包括短编动车组（1M+7T+1C）和长编动车组[1M+(7~15)T+1M]2 种固定编组类型[1]，具备技术成熟、编组形式灵活等特点。由于动力集中动车组设备集中布置，动力设备数量少，在成本方面具备一定优势，主要表现在以下 2 个方面：一是在舒适性方面，动力车布置在动车组的两端，远离客车车厢，可提高旅客乘车体验和人身安全性；二是在装备检修或换新方面，动力车与拖车车厢可以分别处置而互不影响，提高了检修效率和动车组可用率[1-2]。

本文将介绍国外动力集中动车组的发展现状，提出研制我国动力集中动车组的顶层技术指标和系统技术方案，并重点对其关键技术的应用进行详细分析。通过地面试验验证动车组的主要性能指标，为我国动力集中动车组电气系统的应用提供设计支撑和重要的理论依据。

1　国外动力集中动车组简介

动力集中动车组在国外已有 40 余年的发展历史，建立了系列化的产品平台，截至目前已经基本形成了以德国 ICE1/ICE2、法国 TGV 系列、西班牙 Tago350 和意大利 ETR-500 等为代表的动车组系列产品[3]，这些动力集中动车组基本参数如表 1 所示。

国外动力集中动车组应用主要以欧洲为主，其中主要以法、德为代表等国家，运营速度维持在 250~300 km/h。法国自 1978 年制造出第一列 TGV 高速列车以来，至今已发展到第四代高速列车，其中第一代为 TGV-PSE，第二代为 TGV-A 等，第三代为 TGV-2N，第四代为 AGV 高速列车。TGV 高速列车以安全、寿命长、载客量大著称，是世界各国高铁中的典范。德国自 1985 年完成高速试验列车 ICE-V 研制后，开始致力

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划合同（N2021J050）
通信作者：李　鹏（1981—），男，硕士，正高级工程师，主要从事牵引电传动系统技术研究；E-mail: lipengbl@csrzic.com
引用格式：李鹏, 邹志超. 动力集中动车组电气系统关键技术分析与验证[J]. 机车电传动, 2024(1): 109-121.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.121.
Citation：LI Peng, ZOU Zhichao. Analysis and verification of key technologies for electrical systems of power concentrated EMUs[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 109-121.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.121.

表 1　国外动力集中动车组主要技术参数对比

Table 1　Comparison of main technical parameters among foreign power-concentrated EMUs

参数名称	法国 TGV 系列		德国 ICE 系列		西班牙系列		意大利
	TGV-A	TGV-2N2	ICE1	IEC2	AVE	Talgo350	ETR-500
运营速度/(km·h^{-1})	300	320	280	280	300	350	300
供电方式	25 kV/50 Hz 或 DC 1.5 kV	25 kV/50 Hz 或 DC 1.5 kV	15 kV/16.7 Hz	15 kV/16.7 Hz	25 kV/50 Hz 或 DC 3 kV	25 kV/50 Hz	25 kV/50 Hz 或 DC 3 kV
编组方式	2M+10T	2M+10T	2M+(12~14)T	1M+7T	2M+8T	2M+12T	2M+11T
启动牵引力/kN	212.5	212.5	385.0	200.0	175.0	200.0	290.0
动力配置	首尾集中，非固定编组	首尾集中，非固定编组	首尾集中，非固定编组	头车集中，非固定编组	首尾集中，非固定编组	首尾集中，非固定编组	首尾集中，固定编组
额定牵引功率/kW	8 800	8 800	9 600	4 800	8 800	8 000	8 800

于 ICE1 型动车组的研制，之后相继发展了 ICE2、ICE3、新 ICE3、ICE4。西班牙的高速列车都是由西班牙国铁（Renfe）运营，拥有不同速度等级的高速列车，其包括准高速列车 Altaria，高速列车 Avant、Alvia 和 AVE。动力集中动车组具有快速、舒适度高、编组灵活、折返换端时间短等特点，符合铁路装备现代化发展和以人为本的铁路服务理念，满足拓展快速客运网半径、完善区域铁路网功能的需要，使其在国内外轨道交通领域占据一定市场份额。

2　系统概述

中国的动力集中动车组是根据中国国家铁路集团有限公司运输和经营发展需要，为提高普速线路运输服务品质，充分利用普速线路的运输资源和既有机车、客车的检修资源而研制的，主要运营线路为普速线路和新建的客货混运线路，最高运营速度为 160~250 km/h。研制秉承“先进、可靠、成熟、经济、必须”的方针，遵循“技术先进、安全可靠、简统化、自主知识产权、节能环保、降低全寿命周期成本、充分利用既有机车和客车检修资源”的基本原则，采用标准化统型设计、应用模块化、集成化的设计理念，以降低设计成本，提升组装工艺水平和后期产品的维护性。

动力集中动车组速度等级为 160 km/h，列车动力编组模式包括短编动车组（1M+7T+1C）和长编动车组[1M+(7~15)T+1M]2 种方式。系统需要满足车辆动力性能、故障运行、救援能力要求，实现预期的运行速度，同时需要考虑系统各参数匹配和满足动车组特殊的运行工况及电气性能要求[3]。

2.1　系统构成

牵引电传动系统构成如图 1 所示，主要分为高压电器部分与控制设备部分。牵引变压器通过软连接母排与牵引变流器连接，牵引变流器通过交–直–交变换，

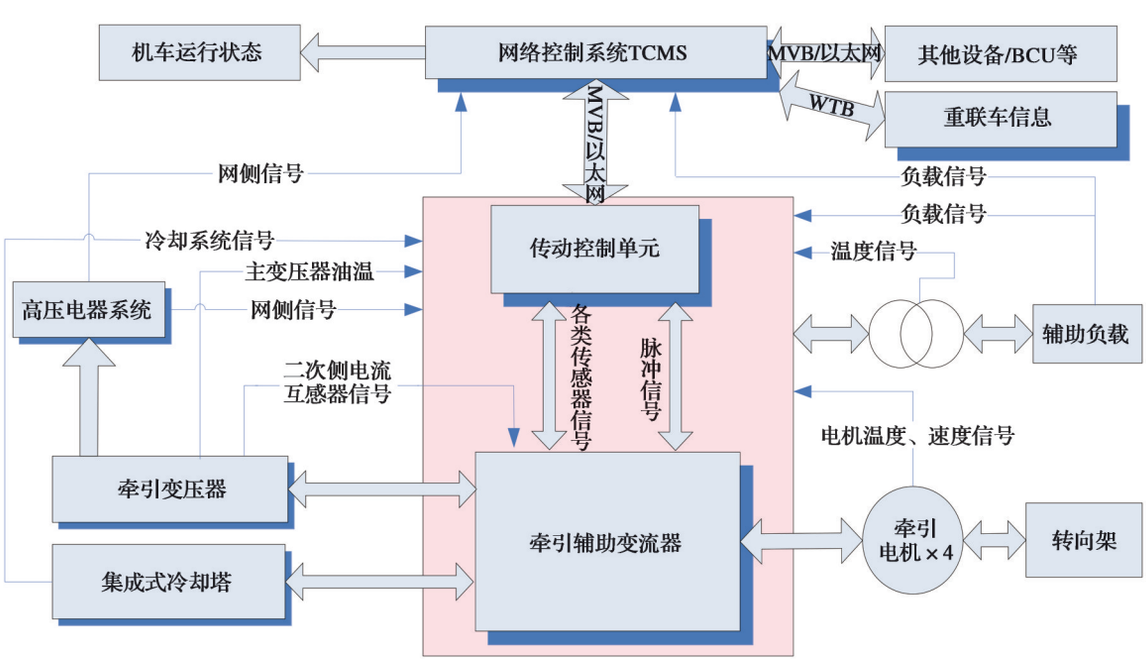


图 1　牵引电传动系统构成示意图

Fig. 1　Composition diagram of traction electric drive system

为牵引电机提供电压和频率可调的供电电源，实现对列车的牵引和调速。传动控制单元通过采集网侧、电机侧和IGBT模块等设备运行时的信号参数，提供控制与保护功能，并与网络控制系统进行实时通信。网络控制系统则通过列车级或车辆级总线进行整车系统参数调节、运行和故障信息的传递等。

2.2　系统技术指标

动力集中动车组速度等级为160 km/h，列车动力单元配置模式为1M+7T+1C，每个动力单元配置有牵引变压器、牵引辅助变流器和牵引电机。动车组牵引系统的最大轮周功率为4×1 600 kW，辅助供电容量为220 kVA。动力集中动车组牵引系统基本技术参数如表2所示。

表2　动力集中动车组基本技术参数

Table 2　Basic technical parameters of power-concentrated EMU

参数名称	参数值	参数名称	参数值
轨距/mm	1 435	编组形式（短编）	1M+7T+1T
轴式	B_0-B_0	动力车轴重/t	19.5^{3}_{-1}%
齿轮传动比	102/23	拖车最大轴重/t	17
最高运营速度/(km·h^{-1})	160	乘客额定载荷/kg	43 200 (720×60)
最高试验速度/(km·h^{-1})	176	轮径/mm	1 250(新轮)/ 1 200(半磨耗)/ 1 150(全磨耗)
动力车轮周功率/kW	5 600（短时6 400）		

根据动车组设计要求，牵引系统至少要达到以下牵引能力：

①在平直道和定员载荷条件下，动车组在速度0～40 km/h的平均加速度不小于0.3 m/s^2；

②在平直道和定员载荷条件下，当动车组以160 km/h速度运行时，其剩余加速度不小于0.05 m/s^2。

当动车组发生设备故障时，动车组牵引系统应具备以下故障运行能力：

①当动车组发生25%以下（含）动力失效时，在定员载荷下，可全程往返1次，根据动车组运行的特性，降低运用性能，避免对牵引部件造成损坏；

②当动车组发生50%动力失效时，在定员载荷下，可在12‰的坡道上起动，并运行到最近车站；

③当一列满载的动车组因故障停在12‰的坡道上，动车组能够对同一类型的故障动车组进行救援，具体要求如下：

a. 动车组在速度0～40 km/h的平均加速度为0.35 m/s^2；

b. 当动车组的速度为160 km/h时，其剩余加速度为0.14 m/s^2；

c. 当动车组损失25%动力时，运行在平直道的动车组可按照速度160 km/h运行；

d. 当坡道的坡度为12‰，动车组50%动力失效时，可以起动并运行，均衡速度为103 km/h；

e. 当坡道的坡度为12‰时，无故障动车组可对同一类型的故障动车组实施救援，救援时的均衡速度为103 km/h。

动力车运行阻力为

$$W = 1.09 + 0.0014v + 0.000303v^2 \quad (1)$$

式中：W为动力车运行阻力，kN；v为动车组运行速度，km/h。

拖车运行阻力为

$$W' = 1.61 + 0.0004v + 0.000187v^2 \quad (2)$$

结合整车质量、传动比、阻力公式、设计要求、设计参数，经过牵引计算，整车牵引与制动特性曲线分别如图2和图3所示。

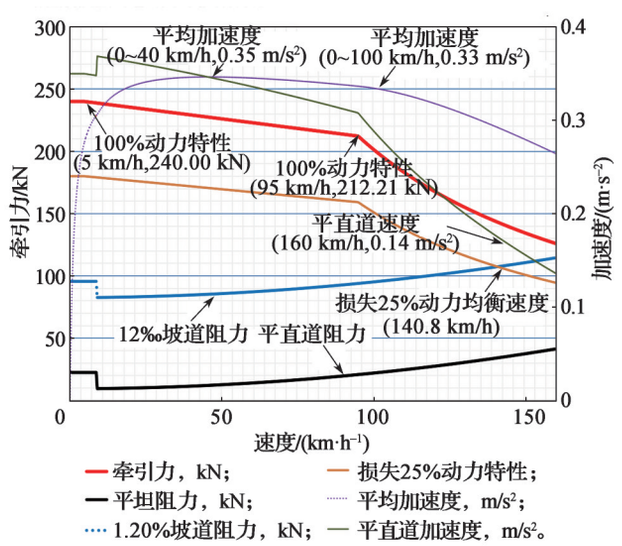


图2　牵引特性曲线

Fig. 2　Traction characteristic curve

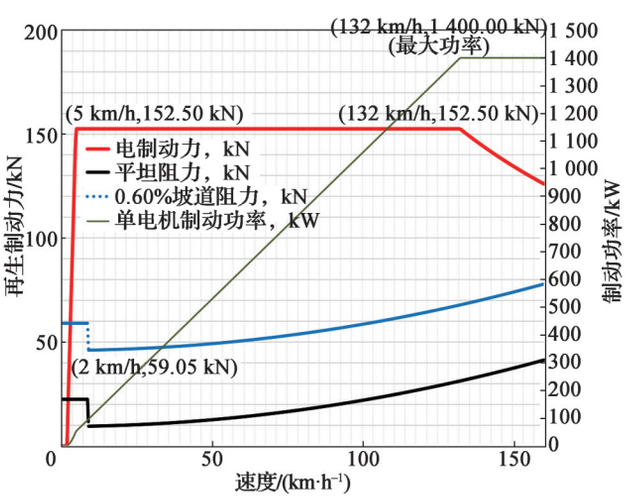


图3　制动特性曲线

Fig. 3　Brake characteristic curve

结合计算结果可知，动车组的牵引设计性能可以满足正常运营和救援的要求。

3 牵引电传动系统关键技术

动力集中动车组采用1节动力车（单机）或者2节动力车（双机重联）首尾相连运行，当牵引电传动系统发生故障，由于动力不足就会直接导致动车组降速运行，甚至会影响动车组的运行安全，因此动力集中动车组牵引电传动系统技术方案选择尤为重要，涉及控制系统的全冗余设计、主电路拓扑的冗余切换、列车供电系统的不间断供电等，相关技术直接关系到列车的安全运行。

牵引传动系统的运行特性需满足动力集中动车组的牵引和制动特性曲线。另外，考虑动力集中动车组对轴重要求较高等因素，需要考虑列车关键部件的轻量化设计[3]；为尽量发挥动力集中动车组的经济性优势，在设计中也要求牵引系统关键设备检修费用低、维修方便，以及尽可能达到不停运检修，全面提高动力集中动车组的运行可靠性。牵引电传动系统关键技术参数如表3所示。

表3 主要部件参数

Table 3 Parameters of main components

设备		参数值	设备		参数值
牵引变压器	容量/kVA	6 752	牵引电机	额定功率/kW	1 430
	一次侧绕组额定电压	AC 25 kV/50 Hz		短时功率/kW	1 630
	二次侧绕组额定电压	AC 2 011 V/50 Hz		最高电压（基波）/V	2 808
	额定效率/%	96		起动电流/A	480
牵引变流器	标称直流电压/V	3 300~3 600		工作频率/Hz	0~147
	冷却方式	强迫水循环冷却		效率/%	95
	效率/%	97.5			

3.1 主电路拓扑及其控制技术

根据动力集中动车组整车系统的顶层技术指标要求，开展共中间回路有二次谐振回路单轴硬件隔离和独立轴控无二次谐振回路2种电路拓扑的技术研究，其关键技术参数如表4所示。

表4 牵引变流器关键技术参数

Table 4 Key technical parameters of traction converter

电路拓扑		参数值	电路拓扑		参数值
中间直流回路（有二次谐振回路）	标称直流电压/V	3 300~3 600	VVVF逆变器（有二次谐振回路）	输出电压范围/V	AC 0 ~ 2 808（三相）
	支撑电容/mF	5(1×5)		额定输出电流/A	AC 430（三相）
	谐振电容/mF	7.2(6×1.2)		最大输出电流/A	AC 480（三相）
	谐振电感/mH	0.35	VVVF逆变器（无二次谐振回路）	输出电压范围	AC 0 ~ 2 700（三相）
中间直流回路（无二次谐振回路）	标称直流电压/V	3 500		额定输出电流	AC 435（三相）
	支撑电容/mF	12(6×2)		最大输出电流	AC 515（三相）
四象限输入（有二次谐振回路）	额定输入电压	AC 2 011 V/50 Hz	四象限输入（无二次谐振回路）	额定输入电压	AC 1 950 V/50 Hz
	额定输入电流/A	AC 803		额定输入电流	AC 940
	最大输入电流/A	AC 911		最大输入电流	AC 1 044

1）共中间回路主辅一体化牵引变流器

共中间回路单轴硬件隔离拓扑如图4所示，其中牵引变流器内部包含2个独立的中间直流回路，每个中间回路集成2路牵引变流装置和1路辅助变流装置，为2台牵引电机和1路辅助回路供电，直流回路设置有二次谐振回路。为解决IGBT模块故障造成的切架故障隐患，通过在直流回路增加电动隔离开关，实现当任何一轴发生故障时，并不影响其他回路的正常运行，提高动车组电气系统的运营可用性[3]。

辅助逆变器和牵引变流器共用中间回路，为辅助系统提供2路130 kVA的变压变频和恒压恒频电源，当其中任意一路发生故障后，辅助逆变器通过冗余配置，提供220 kVA恒压恒频电源供给辅助负载。

2）无二次谐振独立中间回路牵引变流器

完全独立中间回路拓扑如图5所示，其中，牵引变流器内部包含3个独立的中间直流回路，分别是2路牵引变流装置和1路辅助变流装置，为2台牵引电机和1路辅助回路供电，为实现系统的轻量化设计，采用无二次谐振回路，取消二次谐振电感，从而减小牵引系统的体积和重量。

辅助变流器采用独立绕组供电方式，通过AC/DC四象限整流模块和DC/AC逆变模块为辅助系统提供2路130 kVA的变压变频和恒压恒频电源，当其中任意一路发生故障后，辅助变流器提供220 kVA恒压恒频电源给辅助负载。

3）共中间回路单轴硬件隔离控制技术

动力集中动车组牵引电传动系统在共中间回路方案的基础上增加了电动隔离开关，在严重故障情况下可通过电动隔离开关实现轴与轴之间的硬件隔离，在保障系统高度集成的同时，提高了动车组的运营可用

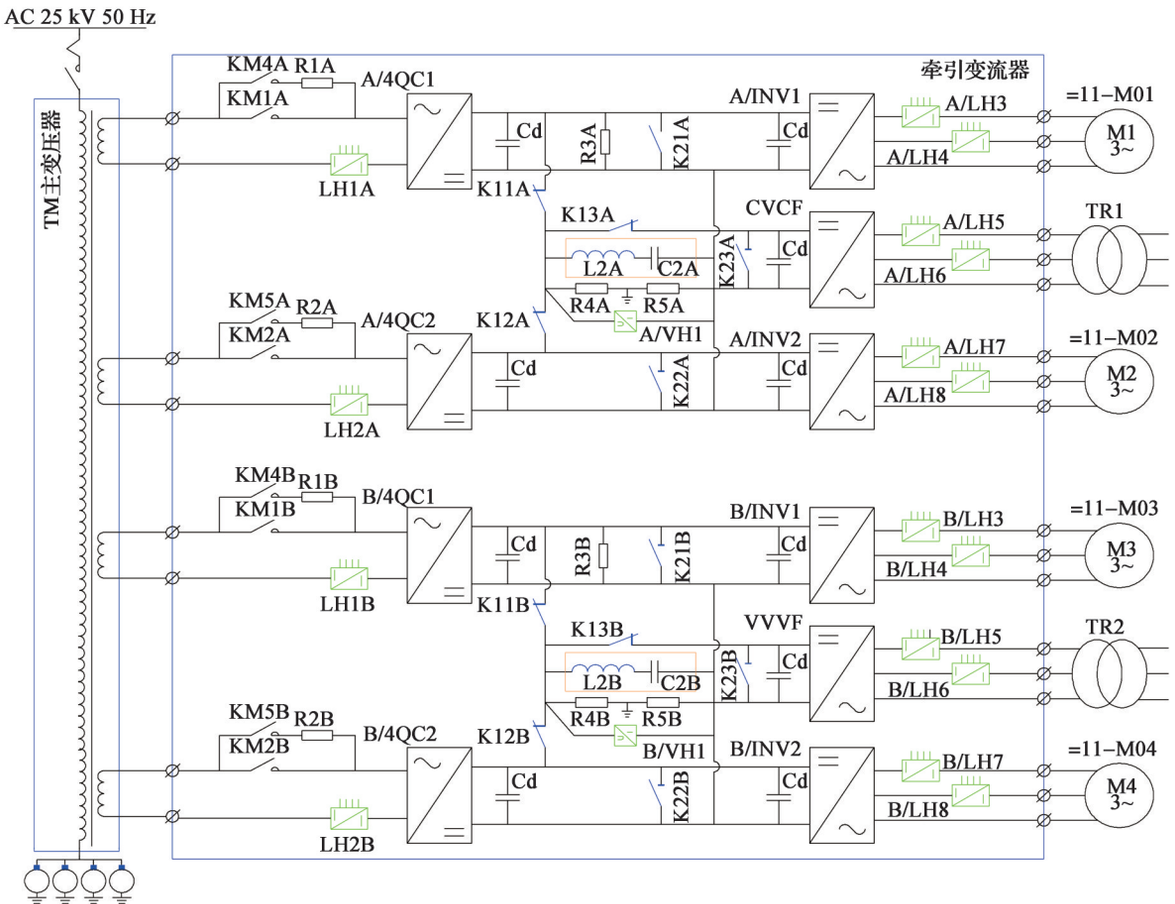


图4　共中间回路单轴硬件隔离主电路

Fig. 4　Main circuit for single axis hardware isolation with common intermediate circuit

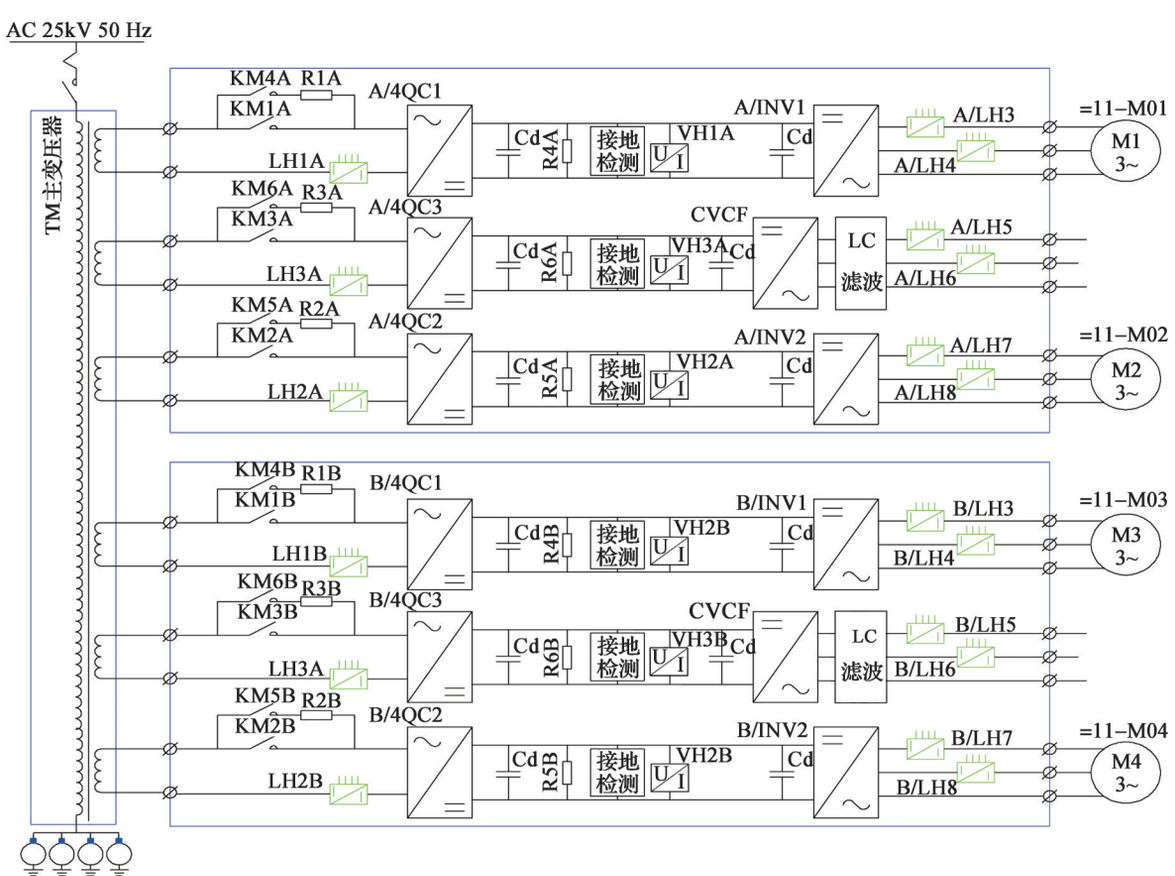


图5　独立轴控无二次谐振主电路

Fig. 5　Main circuit for independent axis control without secondary resonance

性。当中间直流环节出现短路或接地故障时，牵引变流器停止工作并开通斩波回路，快速泄放中间直流回路的能量，隔离开关通过主触头（K11A/K12A/K13A）分合操作将对应故障轴切除，并保持辅助触点闭合（K21A/K22A/K23A），对隔离轴正负电位进行限位，防止运行过程中的能量累积造成系统二次故障，电动隔离开关原理如图6所示。

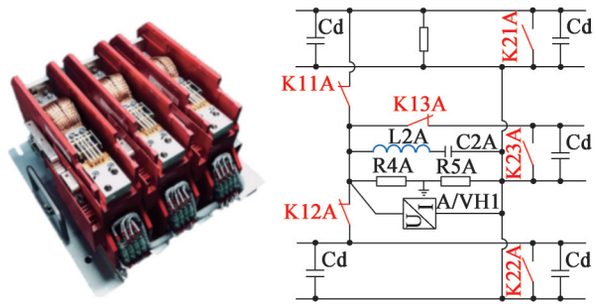


图6 电动隔离开关外形及原理图

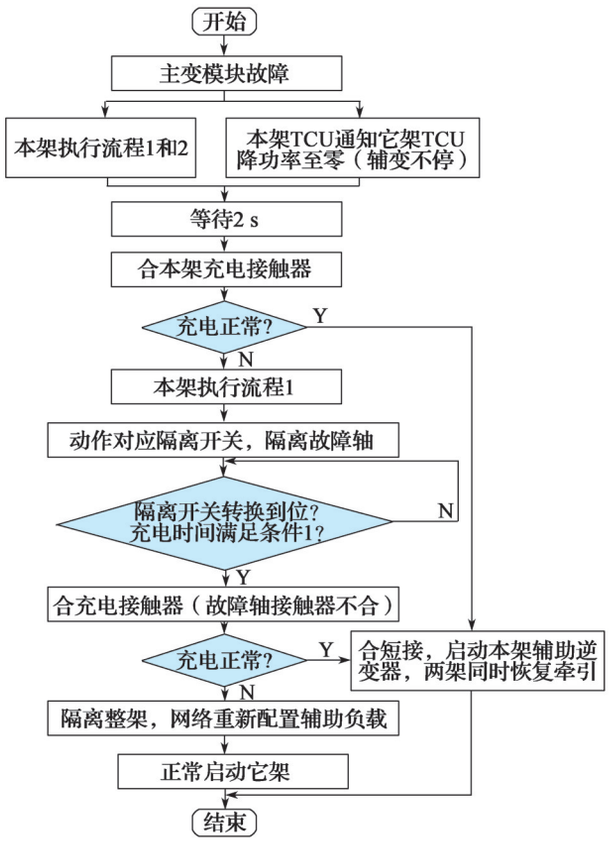
Fig. 6 Outline and schematic diagram of electric disconnector

中间直流回路增加了隔离开关，使得中间直流环节的并联复杂度增加，寄生参数会在直流电路上增加额外的谐振点，进而影响并联效果。因此，在设计阶段，通过相关软件仿真获取并联环节的寄生电感，将此电感值代入仿真模型，分析线路的谐振点和谐振频率，并进行了试验验证，试验结果表明此频率点对牵引变流器运行几乎没有影响[4]。隔离开关的工作逻辑如图7所示。

4）轴功率1 600 kW无二次谐振控制技术

由于牵引变流器采用单相脉冲整流器，其固有的工作特性会在直流侧产生2倍电网频率的二次脉动电压。在常规情况下，通过在直流回路设置LC谐振滤波电路来消除二次脉动电压的影响。为满足现代化动车组的技术发展，取消二次谐振滤波电路，降低制造成本，实现轻量化设计。但当中间直流回路未设置LC谐振滤波回路时，直流侧的二次脉动电压会对牵引电机运行造成较大的影响，二次脉动电压一方面会在网侧产生低次电流谐波，另一方面会引起逆变侧电机的拍频现象，造成转矩脉动，在定子和转子中产生额外的损耗，降低牵引电机的效率和寿命[5-6]。无二次谐振的电路拓扑如图8所示。

取消二次谐振LC回路后，采用电机拍频抑制控制技术，可有效降低二次脉动电压的影响，减小电机电流出现低频波动。电机拍频抑制控制技术是在每个控制周期内，根据检测到的牵引逆变器直流环节的电压瞬态值，实时调整各电压矢量开关时间，从而在控制周期内仍能满足伏秒平衡，保证逆变器输出电压的有效值尽可能地接近理想值，在每一个控制周期内的电压矢量与时间乘积等于理想的电压与时间乘积，消除二次脉动电压带来的影响，获得稳定的电机输出电流，从而保证输出转矩的稳定。通过实测数据对比两者在谐波电压和谐波电流两方面的差异，如图9和图10所示。



注：流程1：封锁该架所有模块脉冲，断开该架短接接触器，斩波放电；流程2：模块只要报一次管故障，就隔离该模块。

图7 硬件隔离工作流程

Fig. 7 Hardware isolation workflow

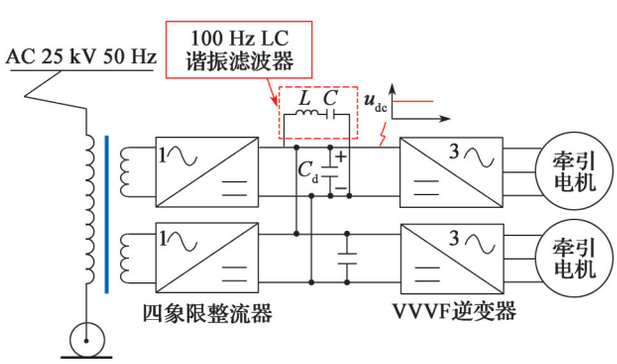


图8 主电路二次回路系统

Fig. 8 Secondary circuit system of main circuit

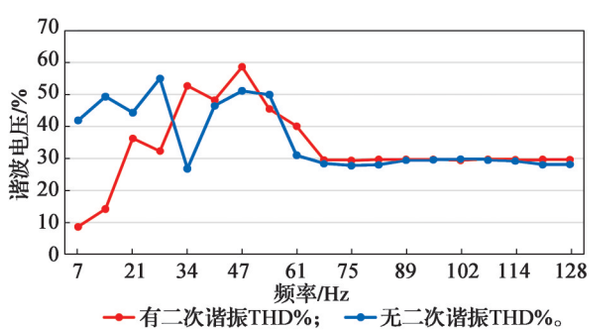


图9 输出电压THD对比

Fig. 9 Comparison of output voltage THD

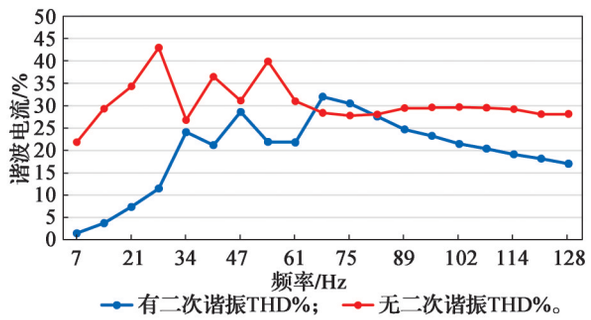


图 10　输出电流 THD 对比

Fig. 10　Comparison of output current THD

3.2　列车供电系统关键技术

列车供电系统主电路拓扑如图 11 所示，供电系统通过牵引变压器获取单相输入交流电，经四象限脉冲整流器将输入的单相交流电整流为 DC 600 V 输出，给后端的客车负载提供直流电源。列车供电系统输出 2 路电源，每路额定功率为 200 kW，在冗余模式下，单路具备 300 kW 的输出能力[7]。

四象限整流列车供电技术（以下简称“四象限列供”）可大幅改善列车供电品质，改善网侧谐波性能和提高功率因数。相对于传统的相控列车供电装置（以下简称“相控列供”），四象限列供装置在重量和体积上具有明显优势。同等容量的列车供电系统采用四象限整流技术与相控变流技术对比如表 5 所示。

表 5　关键技术指标对比

Table 5　Comparison of key technical indicators

对比项目	四象限列供	相控列供
体积/mm^3	750×700×2 000	1 100×900×1 800
质量/kg	600	750
功率因数	0.99	0.90

为进一步验证四象限列供运用的实际性能指标，在某线路开展数据测试，具体测试波形如图 12 所示。

取某一时间点数据波形放大，如图 12(b)所示，输出电压有效值为 AC 597 V，第一重支撑电容电压有效值为 DC 602 V，第二重支撑电容电压有效值为 DC 606 V，第一重输入电流有效值为 AC 86.0 A，输出总电流有效值为 AC 111.3 A，第二重支撑电容电流有效值为 DC 11.0 A，测试结果表明相关性能指标满足列车供电要求。

3.3　过分相耦合发电技术

当动车组列车进入分相区时，在微制动的工作模式下，牵引电机作为发电机运行，通过逆变器控制，维持牵引回路直流电压恒定，再通过四象限整流器回馈至牵引变压器，通过变压器二次侧绕组耦合对辅助和列供绕组供电，实现辅助系统和列供系统在中性区

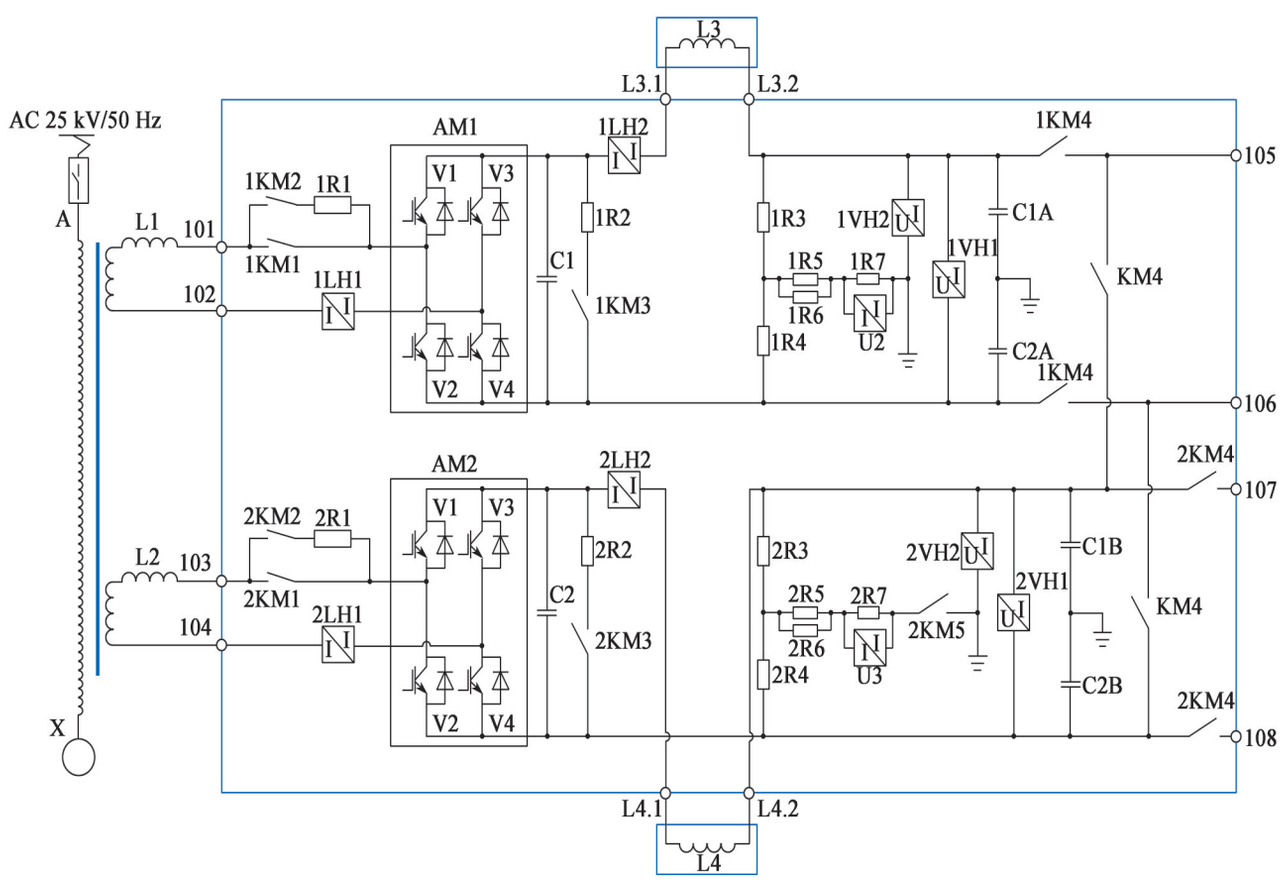
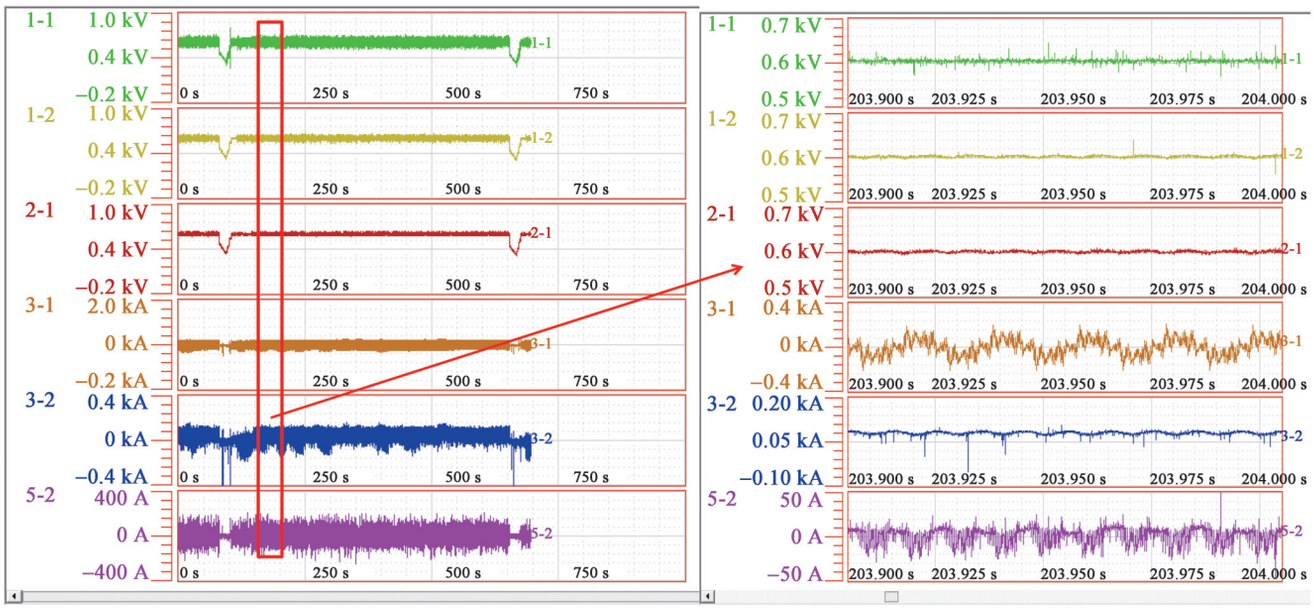


图 11　列车供电系统主电路

Fig. 11　Main circuit of train power supply system



(a) 实测数据　　(b) 局部放大图

1-1:第二重支撑电容电压;1-2:第一重支撑电容电压;2-1:输出电压;3-1:第一重输入电流;3-2:输出总电流;5-2:第一重支撑电容电流。

图 12　四象限列供实测数据

Fig. 12　Train power supply data based on four quadrant rectifier

获得能量，解决辅助设备和客车设备在过分相时的断电问题。牵引变压器作为能量耦合传递的媒介，直接影响牵引绕组与辅助、列供绕组之间能量耦合的传递效率，辅助系统和列供系统不断电技术的关键在于如何更好地实现牵引系统和辅助列供系统控制策略下的能量交互。

当动车组列车在分相区时，牵引电机进入微制动发电模式，依靠牵引逆变器稳定中间直流电压，四象限整流器将能量反馈到牵引变压器二次侧绕组，利用变压器二次侧绕组耦合，实现在分相区的辅变、列供不断电运行[8]，列车过分相不断电能量流动路径如图 13 所示。

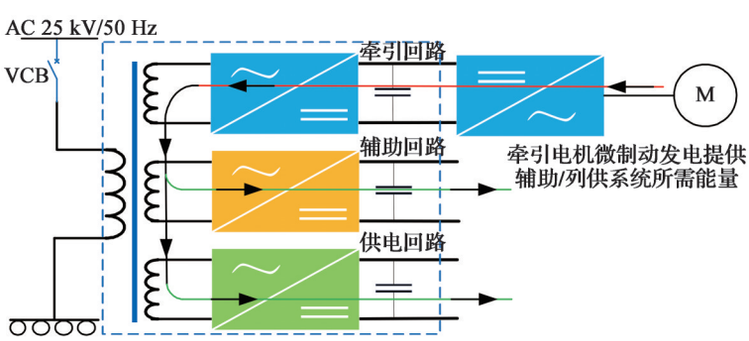


图 13　过分相不断电能量流动

Fig. 13　Uninterruptible electric energy flow for passing neutral section

在地面模拟动车组列车过分相试验，采用牵引电机微制动发电模式，制动能量通过牵引变压器二次侧绕组耦合给辅助系统和列车供电系统提供能量，保持辅助系统和列车的不间断供电。其中，辅助系统容量设定为 200 kVA，列车供电电源功率 300 kW，当列车过分相时，各信号情况如图 14 标定所示[9]，动车组过分相全过程分为 4 个阶段：*a*→*b*→*b*→*a*，“G1”为预告信号，“G2”为强断信号，“G3”为合信号，“G4”为预告信号。

根据过分相流程，耦合发电全过程分为 5 个阶段，试验过程中牵引变压器一次测感应电压与接触网实际

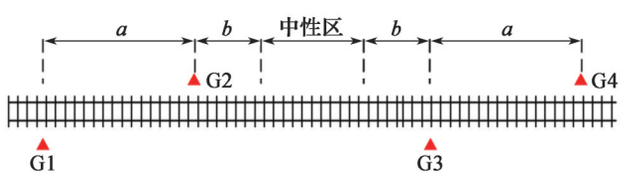


图 14　过分相过程图

Fig. 14　Process diagram of passing neutral section

电压如图 15 所示。其中，阶段 1 为动车组接收到过分相预告信号，由正常控制模式向过分相控制模式转换，主断路器处于闭合状态；阶段 2 为动车组启动过分相辅助列供不间断供电控制模式切换，主断路器断开；阶

段 3 为动车组进入分相区，网压信号消失；阶段 4 为动车组出分相区，接触网网压信号恢复；阶段 5 为动车组完成过分相控制模式，向正常控制模式切换，主断路器重新闭合，过分相耦合发电过程结束[10]。

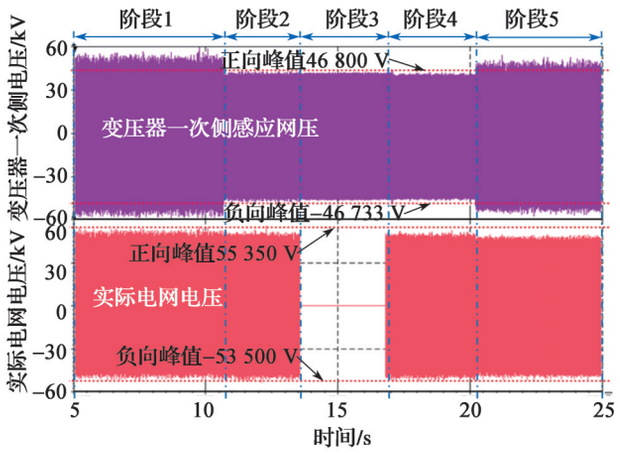


图 15　过分相不间断供电电压波形

Fig. 15　Waveform of uninterruptible power supply function for passing neutral section

当动车组由正常牵引模式切换至过分相发电模式后，在断开主断路器时刻，变压器一次侧感应网压与实际网压波形以及进分相区前主断路器断开前后的波形如图 16 所示。

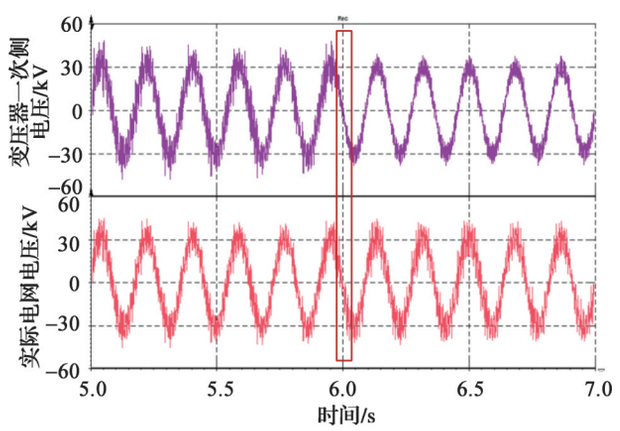


图 16　主断路器断开后感应电压与实际网压波形

Fig. 16　Waveforms of induced voltage and actual grid voltage after main VCB disconnection

动车组出分相无电区后，完成控制模式切换，变压器一次侧感应电压与实际网压波形，以及出分相区后主断路器闭合前后波形如图 17 所示。

通过牵引变压器二次侧耦合发电技术，可实现独立绕组供电的辅助系统和列供系统在列车过分相期间设备的不间断供电，对相关技术的应用完成了地面试验验证和现场运用考核。试验结果表明，实现本技术具备可行性，为避免由于系统耦合发电产生的谐振过电压问题[8]，建议通过增加高压互感器等硬件采样设备，实现系统的闭环控制，保证系统的可靠性与稳定性。

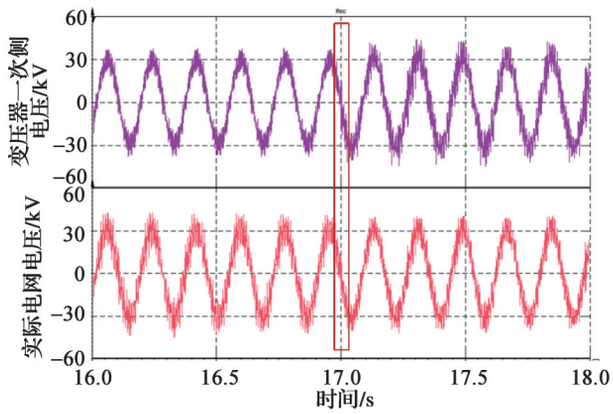


图 17　过分相发电模式切换回正常牵引模式感应电压与实际网压波形

Fig. 17　Waveforms of induced voltage and actual grid voltage upon switching to normal traction mode from power generation mode for passing neutral section

3.4　网络控制系统关键技术

动力集中动车组的网络控制系统采用分布式控制技术，由 WTB/MVB 网关模块 EGWM、事件记录模块 EDRM、数字量输入输出 IOM 单元、LonWorks 网关和司机室显示单元 DDU 等组成，通过车辆总线 MVB/ECN 与传动控制单元 TCU、列车供电系统 ETS、制动控制单元 BCU 等智能设备进行通信，与客车 TCDS 系统通信则通过 LonWorks/ECN 总线[11]，网络控制系统拓扑如图 18 所示。

①通过优化恒速算法和斜率控制算法，实现列车的平稳性控制，现场实测波形如图 19 所示。采用基于加速度的增量式 PID 控制算法用于实现恒速控制，根据加速度限制曲线和速度控制简化模型，简化增量式 PID 控制算法，有效地避免积分调节原始速度差累积误差，抑制超调，同时简化增益参数调节方式，明显有效地提高了恒速控制精度和平稳性。采用多模型自适应斜率控制模式优化斜率控制，分别建立了动车组过分相、紧急牵引、转矩模式和速度模式等不同动力模型，采用斜率归类动力模型方法，根据实际运行工况自适应选择对应的斜率，精细化调整动力集中动车组速度变化斜率，提高运行平稳性。

②为提高动车组的可用性，优化控制辅助系统的配置逻辑。在辅助系统出现非严重故障时，保持主断路器闭合，进行辅助系统冗余配置，控制辅助系统快速停机和启动，实现主断路器断开和闭合过程中的在线冗余配置，从而大幅缩短了辅助系统冗余配置启动时间。

③通过现场的测试验证，通过增设车载通信电缆检测装置，实现短编组重联动车组的通信电缆检测功能，可快速准确定位电缆故障点，为排除现场故障节省大量时间。相比于类似功能的便携式检测仪器，具备快速性、准确性、高效率等特点，电路拓扑如图 20

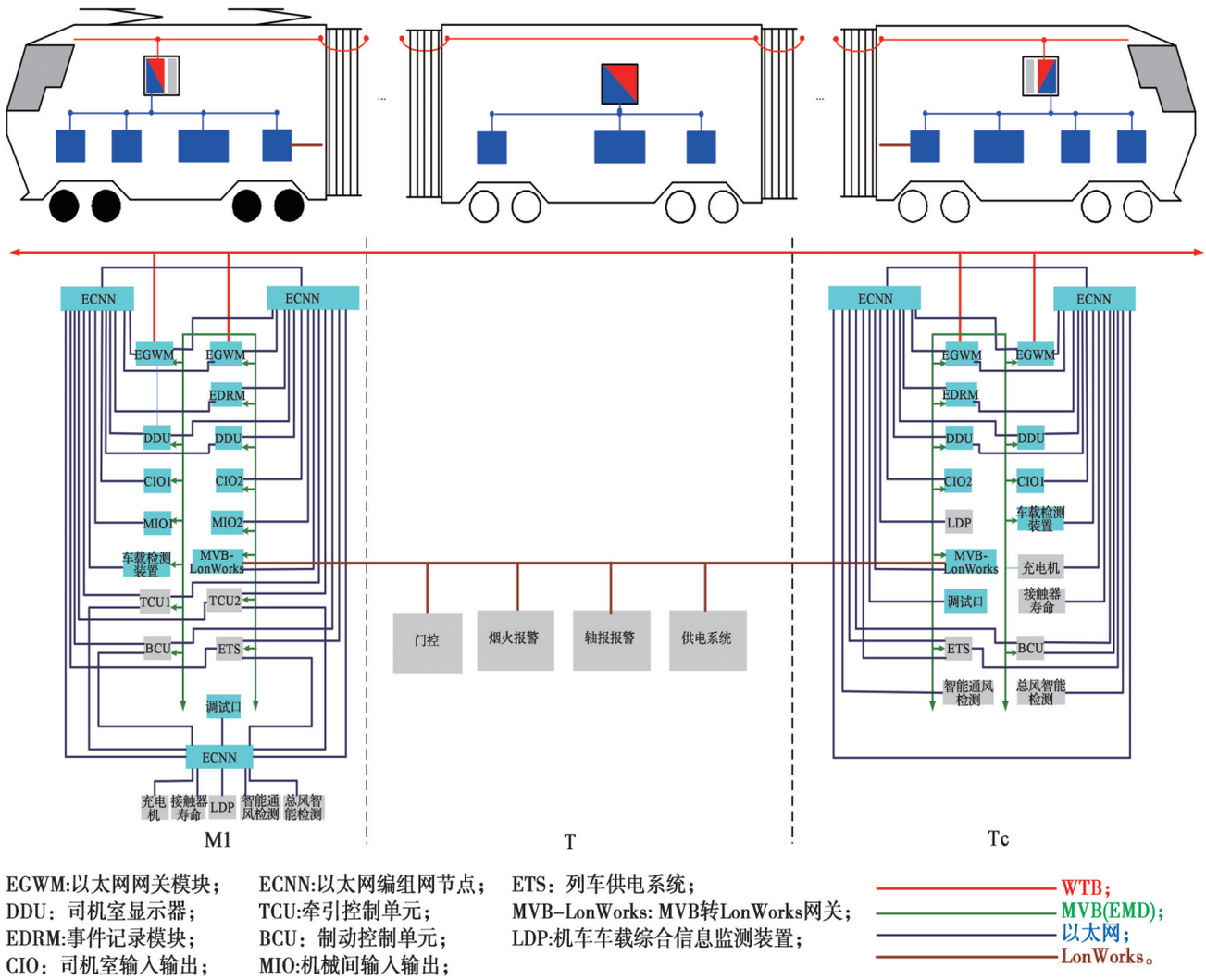


图 18　动力集中动车组网络拓扑图

Fig. 18　Network topology of power-concentrated EMU

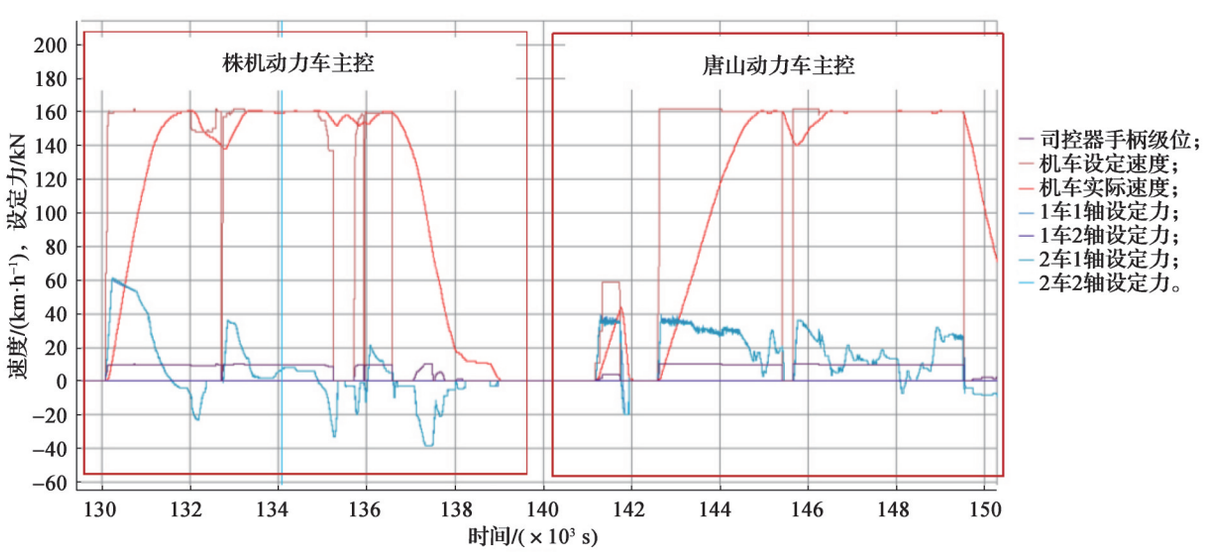


图 19　动力集中动车组平稳性波形图

Fig. 19　Stability waveform of power-concentrated EMU

所示。

④通过对系统、部件、单板、通道级冗余设计，极大提高了可靠性。其中，动力集中动车组网络控制系统首次采用了MVB与ECN双网并存的模式，车辆级网络能实现MVB网络与ECN网络的冗余切换；列车级网络具备实现WTB网络与ETB网络的冗余切换的接口。

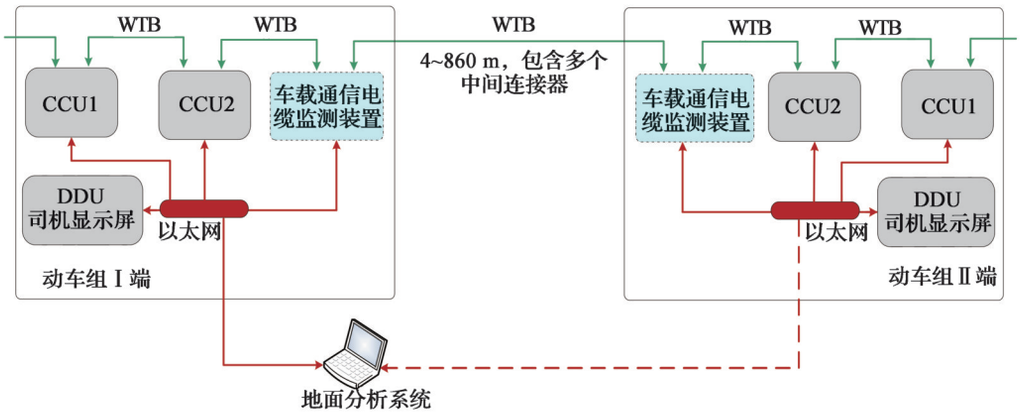


图20　动力集中动车组通信电缆检测装置关联图

Fig. 20　Correlation diagram of communication cable detection device of power-concentrated EMU

⑤首次在动车组领域通过LonWorks网关单点实现短编组和重联编组客车状态信息的实时显示，主要包括重联编组的车门状态、轴报信息、制动状态和火灾报警。

4　试验验证

4.1　直流回路电压及纹波

直流电压波动和纹波电流是反映变流器系统稳定性的关键指标，需要重点验证中间直流回路增加隔离开关后对系统的影响。试验时，供电电压为25 kV，牵引变流器处于最大负载状态，即2台牵引电机功率为1 630 kW，辅助负载容量为130 kVA，记录此时中间直流环节的电压和电流纹波波形。其中，直流电压波动值应在额定电压的±5%以内，支撑电容器纹波电流应不大于额定电流值的80%。试验结果显示，牵引变流器中间直流电压波动幅值为±142 V，额定直流电压为3 600 V，满足设计要求；支撑电容纹波电流有效值为210 A，额定电流为350 A，满足设计要求。具体实测数据波形如图21所示。

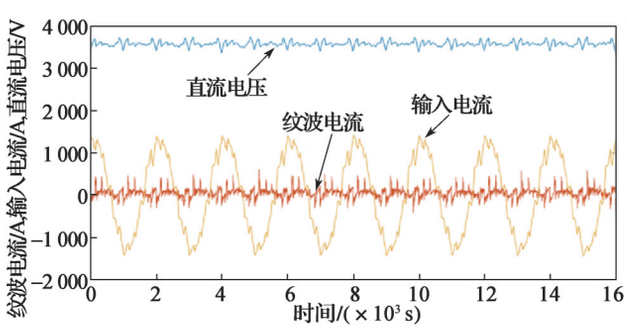


图21　直流电压纹波情况

Fig. 21　DC voltage ripple

4.2　牵引变流器温升试验

为了验证牵引变流器的整体散热情况，需对牵引变流器进行2种功率模式下的温升试验。整体试验方案基于牵引变流器真实工况进行模拟，从而评估实际运行工况下的各项性能指标。

温升试验采用满功率高低温循环试验进行验证，即功率循环试验按照“单轴牵引功率1 430 kW考核2 h→单轴牵引功率1 630 kW考核0.5 h→单轴制动功率1 430 kW制动1.5 h”进行。温度循环试验按照“45 ℃持续8 h→从45 ℃均速降至–25 ℃，历时1 h→–25 ℃持续2 h，从–25 ℃均速升至45 ℃，历时1 h”进行。试验要求如下：

①当牵引变流器工作在额定功率模式时，即4台牵引电机运行功率为1 430 kW，2路辅助负载功率130 kVA下，确认内部各部件已经达到热平衡状态，此时各个功率模块的散热器台面温升应小于25 K；

②当牵引变流器工作在短时功率模式时，即4台牵引电机运行功率为1 630 kW，2路辅助负载功率为130 kVA，各个功率模块的散热器台面温升应小于25 K。

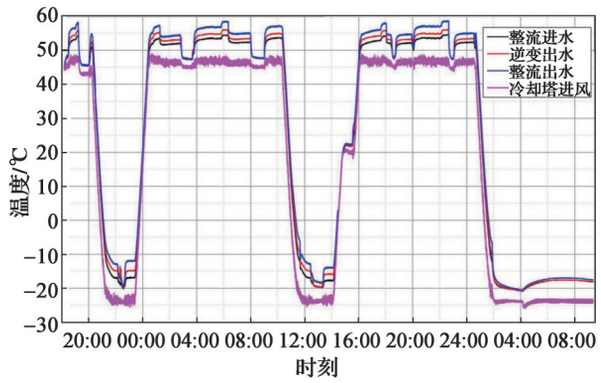
此外，研发团队还分别测量了柜内空气温度、变流器模块和支撑电容等部件温度。试验数据如图22所示，在额定功率模式下功率模块台面温升为5.7 K，在短时功率模式下功率模块台面温升为6.7 K。从总体来看，各测试点的温度变化曲线均平稳连续，散热情况良好，牵引变流器柜热设计符合要求。

4.3　牵引电机温升试验

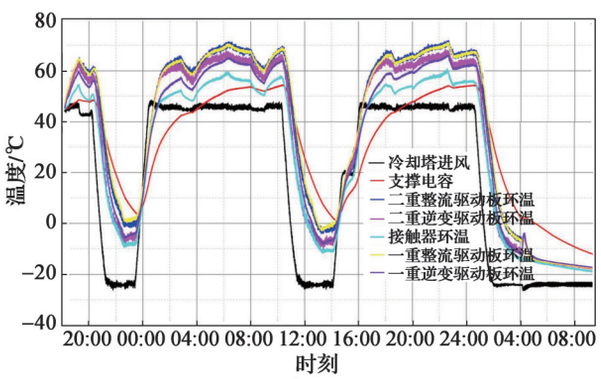
牵引电机温升也是考量牵引系统设计是否合格的重要指标。具体试验方法为：2台牵引电机分别按照1 430 kW和1 630 kW额定功率输出，由外部风源提供额定风量1.8 m³/s，其中1 630 kW功率下仅运行30 min，测量牵引电机处于热平衡状态的定子绕组温升值[12-13]。

牵引电机温升数据波形如图23所示，牵引电机输出功率为1 430 kW、转速为1 863 r/min、基波电流为387 A，最终测得电机温升为137 K，满足其设计规定小于177.5 K的要求；调整电机输出功率为1 630 kW、转速为2 183 r/min、工作30 min，实测电机温升为143.2 K，满足技术要求中小于177.5 K的要求，其试验

结果验证了电机的设计性能完全满足整车技术要求和相关标准要求。



(a) 额定功率



(b) 短时功率

图 22　牵引变流器温升

Fig. 22　Temperature rise of traction converter

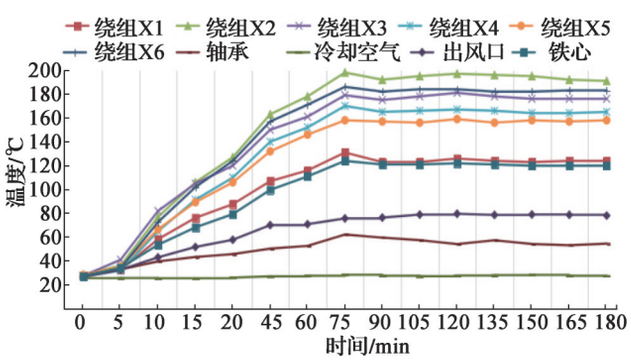


图 23　牵引电机温升

Fig. 23　Temperature rise of traction motor

5　结束语

根据动力集中动车组运行特点，在牵引电传动系统的主电路拓扑方面进行了部分优化，无论是采用独立轴控无二次谐振回路，还是采用共中间回路有二次谐振回路，均可以在保障系统稳定性的前提下，进一步提升列车的可用性以及乘坐舒适性；据线路运行特点，增加了短时 1 630 kW 功率增强模式，全面提升动车组在特定区段的运行能力。另外，通过变压器二次侧耦合实现了列车辅助系统和列车供电系统在过分相期间的不间断供电，提升旅客列车的舒适性；网络控制系统方面也对系统冗余性、平稳性控制、信息交互等方面进行了全面升级。在牵引系统的地面试验中，验证了变流器直流电压、关键部件温升等技术指标，能够满足整车顶层指标设计要求。该型动力集中动车组电气系统已完成地面系统组合试验和装车试验，试验结果均满足设计要求。该牵引电气系统研发中采用的设计方法和验证方法可推广至系列化动力集中动车组平台项目。

参考文献：

[1] 李芾, 安琪. 国内外高速动车组的发展[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007(5): 1-5.
LI Fu, AN Qi. Development of high speed EMUs at home and abroad[J]. Electric locomotive & mass transit vehicles, 2007(5): 1-5.

[2] 冯江华, 陈高华. 大功率交流传动系统[J]. 机车电传动, 2003 (5): 46-50.
FENG Jianghua, CHEN Gaohua. High power AC drive system[J]. Electric drive for locomotives, 2003(5): 46-50.

[3] 原志强, 武学良, 陈君. 17 t轴重动力集中动车组动力车总体技术研究[J]. 机车电传动, 2018(3): 34-40.
YUAN Zhiqiang, WU Xueliang, CHEN Jun. Overall technology research of 17 t axle load motor car for power centralized EMU[J]. Electric drive for locomotives, 2018(3): 34-40.

[4] 张义, 刘永江, 范斌, 等. 新一代动力集中型动车组牵引变流器设计[J]. 机车电传动, 2021(2): 66-72.
ZHANG Yi, LIU Yongjiang, FAN Bin, et al. Design of traction converter for new generation of power centralized EMU [J]. Electric drive for locomotives, 2021(2): 66-72.

[5] 谢曲波, 马雪艳, 刁利军. 电力机车直流电压二次脉动影响抑制策略分析[J]. 铁道机车与动车, 2021(3): 22-24.
XIE Qubo, MA Xueyan, DIAO Lijun. Analysis on suppression strategy of DC voltage secondary pulsation of electric locomotive[J]. Railway locomotive and motor car, 2021(3): 22-24.

[6] 陈燕平, 忻力, 李中浩. 牵引变流器中支撑电容器研究[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(2): 76-81.
CHEN Yanping, XIN Li, LI Zhonghao. Study of the DC-link capacitor for traction converter[J]. Railway locomotive & car, 2011, 31(2): 76-81.

[7] 蔡杰, 陈湘, 李自然, 等. 新型动力集中动车组 DC 600 V 列车供电装置[J]. 机车电传动, 2017 (5): 44-47.
CAI Jie, CHEN Xiang, LI Ziran, et al. DC 600 V train power supply device for novel centralized power EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2017(5): 44-47.

[8] 高洪光, 张立臣, 李雪莉, 等. HXD3 系列电力机车过分相

不间断供电技术的研究与实现[J]. 机车电传动, 2016(4): 11-15.
GAO Hongguang, ZHANG Lichen, LI Xueli, et al. Research and implementation of passing neutral section uninterruptible power supply technology of HXD3 series electric locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2016(4): 11-15.

[9] 罗文广, 何平, 张志学, 等. 交流传动列车地面自动过分相控制策略[J]. 机车电传动, 2019(5): 10-14.
LUO Wenguang, HE Ping, ZHANG Zhixue, et al. Control strategy of ground automatic neutral section passing for AC drive train[J].Electric drive for locomotives, 2019(5): 10-14.

[10] 胡景瑜, 徐广伟, 刘建城, 等. 独立绕组供电变流器过分相不间断供电技术研究[J]. 控制与信息技术, 2020(3): 68-72.
HU Jingyu, XU Guangwei, LIU Jiancheng, et al. Research on uninterrupted power supply technology for separate winding powered converter[J]. Control and information technology, 2020(3): 68-72.

[11] 蔡志伟, 贾峰, 李哲, 等. CR200J-3 型动力集中动车组 WTB 通信可靠性提升研究[J]. 机车电传动, 2021(1): 98-103.
CAI Zhiwei, JIA Feng, LI Zhe, et al. Research on WTB communication reliability for CR200J-3 power concentration EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2021(1): 98-103.

[12] 刘海涛, 章志兵, 高峻. 出口马其顿动车组交流传动系统[J]. 机车电传动, 2017(3): 20-23.
LIU Haitao, ZHANG Zhibing, GAO Jun. AC drive system of Macedon EMUs[J]. Electric drive for locomotives, 2017 (3): 20-23.

[13] 高首聪, 刘可安, 李鹏. HXD1C 型电力机车电传动系统设计及运用[J]. 机车电传动, 2012 (2): 70-74.
GAO Shoucong, LIU Kean, LI Peng. The design and application for electric drive system of HXD1C locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2012(2): 70-74.

Analysis and verification of key technologies for the electrical system of power-concentrated EMUs

LI Peng[1], ZOU Zhichao[1,2]

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Safety Supervision Special Office, China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110000, China)

Abstract: This paper introduced the research progress and typical applications of power-concentrated EMUs abroad and provided a preliminary comparative analysis of system configurations among various EMU models. It presented overall objectives, technical characteristics, technical challenges, and technical solutions for the development of power-concentrated EMUs, in the context of the technological development and application status of power-concentrated EMUs in China. This paper focused on the analysis and development of key technologies for the design elements of power-concentrated EMUs, including traction, DC 600 V train power supply, and network control systems. Ground tests and field operation show the good performance of the proposed electrical system and its compliance with the requirements of various indicators for electrical systems of power-concentrated EMUs. Its successful development provides solid equipment support for improving the Chinese "Fuxing" EMU family and facilitating the China's "going out" strategy of high-speed rail systems.

Keywords: power-concentrated EMU; electrical system; main circuit topology; network system; DC 600 V; coupled power generation

收稿日期：2022-09-13；修回日期：2024-01-01