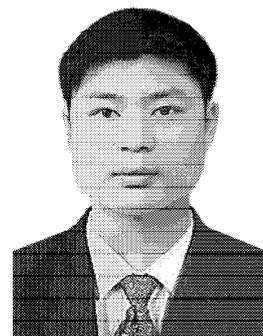


城
市
轨
道
车
辆

广州地铁国产A型增购列车 车辆电传动系统

何红成, 廖 云

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 何红成(1981-), 男, 工程师, 目前主要从事城轨地铁列车牵引系统及主电路设计。

摘 要: 介绍广州地铁国产A型增购列车车辆电传动系统的基本参数和性能要求, 阐述了列车牵引电传动系统的牵引/电制动特性、主电路、列车牵引控制系统的设计思路和技术特点, 并将广州地铁国产A型增购列车车辆与同线路运行的西门子车辆进行了比较。广州地铁国产A型增购列车及牵引电传动系统已通过线路型式试验和运行考核, 目前正在广州地铁2号线载客运行, 运行情况良好。

关键词: 地铁列车; 广州地铁2号线; 牵引; 电传动系统; 主电路; 牵引特性; 电制动特性

中图分类号: U231; U264.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2013)05-0053-05

Electric Drive System of Domestic A Type Additional Metro Trains for Guangzhou Metro

HE Hong-cheng, LIAO Yun

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Basic parameters and performance requirement of Guangzhou metro domestic A type additional metro trains electric drive system were introduced. Design idea and technology details of the electric drive system's traction/electrical brake characteristic, main circuit, and train traction control system were explained, as well as compared with the Siemens trains served in the same lines. Guangzhou metro domestic A type additional metro trains and their electric drive systems had passed the type test and operation appraisal, and now the trains are served in Guangzhou metro line 2 with good operation situation.

Key words: metro train; Guangzhou metro line 2; traction; electric drive system; main circuit; tration characteristic; electrical brake characteristic

0 引言

电传动系统是车辆电气系统的核心装备, 其相关设计主要包括牵引系统特性设计、性能计算和仿真、系统电路及参数确定、列车牵引控制系统设计等。株洲南车时代电气股份有限公司在依托2005年成功研制北京地铁13号线国产化地铁车辆电传动系统及后续上海、沈阳、深圳等国产地铁车辆交流传动系统的技术完善和经验积累基础上, 全面掌握了具有完全自主知识产权的地铁车辆电传动系统的技术设计和工程应用实现能力^[1-3]。

1 车辆参数及性能要求

1.1 车辆基本参数

广州地铁国产A型增购列车采用4动2拖6辆编组,

DC 1 500 V架空接触网受流, 供电电压为DC 1 000~1 800 V; 轮径为840/805/770 mm(新/半磨耗/全磨耗); 动车轴式B₀-B₀; 列车编组: -A*B*C=C*B*A-; 3辆车为一单元车组, 6辆车为列车编组。车辆自重: 动车38.7 t, 拖车35.7 t。列车载客人数: 额定载荷AW₂时1 860人, 超员载荷AW₃时2 592人。

1.2 列车动力性能参数

| | |
|-----------------------|---|
| 最高运行速度 | 80 km/h |
| 平均旅行速度 | ≥35 km/h |
| 列车冲击极限 | 0.75 m/s ³ |
| 列车速度从0到36 km/h的平均加速度 | ≥1.0 m/s ² |
| 列车速度从0达到60 km/h的平均加速度 | ≥0.8 m/s ² |
| 列车速度从0达到80 km/h的平均加速度 | ≥0.6 m/s ² |
| 列车常用制动减速度 | ≥1.0 m/s ² |
| 电制动能力 | 在载荷为AW ₀ ~AW ₂ , 电压不低 |

于DC 1 650 V时,速度从80 km/h至空电混合制动转换点,列车只使用电制动,就可满足常用制动减速度需求

1.3 故障运行及坡道救援能力

①当一列车中的1辆动车不能工作时,在AW2状态下可以保证列车运行一个往返。

②当2辆动车不能工作时,在AW3的状态下,列车可在35‰坡道上启动行驶到最近车站。

③一列空载列车牵引一列超载AW3(无动力)故障列车能在35‰坡道上启动。

④当一列AW0列车救援另外一列AW0故障列车时,能以不低于45 km/h速度运行回厂。

2 牵引电传动系统

相比同样编组的B型地铁列车,A型车具有更大的车辆自重与载荷,因此对电传动系统的性能设计要求更高。A型地铁列车牵引电传动系统设计充分考虑到满足车辆动力性能、故障运行/救援能力及实现预期的旅行速度等,并考虑系统各参数匹配和满足地铁车辆特殊的运行工况(运行站距短、启/制动频繁且启/制动加/减速度大)及电气性能要求(启/制动力距大、启/制动峰值功率大以及导致的直流供电电压变化范围大)。另外,为满足列车与其他列车在同一线路混跑的需求,在牵引/制动性能、列车控制及司机操作模式、信号系统接口及ATO控制等方面尽可能考虑与其他列车保持一致。

牵引电传动系统主要由牵引主电路、牵引控制系统及其装置组成,以提供列车的牵引/电制动力和实现列车的牵引顺序逻辑控制、故障保护及列车牵引/电制动运行等。系统采用牵引逆变器—异步鼠笼电机交流传动系统,并由列车网络进行控制和诊断。

2.1 牵引/电制动特性

牵引/电制动特性是列车电传动系统的基本特性,其设计主要满足列车牵引/制动性能的要求,根据列车重量、列车载荷以及线路因素,并考虑列车的冲击极限和电传动系统部件的容量(如牵引逆变器、异步牵引电动机等),参数匹配以及轮轨粘着的允许,并对典型区间、目标线路进行牵引和故障运行能力核算。

2.1.1 牵引特性

列车在半磨耗轮径、定员载荷AW2及接触网压DC 1 500 V条件下,列车最大启动轮缘牵引力 $F_{st} \approx 400$ kN,恒牵引力速度范围0~40 km/h,恒功速度范围40~55 km/h,自然特性速度范围55~80 km/h。

其中,恒功起始点列车牵引力为400 kN,自然特性起始点列车牵引力约为290.9 kN。牵引特性曲线参见图1所示,列车启动性能参数如表1所示。

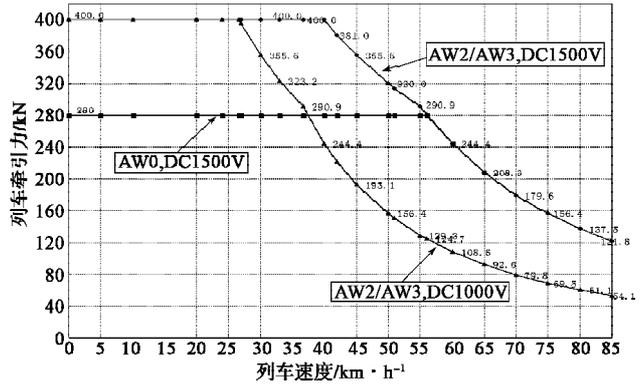


图 1 列车牵引特性曲线

表 1 列车启动性能参数

| 项目 | 数值 |
|---------------------|-----------------------|
| 启动牵引力 | 400 kN |
| 启动加速度 | 1.08 m/s ² |
| 最大计算粘着系数 | 0.177 |
| 启动至 40 km/h 所用时间 | 9.98 s |
| 0 ~ 40 km/h 平均启动加速度 | 1.01 m/s ² |
| 启动至 60 km/h 所用时间 | 16.3 s |
| 0 ~ 60 km/h 平均启动加速度 | 0.95 m/s ² |
| 启动至 80 km/h 所用时间 | 29.65 s |
| 0 ~ 80 km/h 平均启动加速度 | 0.64 m/s ² |

在网压 $U_s \geq 1 500$ V时,牵引特性不变;在网压 $U_s < 1 500$ V时,列车牵引特性根据网压的下降进行功率限制,其恒功起始点及终止点与网压成一次方比例下降。

牵引系统充分利用轮轨粘着条件,并按列车载重量从空车到定员载荷范围内自动调整牵引力的大小,使列车在空车至定员载荷范围内保持启动加速度基本不变。

广州地铁国产A型增购列车跟同线路运营的进口西门子牵引系统相比,牵引特性曲线基本一致,两者的牵引加速度性能相当,有利于同线路混跑。

2.1.2 电制动特性

列车在半磨耗轮径、定员载荷AW2及接触网压DC 1 650 V条件下,列车最大电制动力为:AW2时, $F_{b2} \approx 389$ kN,恒电制动力速度范围80~5 km/h;电气制动力减小的起始速度点5 km/h(可调);电制动特性曲线如图2所示,列车制动性能参数如表2所示。

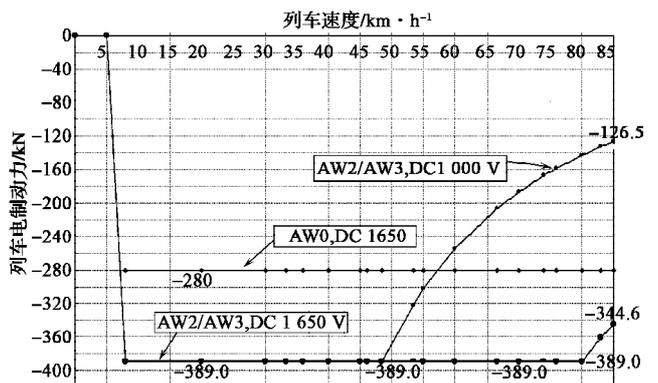


图 2 列车电制动特性曲线

表2 列车电制动性能参数

| 项目 | 数值 |
|-------------------------|-----------------------|
| 最大电制动力 | 389 kN |
| 最大计算粘着系数 | 0.172 |
| 80 km/h 制动至 5 km/h 所用时间 | 18.2 s |
| 80~5 km/h 平均制动减速度 | 1.03 m/s ² |

在网压 $U_s \geq 1650$ V 时, 特性不变; 在网压 $U_s < 1650$ V 时, 列车制动特性根据网压的下降, 其恒制动力起始点与网压成一次方比例下降。

列车制动原则: 制动时优先使用电气制动(再生制动), 电气制动不足部分自动由空气制动补充。紧急制动仅使用空气制动。

列车充分利用轮轨粘着条件, 并按列车载重量从空车到超员范围内自动调整电制动力的大小及补充空气制动, 使列车在空车至超员范围内保持制动减速度基本不变。

广州地铁国产A型增购列车跟同线路运营的进口西门子牵引系统相比, 国产牵引系统电制动特性恒电制动力比进口西门子牵引系统恒电制动力的设计值 400 kN 稍小, 但国产牵引系统的电制动性能已满足要求, 这有利于粘着的利用和系统最大功率的均衡。

2.1.3 列车故障处理能力校验及仿真计算

列车在超员载荷下, 牵引动力损失 1/2 时, 列车仍然可以在 35‰ 的坡道上以 0.123 m/s² 的加速度启动并能正常运行; 一列空车牵引另一列超员载荷故障列车在 35‰ 的坡道上启动, 计算表明, 17.5 kN/电机的牵引力可以使列车在 35‰ 上坡道启动, 但无法达到加速度为 0.083 3 m/s² 的要求。因此需要高加速开关, 产生 18.375 kN/电机的牵引力, 达到 0.083 3 m/s² 的加速度, 才可以使列车在 35‰ 上坡道启动。需要采用 0.192 的高粘着系数。

广州地铁国产A型增购列车实际线路模拟仿真计算(超员载荷 AW3, 网压取 DC 1 500 V 工况下, 以广州地铁 2 号线线路为例)如下:

嘉禾望岗至广州南站上行的总旅行时间 2 568.3 s (24 个站平均每站 107.1 s), 平均旅行速度达 43.3 km/h。主电路直流侧等效电流约 451.8 A, 牵引电机等效电流约 120.3 A。

广州南站至嘉禾望岗下行总旅行时间 2 542.69 s (24 个站平均每站 105.9 s), 平均旅行速度达 43.8 km/h。主电路直流侧等效电流约 456.2 A, 牵引电机等效电流约 121.2 A。

故列车上下行全线路平均旅行速度都可以满足不小于 35 km/h 的旅行速度要求。

2.2 电传动系统主电路

列车牵引电传动系统采用VVVF逆变器—异步牵引电机构成的交流电传动系统, 为车控方式。

牵引电传动系统主电路采用二电平电压型直交逆变电路。经受电弓接触受流输入的 DC 1 500 V 直流电由牵引逆变器变换成频率、电压均可调的三相交流电, 向异步牵引电动机供电。牵引逆变器由 2 个逆变模块单元组成, 每个逆变器模块驱动 2 台牵引电动机, 电阻制动斩波单元与逆变模块单元集成在一起。当电网电压在 1 000 ~ 1 800 V 之间变化时, 主电路能正常工作, 并方便地实现牵引—制动的无接点转换。动车的主电路型式、结构完全相同, 满足列车的牵引及制动特性的要求。其主电路原理图见图 3 所示。

牵引主电路部件由受电弓、避雷器、能耗记录仪、高压电器箱(HV01、HV02)、线路电抗器箱(L)、牵引逆变器箱(VVVF)、制动电阻箱、牵引电机(M)等设备组成。

主电路系统由高压电器及能量释放单元(1F01、

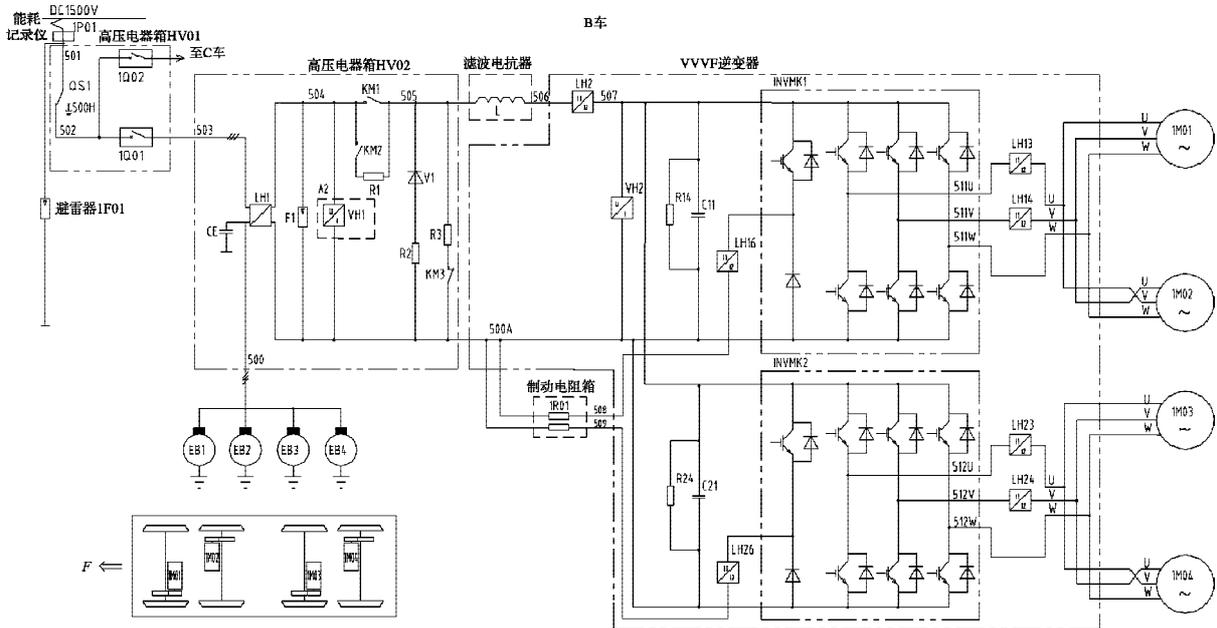


图3 牵引主电路图

QS1、1Q01、F1、V1、R2)、电容器充放电单元(KM1、KM2、KM3、R1、R3、R14/R24)、滤波单元(L、C11/C21)、逆变器单元(含制动电阻1R01、逆变及斩波模块INVMK1、INVMK2)、异步牵引电动机(1M01~1M04)及检测单元(LH1、LH2、LH13、LH14、LH16、LH23、LH24、LH26、VH1、VH2)等组成。

综合考虑系统的经济性、电机的并联运行、牵引电动机与逆变器的电流及容量以及齿轮传动装置的机械性能,采用小逆变器和大电动机匹配,选齿轮传动比为6.315 8(120/19)及设计出如2.1节所述的牵引特性/电制动特性。

地铁列车在启动初期阶段,采用VVVF变频调速控制方式,以维持输出转矩的恒定,当进入恒功阶段且逆变输出电压进入方波后,由于输出转矩 $M_n = M_m/K_m \approx C \times (U_1/f_1)^2/K_m$ (M_m 为电磁转矩, C 为常数, U_1 为逆变输出电压, f_1 为逆变输出频率, K_m 为电磁转矩过载倍数)和输出功率 $M_n \times f_1 = C \times U_1^2/(f_1 K_m)$ 恒定,可知 $f_1 K_m =$ 常数, K_m 将随着 f_1 的升高而减小。为了使 K_m 大于一定的值而保证系统的稳定,取牵引特性恒功开始点和恒功速度范围为40~55 km/h。此时,电机最大转矩为1 624 N·m,最高转速为3 538 r/min,最高转速处的转矩过载倍数为1.2,启动时最大功率为283 kW,制动峰值功率为484 kW,牵引时最大电流约193 A,制动时峰值电流约265 A,直流侧牵引时最大电流840 A,直流侧制动时最大电流1 148 A,各参数比较合适。

牵引电动机为三相交流异步牵引电动机,满足系统牵引/电制动特性及列车运行要求,其额定功率根据牵引计算出的等效电流、列车旅行速度并考虑电动机的发热温升确定,它为等效功率。牵引电动机的额定参数为:额定频率60.9 Hz,额定功率190 kW,额定电压(基波)1 050 V,额定电流(基波)131 A,效率(基波)92.5%,功率因数(基波)0.86,额定转矩1 008 N·m,额定转速1 800 r/min。

与牵引电动机相匹配,牵引逆变器的主要技术参数为:输入电压DC 1 500 V(1 000~1 800 V,再生制动时不高于2 000 V),额定输出容量 2×530 kVA,输出电压0~1 400 V,输出频率0~150 Hz,额定输出电流 2×262 A,最大输出电流 2×386 A,最大制动电流 2×530 A。

牵引逆变器模块为IBBM60G标准模块,每个IBBM60G模块集成8个3 300 V/800 A的IGBT元件。其主要技术特点为:集成了三相逆变桥臂和制动斩波桥臂IGBT开关元件,还包括支撑电容器、门控单元、脉冲分配单元等,集成度高;门极驱动采用光纤传输技术,抗干扰能力强,可靠性高;采用低电感母排(Busbar)连接,无吸收电路,电路简洁、效率高;另外,采用以水为冷媒的热管散热器靠走行风自然冷却,对环境无污染、无噪声;模块组装(拆卸)简单,维护方便等。无冷却风机,大大降低了设备运用时维护保养工作量,

节省了预防性维护所需的冷却风机更换成本。

主电路高压电器主要为避雷器(1F01)、隔离开关(QS1)、高速断路器(1Q01)、线路充放电接触器(KM1/KM2/KM3)等,其主要用于主电路的隔离以及电气联锁放电、主电路的短路及故障保护、线路短接等。能量释放单元由RD回路(R2、V1)和浪涌吸收器(F1)组成,主要用于主电路故障情况下释放线路电抗器等的蓄存能量,以避免主电路器件的二次损坏。KM3与R3形成支撑电容快速放电电路,以保证维修人员的安全。

高压电器部件的选型和主要参数则考虑高压电气性能、可靠性、所承受的供电网的电压,并根据主电路直流侧典型电流曲线、列车故障运行时的过载能力等原则进行选取。高速断路器的脱扣门槛值根据系统正常使用及线路需求情况进行设定,设定值调整在DC 1 500 A。

线路电抗器及滤波电容器,使系统稳定并将直流侧电容电压波动限制在允许范围内,同时,满足逆变器开关元件换流的要求,滤除高次谐波并在逆变器发生短路时抑制短路电流等。

地铁车辆运行特点存在频繁启/制动并且制动峰值功率大,使牵引系统主电路直流侧电流呈阶梯或锯齿波状态,并且峰值相差很大,因此,直流侧线路电抗器采用空心结构设计,使其电感值几乎不受直流侧电流的影响,制动电阻则根据地铁车辆电制动特性、要求及制动功率波形进行设计,以获得最优的参数。

考虑一定的裕量,取制动电阻值 $R=3.2 \Omega$ (工作温度时),最后,还要通过校核过压吸收功率、斩波模块IGBT元件的允许容量和最大开关频率来确定。考虑到

表3 传动系统对比

| 对比项目 | 时代电气产品 | 进口产品 | 说明 |
|------------|--|---|--------------------------------|
| 主电路结构 | 二电平逆变电路 | 二电平逆变电路 | 基本一致 |
| 系统设备 | 设备分立(高压电器箱+线路电抗器+牵引逆变器) | 设备集中(牵引逆变器箱集成高压电器、线路电抗器、逆变器) | 进口牵引系统设备总重量相对较轻 |
| 冷却方式 | 自然冷却,无风机电源需求,无过电网维护 | 强迫风冷,有冷却风机维护及滤尘网清洗要求 | 国产牵引系统冷却系统维护工作量较少 |
| 逆变器模块及IGBT | 每台逆变器含2个逆变器模块,逆变及斩波IGBT采用3 300 V/800 A元件 | 每台逆变器含1个逆变器模块,逆变IGBT采用3 300 V/1 200 A元件,斩波IGBT采用3 300 V/800 A元件 | 国产牵引系统IGBT元件的负荷裕度大,系统具有较强的过载能力 |
| 线路滤波器参数 | 电抗器电感量5 mH,滤波电容为8.6 mF | 电抗器电感量10 mH,滤波电容为3 mF | 国产系统固有谐振频率更低,有利于减少系统对外干扰 |
| 滤波电容快速放电 | 通过接通放电接触器进行放电(300 W/300 Ω),放电接触器与充电短接接触器联锁 | 斩波放电+固定放电(100 k Ω) | 两者均可保证电容快速放电 |

制动电阻的峰值及等效功率较大, 制动电阻采用强迫风冷却方式。

表 3 列出了广州地铁国产 A 型增购列车与同线路运营的西门子进口牵引传动系统的一些对比情况。

2.3 列车牵引控制系统

2.3.1 功能及构成

列车牵引控制系统是列车电气控制系统中的一部分, 主要完成列车有关牵引的控制指令及状态的给出、传输, 实现列车牵引顺序逻辑控制、牵引/电制动特性控制和牵引系统故障保护等, 它由司机控制器、各指令开关、有接点控制单元、列车网络控制及诊断单元(即VCU, 为列车及车辆级控制)、传动控制单元(即DCU, 为传动级控制, 负责实现主电路充放电接触器及高速断路器等逻辑控制、对IGBT逆变器及交流异步牵引电机的实时控制、粘着控制、制动斩波控制, 同时具备部分车辆级控制功能)等构成, 完成列车有关牵引的控制指令及状态的给出、传输, 实现列车牵引顺序逻辑控制、电传动系统故障保护和列车牵引/电制动控制等功能。它受列车受电弓、主电路隔离刀开关、信号系统、空气制动系统、门控系统等状态及逻辑制约。

其中, 列车控制及诊断系统采用分布式控制技术, 符合IEC 61375标准, 通过多功能车辆总线MVB连接车辆的所有智能设备, 其物理介质采用电气中等距离EMD电介质。MVB的基本参数为:

- 介质: 屏蔽双绞线, 变压器隔离
- 波特率: 1.5 Mbps
- 传输距离: 200 m (EMD)
- 最多可以挂智能总线站数: 256个
- 传输周期: 1, 2, 4, 8, ..., 1 024 ms (典型值为32, 64, 128, ..., 1 024 ms)
- 数据帧长度: 2, 4, 8, 16, 32 字节
- 最多可以定义数目: 4 096个

列车牵引控制系统信号构成及接口示意图如图 4 所示。

列车牵引、制动指令有 2 种传输方式:

①正常情况下由列车控制和诊断系统的AXM模块采集司控器电位器模拟信号指令由列车网络控制系统进行I/O采集, 再通过MVB网络通信传给DCU和BCU; 在ATO自动驾驶模式下, 牵引制动力及牵引制动指令由信号系统通过MVB通信传给网络, 再由网络传给DCU和BCU。

②紧急牵引模式下DCU和BCU根据紧

急牵引信号转变相应控制模式, 并实施预定的控制要求, 牵引、制动控制具有两级。

2.3.2 牵引控制

牵引控制系统本着安全、可靠、先进的原则进行设计。各运行操作模式有常规牵引、洗车、慢行、紧急牵引、常用制动、快速制动、紧急制动、救援等。正常模式下通过利用网络控制的优势, 实现列车牵引控制。在列车网络故障的情况下, 司机可通过操作紧急牵引开关使列车进入紧急牵引模式, 在不依赖于网络的情况下, 司机操作司机控制器牵引列车进站或入库。

牵引系统充分利用轮轨粘着条件, 并按列车从空车到超员范围内的载重自动调整牵引力/电制动力的大

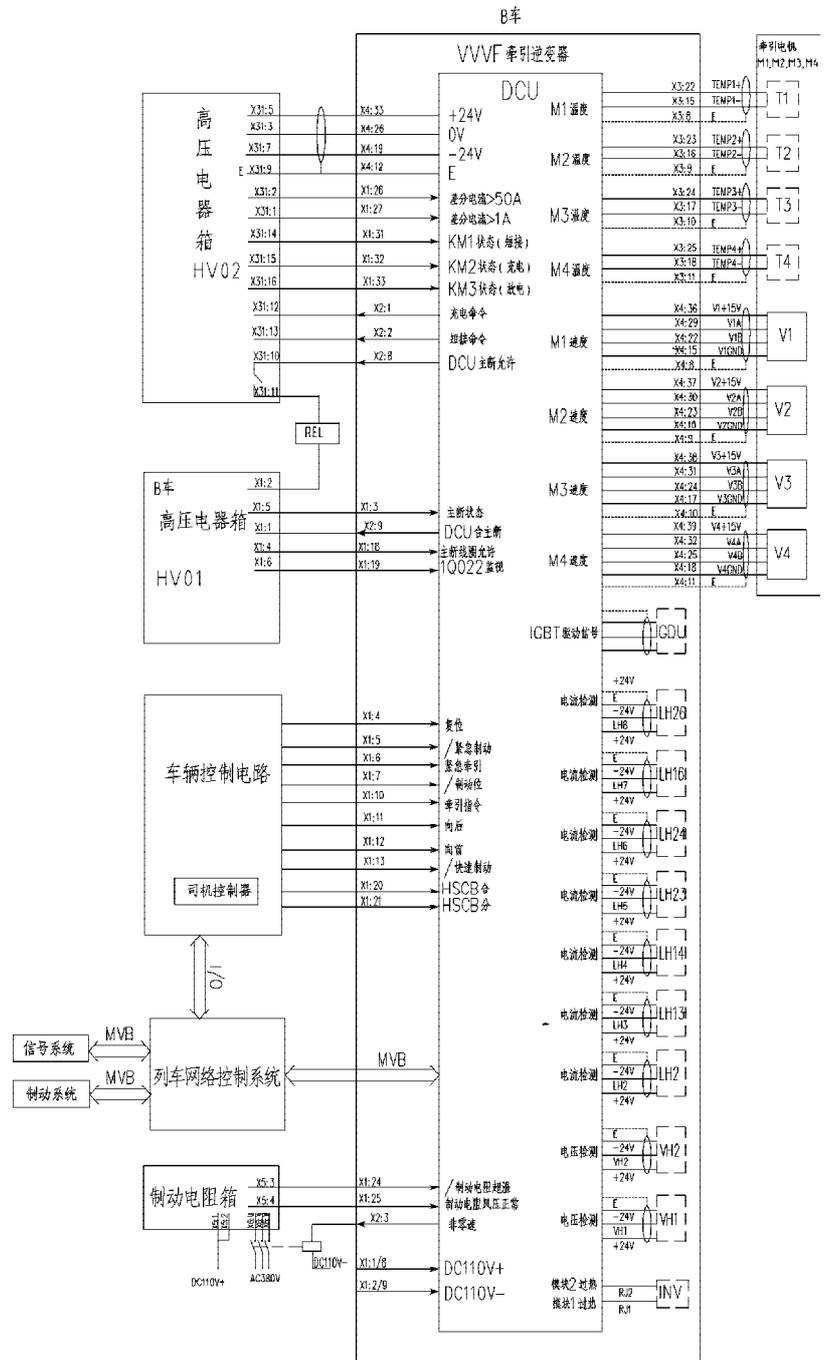


图 4 列车牵引控制系统信号构成及接口示意图

(下转第 83 页)

