

市域（郊）交直流转换方案研究

杜菡茜¹ 郝伊康²

1. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 中国·北京 102600

2. 北京交通大学 国家卓越工程师学院, 中国·北京 100044

摘要: 为满足某实验线列车跨线运营中 AC25kV 与 DC1500V 双流制供电系统的切换需求, 保障列车运行安全与效率, 本文从车辆、信号、供电三大核心系统展开交直流转换段方案设计。车辆系统采用全自动不降弓切换模式, 信号系统基于 5 个信标的高电平有效控制逻辑, 实现转换过程的精准定位与异常容错; 供电系统通过接触网隔离转换区方案比选确定 4 台分相绝缘器方案, 并优化钢轨无电区值为 9.5m 以适配双向运营与操作容错。研究表明, 该方案可实现列车安全、高效的交直流转换, 满足实验线的运营需求, 为同类双流制轨道交通工程提供参考。

关键词: 交直流转换; 接触网设计; 信号控制

Research on AC/DC Conversion Scheme in Urban (Suburban) Areas

Du Handan¹, Hao Yikang²

1. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., China Beijing 102600

2. Beijing Jiaotong University National College for Excellent Engineers, China Beijing 100044

Abstract: To meet the demand for switching between the AC 25kV and DC 1500V dual-power supply systems in cross-line operations of a test line train, ensuring operational safety and efficiency, this paper designs a power conversion section solution focusing on three core systems: the vehicle, signaling, and power supply systems. The vehicle system adopts an automatic pantograph non-lowering switching mode. The signaling system employs a high-level effective control logic based on five beacons to achieve precise positioning and fault tolerance during the conversion process. The power supply system determines a solution involving four phase separators through the comparison of overhead line isolation conversion zone schemes and optimizes the track section without power to 9.5m to accommodate bidirectional operation and operational fault tolerance. The study demonstrates that this solution enables safe and efficient AC/DC conversion for trains, meets the operational requirements of the test line, and provides a reference for similar dual-power supply rail transit projects.

Keywords: AC-DC conversion; Catenary design; Signal control

0 引言

随着城市轨道交通网络的跨线互联趋势增强, 双流制列车因可适配不同供电制式线路而成为跨线运营的核心装备。为实现供电系统的无缝切换, 其交直流转换段的设计直接决定列车运行安全性、可靠性与运营效率。

传统交直流转换多采用人工降弓切换模式, 存在运营中断时间长、人为操作风险高等问题。本文基于实验线 As 双流制 6 编组列车的技术参数, 从车辆运行控制、信号精准定位、供电系统绝缘与回流保障三个维度, 构建全自动、高容错的交直流转换段方案, 重点解决转换过程中的弓网安全、速度控制、异常应急等关键问题, 为列车的跨线运营给予了一定的技术支撑。

1 车辆设计方案

列车编组与供电适配。实验线列车基于市域轨道交通运营需求, 采用双动力单元模块化设计, 确保单一单元故

障不影响另一单元基本功能。并可在 AC25kV 和 DC1500V 两种供电制式下工作, 其在交流、直流工况下的回流设计如图 1 所示。



图1 车辆编组布置示意图

通过交直流转换区时, 车辆以全自动切换的方式完成交直流供电转换, 并不降弓。为保证具有足够的切换时间, 根据计算, 车辆通过交直流转换段时的速度暂定为不超过 80km/h; 此时, 车辆通过交直流转换段, 以惰行的方式。当车辆以 80km/h 的速度通过转换段后, 速度损失最大约

为 10km/h^[1]。

2 信号设计方案

2.1 设计背景与基础参数

本实验线所采用的列车为 As 型双流制 6 编组车型，其供电系统可兼容 DC1500V 与 AC25kV 两种供电制式，能灵活适配不同区段的供电需求。列车的动力布局采用 4 辆全动车辆搭配 2 辆带受电弓车辆的组合形式，其中带受电弓的车辆具备工况自适应调节能力——在直流区段运行时处于半动车工作状态，承担部分动力输出功能；进入交流区段后，该类车辆则自动切换为拖车工况，仅配合列车整体行驶。受流系统采用接触网 - 受电弓匹配设计，每个牵引单元均配置双受电弓以保障供电稳定性，且整车未设置高压贯通线缆，避免高压传输过程中的安全隐患，其详细编组结构如图 2 所示。

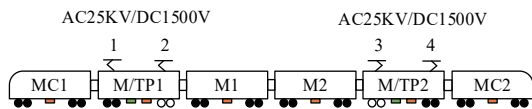


图2 列车编组图

其中，MC 车型为带司机室的动车，专门配备 2 个动力转向架，以满足驾驶操控与动力输出需求；M/TP 车型为带受电弓的动车，采用 1 个动力转向架与 1 个非动力转向架的组合配置，兼顾受流功能与行驶稳定性；M 车型为纯动车，搭载 2 个动力转向架，核心承担列车的动力供给任务。车辆受电弓间距参数如图 3 所示。

- 单受电弓碳滑板间距（最大）：420mm；
- 1、2 号碳滑板中心距：12894mm；
- 3、4 号碳滑板中心距：12894mm；
- 2、3 号碳滑板中心距：47650mm；
- 1、4 号碳滑板中心距：73438mm；

图3 受电弓间距参数

2.2 核心功能需求

2.2.1 自动切换功能设计

(1) 电平有效方式选择。信号系统与车辆的接口信息在相互进行采集驱动时按照高电平有效方式进行处理，目前车辆不支持低电平有效的状态。

信号系统处理列车降级和 RM 模式状态时输出的电平信号为低电平状态，若与车辆接口信息按照低电平有效方式处理时，当列车降级或处于 RM 模式下，车辆将会收到交直流转换位置、交流过分相信息，此信息会与实际状态不符。其次若采用低电平有效，信号系统需要增加高电平保持状态，若此时车载设备故障、宕机情况下车载信号设

备无法保持高电平有效状态，此电平保持逻辑与信号处理逻辑冲突，将影响信号系统的可用性。

(2) 五信标定位控制。车辆需信号系统经由硬线接口反馈单方向的 5 组精准位置数据，为其实现交直流供电的自动切换提供关键技术支持。关于这 5 个位置对应的里程参数，以及切换区域的入口速度标准，需由车辆向信号系统明确提出具体适配要求，确保切换过程的精准协同。直流切换到交流场景下以及交流切换到直流场景下，车辆提供的布点方案分别如图 4 与图 5 所示。

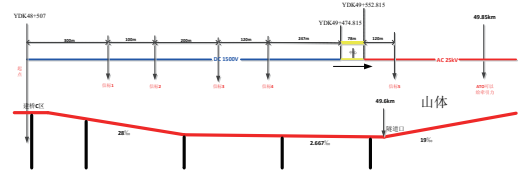


图4 直流切换交流示意图

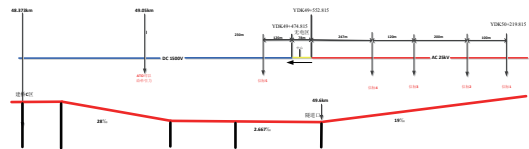


图5 交流切换直流示意图

在上述位置信息的交互逻辑中，信标 1 对应的位置信号由车辆通过硬线接口反馈至信号系统；与此同时，信标 1 至信标 5 的全量位置数据，车辆均通过 MVB 接口同步传输给信号系统，实现信息双向核验。信号系统则通过硬线接口向车辆下发信标 1 至信标 5 的精准位置信息，其输出的各项控制指令均为持续时长 5 秒的高电平脉冲信号，确保指令传输的稳定性与有效性。

2.3 运营场景流程

当列车运行于 AM/CM 模式时，车载 VOBC 通过 BTM 设备检测到信标信号后，将按以下预设流程逐步执行操作：

信标 1（触发阶段）：当列车运行于 AM/CM 模式时，车载 VOBC 实时监测列车位置，一旦判定列车行至信标 1 预设位置前方的可配置距离范围时，立即通过 1 路 ATO 独立硬线接口将该位置触发信息传输至车辆，同时在车载 HMI 进行对应提示，告知司机转换流程即将启动；车辆成功接收信息后，需通过独立硬线接口向车载 VOBC 反馈确认信号，若车载 VOBC 未成功捕获该反馈信号，将在车载 HMI 及时提示司机介入人工操作，避免流程中断。

信标 2（减载阶段）：列车处于 AM/CM 模式下，车载 VOBC 持续追踪位置信息，当识别列车接近信标 2 预设位置前方设定距离时，通过 1 路 ATO 独立硬线接口向

车辆发送减载触发指令。车辆接收指令后执行牵引切除操作；若列车当前处于 AM 模式，车载 VOBC 将直接自动完成牵引切除动作，保障列车平稳过渡至后续转换环节，为供电制式切换创造稳定工况。

信标 3（断 VCB 阶段）：车载 VOBC 判定列车抵达信标 3 预设位置前方指定距离时，通过 1 路 ATP 独立硬线接口向车辆传输该位置信号。车辆接收后执行真空断路器（VCB）断开操作，并经由 MVB 接口将 VCB 断开的状态信息回传至信号系统；若车载 VOBC 未获取到该状态反馈，将在车载 HMI 提示司机介入处理。需明确的是，列车行至信标 2 时的最高允许速度为 80km/h，经下坡滑行与惰行后，抵达信标 3 位置后实施紧急制动的制动距离不超过 330m，可确保列车停于无电区外；鉴于信标 4 及后续人工警示牌可实现强制断弓，保障列车安全通过无电区，因此信号系统收到车辆针对信标 3 的反馈信息时，不启动紧急制动程序，仅向司机提示自动切换故障。

信标 4（判定阶段）：当车载 VOBC 检测到列车接近信标 4 预设位置前方设定距离时，通过 1 路 ATO 独立硬线接口向车辆发送位置核验信号。车辆接收该信号后，通过 MVB 接口与信号系统开展双向信息交互，完成交直流转换状态的进一步核验，为后续恢复牵引或应急处置提供决策依据。

信标 5（恢复阶段）：列车处于 AM/CM 模式下，车载 VOBC 识别列车行至信标 5 预设位置前方指定距离时，通过 1 路 ATO 独立硬线接口向车辆传输牵引恢复触发信号。待车载 VOBC 接收到车辆反馈的牵引允许信号后，即刻输出牵引控制指令，恢复列车牵引功能，至此完成整套交直流供电转换流程，列车进入目标供电制式下的正常运行状态。

2.4 轨旁设备布置

轨旁信号设备在布置时考虑了多种场景，布置示意图如图 6 所示。

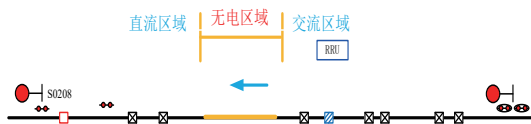


图6 交直区域信号设备布置示意图

当后车在无电区时，前车降级导致后车降级停在无电区场景；在切换区出口端增加 1 个计轴区段进行隔离，降低前车降级对后车的影响；当前车在无电区时，后车距离前车距离过近导致憋车的场景；在无电区入口和出口设置信号机，设置成单列车进路方式进行处理；当车地通信时，

在无电区附近设置 RRU 设备降低通信传输损耗；对于列车位置的准确性，部分信标点采用了双应答器方式进行布置，以缩小动态误差^[2]。

3 供电设计方案

3.1 接触网隔离转换区设计

3.1.1 设计原则与输入条件

接触网隔离转换区的设计核心准则，是以保障交 - 直流双制式牵引列车平稳完成牵引供电制式转换为核心目标，同时确保双制式供电系统运行过程中的安全性、稳定性与可靠性，从根源上规避交 - 直流供电系统间发生短路故障的风险。此外，针对运营阶段可能出现的各类故障工况，还需配套设计相应的救援保障措施，以提升系统应急处置能力。

设计所需的基础输入参数基于车辆自身特性确定，本次设计采用山地 AS 双流制型列车。该列车配置两个相互独立的牵引单元，每个牵引单元设有双受电弓，同一牵引单元内两个受电弓碳滑板的中心间距为 12.894m；不同牵引单元间相邻受电弓碳滑板的中心间距为 47.65m，列车上最远两个受电弓碳滑板的中心间距则达到 73.438m。根据远期运营规划，车辆将调整为 7 辆编组形式，但牵引单元的划分及受电弓间距等关键参数保持不变，如图 7 所示。

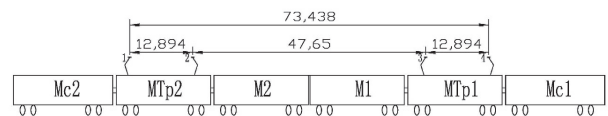


图7 列车编组示意图

列车在穿越接触网隔离转换区的过程中，需杜绝受电弓两端同时接触直流与交流电压的情形，否则将导致车辆出现逻辑故障提示。基于这一要求，接触网隔离转换区的长度需设定为 78m，该数值已超出双受电弓的最大间距，能够有效避免上述冲突问题。但隔离转换区长度也不可过长，一旦超出合理范围，列车以惰行模式通过时，陷入转换区的概率将大幅上升，综合考量安全冗余与风险防控需求，最终明确接触网隔离转换区的总长度为 78m。

列车在执行交 - 直或直 - 交供电制式转换时，将采用切断牵引单元主断路器但保持受电弓升弓状态的惰行方式，通过接触网隔离转换区。

3.1.2 方案比选

结合工程实际建设条件，并参考国外已建交流 - 直流接触网隔离转换区的相关工程经验，本次设计筛选出三种具备可行性的方案进行对比分析，最终确定最优实施方案。

(1) FRP (玻璃钢材质) 接触线绝缘。本方案的设计理念参考了日本筑波线的相关实践, 如图 8 所示, 具体通过在交、直直流接触网之间布置两段各长 20m 的 FRP 接触线, 从而分隔出总长度达 78m 的交 - 直流接触网隔离转换区域。借助 FRP 接触线本身所具备的卓越绝缘特性, 可有效阻断交、直流供电系统间的电气连通, 进而保障双制式供电系统运行过程中的绝缘稳定性与可靠性。



图8 接触网隔离转换区方案一示意图

该方案具备接触网结构设置简便、弓网配合关系良好、交 - 直流供电系统间绝缘效果稳定等优势。但存在明显的实施局限: 当前国内暂无 FRP 接触线的自主生产能力, 而该产品需从日本进口, 且日本方面对相关技术实施封锁, 导致产品获取难度大, 目前尚不具备落地实施的前提条件; 此外, 若列车不慎掉入接触网无电区, 仅能通过救援车牵引或相邻列车协助的方式将故障车辆拖出, 应急处置方式较为单一。

(2) 六台分相绝缘器绝缘。该方案采用在交 - 直流接触网之间布置 6 台分相绝缘器的方式, 成功分隔出总长度为 78m 的交流 - 直流接触网隔离转换区域。从结构划分来看, 隔离转换区的接触网被拆解为 ab、bc、cd、de、ef 五个独立区段, 其中 bc 区段与 de 区段的接触网, 分别通过 G3、G4 两台常闭隔离开关实现接地设计; 同时, 在直流段接触网与 ab 区段、bc 区段接触网之间, 专门配置了 G1、G2 两台常开联络隔离开关, 而 de 区段、ef 区段接触网与交流段接触网之间, 则对应增设了 G5、G6 两台常开联络隔离开关, 以保障不同制式供电系统的灵活切换与电气隔离, 如图 9 所示。

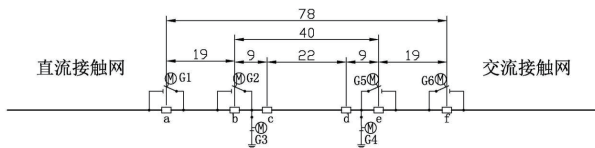


图9 接触网隔离转换区方案二示意图

该方案的突出优势体现在两方面: 一是所需设备与材料的采购及供应渠道畅通, 便于工程落地实施; 二是通过设置接触网常接地区域, 可有效规避因分相绝缘器故障或列车转换操作失误造成的带电误闯情况, 从根源上防范交 - 直流供电系统短路事故的发生。此外, 若列车因故障陷入转换区, 可通过隔离开关的倒闸操作缩短无电区长度, 使列车受电弓能够分别从直流接触网或交流接触网取流,

进而实现自主驶出, 提升应急处置的灵活性。

但该方案存在明显短板: 一方面, 6 台分相绝缘器与 6 台隔离开关的连接线缆会加重接触网的整体负荷, 且易形成较多硬点, 这会对弓网配合关系产生显著负面影响, 可能影响列车运行的平稳性; 另一方面, 6 台隔离开关的闭锁逻辑较为复杂, 倒闸操作流程繁琐, 不仅增加了操作人员的工作难度, 还无形中提升了人为误操作的风险, 不利于运营安全。

(3) 四台分相绝缘器绝缘。该方案通过在交 - 直流接触网之间布置 4 台分相绝缘器, 成功分隔出总长度为 78m 的交 - 直流接触网隔离转换区域, 该转换区内的接触网被划分为 ab、bc、cd 三个独立区段。其中, bc 区段接触网借助 G2 常闭隔离开关实现接地配置; ab 区段与 cd 区段均为中性区接触网, 二者分别通过 G1、G2 两台联络隔离开关, 对应与直流段接触网、交流段接触网建立连接, 确保不同制式供电系统的有序隔离与切换适配, 如图 10 所示。

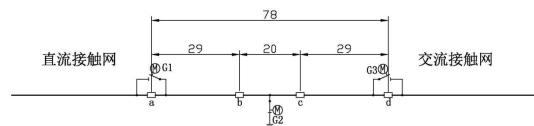


图10 接触网隔离转换区方案三

此方案具备多重显著优势: 其一, 所需设备与材料的获取渠道畅通, 利于工程推进实施; 其二, 通过设置接触网常接地区域, 能针对性规避分相绝缘器故障或列车转换异常引发的带电误闯风险, 从源头杜绝交 - 直流供电系统短路事故; 其三, 若列车不慎陷入转换区, 可通过隔离开关倒闸操作缩短无电区范围, 列车同步配合完成受电弓升降动作后, 便能分别从直流接触网或交流接触网获取电流, 实现自主脱困驶出; 其四, 相较于方案二, 此方案减少了两台分相绝缘器及部分上网连接线缆, 既有效降低了接触网的整体负荷, 又能显著优化弓网配合关系; 其五, 开关数量的精简进一步简化了闭锁控制逻辑, 让倒闸操作流程更便捷、执行更高效。且此方案仅存在一处局限, 即列车陷入转换区后的自救过程中, 需额外配合完成受电弓的升降操作。

综合对比上述三种方案的优缺点, 方案三在设备可用性、弓网关系优化、操作便捷性及应急处置灵活性等方面均表现更优, 因此确定方案三作为本工程交流 - 直流接触网隔离转换区的最终实施方案。

3.2 钢轨无电区设计

3.2.1 回流轴与绝缘节要求

车辆设两个动力单元, 两动力单元间高压不联通。车

辆交流、直流工况下的回流轴设置如图 11 所示。



图11 车辆交流、直流工况下的回流轴设置示意图

车辆在穿越交直流转换区的过程中，为确保动力持续输出不受影响，需保障车辆回流系统稳定运行。具体来看，当列车处于直流运行工况时，单个牵引单元需确保该单元内全部直流回流轴均能正常实现回流功能；而在交流运行工况下，单个牵引单元则至少需有 1 根交流回流轴可完成回流操作，以此维持动力系统的连续工作。因此，当车辆最后一架受流弓即将驶入无电区之际，为契合前述回流相关要求，轨道绝缘节的具体布设方式如图 12 所示。

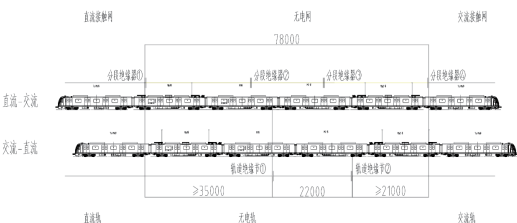


图12 轨道绝缘节设置示意图

按照上述方案设计接触网及回流轨道，车辆掉入无电区时，须分别闭合分段绝缘器①及分段绝缘器④处的隔离开关，车辆配合接触网调整受电弓升降顺序后，驶出无电区。

3.2.2 钢轨无电区长度选择分析

为了平衡停车容错率、切换次数与双向行驶需求，需要对钢轨无电区长度进行选取，用 Δ 来表示，本文对 Δ 为 0 米、5 米、14 米三种情况进行分析。

当 Δ 等于 0 米时，无电区三段长度为 35m、8m、35m，车辆通过交直流转换区时，需在停车标 1 处停车，此时第一架受电弓仍未越过分段绝缘器④，车辆与弓网关系如图 13 所示。

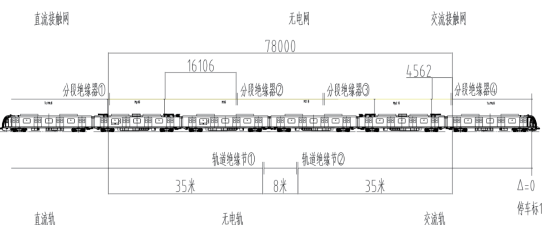


图13 $\Delta=0$ 米时钢轨无电区示意图

然而，由于车辆直流主回路采用双弓受流方案，由两架受电弓共同承担车辆运行时的工作电流，该方案下单弓受流容易出现工作电流超过车辆最大载流量设计的风险。

当 Δ 等于 5 米时，三段长度为 40m、8m、30m，车辆通过交直流转换区时，需在停车标 2 处停车，此时第一架受电弓刚好越过分段绝缘器④ 78mm，车辆可直接受流继续前进，车辆与弓网关系如下如图 14 所示。

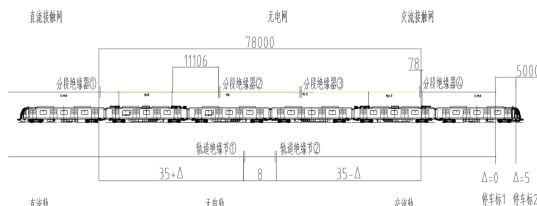


图14 $\Delta=5$ 米时钢轨无电区示意图

当轨道无电区长度按 Δ 等于 5 米设计时，相较于 Δ 等于 0 米的设计方案，能够减少一次隔离开关的切换操作，进而缩短列车通过转换区的整体时间。不过，该设计下受电弓恰好越过分段绝缘器④，这就对司机的停车定位精度提出了更高要求，一旦车辆停车位置出现偏差，极易引发列车无法正常受流的问题。

当 Δ 等于 14 米时，三段长度为 49m、8m、21m，车辆通过交直流转换区时，需在停车标 3 处停车，此时第一架受电弓已经越过分段绝缘器④ 9078mm，车辆与弓网关系如图 15 所示。

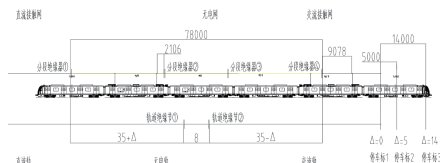


图15 $\Delta=14$ 米时钢轨无电区示意图

相较于轨道无电区长度按 Δ 等于 5 米的设计方案，当采用 Δ 等于 14 米的设计时，受电弓越过分段绝缘器④的距离可超过 9 米，这使得对司机停车定位的精准度要求更为宽松，能有效规避因车辆停车位置偏差而导致的无法正常受流问题。

综合上述不同 Δ 值的设计分析结果可知，当轨道无电区长度 Δ 的取值落在 5-14 米区间内时，列车在穿越交直流转换区的过程中，均能满足前动力单元受电弓顺利越过分段绝缘器④、接入交流网获取电流的核心需求。在该取值范围内，此设计可为司机预留的最大操作空间达到 9 米。

根据 Δ 的取值范围，为司机操作时预留足够的安全余量和操作容错空间， Δ 值可按照如下方法计算：

$$\Delta = 5 + 4.5 = 9.5 \text{ 米}$$

此时车辆受电弓与各绝缘节相对距离如图 16 所示。

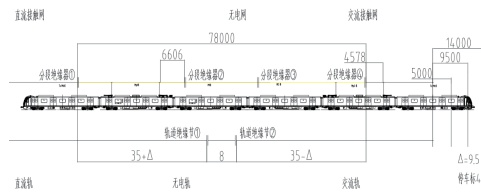


图16 $\Delta=9.5$ 米时车辆受电弓与各绝缘节相对距离示意图

此时，三段长度为 44.5m、8m、25.5m，具备以下优势：

- (1) 预留 9m 操作空间，满足司机人工操作需求；
- (2) 支持双向行驶；
- (3) 仅需 1 次隔离开关切换，切换时间短；
- (4) 受电弓越过分段绝缘器时，碳滑板与的距离大于 9m，避免位置偏差导致的无流风险。

综上所述，最终钢轨无电区长度选用 9.5m。

4 结语

本文针对实验线列车交直流转换需求，从车辆、信号、供电三大系统构建一体化设计方案，最终结论如下：

- (1) 车辆采用全自动不降弓切换模式，主电路切换时

序保障安全。

(2) 信号系统基于 5 个信标的高电平有效控制，实现转换过程的精准定位与异常容错，轨旁设备优化提升系统可靠性。

(3) 供电系统推荐 4 台分相绝缘器接触网方案，以及 9.5m 的钢轨无电区设计，平衡安全性、操作性与经济性。

通过以上关键数据的确定，各系统协同设计可实现列车安全、高效的交直流转换，为同类双流制轨道交通工程提供技术参考。后续可进一步研究长期运营中弓网磨损规律与转换段能耗优化，提升方案的经济性与耐久性^[9]。

参考文献：

[1] 谢明所. 基于信标的双流制列车过交直流转换段方案研究[J]. 铁道建筑技术, 2024 (01):190-194.

[2] 刘锐. 交流 - 直流双制式接触网隔离转换区设置方案研究[J]. 电气化铁道, 2022 ,33 (03):52-56.

[3] 胥伟. 交直流双制式城市轨道交通方案设计与关键技术探讨[J]. 电工技术, 2020 (13):60-61+64.

作者简介：杜茵茜（1981.05-），女，汉族，重庆人，硕士，高级工程师，研究方向：从事铁路信号工作。