

摘要:列车自动防护 (ATP) 子系统是城市轨道交通列车运行时必不可少的安全保障。结合西安地铁 2 号线阐述基于无线移动闭塞列车自动防护 (ATP) 子系统的轨旁、车载主要设备的体系结构、主要性能、系统功能、工作原理及数据通信网络设计技术方案,为城市轨道交通信号控制系统提供技术参考。

关键词:无线移动闭塞;列车自动防护系统;区域控制器 (ZC);车载控制器 (CC);西安地铁

目前我国城市轨道交通的固定闭塞、准移动闭塞、移动闭塞 3 种制式的列车自动控制系统 (ATC) 中,列车自动防护 (ATP) 子系统的组成、功能和工作原理均有差异[1]。西安地铁 2 号线采用的 ATP 子系统利用当今最先进的无线移动闭塞制式实现车-地之间双向、连续、可靠、安全的数据交换,完成列车移动授权,实现超速防护,保证列车以最小的间隔安全运行。

1 列车自动防护子系统的组成及性能

西安地铁 2 号线 ATC 的核心子系统 ATP 的主要组成和性能如下:

1.1 ATP 子系统的组成

ATP 子系统主要由轨旁设备和车载设备两部分组成。

(1) 轨旁设备。由位于设备集中站的多个分布式区域控制器组成 (见图 1[2])。区域控制器采用三取二冗余配置,正线计算机联锁采用双机热备联锁控制器,联锁控制器的输入和输出接口采用安全继电器。

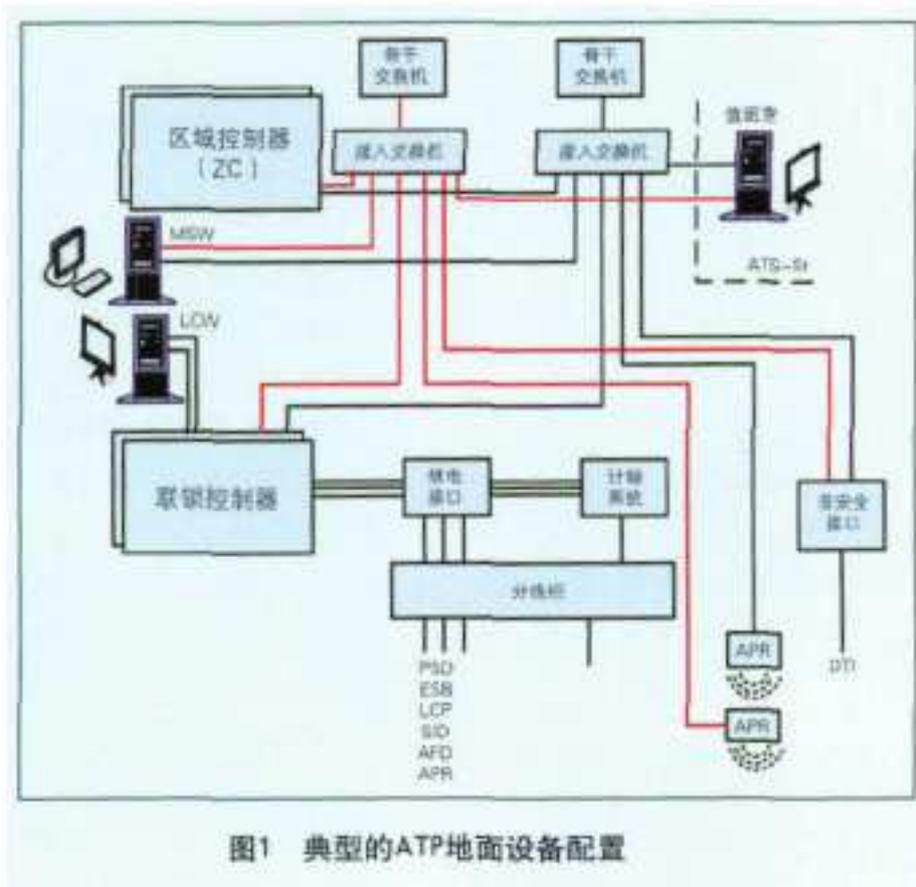


图1 典型的ATP地面设备配置

(2) 车载设备。列车两端分别安装有一套车载设备 (见图 2[2])，其关键设备车载控制器采用三取二冗余配置。

1.2 ATP 子系统的主要性能

(1) 运营行车 (6 辆编组) 间隔: 2min;

- (2) 设计行车间隔: <90s;
- (3) 设计折返间隔: <110s;
- (4) 一个轨旁区域控制器 (ZC) 能够处理的最多列车数量: 30 列;
- (5) 车站站台停车误差判定标准: $\pm 0.5\text{m}$;
- (6) 测速范围: 0~100km/h;
- (7) 列车测速精度: $\pm 0.5\text{km/h}$;
- (8) 车到地、地到车的通信延时: 0.5s;
- (9) 轨旁设备、车载设备反应时间: 0.5s;
- (10) 实时记录并存储操作、运行数据、ATP 信息容量: 192 h 以上。

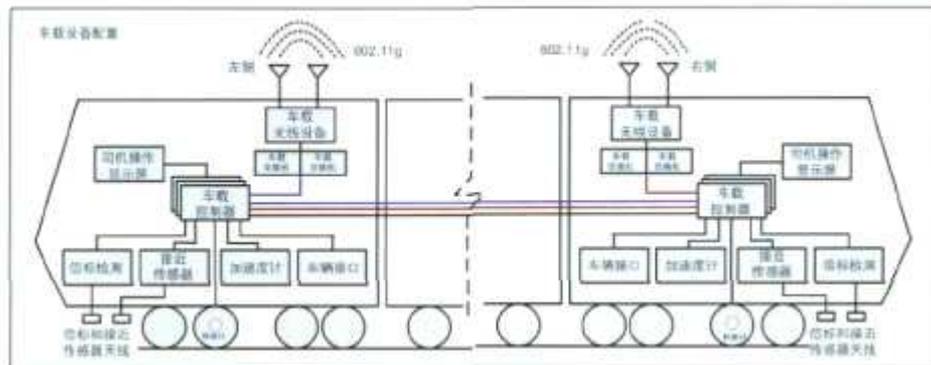


图2 车载设备配置图

2 ATP 子系统的功能

ATP 子系统主要负责“超速防护”，起保障安全的作用[3]。

2.1 测速与测距

ATP 子系统车载设备利用安装在轮轴上的测速传感器检测列车的实际速度，并在驾驶室内显示该速度值。测距是通过记录车轮转数和预知的车轮直径加以换算而实现的。对于不准确的列车位置/速度测量，如车轮空转、蠕滑、抱死等引起的误差可进行修正。

2.2 安全列车间隔

列车间隔控制是一种既能保证行车安全，又能提高运行效率的信号概念。移动闭塞与划分闭塞分区、设立防护信号机的固定闭塞不同，移动闭塞的闭塞长度和位置不固定，是随前行车的位置、后续列车的实际速度及线路参数（如坡度）不断改变[4]。

ATP 子系统能将移动授权限定在前方列车尾部后面的安全距离外方停车点，保证列车之间的最小安全间隔。

无线数据通信是移动闭塞实现的基础。列车通过可靠的无线数据通信网，不间断地将其标识、位置、车次、列车长度、实际速度、制动潜能和运行状况等信息以无线传输方式发送给轨旁区域控制器（ZC），ZC 根据来自列车的信息计算、确定列车的安全行车间隔，并将相关信息通过无线传输方式传递给列车，控制列车运行[5]。

2.3 超速防护和制动保证

ATP 子系统根据固定限速，如区间最大允许速度（取决于线路参数）、列车最大允许速度（取决于列车的物理特性）和临时限速，如线路在维修时设置的临时速度，计算常用制动和紧急制动模式曲线，常用制动略低于紧急制动曲线 3~5km/h。当列车的实速超越最大允许速度时，ATP 车载设备立即发出报警提示；当超速达到一定值时，输出最大常用制动命令，保证在预计时间内可达到制动或减速的目的，否则立刻实施紧急制动，确保在任何情况下配有车载设备的列车都不会超出移动授权限制。

2.4 紧急制动



紧急制动系统能保证列车在安全制动模式所确定的停车距离内停车。紧急制动一经激活，在列车完全停车前不会缓解。即使 ATP 所测定的列车运行状况错误，紧急制动仍将继续，任何复位信号和干预行为均无效。ATP 通常在检测出车载 ATP 有涉及安全故障、列车非正常移动、运行中车门开启、列车发生脱钩等故障时对列车实施紧急制动。

2.5 车门安全控制

车载 ATP 子系统严格监督车门控制的安全条件，防止列车站外开门和站内开错门以及列车未停稳开门或车门打开时列车启动等情况的发生。当 ATP 检查所有安全条件均已满足时，才发出开门允许信号，车门依据运行模式的不同自动或人工打开。

ATP 子系统监视列车的停车位置误差。当列车在车站的停车窗内停稳且停车点的精度在允许范围以内 ($\pm 0.5\text{m}$) 时，车载控制器 (CC) 根据线路数据库和车辆运行方向决定开哪侧门。当停车误差超过允许值时，ATP 将实施保护，不许开门，并给出表示，此时允许列车以小于 5km/h 的速度移动，以满足停车的精度要求。当列车长度超过站台长度时，要保证在站台有效长度内的车门才能打开，其他车门锁在关闭位置。

列车停站结束后，司机可人工关闭车门。若关门模式选择开关位于“自动”位置时，车门则会自动关闭。车门关闭后，车载 ATP 才具备安全发车条件。

2.6 站台屏蔽门控制

轨旁联锁控制器 (Microlok II) 连续监测屏蔽门的状态。可发出“屏蔽门开”或“屏蔽门关”的指令。只有在屏蔽门“关闭且锁闭”的情况下才允许列车进入站台区域。当列车停在 ATP 停车窗规定的停车点后，CC 会向 MicrolokII 发出相应站台侧“屏蔽门开”的指令，同时 MicrolokII 会请求屏蔽门控制器打开屏蔽门。停站结束，CC 向车辆和屏蔽门控制器发出请求，关闭屏蔽门和车门（车门和屏蔽门的开关可同时进行）。司机按下发车按钮，即可发车。

2.7 其他功能

(1) 防倒退控制。车载 ATP 子系统监测正线上列车的实际运行方向，并将测定方向与设定/指令运行方向进行比较，如果列车的倒退超过了预设距离 (0.5m)，ATP 子系统就会实施紧急制动。

(2) 防溜控制。列车处于列车自动运行 (ATO) 模式且已在站台停车窗停车时，ATP 子系统通过速度传感器和加速度计，检测列车是否停稳。如果检测到列车在没有命令的情况下移动了一定距离，ATP 子系统将实施紧急制动。

(3) 紧急停车控制。在特殊紧急情况下，按压设在站台上或控制室的紧急停车按钮（平时加铅封），可对线路上的列车实施紧急制动，使其停止运行。

(4) 受限进路的防护。ATP 子系统可与影响进路安全的检测设备接口，防止列车驶入非安全进路。非安全因素有：临时的土建、电力、轨道设备维修等。

(5) 运行反方向联锁控制。ATP 子系统通过 CC 和 ZC 对列车运行方向实施管理和移动授权，对同一区域内相反方向的列车限制移动授权。

(6) 隔断门和防淹门的防护。在接收到防护隔断门脱离安全位置的信息时，阻止列车接近防护隔断门。在接收防淹门的关闭请求时，ATP 子系统将允许所辖范围内的列车离开，确定无车后关闭该区域，限制该区域外的列车进入。

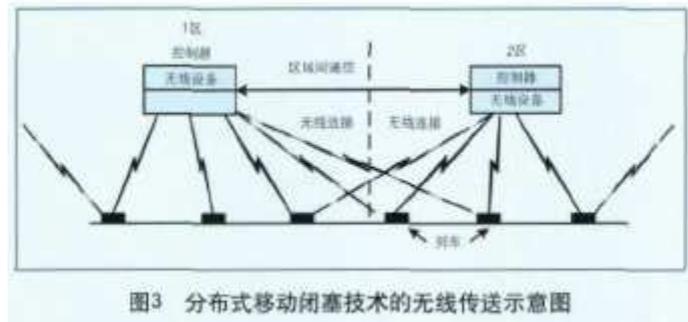
(7) 人机交互界面。车载 ATP 子系统的人机交互界面应显示驾驶列车时所需的各种信息，包括实际速度、最大允许速度、目标距离、驾驶模式、车门/屏蔽门控制及状态表示、列车准确停站指示、跳停指示、系统出错信息等。

3 ATP 子系统的基本原理

3.1 分布式无线移动闭塞的工作原理

无线移动闭塞的线路被划分成若干个区域，每一个区域内的 ZC、CC、MicrolokII 之间通过数据通信子系统 (DCS) 进行连续的双向数据通信，控制本区域内的列车运行。列车通过相邻 ZC 之间的有线通信实现从一个控制区进入下一个区域的移交。当列车到达区域边界时，后方 ZC 将列车到达信息传递给前方 ZC，同时命令列车调整其通话频率，前方 ZC 在接收并确认列车身份后发出公告，移交便告完成。两个相邻控制区域有一定重叠，保证列车移交时无线通信不中断（见图 3[5]）。





3.2 轨旁主要设备的工作原理

(1) ZC 和 MicrolokII 的工作原理。ZC 是基于微处理器的安全控制器，ZC 通过 DCS 与区域内的 MicrolokII、CC、ATS 接口。每个 ZC 接收临时限速指令和该控制区内列车发出的位置信息，根据所有已知障碍物的位置和预计的交通荷载确定其区域内所有列车的移动授权，并持续更新和传输移动权限指令，通过移动闭塞确保列车以最小的运行间隔安全运行。同时 ZC 也回应相邻 ZC 的移动授权申请。

Microlok II 是基于微处理器的逻辑控制器，每个 MicrolokII 都有一个唯一的 IP 地址，通过轨旁网络与 ZC 保持通信。MicrolokII 安全执行传统的联锁功能，与轨旁的转辙机、信号机、屏蔽门等设备接口，并控制和表示这些设备。

(2) 列车自动监控 (ATS)。采用冗余结构传输命令，在 ATP 子系统的支持下完成对全线列车运行的自动管理和监控。

(3) 数据库存储单元 (DSU) 和临时限速数据库管理。DSU 保存所有维护记录和列车运行线路的轨道数据。轨道数据库通过离线数据库创建，包括：土建限速信息、身份识别号码、轨道应答器位置、转辙机位置、折返位置、其他障碍物的位置等相关线路信息。每个 CC 和 ZC 都使用轨道数据库，定期与数据库服务器联系，获取当前正在使用的数据库版本号。如果 CC 或 ZC 需要更新数据则向数据库服务器发出请求，数据库服务器将通过发送一系列所需的轨道数据信息来回应。

动态临时限速指令由 ATS 生成，并发送至 ZC。ZC 定期向其他 ZC 发送该指令，ZC 也向位于其区间的 CC 发送动态临时限速指令。

3.3 车载主要设备工作原理

(1) 车载控制器 (CC) 是基于微处理器的控制器，每个 CC 内存中储存与列车运行有关的轨道线路数据。CC 与列车控制的各子系统接口，并通过 DCS 与 ZC 接口，完成列车定位、允许速度执行、控制模式的管理、移动授权等功能。

(2) 车载无线设备 (MR) 采用空间分集技术，分别安装在列车两端，用来在车载设备和轨旁设备间传输数据。

3.4 数据通信子系统 (DCS) 结构与功能

数据通信子系统体系结构框图见图 4。



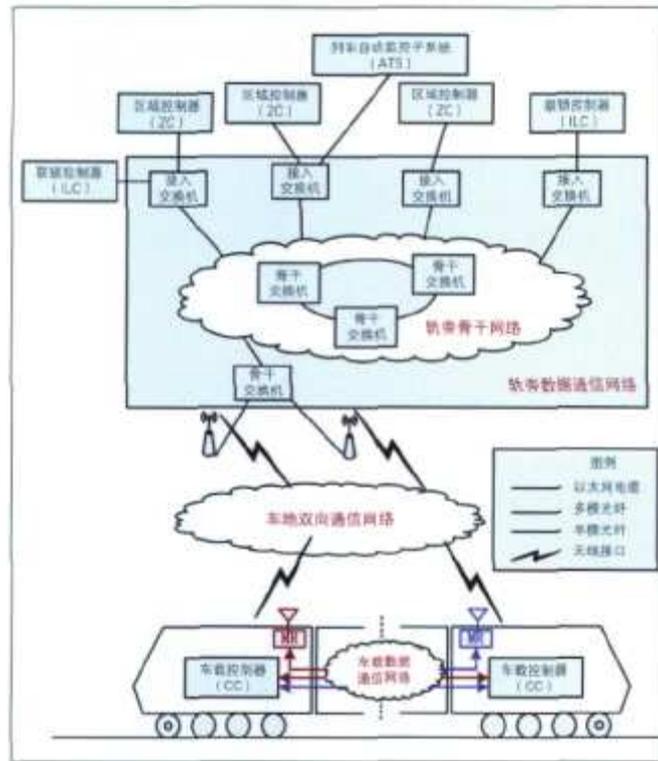


图4 数据通信子系统体系结构框图

DCS是一个宽带通信系统，应用国际通行的协议：有线通信网络采用IEEE802.3以太网标准，无线通信采用先进的WLAN技术——IEEE802.11g标准。提供开放的业界通信接口标准，最大程度地采用现成的商业化设备，实现信号系统各设备之间双向、可靠、安全的数据交换。

(1) 轨旁数据通信网络提供轨旁设备接入DCS的接口。接入交换机提供标准的10/100 Mb/s以太网接口，遵循国际通行的IEEE802.3u和802.3x协议。网络层和传输层协议采用UDP/IP。

(2) 轨旁骨干网络由骨干交换机组成，交互连接到两个独立的单模光缆，形成环式拓扑结构。骨干网采用弹性分组数据环技术将接入交换机连接起来，集IP的智能化、以太网的经济性、光纤环网的高带宽效率和可靠性于一体。网络层和传输层协议采用UDP/IP。

(3) 车载数据通信网络提供车载设备间的通信接口。车载ATP和ATO通过两个独立的以太网与MR连接。采用双绞线彼此连接的以太网扩展设备实现车厢之间的通信，车厢的本地通信经过滤处理，信息不向外部发送。

(4) 车-地双向通信网络提供车-地之间双向、高速、安全、可靠、实时的移动数据交换。无线接口采用国际先进的IEEE802.11g标准，遵循IEEE802.11i无线网络安全协议。

4 结束语

基于无线移动闭塞制式的西安地铁2号线列车自动防护子系统具有设备数量少、建设及维护成本低，采用统一标准、易于实现互通互联，硬件冗余、保证高可靠性等特点，实现了车-地之间的双向、实时、高速、可靠、安全的移动通信，完成了列车超速防护，保证列车以最小的间隔安全运行。目前该设计方案已进入实际应用阶段。

参考文献

- [1]何宗华.城市轨道交通通信信号系统运行与维护[M].北京：中国建筑工业出版社，2007
- [2]美国联合道岔与信号国际公司.西安地铁2号线信号系统初步方案[S]，2007
- [3]吴汶麒.城市轨道交通信号与通信系统[M].北京：中国铁道出版社，2003
- [4]刘晓娟.城市轨道交通智能控制系统[M].北京：中国铁道出版社，2008
- [5]林瑜筠.城市轨道交通信号[M].北京：中国铁道出版社，2008



