

# 地铁信号系统的现状及发展趋势

## Nowadays Situation and Development Tendency of Mass Transit Signaling System

南京电子技术研究所三思实业公司 (南京 210013) 蔡爱华 季锦章

**【摘要】** 分析了地铁信号系统的现状, 其中着重论述了列车自动控制、自动驾驶、自动防护和自动监督方面的情况。在发展趋势部分, 文章指出利用通信、计算机、自动控制及数字信号处理等技术的最新成果开发出来的先进列车自动控制系统必将得到越来越广泛的应用。

**关键词:** 列车自动控制, 列车自动驾驶, 列车自动防护, 列车自动监督, 联锁

**【Abstract】** This paper analyzed the nowadays situation of mass transit signaling system with emphasis on ATC, ATO, ATP and ATS. In the part of development tendency of mass transit signaling system, the article pointed out what the advanced automatic train control system with the new technology of communication, computer, automation and digital signal processing (DSP) will be used extensively.

**Key words:** automatic train control (ATC), automatic train operation (ATO), automatic train protection (ATP), automatic train supervision (ATS), interlocking

### 1 引言

地铁信号系统, 已从早期的固定闭塞发展到了准移动闭塞, 正在向移动闭塞方向发展。目前普遍使用的是基于数字轨道电路的准移动闭塞系统, 数字轨道电路是列车自动控制(ATC)的基础。

世界上大多数新建的地铁系统都或多或少地配置了先进的列车自动控制(AATC)设备, 以保证列车运行的安全性以及操作的方便性和灵活性。ATC系统由ATP(列车自动防护)、ATO(列车自动驾驶)、ATS(列车自动监督)三个子系统组成。

ATP是ATC系统最重要的部分, ATP根据故障-安全原则, 执行列车安全间距的监控、列车的超速防护、安全开关门的监督和进路的安全监控等功能, 确保列车和乘客的安全。ATO主要执行站间自动运行、列车在车站的定点停车、在终点的自动折返等功能。ATS的主要作用是监督列车状态、产生列车时刻表、自动调整列车运行时刻和保证列车按时刻表正点运行。

目前的ATC系统基本上能满足当前客运量对行车安全、行车密度等的要求, 但这种ATC系统所含设备的品种多、设备量大、接口关系复杂, 在安全性、可靠性等方面尚有需完善的空间, 随着科学技术的进步, 它必将发展成为更先进、更可靠、服务性能更佳、智能化程度更高的系统。

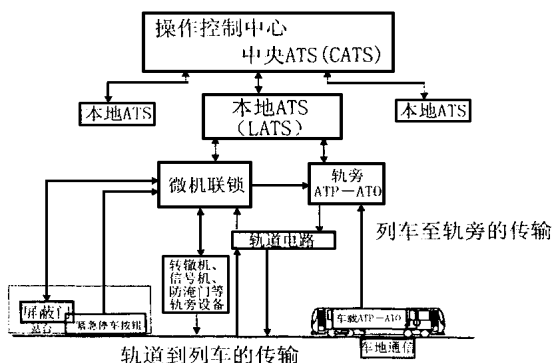


图1 典型的ATC系统框图

### 2 目前普遍使用的ATC系统

早期地铁信号系统以音频轨道电路为基础, 但音频轨道电路由于信息量、可靠性、抗干扰等性能不能满足高密度行车的要求, 故逐渐被报文式数字轨道电路取代, 目前应用得最多的地铁信号系统是基于数字轨道电路的ATC系统。

总的来说,ATC 系统由ATS、ATP、ATO 三个子系统组成,其中ATP/ATO 按地理位置的分布又分为轨旁ATP/ATO 和车载ATP/ATO。联锁从原理上讲应属于ATP 的一部分,但由于新近发展起来的微机联锁在功能、设备方面具备较强的独立

性,因此联锁部分往往被单独列出来介绍。ATC 系统的框图如图1所示。

## 2.1 ATS 系统

ATS 系统的结构如图2所示。

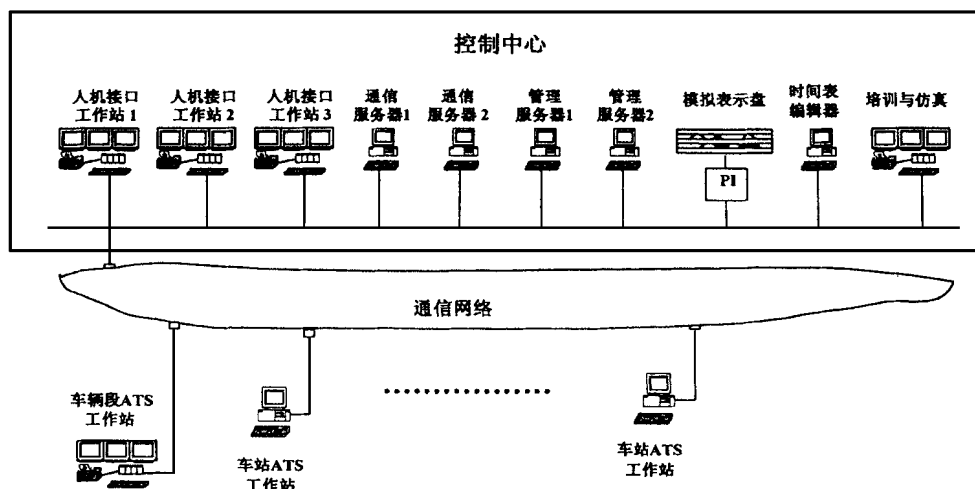


图2 ATS系统结构图

ATS 子系统负责监视和控制整个地铁线路中列车的运行状态。它由位于操作控制中心、监督控制地铁全线情况的中央ATS 和位于车站的进行区域控制的本地ATS 组成。中央ATS 与本地ATS 之间通过通信设备不停地交换信息。信息的传输一般以光纤作媒介。中央ATS 的设备之间及本地ATS 之间分别组成局域网。工作站采用相同的硬件和系统软件,操作员根据各自的操作权限可在任一工作stations 对地铁系统进行监督与控制。

ATS 为非故障安全系统,它的全部或任何一个部分的故障或不正确操作,不会影响列车运行的安全。ATS 通过ATP 有效地防止了由于ATS 故障或不正确操作可能导致的对列车运行的危害。

ATS 系统主要提供下列功能:

- 显示地铁系统的运行情况和有关设备的状态信息,以便调度员进行人工控制。显示的信息包括列车位置指示、进路状态、信号状态、列车识别号和道岔位置等。

- 通过对联锁单元的控制请求实现中心ATS 对现场设备的控制。中心ATS 同时从现场接收信号系统反馈的状态信号。

- 自动或根据操作人员的请求,将中央ATS 的控制权限下放给车站本地ATS 设备,经ATS 通信链路,调节列车在每个站台上的停留时间和在站间的运行等级。

- 列车识别和跟踪:当列车从一个轨道电路运动到另一轨道电路时,系统跟踪每辆车的当前位置。通过每个车站的车-地(TWC)通信链路,确认识别列车号以保证正确的列车跟踪。

- 列车时刻表的生成、编辑和修改,调整列车发车时刻和运行等级以使列车按照时刻表运行。

- 生成异常情况警报。
- 生成运行报告和统计报告。
- 记录运行数据,并可事后回放。
- 列车进路选择(自动或人工)。
- 自检和诊断。

## 2.2 ATP 系统

ATP 系统以故障安全原则强制系统安全工作。它用来检查和控制所有涉及道岔动作、列车占用状态、列车运行速度、列车追踪间隔、地面信号灯指示、列车进路等安全性。列车紧急制动闸的释放、行驶距离的确定、车门的监督、折返的监督、列车运行速度

的监督等也属于 ATP 控制的范畴。

组成框图如图 3 所示。

ATP 分车载 ATP 和轨旁 ATP。典型的 ATP

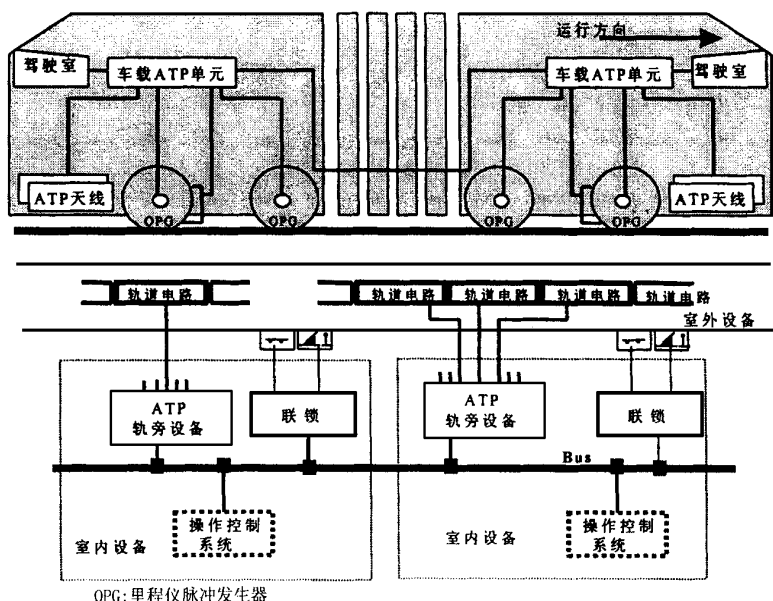


图 3 ATP 组成示意图

轨旁 ATP 计算机根据轨道参数、最大运行速度和轨道电路的占用情况实时计算保证列车安全运行的最小行车间隔，从联锁计算机、轨道电路等系统中接收各种命令和参数，形成报文，通过轨道电路发送给在轨道上运行的列车。ATP 报文主要有目标距离、目标速度、最大限速、紧急停车、轨道电路编号等安全性数据。列车通过车载 ATP 天线接收这些数据，并形成相应的速度保护曲线，保证列车在安全状态下行驶。

检测轨道上列车占用状态和传送报文信息的轨道电路是列车自动控制的基础。目前新建的地铁信号系统，普遍采用的是无绝缘报文式数字轨道电路。轨道电路的设备分两部分，一部分在现场轨道上，另一部分在设备集中站。报文信息可以通过双绞线由设备集中站传输到现场调谐单元。

与音频轨道电路相比，数字轨道电路在可靠性、传送的信息量、传输信息的灵活性等方面具有绝对的优势，但目前在北京、上海等城市的一些地铁线上采用的仍然是音频轨道电路。由于音频轨道电路传输的信息较少，不能把线路沿线的情况，尤其是变化情况及时地传递给列车，只能以通过轨旁设备对轨道电路进行限速的手段控制列车的运行，故列车控

制的精确性、平稳性和灵活性较差，很难达到 120 s 的安全行车间隔。因此，音频轨道电路会逐步被数字轨道电路取代。

车载 ATP 设备主要由车载 ATP 计算机及必要的外围设备如里程仪、ATP 天线等组成。车载 ATP 计算机根据里程仪送出的距离脉冲解算出列车实际运行速度，根据接收到的 ATP 报文信息实施对列车距离和速度的监督、紧急停车的监督、停车点的监督等安全性功能，并把相应的距离、速度等参数送给驾驶室里的辅助显示单元，作为驾驶员操作控制列车的依据。

联锁是 ATP 的一个重要组成部分，联锁功能根据中央控制中心安排的列车进路，控制轨道沿线相应的转辙机及信号机。联锁主要有道岔和进路的联锁、进路与进路之间的联锁、进路与信号机之间的联锁、信号机与信号机之间的联锁等内容。目前普遍采用微机联锁技术，传统的继电联锁技术正在被逐渐淘汰，有些国家已决定不再发展继电联锁。目前采用的微机联锁有两种典型技术：一种是从硬件组成和结构上来提高计算机的安全性，如采用双机并行处理方式、三取二表决方式、二取二加热备方式等，各种组成方式的复杂程度不一样；另一种实现微机

联锁故障- 安全性技术所采用的是软件方法, 即在单套设备中采用双通道软件比较、双版软件、冗余编码、软件自校核、互校核、多重检验等手段保证联锁设备的安全性。

联锁计算机是联锁系统的核心, 主要完成故障- 安全联锁逻辑的计算, 并通过 I/O 接口控制信号机、转辙机和轨道电路等现场设备。

### 2.3 ATO 系统

ATO 执行站间自动运行、车站定点停车、自动折返、开/关车门和车站停车时间控制等功能。

ATO 又分轨旁 ATO 和车载 ATO 两部分, 实际上 ATO 与 ATP 从设备上已经很难严格区分, 这里仅从概念上介绍一下 ATO 的功能。

地铁信号系统现在所采用的 ATO 方式多为站间自动运行方式, 车站的开、关门及列车出站时的启动由驾驶员负责, 目前的技术从理论上讲已具备了全程自动驾驶能力, 但考虑到乘客的心理、安全性、可靠性、必要性等方面的因素, 列车都配备了驾驶员。

列车驾驶员的责任主要是在正常情况下列车离站时启动列车, 信号设备故障时, 人工驾驶列车。ALSTOM 公司提出了一种“车载智能”概念。原理是把一定范围内的线路状态, 如轨道占用情况、线路临时限速情况实时地告诉列车, 列车根据贮存在车载设备中的轨道坡度、弯度、轨道电路编号等信息实时计算出最节能最高效而又最安全的运行曲线。这种运行模式一定会在“移动闭塞”方式中得到广泛的应用。

### 2.4 准移动闭塞和移动闭塞技术

目前地铁信号系统中普遍采用的是准移动闭塞技术(在以前的一些地铁信号中尚有许多采用固定闭塞技术的情况, 因篇幅所限, 这里不作介绍了), 准移动闭塞概念建立在采用轨道电路检测列车位置的基础上, 参见图 4。假设轨道电路 TC4 被列车 1 占用, 那么后续列车 2 只能停在轨道电路 TC3 上, 为防止碰撞, 还必须预先确定一段安全保护距离(overlap)。从图 4a 中可看出, 似乎两辆列车间的间隔很小, 但若如图 4b 所示(列车 1 车尾一小部分占用 TC4, 列车 2 仍只能停在图 4a 的位置上), 这时两辆列车间的距离为一个轨道电路的长度。对列车 2 来说, 只要前方轨道电路被占用, 就绝不允许进入前方已占用的轨道电路, 列车 2 把前方被占用轨道电

路看作是一个不可逾越的“点”, 这是由安全性原则决定的, 这种方式就称为准移动闭塞方式。在准移动闭塞中, 关键问题是列车 2 只知道自己在轨道电路中所处的精确位置(通过车载里程仪和地面距离同步确定), 而不知道前行列车在轨道电路中的精确位置, 移动闭塞则通过双向通信手段使每辆列车不仅知道自身在线路中的位置, 而且也了解前行列车在线路中的精确位置, 这样就可以缩短列车的行车间隔(如图 4c 所示), 提高行车密度和行车效率, 从而增强客运能力, 提高服务质量和水平, 这正是地铁信号系统发展的需求和趋势。

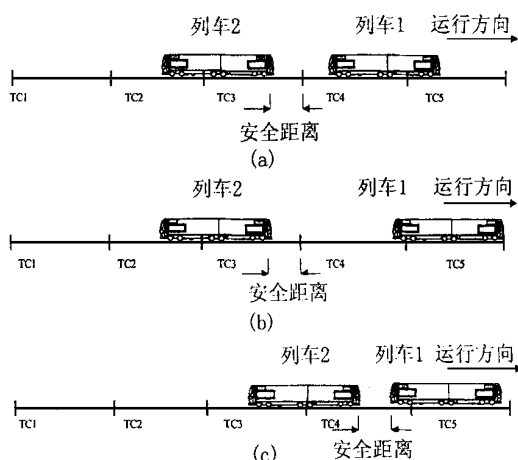


图 4 准移动闭塞、移动闭塞举例

## 3 地铁信号系统的发展趋势

地铁信号系统的发展趋势主要体现在三个方面: 一是通信网络技术在地铁信号中的应用, 形成了以通信为基础的 AATC 系统; 二是随着通信安全性、可靠性的提高和通信手段的多样化, 目前普遍采用的站间 ATO 方式将向全程无人 ATO 方式发展; 三是利用先进的网络技术与计算机技术, 单一的 ATS 系统将向集成化的综合地铁控制系统方向发展。

### 3.1 AATC 系统

科技的进步、用户的需求, 促进了地铁信号系统的发展。1995 年在美国华盛顿召开的第一届“基于通信的列车控制系统”国际研讨会上, 与会代表的关于“作为信号基础设施的轨道电路将被日新月异的现代通信技术所代替”的预言即将变成现实, ALCA TEL 公司、ALSTOM 公司、HARMON 公司

都开发出了基于通信的实现移动闭塞的地铁信号系统。通信手段有很多种,ALSTOM 公司就采用了在轨道间铺设电缆环,利用钢轨本身沿地铁线铺设泄漏波导或同轴电缆等多种方法。ALCATEL 公司则把在高速铁路上取得的经验和采取的技术应用到了地铁信号系统中,利用其公司在通信领域方面的丰富经验,使用在轨道沿线铺设电缆环的方式进行列车与轨旁间的双向通信,从而实现了移动闭塞。HARMON 公司 1997 年就在密西根美国铁路客运公司的集成列车控制系统(ITS)中成功地应用了基于射频通信的列车控制系统。HARMON 公司采用以无线扩展频谱通信为基础的信号系统,正在对纽约的一条旧地铁线进行改造,预计最近新的系统可以投入运行。HARMON 公司的基于无线扩展频谱通信技术的 ATC 系统的原理,与 ALCATEL 和 ALSTOM 公司基于电缆环或泄漏电缆等通信手段的 ATC 系统的原理不一样。基于电缆环或泄漏同轴电缆等通信手段的 ATC 系统是通过车站设备交换列车位置信息的,如图 5 所示。列车 1 在线路中的位置需要列车通过车载里程仪(借助电缆环的交叉点同步)测量后经车载通信天线发送给轨道上的电缆环,通过轨旁设备处理后送到设备集中站,车站的控制设备再把这一信息以相反的通信路径转发给后续列车 2,后续列车知道了前行列车的位置,可以根据事先定义的安全行车原则,保持最小的行车间距,实现移动闭塞。

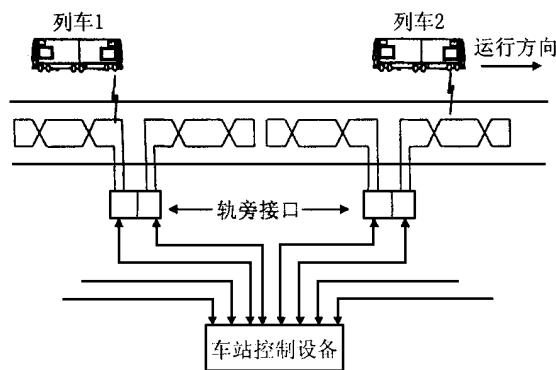


图 5 移动闭塞通信方式

HARMON 公司的基于无线扩展频谱通信技术的 ATC 系统则采用了军用定位系统的技术。利用车站、轨旁和列车上的扩频电台,一方面通过这些电台在列车与控制中心间传递安全信息,另一方面也

利用它们对列车进行定位。列车的位置是通过接收轨旁电台的信号计算出来的,而不是用里程仪测量出来的。其原理可用图 6 和图 7 来说明。

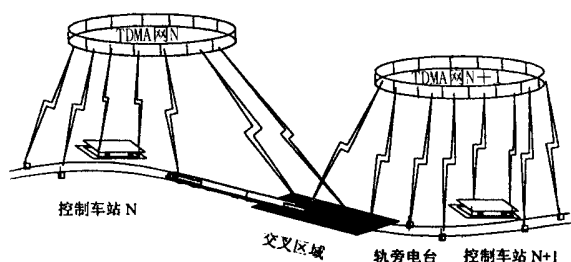


图 6 控制区域分割示意图

图 6 为划分轨道控制区域的示意图,图 7 为基于无线扩频通信的 AATC 的系统组成原理图。AATC 系统将轨道分割成不同的控制区,每个控制区由车站设备房内的车站计算机控制,在 AATC 控制区由分布的电台构成无线通信网,各控制区彼此交替,以免出现盲区。利用时分多址(TDMA)方法将 0.5s 分割成 256 帧,最多可同时控制 20 辆列车。多数情况下,站间可以被无线电可靠地覆盖,而且有冗余,不需要在站间安装电台。这种冗余是一种自愈式的结构,当其中一个电台故障时,系统可以重新组织,并自动报告故障电台位置或编号,不会影响通信和对列车的控制。通常一个电台的信息会有两个甚至三个电台接收,扩展频谱技术最初是为军事应用而设计的,具备在恶劣电磁环境下可靠传输的能力。

每隔 0.5s 可对每辆列车的位置进行检测,对列车定位的精度可达  $\pm 5\text{m}$ 。列车运行间隔可达 80s。采用扩频技术的 ATC 系统设备量较小,全寿命周期费用仅为传统 ATC 系统的一半左右,而且还具备安装容易、维修方便等特点,用于旧线改造时不会打断现有列车控制设备的运行。

### 3.2 集成化的综合地铁控制系统

由于通信技术的发展,ATC 系统中 ATS 子系统的功能也越来越强。ATS 子系统正在向集成化方向发展,它已不仅仅是传统意义上的“列车自动监督”,地铁工程中地铁信号系统的其它子系统如电话系统、无线通信系统、公共广播系统、闭路电视系统、环控系统、电力监控系统、自动售检票系统、火灾报警系统及保安系统等,可与乘客信息系统、列车自动监督系统等功能集成在一个系统中,这样既保证了地铁系统运行的完整性、协调

性,又减少了设备量和工作人员的数量,使系统更先进、更高效。

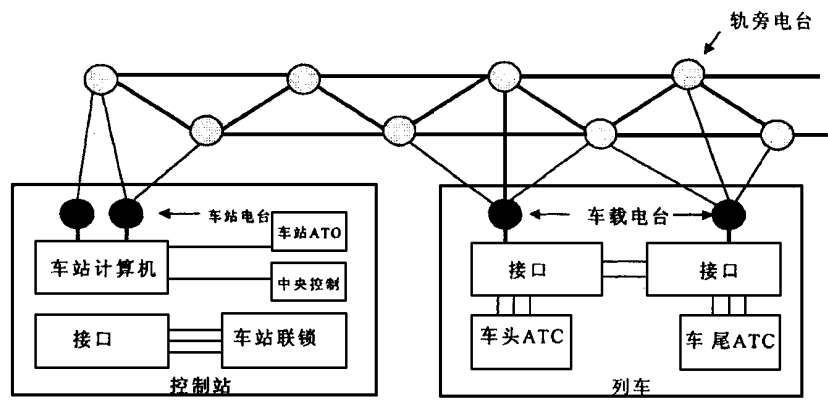


图 7 AA TC 系统框图

3 3 全程无人驾驶技术

目前普遍采用站间ATO方式,即正常情况下列车出站时的启动由驾驶员完成,运行过程则是全自动的。全程无人ATO方式则是列车上没有任何驾驶员或工作人员的全自动方式,站停、发车、运行、折返、入库等过程由操作控制中心直接管理。目前的ATO方式,在通信的速率、通信安全性、可靠性等方面能得到保证的话,很容易升级为全程无人ATO方式。

全程无人ATO方式具备非常高的灵活性,对突然增长的能力需求和不可预见的事件具备敏捷的反应能力,而且不需要增加系统操作人员的工作压力,自然也就提高了运输效率和经济利益。让更多的人力资源直接用于为旅客提供服务,这才是乘客最迫切需要的。

与首先使用无人驾驶系统的几个城市一样,世

界上许多地方的专业人士也已经认可了无人驾驶技术所具有的优越性和灵活性。

4 小结

城市建设的发展,城市人口的急剧膨胀,对地铁运输能力的要求越来越高。用户的需求,科技的进步,促进了地铁信号技术的发展。基于通信的ATC系统,全程无人ATO系统,集成的地铁控制系统是地铁信号系统发展的方向,并随着通信、网络、计算机技术的进步而不断发展。

参 考 文 献

1 魏京燕等编 当代中国铁路信号 北京:中国铁道出版社, 1997

(收稿日期: 2000—04—06)