

城市轨道交通职业教育系列教材 —— 城市轨道交通控制

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG ZHIYE JIAOYU XILIE JIAOCAI
CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG KONGZHI

城市轨道交通 列车运行自动控制系统



主 编 ○ 张建平

主 审 ○ 田光超

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
LIECHE YUNXING
ZIDONG KONGZHI XITONG

城市轨道交通职业教育系列教材——城市轨道交通控制

城市轨道交通列车运行自动控制系统

主 编 张建平

副主编 王佩硕 李凯兵

主 审 田光超

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

城市轨道交通列车运行自动控制系统 / 张建平主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2017.6
城市轨道交通职业教育系列教材. 城市轨道交通控制
ISBN 978-7-5643-5483-1

I. ①城… II. ①张… III. ①城市轨道交通 - 轨道交通 -
自动控制系统 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 130578 号

城市轨道交通职业教育系列教材——城市轨道交通控制

城市轨道交通列车运行自动控制系统

主编 张建平

责任编辑 李伟

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印 张 7.25

字 数 178 千

版 次 2017 年 6 月第 1 版

印 次 2017 年 6 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-5483-1

定 价 22.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着城市规模的扩大和城市人口数量的不断增加，交通成为人们特别关注的日常问题，速度快、安全准时、乘坐舒服成为人们选择交通工具的主要依据；城市轨道交通就是为了满足人们的出行要求，解决日益严重的城市交通拥堵问题而采用的交通方式。而通信与信号系统是确保城市轨道交通列车运行安全与提高效率的关键设备，为人们的出行提供了安全保证。

本书主要介绍了基于通信的列车运行自动控制系统（CBTC）。全书共有7个项目，主要包括列车自动控制（ATC）系统的基本概念，列车自动监控（ATS）、列车自动防护（ATP）、列车自动驾驶（ATO）系统的框架、功能和工作原理，联锁子系统，以及通信子系统（DCS）。

本书可作为相关职业学校城市轨道交通控制专业的系列教材，也可作为从事城市轨道交通控制专业人员的学习及培训用书。

本书由洛阳铁路信息工程学校张建平担任主编，洛阳铁路信息工程学校高级讲师田光超担任主审。具体编写工作如下：李凯兵、张建平、蒋荣编写项目一、项目二；张建平、宋玉鼎编写项目三、项目四、项目五；王佩硕、张建平编写项目六、项目七。同时，特别邀请了北京和利时系统工程有限公司高级软件工程师王景云参与本书的审定与指导工作。

在本书编写过程中，编者得到了各方同行的帮助，在此一并表示衷心的感谢。另外，特别感谢西南交通大学出版社的领导和编辑们的支持与帮助。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，欢迎各位读者批评指正。

编 者
2017年2月

目 录

项目一 ATC 的基本概念	1
任务一 ATC 的速度控制模式	1
任务二 ATC 的基本概念与分类	2
项目二 基于通信的 ATC 系统	7
任务一 CBTC 的概念、模式和移动授权	7
任务二 CBTC 系统的特点和分类	13
项目三 列车自动监控 (ATS) 子系统	18
任务一 ATS 子系统的结构	18
任务二 ATS 子系统的功能	20
任务三 ATS 子系统的工作原理	28
项目四 列车自动防护 (ATP) 子系统	41
任务一 ATP/ATO 子系统的组成	41
任务二 ATP 子系统的功能	46
任务三 ATP 子系统的工作原理	57
项目五 列车自动驾驶 (ATO) 子系统	65
任务一 ATO 子系统的组成	65
任务二 ATO 子系统的功能	67
任务三 ATO 子系统的工作原理	69

项目六 联锁子系统	74
任务一 联锁子系统的结构及组成	74
任务二 联锁子系统的功能	85
项目七 数据通信系统 (DCS)	90
任务一 系统网络结构描述	90
任务二 DCS 系统的功能	94
附表 英文及其缩写和中文含义	105
参考文献	107

项目一 ATC 的基本概念

【项目描述】

列车运行自动控制系统(简称列控系统)是保证列车按照空间间隔制运行的技术方法,是靠控制列车运行速度的方式来实现的。

运行的列车间必须保持的空间间隔首先是满足制动距离的需要,同时还要考虑适当的安全余量和确认信号时间内的运行距离。所以,列控系统根据其采取的不同控制模式会产生不同的闭塞制式。列车间的追踪运行间隔越小,运输能力就越大。

任务一 ATC 的速度控制模式

列车自动控制 ATC (Automatic Train Control) 系统就是对列车运行全过程或一部分作业实现自动控制的系统。其特征为:列车通过获取的地面信息和命令,控制列车运行,并调整与前行列车之间必须保持的距离。从速度控制方式角度,即对列车运行自动控制采用目标距离控制模式。

目标距离速度控制采取的制动模式为连续式一次制动速度控制的方式,根据目标距离、目标速度及列车本身的性能确定列车的制动曲线,不设定每个闭塞分区速度等级。连续式一次速度控制模式,以前方列车的尾部为追踪目标点,称之为移动闭塞。移动闭塞在城市轨道交通中有运用,但在铁路系统中尚无运用实例,以下所述的目标距离速度控制方式主要是指准移动闭塞。如图 1.1 所示,粗实线为目标距离速度控制线,从最高速至零速的列车控制减速线为一条连贯和光滑的曲线,列车实际减速运行线只要在控制线以下就可以了,万一超速碰撞了速度控制线,设备自动引发紧急制动,因为速度控制是连续的,所以不会超速太多,紧急制动的停车点不会冒出闭塞分区,可以不需增加一个闭塞分区作为安全防护区段,当然设计时要考虑留有适当的安全距离。



目标距离控制模式



图 1.1 目标距离速度控制

列控设备给出的一次连续的制动速度控制曲线是根据目标距离、线路参数和列车自身的性能计算而定的，线路参数可以通过地对车信息实时传输，也可以事先在车载信号设备中存储通过核对取得。因为给出的制动速度控制曲线是一次连续的，需要一个制动距离内所有的线路参数，地对车信息传输的信息量相当大，可以通过无线通信、数字轨道电路、轨道电缆、应答器等地对车信息传输系统传输。目标距离速度控制的列车制动起始点是随线路参数和列车本身性能不同而变化的，空间间隔的长度是不固定的，适用于各种不同性能和速度列车的混合运行，其追踪运行间隔要比分级速度控制小，减速比较平稳，旅客的舒适度也要好些。

任务二 ATC 的基本概念与分类

列车自动控制系统是我国城市轨道交通保证列车行车安全、提高列车运行效率的重要技术设备，它能以有效的技术手段对列车的运行速度、运行间隔进行实时监控和超速防护。目前，先进的城市轨道交通信号系统通常由列车运行自动控制系统和计算机联锁（Computer Based on Interlocking System, CBI）设备两大部分组成，用于列车运行控制、行车调度指挥、信息管理和设备维护等，可实现行车指挥和列车运行自动化，减轻运营人员的劳动强度，发挥城市轨道交通的通过能力，是一个高效的综合自动化系统。

列车运行自动控制系统是列车运行的指挥和控制系统，取消了传统的地面信号，将机车信号作为主体信号，信号的含义发生了质的变化，传递给列车的是具体的速度或距离信息。根据与先行列车之间的距离和进路条件，在车内连续地显示出容许的速度信息，或给出按设定的运行条件达到该容许速度的距离信息。根据上述信息，列车自动控制运行速度，进行超速防护，以达到自动调整行车间隔的目的，并实现列车在车站内精确地定位停车。同时，ATC 系统还可实现对运行列车的实时监督及运行信息的管理。

列车自动控制（ATC）系统包括列车自动防护 ATP（Automatic Train Protection）、列车自动驾驶 ATO（Automatic Train Operation）及列车自动监控 ATS（Automatic Train Supervision）。ATC 系统与联锁系统共同构成城市轨道交通的信号控制系统。

一、移动闭塞制式的 ATC 系统

按闭塞制式，基于通信的城市轨道交通 ATC 主要采用移动闭塞方式。

移动闭塞的特点是前、后两列车都采用移动式的定位方式，不存在固定的闭塞分区，列车之间的安全追踪间距随着列车的运行而不断移动且变化。



移动闭塞方式

移动闭塞可借助感应环线或无线通信的方式实现。早期的移动闭塞系统大部分采用基于感应环线的技术，即通过在轨间布置感应环线来定位列车和实现车载计算机（VOBC）与车辆控制中心（VCC）之间的连续通信。而今，大多数先进的移动闭塞系统已采用无线通信系统实现各子系统间的通信，构成基于无线通信技术的移动闭塞。

CBTC 则是实现这种闭塞制式的最主要技术手段。采用这种方法以后，实现了车地间双向、大容量的信息传输，达到连续通信的目的，在真正意义上实现了列车运行的闭环控制。当列车和车站一开始通信，车站就能得知所有列车的位置，能够提供连续的列车安全间隔保证和超速防护，在列车控制中具有更好的精确性和更大的灵活性，并能更快地检测到故障点。而且，移动闭塞可以根据列车的实际速度和相对速度来调整闭塞分区的长度，尽可能缩小列车的运行间隔，提高行车密度，进而提高运输能力。此外，这种系统与传统系统相比将大大减少沿线设备，车载设备和轨旁设备的安装也相对较容易，维修方便，有利于降低运营成本。

移动闭塞与固定闭塞的根本区别在于闭塞分区的形成方法不同，如图 1.2 所示，移动闭塞系统是一种区间不分割、根据连续检测先行列车位置和速度进行列车运行间隔控制的列车安全系统。这里的连续检测并不意味着一定没有间隔点。实际上该系统把先行列车的后部看作假想的闭塞区间。由于这个假想的闭塞区间随着列车的移动而移动，所以叫作移动闭塞。在移动闭塞系统中，后续列车的速度曲线随着目标点的移动而实时计算，后续列车到先行列车的保护段后部之间的距离等于列车制动距离加上列车制动反应时间内驶过的距离。

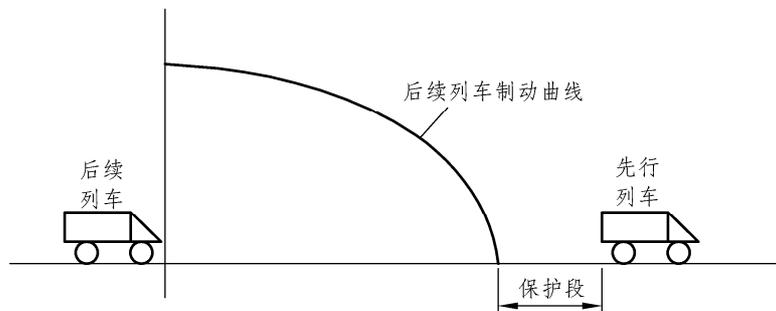


图 1.2 移动闭塞原理示意图

移动闭塞技术在对列车的安全间隔控制上更进了一步。通过车载设备和轨旁设备连续地双向通信，控制中心可以根据列车实时的速度和位置动态地计算列车的最大制动距离。列车的长度加上这一最大制动距离并在列车后方加上一定的防护距离，便组成了一个与列车同步移动的虚拟闭塞分区（见图 1.3）。由于保证了列车前后的安全距离，两个相邻的移动闭塞分区就能以很小的间隔同时前进，这使列车能以较高的速度和较小的间隔运行，从而提高了运营效率。

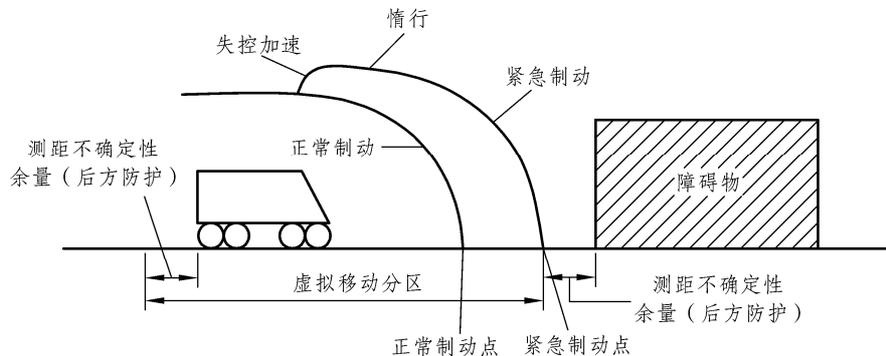


图 1.3 移动闭塞系统的安全行车间隔

无线移动闭塞系统的组成主要包括无线数据通信网、车载设备、区域控制器和控制中心等。其中，无线数据通信是移动闭塞实现的基础。通过可靠的无线数据通信网，列车不间断地将其标识、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的方式发送给区域控制器。区域控制器追踪列车并通过无线传输方式向列车发送移动授权，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（如先行列车位置、移动授权等）传递给列车，控制列车运行。车载设备包括无线电台、车载计算机和其他设备（如传感器、查询器等）。列车将采集到的数据（如机车信息、车辆信息、现场状况和位置信息等）通过无线数据通信网发送给区域控制器，以协助完成运行决策；同时对接收到的命令进行确认并执行。

移动闭塞 ATC 系统就车、地双向信息传输速率而言，可分为基于电缆环线的传输方式和基于无线通信、数据传输媒介的传输方式；按无线扩频通信方式可分为直接序列扩频方式和跳频扩频方式；按数据传输媒介传输方式可分为点式应答器、自由空间波、裂缝波导管和漏泄电缆等传输方式。

二、不同结构的 ATC 系统

（一）点式 ATC 系统

点式 ATC 系统因其主要功能是实现列车超速防护，所以又称为点式 ATP 系统。它用点式传递信息，用车载计算机进行信息处理。点式 ATC 系统在城市轨道交通中应用比较广泛。其主要优点是采用无源、高信息容量的地面应答器，结构简单，安装灵活，可靠性高，价格明显低于连续式 ATC 系统。上海轨道交通 5 号线采用的即是德国西门子的点式 ATC 系统。但点式 ATC 系统难以胜任列车密度大的情况，如后续列车驶过地面应答器时，

>>4

因前方区段有车，它算出的速度曲线是一条制动曲线。后续列车驶过后，尽管前行列车已驶离，但后续列车已驶过地面应答器，得不到新的信息，只能减速运行，直到抵达运行前方的地面应答器才能加速。

点式 ATC 系统的车载设备不仅接收信号点或标志点的应答器信息，还接收列车速度和制动压力信息，输出控制命令和向司机显示。地面应答器向列车传送每一信号点的允许速度、目标速度、目标距离、线路坡度、信号机号码等信息。图 1.4 表示车载中央控制单元根据地面应答器传至车上的信息以及列车自身的制动率（负加速度），计算得出的两个信号机之间的速度监控曲线。

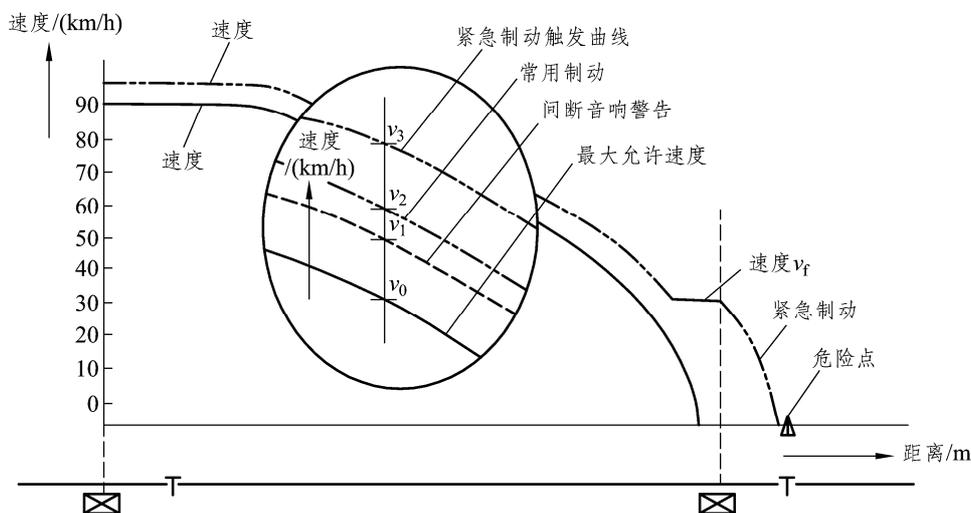


图 1.4 点式列车超速防护系统的速度监控曲线

其中， v_0 ——所允许的最高列车速度。

v_1 ——当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出音响报警，如果此时司机警惕降速，使车速低于 v_0 ，则一切趋于正常。

v_2 ——当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出启动常用制动（通常为启动最大常用制动）的信息，列车自动降速至 v_0 以下。若列车制动装置具有自动缓解功能，则在列车速度降至 v_0 以下时，制动装置即可自动缓解，列车行驶趋于正常；若列车制动装置不具备自动缓解功能，则常用制动使列车行驶一段路程后停下，列车由驾驶员经过一定的手续后重新人工启动。

v_3 ——当列车车速达到此值时，车载中央控制单元给出启动紧急制动的信息，确保列车在危险点的前方停住。

(二) 连续式 ATC 系统

按车、地信息传输所用的媒体分类,连续式 ATC 系统可分为有线与无线两大类,前者又可分为利用轨间电缆与利用数字编码音频轨道电路两类。按自动闭塞的性质,连续式 ATC 系统可以分为移动闭塞、准移动闭塞和固定闭塞。按车、地之间所传输信息的内容,ATC 系统还可分为速度码系统与距离码系统。

项目二 基于通信的 ATC 系统

【项目描述】

基于 CBTC 的 ATC 系统，通过列车与地面间连续的双向通信，实时提供列车的位置和速度信息，更新列车的移动授权，最大限度地减小了列车的运行间隔，突破了固定闭塞的局限，实现了移动闭塞，在技术以及成本上都较传统的信号系统有明显的优势。

CBTC 包含列车自动监控系统（ATS）、车载 ATP/ATO 系统（主要设备为 VOBC，即车载控制主机）、地面 ATP/ATO 系统（主要设备为 ZC，即区域控制器）、计算机联锁（CBI）和数据传输系统（DCS）5 个子系统。

任务一 CBTC 的概念、模式和移动授权

一、CBTC 的概念

CBTC 系统是新型的城市轨道交通 ATC 系统，包括采用感应环线和无线通信的 CBTC 系统。CBTC 系统是一种采用先进的通信和计算机技术连续控制、监测列车运行的列车控制系统，是实现移动闭塞制式的主要技术。它通过列车与地面间连续的双向通信，实时提供列车的位置以及速度信息，更新列车的移动授权，最大限度地减小了列车的运行间隔，突破了固定闭塞的局限，实现了移动闭塞。与传统的基于轨道电路的信号系统相比，CBTC 系统减少了硬件设备量，降低了设备安装和维护成本，而且系统的安装、调试和维护也很简单，从而实现了更低的全寿命周期成本。所以，移动闭塞和车地连续通信是 CBTC 的主要特点。CBTC 系统是当今世界上最有发展潜力的列车运行控制系统。

CBTC 系统主要包括 3 个部分：无线移动通信系统、列车控制系统和列车定位子系统。列车控制系统又包括中央控制室、无线闭塞中心和车载子系统。其中，高可靠的无线移动通信系统是无线闭塞中心（RBC）、车载子系统和列车定位子系统的基础。

无线移动通信系统主要是进行车地通信，在移动的列车和地面控制设备之间实时双向传输行车信息，由无线车地通信技术提供保障，列车通过相应的地面设备，如信标灯、应答器，可以获知自身的位置及速度等信息，通过可靠的无线移动通信网络，列车将位置、车次、列车长度、实际速度、制动潜能、欲行状况等信息以无线的方式发给 RBC，RBC 则

开始追踪列车并发送移动权限、允许速度、限速、紧急停车等命令。因此，无线 CBTC 系统中，无线移动通信网络取代了轨道电路的信息传输地位。

二、CBTC 的模式

CBTC 系统可以实现全线自动驾驶 (ATO)。整个系统的主要设备都采用冗余配置，因此出现冗余故障情况的可能性微乎其微。但当轨旁 ATC 或车地无线通信故障时，列车可通过计轴设备检测列车占用，降级为点式 ATP 模式。在点式 ATP 模式下，轨旁信号机自动亮灯，系统通过信号机的显示来间隔列车，车载设备具备 ATP 防护功能。对于相邻区段内 CBTC 正常通信的列车，列车驾驶模式无须改变，即 CBTC 列车和降级模式的列车可以实现“混跑”。



点式 ATP 模式



驾驶模式

(一) 驾驶模式

CBTC 系统主要提供 4 种驾驶模式，分别为自动驾驶模式 (AMC)、ATP 防护人工驾驶模式 (MCS)、限制人工驾驶模式 (RM)、非限制人工驾驶模式 (NRM)。正常情况下，AMC 是系统的常用模式。根据具体项目的需要，可以在线路终端站配置有/无人自动折返 (ATB) 功能，即在折返区域能实现无人驾驶自动折返的 ATO 功能。

(二) 驾驶模式的转换

在所请求的驾驶模式指示有效的情况下，线路上任何位置的驾驶模式切换都可以发生，司机可以在不停车的情况下由 RM 模式切换至 MCS 模式或由 MCS 模式切换至 AMC 模式，反之亦然。但为了平稳地完成模式切换，还需要考虑下面几个问题。

- ① 当切换至 RM 模式时，列车速度应低于 RM 的限制速度。
- ② 当由 MCS 模式切换至 AMC 模式时，牵引/制动手柄须在惰行位置。
- ③ 从 MCS 模式切换到 AMC 模式时，ATO 需要几秒的时间执行其 ATO 速度曲线。如果上述情况满足，在正常的载客运行时，司机可以按照调度命令切换驾驶模式。模式的切换操作由司机完成，各驾驶模式间的转换原则如图 2.1 所示。

(三) 正常及降级运营模式

1. 最佳运营模式

正常运营模式定义为所有子系统设备正常且相互通信正常，即 CBTC 模式，线路以全部能力运行的理想运营情况。此时，ATS 自动根据当天运行时刻表调整列车，ATP 保证所有列车的行车安全，ATO 驾驶列车，联锁排列进路并控制轨旁设备。无线通信系统 (DCS) 确保所有子系统之间通过骨干网和无线接入点的通信顺畅。

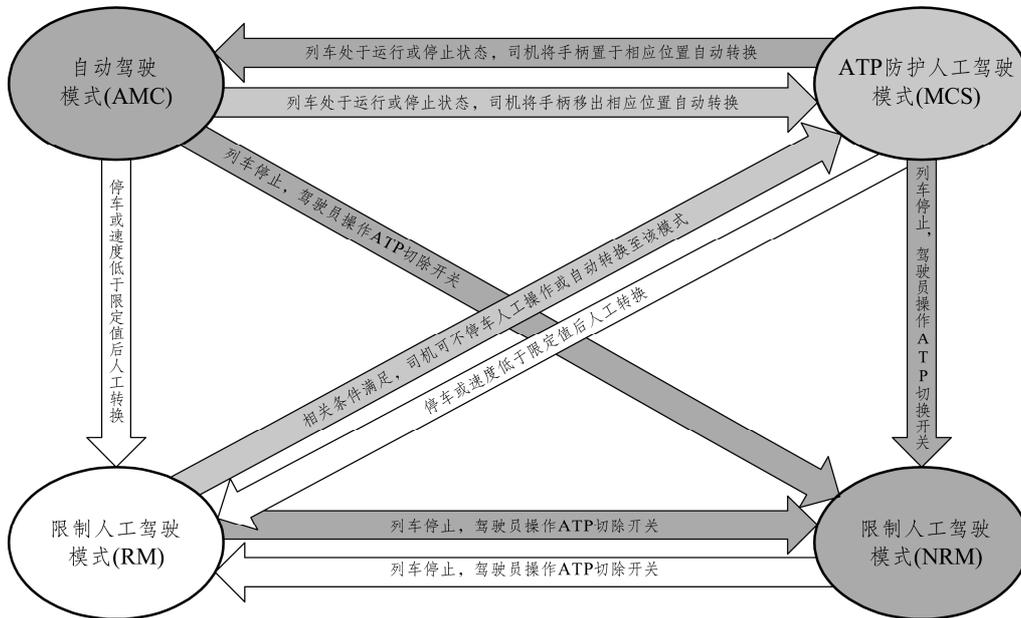


图 2.1 驾驶模式转换原则

2. 限制运营模式

CBTC 模式下的 AMC 模式是正常运营情况下的驾驶模式。在特殊情况下，司机可以通过驾驶模式选择开关切换到 MCS 模式，在 ATP 防护下驾驶列车。当有故障发生时（安全相关设备故障），ATP 将自动执行紧急制动。当列车停止且紧急制动缓解时，司机必须将驾驶模式选择开关切换到 RM 模式，之后的线路只能在 RM 模式下运行，直到所请求的驾驶模式指示有效。

3. 点式 ATP 运营模式

点式 ATP 运营模式是信号系统的降级模式，即点式 ATP 模式。当设备出现故障，如区域控制器（ZC）故障或车地通信故障时可用作降级模式。由于 CBTC 模式实现移动闭塞，闭塞的起点和终点均为动态确定；而点式 ATP 模式为固定闭塞，闭塞的起点和终点均为固定的信号机。CBTC 模式至点式 ATP 模式的降级转换，需先降级转换至 RM 模式后，列车运行至点式 ATP 模式初始化信号机前，再升级转换至点式 MCS 模式。而点式 ATP 模式至 CBTC 模式的升级转换，只需所请求的 AMC 驾驶模式指示有效后，停车切换即可实现。

4. 可用驾驶模式

表 2.1 和表 2.2 描述了在设备部分/完全故障情况下，信号系统的运行以及故障恢复的过程。

(1) 表 2.1 描述了在 CBTC 运营模式下不同故障时采用的驾驶模式。

表 2.1 在 CBTC 运营模式下不同故障时采用的驾驶模式

模式故障	可用模式 (CBTC)	说明
车辆紧急制动系统完全故障	NRM 模式可用	列车需要退出运营
两个驾驶室的车载 ATP 都完全故障	NRM 模式可用	列车必须人工驾驶
车载无线完全故障 (两个驾驶室)	RM 模式、NRM 模式或点式 ATP 模式可用	列车必须人工驾驶
骨干网完全故障	RM 模式或 NRM 模式可用	列车必须人工驾驶
ZC 完全故障	RM 模式、NRM 模式或点式 ATP 模式可用	在该 ZC 区域内只能人工驾驶列车
一个区域的一个无线接入点 (AP) 故障	该小区内 RM 模式、NRM 模式或点式 ATP 模式可用	该小区内无线传输网络均故障
一个联锁区域的联锁故障	相应联锁控制区域内 RM 模式或 NRM 模式可用	联锁控制区域受限制
一个车载以太网故障	所有模式可用	车载冗余配置使列车能够在正常条件下减轻这一故障影响
中央 ATS 故障	所有模式可用	部分 ATS 调整功能不可用
车站 ATS 故障	所有模式可用	本区域 ATS 功能不可用

(2) 表 2.2 描述了点式 ATP 运营模式下不同故障时采用的驾驶模式。

表 2.2 点式 ATP 运营模式下不同故障时采用的驾驶模式

模式故障	可用模式 (点式 ATP)	说明
车辆紧急制动系统完全故障	NRM 模式可用	列车需要退出运营
头车车载 ATP 完全故障	NRM 模式可用	
一个联锁区域的联锁 (CBI) 故障	相应联锁控制区域内 RM 模式或 NRM 模式可用	联锁控制区域受限制
一个联锁区域的欧式编码器 (LEU) 故障	相应联锁控制区域内 RM 模式或 NRM 模式可用	联锁控制区域受限制
中央 ATS 故障	所有模式可用 (除 AMC 外)	部分 ATS 调整功能不可用
车站 ATS 故障	所有模式可用 (除 AMC 外)	本区域 ATS 功能不可用
ZC 故障	所有模式可用 (除 AMC 外)	
线路控制器 (LC) 故障	所有模式可用 (除 AMC 外)	