

城市轨道交通列车全自动运行系统的 列车唤醒休眠方法研究*

陈宁宁^{1,2,3} 张琦^{2,3} 郜洪民^{2,3} 邢科家^{2,3}

(1. 中国铁道科学研究院研究生部, 100081, 北京; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京;
3. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心 100081, 北京//第一作者, 高级工程师、博士研究生)

摘要 以提高城市轨道交通列车运营管理自动化水平、降低列车使用能耗为主要目标的列车远程唤醒休眠功能, 主要包含休眠后的列车位置持续获取及监督、列车唤醒命令获取等。在分析现存系统实现方式的优缺点基础上, 提出一种全新的列车唤醒休眠系统的实现方案。利用此系统可以代替既有应答器传输单元、车载测速单元实现休眠时车辆位置的持续获取与实时监督, 并借助此系统的双向通信机制代替 WLAN(无线局域网)或 LTE(长期演进)接收来自控制中心的 ATS(列车自动监控)唤醒命令。本系统可适用于既有轨道交通列车全自动运行改造项目及新建列车全自动运行项目, 在实现列车远程唤醒功能的同时, 简化了列车休眠的车地设备设计, 提高了休眠列车的定位精度, 降低了列车休眠时的功耗。

关键词 城市轨道交通; 列车全自动运行系统; 列车休眠; 列车唤醒

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.034

Research on Train Wake-up and Sleep Method of Urban Rail Transit FAO System

CHEN Ningning, ZHANG Qi, GAO Hongmin, XING Kejia

Abstract In order to improve the automation level of urban rail transit train operation and management, and to reduce the train energy consumption, the train remote wake-up and sleep function mainly includes continuous acquisition and supervision of train position during sleep, acquisition of train wake-up command. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of existing system implementation, a new implementation scheme of train wake-up and sleep system is proposed. This system can replace the existing balise transmission module and on-board speed measurement unit to realize the continuous acquisition and real-time supervision of vehicle position during

sleep, and use the bidirectional communication mechanism of this system to replace WLAN (wireless local area network) or LTE (long-term evolution) to receive the ATS (automatic train supervision) wake-up command from the center. The system can be applied to the automatic transformation project of existing rail transit trains and the new FAO project. This system can not only realize the function of remote wake-up, but also simplify the design of the vehicle-ground equipment of the sleeping system, improving the positioning accuracy and reducing the power consumption of the train during sleep.

Key words urban rail transit; train FAO (fully automatic operation) system; train sleep; train wake-up

First-author's address Postgraduate Department, China Academy of Railway Sciences, 100081, Beijing, China

依据 IEC 62290-1—2014《铁路应用—城市轨道交通交通管理与指挥/控制系统》规范定义, 城市轨道交通的 GoA(自动化等级)可以划分为 5 个等级: GoA0, GoA1, GoA2, GoA3, GoA4^[1-2]。从降低列车使用能耗和提高运营管理自动化水平的角度, GoA4 的 UTO(无人值守的列车全自动运行)系统要求能够实现远程唤醒功能^[3-5]。城市轨道交通列车全自动运行系统的构成如图 1 所示。其与远程唤醒相关的设备有车载的 WIU(唤醒休眠单元)、轨旁的唤醒休眠设备、控制中心的 ATS(列车自动监控)系统。每天运营结束后列车自动进入车辆段库线停准并实施自动休眠操作。休眠后的列车主要的用电设备都自动关闭, 只保留唤醒休眠相关的车辆头尾冗余配置 WIU 蓄电池供电。唤醒设备的主要功能是对车辆的位置实施获取及监督, 并将位置发送给控制中心 ATS 系统; 实时接收来自于控制中心 ATS 系统的唤醒命令。

* 中国铁道科学研究院基金项目(2020YJ045)

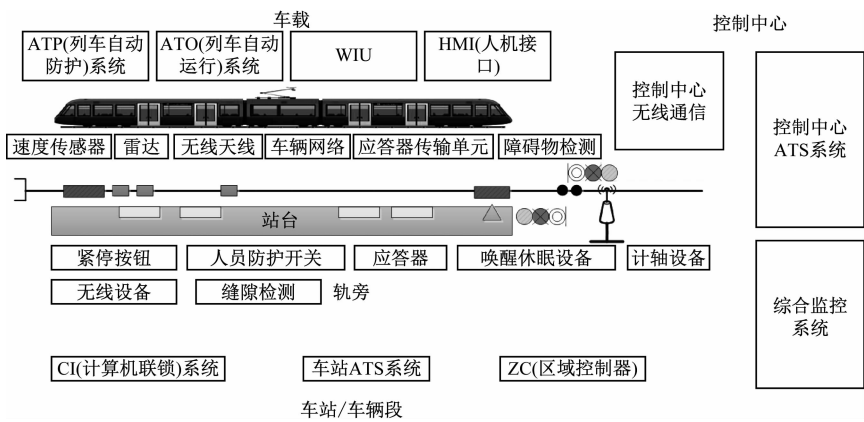


图 1 列车全自动运行系统构成图

Fig. 1 Composition diagram of train FAO system

控制中心 ATS 系统根据列车位置、状态和运行计划编制列车的唤醒计划。地面 ATS 按照唤醒计划给目标列车发送唤醒命令。车辆接收到唤醒命令后,控制车辆其他非唤醒设备(空调、牵引、制动、空压机等)上电,并进行全车上电后的静、动态自检。

车辆段内,车辆由于检修任务被牵引离开休眠列位,或由于溜车、测试任务动车而造成车辆离开休眠位置,则该车辆将无法被正常唤醒,进而造成早班车库内发车延误。对此,为降低此类事件发生的概率,控制中心 ATS 系统需实时监督列车的位置并根据休眠列车位置的变化来变更唤醒计划。

1 列车休眠后的列车位置维持及监督

1.1 轨旁传感器休眠定位技术

轨旁传感器休眠定位技术是基于轨道电路或计轴技术,利用安装在轨旁传感器对休眠车辆进行定位的技术(如图 2 所示),可利用“3 点检查”原则确定列车的位置。

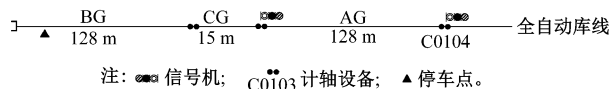


图 2 休眠库线计轴区段划分

Fig. 2 Axle counter division of parking line for sleep

此技术的优点在于车载设备不需要额外的定位设备带电,而完全依赖于轨旁设备实现休眠列车的定位。但此定位技术的精度较低,只能确定车辆未离开休眠前的计轴区段,无法确定车辆是否已经离开唤醒休眠区域。且此技术的使用受限库线的计轴区段的划分,2 个休眠计轴区段 AG 和 BG 之间必须有一个小的计轴区段 CG。通过判断 CG 段

占用与否,来判定休眠于 BG 段和 CG 段的车辆是否发生过移动。

1.2 车载传感器休眠定位技术

1.2.1 利用唤醒休眠应答器定位

唤醒休眠应答器为无源应答器,比普通固定应答器的尺寸要长、通信范围要大,如图 3 所示。应答器和车载设备之间的数据传输通过空气中磁场耦合完成。车载应答器传输单元的天线向地面发送 27.095 MHz 的连续电磁波功率信号,为地面应答器提供产生电源的电磁场。当车载天线接近地面应答器时,地面应答器天线环感应到能量,通过电磁耦合转换成电能,地面应答器被激活,向车载设备循环发送报文,直至能量消失。



图 3 唤醒休眠应答器

Fig. 3 Wake-up and sleep balise

相对于轨旁传感器休眠定位技术,此技术的定位精度更高。位置精确度应该在 0.998 置信区间内。列车速度为 v 时,用 $|L_{err}|$ (单位为 m) 来表示测量应答器位置与应答器物理中心相比较的最大误差:

$$|L_{err}| = \begin{cases} 0.20, & 0 < v < 40 \text{ km/h} \\ 1.1 \times 10^{-3} v + 0.15, & 40 \text{ km/h} \leq v \leq 500 \text{ km/h} \end{cases} \quad (1)$$

唤醒休眠应答器的通信范围为应答器的物理

长度与 $|L_{\text{err}}|$ 之和。

此技术的缺点是:读取唤醒休眠应答器的车载 BTM(应答器传输单元)功耗很大。列车休眠后,为了节约车辆蓄电池电量,需要车载应答器传输单元处于断电状态。因此,休眠时车载休眠设备无法通过 BTM 实时读取唤醒休眠应答器的报文,更无法通过唤醒休眠应答器来实时获取列车位置。只有列车被唤醒,且车载 BTM 得电后,才能继续获取列车位置。

1.2.2 利用车载测速单元的多传感器融合定位

车载测速单元包括速度传感器、多普勒雷达和主控单元,采用多传感器信息融合技术。虽多传感器信息融合技术已经经过多年的发展,但绝大多数信息融合研究皆是针对特定问题开展的,未形成完整的理论框架和融合模型。而基本的车载测速单元定位通过相对位置的累加来不断修正列车的绝对位置。车载主控单元要记录休眠前的绝对位置作为累计基础。

速度传感器安装在车辆的轴头上,跟随车轴的转动而转动,通过霍尔或光电方式获取车轴的转动角度并转化为传感器的脉冲输出。车载传感器的信息融合重点在于相对位置的累加。速度传感器定位的一个误差源头为轮径误差。随着车辆运营时间的推移,车轮会磨损。如果轮径按照出厂参数来设定,势必会带来误差。

多普勒雷达测速是一种直接测量速度和距离的方法。在列车头部安装的多普勒雷达,始终面向轨面发射电磁波。根据多普勒效应原理,由于车辆与地面之间有相对移动,故在发射波与反射波之间产生频移,雷达通过测量频移就可以计算出列车的速度。通过速度累加可计算出列车移动的距离。雷达测速可克服车轮磨损、空转和滑行等造成的误差。

此技术的优点是,速度传感器的脉冲测距精度很高。此技术的缺点是,由于低速时的雷达精度很低,速度传感器的方向判断误差较大,从而造成定位误差需要双向累计^[6-11]。休眠前的列车绝对位置不确定性本身就很大,造成休眠时定位可靠性较低。此外,列车休眠时的带电设备也相应增加,功耗增加。因此利用车载测速单元作为休眠时的定位方法可用性较低。

由于存在列车被工程车拖离休眠位置或由于溜车等其他原因造成车载应答器天线无法与地面

加长固定应答器对正的情况,在列车休眠期间,地面 ATS 系统无法判断发生上述异常的车辆已经无法成功唤醒,还会继续给上述异常列车发送唤醒命令;异常列车唤醒后无法读取地面唤醒休眠应答器报文而导致唤醒失败,系统可用性降低。

如果通过休眠时保持车载应答器传输单元或车载测速单元长期带电的方式实现位置的持续获取,车载系统功耗会增加很多,全自动运行系统支持的休眠时间会降低很多。

1.3 休眠时车地通信通道

地面 ATS 系统需要实时监督停在休眠区域的车辆的状态。利用轨旁传感器休眠定位技术时,地面 ATS 系统无需通过车地通信通道获取车辆位置。但是车载传感器休眠定位技术却需要车地通信通道的支持。休眠后,列车唤醒指令的获取需要此通道的支持。

车载 BTM 天线为单向通信设备,地面 ATS 无法通过此设备获取列车的状态。因此,休眠时需要保证车载无线通信设备(WLAN(无线局域网)、LTE(长期演进))保持带电。这 2 种通信方式都为高频通信,其车载设备在休眠时的功耗会较高。

2 唤醒休眠系统设计

为了解决上述问题,设计了如下具备车地通信及实时定位监督功能的唤醒休眠系统。

车地双向通信及定位装置的基本构成单位为车载定位传感器、车载传感器处理单元和地面定位天线,如图 4、图 5 所示。

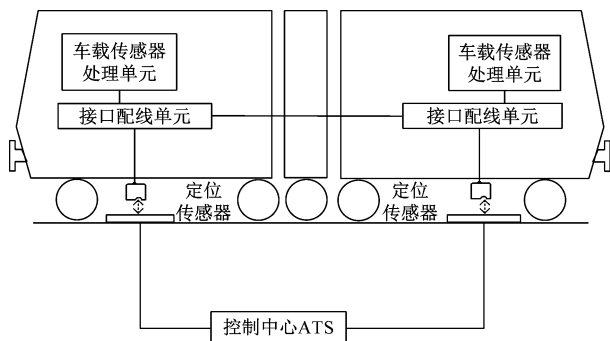


图4 车地双向通信及实时定位的唤醒系统构成图
Fig. 4 Wake-up system composition of vehicle-wayside bidirectional communication and real-time positioning

车地双向通信及定位装置的定位原理是车载定位传感器通过判断地面天线的发射功率强度判断是否在天线的覆盖范围内。车载既有的 BTM、

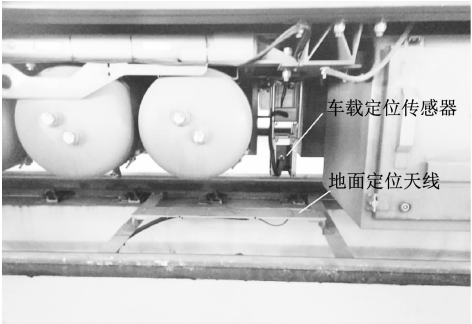


图 5 唤醒系统构成实景图

Fig. 5 Photo of wake-up system composition

WLAN 或 LTE 无线通信设备不需要带电,仅低功耗车载定位传感器及处理单元带电。地面发射天线为有源设备,需要轨旁设备供电,不同于欧标固定应答器这种无源设备的读取方式。

2.1 唤醒流程设计

唤醒流程如图 6 所示。

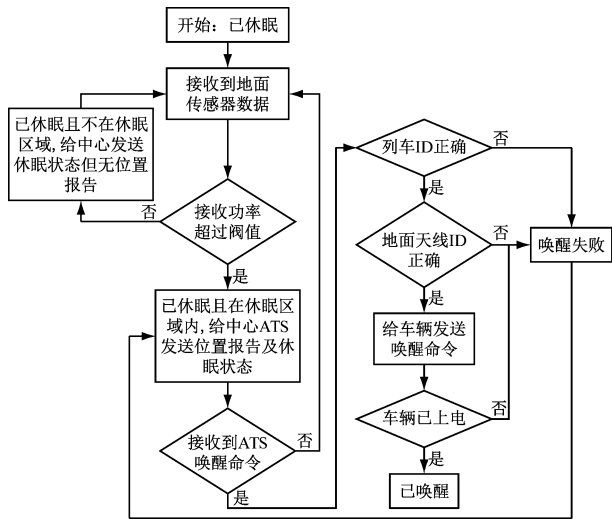


图 6 唤醒流程图

- Fig. 6 Wake-up flowchart
- 1) 已休眠的列车通过车载定位传感器实时接收地面定位天线发送的无线信号。
 - 2) 当接收到定位天线无线信号后先进行接收功率的判断。如果超过设定的阈值则判断列车处于允许休眠区域内,根据地面天线的 ID(标识)判断列车所处的位置并将位置发送给控制中心 ATS 系统。
 - 3) 控制中心 ATS 系统接收到地面天线 ID 及列车 ID,通过两个唯一的 ID 判断列车所处的位置。
 - 4) 控制中心 ATS 系统按照时刻表及列车位置信息通过地面定位天线(WLAN 或 LTE 等其他车

地通信设备已断电)给已休眠列车发送唤醒命令,车载处理单元判断命令正确后给车辆发送唤醒命令。

5) 车辆上电后,系统唤醒成功。

车载定位传感器与地面定位天线之间可以进行双向通信,且通信范围与地面定位传感器的设备大小相关。唤醒休眠系统可以根据需要的定位范围确定地面天线的长度,唤醒休眠系统的设计灵活。车载定位传感器离开地面定位传感器的物理边界后就无法实现与地面的双向通信。

2.2 唤醒休眠系统主要工作特性

1) 定位精度:定位精度受限于地面无线辐射边界的功率衰减,因此,可通过分析天线的衰减特性来选择合适判断功率,以提高定位精度。

2) 定位有效范围:受限于地面传感器的长度(见表 1)。

表 1 传感器通信范围实测结果

Tab. 1 Field measurement result of sensor communication range

地面传感器类型	地面传感器长度/mm	车地通信范围/mm
短传感器	800	850
长传感器	2 500	2 560

3) 定位鲁棒性:每个地面传感器有唯一的设备 ID,车载处理单元通过地面设备 ID 判断所处位置;车地双向通信基于安全通信协议实现,保证通信的安全性;车载传感器也有唯一的设备 ID,地面 ATS 系统可以通过此车载 ID 及安全通信协议来确定列车的位置。此方案能满足 SIL2(安全完整性等级 2)的要求。

2.3 唤醒休眠系统设计目标

唤醒休眠系统设计主要解决以下问题:

1) 休眠时的位置持续获取:利用新型的车地双向通信及定位设备可以不通过既有的车载应答器传输单元和车载测速单元来准确地判定休眠时车辆是否静止于某一固定区域内。利用新型的车地双向通信设备,地面 ATS 系统不通过 LTE 或 WLAN 设备就能实时监督列车是否在休眠区域内。当地面 ATS 系统判断列车移除休眠区域时,可以将该列车从允许唤醒列表中删除,避免了列车移动但列表未及时更新而造成的唤醒操作失败,导致车辆段发车晚点。

2) 简化车载休眠设备设计、延长车辆休眠后的待机时间;新型的车载低功耗双向通信及定位设备为低频率设备(10 ~ 100 kHz),且地面设备为有源工作模式,车地通信主要依赖地面设备的信号发射,从而降低了车载设备的功耗。

车载天线通过判断地面的无线覆盖强度来判断列车是否在地面天线的范围内,以实现定位。地面天线的发散角度相对于唤醒休眠应答器的扩散角度小,边界定位精度相对于唤醒休眠应答器能提高 10 倍左右,因此定位精度较高。

表 2 列出了既有设备和新型设备在实现休眠后实时定位及双向通信功能时的功耗对比。利用新型的低功耗双向通信及定位设备,既不用开启车载的无线通信设备(WLAN、LTE),也不用开启车载应答器设备和车载测速单元。这简化了车载休眠设备的系统设计,可有效降低休眠时设备对车辆蓄电池的损耗,进而延长整个系统休眠时的待机时间。

表 2 车载设备功耗比较

Tab. 2 On-board equipment power comparison		
设备名称	既有设备功耗/W	新型设备功耗/W
BTM	100	
LTE 及 WLAN 设备	25	
速度传感器	5	
双向通信定位设备		15
合计	130	15

3 结语

利用双向通信及列车定位唤醒休眠系统,在简化系统构成(不用开启车载应答器传输单元、车载定位单元、WLAN 及 LTE 无线通信设备)的同时,可实现休眠过程中控制中心 ATS 系统持续地获取列车的位置。

该唤醒休眠系统可以通过调整地面天线的物理长度实现通信范围的灵活调整,相对于车载应答器传输单元和测速单元等既有方式,其具有使用灵活、功耗低和精度高等特点。目前该系统已在现场作实车验证,有较好的应用前景。

参考文献

[1] IEC. Railway applications-urban guided transport management and command/control systems part 1: system principles and fun-

damental concepts; IEC 62290-1[S]. Geneva: IEC, 2014.

[2] IEC. Railway applications-urban guided transport management and command/control systems part 2: functional requirements specification; IEC 62290-2[S]. Geneva: IEC, 2014.

[3] 李猛,张艳兵,徐成永,等.全自动运行系统地铁车辆关键技术[J].都市轨道交通,2018(1):123.

LI Meng, ZHANG Yanbing, XU Chengyong, et al. Key technology of vehicle in fully automatic operation system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018(1):123.

[4] 张海涛,梁汝军.地铁列车全自动无人驾驶系统方案[J].城市轨道交通研究,2015(5):33.

ZHANG Haitao, LIANG Rujun. Introduction to the unattended train operation system on metro train[J]. Urban Mass Transit, 2015(5):33.

[5] 郑鸿昌,张涛,何敏学.无人驾驶信号系统中休眠和唤醒功能的设计[J].电声技术,2018(6):51.

ZHENG Hongchang, ZHANG Tao, HE Minxue. The design of the dormancy and wake-up function of UGTMS[J]. Audio Engineering, 2018(6):51.

[6] 赵磊,张小林.列车测速定位误差的仿真研究[J].城市轨道交通研究,2014(3):35.

ZHAO Lei, ZHANG Xiaolin. Error simulation in train speed and position detection[J]. Urban Mass Transit, 2014(3):35.

[7] MALVEZZI M, TONI P, ALLOTTA B, et al. Train speed and position evaluation using wheel velocity measurements[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings. Italy: IEEE, 2001:478.

[8] 吴昕慧,蔡煊,陶汉卿.基于多传感器的列车里程计定位误差检测及校正方法[J].城市轨道交通研究,2016(5):19.

WU Xinhui, CAI Xuan, TAO Hanqing. Detection and correction method of train odometer positioning error based on multi-sensor system[J]. Urban Mass Transit, 2016(5):19.

[9] 崔科,董德存.列车组合测速系统安全完整性分析[J].城市轨道交通研究,2017(7):56.

CUI Ke, DONG Decun. Analysis of the safety integrity in integrated train speed measurement system[J]. Urban Mass Transit, 2017(7):56.

[10] 杨扬,陈光武,屈睿涛,等.基于 Markov 模型的多传感器组合定位可靠性评估[J].铁道科学与工程学报,2017(12):2689.

YANG Yang, CHEN Guangwu, QU Ruitao, et al. Multi-sensor combination reliability assessment based on markov model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017(12):2689.

[11] 张洋,周达天,刘宏杰,等.基于多传感器融合的列车测速定位方法[J].都市轨道交通,2011(4):30.

ZHANG Yang, ZHOU Datian, LIU Hongjie, et al. Research on multi-sensor information fusion based CBTC train speed and position measurement[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011(4):30.

(收稿日期:2020-09-03)