

地铁列车驾驶技术发展综述：从人工驾驶到智能无人驾驶

赖文柱^{1,2}, 陈德旺^{1,3}, 何振峰^{1,2}, 邓新国^{1,2}, GIUSEPPE CARLO Marano⁴

- (1. 福州大学计算机与大数据学院, 福建 福州 350108;
2. 福州大学智慧地铁福建省高校重点实验室, 福建 福州 350108;
3. 福建工程学院交通运输学院, 福建 福州 350118;
4. 都灵理工大学, 意大利 都灵 EI10129)

摘要: 基于国内外地铁列车驾驶技术的发展现状, 提出并阐述了地铁列车驾驶技术发展的4个阶段为人工驾驶、自动驾驶、无人驾驶、智能无人驾驶。概括了我国无人驾驶地铁列车的建设情况, 针对目前基于神经网络这类机器学习方法的列车控制方法可解释性差的弊端, 引入了深度模糊系统的概念, 提出了基于人机混合智能的地铁智能无人驾驶基本框图, 为将处理紧急情况的专家经验、人工智能算法和无人驾驶系统结合起来, 实现智能无人驾驶提供了一种具有前景的解决思路。

关键词: 地铁; 无人驾驶; 人工智能; 智能无人驾驶; 人机混合智能

中图分类号: TP273, TP314.41

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202204

Overview of metro train driving technology development: from manual driving to intelligent unmanned driving

LAI Wenzhu^{1,2}, CHEN Dewang^{1,3}, HE Zhenfeng^{1,2}, DENG Xinguo^{1,2}, GIUSEPPE CARLO Marano⁴

1. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China
2. Key Laboratory of Intelligent Metro of Universities in Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China
3. School of Transportation, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China
4. Politecnico di Torino, Turin EI10129, Italy

Abstract: Based on the current development status of subway train driving technology in China and abroad, the four stages of subway train driving technology development were proposed and explained as manual driving, automatic driving, unmanned driving, and intelligent unmanned driving. After summarizing the construction situation of unmanned subway trains in China, the disadvantages of the current train control methods based on neural network-based machine learning methods were addressed. Then, the basic block diagram of metro intelligent unmanned driving based on man-machine hybrid intelligence was put forward and the deep fuzzy system was introduced. A promising solution for the combination of expert experience in dealing with emergency and interpretable AI algorithms for unmanned driving system to evolve into intelligent unmanned driving was provided.

Key words: metro, unmanned driving, artificial intelligence, intelligent unmanned driving, man-machine hybrid intelligence

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-03-19

通信作者: 陈德旺, dwchen@fjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61976055, No.61906043); 福建省财政厅教育科研专项资金 (No.GY-Z21001); 福州大学人才项目 (No.510809/GXRC-19037, No.510730/XRC-18075)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61976055, No.61906043), Special Fund for Education and Scientific Research by Fujian Provincial Department of Finance (No.GY-Z21001), Fuzhou University Talent Project (No.510809/GXRC-19037, No.510730/XRC-18075)

0 引言

1863年,世界上第一条用蒸汽机车牵引的地下铁道线路在英国伦敦建成通车。1879年电力驱动机车的成功研制,极大地改善了地下客运环境和服务条件,城市地铁的建设显示出强大的生命力。自世界第一条地铁在英国伦敦诞生以来,越来越多的国家开始了对城市地铁的建设,地铁已在很多国家的城市交通中承担起乘客运输的主要任务^[1]。

截至2019年,共有59个国家和地区的167座城市开通地铁,总里程达15 622.61 km,中国(除台湾外)总运营里程排名世界第一,占全球总里程的37.78%,全球共80座城市的城轨交通运营总里程超过100 km,其中中国有18座城市;共19座城市总里程超过300 km,其中中国有8座城市;上海、北京、莫斯科、广州、首尔的总里程超过500 km,其中上海以801.34 km运营里程位居世界第一^[2]。

据中国城市轨道交通协会^[3]2018年客流数据统计,全球轻轨、地铁累计运客量达到681.29亿人次,全球轨道交通客流量前十的城市为:北京、东京、上海、首尔、广州、莫斯科、深圳、香港、纽约、墨西哥城,中国共有5座城市位列前十,其中北京轨道交通客运量以38.5亿人次首次超过东京位列世界第一。

不难看出,地铁的建设大大改善了这些人流巨大的城市拥堵的交通状况。因此,要建设现代化大都市必须要有便利发达的交通,而建设地铁为其提供了可靠的解决方案。与城市中的其他交通工具相比,地铁除了能充分利用空间和避免城市地面拥挤,还有很多优点^[4]。一是运量大,地铁一般拥有4~6节车厢,其运输能力是地面公共汽车的7~10倍,远远大于任何城市交通工具。二是速度快,地铁列车在地下隧道里快速行进,行驶的时速可超过100 km。三是能源清洁,一般的交通工具的动力来源是汽油或石油,而地铁使用电能,没有尾气的排放,不会污染环境。

地铁要发挥其职能,既要有优秀的选线设计、严谨的施工方案,还要有高超的驾驶技术,三者缺一不可,而地铁列车的驾驶技术是其中的关键技术。一个拥有出色驾驶技术的司机/驾驶系统,是地铁安全高效运行的关键。一方面,只有具有丰富经验的司机/驾驶系统,才能够准确把控到站时间,并以此为依据进行加速或减速;另一方面,司机/驾驶系统可以游刃有余地处理列车行驶中出现的各种

突发情况。

从1863年开始,地铁列车驾驶技术的发展大致可分为人工驾驶、自动驾驶、无人驾驶、智能无人驾驶4个阶段。第一阶段是人工驾驶阶段,在这个阶段,列车运行全由司机进行控制,运行的质量由司机的驾驶水平决定,还容易受到外界情况的干扰。第二阶段是自动驾驶阶段,实际上是半自动化,这个阶段对列车某些比较固定的操作进行了自动化,而变化较多的操作仍由司机操控,这在一定程度上降低了司机的操作难度,但列车运行的质量仍与司机的驾驶水平息息相关。第三阶段是无人驾驶阶段,这个阶段列车的休眠、唤醒、启动、停车、车门开关、洗车、车站和列车的设备管理以及故障和突发情况的应对全部由系统自动管理,无任何人员参与,基本实现了地铁的无人驾驶。但其在列车运行能耗、乘客舒适度、到站精准率、停车误差、高峰时期列车调度等方面仍有许多不足。第四阶段也就是目前所处的阶段——智能无人驾驶阶段,这个阶段出现了各种控制、优化方法,如遗传算法、强化学习、数据挖掘神经网络^[5-10]等与人工智能方法结合的方法,不同程度地解决了地铁无人驾驶在运行能耗、乘客舒适度等方面的问题。在这个阶段,很多机器学习方法存在可解释性差等弊端。而最终目标是实现真正意义上的智能无人驾驶,做到即使没有人监管,也能自行处理各种特殊情况,保证地铁列车正常运行,并且能在运行过程中不断学习和提高驾驶性能,实现智能化驾驶。笔者创新地提出了基于人机混合的智能驾驶的概念,并结合深度学习和模糊系统,提出高安全性和高智能性的智能无人驾驶系统。

1 人工驾驶阶段

1863年,英国伦敦建成了世界第一条地铁^[10],这标志着城市快速轨道交通的诞生。随后纽约、芝加哥、维也纳等欧美国家的发达城市也相继建成了自己的城市地铁,直到2000年,世界上已有155座城市修建了地铁,线路总长度超过7 000 km。1969年,我国的第一条地铁线路在首都北京试运行,全长23.6 km,共17个站,每日最多可发车320次,运送乘客19万人次。该线路还实现了一定的自动化功能,如高度集中、自动闭塞、自动广播等。

但是,由于当时信号系统发展的限制,列车的安全运行是借助铁轨旁的视觉信号来完成的,因此

又被称为视距列车驾驶。在这种情况下, 列车完全由司机控制, 从路边设备(如轨道栏杆、轨道电路等^[11])实时接收轨道状态信息, 并连续接收铁路交通控制中心的列车调度指令。然而, 随着铁路系统的发展, 这种列车控制策略存在两个主要问题。一是若使用视觉信号, 如果司机没有看到或遵守信号指示, 会造成严重的灾难。二是手动驾驶主要基于司机的经验和专业判断, 缺乏严格的计算和优化。

2 自动驾驶阶段

在汽车自动驾驶领域, 由于当前道路权限、安全和现有技术不成熟等因素, 汽车的自动驾驶技术还未能广泛应用; 但在轨道交通领域, 列车运行在相对封闭和专用的轨道中, 在能处理好安全和效率关系的前提下是可以实现自动驾驶的。

2.1 列车自动控制系统简介

研究人员提出了由列车自动保护(automatic train protection, ATP)系统、列车自动运行(automatic train operation, ATO)系统、列车自动监控(automatic train supervision, ATS)系统组成的列车自动控制(automatic train control, ATC)系统。ATC作为当前最常用的信号系统具有以下3种技术性能不同的模式。

(1) 基于轨道电路的列车运行控制(track-circuit based train control, TBTC)模式。在这种模式下, 只能知道列车在某个轨道电路区间, 无法知道列车在区间内的具体位置, 列车运行效率不高。

(2) 综合使用轨道电路+应答器的准移动闭塞模式。在这种模式下, 系统可以告知后续列车继续前行的距离, 后续列车可根据这一距离合理地采取减速或制动, 从而改善列车速度控制性能, 缩小列车安全间隔, 提高线路利用效率。

(3) 基于通信的列车自动控制系统(communication based train control system, CBTC)模式。这种模式需要连续式双向车-地通信系统支持, 列车实时地向列控中心汇报位置和速度等运行参数, 列控中心实时地为列车计算运行参数并发送给列车。

在列车自动控制系统中, ATS主要负责监控列车的运行状况; ATP主要保证列车的运行安全; ATO主要被用于产生列车的推荐速度, 使列车按推荐速度运行, 包括实现车站自动运行、区间自动运行、自动折返、车站自动停车、车门开关控制、车门/站门联动控制等, 能够保证列车的运输安全, 提高列车运营效率。ATC与ATS、ATP、ATO的关系如图1所示。

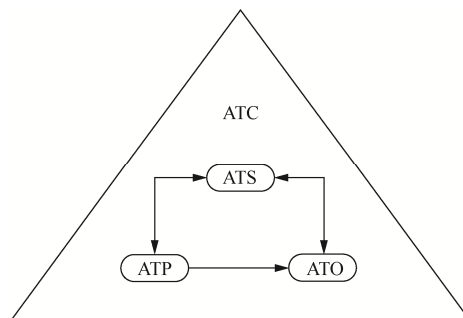


图1 ATC与ATS、ATP、ATO的关系

ATO会根据当前所处的路段产生一条ATO运行曲线。该运行曲线是模拟司机的经验形成的一种理想推荐速度曲线, 推荐速度曲线是由模拟控制器产生的^[12], 由于ATO计算的推荐速度在ATP防护曲线以下才能确保安全, 列车实际速度也应始终保持在ATP防护曲线以下。在ATO控制列车自动运行时, 列车在信号响应上有一定的延迟, 因此, ATO运行速度会略低于ATP防护曲线, 而ATP防护曲线会略低于线路限速, 列车实际速度则以ATO运行速度为基准, 越过ATP防护曲线则会触发紧急制动, 使列车停车。列车实际速度、ATO运行速度、ATP防护曲线及线路限速的关系如图2所示。列车从起点出发时, 速度在ATO运行速度以下; 当加速至ATO运行速度附近时, 立刻以ATO运行速度为基准; 当列车速度越过ATO运行速度时, 列车将采取常规制动, 使列车速度位于ATO运行速度以下; 当列车速度越过ATP防护曲线时, 系统将采取紧急制动使列车停车。

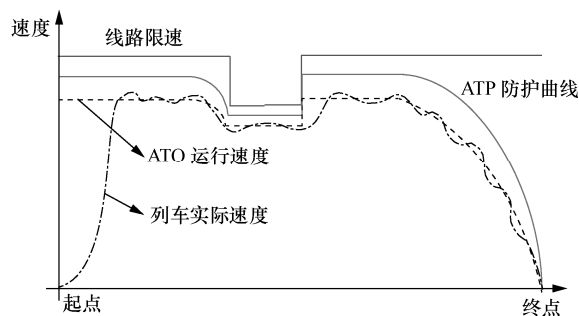


图2 列车实际速度、ATO运行速度、ATP防护曲线及线路限速的关系

因此, 地铁列车运行的速度控制问题可以表示为具有约束的多目标优化问题。为了满足这些约束条件并优化目标, 列车必须根据实时信息做出驾驶决策。在正常情况下, ATO负责所有的列车牵引和制动控制命令。ATO是解决列车速度控制的关键技术, 它的任务是保证列车准时运行、调节速度并在

目的地准确停车^[13]。传统上 ATO 可分为两个子模块。第一个子模块用于计算未来列车运行的速度曲线。在该模块下,使用离线优化算法计算最佳速度曲线。第二个子模块用于保证列车准确跟踪给定的速度曲线。

2.2 列车自动化等级及我国地铁自动驾驶发展现状

根据 IEC 62267^[14]规定,列车运行的基本功能包括保证列车安全运行、驾驶列车、监控轨道、监控乘客上下、监控列车、紧急状态的检测与管理。公共交通国际联合会(Union International des Transports Public, UITP)将列车自动化水平(grade of automation, GoA)分为5个等级:GoA0、GoA1、GoA2、GoA3、GoA4。其中,GoA0对应的自动化水平为人工驾驶阶段;GoA1表示在列车自动保护装置防护下的完全人工驾驶阶段,由司机控制列车的启动、停止,车门的开关以及突发情况的处理;GoA2对应半自动列车运行有司机值守阶段,由信号系统提供安全防护,控制列车运行和站台停车,但是关门和启动指令由司机下达;GoA3对应有人值守下的列车自动运行阶段,车上没有司机,司机被ATO等系统功能所取代,自动化程度进一步提高,仅安排乘务人员以应对突发事件;GoA4对应无人值守下的列车自动运行阶段,车上没有司机,也不安排任何乘务人员,是目前轨道交通自动化运营的最高级别。GoA1、GoA2、GoA3、GoA4的自动化程度的基本运行功能需求见表1。

尽管地铁的自动驾驶在20世纪80年代^[15]已经被提出,但实际上大部分列车并未真正实现全自动

化或真正的无人驾驶。在此阶段的地铁列车被称为有司机值守的自动驾驶(GoA2),又被称为ATO模式或半自动运行(semi-automatic train operation, STO)模式。其由信号系统提供安全防护,控制列车运行和站台停车,但是关门和发车的指令仍然由司机下达。实际上,目前我国大部分城市的地铁采用这种模式。

2017年,我国正式运营的上海地铁17号线^[16]由中国通号卡斯柯公司提供信号系统,实现了无司机有人监控的自动驾驶(GoA3),又被称为无驾驶员运行(driverless train operation, DTO)模式。在该线路中,信号系统对列车运行进行全程控制,列车的启动、停车、运行均由信号系统控制,但列车上仍需配备一名随车人员,用以开关列车的车门以及在紧急情况下对列车进行控制。严格来说,该模式也不算真正意义上的无人驾驶。截至2020年,达到GoA3自动化级别的线路有北京地铁首都机场线、上海地铁17号线、上海浦东国际机场旅客捷运系统、武汉地铁阳逻线,线网规模达到105.412 km,拟在建的有广州地铁7号线二期和青岛地铁6号线。

3 无人驾驶阶段

地铁的无人驾驶系统又可称为无人值守的自动驾驶(unattended train operation, UTO)系统,是目前轨道交通自动化运营的最高级别,即GoA4,列车的休眠、唤醒、启动、停车、车门开关、洗车、车站和列车的设备管理以及故障和突发情况的应对全部由系统自动管理,无任何人员参与。

表1 GoA1、GoA2、GoA3、GoA4的自动化程度的基本运行功能需求

列车运行的基本功能	具体功能	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
保证列车安全运行	安全进路	设备	设备	设备	设备
	列车间隔控制	设备	设备	设备	设备
	速度监督	人工	设备	设备	设备
驾驶列车	加速或减速	人工	设备	设备	设备
监控轨道	障碍物检测	人工	人工	设备	设备
	避免与轨道上的人员接触	人工	人工	设备	设备
监控乘客上下	车门和站台门控制	人工	人工	人工	设备
	判断列车启动条件	人工	人工	设备	设备
监控列车	列车投入运营	人工	人工	人工	设备
	列车退出运营	人工	人工	人工	设备
	监督列车运营	人工	人工	人工	设备
紧急状态的检测与管理	检测列车;检测烟火、脱轨、列车完整;紧急情况处理	人工	人工	人工	设备检测+人工处理

3.1 地铁无人驾驶发展历程

UTO 的开发经历了概念形成、技术存储、尝试应用和蓬勃发展 4 个阶段^[17]。1962 年,世界第一条全自动驾驶地铁在美国纽约投入运营,运行在纽约大中央火车站与时代广场之间。1998 年,世界第一条应用到大型客流的全自动驾驶地铁列车——法国巴黎地铁 14 号线正式运行^[18],该线路采用了阿尔斯通公司提供的 MP89 型动车组和西门子公司提供的 TrianGuard 信号系统,实现了很多革新,如能够根据运营、调度的需要调整列车的运行速度和行车密度,停车时车门可自动打开等。鉴于地铁 14 号线的成功,巴黎政府将繁忙的地铁 1 号线也升级为无人驾驶,并在 2012 年年底实现了所有列车无人值守,达到了 100%自动化^[19]。

2003 年 6 月,新加坡地铁东北线正式开通,该线路是世界上第一条实现正线和车辆段全自动运行的重载线路,其最高时速可达 90 km,最小行车间隔 2 min,控车方式由固定闭塞逐渐向移动闭塞发展,即列车与列车的间隔不再是固定的,而是在保证可安全制动的前提下根据客流量灵活变动^[20]。

2009 年,欧盟完成了包含车载、轨旁、通信、乘客服务、节能和系统^[21]6 个方面,具有开放结构和接口的新一代城市轨道交通系统测试,并被国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)和欧洲电工标准化委员会(European Committee for Electrotechnical Standardiz, CENELEC)采纳,这标志着城市轨道交通进入成熟应用阶段。在该阶段,移动闭塞技术成为主流,系统的安全可靠性也成为研究人员关注的重点。

3.2 我国地铁无人驾驶发展现状

2016 年,我国的第一条全自动驾驶地铁在香港南港岛正式运营。该线路由中车长春轨道客车股份有限公司研发,其自动化等级达到了 GoA4,能完全实现自动唤醒、自动运行、自动诊断等功能^[22],实现了真正的无人驾驶。2017 年 12 月 30 日,中国首条自主研发的全自动运行线路——北京地铁燕房线正式投入运营,该线路全长 14.4 km,最高时速 80 km,采用了完全国产的 CBTC 系统^[23]。该线路的成功研发也意味着中国轨道交通尖端技术走在了世界的前列^[24]。

据统计,截至 2020 年年底,中国(除香港、澳门外)已运营线路中采用最高等级 GoA4(无人值守下的自动化运行)的有北京、上海、广州、成

都和太原 5 座城市的 8 条线路,线网规模 181.55 km;并且中国(除香港、澳门外)的北京、上海、深圳、广州、武汉、郑州、太原等 23 座城市正在建设全自动运行系统轨道交通线路,线路共计 49 条,一共 1 774.77 km,其中采用最高等级 GoA4 的有广州、深圳、郑州、北京等 19 座城市,线路共计 40 条,一共 1 221.848 km,占有在建线路规模的 69.42%。由此可见,我国的地铁无人驾驶技术已经十分成熟,成为国内各城市修建地铁的首选。

4 智能无人驾驶阶段

轨道列车方向是较早开始进行无人驾驶研究和应用的领域,并且也是目前为数不多能够在实际运行中应用无人驾驶的领域。尽管 ATC 在地铁无人驾驶上取得了很大的成功,但其在列车运行能耗、乘客舒适度、到站精准率、停车误差、高峰时期列车调度等方面仍有许多不足^[25]。近年来,随着 5G、大数据和人工智能技术的蓬勃发展,将城市轨道交通与 5G、大数据以及人工智能结合^[26]成为国家实现现代化建设的新方向。但是正是轨道列车在无人驾驶领域的优势限制了其在无人驾驶方向的大规模发展,而人工智能在轨道列车运行控制、轨道车辆调度配置和整车车联网方向的优势能够极大地促进无人驾驶在轨道列车领域的推广。未来,与人工智能、大数据、5G 结合的无人驾驶必将是轨道列车运行的主要方式。笔者将该阶段称为智能无人驾驶阶段。

4.1 未来智能无人驾驶系统中的关键技术

(1) 基于深度强化学习的轨道列车控制技术

我国很多一线城市高峰时段的地铁车次之间的时间间隔只有 2~3 min,对于列车来说,控制车速、刹车时间以及在不同站点的等待时间以保证乘客能够安全、准确、准时地到达目的地至关重要。深度强化学习^[27]在控制领域具有不可撼动的地位。基于深度强化学习的控制技术对于解决轨道列车的运行控制的未知阻力和非线性问题是行之有效的解决途径。同时,在列车控制过程中,列车的行为不仅会影响当前时刻的列车运行,还会影响未来列车的运行(如准时到站、在站台精准停车)。而这正是强化学习所擅长的。此外,现代地铁可以输出连续的牵引力和制动力^[28],利用深度强化学习可以改进当前 ATO 系统中使用的针对离散动作的控制策略。

(2) 基于客流大数据分析的列车调度技术

对于城市地铁来说,不同运行线路、不同运行时段的客流量差异很大。例如,深圳地铁6号线周末单日客流量是10号线的近4倍。因此,在不同的客运路线和时间上合理配置车辆也十分关键。使用机器学习方法^[29-35]对客流大数据进行建模、分类,再利用神经网络对地铁的客流大数据进行分析、预测^[36]可以实现对地铁列车的实时调度,甚至可以根据地铁列车每日的运行数据对第二天的列车驾驶策略进行优化。这些人工智能方法可从大数据中学习特征并总结规律,使得地铁驾驶系统可以“进化”得更加智能、高效和安全。基于客流大数据分析的列车调度技术是针对我国城市大规模上下班高峰和节假日高峰乘客乘车最优的解决方案。

(3) 基于5G通信的列车物联网技术

随着5G的到来,对城市轨道交通的要求就不能仅仅停留在只满足群众出行的层面上,应利用5G超高带宽、超低延时和超大规模连接的特点^[37]使城市轨道交通向智能化和多功能化方向发展。目前我国大多数地铁列车的车载影音系统薄弱,车厢内播放的内容常常会出现花屏甚至无信号的情况。5G的通信速度能将列车的车站影音娱乐类系统全面升级,实现4k、8k、3D或者AR视频服务,特别是虚拟内容与乘客之间的交互,可以极大地丰富乘客在列车上的文娱活动^[38]。同时,5G带来的超高速通信可以保证列车在无人驾驶情况下能够通过车载系统与控制中心实时连接,随时保证列车运行时的安全可控。5G也必将支撑无人驾驶轨道列车实现的核心关键技术。

4.2 人机混合智能系统

相比GoA2级别的有司机值守的自动驾驶系统,虽然智能无人驾驶阶段的无人驾驶系统有很多无可比拟的优势,但在列车遇到紧急情况时,有人值守的列车安全性更高。究其原因,目前的深度学习算法都有可解释性差的弊端^[39-40],在不同程度上都依赖有监督的样本训练,以至于无法应对没有训练到的状况。为了解决这个问题,郑南宁院士曾提出“人机混合增强智能”^[41]的人类智能与机器智能协同工作的新概念,并提出了人在回路的混合增强智能和基于认知计算的混合智能计算两种实现形式。基于人机混合增强智能的观点,不妨把处理列车紧急情况的专家经验与无人驾驶系统结合起来,

称其为人机混合智能驾驶系统。在列车遇到紧急情况时,系统自动切换到拥有人类智能的“专家模式”,并针对不同的情况控制列车的运行。例如,Yin J T等人^[42]利用专家经验和强化学习Q-Learning方法,构建了一个能够满足多个目标(节能、准时、舒适、安全)的智能列车操作系统,同时该系统还实现了在线运行,从而无须参考离线的推荐速度曲线。Zhou K C等人^[43]在此基础上利用深度确定性政策梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)和归一化优势函数(normalized advantage function, NAF)算法,进一步优化了列车运行时的能耗、舒适度指标,并实现了对地铁列车连续的牵引力和制动力的控制。

人机混合智能驾驶系统解决地铁列车无人驾驶的关键是合理安排人类专家和智能体的分工。如果利用人类专家经验处理的部分过多,则自动化以及智能化的程度就会过低;如果智能体处理的部分过多,则可能会考虑不到特殊情况,存在安全隐患。为了解决人类专家和智能体的分工问题,此处引入深度模糊系统和深度神经模糊系统^[44-45],深度神经模糊系统结合了神经网络的准确性高和模糊系统可解释性高的优点,十分契合地铁高效安全运行的需求。

将深度模糊系统和深度神经模糊系统应用于基于人机混合智能的地铁列车无人驾驶系统的关键在于对常规情况以及特殊情况的划分。如果模糊系统判断当前场景属于常规场景,则使用智能体对当前场景进行处理;如果模糊系统判断当前场景属于特殊场景,则应当在智能体处理的基础上再引入人类专家的经验进行处理。如此一来,安排分工这一核心问题就转变为划分列车运行场景。而这一问题可以根据地铁运行过程中的需求进行自定义修改,例如在列车运行过程中,每个时刻智能体都会输出相应的动作(一般是加速度),若该动作取值不符合常规情况的范围,则此次动作将被视为特殊情况,需要使用人类专家知识进行处理。由于列车控制模型的复杂性和不确定性,难以设计出能够解决所有问题的控制器,因此人类专家知识的引入,降低了列车控制模型训练的难度,同时也保证了模型的安全性。

基于人机混合智能的地铁列车无人驾驶系统的基本框图如图3所示,根据图3可以解决以上核心问题。先由列车智能体和人类专家共同感知或列

车智能体单独感知目前的运行环境, 获得当前时刻的列车速度、加速度、运行阻力、剩余路程等参数, 然后对这些参数进行综合, 用模糊系统判断当前状态属于常规场景还是特殊场景。如果属于常规场景, 则按照事先训练好的情况让智能体做出处理, 得出下一个时刻应做出的动作; 如果属于特殊场景, 则将人类专家的作用引入人工智能, 让智能体运用人类专家经验与常规经验一同处理, 得出下一个时刻的最优或者较优动作。如此循环, 直至完成一趟运行。

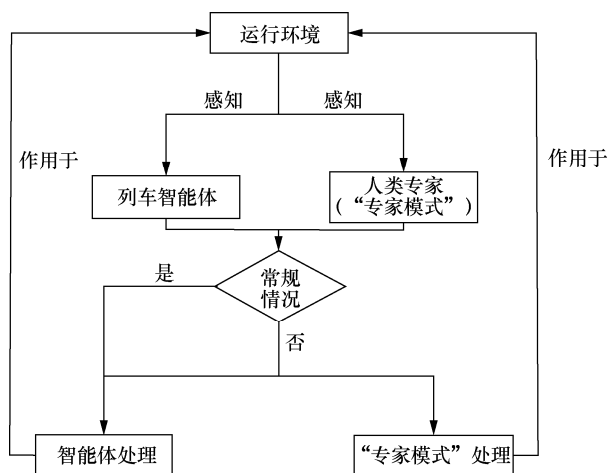


图3 基于人机混合智能的地铁列车无人驾驶系统的基本框图

不难想象, 将人机混合增强智能应用到地铁列车的自动驾驶系统中的各个方面, 让人类智能与机器智能在列车运行中协同工作、发挥各自优势的基于人机混合的智能驾驶是未来地铁智能无人驾驶研究一个重要方向。

5 结束语

本文根据地铁列车驾驶的自动化程度将地铁列车的驾驶技术划分为人工驾驶阶段、自动驾驶阶段、无人驾驶阶段和智能无人驾驶阶段, 并对不同阶段的驾驶技术特点进行了阐述; 针对无人驾驶阶段列车面对紧急情况存在的安全隐患, 提出了基于人机混合智能的“专家模式”的概念, 并结合深度学习和模糊系统, 提出了面向人机混合智能的深度模糊系统, 该系统可以很好地将数据驱动智能和人类专家经验有机地融合在一起, 在确保安全性的前提下, 提高驾驶系统的综合性能和自学习能力。

我国的地铁建设相对欧美发达国家起步较晚, 若想现阶段实现对欧美国家的弯道超车, 就需要

在列车的驾驶技术上取得创新性成果, 而将人机混合智能理论和深度模糊系统等方法综合应用到列车无人驾驶上, 为其提供了一种极具前景的新方向。

参考文献:

- [1] 《隧道建设(中英文)》编辑部. 世界地铁数据·2018[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(12): 2077-2080.
Editorial Department of Tunnel Construction. World metro data, 2018[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(12): 2077-2080.
- [2] 韩宝明, 陈佳豪, 杨运节, 等. 2019 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 4-8.
HAN B M, CHEN J H, YANG Y J, et al. Statistical analysis of urban rail transit operation in the world in 2019: a review[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(1): 4-8.
- [3] 孙世超, 顾保南, 邓澄远. 2015 年中国城市轨道交通运营线路统计和分析: 中国城市轨道交通“年报快递”之三[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(1): 1-4, 9.
SUN S C, GU B N, DENG C Y. Statistical analysis of urban rail transit lines in 2015 China—express delivery of annual report on urban rail transit III[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(1): 1-4, 9.
- [4] 曹炳坤. 世界地铁发展令人瞩目[J]. 城市公共交通, 2003(5): 33.
CAO B K. The world's remarkable development of subway[J]. Urban Public Transport, 2003(5): 33.
- [5] CAO Y, WANG Z C, LIU F, et al. Bio-inspired speed curve optimization and sliding mode tracking control for subway trains[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6331-6342.
- [6] HUANG J, LIU Y, XIA Y N, et al. Train driving data learning with S-CNN model for gear prediction and optimal driving[C]//Proceedings of 2019 Chinese Automation Congress. Piscataway: IEEE Press, 2019: 2227-2232.
- [7] PU Q, ZHU X M, ZHANG R T, et al. Speed profile tracking by an adaptive controller for subway train based on neural network and PID algorithm[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10656-10667.
- [8] YIN J T, SU S, XUN J, et al. Data-driven approaches for modeling train control models: comparison and case studies[J]. ISA Transactions, 2020, 98: 349-363.
- [9] ZHANG C Y, CHEN D W, YIN J T, et al. Data-driven train operation models based on data mining and driving experience for the diesel-electric locomotive[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30(3): 553-563.
- [10] 宿帅, 朱擎阳, 魏庆来, 等. 基于DQN的列车节能驾驶控制方法[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(4): 372-384.
SU S, ZHU Q Y, WEI Q L, et al. A DQN-based approach for energy-efficient train driving control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(4): 372-384.
- [11] MIDYA S, THOTTAPPILLIL R. An overview of electromagnetic

- compatibility challenges in European Rail Traffic Management System[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2008, 16(5): 515-534.
- [12] 汤力成. 考虑ATO控制策略的城轨列车推荐速度曲线优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- TANG L C. Optimization of recommended speed curve considering ATO control strategy for urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [13] DONG H R, NING B, CAI B G, et al. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2010, 10(2): 6-18.
- [14] KWON S D, LEE H S. A study of unmanned light rail vehicle (K-AGT) system engineering process under safety requirement, IEC 62267[J]. *Journal of the Korea Society of Systems Engineering*, 2013, 9(1): 1-11.
- [15] 赵红. 列车自动驾驶系统(ATO系统)在地铁中的应用[J]. *电子世界*, 2014(7): 30-30, 32.
- ZHAO H. Application of automatic train driving system (ATO) in subway system [J]. *Electronics World*, 2014(7): 30-30, 32.
- [16] 冯立勋. 浅谈上海地铁17号线车辆特点[J]. *中国高新区*, 2018(18): 46.
- FENG L X. On the characteristics of Shanghai metro line 17[J]. *Science & Technology Industry Parks*, 2018(18): 46.
- [17] 饶东. 全自动运行系统地铁车辆技术[J]. *铁路技术创新*, 2015(4): 13-17.
- RAO D. Metro vehicle technology with automatic operation system [J]. *Railway Technical Innovation*, 2015(4): 13-17.
- [18] 缪根欣. 巴黎地铁MP89型新动车组的试验[J]. *控制与信息技术*, 1995(7): 20.
- MIAO G X. Test of MP89 EMU of Paris metro[J]. *Control and Information Technology*, 1995(7): 20.
- [19] 任安萍. 浅谈我国全自动无人驾驶地铁的发展[J]. *科技视界*, 2012(25): 207-208.
- REN A P. The development of fully automated and driverless subway in China[J]. *Science & Technology Vision*, 2012(25): 207-208.
- [20] 傅世善. 闭塞与列控概论第十讲移动闭塞概述[J]. *铁路通信信号工程技术*, 2006, 3(4): 61-63.
- FU S S. Introduction to block and train control lecture 10 overview of moving block[J]. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2006, 3(4): 61-63.
- [21] 赵有明, 方鸣, 刘淮清. 欧洲轨道交通技术类研究项目综述[J]. *现代城市轨道交通*, 2014(1): 1-6.
- ZHAO Y M, FANG M, LIU W Q. Overview on technology research projects in rail transit in Europe[J]. *Modern Urban Transit*, 2014(1): 1-6.
- [22] 张崔中. 我国首条全自动驾驶地铁“上岗”[J]. *新长征(党建版)*, 2017(5): 60.
- ZHANG C Z. China's first fully automatic Metro "on duty" [J]. *New Long March*, 2017(5): 60.
- [23] 宗明, 郇春海, 何燕. 基于CBTC控制的全自动驾驶系统[J]. *都市轨道交通*, 2006, 19(3): 34-36.
- ZONG M, GAO C H, HE Y. Fully automatic operation system based on CBTC[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2006, 19(3): 34-36.
- [24] 王浩, 林湛, 杨霓霏, 等. 轨道交通国产化CBTC系统技术创新点研究[J]. *铁路计算机应用*, 2014, 23(1): 58-60.
- WANG H, LIN Z, YANG N F, et al. Research on technical innovative points of domestic CBTC system of urban transit[J]. *Railway Computer Application*, 2014, 23(1): 58-60.
- [25] 冷勇林. 基于专家经验和机器学习的列车智能驾驶算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- LENG Y L. Intelligent train operation algorithm based on expert knowledge and machine learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [26] 陈德旺, 章明亮, 沈镛. 智慧地铁: 基于大数据与人工智能的新型地铁系统[J]. *智能城市*, 2018, 4(19): 8-10.
- CHEN D W, ZHANG M L, SHEN Y. Intelligent metro: new metro system based on big data and artificial intelligence[J]. *Intelligent City*, 2018, 4(19): 8-10.
- [27] WANG H N, LIU Z, ZHANG Y Y, et al. Overview of deep reinforcement learning[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, 21(12): 63-82.
- [28] LIU R, GOLOVITCHER I M. Energy-efficient operation of rail vehicles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, 37(10): 917-932.
- [29] REBENTROST P, MOHSENI M, LLOYD S. Quantum support vector machine for big data classification[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(13): 130503.
- [30] 宁滨. 平行轨道交通系统[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(3): 215-218.
- NING B. Parallel rail transportation system[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(3): 215-218.
- [31] FIORE U, PALMIERI F, CASTIGLIONE A, et al. Network anomaly detection with the restricted Boltzmann machine[J]. *Neurocomputing*, 2013, 122: 13-23.
- [32] HUANG W H, SONG G J, HONG H K, et al. Deep architecture for traffic flow prediction: deep belief networks with multitask learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(5): 2191-2201.
- [33] KARPATY A, TODERICI G, SHETTY S, et al. Large-scale video classification with convolutional neural networks[C]//*Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1725-1732.
- [34] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning[J]. *A Bradford Book*, 1998, 15(7): 665-685.
- [35] CORLU C G, DE LA TORRE R, SERRANO-HERNANDEZ A, et al. Optimizing energy consumption in transportation: literature review, insights, and research opportunities[J]. *Energies*, 2020, 13(5): 1115.
- [36] 鲁明旭, 叶银忠, 马向华. 神经网络在地铁客流预测中的应用[J]. *机械研究与应用*, 2012, 25(3): 86-89.

LU M X, YE Y Z, MA X H. Application of neural network in the subway passenger flow prediction[J]. Mechanical Research & Application, 2012, 25(3): 86-89.

- [37] AI B, MOLISCH A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893.

- [38] 施浚琿. 人工智能在无人驾驶轨道列车中的应用[J]. 科技风, 2019(31): 8-9.

SHI J H. Application of artificial intelligence in unmanned rail train[J]. Science and technology wind, 2019 (31): 8-9

- [39] 吴飞, 廖彬兵, 韩亚洪. 深度学习的可解释性[J]. 航空兵器, 2019, 26(1): 39-46.

WU F, LIAO B B, HAN Y H. Interpretability for deep learning[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(1): 39-46.

- [40] 郑庆华. 人机混合增强智能的典型应用专题前言[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(12): 2479-2480.

ZHENG Q H. Foreword of typical application of human machine hybrid enhanced intelligence[J]. Computer Research and Development, 2020, 57(12): 2479-2480

- [41] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 1-3. ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3.

- [42] YIN J T, CHEN D W, LI L X. Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2561-2571.

- [43] ZHOU K C, SONG S J, XUE A K, et al. Smart train operation algorithms based on expert knowledge and reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(2): 716-727.

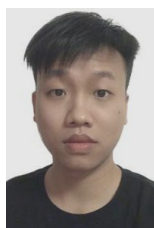
- [44] 陈德旺, 蔡际杰, 黄允沛. 面向可解释性人工智能与大数据的模糊系统发展展望[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(4): 327-334.

CHEN D W, CAI J J, HUANG Y H. Development prospect of fuzzy system oriented to interpretable artificial intelligence and big data[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(4): 327-334.

- [45] 赵文迪, 陈德旺, 卓永强, 等. 深度神经模糊系统算法及其回归应用[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2350-2358.

ZHAO W D, CHEN D W, ZHUO Y Q, et al. Deep neural fuzzy system algorithm and its regression application[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(11): 2350-2358.

[作者简介]



赖文柱（1997-），男，福州大学计算机与大数据学院硕士生，主要研究方向为深度强化学习与地铁无人驾驶。



陈德旺（1976-），男，博士，福州大学计算机与大数据学院教授、博士生导师，福建工程学院交通运输学院院长，福州大学智慧地铁福建省高校重点实验室研究员，福建省“闽江学者”特聘教授。主要研究方向为人工智能、大数据、智慧轨道交通。



何振峰（1971-），男，博士，福州大学计算机与大数据学院副教授，主要研究方向为数据挖掘、智能交通、农业信息技术。



邓新国（1975-），男，博士，福州大学计算机与大数据学院副教授，主要研究方向为印刷电路板转移路由、印刷电路板总线布线/列车智能驾驶。



GIUSEPPE CARLO Marano（1967-），男，博士，都灵理工大学结构、建筑和岩土工程系教授，主要研究方向为土木工程、智能建造和智能交通系统。