DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.001　　文章编号：1000-128X(2023)01-0001-12

机车自动驾驶技术研究与应用

尚　敬，刘　勇，江　帆
（株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：当前轨道交通正朝着绿色、智能的方向发展，自动驾驶可进一步降低列车运行能耗，提升列车运行效率、消除不同司机操纵差异、提升列车运行一致性，是未来路网条件下列车有序协同运行的控制基础，也是轨道交通智能化方向技术发展的典型代表。文章分析了机车自动驾驶研究的国内外现状和技术难点，阐述了满足我国干线机车运用需求的机车自动驾驶系统整体架构，设计了有人值守的机车自动驾驶方案，详细介绍了列车运行规划与速度控制、列车纵向动力学仿真、多传感器融合感知、列车系统运行仿真等关键技术，并对机车自动驾驶技术未来的发展方向进行了思考和展望。基于上述技术的机车自动驾驶系统已在多个铁路局和铁路公司装车运用并取得显著的应用效果。该系统可支持不同的编组和载重，可适配不同的车型、控制系统、信号系统，具有良好的通用性和可推广性。

关键词：机车；自动驾驶；规划与控制；纵向动力学；系统仿真；重载列车
中图分类号：U268.4　　**文献标识码：**A

Research and application of locomotive automatic operation technology

SHANG Jing, LIU Yong, JIANG Fan

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In the current development tide of rail transit towards green and intelligence, automatic operation technology plays a role in the control basis for the orderly and coordinated operation of trains under the future railway network conditions, and emerges as a typical representative of the rail transit development in the field of intelligent technology, thanks to the benefits to further improving the efficiency while reducing the energy consumption of train operation, eliminating the operation differences among drivers, and raising the consistency of train operation. This paper analyzed the current development and technical difficulties of locomotive automatic operation research in China and abroad, elaborated the overall architecture of the locomotive automatic operation system to meet the application requirements on the trunk lines in China, proposed a manned locomotive automatic operation design, with details on the key technologies such as train operation planning and speed control, train simulation in longitudinal dynamics, multi-sensor fusion perception, operation simulation of train systems, and was concluded with ideas and prospects on the future development trends of automatic locomotive operation technologies. The locomotive automatic operation system based on the above-mentioned technologies has been used in many CR regional groups and turned out with remarkable application results. The system can support different formations and loads, and is adaptive to different car models, control systems, and signal systems, demonstrating good universality and popularization.

Keywords: locomotive; automatic operation; planning and control; longitudinal dynamics; system simulation; heavy-haul train

0　引言

近年来，智能化技术的发展与应用逐渐成为驱动轨道交通技术装备革新的重要手段[1]。2019年9月，中共中央、国务院发布《交通强国建设纲要》，指出要强化前沿关键科技研发。瞄准新一代信息技术、人工智

基金项目：中国中车科技研究开发计划重点项目（2022CTB143）
通信作者：尚　敬（1977—），男，博士，正高级工程师，研究方向为牵引控制技术、自动驾驶技术；E-mail: shangjing@csrzic.com
引用格式：尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应用[J]. 机车电传动, 2023(1): 1-12.
Citation: SHANG Jing, LIU Yong, JIANG Fan. Research and application of locomotive automatic operation technology[J].Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 1-12.

能、智能制造等世界前沿科技，加强对可能引发交通产业变革的前瞻性、颠覆性技术研究。自动驾驶依靠计算机与智能化技术在没有人工操纵的情况下，完成列车安全、平稳、准点、节能运行，是轨道交通与人工智能、物联网、高性能计算等智能化技术深度融合的产物，也是轨道交通智能化发展的主要技术方向。目前自动驾驶在城轨领域已大规模商业应用，技术状态较为成熟。在动车领域，京张高铁智能动车组实现了有人值守的自动驾驶。在机车领域，存在运营线路非封闭、环境多变、机车与车辆灵活编组等特点，使得机车自动驾驶系统面临运用场景复杂、受控对象的长度和载重灵活多变、运行环境复杂等一系列挑战。

1 机车自动驾驶技术特点

1.1 自动化等级

在轨道交通行业，城市轨道交通的自动驾驶研究起步最早。IEC 62267根据运营人员和系统所承担的列车运行基本功能的责任划分，确定列车运行自动化等级（Grades of Automation，GOA）为 5 级：GOA0 为目视行车，GOA1 为非自动化列车运行，GOA2 为半自动化列车运行，GOA3 为无人驾驶列车运行，GOA4 为无人干预列车运行[2]。基于GOA 分级，GOA2 一般也称为有人值守的自动驾驶；GOA3/4 称为无人驾驶。

相较于城市轨道交通列车简单封闭的运用场景和固定编组的运输组织模式，干线铁路运输组织体系十分复杂，货物装卸、机车车辆编组解编作业频繁，地面作业及安全保障人员多，机车车辆装备、地面配套系统与基础设施保障体系不够完善。如果参照城市轨道交通实现无人驾驶的目标，资源投入巨大，因此以有人值守的GOA2 等级自动驾驶作为目标，后续再逐步向无人驾驶方向发展的方式更加符合目前国内干线机车的运用现状。

1.2 国内外发展现状

澳大利亚力拓公司开发的世界上首个机车自动驾驶系统AutoHaul经过10年研究后于2018年在西澳铁路皮尔巴拉（Pilbara）地区的重载铁路网上成功应用。该系统采用安萨多尔（Ansaldo STS）的ETCS-2 信号系统，自动驾驶系统ATO采用克诺尔（KNORR）研发的LEADER 系统（AutoPliot）。该自动驾驶列车由 3 台内燃机车集中牵引236辆货车车辆，载重超过2.8万t，可实现GOA4等级的无人驾驶。

美国GE公司开发的Trip Optimizer（TO）系统在美国批量运用，累计装车7 000余套，但该系统在机车速度大于15 km/h时才被允许进入，当TO系统获得控制权后，仅控制机车的牵引和电制动（不控制空气制动系统）。该系统以内燃机车节能、列车冲动降低作为主要技术特点。

欧洲英国、法国、德国等多个国家在干线铁路上进行了基于ETCS的ATO技术研究与试验，在欧盟主导的Shift2Rail创新计划中，其长期目标是发展GOA3/4级列车自动驾驶的干线铁路应用，现阶段主要集中在GOA2等级的列车自动驾驶技术研究，致力于研究一种可互操作的方法，开发可扩展到不同应用场景和兼容不同厂商的ATO解决方案[3]。

在国内，中车株洲所研制的机车自动驾驶系统于2018年9月在西安局国产化HXD1机车上装车，首次实现了正线“零起零停”的货运列车自动驾驶；2019年12月在包神铁路开行了首列具备干线铁路异物入侵检测、覆盖正线自动驾驶与站段自动调车的万吨重载列车；2020年以来，先后在国内2条运量最大的重载专线——大秦线与朔黄线开展2万t重载组合列车自动驾驶线路试验，解决了重载组合列车平稳控制、循环空气制动控制等技术难题。

尽管国内外均在开展机车自动驾驶技术的研究与应用，我国的货车车辆使用的是自动式空气制动系统(Pneumatic Controlled Pneumatic，PCP)，而澳大利亚、美国的货车车辆则使用电控空气制动系统(Electronically Controlled Pneumatic，ECP)。ECP采用贯穿于长大列车的通信电缆而非空气作为制动系统指令的传输介质，且仅通过压缩的空气产生制动力。ECP制动系统可以实现全列车同步制动、缓解，形成贯穿全列车的制动力均匀分配，有效缩短列车制动的空走时间，减少列车纵向冲动和制动距离，同时可以阶段缓解[4]。因此采用ECP制动系统的长大列车在操纵上比采用PCP制动系统的长大列车要容易很多，同时考虑开行密度、线路条件、运行速度等因素，我国开展机车自动驾驶技术的研究与应用相比澳大利亚、美国难度更大。

1.3 与城轨/动车自动驾驶的区别

机车自动驾驶与城轨、动车自动驾驶的区别主要体现在受控对象方面，具体对比见表1。

表1 机车与动车/城轨自动驾驶的对比

Table 1 Comparison of automatic operation between locomotive and EMU/urban rail vehicles

项目	机车	动车/城轨
编组形式	单编列车、单元列车、组合列车	城轨：固定编组； 动车：标准列、标准列重联
负载类型	敞车、罐车、棚车等	客运车厢
制动类型	自动式空气制动系统	直通式电空制动系统
列车载重	单编列车100~200 t， 单元列车5 000~10 000 t， 组合列车2.1万t	城轨：400 t 动车：500 ~ 1 100 t
控制方式	集中式牵引，推挽模式，分布式动力	动力分散，控制同步

由表1可知，城轨与动车具有编组短、载重小、动

力分散、制动系统同步性好等特点，而机车自动驾驶则更需要聚焦长编组、大载重的大惯性系统，实现在复杂线路及非确定变量条件下的精准控制，因此机车自动驾驶的控制难度更大，且城轨、动车的自动驾驶控制方法不适用于机车。

1.4　机车自动驾驶技术难点

重载列车编组长、载重大、列车覆盖的纵断面多，因此受力复杂。实现自动驾驶的高效安全运行主要存在以下难点：

①重载列车建模难度大。1 列 2 万 t 重载组合列车由“1 辆主控机车+105 辆货车+1 辆从控机车+105 辆货车+1 辆带可控列尾装置的机车”构成，列车全长 2.6 km左右，整列车通常覆盖 3 ~ 4 个线路纵断面，导致整列车的线路附加阻力分布不均匀。主控与从控机车之间的控制指令依靠无线传输，货车的制动指令依靠空气制动波传输，因此在列车运行过程中可能出现主控–从控机车控制响应延时，空气制动过程中前部与尾部车辆存在制动/缓解时间差，使得重载组合列车在运行过程中的受力十分复杂，建模难度大。

②约束条件耦合多。重载列车开行受到线路、环境制约，随着列车载重增大、编组辆数增多，在牵引/制动力的加/减载、特殊场景下电制动力的限制、空气制动与电制动的协同配合、空气制动的最低缓解速度、过分相前后的平稳操纵等方面有很多约束条件，一旦操纵不当容易出现冲动，严重时可能诱发中部机车渡板变形、车钩分离、脱轨、脱线等重大安全事故。

③循环空气制动精准操纵难。我国货运拖车多使用自动式空气制动系统，其空气制动只能阶段施加、一次缓解。对重载列车而言，在长大下坡道区段内机车电制动的速度调节能力有限，必须与车辆空气制动协同控制才能保障安全通过。空气制动系统的制动力特性与再充风时间、列车速度和闸瓦摩擦作用均有关，车辆空气制动性能存在离散性大的问题，但循环空气制动缓解对列车缓解地点与速度均有严格要求，这对重载列车在长大下坡过程中的精准操纵提出了很高的要求。

综上所述，如何针对操纵难点保证重载列车运行的平稳性与安全性是机车自动驾驶技术研究的重点与难点。

2　机车自动驾驶系统架构与关键技术

2.1　场景分析

结合车载系统、信号系统、地面系统及机车乘务员操纵的相关规定开展运用场景分析，为实现机车自动驾驶提供场景描述、边界划分、约束条件和经验规则，从而实现控制策略与实际运用的紧密结合。根据目前国内干线机车运用情况及相关操纵规定，机车自动驾驶系统的运用场景应包含干线机车调车和正线作业。干线机车调车是指干线机车在段内和站场运行，其场景覆盖机车唤醒、机车出段和正线发车，以及正线运营完成后的站场解编和机车入段休眠[5]；正线作业场景是指机车完成正线运营所需要的场景，覆盖区间运行、车站的到达、停车及通过等。在列车运行过程中，遇到的故障及非正常场景，自动驾驶也需要做出对应的安全导向。具体场景组成如图 1 所示。

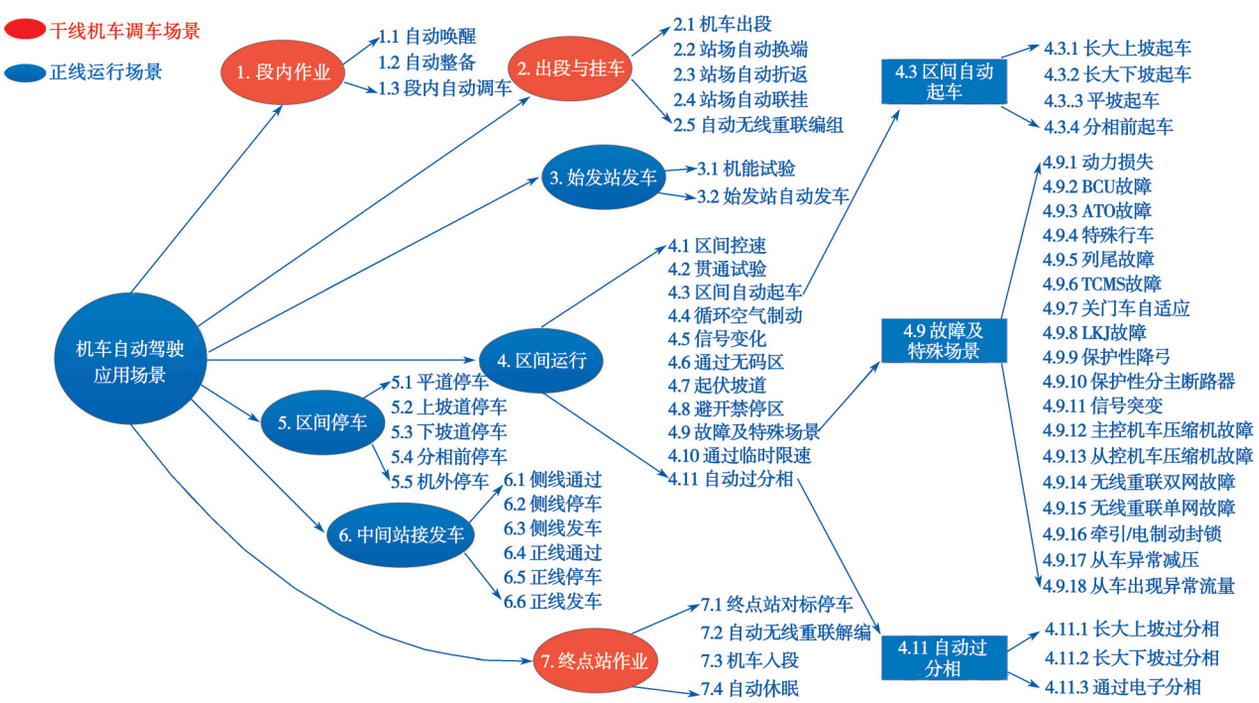


图 1　机车自动驾驶运用场景

Fig.1　Application scenarios of locomotive automatic operation

2.2 系统架构

机车自动驾驶系统运用场景包括站段自动调车与正线自动运行，其系统整体架构由车载与地面2个部分组成，车载部分由机车自动驾驶装置、智能显示单元、自动唤醒装置、健康管理系统、障碍物检测单元、车载云平台及车地无线通信单元等组成，地面部分包括调车管理系统、无线信号控制系统、定位服务器、调度中心、数据中心、智能运维系统、通信系统等。针对具体运用需求，该系统组成与功能可进行裁剪与适应性更改。机车自动驾驶系统整体架构如图2所示。

机车自动驾驶系统车载设备以机车自动驾驶装置（ATO）为核心，通过与车载既有关键控制设备（网络控制系统、空气制动系统、列车运行监控设备、无线同步操控等）、健康管理系统、障碍物检测单元，以及调度、监测、通信等地面系统进行信息交互与安全联动，并基于多目标约束条件下的最优曲线规划和智能跟随等技术实现列车自动唤醒、自动整备、自动调车和正线自动运行等全场景的自动控制。

自动唤醒装置用于自动驾驶列车的唤醒与休眠；健康管理系统监测车载关键设备状态并将对应信息实时发送给ATO；障碍物检测单元与车载雷达及摄像头连接，进行近距离、低速度场景下的障碍物检测；车载云平台将车载数据以无线方式传输至地面。调车管理系统负责获取机车服役状态、出勤计划与整备计划，同时具备远程操纵功能；无线信号控制系统获取联锁进路信息并将其发送至车载设备，用于计算调车速度防护曲线；定位服务器采用北斗差分定位，用于提升列车的定位精度；地面监测系统实时获取地面的异物入侵、边坡桥梁、气象、视频监测等信息；智能运维系统负责分析机车在运行过程中产生的各类数据，辅助人工决策；通信系统负责将地面监测数据与调度数据发送到车载自动驾驶系统。

2.3 关键技术

机车自动驾驶技术的发展目标为替代人工操纵，实现列车安全、平稳、准点、节能运行。从空间维度划分，自动驾驶关键技术包括车载侧技术和地面侧技术。在车载侧，机车自动驾驶装置作为决策控制的核心，通过信息感知、决策规划、跟随控制等关键技术完成自动驾驶的决策行为，将车载控制指令序列发送给关联系统执行并实时观测运行状态。在地面侧，为保障自动驾驶列车根据运行计划和临时调度命令信息进行动态调整，需通过地面调度系统进行车地协同；与此同时，为保障自动驾驶系统的高效安全运行，需构建1套基于列车纵向动力学的仿真技术平台，为自动驾驶运行品质的不断优化提供完备、真实的仿真与测试保障。机车自动驾驶关键技术如图3所示。

2.3.1 运行曲线规划技术

运行曲线规划是根据列车运行线路数据、信号状态、运行时分和限速要求，结合机车牵引制动特性曲线、车辆特性、列车编组等信息，计算未来一段时间的运行曲线。运行曲线规划的本质是一个带约束的多目标运动规划，目标包括安全、平稳、节能和准点[6]。考虑全局运营目标、复杂场景及动态运行因素的影响，将运行曲线规划技术划分为全局目标规划、行为决策和动态目标规划3个部分，技术框架如图4所述。

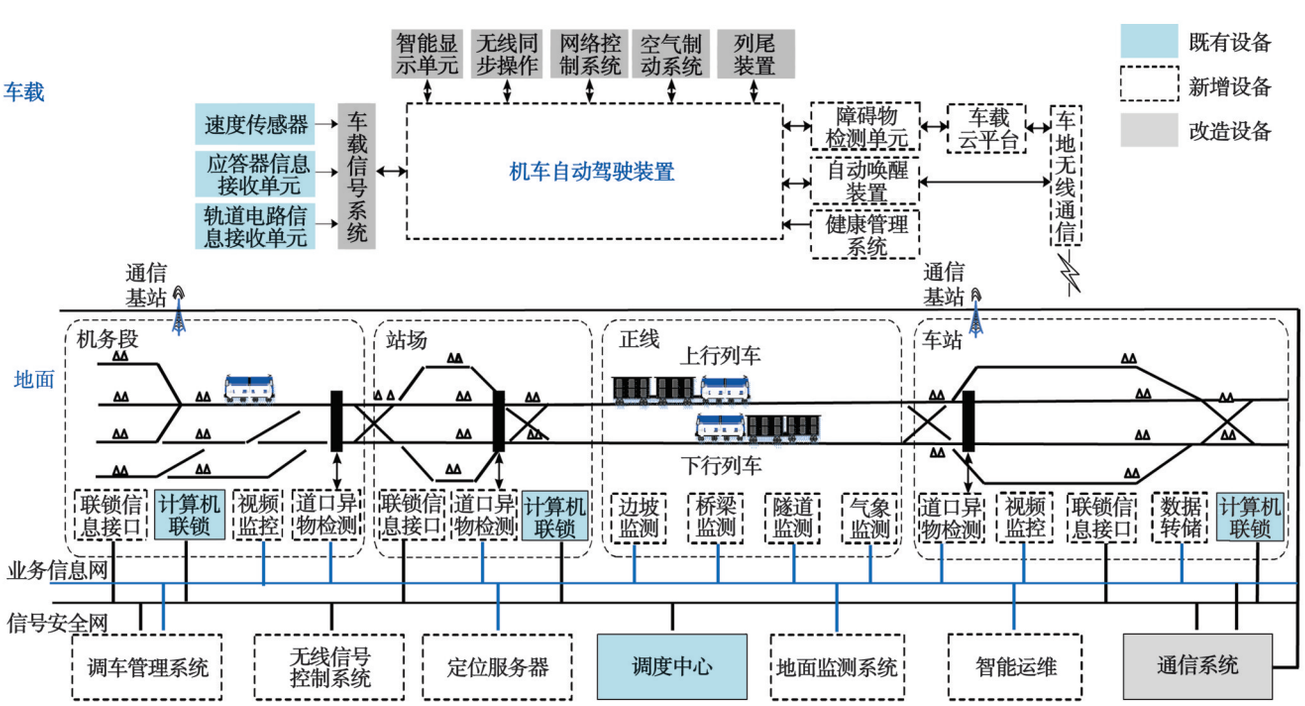


图2 机车自动驾驶系统整体架构

Fig. 2 Overall architecture of locomotive automatic operation system

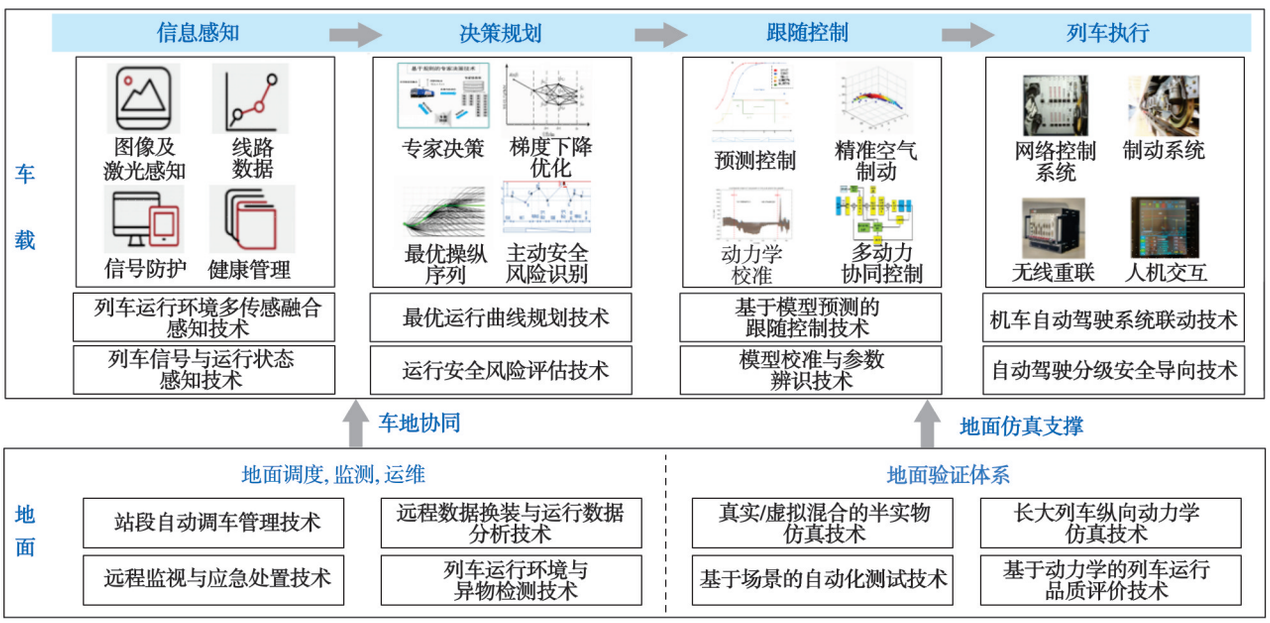


图 3　机车自动驾驶关键技术

Fig. 3　Key technologies of locomotive automatic operation

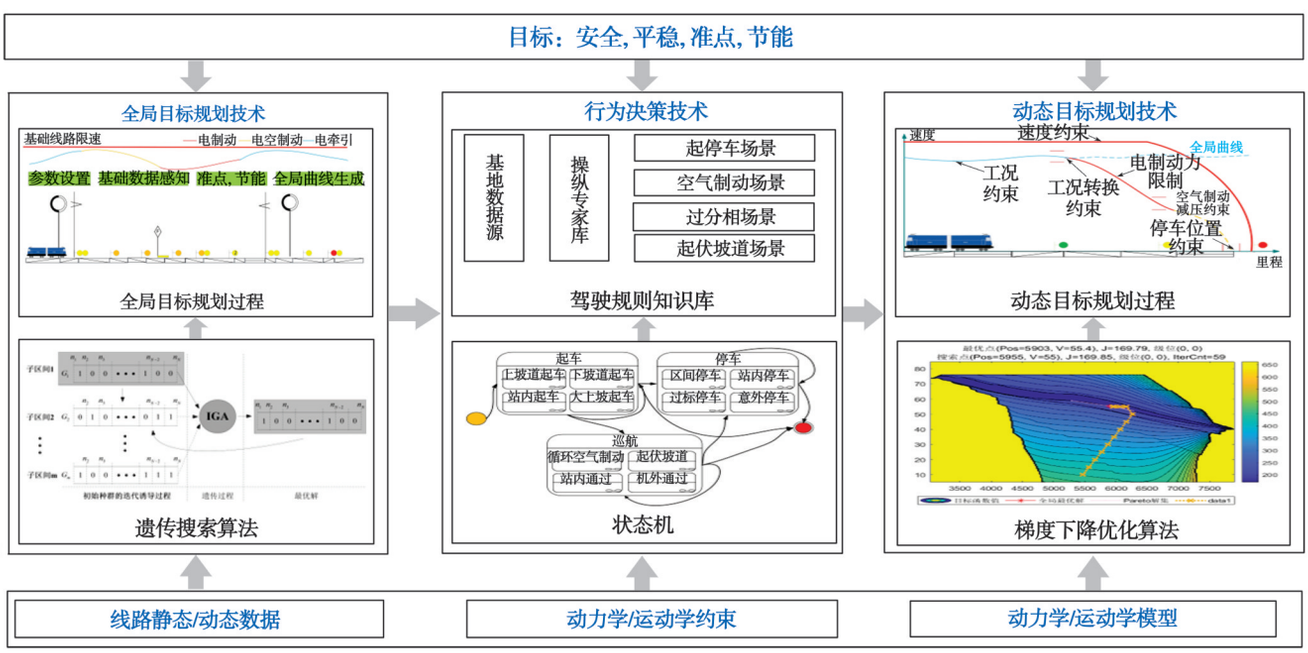


图 4　运行曲线规划技术

Fig. 4　Operation curve planning technology

2.3.1.1　全局目标规划技术

全局目标规划是运行曲线规划的第一步，主要用于实现机车自动驾驶运行过程中“节能和准点”的全局目标，其实现范围为站与站或多个站之间的运行范围，且信号机默认为全开放状态。

全局目标规划的实现方式是基于线路的静态信息，在动力学约束、运动学约束和安全约束条件下，计算满足节能、准点的规划序列。该实现过程与动态变化的数据无关，无法实现类似于停车、临时限速区域通过之类的动态功能。

全局目标规划的实现算法主要是搜索优化，如动态规划和遗传算法。此类算法一般不依赖于问题的性质，只需进行目标函数寻优，具有较好的全局搜索性能，可避免优化过程陷入局部最优解，能较好地实现机车运行的全局目标。

2.3.1.2　行为决策技术

行为决策主要是依据全局目标的规划，基于当前场景和环境感知等信息，输出列车对应的驾驶行为目标，它的功能是缩小运动规划的解集空间，提高规划动作的安全性。

行为决策功能首先根据决策数据、专家知识库确定机车驾驶状态与操纵规范的约束，然后通过有限状态机或决策树等推理决策算法得出合理的驾驶行为，最后将该驾驶行为转化为相应的速度和工况约束以用

于动态目标规划。决策数据包含车辆状态、线路数据和动态数据等不同维度和尺度的输入信息；专家知识库包含《列车牵引计算规程》《铁路机车操作规程》和优秀乘务员经验。

行为决策的典型决策场景包括起停车、过分相、循环空气制动、动能闯坡、临时限速运行、起伏坡道运行等。典型决策场景所对应的决策包含：起车模式、停车模式、电制动与电空制动的选择，空气制动施加与缓解位置的选取，提前控速的距离，道岔区电制动力限制值，空气制动的减压量，理想的充排风时间等状态和控制约束。

2.3.1.3 动态目标规划技术

动态目标规划是根据行为决策的结果来实现机车运行过程中的动态目标，即当前信号机动态变化，相应后续的信号机默认按照降码模式且同时满足限速曲线的要求进行目前的动态计算。

动态目标规划的实现方式为：①在行为决策结果中提炼出非线性状态约束、控制约束和终端约束，将速度规划问题转化为带约束的非线性最优控制问题；②设计非线性梯度下降求解优化算法，在非线性状态和控制约束下对平稳和节能目标进行梯度寻优，得到控制量序列以及速度序列。同时考虑了平稳、节能性能指标的控制模型如下：

$$\min J=\varphi_0[x(N)]+\sum_{k=0}^{N-1}L(x(k),u(k),k)$$

$$\varphi_0[x(N)]=v_{(N-1)}$$

$$L(x(k),u(k),k)=K_{\mathrm{e}}\left|\Delta u(k)\right|+K_{\mathrm{f}}u(k)s(k)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}v(0)=v_0\\ t(N)=t_{\mathrm{f}}\\ \Delta u(k)_{\min}\leqslant\Delta u(k)\leqslant\Delta u(k)_{\max}\\ g(k)_{\min}\leqslant u(k)\leqslant g(k)_{\max}\\ v(k)_{\min}\leqslant x(k)\leqslant v(k)_{\max}\end{cases}$$

式中：$\varphi_0[x(N)]$为准点状态量终端约束条件；$L(x(k),u(k),k)$为平稳和能耗性能指标；K_{e}为平稳性指标权重系数；K_{f}为节能指标权重系数；$s(k)$为相邻k和$k+1$之间的位置差；$v(0)=v_0$为起始状态约束；$t(N)=t_{\mathrm{f}}$为运行时间；$\Delta u(k)_{\min}\leqslant\Delta u(k)\leqslant\Delta u(k)_{\max}$为控制增量上、下界的约束；$g(k)_{\min}\leqslant u(k)\leqslant g(k)_{\max}$为控制量需满足的牵引/制动特性约束；$g(k)$为牵引制动特性函数；$v(k)_{\min}\leqslant x(k)\leqslant v(k)_{\max}$为列车运行状态下的速度约束。

2.3.2 跟随控制技术

自动驾驶动态运行规划完成后，机车必须按照规划精准执行。跟随控制是以规划好的运行曲线为目标，以列车动力学和运动学模型为基础，克服模型失准等影响，计算得出实际控制列车运行的牵引/制动和空气制动指令，实现自适应鲁棒速度跟踪控制。列车在行驶过程中其内部参数会随着载荷、线路状况的变化而改变，同时环境、天气、轨道湿滑程度等也会影响牵引和制动系统执行部件的能力发挥。因此，跟随控制技术应能够根据不同的场景、运行等级，给定不同的牵引/制动和空气制动指令，满足多目标运行的需求[7]。如图5所示，机车自动驾驶跟踪控制技术主要包含控制器设计和模型参数辨识2个层面。

控制器主要包括2类控制算法，第1类是无模型传统控制算法，第2类是基于模型的先进控制算法。无模型传统控制算法是在运动学和动力学约束条件下设计专家PID控制器，解决典型场景的跟随控制问题。但列车运行环境复杂，面临动态过程非线性强、随机扰动多的问题，同时过程模型时刻改变所带来的模型失配问题会降低控制算法的精度。基于模型的先进控制算法首先基于列车运动学状态空间方程构建出预测模型；其次考虑列车运行舒适性要求和空气制动操纵约束，增加包括加速度、冲击率、力的给定斜率等状态量在内的约束规则集，设计带约束的多目标代价函数；最后设计优化计算策略，比如QP求解器，实现代价函数寻优求解计算。基于模型的先进控制算法能够实现

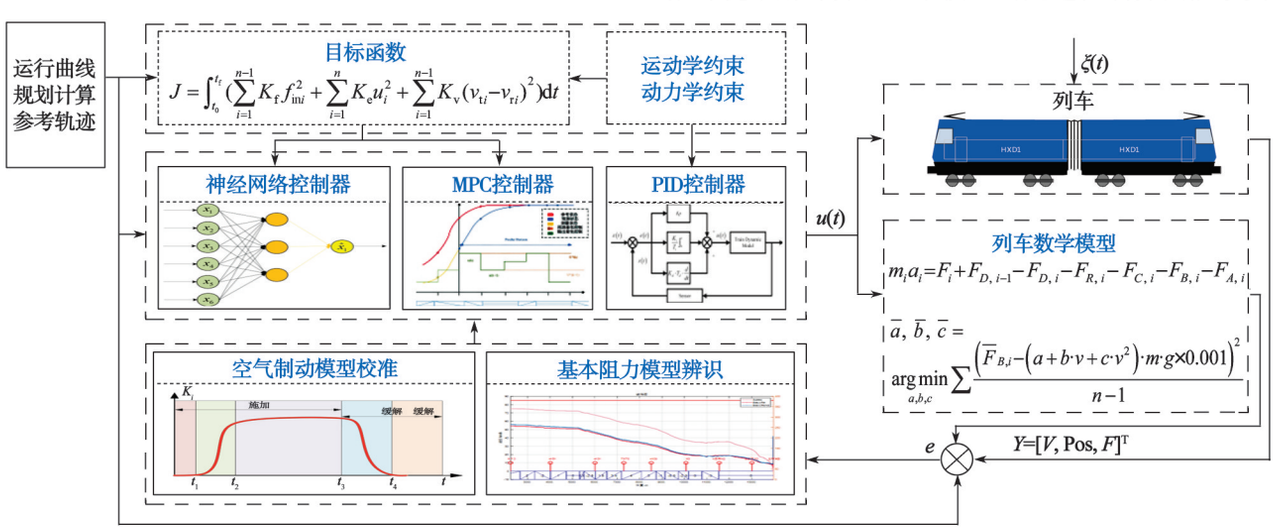


图5 跟踪控制技术

Fig. 5 Tracking control technology

更高精度的速度跟踪控制，但对计算能力的需求过大，且对模型比较敏感，鲁棒性较低，不一定适用于所有控制场景。

模型参数辨识主要包含随机性扰动补偿、空气制动模型校准和基本阻力模型参数辨识。随机性扰动补偿是采用基于学习规则而设计的神经网络算法，从实际数据中分析扰动特性，补偿模型中的随机性误差且消除模型失配带来的预测偏差。空气制动模型校准和基本阻力模型参数辨识是通过估计出列车模型误差，并将其分离为随机误差项和常值误差项，分别校准运行轨迹规划及跟踪控制的列车模型参数，并进行迭代优化以保证列车在全线路不同场景中的安全运行。

2.3.3　列车纵向动力学

通过列车纵向动力学仿真分析影响列车纵向运动过程中动力学性能的相关因素，包括车钩缓冲器装置、操纵策略、线路条件、编组模式、车辆空气制动系统和运行工况等。通过该技术可实现列车运行安全性能指标的定量分析，多种操纵策略、装备方案的比选和风险预测，促使列车操纵更科学化、规范化，从而提高列车运行的平稳性、安全性[8]。

如图6所示，纵向动力学模型中每个机车车辆都具备独立的自由度，首先通过对空气制动系统、机车牵引系统、环境阻力和钩缓系统分别建模得到各自由度的空气制动力、实际牵引电制动力、环境阻力、车钩力与车钩位移关系，同时对机车指令信号传递的时间特性进行模拟；然后将空气制动力、阻力、牵引电制动力等集成到列车纵向动力学方程组中，使用New-mark和Runge-Kutta等数值求解算法同时迭代求解各个自由度的速度、加速度和车钩力等；最后根据制动试验数据和实测车钩力数据校准关键模型，实现适用于多工况的多编组列车纵向动力学仿真，为列车操纵优化提供支撑。空气制动系统与车钩缓冲器系统的仿真建模是列车纵向动力学技术研究的重点与难点。

空气制动系统模型包括物理模型[9]和依赖试验数据的经验模型[10]。物理模型具有精度高、模型适应范围广、可扩展性强等特点，通过建立机车制动、车辆制动、列尾装置工作时的气体运动模型，可得到列车制动系统各个位置任意时刻的气体流场变量（密度、温度、压力等）；经验模型则可快速仿真列车空气制动力，通过利用重载列车空气制动试验台采集的数据（不同类型车辆的制动数据），对列车制动和缓解过程中的制动波速、制动缸压力变化曲线进行非线性动态拟合，模拟不同充排风场景下机车车辆空气制动力的变化情况。

在物理模型中，空气制动系统被分解为管路和边界条件。管路包括列车制动主管和支管，边界条件包括分配阀、缸室和列尾装置等。建模时首先针对管路建立基于质量、动量和能量守恒的偏微分方程组，再利用特征线法或有限差分法将方程组进行离散变换，然后联立边界方程进行联合求解，在时间维度上迭代计算得到任意车辆位置在任意时刻的制动缸压力，最后对基础制动装置和闸瓦建模得到空气制动力。

缓冲器是耗散机车车辆冲击力的关键部件，缓冲器类型包括[11]摩擦斜楔型缓冲器和胶泥型缓冲器。构

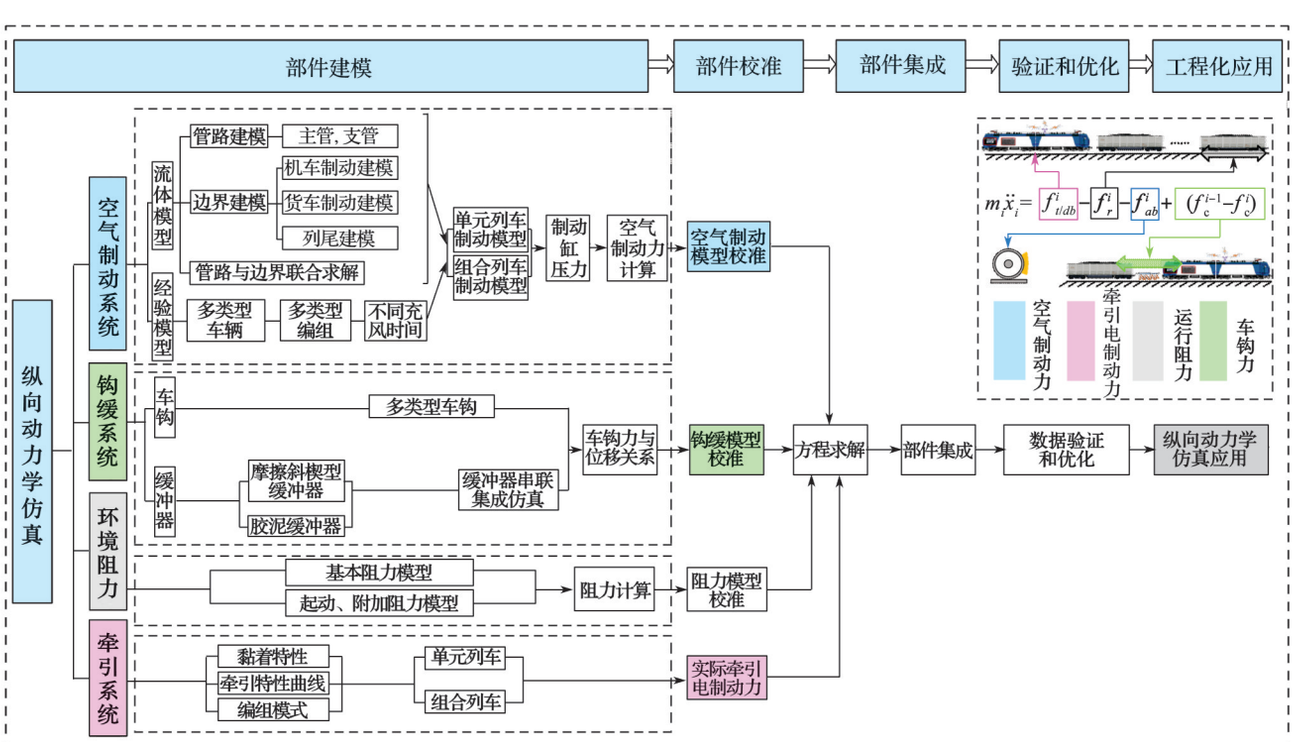


图6　列车纵向动力学仿真技术框架图

Fig. 6　Technical framework of train simulation in longitudinal dynamics

建高精度物理模型，首先需对不同类型缓冲器的材料特性、机械结构和部件间的相对运动进行分析，并通过数学模型描述得到各个类型缓冲器的阻抗力–位移特性曲线，再根据机车车辆实际编组情况进行缓冲器串联仿真处理，最后得到机车车辆间的相互作用力。为提高列车纵向动力学仿真计算速度，可预存钩缓受力特性曲线，通过查表法快速计算车钩力。

2.3.4　多传感器融合感知技术

精确感知列车运行环境中的行驶区域，行人、列车及障碍物的位置与速度，以及信号灯与标识牌之类的线路信息，可为机车自动驾驶的决策提供必要信息和参考依据。以在包神铁路装车的障碍物检测系统为例，典型的列车融合感知应用所需的传感器配置及其系统功能架构如图7所示。

基于相机摄像并通过机器视觉算法可获取视野内物体的颜色、纹理和形状等信息，近年来深度学习大大提升了机器视觉算法的准确性。自动驾驶中的视觉算法主要涉及图像分类、目标检测、语义分割、实例分割、全景分割等。其中图像分类是最常见的基础任务，可利用模型判断图像的所属类别属性，如标志牌信息、信号灯颜色、列车车型等。目标检测用于定位常见目标在图像中的位置，并根据物体的类别信息进行分类，如对行人、标志牌、信号灯、机车等的检测。语义分割是对图片中每个像素的分类，但不区分同一类别中的不同对象，例如可实现铁轨和轨道内区域的有效检测，判断列车当前可行驶的轨道区域。实例分割是目标检测与语义分割的结合，不仅可精确分割到物体的边缘，而且可标注并识别出图像中同一类别的不同个体，但模型推理速度比较慢。全景分割是语义分割与实例分割的结合，相比语义分割它能区分单独的对象实例，相比实例分割其对象分割必须是不重叠的。机车自动驾驶视觉检测的效果如图8所示。

虽然通过相机感知可以提供丰富的目标和状态信息，但由于相机是一种被动式传感器，感知深度不足，因此测距精度低且易受环境影响，特别是在强光、低照度、雨雪雾等恶劣环境下仅靠相机完成感知任务其难度会大幅提升。

雷达传感器能检测目标的三维信息，目前毫米波雷达和激光雷达较为常用。毫米波雷达受天气影响小且抗干扰能力强，对烟雾、灰尘有很好的穿透性，能实现全天时、全天候工作，是汽车和航空领域障碍物探测（测距、测速、测方位）的首选雷达。但在轨道交通领域，毫米波雷达的使用面临杂波干扰大、探测距离不足，雷达峰值功率、发射和接收天线增益不足，方位分辨率差等问题，现有成熟产品难以推广应用。

激光雷达具有距离分辨率高、抗有源干扰能力强、探测性能好、可全天时运行的特点。相比毫米波雷达，激光雷达能够从数据中提取距离、姿态等更为细致的目标信息和更为丰富的路况信息，探测范围更广，探测精度更高，是轨道交通中近距离障碍物探测的首选雷达。但同时激光雷达在进行运行环境感知时需提供障碍物（包括当前轨道机车）的准确位置，且存在诸如点云数据量大、轨道场景地面不平、轨道反射点云稀疏等技术难点。因此激光雷达点云障碍物检测算法必须通过合理的位置标定、点云提取与降采样、聚类、平面拟合和多帧融合等技术实现障碍物的检测与跟踪，并最终结合轨道曲线判断并输出障碍物位置、类型及是否侵入限界等关键信息。自动驾驶雷达检测的效果如图9所示。

由于各类单一传感器均具备明显的劣势，因而将多种传感器信息融合是进一步提高感知可靠性和准确

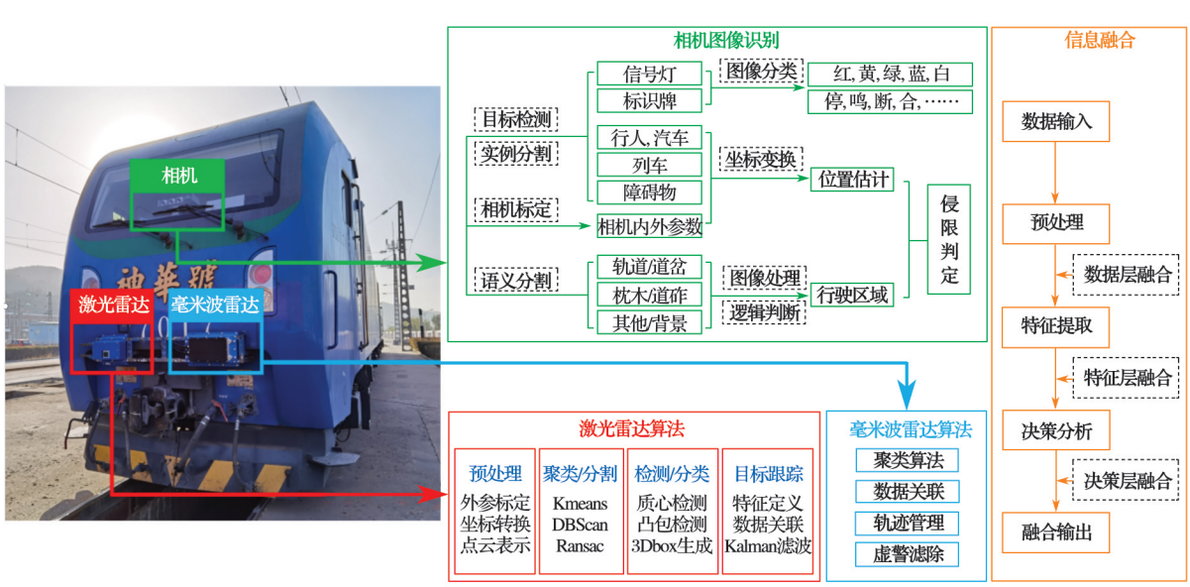
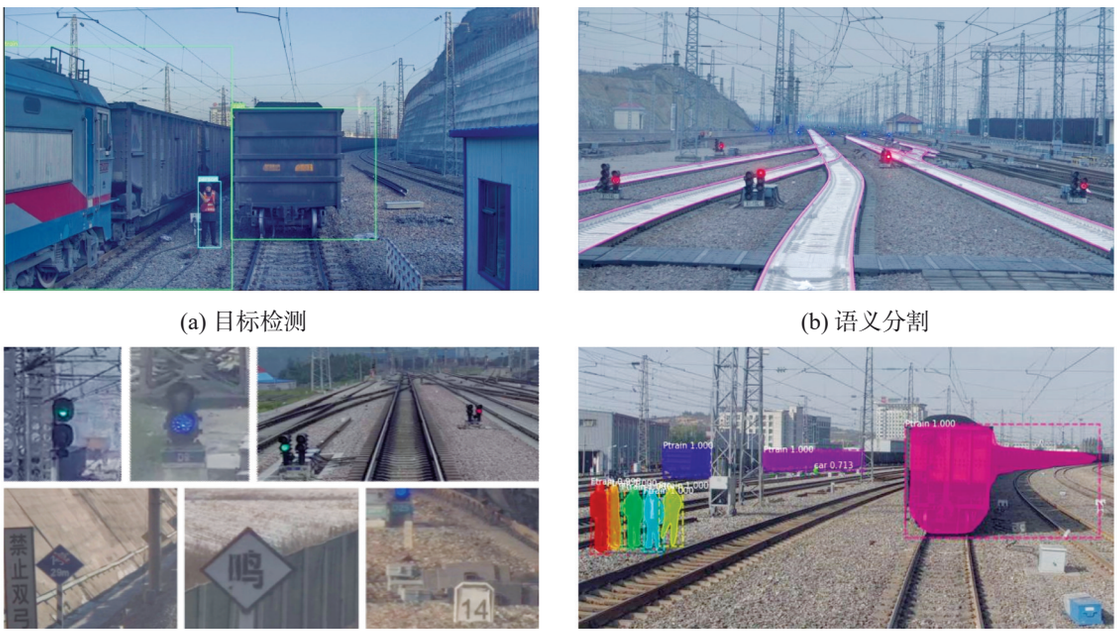


图7　自动驾驶障碍物检测系统功能架构图

Fig. 7　Functional architecture of obstacle detection system for automatic operation

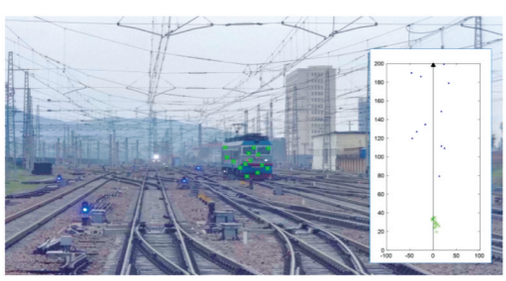


(a) 目标检测　　(b) 语义分割

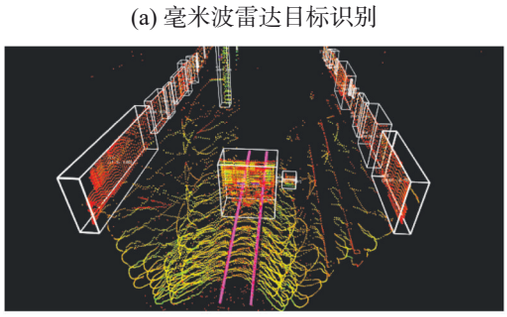
(c) 图像分类　　(d) 实例分割

图 8　自动驾驶视觉检测效果图

Fig. 8　Visual inspection effect of automatic operation



(a) 毫米波雷达目标识别



(b) 激光雷达目标识别

图 9　自动驾驶雷达检测效果图

Fig. 9　Radar detection effect of automatic operation

性的必要途径。按照信息处理方式，多传感器融合可以划分为数据层融合、特征层融合和决策层融合，目前主流方式为数据层融合和特征层融合。

数据层融合也称像素级融合，即先将各传感器的数据融合，再从融合的数据中提取特征向量并进行判断识别。数据层融合不存在数据丢失的问题，得到的结果也是最准确的，但计算量大，且对系统通信带宽的要求很高。

特征层融合是中间层次融合，即先从每种传感器提供的观测数据中提取有代表性的特征，再将这些特征融合成单一的特征向量后运用模式识别方法进行处理。这种方法的计算量及对通信带宽的要求相对降低，但因对部分数据的舍弃而降低了其准确性。

决策层融合是指在每个传感器对目标做出识别后，再将各传感器的识别结果进行融合，属于高层次的融合。由于对传感器的信息进行了压缩，这种方法产生的结果准确率偏低，但其计算量及对通信带宽的要求最低，是目前自动驾驶领域应用最广的方案。

2.3.5　系统仿真技术

重载列车现场试验存在成本高、效率低、周期长等问题，因此需建立一套真实/虚拟相结合的自动驾驶地面仿真系统，方便线路试验前针对自动驾驶控制策略、运行效果、动力学性能等的测试、验证及完善。同时，为支撑自动驾驶系统批量应用，需构建融合列车动力学和《铁路机车操作规程》等的重载列车操纵评价系统，以实现对机车自动驾驶系统运行风险的识别和对常态化运行情况、性能指标的全面评价。

系统仿真平台需对列车在不同线路和信号条件下的运行进行仿真，因此需要包含机车、车辆、线路、信号系统、无线同步操控系统、列尾装置等。考虑到仿真的可用性与有效性，仿真平台采用真实实物与虚拟软件相结合的方式实现对长大列车的仿真。真实实物方面采用与实车一致的网络控制、车载信号、无线同步操控、自动驾驶、人机交互等系统，虚拟软件方面采用机车、列车和动力学仿真软件来模拟列车运行状态。系统仿真平台如图 10 所示。

仿真软件包含机车仿真和列车运行仿真 2 个部分。在机车仿真方面，主要针对牵引系统、制动系统、辅助系统、高压设备、低压设备等机车关键系统进行建模，根据人工驾驶或自动驾驶的控制指令，实现对牵

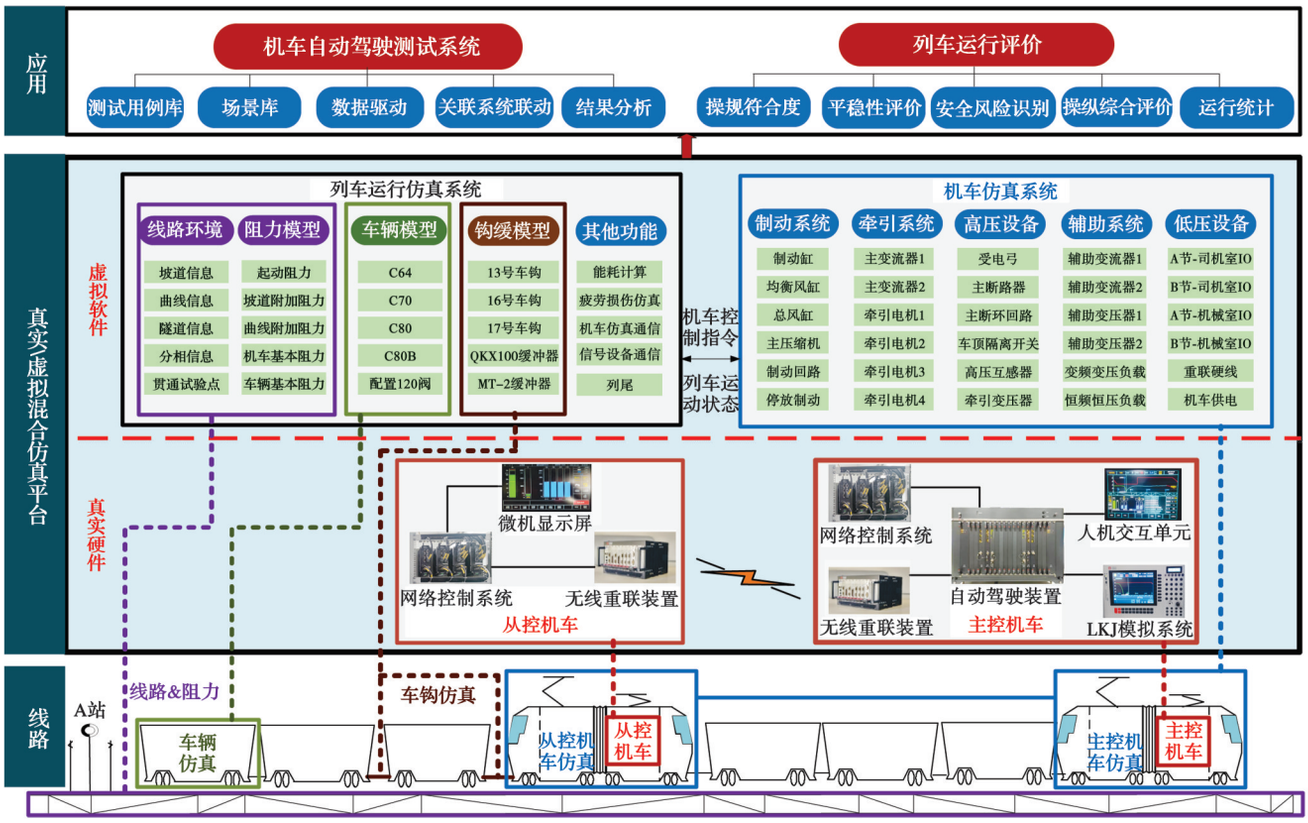


图 10　列车自动驾驶系统仿真平台

Fig. 10　Simulation platform of automatic operation system

引力、制动力、主司控器手柄、制动系统大小闸手柄等机车关键设备仿真；在列车运行仿真方面，主要针对列车运行环境、阻力、车辆、钩缓等建模，实现对列车速度、运行阻力、列车管压力、车辆制动力、加速度、车钩力等列车运行状态关键参数的仿真计算，从而提供完备、准确的列车运行仿真环境，满足列车自动驾驶的测试和验证要求。

该仿真平台可支持不同机车类型、不同编组类型、不同线路等条件下的列车自动驾驶仿真，可模拟列车在站段和正线所遇到的场景，也可模拟故障场景，验证自动驾驶系统的安全导向功能，为自动驾驶系统软件迭代升级及验证提供可靠环境。

3　系统应用情况

3.1　典型应用

本文所述的机车自动驾驶技术及其相关产品已经在国内 9 种车型的机车上装车，可适配不同厂家的网络控制系统、空气制动系统、无线同步操控系统、信号系统，具备良好的兼容性及可扩展性。目前，该系统配属西安局、太原局、包神铁路、朔黄铁路等多个铁路局/铁路公司，典型应用情况见表 2。

3.2　运用效果

机车自动驾驶系统已经在西安局西康线与包神铁路神朔线常态化运行，累计运用里程超过 150 万 km，表 3 为机车自动驾驶系统在某条线路的应用效果统计。

由表 3 可知，经现场运用统计，除车机联控场景外，机车自动驾驶系统在运行期间能够完全替代司机对牵引、制动手柄、尾部风压查询的操纵，整体自动化操控率达到 98% 以上；通过对列车运行能耗及运行速度数据的统计，机车自动驾驶相比人工驾驶其上行重载节能 1.2%，下行轻载节能 4.6%，平均节能 2.9%；上行重载提速 2.0 km/h，下行轻载提速 3.4 km/h，平均

表 2　机车自动驾驶典型应用情况

Table 2　Typical application of locomotive automatic operation

配属单位	详细配置信息								
	车型	信号系统	网络控制系统	空气制动系统	无线同步操控系统供应商	载重	负载类型	运行里程/(10^4 km)	场景
西安局	国产化 $HX_{D}1$	LKJ2000	DTECS	DK-2	–	4 500 t	货运	100	正线
	$HX_{D}2$	LKJ2000	MPU	JZ-8	–	4 500 t	货运	2	正线
包神铁路	神华八轴	LKJ15C	DTECS	DK-2	时代电气	1 万 t	货运	55	正线/站段
朔黄铁路	神华八轴	LKJ15C/ATP	DTECS	DK-2	时代电气	2.1 万 t	货运	0.6	正线
太原局	$HX_{D}1$	LKJ15C	SIBAS32	CCBII	GE	2.1 万 t	货运	1.5	正线

表 3　自动驾驶应用效果

Table 3　Application effect of automatic operation

项目	载重	类别	数据统计	效果
单位能耗	上行重载	人工驾驶	150.999 7 kW·h/(10^4 t·km)	节能 1.2%
		自动驾驶	149.237 6 kW·h/(10^4 t·km)	
	下行轻载	人工驾驶	117.433 6 kW·h/(10^4 t·km)	节能 4.6%
		自动驾驶	111.997 0 kW·h/(10^4 t·km)	
技术速度	上行重载	人工驾驶	均速 55.9 km/h	提速 2.0 km/h
		自动驾驶	均速 57.9 km/h	
	下行轻载	人工驾驶	均速 62.0 km/h	提速 3.4 km/h
		自动驾驶	均速 65.4 km/h	
操控率	上行重载	自动驾驶	平均接管 0.5 次/趟	自动操控率 98% 以上
	下行轻载	自动驾驶	平均接管 0.4 次/趟	

提速 2.7 km/h。

自动驾驶系统的障碍物检测效果如表 4 所示。

表 4　障碍物检测效果

Table 4　Obstacle detection effect

类型	范围或大小	检测召回率	检测准确率
行人	200 m 以内	95.15%	94.81%
火车	400 m 以内	97.39%	95.84%
汽车	目标框大于 900 像素	94.15%	91.19%
信号灯	目标框大于 900 像素	98.29%	97.62%
标识牌	目标框大于 900 像素	94.89%	95.23%
障碍物	30 cm×30 cm×30 cm	98.21%	97.05%
平均值		96.35%	95.29%

由表 4 可知，经现场运用统计，在机车站段调车作业过程中，障碍物检测系统可以辅助司机对行人、信号灯、障碍物、标志牌等进行识别和检测，其中目标检测平均准确率约为 95.29%，平均召回率约为 96.35%，系统无故障运行累计超过 20 万 km。

4　结语

本文通过分析机车自动驾驶的技术现状与难点，根据国内机车运用的典型场景提出了机车自动驾驶系统方案，并对系统的关键技术进行了详细介绍。目前，机车自动驾驶系统已完成产品装车、线路试验、运用考核和批量运用；实现了从普载到重载，从单元到组合，从正线到站段的覆盖。同时，该系统大大降低了司机劳动强度，提升了列车运行效率，为未来智能化运输路网下的列车运行控制奠定了基础。

后续机车自动驾驶技术将主要从以下几个方向进一步研究：①持续优化自动驾驶列车的运行品质，使列车运行得更加平稳、更加节能；②研究先进的感知技术，提升障碍物检测距离和检测精度，同时融合更多的地面监测信息，提高列车在非正常场景的应急处置能力；③开展基于虚拟编组的列车群组控制，以满足特定场景的运输组织要求；④机车自动驾驶要从有人值守的自动驾驶（GOA2）发展到无人驾驶（GOA3/4），机车车辆技术装备、地面配套均需优化升级，同时列车与地面信号、调度等系统之间需要深度协同。

参考文献：

[1] 丁荣军, 杨卫峰, 唐军. 轨道交通装备智能化技术的研究及应用[J]. 机车电传动, 2012(5): 1-4.
Ding Rongjun, Yang Weifeng, TANG Jun. Research and application of intelligentizing technology for rail traffic equipment[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(5): 1-4.

[2] 路向阳, 李雷, 雷成健, 等. 城市轨道交通全自动驾驶技术发展综述[J]. 机车电传动, 2018(1): 6-12.
LU Xiangyang, LI Lei, LEI Chengjian, et al. A review of the development of urban railway transport full automatic operation technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(1): 6-12.

[3] SCHRÖDER J, ALPOIM C G, DICKGIEßER B, et al. Digitale S-Bahn Hamburg – Erstmalige Realisierung von "ATO over ETCS" in Deutschland[J]. Signal+Draht, 2021, 7/8(113): 52-59.

[4] 张波. 重载组合列车牵引及制动系统的试验与仿真研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.
ZHANG Bo. Test and simulation study on traction and brake system of combined heavy haul train[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009.

[5] 刘华伟, 刘勇, 江帆, 等. 机车段内作业智能化系统研究与实现[J]. 机车电传动, 2021(6): 100-105.
LIU Huawei, LIU Yong, JIANG Fan, et al. Research and design of intelligent system for operation in locomotive depot [J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(6): 100-105.

[6] 钟谱华, 张征方, 熊佳远. 一种重载列车自动驾驶操纵曲线规划方法[J]. 控制与信息技术, 2021(6): 35-42.
ZHONG Puhua, ZHANG Zhengfang, XIONG Jiayuan. A planning method of automatic driving control curve for

heavy haul train[J]. Control and Information Technology, 2021(6): 35-42.

[7] 李程, 张征方, 沈子扬. 基于预测控制的货运机车自动驾驶技术研究[J]. 控制与信息技术, 2020(6): 8-13.
LI Cheng, ZHANG Zhengfang, SHEN Ziyang. Research on freight locomotive automatic driving based on predictive control[J]. Control and Information Technology, 2020(6): 8-13.

[8] 耿志修. 大秦铁路重载运输技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
GENG Zhixiu. The heavy-haul technologies for Datong-Qinhuangdao Railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.

[9] WEI Wei, HU Yang, WU Qing, et al. An air brake model for longitudinal train dynamics studies[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(4): 517-533.

[10] 孙树磊, 丁军君, 周张义, 等. 重载列车纵向冲动动力学分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 138-146.
SUN Shulei, DING Junjun, ZHOU Zhangyi, et al. Analysis and test of heavy haul train longitudinal impulse dynamics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 138-146.

[11] WU Qing, SPIRYAGIN M, COLE C. Advanced dynamic modelling for friction draft gears[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(4): 475-492.

收稿日期：2022-11-09
修回日期：2022-12-20