

基于强化学习的机场地面服务车辆调度冲突消解策略

刘 佳

(西安思源学院,陕西省西安市,710038)

摘要 机场身为航空网络的重要节点,其地面服务包含行李转运、客梯车接驳、加油、清洁等多个环节,涉及数十种不同类型的服务车辆,这些车辆在有限的停机坪、滑行道以及廊桥区域内进行高频次作业,很容易引发调度冲突,强化学习把调度过程构建成智能体与环境的交互过程,借助定义状态空间、动作空间以及奖励函数,让智能体在持续探索中学习最优决策策略。本文针对机场地面服务车辆调度中的冲突问题,分析冲突产生的机理,探索基于强化学习的冲突消解策略,为智慧机场建设提供技术支持。

关键词 强化学习;机场;地面服务车辆;调度;冲突;消解

中图分类号:V351.3 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)04-0070-03

随着智慧机场建设的进程不断加快,地面服务系统朝着智能化方向升级,已然成为提高机场核心竞争力的关键举措,机场地面服务场景是“动态复杂系统”的典型范例,一个大型民用机场每日有数百架次航班起降,这使得近千辆服务车辆要在万平方米规模的作业区域内实现精准协同,从航班落地后引导车的引领,到离港前餐食配送车的补给,每个环节的时间稍有偏差,就可能引发一系列反应。强化学习的出现,为解决这一难题提供了新的模式,它的核心优势是能依靠与环境持续互动,自主学习冲突消解的最佳策略。

1 机场地面服务车辆调度常见冲突类型

1.1 路径空间冲突

这是最直观且出现频率较高的冲突类型,其大多发生于停机坪、廊桥通道以及滑行道的衔接区域,不同类型的服务车辆,比如行李车和加油车等,在执行任务期间,大多时候会因为预设路径出现交叉、转弯半径不够或者避让空间受到限制等情况,形成“对峙”局面。例如当一架宽体客机停靠在远机位时,行李拖车需要从机腹行李舱往返货运区,而客梯车则要停靠在机身侧门处,要是两者的路径规划没有考虑到实时位置,那么在飞机后方狭窄通

道就很容易形成堵塞。这种冲突会延误单环节作业,还可能致使后续车辆出现连锁积压的状况。

1.2 时间窗重叠冲突

地面服务的各个环节之间存在着严格的时间依赖关系,举例来说,每当一个航班降落之后,客梯车要在30min内完成撤离,不然就会对后续航班的滑行造成影响,要是多辆服务车的任务时间窗出现重叠的情况,那么冲突就会随之产生,典型的场景有:清洁车没有按时完成机舱清理工作,结果导致客梯车没办法按照计划接驳旅客,加油车由于前序任务出现延误,和行李车在同一时间争夺靠近机翼的作业位置。这种冲突有传导性,单辆车出现时间偏差,就可能致使整个地面服务链条滞后^[1]。

1.3 资源抢占冲突

机场地面存在着数量有限的固定资源,像廊桥接口、加油桩以及特定型号的电源车等,当多辆服务车同时对同一资源有需求时,就会出现争夺的情况。例如同一个停机位的两架相邻航班同时提出需要使用高杆灯车,或者多辆行李车争抢那唯一可用的行李传送带接口,这类冲突最关键的是资源分配的优先级不够清晰明确,传统调度所采用的“先到先得”规则大多时候致使资源利用效率不高。经过测算可以发现,资源抢占冲突会让单航班地面服务的时长较大延长。

2 强化学习在机场地面服务车辆调度冲突消解中的作用

2.1 动态适应复杂场景

作者简介:刘佳(1991~),女,陕西西安人,本科,助教,研究方向:交通运输。

机场地面环境始终处于不断的动态变化进程之中,如航班延误、车辆突然出现故障以及天气发生突变等状况频繁发生,强化学习借助智能体与环境之间的实时交互,可迅速捕捉到这些动态信息,例如当有行李车突然发生故障时,强化学习模型可以马上感知到它的位置以及任务状态,在极短的时间内,也就是毫秒级别的时间里重新规划周边可行行李车的行驶路径以及任务顺序,避免由于故障车辆停滞不前而引发的路径堵塞情况。这种动态适应能力使得调度系统不再仅仅依靠固定的规则,而是如同有丰富经验的调度员那般灵活地应对各种各样的突发状况,提升了冲突消解的及时性。

2.2 实现全局优化决策

机场地勤保障服务是指航班在机场过站期间为保障后续的飞行任务能够正常进行而提供的加油、加水、配餐、清洁、装卸行李、货邮等一系列地面服务,可由不同类型的地勤保障车辆提供。传统的调度方法往往会被限制在局部最优的范围内,虽然有可能解决当下所面临的冲突,然而却可能会引发新的问题出现,强化学习借助累积奖励机制,指引智能体从全局的角度去思考决策所产生的影响,当处理停机坪多车路径冲突的情况时,它并非仅仅关注某两辆车之间的避让问题,而是会全面地考量所有与之相关车辆的任务进度,以及航班时间的要求等诸多因素,规划出可使整体效率达到最高的路径调整方案^[2]。

2.3 平衡多目标调度需求

机场地面服务调度要同时考虑效率、安全、成本等多个方面的目标,强化学习可借助设计多维度的奖励函数来达成这些目标之间的平衡,例如说,在奖励函数里设定航班准点率的权重比成本控制的权重更高,当出现冲突情况时,模型会优先挑选可保障航班准点的消解方案,像是让非关键任务的车辆给赶时间的加油车让路,还会依靠优化路径来减少车辆空驶的情况,降低运营成本,在安全方面会严格限制车辆之间的间距,以此保证作业安全。

3 强化学习赋能机场地面服务车辆调度冲突消解建议

3.1 构建适配场景的强化学习模型架构

机场地面服务场景有特殊性,这就要求强化学习模型突破传统框架的限制,要从状态空间、动作

空间以及奖励函数这三个核心维度展开定制化设计,在构建状态空间时,需要融合多源实时数据,像车辆GPS定位、航班动态信息,包括预计到港和离港时间、作业区域电子围栏数据以及气象条件等,运用分层编码方式把离散信息,例如车辆类型,和连续信息,像行驶速度,整合成为高维状态向量,以此保证智能体可全面感知环境的动态变化。动作空间的设计要兼顾可行性与精细化^[3]。例如对于路径调整动作,可以把“转向角度”“速度调整幅度”等连续动作离散化为有限的选项,同时引入“任务优先级重排”“临时停车等待”等策略性动作,契合复杂冲突场景的需求,奖励函数的设计是模型有效性的关键所在,应当采用多目标加权机制:基础奖励项包含冲突消解成功率和任务完成时效,惩罚项则覆盖安全违规,例如车辆间距不足、资源浪费。目标函数是确定合理的车辆调度方案,使得服务车辆的总行驶路程最短、所用的车辆数最少、每辆运输车之间的任务量差异最小。

3.2 建立动态数据驱动模型训练体系

强化学习的性能依靠高质量数据的支持,要构建一种闭环数据体系,这种体系包含实时采集、离线训练以及在线迭代这几个环节,要搭建起能覆盖整个作业区域的物联网感知网络,借助车载传感器、毫米波雷达、高清摄像头等设备,每秒采集车辆位置、速度、作业状态等超过300维度的数据,经过边缘计算节点预处理之后,筛选出和冲突有关的关键特征,例如两车距离小于安全阈值的持续时长。建立历史冲突案例库,依据冲突类型,像路径交叉、资源抢占,以及场景特征,如高峰时段或者平峰时段进行分类标注,形成一个包含超过10万个样本的训练数据集,采用生成对抗网络扩充那些罕见的冲突样本,以此解决数据分布不均衡的问题,训练过程要采用离线预训练加上在线微调的模式:利用历史数据在仿真环境里进行离线训练,借助数字孪生技术还原停机坪物理场景,模拟暴雨、车辆故障等极端状况,加快模型对复杂冲突的学习,在线阶段把模型部署到实际调度系统中,每处理100起实时冲突之后触发一次参数微调,凭借时序差分算法更新价值函数,保证模型可适应真实环境的变化。

3.3 设计多智能体协同决策机制

机场地面服务车辆的群体作业特性对强化学

习模型的协同能力提出了要求,要构建“集中训练-分散执行”的多智能体框架,在集中训练阶段,设置全局协调器来收集所有车辆智能体的局部观测数据,生成全局最优策略后分发给各智能体,借助联邦学习技术实现数据隐私保护,即各车辆只上传模型参数梯度,不会泄露原始位置信息。分散执行的时候,每个车辆智能体依据本地观测和全局策略自主做出决策,同时依靠车车通信模块实时共享“意图信息”,例如计划行驶路径,以此避免因信息不对称引发新的冲突,针对多智能体间的目标冲突,引入“联盟博弈”机制,当多辆车争夺同一资源时,借助计算各车辆任务的紧急程度,航班起飞倒计时,以及替代方案成本,例如更换作业位置的时间损耗,生成纳什均衡解,保证资源分配的公平性与效率性。

3.4 推进“仿真-试点-推广”的阶梯式落地路径

强化学习模型在实际应用时要规避技术风险,推广逻辑是“从虚拟到现实、从局部到全局”,首先搭建全要素数字孪生平台,依据机场CAD图纸和物联网数据构建能1:1还原的虚拟作业场景,模拟不同冲突强度下模型的表现,依靠压力测试验证其在峰值时段像每小时发生的冲突事件时的稳定性,重点监测决策延迟控制在500ms以内以及安全合规性。接着选择典型场景试点,例如在远机位行李车调度中部署模型,和传统调度系统并行运行,依靠A/B测试对比冲突发生率、作业耗时等指标,每周召开运营团队与算法团队的协同评审会,优化模型在实际场景中的适配性,例如针对行李车转弯半径过大造成的路径规划偏差,增加车身物理参数约束。在此过程中要建立人机协同机制,保留调度员的人工干预权限,当模型决策和人工判断出现偏差时,触发“策略复盘”流程,把人工修正案例纳入训练数据,逐步提升模型自主性^[4]。

3.5 构建跨学科技术支撑与人才保障体系

强化学习在机场调度中的深入运用要突破技

术障碍和人才限制,建立“技术-人才-标准”三位一体的支持体系,在技术方面,和高校以及科研机构合作攻克核心算法,着重突破多智能体信用分配、动态环境下的策略迁移等难题,研发轻量化推理引擎,以此提升模型在边缘设备上的运行效率。制定数据安全与接口标准,明确车辆数据的采集范围、加密方式以及共享权限,保证和机场现有的调度系统实现无缝对接。在人才培养上,组建“算法工程师+机场运营专家”的复合型团队,给算法人员进行机场业务培训,让他们掌握地面服务的流程规范以及冲突成因,对调度员开展AI基础培训,提高他们对模型决策的理解和干预能力。借助校企合作设立联合实验室,开展“强化学习+机场调度”的专项研究,培养既懂技术又懂业务的专业人才,另外要建立模型效果评估标准,从冲突消解率、平均处理时间、安全合规性等6个维度制定量化指标,定期进行第三方评估,推动技术应用的标准化和规范化。

4 结语

综上所述,随着机场业务量的持续攀升以及服务流程的不断演变,新颖的冲突类型持续涌现,强化学习模型有依靠持续学习来持续提升自身性能的能力,该模型可借助历史冲突数据展开离线训练,又可用于日常运营过程中进行在线学习,获取新的冲突模式,对冲突消解策略进行调整,以此适应新车型所带来的调度变化,保证系统始终维持高效的冲突消解能力。

参考文献

- [1] 江婧.大型机场地面服务车辆调度问题的研究[J].科技风,2024(32):149-151.
- [2] 姜伟华,张文静,袁琪,等.基于时间窗的机场地面保障车辆动态调度[J].科学技术与工程,2024(003):024.
- [3] 琚翔,苏圣超,徐超杰,等.边缘计算下基于深度强化学习的车联网任务调度[J].系统仿真学报,2023,35(12):50-52.
- [4] 马林彦,崔艳雨,丁清苗.机场地面服务车辆调度与分配研究进展[J].综合运输,2024,46(4):54-60.