

移动闭塞下列车追踪运行研究

武千宏

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 062350

【摘要】重载铁路运输效率的提升遇到了瓶颈，移动闭塞技术是新一代列控系统的关键所在，对其追踪运行进行优化对于提高线路运能意义重大。本文从列车追踪运行模式入手，剖析了固定闭塞时间阶梯模型和移动闭塞时空占用带的不同特点，构建了涉及发车、区间运行、到达这三个场景的追踪间隔安全模型。借助引入量子进化算法，给出了基于时空占用带的列车追踪运行优化办法。其目的是希望能够达成列车安全且高效地追踪运行，为移动闭塞系统的工程应用给予理论支持提高运输效率。

【关键词】移动闭塞；追踪运行；时空占用带；安全间隔；量子进化算法

Study on train tracking operation under mobile occlusion

Wu Qianhong

Energy Shuohuang Railway Development Co., LTD. Machinery Branch 062350

【Abstract】The improvement of heavy-duty railway transportation efficiency has encountered a bottleneck. Mobile occlusion technology is the key to the new generation of train control system, and it is of great significance to improve the line transport capacity. Starting with the train tracking operation mode, this paper analyzes the different characteristics of fixed occlusion time ladder model and mobile occlusion space-time occupation zone, and constructs a tracking interval safety model involving three scenarios: departure, interval operation and arrival. With the introduction of quantum evolution algorithm, the train tracking operation optimization method based on space-time occupation zone is presented. The purpose is to achieve the safe and efficient tracking operation of the train, and to provide theoretical support for the engineering application of the mobile occlusion system to improve the transportation efficiency.

【Key words】mobile occlusion; tracking operation; space-time occupancy belt; safe interval; quantum evolution algorithm

重载铁路运输能力要想得到提升，存在着两大途径，一是提高运行速度，二是增加运行密度。在我国重载铁路持续发展的进程当中，提速遭遇了技术瓶颈，依靠缩短列车追踪间隔来提升运行密度，已然成为关键的发展方向。移动闭塞属于新一代列控系统的关键特性，它突破了传统固定闭塞分区的限制，可实现列车对前车尾部的动态追踪。当下此项技术在城市轨道交通领域已经得到了应用，不过在重载铁路方面还处于理论研究的阶段，构建移动闭塞下的列车追踪运行优化模型，对追踪过程的安全间隔约束展开分析，对于提升重载铁路运输效率有着意义。

一、移动闭塞组成及原理

（一）固定闭塞追踪方式

固定闭塞追踪方式是基于区间分区构建起来的，借助闭塞时间理论达成列车运行控制，闭塞时间概念涉及了列车经过股道区段的纯运行时间、进路锁闭时间、列车清空时间以及分区释放时间等一系列完整过程^[1]。在固定闭塞系统里，区间被划分成若干个有固定长度的闭塞分区，相邻列车运行

时要保持至少一个闭塞分区的安全间距。依据闭塞时间理论，列车运行过程可形成有序的“闭塞时间阶梯”，此模型可以直观呈现列车运行过程中的轨道资源占用状况，不过固定分区模式限制了列车追踪间隔的缩短，虽说可借助减小分区长度提高运行密度，然而基础设施投入会加重，这也成了制约固定闭塞系统效率提高的关键因素。

（二）移动闭塞追踪方式

移动闭塞系统打破了传统固定分区的限制，它可以被看作是闭塞分区无限接近零的固定闭塞系统。在这个系统里，列车运行线产生的闭塞时间带由上下两条界限线构成，形成了连续的时空占用带模型，对于区间内任意位置 s ，其闭塞占用时间 $t_m(s)$ 包含预占用时间 $t_{m,1}(s)$ 和占用缓解时间 $t_{m,2}(s)$ 这两个部分。预占用时间有信号系统响应时间、司机反应时间以及列车从当前速度制动到静止需要的时间，占用缓解时间包括列车长度出清时间和信号系统确认时间，计算区间各点的预占用时间和占用缓解时间，就能得出闭塞时空占用带的整体范围。移动闭塞技术借助精确的列车定位和车地双向实时通信，动态计算前方列车与本车的实际间距，由车载设备实时确定最佳制动时机，充分利用线路资

源,提高运输效率。

(三) 列车追踪运行分析

在移动闭塞的情况下,列车追踪运行的过程可细分为八个关键阶段,而各个阶段借助四个速度决策变量来实施控制,列车从车站开始启动并加速,一直到出站咽喉速度 v_{sw} ,这受到道岔侧向允许速度 v_{max_sw} 的限制,接着列车以 v_{sw} 的速度匀速凭借咽喉区,之后进入加速段,速度提升至区间巡航速度 v_{cr} ,这个速度要符合线路限速 v_{max} 的规定^[2]。列车完成巡航段的运行后进入惰行阶段,速度从 v_{cr} 降低到惰行末速度 v_{co} ,然后采取制动措施,速度降至进站咽喉速度 v_{bs} ,此速度受到进站道岔侧向限速 v_{max_bs} 的制约,借助对列车运动状态方程展开分析,再结合质量、回转系数等参数,可构建出包含牵引力、制动力以及阻力的列车运动学模型。该模型以距离作为采样间隔,凭借状态变量的更新达成列车运行过程的精确描述,为后续的追踪优化奠定理论基础。

二、重载列车移动闭塞追踪间隔安全分析

(一) 车站发车追踪间隔

列车于区间运行追踪期间,后车的移动授权终点会依据前列车尾位置的变化进行动态更新。移动闭塞系统一般采用相对制动以及绝对制动这两种模式,相对制动在考量移动授权终点时会同时纳入前后车的制动特性,绝对制动则仅仅考虑后车的制动性能,区间追踪间隔距离 H_b 由设备反应距离 l_e 、最大常用制动距离 l_{br} 、安全保护距离 l_s 以及列车长度 l_t 共同构成。其中设备反应距离 l_e 与设备响应时间 t_l 以及司机反应时间 t_r 存在关联,可表示为 $l_e = v_b(t_l + t_r)$,安全保护距离 l_s 是用于防范里程和速度测量误差所导致的定位偏差,在确定初始追踪间隔范围时,区间追踪速度 v_b 的取值要和巡航速度 v_{cr} 保持一致。和相对制动模式相比,绝对制动尽管追踪间隔比较大,不过安全性能更高,适用性也更广。

(二) 区间运行追踪间隔

区间运行追踪间隔直接决定了移动闭塞系统的线路运输效率。列车到达间隔距离 H_a 由进站作业距离 l_a 、最大常用制动距离 l_{br} 、进站咽喉区长度 l_y 、安全保护距离 l_s 以及列车长度 l_t 共同构成^[3]。进站作业距离 l_a 取决于进站作业时间 t_a 和列车运行速度 v_a 的乘积,即 $l_a = v_a \cdot t_a$ 。在确定初始追踪间隔范围时,进站速度 v_a 需与进站咽喉速度 v_{bs} 保持一致,同时必须满足进站道岔侧向限速要求。根据重载铁路工程实践,进站咽喉区长度因车站规模不同而异,通常在 800—1000m 范围内,进站作业时间一般取 40s。进站追踪间隔时间可通过间隔距离与速度比值计算得出,对列车追踪运

行的安全性和效率具有重要影响。

(三) 车站到达追踪间隔

车站到达追踪间隔所指的是,从先行列车到站时刻开始,一直到后续同方向列车到站时刻的这段时间里,最小的时间间隔,这对于站场运行安全以及运输效率有着颇为关键的影响。车站到达追踪间隔距离 H_a 需要全面考量多个技术参数,像进站作业距离 l_a 、制动安全距离 l_{br} 、进站咽喉区长度 l_y 、防护安全距离 l_s 以及列车长度 l_t 等。进站作业距离 l_a 跟进站作业时间 t_a 以及进站速度 v_a 紧密关联,其表达式为 $l_a = v_a \cdot t_a$,在重载铁路工程实践当中,进站咽喉区一般会设置 18 号道岔,该道岔侧向限速为 80km/h,进站作业时间一般取 40s,到达追踪间隔时间 I_a 是依靠间隔距离与速度的比值 $I_a = H_a/v_a$ 计算得出的。进站速度 v_a 的取值要和进站咽喉速度 v_{bs} 保持一致,并且一定要严格符合道岔侧向限速约束,这对于保障列车进站过程的安全性有着意义,依靠合理设定各项参数,可有效协调追踪间隔与运行安全之间的关系。

(四) 最小追踪间隔计算

在移动闭塞系统里,列车追踪间隔的计算要全面考量发车、区间运行以及到达这三个关键环节,最小追踪间隔时间 I_{hf} 必然要大于发车追踪间隔 I_d 、区间追踪间隔 I_b 以及到达追踪间隔 I_a 中的最大值,也就是 $I_{hf} > \max\{I_d, I_b, I_a\}$,经过速度影响分析可以发现,出站速度 v_{sw} 和发车追踪间隔呈现十分突出的负相关。在低速段这种表现更为明显,区间巡航速度 v_{cr} 和区间追踪间隔呈现正相关关系,当速度超过 200km/h 的时候这种相关性更强,进站速度 v_{bs} 和到达追踪间隔同样呈负相关,在速度低于 50km/h 时表现得格外突出。研究显示,在当前的重载铁路系统中,车站到达追踪间隔一般大于发车和区间追踪间隔,这成为制约系统运输效率的关键因素,鉴于此,在确定列车运行速度时,要着重关注进站速度的合理选取,在保证安全性的前提下尽可能提升进站速度,以此有效缩短整体追踪间隔。

三、追踪运行优化设计

(一) 多参数整合策略拟定

重载列车追踪运行的优化设计,要全面综合地考量多个速度参数之间的协调配合情况。在从列车发车直至到达的整个过程里,出站咽喉处的速度、区间巡航速度、惰行结束时的速度以及进站咽喉速度,共同构成了列车运行过程中的关键控制点^[4]。这些速度参数,要符合线路条件以及车辆性能所提出的基本约束要求,还需对各速度之间的合理衔接给予充分考虑。在实际工程当中,出站速度会受到咽喉区道岔的限制,区间巡航速度需要在运行效率与能源消耗之间进行权

衡,而进站速度则会直接对车站的到达能力产生影响,这些因素一起构建成了一个复杂的参数优化体系,重载铁路的运营实践显示,合理的速度控制策略可提升运输效率,降低系统能耗。

在追踪运行的场景之中,前后列车速度的合理匹配是非常关键的,当前面的列车采用较高的巡航速度时,后面的列车需要对自身的速度曲线作出调整,以此来维持安全的追踪距离,考虑到重载铁路运营的实际需求,追踪运行的优化要保障运行安全,又要兼顾运输效率以及能源节约,这就要求在契合各项工程约束条件的基础上,借助合理配置速度参数,达成多目标的协同优化。凭借构建科学的评价指标体系,可有效平衡运行时间、能源消耗以及追踪间隔等关键性能指标,移动闭塞条件下的追踪优化相较于固定闭塞更加灵活,不过对速度参数的精确控制也提出了更高的要求,这给优化策略的制定给予了新的挑战。

(二) 时空域协同资源优化

移动闭塞系统下的时空域资源优化是以闭塞时间带理论为基础构建的。列车运行期间所形成的时空占用带是由上下两条界限线组成的,这些界限可直接体现轨道资源的占用状况,对于区间内的任意位置而言,其闭塞占用时间包含预占用时间和占用缓解时间这两个关键部分,预占用时间包含了信号系统响应、司机反应以及列车制动等整个过程,而占用缓解时间则囊括了列车长度出清和信号系统确认等环节。凭借精准计算区间各点的占用特性,可得出完整的时空占用带范围,为追踪优化提供基础约束条件,

在列车追踪运行优化里,前后车时空占用带的合理配置是非常关键的,两列车的占用带要严格防止出现重叠情况,这就需要后车的占用带上限始终处于前车占用带下限之后,依据这个约束条件,可以凭借调整两车的速度参数以及发车间隔,达成轨道资源的高效利用。在实际应用过程中,需要着重关注车站咽喉区等关键路段的资源占用情形,合理控制列车速度,防止因不当的参数配置致使追踪间隔过大或者安全裕度不足,这种基于时空占用带的优化方法,可在保证安全性的同时最大程度地提高线路运输效率。

(三) 智能算法融合模型构建

参考文献

- [1]刘骥阳,张进川,宋宗莹.基于移动闭塞的重载列车追踪间隔模型研究[J].铁道运输与经济,2024,46(05):12-21+30.
- [2]李昊阳.基于车-车通信原理的列车追踪算法优化[D].大连交通大学,2023.DOI:10.26990/d.cnki.gsltc.2023.000460.
- [3]白鹏斌.移动闭塞条件下列车流特性研究[D].北京交通大学,2023.DOI:10.26944/d.cnki.gbju.2023.001125.
- [4]丁潇潇.单线铁路移动闭塞模式下的列车行方案及车流特性研究[D].兰州交通大学,2023.
- [5]潘槿仪.高速铁路移动闭塞条件下列车实时运行调整研究[D].西南交通大学,2022.

作者简介:武千宏(1982.10-)男,山西省阳泉市,大专,助理工程师,研究方向:移动闭塞。

移动闭塞情形下的列车追踪运行优化问题有多目标、多约束这样复杂的特性^[5]。传统数学方法很难有效求解,量子进化算法借由引入量子计算的理念,借助量子比特编码染色体,让种群多样性有了一定程度的提升,此算法运用量子旋转门来进行染色体变异,提高了算法探索的能力,并且依靠自适应旋转角度的设计使收敛速度得以加快。在编码方案方面,针对速度决策变量以及追踪间隔时间构建九维量子染色体,每个基因位借助概率幅和相位来表示,让搜索空间变得更加充分,优化效果也变得更好,

算法的具体实现过程把量子计算和进化策略的优势融合在了一起,种群初始化之后,借助量子门操作达成染色体进化,并且结合时空占用带约束来判断可行解。在适应度评价环节,把运行时间和能耗指标进行归一化处理,采用帕累托非支配排序来确定最优解集,算法的收敛过程呈现了量子进化的特点:早期阶段维持较大的旋转角度以提高全局搜索能力,后期则依靠角度衰减来提升局部寻优效果,仿真结果显示,该算法可快速获取列车追踪优化问题的帕累托最优解集,为工程应用提供了有效的理论支持。

结束语

移动闭塞作为新一代列控系统里的核心技术,对其追踪运行展开优化研究,对于提高重载铁路运输效率有着重要意义。本文借助构建移动闭塞时空占用带模型,对列车追踪运行的安全间隔约束做了较为细致的分析,提出了依靠量子进化算法的追踪优化办法,研究显示,车站到达追踪间隔是对系统运输效率形成制约的关键要素,合理提高进站速度可有效地缩短整体追踪间隔。基于时空占用带的优化方式可以在保证安全性的情况下达成资源的高效利用,而量子进化算法为求解这个复杂的优化问题提供了有效的工具,未来的研究将会思考列车制动性能提升给追踪间隔带来的影响,并且探索虚拟重联等新型运行模式,为重载铁路移动闭塞系统的工程应用给予更为完善的理论支持。