

高速铁路信号系统运维分层架构模型研究

林 鹏¹ 田 宇¹ 袁志明² 张 琦² 董海荣³ 宋海锋⁴ 阳春华¹

摘 要 高速铁路信号系统是高速铁路安全可靠运营的核心装备, 实现高速铁路信号系统智能运维是降低高速铁路运行风险的必要基础保障. 目前, 我国高速铁路信号系统运维研究工作主要集中于器件级系统或基本单元系统, 系统层面的相关研究几乎为空白, 亟需从整体上建立全局架构理论模型. 为此, 定义了关联信号系统, 提出了分散式动态评估函数, 将动态调度纳入运维体系, 构建了分层架构模型. 在此基础上, 针对分层架构模型的决策层和关联信号层, 提出了动态定量评估、动态风险预警和故障诊断的研究方法, 并展望了所面临的挑战.

关键词 高速铁路信号系统运维, 分层架构模型, 定量评估, 风险预警, 故障诊断

引用格式 林鹏, 田宇, 袁志明, 张琦, 董海荣, 宋海锋, 阳春华. 高速铁路信号系统运维分层架构模型研究. 自动化学报, 2022, 48(1): 152–161

DOI 10.16383/j.aas.c210109

Operation and Maintenance of High-speed Railway Signaling System: Hierarchical Structure Model

LIN Peng¹ TIAN Yu¹ YUAN Zhi-Ming² ZHANG Qi²
DONG Hai-Rong³ SONG Hai-Feng⁴ YANG Chun-Hua¹

Abstract The high-speed railway signaling system is the core equipment for the safe and reliable operation of high-speed railway. The realization of intelligent operation and maintenance of high-speed railway signaling systems is the fundamental guarantee to reduce the operation risk of high-speed railway. However, the research on the operation and maintenance of high-speed railway signaling systems is still in early stage. Most of existing works were concerned about the systems in device level or the most basic level and few works focused on the whole system. There is a tremendous need to set up theoretical model of global structure on the whole. In this paper, we first define a concept of interrelated signaling system, propose a decentralized dynamic evaluation function and incorporate dynamic scheduling into the operation and maintenance system, based on which we construct a hierarchical structure model for high-speed railway signaling systems. After that, we give some research methods of dynamic quantitative evaluation, dynamic risk early warning and fault diagnosis for the decision-making layer and interrelated-signaling layer of hierarchical structure model, and finally discuss the challenges in these aspects.

Key words Operation and maintenance of high-speed railway signaling system, hierarchical structure model, quantitative evaluation, risk early warning, fault diagnosis

Citation Lin Peng, Tian Yu, Yuan Zhi-Ming, Zhang Qi, Dong Hai-Rong, Song Hai-Feng, Yang Chun-Hua. Operation and maintenance of high-speed railway signaling system: Hierarchical structure model. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(1): 152–161

收稿日期 2021-02-01 录用日期 2021-03-19

Manuscript received February 1, 2021; accepted March 19, 2021

国家自然科学基金 (61790572, 61790573, 61790575, 61925302, 61903021), 111 引智计划 (B17048), 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2020zzts575) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61790572, 61790573, 61790575, 61925302, 61903021), 111 Project (B17048), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University (2020zzts575)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 中南大学自动化学院 长沙 410083 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所 北京 100081 3. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044 4. 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044

1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083 2. Signal and Communication Research Institute, China

截止到 2020 年底, 我国已成为世界上高速铁路运行里程最长、在建规模最大的国家. 随着“八纵八横”高速铁路网建设规划的提出, 我国高速铁路建设进入全面快速发展阶段. 近年来, 随着我国高速铁路网的快速发展, 高速铁路已经成为中国铁路旅客运输的主要渠道. 2020 年, 国家铁路旅客发送量为 21.6 亿人次, 高铁动车组旅客发送量约占铁路旅客发送量的 70%; 高铁运营里程达到 3.79 万公

Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081 3. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 4. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

里, 占世界高铁总里程的 $2/3$ 以上。高速铁路的发展, 极大地提高了列车的运行速度, 缩短了城市间的时空距离, 促进了区域经济的繁荣与文化的交融^[1-3]。安全是高速铁路的生命线, 特别是随着列车速度的不断提高和运行密度的加大, 安全成为人们越来越关心的问题。以京沪铁路为例, 目前运营速度为 350 公里/小时, 平均日开行列车高达 426 列, 列车最小追踪间隔不到 3.5 分钟, 如此高的“运行密度”已逼近铁路运力上限, 一旦发生事故, 可能造成重大的人员伤亡和经济损失。

高速铁路信号系统是指指挥列车运行、控制列车运行速度和追踪方式、传递列车相关控制信息、监督列车运行及各种相关作业情况的总称, 由车载和地面两大系统组成, 进一步又可以分为车站联锁系统、区间闭塞系统、列车控制系统、调度指挥系统、微机监测系统以及其他安全技术系统等, 具体架构见图 1^[4]。信号系统作为高速铁路的“大脑和神经中枢”, 是确保高速铁路安全、高效运营的关键设备。高速铁路信号系统是一个极其复杂的系统, 这导致信号系统运维难度巨大。且一旦某一设备出现故障, 如果不及时进行运行维护, 极有可能导致其他设备发生连锁故障, 甚至会造成社会和经济重大损失。因此, 如何保证信号系统的安全运营具有重要的理论意义, 也是我国高速铁路发展亟需解决的重大应用课题。

然而, 目前高速铁路信号系统运维研究工作主

要集中于器件级系统或基本单元系统, 系统层面的相关研究几乎为空白, 亟需从整体上系统地研究高速铁路信号系统的运维理论并建立全局架构模型。因此, 本文的第一个研究重点为建立高速铁路信号系统运维体系框架, 定义关联信号系统概念, 提出分散式动态评估函数, 构建高速铁路信号系统分层架构模型。

我国幅员辽阔, 铁路运营里程长, 部分线路运行环境恶劣, 信号系统运维困难且成本高。目前高速铁路信号系统运维存在以下不足^[5-8]: 1) 现有信号系统仍然采用传统的“大经验、小科学”的运维思路, 信号系统的运行状态评估和维护都依赖于人的经验, 极少能从机理上或基于大数据分析挖掘信号系统之间的横向耦合关系; 2) 信号系统的量化评估大多是基于单个系统评估的线性综合, 准确性和有效性难以保证; 3) 信号系统异常情况具有随机性、并发性和共因性, 现有的定期检测和维护等方法虽然能够一定程度上检测并排除故障, 但很少对信号系统设备的相关数据进行有效利用并很少对高速铁路信号系统进行实时的风险预警和故障诊断。2011 年 7 月 23 日发生的甬温铁路追尾事故是一起典型的信号系统故障引起的重大铁路交通事故, 甬温线双向中断 32 个多小时, 造成重大的生命和财产损失。事故主要原因为信号系统设备遭受雷击而发生故障。因此, 如何对信号系统的运行状况及时作出

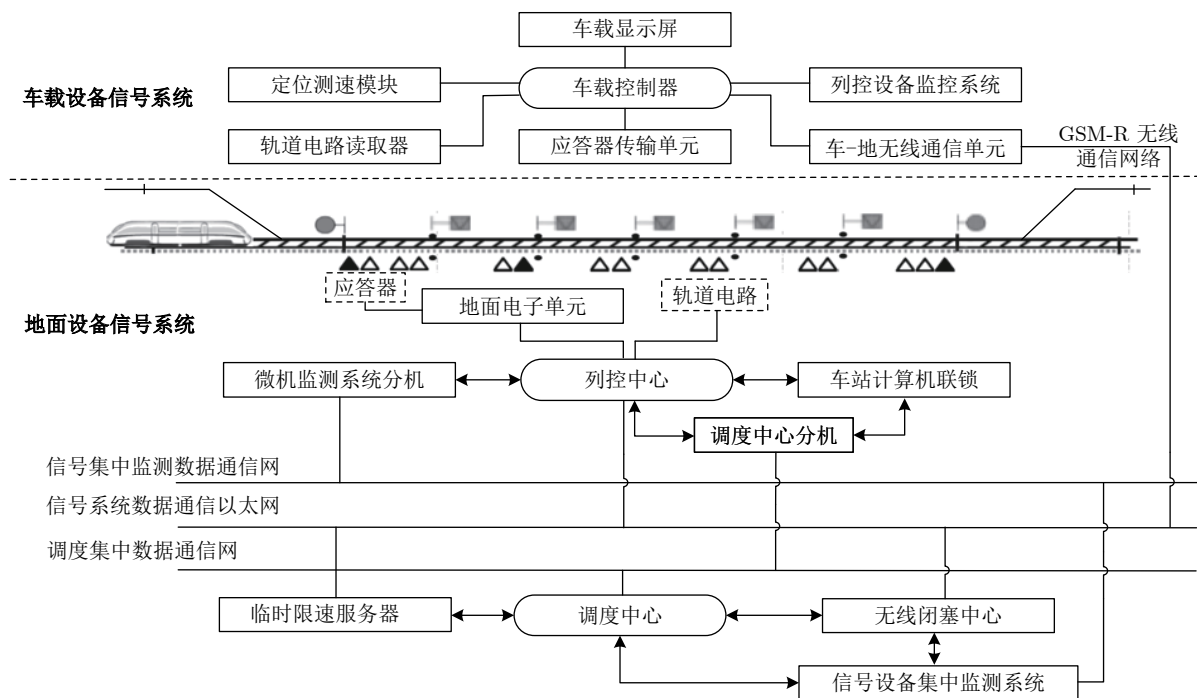


图 1 高速铁路信号系统架构图

Fig.1 The structure of high-speed railway signaling system

科学评估, 进行准确的风险预警和故障诊断是高铁信号系统运维所面临的重要挑战. 本文第二个研究重点是针对以上存在的问题, 在所构建的分层架构模型基础上, 提出动态定量评估、动态风险预警和故障诊断的研究方法.

1 高速铁路信号系统分层架构模型

高速铁路信号系统由调度指挥系统、列车控制系统、车站联锁系统、区间闭塞系统、信号集中监测系统、电源系统等构成. 高速铁路信号系统规模巨大, 列车、站点和线路数目巨大, 且从整体上看, 高速铁路信号系统是一个复杂的非线性、强时变、强耦合的不确定网络化系统, 其覆盖面非常宽广且错综复杂. 任一子系统的异常运行状态极有可能在全网多层次的传播, 直接或间接影响全网各子信号系统和设备的运行, 甚至会引起整个信号系统的紊乱, 严重影响高速铁路系统的正常运营.

1.1 面临的挑战

高速铁路信号系统的可靠运行对保证高速铁路的安全、高效运营起着关键作用. 高速铁路信号系

统运维研究已经有了一定的成果, 但由于其复杂巨系统特征, 如何分析高速铁路信号系统的运行机理, 实现高速铁路信号系统定量评估、风险预警与故障诊断等还面临着很大的挑战, 还有很多问题值得继续深入研究. 特别是, 目前高速铁路信号系统运维还没有统一系统的定义, 且相应研究集中于器件级系统或基本单元系统, 而对于高速铁路信号系统整个系统层面的运维研究还几乎为空白, 并未建立设备运维之间的联系. 当多个子系统相互耦合、相互作用时, 现有的方法难以实现对整个系统有效的运维处理. 因此, 高铁信号系统研究亟需建立系统性的运维理论.

1.2 高速铁路信号系统分层架构划分

为研究整个高速铁路信号系统的运维, 在深入分析系统运行状态的基础上, 可分析各信号系统之间的关联性与独立性, 并根据功能的不同, 定义关联信号系统, 将高速铁路信号系统划分为多个层次, 构建高速铁路信号系统分层架构模型 (见图 2). 所构建模型的最顶层为决策层, 决策层是一个由调度控制关联信号系统、列车关联信号系统和地面监

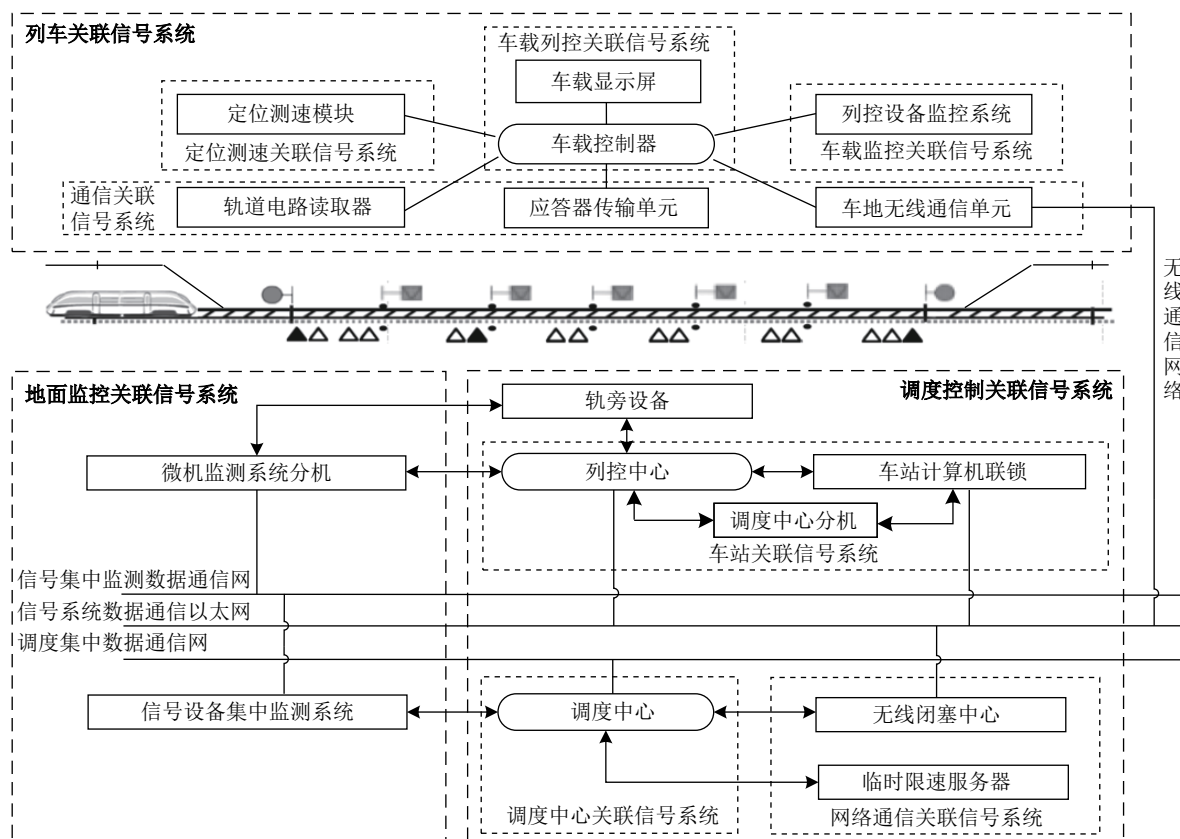


图 2 高速铁路信号系统的分层架构模型框图

Fig.2 The hierarchical structure model of high-speed railway signaling system

控关联信号系统所组成的分散式网络化系统. 其中, 关联信号系统是指若干子信号系统所组成具有特定功能的整体, 各子信号系统相互作用、相互依赖, 而且每个关联信号系统可能从属更大的关联信号系统. 在决策层的基础上, 可分别将调度控制关联信号系统、列车关联信号系统和地面监控关联信号系统作进一步划分, 形成下一级关联信号系统. 例如, 调度控制关联信号系统可划分为调度中心关联信号系统、车站关联信号系统、网络通信关联信号系统等信号系统; 列车关联信号系统可划分为车载列控关联信号系统、车载监控关联信号系统、通信关联信号系统、定位测速关联信号系统等信号系统; 地面监控关联信号系统由微机监测关联信号系统等信号系统组成. 按照此方法, 从上到下逐层划分, 直至最底层的某一个具体功能系统, 如调度中心、无线闭塞中心和临时限速服务器等, 将最底层的具体功能系统定义为基本单元信号系统.

1.3 决策层分散式动态评估函数

在第 1.2 节中, 将决策层划分为调度控制关联信号系统、列车关联信号系统和地面监控关联信号系统. 而这三个关联信号系统并不是独立存在和运行的, 为描述其关联性, 需要构建函数来定量评估. 由于高速铁路系统中列车数量巨大, 相互耦合关系复杂, 且列车在实时动态变化, 构建统一静态的高速铁路信号系统定量评估函数难以实现. 为此, 考虑到列车系统的同构性, 基于每列列车的运行状态和限制条件以及列车的性能评估, 结合列车运行目标和列车之间相对运行状态等, 可提出决策层意义下的列车网分散式动态评估函数, 来评估决策层三个关联信号系统之间的耦合关系. 对于第 i 列列车, 分散式动态评估函数可取如下形式:

$$\begin{aligned} Den(x_i(t)) = & f_1(\gamma_1 \|x_i(t) - x_{i0}(t)\|) \diamond \\ & f_2(\gamma_2 \|x_i(t) - x_{i-1}(t) - h_{i,i-1}\|) \diamond \\ & f_3(\gamma_3 \|x_{i+1}(t) - x_i(t) - h_{i+1,i}\|) \end{aligned}$$

其中, $x_i(t)$ 表示在 t 时刻第 i 列列车的位置; $x_{i0}(t)$ 表示在 t 时刻第 i 列列车的期望位置; $h_{i,i-1}$ 表示第 i 列列车与第 $i-1$ 列列车之间期望的距离; $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, $\gamma_3 > 0$ 表示比例系数; $f_1(\gamma_1 \|x_i(t) - x_{i0}(t)\|)$ 表示列车自身运行状态影响; $f_2(\cdot)$ 和 $f_3(\cdot)$ 表示前后车相对运行状态的影响; $\diamond$ 表示函数 $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$, $f_3(\cdot)$ 的作用关系, 可以为加性、乘性等关系. 将其应用于实际高铁信号系统时, 具体形式需要根据实际情况作出调整.

在此基础上, 将列车网分散式动态评估函数与决策层各关联信号系统评估函数相融合, 构建高速

铁路信号系统分层架构模型.

2 高速铁路信号系统定量评估

针对单个信号系统的定量评估已有一定的研究, 但相关工作很少从机理上分析信号系统之间的相互作用对整个高速铁路信号系统的影响, 其评估的准确性和可靠性难以保证. 如何从关联信号系统的角度对信号系统进行定量评估需要得到更加深入的研究.

2.1 面临的挑战

定量评估问题是高速铁路信号系统运维中最关键的问题之一. 定量评估是一种“事前型”的评估手段, 通过对信号系统的“健康状态”进行定量评估, 可以对系统运行可能出现的风险进行预测, 避免事故的发生. 现有的信号系统定量评估方法主要是以单个信号系统的评估结果为基础, 通过线性综合得到整个信号系统的评估结果. 由于信号系统之间的耦合作用是非线性的, 现有的评估方法很少从机理上分析信号系统之间的相互作用对整个信号系统的影响, 故难以获得准确有效的结果. 具体来说, 高速铁路信号系统定量评估主要存在两方面的研究困难: 一是高速铁路信号系统是一个强耦合的网络化系统, 信号系统之间的耦合关系难以描述, 难以通过单个信号系统的定量评估结果线性综合得到整个信号系统的准确评估; 二是高速铁路信号系统网络结构复杂, 站点、列车和线路数目众多且列车运行等相关状态实时变化, 难以建立整个信号系统统一的定量评估模型.

目前高速铁路信号系统定量评估研究非常有限, 主要研究方法大致可以分为两种: 基于子系统机理分析或经验的线性综合评估方法和数值分析评估方法 (或称为数据驱动法).

基于子系统机理分析或经验的线性综合评估方法, 主要是通过分析子系统的运行状态、输入和输出之间的耦合关系对子系统进行评估, 然后对子系统的评估线性综合, 从而实现整个系统的评估. 该方法虽然对子系统的评估较为准确, 但对子系统之间相互作用关系的描述并不是很准确, 导致所得定量评估结果难以应用到实际中^[9-13]. 例如, 文献 [11] 提出了将层次分析法、最大绝对加权残差法和最大熵法有机结合的综合加权算法, 并选取了 ZPW-2000A 型移频轨道电路室内设备、计算机联锁、调度中心三种典型的铁路信号系统设备, 计算了设备的危险故障率、评估了设备的安全水平. 但是, 该模型仅考虑了独立站点设备的评估问题, 未考虑站点

之间、不同系统和设备间的相互影响. 因此, 该模型在实际应用中的准确性还有待进一步提高.

数值分析评估方法 (或称为数据驱动法) 是通过数据分析处理来挖掘系统测量数据、实验数据和观测数据中的隐含信息, 根据这些信息是否满足某些要求来评估信号系统的性能. 在该方面先后提出了基于决策树、贝叶斯、神经网络、遗传算法、模糊逻辑、灰色聚类等方法来对信号系统进行评估^[14-18]. 数值分析评估方法存在两方面关键不足: 一是难以获取足够的实际运行数据, 并且实际数据无法覆盖所有可能发生的情况, 所得模型准确性难以保证, 尤其是高速铁路信号系统规模巨大, 各种信号系统的耦合关系错综复杂; 二是由于高速铁路信号系统由多个异构子系统和设备组成, 各种运行数据混合在一起, 多源异构数据融合分析存在较大困难, 难以准确区分和描述各种系统相互之间的影响.

2.2 高速铁路信号系统动态定量评估研究方法

本文所考虑动态定量评估方法主要是针对所构建的分层架构模型决策层和关联信号层系统, 在兼顾各系统单独评估的基础上, 考虑系统之间关联性的影响. 由于高速铁路信号系统的子系统数量巨大且性质迥异, 高速铁路信号系统评估难以采用统一的方法来实现. 在此, 本文仅给出主要的研究方法, 具体分为基本单元信号系统定量评估、关联信号层

系统定量评估、决策层系统动态定量评估三种情况 (见图 3).

基本单元信号系统定量评估. 针对基本单元信号系统, 研究系统的输入输出特性, 分析系统的输入域和输出域分布、输入输出映射关系以及各状态对应的系统稳定裕度, 并结合信号系统的标称数据, 利用机器学习等数值分析方法, 对系统输入输出映射关系进行定量分析, 建立该信号系统的定量评估函数.

关联信号层系统定量评估. 针对各关联信号层, 分析信号系统之间的关联程度、各事件的变迁过程以及信号系统不同状态的稳定裕度. 基于系统控制、网络化系统智能协同方法等思想, 研究关联信号系统中各子信号系统的耦合关系. 将各子信号系统的相互作用看作各子信号系统的输入输出, 考虑各子信号系统输入输出域的限制条件, 确定出整个关联信号系统的输入输出域以及各状态对应的系统稳定裕度. 进而利用机器学习等数值分析方法, 对整个关联信号系统输入输出的关系进行定量分析, 建立该关联信号系统定量评估函数. 并基于所获得的关联信号系统的实际运行数据, 对所得该关联信号系统的定量评估函数进行验证和修正.

决策层系统动态定量评估. 将第 1.3 节中所提出的列车网分散式动态评估函数与决策层各关联信号系统定量评估函数相融合, 构建高速铁路信号系

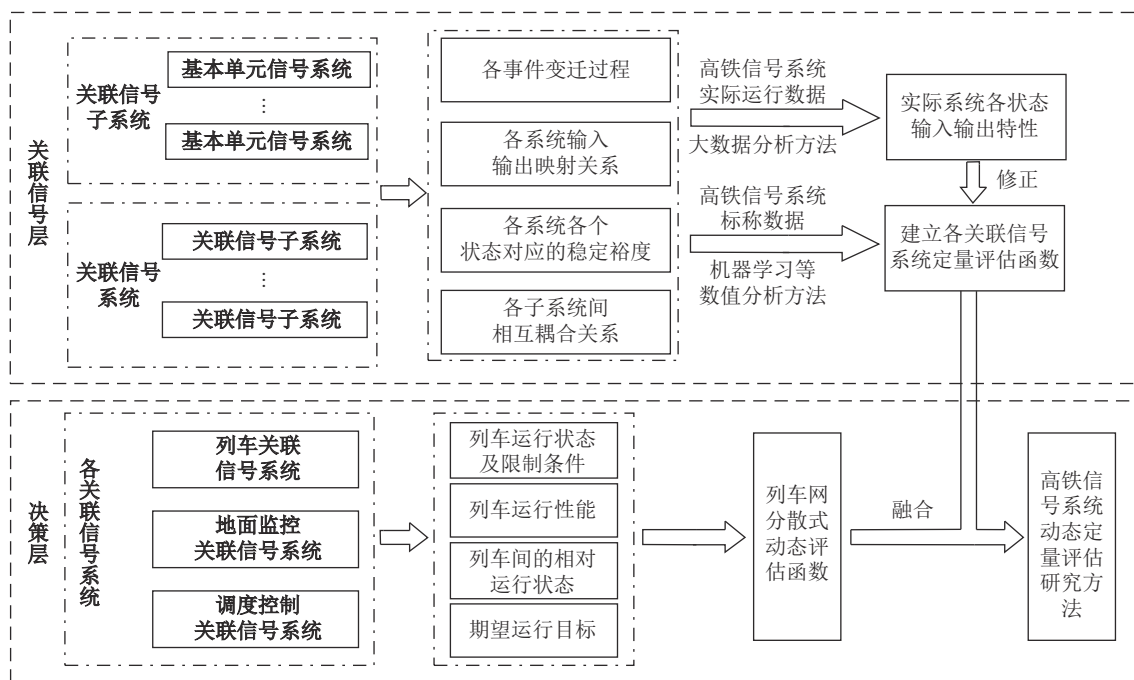


图 3 高速铁路信号系统动态定量评估研究方法

Fig. 3 The dynamic quantitative evaluation of high-speed railway signaling system

统动态定量评估函数. 并基于所获得的实际运行数据对所得动态定量评估函数进行验证和修正.

3 高速铁路信号系统风险预警

目前高速铁路信号系统局部风险建模和风险预警研究都有了一定的成果, 但利用信号系统输入输出状态数据对整体信号系统的风险进行预警的相关研究工作还有待进一步推进. 该问题不仅需要考虑系统不同状态下异常情况发生对系统的影响, 而且需要考虑其在车线网上的传播所带来的影响.

3.1 面临的挑战

风险预警是高速铁路信号系统运维中最复杂的问题之一. 风险预警主要是针对信号系统可能出现的风险进行定性和定量的评估, 从而预防事故的发生. 目前关于高速铁路信号系统风险预警研究的困难主要体现在以下三方面. 首先, 从信号系统设备来看, 由于信号系统设备越来越复杂, 设备异常的发生具有很大的随机性和偶然性, 电子系统的封闭性使得信号系统设备运行风险具有隐蔽性, 识别和预估设备运行异常情况存在着较大的困难. 其次, 信号系统运行异常情况的发生具有并发性和共因性, 例如大风大雨的出现可能会使不同设备系统同时出现异常情况, 其影响可能在车线网上交叉传播, 相互耦合、相互再度影响, 必须同时考虑双重或多重异常情况对信号系统的影响. 同时, 某些异常情况的影响可能会沿车线网传播和扩散, 会对不同信号系统的正常运行状态同时带来破坏, 例如当某车站列车因设备故障发生延误时, 延误将会沿着车线网传播, 造成整条线路甚至全网其他列车不同程度的延误. 再次, 信号系统之间存在强非线性、强时变

耦合关系, 异常情况对信号系统和相关联的信号系统的影响难以准确描述.

目前, 风险预警方面研究最多的是基于延迟时间的风险预警模型^[19-24]. 例如, 文献 [19] 针对铁路轨道检查和维护问题, 研究了基于延迟时间的风险预警模型, 考虑异常情况的风险概率, 利用遗传算法计算检测策略的成本和风险水平, 该研究成果被挪威国家铁路管理局采用. 在两过程延迟时间模型的基础上, 文献 [20-22] 作了进一步拓展, 按照系统损伤的严重程度将延迟时间分为三个过程, 构建了三过程延迟时间风险预警模型.

除了基于延迟时间的风险预警模型, 其他学者还研究了基于故障树分析、模糊推理、云模型和证据理论分析等一系列风险预警模型^[25-29]. 例如, 文献 [25] 在所收集的铁路系统数据分析基础上, 建立了基于故障树和事件树的风险评估预警模型. 文献 [28] 利用模糊网络分析法, 结合专家意见和网络分析, 量化高铁运营中的风险因素, 评估高铁安全风险等级. 文献 [29] 针对我国高速铁路历史风险数据不足、获取困难和难以定量评估问题, 提出了基于云模型和证据理论的信号系统风险预警模型.

3.2 高速铁路信号系统动态风险预警研究方法

本文所考虑高速铁路信号系统风险预警方法的核心思想是, 在所构建的分层架构模型基础上, 针对关联信号层和决策层, 构建关联信号层系统风险预警模型, 并分析决策层各关联信号系统的关联性, 从而构建决策层系统动态风险预警模型 (见图 4).

关联信号层系统风险预警. 考虑关联信号系统各子系统输入输出域的限制和定量评估函数, 研究关联信号系统中输入输出关系. 在不同状态情况下,

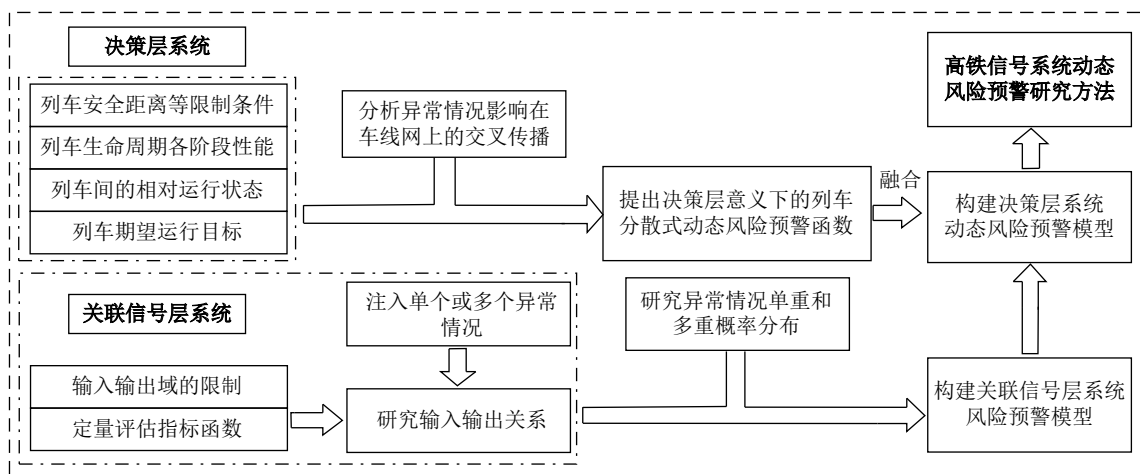


图 4 高速铁路信号系统动态风险预警研究方法

Fig.4 The dynamic risk early warning of high-speed railway signaling system

注入给定异常情况,分析异常情况对状态和输出的影响,结合给定异常情况的发生概率,构建单异常关联信号系统风险预警模型.在此基础上,同时注入多个给定异常情况,研究异常情况的多重概率分布,分析异常情况对状态和输出的影响,构建多重异常关联信号层系统风险预警模型.

决策层系统动态风险预警.针对决策层系统,分析异常情况单独发生或多重发生状况在车线网上的交叉传播过程、范围及影响.基于每列列车的运行状态、限制条件、列车性能、列车运行目标以及列车之间相对运行状态等,结合异常情况的单重或多重概率分布,提出列车分散式动态风险预警函数,进而将其与决策层各关联信号系统的风险预警模型相融合,构建决策层系统动态风险预警模型.

注.本节中风险预警模型构建与第2节中定量评估模型构建具有明显区别.定量评估模型侧重系统自身的评估,一般未考虑异常情况的影响,而风险预警不仅要考虑系统受到异常情况的影响,还要考虑异常情况的影响在不同系统中的传播影响.除此之外,风险预警还需考虑异常情况的并发性和随机性,如灾害天气可能同时造成几种信号设备异常,且该异常情况产生的影响会沿车线网传播,进而影响其他车站列车和系统的正常工作.

4 高速铁路信号系统故障诊断

目前高速铁路信号系统故障诊断主要集中于单个器件级系统或多个同构子系统的研究,很少考虑高速铁路信号系统的异构问题.此外,现有方法对故障在车线网中交叉传播机理的研究还很不成熟,多是仅考虑站点之间的故障,所得相关结果难以应用于全网上的故障传播分析.

4.1 面临的挑战

现有高速铁路信号系统故障诊断的研究主要集中于单个器件级系统或多个同构子系统所组成的系统.比如,列车控制系统和车站信号控制系统故障诊断方面,先后提出了以信号处理、建模处理和知识处理相融合的智能诊断技术,诊断方法包括故障树、专家系统和贝叶斯网络等^[30-36].考虑到车载信号系统设备系统化、复杂化的发展趋势,故障呈现出隐蔽性、多样性和重叠性等特点,文献^[33]将动态贝叶斯网络的方法用于列车运行控制系统车载信号设备的故障诊断.文献^[34]提出了针对车站信号控制设备的专家系统故障诊断方法.然而由于高速铁路信号系统是相互耦合的,文献^[33-34]的局部性诊断方法容易造成故障误判或者漏判.文献^[35]提

出了一种系统级的故障诊断方法,充分利用信号系统高度的信息交互和可靠的数据通信网络进行节点互测,建立故障诊断模型和诊断算法,从而实现故障的定位和诊断.但该方法所需数据量巨大且数据检测依赖于静态环境,不适用于高速铁路实际运行场景.

由于高速铁路信号系统非常复杂,信号系统普遍存在异构问题且系统取值并不是连续的,而现有故障诊断方法多要求系统是同构且连续的,对于这些具有混合特征的信号系统故障诊断问题的研究方法有限.特别是,对于信号系统故障所导致的列车网调度与控制运行故障及其在车线网中的交叉传播问题,现有研究还很不成熟,相关分析和解决方法仅局限于站点之间^[37-42].例如,文献^[37-39]在某一线路区间通过能力部分失效、全失效情况下,研究了不同故障场景、优先级、故障持续时间等约束下的列车运行实时调整调度模型.文献^[40-42]研究了线路初始延误时间已知、列车运行干扰较小情况下的列车运行调整优化模型,通过对列车到发时刻与运行顺序调整来最小化延误时间,从而实现列车最优调整调度.

4.2 高速铁路信号系统故障诊断研究方法

高速铁路信号系统故障诊断可以分为两种情况:一是通过定量评估函数和风险预警模型能够直接判断或预测信号系统各环节的故障;二是通过定量评估函数和风险预警模型难以直接判断是否出现故障.第一种情况下的故障诊断相对比较容易,在此不作深入分析.第二种情况在实际高速铁路信号系统中是比较常见的,比如传感器检测基本单元信号系统常会包含多个同构或异构的传感器,很难通过基本单元整体定量评估函数和风险预警模型直接判断或预测哪个传感器出现了故障.因此,本文仅分析和讨论第二种情况以下两种子情况的研究方法(见图5).

关联信号层系统故障诊断.考虑到基本单元信号系统和关联信号系统各子系统可能存在的异构特点,首先,通过分解、融合等操作将各子信号系统转化为标准的控制系统.然后,基于关联系统监测所获得的电压、电流、压力等信号,利用传统集中式控制和分布式控制理论,研究各子信号系统之间强非线性耦合关系,重构关联信号系统的内部关键状态.最后,根据所构建定量评估函数和风险预警模型,判断关联信号系统是否出现故障.

决策层系统故障诊断.考虑故障对全网列车的影响,基于列车之间相互作用关系,分析或预测列

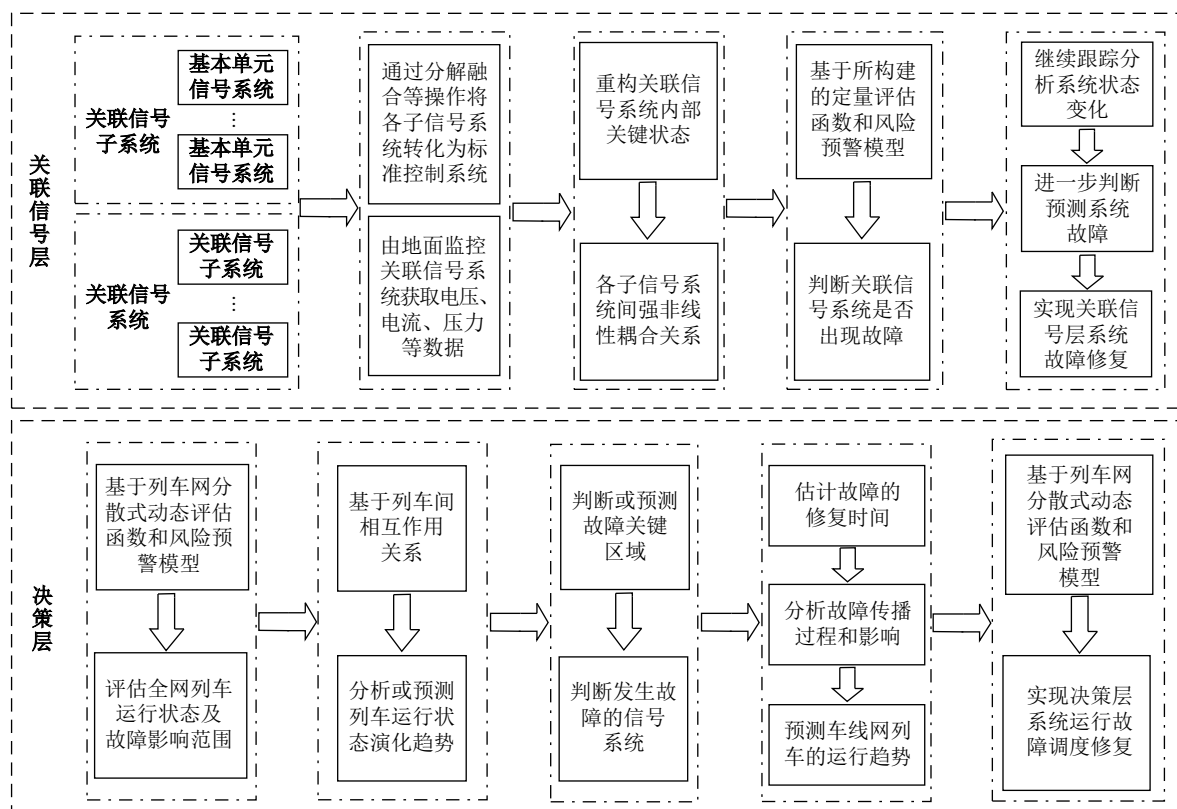


图5 高速铁路信号系统故障诊断研究方法

Fig.5 The fault diagnosis of high-speed railway signaling system

车运行状态具体演化趋势,从而判断或预测出决策层发生故障的关键区域,进而判断发生故障的信号系统.由于决策层各关联信号系统相互耦合,特别是列车运行状态是动态变化且相互影响,关联信号系统的故障常会影响到列车的运行且沿着车线网传播,造成决策层系统的运行故障.决策层系统的运行故障,通常可通过调度和相关信号系统的故障修复来解决.首先估计决策层系统故障的修复时间,研究故障在车线网上的传播过程和影响范围,并预测车线网列车的运行趋势.然后基于列车网分散式动态评估函数和风险预警模型,结合非线性控制理论、多智能体系统分布式控制理论和调度优化方法,根据决策层信号系统的特点,提出列车调度方法和相关信号系统的故障修复方法,解决决策层运行故障.

5 结束语

高速铁路信号系统运维理论和方法的研究具有重要的理论意义和实际应用价值.一方面,不仅可为提升高速铁路智能化程度提供有力的支撑,而且可为列车运行控制、行车调度等实际智能运维系统的研究奠定理论基础;另一方面,高速铁路信号系

统运维理论研究属于多学科交叉研究,涉及复杂网络建模与优化、列车运行控制、随机概率、风险预警、故障诊断等众多学科知识,该领域的研究不仅可为物联网系统、电力系统等系统的研究提供参考和借鉴,还将有力地促进复杂网络大系统理论的发展.为此,本文定义了关联信号系统,提出了分散式动态评估函数,构建了分层架构模型.在此基础上,针对分层架构模型的决策层和关联信号层,从动态定量评估、动态风险预警和故障诊断三方面进行了研究、分析与展望.希望本文所提出的研究方法能为未来高速铁路信号系统智能运维的发展与相关研究工作提供一定的帮助与参考.

References

- 1 Lin Zhong-Hong, Yang Ying, Tian Ya-Ming. Research on the economic function of high-speed railway: A case study of Beijing-Shanghai high-speed railway. *Railway Economics Research*, 2017, **135**(1): 1-9
(林仲洪, 杨瑛, 田亚明. 从京沪高铁看高铁经济的重要作用. 铁道经济研究, 2017, **135**(1): 1-9)
- 2 Wang Feng. Development of China's intelligent HSR building technology and its future. *Chinese Railways*, 2019, **04**: 1-7
(王峰. 我国高速铁路智能建造技术发展实践与展望. 中国铁路, 2019, **04**: 1-7)
- 3 He Tian-Xiang, Huang Lin-Ya. Impact of high-speed rail network on regional economic coordinated development in Hunan province based on empirical analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(09): 1439-1449

- (何天祥, 黄琳雅. 高铁网络对湖南区域经济协同发展影响. 地理科学, 2020, **40**(09): 1439–1449)
- 4 Li Ying-Hong. *High-speed Railway Signaling System*. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009.
(李映红. 高速铁路信号系统. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.)
 - 5 Jiang Nan. Discussion on improvement of high-speed railway signaling system safety. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2018, **15**(1): 59–64
(姜楠. 高速铁路信号系统安全性改进探索. 铁路通信信号工程技术, 2018, **15**(1): 59–64)
 - 6 Guo Jin, Zhang Ya-Dong. Study and consideration on Chinese high-speed railway signaling system. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2012, **36**(5): 90–94
(郭进, 张亚东. 中国高速铁路信号系统分析与思考. 北京交通大学学报, 2012, **36**(5): 90–94)
 - 7 Ning Bin, Mo Zhi-Song, Li Kai-Cheng. Application and development of intelligent technologies for high-speed railway signaling system. *Journal of the China Railway Society*, 2019, **41**(03): 1–9
(宁滨, 莫志松, 李开成. 高速铁路信号系统智能技术应用及发展. 铁道学报, 2019, **41**(03): 1–9)
 - 8 Ning Bin, Dong Hai-Rong, Zheng Wei, Xun Jing, Gao Shi-Gen, Wang Hong-Wei, et al. Integration of train control and online rescheduling for high-speed railways: Challenges and future. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(12): 2208–2217
(宁滨, 董海荣, 郑伟, 荀径, 高士根, 王洪伟, 等. 高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望. 自动化学报, 2019, **45**(12): 2208–2217)
 - 9 Delorme X, Gandibleux X, Rodriguez J. Stability evaluation of a railway timetable at station level. *European Journal of Operational Research*, 2009, **195**(3): 780–790
 - 10 Saporì E, Sciutto M, Sciutto G. A quantitative approach to risk management in critical infrastructures. *Transportation Research Procedia*, 2014, **3**: 740–749
 - 11 Liu C, Yang S, Cui Y, Yang Y X. An improved risk assessment method based on a comprehensive weighting algorithm in railway signaling safety analysis. *Safety Science*, 2020, **128**: Article No. 104768
 - 12 Dong S K, Dong H B, Wan C Y. Development and evaluation of a computer-aided system for analyzing human error in railway operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, **95**: 87–98
 - 13 Ding Y, Lin Y, Peng R, Zuo M. Approximate reliability evaluation of large-scale multistate series-parallel systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, **68**(2): 539–553
 - 14 Song Tong, Zhou Yan. Automatic synthesis of fault tree for control systems based on system analysis. *Systems Engineering-Theory Methodology Applications*, 2005, **14**(6): 514–518, 526
(宋彤, 周妍. 基于系统分析的控制系统故障树自动生成. 系统工程理论方法应用, 2005, **14**(6): 514–518, 526)
 - 15 Kyriakidis M, Majumdar A, Ochieng W Y. The human performance railway operational index — A novel approach to assess human performance for railway operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, **170**: 226–243
 - 16 Wang R, Work D B. Data driven approaches for passenger train delay estimation. In: Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria, Spain: IEEE, 2015. 535–540
 - 17 Liu Hao-Yu, He Shi-Bo, Chen Ji-Ming. Data-driven adaptive adjustment strategy for strong wind alarm in high-speed railway. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(12): 2242–2250
(刘昊宇, 贺诗波, 陈积明. 数据驱动的高速铁路强风报警自适应解除策略. 自动化学报, 2019, **45**(12): 2242–2250)
 - 18 Zhang Qi, Chen Feng, Zhang Tao, Yuan Zhi-Ming. Intelligent prediction and characteristic recognition for joint delay of high speed railway trains. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(12): 2251–2259
(张琦, 陈峰, 张涛, 袁志明. 高速铁路列车连带晚点的智能预测及特征识别. 自动化学报, 2019, **45**(12): 2251–2259)
 - 19 Podofilini L, Zio E, Vatn J. Risk-informed optimisation of railway tracks inspection and maintenance procedures. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, **91**(1): 20–35
 - 20 Wang W. A model for maintenance service contract design, negotiation and optimization. *European Journal of Operational Research*, 2010, **201**(1): 239–246
 - 21 Wang W. An inspection model based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, **96**(7): 838–848
 - 22 Wang W. Maintenance models based on the np control charts with respect to the sampling interval. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, **62**(1): 124–133
 - 23 Wang W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, **106**: 165–178
 - 24 Andrews J, Prescott D, De Rozières F. A stochastic model for railway track asset management. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, **130**: 76–84
 - 25 Leighton C L, Dennis C R. Risk assessment of a new high-speed railway. *Quality & Reliability Engineering International*, 2010, **11**(6): 445–455
 - 26 An M, Chen Y, Baker C J. A fuzzy reasoning and fuzzy-analytical hierarchy process based approach to the process of railway risk information: A railway risk management system. *Information Sciences*, 2011, **181**(18): 3946–3966
 - 27 An M, Qin Y, Jia L M, Chen Y. Aggregation of group fuzzy risk information in the railway risk decision making process. *Safety Science*, 2016, **82**: 18–28
 - 28 Wei Yuan-Yuan, Zuo Zhong-Yi, Cheng Wei, Meng Zi-Yue. Application of F-ANP method in risk assessment of high-speed railway. *China Safety Science Journal*, 2020, **30**(S1): 165–171
(魏圆圆, 左忠义, 程伟, 孟子悦. F-ANP 法在高速铁路风险评估中的应用. 中国安全科学学报, 2020, **30**(S1): 165–171)
 - 29 Zhang You-Peng, Li Yuan-Yuan. Risk assessment of railway signal system based on cloud model and evidence theory. *Journal of China Railway Society*, 2016, **38**(1): 75–80
(张友鹏, 李远远. 基于云模型和证据理论的铁路信号系统风险评估. 铁道学报, 2016, **38**(1): 75–80)
 - 30 Sun S, Zhang C, Yu G. A Bayesian network approach to traffic flow forecasting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, **7**(1): 124–132
 - 31 Yang C H, Yang C, Peng T, Yang X Y. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(7): 5719–5727
 - 32 Su H, Che Y. Reliability assessment on CTCS-3 train control system using faults trees and Bayesian networks. *International Journal of Control and Automation*, 2013, **6**(4): 271–292
 - 33 Jiang Lei, Wang Xiao-Min, Liu Yi-Liu, Chen Guang-Wu. DBN-based operational reliability and availability evaluation of CTCS3-300T onboard system. *Journal of the China Railway Society*, 2020, **42**(03): 85–92
(江磊, 王小敏, 刘一骊, 陈光武. 基于动态贝叶斯网络的 CTCS3-300T 列车车载系统运行可靠性及可用性评估. 铁道学报, 2020, **42**(03): 85–92)
 - 34 Zhang Xi, Du Xu-Sheng, Liu Zhao-Ying. Development of railway station signaling control equipment fault diagnosis expert system. *Journal of the China Railway Society*, 2009, **31**(3): 43–49
(张喜, 杜旭升, 刘朝英. 车站信号控制设备故障诊断专家系统的研究与实现. 铁道学报, 2009, **31**(3): 43–49)
 - 35 Zhao Qing-He. Research on System-level Fault Diagnosis of High-speed Railway Signaling System [Master dissertation], Beijing Jiaotong University, China, 2014
(赵青鹤. 高铁信号系统的系统级故障诊断方法研究 [硕士学位论文]. 北京交通大学, 中国, 2014)
 - 36 Zhou Dong-Hua, Ji Hong-Quan, He Xiao. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(7): 1153–1164
(周东华, 纪洪泉, 何潇. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术. 自动化学报, 2018, **44**(7): 1153–1164)
 - 37 Zhan Shu-Guang, Zhao Jun, Peng Qi-Yuan. Real-time train rescheduling on high-speed railway under partial segment blockages. *Journal of the China Railway Society*, 2016, **38**(10): 1–13
(占曙光, 赵军, 彭其渊. 高速铁路区间能力部分失效情况下列车运行实时调整研究. 铁道学报, 2016, **38**(10): 1–13)

- 38 Zhan Shu-Guang, Zhao Jun, Peng Qi-Yuan, Xu Pei-Juan, Zhang Xin-Zhu. Real-time train rescheduling on high-speed railway under complete segment blockages. *Journal of the China Railway Society*, 2015, **27**(11): 1-9
(占曙光, 赵军, 彭其渊, 徐培娟, 张馨竹. 高速铁路区间能力全失效条件下列车运行实时调整研究. 铁道学报, 2015, **27**(11): 1-9)
- 39 Louwerse I, Huisman D. Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockages. *European Journal of Operational Research*, 2014, **235**(3): 583-593
- 40 Long Si-Hui, Meng Ling-Yun, Wang Yi-Hui, Luan Xiao-Jie, Zhang Peng. A bi-objective integrated optimization model of high-speed train rescheduling and train control. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, **20**(06): 163-169
(龙思慧, 孟令云, 王义惠, 栾晓洁, 张鹏. 高速列车运行调整与运行控制一体化双目标优化模型与算法. 交通运输系统工程与信息, 2020, **20**(06): 163-169)
- 41 Sun Y, Cao C, Wu C. Multi-objective optimization of train routing problem combined with train scheduling on a high-speed railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, **44**: 1-20
- 42 Dollevoet T, Huisman D, Kroon L G, Veelenturf L P, Wagenaar J C. Application of an iterative framework for real-time railway rescheduling. *Computers & Operations Research*, 2017, **78**: 203-217



林 鹏 中南大学自动化学院教授。主要研究方向为多智能体系统分布式控制与优化, 高速铁路控制与调度优化。E-mail: lin_peng@csu.edu.cn

(**LIN Peng** Professor at the School of Automation, Central South University. His research interest covers

distributed control and optimization of multi-agent system, control and scheduling optimization of high-speed railway.)



田 宇 中南大学自动化学院硕士研究生。主要研究方向为智能交通系统, 高速铁路多列车协同控制与调度优化。E-mail: Yu_Tian@csu.edu.cn

(**TIAN Yu** Master student at the School of Automation, Central South University. His research interest covers intelligent transportation system, multiple trains cooperative control and scheduling optimization of high-speed railway.)



袁志明 中国铁道科学研究院集团有限公司研究员。主要研究方向为铁路运营指挥, 铁路信号控制和铁路智能调度。E-mail: zhimingyuan@hotmail.com

(**YUAN Zhi-Ming** Research fellow at China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. His research interest covers railway traffic management, railway signaling control, and intelligent train operation.)



张 琦 中国铁道科学研究院集团有限公司首席研究员。主要研究方向为铁路通信信号, 列车自动驾驶, 列车运行控制和多列车智能调度与协同控制。E-mail: zhangqi@rails.cn

(**ZHANG Qi** Chief research fellow at China Academy of Railway Sciences Corporation Limited. His research interest covers railway signal and communication, automatic train operation, train operation control, and intelligent dispatching and cooperative control of multiple trains.)



董海荣 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授。主要研究方向为列车运行智能控制与优化, 调度控制一体化。E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn

(**DONG Hai-Rong** Professor at the State Key Laboratory of Rail

Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. Her research interest covers intelligent control and optimization of train operation, integration of scheduling and control.)



宋海锋 北京交通大学电子信息工程学院副教授。主要研究方向为交通系统安全评估, 交通智能控制与优化。E-mail: songhf@bjtu.edu.cn

(**SONG Hai-Feng** Associate professor at the School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University. His research interest covers transportation systems safety evaluation, traffic intelligent control and optimization.)



阳春华 中南大学自动化学院教授。主要研究方向为复杂工业过程建模与优化, 故障诊断和智能系统。本文通信作者。E-mail: ychh@csu.edu.cn

(**YANG Chun-Hua** Professor at the School of Automation, Central South University. Her research interest covers complex industrial process modeling and optimization, fault diagnosis, and intelligent system. Corresponding author of this paper.)