

高速铁路网格化管理理论与关键技术

王 峰

(上海铁路局, 上海 200071)

摘要: 高速铁路具有高度集成、高精度的技术特点,运营过程中经受列车质量、速度、密度等多种因素影响,地理位置因素往往是影响铁路设备状态演变的关键性因素。采用网格化管理技术可将空间上连续分布的管理对象划分成较小的单元网格,有利于从空间位置角度研究管理对象状态的变化规律。随着信息系统技术、大数据技术的迅猛发展,基于位置而不是基于专业更符合高速铁路的管理需求,网格化管理技术给高速铁路管理带来了新的视角。

关键词: 高速铁路; 网格化; 全寿命; 大数据; 评定

中图分类号: U238 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2014)01-0050-06

我国已成为高速铁路系统技术最全、集成度最高、运营里程最长、运行速度最快,在建规模最大的国家,已开通 30 条高速铁路,投入运营的高速铁路总里程已超过 1 万 km,居世界首位。根据中长期铁路网规划(2008 年调整),到 2020 年,我国高速铁路营业里程将达到 1.6 万 km 以上。高速铁路网投入运营的同时,如何保障高铁运行安全畅通、养护维修成本有效控制,给铁路运营管理部门提出了巨大的挑战。传统的故障修和周期修的维修模式,以及分专业对设备进行养护维修管理,已无法满足高速铁路高修理标准、高平顺性、高稳定性、高可靠性的要求,必须采用新理念、新技术、新手段,对高速铁路管理理论、方法和技术进行创新^[1]。

1 高速铁路主要技术特点

高速铁路是一项复杂的系统工程,由工务工程、牵引供电、通信信号、动车组、运营调度、客运服务等子系统构成,他们的共同特点是具有一定的空间位置,与周围地理环境融为一体,大部分个性化定制,状态的变化与环境密不可分。

高速铁路的建造涉及到材料、加工、施工、测量、控制、通信、计算机等多种学科领域的技术成果,设备本身及设备制造过程中的智能化程度显著提高。如高速铁路工务设备具有无砟轨道、新型桥梁、高架长桥、宽大隧道、刚度均匀、沉降控制、精密控制、动态优化、灾害预防、环境友好等十大技术特点^[2]。高速铁路信号系统高度信息化、自动化、集中化,主要由调度集中、列车运行控制、车站联锁、集中监测等子系统组成^[3]。调度集中系统(CTC)能远距离控制管辖范围内的信号机、转辙机和列车进路,集中监测系统主要监测信号设备的电气特性和转辙设备机械特性,实现预警分析和故障诊断,监督、记录信号设备与电力、车务、工务等结合部的有关状态。高速铁路牵引供电系统具有综合一体化远程监控能力,采用 SCADA(supervisory control and data acquisition)系统对牵引供电、电力等机电系统运行及设备状态进行实时监控管理。

高速铁路由高质量及高稳定的基础设施、性能优越的高速列车、先进可靠的列车运行控制、高效的运输组织与运营管理架构等综合集成。各子系统之间既自成体系,又相互关联,围绕整体统一的管理目标,

DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2014.01.10

收稿日期: 2013-08-26

作者简介: 王峰 男 1963 年出生 教授级高级工程师

基金项目: 上海铁路局科研计划项目(2013093)

彼此兼容,完整结合^[4],形成一个复杂的巨系统。以道岔为例,工务提供基本的辙叉设备,而电气部分转辙机则是信号和供电两个专业共同作用,信号专业提供转辙指令,供电专业提供转辙的动力。

高速铁路的设备在运营过程中受到列车运行的冲击和自然环境的影响,相同专业不同设备之间,或不同专业设备之间的状态变化具有高度关联的特征。在空间位置关系上,如路基、桥梁和隧道建筑物支撑轨道、接触网和通信信号等设备,它们的变形直接影响到它所承载的设备状态和可靠性。由于高速铁路的设备高度关联,在空间位置上的相互依赖,导致他们状态演变过程的关联性。以弓网设备为例,当轨道出现变形病害,弓网设备也将出现故障。

2 高速铁路网格化管理的理论基础

高速铁路网格化管理从基于位置管理观点出发,围绕铁路设备状态演化对空间位置的依赖性这一基本事实,利用现代信息技术和协调机制,整合维修资源,按照空间位置把握设备薄弱环节、安排修理计划,从而提高设备管理效率,实现智慧的维修决策。如图1所示,高速铁路网格化管理以工务等专业设备理论为业务基础,利用设备全生命周期管理理论,研究网格的数据标准和编码标准;根据统计学及可靠性数学理论,建立网格的评价体系,同时结合大数据技术,针对不同的管理需求,形成个性化的设备状态劣化规律模型和寿命分布模型建模方法;根据数据库技术、地理信息系统、大数据技术等构建综合数据平台,存储设备全生命周期内产生的数据,研究网格个性化的时间、空间分析方法,辅助设备管理人员做出更智慧的设备维修决策,对铁路安全风险及维修成本进行有效控制。

2.1 设备全生命周期管理的有效融合

全生命周期管理有利于透彻的感知设备状态。通过对高速铁路的规划、设计、建设、运营等阶段的信息管理,采集其历史和当前信息,可辅助管理者实现在时间维度上更透彻地感知设备历史,做到对历史数据的快速追溯;对各种原始记录,如设备的故障史、诊断与维修经验的积累和理论性总结工作进行有效管理,使高速铁路相关资料实现多层次的数据共享。

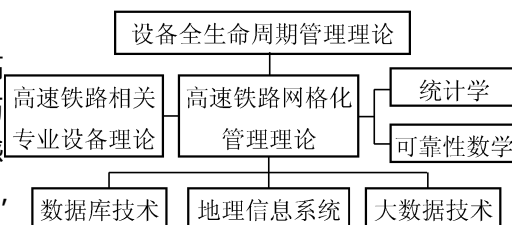


图1 高速铁路网格化管理理论基础构架

全生命周期管理有利于更智慧的设备管理决策。运用设备全生命周期管理的理念,对设备的寿命分布规律建模,掌握设备状态的变化规律,预测设备实际使用寿命;对设备不同阶段的多风险因素进行分析、评价和控制,实现对设备风险全面评价的目的;对设备的全生命周期成本进行分析和决策,优化设备质量,以获取最大的效益。基于时间维度的设备全生命周期管理与基于地理空间维度的网格化管理相结合,可真正实现基于时间维度与空间维度的时空分析,对不同空间位置上设备全生命周期的分布规律进行个性化建模,满足高速铁路设备个性化分析的需求,辅助管理者精准管理,对安全隐患科学预判,做到风险控制的科学管理,从而实现更智慧的管理决策。

2.2 大数据技术辅助决策

大数据的特征分别是规模性(volume)、多样性(variety)、高速性(velocity)、精确性(veracity)和价值性(value)^[4-5]。高速铁路网格化管理需要不同专业的管理者共享同一网格内的所有的属性数据,利用大数据技术,可以打破铁路传统管理中存在的“信息孤岛”问题,真正实现基于位置的信息互联互通。

大数据的价值正在促使各行各业的决策从业务驱动转变为数据驱动。高速铁路数据集具有典型的大数据特征,利用大数据技术,可以辅助实现多源、异构、多尺度的高速铁路网格化管理基础数据的高效组织管理,为网格化管理奠定数据基础。不同空间位置上的设备的状态独特变化规律一定隐含在该空间位置上的设备全生命周期过程中产生的大数据中,从海量的数据中发现新的模式、新的知识和新的规律,找到影响网格状态变化的强相关的因素,进而实现个性化建模,发掘出个体的寿命分布模型,是大数据技术的独特优势。统一的经验公式或统计模型都是对变化规律一定程度的近似,常常是较低程度的近似。因为这些公式忽略了地理环境变量的作用,而地理环境变量往往起着决定性的作用。大数据技术是解决这一困难的最好手段,风险及产生风险的原因一定隐藏在设备的大数据之中,通过数据挖掘与分析,我们

能够找到他们,并通过及时采取对策实现对风险的控制。

铁道部针对设备管理提出了“零误差、零故障、零缺陷”的维修理念,而大数据将辅助我们发现新的设备管理知识。通过在线性能评价和剩余寿命的动态预测,实时地分析设备/部件性能衰退趋势,预报可能发生故障的时间,达到在失效之前维护、维修的目的^[6]。

2.3 信息技术管理的优越性

寻找影响运输安全关键设备对高速铁路管理至关重要。成功的预防来自于对设备健康状况的准确把握,以及设备状态未来变化趋势的科学预判。传统的安全管理方法,对设备状态日常监控、分析预测不够深入,靠短时间内的集中普查难以找到问题的真正原因,安全隐患难以根除。同时,设备病害或故障产生的原因多种多样,涉及设备本身的特点、不同设备之间相互影响、设计缺陷、建造原因、维修不当和地理环境等因素,分析与诊断设备病害或故障原因是高速铁路管理的重要环节。设备的病害或故障一般来说只是表象,产生有其深刻的发生机理。要做好分析和诊断工作,必须全面收集设备状态数据信息,有针对性地选择分析工具。因此,掌握网格内设备状态变化规律至关重要,这需要对设备属性信息按空间位置进行叠合分析和时序分析,采用 GIS(地理信息系统)的空间数据挖掘技术,可以从时间空间两个维度分析设备状态,建立个体设备的状态劣化模型,可实现对安全隐患的预警。

目前,高速铁路采用综合维修模式,能够加强维修机械化、专业化,并能促进不同专业之间的联动性,提高维修天窗利用效率。要进行综合维修,也需要了解不同专业的设备病害或故障在空间上的分布情况,按空间位置整合不同专业的维修资源;在维修任务确定后,不同活动之间存在着时间约束、空间距离约束,需要一个强大的时空分析与优化工具,保证施工安全、施工质量,并节约维修成本。GIS 的叠合分析技术、时空分析技术、可视化表达技术能够满足上述需求,实现维修资源的整合,辅助管理人员达到不同专业设备进行综合维修的管理要求。

3 高速铁路网格化管理技术措施

高速铁路网格化管理可将网格、部件(设备)、事件相关的空间数据、属性数据通过 GIS 技术整合到一个平台上,如图 2 所示。电子文库是进行设备状态分析与对比的基础;设备状态分析是设备网格化管理的核心;设备状态对比能找出各类设备中状态最差的设备,是网格化管理的重要环节;数据采集软件是各属性数据的入口。

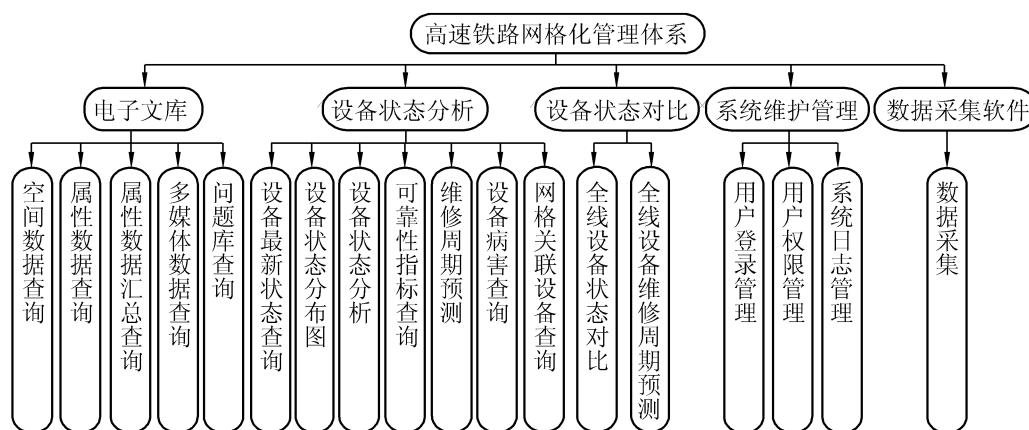


图 2 高速铁路网格化管理结构图

3.1 高速铁路网格的定义与划分

网格化管理的基本要素包含网格、部件(或设备)和事件^[7]。部件是指网格内不同专业设备,不同设备在空间布局、组成结构方面各有特点;事件是指部件的一种属性信息,反映其一种状态,可通过检查或检测手段获得,也包括与部件有关的各种管理行为。高速铁路网格是将连续的铁路线路离散化,即按一定规则进行分割,形成众多小的线路区段,每个线路区段称为网格单元。由于铁路用地呈带状分布,线长、点多、面广,设备分布密集,且铁路两侧的地界宽度是确定的,因此可采用以线路的长度来划分。基于

地理网格划分的原则,且考虑到符合现有业务专业管理的特点,高速铁路可采用 200 m 线路区段作为基本网格单元,以高速铁路的百米标作为相邻网格的分界点。

3.2 高速铁路网格状态评定的实现

网格的状态评定是基于网格内部件的整体表现做出的,是对部件集合的综合运行状态的度量。网格的状态既与部件状态有联系,又有自己的独特性。可靠性评价可以采用稳态可用度、平均病害率、病害重复度、病害集中度等指标。

稳态可用度是指设备在长时间运用过程中平均处于正常状态的时间比例,反映了设备在长期使用过程中经过反复磨合逐步稳定下来以后的可用程度^[8]。它对人们从全寿命过程整体的角度认识设备的完好程度与设备持续工作能力具有十分重要的作用。高速铁路设备可用度计算流程如图 3 所示。平均可用度是指网格内的所用行车固定设备的稳态可用度的加权平均,是衡量网格内不同专业不同种类设备状态的综合评价指标。根据该指标的大小,可以对网格状态进行排序,确定需要进行重点管理的网格。

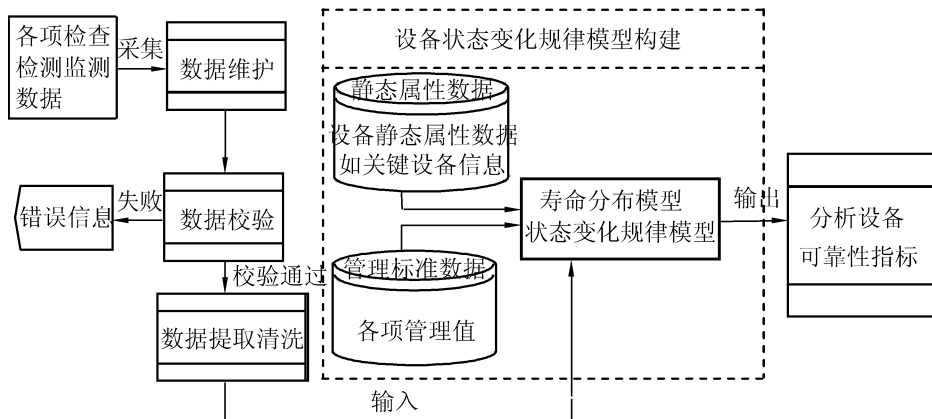


图 3 高速铁路设备可靠性指标计算流程

平均病害率是指网格内的所有设备在一定的时间范围内的平均病害或故障率的加权平均,是衡量网格内不同专业不同种类设备状态的综合评价指标,确定安全隐患较严重的网格。

病害重复度是指在一定的时间范围内同一部位出现相同病害或故障的次数,可以反映设备维修验收工作情况或设备设计上的缺陷,辅助管理人员把握设备质量状态,是衡量高速铁路设备状态的重要参数。平均病害重复度是指网格内的所有设备在一定的时间范围内的平均病害重复度的加权平均,是衡量网格内不同专业不同种类设备状态的综合评价指标,对该指标较大的网格单元,需要高度关注,认真分析产生的原因,采取恰当的维修措施。

病害集中度可用衡量有一定延展长度的设备(如钢轨、曲线、桥梁、隧道、长大下坡道等),在空间上病害或故障密集发生的程度,是指同一时刻设备单位延展长度空间内病害或故障的数量。利用该指标可确定整条线路需要重点关注的设备或地段。平均病害集中度是指网格单元内的所有设备在同一时刻单位长度内的病害或故障的数量。平均病害集中度是衡量网格内不同专业不同种类设备状态的综合评价指标,用于衡量网格状态,确定整条线路需要重点关注的网格。

高速铁路网格状态分析以电子文库为基础,对网格、部件的状态进行统计分析,并根据每个设备的具体情况,构建其各自的寿命分布模型,获得设备运行可靠性指标,并对未来一段时间内设备的状态进行分析预测,如图 4 所示。由于高速铁路设备的劣化具有典型的浴盆曲线特征,可以划分为早期失效期、偶然失效期和磨损失效期三个阶段^[9]。高速铁路设备的早期失效期较短,一般在联调联试及试运营阶段对设备暴露的问题及时解决,并使设备状态稳定下来,主要应对设备在偶然失效期和磨损失效期的状态变化规律建模,可采用工程界中常用的指数分布、韦布尔分布或伽玛分布(Γ 分布)来进行设备寿命可靠性分析^[10]。其中,韦布尔分布的失效率函数

$$r(t) = \lambda \alpha (\lambda t)^{\alpha-1} \quad (1)$$

高速铁路网格化管理将所有网格内全生命周期的属性信息进行整合,网格、部件、事件均有编码,进行唯

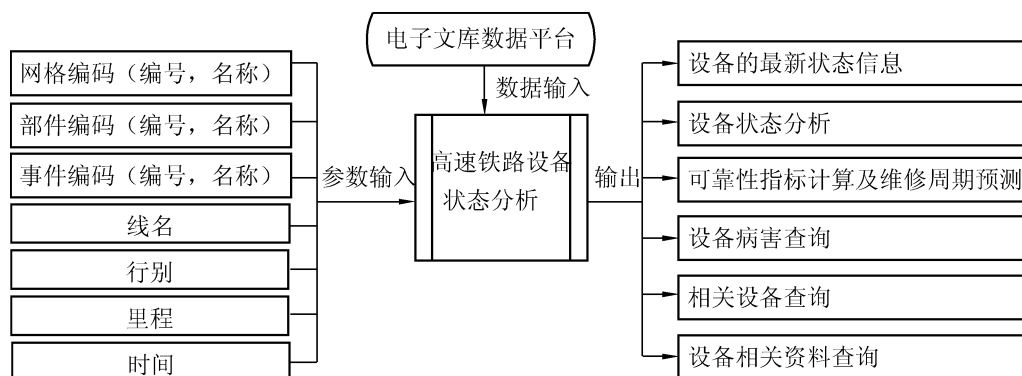


图 4 高速铁路网格内设备状态分析图

一标识。利用设备的唯一编码,可以从大数据集中,抽取到目前时刻 t 为止,该设备在全生命周期各阶段的病害或故障时间点,构成相应的时间序列 $\{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$ 。该时间序列数据是描述该设备寿命的截止时刻 t 的截尾数据。利用不同设备的不同截尾数据,可以确定每个设备独特的参数 α 和 λ ,得到每个设备的独特的寿命分布模型,从而辅助定量地掌握每个设备的独特状态,合理安排各项工作,保障铁路行车安全。

图 5 是宁杭高速铁路网格(219.2~219.4 km 下行)在 2013 年 3 月至 5 月联试联调期间历次轨道动态不平顺检测数据以及 TQI(轨道质量指数)随时间的变化趋势图。其中,横轴代表时间,纵轴代表 TQI 值,图中圆点表示该网格在某一时刻的 TQI 值,三角形表示该网格在某一时刻进行了轨道精调维修。可以看出,在 3 月 1 日至 9 日期间,该网格的 TQI 值大部分处于[4, 4.5]区间之间;当 3 月 10 日进行轨道精调维修后,直到联调联试结束,该网格 TQI 值均处于在[2, 3]区间之间,且变化幅度很小。说明在联试联调阶段,网格设备处于早期失效期,经过设备精调以及相互磨合,失效率逐渐减少并趋于稳定。

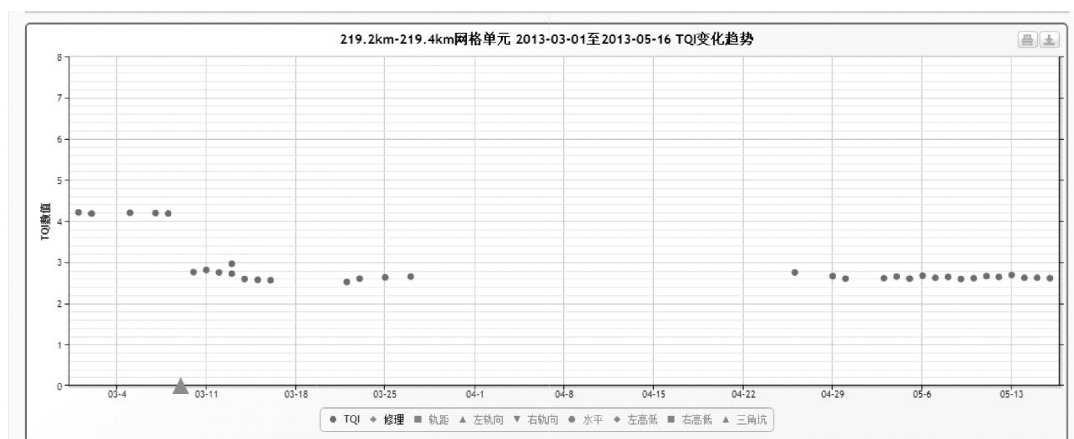


图 5 宁杭高速铁路网格(219.2~219.4 km 下行)状态分析图

联调联试期间该网格发生了 4 种类型共 21 次病害,其中轨距变化率 1 级超限 18 次,轨距变化率 2 级超限 1 次、三角坑 1 级超限 1 次、小轨距 1 级超限 1 次。网格在联调联试的 5 月份的平均病害率为 0.002 98(个/d),在全线共 2 520 个网格中位于第 81 位,说明该网格状态较为薄弱,需在后续的运营阶段重点关注。根据历次 TQI 检测数据,可初步分析得到该网格轨道状态分布函数为,拟合的曲线如图 6 所示,在 2013 年 7 月以后, TQI 月度变化率将小于 0.05,可初步判定此时该网格由早期失效期逐渐过渡到了偶然失效期阶段。随着运营期检测数据的逐渐积累,由该预测图可以看出该网格的 TQI 在未来何时将达到临界点而必须进行修理。

4 结语

网格化管理综合了数字铁路与智慧铁路二者的技术优势和管理理念,在设备管理领域进行了应用创

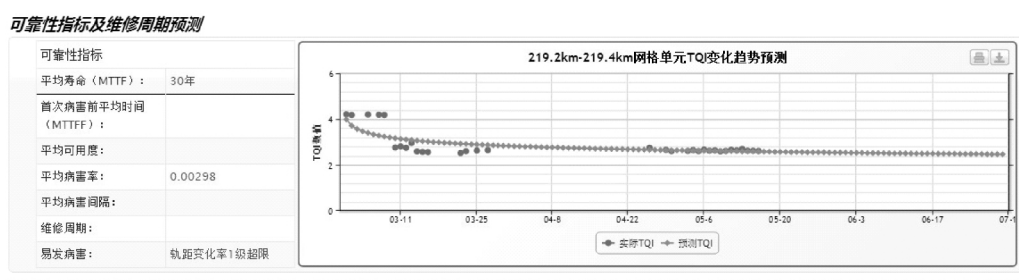


图 6 宁杭高速铁路可靠性指标及维修周期预测图

新,是智慧铁路的典型应用。网格化管理的数据平台技术与数字铁路的空间数据库构建技术是一致的,但网格化管理提出了一种新的业务管理模式,是对数字铁路在高速铁路设备管理领域中的应用和发展,体现了智慧铁路的理念,强调不仅在专业部门内部,而且要在专业部门之间实现信息互联互通,并在积累形成的大数据集基础上建立模型,实现针对设备状态检测、设备状态评定、设备修理计划编制的智慧决策。高速铁路网格化管理是从空间的角度而不是从专业的角度管理高速铁路设备,采用基于 GIS 技术的时空分析方法,为管理提供决策支持,实现了管理流程的创新,在宁杭高速铁路联调联试期间,上海铁路局初步建立了网格化管理体系,有效地指导了轨道精调、接触网精调等工作。

参 考 文 献

- [1] 王峰,姚建伟,张骏. 高速铁路联调联试管理与技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [2] 何华武. 创新的中国高速铁路技术(上)[J]. 中国工程科学, 2007, 9(9): 4-18.
- [3] 程先东. 中国高速铁路系统集成方法与工程实践[J]. 中国铁路, 2010(12): 38-41.
- [4] 孟小峰, 慈祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146-169.
- [5] 李国杰, 程学旗. 大数据研究: 未来科技及经济社会发展的重大战略领域——大数据的研究现状与科学思考[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(6): 647-657.
- [6] Lee J. Intelligent prognostics tools and e-maintenance[J]. Computers in Industry, 2006, 57(6): 476-489.
- [7] 陈平. 依托数字城市技术创建城市管理新模式[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(3): 220-222.
- [8] 王立超. 系统可用度匹配化分析与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [9] 詹刚, 许玉德, 周宇. 重载铁路曲线钢轨型面的发展规律分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(4): 72-76.
- [10] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

Management Theory and Key Technology of Grid in High-speed Railway

Wang Feng

(Shanghai Railway Administration, Shanghai 200071, China)

Abstract: High-speed railway, which has the technical characteristics of high integration and high precision, subjects to various influence factors of train weight, speed, density and so on in the operation process. However, the geographical position is often the decisive factor which affects the state evolution of railway equipments. Using the grid management technology can spatially divide continuously distributed management objects into smaller unit grids, which is conducive to studying the change regulations of the management objects state from the spatial perspective. With the rapid development of information system technology and large data technology, grid management, based on location rather than profession, is more in line with the administration demand of high-speed railway. Grid management technology has brought new perspective for high-speed railway management.

Key words: high-speed railway; grid; whole life; large data; assess

(责任编辑 刘宪福)