

文章编号:1671-1637(2015)01-0108-11

改进 ANP 的无线闭塞中心管控能力评价模型

陈建球,唐 涛,袁 磊

(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)

摘要:分析了影响无线闭塞中心(RBC)管控能力的多种因素,研究了不同因素间的关系,应用网络层次分析法(ANP)建立了RBC管控能力评价模型。为了降低评价中人为主观性影响与提高评价结果的可信性,在ANP评价过程引入了专家均值置信法,建立了ANP评价模型。以京沪高铁和郑西高铁下行区段第1个RBC(RBC-JH1、RBC-ZX1)的实际布置为例,使用SD软件求解模型,获得了RBC管控能力影响因素的定量排序。研究结果表明:管辖范围、控制车站数、非周期数据处理、注册受控列车数量、单个RBC最大控车容量、周期数据处理、车站复杂度、无线信道传输延时的权重分别为0.167、0.095、0.092、0.090、0.086、0.072、0.064、0.058,它们对RBC管控能力的影响较大,在实际RBC布置中,需要优先考虑这些因素;得到了RBC-JH1的权重为0.037,RBC-ZX1的权重为0.039,结合需要优先考虑的因素,建议RBC-JH1的管辖范围可以扩展至中继站6。改进ANP评价模型对无线闭塞中心管控能力评价的适用性较好,结合已有的RBC布置数量计算公式,可确定一条线路RBC管控范围和布置数量。

关键词:列车运行控制系统;无线闭塞中心;管控能力;网络层析分析法;专家均值置信法

中图分类号:U283.2

文献标志码:A

Management-control capability evaluation model of radio block center based on improved ANP

CHEN Jian-qiu, TANG Tao, YUAN Lei

(State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Various factors affecting the management-control capability of radio block center(RBC) were analyzed. The relationship among the factors was researched. The evaluation model of management and control capability of RBC was built by analytic network process (ANP). In order to reduce the influence of subjectivity and improve the credibility of evaluation results, the experts mean assessment was introduced to ANP evaluation process. Taking the real layouts of the first RBCs(RBC-JH1, RBC-ZX1) in the down direction of Jinghu and Zhengxi High-Speed Railways as example, the ANP evaluation model was built, and SD software was used to solve the model. The quantitative ordering of various influence factors was obtained. Analysis result indicates that the covered line area, control station number, non-cycle data dealing, the number of registered control trains, the maximum control train number of a single RBC, cycle data dealing, station complexity and the transmission delay time of wireless channel are key influence factors, their weights are 0.167, 0.095, 0.092, 0.090, 0.086, 0.072, 0.064 and 0.058,

收稿日期:2014-09-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61374201,U1434209);国家国际科技合作专项项目(2012DFG81600);轨道交通控制与安全国家重点实验室自主研究课题(RCS2014ZT06,RCS2011ZZ001)

作者简介:陈建球(1984-),男,广西河池人,北京交通大学工学博士研究生,从事列车运行控制系统研究。

导师简介:唐 涛(1963-),男,河南洛阳人,北京交通大学教授,工学博士。

respectively. In the real RBC layout, the key influence factors should be given the priority because they have larger influence on the control capability of RBC. The weight of RBC-JH1 is 0.037, and the weight of RBC-ZX1 is 0.039. Considering the priority influence factors, the jurisdiction of BC-JH1 can be extended to the sixth relay station. The applicability of improved ANP evaluation model is proved in evaluating the RBC management and control capability. Combination with the calculation formula of RBC layout number, the management-control range and layout number of RBC in a railway line can be determined. 9 tabs, 6 figs, 22 refs.

Key words: train control system; radio block center; management-control capability; analytic network process; experts mean assessment

Author resumes: CHEN Jian-qiu(1984-), male, doctoral student, +86-10-51467246, chenjq@bjtu.edu.cn; TANG Tao(1963-), male, professor, PhD, +86-10-51467246, ttang@bjtu.edu.cn.

0 引言

无线闭塞中心(Radio Block Center, RBC)是中国列车运行控制系统第3级(Chinese Train Control System Level 3, CTCS-3)核心地面设备之一,它的一个重要功能是计算其管辖范围内列车的运行许可,并通过无线通讯网将运行许可发送给列车。一条线路上RBC布置数量和管辖范围对行车效率与工程投资有较大的影响。RBC布置数量的计算目前还没有标准规范可依^[1]。沈志凌总结了RBC数量计算的一些原则和参数,提出了单个RBC管辖范围内列车数量的计算方法^[1];石先明根据RBC设备的功能、接口等相关参数推算出了一条线路RBC布置数量的计算公式^[2];赵宇坤深入研究了一条线路RBC布置数量的计算公式,提出了更多的考虑因素,如无线网络对RBC控车容量的影响等^[3]。以上研究给出的公式考虑了影响RBC布置数量的定量因素,可以计算一条线路中需要布置的RBC数量,但每一个RBC的管控范围公式未明确,只是根据线路数据计算RBC数量不能充分发挥RBC的能力,并且影响RBC布置的因素相互影响,各因素对RBC管控能力的影响不一样,RBC的布置需要贯彻安全适用、技术先进、经济合理的理念^[2]。一条线路RBC布置数量不仅受定量因素的影响,还受到定性因素的影响,如RBC的维护适用性也对RBC布置有一定的影响。如果可以首先通过公式计算出一条线路需要布置的RBC概数,再充分考虑影响RBC管控能力的主要因素,以此为据共同调整RBC布置的实际数量和管控范围将更为科学。影响RBC管控能力的因素较多,面面俱到进行考虑不太现实,需要从中找到关键因素,对影响RBC管控能力的因素进行定量排序,转化为因素评价问题。

网络层次分析法(Alytic Network Process, ANP)是一种比较成熟的评价方法,与层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)相比,ANP方法在解决因素间存在相互关系的问题上更具优势,因此,其在评价受相互作用因素影响的方案、设计、性能等方面有较多的实际应用。任伟等使用ANP方法评价了舰舰导弹的性能,采用问卷调查法对3种舰舰导弹方案进行了对比分析,为舰舰导弹的方案选型提供了一种可靠的方法^[4];石福丽等建立了潜艇装备作战能力的ANP幂指数评估流程,并与AHP幂指数评价模型进行了比较分析,验证了ANP方法的合理性和有效性^[5];王海涌等使用ANP方法确定主观权重,基于变精度粗糙集确定客观权重,得到了高速列车舒适性综合评价指标权重^[6];李金超等采用ANP方法解决了电网企业运营能力的评价问题,证明了方法在电网运营能力评价中的适用性^[7];赵高强等结合ANP方法和灰色聚类决策法评价了风电项目的经济外部性,指出环境效益和市场影响是影响风电项目经济外部性的最主要因素,灰色聚类决策法有利于弥补ANP方法主观性过大的缺点^[8];王效俐等建立ANP评价模型评价物流供应链突发事件合作补救能力,并使用SD软件求解模型^[9];陈志祥分别使用AHP和ANP 2种方法评价供需协调绩效,指出在非线性组合中使用ANP方法更为可行^[10];Saaty比较分析了AHP方法和ANP方法的适用性,指出在评价因素之间有反馈关系的情况下使用ANP方法更为合理^[11]。以上学者在不同领域验证了ANP方法在处理非线性组合与评价因素之间存在反馈和依存关系问题上的适用性。ANP方法和AHP方法一样,它们的输入数据均来自于人为主观性评价,如果不采取一定的方法降低人为主观性的偏差,会对评价结

果造成极大的影响。田小革等使用了熵值法来降低人为主观影响,将实测数据的客观性和评价分级的主观性进行结合^[12];Wang 等将数据包络分析法加入到评价中,通过仿真测试数据的客观性和评价分级主观性相结合来降低人为主观性的影响^[13]。本文在以上研究的基础上,对 ANP 方法的步骤进行改进,并将其应用于 RBC 管控能力的评价研究中。由于影响 RBC 管控能力的因素之间存在依存关系,使用 ANP 方法来对这些因素进行评价分析是合理的,但直接使用 ANP 方法会由于人为主观性的影响降低评价结果的可信性。为了降低 ANP 方法人为主观性的影响,本文首先对 ANP 方法的输入数据进行改进处理,再使用 ANP 方法建立 RBC 管控能力评价模型,获得影响因素的定量排序。

1 改进 ANP 的评价模型

1.1 ANP 方法概述

ANP 方法与 AHP 方法均由最高层的目标层和底层的决策层 2 部分组成。与 AHP 方法相比,ANP 方法的优点是允许决策层中各影响因素之间具有相互作用,因此,ANP 方法中的决策层也称为网络层。ANP 方法的标准计算步骤如下^[9-14]。

Step 1: 计算超矩阵。

ANP 方法中将网络层中各因素相对于目标层准则的优势度称为超矩阵,也称未加权超矩阵。假设网络层中有 N 个簇组,则有

$$W_{ij} = (w_{in_i, jn_j}) \quad (1)$$

式中: n_i 为簇组 i 中因素的个数, $i=1, 2, \dots, N$; n_j 为簇组 j 中因素的个数, $j=1, 2, \dots, N$; W_{ij} 为簇元素特征向量矩阵。

如果簇组 i, j 之间没有依存关系,则 W_{ij} 为 0 。将所有 W_{ij} 进行合并构成未加权超矩阵,表示为

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ W_{N1} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: W 为未加权超矩阵,代表网络层中每个簇组因素之间的相对优势度。

此外还需要确定簇组相对于准则的优势度,以目标层因素为准则,计算不同簇组对目标层准则的重要性,得到簇权重矩阵,表示为

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{N1} & \cdots & e_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: E 为簇权重矩阵; e_{ij} 为 W_{ij} 相对于目标层准则

的权重。

Step 2: 计算加权超矩阵。

ANP 方法的加权超矩阵是反映网络层簇组因素相对于目标层准则重要性的矩阵。加权超矩阵 \bar{W} 为簇权重矩阵 E 中的簇权重分别乘以未加权超矩阵 W 中对应的簇组因素特征向量矩阵 W_{ij} , 表示为

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij} W_{ij} \quad (4)$$

Step 3: 计算极限加权超矩阵。

加权超矩阵不能反映网络层因素之间的关系,需要对加权超矩阵进行稳定处理,得到极限加权超矩阵为

$$W^\infty = \lim_{N \rightarrow \infty} (1/N) \sum_{k=1}^N \bar{W}^k \quad (5)$$

式中: W^∞ 为极限加权超矩阵,其每一行的数值均一致,每一列数值的大小表征了其所对应因素的重要性。

1.2 改进 ANP 的评价模型

1.2.1 相对权重专家均值置信法

在构建 ANP 评价模型的超矩阵之前,必须在一定的准则下比较 2 个因素对第 3 个因素的影响程度,不可避免将由人比较判断两两因素之间的相对权重,这样就会存在较大的人为因素影响,并给最终排序带来误差。为了尽量降低这种人为主观性带来的误差,计算前采用以下 3 个步骤确定两两因素的相对权重,提高计算结果的可信性。

Step 1: 限定两两因素比较时的取值范围,避免确认相对权重时因数值太多给评价人带来的混乱影响,因此,可采用 AHP 的比较思想确定相对权重,具体权重的比较见表 1^[15]。

表 1 两因素权重比较

Tab. 1 Comparison of weights between two factors

| 影响因素 X 和 Y 的 相对权重 | 定义 | 说明 |
|----------------------|------|---------------|
| 1 | 同等重要 | X、Y 对目标具有同等贡献 |
| 3 | 稍微重要 | X 比 Y 稍微重要 |
| 5 | 重要 | X 比 Y 重要 |
| 7 | 明显重要 | X 比 Y 明显重要 |
| 9 | 非常重要 | X 比 Y 非常重要 |
| 2、4、6、8 | 中间重要 | 对应中间状态的标度值 |

Step 2: 请 RBC 领域的多位专家来确定两两因素的相对权重,再计算其均值作为两两因素权重的预值。由于是领域内专家,可以最大限度避免由于知识和经验的欠缺导致的错误评价,同时,由多位专家一起评价可以避免个人的主观偏见带来的人为

误差。专家评价均值 M 为

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_q}{q} \quad (6)$$

式中: $m_1 \sim m_q$ 分别为第 1~ q 位专家的评价值。

Step 3: 设置一个置信阈值, 将计算得到的预值与每一位专家的评价值进行比较, 如果某专家的评价值超过置信阈值, 删除该专家对这些因素的评价值, 重复计算剩余专家的评价均值, 并进行置信阈值比较, 直至不再出现超过置信阈值的专家评价值为止。该步骤可以降低由于专家的疏忽所带来的误差。该步骤的关键是确定置信阈值, 由于表 1 中使

用的权重最大和最小值分别为 9 和 1/9, 一般取其中间值作为置信阈值^[16]。因为评价过程均由专家进行相对权重判断, 专家有领域内的专业知识, 一般情况下不会发生重大的错误, 故可以将他们的置信阈值缩小为 2.3^[17]。为了与 ANP 判断矩阵的计算一致, 最后得到的权重均值采用四舍五入取整数值。在采用的专家人数足够多的情况下, 最终一定可以获得可用的权重。

1.2.2 改进 ANP 评价模型的计算步骤

结合对 RBC 管控能力的分析, 改进 ANP 评价模型流程见图 1, 具体计算步骤如下。

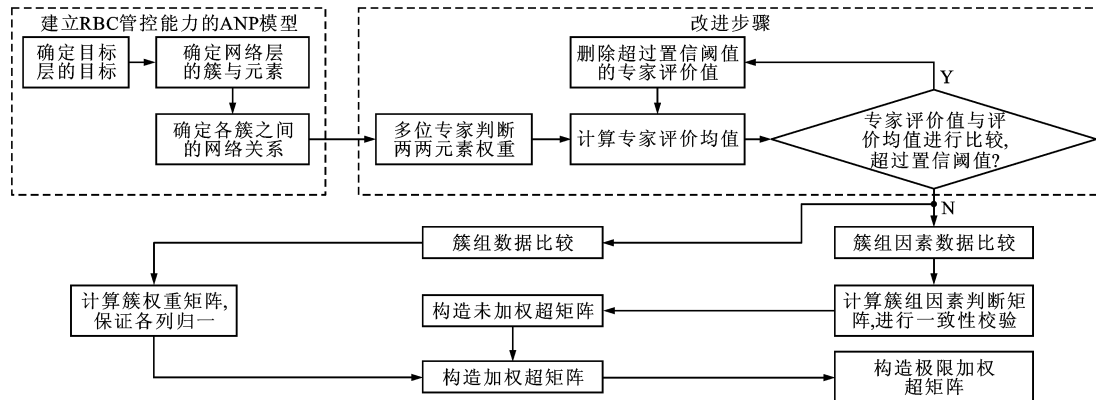


图 1 改进 ANP 评价模型的计算步骤

Fig. 1 Calculation procedure of improved ANP evaluation model

Step 1: 根据目标层准则确定簇及因素之间的相互关系, 这一步骤是建立 RBC 管控能力 ANP 评价模型的关键, 可细分为以下几个步骤。

Step 1.1: 确定目标层的目标为单个 RBC 管控能力评价, 同时由于目标层里只有一个目标, 其也作为唯一的准则。

Step 1.2: 确定网络层的簇组, 即影响 RBC 管控能力的因素。由相关文献获取的影响 RBC 管控能力的因素比较粗糙, 需要根据专业知识进行细化, 得到影响因素, 使评价结果更具有实际指导意义。为了能有一个直观的对比结果, 同时增加一些定量数据, 如 RBC 管辖范围、单个 RBC 最大控车容量等, 提高评价的准确性。本文使用京沪高铁和郑西高铁下行区段第一个 RBC 的实际布置作为网络层中的一个簇组, 最后得到的评价结果不仅是影响因素的排序, 同时可以获得在这些相关影响因素下 2 条线路 RBC 布置优劣的排序。

Step 1.3: 确定 Step 1.2 中影响 RBC 管控能力各因素之间的相互关系, 组成 ANP 评价模型的网络层。

Step 2: 选取多位领域内专家, 基于网络模型中

各因素间的相互作用, 进行两两比较, 并采用专家均值置信法建立判断矩阵。

Step 3: 根据 ANP 方法的一般步骤, 计算 Step 2 获得的判断矩阵, 包括簇权重矩阵和簇组因素判断矩阵, 通过一致性校验后, 依次计算未加权超矩阵、加权超矩阵, 采用幂次方得到收敛的极限加权超矩阵。根据极限加权超矩阵中各因素对应数值的大小即可得到最终影响因素的排序结果。

图 1 中 RBC 管控能力 ANP 评价模型需要经过详细分析并根据专业知识来确定, 改进步骤需要进行单独的计算。

2 RBC 管控能力的评价建模

2.1 影响 RBC 管控能力指标体系

RBC 的配置原则重点考虑控制能力、接口能力与维护适应性^[1]。每个 RBC 的管控能力受以下几方面的影响^[3]。

(1) 同时登陆的列车数量。单个 RBC 应能处理至少一条 ISDN PRI 线路, 每条 ISDN PRI 线路应能处理列车多达 30 列。

(2) 同时设定的进路数量。单个 RBC 至少应能

同时处理 480 条已设定的进路。

(3) 同时激活的临时限速数量 (Temporary Speed Restriction, TSR)。单个 RBC 至少应能同时处理 255 个已激活的 TSR。

(4) 同时激活的紧急区域数量。单个 RBC 至少应能同时处理 100 个已激活的紧急区域。

(5) 同时通信的车站数量。单个 RBC 至少应能同时与 8 个车站进行通信。

2.1.1 控制能力

RBC 控制能力主要表现在其可以管辖的列车数量和覆盖的线路范围^[3]。RBC 控制的列车数量分为 2 类:一类为受 RBC 直接控制的列车,由 RBC 计算其运行许可,包含管辖范围内已经注册且正常运行的列车;另一类为已经与 RBC 注册的列车,但未受本 RBC 的控制,这类列车包括 CTCS-2 到 CTCS-3 级间转换过程中与 RBC 已经注册,但还运行在 CTCS-2 级区段的列车,以及 RBC 切换过程中,已经接受 RBC 注册,但还在移交 RBC 管辖范围内的列车。RBC 覆盖的线路范围包括区间和车站。对于中国高速铁路,区间线路相比车站线路情况简单,为双线双方向。由于车站要进行调车、客运作业、列车摘解重联、转场等站内作业,所以车站的复杂程度将直接影响 RBC 的覆盖范围。在控制能力中还需要综合考量 RBC 的最大控车容量和管辖范围之间的关系,单个 RBC 的控车容量小,但管辖范围宽,将导致行车间隔增大,势必影响到行车效率。

2.1.2 接口能力

RBC 由无线闭塞单元、维护终端、司法记录器、服务器、操作控制终端等组成^[18],这些均为其内部接口,RBC 与其他设备的接口为外部接口。为了便于评价其接口能力,将 RBC 与其他设备的接口按照不同规则分为 4 类:多接口设备与单一接口设备,这类设备要考虑交互信息的容量;周期接口设备与非周期接口设备,这类设备也要考虑交互信息的容量;无线信道接口设备与有线信道接口设备,这类设备要考虑不同信道下的延时对控制能力的影响;内部接口和外部接口设备,这类设备中的外部接口会随车站复杂度的变化,影响运行许可的计算时间。根据此分类以及 RBC 的通信接口和组成,联锁与 RBC 主机的接口属于多设备的周期有线信道外部接口;车载与 RBC 主机的接口属于多设备的周期无线信道外部接口;调度中心、临时限速服务器与 RBC 主机的接口属于单一设备的非周期有线信道外部接口;相邻 RBC 与 RBC 主机的接口属于多设

备或单一设备的非周期有线信道外部接口;RBC 与映射数据库之间的接口属于内部接口。RBC 接口关系见图 2。在非故障情况下,RBC 通信交接协议对行车效率影响较小^[19],牛儒等也证明了正常情况下 RBC 切换的安全性和效率^[20],接口能力是在非故障情况下考虑的,对 RBC 的通信协议的影响可以忽略。

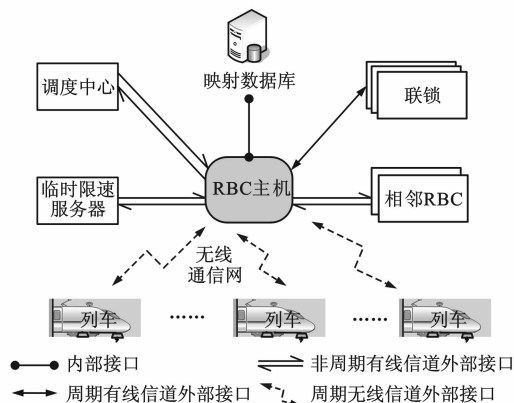


图 2 RBC 接口关系

Fig. 2 Relationship of RBC interfaces

单个 RBC 的管辖范围越大,交互的信息容量也就越大,信道接口数量也越多,由此也可以得出,接口能力和控制能力的影响因素互相作用,适宜使用 ANP 模型进行评价。

2.1.3 维护适应性

为了便于 RBC 的维护,RBC 主机一般采用集中设置^[1]。中国投入使用的 RBC 设备为二乘二取二动态冗余或者三取二静态冗余结构,在对 RBC 进行维修、维护和升级时可以做到不影响正常行车,但维护中需要考虑 RBC 改造对线路产生的影响。枢纽大站的建设有可能分步实施,有些车站也可能扩建或改造,为了减少将来改造时对运输的影响,最好单独配置 RBC^[1]。

2.2 RBC 管控能力的 ANP 评价模型

综合考虑 RBC 管控能力的影响因素,以单个 RBC 管控能力评价为目标作为目标层,以方案选择、控制能力、接口能力和维护适应性作为网络层的簇组,建立的 RBC 管控能力 ANP 评价模型见图 3。方案选择京沪高铁下行区段第 1 个 RBC (RBC-JH1)和郑西高铁下行区段第 1 个 RBC (RBC-ZX1)的实际布置。控制能力下的因素包括注册受控列车数量、注册未受控列车数量、管辖范围、控制车站数、车站复杂度和单个 RBC 最大控车容量。接口能力下的因素包括非周期数据处理、周期数据处理、有线信道传输延时、无线信道传输延时和内部接口延时。

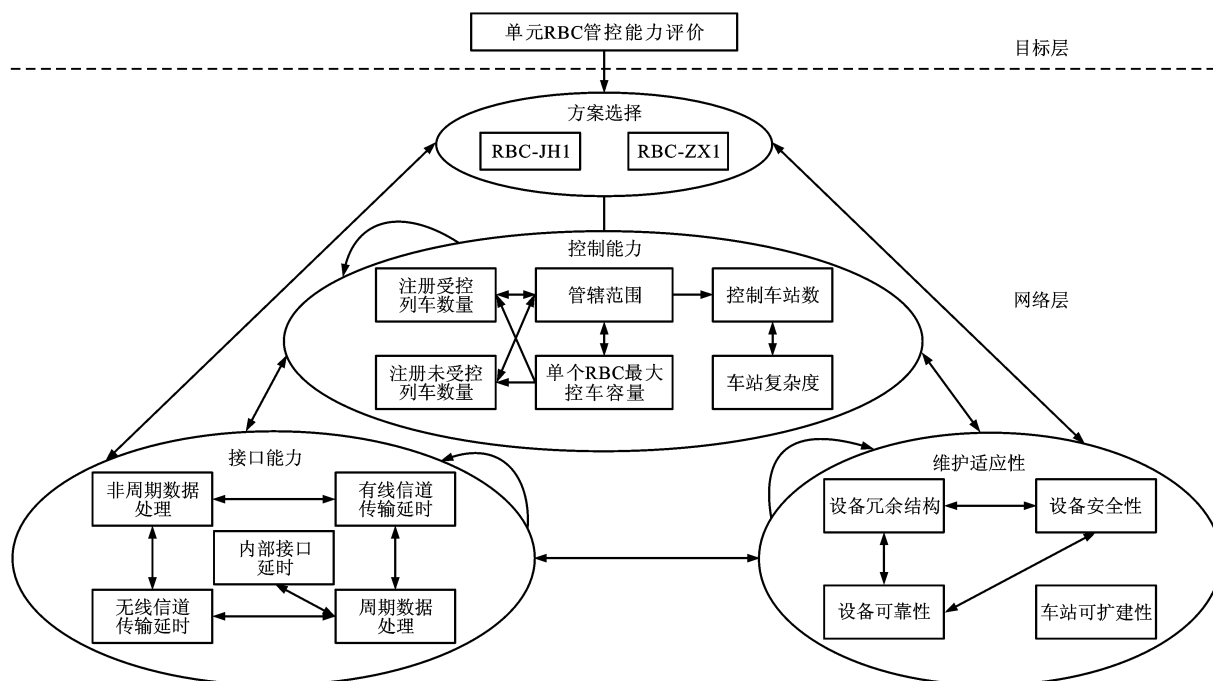


图 3 RBC 管控能力 ANP 评价模型

Fig. 3 ANP evaluation model of RBC management-control capability

维护适应性下的因素包括设备冗余结构、设备安全性、设备可靠性和车站可扩展性。

3 RBC 管控能力评价应用

3.1 RBC 管控能力实例

京沪高铁全长为 1 318 km,共设置 24 个车站,75 个中继站,共布置 13 个 RBC,RBC 由北京全路通信信号研究设计院和庞巴迪公司合作提供。郑西高铁全长为 505 km,设置 13 个车站,24 个中继站,共布置 5 个 RBC,RBC 由和利时集团和安萨尔多公司合作提供。以 RBC-JH1 与 RBC-ZX1 为实例进行分析,2 条线路 RBC 管辖范围见图 4。运用图 3 构建的 RBC 管控能力 ANP 评价模型评价 RBC-

JH1 与 RBC-ZX1 管控能力的合理性,同时对影响 RBC 管控能力的因素进行定量排序。

RBC-JH1 与 RBC-ZX1 的 RBC 布置与维护适应性分别见表 2、3,表中的单个 RBC 最大控车容量与其冗余结构由设备供应商提供。

在第 1 个 RBC 管辖范围内,注册受控列车按照 5 min 追踪间隔,京沪高铁运行列车数量为 8 列,郑西高铁运行列车数量为 12 列,注册未受控列车中京沪高铁的 RBC 交接列车数量为 1 列,郑西高铁数量为 2 列,等待发车的列车预留数量为 5 列,其他列车数量为 3 列,因此,高峰时期 RBC-JH1 控制列车数量为 17 列,占最大控车容量 18.9%;RBC-ZX1 控制列车数量为 22 列,占最大控车容量 73.3%。车站复杂

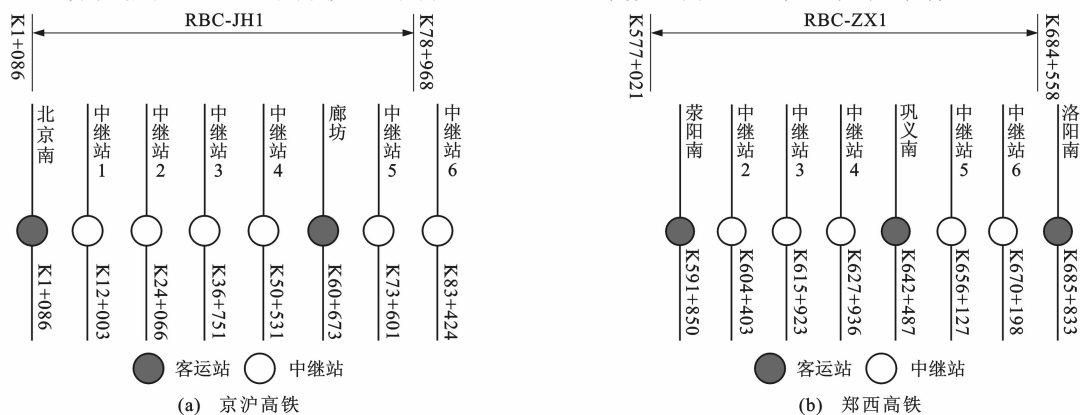


图 4 RBC 管辖范围

Fig. 4 Management-control ranges of RBCs

表 2 RBCs 布置
Tab. 2 Layout of RBCs

| 闭塞中心 | 所属线路 | 管辖范围 | 最大控车容量 ^[2] | 下行覆盖长度/km | 管辖车站 | | | | 高峰时期列车数量 |
|---------|------|-------------------|-----------------------|-----------|------|----------|--------|-------|----------|
| | | | | | 车站名 | 站场规模 | 列车进路数量 | 中继站数量 | |
| RBC-JH1 | 京沪高铁 | K1+086~K78+968 | 90 | 77.882 | 北京南 | 6 台 12 线 | 60 | 5 | 17 |
| | | | | | 廊坊 | 2 台 4 线 | 20 | | |
| RBC-ZX1 | 郑西高铁 | K577+021~K684+558 | 30 | 107.537 | 荥阳南 | 2 台 4 线 | 20 | 5 | 22 |
| | | | | | 巩义南 | 2 台 4 线 | 20 | | |

表 3 RBC 维护适应性
Tab. 3 Maintenance adaptabilities of RBCs

| 所属线路 | 冗余结构 | 可靠性 ^[21] / 10 ⁵ h | 安全性 | 设置方式 |
|------|-----------|--|-----------|------|
| 京沪高铁 | 二乘二取二动态冗余 | 1.95 | 安全完善度等级 4 | 集中设置 |
| 郑西高铁 | 三取二静态冗余 | 1.90 | 安全完善度等级 4 | 集中设置 |

度会影响 RBC 内部数据的搜索速度,由到发线数量来决定。在系统周期为 500 ms 的情况下,周期信号的延时为 0.16 s,非周期信号的延时是 0.2 s,存在非周期信息丢失的情况时,信息重复时间间隔延时才会影响 RBC 切换时间^[22]。在性能方面,内部接口优于外部的有线信道,有线信道优于无线信道。由图 3 可以得到各影响因素之间的关系,见表 4。

表 4 影响因素的关系
Tab. 4 Relationship of influence factors

| 因素 | 描述 | 依存关系 |
|----|---------------|-------------------------------|
| A1 | RBC-JH1 | B1~D4 |
| A2 | RBC-ZX1 | B1~D4 |
| B1 | 单个 RBC 最大控车容量 | A1、A2、B2、B3、B6、C1、C4 |
| B2 | 注册受控列车数量 | B3、B6、C1、C4 |
| B3 | 注册未受控列车数量 | B2、B6、C4、C5 |
| B4 | 控制车站数 | A1、A2、B5、B6、C1、C3 |
| B5 | 车站复杂度 | B4、D4 |
| B6 | 管辖范围 | A1、A2、B1、B2、B3、B4、C1、C5、D2、D3 |
| C1 | 周期数据处理 | B1、B2、B4、B6、C2、C3、C4、D1、D2、D3 |
| C2 | 内部接口延时 | C1 |
| C3 | 有线信道传输延时 | B4、C1、C5 |
| C4 | 无线信道传输延时 | B2、B3、C1、C5 |
| C5 | 非周期数据处理 | B3、B6、C3、C4、D1、D2、D3 |
| D1 | 设备冗余结构 | A1、A2、C1、C5、D2、D3 |
| D2 | 设备可靠性 | C1、C5、D1、D3 |
| D3 | 设备安全性 | C1、C5、D1、D2 |
| D4 | 车站可扩展性 | B5 |

表 4 中第 3 列表示因素之间的依存关系,如因素 A1 的依存关系 B1~D4 表示因素 A1 对因素 B1~D4 均有影响。因素关系是决定式(1)矩阵的基础。

3.2 RBC 管控能力 ANP 评价模型求解与分析

ANP 评价模型求解步骤如下。

Step 1:根据图 3 的 RBC 管控能力 ANP 评价模型和表 4 中各影响因素之间的关系建立 SD 软件能识别的 ANP 链接,见图 5。

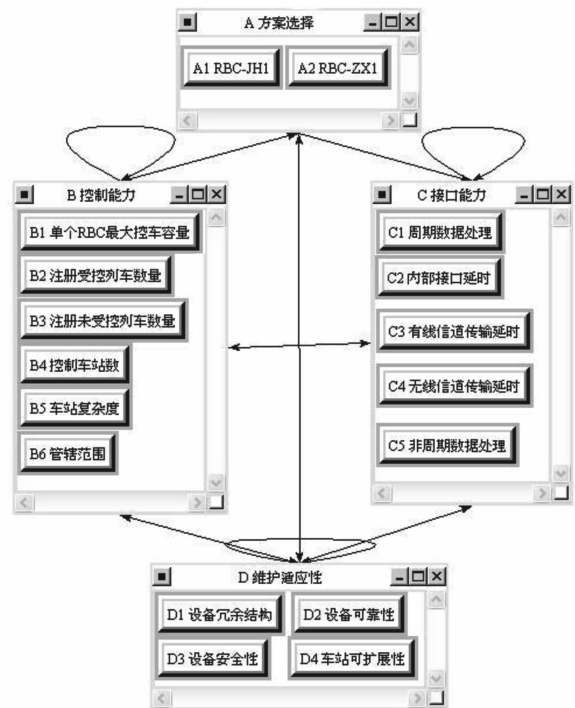


图 5 RBC 管控能力 ANP 链接

Fig. 5 ANP link of RBC management-control capacity

Step 2:确定表 4 各影响因素之间的权重。未改进的 ANP 评价步骤采用单个人来确定影响因素之间的权重,会由于个人知识层面的欠缺或主观臆断带来较大的偏差,直接降低了 ANP 计算结果的可信性。改进 ANP 评价模型在确定影响因素两两之间的权重时,请 3 位相关领域内专家按照 AHP 方法中对两两因素的权重比较方法,依据图 3、表 2~4 的相互制约关系确定权重,根据式(6)计算其平均

值,如果专家给出的权重均在平均值的置信区间内,则采纳平均值作为最终权重;如果有超过置信区间的专家权重,删除该专家的评价值,重新计算均值直至不再出现超过置信区间的评价值为止。如在因素 A1 下,C5 和 C1 的比较,3 位专家分别给出了 3、3、4 的权重,计算平均值,四舍五入后为 3,3 位专家给出的权重均在置信区间 0.7~5.3 之间,不存在需要舍弃的数据,所以在 A1 因素下,C 组中因素 C5、C1 的权重确定为 3。经过这一步处理得到的两两因素权

重,还需要经过 ANP 模型建立者的审核,修正不符合定量数据描述的权重,如通过表 3 中设备供应商提供的数据,RBC-JH1 的可靠性是略大于 RBC-ZX1 的可靠性的,两者相比较的权重取 2 或 3 是合理的。

Step 3:经过专家均值置信法处理后的两两因素权重分别构成比较矩阵,经过一致性校验,计算每一个矩阵的特征向量,构成 RBC 管控能力评估未加权超矩阵,见表 5。

表 5 未加权超矩阵
Tab. 5 Unweighted super matrix

| 因素 | A1 | A2 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | D1 | D2 | D3 | D4 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.800 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| A2 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B1 | 0.137 | 0.260 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.551 | 0.207 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B2 | 0.173 | 0.235 | 0.462 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.284 | 0.428 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B3 | 0.060 | 0.028 | 0.077 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.038 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B4 | 0.134 | 0.115 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.126 | 0.067 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B5 | 0.327 | 0.144 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.833 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| B6 | 0.169 | 0.218 | 0.462 | 0.857 | 0.500 | 0.167 | 0.000 | 0.000 | 0.298 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.857 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C1 | 0.230 | 0.131 | 0.800 | 0.250 | 0.000 | 0.333 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 1.000 | 0.250 | 0.333 | 0.000 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.000 |
| C2 | 0.140 | 0.226 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.111 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C3 | 0.171 | 0.244 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.667 | 0.000 | 0.000 | 0.444 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C4 | 0.171 | 0.244 | 0.200 | 0.750 | 0.667 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.444 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C5 | 0.289 | 0.156 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 0.000 | 0.000 | 0.800 | 0.000 | 0.000 | 0.750 | 0.667 | 0.000 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.000 |
| D1 | 0.621 | 0.606 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.714 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.714 | 0.000 | 0.833 | 0.800 | 0.000 |
| D2 | 0.165 | 0.166 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.143 | 0.500 | 0.000 | 0.200 | 0.000 |
| D3 | 0.165 | 0.166 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.143 | 0.500 | 0.167 | 0.000 | 0.000 |
| D4 | 0.048 | 0.063 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Step 4:以目标层的单个 RBC 管控能力评价为准则,对网络层中方案选择、控制能力、接口能力、维护适应性 4 个簇组进行相对权重专家均值置信法评估,同时计算特征向量,获得了簇组权重,数值见表 6。

Step 5:在 Step 3 获得了 RBC 管控能力评价的未加权超矩阵,未反映出 4 个簇组之间的依存关系,将表 5 的未加权超矩阵与表 6 的权重相乘,得到加权超矩阵,见表 7。

Step 6:表 7 中的加权超矩阵并非归一化矩阵,需要进行稳定处理,获得极限加权超矩阵,结果见表 8。表 8 中极限加权超矩阵每一行的数值均相同,表征极限加权超矩阵是稳定的,每一列的数值大小表征了其对应的因素排序。各因素的优先权见图 6。

表 6 簇组权重
Tab. 6 Weights of clusters

| 簇组 | 方案选择 | 控制能力 | 接口能力 | 维护适应性 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 方案选择 | 0.120 | 0.236 | 0.000 | 0.236 |
| 控制能力 | 0.511 | 0.427 | 0.625 | 0.427 |
| 接口能力 | 0.249 | 0.201 | 0.238 | 0.201 |
| 维护适应性 | 0.120 | 0.137 | 0.137 | 0.137 |

由极限加权超矩阵数据可以看出 RBC-ZX1 的管控能力布置(0.039)比 RBC-JH1 的管控能力(0.037)略合理,对 RBC 管控能力影响排前 8 位的因素分别为:管辖范围,权重为 0.167;控制车站数,权重为 0.095;非周期数据处理,权重为 0.092;注册受控列车数量,权重为 0.090;单个 RBC 最大控车容量,权重为 0.086;

表 7 加权超矩阵

Tab. 7 Weighted super matrix

| 因素 | A1 | A2 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | D1 | D2 | D3 | D4 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | 0.040 | 0.040 | 0.091 | 0.000 | 0.000 | 0.136 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.329 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| A2 | 0.080 | 0.080 | 0.182 | 0.000 | 0.000 | 0.136 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.082 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B1 | 0.070 | 0.133 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.308 | 0.129 | 0.000 | 0.000 | 0.362 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B2 | 0.089 | 0.120 | 0.228 | 0.000 | 0.340 | 0.000 | 0.000 | 0.159 | 0.268 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B3 | 0.030 | 0.014 | 0.038 | 0.097 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.362 | 0.089 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B4 | 0.069 | 0.059 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.758 | 0.070 | 0.042 | 0.000 | 0.724 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| B5 | 0.167 | 0.074 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.412 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| B6 | 0.086 | 0.112 | 0.228 | 0.583 | 0.340 | 0.082 | 0.000 | 0.000 | 0.186 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.536 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C1 | 0.057 | 0.032 | 0.186 | 0.080 | 0.000 | 0.078 | 0.000 | 0.053 | 0.000 | 1.000 | 0.069 | 0.092 | 0.000 | 0.117 | 0.198 | 0.198 | 0.000 |
| C2 | 0.035 | 0.056 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C3 | 0.043 | 0.061 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.155 | 0.000 | 0.000 | 0.106 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.119 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C4 | 0.043 | 0.061 | 0.047 | 0.240 | 0.213 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.106 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.119 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| C5 | 0.072 | 0.039 | 0.000 | 0.000 | 0.107 | 0.000 | 0.000 | 0.210 | 0.000 | 0.000 | 0.207 | 0.184 | 0.000 | 0.234 | 0.397 | 0.397 | 0.000 |
| D1 | 0.074 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.098 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.098 | 0.000 | 0.337 | 0.324 | 0.000 |
| D2 | 0.020 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.089 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.119 | 0.000 | 0.081 | 0.000 |
| D3 | 0.020 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.089 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.020 | 0.119 | 0.067 | 0.000 | 0.000 |
| D4 | 0.006 | 0.008 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.242 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

表 8 极限加权超矩阵

Tab. 8 Limit weighted super matrix

| 因素 | A1 | A2 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | D1 | D2 | D3 | D4 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 |
| A2 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 |
| B1 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 | 0.089 |
| B2 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 |
| B3 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.047 |
| B4 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 | 0.095 |
| B5 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | 0.064 |
| B6 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.167 |
| C1 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 | 0.072 |
| C2 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| C3 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | 0.037 |
| C4 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | 0.058 |
| C5 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 | 0.092 |
| D1 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 | 0.039 |
| D2 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 |
| D3 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 | 0.026 |
| D4 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |

周期数据处理,权重为 0.072;车站复杂度,权重为 0.064;无线信道传输延时,权重为 0.058。

非周期数据处理的权重排序较为靠前,是因为列车数量增加会导致延时增加^[22],并且非周期数据是

与临时限速服务器交换的数据,涉及到行车安全。京沪高铁单个 RBC 的控车容量大,但管辖北京南和廊坊站的 RBC 实际控车数量较少,由排序结果可知,京沪高铁第 1 个 RBC 的管辖范围可以适当延长。京沪

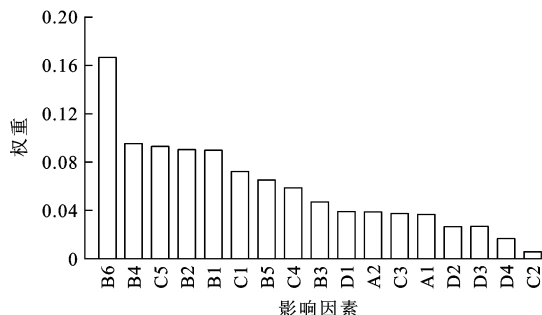


图 6 影响因素的优先权重

Fig. 6 Priority weights of influence factors

高铁的基础线路数据见表 9,使用表 9 中的数据计算得到京沪高铁的 RBC 布置数量为 12 个,结合本文分析,京沪高铁下行方向第 1 个 RBC 的管控能力有一定余量,可以从原来的中继站 4 扩充至中继站 6 作为管辖范围,但不能包含天津西站,因为天津西站的站场规模为 13 台 26 线,同时又为线路所。将新分配的 RBC 布置方案和现行的京沪高铁运行图注入到轨道交通控制与安全国家重点实验室的 CTCS-3 级仿真测试平台中多次运行,仿真结果表明与原有的方案比较,新的布置方案运行效率保持不变,并没有因为 RBC 数量和管辖范围变化导致效率降低,因此,首先使用公式计算一条线路 RBC 的布置数量,再结合本文分析的定性因素对 RBC 管控能力的影响,共同决定 RBC 的管控范围更为合理。

表 9 京沪高铁基础线路数据

Tab. 9 Basic line data of Jinghu High-Speed Railway

| 参数 | 数值 |
|---------|-------|
| 线路长度/km | 1 318 |
| 股道数量 | 204 |
| 车站数量 | 24 |
| 中继站数量 | 75 |
| 使用比例/% | 80 |
| 控车富余量/% | 20 |

4 结 语

传统的 RBC 布置数量计算公式仅能给出一条线路上 RBC 的布置数量,并且不能充分考虑到定性因素对 RBC 布置的影响。本文对影响 RBC 管控能力的控制能力、接口能力和维护适应性进行了细化分析,建立了 ANP 评价模型,并使用 SD 软件进行求解。为了降低 ANP 评价中的主观影响,使用了专家均值置信法,使评价结果更为可信。在确定 RBC 影响因素相对权重时,为了降低知识欠缺带来的评价错误,同时消除人为疏忽导致的数据误差,采用多位专家进行判断,并取其平均值与置信阈值比

较,进行数据的筛选。以京沪高铁和郑西高铁下行区段第 1 个 RBC 为案例进行分析,根据极限加权超矩阵影响因素的排序结果,得到对 RBC 管控能力影响较大的因素:管辖范围、控制车站数、非周期数据处理、注册受控列车数量、单个 RBC 最大控车容量、周期数据处理和车站复杂度,并指出京沪高铁中可以适当扩大第 1 个 RBC 的管辖范围至中继站 6。本文研究的意义在于在新线建设中,可以首先通过传统的公式计算出整条线路需要布置的 RBC 数量,然后根据基础数据与 RBC 供应商给出的 RBC 参数,建立 ANP 评价模型,确定 RBC 的管控范围,两者结合最终确定 RBC 的实际布置数量。

参考文献:

References :

- [1] 沈志凌. 高速铁路 CTCS-3 列控系统无线闭塞中心设备数量计算原则和方法的研究[J]. 铁道标准设计, 2009(增 1): 136-137, 150.
SHEN Zhi-ling. Research on the principle and method of radio block center number of high-speed railway CTCS-3 train control system[J]. Railway Standard Design, 2009 (S1): 136-137, 150. (in Chinese)
- [2] 石先明. 高速铁路 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心工程设计[J]. 中国铁路, 2009(11): 1-6.
SHI Xian-ming. Engineering design of radio block center in CTCS-3 train control system for high-speed railway[J]. Chinese Railways, 2009(11): 1-6. (in Chinese)
- [3] 赵宇坤. CTCS-3 级列控系统 RBC 设置及容量计算方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
ZHAO Yu-kun. Research of calculation method for RBC setting and capacity in CTCS-3 [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [4] 任 伟, 熊 鹰, 张树龙. 基于网络分析法的舰舰导弹性能评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(10): 26-28.
REN Wei, XIONG Ying, ZHANG Shu-long. An approach to performance evaluation of surface to surface missile based on analytic network process[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(10): 26-28. (in Chinese)
- [5] 石福丽, 方志刚, 杨 峰, 等. 基于仿真的潜艇装备作战能力 ANP 幂指数评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 168-174.
SHI Fu-li, FANG Zhi-gang, YANG Feng, et al. ANP power index evaluation method for operational capability of submarine equipment based on simulation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 168-174. (in Chinese)
- [6] 王海涌, 张玮玥, 王晓明, 等. 基于 ANP 和 VPRS 的高速列车舒适性综合评价指标权重分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 15-20.
WANG Hai-yong, ZHANG Wei-yue, WANG Xiao-ming, et al.

- ANP and VPRS based analysis on index weight for comprehensive evaluation of comfort of high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(6): 15-20. (in Chinese)
- [7] 李金超, 李金颖, 牛东晓, 等. 基于 ANP 的电网企业运营能力评价模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 37-43.
LI Jin-chao, LI Jin-ying, NIU Dong-xiao, et al. Study on the evaluation model for the power grid corporation operation ability based on ANP[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 37-43. (in Chinese)
- [8] 赵高强, 郭 森, 李泓泽, 等. 基于 ANP-GCDM 模型的风电项目经济外部性评价[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(4): 59-64, 71.
ZHAO Gao-qiang, GUO Sen, LI Hong-ze, et al. Evaluation on economic externality of wind power project based on ANP-GCDM[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(4): 59-64, 71. (in Chinese)
- [9] 王效俐, 张 默. 物流服务供应链突发事件合作补救能力评价模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 159-166.
WANG Xiao-li, ZHANG Mo. Cooperation recovery capability evaluation model of logistics service supply chain in emergency[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(1): 159-166. (in Chinese)
- [10] 陈志祥. 基于 ANP 理论的供需协调绩效评价模型与算法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(3): 286-291.
CHEN Zhi-xiang. Model and algorithms of supply and demand coordination performance measurement based on ANP theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(3): 286-291. (in Chinese)
- [11] SAATY T L. Fundamentals of the analytic network process-dependence and feedback in decision-making with a single network[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(2): 129-157.
- [12] 田小革, 林 杜, 吴孙德. 基于模糊复合物元法的水泥路面性能评价[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 26-29, 35.
TIAN Xiao-ge, LIN Du, WU Sun-de. Performance evaluation of Portland cement concrete pavement based on fuzzy complex matter element method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 26-29, 35. (in Chinese)
- [13] WANG Ying-ming, LIU Jun, ELHAG T M S. An intergrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment[J]. Computers and Industrial Engineering, 2008, 54(3): 513-525.
- [14] 武荣桢, 翟栋栋, 郝恩崇, 等. 城市公共交通服务满意度评价模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 65-70.
WU Rong-zhen, ZHAI Dong-dong, XI En-chong, et al. Evaluation model of satisfaction degree for urban public transit service[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 65-70. (in Chinese)
- [15] UYAN M. MSW landfill site selection by combining AHP with GIS for Konya, Turkey [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(4): 1629-1639.
- [16] BARTON R R, NELSON B L, XIE Wei. Quantifying input uncertainty via simulation confidence intervals[J]. INFORMS Journal on Computing, 2014, 26(1): 74-87.
- [17] 陈建球, 唐 涛. 基于改进 FAHP 方法的列车运行控制系统仿真可信度研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 59-66.
CHEN Jian-qiu, TANG Tao. Research on simulation credibility of train operation control system based on improved FAHP method[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 59-66. (in Chinese)
- [18] 苟晨曦, 蔡伯根, 唐 涛, 等. 无线闭塞中心测试案例生成方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(4): 114-122.
GOU Chen-xi, CAI Bai-gen, TANG Tao, et al. Test case generation method of radio block center[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(4): 114-122. (in Chinese)
- [19] 吕继东, 唐 涛, 贾 昊. 客运专线 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心的建模与验证[J]. 铁道学报, 2010, 32(6): 34-42.
LU Ji-dong, TANG Tao, JIA Hao. Modeling and verification of radio block center of CTCS-3 train control system for dedicated passengers lines[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(6): 34-42. (in Chinese)
- [20] 牛 儒, 曹 源, 唐 涛. ETCS-2 级列控系统 RBC 交接协议的形式化分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 52-58.
NIU Ru, CAO Yuan, TANG Tao. Formal modelling and analysis of RBC handover protocol for ETCS level 2 using stochastic Petri nets[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(4): 52-58. (in Chinese)
- [21] 马小玲, 张友鹏, 杜求茂, 等. 计算机联锁系统的可靠性和安全性比较[J]. 铁路计算机应用, 2009, 18(6): 46-49.
MA Xiao-ling, ZHANG You-peng, DU Qiu-mao, et al. Comparing of reliability and security with computer-based interlocking system multiplying model[J]. Railway Computer Application, 2009, 18(6): 46-49. (in Chinese)
- [22] 梁 楠, 王海峰. 基于 SPN 的 CTCS-3 级列控系统 RBC 实时性能分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 67-71.
LIANG Nan, WANG Hai-feng. Real-time performance analysis of RBC system for CTCS lever 3 using stochastic Petri networks[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 67-71. (in Chinese)