

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.06.015

基于贝叶斯网络的空中交通运输系统韧性评价

王兴隆¹, 赵俊妮¹, 贺敏²

(1. 中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300; 2. 南京莱斯信息技术股份有限公司, 南京 210014)

摘要: 为准确刻画空中交通运输系统安全保障能力, 引入韧性概念评估其抵御风险与恢复水平。建立层次化的贝叶斯网络模型, 分析影响空中交通运输系统正常运行因素, 评价系统韧性, 并对 2010—2019 年中国空中交通运输系统韧性及变化趋势进行定量分析。通过调整模型各结点, 分析因素对系统整体韧性水平的影响, 以新冠疫情下底层结点的变化情况为例对系统整体韧性水平变化进行评估。研究结果表明, 空中交通运输系统的总体韧性评价在 54%~60.2% 之间, 且随着社会经济不断发展呈现波动上升的趋势。在新冠疫情疫情影响下系统服务水平受到较大影响, 但系统整体仍能维持一定的韧性。贝叶斯网络模型较好地量化了空中交通运输系统韧性, 是提高系统韧性的基础, 为空中交通运输业可持续发展及抵御冲击提供有效调控策略和理论方法。

关键词: 航空运输; 系统韧性; 贝叶斯网络; 系统风险; 民用航空

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)06-1121-10

Resilience Evaluation on Air Transportation System Based on Bayesian Network

WANG Xinglong¹, ZHAO Junni¹, HE Min²

(1. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Nanjing Les Information Technology Co., Ltd. Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to accurately describe the security capability of the air transportation system, the concept of resilience is introduced to evaluate its risk resistance and recovery level. First, a hierarchical Bayesian network model is established, and the factors that affect the normal operation of the air transportation system are analyzed. Second, the system resilience is evaluated, and the resilience and changing trends of China's air transportation system from 2010 to 2019 are quantitatively analyzed. Third, the impact of factors on the overall resilience level is analyzed, and the change of the underlying nodes during the COVID-19 epidemic is taken as an example. Then, the overall resilience level of the system is evaluated through adjusting each node of the model. The research results show that the overall resilience evaluation value of the air transportation system is between 54% and 60.2%, and it exhibits a fluctuating upward trend with the continuous social and economic development. Under the influence of the COVID-19 epidemic, the service level of the system has been greatly affected, but the overall system can still maintain a certain degree of resilience. The Bayesian network model can better quantify the resilience of the air transportation system, and help improve the resilience of the system. This method provides effective control strategies and theoretical methods for the sustainable development and resistance to shocks of the air transportation industry.

Key words: air transportation; system resilience; Bayesian network; system risk; civil aviation

基金项目: 国家重点研发计划课题基金(2020YFB1600101); 天津市教育委员会自然科学基金重点基金(2020ZD01)。

收稿日期: 2021-09-08; **修订日期:** 2022-01-22

通信作者: 王兴隆, 男, 研究员, E-mail: xinglong1979@163.com。

引用格式: 王兴隆, 赵俊妮, 贺敏. 基于贝叶斯网络的空中交通运输系统韧性评价[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1121-1130. WANG Xinglong, ZHAO Junni, HE Min. Resilience evaluation on air transportation system based on Bayesian network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1121-1130.

随着中国空中交通运输行业的不断发展,航班数量和客货吞吐量逐年递增^[1],对空中交通运输系统的正常、稳定运行及可持续发展的需求逐渐凸显。韧性作为系统的一种固有属性,可以表征系统抵御外界扰动并从冲击中恢复的能力。为有效评估空中交通运输系统抵御、适应风险并快速恢复能力,引入韧性概念并对其进行定量测度。

目前,系统韧性研究集中在电力系统、城市规划、道路交通、环境及防灾减灾^[2-5]等方面,而空中交通运输系统韧性研究刚刚起步。王兴隆等^[6]对空域扇区进行建模,采用随机和依度值等顺序删除并恢复网络中的节点,对其结构韧性进行了评估;Xu等^[7]对航路网进行了建模,采集实际运行数据对扰动状态下运行层面的网络功能变化情况进行了分析。然而,不同于脆弱性分析^[8-10],对空中交通运输系统韧性的准确测度存在一定难度。现有的研究方法主要以实际存在的物理对象为节点,以对象之间的物理连接关系作为边建立网络。通过“删除-恢复”网络中的节点,从而模拟系统受到冲击并恢复过程中的拓扑结构与物理功能的变化。例如,Zhang等^[11]通过“节点和链路移除”模拟故意破坏或随机故障,通过监测所选网络测量的性能来评估网络韧性;Wang等^[12]通过量化地铁网络在随机故障和蓄意攻击下的鲁棒性,对其鲁棒性指标及性能进行了大量研究。此类研究虽然可以有效直观地反映出系统在扰动过程中的表现,但忽视了空中交通运输系统长期发展中的累积效应及韧性随时间的演化趋势。在系统工程界,运输系统通常被视为一个功能系统,其韧性通常被视为一种综合系统性能,系统思维依赖系统韧性的基本特性,并已应用于交通研究^[13]。Hosseini等^[14]提出基于性能的贝叶斯网络衡量水路港口系统韧性;陈群等^[15]利用贝叶斯网络建立韧性模型,调整网络各结点分析因素与系统韧性关系。以上研究多从宏观角度进行分析,较少涉及底层因素与空中交通运输系统总体韧性变化之间的具体因果及耦合关系。交通运输系统韧性评估是一个具有大量不确定性和模糊性的多属性决策问题,本文采用基于系统基本特性的方法构建了分层贝叶斯网络模型,以获取衡量系统韧性因素,从而量化空中交通运输系统韧性并对其表现进行评价。

1 空中交通运输系统韧性

1.1 空中交通运输系统

空中交通运输系统作为公共运输系统的重要组成部分,具有复杂系统的典型特征,即自组织、自适应、多稳态和多种可能结果等。因此,在对空中交通运输系统进行研究时,本文将其视为多层次的

复杂系统。多种因素相互联系、相互作用,对系统产生影响。空中交通运输系统正常运行不仅与其表现出的服务水平、安全性、系统鲁棒性和系统受到冲击后的可修复性有关,也与其环境友好性(可持续性)、市场经济下政府的调控手段及运行政策影响、对国际市场及科研新技术等的适应性有关。

1.2 系统的韧性

韧性是系统的一种固有属性,其名称来源于拉丁语“resilio”,即“回到原始状态”的意思。对于空中交通运输系统而言,韧性是在突发事件(如公共卫生事件的发生、极端天气现象等自然灾害、突发航空安全事件等)影响下,部分功能损失从而导致系统整体性能下降,通过自身调节以减小、抵御事件影响的能力,可以表示为其性能的函数。目前,韧性评估主要集中在观察测度系统在扰动-恢复过程中的变化情况^[16-17],可较好地宏观角度评估系统韧性,但不能准确刻画系统有效应对风险扰动、保障正常运行的能力。

空中交通运输系统在遭受外界扰动后,性能会产生明显波动,其性能变化过程可分为4个阶段,如图1所示。

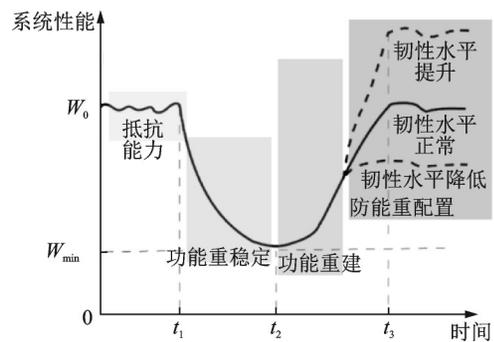


图1 系统韧性示意图

Fig.1 Schematic diagram of system resilience

图1中,0~ t_1 阶段为系统正常的稳态运行模式; t_1 ~ t_2 阶段为系统性能下降阶段,外界扰动对空中交通运输系统产生影响,正常的空中交通运输保障作业能力降低,系统总体性能下降,直至 t_2 时刻系统性能下降至此次扰动过程中的最低点,此时系统性能为 W_{\min} ; t_2 ~ t_3 阶段为性能恢复阶段,系统通过自我调节对受到扰动影响的部分进行恢复; t_3 时刻后为系统新的稳定阶段,空中交通运输系统韧性水平重新达到相对平衡的稳态,和初始韧性水平对比有提升、正常、降低3种情况。

2 韧性评价贝叶斯网络模型

2.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是由贝叶斯定理衍生出的一种有向

无环的概率图模型。对于一组随机变量 x ,可以通过条件概率表准确地计算出变量之间的联合分布,能较好的表征各变量之间的耦合、从属、因果关系而被广泛使用,但在系统韧性评估中的应用较少。

节点之间的相互依赖关系由联合概率分布定义,假设网络中给定的一组随机变量 $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$,且每个结点都与它的非后裔结点独立,则联合分布可表示为随机变量与其条件概率分布乘积的形式,即

$$P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \pi(x_i)) \quad (1)$$

式中: n 为变量数; $\pi(x_i)$ 代表结点 i 的父结点构成的集合。在贝叶斯网络模型构建过程中,需要分别确定网络结构以及各变量的条件概率,常用的方法有基于历史数据驱动确定^[18]和由专家先验知识评判给出两种。历史数据驱动确定方法预测客观、准确,对于可精确量化的连续型数据,可使用历史数据驱动确定方法,采用恰当的概率分布对其进行表达。而系统韧性存在模糊及不确定性,对于无法准确量化评估的数据,通过概率分布无法准确地对该因素进行表示,由专家先验知识评判方法给出贝叶斯网络的有关参数和输入模型概率,该网络构建方法在应对系统韧性等不确定性及模糊性问题时有较好的表现效果^[19]。

2.2 韧性评价贝叶斯网络构建

从系统角度出发,提出层次化的贝叶斯网络模型以对空中交通运输系统的韧性变化进行评价,分别是宏观表现层、中间影响层及底部致因层3个层次,对应空中交通运输系统在应对外界冲击及扰动时系统在宏观、中观、微观等不同尺度下的韧性表现。

2.2.1 韧性网络宏观表现层

宏观表现层的构建主要基于Heinimann等^[20]提出的韧性功能测量框架。空中交通系统宏观层的逻辑关系如图2所示,系统韧性的观测因素主要包括系统抵抗力,系统重稳定,系统重建和重新配置。这4类因素提供了系统受到干扰后性能曲线的整体特征,也称为韧性三角曲线。通常由外部或内部干扰触发,随后立即吸收和事件后反应,包括恢复和适应能力,共同作用体现空中交通运输系统韧性特点。该模型可以较好地宏观角度评价空

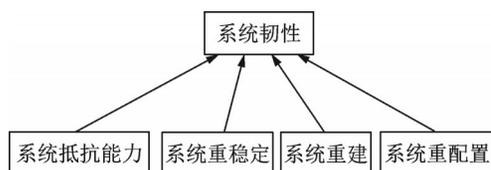


图2 宏观表现层逻辑关系图

Fig.2 Macroscopic logic diagram of resilience

中交通运输系统受扰动时直接表现出的韧性特点。

(1) 系统抵抗能力:一般指系统在受到外界冲击或扰动后,抵抗负面影响的能力,并将性能水平保持在可接受的范围内。这一功能对于长期可持续发展非常重要,这意味着系统能否在不发生任何致命崩溃的情况下经受住冲击。系统的抵抗能力可以较好地描述事中(扰动正在进行时)系统的韧性。

(2) 系统功能重稳定:该指标描述了系统在受到外界冲击后在一定时间内通过自身调节将受到扰动处于功能脆弱状态的系统结构或功能重新恢复到相对稳态的能力,该指标在一定程度上反映了系统韧性与脆弱性之间的关系,在吸收和适应干扰可能发生的过程中发挥着不可或缺的作用。与系统的抵抗能力类似,系统功能重稳定主要用于对事中状态下系统的韧性进行评估。

(3) 系统功能重建:功能重建一般描述系统从受影响状态中重新恢复至相对稳定后,系统通过重建快速恢复原有的基础架构及运行能力的过程,空中交通运输系统的扰动后功能重建主要通过各部门之间的合作及调控层次的努力协同完成,例如情报中心发布有关空域恢复的航行通告,一定区域内的空管运行人员协同运行,迅速恢复延误航班流等。系统功能重建主要对事后(扰动过程结束后)系统的韧性表现进行描述。

(4) 系统功能重配置:用于描述一次“扰动-恢复”过程结束后系统自身从该次事件中吸取经验并对自我结构重新调节的指标,该指标较好地反映了系统的自适应特性及应对外界环境变化做出的改变,是对事后系统状态的评估及再改进,使系统具有适应性和更大的韧性,对于韧性的长期发展至关重要。

2.2.2 韧性网络中间影响层

与系统扰动-恢复过程中的宏观表现不同,中间影响层主要对系统韧性所蕴含的内部特性进行观测。宏观尺度上系统的表现可视为中间影响层系统内部特性在时空范围内的累积而产生的。本文以Murray^[21]提出的交通系统韧性的概念和量化方法为基础,结合空中交通运输系统实际情况,选取韧性网络的中间影响层有关指标。在空中交通运输系统受到外界扰动并逐步恢复的过程中,隐含了系统可用性、可靠性、可变性、可维护性、自适应特性等的变化情况,将这些随系统韧性过程发生改变的系統性质作为中间影响层指标。系统韧性作为一种系统属性,被认为是一种复合属性,由两种性质构成,即“可用性”和“可变性”系统韧性作为一种系统属性^[22]。在系统工程和可靠性工程界都有明确的定义,“可用性”与“可靠性”和“可维护性”有着明显的密切关系。另外,系统的“可变性”应由基

于当前状态的适应能力(“可维护性”和“适应性”)来定义^[23]。这些中间影响层的综合效应确保了运输系统的长期韧性发展,韧性的中间影响层逻辑示意如图3所示。

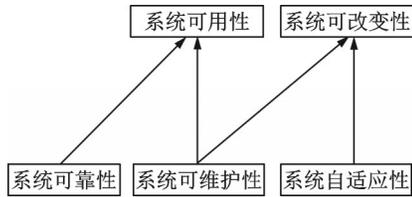


图3 中间影响层逻辑关系图

Fig.3 Logical diagram of the intermediate impact layer

2.2.3 韧性网络底部致因层

底部致因层充当微观层面的底部,支持中间影响层的应用。底部致因层是造成空中交通运输系统中间影响层特性产生变化的根本原因,如民航局

出台相应法规调控对系统运行稳定产生的正向或负向影响;交通运输系统的节能减排等可持续发展要求及航行新技术对系统产生的作用体现了系统本身对社会、经济、环境、科技等适应性;空中交通运输系统的服务水平、鲁棒性、安全性等表现决定了系统的可靠性等。本文在通过中国民用航空局公布的评价空中交通运输发展的有关数据资料进行归纳整理的基础上,征询一线的空管、飞行人员等运行人员及有关专家,从可持续性、航行安全、服务、科技创新、可调控性等多方面评价空中交通运输系统。因此,选取空中交通运输系统底部致因层影响因素,共6大类,17种具体的致因变量影响因素。

所有不同层次的影响因素指标如表1所示。

在得到表1中的空中交通运输系统韧性有关影响指标后,依据其各因素间的逻辑从属、并列关系构建贝叶斯网络如图4所示。

表1 贝叶斯网络结构指标

Table 1 Bayesian network structure indicators

类别	指标	意义	类别	指标	意义
宏观表现层	A_1	系统抵抗能力	底部致因层 影响因素	$E_1/(10^8 \cdot \text{t} \cdot \text{km})$	运输周转量
	A_2	系统重稳定		$E_2/10^4$ 架次	起降架次
	A_3	系统重建		$E_3/10^4$ h	飞行小时
	A_4	系统重配置		$E_4/\text{件}$	旅客投诉
中间影响层	B_1	系统可用性		$E_5/10^8$ ¥	有关系统建设投资
	B_2	系统可改变性		$E_6/10^4$ 架次	扰动影响航班
	C_1	系统可靠性		$E_7/\text{起}$	事故征候
底部致因层	C_2	系统稳定性		E_8	严重事故征候万时率
	C_3	系统自适应性		$E_9/\text{人}$	航空从业人数
	D_1	系统服务水平		$E_{10}/\text{条}$	航线网络
	D_2	系统安全性		$E_{11}/\text{个}$	机场数目
	D_3	系统鲁棒性		$E_{12}/10^4 \text{km}$	临时航路
	D_4	系统可修复性	E_{13}/t	耗油	
	D_5	系统可持续性	E_{14}	双边适航条约	
	D_6	系统可调控性	E_{15}	航行新技术推广	
			E_{16}	重大科技项目	

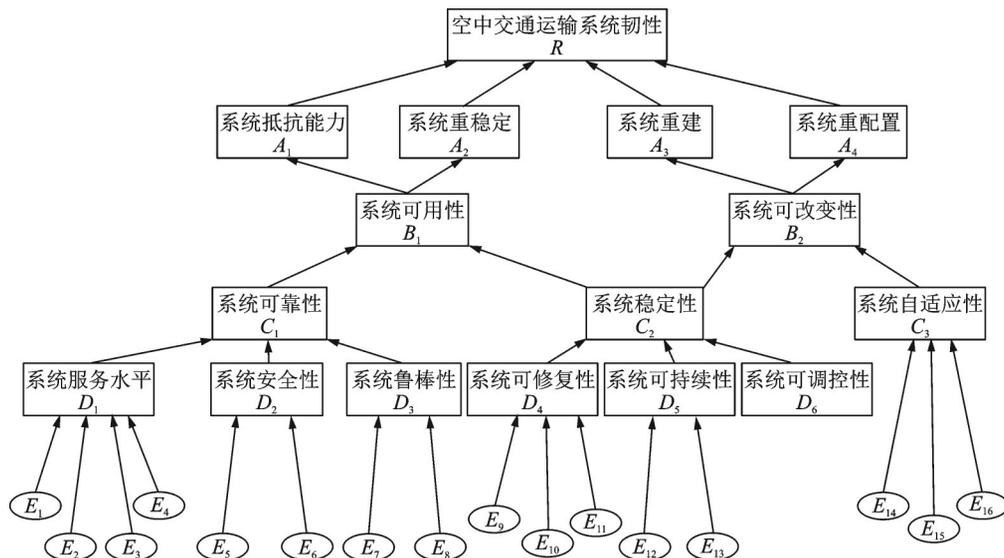


图4 空中交通运输系统韧性贝叶斯网络结构

Fig.4 Bayesian network structure of air transportation system resilience

2.3 韧性评价模型数据处理

确定网络结构后,将网络中的变量转化为由 1、0 代表的二值布尔变量,以 T 和 F 进行表示各节点对空中交通运输系统韧性产生的正向和负向影响,如对于结点 C_1 ,“T”表示具有可靠性,“F”表示不具有可靠性; D_5 中的“T”表示空中交通运输系统中具有可持续性,“F”表示空中交通运输系统不具有可持续性等。

在将系统中各结点进行二值化处理,将底部致因层的各影响因素的统计数据转换为概率分布输入模型进行学习。对于本文选取的底部致因层影响因素数据,可大致分为可精确量化的连续型数据和无法准确量化评估的数据两类。对于可精确量化的连续型数据,采用恰当的概率分布对其进行表达,对各连续型随机变量进行 W 检验,除顾客投诉事件无法准确描述其分布外,其余连续型底层影响因子分布均可近似由正态分布表示,各影响因素 P 值如表 2 表示。

表 2 底部致因层影响因子正态性检验

Table 2 Normality test of influence factors of the bottom causative layer

底部致因层影响因子	正态性检验 P 值	底部致因层影响因子	正态性检验 P 值
E_1	0.380	E_{10}	0.699
E_2	0.854	E_{11}	0.436
E_3	0.947	E_{12}	0.684
E_4	0.020	E_{13}	0.549
E_5	0.559	E_{14}	0.325
E_6	0.664	E_{15}	—
E_7	0.169	E_{16}	0.126
E_9	0.859		

为精确描述历史数据的概率分布,采用截断正态概率分布对各影响因素的先验概率建模。截断正态分布通过确定分布的上限和下限将数据界定在一定范围内,该方法相对于正态分布更贴近于实际运行情况,对于运输周转量、飞行小时数等类似的变量有较好的效果。本节以运输周转量为例给出底层影响因子的截断正态分布。

运输周转量 E_1 的截断正态分布情况为

$$E_1: (x_1 \sim T_N) \sim (\mu; \sigma; \text{Lower} = \min(x); \text{Upper} = \max(x)) \quad (2)$$

式中: x_1 为代表运输周转量的随机变量; T_N 为截断正态分布; μ 为运输周转量分布的均值; σ 为其分布的标准差;Lower、Upper 分别为截断正态分布确定的上限及下限。经计算,取 $\mu = 853.7, \sigma = 257.17, \text{Lower} = 340, \text{Upper} = 1369$ 。对于运输周转量分布,分别以 $\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma$ 作为截断分布的下限及

上限,运输周转量的正态分布与截断正态分布的对比如图 5 所示。对比图 5(a) 及图 5(b) 可知,相比正态分布,通过对历史数据进行截断正态分布处理能更好地表达出实际运行中的概率分布。

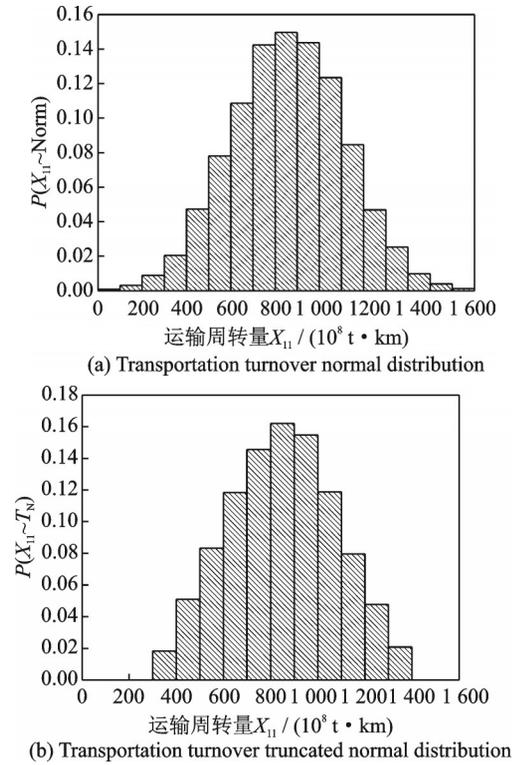


图 5 运输周转量概率分布示意图

Fig.5 Diagram of transportation turnover probability distribution

除了可以转化为概率分布的底层影响因素历史数据,另一部分评价指标无法准确由特定概率分布描述,如表 2 中的 E_4 投诉件数。此外,还有一部分影响因子对空中交通运输系统产生的效用无法准确用数据定量描述,如开源数据中对航行新技术推广因素的定量描述较少,且不同年份内主推实施的新技术也不完全相同(如电子飞行包(Electronic flight bag, EFB)、基于性能的飞行器导航(Performance based navigation, PBN)、平视显示器(Head-up display, HUD)等),因此通过概率分布无法准确地对该因素进行表示。对于这两类数据,输入模型的概率是通过问卷及专家打分形式获得的。首先,将变量因素对系统产生的影响由高到低分为高、较高、中等、较低、(近似)无影响 5 个层级,分别赋分 4 分、3 分、2 分、1 分及 0 分。收集多组数据并综合多组数据计算此结点因素的平均分值,影响力高对应“T=1”,(近似)无影响对应“F=1”,对得到的平均分进行转化,此类影响因素输入概率为

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m 0.25t_i \times 100\% \quad (3)$$

式中: m 为数据总数; t_i 为第 i 组数据的评价值。将

得到的 T 值作为模型的输入概率值。

本文面向空管、飞行人员、航空院校有关专家发放问卷,收集有效数据 274 组,对数据进行处理得到概率值。通过对底层影响因素进行截断正态分布及专家问卷打分处理,得到空中交通运输系统韧性评价贝叶斯网络中各结点的先验概率和后验概率。

3 实证分析

本节将基于已构建的多层贝叶斯网络韧性评价模型对 2010—2019 年中国空中交通运输系统韧性水平及变化趋势进行定量分析;对构建的模型进行灵敏度分析及关系推理,分析底层因素变化对系统整体韧性表现水平带来的变化,以 2020 年新冠疫情为例分析空中交通运输系统的韧性变化情况。实证分析所采用的有关数据来源为中华人民共和国交通运输部发布的月度数据、年度行业发展统计公报及国家统计局发布的开源数据。

3.1 空中交通运输系统韧性变化趋势分析

采用图 4 构建的网络结构对 2010—2019 年中国空中交通运输系统的韧性变化情况进行分析,结果如图 6 所示。由量化评价结果可知,空中交通运输系统具有一定的韧性,2010—2019 年系统韧性总体呈现上升趋势,从 2010 年的 54.1% 增长至 60.2%。其中,2016—2019 年系统韧性水平提高较大,而在 2013—2016 年期间空中交通运输系统韧性表现出了小幅波动的趋势。对比各年度底层影响因素变化可知,韧性产生波动的内部原因一定程度上是在空中交通运输系统高速建设发展的同时,投诉事件及事故征候的发生频次出现巨幅增长以及外界扰动对航班运营的总体影响占比增加,如图 7 所示。从图 7 中可以看出在 2013—2016 年,投诉事件、事故征候的频次及外界扰动对航班运营的总体影响占比逐年递增,投诉事件频次在 2014 年显著增长直至 2017 年。这些影响因素频次的增长,

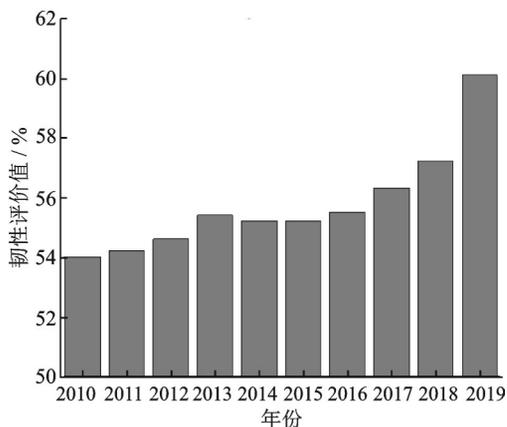


图 6 空中交通运输系统韧性评价价值

Fig.6 Resilience evaluation value of air traffic transportation

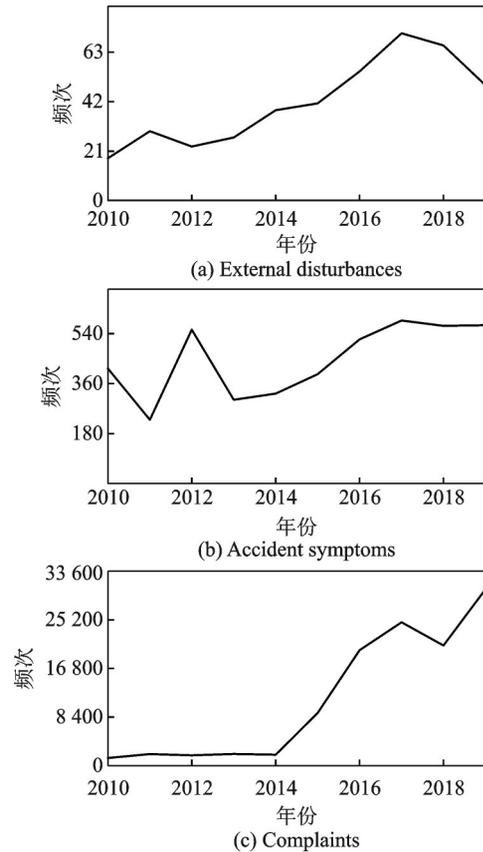


图 7 2010—2019 年实际投诉、事故征候及外界扰动频次变化

Fig.7 Actual changes in complaints, incidents and external disturbances from 2010 to 2019

导致了空中交通运输系统的服务水平、安全性、鲁棒性等中间影响层的系统表现波动下降,最终造成了系统总体韧性水平的减少,体现了该韧性量化模型的适用性。该波动过程在一定程度上也反映了中国民用航空运输系统总体韧性在长期发展中表现出的动态特征。

在贝叶斯网络中,子节点的后验概率会随父节点先验概率的变化而改变。敏感性分析通过量化父节点变化而引起的子节点参数变化程度,从而识别出影响贝叶斯网络的关键因素^[24]。以空中交通运输系统总韧性为目标节点,通过依次改变模型中其他父结点的先验概率,分析系统韧性的变化情况,为统一各结点变化对整体系统带来的影响,分别取“ $T=100\%$, $F=0\%$ ”和“ $T=0\%$, $F=100\%$ ”两种状态的结点。网络中各影响因素的敏感度值相对大小如图 8 所示。

由图 8 可知,系统的重建能力及系统的功能重配置能力(即 A_3 和 A_4)对空中交通运输系统总体韧性表现影响较大,其次为系统的性能下降程度与重稳定性,即与扰动的事中状态相比,扰动的事后恢复及适应,对空中交通运输系统的韧性产生更大的作用

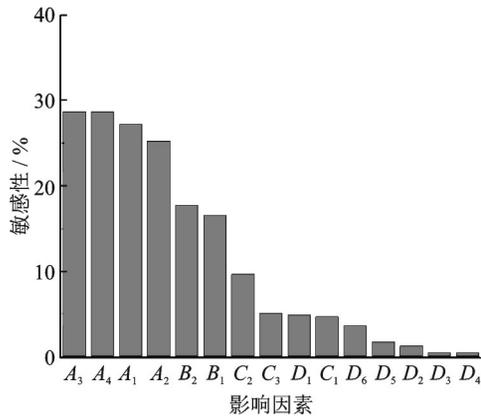


图8 影响因素敏感性示意图

Fig.8 Schematic diagram of sensitivity of influencing factors

效果。中观层下的系统特性表现对系统总体韧性影响略小。而底部致因层的变化对系统总体韧性带来的作用相对有限,其中系统的服务水平与政府的调控行为相对其他底层因素对空中交通运输系统韧性影响更大。敏感度分析结果在一定程度上与韧性贝叶斯网络自下而上的网络架构相对应。

根据图4所构建的贝叶斯网络模型和表1中列韧性相关指标,将2020年的空中交通运输系统韧性进行评价和量化,结果如图9所示。

3.2 新冠疫情影响下的系统韧性分析

2020年1月以来,由于新冠疫情,航班起降架次、运输周转量等均受到严重影响,为保障公民的健康安全,有关部门先后发布“熔断指令”“更改境外航班入境点”等措施缓解新冠疫情对疫情扩散带来的影响,政策调控在保护公民健康的同时也在一定程度上减弱了空中交通运输系统的运行量。基于已经构建的模型,对2020年空中交通运输系统在疫情下的韧性情况进行评估。

鉴于新冠疫情主要对空中交通运输系统底部致因层的服务性和调控性产生较大影响,对于有关部门发布的调控政策,考虑到对航班正常性(尤其对国际航线)带来的负向影响,本文取正向20%,负向80%作为先验概率输入。

2020年的韧性评价网络量化结果如图10所示。

对比图9和图10,新冠疫情影响下的空中交通运输系统韧性出现小幅下降,韧性评价值为57.6%,仍然处在一个相对适度的范围内。其中,新冠疫情主要通过服务性能的下降对系统可靠性造成影响,系统的服务性由69.8%降至27.9%,造成系统性能及系统状态稳定性下降。

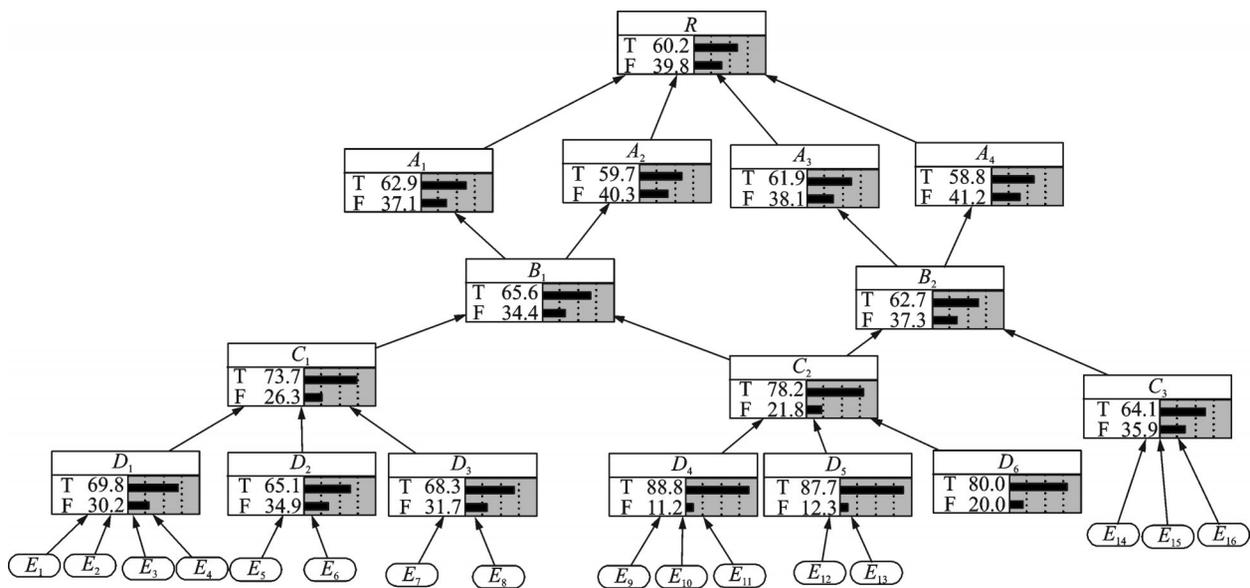


图9 2020年空中交通运输系统韧性量化模型

Fig.9 Quantification model of resilience of air transportation system in 2020

基于3.1节中得出的影响因素敏感性差异分布可知,在疫情对空中交通运输系统的服务水平产生较大冲击的前提下,为有效应对此次卫生事件带来的冲击,应着重加强对系统功能恢复、系统功能重配置方面有关建设,以及尽可能减小新冠疫情对系统性能带来的影响,即着重提高系统的恢复、重配置及其影响因素的水平。

如图11所示,在敏感度分析基础上,通过调节对系统恢复能力、系统重配置影响较大的各中间影响层因素,即系统稳定性及系统适应能力以观察系统韧性变化情况可有效提高系统总体韧性。当设定C₂、C₃因素均为75%正向时,空中交通运输的总体韧性水平从图10中的57.6%增长恢复为60.2%,此时,空中交通运输系统的韧性表

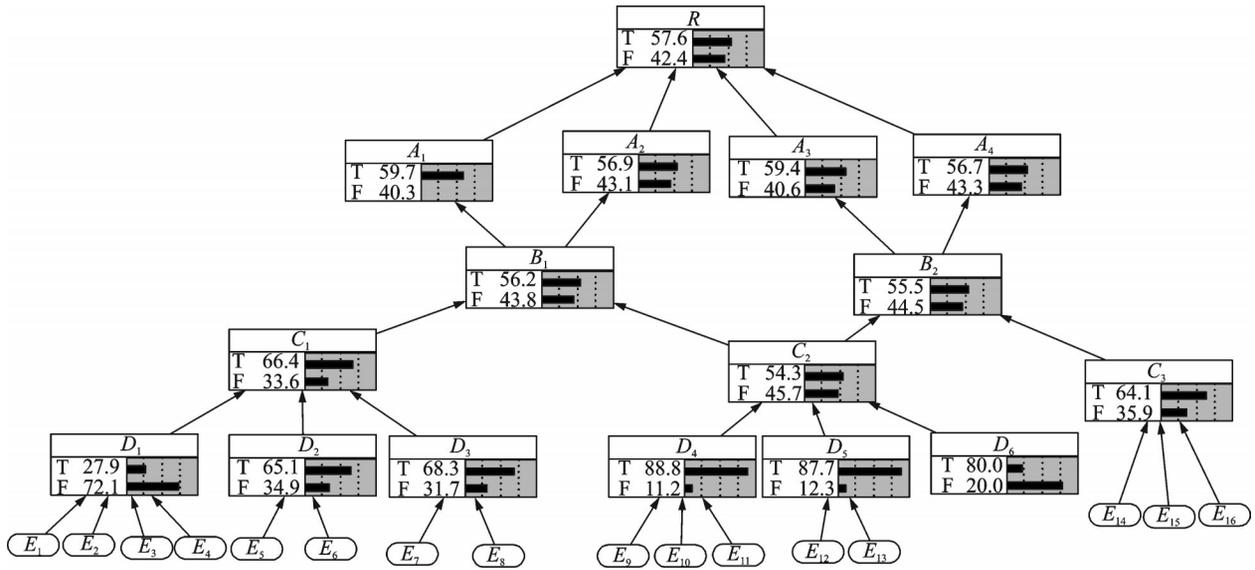


图10 2020年空中交通运输系统韧性评估

Fig.10 Prediction model of resilience of air transportation system in 2020

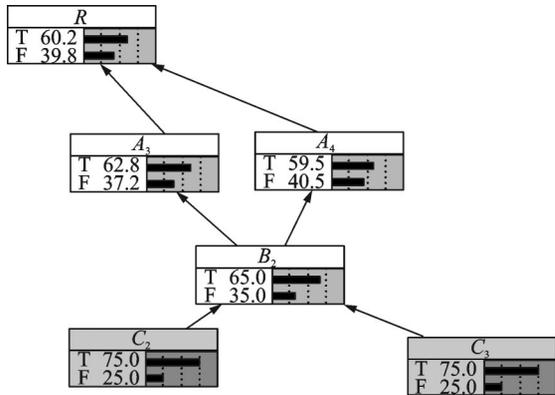


图11 正向推理关系

Fig.11 Forward reasoning relationship

现与2019年时基本一致,在一定程度上减小、抵消了公共卫生突发事件对空中交通运输业带来的影响。

具体而言,应当在服务水平已经受到较大冲击的情况下,对C₂、C₃所包含的底部致因因子进行调节。结合本文所提的贝叶斯韧性网络评价模型及空中交通运输的实际情况,本文提出以下具体韧性提升策略:

(1)加大对于技术层面的支持,推进民航运输有关科技项目的立项,通过提高空中交通运输系统的适应性以达到增强系统功能重配置的目标。加快航行新技术尤其是数字化技术等发展,有利于总结此次新冠疫情引发的问题,对地服、机务、飞行等有关部门作出指导。

(2)增强空中交通运输网络的可修复性,在传统的航路网架构中,主要考虑航空器的可达性及端到端OD对两点的地缘特性。为快速恢复及重配置空中运输系统功能,以达到增强系统韧性目的,

可以考虑在市场需求允许的范围内增加航线及备降场,增加临时航路划设,以更好地应对卫生事件、恶劣天气、军事演练等其他外界因素对空中交通运输系统带来的冲击与干扰。

(3)通过政府有关部门的调控政策,陆续恢复受影响的航班、航线,缩短系统的恢复时间。同时完善灾后复产复工政策,并建立相应预案储备,增强系统的重配置能力,通过增强系统可调控性提高空中交通运输的保障能力。

由此可知,基于贝叶斯韧性模型的正向及反向推理,可通过不同层次的影响因素变化评估空中交通运输系统的韧性变化,并因地制宜提出相应的控制策略与解决方法,最终达到保持或提高空中交通运输系统韧性的目的。

4 结 论

为定量测度空中交通运输系统韧性,提出一种多层次多维度的贝叶斯网络韧性评价模型。该模型从宏观、中观、微观等3个层次自下而上对空中交通运输体系进行评估;以中国2010—2019年运输航空为例,对空中交通运输系统韧性进行评价,证明了模型的适用性;以2020年新冠疫情为例,讨论了特定灾害扰动下系统的韧性变化情况与恢复策略。研究结论如下:

(1)中国空中交通运输系统韧性水平总体适中,随社会、经济发展而呈现上升的趋势。在总体上升趋势下具有一定的局部波动,反映出空中交通运输系统韧性的动态特征。

(2)空中交通运输系统恢复与重配置能力占据韧性主导地位,即在空中交通运输系统设计中,

应着重注意这两项指标的变化与发展。

(3)新冠疫情主要影响系统服务水平从而降低系统抵抗能力,造成系统韧性水平下降,可通过调节相关敏感度较高的影响因子减小灾害对系统造成的冲击。

本文的研究针对运输航空展开,但随着民航运输业的不断发展,通航及无人机业务所占比重不断增加,未来将进一步研究通航、无人机航空对空中交通运输系统韧性的影响。

参考文献:

- [1] Civil Aviation Administration of China. 2019 Civil Aviation Industry Development Statistics Bulletin [EB/OL].[2019-01-01].http://www.caac.gov.cn.
- [2] MENCK P J, HEITZIG J, KURTHS J, et al. How dead ends undermine power grid stability[J]. *Nature Communications*, 2014, 3969(5): 1-8.
- [3] PEI J J, LIU W, HAN L. Research on evaluation index system of Chinese city safety resilience based on Delphi method and cloud model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 1-6.
- [4] 吕彪,高自强,管心怡,等.基于日变交通配流的城市道路网络韧性评估[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(6): 1181-1190.
LV Biao, GAO Ziqiang, GUAN Xinyi, et al. Resilience assessment of urban road network based on day-to-day traffic assignment[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(6): 1181-1190.
- [5] 刘婧,史培军,葛怡,等.灾害恢复力研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 2006(2): 211-218.
LIU Jing, SHI Peijun, GE Yi, et al. The review of disaster resilience research[J]. *Advances in Earth Science*, 2006(2): 211-218.
- [6] 王兴隆,苗尚飞.空域扇区网络结构特性分析及韧性评估[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(5): 904-911.
WANG Xinglong, MIAO Sangfei. Structural characteristics analysis and resilience assessment of airspace sector network[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(5): 904-911.
- [7] WANG Y, ZHAN J, XU X, et al. Measuring the resilience of an airport network[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(12): 2694-2705.
- [8] 王兴隆,潘维煌,赵末.空中交通相依网络的脆弱性研究[J]. *航空学报*, 2018, 39(12): 275-284.
WANG Xinglong, PAN Weihuang, ZHAO Mo. Vulnerability of air traffic interdependent network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(12): 275-284.
- [9] 武喜萍,杨红雨,韩松臣.基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析[J]. *航空学报*, 2017, 38(S1): 113-119.
WU Xiping, YANG Hongyu, HAN Songchen. Analysis of properties and delay propagation of air traffic based on complex network[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(S1): 113-119.
- [10] PIEN K C, HAN K, SHANG W, et al. Robustness analysis of the European air traffic network[J]. *Transport Metrics A: Transport Science*, 2015, 11(9): 772-792.
- [11] ZHANG X, MILLER-HOOKS E, DENNY K. Assessing the role of network topology in transportation network resilience[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 46: 35-45.
- [12] WANG X, KOC Y, DERRIBLE S, et al. Multi-criteria robustness analysis of metro networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 474: 19-31.
- [13] MATSSON L G, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16-34.
- [14] HOSSEINI S, BARKER K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 252-266.
- [15] 陈群,黄骞,陈哲,等.基于贝叶斯网络的地铁工程系统韧性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(11): 98-103.
CHEN Qun, HUANG Qian, CHEN Zhe, et al. Quantitative evaluation of resilience of metro engineering system based on Bayesian networks[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(11): 98-103.
- [16] ABIGAIL O A, NICHOLAS E L. Complex network method of evaluating resilience in surface transportation networks[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2467(1): 120-128.
- [17] 李兆隆,金淳,胡畔,等.基于弹性的交通网络应急恢复阶段策略优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(11): 2828-2841.
LI Zhaolong, JIN Chun, HU Pan, et al. Resilience-based recovery strategy optimization in emergency recovery phase for transportation networks[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2019, 39(11): 2828-2841.
- [18] ZHAGN L, WU X, DING L, et al. Decision support

- analysis for safety control in complex project environments based on Bayesian networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(11): 4273-4282.
- [19] HOSSEINI S, KHALED A A, SARDER M D. A general framework for assessing system resilience using bayesian networks: A case study of Sulfuric acid manufacturer[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, 41: 211-227.
- [20] HEINIMANN H R, HATFIELD K. Infrastructure resilience assessment, management and governance-state and perspectives[M]//NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2017: 147-187.
- [21] MURRAY P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, USA: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [22] BOEHM B, KUKREJA N. An initial ontology for system qualities[J]. *Insight*, 2017, 20(3): 18-28.
- [23] BOEHM B, CHEN C, SRISOPHA K, et al. The key roles of maintainability in an ontology for system qualities[J]. *INCOSE International Symposium*, 2016, 26(1): 2026-2040.
- [24] 严利鑫, 秦伶俐, 熊钰冰, 等. 多模式公驾智能车行驶安全性评估研究[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(3): 1-7.
- YAN Lixin, QIN Lingqiao, XIONG Yubing, et al. A safety evaluation intelligent vehicles with multi-mode cooperative driving[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(3): 1-7.

(编辑:张蓓)