DOI: 10.3901/JME.2021.08.221

服役过程中高速列车动态损失定量分析方法^{*}

孙文君¹ 刘志亮^{1,2} 王佳鑫¹ 秦 勇³

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731;

2. 电子科技大学广东电子信息工程研究院 东莞 523808;

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)

摘要: 高速列车故障所导致的事故会造成很大的经济损失与社会影响,而现有的高速列车风险评估方法未能考虑列车服役过程中外界环境的时变特性。选择考虑多环境因素共同作用下的动态损失系数对静态值进行更新,建立适用于高速列车的运行风险定量评估方法。通过对与损失密切相关的典型环境因素进行分析,首先利用逻辑斯蒂分布构建不同环境因素对高速列车运行损失代价的影响的概率模型,进而应用层次分析法完成对不同环境因素的影响权重分配,最终将环境影响权重与概率模型相结合实现高速列车的动态损失量化评估。对某型高速列车运行过程的仿真验证结果表明,计算结果不仅能满足高速列车对动态风险评估的需求,而且能合理地刻画不同环境因素综合作用条件下的动态损失。该方法将实时的外界环境因素对于运行事故的损失引入高速列车定量风险评估中,能够为相关人员的决策提供一种有效的参考指标。

关键词: 动态损失; 运行环境; 风险评估; 高速列车

中图分类号: TG156

Dynamic Loss Quantitative Method for High-speed Trains in Operation

SUN Wenjun¹ LIU Zhiliang^{1,2} WANG Jiaxin¹ QIN Yong³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731;

2. Institute of Electronic and Information Engineering of UESTC in Guangdong, Dongguan 523808;

3. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Accidents caused by the high-speed train failure will incur great economic losses and negative social impacts. However, existing risk assessment methods of high-speed train do not take the time-varying characteristic of external environment into account during the operating process. To solve this problem, the dynamic loss coefficient is utilized to update the static value with combined action of multiple environmental factors. An assessment method is advanced to evaluate the operational risk of high-speed train. Concretely, first of all, in order to describe the impact of different environmental factors on the loss, the probability distribution models are constructed by using logistic distribution after analyzing the typical environmental factors closely related to the loss. Then, the analytic hierarchy process is introduced to determine the weights of the impact on different environmental factors. Finally, quantitative assessment of the dynamic loss to the high-speed trains could be achieved after considering both the environmental impact weights and probability models. To validate the effectiveness of the proposed method, simulation is carried out on a certain type of high-speed train. The result shows that the proposed method not only meets the needs of high-speed trains for dynamic risk assessment, but also reasonably characterizes the dynamic losses under the combined action of different environmental factors. By considering the influence of real-time external environmental factors to the loss of operational accidents in the quantitative risk assessment of high-speed trains, the proposed method can provide an effective reference index to relevant personnel for the decision-making.

Key words: dynamic loss; environment factor; risk assessment; high-speed train

0 前言

高速列车是指行驶速度在 200 km/h 以上的列

车。高速列车属于现代化的高速交通工具,是轨道交通顶尖科学技术的集中体现,可以大幅提高运行速度,从而提高高速列车运输效率。伴随着高速列车技术的发展,高速列车得到了广泛的应用,已经成为人们出行的主要方式之一。高速列车在运行过程中会受到外界环境变化的影响,例如在大雨、强风和极

^{*} 国家自然科学基金重点(61833002)和广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515012085)资助项目。20200110 收到初稿,20200915 收到修改稿

端气温的情况下, 高速列车发生事故引起的损失会相应的增加。因此, 研究如何客观评估环境因素作用下高速列车动态风险成为亟需解决的问题。

风险的定义具有很多种形式, 较为普遍的一种形式是时间发生的估计概率和事件的后果的乘积, 也就是不良影响发生的概率和严重程度的衡量标准。风险可以被定义为一组场景, 每个场景都有一个概率或者频率和一个后果, 对于一个给定的场景, 风险就是估计概率或频率和事件后果的乘积。

本文将高速列车运行风险定义为两个部分: 一是高速列车在服役过程中发生危险事件的可能性; 二是某个危险事件发生所造成的损失。此处损失值是指, 高速列车发生故障或者意外事故之后, 经过一系列的事态演变导致全部后果折算之后的经济损失, 单位为一元。当高速列车正常运行时, 本文认为其损失值为零。在高速列车运行风险评估方面, 传统的方法有故障树分析法、基于层次分析和专家经验的方法、基于蒙特卡洛和贝叶斯网络等方法^[1-3]。部分学者还基于复杂影响关系对高速列车的运行风险模型进行了研究, 如复杂网络与熵理论模型^[4]、Petri 网模型^[5]等。整体来说, 高速列车的运行风险评估正在逐渐从定性到定量、从静态到动态的方向发展^[6]。

在动态损失评估方面, 钱龙霞等^[7]建立了基于 Copula 函数的水资源供需风险损失模型^[8]和基于最大熵原理和数据包络分析的水资源短缺风险损失模型。李赛等^[9]提出了基于险度函数的装备供应链风险损失度量方法。PALTRINIERI 等^[10]通过进行非典型场景识别进而计算得到损失函数与损失概率结合最终得到风险评估结果。AN 等^[11]采用了一种基于熵权和 BP 神经网络的模糊综合评价方法对天然气管道的风险损失成本进行了预测。ABAD 等^[12]研究了损失函数在在险值法衡量风险中的应用。然而, 在高速列车动态损失评估方面, 还鲜有研究。基于此, 本文以降雨量、风力等级、气温和行驶距离 4 个环境因素为例, 研究服役过程中运行环境因素对高速列车运行故障或事故损失的影响, 在此基础上提出了一种高速列车动态损失定量评估方法。

1 基本理论

1.1 逻辑斯蒂分布

逻辑斯蒂分布最早来自于生长曲线的需要。在火药性能研究工作中, 对于表现敏感性的临界刺激量的概率分布, 有时用逻辑斯蒂分布来表示, 而同正态分布一起, 成为在这一领域应用最广的两个分布。此外, 逻辑斯蒂分布还用于经济、人口统计以

及可靠性工程等领域。

逻辑斯蒂分布是一种连续型的概率分布, 记为 $L(\mu, \gamma)$, 当 $\mu=0$ 且 $\gamma=1$ 时, 称为标准的逻辑斯蒂分布, 其累积分布函数

$$F(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{t-\mu}{\gamma}\right)} \quad (1)$$

概率密度函数

$$f(t) = \frac{\exp\left(-\frac{t-\mu}{\gamma}\right)}{\gamma \left[1 + \exp\left(-\frac{t-\mu}{\gamma}\right)\right]^2} \quad (2)$$

式中, μ 是散布中心, 也是数学期望; γ 表示散布程度, γ 越大, 散布程度也越大。

逻辑斯蒂分布函数的图形是一条 S 形曲线, 该曲线以点 $(\mu, 0.5)$ 中心对称, 曲线在中心附近增长速度较快, 在两端增长速度较慢, 形状参数 γ 的值越小, 曲线在中心附近增长得越快。通过对逻辑斯蒂分布的累积分布函数和概率密度函数进行趋势分析可以看出, 该函数符合列车服役过程中外界因素对故障或者事故后经济损失的影响变化。比如, 随着降雨量的增加, 高速列车发生故障或者危险事件后, 维修或者救援的成本就会增加, 那么对应的损失也就会增加。具体的损失增长趋势也会随着降雨量的变化呈现不同的增长速率。因此, 本文采用逻辑斯蒂分布作为基础函数, 通过适当的函数变形和选择不同参数以适应不同因素对于故障或者事故损失的影响程度。

1.2 一致性检验 RI 值

SAATY 提出了一种一致性比例检验方法: 随机抽取 1~15 阶的判断矩阵 500 个, 根据式

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

计算出各个判断矩阵的 CI , 然后以被抽取样本判断矩阵的 CI 平均值作为随机一致性指标 RI , 不同阶数矩阵的 RI 取值见表 1。用一致性比例 $CR=CI/RI$ 来检验判断矩阵是否具有-致性, 若 $CR<0.10$, 认为判断矩阵满足一致性要求; 否则, 判断矩阵不满足一致性要求^[13]。

表 1 RI 取值表

阶数 n	RI	阶数 n	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	0.49

2 动态损失系数定量计算方法

为定量计算高速列车运行过程中的动态损失系数，本文提出一种不同环境因素作用下动态损失系数定量计算方法。如图 1 所示，该方法包括 3 个步骤：一是单一环境因素作用下的动态损失系数计算，二是多环境因素权重分配，三是融合多环境因素的动态损失系数计算。

图 1 考虑多环境因素的动态损失系数定量分析方法

2.1 单一环境因素作用下的动态损失系数计算

据统计，高速列车事故主要包括 4 种：碰撞、脱轨、火灾和非正常停车。高速列车事故所造成的损失会随着外界环境的变化而变化，根据之前的研究^[14]，环境因素主要有强风、大雨、大雪、雨涝、雷电、地震等。本文以降雨量、风力等级、气温和行驶距离 4 个环境因素为例，介绍考虑多环境因素下的高速列车动态损失定量评估方法。

降水量是指某一段时间内，从天空降落到地面上的液态(雨)或固态(雪)降水，未经蒸发、渗透和流失，在水平面上积累的深度。降水量以毫米(mm)为单位。气象站常见的观测时间大体包括每分钟、每小时、每日降水量。查询国家标准得到表 2^[15]和表 3^[16]，根据表 2 可以看出我国的 12 h 降雨量的范围是 0~140.0 mm。当降雨量达到 15 mm 时就达到了大雨的等级。在强降雨天气发生时，首先影响工作人员的瞭望，工作人员视线模糊不清，会导致事态发展无法得到有效的遏制，此外高速运行的动车组遇到密集的雨滴也会对列车产生较大的冲击，进一步造成更大的损失。具体地，当降雨量处于一个较低的水平时，损失会随着降雨量的增加而缓慢增加，当降雨量达到大到暴雨的水平时，维修或者救

援措施相应的成本也会迅速增加，后续随着降雨量越来越大，达到一定程度时，该因素对于工作人员视线等问题的影响会趋于稳定，相应地，对于损失的影响也变化不大。因此，采用基于逻辑斯蒂分布函数的关系式来进行表示具有合理性和有效性。因此选择量化函数

$$F_r = 1 + \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{r-15}{\gamma}\right)} \tag{4}$$

式中， r 表示 12 h 降雨量(mm)； γ 表示降雨量的拟合形状因子，一般由专家给出； F_r 是随着降雨量的变化而变化的损失系数。需要特别说明的是，本文中提到的损失系数是动态损失与静态损失之比。

表 2 不同时段降雨量等级划分表

等级	时段降雨量 r / mm	
	12 h	24 h
微量降雨	<0.1	<0.1
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100~249.9
特大暴雨	≥ 140.0	≥ 250.0

表 3 风力等级划分表

风力/级	风速 v / (m·s ⁻¹)	风力/级	风速 v / (m·s ⁻¹)
0	0.0~0.2	9	20.8~24.4
1	0.3~1.5	10	24.5~28.4
2	1.6~3.3	11	28.5~32.6
3	3.4~5.4	12	32.7~36.9
4	5.5~7.9	13	37.0~41.4
5	8.0~10.7	14	41.5~46.1
6	10.8~13.8	15	46.2~50.9
7	13.9~17.1	16	51.0~56.0
8	17.2~20.7	17	≥ 56.1

风力是指风吹到物体上所表现出的力量的大小。一般根据风吹到地面或水面的物体上所产生的各种现象，把风力的大小分为 18 个等级，最小是 0 级，最大为 17 级。风速是风的前进速度。相邻两地间的气压差愈大，空气流动越快，风速越大，风的力量自然也就大。因此，通常都是以风力来表示风的大小。风力的大小会影响工作人员的维修和救援工作，在故障或事故发生之后如果无法得到有效的

救援,就会进一步增加损失。严重地,如果列车发生火灾事故,风力对于损失的影响会更加明显。具体来说,当风力处于一个较低的水平时,微风或者无风的情况,对于工作人员的影响不大,当风力达到一定的水平时,对于工作人员的影响会迅速增加,后续当风力达到一定的程度时,对于工作人员的影响也会趋于稳定,相应带来的损失也会增长缓慢。通过分析来看,风力大小与损失量化函数的关系趋势和降雨量与损失量化函数的关系趋势相差不大。

根据表 3 取风速范围为 0~56.0 m/s,当风力等级为 8 级时,表现为大风。选择位置参数为 17 的量化函数

$$F_v = 1 + \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{v-17}{\gamma}\right)} \quad (5)$$

式中, v 表示实时风速,单位 m/s; γ 表示风力的拟合形状因子,一般由专家给出; F_v 是随着风力的变化而变化的损失系数。

气温体现了空气的冷热程度。地面气象观测中测定的是离地面 1.5 m 高度处的气温。同时为了避免辐射误差,测量仪器为放置在避光且通风的百叶箱内。中国极端最高气温最高的地方是在新疆的吐鲁番盆地,新中国成立前吐鲁番曾创下了 47.8 °C 的全国记录。以后,在 1953 年和 1956 年这两年的 7 月 24 日,都出现过 47.6 °C 的高温,1975 年 7 月 13 日吐鲁番民航机场还曾观测到目前中国的极端最高气温——49.6 °C。中国内蒙古自治区大兴安岭的免渡河在 1922 年 1 月 16 日曾观测到-50.1 °C 的温度,是新中国成立前气温记录中的最低值。新中国成立后,新疆北部的富蕴气象站在 1960 年 1 月 20 日以-50.7 °C 的低温首次打破了免渡河的记录,接着 1 月 21 日又以-51.5 °C 再创全国新记录。中国最北的气象站——黑龙江省漠河气象站,1968 年 12 月 27 日清晨测得了气温-50.9 °C。而在 1969 年 2 月 13 日漠河诞生了中国现有气象资料中的极端最低气温记录为-52.3 °C。

适宜的环境温度对于高速列车各个部件的正常运行十分重要,当列车发生故障时温度过高或者温度过低都会使得高速列车故障加剧,在故障加剧到一定程度后,会诱发火灾等更加严重的事故后果。同时,过高的温度或者过低的温度对于在外工作的工作人员的身心健康也是一个潜在威胁。通过分析可以发现其变化趋势与逻辑斯蒂分布的概率密度函数趋势正好相反。基于此,取概率密度函数的相反

数并进行一定的函数变形得到初步函数模型,同时根据资料,本文选择气温的范围是-50~50 °C,同时将 26 °C 作为最适宜温度,给定参数最终建立量化函数模型

$$F_t = 2 - \frac{\exp\left(-\frac{t-26}{\gamma}\right)}{\gamma \left[1 + \exp\left(-\frac{t-26}{\gamma}\right)\right]^2} \quad (6)$$

式中, t 表示实时温度(°C); γ 表示气温的拟合形状因子,一般由专家给出; F_t 是随着气温的变化而变化的损失系数。

高速列车在运行过程中,从驶出车站开始到驶入下一个车站的过程中,高速列车距离车站的距离越远,发生故障或者事故后得到有效维修援助的时间会相应增加,进而造成的损失也会相应地增加。即在一个运行区间内,列车在两个站点中间位置时,得到有效维修援助的时间最长,损失最大;在站点时,得到有效维修援助的时间最短,损失最小。在每个运行区间内,损失随列车距站点的距离变化而变化的关系与逻辑斯蒂分布的概率密度函数的趋势相似,根据这一点建立量化函数模型

$$F_x = 1 + \frac{\exp\left(-\frac{x-L/2}{\gamma}\right)}{\gamma \left[1 + \exp\left(-\frac{x-L/2}{\gamma}\right)\right]^2} \quad (7)$$

式中, x 表示高速列车已经行驶的距离(km); L 是两个车站的距离(km); γ 表示行驶距离的拟合形状因子,一般由专家给出; F_x 随着高速列车行驶距离的变化而变化的损失系数。

2.2 多环境因素权重分配

通过建立上述模型,可以分别得到降雨量、风力、气温和行驶距离 4 个环境因素对于高速列车事故损失系数的影响。为求得高速列车运行事故在多环境因素作用下的损失系数,需要计算每个环境因素的权重值。

各环境因素权重分配方法如下。

步骤 1: 建立两两判断矩阵。设降雨量、风力、气温和行驶距离 4 个环境因素分别是 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 ,将这 4 个环境因素进行两两比较后评分,评分分值如表 4 所示,得到两两判断矩阵

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{pmatrix} \quad (8)$$

表 4 因素评分标准

分值	定义
1	i 因素与 j 因素同样重要
3	i 因素比 j 因素略重要
5	i 因素比 j 因素稍重要
7	i 因素比 j 因素重要得多
9	i 因素比 j 因素重要得很多
2,4,6,8	i 与 j 两因素重要性比较结果处于以上结果的中间
倒数	j 与 i 两因素重要性比较结果在 i 与 j 因素比较结果的中间

步骤 2: 将判断矩阵每一列正规化。针对判断矩阵, 将矩阵 C 的每一列正规化得到矩阵 R 。矩阵 R 中的各个元素可由下式计算获得

$$r_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^4 c_{kj}} \quad (9)$$

步骤 3: 计算特征向量。将正规化的判断矩阵 R 按行相加, 得到

$$w_i = \sum_{k=1}^4 r_{ik} \quad i=1,2,3,4 \quad (10)$$

将 w_i 进行量纲一化可以得到

$$w_i = \overline{w_i} / \sum \overline{w_i} \quad (11)$$

步骤 4: 一致性检验。记判断矩阵 C 的最大特征值为 $\lambda_{\max}$, 设 CI 为判断矩阵的一致性指标

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (12)$$

当矩阵具有完全一致性时, $CI=0$, $\lambda_{\max}-n$ 越大, CI 越大, 矩阵的一致性越差。其中, CI 为判断矩阵的一致性指标, λ 为特征值; n 为矩阵的维数, 查 RI 取值表, 并计算 $CI/RI < 0.1$ 时, 判断矩阵一致性达到要求; 否则重新进行判断(RI 为矩阵的平均随机一致性指标)。

2.3 融合多环境因素的动态损失系数计算

经过第 2.2 节计算得到一致性达到要求的权重后, 与第 2.1 节计算得到的单一环境因素作用下的动态损失系数结合, 得到融合多个环境因素的动态损失系数为

$$F = w_1 F_r + w_2 F_v + w_3 F_t + w_4 F_x \quad (13)$$

3 实例仿真验证

3.1 动态损失系数计算范例

本文以某一型号高速列车的运行过程为例验证上述方法。已知高速列车的运行时间为 08:08 到 14:23, 历时 6 h 15 min, 全程 1 181 km。该高速列

车运行时刻表如表 5 所示。

表 5 某高速列车运行时刻表

站次	运行时间/min	里程 x /km
1	0	0
2	14	32
3	30	66
4	49	113
5	104	278
6	130	340
7	157	416
8	233	658
9	272	779
10	327	1 038
11	344	1 088
12	375	1 181

在本次仿真试验中, 做出以下 3 点假设。

(1) 假设在该高速列车运行过程中的 12 h 降雨量在定义域 0~150 mm 中呈阶梯状变化。初始状态为 0, 随着高速列车运行距离的变化逐渐增加, 在总运行距离为 400 km 时达到最大, 然后在 500 km 时开始下降, 一直下降到 0。

(2) 假设在该高速列车运行过程中的风速呈阶梯状变化, 初始时风速为 0, 随着高速列车运行距离的变化逐渐增加, 在总运行距离为 360 km 时达到最大, 然后在 500 km 时开始下降, 一直下降到 0。

(3) 假设在该高速列车运行过程中的温度变化呈三角函数变化, 其中最高温度为 50 °C, 最低温度为 -50 °C。

基于以上假设, 根据式(4)~(7)可以计算得到不同因素下的损失系数值, 得到图 2~5 所示结果。

根据图 2~4 可以看出, 高速列车运行过程中的损失会随着降雨量和风速的大小进行波动, 当降雨量和风速较大时, 损失会变大; 当降雨量和风速较

图 2 降雨量单一作用下的损失系数

小时,损失也会相应地减少。随着时间的增加,温度逐渐升高,在温度达到适宜温度之前,损失不断降低,在达到适宜温度后再继续升高,损失开始增加,当温度再次下降时,损失又出现了下降的趋势。由图5可以看出随着高速列车运行,在站点时损失较低,在运行的过程中高速列车距离站点越远损失越大。

图3 风速单一作用下的损失系数

图4 气温单一作用下的损失系数

图5 行驶距离单一作用下的损失系数

下面对各环境因素的权重进行分配。

建立两两判断矩阵,由专家进行打分,得到两两判断矩阵

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 1/3 & 1/5 \\ 7 & 1 & 5 & 3 \\ 3 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 5 & 1/3 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

将每一列正规化,计算得到矩阵

$$R = \begin{pmatrix} 0.0625 & 0.0852 & 0.0357 & 0.0441 \\ 0.4375 & 0.5966 & 0.5357 & 0.6618 \\ 0.1875 & 0.1193 & 0.1071 & 0.0735 \\ 0.3125 & 0.1989 & 0.3214 & 0.2206 \end{pmatrix} \quad (15)$$

计算特征向量

$$w_1 = \sum_{k=1}^4 r_{1k} = 0.2275 \quad (16)$$

$$w_2 = \sum_{k=1}^4 r_{2k} = 2.2316 \quad (17)$$

$$w_3 = \sum_{k=1}^4 r_{3k} = 0.4874 \quad (18)$$

$$w_4 = \sum_{k=1}^4 r_{4k} = 1.0534 \quad (19)$$

量纲一化可得

$$\bar{w}_1 = w_1 / \sum w_i = 0.0569 \quad (20)$$

$$\bar{w}_2 = w_2 / \sum w_i = 0.5579 \quad (21)$$

$$\bar{w}_3 = w_3 / \sum w_i = 0.1218 \quad (22)$$

$$\bar{w}_4 = w_4 / \sum w_i = 0.2633 \quad (23)$$

计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=4.1170$, 所以

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = 0.0390 \quad (24)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0390}{0.90} = 0.0433 < 0.10 \quad (25)$$

根据计算可以得到 CR 的值满足一致性检验,因此上述各因素权重具有一致性。将各个环境因素的权重值和相应的损失系数相结合得到随时间变化的动态损失系数。

3.2 损失系数在风险评估中的应用

针对列车发生故障的情景,以下具体地说明该动态损失系数在风险评估计算中的应用。在高速列车实际的运行过程中,为了避免由于某些关键部件发生故障而出现非常严重的事故状况,通常会采用

一些安全措施,来提高列车运行的安全性。常见的安全保障机制有微机监测报警系统、应急措施机制、室外维护机制等。在列车发生故障后,从微机监测报警系统来看有两种情况,第一种是该系统能够检测到异常,这时采用有效的室外维护机制可以较好地预防事故的发生,若不能采用有效的维护机制,则会导致列车出现非正常停车等情况。另一种是该微机报警系统没有及时检测到列车故障,此时如果日常的维护工作仍旧没有发现列车故障问题,则会导致列车运行事故。而列车运行事故后的应急措施能否有效地施行则决定了所发生的事故的严重程度。上述分析可以通过事件树模型来进行描述,具体如图 6 所示。

本文将列车运行事故的严重程度分为了 4 个等级,分别为 1、2、3 和 4。等级 1 对应的是未对列车运行造成影响或者造成轻微影响,等级 2 对应的是未造成交通事故但影响正常运营,等级 3 对应的是是一般事故,等级 4 对应的是严重事故。假设每个等级的事件损失分别为 1 万元、10 万元、100 万元和 1 000 万元。

下一步是计算不同严重程度的列车运行事故的发生概率。计算方式如下:根据不同安全屏障的故障树模型,将底事件的失效概率由下至上进行计算,最终得到安全屏障的失效概率。在这里为了简化计算,直接假设每个安全屏障失效发生的概率如表 6 所示,高速列车故障的概率为 0.2。

表 6 安全屏障失效概率

安全屏障	失效概率
微机监测报警系统	0.025
室外日常维护机制	0.015
应急措施机制	0.028

为了获得不同程度的最终事件的发生概率,可以简单地将与该状态相关的每个分支的概率相乘。例如,严重等级为 2 的事件发生概率计算式为

$$P = P_0 \times (1 - P_1) \times P_2 \quad (26)$$

式中, P_0 为高速列车发生故障的概率, P_1 为微机监测报警系统的失效概率, P_2 为室外日常维护机制失效概率。其他等级的事件发生概率也可类比该方法进行计算,最终结果如表 7 所示,进而计算得到静态风险值 $R_s=2\ 356.4$, 单位为元。

表 7 不同严重等级的事件发生概率

严重等级	1	2	3	4
发生概率	0.197	2.925×10^{-3}	7.29×10^{-5}	2.1×10^{-6}

最后,将本文方法所得到的动态损失系数与静态损失结果相乘即可得到动态评估结果,最终动态风险评估结果与静态风险相对比可以得到图 7。

图 7 风速为主导下的静态与动态风险对比

如图 7 可知,静态风险在高速列车的运行过程中不具有及时更新的特性,不符合实际需求,动态损失则能够满足高速列车对动态风险评估的需求。同时,根据上述判断矩阵得到的权重可以看出,在本次仿真试验中,风速为主导因素,对高速列车运行的损失影响较大。下面重复上述步骤分别采用以温度、行驶距离,降雨量为主导因素的判断矩阵来进行动态风险的计算得到图 8~10。

根据对比可以看出,图 7 中的动态风险变化趋势与风力单一因素作用下的损失变化整体趋势相似。图 8 中的风险变化趋势与温度因素下的损失变化整体相似。图 9 中的风险变化趋势与降雨量因素下的损失变化整体相似。根据图 10 可以看出,在高速列车运行过程中随着距离最近站点的距离的变化,风险变化较为突出。

图 8 度为主导下的静态与动态风险对比

图 9 行驶距离为主导下的静态与动态风险对比

图 10 雨量为主导下的静态与动态风险对比

4 结论

从高速列车运行风险损失定量评估的角度,通过对高速列车运行环境的分析,提出一种可以定量衡量高速列车运行环境下的动态损失的方法。由仿真试验结果,可以得出以下结论。

(1) 故障损失受到了包括外部环境、安全保障

机制、故障类型及程度等因素在内的多种因素综合作用的影响。

(2) 动态风险损失结果与主导环境因素密切相关,具有相似分布特点及整体趋势。

(3) 该方法能够基本刻画出高速列车在服役过程中随着外界环境因素和风险不断变化的情况,能够为相关人员提供一种参考指标。

提出的方法在实际应用中还存在两个难点:在本文中外界环境的参数与列车运行过程中的损失通过以逻辑斯蒂分布函数为基本函数建立给定参数(如量化函数关系式中的 γ)的对应关系,在实际应用中,如何在数据缺乏的情况下选择合适的参数是一个需要解决的问题;在各个因素权重确立方面,本文采用的是专家判断矩阵的方法,该方法可能与实际具有一定的偏差,如何建立更加与实际相符合的判断矩阵,也是一个需要考虑的问题。

参 考 文 献

- [1] SHAFIEEZADEH A, CHA E, ELLINGWOOD B. A decision framework for managing risk to airports from terrorist attack[J]. Risk Analysis, 2015, 35(2): 292-306.
- [2] LABEAU P, SMIDTS C, SWAMINATHAN S. Dynamic reliability: Towards an integrated platform for probabilistic risk assessment[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2000, 68(3): 219-254.
- [3] AN Ming, QIN Yong, JIA Liming, et al. Aggregation of group fuzzy risk information in the railway risk decision making process[J]. Safety Science, 2016, 82: 18-28.
- [4] 王艳辉, 李曼, 申睿. 基于涌现和熵的城轨运营安全程度评判方法及应用研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(4): 1-8.
WANG Yanhui, LI Man, SHEN Rui. Safety Assessment method application for urban rail transit operation based on entropy and emergence[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(4): 1-8.
- [5] SINGH L, RAJPUT H. Verification of safety in safety critical computer-based systems: a case study of nuclear power plant system[J]. Nuclear Technology, 2016, 195(3): 301-309.
- [6] AVEN T, ZIO E. Foundational issues in risk assessment and risk management[J]. Risk Analysis, 2014, 34(7): 1164-1172.
- [7] 钱龙霞, 张韧, 王红瑞, 等. 基于 MEP 和 DEA 的水资源短缺风险损失模型及其应用[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1199-1206.

- QIAN Longxia, ZHANG Ren, WANG Hongrui, et al. A model for water shortage risk loss based on MEP and DEA and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1199-1206.
- [8] 钱龙霞, 张韧, 王红瑞, 等. 基于 Copula 函数的水资源供需风险损失模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 517-527.
- QIAN Longxia, ZHANG Ren, WANG Hongrui, et al. Risk loss model of water supply and water demand based on copula function and its application[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2016, 36(2): 517-527.
- [9] 李赛, 许爱强. 基于险度函数的装备供应链库存风险损失度量[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(5): 107-112.
- LI Sai, XU Aiqiang. Inventory risk loss measurement of equipment supply chain based on risk measurement function[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(5): 107-112.
- [10] PALTRINIERI N, KHAN F, COZZANI V. Coupling of advanced techniques for dynamic risk management[J]. Journal of Risk Research, 2015, 18(7): 910-930.
- [11] AN Jinyu, PENG Shini. Prediction and verification of risk loss cost for improved natural gas network layout optimization[J]. Energy, 2018, 148: 1181-1190.
- [12] ABAD P, MUELA S, MARTIN C. The role of the loss function in value-at-risk comparisons[J]. The Journal of Risk Model Validation, 2015, 9(1): 1-19.
- [13] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- XU Shubo. Principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [14] 张艳潮. 高速铁路运营安全风险分析与评估[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- ZHANG Yanchao. Railway operation safety risk analysis and assessment[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [15] 中国气象局. GB/T 28592-2012 降雨量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Meteorological Administration. GB/T 28592-2012 Rainfall scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] 中国气象局. GB/T 28591-2012 风力等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Meteorological Administration. GB/T 28591-2012 Wind scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
-
- 作者简介: 孙文君, 女, 1995 年出生。主要研究方向为高速列车风险评估。
E-mail: wenjun_sun1019@qq.com
- 刘志亮(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能传感与状态监测、信号处理与数据挖掘、寿命预测与故障诊断。
E-mail: zhiliang_liu@uestc.edu.cn
- 王佳鑫, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高速列车风险评估。
E-mail: j.x_wang@qq.com
- 秦勇, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轨道交通安全保障和运输组织、智能交通系统。
E-mail: yqin@bjtu.edu.cn