

基于拓扑和韧性三角形理论的机场道面韧性评估方法

齐麟, 王道通, 陈宇

(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津, 300300)

摘要 机场道面在运行过程中受到机轮碾压等荷载作用过程可视为道面系统遭受不利扰动过程, 采用道面韧性指标表征道面系统对不利扰动的防御能力和受扰动后的恢复能力是研究的热点问题。通过引入经济性指标, 结合道面状况指数、道面结构状况指数、道面平整度指数和道面摩擦系数, 建立道面韧性评估指标节点, 然后根据拓扑理论按照节点之间的关系构建拓扑网络, 基于韧性三角形理论计算节点强度, 最后通过计算拓扑网络整体强度确定机场道面系统韧性。采用该方法对天水机场开展道面韧性评估, 其评估结果为“良好”, 可为机场道面系统安全运行评估提供重要参考。

关键词 机场道面; 拓扑理论; 韧性三角形理论; 韧性评估

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.004

中图分类号 U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0029-08

An Evaluation Method for Resilience of Airport Pavement Based on Topology and Toughness Triangle Theory

QI Lin, WANG Daotong, CHEN Yu

(School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract The process of airport pavement destroyed by loads such as wheel crushed down during pavement operation can be regarded as a process of unfavorable disturbance, and the ability of the pavement system characterized by adopting the pavement resilience index unfavorable for defending against adverse disturbances and recovering from disturbances is a hot research issue. In this paper, first, an index node for pavement resilience evaluation is established by introducing an economic index in combination with pavement condition index, pavement structural condition index, pavement flatness index and pavement friction coefficient. And then, the topological network is constructed based on the node relationships according to the topology theory, and the strength of nodes is calculated based on the theory of toughness triangle. Finally, the resilience in the airport pavement system is determined by calculating the overall strength of the topological network. The Tianshui Airport's pavement resilience index is measured by this measure, and the results show that the evaluation method is “good”, and can provide an important reference for the evaluation of the safe operation of the airport pavement system.

Key words airport pavement; topological theory; triangle theory of resilience; resilience evaluation

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600500)

作者简介: 齐麟(1982—), 男, 山西太原人, 教授, 研究方向为机场工程。E-mail: qilin1208@163.com

通信作者: 陈宇(1987—), 男, 天津人, 副教授, 研究方向为工程结构防灾减灾。E-mail: yuchen@cauc.edu.cn

引用格式: 齐麟, 王道通, 陈宇. 基于拓扑和韧性三角形理论的机场道面韧性评估方法[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 29-36. QI Lin, WANG Daotong, CHEN Yu. An Evaluation Method for Resilience of Airport Pavement Based on Topology and Toughness Triangle Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 29-36.

机场道面作为机场的重要组成部分,其结构与功能的安全对飞机起落至关重要,保持机场道面结构与功能长期处于健康状态,有利于保障交通运输的稳定性,有助于实现我国的交通强国战略。机场道面的主要破坏模式表现为机轮对道面的反复碾压破坏,所以评估机场道面抵抗机轮碾压破坏的能力极为重要。已有研究表明,机场道面抵抗机轮碾压破坏的能力受到机场道面强度、机轮碾压荷载、机场道面维护力度等多方面因素的影响。开展道面服役性能评价对保障机场的安全运行具有重要意义。

近年来随着韧性概念的提出,其在交通运输领域的应用越来越广泛^[1]。韧性概念首先由 Holling^[2]于 1973 年提出,用于描述一个系统由当前状态转移到另一状态之前能够承受的干扰量,这个过程包括系统对扰动的抵抗、吸收以及扰动后系统功能恢复,然后继续抵抗、吸收扰动并功能恢复一直循环到下一状态的各个环节。将韧性概念引入机场道面,基于韧性指标描述机场道面抵抗机轮破坏的能力和恢复能力,可用于评估机场道面的服役性能。目前,交通系统中的韧性指标主要分为基于拓扑的韧性指标和基于性能的韧性三角形理论指标^[3]。基于拓扑的韧性指标用于对扰动过程性能不敏感的交通系统网络的韧性评估^[4],该方法的优点是包含非主观因素如经济性对韧性的影响,但其缺点是无法详细描述系统对不利扰动的抵抗吸收过程。基于性能的韧性三角形理论指标多用于对扰动过程性能变化较为敏感的交通基础设施韧性的评估,但其缺点是无法衡量经济性等对韧性的影响^[5]。

基于此,本文将基于拓扑的韧性指标和基于性能的韧性三角形理论指标有机结合,提出了基于拓扑和韧性三角形理论的机场道面韧性评估方法,弥补了传统韧性三角形理论评估交通基础设施韧性时无法兼顾经济性的影响,达到对机场道面系统运行安全的全面评估。然后基于天水机场的跑道数据,采用所提出的方法对天水机场道面系统进行分析,探讨其道面系统韧性。

1 机场道面韧性评估方法

基于拓扑和韧性三角形理论的机场道面韧性评估方法的流程如下:首先,确定道面评价指标;然后,建立拓扑网络并计算各节点强度;最后,计算拓扑网络整体强度并评估其韧性。具体的评估流程如图 1 所示。

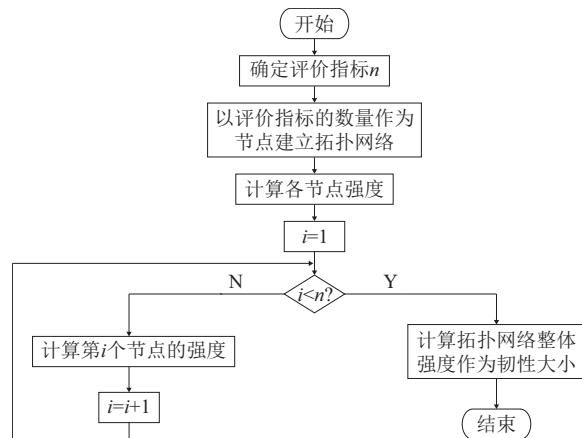


图 1 韧性评估流程

Fig. 1 Resilience assessment process

1.1 道面评价指标确定

1.1.1 道面性能指标

机场道面最重要的结构和功能指标是道面承载力、平整度和抗滑性^[6]。道面承载力由道面状况指数(PCI)和道面结构状况指数(SCI)决定,道面平整度由平整度指数(IRI)决定,道面抗滑性由摩擦系数(μ)决定,因此定义道面性能指标由以上 4 个指数的拓扑节点强度表示。

1.1.2 经济性指标

以往交通运输基础设施的韧性评估大多通过道面性能指标随扰动的变化决定其韧性大小,忽略经济性对韧性的影响。然而,针对机场道面系统,若维护成本过高将带来过大的经济负担导致维护资金不足,从而降低维护质量,最终造成系统功能下降而带来风险^[7]。本文通过引入经济性指标,建立机场道面韧性评估方法,其韧性评价指标树如图 2 所示,该方法能够弥补韧性三角形理论评估韧性时因经济性的缺失而带来的不足。

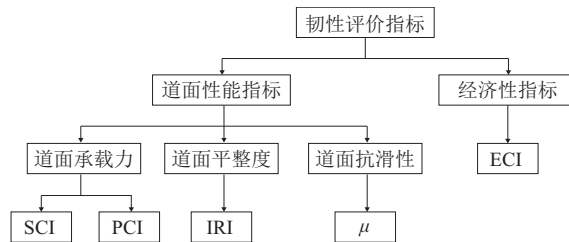


图 2 韧性评价指标树

Fig. 2 Resilience evaluation index tree

1.2 拓扑网络构建

与交通网络拓扑建立原则相同^[8],机场道面韧性评价拓扑网络建立的原则是相关的节点相连,不相关的节点不相连,连接 2 个节点线段的长度表示这两个点的关系强弱。因为机场道的平整度 IRI、承载力 SCI 和摩擦系数 μ 会受道面状况指数 PCI 的影响^[9],因此拓扑网络中 PCI 节点连接 IRI、SCI 和 μ 3 个节点。平整度 IRI、承载力 SCI 和摩擦系数

μ 三者之间基本没有关系,因此拓扑网络中它们之间不相连。经济指数 ECI 对道面状况指数 PCI、平整度 IRI、承载力 SCI 和摩擦系数 μ 四者均有影响,因此在拓扑网络中 ECI 会连接 PCI、IRI、SCI 和 μ 4 个节点。在计算每条线段的通过率上,由于 IRI、SCI 和 μ 的节点强度均由 PCI 节点强度推导获得,且与其相关强度一致,并且道面性能指标 (PCI、IRI、SCI、 μ) 与经济指数 ECI 直接相关,假定其相关强度一致均为 1,因此定义拓扑网络中每条线段的有效计算长度均为 1。通过上述原则完成拓扑网络的建立。

根据道面性能指标 (PCI、IRI、SCI、 μ) 的相关性和经济性指标 (ECI) 构建拓扑网络如图 3 所示,并根据每个节点强度计算网络整体强度来评估机场道面系统的韧性。

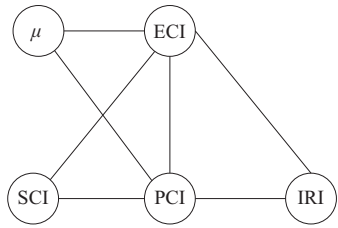


图 3 机场道面韧性评价拓扑网络

Fig. 3 Topological network for resilience evaluation of airport pavement

1.2.1 PCI 节点强度

机场道面状况指标 PCI 可表征道面损坏的状态,其取值范围为 0~100。使用机场道面当前状态至生命周期结束状态年均 PCI 的归一化值(即 PCI/100)作为 PCI 节点强度。

机场道面剩余寿命定义为^[10]:

$$Y_s = \frac{100N_e T}{0.75n_w W_l N_s} \quad (1)$$

式中: Y_s 为道面剩余使用年限; N_e 为评价机型剩余累计作用次数; T 为通行宽度(跑道取 11.4 m,滑行道和停机坪取 2.3 m); n_w 为评价机型一个主起落架的轮子数; W_l 为评价机型主起落架一个轮印的宽度; N_s 为评价机型的年均运行次数。

PCI 衰减模型定义为^[11]:

$$PCI_t = 100(1 - e^{-(A/t)^B}) \quad (2)$$

式中: PCI_t 为第 t 年跑道整体 PCI; t 为跑道的年龄(a); A 和 B 由跑道当前状态的数据与最后一年的数据回归计算而获得。

根据跑道剩余寿命 Y_s 和跑道 PCI 衰减模型可得道面当前状态至临界状态的整体 PCI 的计算公式为:

$$PCI = \frac{\sum_{t=1+n}^{Y_s+n} PCI_t}{Y_s} \quad (3)$$

式中: n 为跑道当前年龄; PCI_t 通过 PCI 衰减模型计算出第 t 年跑道整体的 PCI 值。

根据《MH/T 5024—2019 民用机场道面评价管理技术规范》中要求机场道面整体 PCI 值最低不得小于 40,即 PCI 的节点强度 $PCI/100 \geq 0.4$,因此在规范要求的 PCI 范围内(40~100),根据该技术规范中 PCI 的评判规则,分为优、良、中、次 4 个等级,定义 PCI 节点强度 R_1 为 0.4 对应道面损坏等级中的差,PCI 节点强度 R_1 为 1.0 对应道面损坏等级中的优,由此定义 PCI 节点强度如表 1 所示。

表 1 PCI 节点强度计算标准

Tab. 1 Calculation standard of PCI node strength

道面损坏等级	优	良	中	差
PCI 范围	≥ 85	[70, 85)	[55, 70)	[40, 55)
R_1	1.0	0.8	0.6	0.4

1.2.2 IRI 节点强度

道面平整度指标 IRI 对飞机起降安全至关重要,其受机场道面状况指数 (PCI) 的影响很大^[12],将 IRI 与 PCI 的数据拟合,结合 PCI 衰减模型,可获得 IRI 预测公式。基于工程中常用的三点二次 Lagrange 插值多项式^[13],拟合 IRI-PCI 函数关系式如下:

$$IRI(PCI) = y_0 \frac{(PCI-x_1)(PCI-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (4)$$

式中: x_0 为道面所有区间 PCI 的均值; y_0 为道面所有区间 IRI 的均值; x_1 为 PCI 大于 x_0 区间的 PCI 均值; y_1 为 PCI 大于 x_0 区间的 IRI 均值; x_2 为 PCI 小于 x_0 区间的 PCI 均值; y_2 为 PCI 小于 x_0 区间的 IRI 均值。

将式(2)代入式(4),可得 IRI 随年份 t 变化的预测公式为:

$$IRI(t) = IRI(PCI_t) \quad (5)$$

式中: $IRI(t)$ 为第 t 年道面的平整度。

由此可得道面当前状态至临界状态的整体平整度 IRI 的计算式为:

$$IRI = \frac{\sum_{t=1+n}^{Y_s+n} IRI(t)}{Y_s} \quad (6)$$

根据上述 PCI 的节点强度 $PCI/100 \geq 0.4$,为了

保持评价系统一致性,IRI 节点强度 R_2 最低值定义为 0.4。根据《MH/T 5024-2019》中 IRI 的评判规则,分为优、良、中、差 4 个等级,定义 IRI 节点强度 R_2 为 0.4 对应 IRI 中的差,IRI 节点强度 R_2 为 1.0 对应 IRI 中的优,由此定义 IRI 节点强度如表 2 所示。

表 2 IRI 节点强度计算标准

Tab. 2 Calculation Standard of IRI NodeStrengt

评价标准	优	良	中	差
IRI	<2.3	[2.3,3.3)	[3.3,4.3]	>4.3
R_2	1.0	0.8	0.6	0.4

1.2.3 SCI 节点强度

道面承载力指标 SCI 对飞机起降安全至关重要,其受机场道面状况指数(PCI)的影响很大,将 SCI 与 PCI 的数据拟合,结合 PCI 衰减模型,可获得 SCI 预测公式。基于工程中常用的三点二次 Lagrange 插值多项式,拟合 SCI-PCI 函数关系式如下:

$$SCI(PCI) = y_0 \frac{(PCI-x_1)(PCI-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (7)$$

式中: x_0 为道面所有区间 PCI 的均值; y_0 为跑道所有区间 SCI 的均值; x_1 为 $PCI > x_0$ 区间的 PCI 均值; y_1 为 $PCI > x_0$ 区间的 SCI 均值; x_2 为 $PCI < x_0$ 区间的 PCI 均值; y_2 为 $PCI < x_0$ 区间的 SCI 均值。

将式(2)代入式(7),可得 SCI 随年份 t 变化的预测公式为:

$$SCI(t) = SCI(PCI_t) \quad (8)$$

式中: $SCI(t)$ 为第 t 年道面的 SCI。

由此可得道面当前状态至临界状态的整体结构状况指数 SCI 的计算式为:

$$SCI = \frac{\sum_{t=1+n}^{Y_s+n} SCI(t)}{Y_s} \quad (9)$$

为了保持评价系统一致性,SCI 节点强度 R_3 最低值为 0.4。根据《MH/T 5024-2019》中 SCI 的评判规则,分为满足、不满足两个等级,则在 SCI 满足结构承载力区间(80~100)内定义 SCI 节点强度 R_3 为 0.4 对应 SCI 区间中 80~85 部分,SCI 节点强度 R_3 为 1.0 对应 SCI 中区间中 100~95 部分,由此定义 SCI 节点强度如表 3 所示。

表 3 SCI 节点强度计算标准

Tab. 3 Calculation standard of SCI node strength

结构承载力	满足	不满足
SCI	$SCI \geq 80$	< 80
SCI 区间	≥ 95 (95,90]	(90,85] (85,80]
R_3	1.0 0.8	0.6 0.4

1.2.4 μ 节点强度

道面摩擦系数指标 μ 对飞机起降安全至关重要,其受机场道面状况指数(PCI)的影响很大,将摩擦系数 μ 与 PCI 的数据拟合,结合 PCI 衰减模型,可获得 μ 预测公式。基于工程中常用的三点二次 Lagrange 插值多项式,拟合 μ -PCI 函数关系式如下:

$$\mu(PCI) = y_0 \frac{(PCI-x_1)(PCI-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} + y_1 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} + y_2 \frac{(PCI-x_0)(PCI-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \quad (10)$$

式中: x_0 为道面所有区间 PCI 的均值; y_0 为跑道所有区间 μ 的均值; x_1 为 $PCI > x_0$ 的区间的 PCI 均值; y_1 为 $PCI > x_0$ 的区间的 μ 均值; x_2 为 $PCI < x_0$ 区间的 PCI 均值; y_2 为 $PCI < x_0$ 区间的 μ 均值。

将式(2)代入式(10),可得摩擦系数 μ 随年份 t 变化的预测公式为:

$$\mu(t) = \mu(PCI_t) \quad (11)$$

式中: $\mu(t)$ 为第 t 年跑道的摩擦系数。

由此可得道面当前状态至临界状态的整体摩擦系数 μ 的计算式为:

$$\mu = \frac{\sum_{t=1+n}^{Y_s+n} \mu(t)}{Y_s} \quad (12)$$

为了保持评价系统一致性,为了保持评价系统一致性, μ 节点强度 R_4 最低值为 0.4。根据《MH/T 5024-2019》中摩擦系数 μ 的评判规则,分为好、中、差 3 个等级,定义 μ 节点强度 R_4 为 0.4 对应 μ 中的差, μ 节点强度 R_4 为 1.0 对应 μ 中的好,由此定义 μ 节点强度如表 4 所示。

表 4 μ 节点强度计算标准Tab. 4 Calculation standard of μ node strength

抗滑性能等级	好	中	差
μ	≥ 0.60	(0.50 0.60)	≤ 0.5
R_4	1.0	0.7	0.4

1.2.5 经济成本节点强度

将机场道面建设费用、维护费用以及未来的投入费用相加可得点道面总的经济成本,成本越高代

表道面的经济性越差,跑道存在资金不足的风险越高,从而可能导致维护周期延长、维护质量降低,最终导致跑道的安全性差。已有研究成果表明^[14]:当跑道建设费用为2 000万美元,年度预算为100万美元时可基本满足机场道面维护需求,年度预算超过205万美元时不会增加道面的服务性能。以机场刚性道面设计使用寿命30 a^[15]为计算依据,道面生命周期内的维护费用大约为建设费用的2~4倍。将道面总投入费用与建设费用的比值作为经济成本节点强度 R_s 的参考,定义经济成本节点强度 R_s 标准如表5所示。

表5 经济成本节点强度计算标准

评价标准	优	良	中	次
总投入费/建设费	<3	[3 4)	[4 5]	>5
R_s	1.0	0.8	0.6	0.4

1.3 韧性评估准确性验证

机场道面韧性评价与城市建筑韧性类似,因此在韧性评估结果准确性上参考了《GB/T 38591—2020 建筑抗震韧性评价标准》中通过检验预测模型的准确性来确定评估结果的准确性^[16]。同时,因本文采用模型与网络相结合的评估办法,网络的准确性采用《GB/T 40947-2021 安全韧性城市评价指南》中的思路,先检验各评价指标的准确性,最后通过各评价指标的准确性确定最终韧性评估结果的准确性^[17]。

1.3.1 PCI节点准确性检验

PCI节点强度的计算采用《MH/T 5024—2019 民用机场道面评价管理技术规范》中的PCI预测法,因此PCI节点强度的准确性 J_{PCI} 定义为1.0(1.0代表准确性为100%)。

1.3.2 IRI节点准确性检验

IRI节点强度通过RI-PCI与PCI-t 2个公式推导而来,因PCI-t采用规范《MH/T 5024—2019》中提供的公式,因此IRI-PCI的准确性代表该节点的准确性,定义IRI-PCI的准确性的计算式如下:

$$J_{\text{IRI}} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{IRI}_{i\text{模}} - \text{IRI}_{i\text{测}}}{\text{IRI}_{i\text{测}}} \right| \quad (13)$$

式中: J_{IRI} 为IRI节点的准确性; n 为跑道的区间数; $\text{IRI}_{i\text{模}}$ 为使用拟合公式(4)拟合出的第*i*个跑道区间的IRI; $\text{IRI}_{i\text{测}}$ 为第*i*个区间实测IRI。

1.3.3 SCI节点准确性检验

SCI节点强度通过SCI-PCI与PCI-t 2个公式推导而来,因PCI-t采用规范《MH/T 5024—2019》中提供的公式,因此SCI-PCI的准确性代表该节点的准确性,定义SCI-PCI准确性的计算公式如下:

$$J_{\text{SCI}} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{SCI}_{i\text{模}} - \text{SCI}_{i\text{测}}}{\text{SCI}_{i\text{测}}} \right| \quad (14)$$

式中: J_{SCI} 为SCI节点的准确性; n 为跑道的区间数; $\text{SCI}_{i\text{模}}$ 为使用拟合公式(7)拟合出的第*i*个跑道区间的SCI; $\text{SCI}_{i\text{测}}$ 为第*i*个区间实测SCI。

1.3.4 μ 节点准确性检验

μ 节点强度通过 μ -PCI与PCI-t 2个公式推导而来,因PCI-t采用规范《MH/T 5024—2019》中提供的公式,因此 μ -PCI的准确性代表该节点的准确性,定义 μ -PCI的准确性的计算式如下:

$$\mu_a = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\mu_{i\text{模}} - \mu_{i\text{测}}}{\mu_{i\text{测}}} \right| \quad (15)$$

式中: J_{μ} 为 μ 节点的准确性; n 为跑道的区间数; $\mu_{i\text{模}}$ 为使用式(10)拟合出的第*i*个跑道区间的 μ ; $\mu_{i\text{测}}$ 为第*i*个区间实测 μ 。

1.3.5 ECI节点准确性检验

ECI节点强度由机场部门提供的真实数据而得,本文定义ECI节点准确性为1.0。

1.3.6 拓扑网络准确性验证

在上述定义了各节点的准确性的基础上,拓扑网络准确性计算式^[18]如下:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (16)$$

式中: W 为拓扑网络整体的准确性,即整个韧性评估结果的准确性; n 为拓扑网络线段数量; l_i 为第*i*个线段的准确性,其大小等于这个线段2个节点准确性的乘机。

1.4 道面系统韧性评估

基于PCI、SCI、IRI、 μ 和ECI的节点强度,计算机场道面拓扑网络整体强度,其计算式如下^[19]:

$$R = \sum_{i=1}^n a_i R_i \quad (17)$$

$$a_i = l_i / l_z \quad (18)$$

式中: R 为拓扑网络整体强度; n 为节点个数; a_i 为第*i*个节点的权重; R_i 为第*i*个节点的强度; l_i 为第*i*个节点连接的线段数量; l_z 为所有节点连接的线段数量。

将机场道面拓扑网络整体强度作为机场道面系统韧性指标,定义机场道面系统的韧性评价指标标准如表6所示。

根据上述建立的道面韧性评估方法可用于评估机场道面抵抗机轮破坏的能力,韧性评估结果越高就代表着在特定交通量下,机场道面的功能性能越好,也代表机场道面拥有更多的余富性能可以吸收更多的交通量^[20]。

表 6 韧性评价标准

Tab. 6 Resilience evaluation standard

评价标准	优	良	中	差
韧性指标	$0.8 < R \leq 1.0$	$0.6 < R \leq 0.8$	$0.4 < R \leq 0.6$	$R \leq 0.4$

2 实例分析

2.1 机场道面数据

2021 年天水机场跑道完成了全面检测,检测完毕时其使用年限为 13 a,跑道各项数据如表 7 所示。跑道的基层顶面反应模量为 100 MN/m^3 ;水泥混凝土弯拉强度为 5.3 MPa ;水泥混凝土弹性模量为 $36\,484 \text{ MPa}$;评价机型剩余累计作用次数 1 266;评价机型 1 个主起落架的轮数为 2;评价机型主起落架 1 个轮印宽度为 24.8 cm ;评价机型年均运行次数为 3 678,根据机场部门估算,机场跑道全生命周期的投入大约为跑道建设费用的 4.77 倍。

表 7 天水机场道面数据

Tab. 7 Tianshui airport pavement data

跑道区段/m	PCI	IRI	μ	SCI
0~100	83.6		0.545	100.0
101~200	87.6		0.570	100.0
201~300	83.8	3.980 0	0.570	100.0
301~400	81.4	4.540 0	0.565	100.0
401~500	78.0	4.070 0	0.585	100.0
501~600	76.6	3.867 5	0.595	100.0
601~700	79.6	3.767 5	0.580	100.0
701~800	77.4	4.042 5	0.580	99.0
801~900	82.4	4.260 0	0.565	97.4
901~1 000	85.0	4.102 5	0.580	99.0
1 001~1 100	88.0	3.787 5	0.580	100.0
1 101~1 200	80.6	3.500 0	0.570	100.0
1 201~1 300	79.8	3.557 5	0.545	100.0
1 301~1 400	78.4	3.880 0	0.540	100.0
1 401~1 500	79.8	3.777 5	0.580	100.0
1 501~1 600	76.6	3.520 0	0.580	100.0
1 601~1 700	78.8	3.205 0	0.570	100.0
1 701~1 800	83.2	3.402 5	0.575	100.0
1 801~1 900	83.8	2.945 0	0.600	100.0
1 901~2 000	80.0	2.940 0	0.580	100.0
2 001~2 100	80.8	2.680 0	0.585	100.0
2 101~2 200	85.4	2.710 0	0.575	100.0
2 201~2 300	85.6	4.330 0	0.545	100.0
2 301~2 400	82.6	3.752 5	0.560	100.0
2 401~2 500	87.4	4.037 5	0.555	99.0
2 501~2 600	83.4	4.097 5	0.540	100.0
2 601~2 700	83.2		0.550	100.0
2 701~2 800	85.8			100.0

2.2 节点强度计算

2.2.1 PCI 节点强度

根据式(1)计算得到机场道面剩余寿命为 10 a;将 $PCI_t = 82$ 、 $t = 13$ (跑道当前状态)和 $PCI_t = 40$ 、 $t = 23$ (跑道临界状态)2 组数据代入到式(2)得到 PCI 衰减模型为 $PCI_t = 100(1 - e^{-(15.04/t)^{1.32}})$,由此可得跑道剩余 10 年的 PCI 衰减曲线如图 4 所示。

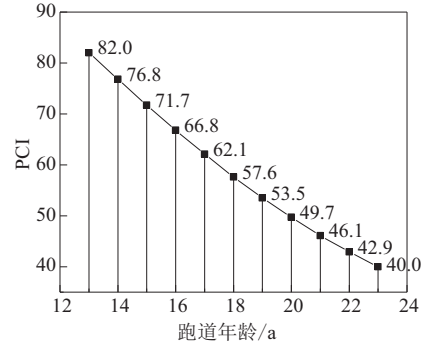


图 4 PCI 衰减曲线

Fig. 4 PCI Attenuation Curve

根据 PCI 衰减模型以及式(3)计算出跑道剩余寿命期间的平均 PCI 为 56.2,最后根据表 1 得到 PCI 节点强度 R_1 为 0.6。

2.2.2 IRI 节点强度

根据表 7 可知,跑道 PCI 与 IRI 的对应关系部分如表 8 所示。

表 8 PCI 与 IRI 对应关系

Tab. 8 Correspondence between PCI and IRI

区间/m	201~300	301~400	401~500
PCI	83.8	81.4	78.0
IRI	3.98	4.54	4.07

区间/m	2 301~2 400	2 401~2 500	2 501~2 600
PCI	82.6	87.4	83.4
IRI	3.75	4.00	4.10

根据式(4),可得 IRI 与 PCI 的关系式为:

$$IRI(PCI) = \frac{4.03(PCI - 83.123)(PCI - 77.9)}{(80.5 - 83.125)(80.5 - 77.9)} + \frac{3.895(PCI - 80.5)(PCI - 77.9)}{(83.125 - 80.5)(83.125 - 77.9)} + \frac{4.165(PCI - 83.125)(PCI - 80.5)}{(77.9 - 83.125)(77.9 - 80.5)} \quad (19)$$

将图 4 中 PCI 衰减曲线代入式(19),可得未来 IRI 分布情况如图 5 所示。根据式(6)可得当前状态至临界状态机场道面的整体平整度 IRI 为 5.34,按表 2 确定 IRI 节点强度 R_2 为 0.4。

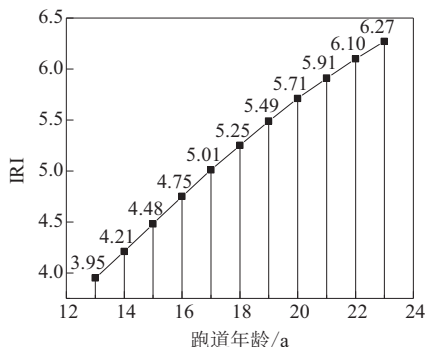


图 5 平整度 IRI 未来变化情况

Fig. 5 Future changes in flatness IRI

2.2.3 SCI 节点强度

根据表 7 可知,跑道 PCI 与 SCI 的对应关系如表 9 所示。

表 9 PCI 与 SCI 对应关系

Tab. 9 Correspondence between PCI and SCI

区间/m	0~100	101~200	201~300
PCI	83.6	87.6	83.8
SCI	100	100	100

区间/m	2 501~2 600	2 601~2 700	2 701~2 800
PCI	83.4	83.2	85.8
SCI	100	100	100

根据式(7),可得 SCI 与 PCI 的关系式为:

$$SCI(PCI) = \frac{99.7(PCI-84.7)(PCI-79)}{(82-84.7)(82-79)} + \frac{99.9(PCI-82)(PCI-79)}{(84.7-82)(84.7-79)} + \frac{99.4(PCI-84.7)(PCI-82)}{(79-84.7)(79-82)} \quad (20)$$

将图 4 中 PCI 衰减曲线代入式(20)可得未来 SCI 分布情况如图 6 所示。根据式(9)可得当前状态至临界状态机场道面整体状况指数 SCI 为 94.7,按表 3 确定 SCI 节点强度 R_3 为 0.8。

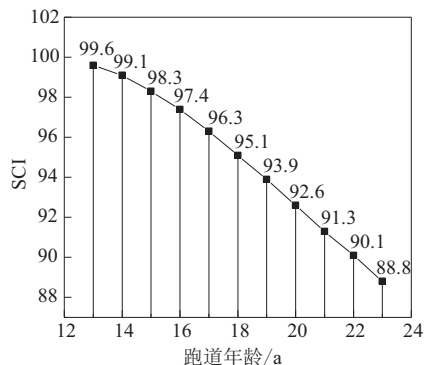


图 6 道面结构状况指数 SCI 未来变化情况

Fig. 6 Future changes in the pavement structure condition index SCI

2.2.4 μ 节点强度

根据表 7 可知,跑道 PCI 与 μ 的对应关系如表

10 所示。

表 10 PCI 与 μ 对应关系

Tab. 10 Correspondence between PCI and μ

区间/m	0~100	101~200	201~300
PCI	83.6	87.6	83.8
μ	0.545	0.570	0.570

区间/m	2 401~2 500	2 501~2 600	2 601~2 700
PCI	87.4	83.4	83.2
μ	0.555	0.540	0.550

根据式(10),可得 μ 与 PCI 的关系式为:

$$\mu(PCI) = 0.569 \frac{(PCI-84.6)(PCI-79)}{(81.9-84.6)(81.9-79)} + 0.565 \frac{(PCI-81.9)(PCI-79)}{(84.6-81.9)(84.6-79)} + 0.573 \frac{(PCI-84.6)(PCI-81.9)}{(79-84.6)(79-81.9)} \quad (21)$$

将图 4 中 PCI 衰减曲线代入式(21)可得未来 μ 分布情况如图 7 所示。根据式(12)可得当前状态至临界状态机场道面整体摩擦系数为 0.59,按表 4 确定 μ 节点强度 R_4 为 0.7。

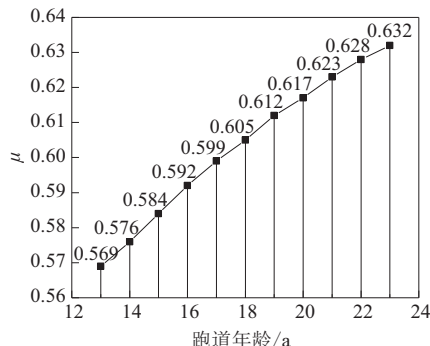


图 7 摩擦系数 μ 未来变化情况

Fig. 7 Future changes in friction coefficient μ

2.2.5 经济成本节点强度

根据机场部门对投入的估算确定总投入费用与建设费用的比值为 4.77,根据表 5 确定经济成本节点强度 R_5 为 0.6。

2.3 韧性评估准确性验证

根据式(13)~式(15)和表 7 数据可计算得到各节点的准确性如表 11 所示。根据式(16)可得整体韧性评估的准确性 W 为 0.977。

表 11 各节点的准确性

Tab. 11 Accuracy of each node

节点	PCI	IRI	SCI	μ	ECI
准确性	1	0.925	0.999	0.998	1

2.4 机场道面系统韧性评估

将 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_5 代入式(17),计算拓扑网络整体强度为 0.614,根据表 6 确定机场道面系

统的韧性评估结果为良好,说明该机场道面在固定扰动量的情况下从当前状态至大修过程时道面整体功能良好且维护费用适中,风险较低,也意味着机场道面具有较多的冗余度可以吸收更多的外界扰动。

3 结论

本文通过引入经济性指标,结合道面状况指数、道面结构状况指数、道面平整度指数和道面摩擦系数,基于拓扑和韧性三角形理论建立了机场道面系统韧性评估方法,采用该方法对天水机场进行了道面韧性评估,主要结论如下:

1)对天水机场道面进行韧性水平综合评估,得到其综合评估结果为“良好”,说明该机场道面韧性水平较好。

2)基于拓扑和韧性三角形理论的韧性评价模型兼顾了拓扑理论度量韧性时的全面性和韧性三角形理论度量韧性的过程性,保证了评价过程和结果的科学性。

3)将机场道面韧性评估引入机场工程中,为机场的运行安全评估提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] MURRAY-TUITE M. A Comparison of Transportation Network Resilience Under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions [C]//Proceeding of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey:IEEE, 2006:1398-1405.
- [2] HOLLING C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [3] 黄晓明,赵润民. 道路交通基础设施韧性研究现状及展望[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(6): 1529-1549.
- HUANG X M, ZHAO R M. Status and Prospects of Highway Transportation Infrastructure Resilience Research[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1529-1549. (in Chinese)
- [4] CHOPRA S S, DILLON T, BILEC M, et al. A Network Based Framework for Assessing Infrastructure Resilience:a Case Study of the London Metro System [J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2016, 13(118): 20160113.
- [5] BRUNEAU M, CHANG S, EGUCHI R, et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [6] 袁捷,王宇翔. 中国机场道面管理系统分析优化理论模型[J]. 公路, 2016, 61(12): 163-170.
- YUAN J, WANG Y X. Analysis and Optimization Theory Model of China Airport Pavement Management System[J]. Highway, 2016, 61(12): 163-170. (in Chinese)
- [7] 莫俊文,滕仓国,李甲,等. 基于熵权-二维云模型的高铁建设工程系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 26-33.
- MO J W, TENG C G, LI J, et al. Resilience Evaluation of High-Speed Railway Construction Engineering System Based on Entropy Weight-Two Dimensional Cloud Model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 26-33. (in Chinese)
- [8] 王天睿,刘国睿,杨海华,等. 基于 Space L 的公共交通网络拓扑结构特性分析[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(11): 174-178.
- WANG T R, LIU G R, YANG H H, et al. Topology Characterization of Public Transportation Network Based on Space L [J]. Heilongjiang Transportation Technology, 2023, 46(11): 174-178. (in Chinese)
- [9] 杨超. 哈尔滨机场飞行区道面使用性能检测与评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- YANG C. Performance Test and Evaluation of Airfield Area in Harbin Airport[D]. Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] 凌建明,郑悦锋. 机场水泥混凝土道面剩余寿命的预估方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 484-488.
- LING J M, ZHENG Y F. On Prediction Method of Remaining Life for Cement Concrete Pavement of Airport [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(4): 484-488. (in Chinese)
- [11] 民用机场道面评价管理技术规范:MH/T 5024—2019[S]. 北京:中国民航出版社, 2019.
- Specifications for Pavement Evaluation and Management of Civil Airports:MH/T 5024—2019[S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2019. (in Chinese)
- [12] 王维,韩利斌. 机场道面使用性能预估理论和模型[J]. 中国民航大学学报, 2007, 25(2): 28-32.
- WANG W, HAN L B. Introduction to Prediction Theory and Models of Airport Pavement Operational Performance[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2007, 25(2): 28-32. (in Chinese)
- [13] 喻文健. 数值分析与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2020.
- YU W J. Numerical Analysis and Algorithms [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020. (in Chinese)

- (in Chinese)
- [3] ZHANG Z, ZHANG Y, GUO D, et al. Communication-Efficient Federated Continual Learning for Distributed Learning System with Non-IID Data[J]. Science China Information Sciences, 2022, 66(2): 122102.
- [4] MCMAHAN H B, MOORE E, RAMAGED, et al. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Fort Lauderdale: PMLR, 2017: 1273-1282.
- [5] ZHU L, LIU Z, HANS. Deep Leakage from Gradients [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2019: 14747-14756.
- [6] PAILLIER P. Public-Key Cryptosystems Based on Composite Degree Residuosity Classes[M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 223-238.
- [7] ZHENG S, MENG Q, WANGT, et al. Asynchronous Stochastic Gradient Descent with Delay Compensation [C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning. Sydney, NSW: PMLR, 2017: 4120-4129.
- [8] ELOUADRHIRI A, ABDELHADI A. Differential Privacy for Deep and Federated Learning: a Survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 22359-22380.
- [9] HENRY C, DAN B. Prio: Private, Robust, and Scalable Computation of Aggregate Statistics[C]//Proc of the 14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley CA: USENIX, 2017: 259-282.
- [10] CONG X, SANMI K, INDRANIL G. Asynchronous Federated Optimization[C]//NeurIPS Workshop on Optimization for Machine Learning. Cambridge: MIT Press, 2020.
- [11] ABADI M, BARHAM P, CHEN J, et al. Tensorflow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems [EB/OL]. (2016-03-16) [2022-11-04]. <https://arxiv.org/abs/1603.04467>.

(编辑: 韩茜)

(上接第 36 页)

- [14] FATURECHI R, LEVENBERG E, MILLER-HOOKS E. Evaluating and Optimizing Resilience of Airport Pavement Networks[J]. Computers & Operations Research, 2014, 43: 335-348.
- [15] 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T 5004—2010[S]. 北京: 中国民航出版社, 2019.
Design Specification for Cement Concrete of Civil Airports: MH/T 5002—2010[S]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2019. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
Evaluation Criteria for Seismic Resilience of Buildings: GB/T 38591—2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2020. (in Chinese)
- [17] 安全韧性城市评价指南: GB/T 40947—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Guidelines for Evaluating Safe and Resilient Cities: GB/T 40947—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021. (in Chinese)
- [18] 申晨. 城市公共交通网络空间拓扑结构特性及鲁棒性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- SHEN C. Research on Topological Structure Characteristic and Robustness of Urban Public Transport Network Space[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. (in Chinese)
- [19] 许钦钧, 徐龙琴, 刘双印. 一种基于网络拓扑的关键节点挖掘算法[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2023, 36(2): 21-30.
XU Q J, XU L Q, LIU S Y. A Topology Based Heuristics Algorithm for Critical Node Detection [J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2023, 36(2): 21-30. (in Chinese)
- [20] 刘阳. 降雨内涝条件下城市道路网络韧性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
LIU Y. Research on the Resilience Evaluation of Urban Road Network Under Rainfall and Water Logging Conditions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)

(编辑: 刘勇)