

基于灰色理论的地下线路改造施工道面的变形预测

——以广汉市某灯光线路改造工程为例

史跃亚^{1,2}, 郭雯雯², 孔奕豪²

(1. 中国民用航空飞行学院四川省民航机场智慧运营与运维工程研究中心, 四川 广汉 618307;

2. 中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 地下线路改造施工中道面变形具有不确定性、复杂性等特征。为此,运用灰色理论建立道面变形的预测模型,并结合工程实例验证其有较好精度。鉴于灰色模型在变形预测中仅能预测总体趋势、不能反映预测误差的波动性,通过处理预测误差,定出灰色预测的上、下限值,赋予模型一定的预测区间,改变点预测形式。并依据变形控制线与灰色上、下限曲线的相交位置划分道面变形的安全状态,更为合理地判断施工安全性,为相关工程提供参考借鉴。

关键词: 地下线路改造; 灰色理论; 灰色上、下限; 道面变形; 安全状态

中图分类号: TU470+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0008-06

在城市建设高速发展的背景下,地下线路改造工程的重要性日益凸显。水平定向钻技术作为一种先进的非开挖施工技术,在地下线路改造施工中占据了重要地位,被广泛应用于城市建设、石油勘探、基础设施施工等领域,以其对环境污染、交通影响、地层破坏较小等优越性显著^[1]。目前,相关论文多聚焦在地质适应性及钻进工艺参数优化等研究方向,而对其所引发的变形预测研究则相对较少。与此同时,施工过程中引发的道面变形问题也给工程带来了诸多挑战。为了确保施工安全,及时发现潜在风险,实现信息化施工,合理配置施工资源,降低工程成本,需探寻一种科学且准确的方法来预测变形量。

众多实验数据显示,在沉降监测中,若观测数据数量多且周期长,采用恰当的数学建模能够得到令人满意的预测结果。然而,对于数据量少、观测周期短且规律性不明显的观测数据,传统的统计预测面临着较大困难^[2-4]。而灰色系统理论以独特的优势,为地下线路改造施工中道面变形的预测提供了有力支持以及实践指导^[5]。该理论不受传统统计预测在特定数据情景下的限制,拥有“小样本”“贫信息”不确定性系统的强大分析能

力,在实际应用中可有效地预测道面变形情况。在此背景下,结合广汉某地下灯光线路改造工程实例,借助灰色系统理论构建模型,并对该模型预测产生的误差加以利用,采用灰色上、下限理论,为评价工程的安全状态提供参考区间,也为工程的顺利开展和安全保障提供可靠依据,切实指导地下线路改造施工的具体实践操作。

1 灰色系统建模

1.1 GM(1,1)模型的建立

对于GM(1,1)模型而言,其中的两个“1”具有特定含义。第1个“1”对应一阶方程,意味着该模型属于线性模型范畴;第2个“1”则意味着一个变量,表明此模型的建模工作仅能针对某单一序列,所以GM(1,1)可被表述为仅能对单一序列进行建模的线性模型。而针对在地下穿越施工中所引起的道面变形监测数据呈现为单数据列这一情况,可以构建GM(1,1)模型来对变形量进行预测^[6]。

GM(1,1)模型的建模核心是对原始数据序列进行灰色生成操作,以此降低其随机性。从缺乏规律的离散数据当中挖掘内部潜藏的规律信息,最后运用一阶线性微分方程对所提取的规律信息进行数学表达,并依据拟合曲线对数据展开分析和预

收稿日期: 2024-09-21

基金项目: 四川省民航机场智慧运营与运维工程研究中心项目(JCZX 2023ZZ06)

作者简介: 史跃亚(1983—),女,四川广汉人,硕士,副教授,硕士研究生导师,研究方向为民航安全、交通运输规划、机场运行;通信作者郭雯雯(1999—),女,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为机场安全管理、机场工程;孔奕豪(1999—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为机场安全管理、机场工程。

测^[7]。现将原始非负离散数据序列界定为

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (1)$$

对于原始的非负离散数据序列,进行一次累加生成处理,目的是降低其随机性,进而生成一阶累加序列

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (2)$$

式中: $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$; $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ 。

对序列进行均值生成,即可得到均值序列:

$$z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad (3)$$

则 GM(1,1)模型的灰色微分方程为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = u \quad (4)$$

式中: a 和 u 为灰色参数,其白化值为

$$\hat{a} = [a, u]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y \quad (5)$$

$$\text{式中: } Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}。$$

得 \hat{a} 后代入式(4),解出微分方程:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

对求得的数据列 $\hat{X}^{(1)}(k+1)$ 作累计减生成,即

得到 $X^{(0)}$ 的预测值: $\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k)$, $\hat{X}^{(0)}(1) = \hat{X}^{(1)}(1)$,即可对变形量进行预测。

1.2 模型的精度检验

通常采用残差检验法、相对误差检验法以及后验差比值法,对建立道面变形的 GM 模型的拟合精度进行全面的检验和评判^[8]。根据所建立的 GM 模型求经过一次累加 $X^{(1)}(t)$ 后的模拟值和预测值,

用 $\hat{X}^{(1)}(t) (t = 1, 2, \dots, N)$ 表示为

$$\begin{cases} \hat{X}^{(1)}(2) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-a} + \frac{u}{a} \\ \vdots \\ \hat{X}^{(1)}(N) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-(N-1)a} + \frac{u}{a} \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\hat{X}^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^t \hat{X}^{(0)}(k)$,可得原始数据的模拟值为

$$\hat{X}^{(0)}(t+1) = \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t), \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

残差检验:计算残差 $\epsilon^{(0)}(t)$ 及其相对误差 $q^{(0)}(t)$:

$$\begin{cases} \epsilon^{(0)}(t) = X^{(0)}(t) - \hat{X}^{(0)}(t) \\ q^{(0)}(t) = [\epsilon^{(0)}(t)/X^{(0)}(t)] \times 100\% \end{cases} \quad (9)$$

记 S_1^2 与 S_2^2 分别为道面变形数列 $X^{(0)}$ 及残差数列 ϵ 的方差,则

$$\begin{cases} S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [X^{(0)}(t) - \bar{X}^{(0)}]^2 \\ S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [\epsilon(t) - \bar{\epsilon}]^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{X}^{(0)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X^{(0)}(k)$; $\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \epsilon(t)$ 。

则 GM 模型的后验差比值 C 和小误差概率 P 分别为

$$\begin{cases} C = \frac{S_2}{S_1} \\ P = P\{|\epsilon(t) - \bar{\epsilon}| < 0.6745 S_1\} \end{cases} \quad (11)$$

模型精度由 q 、 C 和 P 共同决定,划分标准见表 1。

表 1 灰色模型精度的划分标准

精度等级	q	C	P
一级(好)	0.01	0.35	0.95
二级(合格)	0.05	0.50	0.80
三级(勉强合格)	0.10	0.65	0.70
四级(不合格)	0.20	0.80	0.60

将前期地下线路改造工程,实际施工所获取的监测数据建立模型,并通过 MATLAB 软件来编写 GM(1,1)模型程序,依据灰色模型预测跑道道面基层穿越施工的道面变形的情况。模型的精度检验采用 q 、 C 和 P 来进行,以保障对地下灯光线路改造工程道面变形预测的精确程度。

2 灰色上、下界限的确定

通过分析预测情况,预测结果相对应的还未出现的实际变形沉降值是不清晰的,但是一个确切的预测变形值可以通过对已经获得的沉降变形值进行建立模型得到,因此预测误差的产生不可避免^[9]。预测区间是可以由确定的预测值和预测误差共同作用,这表明实测值的表现形式是灰色预测值与绝对误差之和。

$$x_1^{(1)}(k+1) = \hat{X}_1^{(1)}(k+1) + \epsilon^{(1)}(k+1) \quad (12)$$

式中: $x_1^{(1)}(k+1)$ 为实际测量值; $\hat{X}_1^{(1)}(k+1)$ 为灰色预测值; $\epsilon^{(1)}(k+1)$ 为模型的预测值与还没实际

发生的测量值之间的绝对误差,即预测值和与之对应未出现的实测值之间的绝对差值。

从式(12)得出,模型预测值和对应的预测误差两部分共同构成了实际测量所得的变形数据。而预测部分之所以能够展现出沉降总体趋势的预测结果,是因为它是由施工获得的实测数据进行灰色建模预测生成。而预测误差在考虑道面沉降变形总体走向的同时,也兼顾了其上下浮动性,恰当处理模型中存在预测误差,可以将灰色预测模型的单个点预测形式转变为一定范围的波动区间。

首先,对测量收集到的变形数据构建灰色模型,得到灰色预测曲线。以时间为节点,将实际的沉降变形值与预测变形值对比分析,并将测量所得的变形值划分为位于灰色预测曲线上边和灰色预测曲线下边两个部分。

对于这两部分的实测沉降值,分别计算其与预测值的绝对误差,并取平均值。将这两个平均值作为上、下限参考误差,对预测值采用上部加、下部减的策略,初步界定灰色预测的上、下限。

接着,对灰色建模序列中的实际测量值,处于所确定的灰色上下限区间之内的可能性进行统计。将建模变形值落在灰色上下限以内的概率 P_0 大于 70% 作为控制目标,这一概率的设定是基于对建模数据量的考虑。当建模数据较多时,由于数据丰富性而带来的稳定性,可适当降低概率要求取小值;而当建模数据较少时,为了确保在有限数据下的可靠性,应提高概率要求取较大值。

$$e_{\text{上限}}^{(0)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\epsilon^{(0)}(k)|, \epsilon^{(0)}(k) > 0, k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$e_{\text{下限}}^{(0)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\epsilon^{(0)}(k)|, \epsilon^{(0)}(k) < 0, k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(12)中,得到灰色上、下限模型:

$$x_{\text{上限}}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) + e_{\text{上限}} \quad (15)$$

$$x_{\text{下限}}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - e_{\text{下限}} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{\text{上限}}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} + e_{\text{上限}} \\ x_{\text{下限}}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} - e_{\text{下限}} \end{cases} \quad (17)$$

灰色预测上、下限曲线如图 1 所示。

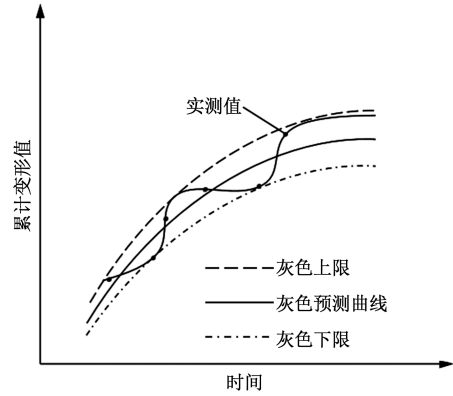


图 1 灰色预测上、下限曲线

3 安全评价等级

借助式(17)模型中所界定的预测上限和预测下限,得出一个区间范围,并利用灰色上、下限预测区间内灰色上、下限的平均值,可得到一条灰色中线,这样能够再次细化分析该灰色区间范围。分析道面变形控制线和灰色中线的交互位置,可以更为详细地展开对地下线路改造工程的安全性评价,同时可通过式(18)来量化分析。

$$\lambda = \frac{x_c - x_m}{x_k - x_m} \quad (18)$$

式中: x_c 为道面变形控制值; x_m 为灰色预测下限值; x_k 为灰色预测上限值。分析灰色上、下限与道面变形控制值之间的交互位置,可对工程变形所处的状态进行安全分析。灰色预测上、下限与道面变形控制值的相交示意图如图 2 所示,通过变形控制值与灰色上、下限这几条曲线的位置情况,对地下线路改造工程所引起的跑道道面变形施工的安全状态予以区分。

如图 2(a)所示,变形控制值位于灰色上限值的上边,还未接近灰色上限值,即 $\lambda > 1$ 时,意味着当前施工时段道面处于安全稳定的状态,道面结构的完整性和可靠性得到了有力保障,各项施工活动在安全的范围内有序进行,不存在因道面变形而引发的潜在风险。

如图 2(b)所示,当道面变形控制线处于灰色中线之上且处于灰色上限的下边,即 $1 \geq \lambda > 0.5$ 时,此时施工的安全状态处于一种较为紧张的临界状态,道面变形情况已引起高度关注,安全形势较为微妙。这表明该时段道面变形存在潜在风险,此时已经处于隐患状态,必须提前做好实施应对防护举措的对策,来应对未来的变形增长趋势。

如图 2(c)所示,若跑道道面变形控制线位于灰色中线以下,同时仍处于灰色下限的上边时,即

$0.5 \geq \lambda > 0$ 。将此时间点定为危险阶段,需要立即启动应急预案,确保各环节人员明确自身职责和行动流程,并向上级主管部门详细说明危险的性质、程度和可能造成的影响。

如图 2(d)所示,当 $\lambda \leq 0$,即变形控制线低于灰色下限曲线时,此时施工处于高危险状态,这表明道面变形失控已经突破安全防线,此时应该立即停止现场施工作业,组织工作人员和施工设备有序离场,并制定应急处理的方案,保障人员和机器设备的安全。

从图 2 能够较为清晰地看出,施工阶段,当灰色预测的上限曲线已经相交于变形控制线时,施工所引起的变形情况就已经出现隐患问题,故而在该时间点必须提前实施必要的应急处置预案、推行稳健的规划方案以及设计参数优化等策略,保障工程施工的有序开展。通过 λ 值的大小和变形控制线位于灰色上、下限曲线以及灰色中线的交互情况,切实采取应对方案,为跑道道面变形预警留出了适当的准备阶段,极大地保障施工安全进行,达到区分道面变形安全状态的目的。道面变形安全状态等级划分见表 2。

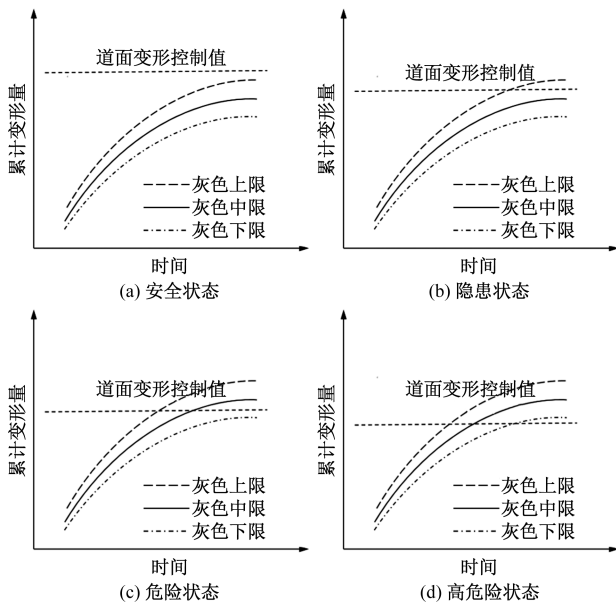


图 2 灰色预测上、下限与道面变形控制值相交示意图

表 2 道面变形安全状态等级划分

危险程度	λ 区间
安全	$\lambda > 1$
隐患	$1 \geq \lambda > 0.5$
危险	$0.5 \geq \lambda > 0$
高危险	$\lambda \leq 0$

4 工程实例

4.1 数据分析

广汉某地下灯光线路改造工程,采用水平定向钻技术进行机场跑道道面基层,即距离跑道表面 38 cm 处进行基层穿越操作。该区域地势平坦,其南北两端的稳定地下水位均远低于该钻孔位置,因此地下水对工程施工无影响。穿越施工影响的土层仅为水泥稳定类基层,穿越过程中整体稳定性较好。为确保地下线路改造工程的安全,实现信息化施工,在穿越过程中对道面的竖向位移进行监测,共监测 5 块板面的道面,选用其中 1 块板面的平均沉降数据,监测数据是以 2023 年 6 月 16 日为监测基点,每隔 1 h 监测一次数据,预测模型的数据选取为钻进工序当天的 09:00—16:00,其中施工时间为 09:00—12:00。由于该监测区间内监测时间是等间隔的,故不需要进行插值处理。

监测所获取的沉降量为 $X^{(0)} = (0.2, 2.1, 1.8, 1.9, 1.8, 1.7, 1.7, 1.7)$,然后进行一次累加生成(AGO)可得序列 $X^{(1)} = (0.2, 2.3, 4.1, 6.0, 7.8, 9.5, 11.2, 12.9)$,使得其呈现线性增长趋势。构造数据矩阵 B 和 Y ,并利用最小二乘原理估计 $\hat{a} = [a, u]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y$,求出参数发展系数 $a = 0.032 1$ 和灰色作用量 $u = 2.031 9$,代入式(6)可得:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left(0.2 - \frac{2.031 9}{0.032 1}\right) e^{-0.032 1k} + \frac{2.031 9}{0.032 1} \quad (19)$$

竖向位移监测值及预测值见表 3。

当天 17:00 的预测值可得:

$$\hat{X}^{(1)}(8) = \left(0.2 - \frac{2.031 9}{0.032 1}\right) e^{-0.032 1 \times 7} + \frac{2.031 9}{0.032 1} = 1.592 \quad (20)$$

可求得施工结束后当天 17:00 的道面沉降位移值为 1.600 mm,其中,后验差比值 $C = S_2/S_1 =$

表 3 道面某一板块竖向位移监测值与预测结果

时间	实测值/mm	GM 模拟值/mm	残差	相对误差/%
09:00	0.200	0.200	0.000	0.00
10:00	2.100	1.993	0.107	5.06
11:00	1.800	1.930	-0.130	-7.22
12:00	1.900	1.869	0.031	1.63
13:00	1.800	1.810	-0.010	-0.56
14:00	1.700	1.753	-0.053	-3.12
15:00	1.700	1.698	0.002	0.12
16:00	1.700	1.644	0.056	3.29

$0.0051/0.3441 = 0.0147 < 0.35$, 且 $P=1$, 精度较好。如图 3 所示, 对观测到的实际变形数据与模拟预测数据实施线性拟合操作, 能够发现模拟预测值和实际检测值相对误差比较小, 灰色理论模型的模拟预测效果非常接近实际的观测值, 验证出该模拟预测模型精度较高。采用 GM(1,1) 灰色预测方法在对道面沉降变形的预测分析的过程中, 伴随着建模数据的不断增多, 拟合精度也会随之降低。这种误差不仅仅是由于模型本身的局限性所导致的, 还与数据的波动性密切相关, 同时这也与灰色理论系统所表现出来的局部的、不充分的状态下去发现和探寻内在规律的独特优势相契合^[10]。

当运用灰色预测模型的时候, 预测误差不可避免地会存在, 实际测量值会围绕预测曲线周围上下浮动, 表现有波动性。灰色预测曲线作为一条较为平滑的曲线, 着重于挖掘数据中的主要趋势信息, 而对于数据的波动性关注不足。利用灰色上、下限理论模型, 分别选取实测沉降值位于预测曲线之上和预测曲线以下的 3 个误差数据, 计算其平均值, 并将作为其上、下限理论的参考误差 e , 分别对灰色上、下限的 e 适当处理, 直到达到概率条件, 最终将符合概率条件的 e 代入式(17)中, 定义出灰色上、下限^[11]。表 4 显示, 当选取概率 $P_0 > 70\%$ 的时候, 所采集到的 8 组数据, 有 6 个数据落在预测上下限的区间之内, 即预测灰色上、下限模型的有效率为 75%。如图 4 所示, 10:00 和 11:00 这两个累计沉降值分别处于预测上限之上和预测下限之下, 这可能是由于该时段处于施工期间, 道面上启动的机器设备以及来往人员的活动, 数据受到较大的干扰影响所致, 波动性反映了事物发展过程中的不确定和变化性。为了更好地考虑数据的起伏特征, 利用灰色上、下限理论方法, 改变了灰色模型在时序方面的单个点预测, 拓展了灰色理论的应用范畴。这种方式可以清晰呈现变形发展的可能范围, 使人们对变形的不确定性有更准确的把握, 为处理变形问题

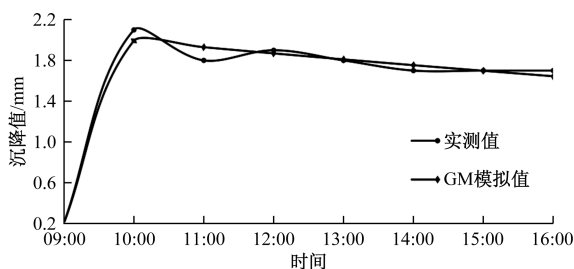


图 3 沉降值与灰色模拟值对比

表 4 灰色上、下限模型预测值

时间	沉降实测值/mm	预测上限值/mm	预测下限值/mm
09:00	0.200	0.247	0.136
10:00	2.100	2.040	1.929
11:00	1.800	1.977	1.866
12:00	1.900	1.916	1.805
13:00	1.800	1.857	1.746
14:00	1.700	1.800	1.689
15:00	1.700	1.745	1.634
16:00	1.700	1.691	1.580

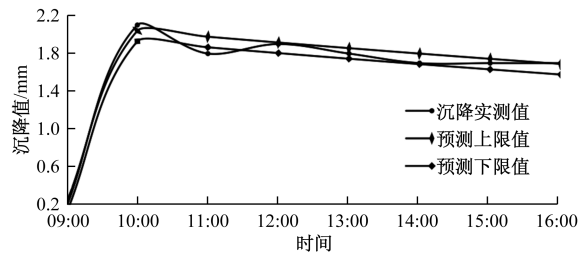


图 4 基于 GM(1,1) 模型的预测上、下限

提供了有力支撑, 在实际的地下线路改造等工程中具有很强的指导意义, 能够切实助力工程人员进行更合理的决策和规划, 从而更好地应对变形的不确定性。

4.2 安全评价

在开展定向钻施工变形监测的工作中, 根据不同领域的相关要求、并结合不同地区的气候条件、土壤性质、地质情况、地下水分布以及施工环境等均影响着变形控制值的选取, 所以针对道面的变形控制值的选取也会存在有不同的情况, 甚至有极大的差距。因此地下线路改造工程中道面的变形控制值的确定需要紧密结合实际的施工情况、专业人员的协助以及相应规定的报告文件来科学地选取。

结合此次水平定向钻穿越跑道基层进行灯光线路改造的实际情况以及机场水泥混凝土跑道道面的施工规范要求, 把此次施工的道面变形控制值定为 5 mm^[12]。将灰色上、下限模型得出的定向钻施工道面变形的预测上限值和下限值代入式(18), 发现在评价时段区间内, λ 值均大于 1, 由此可以判断该地下线路改造工程的道面变形处于安全状态, 不存在因道面变形而引发的潜在风险。

5 结论

(1) 为地下线路改造工程提供了一种可靠的道面沉降变形预测方法, 基于严格的数学计算, 较为客观地反映了工程实际情况, 并展现出了较好的预测精度, 为工程设计施工提供科学依据。

(2)灰色上、下理论的运用,将原有灰色模型的点预测形式转为区间预测,赋予一个灰色预测范围,为工程决策提供了更全面的信息。

(3)对灰色预测误差的处理方法,提高了预测精度,减少了误差带来的随机波动性,有助于提高工程质量,避免因预测不准确而导致的资源浪费。

(4)根据道面变形控制线与灰色上、下限曲线的交互位置,区分出道面变形安全状态的层级划分,可以更为合理地判断施工期间道面变形的安全性。

结合实例,灰色上下限理论不仅在理论上赋予了灰色预测区间,在实际工程中,其计算过程简便,能够快速为工程决策提供可靠的参考范围。与实际监测数据的对比分析,发现其预测精度达到了较高水平。该方法在应用中较为客观地反映了工程实际情况,让工程施工对道面沉降变形的控制更为准确,节约了大量的人力、物力和财力资源,同时也为类似的地下线路改造工程提供了可借鉴的经验。

参考文献

- [1] PIKAS J. Horizontal directional drilling (HDD) method pipe update [C]//AMPP Annual Conference + Expo. Denver: AMPP, 2023: 1444-1456.
- [2] 苟胜荣, 张文学, 白立东. 基于GM(1, 1)模型的地铁基坑变形预测研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(2): 70-74.
- [3] 王德法, 刘镇瑜, 雒亿平, 等. 基于改进的变权缓冲灰色模型在沉降预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5677-5684.
- [4] 魏冠军, 梁斌, 戴嵩, 等. 一种优化组合模型及其在高速铁路冻胀变形预测的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8459-8466.
- [5] 黄维坤, 池永锋, 杨少渊, 等. 基于灰色理论的采动围岩变形混沌时序预测[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(3): 79-85, 100.
- [6] 张华平, 聂飞. 优化灰色模型在变形预测中的应用研究[J]. 经纬天地, 2023(5): 25-29.
- [7] 项文. 基于灰色理论的高层建筑物基坑变形预测[J]. 地矿测绘, 2023, 6(5): 16-18.
- [8] 魏周会, 唐永鹏. 灰色模型在蓄水池变形预测中的应用[J]. 水利技术监督, 2024(2): 35-38, 59.
- [9] 田岗, 白明洲, 王成亮, 等. 基于灰色上、下限理论的土质隧道变形预测分析及安全评价[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 161-167.
- [10] 樊海青, 马彦凤. 基于时变参数的灰色模型在变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 74-77.
- [11] 贾晶磊, 陈月顺, 朱念焜. 基于灰色 DNGM(1, 1)的隧道拱顶沉降预测研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(7): 229-231.
- [12] 民用机场水泥混凝土道面设计规范: MH/T 5004—2010[S]. 北京: 中国民用航空局, 2010.

Deformation Prediction of Road Surface in Underground Line Reconstruction Construction Based on Grey Theory: Taking a Certain Lighting Line Reconstruction Project in Guanghan City as an Example

SHI Yueya^{1,2}, GUO Wenwen², KONG Yihao²

(1. Civil Aviation Airport Intelligent Operation and Maintenance Engineering Research Center of Sichuan Province, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;

2. Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: In the construction of underground line reconstruction, pavement deformation has characteristics such as uncertainty and complexity. Therefore, the grey model was used to establish a prediction model for pavement deformation, and engineering examples were combined to verify its good accuracy. Given that the grey model can only predict the overall trend in deformation prediction and cannot reflect the volatility of prediction errors, prediction errors were processed to determine the upper and lower limit values of grey prediction, endowing the model with a certain prediction interval and changing the point prediction form. According to the intersection position of the deformation control line and the upper and lower limit curves of grey, the safety state of pavement deformation was divided to more reasonably judge the construction safety and provide reference for related projects.

Keywords: underground line reconstruction; grey theory; gray upper and lower limit; pavement deformation; safety state