

基于灰色关联法的机场跑道表面温度影响因素分析

乐少斌

(上海虹桥国际机场有限责任公司, 上海市 200335)

摘要: 分析机场跑道表面温度的主要影响因素, 明确各因素对温度变化的作用程度, 为温度预测模型构建提供依据。选取上海虹桥机场东跑道 2023 年 3 月 15 个完整自然日的小时温度数据作为参考序列, 采用灰色关联法对平均气温、太阳辐射量、平均风速及降雨量等气象因素进行敏感性分析, 通过无量纲化处理和关联系数计算获得各因素关联度。平均气温关联度最高, 其次为平均风速、太阳辐射量和降雨量。气温与道面温度变化趋势高度一致, 风速呈负相关特征, 太阳辐射具有显著的周期性影响, 降雨随机性较强但对短时温度变化作用明显。分析结果表明, 气温是跑道表面温度变化的主导因素, 风速与太阳辐射为重要辅助因素, 降雨在特定情境下具有显著影响, 应在预测模型中综合考虑多因素耦合作用。

关键词: 机场工程; 道面温度; 灰色关联法; 气象因素; 敏感性分析

中图分类号: V351.11; U418.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0050-04

Analysis on Factors Influencing Surface Temperature of Airport Runways Based on Grey Correlation Method

LE Shaobin

(Shanghai Hongqiao International Airport Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The primary factors influencing the surface temperature of airport runways are analyzed and the impact level of each factor on the temperature change is clarified in order to provide a basis for the establishment of temperature prediction model. Selecting the hourly temperature data of 15 complete natural days in March 2023 at the east runway of Shanghai Hongqiao Airport as the reference sequence, the grey relational analysis is adopted to conduct the sensitivity analysis on meteorological factors such as average temperature, solar radiation, average wind speed and rainfall. The correlation degrees of each factor are obtained through dimensionless processing and calculation of correlation coefficients. The average temperature has the highest correlation, followed by the average wind speed, solar radiation and rainfall. The variation trends of air temperature and pavement temperature are highly consistent. Wind speed shows a negative correlation feature. Solar radiation has a significant periodic impact. Rainfall is highly random but has a significant effect on short-term temperature changes. The conclusion shows that the air temperature is the dominant factor affecting runway surface temperature, and the wind speed and solar radiation are important auxiliary factors. Rainfall has a significant impact in specific situations. The coupling effect of multiple factors should be comprehensively considered in the prediction model.

Keywords: airport engineering; pavement temperature; grey relational analysis; meteorological factor; sensitivity analysis

0 引言

近年来, 民航业发展愈发迅速, 航空出行的安全性与准时性逐渐成为人们关注的重点^[1]。机场跑道是飞行区最核心的基础设施, 其表面温度过高易导致飞机在运行中发生爆胎事故, 温度过低易导致跑道表面凝霜结冰, 显著降低跑道表面与轮胎之间的摩擦力, 增大飞机冲出跑道的风险。因此, 准确分析

机场道面温度影响因素, 是保证机场日常运行安全和效率的重要议题之一^[2]。

机场道面温度场分布情况变化频繁, 影响因素众多, 国内外已有研究从数值模拟与实测数据角度对道面温度场演化规律进行了分析^[3-4]。由热量传递机理分析, 道面温度变化主要受材料热物理特性及气象环境共同作用^[5], 内部影响因素主要为机场跑道材料的热传导效率、跑道材料的热容量、跑道表面的热反射率以及跑道表面的辐射率等。外部影响因素主要由气象因素组成, 主要包括平均大气温度、太阳辐射量、平均风速和降雨量等。需要说明的是,

收稿日期: 2026-03-09

作者简介: 乐少斌(1977—), 男, 硕士, 经济师, 从事机场设计、施工管理工作。

本文研究对象为上海虹桥机场东跑道既有道面,在研究时段内其结构形式、材料组成及主要热物性参数基本保持稳定,而可获取的连续监测数据主要为气象要素和道面表面温度数据,因此本文后续灰色关联分析重点针对外部气象因素展开,内部因素作为相对稳定的背景条件进行定性分析,未单独纳入关联度计算。跑道表面温度的影响因素众多,单一因素的影响可以定性或定量的表示^[6]。然而,已有研究表明,多因素耦合分析是提高温度预测精度的重要途径^[7],应当对各影响因素对道面温度的相关程度进行分析,从众多影响因素中确定温度预测模型中最为重要的影响因素。

为此,本文采用灰色关联法分析并确定影响因素中关联程度更高、影响更大的因素。本文首先梳理了可能影响对跑道表面温度变化的因素,并通过敏感性分析处理得到不同影响因素的权重,确定主要影响因素,为构建跑道表面温度预测模型提供基础。

1 影响因素

1.1 外部因素

外部影响因素主要为气象因素,包括近地面气温、太阳辐射量、平均风速、降雨量以及人为因素等。机场跑道表面与近地表空气直接接触,并时刻发生着热对流以及热辐射,近地面气温会直接影响道面温度。太阳辐射是道面结构热量的主要来源,太阳辐射作为道面热量输入的主要来源,其周期性变化直接影响表面温度峰值分布^[8]。太阳辐射吸收量会显著影响道面温度;同时,各结构层热量向下传递需要一定时间,跑道面层吸收的大量太阳辐射会聚集在跑道表面,提高表面温度^[9]。风速会直接影响跑道表面的热对流作用:热对流换热系数与风速呈显著相关关系,对路面温度变化具有重要调节作用^[5],平均风速的增大会使热对流系数提高,加快热交换速率,降低道路表面的温度^[10]。降雨对跑道表面温度的影响表现在多个方面:首先,降雨时云层相比于晴朗天气云层更厚,从而减小了道面太阳辐射能量吸收量,导致地面持续降温^[11];其次,降雨也使大气温度下降,进而影响跑道表面的热辐射吸收量,从而影响跑道表面温度;最后,积聚在跑道表面的雨水会带走跑道表面的大量热量,导致跑道表面快速降温。人为因素方面最主要的是航班起落引起的热量变化。

1.2 内部因素

内部影响因素主要为道面本身的物理性质,主要包括反射率、辐射率、体积热容量和热传导率。反射率是指辐射被反射部分与入射总量的比率,反映了跑道表面对于太阳辐射的吸收能力,取值范围介于0~1。辐射率指跑道表面每单位面积散发的热辐射通量与相同温度下的理想黑体辐射通量之比,用来反映跑道表面放出热量的能力。体积热容量是描述物体热效应的重要物理量之一,反映了单位体积物体在不经过程相变时发生温度改变所需要的热量。体积热容量会影响道面材料温度变化的速率,相关研究指出,道面材料热容量与导热率的变化将显著改变温度梯度分布^[12],随着热容量的增大,道路沥青的最大表面温度会下降,最低表面温度会上升^[13]。导热率是指在1 m厚度的材料中两端温差为1 K时,1 h通过的热量,用来描述物体传热的速率。高导热系数的道面可以降低最大表面温度,提高最低表面温度。

2 影响因素敏感性分析

2.1 灰色关联法

结合本文研究目的及数据可得性,影响因素敏感性分析主要选取平均气温、太阳辐射量、平均风速及降雨量等外部气象因素作为对比序列。上述因素能够较好表征研究时段内跑道表面与外界环境之间的热交换条件。对于道面材料组成、结构层厚度及热物性参数等内部因素,由于在研究对象和研究周期内变化较小,且缺乏与表面温度同步匹配的动态监测数据,故本文未将其纳入本次灰色关联分析计算。采用灰色关联法对影响因素敏感性进行分析。灰色关联法(grey relational analysis)是灰色系统理论的重要组成部分,由邓聚龙提出^[14],已广泛应用于多因素敏感性分析与工程评价领域^[15-16],是灰色系统分析中常用方法之一,用于分析系统中不同影响因素对其所在系统的影响程度。灰色关联法能够研究多个因素之间关联程度,其主要思想是根据序列曲线的几何形状相似程度判断其联系是否紧密,曲线相似程度越大,相应两序列关联程度越高,反之亦然^[17]。灰色关联分析的简要步骤如下。

2.1.1 建立参考序列与对比序列

参考序列是反映数据行为特征的序列,应能够表征系统数据的变化趋势,本文中选取测点实际温度数据作为参考序列。对比序列是影响系统行为的

因素组成的序列,即需要进行关联度分析的因素序列,本文中为小时平均气温 T_m 、太阳辐射量 Q_s 、降雨量 v 、平均风速 u 四种序列。

2.1.2 数据的无量纲化处理

将各因素数据序列除以各组数据均值,得到新的参考序列 X_0 和对比序列 X_i ,即:

$$X_i = \frac{X}{\bar{X}} \quad (1)$$

2.1.3 计算灰色关联系数

灰色关联程度可通过参考序列与对比序列曲线之间的差异进行表征,因此可根据参考序列与各对比序列在各样本点处的差值,利用式(2)即可计算各对比序列元素与参考序列元素关联度 θ_k ,即:

$$\theta_k = \frac{\min |X_0 - X_i| + \rho \times \max |X_0 - X_i|}{|X_0 - X_i| + \rho \times \max |X_0 - X_i|} \quad (2)$$

式中: ρ 为分辨系数,取值为 $[0, 1]$ 之间,分辨系数取值越小,计算所得的关联度差异越明显,可以更直观地表现各因素对系统的影响程度。

2.1.4 获得序列间关联度

式(2)计算得到的灰色关联系数对应于参考序列与各对比序列在各个样本点上的关联程度。由于各样本点对应的关联系数数量较多,难以直接用于整体比较分析,因此对各对比序列在所有样本点上的灰色关联系数取均值,以表征该对比序列对系统的影响程度。

2.2 结果分析

使用上海虹桥机场东跑道埋入式传感器实测道面温度,以小时为单位输入2023年3月跑道表面温度数据中15个完整自然日数据作为参考序列。气象数据通过欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)公开气象数据集第五代大气再分析全球气候数据(ERA5)通过插值法得到,将虹桥机场实测数据对应的气象数据作为对比序列。依照式(2)进行无量纲化处理,将处理后数据代入式(3)计算灰色关联系数,因输入数据量较大,且周期性较强,为了直观地看到各因素影响程度,分辨系数取0.1进行计算。得到各影响因素关联度见表1。

表1 灰色关联分析结果

因素	平均气温	太阳辐射量	降雨量	平均风速
关联度	0.985 3	0.913 3	0.884 6	0.958 2

由表1可知,平均气温对跑道表面温度的影响程度最大,这是因为跑道表面与近地表空气直接接触,

时刻发生着热辐射与热对流。平均风速对跑道表面温度影响程度相对较大,这是因为风速会影响跑道表面与空气热对流效率,会显著影响跑道表面热量的变化,从而影响跑道表面温。太阳辐射作为跑道表面重要的热量来源,但是相关程度较低,主要原因是日间太阳辐射量对跑道表面温度变化影响程度较大,夜间不存在太阳辐射所。降雨量因素在分析结果中显示出的相关性不如其他三者突出。

进一步对无量纲化处理后的对比序列与参考序列图像进行对比分析。图1表明,小时平均气温对比序列与参考序列曲线相似度很高,与灰色分析数值结果相吻合。由图2发现,太阳辐射量在每日数据中极大值处的变化趋势可以较好吻合参考序列的曲线极大值,进一步印证了跑道表面温度热量来源的重要部分是太阳辐射量。图3表明,平均风速对比序列曲线与参考序列曲线增减性相反且变化具有一定的滞后性,在平均风速对比序列最小值附近参考序列达到了样本内的最大值,基本符合风速气象因素的影响特征。图4表明,降雨具有很强的随机性,且出现降雨时会对跑道表面温度造成较大影响;在灰色关联分析中降雨因素作用被无量纲化处理拉平,故其关联度会明显低于其他变量。

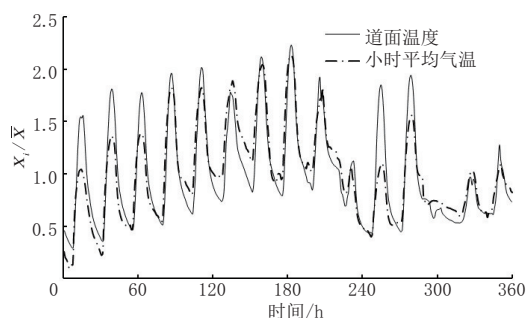


图1 小时平均气温与道面温度序列对比

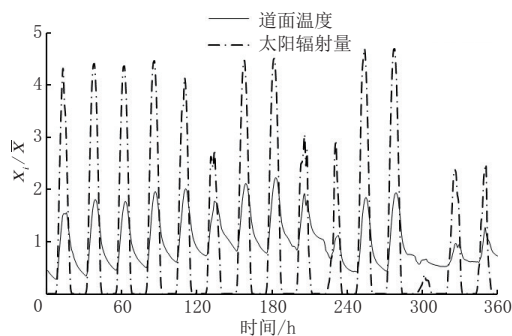


图2 太阳辐射量与道面温度序列对比

3 结论

本文梳理了影响机场跑道表面温度的外部因素以及内部因素,通过灰色关联度分析法判断各因素

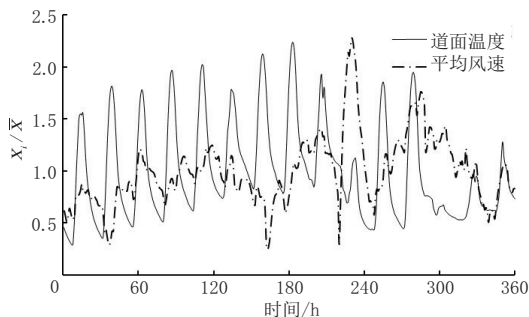


图3 平均风速与道面温度序列对比

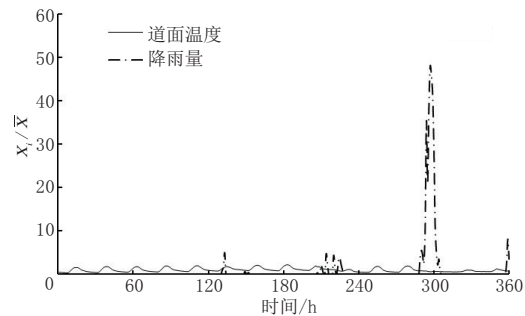


图4 降雨量与道面温度序列对比

影响程度,得到了如下结论:

(1)平均气温与道面温度有明显的相关性,是道面温度最主要的影响因素;

(2)太阳辐射量具有周期性的特点,在太阳辐射量达到极大值时跑道表面温度也会增长至极大值;

(3)平均风速与跑道表面温度呈现负相关趋势,风速变化时能够改变对流系数,使跑道表面热对流效率发生改变;

(4)降雨影响因素的随机性较强,但在发生降雨时对跑道表面温度会有显著影响,所以在预测模型构建时不能忽略降雨的影响效果。

需要指出的是,本文灰色关联分析主要针对外部气象因素展开,尚未进一步量化道面材料热参数、结构特征及内部含水状态等内部因素对跑道表面温度的影响。后续研究可结合不同道面结构形式、

材料参数及现场热响应测试,进一步分析内部因素与外部气象因素的耦合作用机制。

参考文献:

[1] 凌建明,刘海伦,石蓉,等. 机场水泥道面日周期温度效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1171-1179.

[2] 张高望,袁捷,张家科,等. 橡胶混凝土道面温度场演化特征[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 16-25.

[3] 赵军,刘海伦,凌建明. 机场水泥混凝土道面温度场数值模拟研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 815-822.

[4] 王浩,李磊,张旭. 机场道面结构温度场分布规律研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 92-100.

[5] 刘洋,秦勇. 气象因素对沥青路面温度场影响分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(7): 35-41.

[6] 付建峰,陈凤晨,苏新. 基于实测温度的机场道面温度应力影响因素敏感性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 38-41.

[7] 孙立军. 路面结构热传导机理及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 523-530.

[8] Qin Y. Pavement surface temperature modeling under various weather conditions[J]. Energy and Buildings, 2015, 102: 104-113.

[9] Islam M R, Ahsan S, Tarefder R A. Modeling temperature profile of hot-mix asphalt in flexible pavement[J]. Int J Pavement Res Technol, 2015, 8(1): 47.

[10] Qin Y, Hiller J E. Ways of formulating wind speed in heat convection significantly influencing pavement temperature prediction[J]. Heat Mass Transf, 2013, 49(5): 745-752.

[11] Zhang X, Pang J, Li L. Estimation of land surface temperature under cloudy skies using combined diurnal solar radiation and surface temperature evolution[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1): 905-921.

[12] 黄卫,张宏. 道面材料热物理参数对温度场影响研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 18-25.

[13] Gui J, Carlson J, Phelan P E, et al. Impact of pavement thickness on surface diurnal[J]. J Green Building, 2007, 2(2): 121-130.

[14] Deng J L. Introduction to grey system Theory[J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24.

[15] 刘思峰,谢乃明. 灰色关联分析模型及其应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(5): 123-128.

[16] 朱建军,刘思峰. 灰色系统理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[17] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.