文章编号:2096-5052(2026)03-0045-11 DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.05

基于软硬件实时交互的大直径盾构隧道管片收敛变形监测

陈俊伟[1,2],施江杰[3*],全良臣[1],张宇[4]
(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063;2.水下隧道技术国家地方联合工程研究中心,湖北 武汉 430063;
3.南京仕达得尔智能科技有限公司,江苏 南京 210019;4.济南城市建设集团有限公司,山东 济南 250014)

摘要:隧道结构变形不仅包含几何变形,还涉及管片自身弹性变形与接头张开引发的刚性变形,为保障超大直径盾构隧道施工安全,解决单一监测方法难以兼顾实时性与精度的技术问题,提出一种基于软硬件实时交互的管片变形监测算法,通过卡尔曼滤波融合应变与转角数据,获取管片实时绝对收敛信息。该算法在济南黄河隧道工程中得到应用,并经激光扫描数据验证。结果表明,该融合算法可有效抑制传感器噪声,监测精度较传统方法提升30%以上,兼具良好的实时性与稳定性,为大直径盾构隧道的变形监测提供新的技术思路。

关键词:盾构隧道;结构健康监测;多源数据融合;卡尔曼滤波;管片收敛;变形感知
中图分类号:U456.3;TP274 **文献标志码**:A

引用格式:陈俊伟,施江杰,全良臣,等. 基于软硬件实时交互的大直径盾构隧道管片收敛变形监测[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):45-55. Chen Junwei, Shi Jiangjie, Quan Liangchen, et al. Monitoring on segment convergence deformation of large-diameter shield tunnels based on real-time cyber-physics interaction[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):45-55.

Monitoring on segment convergence deformation of large-diameter shield tunnels based on real-time cyber-physics interaction

Chen Junwei[1,2], Shi Jiangjie[3*], Quan Liangchen[1], Zhang Yu[4]
(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;
3. Nanjing Strdal Intelligent Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China;
4. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: Tunnel structural deformation was defined to include not only geometric deformation, but also elastic deformation of segments and rigid deformation induced by joint opening. To ensure the construction safety of superlargediameter shield tunnels and to address the technical challenge that a single monitoring method could not balance realtime performance and accuracy, a segment deformation monitoring algorithm based on real-time interaction between software and hardware was proposed. Strain and rotation angle data were fused by Kalman filtering to obtain realtime absolute convergence information of segments. The proposed algorithm was applied to the Jinan Yellow River Tunnel Project and verified by laserscanning data. The results showed that the fusion algorithm could effectively suppress sensor noise, improve monitoring accuracy by over 30% compared to conventional methods, and achieve favorable realtime performance and stability. A new technical idea for deformation monitoring of large-diameter shield tunnels was thereby provided.

Keywords: shield tunnel; structural health monitoring; multisource data fusion; Kalman filtering; segment convergence; deformation perception
Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-08-26; **Accepted**: 2026-08-27; **Published**: 2026-09-20

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-08-26;**接受日期**:2026-08-27;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]12)
第一作者简介:陈俊伟(1989—),男,江苏宜兴人,高级工程师,硕士,主要研究方向为岩土与隧道工程。E-mail: junweichen1014@163.com
*通信作者简介:施江杰(1976—),男,江苏南通人,主要研究方向为软硬件结合系统开发和集成。E-mail: jj.shi@strdal.com

0 引言

盾构隧道,尤其是超大直径隧道,已广泛应用于公路、铁路和地铁等交通工程。施工扰动、车辆振动及邻近深基坑开挖等,均可能引起管片收敛变形[1],对施工、运营安全构成威胁。因此,开展隧道内壁预制管片收敛变形的精确监测是保障质量与安全的重要环节。

目前隧道管片的收敛变形监测常见方法包括全站仪、三维激光扫描、数字图像法和分布式光纤传感器[2-4]。全站仪具有高精度和实时性优势,杨松林等[5]在北京地铁隧道施工中成功使用全站仪开展盾构管片收敛监测。普通人工全站仪无法捕捉短时间内突发性的变形,而自动全站仪可以连续自动化采集,但设备价格高昂。三维激光扫描技术则能快速获取隧道整体形态[6],李行[7]验证了三维激光技术可以掌握监测断面内整体变形情况,但设备价格昂贵(如 Polaris TLS750 约 19 万美元,Profiler 9012 约 13 万美元),且难以实现实时监测。数字图像法是一种非接触式视觉测量技术,具有无需布设传感器、不损伤结构、测点布设简便、不干扰施工等优点,但是数字图像法受环境、视野局限,受光照、雨雪、扬尘、遮挡等现场环境影响大,且图像数据量大,后期运算繁琐。分布式光纤传感器技术具备分布式与实时优势[8],Gómez 等[9]和 Monsberger 等[10]均验证了其在地铁隧道的有效性。然而,分布式光纤传感器抗剪能力弱,难以捕捉接缝错位和大变形,且长光纤易受环境干扰。

多源数据融合技术在隧道变形监测中的应用研究逐渐成为热点。黄惠峰等[11]将神经网络应用于隧道结构健康监测,通过多源数据训练模型提高预测精度。Maes 等[12]采用主成分分析处理隧道多维度监测数据,有效降低了数据冗余,消除环境因素对隧道长期变形监测数据的影响。然而,现有融合方法在实时性、计算复杂度及物理意义明确性方面仍存在局限。相比之下,卡尔曼滤波具有递推计算、实时性强和物理意义明确等特点,能够综合利用不同监测信息对系统状态进行动态估计,为隧道多源变形监测数据的实时融合提供了一种有效方法。

综上,现有方法虽各有优点,但在实时性、成本和适用性方面仍存在不足。为此,本研究提出基于姿态转角与应变融合的智能算法(见图 1),并构建了配套的软硬件实时交互系统。硬件部分由空间姿态盒、应变计和采集仪组成,负责转角与应变数据的现场感知与传输;软件部分依托云接收服务、云计算引擎与前端服务器,对监测数据进行实时接收、在线融合计算与动态可视化显示。由此形成从数据采集、传输、卡尔曼滤波融合到用户呈现的闭环实时交互。该方法已在济南黄河隧道应用,并通过与激光扫描数据对比,验证了其精度与可靠性。

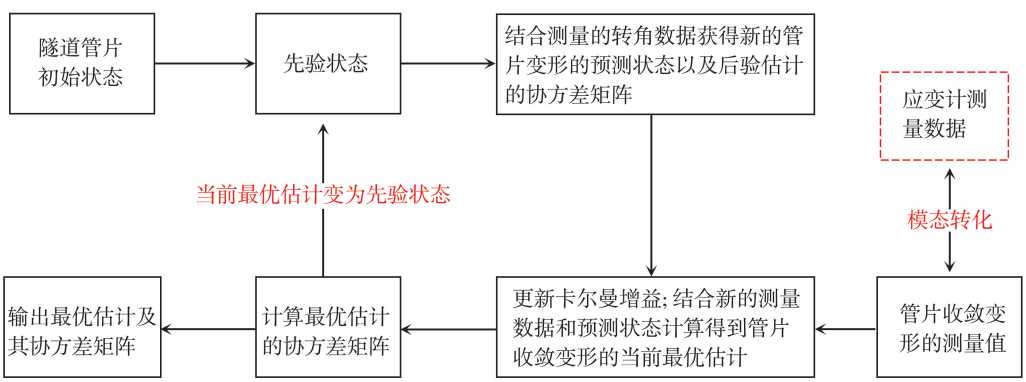


图 1 基于姿态转角与应变融合的管片收敛变形测量算法

Fig.1 Segment convergence deformation measurement algorithm based on fusion of attitude rotation angle and strain

1 监测算法原理

在盾构隧道变形监测中,单一测量手段常受到传感器噪声、环境变化以及安装条件等因素影响,难以长期稳定地反映结构真实变形状态。为提高监测结果的准确性和可靠性,本研究引入卡尔曼滤波算法,对姿态转角与应变两类监测数据进行融合分析,充分发挥不同测量信息之间的互补优势[13]。该算法能够综合考虑系统模型误差和测量噪声,通过递推计算不断修正变形估计结果,从而获得更接近结构真实状态的监测值。

如图 1 所示,算法首先以隧道管片初始状态作为系统状态的起点,并将上一时刻的最优估计结果

作为当前时刻的先验状态。随后,根据测得的姿态转角数据,结合管片几何关系建立状态预测模型,得到当前时刻管片收敛变形的预测值及其协方差矩阵。与此同时,通过应变计获取管片应变数据,并利用结构力学模型将应变信息转换为对应的收敛变形测量值。

在状态更新阶段,卡尔曼滤波根据预测值与应变测量值之间的差异计算卡尔曼增益,并结合两类观测信息对当前变形状态进行加权修正。其中,噪声较小、可信度较高的数据将获得更大的权重,从而实现多源监测信息的自适应融合。完成更新后,得到当前时刻管片收敛变形的最优估计值及其协方差矩阵,并将该结果作为下一时刻的先验状态继续参与迭代计算。

与依赖单一监测量的方法相比,该融合算法能够有效抑制随机噪声和异常波动,提高监测结果的连续性、稳定性和抗干扰能力,从而更加准确地反映盾构隧道管片的实际收敛变形状态,为结构健康评估和长期运营安全监测提供可靠的数据支撑[14]。

1.1　由转角换算变形

在隧道结构监测中,变形既可以通过位移表示,也可以通过转角表示。研究表明,转角测量在结构变形监测中具有较高的可靠性和精度[15]。由于转角测量具有精度高、稳定性好等优点,因此可利用结构转角反演其变形情况。隧道管片转动与变形关系如图 2 所示,当隧道截面上监测点 P 发生转动后,其位置变化至 P'。由于监测点与截面中心 O 的距离保持不变,因此可根据转角变化和结构几何关系计算监测点的位移量,从而实现由转角到位移的换算。该方法能够将姿态信息直接转换为结构变形信息,为隧道收敛变形监测提供有效手段。

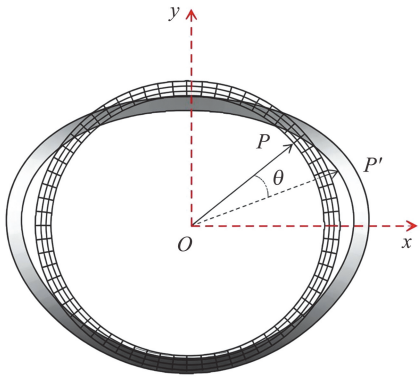


图 2　隧道管片转动与变形关系示意图
Fig.2　Schematic of rotation-deformation relation for tunnel segments

1.2　由应变换算变形

应变作为结构响应的重要指标,也可以通过适当的模型转换方法反推出整体变形。在此方法中,应变到位移的转换中采用了模态叠加理论,通过进行有限元模态分析,选出对结构变形贡献最大的结构自振模态信息,通过组建模态转换矩阵对应变测量值进行转换计算从而得到变形信息(见图 3)。本研究采用有限元模型结合模态分析的方法,建立局部应变测量与整体变形场之间的映射关系。

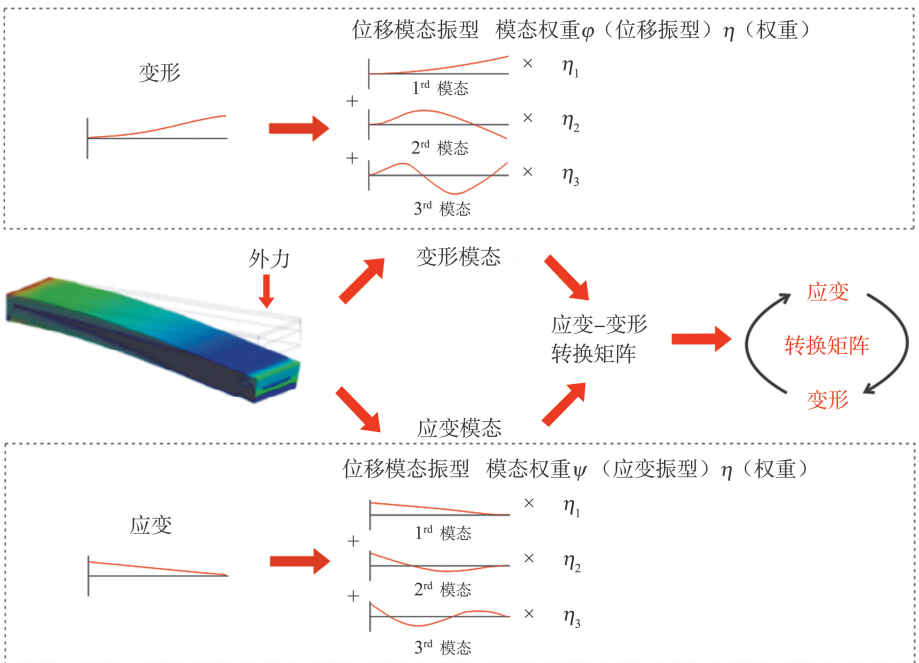


图 3　应变变形模态转换流程原理图
Fig.3　Schematic diagram of strain-deformation mode conversion process

具体而言，首先基于有限元模型对结构进行模态分析，提取结构的应变模态与对应的位移模态，并建立两者之间的映射关系。在此基础上，通过模态叠加原理构建应变–变形转换矩阵，实现由离散应变数据向整体变形分布的重构。

由于结构响应主要由低阶模态主导，不同阶模态对整体变形的贡献存在明显差异，因此采用应变能累积占比作为模态筛选依据。为使得部分局部弯曲及高阶变形信息得到充分描述，综合模态贡献率、重构精度及计算效率等因素，最终选取合适的模态构建应变–变形转换矩阵。

随后，将实测应变数据输入转换模型，求解各阶模态权重系数，并重构得到结构整体变形分布。相比基于单测点或局部经验公式的推算方法，该方法能够充分利用结构整体模态特征，更准确地反映隧道管片的实际变形状态，同时兼顾监测精度与实时计算需求。

2 工程应用

2.1 工程概况

济南黄河隧道位于黄河下游蜿蜒河段，隧道地理位置如图 4 所示，隧道设计图如图 5 所示。隧道采用城市道路与轨道交通 M2 线共建方案，全长 4 760 m，其中隧道长 3 850 m，连接道路长 910 m。隧道分为两层（见图 6）。上层为公路段，供车辆通行，下层为地铁段。

隧洞围岩以黏性土为主，夹有部分砂层和钙质结核。该河段黄河河势相对稳定，河堤宽约 1.4 km，主河道平均水深 4.6 m，河道断面形状复杂，主河道断面总体呈 U 型，主河道水面宽约 400～600 m，浅滩宽约 900～1 200 m。



图 4 济南黄河隧道地理位置图

Fig.4 Geographic location map of Jinan Yellow River Tunnel

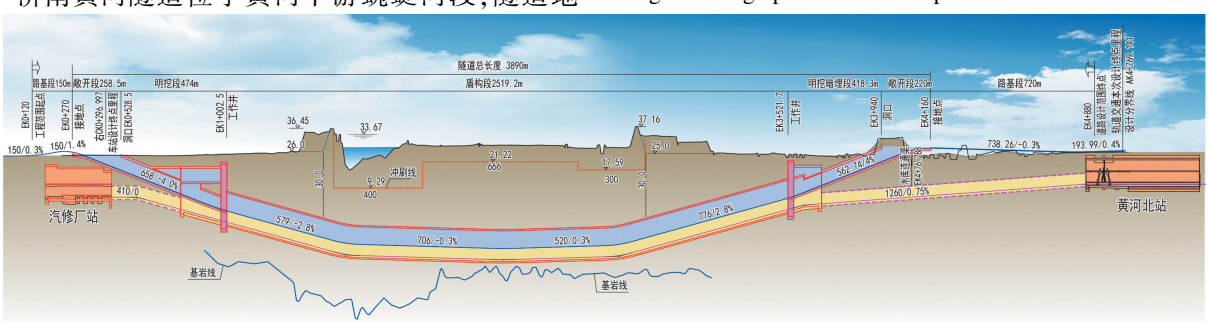
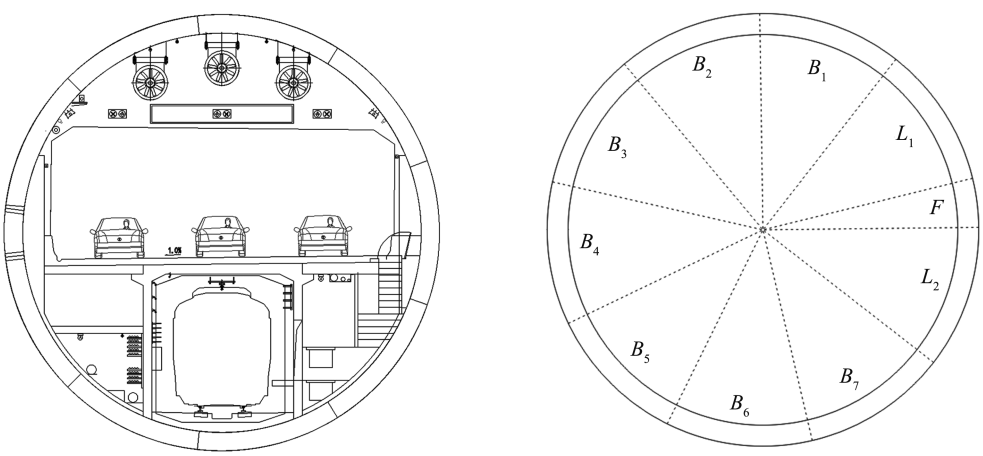


图 5 济南黄河隧道设计图

Fig.5 Design drawing of Jinan Yellow River Tunnel



(a) 隧道横断面布置图 (b) 隧道管片分布图

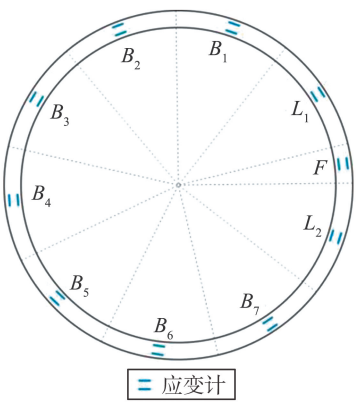
图 6 隧道断面示意图

Fig.6 Schematic diagram of tunnel cross section

隧道剖断面如图 6 所示,隧洞段为单层拼装衬砌,混凝土强度为 C60,抗渗等级为 P12。隧道的设计内径和外径分别为 13.9 m 和 15.2 m,隧道环的厚度和宽度分别为 0.65 m 和 2 m。每个环由 10 段组成,包括 7 个标准段、两个相邻段和一个密封段。用于连接相邻节段的螺栓共有 58 个(M36×750 mm),其中环向螺栓 28 个,纵向螺栓 30 个。

2.2　传感器布设

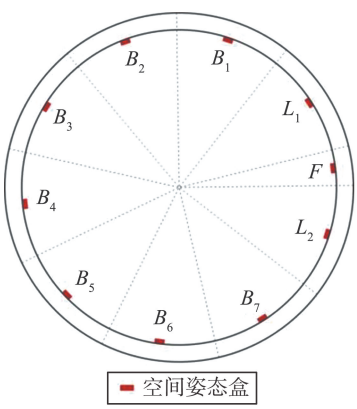
根据监测算法,为更高精度监测隧道管片的变形,分别使用空间姿态盒和应变计来监测隧道结构的转角和应变变化。通过有限元模态分析初步评估结构变形特征,发现前 10 阶模态的应变能累积占比已达 91.2%,表明这 10 阶模态已能反映结构的主要变形模式。结合隧道管片每环由 10 块管片组成的结构特点,确定每环布设 10 个测点(每块管片一个),确保每个测点能有效捕捉对应区域的变形信息。每个测点安装一只空间姿态盒、两支混凝土应变计,如图 7 所示。



(a) 应变计布设图



(b) 应变计照片



(c) 空间姿态盒布设图



(d) 空间姿态盒照片

图 7　传感器布设及照片

Fig.7　Layout and photos of sensors

2.2.1　空间姿态盒

空间姿态盒(见图 8)是基于角度变化监测原理开发的一款高精度空间姿态和运动传感器,适用于长期布设在隧道、建筑物、桥梁监测结构物的倾斜、位移和变形中,其主要监测参数有:标准时间、温度、任意坐标下的高精度倾角、大地坐标下的三维欧拉角、高精度三轴加速度、四元素和位移,具体参数详情如表 1 所示。此外,传感器本身可直接测量角位移数据,其外接通道适配接入应变等其他外源数据。



图 8　空间姿态盒

Fig.8　Attitude measurement box

表 1 姿态盒技术参数表
Table 1 Technical parameters of attitude measurement box

传输速率	姿态角范围	加速度参数	角速度参数	位移参数
上行:60 kbps; 下行:20 kbps	三轴 360°全方位	三轴 16 bits, ±2/±4/±8/±16 g	三轴 16 bits, ±250/ ±500/ ±1 000/±2 000°/sec	最大量程 25 mm

测量范围	测量分辨率	测量精度	系统采样频率	数据输出	数据输出方式	防护等级
±5°	0.001°	0.003°	0~100	高精度倾角/加速度/四元素	RS485/WIFI/BIE/NB/LoRa	IP68

2.2.2 混凝土应变计

应变测量采用基康 BGK4200 振弦式应变计(见图 9),该应变计适用于监测混凝土结构应变,且可长期埋设在混凝土结构内,除可测量结构内部应变外,传感器还同步获取测点位置的温度,具体参数详情如表 2 所示。



图 9 振弦式应变计
Fig.9 Vibrating wire strain gauge

表 2 BGK4200 振弦式应变计技术参数表
Table 2 Technical parameters of BGK4200 vibrating wire strain gauge

标准量程/με	非线性度	分辨力	温度范围	标距/mm	防护等级
3 000	直线:≤1% FS; 多项式:≤0.1% FS	0.125% FS	−20~+80 ℃	150	IP68

2.3 监测频率及预警阈值

为确保隧道结构施工及运营期间的安全稳定,及时掌握结构受力与变形状态,特对结构监测频率作出规定,如表 3 所示。

表 3 监测频率
Table 3 Monitoring frequency

传感器名称	监测频率
空间姿态盒	10 min/次
振弦式应变计	6 h/次

依据文献[16],及周边环境条件,并结合当地工程经验确定该监测项目的监测控制值、预警等级,如表 4、5 所示。

表 4 监测项目控制值
Table 4 Control values of monitoring items

监测项目	控制值	
	累计值/mm	变化速率/(mm·d^{-1})
收敛变形	30	3
沉降	20~30	3

注:收敛变形计算公式为 0.2%D=0.02×0.01×152 000=30.4 mm,式中 D 为隧道管片直径;沉降工程概况未明确注明土体承载力数值,只标注承载力较低,故选择规范中中软-软弱土类别。

表 5 预警等级及标准
Table 5 Early warning levels and criteria

预警级别	预警指标
黄色预警	“双控”指标(累计变化量、变化速率)均达到监测量测控制值的 70%时,或双控指标之一达到控制值的 85%时
橙色预警	“双控”指标(累计变化量、变化速率)均达到监测量测控制值的 85%时,或双控指标之一达到控制值的 100%时
红色预警	“双控”指标(累计变化量、变化速率)均达到监测量测控制值的 100%时

2.4 自动化监测系统

为了实现隧道结构的实时监测与数据处理,在融合算法的基础上依托工程还设计部署了一套自动化监测系统。系统由 3 部分构成。

(1)前端传感器布设

在隧道管片环向布设空间姿态盒、应变计等传感器,实时采集应变、位移信号。每个传感器均具备无线通信和自供电能力,能够在复杂环境下长期稳定工作。

(2)数据处理与融合计算

传感器采集的数据通过隧道内部无线网络(LoRa+WiFi+5G)传输至数据中心。数据中心对采集的传感器原始数据进行初步过滤/插补处理,数据处理流程如图 10 所示。

中心服务器利用卡尔曼滤波器算法对预处理后的数据进行迭代融合计算。系统每 10 min 执行一次融合计算,生成隧道结构内力与变形的时序曲线和空间分布。融合算法的计算效率经过优化,单次计算时间小于 300 ms,满足实时性要求。

(3)监测与预警平台

在上位机端搭建可视化监测平台,实时展示各

监测断面的内力与变形趋势,监测断面的管片收敛变形监测页面如图 11 所示。当预测值超过预设阈值时,系统将自动发出预警信息,提示运维人员采取相应措施。

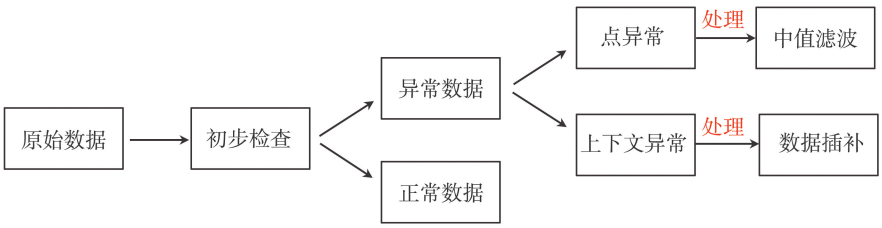


图 10　数据筛查、处理流程图

Fig.10　Flow chart of data screening and processing

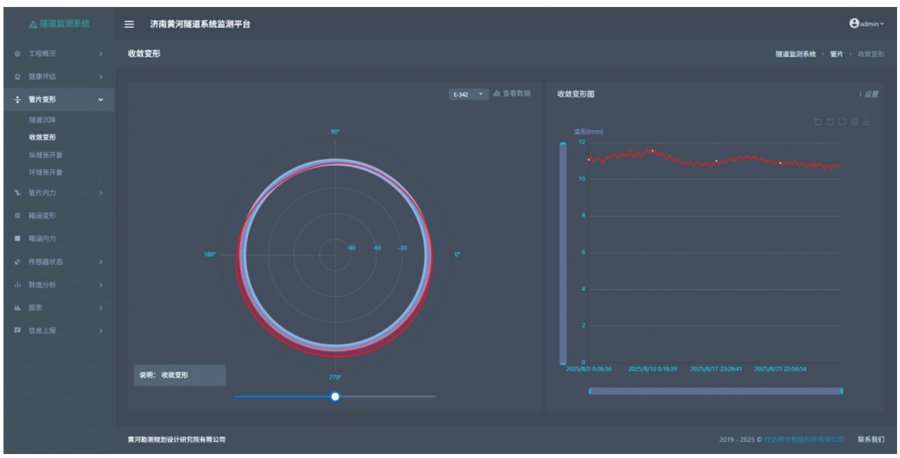


图 11　管片收敛变形监测页面

Fig.11　Monitoring interface of segment convergence deformation

监测与预警平台功能用户端界面简明直观(见图 12),用户操作简单方便。用户可通过视图查看工程结构物的现场图片、三维模型以及各项监测项目的分析结果,可以查看各类传感器的原始信息、实时数据及历史数据。同时可以根据对传感器数据进行分析从而得到的各构件的内部变化。

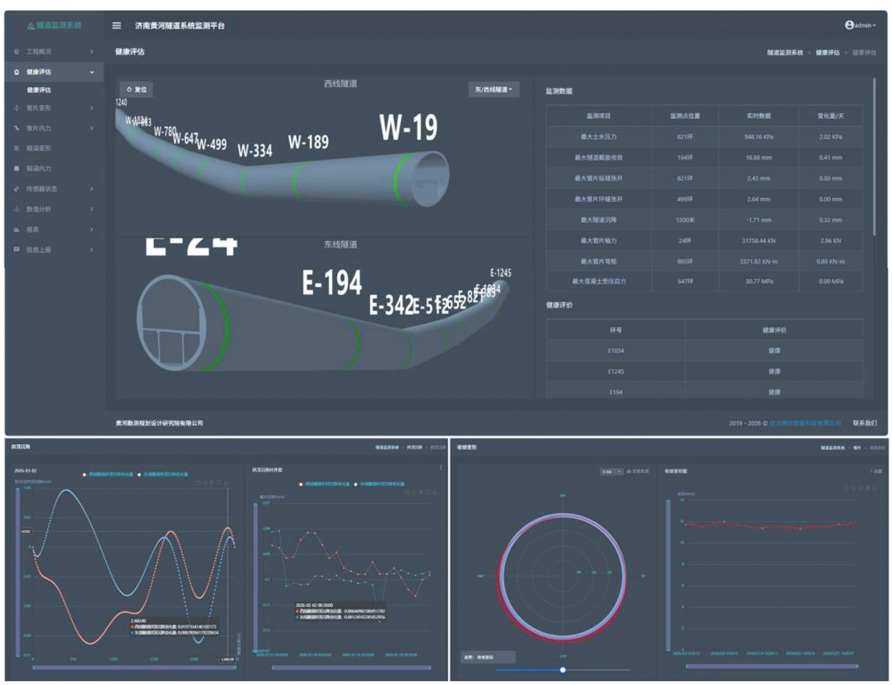


图 12　监测与预警平台前端界面

Fig.12　Front-end interface of monitoring and early warning platform

监测与预警平台主要实现的功能有:隧道几何结构可视化、隧道监测数据可视化、隧道监测数据分析、隧道监测专题图、隧道监测数据报表、隧道监测预警预报、隧道监测历史查询,满足隧道长期运营健康监测的需要。

本系统于 2021 年 7 月 1 日在济南黄河隧道工程中应用,至 2025 年 12 月软、硬件均稳定运行。安装的传感器存活率高,空间姿态盒存活率 98.8%,混凝土应变计存活率 95.8%,传感器安装数量及存活率详情如表 6 所示。监测与预警软件平台各组件、各项功能正常运行,已采集、处理超百万条数据。

表 6 传感器存活率

Table 6 Survival rate of sensors

传感器名	2021 年安装数量/个	2025 年 12 月存活数量/个	存活率/%
空间姿态盒	180	178	98.8
混凝土应变计	360	345	95.8

结果表明,该系统能够在不中断交通的情况下,实现隧道变形的全天候、实时、自动化监测,有效提升了监测的精度与效率,并为后续运维管理提供了数据支持。

3 计算与验证

3.1 算法融合计算结果

根据图 3,应变测量数据通过应变-变形关系矩阵转化为位移观测值,并在迭代中引入。为建立该关系,根据济南黄河隧道实际结构参数建立有限元模型,并采用 ABAQUS 进行模态分析。考虑到本研究的目标是建立应变与变形之间的转换关系,而非模拟施工全过程,因此模型主要针对监测断面所在的单环管片结构进行分析。管片外径 15.2 m、内径 13.6 m、环宽 2.0 m,采用 C60 钢筋混凝土等效均质材料模拟,弹性模量取 36 GPa,泊松比取 0.20,密度取 2 500 kg/m^3。

模型采用四节点线性四面体单元(C3D4)进行离散,共划分 425 737 个单元。经网格敏感性分析,当单元数量超过 40 万后,前 20 阶固有频率变化均小于 2%,表明模型已达到收敛要求。

考虑到隧道埋置于地层中,实际结构受到周围土体约束作用,因此未采用完全自由边界,而是在管片外表面施加等效径向弹簧约束,以模拟岩土体-结构相互作用对模态特性的影响。管片接头采用连续连接简化处理,不单独模拟螺栓及接缝非线性行为,以保证计算效率并突出整体变形特征。

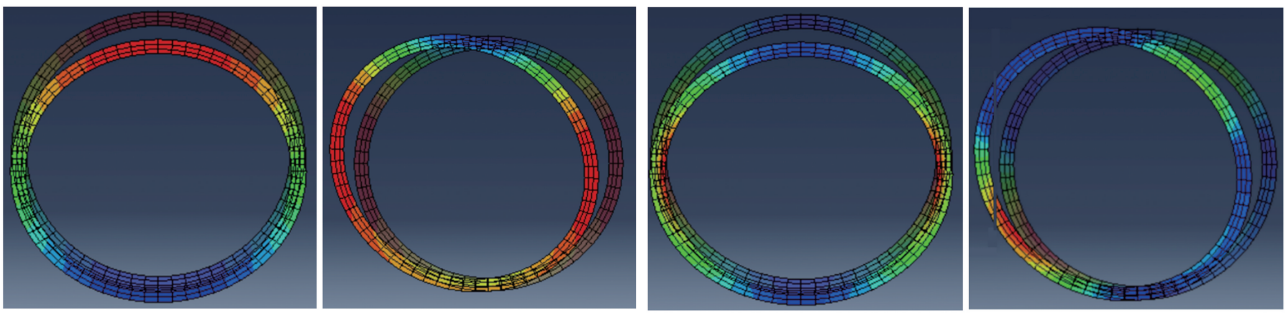
模态分析采用 ABAQUS/Standard 求解器中的 Lanczos 特征值提取方法,提取前 20 阶模态振型,管片前 20 阶模态混合应变能统计结果如表 7 所示。

由于不同模态对整体响应的贡献不同,需要通过应变能分布评估各模态的重要性,前 10 阶模态的应变能累积占比为 91.2%,已能覆盖主要变形特征;为进一步提升重构精度,将模态阶数增加至 20 阶,此时应变能累积占比达到 96.3%,能够覆盖结构主要响应特征,因此选取其构建应变-变形转换矩阵。提取了前四阶模态振型如图 13 所示。进一步地,依据提取的位移模态 φ 与应变模态 $\varnothing$,生成应变-变形转换矩阵,从而得到由应变观测得到的管片收敛变形值。

表 7 管片模态分析前 20 阶模态混合应变能比值

Table 7 Mixed strain energy ratios of the first 20 modes in segment modal analysis

模态#	应变能	比率/%	累计比率/%	模态#	应变能	比率/%	累计比率/%
1	0.009 790	13.60	13.60	11	0.000 576	0.80	92.00
2	0.003 460	4.80	18.40	12	0.000 504	0.70	92.70
3	0.004 820	6.70	25.10	13	0.000 432	0.60	93.30
4	0.008 860	12.30	37.40	14	0.000 432	0.60	93.90
5	0.008 350	11.60	49.00	15	0.000 360	0.50	94.40
6	0.007 700	10.70	59.70	16	0.000 360	0.50	94.90
7	0.006 770	9.40	69.10	17	0.000 288	0.40	95.30
8	0.002 810	3.90	73.00	18	0.000 288	0.40	95.70
9	0.002 520	3.50	76.50	19	0.000 216	0.30	96.00
10	0.010 600	14.70	91.20	20	0.000 216	0.30	96.30



(a) 第一阵型位移模态　(b) 第二阵型位移模态　(c) 第一阵型应变模态　(d) 第二阵型应变模态

图 13　隧道管片模态分析

Fig.13　Modal analysis of tunnel segments

此外,根据姿态盒转角测量数据和转角位移换算公式,亦可计算出隧道管片的收敛变形。则在前文所述的基础上,进一步通过融合特定时间的转角和应变测量数据来估算变形值。B_1 测点转角和应变时序监测数据如图 14 所示,在规定时间段内进行持续监测时,会计算出不同的变形估算值,并将其纳入上述算法中,则预测结果将同时考虑这两种估计值。融合算法预测与单一转角和应变测量估算值的对比如图 15 所示,融合算法预测值与应变转角数据如表 8 所示。

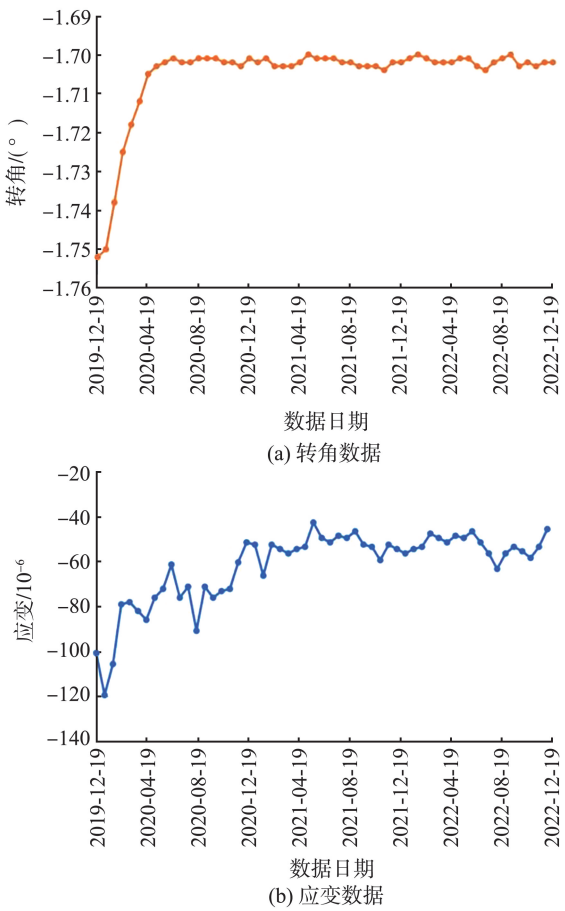


图 14　B_1 测点转角和应变时序监测数据

Fig.14　Time-series monitoring data of rotation angle and strain at measuring point B_1

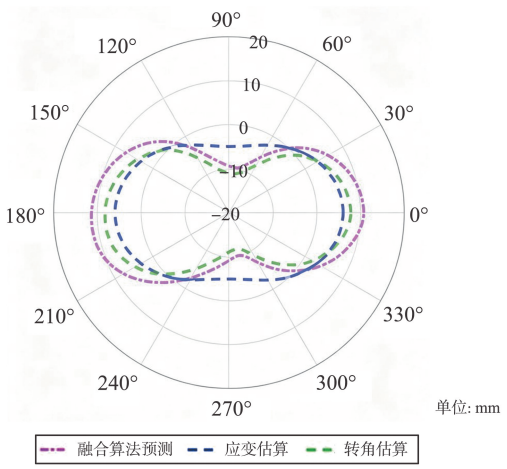


图 15　融合算法预测与单一转角和应变测量估算值的对比

Fig.15　Comparison between prediction results of fusion algorithm and estimated values from single rotation angle and strain measurement

表 8　融合算法与应变转角数据表

Table 8　Data of fusion algorithm, strain and rotation angle

隧道管片角度/(°)	融合算法预测值/mm	应变估算值/mm	转角估算值/mm
0	11.03	6.21	8.12
30	7.09	3.98	4.01
60	−5.21	−2.58	−7.23
90	−8.86	−5.23	−10.50
120	−3.16	−2.27	−4.76
150	7.18	4.27	5.64
180	11.54	8.51	7.17
210	8.28	4.61	5.54
240	−2.97	−3.03	−5.42
270	−9.12	−5.68	−12.05
300	−6.25	−3.29	−6.52
330	4.51	3.49	2.89

图 15 及表 8 显示了融合预测值相较单一估算的改进效果,结果表明融合算法能够有效抑制单一传感器的数据波动,提升预测的连续性与稳定性。

3.2　对比验证

为进一步验证算法精度,现场使用徕卡 910 型

激光扫描仪在隧道内固定点位采集隧道内每 30°的数据,计算后获取隧道管片的真实收敛变形数据。将激光采集数据与预测结果进行对比。四类变形结果的比较如图 16 所示,包括转角估算、应变估算、融合预测及激光扫描实测。结果显示,融合算法预测值与实测结果高度吻合,明显优于单一传感器的估算结果。这表明,所提出的方法能够显著提高济南黄河隧道变形监测的精度与可靠性。

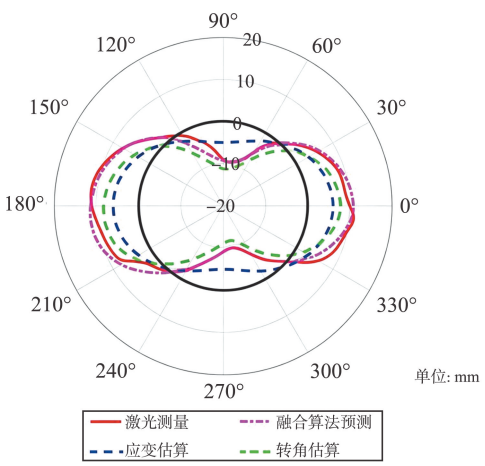


图 16 融合算法预测值与激光扫描仪、单一转角和应变测量估算值的对比

Fig.16 Comparison among predicted values of fusion algorithm, laser scanner data and estimated values from single rotation angle and strain measurement

进一步定量计算均方根误差(root mean square error, E_{RMS})指标如下。

(1)转角估算:E_{RMS} = 2.41 mm,最大偏差 = 4.8 mm;

(2)应变估算:E_{RMS} = 1.93 mm,最大偏差 = 3.9 mm;

(3)融合预测:E_{RMS} = 1.08 mm,最大偏差 = 2.1 mm。

融合算法相较于转角估算 E_{RMS}降低 55.2%,相较于应变估算 E_{RMS}降低 44.0%。此外,选取施工扰动期(2021 年 8 月)和运营稳定期(2022 年 3 月)数据分别验证,融合算法在两种工况下的 E_{RMS}分别为 1.21 mm 和 0.95 mm,表明算法对不同阶段均具有良好的适应性。

上述对比验证表明,本研究提出的“转角+应变”融合算法能有效抑制单一传感器波动,其预测值与激光扫描实测结果高度吻合,E_{RMS} 仅为 1.08 mm,且在施工扰动期与运营稳定期均保持良好适应性。与传统融合方法相比,该算法物理机制明确、计算效率高、实时性强,能够同时捕捉管片的刚体转动与弹性变形,实现对隧道结构变形的全方位感知。

4 结论

本研究提出一种基于卡尔曼滤波的转角与应变数据融合算法,用于大直径盾构隧道管片收敛变形实时监测,并在济南黄河隧道工程中成功应用,主要结论如下。

(1)通过融合转角与应变数据,卡尔曼滤波能有效抑制单一传感器噪声,输出更稳定、准确的变形估计。以均方根误差(E_{RMS})为评价指标,融合算法较转角测量和应变测量分别降低了 55.2% 和 44.0%;以最大偏差为评价指标,融合算法的 2.1 mm 也远优于单一方法的 4.8 mm 和 3.9 mm,平均绝对误差降低幅度超过 30%,充分证明了本方法的高精度优势。

(2)基于模态分析的应变-变形转换矩阵构建方法可行,选取前 20 阶模态(应变能累积占比 96.3%)能在保证计算效率的同时准确重构变形场。

(3)空间姿态盒与振弦式应变计在隧道高湿、振动环境下长期运行稳定,传感器存活率超过 95%,自动化监测系统功能完备,满足工程应用需求。

(4)本算法可推广至其他大直径盾构隧道(如公路、铁路、地铁)的长期健康监测,结合历史数据可进一步建立基于监测指标的结构安全评估体系,例如利用收敛速率、应变能变化、预警频次等指标评估隧道服役状态,为运维决策提供科学依据。

参考文献:

[1] Lin Xingtao, Chen Renpeng, Wu Huaina, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 78-90.

[2] Sharma J S, Hefny A M, Zhao J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 93-98.

[3] Huang Hongwei, Cheng Wen, Zhou Mingliang, et al. Towards automated 3D inspection of water leakages in shield tunnel linings using mobile laser scanning data[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6669.

[4] Jiao Tong, Zhou Zhi. An optical-electrical co-sensing tape for cross-sectional deformation monitoring of shield

tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104148.

[5] 杨松林, 刘维宁, 师红云, 等. 全站仪自由设站隧道围岩变形非接触监测理论和方法的研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 100-104.
Yang Songlin, Liu Weining, Shi Hongyun, et al. Research on theory and method of non-contact monitoring for surrounding rock deformation of tunnels with total station free stationing [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 100-104.

[6] Xu Lei, Gong Jian, Na Jiaming, et al. Shield tunnel convergence diameter detection based on self-driven mobile laser scanning[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 767.

[7] 李行. 三维激光扫描在大变形隧道中的变形监测应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(4): 115-123.
Li Hang. Application of 3D laser scanning in deformation monitoring of large-deformation tunnels[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(4): 115-123.

[8] Wijaya H, Rajeev P, Gad E. Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: field applications[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 64: 102577.

[9] Gómez J, Casas J R, Villalba S. Structural health monitoring with distributed optical fiber sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity[J]. Automation in Construction, 2020, 117: 103261.

[10] Monsberger C M, Lienhart W. Distributed fiber optic shape sensing along shotcrete tunnel linings: methodology, field applications, and monitoring results[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11: 337-350.

[11] 黄惠峰, 张献州, 张拯, 等. 基于 BP 神经网络与变形监测成果的隧道安全状态评估[J]. 测绘工程, 2015, 24(3): 53-58.
Huang Huifeng, Zhang Xianzhou, Zhang Zheng, et al. Research on tunnel safety state evaluation based on BP neural network and deformation monitoring results[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 24(3): 53-58.

[12] Maes K, Salens W, Feremans G, et al. Anomaly detection in long-term tunnel deformation monitoring [J]. Engineering Structures, 2022, 250: 113383.

[13] Welch G F. Kalman filter[M]//Ikeuchi K .Computer Vision: A Reference Guide. Cham, Switzerland: Springer, 2020: 1-3.

[14] Zeng K, Huang H, Song S B. Displacement measurement based on data fusion and real-time computing[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(6): 04020118.

[15] Pei H F, Jing J H, Zhang S Q. Experimental study on a new FBG-based and Terfenol-D inclinometer for slope displacement monitoring[J]. Measurement, 2020, 151: 107172.

[16] GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S].

(编辑:宋艳)