光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060701

基于光纤陀螺的有轨钢构桥梁形变检测方法

姜永生*

（交通运输部水运科学研究所，北京 100000）

摘　要： 针对现有光纤陀螺桥梁形变检测方法无法消除检测小车偏航带来的路径偏差，提出了基于光纤陀螺的有轨钢构桥梁形变检测方法。首先，阐述了光纤陀螺测量桥梁线形的原理与系统架构；然后，通过有限元对有轨条件下的钢构进行分析，设置不同温度梯度，验证得到轨道受热力耦合作用产生的形变与温度之间呈线形关系，构建了轨道与温度的误差模型；最后，通过搭建试验环境，测试轨道线形与轨道在不同温度下的形变结果，验证了该方法的有效性。实验结果表明：有轨钢构桥梁形变与外界环境温度之间的关系为 1～2 mm/10 ℃，为后续实际桥梁形变测量提供了温度误差校准模型；基于光纤陀螺的有轨钢构桥梁形变检测精度优于 2 mm。

关键词： 桥梁安全；有轨结构；光纤陀螺；形变检测

中图分类号： TP29；TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0892－06

Research on Rail Steel Structure of Bridge Deformation Monitoring Based on Fiber Optic Gyroscope

JIANG Yongsheng

（China Waterborne Transport Research Institute，Beijing 100000，CHN）

Abstract： For the existing bridge deformation detection methods based on fiber optic gyroscope (FOG) cannot eliminate the path deviation caused by the yaw of the detection trolley, a deformation detection method of rail steel bridge based on FOG was proposed. Firstly, the principle and system architecture of FOG measurement of bridge alignment were explained. Then the steel structure under rail condition was analyzed by finite element method. By setting different temperature gradients, it was verified that the deformation of the rail was linear with the temperature, and the error model of rail and temperature was established. Finally, the validity of the method was verified by setting up the test environment to test the rail alignment and the rail deformation at different temperatures. The experimental results show that the relationship between the deformation of rail steel bridge and the ambient temperature is 1～2 mm/10 ℃, which provides a temperature error calibration model for subsequent actual bridge deformation measurement. The precision of deformation detection of rail steel bridge based on FOG is better than 2 mm.

Key words： bridge safety; tracked structure; FOG; deformation detection

0　引言

随着桥梁使用年限的增加，桥梁健康状态会随之下降，其表面连续挠度可以反演得到桥跨结构下挠、墩台沉降等结构变形参数，可以作为评估桥梁运营安全状况的重要指标[1]。常规的桥梁形变检测方法大多属于点式测量，存在着漏检、检测操作繁琐、测量结果受环境因素干扰等局限[2-6]。基于光纤陀螺（Fiber Optic Gyroscope，FOG）的桥梁形变检测系统具有快速、连续测量、不受环境干扰、可高效满足桥梁动态挠度检测需求的优点[7-8]。

基于 FOG 的桥梁形变检测报道较多，研究者

收稿日期：2022－06－07.

* 通信作者：姜永生　E-mail：jiangys@wti.ac.cn.

们为提高检测精度，在算法和检测系统上进行了各种尝试。李书恒等[9]针对 FOG 长时间工作，输出值易受零偏影响，提出将 FOG 输入信号与加速度输出值融合得到最优倾角估计值，以消除 FOG 输出信号累计漂移的新算法；甘维兵等[10]针对桥梁的微小形变，探索了检测小车前后轮里程计算输出新模型，提高了微小形变检测的精确性；Yang 等[11]利用小波变换对 FOG 采集的路面数据信号进行分解和重构，定位奇异信号，消除了凸起和伸缩缝对检测数据的污染，并进一步利用 EMD 和 ICA 相结合的方法，恢复了因颠簸产生的轨迹漂移，在几乎没有失真的情况下还原了原始信号；吴彬[12]针对 FOG 线形检测误差发散的问题，采用组合传感器思想，采用 GPS 辅助 FOG 线形检测方法，约束参考点检测值以提高检测精度。

当前基于 FOG 的桥梁形变检测技术均基于单轴 FOG，配合里程计使装有惯性器件的检测小车沿桥梁表面直线行驶，经过捷联算法得到桥梁表面绕曲线从而获得桥梁形变值。检测过程需要检测小车沿既定直线路径行驶，而检测过程中小车行驶路径的偶然偏差带来的测量误差无法消除。所以，考虑到检测小车无法沿固定路径行驶的问题，提出了基于 FOG 的有轨桥梁形变检测方法，消除路径偏差带来的误差，从而提高桥梁形变检测精度。考虑到轨道本身受热力耦合的特性，本文研究了轨道拱变形与温度的关系，建立轨道温补误差模型，以消除轨道自身变形得到桥梁正确形变值。

1　FOG 线形检测原理与系统

1.1　FOG 线形检测原理

FOG 的基本检测原理是基于光的萨格奈克(Sagnac)效应，得到闭合惯性空间旋转环路中，两相向传播的光再次汇合时发生的相位差，反推得到光纤环角速度值[13]。由 FOG 和里程计等集成的形变检测系统搭载在检测小车上，检测小车在待测桥面沿既定路线直线行驶时，通过对输出角速度进行积分得到待测桥面线形拟合曲线，从而间接得到垂直于桥梁平面的高程形变信息[14]，该线形检测原理如图 1 所示。

在线形解算中，将搭载光纤陀螺的运载体小车视为质点，设第 i 时刻运载体小车所在位置为(x_i，y_i)，下一时刻位置为(x_{i+1}，y_{i+1})，当前位置和下一时刻位置之间的关系如式(1)：其中 ΔL 为当前位置和下一位置里程计触发间隔，因里程脉冲间隔极短，其间隔可以近似作为直线计算。

$$\begin{cases} X_{i+1}=X_i+\Delta X=X_i+\Delta L\times\cos(\theta_i+\Delta\theta) \\ Y_{i+1}=Y_i+\Delta Y=Y_i+\Delta L\times\sin(\theta_i+\Delta\theta) \end{cases} \tag{1}$$

$\Delta\theta$ 为单轴陀螺前后位置间隔俯仰角变化值，与光纤陀螺转动角速度 Ω 之间的关系如式(2)所示：

$$\Delta\theta=\int_{t_i}^{t_{i+1}}\Omega_{i+1}\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

故该线形坐标解算公式可以表示为式(3)：

$$\begin{cases} X_{i+1}=X_i+\Delta X=X_i+\Delta L\times\cos\left(\theta_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\Omega_{i+1}\,\mathrm{d}t\right) \\ Y_{i+1}=Y_i+\Delta Y=Y_i+\Delta L\times\sin\left(\theta_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\Omega_{i+1}\,\mathrm{d}t\right) \end{cases} \tag{3}$$

根据式(2)和(3)建立递推关系式，即可得到基于单轴陀螺的检测载体沿桥梁行驶所测桥梁形变曲线。由线形检测原理可知，光纤陀螺组成的桥梁形变检测系统测量的是桥梁相对形变值，即检测的是桥梁相对于起始测量点的高程变化。将当前测量值与之前定期测量值相比即可得到桥梁在这段时间内的形变值，从而判断桥梁下挠变化值。

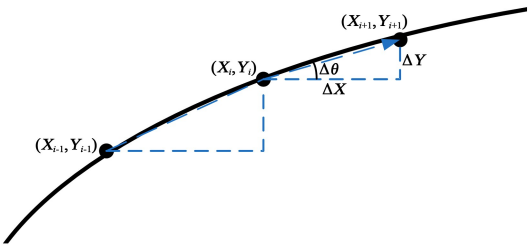


图 1　基于 FOG 的桥梁线形解算原理示意图

1.2　线形检测系统

由 FOG 组成的捷联惯性导航系统包括光纤陀螺、里程计、红外传感器、数据采集板和电源等，其系统架构如图 2 所示。FOG 作为角速度敏感元器件测量待测桥面角速度值，里程计记录检测小车行驶路程信息，通过接收器感知光盘转动产生的光变化，将其转化为电信号并以 0 或 1 的数字形式输出里程信息；红外传感器配合反光板，根据遮光感应判断预设起始点、终点和标志位，辅助线形解算检测段落信息；数据采集板对获取的信息进行整合，将不同传输协议传感器的输出信号以数字信号传输，根据定时器读取时间信息，以自行定义的数据传输协议广播式发送；无线传输模块将采集的信号传输到上位机软件进行后续数据处理；电源负责给以上模块供电，

以确保系统正常运行。上位机将采集板传输的数据提取出来，对数据进行预处理并根据线形解算原理，得到轨道表面线形，与前期所测桥梁形变原始数据相比即可得到桥梁形变值。

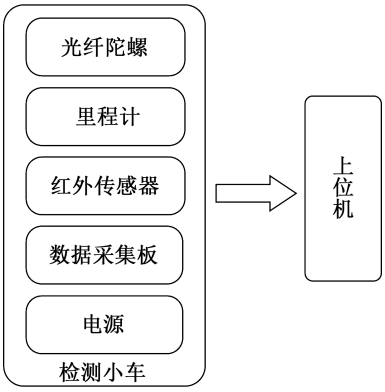


图 2 FOG 线形检测系统架构图

2 轨道在热力耦合下有限元仿真

在有轨测量的条件下，通过测量轨道形变反演桥梁形变。在试验过程中，轨道长期置于户外，受温度冷热交替的影响，轨道受支架和轨道衔接处螺栓的制约，在作用力与温度的共同作用下发生变形，又称为热力耦合[15]。其因轨道自身结构的变形并不代表桥梁本身形变，需要确定轨道形变程度与温度变化的关系，对不同温度下的测量结果做误差补偿，得到正确的桥梁形变值[16]。受试验环境的影响，本试验轨道采用工字铝材在楼顶平台悬空架设，通过支架固定于楼顶地面，单根轨道长为 4 m，全长共计 32 m。其有限元仿真示意图如图 3 所示。

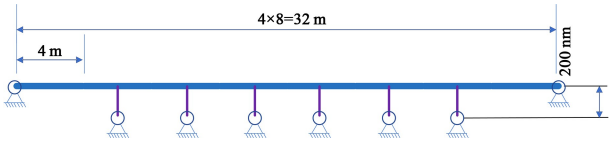


图 3 轨道结构示意图

其轨道模型空间结构如图 4 所示，轨道结构参数如表 1 所示。由图 4 可知，共定义了两种矩形截面，分别代表工字铝材和支架。在 Y 轴负方向上施加重力加速度(9 806.6 mm/s^2)，以模拟轨道自重。对工字铝材首尾和支架底部施加固定约束，以限制其 $X/Y/Z$ 三个方向上的平动自由度和旋转自由度。采用 BEAM188 单元网格划分，将 2 个节点视为 1 单元，共得到 116 个单元，233 个节点。

设置温度从室温 25 ℃下降到－10 ℃，当下降到设定温度并稳定下来之后，轨道形变和位移云如图 5 所示，从室温下降到其他各温度下轨道形变趋势类似，但其最大、最小形变值不同。

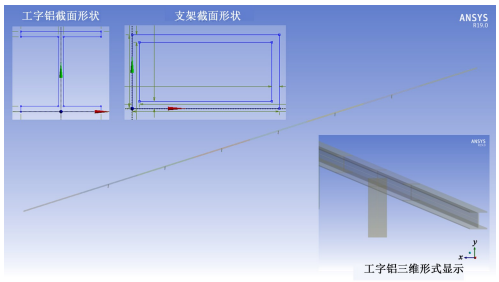


图 4 模型架构图

表 1 轨道结构参数

材料	密度/(Kg/m^3)	导热系数/(W/(m·C^{-1}))	热膨胀系数/C	弹性模量/GPa	泊松比
铝	2 689	237.5	2.3×10^{-5}	69	0.33

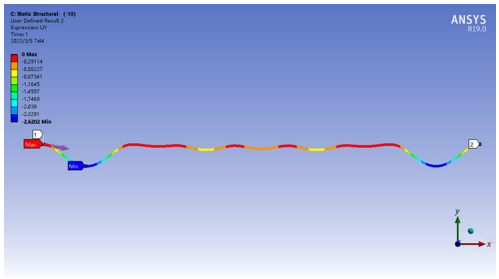


图 5 从 25 ℃下降到－10 ℃过程中轨道形变和位移云图

对工字铝材施加不同温度，其变化范围为－10～40 ℃，以 10 ℃为步长，检测轨道在不同温度下的形变曲线，结果如图 6 所示。由图可知，因轨道结构具有左右对称性，其形变曲线也具有左右对称性。轨道形变与支架间距有关，在确保轨道每根衔接稳固时，在理想环境下，受重力的影响，轨道在两支架架设中间向下膨胀形变最大。支架处受温度影响更大，向上变形其形变值最小。环境温度对轨道形变有一定影响，升温时轨道拱位移增加，降温时随之减小。

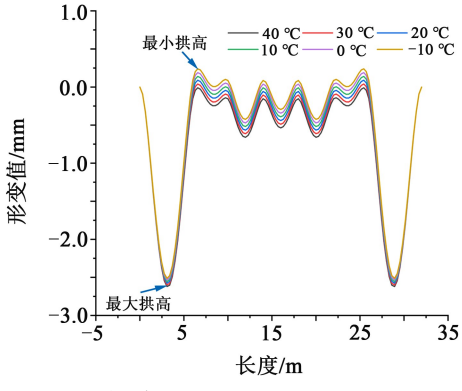


图 6 轨道在－10～40 ℃形变对比图

为寻找轨道最大拱位移和最小拱位移与温度的关系，现将不同温度（T）下轨道最大形变和最小形变值提取出来，结果如表 2 所示，对应的关系曲线如图 7 所示。由图可知，最大和最小拱位移与温度呈线性关系，当前结构线形拟合系数分别为 0.000 215，0.005。可以推知，当确定了轨道结构三种温度下初始测量值时，可以根据其形变与温度的线性关系，推测其他温度下需要补偿的误差值。

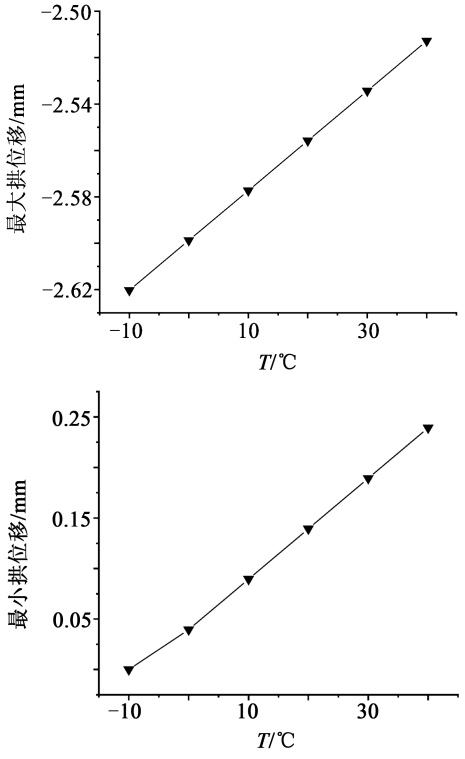


图 7　不同温度下最大和最小拱位移

由轨道结构在热力耦合下的仿真变形结果可知，轨道形变与温度、重力有关。主要受重力因素的影响，在轨道固定支架之间的变形最大，其形变随温度升高而增大，形变增量与温度呈线性关系。

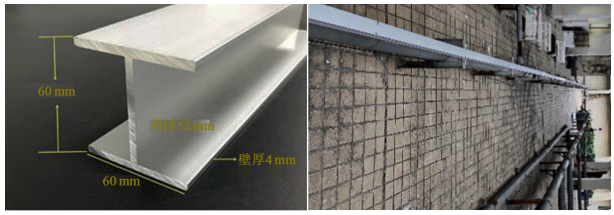
表 2　轨道在不同温度下的最大和最小形变值

T/℃	−10	0	10	20	30	40
最大拱位移/mm	−2.62	−2.60	−2.58	−2.56	−2.53	−2.51
最小拱位移/mm	0	0.04	0.09	0.14	0.19	0.24

3　试验与分析

3.1　试验场景

由于实际场地和检测方案的限制，使用以工字钢作为轨道的实验材料，实验环境铺设于某大楼楼顶，沿地上管道走向东西方向铺设，在原有基础建设之上通过固定支架悬空铺设单轨，通过测量轨道表面线形模拟桥梁形变检测。该工字钢材料高、宽均为 60 mm，内径为 52 mm，壁厚为 4 mm，每一段长度为 4 m。该轨道由 8 段工字钢材料衔接而成，有效测量范围约 30 m。其试验现场照片如图 8 所示。



（a）　工字铝结构参数　　（b）　轨道全景照片

图 8　工字铝结构图及试验现场照片

3.2　试验结果分析

将检测小车沿轨道起点运行至轨道终点，随机选取其中三趟数据，并将测量数据与实际检测数据进行对比。轨道实际线形使用激光准直器测量，将激光准直器放置到轨道起点部分，调节旋转螺母和激光出射口径大小，以保证准直器射出的光束在轨道终点显示屏上呈现出清晰的半径最小的圆形光斑，从起点开始，每隔 1 m 检测激光光斑到轨道上表面的垂直距离并记录。将轨道实际形变数据保存为文本格式，并导入到程序中，利用三角形相似原理，将首、尾高程差通过等比例代入到各测点，消除首尾高度不一致的测量误差，绘制离散点后得到轨道离散形变曲线。其轨道形变测量如图 9 所示。

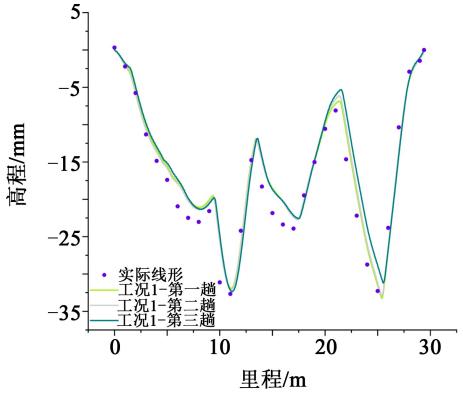


图 9　有轨测量线形与实际线形对比图

现分别对两个工况的测量结果进行定量分析，将各工况三次形变数据取均值，并用每次测量数据与均值作差，求取不同工况每趟测量数据与均值的差值的浮动区间，以确定检测精度，两种工况的误差浮动范围如图 10 所示。

由图 10 可知，由光纤陀螺组成的线形检测系统在有轨测量的条件下，线形重复性在 2 mm 以内。在大部分区间误差浮动范围在 1 mm 以内，在部分

轨道衔接的不平顺导致误差增加至 1～2 mm 之间。

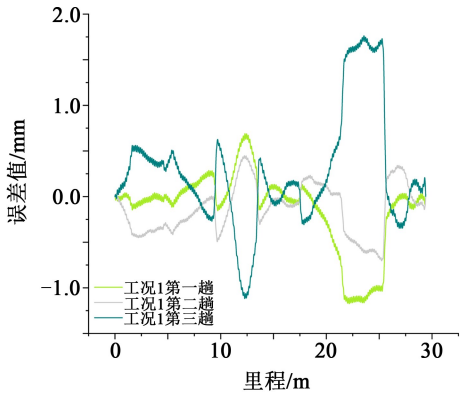


图 10 有轨测量数据与均值的误差浮动范围

根据轨道在热力耦合影响下的有限元仿真结果可知，轨道受外界环境因素的影响，可能会给桥梁形变检测结果带来误差。在保持轨道当前工况不变的情况下，由于轨道裸露在户外且设置于楼顶，受温度循环冷热交替影响，轨道节点对应的位置和轨道形变程度会产生变化，其结构如图 11 所示，支架每间隔 1.5 m 设置一个，起到固定轨道的作用。

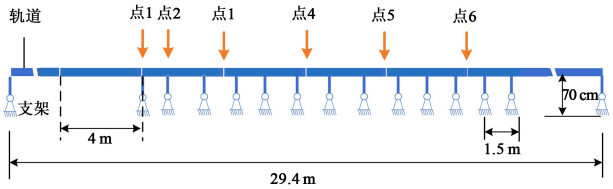


图 11 在不同环境温度下轨道形变试验工况示意图

在保持其他条件不变的情况下，测量不同温度对轨道形变的影响程度，其检测结果如图 12 所示。由图可知，将轨道形变设置为工况 1 时，保持其他条件不变，检测轨道在 25，14 和 3 ℃时的线形。轨道本身受重力和安装固定的影响，呈现向下弯曲的形变，当温度由高到低时，轨道内部受环境因素的影响，各观测点呈现向上拉伸收缩的趋势，轨道横向拉伸方向偏移较小可忽略不计。

结合实际轨道搭建情况，点 1 和点 2 在支架固定处，其形变值相对较小。点 3～点 6 处于轨道衔接处，且独立于支架悬空架设，没有支架作为固定支撑，故其形变值较大。现将 25 ℃时轨道在点 3～点 6 纵向高程作为标况下测量值，分别求取 14 ℃和 3 ℃在极值点处纵向相对形变。在已有数据的基础之上建立不同测点形变受温度影响的关系，以确定不同温度下的偏移误差，建立轨道形变-温度误差模型，其相对形变值如表 3 所示。

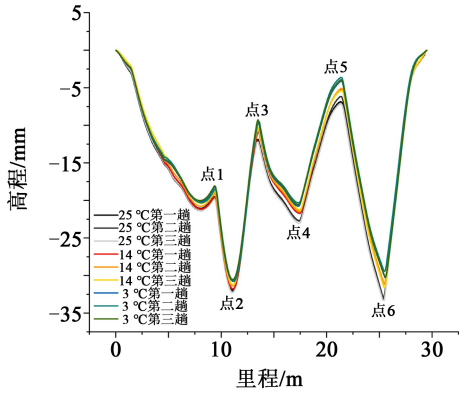


图 12 轨道在不同温度下的线形曲线

表 3 点 3～点 6 相对形变值(单位:mm)

温度/℃	点 3	点 4	点 5	点 6
25	0	0	0	0
14	1.41	1.31	1.49	1.93
3	2.61	2.27	2.81	3.27

由上述实测数据可知，外界温度变化会给轨道自身形变带来影响。由表 3 可知，轨道实际形变与仿真结果表现一致，低温下遇冷收缩形变值较小；高温下受热膨胀，形变值大。位于两根固定支架之间且在轨道接缝处的点为轨道形变折点，以 25 ℃形变为基准，点 3～点 6 的相对形变与温度呈线性关系。由实验结果进一步可知，轨道在 1.5 m 约束条件下，排除测量误差，温度补偿系数为 1～2 mm/10 ℃，当检测温度跨度小于 10 ℃时，其形变值受温度的影响可以忽略不计。

4 结论

基于光纤陀螺的桥梁形变检测方法解决了传统桥梁形变检测方法无法实现大跨度、长距离连续检测的需求，但却无法消除因检测小车行驶路径偏差带来的问题，从而无法进一步提高检测精度。本文基于此局限性，提出基于光纤陀螺的有轨钢构桥梁形变检测方法。在待测桥梁表面铺设一条永久性刚性轨道，通过测量轨道随桥梁一起发生的形变曲线反演得到桥梁形变。

考虑到轨道结构本身受热力耦合影响会给检测结果带来误差。本文通过对轨道进行有限元仿真，验证了不同温度梯度下轨道形变与温度变化呈线性关系。通过搭建实验平台，验证了该场景下轨道形变与温度之间的相互关系为 1～2 mm/10 ℃，基于光纤陀螺的有轨桥梁形变检测精度优于 2 mm。

参考文献：

[1] 卢文壮，郑宗雨，赵文茹，等. 中国桥梁发展与标准化[J]. 标准科学，2021，(S1)：240-246.
Lu Wenzhuang，Zheng Zongyu，Zhao Wenru，et al. Development and standardization of bridge in China [J]. Standard Science，2021，(S1)：240-246.

[2] 杨国玉. 三种桥梁变形监测方法的对比研究[J]. 测绘技术装备，2016，18(3)：15-18.
Yang Guoyu. A comparative study of three bridge deformation monitoring methods [J]. Geomatics Technology and Equipment，2016，18(3)：15-18.

[3] Zhou J，Sun Z，Wei B，et al. Deflection-based multilevel structural condition assessment of long-span prestressed concrete girder bridges using a connected pipe system [J]. Measurement，2021，169：108352.

[4] 翟　文. 基于 GPS/BDS 紧组合 RTK 的桥梁变形监测分析[J]. 城市勘测，2020，5：116-119.
Zhai Wen. Analysis of bridge deformation monitoring based on GPS/BDS tightly combined RTK [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying，2020，5：116-119.

[5] Izvoltova J，Villim A，Kozak P. Determination of geometrical track position by robotic total station [J]. Procedia Engineering，2014，91：322-327.

[6] 栗　欢. 三维激光扫描技术在桥梁变形监测中的应用[J]. 交通世界，2019，20：107-108.
Li Huan. Application of 3D laser scanning technology in bridge deformation monitoring[J]. TranspoWorld，2019，20：107-108.

[7] 薛连莉，翟峻仪，葛悦涛. 2020 年国外惯性技术发展与回顾[J]. 导航定位与授时，2021，8(3)：59-67.
Xue Lianli，Zhai Junyi，Ge Yuetao. Development and review of foreign inertial technology in 2020[J]. Navigation Positioning & Timing，2021，8(3)：59-67.

[8] Gan W，Hu W，Liu F. Bridge continuous deformation measurement technology based on fiber optic gyro [J]. Photonic Sensors，2016，6(1)：71-77.

[9] 李书恒，蔡德所，陈声震，等. 光纤陀螺系统中捷联算法的改进与工程应用[J]. 中国农村水利水电，2020，453(7)：177-184.
Li Shuheng，Cai Desuo，Chen Shengzhen，et al. The improvement and engineering application of strapdown alogorithm in the fiber optic gyro system [J]. China Rural Water and Hydropower，2020，453(7)：177-184.

[10] 甘维兵，胡文彬，张　瑶，等. 基于光纤陀螺的桥梁微小形变检测技[J]. 中国惯性技术学报，2016，(3)：415-420.
Gan Weibing，Hu Wenbin，Zhang Yao，et al. Detection technique for bridge's micro-deformation based on FOG[J]. J. of Chinese Inertial Technol.，2016，(3)：415-420.

[11] Yang D，Wang L，Hu W，et al. Singularity detection in FOG-based pavement data by wavelet transform[C]// 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)，2017：1-4.

[12] 吴　彬. GPS 辅助光纤陀螺桥梁线形检测研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2017.
Wu Bin. Study on GPS aided detection of bridge curve based on FOG[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2017.

[13] 高　爽，武　攀，王　璐. 光纤陀螺随钻测斜仪钻进中井眼轨迹测量方法研究[J]. 半导体光电，2018，39(4)：586-590.
Gao Shuang，Wu Pan，Wang Lu. Measurement method of borehole trajectory in-drilling for FOGs-based inclinometer while drilling [J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(4)：586-590.

[14] 杨丹丹，王立新，胡文彬，等. 基于光纤陀螺的桥梁路面平整度检测研究[J]. 半导体光电，2020，41(5)：700-704.
Yang Dandan，Wang Lixin，Hu Wenbin，et al. Detection of bridge pavement evenness based on fiber optic gyro [J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(5)：700-704.

[15] 吴　斌，刘　参，曾志平，等. CRTSⅡ型板式无砟轨道温度场特征研究[J]. 铁道工程学报，2016，33(3)：29-33.
Wu Bin，Liu Can，Zeng Zhiping，et al. Research on the temperature field characteristic of CRTS Ⅱ slab ballastless track[J]. J. of Railway Engineering Society，2016，33(3)：29-33.

[16] Chen J，Zhang W，Wang H. Intelligent bearing structure and temperature field analysis based on finite element simulation for sustainable and green manufacturing[J]. J. of Intelligent Manufacturing，2021，32(3)：745-756.

作者简介：

姜永生(1970－)，男，北京市人，本科，副研究员，主要从事港口装卸工艺、港口机械检测方面的研究工作。