

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306318

MEMS 姿态传感器在边坡表面位移监测的应用研究

虎 勇¹ 吕辉岩² 李绍荣² 邹 力² 任颖慧¹ 梁 杰¹

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司 成都 610051; 2. 电子科技大学光电科学与工程学院 成都 610054)

摘 要:水电站库区两岸边坡地质状况复杂多变,边坡的稳定工作状态与水电站的安全运行息息相关,本文在雅砻江官地水电站库区左岸边坡覆盖层处,将 MEMS 姿态传感器(陀螺仪和加速度计)按照阵列方式布置在边坡上,建立边坡稳定状态数据实时采集系统,利用初始对准确定导航目标参数姿态、方位、速度和位置的初始值,计算出目标姿态矩阵,再通过姿态矩阵实时将 MEMS 姿态传感器获取的载体系下的加速度和角速度转换到导航系下,用于实时计算边坡变化姿态矩阵和位移开展试验研究。试验结果表明,将 MEMS 姿态传感器应用到边坡位移监测中能够实现边坡表面位移数据的实时获取,位移数据获取精度能够达到毫米级,满足工程实际使用需求,该项研究成果对边坡表面位移稳定状态进行实时监测分析具有十分重要的意义。

关键词: MEMS 姿态传感器;惯性导航;姿态矩阵;边坡表面位移监测
中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Study on application of MEMS attitude sensor in slope surface displacement monitoring

Hu Yong¹ Lyu Huiyan² Li Shaorong² Zou Li² Ren Yinghui¹ Liang Jie¹

(1. Yalong Hydro, Chengdu 610051, China; 2. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract:The geological conditions of the slopes on both sides of the reservoir area of the hydropower station are complex and changeable. The stable working condition of the slopes is closely related to the safe operation of the hydropower station. In this paper, the MEMS attitude sensors (gyroscopes and accelerometers) are arranged on the slopes by the array mode at the left slope cover layer of the reservoir area of the Yalong River Guandi Hydropower Station. Using the initial alignment, a real-time slope stability data acquisition system is established to determine the navigation target parameters' attitude, orientation, velocity and position. The initial values of philosophy, bearing, speed and position are calculated. Then the acceleration and angular momentum under the load system acquired by the MEMS attitude sensors are converted to the navigation system in real-time through the attitude matrix, which is used to calculate the slope change attitude matrix and displacement in real time to carry out experimental research. The experimental results show that applying the MEMS attitude sensor to slope displacement monitoring can achieve real-time acquisition of slope surface displacement data. The displacement data acquisition accuracy can reach the millimetre level to meet the actual needs of engineering. The research results are of great significance to the real-time monitoring and analysis of the stable state of slope surface displacement.

Keywords: MEMS attitude sensor; inertial navigation; attitude matrix; slope displacement

0 引 言

边坡失稳、崩塌等地质灾害问题是大多数水电站工程建设和运营面临的严重问题之一。当前我国水电站的

建设环境越来越恶劣,因地质灾害影响而诱发的边坡失稳、崩塌事故时有发生,这些事故的发生将会给水电站建设及运营带来巨大损失。为了减少滑坡的风险带来的影响,建立一套边坡工作状态实时预警系统,通过实时获取边坡的稳定状态数据,对边坡稳定状态进行分析并实现

边坡稳定安全预警意义重大^[1]。

目前,大多数水电站边坡仍然采用人工监测的方式,该方式存在监测精度低、反馈时间长和工作强度高缺点。随着全球定位系统(GPS)的不断发展,定位导航技术也被应用于边坡变形监测,其可以做到全天候实时监测边坡位移变化,但其受到地理位置等因素的影响,同时监测精度也略低。随着计算机技术的不断发展,视觉监控技术也可以应用于边坡位移变化的检测,但其也存在监测精度不高的问题。

随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)工艺水平的不断进步,带来了更为精准的 MEMS 惯性器件,其体积和功耗较小且具有非常高的可靠性,这使得 MEMS 惯性器件成为位移监测的理想选择^[2-3]。利用 MEMS 姿态传感器进行边坡表面位移变化监测,可以实时掌握边坡位移变化的发展过程,边坡位移监测算法主要分为姿态、速度以及位置解算算法,其中姿态算法对整个系统精度的影响最大,它是算法研究和设计的核心^[4]。本文通过仿真和实验得到运载体的仿真轨迹和姿态传感器的输出数据,通过初始对准获取边坡的初始位置、速度和姿态信息,然后通过迭代获取目标实时的运动状态,从而实现精准的位移监测。

1 常用坐标系及其变换

MEMS 姿态传感器测量得到的运动参数都是相对于某个参考坐标系而言的,因此想要建立边坡位移的动力学方程,必然要涉及多个参考坐标系^[5-6],如图 1 所示,给出了各个参考坐标系的示意图。

1.1 坐标系定义

地心惯性坐标系(inertial frame, i 系):原点 O 位于地球质心, OX_i 和 OY_i 轴在地球赤道平面内, OX_i 轴指向春分点, OZ_i 轴为地球自转轴,并指向北极。惯性传感器的输出就是以该坐标系为参考基准的。

地球坐标系(earth frame, e 系):又称地固坐标系,其固定在地球上。原点 O 位于地球中心, OX_e 轴指向本初子午线, OZ_e 轴沿地球自转轴并指向地球北极。其中 e 对于

i 系的角速度大小就是地球自转角速率,其大小通常取:

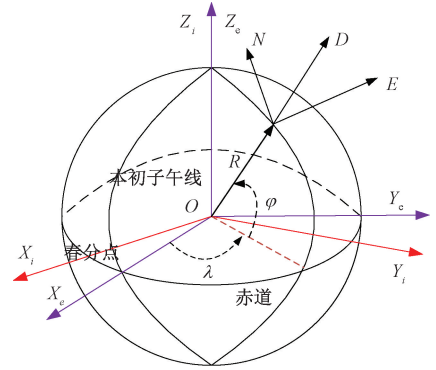


图 1 参考坐标系: i 系、e 系、n 系

Fig. 1 Reference coordinate system: i system, e system and n system

$$\omega_{ie} = 7.292\ 115\ 146\ 7 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

地理坐标系(geographic frame, g 系):原点为运载体的重心, OX_g 轴指向地理东向, OY_g 轴指向地理北向, OZ_g 轴指向当地天向, g 系本质就是当地水平坐标系,它随运载体在地球表面的移动而移动。

导航坐标系(navigation frame, n 系):作为惯性导航姿态解算时所使用的参考坐标系,本文选取“东—北—天”地理坐标 g 系作为参考坐标系,能够适应除极点外的大部分地区使用。

载体坐标系(body frame, b 系):固连于载体,其原点定义为载体的中心或重心, OX_b 轴沿载体横轴向右, OY_b 轴沿载体纵轴向前, OZ_b 轴沿载体立轴向上, b 系相对于 n 系的方位关系可以用一组欧拉角来表示。

1.2 坐标系之间的变换关系

在边坡位移解算中,姿态传感器实时采集到的数据是以与边坡固连的载体坐标系(b 系)为基准,而在位移解算时使用的导航坐标系(n 系)默认为当地的地理坐标系(g 系),因此需要实时将 b 系下采集到的加速度与角速度数据转换到 n 系。参考图 2 所示,可得从 n 系到 b 系的转换矩阵为^[7]:

$$C_b^n = C_\varphi C_\theta C_\gamma = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\gamma - \sin\varphi\sin\theta\sin\gamma & -\sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\gamma + \sin\varphi\sin\theta\cos\gamma \\ \sin\varphi\cos\gamma + \cos\varphi\cos\theta\sin\gamma & \cos\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\gamma - \cos\varphi\sin\theta\cos\gamma \\ -\cos\theta\sin\gamma & \sin\theta & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, φ 为航向角, θ 为俯仰角, γ 为横滚角。边坡在地理坐标系下的运动数据可以转换到地球坐标系(e 系),这个转动关系可以用位置矩阵来表示,如图 3 所示,

g 系先绕 Z 轴转动 $-\pi/2$, 然后绕 Y 轴转动 $L-\pi/2$, 最后再绕 Z 轴转动 $-\lambda$, 因此,可以计算得到位置矩阵为:

$$\mathbf{C}_g^e = \begin{bmatrix} \cos(-\lambda) & \sin(-\lambda) & 0 \\ -\sin(-\lambda) & \cos(-\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(L - \pi/2) & 0 & -\sin(L - \pi/2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(L - \pi/2) & 0 & \cos(L - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\pi/2) & \sin(-\pi/2) & 0 \\ -\sin(-\pi/2) & \cos(-\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & -\sin L \cos\lambda & \cos L \cos\lambda \\ \cos\lambda & -\sin L \sin\lambda & \cos L \sin\lambda \\ 0 & \cos L & \sin L \end{bmatrix}$$

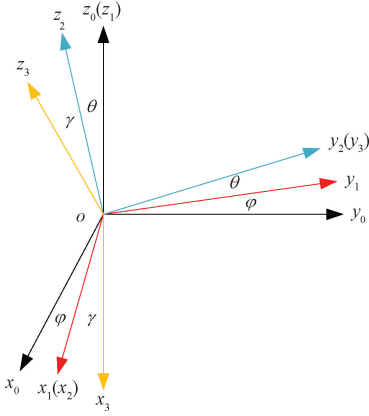


图2 b系到n系的3次转动

Fig. 2 Three rotations from b system to n system

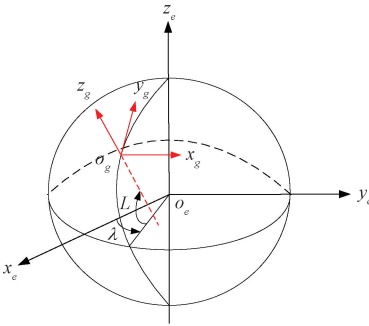


图3 g系到e系的3次转动

Fig. 3 Three rotations from g system to e system

2 适应边坡位移解算的算法优化

位移姿态解算算法经过几十年的发展已经逐渐趋向成熟, Savage^[8]通过对前人工作的总结提出关于补偿圆锥误差和划桨误差在内的姿态解算算法。目前的姿态更新算法一般使用多子样数陀螺角增量采样,然后根据角增量来计算等效旋转矢量以补偿和降低不可交换误差,再根据等效旋转矢量来计算姿态更新四元数,最后得到更新姿态矩阵。根据姿态更新矩阵得到n系下的加速度,经过二次积分得到运载体的速度和位置。但由于边坡运动的特殊性,其姿态变化较少、运动较为缓慢,而目前已经成熟的位移姿态解算算法针对边坡运动存在姿态和速度解算速度低、位移误差大的缺点,因此必须依据边坡运动特点进行优化。本文提出一种适应边坡位移解算

的优化算法,针对边坡位移的姿态、速度以及位置进行解算^[9-10],边坡位移监测原理图如图4所示。

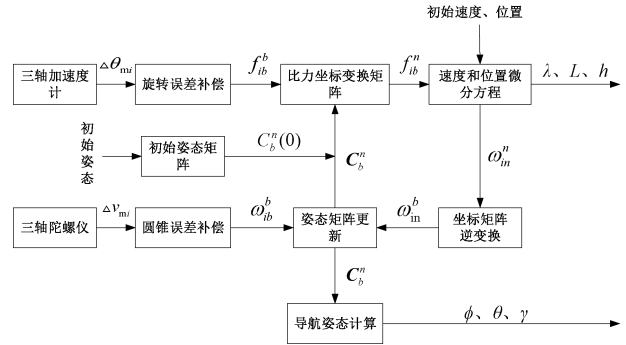


图4 边坡位移监测系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of slope displacement monitoring system

2.1 建立优化算法所需的姿态转换函数

边坡姿态解算本质上是两个坐标系之间的变换关系,因此可以用欧拉角法、方向余弦法、四元数法和等效旋转矢量法来描述这一过程^[11-14]。其中欧拉角法参数数目少,概念简单直观,但因为含有大量三角函数运算,计算量复杂,同时并不能全姿态工作,会出现奇点现象。方向余弦法可以避免奇点现象进行全姿态工作,但其微分方程维数多达9维,实时效率低下,同时使用方向余弦法进行姿态更新会产生非交换误差,影响解算精度。所以本文使用等效旋转矢量法和四元数法相结合来解算姿态表达式。

如图5所示,三维空间中有矢量 \mathbf{r}' 和 \mathbf{r} ,其中 \mathbf{r}' 是 \mathbf{r} 绕单位矢量 \mathbf{u} 旋转 φ 角度得到,这一转动关系表示为:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{D}\mathbf{r} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{I} + \sin\varphi(\mathbf{u} \times) + (1 - \cos\varphi)(\mathbf{u} \times)^2$$

其中, $\mathbf{u} \times$ 是单位矢量 \mathbf{u} 的反对称阵, \mathbf{I} 为三阶单位矩阵。变化矩阵 \mathbf{D} 建立了矢量 \mathbf{r}' 和 \mathbf{r} 之间的转动关系,其被称之为罗德里格旋转公式。三维空间中参考坐标系(i系)和动坐标系(b系)之间的变换可以等效为两个矢量的定点转动,即可以用旋转矩阵 \mathbf{D} 表示:

$$\mathbf{C}_b^i = \mathbf{I} + \frac{\sin\varphi}{\varphi}(\boldsymbol{\phi} \times) + \frac{(1 - \cos\varphi)}{\varphi^2}(\boldsymbol{\phi} \times)^2 \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{\phi} = \varphi \mathbf{u}$,其被称之为等效旋转矢量,它的矢量方向表示转轴方向,模值表示转动角度。动坐标系绕定

轴转动也可以用四元数表示:

$$Q = q_0 + q_v = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k \quad (5)$$

四元数是简单的超复数, q_0 是其实部, q_v 是其虚部。四元数也可以用复数的三角表示法将其表示为三角函数的形式:

$$Q = \|Q\| (\cos\varphi/2 + \mathbf{u}\sin\varphi/2) \quad (6)$$

其中, $\|Q\|$ 为四元数模值, \mathbf{u} 为三维矢量, φ 为各轴角度, $q_0 = \cos\varphi/2$, $q_v = \sin\varphi/2$, 旋转矩阵 \mathbf{D} 可以等效变形为:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_b^i &= \mathbf{I} + \sin\varphi(\mathbf{u} \times) + (1 - \cos\varphi)(\mathbf{u} \times)^2 = \\ &\mathbf{I} + 2\sin\varphi/2\cos\varphi/2(\mathbf{u} \times) + 2\sin^2\varphi/2(\mathbf{u} \times)^2 = \\ &\mathbf{I} + 2\cos\varphi/2\{\sin\varphi/2(\mathbf{u} \times)\} + 2\{\sin\varphi/2(\mathbf{u} \times)\}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

将四元数的实部与虚部代入, 即可以得到用四元数表示的姿态变化矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_b^i &= \mathbf{I} + 2q_0(q_v \times) + 2(q_v \times)^2 = \\ &\mathbf{I} + 2q_0 \begin{bmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} 0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & 0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

至此就得到了利用等效旋转矢量和四元数法相结合的姿态转换函数的理论推导过程, 建立了四元数法和方向余弦阵之间的内在联系, 可以更加简洁、快速的建立起两坐标系之间的转动变化关系。

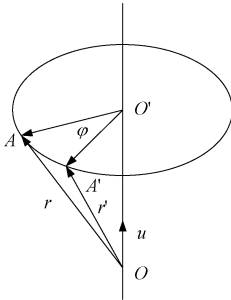


图 5 等效旋转矢量

Fig. 5 Equivalent rotation vector

2.2 边坡姿态解算

选取东—北—天地理坐标系作为参考坐标系, 使用姿态四元数对姿态进行更新, 由于边坡运动过程中姿态变换较少, 边坡姿态解算式可表示为:

$$\mathbf{C}_{b(m)}^{n(m)} = \mathbf{C}_{n(m-1)}^{n(m)} \mathbf{C}_{b(m-1)}^{n(m-1)} \mathbf{C}_{b(m)}^{b(m-1)} \quad (9)$$

采用双子样圆锥误差补偿算法, 在一个姿态更新周期内进行两次等间隔采样, 角增量分别为 $\Delta\theta_{m1}$ 和 $\Delta\theta_{m2}$, \mathbf{b} 系等效旋转矢量与四元数为^[15-18]:

$$\begin{aligned} \phi_{ib(m)}^b &= (\Delta\theta_{m1} + \Delta\theta_{m2}) + \frac{2}{3}(\Delta\theta_{m1} \times \Delta\theta_{m2}) \\ \mathbf{Q}_{b(m)}^{b(m-1)} &= \begin{bmatrix} \cos\|0.5\phi_{ib(m)}^b\| \\ \frac{\sin\|0.5\phi_{ib(m)}^b\|}{\|0.5\phi_{ib(m)}^b\|} 0.5\phi_{ib(m)}^b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

\mathbf{n} 系的旋转主要由地球自转旋转与运载体的移动引起地球表面弯曲引起, 其中:

$$\begin{aligned} \omega_{in}^n &= \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n \\ \omega_{ie}^n &= [0 \quad w_{ie}\cos L \quad w_{ie}\sin L] \\ \omega_{en}^n &= \begin{bmatrix} -\frac{v_N}{R_M + h} & \frac{v_E}{R_M + h} & \frac{v_E}{R_M + h}\tan L \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (11)$$

在边坡运动的一个姿态更新周期内, 速度和位置变化引起 ω_{in}^n 变化可以忽略不计, 在计算过程中, 可以当做常数处理^[19-20]:

$$\mathbf{C}_{n(m-1)}^{n(m)} = (\mathbf{C}_{n(m-1)}^{n(m)})^T = \begin{bmatrix} \cos\|0.5T\omega_{in}^n\| \\ \frac{\sin\|0.5T\omega_{in}^n\|}{\|0.5T\omega_{in}^n\|} 0.5T\omega_{in}^n \end{bmatrix} \quad (12)$$

如上所述, 式(9)~(12)为边坡姿态解算算法。

2.3 边坡水平和竖向位移解算

边坡运动与常见的运载体运动略不相同, 其姿态角和速度变化十分缓慢, 可能几日甚至几周内都不会发生变化, 同时对其所关注的计算量也不相同, 例如汽车与无人机等运动更加关注其姿态和速度在各个坐标系下的变化, 但边坡却大不相同, 更加关注的是其在水平和竖直方向上的位移, 因此边坡的空间位移解算会简洁很多, 姿态传感器在边坡上的安装示意图如图 6 所示。

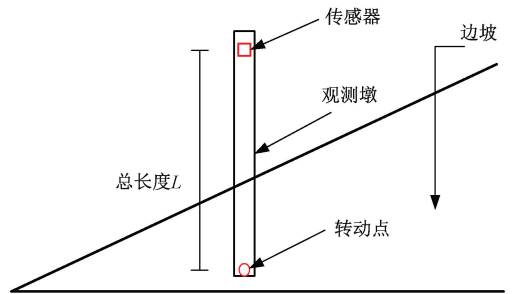


图 6 边坡安装示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slope installation

由图 6 可以看到本文的姿态传感器是固定到观测墩上, 同时以观测墩的底部为转动点, 当边坡发生水平和竖直位移时观测墩会随之一起发生移动, 以转动点为原点

建立 $O-X-Y-Z$ 空间坐标系,并将观测墩抽象化建立数学解算模型,如图7所示。

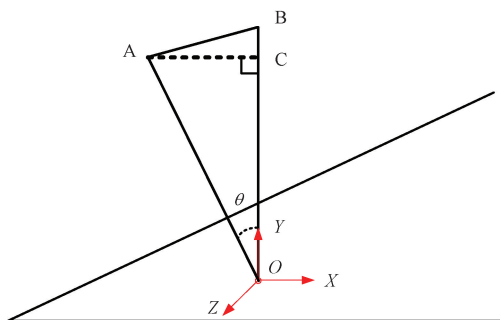


图7 边坡位移解算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of slope displacement calculation

当边坡发生水平位移移动时,观测墩 OB 会随之以转动点 O 为圆心进行转动,可以将每一次转动分解为 X 轴和 Z 轴的独立转动,然后将其水平位移进行矢量分解为 X-Z 轴上的分位移,最后进行矢量叠加即可得到总位移,图中所示的为以 Z 轴转动的 X 方向水平位移,可以将其抽象为一个直角三角形,然后 X 方向水平位移即为:

$$S_x = l_{OB} \sin \theta \quad (13)$$

式中:OB 的长度即为事先在边坡中埋下的观测墩长度,而正弦角度即为姿态转换后的传感器绕 Z 轴的转动角度,经过本文的姿态矩阵可以将载体坐标系下的姿态角转换到导航坐标系下,然后利用式(13)求得 X 方向水平位移,同理可求,Z 方向的水平位移:

$$S_z = l_{OB} \sin \varphi \quad (14)$$

X-Z 方向的水平位移叠加即可得到水平面上的矢量位移:

$$S_{x-z} = l_{OB} (\sin \varphi + \sin \theta) \quad (15)$$

对于水平面的位移可以采用构造等腰三角形,利用姿态传感器中的角度采样值进行计算,但边坡表面的竖直沉积,则需要利用姿态传感器中 Y 轴的加速度采样值进行计算,其值为:

$$S_y = v_0 t + 1/2 a t^2 \quad (16)$$

其中,时间 t 为传感器采样时间,利用式(13)~(16)即可计算得到边坡在空间坐标系下三轴的位移分量,并把它们矢量相加即可得到总的位移矢量,即总的边坡位移,以上即为边坡的水平和竖向位移解算算法。

2.4 初始对准

边坡在进行位移解算之前,必须先进行初始对准以确定边坡位移点的初始变换矩阵^[8]。初始对准时,边坡应当保持静止,利用加速度计测量的地球自转角速度分量和陀螺仪测量的重力加速度分量进行初始对准,重力加速度分量为:

$$C^b = C_n^b g^n \quad (17)$$

地球自转角速度分量:

$$\omega_{ie}^b = C_n^b \omega_{ie}^n \quad (18)$$

联合式(17)和(18)解算得:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} (g^n)^T \\ (\omega_{ie}^n)^T \\ (g^n \times \omega_{ie}^n)^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (g^b)^T \\ (\omega_{ie}^b)^T \\ (g^b \times \omega_{ie}^b)^T \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 实验验证

为了更好地验证 MEMS 姿态传感器在工程边坡实际场景中的工作状况,于 2021 年 11 月~2022 年 1 月底,在雅砻江流域水电集团官地水电站左岸覆盖层边坡上建立了边坡表面位移自动化监测系统,在该系统中安装了 216 组 MEMS 智能传感器作为边坡表面位移数据采集设备,该系统通过近一年的安全稳定运行,积累了大量的边坡表面位移变化数据,从获取的数据分析,数据变化状态符合边坡动态位移变化的特征,系统运行稳定。

3.1 在边坡表面位移监测中的传感器的局部座标定义

1) 顺河流下游方向定义为 X 轴,垂直顺河流方向定义为 Y 轴,指向河流方向定义为 Z 轴。

2) 对姿态而言,绕 X 轴旋转的姿态为临空向位移转角,产生的位移为临空向位移;绕 Y 轴旋转的姿态为垂直临空向转角,产生的位移为垂直临空向位移;绕 Z 轴旋转为边坡上下转动转角,产生的位移为边坡沉降值;

3) 对加速度而言,顺河流方向的加速度为 X 轴水平加速度,积分后产生的位移为边坡垂直临空向位移;顺垂直河流方向的加速度为 Y 轴垂直加速度(重力加速度方向),积分后产生的位移为边坡沉降;顺临空方向(指向河流方向)的加速度为 Z 轴水平加速度,积分后产生的位移为边坡临空向水平位移;

3.2 边坡位移解算原则

1) 边坡临空向位移解算原则

边坡临空向位移通过传感器采集的将绕 X 轴旋转的姿态角和观测墩的虚拟位置构成的直角三角形进行解算求得。

2) 边坡垂直临空向位移解算原则

边坡垂直临空向位移通过传感器采集的将绕 Y 轴旋转的姿态角和观测墩的虚拟位置构成的直角三角形进行解算求得。

3) 边坡沉降解算原则

边坡沉降是由于边坡运动绕 Z 轴方向导致,根据边坡的受力情况,这种工况下的转角非常小,在这种状态下,绕 Z 轴传感器姿态角采集误差较大,故在边坡沉降计算中,采用加 Y 轴向(重力加速度方向)的加速度与时间函数进行关联,通过积分方式进行求解。

3.3 MEMS 智能传感器的施工安装

根据边坡表面位移监测设备安装规范要求,本项目 MEMS 传感器采用固定式安装方式。即将传感器采用限位固定的方式固定安装在观测墩上,观测墩采用 $100\times 100\times 500$ 的钢筋混凝土柱墩,通过成孔方式固定在边坡土层中,观测墩的埋置深度及周边孔隙均按照规范要求执行,使观测墩支座满足固定端支座的要求。

观测墩与边坡自身振动融为一体,其物理变化量由固定其上的 MEMS 传感器进行采集,从而通过传感器可以直接获得边坡在自振作用下的物理变化量,通过后台解算,得到规范要求的各项位移值。

3.4 MEMS 采集频率、通信方式及供电方式

为保证 MEMS 采集的数据满足后台解算的精度要求,本项目传感器采集频率为 50 Hz,后台位移解算积分步长为 0.02 s,能够满足边坡在蠕变状态下的位移解算精度要求。

本项目通信方式采用无线网桥通信,通信协议采用 TCP/IP 协议,供电方式采用太阳能供电。

3.5 现场部份相关图片及设计、安装图纸、图片

1) 现场航拍及三维建模图片

雅砻江流域左岸覆盖层边坡的三维建模和局部航拍如图 8 和 9 所示。

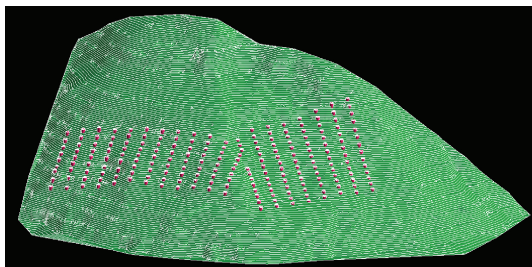


图 8 边坡三维建模图片

Fig. 8 Three-dimensional modeling picture of slope

2) 传感器布置设计图纸

雅砻江流域左岸覆盖层边坡断面上的传感器布置如图 10 所示。

3) 太阳能供电及无线网桥中继站

雅砻江流域左岸覆盖层边坡的太阳能供电及无线网桥中继站安装如图 11 所示。

4) 观测墩、太阳能供电、传感器及无线网桥

雅砻江流域左岸覆盖层边坡的观测墩、太阳能供电、传感器及无线网桥安装如图 12 所示。

3.6 MEMS 智能传感器数据采集部分历史记录数据

因数据量太大,本处之摘取部份数据作参考。



图 9 边坡航拍局部图片

Fig. 9 Local aerial photograph of slope

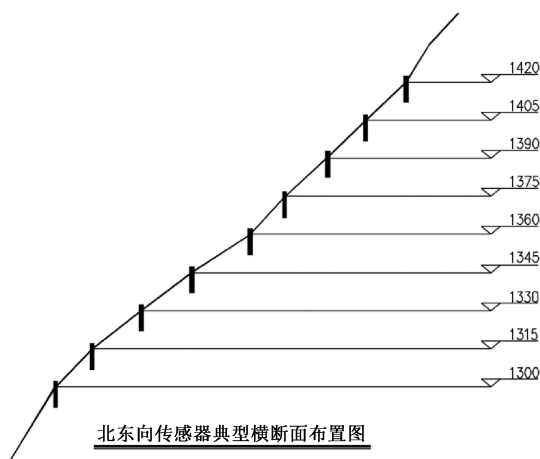


图 10 边坡断面上的传感器布置设计图

Fig. 10 Sensor layout design on slope section



图 11 无线网桥中继站

Fig. 11 Wireless bridge relay station

从表 1 可以看出加速度传感器的 Z 轴数据在当地重力加速度附近徘徊,而其余数据均在 0° 附近徘徊,符合预期结果。为了对比所有数据在 1 h 时间内的变化趋势,同时对加速度和角速度数据进行滤波处理,下面将所有数据绘制图表展示,如图 13 所示。



(a) 传感器安装
(a) Sensor installation



(b) 太阳能供电安装
(b) Solar power supply installation

图 12 观测墩、传感器、太阳能供电及无线网桥安装
Fig. 12 Installation of observation pier, sensor, solar power supply and wireless bridge

表 1 静止状态下 MEMS 传感器数据

Table 1 MEMS sensor data in static state

加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)			角速度/($^{\circ}/\text{s}$)		
X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴	Z 轴
0.009 6	-0.007 8	9.814 4	0.056 7	0.043 6	0.056 9
0.004 8	0.001 7	9.809 6	0.087 4	0.036 3	0.025 4
0.009 5	0.006 5	9.804 8	0.076 3	0.067 1	-0.035 7
0.002 4	0.001 7	9.800 0	-0.094 2	-0.069 2	0.024 6
0.003 5	-0.007 8	9.800 0	0.075 3	0.036 8	-0.062 1
-0.004 8	0.006 5	9.803 2	-0.049 8	-0.041 8	-0.021 8
0.009 6	-0.005 4	9.806 8	-0.038 7	-0.052 8	0.038 2
-0.004 9	0.008 7	9.808 7	0.076 5	0.049 2	0.048 1
0.007 6	0.001 9	9.803 9	0.048 5	0.069 1	0.059 2
0.006 9	0.004 7	9.804 8	0.026 5	-0.058 1	-0.027 5

对图 13 分析可以看出,角速度三轴数据在正负

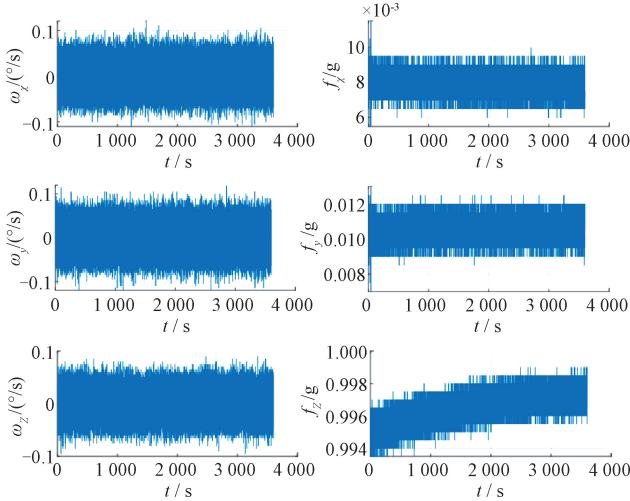


图 13 历史数据记录资料 2
Fig. 13 Historical data record 2

0.1°/s 区间里进行徘徊,但其均值基本为 0,这与传感器误差噪声有关。加速度 X 轴数据在 $10\times 10^{-3}\text{ g}$ 附近左右徘徊,Y 轴数据在 0.01 g 附近左右徘徊,天向 Z 轴数据在当地重力加速度 0.998 g 附近左右徘徊,该数据与理论数据相吻合。

3.7 边坡典型位移曲线

由于边坡数据量太大,曲线仅列出部份时间段的曲线如图 14~16 所示。

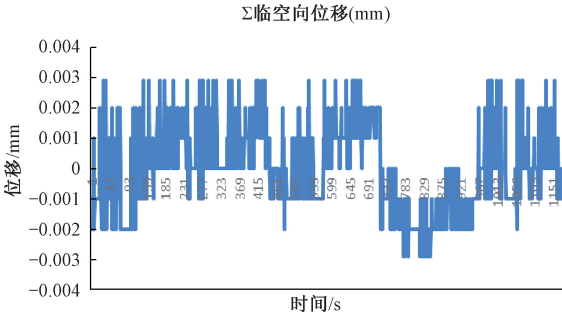


图 14 临空向位移(水平位移)曲线
Fig. 14 Near-space displacement (horizontal displacement) curve

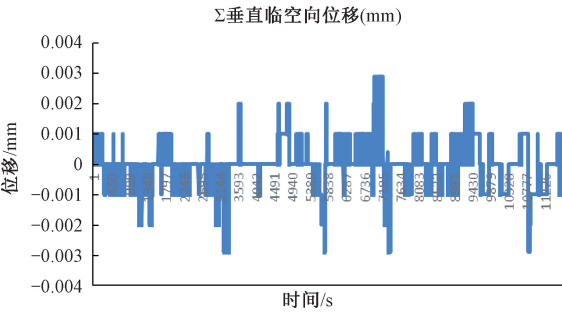


图 15 垂直临空向(水平位移)曲线
Fig. 15 Vertical free direction (horizontal displacement) curve

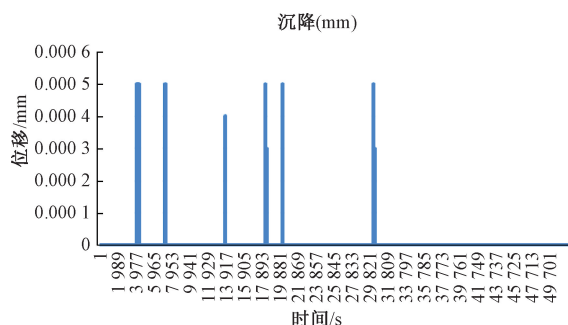


图 16 沉降曲线(重力加速度方向)

Fig. 16 Settlement curve (direction of gravity acceleration)

本自动化监测系统安装至今运行时间近一年,近一年中,通过 MEMS 传感器采集了大量的边坡运行状态数据,由于边坡系未经人工处理的原始状态边坡,故边坡采集的数据形态能够反映边坡的实际工作状态。

1) 临空向位移、垂直临空向位移曲线主要体现为周期性的振动现象,与边坡自振曲线变化形态一致,最大位移变化幅度 $-8\sim 15\text{ mm}$,无数据大起大落的跳动现象。

2) 沉降位移曲线同水平位移曲线一样具有周期性的振动现象,但数据值的化区间明显小于水平位移值的变化区间,符合边坡目前的工作状态。

3) 加速度及姿态变化曲线呈现往复振动的变化特征,无明显数据跳跃现象,今年四川连续发生几次地震,边坡的加速度及姿态角均有数据跳跃变化,说明 MEMS 传感器在高频率下实时抓取数据的效果还是明显的,地震完了以后,上述数据进入一段滞后以后,有恢复到原有的周期性的变化状态,在地震发生过程中,边坡工作状态正常。

通过近一年的工程数据验证, MEMS 智能传感器用于边坡自动化监测系统中的数据采集手段是合适的。从数据分析及曲线变化趋势来看,和现有的边坡工作状态相吻合,数据误差积累值及位移累计值均满足规范要求,验证结果与边坡工作状态相符,在边坡工程的数据采集采用 MEMS 智能传感器的技术手段是能够满足规范要求的。

4 结 论

本文深入讨论了边坡位移解算的整体思路,提出了适应边坡位移解算的优化算法,通过 MEMS 姿态传感器测量位移数据,实时解算出边坡的姿态和位移,位移监测精度在毫米级,定位效果较好。因此该系统可以实时获取准确的边坡稳定状态数据,对实现边坡稳定安全预警意义重大。

参考文献

[1] 姚龙,蔡长钰,刘兴,等. 边坡多滑面深部位移监测装

置研制[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(2): 81-87.

YAO L, CAI CH Y, LIU X, et al. Development of monitoring device for deep displacement of slope with multiple sliding surfaces [J]. Automation and Instrument, 2023, 38(2): 81-87.

[2] 王文广,徐辉. 基于 MEMS 技术的基坑变形监测试验研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(3): 12-16.

WANG W G, XU H, Experimental study on deformation monitoring of foundation pit based on MEMS technology [J]. Engineering Survey, 2017, 45(3): 12-16.

[3] 吴迪,王金晨,杨彦鑫,等. MEMS 传感器在岩溶塌陷物理模拟试验监测中应用研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(3): 800-811.

WU D, WANG J CH, YANG Y X, et al. Study on the application of MEMS sensor in monitoring the physical simulation test of karst collapse [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(3): 800-811.

[4] WU Y. RodFilter: Attitude reconstruction from inertial measurement by functional iteration [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(5): 2131-2142.

[5] SUZUKI S, NAKAZAWA D, NONAMI K, et al. Attitude control of small electric helicopter by using quaternion feedback [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2011, 5(2): 231-247.

[6] 陈映秋,旷俭,牛小骥,等. 基于车轮安装惯性测量单元的车载组合导航[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(6): 799-804.

CHEN Y Q, KUANG J, NIU X J, et al. Vehicle integrated navigation based on wheel-mounted inertial measurement unit [J]. Journal of Inertial Technology of China, 2018, 26(6): 799-804.

[7] 张福斌,王凯,廖伟飞,等. 激光雷达/MEMS IMU/里程计紧组合导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 139-148.

ZHANG F B, WANG K, LIAO W F, et al. Lidar /MEMS IMU/odometer integrated navigation algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 139-148.

[8] SAVAGE P G. Coning algorithm design by explicit frequency shaping [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(4): 1123-1132.

[9] 廖亚桢,刘昱,张立强,等. 面向 PDR 定位系统的多层感知机 IMU 阵列数据融合方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 35-42.

LIAO Y ZH, LIU Y, ZHANG L Q, et al. Data fusion method of IMU array of multi-layer perceptron for PDR positioning system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 35-42.

- [10] 符彦,王剑辉,韩菲. 地固坐标系下捷联惯导系统初始精对准[J]. 导航定位学报,2019,7(4):50-55.
FU Y, WANG J H, HAN F. Initial precise alignment of strapdown inertial navigation system in ground-solid coordinate system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019,7(4):50-55.
- [11] LI K L, HU B Q, GAO J D, et al. Direct navigation mode and indirect navigation mode for integrated SINS/GPS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 568-570(17):958-963.
- [12] IGNAGNI M. Optimal sculling and coning algorithms for analog-sensor systems[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(3): 903-903.
- [13] KANG C W, IK CHO N, PARK C G. Approach to direct coning/sculling error compensation based on the sinusoidal modelling of IMU Signal [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2013, 7(5): 527-534.
- [14] CHEN X, TANG C. Improved class of angular rate-based coning algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(5): 2220-2229.
- [15] WANG W, GAO Z, GANG M, et al. Integrated navigation method based on inertial and geomagnetic information fusion [C]. Optical Sensing and Imaging Technology and Application, 2018.
- [16] SAVAGE P G. Down-summing rotation vectors for strapdown attitude updating [J]. WBN-14019, July, 2017, 16.
- [17] WANG M, WU W, WANG J, et al. High-order attitude compensation in coning and rotation coexisting Environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(2): 1178-1190.
- [18] WANG M, WU W, HE X, et al. Higher-order rotation vector attitude updating algorithm [J]. Journal of Navigation, 2019, 72(3): 721-740.

- [19] SAVAGE P G. Errata: A unified mathematical framework for strapdown algorithm design[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2021, 44(3): 1.
- [20] HAO Y, MU H, JIA H. Application of robust adaptive CKF in SINS/GPS initial alignment with large azimuth misalignment angle [J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(20): 536-544.

作者简介



虎勇,1997 年于四川工业学院获得学士学位,2013 年于四川大学获得硕士学位,现为雅砻江流域水电开发有限公司官地水力发电厂副厂长、高级工程师,主要研究方向为水电站自动控制优化及智能电站建设。

E-mail: huyong@ylhdc.com.cn

Hu Yong received a M. Sc. degree from Sichuan University in 2013. Now he is the deputy head and the senior engineer of the Guandi Hydropower Station of Yalong Hydro. His main research interests include automatic control optimization and intelligence of hydropower.



李绍荣(通信作者),1986 年于成都电讯工程学院获得工学学士学位,现为电子科技大学光电科学与工程学院研究员,主要研究方向为光电测控、传感器与物联网。

E-mail: lsrxt@126.com

Li Shaorong (Corresponding author) received the B. E. degree from Chengdu Institute of Telecommunications Engineering, Chengdu, China, in 1986, and is currently a researcher at the School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology (UEST), with the main research interests in optoelectronic measurement and control, sensors and Internet of Things (IoT).