

ICS 93.060
CCS P 21



团 体 标 准

T/CI 489—2024

敞开式 TBM 施工隧道振动 监测技术规程

Technical specification for vibration monitoring in open TBM tunnel

2024-09-02 发布

2024-09-02 实施

中国国际科技促进会 发 布
中国标准出版社 出 版

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	2
5 监测设备	2
6 振动监测程序	2
7 数据处理程序	4
8 报告编制	5
附录A(资料性) 敞开式TBM振动监测主要设备的规格参数	6
附录B(资料性) 常用敞开式TBM振动数据处理方法	7
附录B(资料性) 常用敞开式TBM振动数据处理方法	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由东北大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：东北大学、川藏铁路技术创新中心有限公司、北方重工集团有限公司、中铁隧道局集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中国水利水电第十四工程局有限公司、中铁十二局集团有限责任公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、曼彻斯特大学、中铁二院工程集团有限责任公司、四川华能泸定水电有限公司、广西大学、中国电建成都勘测设计研究院有限公司、中国水利水电第三工程局有限公司、四川公路桥梁建设集团有限公司、中国水利水电第十一工程局有限公司。

本文件主要起草人：何本国、王杰、冯夏庭、王旭、刘书兵、李志军、黄勇、姚志宾、胡磊、张伟、赵伟、梁志强、乔志斌、江权、游金虎、尚俊龙、李红普、孟祥瑞、李嘉雨、陈涛、牛文静、金兆通、刘韩毅、王彪、张恒源、林波、付洪源、鲁宇、姚茂宏、王梓鉴、张文华、林莹、孙立成、康海波、刘家驿、周文朋。

敞开式 TBM 施工隧道振动 监测技术规程

1 范围

本文件规定了敞开式 TBM 关键部位及掌子面后方围岩振动监测与数据处理的方法与技术要求。

本文件适用于敞开式 TBM 关键部位(刀盘、撑靴、护盾)的振动监测,也应用于敞开式 TBM 开挖振动效应引起掌子面后方围岩表面振动监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

JJG 676 测振仪检定规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

敞开式 TBM 关键部位 **key position of open TBM**

TBM(全断面硬岩掘进机:Tunnel Boring Machine)施工过程中与围岩接触,其振动可引起围岩性质变化的部位,如刀盘、撑靴、护盾、机头架(主驱动)、主驱动电机等。

3.2

敞开式 TBM 施工振动 **TBM vibration**

敞开式 TBM 在掘进过程中刀盘不断切削挤压岩体产生一种波并呈球形向周围岩体扩散引起围岩振动。

3.3

敞开式 TBM 振动有害效应 **adverse effects of TBM vibration**

敞开式 TBM 振动对掌子面附近围岩产生扰动引起的地质灾害如塌方、岩爆等地质灾害和主轴承、主驱动电机等机械构件设备等振动引起的有害效应。

3.4

质点振动速度 **particle vibration velocity**

在敞开式 TBM 施工引起的振动作用下,介质中的质点在其平衡位置做往复运动的速度。

3.5

质点振动加速度 **particle vibration acceleration**

敞开式 TBM 施工振动引起质点振动的加速度。

3.6

主振频率 **main vibration frequency**

介质质点振动幅值-频率曲线中最大幅值对应的频率。

3.7

监测点 monitoring points

直接或间接设置在监测对象上并能反映其振动变化特征的观测点。

4 基本规定

4.1 敞开式 TBM 振动监测分为敞开式 TBM 关键部位振动监测和敞开式 TBM 开挖扰动围岩振动监测。

4.2 敞开式 TBM 振动监测可采取连续更换传感器无线监测和长期有线监测两种方式。

4.3 振动监测应采取仪器监测、宏观调查和巡视检查相结合的方法。

4.4 振动监测主要包括质点振动速度和质点振动加速度等监测。

4.5 监测前进行现场踏勘及掘进资料收集,应编制监测实施方案,包括工程名称、工程概况、测点位置、监测范围、监测方法、监测设备、监测步骤和预期成果等内容。

5 监测设备

5.1 振动监测设备测试等级应优于 JJG 676 要求,监测设备采集速度和加速度范围、采样频率、采样精度应满足采集要求,敞开式 TBM 振动监测主要设备的规格参数详见附录 A。

5.2 监测设备投入使用前,应经过检定和校准,监测过程中应定期进行监测设备的维护保养。

5.3 监测设备的安装应满足敞开式 TBM 振动监测方案、监测目的和施工要求。

5.4 振动监测设备工作温度、防护等级、尺寸大小适应现场恶劣施工条件,并符合下列规定:

- a) 传感器监测频率范围应符合监测要求;
- b) 监测仪器防尘、防潮性能应满足 IP65 防护等级要求,耐高温和低温性能宜满足 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的监测环境要求;
- c) 在含瓦斯隧道中监测时振动传感器应满足现场防爆等级要求。

6 振动监测程序

6.1 一般规定

6.1.1 敞开式 TBM 振动监测选取的试验段应具有典型性,监测结果应能满足测试目的且能为后续室内试验、数值模拟提供依据。

6.1.2 敞开式 TBM 围岩振动监测断面在轴向上和径向上监测点应不少于 3 个。

6.1.3 完整的敞开式 TBM 振动监测过程分为 3 个阶段,分别是监测准备阶段、现场监测阶段、数据回放处理阶段,监测流程见图 1。

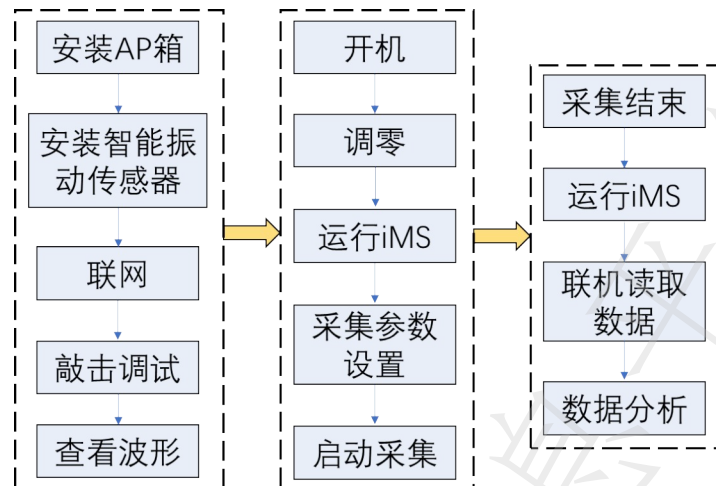


图1 TBM振动监测流程图

6.1.4 应记录监测时的掌子面桩号、测试点与掌子面之间的地质信息等。本条提到的地质信息重点是对地质灾害区域的整体情况,包括岩性、地质灾害、结构面、渗水情况等,进行详细描述记录,同时还应采取测量、摄影或录像等手段进行宏观调查,并对照振动监测结果,评估地质灾害受敞开式TBM开挖扰动影响的程度,主要包括轻微、中等、重。敞开式TBM施工前后对比的主要内容应包括:

- a) 灾害区域的深度、宽度进一步变化情况;
- b) 灾害区域破碎程度有无进一步加深情况;
- c) 节理裂隙有无进一步发育情况。

6.1.5 敞开式TBM施工掌子面后方围岩振动测点的布设应避开沟槽、破碎带、空洞等存在不良地质作用和地质灾害的位置,且宜选择同一基岩平面。

6.1.6 传感器布置要考虑应力集中区、结构面、断层等关键地质因素。

6.2 监测准备

6.2.1 布设表面应进行清洁处理,清除表面异物。

6.2.2 进行多次现场预测试,调试出适合该次试验段监测的触发电平、采集时间等采集参数。

6.2.3 监测前应将传感器与底座拧紧,并在底座上标记出传感器XY方向。

6.2.4 应对传感器进行统一编号,并保持传感器方向与所监测振动的径向和轴向一致,且传感器安装角度误差不大于 3° 。

6.2.5 在振动监测时,传感器与被测部位宜刚性连接。在围岩内部安装时,充填材料波阻抗应与围岩波阻抗一致。

6.3 现场监测项目及流程

6.3.1 敞开式TBM刀盘振动监测应按下列流程进行:

- a) 现场调研,选取典型的监测试验段;
- b) 将振动传感器通过焊接的方式安装在敞开式TBM刀盘处,将线捋顺并做好防护;
- c) 将配电箱及网关安装在主梁前端,用来接收振动传感器信号;
- d) 设备开机,连接上位机软件,设置采集时间、采集模式、采集段数、触发模式、触发电平等参数;
- e) 进行设备调零,敲击测试,查看波形,同时记录XYZ倾角;
- f) 启动采集,采集结束后取下设备。

6.3.2 敞开式TBM护盾及撑靴振动监测应按下列流程进行:

- a) 同第6.3.1a);

- b) 布设测点时,借助磁力和胶水将传感器底座耦合在护盾和撑靴上,其X方向应指向掌子面;
- c) 将振动传感器和底座刚性螺接、旋紧,传感器X方向应指向掌子面;
- d) 设备开机,连接上位机软件,设置采集时间、采集模式、采集段数、触发模式、触发电平等参数;
- e) 进行设备调零,敲击测试,查看波形,同时记录XYZ倾角;
- f) 启动采集,采集结束后取下设备及读取数据。

6.3.3 敞开式 TBM 施工围岩振动监测应按下列流程进行:

- a) 现场调研,选取合适的锚杆垫片;
- b) 布设测点,借助磁力和胶水将传感器底座耦合在锚杆垫片上,布设时将X方向均朝向掌子面;
- c) 同第 6.3.1c);
- d) 同第 6.3.1d);
- e) 同第 6.3.1e);
- f) 同第 6.3.1f)。

6.3.4 围岩内部振动监测应按下列流程进行:

- a) 现场调研,选取合适的监测断面,设计试验方案;
- b) 根据试验方案设置多个断面、钻孔;
- c) 利用定制接管安装传感器,传输线引出孔口并用胶管防护;
- d) 利用泵输送封堵材料到钻孔中固定传感器;
- e) 同第 6.3.1e);
- f) 同第 6.3.1f)。

7 数据处理程序

7.1 一般规定

- 7.1.1 应对现场监测数据进行整理、分析和清洗。
- 7.1.2 数据下载时,因数据量很大,应先根据掘进信息初步筛选掉掘进时间段外的数据。
- 7.1.3 监测数据应输入专用分析系统进行处理,确定各监测物理量的振速峰值、频率值。
- 7.1.4 数据处理时,应根据现场实际掘进情况并结合记录波形筛选数据。
- 7.1.5 作图时选取典型敞开式 TBM 振动数据,完整波形图应含两段或两段以上。
- 7.1.6 应记录掘进参数和地质数据,并加以分析统计。

7.2 数据处理流程

- 7.2.1 数据处理分为数据筛选、数据预处理和数据分析三大部分,数据处理方法详见附录 B,监测到的振动数据处理流程宜按图 2 进行。

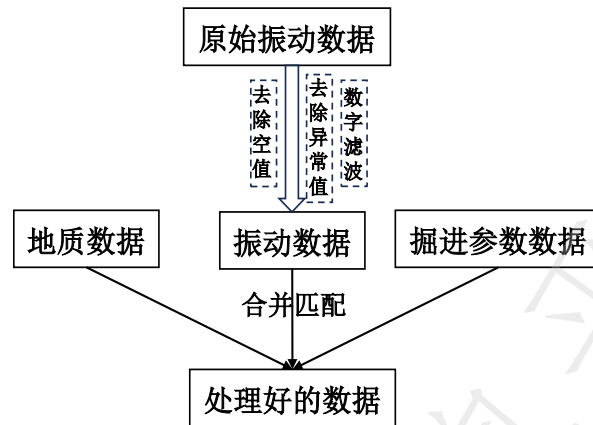


图2 数据处理流程图

7.2.2 数据筛选阶段通过地质数据、掘进参数数据、振动数据三部分合并匹配和清洗筛选得到最终数据。

7.2.3 数据预处理应通过加减直流量、数字滤波、直线滑动平均进行处理。

7.2.4 数据分析阶段可通过量纲分析、数据拟合等方法对不同类型数据之间的关系进行分析。

8 报告编制

8.1 敞开式 TBM 振动测试完成后应进行成果整理,数据记录表参见附录 C。

8.2 敞开式 TBM 振动测试报告应包括以下内容。

- a) 工程地质背景。敞开式 TBM 振动测试前应编制监测实施方案,宜包含工程名称、工程概况、测量目的、测点位置、监测范围、监测方法、监测设备、监测步骤和预期成果等内容。
- b) 编制依据。
- c) 记录监测过程中实际的测量设备和测量步骤。
- d) 敞开式 TBM 振动测试数据分析与成果整理。
- e) 结论与建议。
- f) 测试过程与数据的附图与附表。

8.3 各类监测报告均应以表格、图形等表示出监测对象的状态变化情况,每日测试完成后,应及时进行数据处理和分析,形成日报。

8.4 监测工作全部完成后,对各类监测数据和宏观调查信息进行汇总、分析和说明,对整个现场监测工作进行分析评价,形成整个工程监测的成果报告。

8.5 报告中的不常用符号应作说明,有参考引文的应标明引文的作者、名称等信息。

附录 A

(资料性)

敞开式 TBM 振动监测主要设备的规格参数

敞开式 TBM 振动监测主要设备的规格参数见表 A.1

表 A.1 敞开式 TBM 振动监测主要设备的规格参数

传感器类型		尺寸 mm	测量范围		测量精度	工作温度 ℃
			加速度 g	速度 cm/s		
三轴智能振动传感器	iSV-420	直径:50 高:70	0.001~40	0.01~40	0.5%	-20~60
	SV-316	直径:42 高:48	0.001~40	0.01~40	0.5%	-20~60
微型智能振动传感器		32×32×12	±40	±100	0.5%	-20~60

注：微型智能振动传感器适用于灌封结构体振动监测，可用于围岩内部振动监测

附录 B

(资料性)

常用敞开式 TBM 振动数据处理方法

常用敞开式 TBM 振动数据处理方法见表 B.1。

表 B.1 常用敞开式 TBM 振动数据处理方法

参数	计算方法	备注
FFT(快速傅里叶变换)—— 幅度谱、相位谱	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$ $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ $\Phi = \text{atan2}(b, a)$	$X(k)$ 是频率域的复数输出, $x(n)$ 是时间域的输入, N 是样本数量, j 是虚数单位, A 是幅度, Φ 是相位角。
功率谱 $P(f)$	$P(f) = X(f)^2$	时域信号 $x(t)$, 其傅里叶变换为 $X(f)$, 功率谱 $P(f)$ 通常计算为 $X(f)$ 的幅度的平方。
功率谱密度 $S(f)$	$S(f) = \frac{1}{T} X(f)^2$	$x(t)$ 是时域信号, $X(f)$ 是其傅里叶变换, T 是信号的总时间长度。
传递幅度谱/相位谱	$f(x) = f(x)_1 - f(x)_2$	$f(x)_1$, $f(x)_2$ 两个不同通道的 FFT 幅度谱/相位谱
速度信号 $V(f)$ (频域)	$V(f) = \frac{A(f)}{j \cdot 2\pi f}$	$A(f)$ 是加速度信号 $a(t)$ 的傅里叶变换

附录 B
(资料性)

常用敞开式 TBM 振动数据处理方法

敞开式 TBM 振动测试记录表见表 C.1。

表 C.1 敞开式 TBM 振动测试记录表

测量人： 记录人： 仪器型号： 日期： 年 月 日

掌子面桩号							
工程地质特征描述							
测点桩号	与掌子面距离 m	传感器安装方向	振动监测数据				敞开式 TBM 掘进参数
			倾角(°)	速度 cm/s	加速度 g	主振频率 Hz	

条文说明

4 基本规定

4.1 本条中的敞开式 TBM 关键部位指的是敞开式 TBM 施工过程中与围岩接触,其振动可引起围岩性质变化的部位如刀盘、护盾、撑靴等。

4.1.1 刀盘是敞开式 TBM 破岩的核心部件,长期工作在长距离、大埋深的环境中,还可能会遇到高硬度、高石英含量的极端围岩环境,且刀盘滚刀具有多点破岩的特点,使刀盘在工作过程中承受多点强冲击破岩载荷,极易引起刀盘的剧烈振动,而长期的振动往往会造成刀盘面板开裂、主轴承密封失效、齿轮崩齿、连接螺栓断裂等严重的工程问题,极大地影响隧道施工的效率和安全。

4.1.2 敞开式 TBM 护盾的主要作用之一是提供支护,以防止岩石坍塌,护盾紧紧嵌入破碎岩石之中。而敞开式 TBM 护盾振动传导到周围岩体必定会引起围岩损伤加剧,通过监测护盾振动效应,可以评估敞开式 TBM 施工对周围岩体的影响。

4.1.3 敞开式 TBM 主要应用在硬岩地质条件下,岩层强度多变,从刀盘传递过来的扭矩也随之改变,由此会产生不规则的高频振动。撑靴作为支撑结构,相当于给刀盘提供一个掘进反力,撑靴位置处必然会产生高频振动,撑靴位置处的振动对围岩破坏模式和机理的影响不可忽视。

4.2 本条的敞开式 TBM 振动监测根据监测方法分为有线式和无线式,根据监测时间可分为长期监测和临时监测。根据监测方案必要时可采取永临结合、统筹兼顾的监测方法。

4.3 本条是监测机构遵循的监测工作的基本程序,宏观调查的试验段应大于仪器监测测量点的部位。宏观调查、巡视检查应按本文件附录 D 进行记录,并于仪器监测数据进行综合分析。

5 监测设备

5.1 敞开式 TBM 振动监测设备通常由振动传感器、控制系统(计算机)以及供电系统三部分构成(见图 3)。

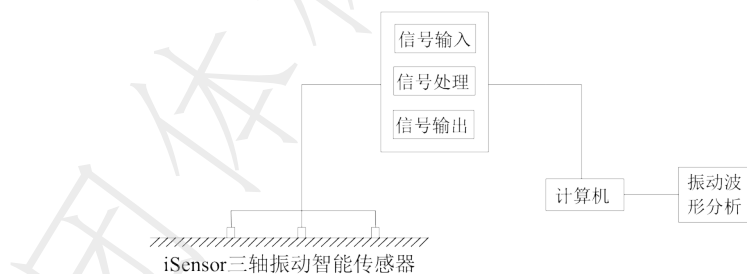


图 3 TBM 振动监测系统

5.2 本条是由于测振仪中某些元器件的电气性能和机械性能会因使用和存放时间发生变化,而传感器属于敏感器件,现场使用环境条件差,颠簸振动较大,容易受损。测试仪器应经计量部门检定或校准,检定或校准周期不宜超过 1 年。

6 TBM 振动监测

6.1 一般规定

6.1.5 本条是由于地质构造的复杂性和介质的非均质性,振动波在传播过程中受地应力、应力集中区、结构面、断层、地层岩性等关键环境因素影响较大。传感器布置时应重点考虑这些特殊因素进行布置。

6.2 监测准备

6.2.1 本条在于在岩石介质或其余表面上安装设备前,对安装点表面进行表面平整、清理或清洗。

6.2.2 本条是由于在内触发的条件下,微小的波动信号进入输入通道后也有可能造成误触发而导致采集数据的不准确。因此在正式的振动监测前,必须做一两次探索性的振动监测试验以获得合适触发电平,这样既可防止干扰引起的误触发,又能保证可靠触发。

6.2.3 本条中传感器应注意定位方向,约定传感器的 X 方向为水平轴向,Y 方向为水平径向,Z 方向为垂直向。安装时应统一使传感器的 X 方向均指向掌子面方向,便于后续数据处理分析。

6.2.5 本条是由于传感器是反映被测信号的关键设备,为了能正确反映所测信号,除了传感器本身的性能指标满足一定要求外,传感器的安装、定位也是极为重要的。为了可靠地得到 TBM 振动或结构动力响应的记录,传感器必须与被测点的表面牢固地刚性结合在一起确保传感器与被测体同步振动,同时应避免 TBM 开挖施工时传感器松动、滑落,使记录的振动信号失真。

6.3 现场监测项目及步骤

6.3.1 刀盘振动监测因其安装难度,建议采用长期网络传输方式监测,通过网线将主梁前端安装的网关接入 TBM 控制室网口,传入施工现场的服务器,同时现场服务器内部使用专用通讯软件通过因特网将数据传入在其子网下的本地服务器,实现振动数据的远程采集。

6.3.2 敞开式 TBM 护盾及撑靴振动监测传感器实际安装位置如图 4~图 5 所示。



图 4 护盾尾部传感器安装示例

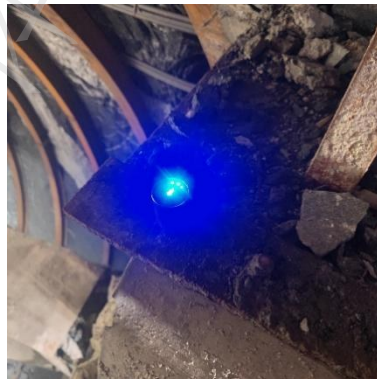


图 5 撑靴位置传感器安装示例

6.3.3 敞开式 TBM 施工围岩振动监测传感器实际安装位置如图 6 所示。



图6 围岩表面传感器安装示例

6.3.4 本条是由于 TBM 围岩内部振动传感器的监测是由于随着与洞壁距离的增加,围岩承载能力下降,能量积聚与释放特性也不同,围岩破坏由脆性拉破坏逐渐过渡到延性剪破坏,TBM 扰动效应也不同。因此应基于隧道围岩地质资料及数值模拟结果,确定隧道围岩承载能力变化的位置,探究围岩内部不同径向深度部位 TBM 开挖扰动效应。

7 数据分析与成果整理

7.1 一般规定

7.1.1 本条是由于敞开式 TBM 振动监测的现场条件非常复杂、影响因素众多,仪器监测成果可能因为监测仪器、设备、元器件和传感器等问题出现偏差,因此,完成现场监测后,应对地质资料、灾害资料、数据资料进行整理、分析和校对。

7.1.5 本条因敞开式 TBM 振动为长时连续振动,从整体做波形图以进行统计,从局部做波形图以进行分析细节。

7.1.6 本条的掘进参数是指推力、扭矩、转速、贯入度、掘进速度等,可与振动数据匹配并进行相关性分析。

7.2 数据分析

7.2.3 本条提到的加减直流量处理是由于尽管在振动监测前已经将传感器置零,但是在监测过程中振动监测结果大多还是带有一定的直流分量,导致振动波形呈现出基线漂移。其振动数据的平衡点不在左边的零点位置处,这时需要对时域波形进行加减直流量处理。通常的处理方法就是以振动信号的平均值作为直流量的估计值,然后用振动监测值加减该直流分量估计值将其剔除,某次掘进 TBM 振动数据加减直流量处理前后,见图 7。

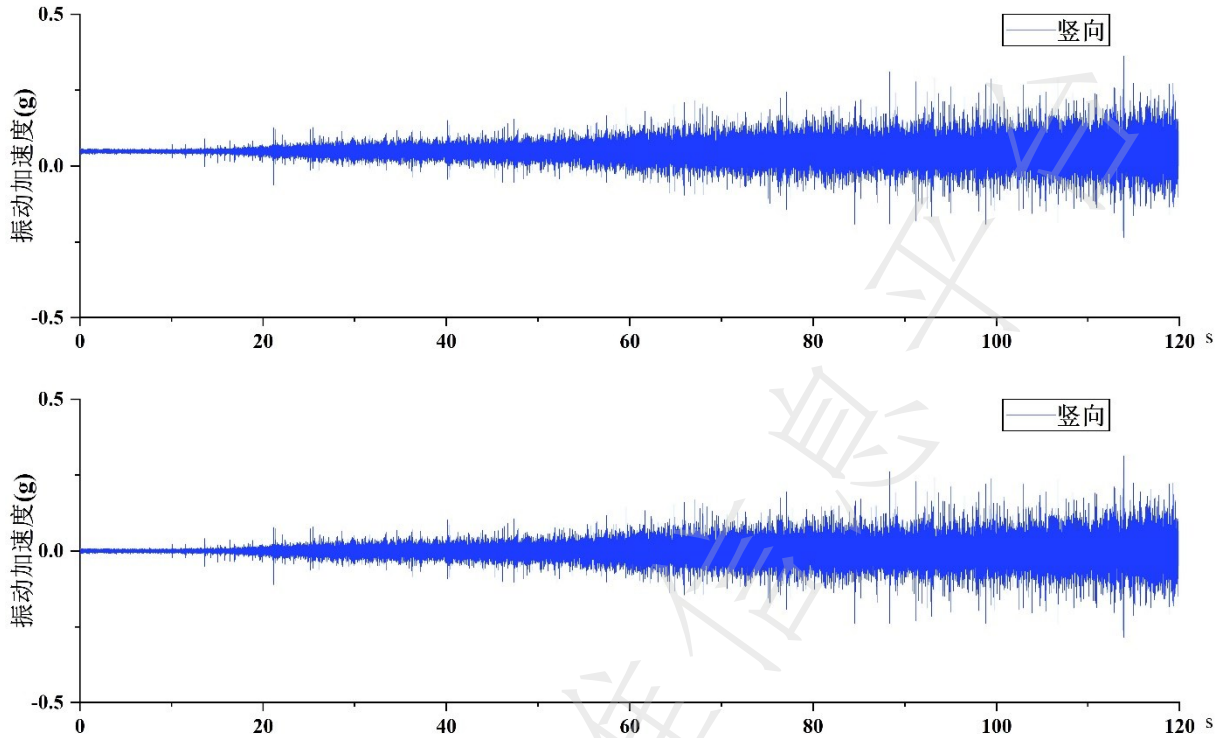


图7 加减直流量处理前后

7.2.3.1 图7可看出加减直流量并不改变时域波形的形态,只是将监测的时域波形信号基线调整到零位。

7.2.3.2 本条提到的数字滤波是由于在进行振动信号的监测和拾取时,大地脉动、工频干扰,以及其他的随机干扰等会导致振动监测信号的失真,所以在数据分析之前首先需要对监测信号进行数字滤波。数字滤波主要是从频域上对信号进行处理,剔除干扰频率的波形,从而让振动的时域波形更加趋近于被测物体的实际振动波形。数字滤波主要可以对信号进行低通滤波、高通滤波,以及带阻滤波等。

7.2.3.3 本条提到的直线滑动平均算法是由于TBM施工过程中采集的数据中受到TBM动态破岩和设备振动的影响,存在一些噪声。为了消除掘进过程中的白噪声,可采用滑动均值滤波来处理。取窗口长度为 n ,从第一个数据点开始,计算相邻的 n 个数据点的算术平均值并作为该点滤波之后的新值,即

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t x_i$$

7.2.3.4 均值滤波的窗口长度决定影响该点数值的数据范围,当选择较大的窗口长度时,可得到更加平滑曲线,但是忽视了很多数据的变化细节,如果选择的窗口长度过小,则噪声消除的效果不够理想,因此选择合适的窗口长度也很关键。

中国国际科技促进会
团体标准
敞开式 TBM 施工隧道振动
监测技术规程
T/CI 489—2024

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 17 千字
2025 年 1 月第 1 版 2025 年 1 月第 1 次印刷

*

书号:155066·5-10561 定价 00.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权所有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CI 489-2024