

超声测钎传感器在土壤风蚀监测中的应用

郑树海¹, 雷磊², 田堪良^{3,4}, 马蓓青³

(1.国家电网有限公司特高压建设分公司, 北京 100052;

2.国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 3.中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 对超声测钎传感器在土壤风蚀中的应用进行试验研究, 验证该设备对风蚀的监测精度和可靠性, 为设备改进和推广应用提供了理论依据。[方法] 以超声测钎传感器设备为试验对象, 在风洞风力侵蚀试验条件下, 开展超声测钎传感器风沙土风蚀试验研究。[结果] 超声测钎传感器在风洞风蚀试验中的测量误差为 ± 1 mm, 测量精度很高; 随着风力侵蚀厚度的增加, 测量数据的误差变化不大, 方差仅为 0.04, 具有很高的稳定性。[结论] 超声测钎传感器在风蚀监测中具有良好的准确性、稳定性和可靠性, 可应用于风蚀的自动化监测。

关键词: 测钎法; 风力侵蚀; 超声测钎传感器; 测量误差; 监测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0124-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 郑树海, 雷磊, 田堪良, 等. 超声测钎传感器在土壤风蚀监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4):124-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.016; Zheng Shuhai, Lei Lei, Tian Kanliang, et al. Application of ultrasonic chain pin sensor for soil wind erosion monitoring [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4):124-128.

Application of Ultrasonic Chain Pin Sensor for Soil Wind Erosion Monitoring

Zheng Shuhai¹, Lei Lei², Tian Kanliang^{3,4}, Ma Beiqing³

(1.State Grid UHV Engineering Construction Company, State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China;

2.Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an, Shaanxi 710100, China;

3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The application of ultrasonic chain pin sensor in soil wind erosion was studied by experiment to verify the monitoring accuracy and reliability of the equipment for wind erosion in order to provides a theoretical basis for the improvement and popularization of the equipment. [Methods] A wind erosion test using the ultrasonic chain pin sensor was conducted in a wind tunnel. [Results] The measurement error of the ultrasonic chain pin sensor in the wind tunnel erosion test was ± 1 mm, and the measurement accuracy was very high. Measurement error changed little as wind erosion thickness increased, and the variance was only 0.04 and exhibited high stability. [Conclusion] The ultrasonic chain pin sensor had good accuracy, stability, and reliability in wind erosion monitoring, and can be used for automatic monitoring of wind erosion.

Keywords: chain pin method; wind erosion; ultrasonic chain pin sensor; measurement error; monitoring

水土流失监测是生态环境建设的一项重要基础工作, 已逐步形成了动态化监测、全区域监测网络覆盖、基础数据库逐渐完善的基本态势^[1]。与此同时, 这也对水土流失监测技术提出了更高要求。水土流

失监测方法主要有 3 类, 即遥感监测法、地面监测法和调查监测法^[2]。

测钎法是一种常用的地面土壤侵蚀监测方法, 具有布设简单、适应性好、便于测量等优点。马述萍

收稿日期: 2021-12-16

修回日期: 2022-02-07

资助项目: 国家电网有限公司特高压建设分公司水土保持创新项目“超声测钎水土流失量监测设备的测试与验证”(SGTYHT/18-GC-026)

第一作者: 郑树海(1973—), 男(汉族), 河北省蔚县人, 高级工程师, 主要从事水土保持与环境保护等管理工作。Email: bj1577@126.com。

通讯作者: 马蓓青(1990—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为环境工程与地质灾害。Email: mabeiqing19@mails.uca.ac.cn。

等^[3]采用测钎法对火电厂治理项目的水土流失状况进行了监测,测试了风力侵蚀的强度。在我国高速公路工程建设快速发展的时期,许多研究者采用测钎法对施工沿线的土壤侵蚀进行实地监测,为生产建设项目水土流失防治提供了基础数据^[4-6]。随着生态文明建设的发展,测光伏发电项目也采用测钎法监测建设过程中的土壤侵蚀量^[7-8]。目前,测钎法已被广泛应用于风力发电^[7-8]、输油气管线^[9]、公路和铁路等^[10]各类生产建设项目的水土流失监测^[11]。近年来,也有学者使用测钎法对土壤侵蚀特征以及不同立地条件下土壤侵蚀差异进行了研究^[12-13]。传统测钎法因其独有的布设简单、实施灵活等优点,在土壤侵蚀监测中得到广泛应用,但传统测钎法需人工测量,难以获得实时监测数据,也容易受到交通条件的限制,监测结果缺少连续性和时效性。为此,国网陕西省电力

公司电力科学研究院根据超声波测距的原理研发了超声测钎传感器^[14],具有自校准功能、可实时监测、无线数据传输等优点。因此,本研究通过风洞试验设备开展风沙土风蚀试验研究,对超声测钎传感器的准确性和可靠性进行验证和评价,为监测设备改进和推广提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

测试所用风沙土于 2020 年 5 月中旬取自宁夏回族自治区中卫市境内沙坡头区的腾格里沙漠东南缘(105°0'59"E,37°27'29"N,海拔 1 221.7 m),属沙丘地貌类型。风沙土及取样点地貌如图 1 所示。该风沙土颗粒均匀细小,粒径在 0.1~0.25 mm 的颗粒所占比例为 95.0%。



图 1 腾格里沙漠东南缘风沙地貌及取样点风沙土

1.2 超声测钎传感器

超声测钎传感器以超声测距原理为理论基础,超声测距的工作原理是通过 ARM 处理器对超声探头发出的超声波进行回波信号接收,得到超声波发射与接收后的时间间隔,再利用超声波的传播速度与两次接收时间差计算出传播距离^[15]。

测距的公式表示为:

$$L = C \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中: L 为测量的距离长度(m); C 为超声波在空气中的传播速度(m/s); ΔT (s)为测量距离传播的时间差(ΔT 为发射到接收时间数值的 1/2)。

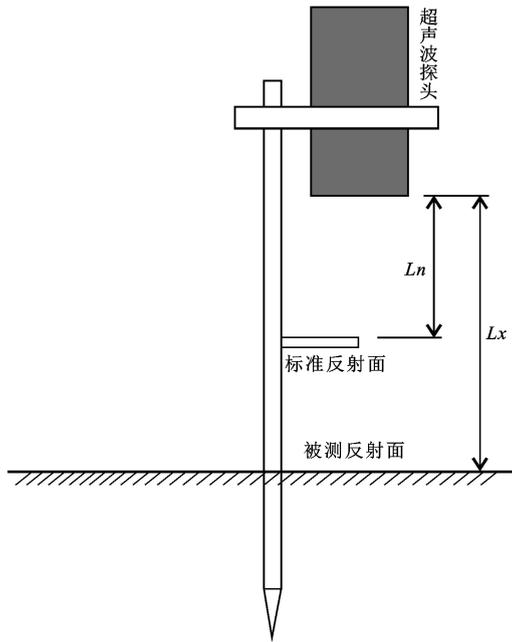
超声测钎传感器结构包括:测钎、超声测量探头以及标准反射面,其中超声波探头安装在自制测钎的顶部,利用超声测距原理对土壤侵蚀厚度进行自动监测,结构示意图如图 2 所示。

超声测距的难点在于空气中的声速会受到环境温度、湿度、气压的影响,为了消除这些因素的影响,

提高测距的精度,超声测钎传感器设计了实时自校准功能。当超声探头开始测量,在 t_0 时刻发射超声波, t_1 时刻遇到标准反射面,产生第一次反射; t_2 时刻遇到被测反射面(地面),产生第二次反射。单片机可精确测出 t_0-t_1 和 t_0-t_2 的时间间隔,分别记为 Δt_n 和 Δt_x 。由于 $L_n = C \cdot \Delta t_n$ 和 $L_x = C \cdot \Delta t_x$,两式相除,可得出: $L_x = \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} L_n$ 。显然,被测距离和超声波速度无关,即完全消除了空气温度、湿度、气压对测距的影响。该方法的优点是在不增加任何硬件成本的基础上,修正、补偿数据并保证了足够的测量精度。

1.3 风洞试验设备

风洞试验设备全长 23.55 m,共由 6 部分组成。分别是:风机段、调风段、整流段、试验段、收集段和导流段。通过配套的变频仪(0~50 Hz)调节风速。制备的试样将放置在试验段,需要用 AZ-8902 智能风速仪对风速进行校验。

图 2 超声测钎传感器结构示意图^[14]

1.4 试样制备

试验沙槽长、宽、高分别为 150, 50 和 10 cm。制样时,将风沙土按照天然干密度 1.61 g/cm^3 铺填在沙槽中,刮平沙土表面。风洞试验开始前,将试样置于风洞试验段,将超声测钎传感器插入沙样中,然后将超声测钎传感器固定在风速仪上。试样及超声测钎传感器安装如图 3 所示。



图 3 试样及超声测钎传感器安装

1.5 风力侵蚀试验

风力侵蚀试验于 2020 年 6 月 8—12 日在中国科学院水利部水土保持研究所风洞试验室进行。采用超声测钎传感器进行风力侵蚀试验之前,先将风沙土试样及超声测钎传感器安置在风洞试验段,采用风速控制器调节风速,并通过风速仪测量试样上方的风速。试验测试时,逐渐增大风速,观察沙样表面,当沙样表面有沙颗粒发生滚动时,此时的风速即为沙粒临界起动风速。经测试,风沙土的沙粒临界起动风速为

5.73 m/s。随后,逐渐增大风速,当风速达到 10 m/s 时,可在 4~8 min 内产生约 5 mm 厚的风蚀,因此,将测试风速保持在 10 m/s,通过试验段玻璃窗口观测风力侵蚀厚度,有明显侵蚀后,关闭风机,然后分别采用超声测钎传感器自动测量和人工测量风力侵蚀厚度。风蚀厚度的测量如图 4 所示。



图 4 风蚀厚度的测量

2 测试结果与分析

2.1 超声测钎传感器风力侵蚀量测试结果

超声测钎传感器风力侵蚀设置了 7 组试验,风速均设定为 10 m/s,在每一组侵蚀试验结束时,为了保证测量精度不受人工干扰,先使用超声测钎传感器测量,测量结果最大侵蚀厚度为 38 mm,最小侵蚀厚度为 4 mm;随后使用直尺进行人工测量,测量结果最大侵蚀厚度为 37.4 mm,最小侵蚀厚度为 5 mm。测量结果详见表 1。

表 1 超声测钎传感器风力侵蚀测试结果

序号	测钎 测量/mm	人工 测量/mm	测量 误差/mm	绝对 误差/mm	测量 精度/%
1	4.0	5.0	-1.0	1.0	20.00
2	9.3	10.0	-0.7	0.7	7.00
3	15.0	14.0	1.0	1.0	7.14
4	15.8	15.0	0.8	0.8	5.33
5	28.0	28.4	-0.4	0.4	1.41
6	33.2	32.5	0.7	0.7	2.15
7	38.0	37.4	0.6	0.6	1.60

注:①测量误差(mm)=测钎测量值-人工测量值;②绝对误差(mm)=测量误差的绝对值;③测量精度(%)=绝对误差/人工测量值。

2.2 超声测钎传感器风力侵蚀测量误差分析

由表 1 可以看出,超声测钎传感器风力侵蚀厚度测量误差在 -1.0~1.0 mm 之间,测量的绝对误差在 0.4~1.0 mm 之间。根据绝对误差分布情况,将误差范围划分为 3 个区间,分别是 0.4~0.6, 0.6~0.8,

0.8~1.0 mm,其中,测量绝对误差在 0.4~0.6 mm 区间共有 2 个数据,占总测量数据的 28.57%;测量绝对误差在 0.6~0.8 mm 区间共有 4 个数据,占总测量数据的 57.14%;测量绝对误差在 0.8~1.0 mm 区间共有 1 个数据,占总测量数据的 14.29%。当绝对误差需要控制在 0~0.8 mm 范围内时,从测量误差角度分析,超声测钎传感器测量的可靠性为绝对误差在 0.4~0.6 mm 和 0.6~0.8 mm 这 2 个区间的测量数据占比之和即为 85.71%;当测量误差需要控制在 0~1.0 mm 的范围内时,超声测钎传感器测量的可靠性为 3 个区间的测量数据占比之和即为 100%。风蚀测量绝对误差的平均水平值为 0.7 mm,小于 1 mm。风力侵蚀量测量误差分析结果详见表 2。超声测钎传感器风力侵蚀测量误差随侵蚀厚度的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,误差值随侵蚀厚度增加在 -1~1 mm 之间波动,没有随侵蚀厚度的增大而发生明显增大或减小。

表 2 风力侵蚀量测量误差分析

误差区间/mm	绝对误差/mm	测量误差/mm	误差计数	误差比例/%
0.4~0.6	0.4	-0.4	2	28.57
	0.6	0.6		
0.6~0.8	0.7	-0.7	4	57.14
	0.7	0.7		
	0.8	0.8		
0.8~1	1	-1	1	14.29
	1	1		

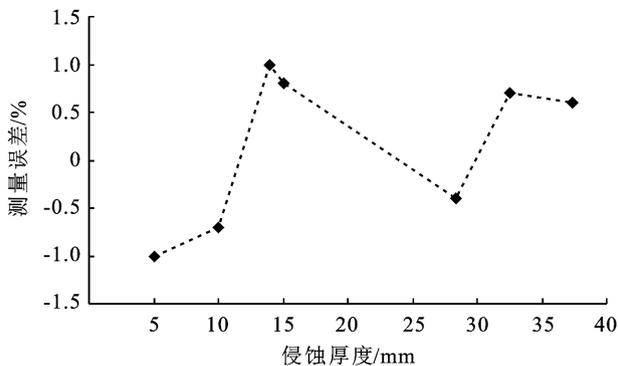


图 5 风力侵蚀测量误差随侵蚀厚度的变化

2.3 超声测钎传感器风力侵蚀测量精度分析

在风力侵蚀测试中,超声测钎传感器测量精度随侵蚀厚度的变化曲线如图 6 所示。由于测量的绝对误差没有随侵蚀厚度的增大而发生明显变化,超声测钎传感器的测量精度随着沙土侵蚀厚度的增加而逐渐提高,测量精度由侵蚀厚度为 5.0 mm 时的 20% 逐渐提高到侵蚀厚度为 38.0 mm 时的 1.60%。

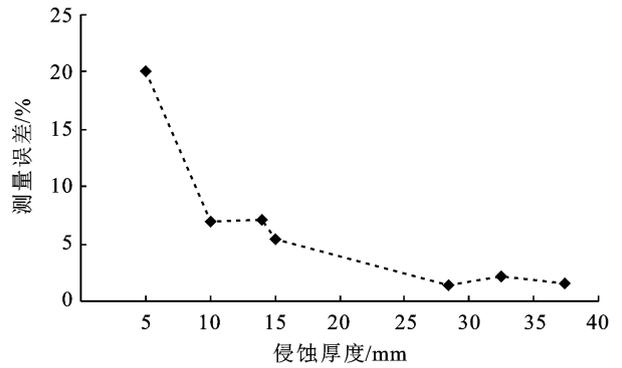


图 6 测量精度随侵蚀厚度的变化

2.4 超声测钎传感器的准确性与稳定性分析

准确性反映超声测得值与真实值(人工测量值)之间相符合的程度,通常用绝对误差的大小表示。从测试结果数据分析可知,若绝对误差要求在 1 mm 范围内时,超声测钎传感器测量的准确性可达 100%。超声测钎传感器测量的稳定性反映测量数据误差的离散程度,离散程度越小,稳定性越好,可以用测量误差的方差进行评价,方差值越小则其稳定性越高。超声测钎传感器风力侵蚀测量稳定性分析详见表 3。由表 3 可以看出,超声测钎传感器测量值绝对误差的方差为 0.04,表明超声测钎传感器测量的稳定性较高。

表 3 超声测钎传感器风力侵蚀稳定性分析

序号	测量误差/mm	绝对误差/mm	绝对误差均值/mm	方差
1	-1.0	1.0	0.7	0.04
2	-0.7	0.7		
3	1.0	1.0		
4	0.8	0.8		
5	0.7	0.7		
6	-0.4	0.4		
7	0.6	0.6		

3 讨论

3.1 超声测钎传感器风蚀监测的可靠性评价

风力侵蚀主要类型为面蚀,适合采用测钎法监测土壤侵蚀量。传统的测钎法都是人工采用直尺测量每个测钎的侵蚀厚度,直尺的最小刻度为 1 mm,所以,人工测量的最大精度为毫米级^[16]。通过风洞试验测试了超声测钎传感器的精度、准确性和稳定性,超声测钎传感器在侵蚀厚度测量中的精度也达到毫米级,绝对误差不大于 1 mm,绝对误差的平均水平值为 0.7 mm。若绝对误差的允许值为 1 mm,

则超声测钎传感器测量的准确性可达 100%，表明超声测钎传感器测量风蚀侵蚀量具有和人工相当的精度和准确性。超声测钎传感器 7 组测试数据的绝对误差的方差仅为 0.04，表明超声测钎传感器测量的稳定性较高，完全能够满足风蚀测量的要求。因此，采用超声测钎传感器进行风蚀监测可以达到和人工测量相当的精度和稳定性，表明其具有较高的可靠性。

3.2 超声测钎传感器风蚀监测的适用性评价

风蚀区域大多地处偏僻的沙漠地带，交通不便，采用传统测钎人工测量困难较大，成本较高，而且难以及时获取侵蚀数据。超声测钎传感器采用太阳能供电，具有自动测量，可及时存储和传输监测数据，实时监测现场风蚀情况，具有高效、低成本和高可靠性等优点。因此，超声测钎传感器监测风蚀具有良好的适用性，值得推广应用。

4 结论

(1) 超声测钎传感器土壤侵蚀厚度测量精度可以达到毫米级，在试验中的测试厚度范围内，绝对误差不大于 1 mm，绝对误差的平均水平值为 0.7 mm。若绝对误差的允许值为 1 mm，则超声测钎传感器测量的准确性可达 100%。超声测钎传感器具有较高的测量精度和准确性。

(2) 超声测钎传感器风力侵蚀测量误差随侵蚀厚度增加在 -1~1 mm 之间波动，没有随侵蚀厚度的增大而发生明显增大或减小，测量值绝对误差的方差仅为 0.04，具有较高的稳定性，完全能够满足风蚀测量的要求。

(3) 超声测钎传感器具有良好的可靠性，适用于对风力侵蚀的实时监测，可有效提高监测工作效率，降低监测成本。

[参 考 文 献]

- [1] 郭索彦,李智广.我国水土保持监测的发展历程与成就[J].中国水土保持科学,2009,7(5):19-24.
- [2] 杨建民,孟凡宪,丛一蓬,等.新型水土流失监测装置及其应用[J].中国水土保持科学,2016,14(4):113-120.
- [3] 马述萍,张建军,孟霞.浅探测钎法在水土流失监测中的运用[J].内蒙古水利,2010(5):86-87.
- [4] 李猛,张洪江,王晓东,等.银武高速公路同心至固原段边坡面蚀试验分析[J].山地学报,2007,25(4):419-424.
- [5] 姜利,孟凡春.高速公路建设中边坡水土流失监测与防治[J].交通科技与经济,2009,11(3):30-32.
- [6] 侯琳,康博文,彭鸿.高速公路建设土壤流失特点及监测方法探讨[J].中国水土保持,2004(11):32-33.
- [7] 吕志玲.光伏发电项目水土保持监测方法[J].中国科技信息,2015(5):45-46.
- [8] 俞素花.光伏发电项目水土保持监测与水土流失特点评价[J].甘肃水利水电技术,2015,51(9):62-65.
- [9] 木哈买提·尼亚孜.西气东输二线新疆段主要水土保持监测方法[J].中国水土保持,2016(7):69-70.
- [10] 巨邦强,刘金鹏,高文永,等.柴达木盆地风沙区铁路工程取土场风力侵蚀模数研究[J].中国铁路,2021(8):65-70.
- [11] 廖章志.测钎观测小区监测技术及应用分析[J].中国水土保持,2015(2):31-32.
- [12] 石燕金,周运超.石漠化喀斯特皆伐迹地的土壤侵蚀特征[J].中国水土保持科学,2018,16(5):114-119.
- [13] 殷清慧,谢世友,蔡先立.喀斯特石漠化皆伐迹地不同微地形和小生境下的土壤侵蚀差异[J].水土保持通报,2019,39(4):44-47.
- [14] 雷磊,吴健,万昊,等.输电工程水土流失监测技术研究[J].电网与清洁能源,2020,36(5):49-57.
- [15] 刘芬,罗前刚,张远征.高精度超声波测距方法的研究[J].自动化与仪表,2021,36(5):66-69.
- [16] 毕华兴,张建军.适用于测钎法的土壤侵蚀最低模数阈值探讨[J].中国水土保持科学,2016,14(5):119-122.