

植物根系抗拉力学特性便携式测试系统*

张云伟¹ 喻 勇¹ 王大龙² 惠 尚² 王彦钧² 李 龙¹

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对传统的植物根系抗拉力学特性参数测量方式的不足,设计了一种在野外现场测量植物根系抗拉力学特性参数的便携测试系统。系统包括机械装置和电子测量两部分。机械装置由机架、根系夹持机构和传动系统组成,采用模块化设计,各部件可以快速拆装。电子测量部分由传感器、低功耗单片机数据采集系统和手持设备组成。手持设备基于 Android 平台开发,通过蓝牙模块与单片机数据采集系统通讯,是实现测量操作、输入以及结果显示输出的终端。试验结果表明,所设计的测试系统携带方便、测量准确,可测量得到根系的4个典型抗拉力学特性参数(最大抗拉力、抗拉强度、拉伸弹性模量、极限应变),显示其应力-应变关系曲线,查询历史数据,能够满足野外现场测量根系抗拉力学特性参数的各种要求。

关键词: 植物根系 力学特性 测试系统 便携式

中图分类号: TH873; S183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0058-06

引言

随着各种极端气候的出现,水土流失已成为危及人类生存环境的重要生态问题。研究表明,植被固土护坡是防止水土流失经济、有效、环保的措施之一。植物根系能够稳定土层结构,提高土壤的抗剪强度,对于植被固土护坡起到重要作用^[1-4]。植物根系抗拉力学特性的好坏是影响植物固土力学作用效果的主要因素之一。植物根系材料由于其自身种类和生长环境的不同,其力学性质有很大差异^[5-7]。单根的最大抗拉力与根系断裂处面积的比值即为抗拉强度。已有研究表明,在同一标距下,许多植物单根的抗拉力随着植物根系直径的增加而增大,单根抗拉强度随着植物根系的增加而减小^[8]。

为了了解各种植物根系的抗拉力学特性,需对植物根系抗拉力学特性参数进行测量。由于缺乏能在野外现场对植物根系的抗拉伸力学特性进行测试的专门设备,传统的测量方式是将根系采集后带回试验室用万能材料试验机测量其抗拉力学特性参数。采用这种方式,植物根系容易失水变干导致所测抗拉力学特性不准确。因此,开发一种专门用于植物根系抗拉强度测试的试验系统,特别是能用于野外环境下植物根系抗拉强度现场测试的便携式试验系统有着重要的应用价值。为了解决这一问题,本文设计一种在野外现场测量植物根系抗拉力学特

性参数的便携测试系统。

1 植物根系抗拉力学特性参数

根据材料力学,根系的抗拉力学特性可由抗拉力、抗拉强度、表征变形特性的弹性模量和极限应变4个参数来反映。抗拉力、抗拉强度反映根系作为土壤中的加筋骨架,承受并传递土壤间张力的能力。根系应力-应变关系是描述根系力学特性的重要指标,应力-应变曲线上的特征点可以反映根系受力过程中不同阶段的基本特性和力学性能指标,反映出根系从受力到破坏过程的受力变形特点。植物根系的极限应变是根系固土的一个重要参数,当土体间出现滑移趋势时,根系的极限应变较大有利于把根系所受的拉力向土体深层传递,缓冲土壤下滑力,提高根系固土能力^[9]。通过单根拉伸试验,能直接测得根系断裂时的最大抗拉力及最大变形量,并可建立应力-应变关系曲线。由于根系直径、测量标距已知,可以计算出根系的抗拉强度、极限应变、弹性模量,计算公式为

$$\sigma_{\max} = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{L_{\max}}{L} \tag{2}$$

$$E = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \tag{3}$$

收稿日期: 2013-07-15 修回日期: 2013-09-06
* 国家自然科学基金资助项目(31060118)
作者简介: 张云伟,教授,博士,主要从事精密测控技术研究, E-mail: zhangyunwei72@qq.com

式中 $\sigma_{\max}$ ——根系的抗拉强度,MPa
 D ——根系直径,mm $\varepsilon_{\max}$ ——极限应变
 $F_{\max}$ ——最大抗拉力,N
 $L_{\max}$ ——根系的 最大变形量,mm
 L ——测量标距,mm
 E ——根系的 拉伸弹性模量,MPa
 $\sigma_{0.5}$ ——50% 极限应力,MPa
 $\varepsilon_{0.5}$ —— $\sigma_{0.5}$ 对应的应变

根据应力-应变关系曲线,许多植物根系在抗拉强度极限 50% 以内其变形近似处于弹性区域。因此,弹性模量可取 50% 极限应力时的抗拉割线模量,对于具体的植物根系,这一取值可根据试验测量进行调整。

2 测试系统设计

由于在野外现场使用,植物根系抗拉力学特性测试系统面临工作环境、作业方式、技术要求等方面的特殊性,系统在设计和实现上主要包括以下难点:
①为了便于携带到野外现场使用,系统的机械装置部分需采用模块化设计,各部件可以快速拆装,具有携带方便、体积小、质量轻、结构紧凑的特点。
②由

于在野外,缺乏动力源,对根系施加拉伸力需靠人工完成,因此,要求机械装置传动部分要加力轻巧、便于人工操作,拉力要沿着根系轴向方向缓慢均匀施加,同时避免造成根系扭转。
③为了提高野外现场测试工作效率,根系夹持部分要便于快速操作,牢固地夹持住根系两端,防止滑动,且要尽量减小夹持对根系的损伤,避免拉伸过程中根系在夹持部分断裂。
④电子测量部分要求硬件功耗小,待机时间长,满足野外长期使用的需求。
⑤拉伸过程中,测试系统需准确测量根系的拉力和变形量(根系变形量变化大,其准确测量有一定的技术难度),能连续记录并存储拉伸过程中拉力和变形量对应的测量数据,直至根系被拉断。由于根系试验数量大,因此,电子测量硬件系统应具备较大的存储容量。
⑥系统软件需具备自动处理能力,对于每一条根系拉伸试验,能自动计算得到最大抗拉力、抗拉强度、拉伸弹性模量和极限应变,显示应力-应变关系曲线,并可查询历史数据。

解决好上述难题是本测试系统设计和实现的关键。图 1 为测试系统整体的功能结构与数据流程。按照功能需求,整个测试系统包括机械装置和电子测量 2 部分。

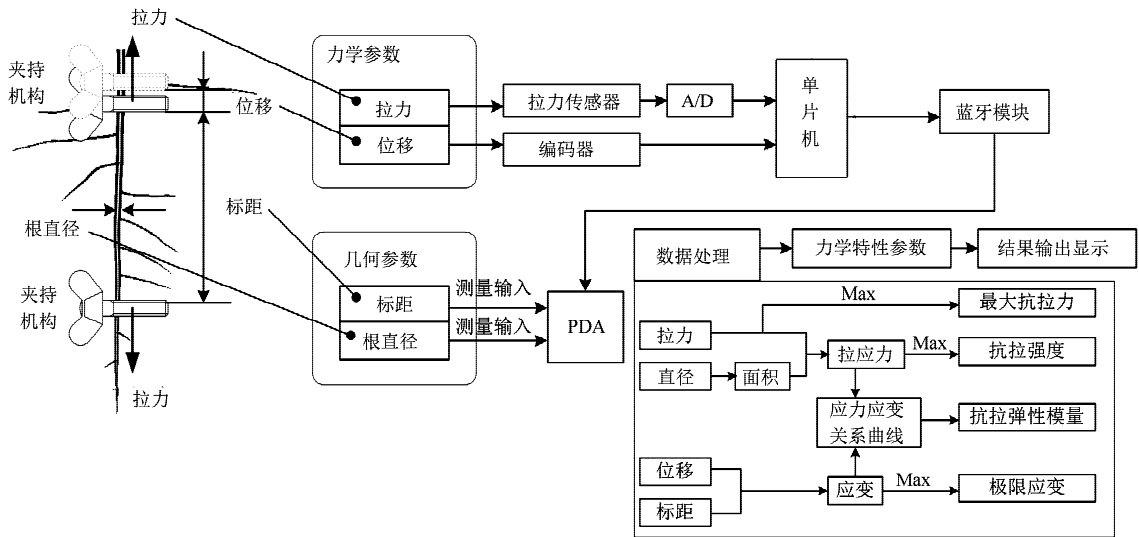


图 1 功能结构与数据流程图

Fig. 1 Functional structure and data flow diagram

2.1 机械装置设计

机械装置设计包括机架结构设计、夹持机构设计和传动系统设计。机架是整个系统最重要的支撑机构,由立柱、上下基座和上下基座钢板组成,立柱内侧装有导轨,各部件间通过螺丝连接,可以方便拆卸组装。设计时在满足强度、刚度和稳定性的前提下尽可能地减小其尺寸和质量^[10]。根系夹持机构是系统的关键部件,其作用是把根系试样两端快速夹持固定在施力部件上,并且在拉伸试验传递力的过程中保持根系不滑移^[11]。本文设计的夹持机

构分为上、下夹持器(图 2),下夹持器由楔块、夹具基座、夹持螺杆 3 部分构成。为了保证在人力作用停止后,仍可以保持夹持力,在夹持螺杆上装有一个锁紧螺母以实现自锁功能。夹具基座采用封闭式结构,只在一方开出能够穿过根系的一个矩形槽,从而保证夹具的力学强度。上夹持器的结构与下夹持器基本相同,区别在于夹持器两侧增加了导向杆可沿着立柱内侧导轨滑动,从而保证上夹持器上下沿直线运动,避免根系拉伸中被扭转。

传动系统是本试验系统中的重要组成部分,使

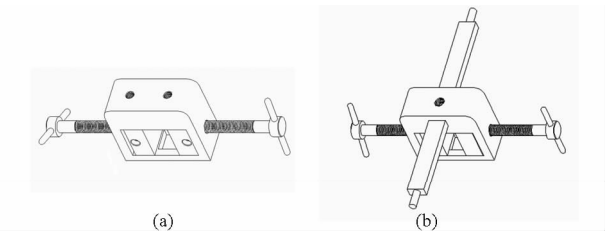


图 2 夹具结构图
Fig.2 Structure diagram of clamp
(a) 下夹具 (b) 上夹具

用符合条件的锥齿轮传动方案,如图 3 所示。包括牵引螺杆、传动螺母、圆锥滚子轴承、一对直角布置的锥齿轮、转轴、转轴支撑座和摇臂。传动螺母固定在水平锥齿轮内孔中,转轴与另一个锥齿轮固定,能够把摇臂转动转换为牵引螺杆竖直上下的运动,而且传动匀速、缓慢。为了提高承载能力减小变形,牵引螺杆和传动螺母使用梯形螺纹。此外,由于使用圆锥滚子轴承,加之夹持器两侧导向杆受到机架立柱内侧导轨的导向作用,保证了转动摇臂对根系进行拉伸时,即使拉力很大的情况下,牵引螺杆能保持垂直升降,所测根系只受轴向拉力的作用,而不会随着转动造成根系在拉伸的过程中被扭转破坏。

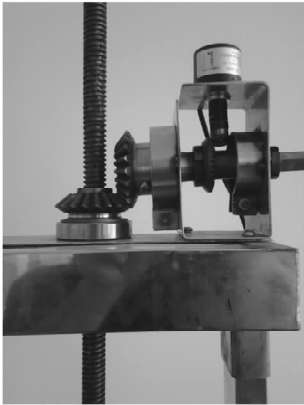


图 3 传动系统图
Fig.3 Drive system

根据设计的结构和尺寸,通过 Pro/E 对该系统的机械部分进行三维建模仿真,图 4 为按照设计进行加工组装后的系统样机。总质量 14.6 kg,长×宽×高为 270 mm×250 mm×950 mm。

2.2 电子测量部分设计

2.2.1 总体方案

电子测量部分负责采集数据并对数据进行存储、处理^[12],主要由传感器、单片机数据采集系统、手持设备及相关软件等部分组成,实现对整个测试系统的测量操作。手持设备采用目前广泛流行的 Android 平台设备华硕 TF201,配有触摸输入、大尺寸彩色液晶屏,通过蓝牙与单片机数据采集系统连接,不但实现了数据存储和数图转换,而且代替了传

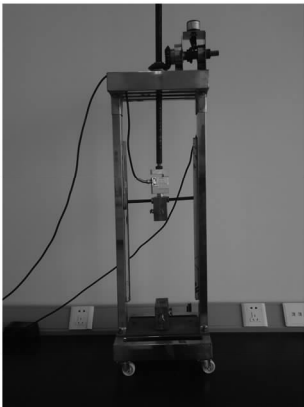


图 4 样机调试
Fig.4 Prototype debugging

统测量设备上的显示和键盘部分,可以降低整个系统的功耗。

在根系拉伸过程中,需实时测量并记录根系的拉力和位移。因此,系统需配置拉力传感器和位移传感器。拉力传感器选择线性度较好的 S 型封闭式的拉力传感器,型号为 NS-WL1,以电压形式输出,选择量程为 200 kg,查拉力传感器手册得到输出电压和输出力的换算公式

$$F = 59.9576U \tag{4}$$

式中 F ——输出力,kg
 U ——输出电压,V

对于位移测量,通过传动装置将根系形变量的垂直位移变化转换为轴向转角变化,然后通过编码器测量,可以较好地解决根系大形变量的测量问题。位移传感器选择增量式旋转编码器,根据机械设计部分的数据,已知斜齿轮与锥齿轮的齿数比为 2.5,可以得到编码器脉冲数与位移的计算方法,从而可以换算出脉冲计数与位移的关系式为

$$l = n/375 \tag{5}$$

式中 l ——位移,mm n ——脉冲计数

受限野外环境使用条件,电子测量系统的设计需考虑低功耗。传感器的功耗是一定的,手持设备有配套电池供电,因此系统设计中低功耗控制主要针对单片机数据采集系统。为满足低功耗的要求,选择 MSP430F149 作为单片机数据采集系统主控芯片,与普通 51 单片机系列相比,MSP430F149 具有强大的数据处理能力、超低功耗模式和方便高效的集成开发环境等优点。单片机系统及拉力传感器供电使用小型蓄电池。由于拉力传感器的供桥电压为 24 V,因此,使用 24 V 铅锌蓄电池作为电源,给拉力传感器供电的同时通过 LM2596 降压芯片向单片机系统供电。

按照以上方案,设计了电子测量部分原理框图(图 5)。

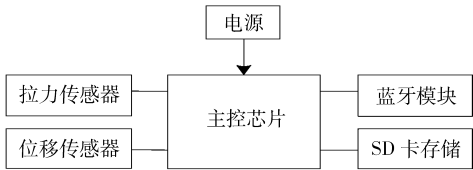


图 5 电子测量部分原理框图

Fig. 5 Block diagram of electronic test part

2.2.2 电路设计

为了尽可能地降低系统功耗和有效提高系统可靠性、稳定性,针对单片机数据采集系统需要设计最小系统板。该最小系统电路主要包括主控芯片的接口电路、电源电路、蓝牙接口电路和 SD 卡存储电路。对单片机系统供电,使用 LM2596 作为降压芯片。

系统设计的功能包括数据的采集、基于 SD 卡的 FAT 文件系统对数据以 .txt 格式的保存、蓝牙模块。如果特殊情况下需单独使用,单片机还配有接口可扩充按键输入和数码显示管。根据编码器的工作原理,选择外部中断口中的 P1.4 作为输入接口,采用外部中断的计数方式来计算脉冲数。拉力传感器采集的数据为模拟量,采集的数据需通过微控制器自带的精度为 12 位的 ADC12 模块转化为数字量,设计中将采集来的电压信号输入 ADC0。手持设备(如手机)通过蓝牙传输模块与微控制器联系,可控制整个系统的工作与否并将测量所得数据导入内存,直接观察应力-应变关系。

SD 卡存储模块用于系统工作时保存所有测量数据。本系统设计了基于 MSP430 系列单片机和 SD 卡的 FAT16 文件系统,该文件系统能够将采集的数据以 .txt 文件形式存储在 SD 卡中,然后通过读卡器方便地将采集的数据传输到通用计算机上,以便进一步的数据处理和分析。

2.2.3 软件设计

软件设计包括手持设备的软件设计和测量部分的软件设计,测量部分软件代码包括一些驱动和误差校正设置。手持设备的软件是基于 Android 平台自行开发的一种用于该测试系统实现参数计算和数图转换的软件。软件流程图如图 6 所示。

3 系统校正和试验

3.1 系统校正

设备调试安装结束之后,为了使试验系统的测量准确可靠,对系统的位移传感器和拉力传感器进行误差校正。

3.1.1 位移误差校正

位移误差来源于传动装置的啮合紧密程度和编码器停止位置。当编码器转动停止时编码器可能处于一个脉冲间的任何间隙,这种随机误差相对于整

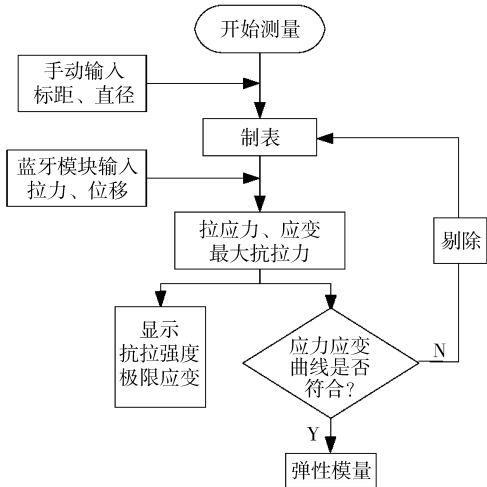


图 6 手持设备软件流程图

Fig. 6 Flow chart of PAD

个系统可以忽略不计。在每一次的测量数据中传动装置之间的间隙不可避免,此类误差属于系统误差。选取合适的位置缓慢转动手柄,让上夹具缓慢上升,在上升过程中的任意位置随机停止,并用游标卡尺测量上升距离和读取编码器的读数,对前后两次相邻的数据作差所得到的数值处理后得函数关系为

$$y = 0.9794x + 0.6177 \quad (6)$$

位移校正拟合曲线如图 7 所示。

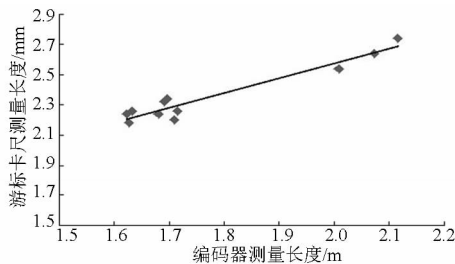


图 7 位移校正曲线

Fig. 7 Calibration curve of displacement

从式(6)可以看出两个位移量斜率大致为 1,系统误差为 0.618 mm,因此在软件代码设置中将按式(6)对编码器测出的位移量进行校正。

3.1.2 拉力误差校正

拉力传感器在出厂时已经得到校正,本系统拉力的误差主要来源于空载时上夹具的本身质量以及与导轨之间的摩擦。上述两种误差均属于系统误差,可以在多次测量后求得其误差,然后在后期测得的试验数据中将其作差即可。多次校正后所得误差函数关系式为

$$y = 1.0156x - 5.576 \quad (7)$$

拉力校正拟合曲线如图 8 所示。

从式(7)可以看出两个拉力关系式斜率近似为 1,截距为 5.576 N,因此在软件代码设置中按式(7)对拉力传感器测出的数据进行校正,可以剔除拉力

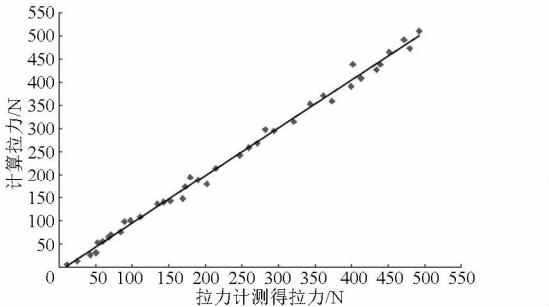


图8 拉力校正曲线

Fig. 8 Calibration curve of pull force

传感器的初始值及部件摩擦的影响,反映根系实际受到的拉伸力。

3.2 竹子根系抗拉力试验

为验证设计的系统校正后测量数据的可靠性,在西南林业大学竹种园内选取绿竹根系为试验样本进行根系抗拉力学特性研究。在进行根系拉伸试验前,需调试好试验系统,用游标卡尺测量根系的直径,每一根系直径分别选取3部分测量,最后取其平均值来确定直径。测试时,将根系的两端用夹持机构固定,标距为80 mm。启动测量系统,缓慢转动摇臂,均匀加力,直至将根系拉断。为了正确反映根系抗拉性能,排除夹持损伤导致的根系断裂,将根系在靠近两端夹具处断裂时测得的数据剔除。测试开始前,先将测量的根系直径和标距输入手持设备,然后启动测试系统,系统自动记录根系被拉伸过程中拉力及位移变化的数据,所测数据将在手持设备上显示并以FAT16的文件.txt格式自动保存到SD卡中。在采集完一个试验样本的数据之后试验者可以通过手持设备上的相关软件查看应力-应变关系曲线,根据曲线判断所采集的数据是否符合试验要求。设备不工作时,整个单片机数据采集系统的外围设备断电,单片机系统核心板进入LPM4模式,理论上功耗为微安级。

本次试验得到的数据分析包括竹根直径与抗拉力、抗拉强度的关系以及竹根应力-应变曲线(图9)。

3.3 试验结果分析

通过以上试验数据分析可得出以下结论:①丛生竹根系最大抗拉力与直径二者间关系都近似满足幂函数关系,决定系数超过0.8。竹根的抗拉强度与直径有关,其数值随着直径的增加而减小,系数不高,但拟合关系近似呈幂函数形式。符合多数植物根系抗拉力或抗拉强度与根系直径表现出幂函数

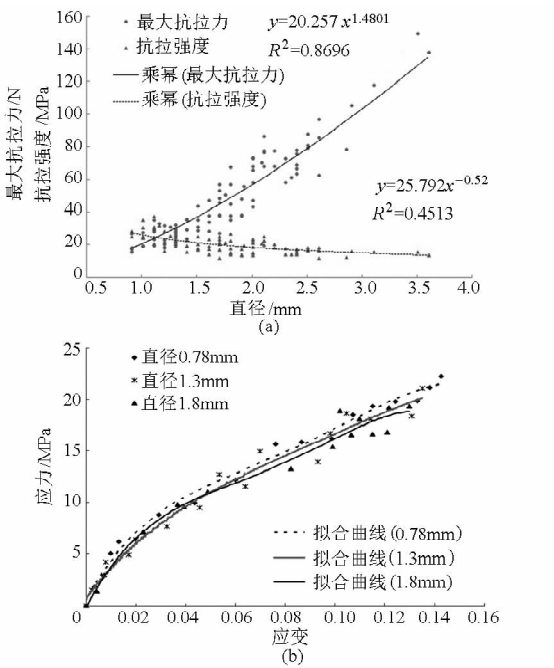


图9 竹子根系抗拉力试验曲线

Fig. 9 Bamboo root tensile resistance experiment curve

(a) 竹根直径与抗拉力、抗拉强度的关系
(b) 竹根应力-应变曲线

或指数函数关系这一力学特性的研究结果^[13-16]。②不同直径的竹应力-应变曲线为单峰曲线,表现出弹塑性材料特性,受拉初期应力-应变按比例增加,为弹性阶段。然后随着应力的增加,进入弹塑性阶段,应变变化相对较快。

4 结束语

为了满足植物根系抗拉力学特性参数测试需要,设计了一种用于野外环境下根系抗拉力学特性参数现场测试的便携式试验系统。根据系统所面临工作环境、作业方式、技术要求等方面的特殊性,分析了系统设计与实现的技术难点,阐述了系统机械装置及电子测量部分软硬件设计与实现的方法。测试系统组装调试后,为反映根系受到的真实拉伸力及变形位移量,对位移传感器和拉力传感器进行了误差校正试验,得到了校正关系曲线。最后,通过竹子根系抗拉力试验对系统的各项功能进行了验证。结果表明,所设计测试系统具有携带方便、数据自动保存、试验效率高、测试速度快和图形观测直接等特点。通过对竹子根系抗拉力学特性的试验数据的分析,验证本系统可以实现所设计的功能,测量得到的数据准确可靠。

参 考 文 献

1 Bartos M J. 101 uses for earth reinforcement[J]. Civil Engineering—ASCE, 1979, 49(1): 51-57.
2 Beke G J, McKeague J A. Influence of tree windthrow on the properties and classification of selected forested soils from Nova Scotia

[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1984, 64(2): 195 – 207.

3 Schaetzl R J, Burns S F, Small T W, et al. Tree uprooting: review of types and patterns of soil disturbance [J]. Physical Geography, 1990, 11(3):277 – 291.

4 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2051 – 2057. Li Shaocai, Sun Hailong, Yang Zhirong, et al. Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):2051 – 2057. (in Chinese)

5 Abe K, Ziemer R R. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(7): 1012 – 1019.

6 Abernethy B, Rutherford I D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(1): 63 – 79.

7 Baets S D, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1 – 2): 207 – 226.

8 史敏华, 王棣, 李任敏. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994(1): 17 – 19.

9 陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系基本力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

10 崔鹏, 陈志, 张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):149 – 153. Cui Peng, Chen Zhi, Zhang Xiaochao. Statics analysis of apple-picking robot humanoid manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):149 – 153. (in Chinese)

11 叶敏, 邹湘军, 蔡沛锋, 等. 水果采摘机器人通用夹持机构设计 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊):177 – 180. Ye Min, Zou Xiangjun, Cai Peifeng, et al. Clamping mechanism of fruits harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):177 – 180. (in Chinese)

12 周城, 杨华勇, 杨利奎. 数控车床动力卡盘输入推拉力的在线监测方法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):224 – 229. Zhou Cheng, Yang Huayong, Yang Likui. Online monitoring method of input push-pull force for CNC lathe power chuck [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):224 – 229. (in Chinese)

13 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2):3445 – 3452. Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp. 2):3445 – 3452. (in Chinese)

14 李晓凤, 陈丽华, 王萍花. 华北落叶松根系抗拉力学特性 [J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 82 – 87. Li Xiaofeng, Chen Lihua, Wang Pinghua. Tensile mechanical properties of roots of Larix principis-rupprechtii [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1):82 – 87. (in Chinese)

15 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰, 等. 油松根系抗拉应力-应变全曲线试验研究 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2):66 – 70.

16 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 138 – 140.

Design of Portable Test System for Tensile Property of Plant Roots

Zhang Yunwei¹ Yu Yong¹ Wang Dalong² Hui Shang² Wang Yanjun² Li Long¹

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To overcome the shortage of traditional test method for tensile property parameters of plant root system, one portable measuring system used in filed work is designed to obtain plant root system tensile property parameters. The system consists of two parts, mechanical device and electronic measuring part. The mechanical device is made up of rack, root holding mechanism and drive system. It adopts the building block design, whose parts can be disassembled quickly. The electronic measuring part is made of sensors, low power consumption MCU data acquisition system, and handheld device developed based on Android platform. It communicates with MCU data acquisition system via Bluetooth, as the terminal of operation, data input and the results display. The experiment results show that the measuring system is portable and accurate. It can get four classical tensile property parameters of root system from the measurement, maximum tensile resistance, tensile strength, modulus of elasticity for tension and ultimate strain. It can also show the stress-strain relationship curve, and inquiry historical data. This system can satisfy the requirements of measuring tensile property parameters of plant root system in the field work.

Key words: Plant roots Mechanical property Test system Portable