

基于 TDT 原理的灌木水分传感器探头设计与实验^{*}

王海兰¹ 张新¹ 盛文溢² 赵燕东¹
(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据时域传输 TDT 法, 设计了灌木茎体含水率测量装置。装置由高频信号源、同轴传输线、缠绕式探头及相位比较电路 4 部分组成。高频电磁波在不同介质中的传播速度不同, 表现为在不同介质中的传播相位不同, 而含水灌木介电常数的大小主要取决于其含水率的大小, 因此通过测量电磁波在同轴电缆上 A 和缠绕于灌木茎体上探头 B 的相位差来获取灌木的含水率。选择吸水棉棒来模拟不同含水率的灌木, 研究高频信号源工作频率、探头结构对相位差的影响。实验表明, 当探针长度为 60 cm, 信号源频率为 50 MHz 和 100 MHz 时, A、B 两路电磁波信号的相位差与棉棒吸水率变化呈单调性, 且具有良好的相关性。

关键词: 灌木 水分传感器 探头结构 时域传输原理 测量

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0259-06

引言

水分是影响植物生长发育的重要环境因子。各种植物从环境中不断吸收水分以满足正常生命活动的需要。环境水分紧张必然会引起植物本身的水分紧张, 植物体内总含水量在一定程度上反映植物适应干旱环境的能力。而植物范畴之一的灌木, 还作为农作物生产系统中一种重要的可再生生物资源, 具有来源广、数量大等特点。研究灌木体含水量对森林生态系统恢复和可再生资源合理利用, 具有重要的意义^[1]。

多年来, 国内外许多科学工作者为了深入研究植物体的水生理特性, 尝试了多种方法去测量植物含水率, 如直接干燥法、电阻法和介电常数法等。干燥法所测数值准确, 可作为相关仪器的标定, 但其在取样中会对植物有较大伤害, 无法实现在线测量^[2-6]。电导法测量植物体含水率存在局限性, 灵敏度欠佳, 并且植物组织的相对含水率与电阻值的联系并不紧密^[7]。介电常数法是目前使用最为广泛的方法, 其中时域反射仪(TDR)是目前水分测量技术中实时性、准确性、快速性最高的仪器, 但其技术难度大、成本高, 限制了在国内的发展和应用。为了解决 TDR 的高成本及技术难题, 本文基于时域传输原理(Time domain transmissometry, TDT)^[8-10], 研究一种方便实用、实时的灌木水分无损检测方法。

1 灌木含水率测量原理

基于时域传输原理(TDT)的灌木茎体水分测量原理如图 1 所示。该系统由高频信号源、同轴传输线、缠绕式探头和相位比较器 4 部分组成。

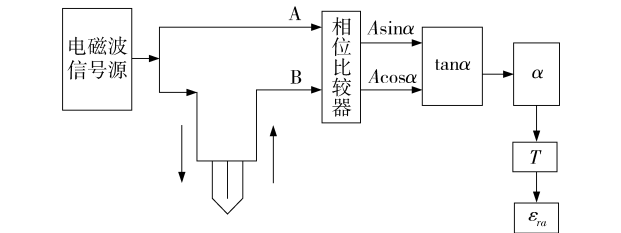


图 1 TDT 灌木茎体水分传感器测量原理图
Fig. 1 Block diagram of TDT stem moisture sensor

高频信号源产生的电磁波信号分成两路: 一路通过同轴传输线直接送到相位比较器的 A 端, 其传输时间 T' 及其相位都是确定值, 作为稳定电磁波相位比较的基准。另一路信号通过传感器探头后输入相位比较器的 B 端, 再与从 A 端送来的正弦波相位基准信号进行相位比较。初始状态(即探针在空气中)时, 两路信号有着一个基准相位差, 当探针缠绕于含水灌木茎体上时, B 路电磁波信号到达相位比较器时的延迟时间随灌木水分的不同而变化, 相位比较器输出一个反映 B 落后于 A 的相位差 α , 可得到两路高频电磁波信号传输的时间差

$$T = \frac{\alpha}{360^\circ} \frac{1}{f} \tag{1}$$

收稿日期: 2013-07-02 修回日期: 2013-09-26
^{*} 国家自然科学基金资助项目(31371537)、农业科技成果转化资金资助项目(2012GB23600634)、北京市教育委员会共建项目建设计划科学研究与科研基地建设资助项目(2008BJKY01)和国际科技合作专项(2010DFA34670)
作者简介: 王海兰, 副教授, 主要从事智能检测研究, E-mail: wanghailan@bjfu.edu.cn
通讯作者: 赵燕东, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测与控制研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

其中 f 为高频信号源的频率。传感器探头长度 L 已知, T 可通过相位比较器测量得到,灌木茎体的表观介电常数表达式为

$$\varepsilon_{ra} = \left(\frac{c_0 T}{L} \right)^2 \tag{2}$$

式中 c_0 ——电磁波在真空中的速度,取 3×10^8 m/s
在没有介质损耗的情况下,表观介电常数 ε_{ra} 可近似等于介电常数 ε_r ,即 $\varepsilon_{ra} \approx \varepsilon_r$,再根据体积含水率-有效介电常数经验关系等式^[3]

$$\theta = -0.251 + 4.66 \times 10^{-2} \varepsilon_r - 4.93 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2$$
$$(r^2 = 0.89, n = 151) \tag{3}$$

便可计算得到灌木体积含水率 θ ,其中 r^2 为拟合系数, n 为试验样本数目。

2 实验

灌木在春季和夏初的含水率最高,变化范围为 40% ~ 50%^[12-13],而棉棒的吸水率为 0 ~ 105%,可以满足灌木含水测量范围。本文使用缠绕有探头的棉棒(长 20 cm,直径 2 cm,质量为 22.83 g)模拟灌木,其中棉棒用白纱布缝制成内部填充有棉花的圆柱形,如图 2 所示。用上海上天精密仪器有限公司生产的 JY10002 型电子天平(最大量程为 1 000 g,精度 0.01 g)测量得到棉棒体的吸水率,用北京普源生产的 DS1302CA 型示波器(测量的最大频率为 300 MHz,采样率范围为 1 Sa/s ~ 2 GSa/s)获取 A、B 两路电磁波信号的波形。随着棉棒吸水率的变化,

A、B 两路电磁波信号相位差会发生变化。选择合适的探头结构及高频信号源的频率,以保证 A、B 两路电磁波信号的相位差变化呈单调性,即在 0° ~ 180° 范围内。

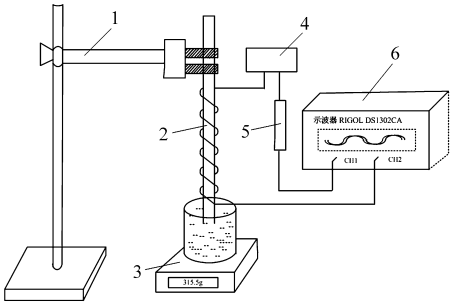


图 2 棉棒模拟实验装置图

Fig. 2 Device of cotton swab simulation expriment

1. 支架 2. 吸水棉棒 3. 天平 4. 高频信号源 5. 同轴传输线 6. 示波器

2.1 信号源频率的选择

取信号源频率分别为 500 kHz、10 MHz、50 MHz、100 MHz、150 MHz、200 MHz、300 MHz,当棉棒的吸水量从 0、1.57、5.43、9.24、12.65、17.87、24.04 g (对应吸水率分别为 0、6.9%、23.8%、40.5%、55.4%、78.3%、105%) 变化时,用示波器测量 A、B 两路电磁波信号相位差的变化。其中,信号源频率为 500 kHz、10 MHz、300 MHz 时,A、B 两端的相位差与棉棒吸水量的相关性不明显,选取相关性较好的信号源频率为 50 MHz、100 MHz、150 MHz、200 MHz 时,得到的测试结果如图 3 所示。

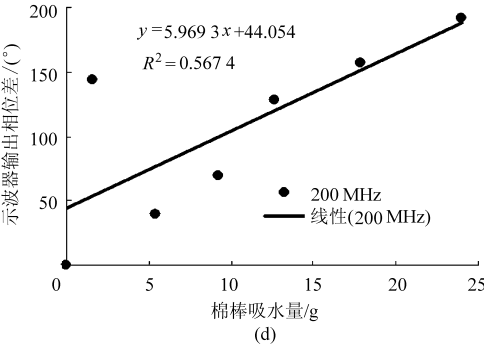
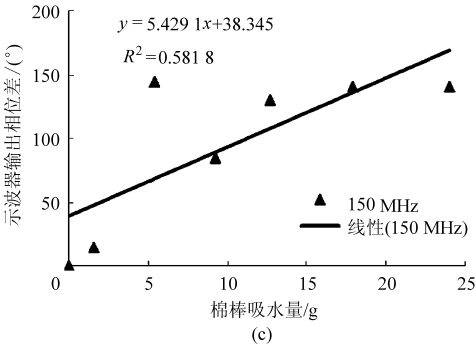
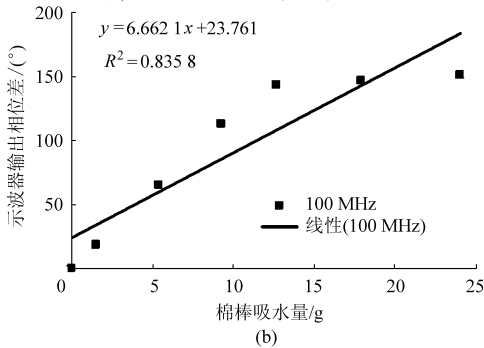
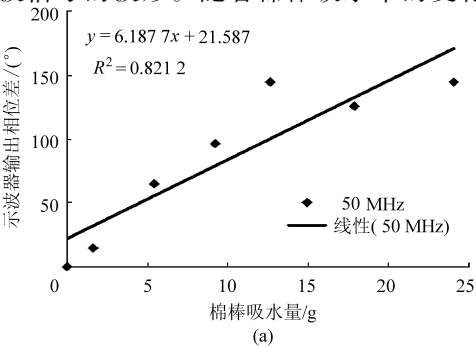


图 3 棉棒吸水量与示波器输出相位差之间的关系

Fig. 3 Relationship between water content of cotton swab and phase difference of oscilloscope output

- (a) 信号源频率为 50 MHz (b) 信号源频率为 100 MHz (c) 信号源频率为 150 MHz (d) 信号源频率为 200 MHz

由实验可知:信号源频率为 200 MHz、150 MHz 时,探头两端 A、B 信号相位差变化单调性较差,而频率为 50 MHz、100 MHz 时,A、B 信号的相位差成单调变化且幅度较大,能满足测量精度的要求。

2.2 探头长度的选择

探头结构对传感器的性能有很大的影响,为了满足实际灌木茎体含水量的测量,同时又从电路的角度能够与仪表电路匹配,本文的探头采用缠绕式的平行双导线结构(如图 4 所示),其中 D 为双导线的间距, D' 为每两匝之间的间距, d 为探头直径。

本文选取探头的直径 d 为 0.8 cm,双平行线之间间距 D 为 0.2 cm,每两匝之间的间距 D' 为 2 cm,选取信号源频率为 50 MHz、100 MHz,根据式 (2) 可以推算出 $17\text{ cm} < L < 150\text{ cm}$ 。

为了研究双平行线探头长度对测量性能的影响,本文选取双平行线探头长度 L 分别为 20、33、

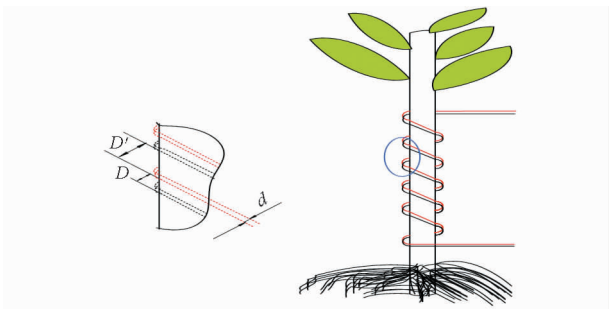


图 4 传感器探头结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of sensor probe

60、80 cm,其缠绕匝数分别为 2、4、9、12,选取信号源频率分别为 50、100 MHz,棉棒质量为 22.83 g,棉棒吸水量分别为 0、1.57、5.43、9.24、12.65、17.87、24.04 g。

实验结果如图 5 所示,结果表明,当探头长度分别为 20、33、80 cm 时,棉棒的吸水量与示波器输出的 A、B 两路信号相位差之间的单调性较差,拟合系

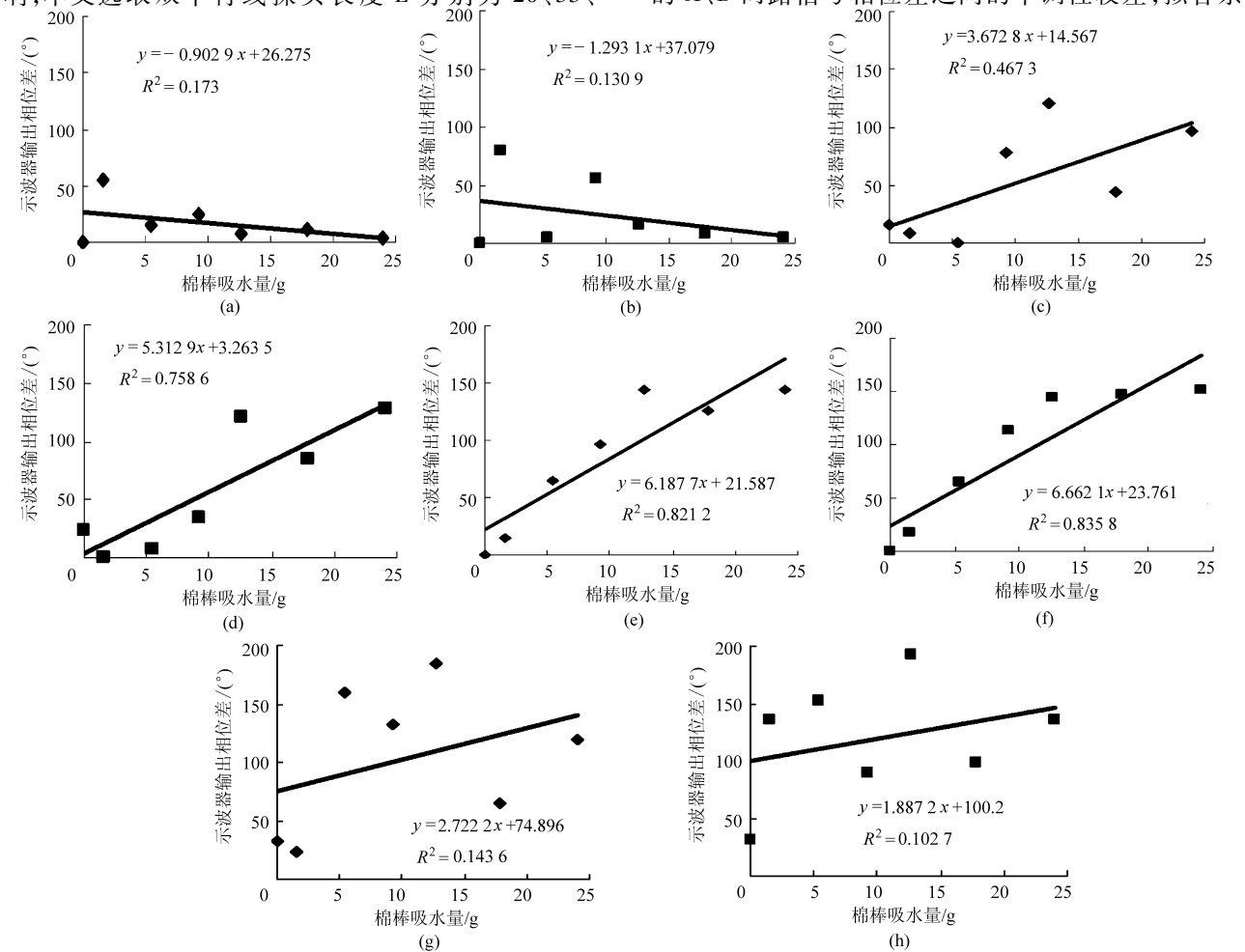


图 5 探针长度变化时,棉棒吸水量与示波器输出相位差的关系

Fig. 5 Relationship between water content of cotton swab and phase difference of oscilloscope output when the length of sensor probe changes

- (a) 探针长度 20 cm,信号源频率 50 MHz
- (b) 探针长度 20 cm,信号源频率 100 MHz
- (c) 探针长度 33 cm,信号源频率 50 MHz
- (d) 探针长度 33 cm,信号源频率 100 MHz
- (e) 探针长度 60 cm,信号源频率 50 MHz
- (f) 探针长度 60 cm,信号源频率 100 MHz
- (g) 探针长度 80 cm,信号源频率 50 MHz
- (h) 探针长度 80 cm,信号源频率 100 MHz

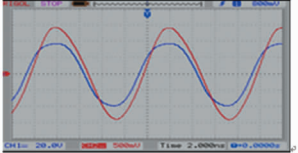
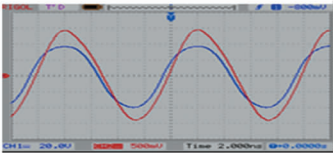
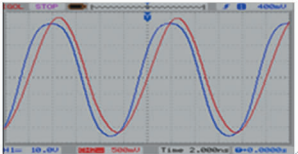
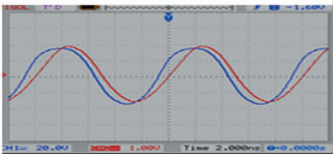
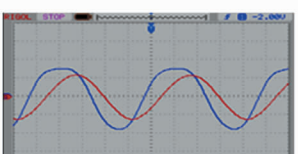
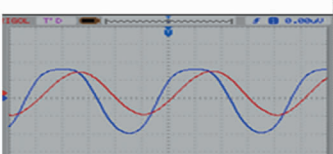
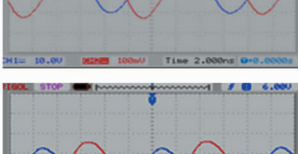
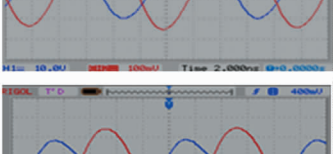
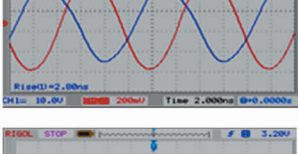
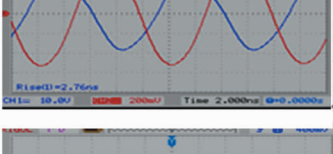
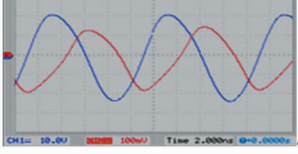
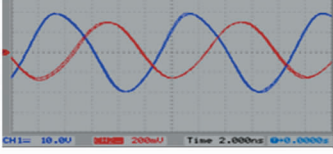
数较低。而同样的工作频率下,当探头的长度为60 cm时,棉棒的吸水量与示波器测量的A、B两路信号的相位差之间的单调性较好,拟合系数较高。

3 结果与分析

选取信号源工作频率分别为100 MHz、50 MHz,探头长度为60 cm的棉棒进行试验,用示波器测量

A、B两路信号的相位变化情况,结果如表1所示。
由表1可以看出,在50 MHz和100 MHz信号源频率下,随着棉棒吸水量的增加,示波器测量出的A、B信号相位差随之变化幅度增大;棉棒吸水量与示波器测量出的A、B信号相位呈良好的线性关系,拟合系数分别为0.821 2和0.835 8,验证了TDT时域测量原理的可行性。

表 1 随棉棒吸水量的变化示波器输出的 A、B 两路信号波形图
Tab.1 Waveform of signals from A,B paths of oscilloscope changing with water content of cotton swab

棉棒吸 水量/g	信号源频率为 50 MHz		信号源频率为 100 MHz	
	波形图	相位差/(°)	波形图	相位差/(°)
0		0		0
1.57		1.44		18
5.43		64.8		64.8
9.24		111		123
12.65		144		144
17.87		104		147
24.04		144		151

4 结论

(1)根据时域传输 TDT 法,研制了灌木茎体含水量的测量装置,选择吸水棉棒模拟不同含水量的灌木,来研究传感器探头的结构。实验中设置当棉棒的吸水量从 0、1.57、5.43、9.24、12.65、17.87、24.04 g (对应吸水率分别为 0、6.9%、23.8%、40.5%、55.4%、78.3%、105%)变化时,选取信号源频率为 500 kHz、10 MHz、50 MHz、100 MHz、150 MHz、200 MHz、300 MHz,选取双平行线探头长度为 20、33、60、80 cm,研究了高频信号源工作频率、探头结构对示波器测量 A、B 两路电磁波信号相位

差的变化特性,从而初步确定传感器的探头结构。

(2)实验结果表明,在信号源频率为 50 MHz、100 MHz 时,探头长度为 60 cm 时,当质量含水率在 0%~105%之间变化时,A、B 两路电磁波信号的相位差变化幅度为 0°~180°,变化幅度较大,A、B 两路电磁波信号的相位差与吸水棉棒吸水量变化呈单调性,且具有良好的相关性。当工作频率为 50 MHz 时,相关系数为 0.821 2;工作频率为 100 MHz 时,相关系数达到 0.835 8。可以得出,用棉棒模拟灌木体吸水实验,验证了采用时域传输原理 TDT 进行灌木体含水率的测量方法是可行的,这将为节水灌溉技术的进一步发展提供一定的科学依据。

参 考 文 献

- 1 杜宁. 暖温带 5 种常见灌木对水分和光照的生理生态响应研究[D]. 济南:山东大学,2010.
Du Ning. Ecophysiological responses of five common shrubs to water and light in the warm temperate zone[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- 2 Nadler A, Raveh E, Uri Yermiyahu, et al. Evaluation of TDR use to monitor water content in stem of lemon trees and soil and their response to water stress[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(2): 437-448.
- 3 Wullschlegel S D, Hanson P J, Todd D E. Measuring stem water content in four deciduous hardwoods with a time-domain reflectometer [J]. Tree Physiology, 1996, 16(10): 809-815.
- 4 Irvine J, Grace J. Non-destructive measurement of stem water content by time domain reflectometry using short probes [J]. Journal of Experimental Botany, 1997,8(3): 813-818.
- 5 Jones S B, Wraith J M, Or D. Time domain reflectometry measurement principles and applications[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(1): 141-153.
- 6 Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content; measurement in coaxia transmission lines [J]. Water Resources Research,1980,16(3):574-582.
- 7 宋蛰存,林迎忠,顾广滨. 活性对电导法测量木材含水率的影响[J]. 东北林业大学学报, 1994,22(1): 113-116.
Song Zhecun, Lin Yingzhong, Gu Guangbin. The influence of wood cell activity on moisture content measurement by electric resistance[J]. Journal of Northeast Forestry University,1994,22(1):113-116. (in Chinese)
- 8 Constantz J Murphy F. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1990,119(1-4):31-42.
- 9 Blonquist Jr J M, Jones S B, Robinson D A. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2005,314(1-4):235-245.
- 10 冯磊. 基于时域传输原理的土壤水分测量技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2011.
Feng Lei. Study on soil moisture measurement technique based on time domain transmission principle [D]. Beijing: China Agricultural University,2011. (in Chinese)
- 11 Zegelin S J, White I, Jenkins D R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry[J]. Water Resources Research,1989, 25(9):2367-2376.
- 12 努尔古丽·马坎,张毓涛,岳朝阳,等. 天山中部 9 种乔灌木可燃物含水率及脂肪含量分析[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 146-150.
Nuerguli Makan, Zhang Yutao, Yue Zhaoyang, et al. Analysis of the water content and fuel moisture content of forest combustible in the center of Tianshan Mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2012, 39(6): 146-150. (in Chinese)
- 13 张景群. 不同树种含水率季节变化的测定[J]. 森林防火,2000,65(2):17-18.
- 14 赵燕东,王海兰,胡培金,等. 基于活立木介电特性的植物茎体含水量测量方法[J]. 林业科学,2010,46(11):179-183.
Zhao Yandong, Wang Hailan, Hu Peijin, et al. A method for measuring plant stem water content based on plant dielectric properties[J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(11):179-183. (in Chinese)
- 15 张慧娟,赵燕东,孙宇瑞. 基于 3-D 图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法[J]. 农业机械学报,2011, 42(1):154-158.
Zhang Huijuan,Zhao Yandong,Sun Yurui. Identification of plant morphology wilt-induced by water stress with 3-D based image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1): 154-158. (in Chinese)
- 16 王克栋,王一鸣,冯磊,等. 基于相位检测原理的土壤水分时域反射测量技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 72-76.
Wang Kedong,Wang Yiming, Feng Lei, et al. Measurement of soil moisture based on phase detecting principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1): 72-76. (in Chinese)

17 赵燕东,聂铭君. 双针结构土壤水分传感器探针最优长度分析与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42 (11):39 – 43.
Zhao Yandong, Nie mingjun. Optimalanalysis for determining the dual-pin length of soil moisture probe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42 (11):39 – 43. (in Chinese)

18 王海兰,白陈祥,赵燕东. 乔木茎体水分传感器探针结构实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 176 – 179 .
Wang Hailan, Bai Chenxiang, Zhao Yandong. Experiment on the probe configuration of stem water content measuring sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):176 – 179. (in Chinese)

Simulated Experiment on Shrubs Moisture Sensor Probe

Structure Based on TDT Principle

Wang Hailan¹ Zhang Xin¹ Sheng Wenyi² Zhao Yandong¹

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on time domain transmissometry (TDT), measurement device for shrub stem water content was designed. This device consists of high frequency signal source, coaxial transmission lines, winding probe and phase comparison circuit. Propagation velocity of high frequency electromagnetic wave varies in different medium, and the propagation phase also changes. The dielectric constant of wet shrubs mainly depends on its moisture content. By measuring phase difference between the coaxial cable A and the winding stem probe B, the moisture content in shrubs was obtained. Absorbent cotton stick was choice to simulate shrubs with different moisture content. And the influence of the phase difference from frequency of high frequency signal source and the structure of the probe was studied. Experimental results show that under the conditions of 60 cm probe length, 50 MHz and 100 MHz signal source frequency, the phase difference between the coaxial cable A and the winding stem probe B is monotonic with the change of water content, and there exists a good correlation between phase difference and moisture content.

Key words: Shrub Moisture sensor Probe structure TDT Measuring

(上接第 270 页)

Position-posture Closed-loop Control of Six-legged Walking Robot

Based on Inverse Velocity Kinematics

Chen Gang Jin Bo Chen Ying

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Position-posture control system of six-legged walking robot has the characteristics: tight coupling, redundancy, nonlinearity. An inverse velocity kinematics model of six-legged walking robot was constructed through research on inverse velocity kinematics of single leg. Then the control on position and posture of six-legged walking robot was decoupled to two closed-loops control, the position and the posture closed-loop control, based on the inverse velocity kinematics. The proportional control strategy was employed to implement the closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot. Finally, a co-simulation on the closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot was carried out by using MATLAB and ADAMS, and the results verify that the method of closed-loop control on the position-posture of six-legged walking robot is correct.

Key words: Six-legged walking robot Inverse velocity kinematics Position-posture Closed-loop control