

树木微钻仪钻针阻力表达方法研究

姚建峰¹ 赵燕东² 张会儒^{3,4} 宋新宇⁵ 雷相东^{3,4} 唐守正^{3,4}

(1. 信阳师范学院计算机与信息技术学院, 信阳 464000; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;

3. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 4. 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091;

5. 信阳师范学院数学与统计学院, 信阳 464000)

摘要: 树木微钻仪钻针阻力不能直接测量,但能通过直流电机的电流、电压、功率、转速等参数间接表达。为了提高钻针阻力测量精度,进一步研究了钻针阻力表达方法。阐述了树木微钻仪的工作原理,分析了钻针阻力与直流电机电流、电压、功率、转速之间的关系,提出了6种钻针阻力表达方法。使用自主研发的树木微钻仪和德国 Resistograph 650-S型微钻仪对4个树种的木材密度进行测试,分别建立自主研发微钻仪每种钻针阻力表达方法各自的平均值、Resistograph 650-S型钻针阻力平均值与木材绝干密度之间的线性模型。测试结果表明:自主研发的树木微钻仪直流电机电流、电压和功率与木材绝干密度之间的线性相关系数均大于0.9,因此可使用直流电机的电流、电压或者功率来间接表达钻针阻力;转速修正后的直流电机电压与木材绝干密度的相关性最高,因此使用转速修正后的直流电机电压表达钻针阻力更为适宜;自制微钻仪转速修正后的直流电机电压与木材绝干密度之间的线性相关系数比德国 Resistograph 650-S型微钻仪高0.0053,说明自制树木微钻仪的设计方案和钻针阻力表达方法合理。

关键词: 树木微钻仪; 微损测量; 钻针阻力; 线性模型

中图分类号: S758.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)08-0271-07

OSID:



Drill Resistance Expression Method of Tree Micro Drill Instrument

YAO Jianfeng¹ ZHAO Yandong² ZHANG Huiru^{3,4} SONG Xinyu⁵ LEI Xiangdong^{3,4} TANG Shouzheng^{3,4}

(1. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

4. Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling,

National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

5. School of Mathematics and Statistics, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The drill resistance of tree micro drill instrument can not be measured directly, but can be expressed indirectly by the current, voltage, power, speed and other parameters of DC motor. In order to improve the measurement accuracy of drill resistance, the expression method of the drill resistance was further studied. The principle of the micro drill instrument was described, and the relationship between the drill resistance and the current, voltage, power and speed of the DC motor controlling the drill rotation speed was analyzed, and six drill resistance expression methods were putted forward. The test wood samples included hardwood, softwood and conifer. The absolute dry wood density of each sample was measured. The drill resistance data was tested by self-developed micro drill instrument and Resistograph 650-S produced by German Rinntech Company. Average resistance value expressed by each resistance expression method of self-developed micro drill instrument and average resistance value measured by Resistograph 650-S were calculated to each test sample. The linear models between each average resistance value and the absolute dry wood density were established. The results showed that the linear correlation coefficient between DC motor current, voltage, power and absolute dry wood density were higher than 0.9, and the current, voltage and power of DC motor can be used to express the relative

收稿日期: 2021-04-12 修回日期: 2021-05-12

基金项目: 河南省科技发展计划项目(212102110209)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(CAFYBB2018SZ007)

作者简介: 姚建峰(1980—),男,讲师,博士,主要从事林业装备自动化研究,E-mail: 249749251@qq.com

通信作者: 唐守正(1941—),男,研究员,中国科学院院士,主要从事林业统计和生物数学模型研究,E-mail: stang@caf.ac.cn

magnitude of drill resistance; the linear correlation coefficient between DC motor voltage adjusted by rotation speed of DC motor and absolute dry wood density was the highest, so when measuring absolute dry wood density, the drill resistance expressed by DC motor voltage adjusted by rotation speed of DC motor was more appropriate in the six drill resistance expression methods. The linear correlation coefficient of self-developed micro drill instrument between DC motor voltage adjusted by rotation speed of DC motor and absolute dry wood density was 0.005 3 higher than that of the German Resistograph 650 – S, which indicated that the design scheme and the drill resistance expression method were reasonable. The design scheme and the drill resistance expression method proposed had great reference value for the independent production of micro drill instrument in China.

Key words: tree micro drill instrument; micro destructive measurement; drill resistance; linear model

0 引言

树木微钻仪是使用电机控制钻针匀速钻入树木、并实时测量钻针阻力的一种精密测量仪器。钻针阻力与木材密度正相关^[1],因此,可以根据钻针阻力获取钻针路径上的木材密度、木材缺陷、树木年轮等信息。树木微钻仪钻针针头宽度仅 3 mm,对被测对象损伤较小^[2],这为活立木密度^[3-4]、树木年轮^[5-6]、木材腐朽程度^[7-8]等测量提供了一种微损测量方法。目前,树木微钻仪主要由德国 Rinntech 公司和 IML(Instrumenta Mechanik Labor)公司生产,我国还没有厂家生产树木微钻仪。鉴于技术保密,我国科研人员尚不能完全掌握树木微钻仪的机械结构和钻针阻力的表达方法。在唐守正院士指导下,中国林业科学研究院资源信息研究所和北京林业大学工学院成立了树木微钻仪研制团队,设计了树木微钻仪的机械传动结构和控制系统^[9-10],研究了微钻仪钻针转速控制算法^[11],提出了钻针阻力的表达方法^[9-13]、钻针阻力滤波算法^[12-13]和树木年轮识别算法^[6,9,13]。经测试,自主研制的树木微钻仪的平均年轮测量精度比德国 Rinntech 公司生产的 Resistograph 650 – S 型微钻仪高约 10 个百分点^[9]。本文在前期研究的基础上,进一步研究钻针阻力表达方法,建立各表达方法钻针阻力与木材绝干密度之间的线性模型,选择与木材绝干密度相关系数最高的作为树木微钻仪的钻针阻力表达方法,建立 Resistograph 650 – S 型微钻仪钻针阻力与木材绝干密度之间的线性模型,对比两个仪器的钻针阻力与木材密度的相关性,以验证自主研制的树木微钻仪钻针阻力表达方法的合理性。

1 树木微钻仪工作原理

自制的树木微钻仪由 2 个电机控制:一个是直流电机,控制钻针的旋转速度;另一个是步进电机,控制钻针的进给速度^[9-10]。树木微钻仪机械传动结构如图 1 所示。钻针通过钻针夹与直流电机轴连接,钻针转速与直流电机转速相同。传动丝杆通过

联轴器与步进电机轴连接,传动丝杆转速与步进电机转速相同。丝杆滑块中央有一个螺纹孔,螺纹孔嵌套在传动丝杆上,当传动丝杆旋转时,丝杆滑块可以在传动丝杆上移动。为了保证丝杆滑块沿直线方向运动,减小丝杆滑块振动,在丝杆滑块底部设计一个“V”形槽,丝杆滑块通过“V”形槽套接在直线导轨上。直流电机安装在丝杆滑块上。当步进电机旋转时,步进电机带动传动丝杆同步旋转,使丝杆滑块在直线导轨上移动,从而带动直流电机和钻针移动。

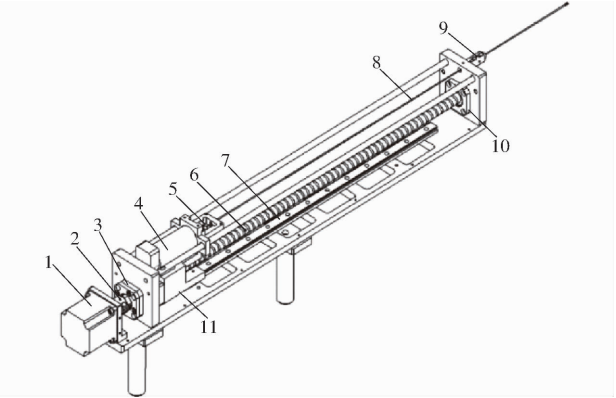


图 1 机械传动结构图

Fig. 1 Mechanical transmission structure diagram

1. 步进电机 2. 联轴器 3. 后丝杆支撑座 4. 直流电机 5. 钻针夹 6. 传动丝杆 7. 直线导轨 8. 钻针 9. 钻针套头 10. 前丝杆支撑座 11. 丝杆滑块

钻针针头是扁平形状,针头宽度是 3 mm,钻针针杆直径是 1.5 mm^[14]。由于钻针针头宽度是钻针针杆直径的 2 倍,因此,钻针针杆部分的阻力比较小,钻针阻力主要集中在钻针针头上。钻针形状如图 2 所示。

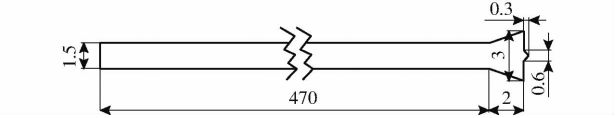


图 2 钻针形状图

Fig. 2 Geometry of drill needle

直流电机的电压平衡方程^[15]为

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \varepsilon$$

(1)

其中 $\varepsilon = C_e \Phi i_a$ (2)

式中 u_a ——电枢瞬时电压,V
 i_a ——电枢瞬时电流,A
 ε ——电枢反电动势,V
 R_a ——电枢内阻, Ω L_a ——电枢电感,H
 C_e ——电机电势常数
 t ——时间,s Φ ——每极磁通,Wb

直流电机转矩平衡方程^[15]为

$$J \frac{dn}{dt} = M - M_L \tag{3}$$

其中 $M = C_m \Phi i_a$ (4)

式中 M ——电磁转矩,N·m
 M_L ——负载转矩,N·m
 J ——转速惯量,N·m·s·min/r
 n ——转子转速,r/min
 C_m ——转矩常数

由式(1)~(4)可得:当木材密度增大时,钻针阻力增大,电机负载转矩增大,直流电机转速降低,从而使直流电机反电动势减小,电枢电流增加,电机输出转矩(当电机转速误差较小时,近似等于电机负载转矩)增加;当木材密度减小时,钻针阻力减小,电机负载转矩减小,直流电机转速上升,从而使直流电机反电动势升高,电枢电流减小,电机输出转矩减小。为了提高树木微钻仪钻针转速的控制精度,采用速度环控制直流电机转速。当直流电机转速高于设定转速时,直流电机控制器减小直流电机两端的平均电压,使直流电机的电流减小,从而减小电机输出转矩和输出功率,使直流电机转速下降;当直流电机转速低于设定转速时,直流电机控制器增加直流电机两端的平均电压,使直流电机的电流增大,从而增加直流电机的输出转矩和输出功率,使直流电机转速上升。

电机输出转矩与直流电机的电流、电压、功率正相关,与电机转速负相关。电机的主要负载是钻针,因此,钻针阻力与直流电机的电流、电压、功率正相关,与直流电机转速负相关。由于电机输出转矩不易实时测量,因此,可使用直流电机的电流、电压和功率来表示钻针阻力的相对值。由于直流电机转速误差不能完全消除,为了进一步优化钻针阻力表达方法,本文使用修正因子 k 修正钻针阻力,计算公式为

$$k = n_0/n \tag{5}$$

$$U_1 = kU \tag{6}$$

$$I_1 = kI \tag{7}$$

$$P_1 = kP \tag{8}$$

式中 n_0 ——直流电机设定转速,r/min

U ——直流电机电压,V
 I ——直流电机电流,A
 P ——直流电机功率,W
 U_1 ——修正后的直流电机电压,V
 I_1 ——修正后的直流电机电流,A
 P_1 ——修正后的直流电机功率,W

分别使用直流电机的电流 I 、电压 U 和功率 P 以及修正后的电流 I_1 、电压 U_1 、功率 P_1 这 6 个参数表达钻针阻力,分别建立这 6 种阻力表达方法与木材绝干密度之间线性模型,选择与木材绝干密度相关系数最高的阻力表达方法作为微钻仪的钻针阻力表达方法。

2 材料与方法

2.1 试验材料与仪器

试验材料是 2020 年 9 月在信阳师范院校内的天然次生林中采样的 2 棵马尾松、2 棵麻栎、1 棵泡桐和 1 棵樱桃的树干木材,试验树种包含硬阔叶树、针叶树和软阔叶树。试验仪器主要有自主研发的树木微钻仪和德国 Rienntech 公司生产的 Resistograph 650-S 型微钻仪。自制微钻仪的钻针旋转速度 n_0 设置为 3 500 r/min,钻针进给速度设置为 15 cm/min,控制器每 1 ms 采样一次直流电机运行参数和钻针位置。Resistograph 650-S 型微钻仪的钻针旋转速度未知,钻针进给速度为 60 cm/min,钻针每前进 0.01 mm 采样一次钻针阻力,钻针阻力的具体测量方法未知,阻力单位为该公司自定义的阻力单位“Resi”,在该公司开发的 DECOM 软件中阻力以百分比的形式显示。

2.2 试验方法

2.2.1 试验样品加工方法

在每棵树木的树高 1.3、2.3、3.3 m 处附近截取树干通直、无明显缺陷、长度为 0.4 m 的树干,把截取的树干加工成 3.0 cm×3.0 cm×3.0 cm 的正方体木块。试验样品总数为 240 个,其中,泡桐 60 个,马尾松 80 个,樱桃 50 个,麻栎 50 个。

2.2.2 试验样品干燥方法

将试验样品放入干燥箱中,干燥箱温度设置为 60℃,恒温干燥 6 h;再将干燥箱温度设置为 105℃,恒温干燥 72 h,使木块干燥至绝干状态;关闭干燥箱,试验样品温度降到室温(20℃)时将试验样品放入玻璃干燥器中保存^[16]。使用天平测量每个样品的绝干质量 m ,测量精度为 0.01 g。使用游标卡尺测量每个样品的长 a 、宽 b 、高 h ,精度为 0.01 mm。每个样品的绝干密度计算公式为

$$\rho = m/(abh) \tag{9}$$

2.2.3 钻针阻力测量的取样方法

使用自制的微钻仪和德国 Resistograph 650-S 型微钻仪沿木材径向方向钻入正方体木块,钻针钻入方向与木块的一条边平行。为了防止 2 个仪器的钻针路径重合,2 个仪器的钻针钻入点之间的距离在 1 cm 左右。使用游标卡尺测量钻针路径的长度,测量精度为 0.01 mm。

3 数据处理

3.1 自制树木微钻仪钻针阻力数据处理

自制的树木微钻仪的 DSP (Digital signal processing) 控制器每 1 ms 采样一次直流电机的电流 I 、电压 U 、功率 P 、转速 n 和钻针位移 s ,并存储在 SD 存储卡中。根据每个样品的钻针路径长度,选取每个测量数据中钻针钻入木材部分的直流电机电流 I 、电压 U 、功率 P 和实际转速 n 数据,以 U 、 I 、 P 、 U_1 、 I_1 、 P_1 这 6 个参数表达钻针阻力,计算每个样品每种钻针阻力表达方法的平均阻力。

(1) 直流电机电流 I 计算方法

在自制的树木微钻仪中,采用电阻法测量直流电机电枢电流^[17],在直流电机回路中串联一个 15 mΩ 精密采样电阻,然后把采样电阻两端的电压输入到 DSP 控制器的 ADCINA 引脚。当 ADCINA 引脚输入电压 V_{in} 低于 0 V 时,ADC 转换结果为 0;当 V_{in} 大于或者等于 3 V 时,ADC 转换的结果为 4 095;当 V_{in} 在 0~3 V 时,ADC 转换结果计算公式^[18]为

$$D = 4\,095 V_{in} / 3 \tag{10}$$

在本设计中,电流放大器的放大倍数是 50,因此,输入到 DSP 控制器的电压 V_{in} 计算公式为

$$V_{in} = 0.015 \times 50 I \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)中得直流电机电流计算公式

$$I = 3 D / (4\,095 \times 0.015 \times 50) \tag{12}$$

(2) 直流电机电压 U 计算方法

在自制的树木微钻仪中,直流电机两端的平均电压采用 PWM (Pulse width modulation) 方式控制^[19]。PWM 信号频率为 10 kHz,控制 PWM 信号周期的寄存器 T1PR 的值设为 7 499,电源电压为 24 V,因此,电机两端的平均电压计算公式为

$$U = 24 C / (7\,499 + 1) \tag{13}$$

式中 C ——PWM 信号比较寄存器 CMPR2 的值

(3) 直流电机功率 P 计算方法

直流电机功率计算公式为

$$P = UI \tag{14}$$

(4) 直流电机转速 n 计算方法

在本设计中,直流电机每旋转 1 周,光电编码器

的两路信号线各发送 1 024 个脉冲信号,定时器 T2 的计数值为 4 096。DSP 定时器 T2 每 1 ms 的计数值为 n_1 ,因此,直流电机转速 n (r/min) 计算公式为

$$n = 60 \times 1\,000 n_1 / 4\,096 \tag{15}$$

(5) 钻针位移 s 计算方法

在本设计中,DSP 控制器发送控制信号给步进电机驱动器,再由步进电机驱动器控制步进电机的旋转速度和旋转方向。从理论上分析,步进电机的旋转角度由 DSP 控制器发出的控制脉冲的个数决定,但在实际工作中,由于步进电机存在丢步情况^[20],为了提高钻针位置的测量精度,本设计使用带光电编码器的步进电机控制钻针进给速度,通过采样步进电机实际的旋转角度来计算钻针的位移。步进电机每旋转 1 周,步进电机光电编码器两路信号线各发送 1 000 个脉冲给 DSP 控制器,定时器 T4 的计数值为 4 000。滚珠丝杆导程为 5 mm,即滚珠丝杆每旋转 1 周,钻针的直线位移为 5 mm。因此,钻针在第 i 毫秒内的位移 s_i (mm) 计算公式为

$$s_i = 5 n_2 / 4\,000 \tag{16}$$

式中 n_2 ——定时器 T4 计数值

钻针在时间 j (ms) 内的总位移 s (mm) 计算公式为

$$s = \sum_{i=1}^j s_i \tag{17}$$

(6) 每种钻针阻力表达方法平均值计算方法

自制树木微钻仪的钻针在钻入树木之前,钻针在钻针套头内前进 1.1 cm,因此,当微钻仪启动后,钻针先空载移动 1.1 cm。当钻针钻穿木块后,操作人员一般会延时 10~30 s 才停止树木微钻仪钻针转动。图 3 是以直流电机的电压表达钻针阻力为例,展示钻针阻力的变化过程,阻力曲线图的开始部分和结束部分钻针针头都处于空载状态,只有中间部分钻针针头在木块内部。

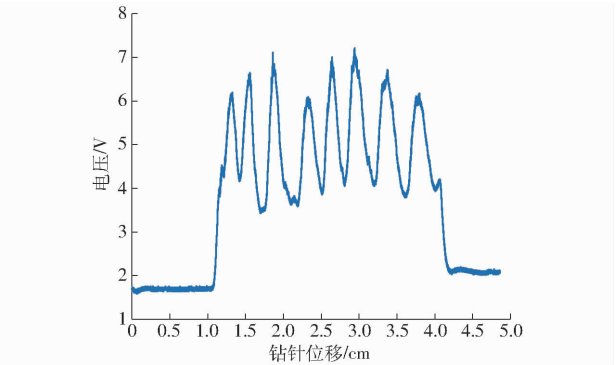


图 3 直流电机电压曲线

Fig.3 Voltage curve of DC motor

自制树木微钻仪每 1 ms 采样一次直流电机的电流、电压、转速和钻针的位移,因此,根据钻针钻入木块前的空载位移和钻针在每个木块内的钻针路径

长度,可求出钻针针头在每个试验样品内的钻针阻力数据的范围和阻力采样点的个数,然后计算钻针针头在每个试验样品的直流电机电流 I 、电压 U 和功率 P 以及用修正因子 k 修正后电流 I_1 、电压 U_1 、功率 P_1 的平均值,分别用 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 和 A_6 表示。

3.2 Resistograph 650-S 型微钻仪阻力数据处理

Resistograph 650-S 型树木微钻仪的钻针在钻入树木之前,在钻针套头内前进 8 mm,因此,当微钻仪启动后,钻针先空载移动 8 mm。当钻针钻穿木块后,操作人员一般会延时 10~30 s 才停止树木微钻仪钻针转动。图 4 为 Resistograph 650-S 型树木微钻仪钻针阻力的变化过程,阻力曲线的开始部分和结束部分钻针针头都处于空载状态,只有中间部分钻针针头在木块内部。

Resistograph 650-S 型树木微钻仪钻针每前进 0.01 cm 采样一次钻针阻力数据,因此,根据钻针钻入木块前的空载位移和每个样品的钻针在木块内的路径长度,选取每个测量数据中钻针钻入木块内的阻力数据的范围和阻力数据的个数。将 Resistograph 650-S 型微钻仪的 . dpa 阻力数据文件转换成 Excel 格式,选取每个木块钻针在钻入木块过程中的阻力数据,并计算每个样品钻针阻力平均

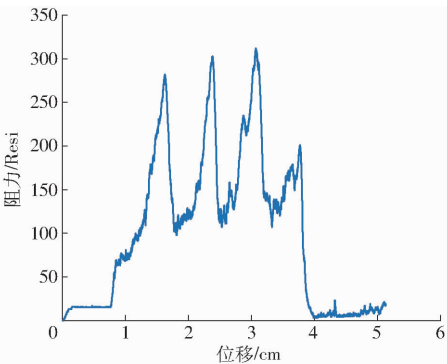


图 4 Resistograph 650-S 型微钻仪钻针阻力曲线
Fig.4 Drill resistance curve of Resistograph 650-S

值 A_7 。

3.3 钻针阻力平均值与木材绝干密度线性模型的建立

分别以每个木块的阻力平均值 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 和 A_7 为自变量,以试验样品的绝干密度 ρ 为因变量,使用中国林业科学研究院资源信息研究所自主开发的 ForStat 软件^[21] 建立钻针阻力平均值与木材绝干密度之间的线性回归模型。

4 结果与分析

自制微钻仪的 6 种钻针阻力表达变量的平均值与试验样品绝干密度之间的线性拟合曲线如图 5 所

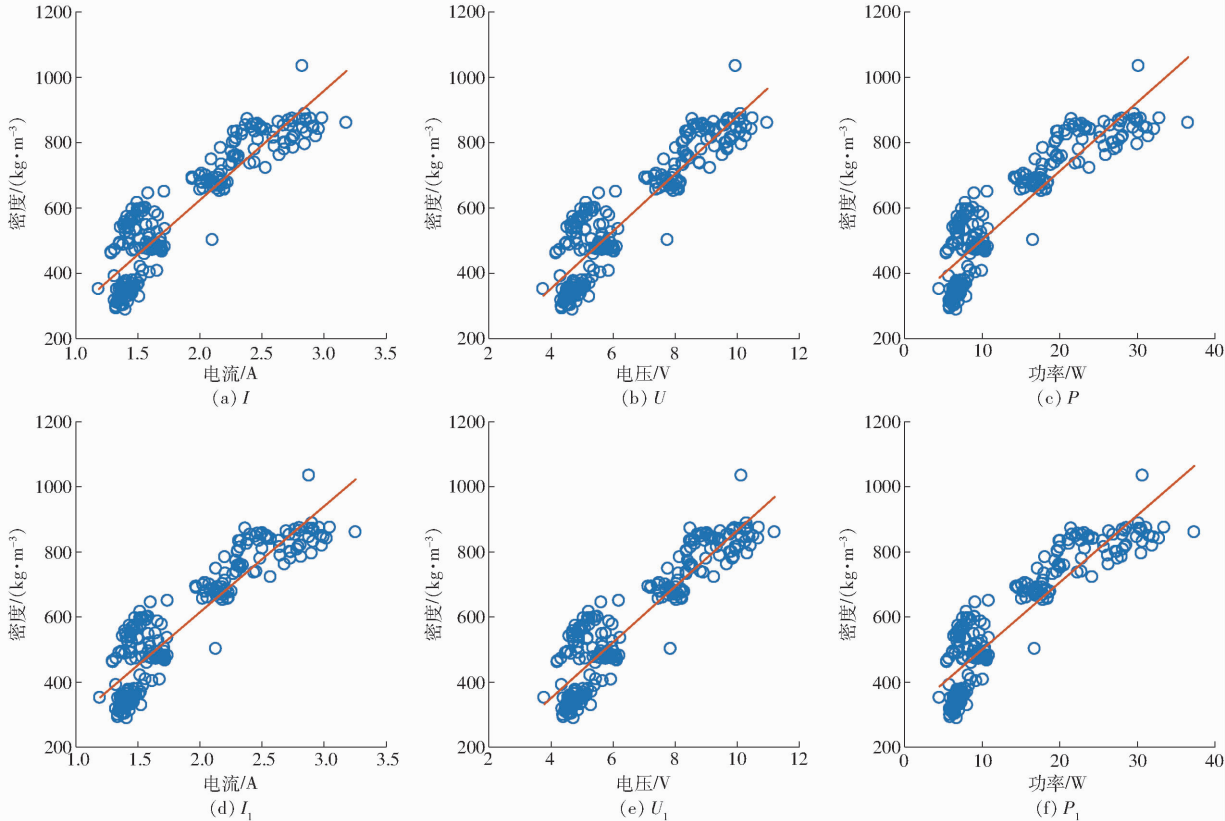


图 5 自制微钻仪钻针阻力表达变量与木材绝干密度线性拟合曲线

Fig.5 Linear fitting curves between expression variables of drill resistance of self-developed micro drill instrument and absolute dry wood density

示, Resistograph 650-S 型微钻仪阻力平均值与试验样品绝干密度的线性拟合曲线如图 6 所示, 2 个仪器的钻针阻力与木材密度之间的相关性分析如表 1 所示。

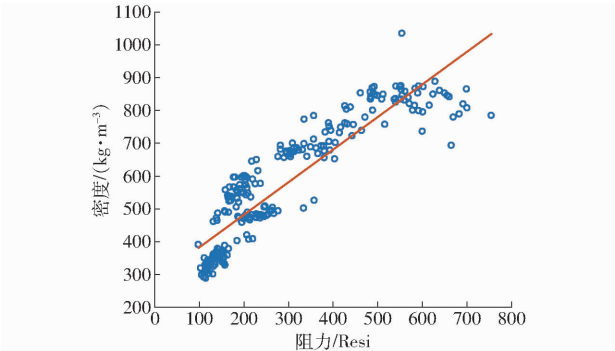


图 6 Resistograph 650-S 型微钻仪钻针阻力与木材绝干密度线性拟合曲线

Fig. 6 Linear fitting curve between drill resistance of Resistograph 650-S and absolute dry wood density

表 1 钻针阻力与木材绝干密度相关性分析结果
Tab.1 Result of correlation analysis between drill resistance and absolute dry wood density

仪器	阻力表达 变量	线性回归方程	相关系数
自主研制	电流	$y = -20.929 + 353.503x$	0.929 6
	电压	$y = 57.242 + 88.466x$	0.933 0
	功率	$y = 298.955 + 24.952x$	0.914 4
	修正电流	$y = -9.919 + 341.689x$	0.929 2
	修正电压	$y = 62.705 + 86.088x$	0.933 1
	修正功率	$y = 300.544 + 24.321x$	0.914 1
Resistograph 650-S	钻针阻力	$y = 298.721 + 0.997x$	0.927 8

从表 1 中可以看出, 2 个仪器的钻针阻力平均值与木材绝干密度之间线性相关系数均高于 0.9, 说明钻针阻力与木材绝干密度具有极强线性相关性。自制微钻仪每种钻针阻力表达方法所测量的钻针阻力平均值与木材绝干密度的相关系数均大于 0.9, 说明这 6 种钻针阻力表达方法均能间接反映钻针阻力。转速修正后的电压与木材绝干密度的相关系数最高, 说明自制微钻仪在测量木材绝干密度时使用转速修正后的电压作为钻针阻力表达方法最合适。自主研制树木微钻仪转速修正后的电压与木材绝干密度的相关系数为 0.933 1, Resistograph 650-S 型微钻仪钻针平均阻力与木材绝干密度之间的线性相关系数为 0.927 8, 因此, 自制微钻仪钻针阻力与木材绝干密度的相关系数比德国 Resistograph 650-S 型微钻仪高 0.005 3, 约高 0.57%, 说明自制微钻仪的设计方案和阻力表达方法合理。

5 讨论

前人研究表明, 微钻仪钻针阻力与木材密度正相关^[22-27]。文献[1]研究发现: 控制钻针旋转速度的直流电机消耗的功率与钻针扭矩成正比, 且主要由木材密度决定。因此, 德国 Rinntech 公司生产的 Resistograph 系列微钻仪钻针阻力可能是使用直流电机的功率表达, 但是 Resistograph 系列微钻仪的阻力单位并不是功率单位“W”, 而是该公司自定义的阻力单位“Resi”。本课题组研究发现: 可以使用直流电机的电流、电压、功率来表达钻针阻力^[13]。根据直流电机工作原理, 直流电机输出力矩与电枢电流成正比, 因此, 从理论上分析, 使用直流电机的电枢电流表达钻针阻力最合适。但是直流电机电流中含有大量的噪声信号, 使用电流表达钻针阻力时阻力测量误差较大。从直流电机的能耗上分析, 直流电机的负载是钻针, 直流电机消耗的电能主要用于钻针切削树木, 因此, 钻针阻力使用直流电机的功率来表示也比较合适。由于直流电机电流信号中存在大量的噪声信号, 因此, 直流电机的功率信号中也含有大量的噪声信号, 用功率表达钻针阻力存在的问题与电流表达钻针阻力存在的问题相同。仅使用电机电压表达钻针阻力时, 需要钻针转速恒定, 但是由于钻针转速误差不能完全消除, 所以使用直流电机的电压表示钻针阻力也存在不足之处。

在本文提出的 6 种钻针阻力表达方式中, 使用电机转速因子修正后的直流电机电压与木材绝干密度的相关系数最高。尽管修正后的电机电压与木材绝干密度的相关系数比原始的直流电机电压与木材绝干密度的相关系数高 0.000 1, 约高 0.11%, 这可能是由于在本试验中, 直流电机转速误差较小, 修正后的电机电压与原始电压相差不大。但是, 当直流电机误差较大时, 修正后的电机电压与原始电压相差较大, 可能使用修正后的电机电压比原始电压表达钻针阻力更合适。特别当钻针阻力较大时, 直流电机的控制电压达到最大值, 直流电机电压为一条直线, 不能反映钻针阻力的变化, 这时, 需要通过转速因子来修正直流电机电压, 使修正后的直流电机电压可以反映钻针阻力的变化。

在本研究处理数据期间, 曾用直流电机平均电流、平均电压、平均功率、平均转速为自变量, 以木材绝干密度为因变量, 建立了木材绝干密度与直流电机平均电流、平均电压、平均功率、平均转速的多元线性回归模型。但是在该模型中, 平均电流和平均功率的系数为负数, 平均电压的系数为正数, 这可能是直流电机的电压与直流电机电流和功率正相关,

尽管直流电机电流和功率与木材绝干密度正相关,但是直流电机电压与木材绝干密度的相关性更高,因此,在多元线性回归模型中,直流电机电压的系数偏大,从而使电流和功率的系数为负数,造成直流电机电流和功率与木材绝干密度呈负相关的错误结论;直流电机平均转速对模型没有显著性影响,这可能是直流电机转速误差比较小,使直流电机平均转速变化不大引起的。

由于钻针阻力不能直接测量,所以钻针阻力目前只能使用其他相关的物理量间接表达。在设计树木微钻仪初期,课题组最初拟用动态扭矩传感器测量直流电机的输出扭矩,但根据直流电机的运行参数得出直流电机的输出扭矩在 50 mN·m 左右,输出扭矩过小,尚未找到合适的扭矩传感器。目前尚无研究钻针阻力的物理模型,木材具体特性对钻针阻力的影响机理尚不明晰。根据前人研究结果:木材密度越大,木材材质越坚硬,钻针阻力越大^[22-27]。所以,本研究以直流电机各运行参数与木材绝干密

度之间的相关系数为依据来研究钻针阻力的表达方式。因此,树木微钻仪钻针阻力的表达方法仍有待进一步研究。

6 结论

(1)直流电机的电流、电压和功率与木材绝干密度的线性模型相关系数均高于 0.9,因此,树木微钻仪钻针阻力可用直流电机的电流、电压或功率间接表达。

(2)使用转速修正因子 k 修正后的直流电机电压与木材绝干密度的线性相关系数最高,因此,在本文提出的 6 种钻针阻力表达方法中,使用转速修正后的电压作为钻针阻力表达方法最合理。

(3)自制微钻仪的钻针阻力与木材绝干密度的线性相关性略高于德国 Resistograph 650-S 型微钻仪钻针阻力与木材绝干密度相关性,因此,自制微钻仪设计方案和钻针阻力表达方法合理,加工制造精度达到微钻仪的设计要求。

参 考 文 献

[1] RINN F, SCHWEINGRUBER F, SCHAR E. RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species[J]. *Holzforschung*, 1996, 50(4): 303-311.

[2] GAO Shan, WANG Xiping, WIEMANN M C, et al. A critical analysis of methods for rapid and nondestructive determination of wood density in standing trees[J]. *Annals of Forest Science*, 2017, 74(2):27.

[3] ISAAC-RENTON M, STOEHR M, STATLAND C B, et al. Tree breeding and silviculture: douglas-fir volume gains with minimal wood quality loss under variable planting densities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 465:118094.

[4] 赵奋成,郭文冰,钟岁英,等. 基于针刺仪测定技术的湿地松木材密度间接选择效果[J]. *林业科学*,2018,54(10):172-179.

ZHAO Fencheng, GUO Wenbing, ZHONG Suiying, et al. Effects of indirect selection on wood density based on resistograph measurement of slash pine[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018,54(10):172-179. (in Chinese)

[5] SZEWCZYK G, WASIK R, LESZCZYNSKI K, et al. Age estimation of different tree species using a special kind of an electrically recording resistance drill[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 34(1205):249-253.

[6] 潘虹,卢军,郭旭展,等. 基于峰谷分析算法用针刺仪测定树木年龄的可行性分析[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(5): 48-54.

PAN Hong, LU Jun, GUO Xuzhan, et al. Feasibility analysis of tree age estimation algorithm using Resistograph based on Peak-valley analysis[J]. *Forest Research*, 2020,33(5):48-54. (in Chinese)

[7] 黄荣凤,王晓欢,李华,等. 古建筑木材内部腐朽状况阻力仪检测结果的定量分析[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6):167-171.

HUANG Rongfeng, WANG Xiaohuan, LI Hua, et al. Quantitative analysis on the detected results by resistograph on inside wood decay of ancient architecture[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007,29(6):167-171. (in Chinese)

[8] ZHANG Tao, DU Dejie, LI Dongqing, et al. Inspection and appraisal of the Yonghemen structure of the Qing Dynasty in Beijing[J]. *International Journal of Archaeology*, 2018,6(2):56-66.

[9] 姚建峰. 基于微钻阻力法的树木年轮测量仪原理与实现研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2020.

YAO Jianfeng. Research on principle and realization of tree ring measuring instrument based on micro drill resistance method [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020. (in Chinese)

[10] 尘兴灿. 树木年轮针刺测量系统设计[D]. 北京:北京林业大学, 2019.

CHEN Xingcan. Design of needle measurement system for tree ring[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)

[11] 姚建峰,卢军,郑一力,等. 基于变论域模糊控制算法的树木年轮测量仪直流电机转速控制[J]. *农业工程学报*, 2019,57(14):57-63.

YAO Jianfeng, LU Jun, ZHENG Yili, et al. DC motor speed control of annual-ring measuring instrument based on variable universe fuzzy control algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(14): 57-63. (in Chinese)

[12] 姚建峰,赵燕东,卢军,等. 基于自适应滤波算法的树木年轮测量方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(3):216-222.

YAO Jianfeng, ZHAO Yandong, LU Jun, et al. Annual-ring measurement method based on adaptive filtering algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3):216-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200325&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.025. (in Chinese)