

【文章编号】 1004-1540(2006)01-0017-04

叶片厚度仪原理误差的研究

李东升¹, 何满喜²

(1. 中国计量学院 计量技术工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 中国计量学院 理学院, 浙江 杭州 310018)

【摘要】 建立了叶片厚度仪的实际传动特性方程, 通过与理论的线性模型比较, 获得了仪器的原理误差函数式。并且分析了测量时接触变形误差对测量结果的影响问题, 在此基础上提出了减小原理误差的方案, 并以增加测量臂长为例论述了减小原理误差的方法。

【关键词】 植物物理学; 植物信息测量; 电阻应变技术; 仪器原理误差; 接触变形误差

【中图分类号】 TH701

【文献标识码】 A

Theoretical errors of plant leaf thickness instruments

LI Dong-sheng¹, HE Man-xi²

(1. College of Metrological Technology & Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An equation of actual transmission characteristics for plant leaf thickness instruments is established in the paper. By a comparison between the equation and theoretical linear model, the theoretical error function of the device is got. Authors analyze the problem about how errors of contact deformation in measurement impact survey results. On the basis of the above-mentioned work, the program to reduce theoretical errors is put forward. Taken as an example, the method to reduce theoretical errors is discussed by means of increasing the length of the measurement arm.

Key words: plant physics; measurement of plant information; resistance strain technology; equipment theoretical error; contact deformation error

植物体内水分的精确测量是一个难题。近代植物水分生理学的理论表明, 植物体内的水分状况可以通过器官几何尺寸变化来反映, 这一理论为检测植物水分、挖掘节水潜力提供了重要的理论支持^[1-3, 6]。为此, 研究人员根据这一理论, 研制

了植物叶片厚度测量仪^[4, 5], 可形成植物水分动态测量传感器, 也可以用该技术构成新型高效节水灌溉系统的核心环节, 为建设循环经济和节约型社会提供一种切实可行的技术。

本文作者研制了两种叶片厚度仪, 一种仪器的

【收稿日期】 2005-01-20

【基金项目】 教育部科学技术研究重点项目(NO. 205063)

【作者简介】 李东升(1957—), 男, 吉林梨树人, 教授、博士生导师, 国务院特殊津贴专家。主要研究方向为精密测试技术、新型传感技术、测控仪器学。

传感部分采用了电阻应变式转换原理,具有结构简单、成本低廉、测量精度较高等优点;另一种仪器则是采用了差动电感式转换原理,具有测量精度高的特点,其成本也较高.这两种类型的仪器由于结构方面的原因,测头的机械结构中采用了正弦机构或准正弦机构,使仪器具有非线性的特性,而仪器的刻度(这里是 A/D 转换器)是采用线性模型,出现了原理误差.本文以电阻应变式叶片测量仪为例对该仪器的原理误差进行了较详细的分析与研究.

1 电阻应变式叶厚仪的原理

电阻应变式测量原理属于常规技术,在普通的传感器教科书中都有介绍,常见于力值测量仪器中,很少见到用于长度测量方面.笔者将该原理引入小尺度长度测量中,是该原理的新应用^[7].图1示出的是基于该技术的叶厚仪原理框图.值得说明的是图1所示的信号拾取部分是将位移转换成应变的关键环节,即被测叶片厚度的变化使弹性片变形,引起应变片产生应变的输出值就体现为位移的变化信号.为简化电路及提高可靠性,调制解调转换电路采用了一种特殊的单片式集成电路芯片,可有效地使仪器的体积减小、功耗降低.

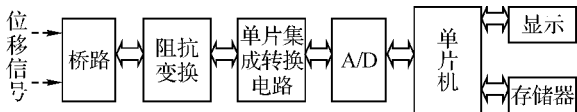


图1 电阻应变式叶厚仪的原理

2 原理误差分析

2.1 测头机构的传动方程

这里对仪器测头部分的原理误差进行分析,为使分析过程简单,将球测头机构简化成图2所示的机构,图2中设测球的半径为 r ,测球的弦高为 h ,被测位移为 s ,臂长为 l ,则有测头上A点在垂直方向的位移

$$s_{\varphi} = l \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

仪器的实际传动特性方程为非线性函数:

$$\begin{aligned} s &= s_{\varphi} + h - [r - (r - h)\cos\varphi] \\ &= s_{\varphi} - (r - h)(1 - \cos\varphi) \\ &= l \cdot \sin\varphi - (r - h)(1 - \cos\varphi) \\ &< s_{\varphi} \end{aligned} \quad (2)$$

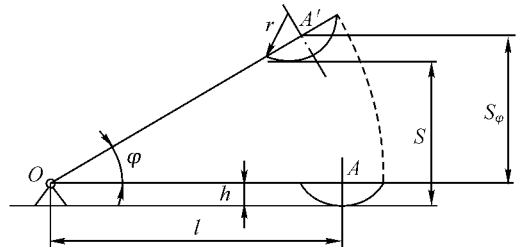


图2 测头机构简图

由式(2)可见,该机构的传动方程比典型的正弦机构的函数式多出一个误差项(若仪器采用式(1)的测量原理,则为典型的正弦机构).因此,可以将式(2)所示的测量原理称为改进型的正弦机构,由于多出一个误差项,所以,其原理误差比正弦机构还要大些.

而目前的仪器在刻度时无法采用同实际特性完全一致的模型,基本是以线性函数作为理论特性方程:

$$s_a = l\varphi \quad (3)$$

可见,理论特性与实际特性之间的不一致就形成仪器的原理误差(属于系统误差),关系式为

$$\begin{aligned} \Delta &= s_a - s \\ &= l\varphi - l \sin\varphi + (r - h)(1 - \cos\varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 原理误差分析

由式(2)可知,若选取测头弦高 $h = r$,即测头为半球时,第二项原理误差就不存在了.这个结论成为重要设计依据,也可以作为参数设计原则来考虑.这里对一般情况下,即 $h \neq r$ 的原理误差进行分析.

对式(4)中的正弦函数和余弦函数按马克劳林级数展开,略去3次以上高次项,保留3次以下项,为区别起见,用 Δ_T 表示近似的原理误差,有

$$\Delta_T = \frac{1}{6}l\varphi^3 + (r - h)\frac{1}{2}\varphi^2 \quad (5)$$

由式(5)可见,即使略去高次项,仍有较严重的原理误差.如图3所示,该误差为系统误差,其值为正值.由此可得出这样的结论:该误差与臂长 l 、球缺测头半径 r 和弦高 h 呈线性关系;与测量时形成的转角 φ 呈指数关系,因此, φ 是重点控制的参数.在测量范围一定的前提下,应尽量加长测量臂 l 的长度,以控制 φ 角值的上限,否则会形成较大的原理误差.但 l 也不宜取得过大,使测头的尺寸增大不利于安装使用.由此可见,减小原理误差

只能从 l 、 r 和 h 三者入手. 如前所述, 当无法取 $h = r$ 时, 在设计时应使 l 和 r 的值尽量小. 本项目组研制的一种传感器采用了 $l = 25 \text{ mm}$ 、 $r = 3 \text{ mm}$ 、 $h = 2 \text{ mm}$ 的设计参数, 在测量范围为 1 mm 的情况下, φ 角约为 2.3° . 那么, 按式(4) 计算出的原理误差为 $\Delta = 1.07 \mu\text{m}$. 而按式(5) 计算出的原理误差为 $\Delta_T = 1.1 \mu\text{m}$. 可见, 采用近似公式时结果要偏大些, 主要是舍入误差的问题. 对微米级测量来说, 原理误差已达到不可忽略的程度.

2.3 根据接触变形误差设计测头半径参数

在接触式测量时, 由于测量力的存在, 接触变形误差是不可避免的. 被测的植物叶片比测头软得多, 其弹性模量数值要远比金属材料的小. 因此, 对弹性变形误差要予以充分考虑. 研究接触变形误差对测头半径和弦高参数的设计有意义. 比较简单的计算接触变形的方法是采用赫兹公式进行计算, 测头与叶片的接触可以按球与平面接触时变形公式^[8]:

$$\delta = 0.76 \sqrt[3]{\frac{P^2}{R} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2} \quad (6)$$

式(6)中: P —测量力, 单位为 N;

R —球缺测头的半径, 单位为 m;

E_1 、 E_2 —测头和叶片的弹性模量, 单位为 Pa.

通常, 植物的叶子都很软, 因此式(6) 可以简化为

$$\delta = 0.76 \sqrt[3]{\frac{P^2}{RE_2^2}} \quad (7)$$

我们选择了茶花树的叶片进行测量, 这还算是一种比较硬的叶片, 对冬季叶片的测量结果是 $E_2 = 92.6 \text{ Mpa}$, 代入式(7) 中可得 $\delta = 4.8 \mu\text{m}$. 可见, 接触变形误差是相当可观的(对这样的误差宜采用补偿的办法进行修正, 另文介绍).

从式(6) 和式(7) 可见, 设计时减小接触变形误差的方案是减小测量力、增加测头半径及增加被测物的弹性模量, 但被测物的弹性模量无法增加, 只能从减小测量力和增加测头半径入手.

3 减小原理误差的方法

3.1 减小原理误差的方案分析

既然原理误差已达到影响仪器精度的程度, 那么, 就应当对其进行研究, 使之符合要求. 将仪器的刻度模型与实际模型列于图 3 进行比较. 曲

线 1 的图形是按式(2) 画出的实际传动特性, 直线 2 是仪器的刻度特性, 曲线 1' 是经最佳调整后的实际传动特性(见下一小节内容). 由图 3 可见, 随着测量范围的扩大, 原理误差将越来越大. 所以仪器的测量范围不能太大. 既然该项原理误差为系统误差, 那就可以通过调整仪器特性的方法, 使该项误差绝对值得到减小. 解决这一问题有两个方案: 一个是保持实际特性不变, 改变仪器的刻度特性, 即减小式(3) 中 l 的值, 降低其斜率, 使仪器刻度特性直线绕坐标原点沿顺时针方向旋转, 穿过实际特性曲线, 最佳调整条件是形成的最大正误差与最大负误差相等. 另一个方案是保持刻度特性不变, 增大测量臂的尺寸, 使实际特性曲线端部上升直至与刻度特性直线良好交叉达到最佳调整条件的程度. 下面内容中是以测量臂 l 的调整为例进行论述的.

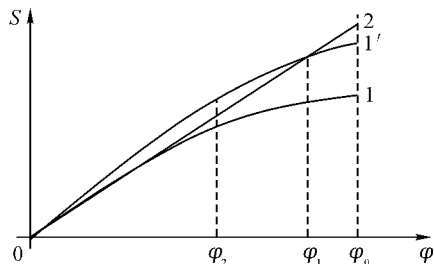


图 3 传动特性曲线

3.2 实际特性的调整

若保持刻度特性不变, 将测臂 l 调整到 l_0 , 则根据式(4) 有原理误差公式为

$$\Delta_0 = l\varphi \sin\varphi + (r-h)(1 - \cos\varphi) \quad (8)$$

最佳调整条件是: 0 点一定要相交, 在 φ_0 与 φ_2 处的原理误差的绝对值相等而符号相反, 在 φ_2 处出现极大值, 在 φ_1 处实际特性与刻度特性相交, 使实际传动特性曲线到达图 3 中 1' 线的位置. 于是有

$$\begin{cases} l\varphi_2 - l_0 \sin\varphi_2 + (r-h)(1 - \cos\varphi_2) = \\ \quad [l\varphi_0 - l_0 \sin\varphi_0 + (r-h)(1 - \cos\varphi_0)] \\ \Delta'_{(\varphi=\varphi_2)} = l - l_0 \cos\varphi_2 + (r-h)\sin\varphi_2 = 0 \\ l\varphi_1 - l_0 \sin\varphi_1 + (r-h)(1 - \cos\varphi_1) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(9) 中, 有三个参数 l_0 、 φ_1 、 φ_2 是待求量, 通过式(9) 的三个方程可以解出. 但因方程组是非线性

方程组,没有直接求解方法和公式,故需要采用数值计算方法的牛顿迭代方法或用 Matlab 数学软件进行求解.例如当 $l = 25 \text{ mm}$ 、 $r = 3 \text{ mm}$ 、 $h = 2 \text{ mm}$ 时,经计算可求得: $\varphi_2 = 1.018^\circ$ 、 $\varphi_1 = 1.94^\circ$ 、 $l_0 = 25.02 \text{ mm}$.将解出的 l_0 和 φ_0 值代入式(8),得调整后的原理误差 $\Delta = 0.27 \mu\text{m}$,仅为调整前的 $1/4$.可见通过调整臂长 l_0 减小原理误差的方法是可行的.根据计算结果将不同参数下的调整量及调整后的原理误差列于表 1、表 2 中,设计时可按表 1 和表 2 的数据选择参数.

表 1 最佳臂长调整量 μm

φ_0/deg	$(r-h)/\text{mm}$	最佳臂长调整量 μm							
		0	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
1.8	1.8	3.1	16.1	22.6	29.1	35.6	42.1	48.7	55.1
2.0	2.0	3.8	18.2	25.5	32.8	40.0	47.6	54.5	61.7
2.2	2.2	4.6	20.5	28.5	36.5	44.4	52.4	60.3	68.3
2.4	2.4	5.5	22.9	31.6	40.2	48.9	57.6	66.3	74.9
2.6	2.6	6.4	25.3	34.7	44.1	53.5	62.9	72.3	81.7
2.8	2.8	7.5	27.8	37.9	48.0	58.1	68.3	78.4	88.5
3.0	3.0	8.6	30.3	41.1	52.0	62.9	73.7	84.6	95.4

表 2 最佳臂长时的原理误差 μm

φ_0/deg	$(r-h)/\text{mm}$	最佳臂长时的原理误差 μm								
		0	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
1.8	1.8	0.03	0.12	0.16	0.20	0.24	0.33	0.37	0.45	
2.0	2.0	0.04	0.16	0.21	0.25	0.30	0.38	0.43	0.50	
2.2	2.2	0.06	0.18	0.25	0.31	0.37	0.44	0.50	0.56	
2.4	2.4	0.08	0.22	0.30	0.38	0.45	0.53	0.60	0.68	
2.6	2.6	0.10	0.27	0.36	0.45	0.54	0.62	0.71	0.80	
2.8	2.8	0.12	0.32	0.43	0.53	0.63	0.73	0.84	0.94	
3.0	3.0	0.15	0.38	0.50	0.62	0.73	0.85	0.97	1.32	

为使传感器结构紧凑,在增加测头半径时,通常不增加弦高值,不易满足半球的条件,从表 2 可见,会使原理误差增加.因此,与 2.3 小节得到的结

论存在矛盾性.设计参数的选取还要根据实际被测对象综合考虑.测量范围 φ_0 对原理误差的影响比 $(r-h)$ 更敏感,设计时应作为优先考虑的参数.

4 结 论

1)建立了叶片厚度仪的实际传动特性方程,通过与理论的线性模型比较获得了仪器的原理误差函数式.在此基础上提出了减小原理误差的方案,并以增加测量臂长为例论述了减小原理误差的方法.

2)分析了测量时接触变形误差对测量结果的影响问题,认为解出最佳调整参数,减小测量力和增加测头半径是减弱接触变形误差的有效方案.

3)用数值计算方法求解了非线性方程组,获得了最佳调整臂长情况下的原理误差值,可以作为传感器结构设计的依据.

【参 考 文 献】

- [1] 苏 臣,孙一源,陈 勇.新型节水灌溉控制原理的应用研究[J].水科学进展,1994,5(2):142-148.
- [2] 李东升,汤晓华,刘九庆,等.精量灌溉中的植物水分精密诊断技术[J].中国计量学院学报,2002,14(1):11-14.
- [3] 杨 波.新型智能灌溉系统[J].世界发明,2002(5):7.
- [4] 李东升,张文卓,陈为凤,等.植物叶片水分间接柔性测量传感器的研究[J].林业科学,2004(6):130-133.
- [5] 李东升,高晓红,张文卓,等.植物叶片厚度和果径精密测量传感器的研究[J].传感器技术,2004(12):43-46.
- [6] 李国臣,马成林,于海业,等.温室设施的国内外节水现状与节水技术分析[J].农机化研究,2002(4):8-11.
- [7] LI Dongsheng, GAO Xiaohong, LIU Jiuqing. Sensors to accurately measure geometry dimension plant organs[J]. The Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2004(1): 824-830.
- [8] 李庆祥,王东生,李玉和,等.现代精密仪器设计[M].北京:清华大学出版社,2004:346.