

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.09.031

赵笑缘, 王松, 郜周明, 等. 薄荷叶片弯曲特性试验研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(9): 234-239

Zhao Xiaoyuan, Wang Song, Gao Zhouming, et al. Experiments on the bending characteristics of mint leaves [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(9): 234-239

薄荷叶片的弯曲特性试验研究*

赵笑缘, 王松, 郜周明, 邱白晶

(江苏大学农业工程学院, 江苏镇江, 212013)

摘要: 植保作业中叶片弯曲变形难以准确描述, 对叶片弯曲变形规律开展研究十分必要。薄荷具有较短的叶柄, 因此在研究叶片弯曲特性时可忽略叶柄干扰。以温室内培养的薄荷为研究对象, 叶片简化为具有初始弯曲的梁模型, 优化长度为 30~40 mm 叶片的加载方式, 提高约 10% 叶片长度的数据有效范围, 通过分析薄荷叶片受力后的变形图像得出沿叶脉方向的柔度分布。提出贡献度概念, 表征叶片各部对弯曲变化的影响, 说明叶片弯曲变形不是整个叶片广泛参与的行为。展示薄荷叶片的 2 种弯曲模式, 根部集中模式由叶片根部承担大部分变形, 中部集中模式由叶片根部和叶片中部共同承担变形。试验表明, 根部集中模式的叶片占试验叶片的 42.9%, 中部集中模式叶片占试验叶片的 57.1%, 说明即便是同种植物叶片, 弯曲行为也不一致。试验证明叶片弯曲行为多样, 在建立叶片简化模型时, 单一模型存在偏差。

关键词: 薄荷叶片; 叶片弯曲; 生物力学; 弯曲模式; 植物表型

中图分类号: S183 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 09-0234-06

Experiments on the bending characteristics of mint leaves

Zhao Xiaoyuan, Wang Song, Gao Zhouming, Qiu Baijing

(School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: Bending deformation of leaves is difficult to be described accurately in plant protection, so a research on the patterns of leaf bending is conducted. Mint has short petioles, and the interference of the petiole is ignored in analyzing bending characteristics of the leaves. Mint cultivated in the greenhouse is used as the research subject. Leaves are simplified into a beam model with initial bending, and an optimized loading method for leaves about 30-40 mm in length increases the effective data range by about 10%. The flexibility distribution along the leaf vein is obtained by analyzing the deformation images of mint leaves under stress. The concept of contribution degree is proposed to quantify the influence of each part of the leaf on bending changes, indicating that leaf bending deformation does not involve the whole blade. Two bending modes of mint leaves are identified: the based-centered mode, where most deformation occurs at the leaf base, and middle-centered mode, where deformation is shared between the base and the mid-section of the leaf. The results show that 42.9% of the tested leaves are in the base-centered mode, while 57.1% exhibit the middle-centered mode, indicating that the bending behavior even within leaves of the same species is inconsistent. The varied bending behaviors of leaves are proved by experiments, and a single simplified model may not adequately represent all cases.

Keywords: mint leaves; leaf bending; biomechanics; bending modes; plant phenotyping

0 引言

叶片在载荷作用下的弯曲变形对植物有着重要影

响。叶片运动会影响光的截获, 优化光环境, 调节辐射吸收^[1]。叶片通过变形排斥植食性昆虫, 灵活的叶片更难受到害虫侵害, 叶片姿态变化会影响农药在叶片

收稿日期: 2023 年 9 月 14 日 修回日期: 2023 年 11 月 23 日

* 基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2020328); 国家自然科学基金(31971790); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD-2018-87)

第一作者: 赵笑缘, 男, 1997 年生, 辽宁锦州人, 硕士研究生; 研究方向为植物保护技术。E-mail: 2609955791@qq.com

通讯作者: 邱白晶, 男, 1961 年生, 江苏镇江人, 教授, 博导; 研究方向为农业环境与植物保护装备及技术。E-mail: qbj@ujs.edu.cn

上的滞留^[2],大的叶倾角会减少农药的沉积^[3]。风引起的叶片振动会影响喷雾效果。雾滴在具有较大弹性的叶片尖部更易沉积。因此研究叶片的力学特性非常重要。

通过测量上千种叶片的力学特性可知,叶片强度与构成组织密切相关,叶脉特性^[4]、维管数量^[5]是关键的叶片力学特征。叶片中的叶脉穿插在叶肉组织中并有上下表皮包覆,呈“三明治”形,力学参数在不同物种中有所不同,且叶片运动方式丰富,相对于扭转变形,叶片更易弯曲,建立叶片弯曲模型具有价值和意义。

在建立树枝、云杉茎秆、树木的震荡、鸢尾花叶片、玉米叶片等对象的运动模型时,梁模型是使用最为广泛的模型。借助梁模型,开展了叶片在降雨事件中的响应^[6]、雨滴能的收集^[7]等多种叶片与环境交互^[8]的研究。

叶片在研究中被分为叶柄和叶面,叶柄由于结构特点易于建模^[9],Liou等^[10]在有限元分析中模拟了菖蒲叶柄的力学特性。而叶面组成复杂,难以描述,且不同叶片具有不同的力学行为^[11],不同的叶面倾角分布^[12]随生长^[13]、昼夜交替^[14]而变化。直梁模型不能准确表达叶片的力学特征。Zhao等^[15]研究了具有初始形态的叶片的力学特性,认为具有初始弯曲的叶片比平直的叶片更难变形,应额外考虑植物叶片存在的初始变形问题。

本文考虑薄荷叶片的自然弯曲和沿叶脉方向的柔度变化,优化载荷施加方法。通过图像分析验证叶片弯曲模式的多样性,为叶片尺度研究,喷雾、降雨等与环境交互的叶片行为提供更贴合实际的简化模型方法。

1 材料与试验方法

1.1 试验样本

薄荷成熟薄荷植株如图1所示,由于叶柄较短,只需关注叶片的弯曲变形特性。用于试验的薄荷植株在温室里培养90天。在培养成熟的薄荷中,选择叶片舒展、无发黄情况的叶子作为试验样本。

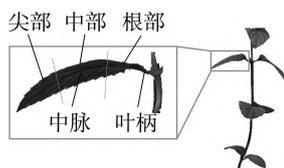


图1 成熟薄荷叶片的一般形态

Fig. 1 General morphology of mature peppermint leaves

1.2 力学试验

1.2.1 试验材料处理

植株在试验前被浇灌充足的水分。由于植株的生物学特性,白天的叶片比晚上更为挺拔,试验时间为

14:00—16:00。试验环境温度为21℃。选择6株薄荷上成熟舒展的叶片。

1.2.2 试验过程

参考Mouliya等^[16]对玉米叶片的试验过程,设计试验台架,如图2所示。

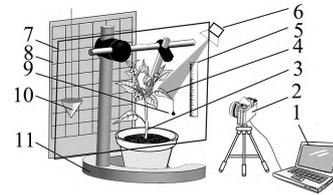


图2 试验台架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test bench

- 1.计算机 2.相机 3.薄荷 4.被测叶片 5.长度基准(直尺)
6.补光灯 7.取景范围 8.背景板 9.砝码
10.铅锤 11.铁架台

叶片的载荷分为6个等级:空载、预载荷(16 mg)、66 mg、116 mg、216 mg、316 mg,在这些载荷作用下,叶片变形幅度与降雨场景和3级风力下的弯曲变形幅度近似。施加载荷后待叶片稳定进行叶片形态记录,通常在施加载荷30 s后记录。

1.3 数据处理方法

1.3.1 曲线弧长坐标

将中脉曲线上各位置坐标规定为叶片微段长度的总和,如式(1)所示。

$$s_i = \sum_{j=1}^i [(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: x —— 标记点横坐标, mm;

y —— 标记点纵坐标, mm;

s_i —— 第 i 个标记点弧长坐标, mm。

使用弧长坐标代替直角坐标,有助于在大变形下确定叶片上变形前后的同一位置的坐标。

1.3.2 柔度

在施加载荷前后的2条叶片曲线相同弧长坐标处计算曲率和弯矩的变化,获得 $[s_i, s_f(s_i)]$ 。基于纯弯曲的假设,弯曲柔度为

$$s_f = \frac{\delta(k)}{\delta(M_i)} \quad (2)$$

式中: s_f —— 弯曲柔度, $N^{-1} \cdot mm^{-2}$;

$\delta(k)$ —— 曲率变化量, mm^{-1} ;

$\delta(M_i)$ —— 第 i 点弯矩的变化量, $N \cdot mm$ 。

在叶片弯曲的问题中,叶片具有初始弧度,曲率初始值不为0。式(2)为柔度公式的增量形式,一般的柔度表达如式(3)所示。

$$s_f = (E_{eq} I_z)^{-1} \quad (3)$$

式中: E_{eq} —— 材料的等效杨氏模量, N/mm^2 ;

I_z —— 惯性矩, mm^4 。

在一条光滑的曲线上解析定义曲率 κ , 使用 SPSS 对薄荷叶片离散点进行最小二乘拟合。叶片上点的曲率 κ_i 计算如式(4)所示。

$$\kappa_i = \frac{\frac{d^2 p(x_i)}{dx^2}}{\left\{1 + \left[\frac{dp(x_i)}{dx}\right]^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式中: $p(x_i)$ ——叶片轮廓多项式。

只计算由外荷载引起的弯矩 M_{zi} 如式(5)所示。

$$M_{zi} = (x_i - x_w) \times m \quad (5)$$

式中: x_w ——弯矩计算点横坐标, mm;

x_i ——载荷作用位置横坐标, mm;

m ——作用在叶片中脉末端的载荷重, N。

叶片自重产生的弯曲变形被计入叶片的初始弯曲, 忽略重力产生的变形。施加载荷使叶片发生进一步弯曲变形后, 忽略叶片自重分布变化引起的挠度变化。

2 结果与讨论

2.1 加载有效性分析

将砝码挂载在叶片尖端用于施加载荷。薄荷的叶片长度为 30~40 mm, 较短的叶片长度使得叶片弯曲变形, 在垂直于叶脉方向上的应力不均匀现象不可被忽略。均匀应力分布通常存在于距集中载荷点 1/6 梁长度外^[17]。

图 3 为悬臂梁模型在集中载荷下的距载荷作用点不同距离的弯曲应力分布情况。

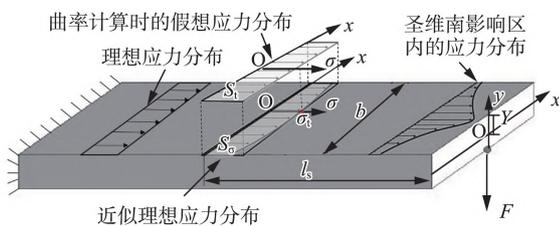


图 3 集中载荷 F 作用下, 弯曲正应力在各截面分布和实际计算中使用的假想应力分布

Fig. 3 Distribution of bending normal stress at various sections under concentrated load F and the hypothetical stress distribution used in practical calculation

叶片曲率的图像识别以中脉为基准, 弯曲应力沿 x 方向的不均匀会影响测量结果, 需要一种加载方式提高试验数据的有效性。通过计算结果对叶片力学特性(抗弯刚度 EI)的准确反应程度来进行有效性评价。应力不均匀分布导致式(6)的曲率计算存在偏差, 从而影响到式(7)对柔度的计算。

$$\kappa = \frac{\epsilon}{Y} \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{M}{EI_y} \quad (7)$$

式中: E ——材料的弹性模量, N/mm^2 ;

ϵ ——应变;

Y ——截面上点距中性面距离, mm;

I_y ——截面对 y 轴的惯性矩, mm^4 ;

M ——弯曲力矩, $N \cdot mm$ 。

通过纯弯曲梁的几何变形关系, 对应变图像分析可得式(6)。式(7)是在理想应力分布下的悬臂梁曲率。力矩 $M = Fl_s$, 其中 F 表示叶片受到外力, l_s 表示力的作用点到叶片上任意截面的距离。根据力矩的平衡原理, 截面上无偏差的弯矩 M_r 计算如式(8)所示。

$$M_r = \iint \sigma(x, y) Y dA \quad (8)$$

式中: A ——截面上的微分面积。

使用 DIC (Digital Image Correlation, 数字图像技术)对弯曲叶片的表面进行分析得到应变 $\sigma(x, y)$ 和叶片截面各处曲率 $\kappa(x)$, 根据 $\sigma = \epsilon E$, 结合式(6)可得式(9)。

$$M_r = \iint \kappa(x) Y^2 E dA \quad (9)$$

用中脉曲率近似模拟叶片曲率, 在中脉任意一点处应力 $\sigma_i(Y) = \kappa_i E Y$ 代表距离叶尖整个截面上的应力, κ_i 为中脉位置的曲率。误差中来自截面上沿 x 方向的应力变化被忽略, 具有误差的力矩 M_t 计算如式(10)所示。

$$M_t = \iint \kappa_i Y^2 E dA \quad (10)$$

在均匀材料假设下, E 为常数, 但在植物叶片中, E 并不是一个常值, 这里的假设是为了计算加载方式对弯曲刚度带来的误差而进行的简化。

弯矩偏差 D 计算如式(11)所示。考虑到式(6), 弯矩的偏差 D 直接反映为 EI 的偏差。

$$D = 1 - \frac{M_t}{M_r} = 1 - \frac{\iint \kappa_i Y^2 E dA}{\iint \kappa(x) Y^2 E dA} = 1 - \frac{S_t}{S_o} \quad (11)$$

式中: S_t ——应力大小在截面分布图中围成的面积;

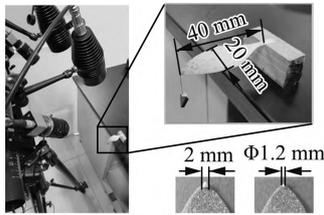
S_o ——叶片弧长。

结合叶片形状和胶片制备的难易程度, 选择圆形和三角形作为加载的方案。圆形用以模仿集中载荷, 三角形是一种能填满叶尖局部区域的形状, 模拟叶尖的均布载荷情况。

通过 DIC(数字图像技术)在 E 为均匀的仿真叶片上进行试验, 如图 4 所示, 仿真叶片由厚度为 1 mm 的亚克力板制成, 上面的散斑由喷漆制成。使用仿真叶片的目的是评估加载方式对应变不均匀分布的影响, 叶片本身就具有组成成分的不均匀性, 如果使用真实叶片, 无法评估何种原因引起的应变分布不均。

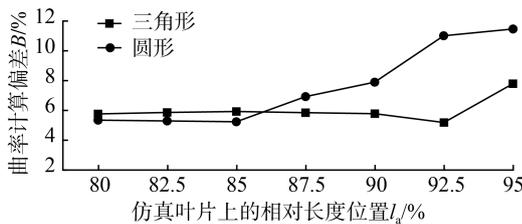
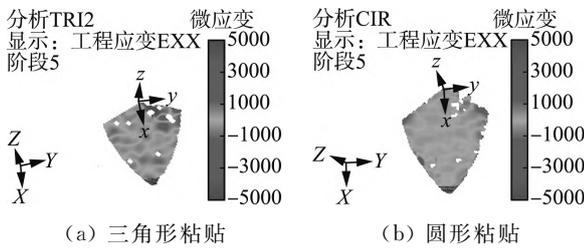
对受 100 mg 载荷的靠近叶尖区域的应变场进行分析, 仿真叶片表面的局部应变场如图 5 所示。使用式(11)计算得到曲率偏差结果, 如图 5(c)所示。通过

对 2 种载荷情况计算可知,在 0%~85% 的叶片相对长度区间内,曲率计算偏差在 2 种形状上没有表现明显的差异,在 85% 仿真叶片长度后,三角形的粘贴小于圆形粘贴的曲率计算偏差,并在 93% 相对叶片长度之间与理想应力分布计算偏差小于 7%,三角形粘贴在应力分布均匀性上优于圆形粘贴。



DIC试验装置 两种胶接形状(三角形和圆形)

图 4 用 DIC 对仿真叶片在载荷作用下的应变场进行测量
Fig. 4 Measure the strain field of the simulated blade by DIC



(c) 2 种粘贴方式的计算偏差

图 5 仿真叶片应变分析结果

Fig. 5 Strain analysis results of simulated blade

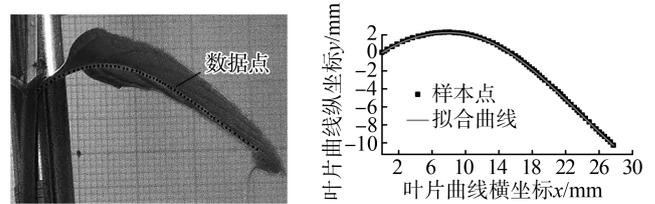
依据 DIC 的应变场分析结果,选择三角形作为粘贴式加载的接触面形状。考虑实际制造难度,最终的粘贴形状确定为边长 2 mm 的等边三角形,获取方法为冲头的冲裁。

在外力作用下,若应变沿垂直叶脉方向的均匀分布,叶脉应变与整体应变一致,则计算准确。圣维南原理表明,应变并不均匀,计算偏差来源于此。偏差 D 越小,说明中脉的应变越能代表叶片整体的应变。叶片中脉的抗弯刚度强于叶面的叶肉结构,叶片上的应力相比均匀仿真叶片更多地作用于中脉变形,真实叶片弯矩偏差 D 低于模拟值。

2.2 叶片的柔度

使用 Engauge Digitizer 数字化照片,用一组点表示中脉轮廓。各叶片中脉记录 50~70 个点和载荷作用点的位置,样本点选取密度为 1.7~2.4 个/mm。在曲率大的位置增加记录点密度,叶片末端减少记录点

数。一片叶子中脉的完整数字化点如图 6 所示。



(a) 对中脉进行数字化提取 (b) 叶片中脉数字化结果

图 6 叶片的数字化

Fig. 6 Digitization of leaf

叶片的形态是通过多项式来表征,为确定最佳拟合阶数,使用残差来衡量拟合优劣。以此为基础,可以生成数据 $[x, p(x) + e(x)]$,其中 x 是数字化点集的真实横坐标, $p(x)$ 是纵坐标的多项式估计, $e(x)$ 是曲线拟合结果与采样点数据集的残差,结果如图 7 所示。

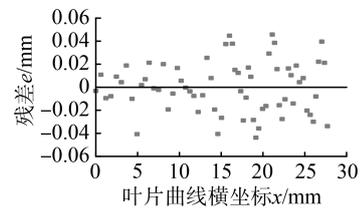


图 7 拟合结果残差

Fig. 7 Residual fitting results

数字化点集的误差来自叶片中脉的厚度,使用 50 分度游标卡尺测量被采样薄荷叶片中脉厚度最厚的地方为 2.96 mm,最薄的地方厚度为 0.82 mm,采样误差为 ± 1.48 mm。所有被采用的叶片的曲线拟合的残差小于 0.12 mm,误差可接受。

叶片的整个加载循环的叶片数字化结果和受载荷情况如图 8 所示。使用式(2)计算 17 片薄荷叶片的柔度,分布如图 9 所示。

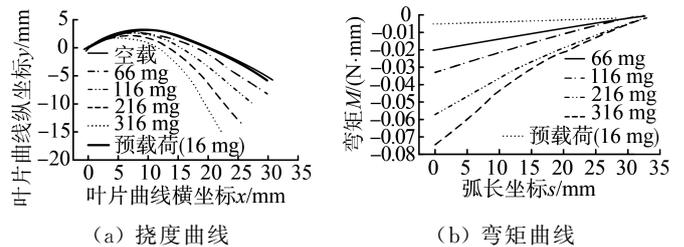


图 8 叶片的加载循环

Fig. 8 Leaf loading loop

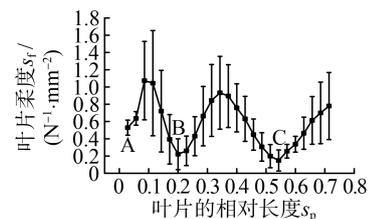


图 9 叶片柔度沿长度变化曲线

Fig. 9 Curve of the blade flexibility along length

从图 9 可以看出,柔度沿中脉方向呈波浪形变化。叶片上有 A、B、C 三个极小值位置,说明薄荷叶片沿中脉柔度分布不均匀。

图 10 显示在不同载荷下薄荷叶片一些位置的曲率与弯矩关系。叶片中脉受弯矩导致的曲率变化存在弹性区间,斜率是柔度,在载荷增加到一定程度后出现了明显的非线性。本文主要在弹性区间内研究,并总结薄荷叶片的弯曲变形特性。

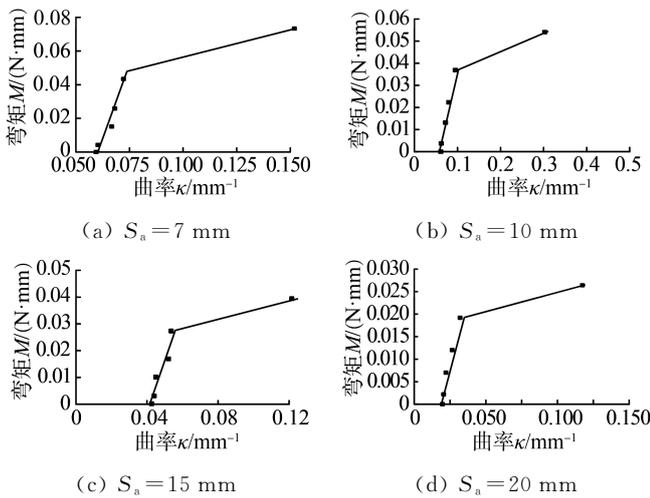


图 10 叶片不同位置的曲率 κ 与弯矩 M 的关系

Fig. 10 Relationship between curvature κ and bending moment M at different positions of the leaf

试验过程中,薄荷叶片变形是大变形过程,有材料本身的非线性和曲率近似两类非线性的问题。为使曲率的表达精确,避免在叶片自身大变形情况下的基本弯曲公式失效,且不能通过对公式的修正避免材料本身的非线性,故对薄荷叶片变形规律研究只在叶片的线弹性范围内。

2.3 叶片弯曲贡献度

柔度表达不同位置叶片的力学特性,不表达对整体变形的影响,为表达局部力学特性对整体变形的影响,提出弯曲贡献度(Cd)概念。以图 11 中悬臂梁为例,若某一段梁刚化,这一段即使受力也不发生变形,这将对梁的挠度产生影响,影响表现为挠度 ω_B 的变小,变小的值与该段刚化前的变形挠度值之比为贡献度 Cd 。

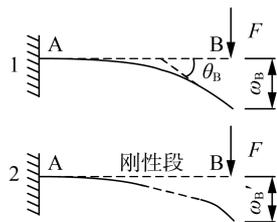


图 11 悬臂梁与具有部分刚性段的悬臂梁

Fig. 11 Cantilever beam and the cantilever beam with partially rigid segments

贡献度 Cd 计算如式(12)所示。

$$Cd = 1 - \frac{\omega_B'}{\omega_B} \quad (12)$$

式中: ω_B ——悬臂梁挠度, mm;

ω_B' ——具有部分刚性段的悬臂梁挠度, mm。

贡献度是刚化段长度和位置的函数。在保证叶片挠度曲线连续的前提下,连续取弧长为 1 mm 的刚化段,计算薄荷叶片沿中脉方向的贡献度分布。2 片不同弯曲模式的薄荷叶片的贡献度曲线如图 12 所示。

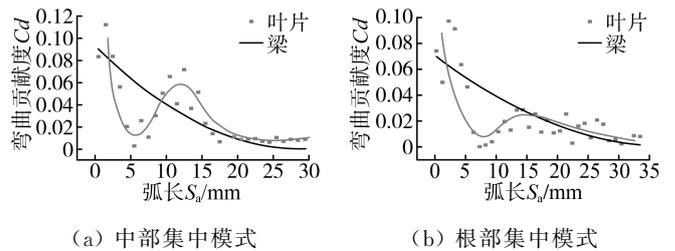


图 12 悬臂梁贡献度与叶片弯曲贡献度对比

Fig. 12 Cantilever beam contribution degree and blade bending contribution degree

与悬臂梁相比,叶片柔度分布不均匀,如图 12(a)所示,叶片上各部分对叶片弯曲变形的贡献度出现 2 个峰值,第一个峰值出现在叶片的根部,而在弧长 10~15 mm 部分贡献度形成第二个尖峰对应的柔度曲线,这部分叶片柔度较大。这种叶片占叶片总数的 57.1%,具有这种模式的叶片弯曲贡献度曲线中间部显著高于悬臂梁的参考贡献度曲线,称之为中部集中模式。

贡献度另一种分布模式如图 12(b)所示,叶片贡献度曲线只存在一个位于叶片根部的峰值。这种情况叶片的柔性集中体现在叶片根部,叶片的其他部分变形很小。在叶片的中间部分,也能看到贡献度的起伏,但这种起伏没有第一种贡献度分布模式明显。呈现这种模式的叶片占叶片总数的 42.9%,由于这种模式在叶片根部的贡献度与悬臂梁的参考贡献度变化相似,称之为根部集中模式。

计算贡献度曲线时采用局部刚化的假设,刚化部分不会变形,计算时的力矩由局部刚化前的叶片载荷确定,导致刚化前后所受的力矩有微小偏差,这种偏差的相对误差小于 1.7%。

在植物冠层不同位置的叶片具有不同的弹性模量,在同一位置叶片的含水量也会影响弹性模量^[18]。采集的叶片全部来自薄荷植株中部冠层中舒展、健壮、成熟的叶片。试验中展现的 2 种弯曲模式推测可能与叶片的激素分泌^[19]或叶片蜡质层的变化^[20]有关。由于缺乏对植物叶片全生长周期的力学性能测试,实际植物叶片具有的弯曲模式可能更加丰富。

3 结论

1) 薄荷叶片的弯曲变形模式可分为根部集中和中部集中。根部集中模式的叶片占试验叶片的42.9%,中部集中模式的叶片占试验叶片的57.1%。

2) 从叶片的柔度分布来看,柔度的波浪式分布变化普遍存在,且由叶片组成和叶片形状共同决定。对于线弹性弯曲范围内薄荷叶片各位置的柔度可被视为定值,此时这种弯曲模式稳定存在。

3) 在对叶片尖端施加载荷时,为减小加载方式带来的计算误差,特殊的接触形状有利于降低误差,提高数据的可用性,模仿叶片尖端形状的三角形接触有利于降低误差,提高数据有效性。

参 考 文 献

- [1] 徐程扬, 翟明普. 紫椴幼苗的叶片运动与光截获[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 488—493.
Xu Chenyang, Zhai Mingpu. Leaf movement and sunlight interception of *Tilia amurensis* seedlings [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(4): 488—493.
- [2] 徐德进, 徐广春, 许小龙, 等. 施液量、雾滴大小、叶片倾角及助剂对农药在稻叶上沉积的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2056—2062.
Xu Dejin, Xu Guangchun, Xu Xiaolong, et al. Effect of application volume, droplet size, rice leaf incline angle and spray adjuvant on pesticide deposition [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 2056—2062.
- [3] 杨希娃, 代美灵, 宋坚利, 等. 雾滴大小、叶片表面特性与倾角对农药沉积量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 70—73.
Yang Xiwa, Dai Meiling, Song Jianli, et al. Effect of droplet size, leaf characteristics and angle on pesticide deposition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 70—73.
- [4] Hua L, He P, Goldstein G, et al. Linking vein properties to leaf biomechanics across 58 woody species from a subtropical forest [J]. Plant Biology, 2020, 22(2): 212—220.
- [5] 韩戴宇, 李英博, 鞠志新. 6种苔草属植物叶片的力学特性及微观结构[J]. 草业科学, 2023, 40(8): 2082—2090.
Han Daiyu, Li Yingbo, Ju Zhixin. Microstructure and tensile properties of leaves of six *Carex* species [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 2082—2090.
- [6] Lauderbaugh L K, Holder C D. The biomechanics of leaf oscillations during rainfall events [J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(4): 1139—1154.
- [7] Bhosale Y, Esmaili E, Bhar K, et al. Bending, twisting and flapping leaf upon raindrop impact [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 15(3): 036007.
- [8] Gart S, Mates J E, Megaridis C M, et al. Droplet impacting a cantilever: A leaf-raindrop system [J]. Physical Review Applied, College Pk; Amer Physical Soc, 2015, 3(4): 044019.
- [9] Niklas K J. A mechanical perspective on foliage leaf form and function [J]. New Phytologist, 1999, 143(1): 19—31.
- [10] Liou N S, Chen S F, Lu M C. The mechanical properties of caladium petiole [J]. Strain, 2011, 47: 333—340.
- [11] Liu J, Ye W, Zhang Z, et al. Vein distribution on the deformation behavior and fracture mechanisms of typical plant leaves by quasi in situ tensile test under a digital microscope [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2020, 2020.
- [12] McNeil B E, Pisek J, Lepisk H, et al. Measuring leaf angle distribution in broadleaf canopies using UAVs [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218: 204—208.
- [13] Raabe K, Pisek J, Sonnentag O, et al. Variations of leaf inclination angle distribution with height over the growing season and light exposure for eight broadleaf tree species [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 214: 2—11.
- [14] Minorsky P V. The functions of foliar nyctinasty: A review and hypothesis [J]. Biological Reviews, Hoboken, 2019, 94(1): 216—229.
- [15] Zhao Z, Zhou S, Feng X, et al. Static and dynamic properties of pre-twisted leaves and stalks with varying chiral morphologies [J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 34: 100612.
- [16] Moulia B, Fournier M, Guitard D. Mechanics and form of the maize leaf: In vivo qualification of flexural behaviour [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(9): 2359—2366.
- [17] Paushkin A, Saiyan S. Numerical study of the applicability of the saint-venant principle [J]. Matec Web of Conferences, 2017, 117: 00134.
- [18] Tadrst L, Darbois-Textier B. Are leaves optimally designed for self-support? An investigation on giant monocots [J]. Journal of Theoretical Biology, 2016, 396: 125—131.
- [19] Gawadi A G, Avery G S. Leaf abscission and the so-called “abscission layer”[J]. American Journal of Botany, 1950, 37(2): 172—180.
- [20] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability [J]. New Phytologist, 1998, 138(1): 91—98.