

快速测量植物根系长度的方法

刘 顺 康

(东南大学电子工程系)

一、引 言

根系是植物的主要吸收器官,植物依靠根系从土壤里吸收水分和无机盐。根系长度(或密度)对植物的生长起着重要的作用,因此,在植物生理、植物营养、农作物、蔬菜栽培管理、生态、环境以及树苗育种等学科都需要了解根系在不同环境和条件下的生长情况。

一般来说,根系的定性研究满足不了上述学科领域的要求。早期的根系定量研究是用根系重量来表示根的总量,但是研究表明,根系的表面积或总长度比根的重量更能反映植物对水分和无机盐的吸收能力。进一步研究指出,单位体积土壤中根的总长度是个重要参量,但要精确测定根系的总长度并不是件容易的事。

定量测试根系总长度的困难主要有两个:首先,根系的总长度很大,即使体积很小的土壤样品,根系的总长度仍然很大^[1],表1列出了几种植物根系长度。

表1 几种植物的根系长度

植 物 名 称	每升土壤内的总根长(米)
甘 蔗	18
咖 啡	21
禾本植物(Gramina)	66—548
草 皮	364—3434

如果仅仅取0.1升的土壤样品,用人工方法直接测量每段根的长度,然后求出根系的总长度,仍然要化费很多时间。若采用间接的方法,例如先测量根的直径,再测出根的体积,然后求出根的总长度,或者测量一小部分样品的长度,然后测量这部分样品的重量和余下根的重量,得到根的总长度。这两种间接

测量方法的误差很大,因为单位长度的体积和单位长度的重量之比是变化的。第二个困难是由于有些植物的根很细,很容易断,难以用量具直接测量,有的甚至无法直接测量;另外,有些植物的根互相缠绕在一起,无法将它们一根一根地分开,因此根本不可能用人工方法精确测量其长度。

国外曾提出了几种快速测量方法,如直线截获法^[1],定量电视显微成象分析法^[2],自动射线照相法^[3]等,但测量设备的价格昂贵。

目前国内在测量根系长度时,主要采用人工测量方法,既麻烦又费时,误差也很大。很多植物的根系无法进行定量测试,致使根系的研究难以深入。因此,迫切需要解决快速定量测试根系长度的难题。

本文介绍的测量方法是基于直线截获法原理,应用电子测量技术对植物根系进行快速、自动测试,其主要特点是测试精度高、测量时间短、操作简单、工作稳定、显示直观,测量设备的成本大大低于国外同类产品。可以预料,采用本文的方法和装置,将有助于对根系的研究,具有重要的应用价值。

二、基本工作原理

美国学者 Newman 提出的直线截获原理是根据概率理论导出的根系总长度计算方法,现简述如下:

设在矩形区域 A 内,有一长度为 Δl 的根,我们用直线段 PQ 代表根的中心轴线;另外,如图 1 所示,在这一区域内还有一条长度为 h 的直线 MN(也称标尺线)。由图 1 可看出,要使 PQ 与 MN 相交,必须使 PQ 的中点 D 位于 MN 两侧的 $\frac{1}{2}\Delta l$ 内,换言之,只有与中点 D 落在图中虚线所示的带状面积内 PQ 与 MN 才可能相交。

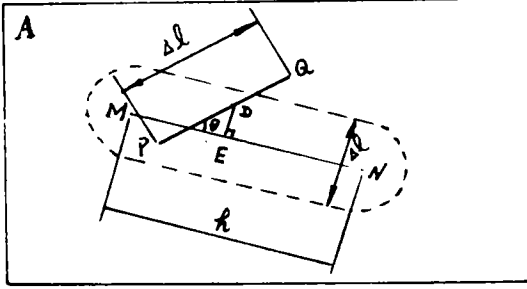


图 1

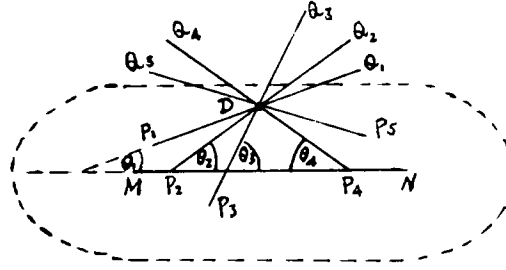


图 2

现在我们来求 PQ 与标尺线 MN 相交的概率。先假定中点 D 确实位于标尺线 MN 两侧的 $\frac{1}{2}\Delta l$ 内,为清楚起见,我们把图 1 中虚线部分放大,如图 2 所示。易见, P_1Q_1 与 MN 夹角 θ_1 较小时, P_1Q_1 与 MN 不相交;当夹角增大到 θ_2 时,正好与 MN 相交,这时

$$\sin\theta_2 = \frac{DE}{P_2D} = \frac{DE}{\frac{1}{2}\Delta l} \quad (1)$$

继续增大夹角, PQ 与 MN 仍相交,但当夹角大于 θ_4 时, PQ 与 MN 不相交。因此 PQ 与 MN 相交的条件是

$$|\sin\theta| \geq \frac{DE}{\frac{1}{2}\Delta l} \text{ 或 } DE \leq \frac{1}{2}\Delta l |\sin\theta| \quad (2)$$

于是 PQ 与 MN 相交的概率就可表示为

$$\frac{\frac{1}{2}\Delta l |\sin\theta|}{\frac{1}{2}\Delta l} = |\sin\theta| \quad (3)$$

根的中点 D 并不一定在 MN 两侧的 $\frac{1}{2}\Delta l$ 内,当 D 在区域 A 内任意位置,则 PQ 与 MN 相交的概率为:

$$P = \frac{(\Delta l)h}{A} |\sin \theta| \quad (4)$$

如果区域 A 内有很多的标尺线,其总长度为 H,则 PQ 与标尺线的交点数为

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\Delta l)H}{A} |\sin \theta| d\theta = \frac{2(\Delta l)H}{\pi A} \quad (5)$$

对区域 A 内任意放置的根系总长度为 L 的情况,可求得根系的中心轴线与标尺线的交点总数为:

$$N = 2LH/\pi A \quad (6)$$

因此,根系的总长度为

$$L = \pi NA/2H \quad (7)$$

很明显,只要能测出根系的中心轴线与标尺线的交点总数 N,就能很容易求得根系的总长度。

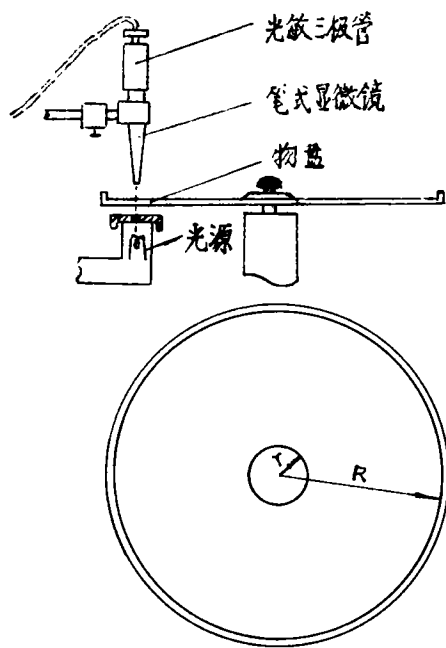


图 3

为了便于测量,我们把区域 A 取为圆形,标尺线是一系列不同半径的圆。在实际测量结构中,区域 A 是一个透光物盘的环形区,在物盘下方有一点光源,上方为光信号接收器件(光敏三极管),如图 3 所示。物盘既作圆周运动,又作平移运动,当物盘上放有根系时,根截断光源的光路,就等效于上面所说的根系与标尺线相交。

下面我们来求物盘运动时根截断光路的次数。物盘上光斑的轨迹方程为:

$$\begin{cases} X = \frac{S}{T}t \cos \frac{2\pi B}{T}t \\ Y = \frac{S}{T}t \sin \frac{2\pi B}{T}t \end{cases} \quad (8)$$

式中:S——物盘的行程;T——物盘移动一个行程所需的时间;B——物盘每分钟旋转的圈数

如(8)式可得到

$$\rho^2 = X^2 + Y^2 = \frac{S^2}{T^2}t^2 \quad (9)$$

$$\therefore t = \frac{T}{2\pi B}\theta$$

$$\therefore \rho^2 = \left(\frac{S}{2\pi B}\right)^2 \theta^2 \quad (10)$$

令 $\frac{S}{2\pi B} = \alpha$, 则得到

$$\rho = \alpha \theta \quad (11)$$

可见,当物盘运动时,物盘上光斑的轨迹(即标尺线)是一条阿基米德螺线,因此,可求得标尺线的总长度为:

$$H \doteq 2\pi \cdot \frac{1}{2} [(R+r)n] = \frac{\pi(R+r)(R-r)}{d} \quad (12)$$

式中： n ——光斑轨迹的总圈数； d ——轨迹间距离

区域 A 的面积，即是环形区的面积为：

$$A = \pi(R+r)(R-r) \quad (13)$$

最后得到待测根系的总长度为：

$$L = \frac{\pi NA}{2H} = \frac{1}{2} \pi d N \quad (14)$$

值得指出的是，这一公式是在理想情况下得到的，即不考虑根系之间相互相交和重叠的情况。而实际测量过程中，由于根的数量很多，几乎要铺满整个物盘，因此根系之间不可避免的要发生相交和重叠，考虑这一因素，应对式(14)适当加权，才能保证测量的精度。

三、测量装置的结构和性能

基于上述原理，我们设计了一套测量装置，它主要由机械传动部件、光电转换装置和光电信号处理器 3 部分组成。

机械传动部件的作用是使物盘作圆周运动的同时，完成直线平移运动。物盘直接固定在一微电机轴上，该微电机支座通过丝杆传动与另一微电机轴连接。

光电转换装置由点光源、笔式显微镜和光敏器件组成。为了能测量直径 0.1mm 的根，希望物盘上的光斑尽可能小，在点光源上方设置了一个光阑。光敏器件在接收到点光源发出的光信号后，产生一微弱的光电转换信号电流。为了提高分辨率，在点光源与光敏器件之间插入了一个笔式显微镜。

光电信号处理器主要完成微弱电流放大，形成脉冲信号和计数、显示的作用，其电路方框图如图 4 所示。

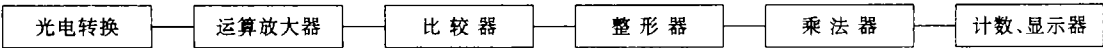


图 4. 光电信号处理器电路方框图

测量装置的测量范围：根系总长约 40m，根系直径 0.1—2mm；对一般植物，可以将根剪成约 2cm 长的短根后撒到物盘上；对细而密集的根，可以在物盘里盛水后进行测试，不过，这时水层应是薄薄的一层，并均匀铺满物盘表面。测量一次仅需 6.5 分钟，根系的总长度可直接显示，测量的操作非常简单。

表 2

样 品 规 格	测 量 值 (m)	误 差 (%)
15m ($\varnothing 0.09-2.0\text{mm}$)	① 15.29	+1.93
	② 15.25	+1.67
	③ 15.11	+0.73
	④ 15.15	+1.00
20m ($\varnothing 0.15-0.35\text{mm}$)	① 19.98	-0.10
	② 20.79	+3.95
	③ 20.06	+0.30
	④ 20.58	+2.90
30m ($\varnothing 0.09-0.2\text{mm}$)	① 29.19	-2.70
	② 28.88	-3.73
	③ 29.47	-1.77
	④ 28.93	-3.57

四、测量结果和讨论

如上所述，除了极少数植物的根可以用量具直接测出其总长度外，大多数植物

的根无法快速、定量测出其总长度。因此,为了检验本文所介绍的测量方法的测试精度,采用金属丝作为样品来模拟根系进行实验。

1. “干”测。将金属丝剪成 2cm 左右的短丝,随机撒到物盘上,并把相互重叠的丝拨开,测量数据列于表 2。

2. “湿”测。在物盘中倒入清水,水层深约 1mm,将剪短的金属丝随机撒入水中,仔细将重叠的根拨开,测量数据列于表 3。

3. 不同磷处理下植物的根长测度结果见表 4*。

表 3

样 品 规 格	测 量 值 (m)		误 差 (%)
30m ($\varnothing 0.09-0.2\text{mm}$)	①	31.19	+3.97
	②	29.57	-1.43
	③	30.01	+0.03
	④	29.55	-1.50

表 4

品 种	处 理	根 长 (m)			相 对 误 差 (%)	根 密 度 (m/dm ³ 土)
		①	②	平 均 值		
茅 状 羊 茅	未施磷	2.19	2.15	2.17	1.84	2.17
	施 磷	23.95	24.05	24.02	0.54	24.02
竹 豆	未施磷	17.79	17.54	17.67	1.41	17.67
	施 磷	25.08	25.73	25.41	2.55	25.41
小 麦	未施磷	16.43	16.57	16.50	0.85	16.50
	施 磷	30.01	31.27	30.64	4.11	30.64
意 大 利	未施磷	4.84	4.30	4.57	5.90	4.57
黑 麦 草	施 磷	25.32	25.02	25.17	1.19	25.17

* 由南京农业大学提供

实验结果表明,采用本文方法,样品长度在 15—30m 内测量误差小于 5%,测量结果的重现性好,这种快速测量方法大大节省人工测量时间。

鉴于这种测量方法原理是基于概率分布计算,从理论上说是存在着一定误差的,而且每次测量时将根随机地撒到物盘上,每次撒的分布情况不可能完全一致,测量值只能是一个数值范围。另外,如果测量时未把相互重叠的根全部分开,也将引起人为的误差。

根据我们大量实验测量结果来看,如不考虑测量的人为误差因素,一般误差不大于 5%。该测量装置制成的仪器经南京农业大学和江苏农学院试用,证明其性能优良,并已通过鉴定。

参 考 文 献

[1] Newman, E. I., J. appl. Ecol, 3, pp. 139—145, 1966.
[2] Baldwin, J. P. et al., J. appl. Ecol. 8, pp. 543—554, 1971.
[3] Baldwin, J. P. et al., Plant and Soil, 37, pp. 209—213, 1972.