doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.041

林冠层结构参数自动测量系统设计与试验*

温一博　范文义　常　颖
(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 为获得林冠层结构参数的监测数据,设计了一种可长期自动感知叶面积指数、聚集度指数和郁闭度指数的自动测量系统。自动测量系统由测量车、固定轨道和太阳能供电系统组成。太阳能驱动的测量车由单片机控制完成指定作业任务,收集轨道所在样线上的光强分布数据,获得不同长度光斑概率分布函数,利用大光斑消除法和贝尔定律解算林冠层结构参数。为验证测量方法和解算精度,先后在林场 32 块样地进行试验,结果表明自动测量系统测得的有效叶面积指数与 LAI-2200 测量结果相近,相关系数为 0.832 5,郁闭度指数与一步一抬头方法测量结果相同,并测得 32 块样地的聚集度指数。

关键词: 树木　冠层参数　自动测量系统
中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)11-0302-07

Design and Experiment of Automatic Measuring System for Forest Canopy Structure Parameters

Wen Yibo　Fan Wenyi　Chang Ying
(*College of Forestry*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*)

Abstract: To perceive long-term leaf area index, foliage clumping index and canopy density index data of forest canopy structure parameters, an automatic instrument was designed. With this instrument, an effective solution was provided to obtain canopy structural parameter for forest management plan and to collect long-term data for scientific research. The instrument was made up of measuring vehicle, designed orbit and solar energy system. The measuring vehicle was controlled by single chip microcomputer to complete the assigned tasks, such as collecting intensity distribution data of orbital light and obtaining probability distribution function of light spots in different lengths. A large flare elimination method and Bell's Law were used to calculate the forest canopy structure parameters. Leaf area index was measured via a non-destructive optical method, which was applied to crown canopy leaf area index long-term measurement, and then gain the long time serial data. The leaves of 32 plots of experimental forest were tested to measure the accuracy and solver of this method. Results showed that the effective leaf area index obtained via this instrument was similar to LAI - 2200 measurement with correlation coefficient of 0.832 5, and canopy density index was consistent with what traditional methods did.

Key words: Forest　Canopy parameters　Automatic measuring system

引言

林冠层是树木与外界环境相互作用最直接和最活跃的界面层[1],是树木接受太阳能进行光合作用的主体,也是树木参与水循环的重要部分[2]。冠层结构体现出植被适应环境的一种生态决策[3]。树

收稿日期: 2015-06-02　修回日期: 2015-08-20
*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD08B01)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572014AA37)
作者简介: 温一博,博士生,主要从事定量遥感和林下仪器设计研究,E-mail: 100004644@qq.com
通讯作者: 范文义,教授,博士生导师,主要从事林业定量遥感研究,E-mail: fanwy@163.com

木的冠层几何学特征直接影响着植物吸收光能进行光合作用能力，还直接影响着大气降水的截留能力，冠层的截留作用减小了地表径流洪峰流量，改变了降水分配[4-6]。不同的冠层结构间接影响着风速、林下空气温湿度、土壤蒸发量、土壤热储量、土壤温度等林内小气候特征，同时也间接决定着森林生态群落和果园病虫害等[7-9]。因此，冠层结构的研究有利于提升现代果园施肥、施药的合理性，同时对森林固碳能力、水源涵养研究提供支持，有利于进一步了解生态系统的运作机制。

冠层结构参数中使用叶面积指数（Leaf area index，LAI）衡量叶片的疏密程度[10-13]，被认为是描述树木健康、研究植被与外界能量循环、物质循环的重要指标。目前叶面积指数实地测量主要分为直接法和间接法，直接法包括择伐标准木法、针探法、收集落叶法等，可很好地保证叶面积指数测量的准确性，但耗时、耗力且多数对植被具有破坏性，因而不适用于长时间序列观测；间接法主要是根据光线衰减、叶片反射光谱特性等，使用光学仪器如 LAI-2000、Sunscan、鱼眼相机等对叶面积指数进行测量，其操作简单、瞬时、对植被没有破坏性，但测得的叶面积指数为有效叶面积指数，其值低于真实的叶面积指数[14-15]。聚集度指数是描述植被空间分布的聚集程度，是真实叶面积指数和有效叶面积指数的比值，分为树冠尺度聚集度指数和冠内叶片聚集度指数。光学测量叶面积指数理论中大部分是基于空隙随机分布假设，但实际中由于树木丛生、单株木枝条分布的轮生、分枝结构、叶片的簇生等特点会造成树冠之间聚集及树冠内部枝叶的聚集效应，是导致基于空隙随机分布假设叶面积指数测量仪器值偏低的原因[16]。准确获得聚集度指数对于准确获取真实叶面积指数、冠层雨水截流、蒸散发等研究具有重要意义[17]。目前测量聚集度指数的仪器主要有 Chen 等[15]研发的 Trac 冠层分析仪。林冠层结构另外一个重要参数郁闭度用来描述林分中乔木树冠遮蔽地面的程度，在不同郁闭度指数的林下光环境具有较大区别，直接影响着植物的生存、生长以及形态结构[18-19]，也与环境因子（如土壤和空气的温湿度）和生物因子（病虫害）具有较高相关性。测量仪器主要为鱼眼镜头光学冠层分析仪和传统一步一抬头方法。

长期的冠层结构参数监测数据在果树林研究中可以作为调整施药参数依据，提升农药利用率、减少果品污染和环境污染[20]，根据监测数据作出合理间伐和整枝措施提升冠内光照强度从而控制林下湿度和温度，增加坐果率、提高品质、减小大小年现象，并为现代化果园种植研究提供有效的数据支持。林业中森林冠层结构参数监测数据是日步长碳、水循环机理模型中的重要输入参数，也对生态群落研究意义重大。但目前商品化冠层结构的测量仪器主要为人工实地操作，连续监测极大地增加了工作量[21]。农业物联网技术为林冠层实时监测提供了有效的技术支持[22-23]。农业物联网由感知层、传输层和应用层构成。其中感知技术是物联网的关键[24]。本文根据大光斑消除法理论[16]，设计一种能自动测量林冠层主要参数的测量系统，探讨长期观测林冠层结构参数感知技术的可行性。

1　解算原理

测量林冠层结构参数的解算原理为大光斑消除法，理论基础是自然界中林冠层内的叶片存在聚集效应，在相同的叶面积指数下真实的林冠层相比叶片呈随机分布的林冠层存在大空隙的概率更高。由此，由自动测量系统获得实地林冠层空隙分布函数，通过模拟冠层叶片呈随机分布情况下的空隙分布函数，可对比计算得到实地冠层结构参数。

1971 年 Miller 和 Norman 假设冠层叶片呈水平随机分布，推导出光线入射冠层后林下光斑的概率分布函数[25]。1992 年 Chen 等在此基础上提出空隙分布理论[16]，可以计算出叶片随机分布情况下的光斑概率，将垂直光线入射方向的面称为 M 面，有

$$F(\lambda)=\left(1+L_P\frac{\lambda}{W_P}\right)\exp\left(-L_P\left(1+\frac{\lambda}{W_P}\right)\right) \quad (1)$$

式中　λ——林下光斑长度

$F(\lambda)$——林下大于 λ 的光斑概率分布

L_P——聚集单元投影在 M 面上的叶面积指数

W_P——叶片在 M 面上的投影宽度

自然界中林冠层内叶片并非随机分布，因此为描述不同的冠层空间分布特征，聚集度指数研究得到了发展，当叶片随机分布时冠层聚集度指数为 1，当叶片均匀分布时（叶片并排生长）聚集度指数大于 1，当叶片聚集分布时（极限为叶子空间位置相互重叠）聚集度指数小于 1。聚集度指数用 Ω_E 表示，引入描述光线透过林冠层衰减的贝尔定律公式[12]

$$P(\theta)=\exp(-G(\theta)\Omega_E L_E/\cos\theta) \quad (2)$$

式中　$P(\theta)$——光线透过率

Ω_E——聚集度指数

L_E——叶面积指数　　θ——叶倾角

$G(\theta)$——不同叶倾角下林冠层的消光系数

$F(\lambda)$表示叶片随机分布情况下林下大于 λ 的光斑概率分布，那么 $F(0)$就可以表示林下光线透过林冠层的概率 $P(\theta)$，叶片呈随机分布情况下聚集度

等于1,代入式(2)有

$$L_E = -\frac{\cos\theta}{G(\theta)}\ln F(0) \tag{3}$$

实际中叶片的聚集度指数并非等于1,通过仪器测量,可以得到实际光斑概率分布函数,用 $F_m(\lambda)$ 表示,同样 $F_m(0)$ 也可以表示林下光线透过林冠层的概率 $P(\theta)$,代入式(2)有

$$\Omega_E L_E = -\frac{\cos\theta}{G(\theta)}\ln F_m(0) \tag{4}$$

式(4)、(3)相比得到聚集度指数的计算式为

$$\Omega_E = \frac{\ln F_m(0)}{\ln F(0)} \tag{5}$$

引入光斑消除法理论,经过以往研究可知,聚集单元内叶片呈随机分布,聚集单元内的 L_P 与 L_E 可以表示为[26]

$$L_P = \frac{G(\theta)L_E}{\cos\theta} \tag{6}$$

代入式(3)中得到

$$L_P = -\ln F(0) \tag{7}$$

聚集效应增加了 $F_m(\lambda)$ 中较大光斑的概率,消除了实测样线上的大光斑,经过迭代运算得到叶片呈随机分布情况下的光斑概率分布 $F(\lambda)$,对比可求得林冠层叶片的聚集度指数 Ω_E。

具体迭代算法是将 $L_P = -\ln F_m(0)$ 作为初值代入式(1)中解得 $F(0)$,从而得到 $L_{P+1} = -\ln F(0)$,当 $L_P - L_{P+1} > \varepsilon$($\varepsilon$ 为允许范围,一般可设定为0.05)时,认为 $F_m(\lambda)$ 中存在聚集效应产生的光斑,即2个聚集单元间的大光斑。消除长度最长的光斑,重新计算光斑概率分布得到 $F_{mr}(0)$,再次进行迭代运算,直到 $L_P - L_{P+1} < \varepsilon$ 时停止计算,认为得到的 $F_{mr}(\lambda)$ 是叶子呈随机分布情况下的光斑分布。

经过大光斑消除法计算后,可以得到叶片随机分布下的光斑概率分布 $F_{mr}(\lambda)$ 和叶片随机分布下林冠层的光线透过率 $F_{mr}(0)$,但是大光斑消除过程相当于缩短了测量样线上的树冠总长度,变化比率用 Δg 表示为

$$\Delta g = \frac{F_m(0) - F_{mr}(0)}{1 - F_m(0)} \tag{8}$$

调整式(5)得到聚集度指数计算式为

$$\Omega_E = \frac{(1+\Delta g)\ln F_m(0)}{\ln F_{mr}(0)} \tag{9}$$

在聚集度指数的计算中,利用贝尔定律和测量的光斑概率分布得到式(4)。本文自动测量系统固定轨道的布设方向要求尽量为东西向,当光线垂直照射轨道方向时进行测量,根据以往研究,此时光线透过林冠层的消光系数 $G(\theta)$ 近似为0.5,叶面积指数表达式为[26]

$$L_E = -2\frac{\cos\theta_E}{\Omega_E}\ln F_m(0) \tag{10}$$

式中 θ_E——太阳天顶角

本系统测量车在固定轨道上运行并收集光强数据,得到轨道所在样线上的光斑分布,其中较大光斑来自于林冠层聚集单元产生的空隙,可以理解为样线上没有被植被遮盖的长度。根据郁闭度指数的定义和大光斑消除法,郁闭度(Canopy density index, Cdi)可以表达为

$$R_{\mathrm{cdi}} = 1 - (F_m(0) - F_{mr}(0)) \tag{11}$$

2 仪器设计

2.1 总体设计

根据大光斑消除法,获得测量样线上光线透过林冠层的光强,计算得到样线上不同大小的光斑分布函数,从而解算林冠层结构参数。本文设计在林下东西方向搭设固定轨道,测量车由单片机控制完成预定时间下轨道所在样线上的光强测量,将测量值记录在SD卡中。本系统的目的是长期观测林冠层结构,因此根据需求自动测量系统由太阳能供电系统、测量车和固定轨道组成。如图1所示。

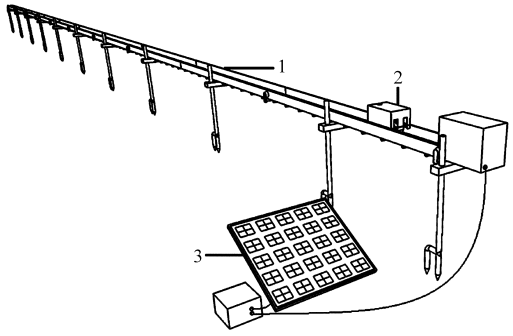

图1 自动测量系统总体结构

Fig. 1 Overall structure of automatic measurement system

1. 测量轨道 2. 测量车 3. 太阳能供电系统

2.2 结构设计

本文设计的测量系统核心在于测量车及搭载在其上的各控制模块和执行模块,通过测量车运行、采集数据获得光强分布,解算冠层结构参数。通过测量车内置单片机控制完成测量任务。测量车结构如图2所示。

测量车采用 Arduino 作为主控制器进行设计,通过“H桥”驱动控制减速电动机实现测量车的正、反向移动。测量车低负载且在固定轨道上运行,考虑其稳定性和易控性,采用四轮单电动机驱动。减速电动机轴配有光栅测速传感器,可以反馈车轮转数并通过单片机控制作业时的测量车运行速度。仪器内置4节18650锂电池为测量车运行提供电能,测量车在轨道上运行的同时,光强传感器记录所在

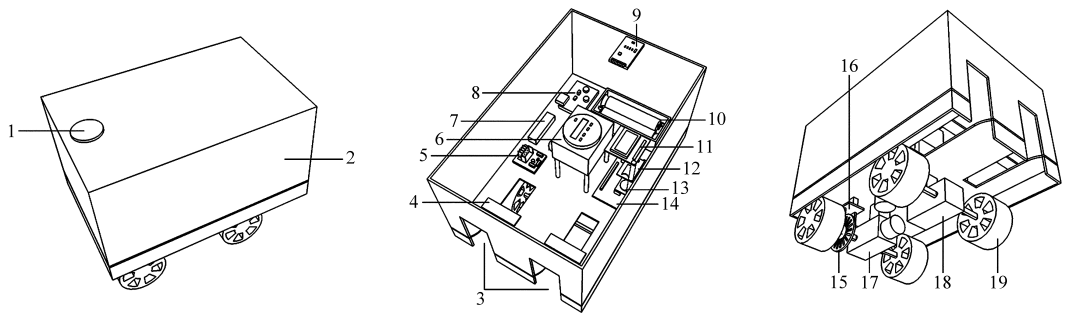

图 2　测量车结构示意图

Fig. 2　Design of measuring vehicle

1. 低通滤光片　2. 防水外壳　3. 充电接口　4. 充电电刷　5. 电动机驱动　6. 时控开关　7. 保险管　8. 锂电池充放电保护模块　9. 光强模块　10. 内置锂电池　11. 显示屏幕模块　12. SD 卡模块　13. 时间模块　14. Arduino UNO 单片机　15. 光栅盘　16. 光栅测速传感器　17. 减速电动机　18. 支架　19. 车轮

点位的光强。本研究采用的光强传感器为日本 RHOM 株式会社的 16 位高精度数字光强度传感器 BH1750FVI,信号传输采用 I^2C 总线接口,避免了 A/D 转换系统带来的误差,BH1750FVI 传感器感光范围为波长 300 ~ 700 nm,为了减小叶片散射、反射阳光对光强测量的影响,本仪器在 BH1750FVI 传感器上方添加了 500 nm 低通滤光片,将传感器感光范围限制在波长 300 ~ 500 nm 之间,获得光强数据单位为坎特拉(cd)。

由于林地地形复杂,故设计固定测量轨道,为测量车提供平缓、易重复测量、安全性高的作业平台。固定轨道由若干轨道架和停靠棚组成,如图 3 所示。

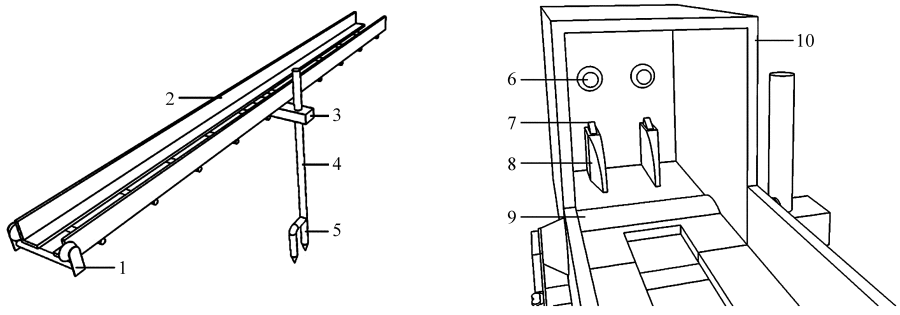

图 3　固定轨道结构示意图

Fig. 3　Design of fixed orbit

1. 连接器　2. 轨道　3. 调节夹　4. 固定架　5. 固定叉　6. 缓冲垫　7. 充电接头　8. 引导轨　9. 停靠坡　10. 停靠棚

轨道架可以调整高度和角度,各节轨道架由连接器相连。停靠棚连接在轨道起始端,为测量车提供非测量条件下的避雨环境,停靠棚与太阳能供电系统相连,为测量车内置锂电池固定周期充电。引导轨和测量车的充电接口设计可以保证测量车的充电刷与充电接头相连。停靠坡可以减少雨水的流入,测量车停靠时通过斜坡作用力和重力使测量车贴靠在停靠棚内侧。本系统是对林冠层结构参数进行长期测量,而测量车是根据光栅测速传感器判断行驶距离,长期重复前、后向移动会造成实际位置与单片机计算位置存在偏差,因此测量车设置后向移动较前向移动多出 5 cm 以保证每次测量完成后测量车可停靠在停靠棚内,缓冲垫可以缓解车与停靠棚内壁的撞击。在搭设轨道时固定架位于轨道北侧,避免固定架遮挡阴影对测量结果造成影响。

太阳能供电系统为本系统提供长期电能,如图 4 所示。

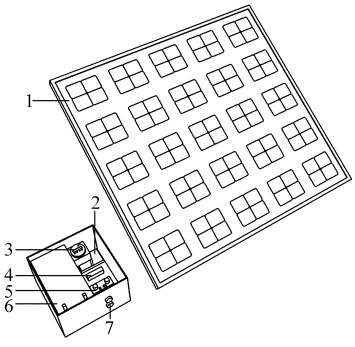

图 4　太阳能供电系统

Fig. 4　Solar power system

1. 太阳能板　2. 太阳能充电控制器　3. 时控开关　4. 保险管　5. 变压模块　6. 蓄电池　7. 航空插头

太阳能供电系统配有 50 W 太阳能板,除太阳能板外其他部件放置在防水盒内,与外界由防水航空插头相连,其中充电插头与太阳能板连接,输电插头与停靠棚充电接头相连。时控开关控制太阳能供电系统为测量车锂电池充电的时间,为避免高湿、高

温,通常在上午为仪器锂电池充电,定时充电避免了充电接头长期带电,增加了仪器安全性,延长了内置锂电池的使用寿命。

2.3 工作原理

测量用固定轨道东西方向搭设在林内,如因地形、树干等遮挡不能严格东西方向搭设时,偏差角度应小于 10°,测量车将根据轨道方向、测量点经纬度坐标判断测量时间。测量时间应在每日太阳光入射方向与轨道面垂直的时间,仪器通过时钟模块获取时间信息,当达到作业时间后,利用温湿度传感器读取实时空气相对湿度,研究表明下雨时空气湿度高,为避免测量车在雨水下作业,当空气湿度大于 75% 时取消本次测量。当空气湿度小于 75% 时测量车通过单片机控制电动机驱动使作业车以 0.2 m/s 速度匀速前进,光强传感器采样频率为 20 Hz,数据记录在 SD 卡中,每次测量以当天日期创建文本文件,利用光栅测速传感器将每 2 m 的光强作为一行记录在文本中。当测量车行驶指定距离后,单片机控制测量车反向运行至停靠棚内完成本次测量。获得的数据通过运算得到轨道所在样线上光线透过林冠层的光斑分布,根据大光斑消除法和贝尔定律解算林分下聚集度指数、叶面积指数和郁闭度指数。

3 试验设计与数据分析

3.1 试验方法

为验证本系统测量和解算方法,先后在 32 块样地进行野外试验,以 2014 年 7 月 28 日在哈尔滨市帽儿山林场老爷岭试验区柞树林测试为例介绍试验方法和解算方法。试验样地为近成熟林,树木平均胸径 16.2 cm,优势木树高 23 m,地势平缓。在试验区域每间隔 20 m 选取 3 行 3 列共 9 个点,使用 LAI-2200冠层分析仪对每点进行测量取平均值作为样地区域叶面积指数参考值,测得林分有效 LAI 为 2.52。通过一步一抬头方法测得研究区域郁闭度指数为 0.9。配合水准仪在林下东西方向搭设 30 m 测量用固定轨道,根据日期、研究区域经纬度信息计算出太阳垂直照射时间,即测量车作业时间为11:39。

3.2 数据分析

测量车在固定轨道上平稳运行,同时以 20 Hz 频率记录轨道所在样线上的光强。光强分布如图 5 所示。

光强描述了光线透过林冠层照射在轨道所在样线上的光照和阴影分布。每个凸起代表林下的光斑,凸起的宽度即为光斑大小,经统计 30 m 轨道上分布大小光斑共 41 个,根据采样频率和测量车运行速度可以得到每一个光斑的长度。在天气晴朗、阳光垂直照射轨道情况下,光斑的大小反映了林冠层空隙的大小。使用 $F_m(\lambda)$ 表示实测冠层中光斑长度大于 λ 的空隙分布概率,例如 $F_m(10)$ 表示光斑长度大于 10 cm 的光斑概率,根据轨道所在样线上的光强分布筛选出光斑长度大于 10 cm 的光斑共计 11 个,累计长度为 276 cm,则在 30 m 的轨道中概率为 0.092。根据式(7)和式(1)可以得到相同透过率下冠层叶片呈随机分布的概率 $F(\lambda)$,$F_m(\lambda)$ 与 $F(\lambda)$ 对比如图 6 所示。

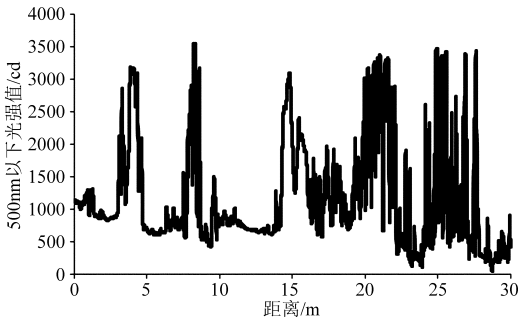

图 5 轨道所在样线上的光强分布

Fig. 5 Distribution of illumination value measured on track

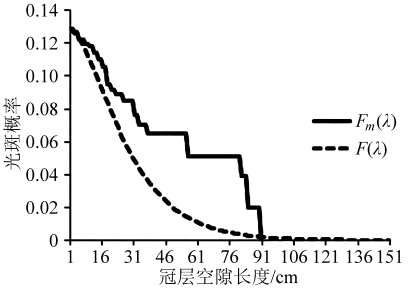

图 6 冠层空隙光斑概率分布

Fig. 6 Gap-size distributions

从图 6 可见在相同的林冠层透过率下,实测冠层和叶片随机分布冠层的光斑分布有较大区别,这是由于实际林冠层内叶片聚集效应产生大的孔隙,光斑概率也相应增大。为此,利用大光斑消除法,减去由叶片聚集产生的光斑,调整冠层光斑分布概率函数 $F_{mr}(\lambda)$。使用原理解算中介绍的迭代方法解算,经过 6 次迭代运算后达到 $L_p - L_{p+1} < 0.05$ 停止运算。得到的 $F_{mr}(0)$ 为 0.052 632,相同透过率下叶片呈随机分布冠层的空隙分布函数使用 $F_r(\lambda)$ 表示。使用大光斑消除法前后光斑分布对比如图 7 所示。

由图 7 可见经过大光斑消除法后,$F_{mr}(\lambda)$ 与 $F_r(\lambda)$ 相近,可以认为消除大光斑后的林冠层内叶片随机分布是形成空隙的主要原因,图中 $F_m(0)$、$F_{mr}(0)$ 分别为 0.128 92 和 0.052 63。大光斑消除法造成采样样线长度的缩减,根据式(8)可以求得冠层长度相对变化比率 $\Delta g = 0.087\,576$;根据式(9)可

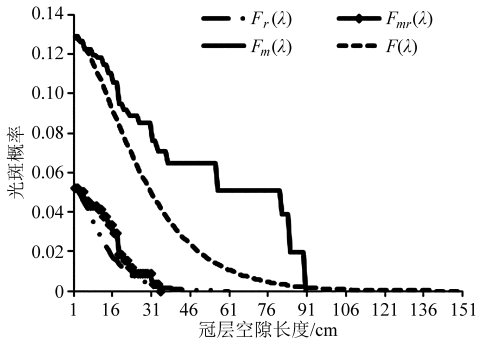

图 7　大光斑消除法前后光斑概率对比

Fig. 7　Spot probability before and after large spot elimination method

以得到聚集度指数 Ω_E = 0.756 676；根据式(4)、(10)求得有效叶面积指数为 2.35，真实叶面积指数为 3.11；根据式(10)得到郁闭度指数为 0.923 7。测量结果较 LAI－2200 测得的有效 LAI 偏小 6.7%，郁闭度指数保留 1 位小数和与传统一步一抬头测量郁闭度指数相同，并解算出林冠层聚集度指数，得到林分真实叶面积指数。

使用同样方法在 2014 年 6 月、2015 年 6—7 月在哈尔滨东北林业大学试验林场对 32 块样地进行测量试验(图 8)。本仪器测得有效叶面积指数与 LAI－2200 测量结果相近(图 9)，相关系数为 0.832 5。

32 块样地中使用本测量系统测量的有效叶面积指数最大值为 6.05，最小值为 1.02，均值为 3.61，使用 LAI－2200 测量结果最大值为 6.72，最小值为 1.54，均值为 3.79，均方根误差为 0.557。郁闭度测量结果与传统一步一抬头测量方法结果相同。聚集度指数在 0.62～0.93 之间，平均值为 0.823。

4　结论

(1)设计了由测量车、固定轨道和太阳能供电系统组成的林冠层参数自动测量系统。测量车通过单片机控制获得轨道所在样线上的光强分布，通过

图 8　人工林试验现场

Fig. 8　Field experiment in plantation

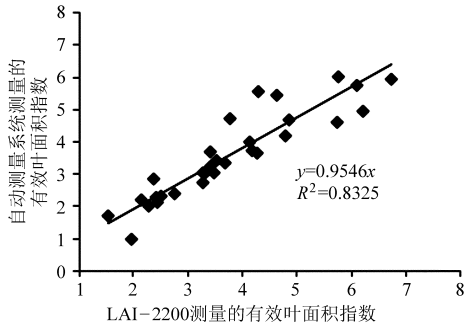

图 9　自动测量系统与 LAI－2200 观测的有效叶面积指数

Fig. 9　Effective LAI measured by automatic measurement system and LAI－2200

大光斑消除法和贝尔定律解算获得冠层结构参数，是一种非破坏可连续观测冠层参数的方法。

(2)试验表明，自动测量系统可以测得林冠层有效叶面积指数、真实叶面积指数、聚集度指数和郁闭度指数，在林场进行 32 次对比试验中郁闭度指数与一步一抬头方法测量结果相同，有效叶面积指数与 LAI－2200 测量结果相关系数为 0.832 5，均方根误差为 0.557，测量值偏低的原因与解算贝尔定理只考虑了单角度消光方法有关。

(3)自动测量系统的固定轨道为测量车搭建了平稳、可重复收集光强数据的平台，目前轨道设计为支架结构，在陡峭林地搭设轨道不易实现，下一步研究中需要改进测量运行方式，增强自动测量系统对不同地形的适应性。

参　考　文　献

1　李德志，臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展[J]. 世界林业研究，2004，17(3)：12－16.
Li Dezhi，Zang Runguo. The research advances on the structure and function of forest canopy as well as their temporal and spatial changes[J]. World Forestry Research，2004，17(3)：12－16.(in Chinese)

2　邱建丽，李意德，陈德祥，等. 森林冠层结构的生态学研究现状与展望[J]. 广东林业科技，2008，24(1)：75－82.
Qiu Jianli，Li Yide，Chen Dexiang，et al. The research progress and the significance of canopy structure in forest ecology[J]. Guangdong Forestry Science and Technology，2008，24(1)：75－82.(in Chinese)

3　郭孝玉. 长白落叶松人工林树冠结构及生长模型研究[D]. 北京：北京林业大学，2013.
Guo Xiaoyu. Crown structure and growth model for larix olgensis plantation[D]. Beijing：Beijing Forestry University，2013.(in Chinese)

4　陈腊娇，朱阿兴，秦承志，等. 流域生态水文模型研究进展[J]. 地理科学进展，2011，30(5)：535－544.
Chen Lajiao，Zhu Axing，Qin Chengzhi，et al. Review of eco-hydrological models of watershed scale[J]. Progress in Geography，2011，30(5)：535－544.(in Chinese)

5　Chapin III F S，Matson P A，Vitousek P. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. Springer Science & Business Media，2011.

6 Cibin R, Athira P, Sudheer K P, et al. Application of distributed hydrological models for predictions in ungauged basins: a method to quantify predictive uncertainty[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2033 - 2045.

7 张玲, 薛新宇, 丁素明, 等. 我国密植型果园病虫害防治方法与技术对策[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 184 - 187.
Zhang Ling, Xue Xinyu, Ding Suming, et al. Methods and technical countermeasures of planting orchard about pest control in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 184 - 187. (in Chinese)

8 俞龙, 黄健, 赵祚喜, 等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 224 - 228.
Yu Long, Huang Jian, Zhao Zuoxi, et al. Laser measurement and rxperiment of hilly fruit tree canopy volume[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 224 - 228. (in Chinese)

9 王万章, 洪添胜, 陆永超, 等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):158 - 161.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Lu Yongchao, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(8):158 - 161. (in Chinese)

10 刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5): 734 - 743.
Liu Yang, Liu Ronggao, Chen Jingming, et al. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data[J]. Journal of Geo-information Science, 2013, 15(5): 734 - 743. (in Chinese)

11 Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant Cell & Environment, 1992, 15(4): 421 - 429.

12 Chen J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 80(2): 135 - 163.

13 Chen J M, Cihlar J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index[J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6211 - 6222.

14 吴伟斌, 冯灼峰, 洪添胜, 等. 基于近红外反射的柑橘重叠叶片叶面积指数测量系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 179 - 184.
Wu Weibin, Feng Zhuofeng, Hong Tiansheng, et al. Measurement system for citrus LAI based on near-infrared reflection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 179 - 184. (in Chinese)

15 吴伟斌, 洪添胜, 王锡平, 等. 叶面积指数地面测量方法的研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(2): 270 - 275.
Wu Weibin, Hong Tiansheng, Wang Xiping, et al. Advance in ground-based LAI measurement methods [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(2): 270 - 275. (in Chinese)

16 Chen J M, Black T A. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 60(3): 249 - 266.

17 Terashima I, Hanba Y T, Tazoe Y, et al. Irradiance and phenotype: comparative eco-development of sun and shade leaves in relation to photosynthetic CO_2 diffusion[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(2): 343 - 354.

18 Zhang Y, Wang J, Liu Y, et al. Study on the sun-shine characteristics of the tropical secondary forest gap in the dry-hot season in Xishuangbanna[J]. Guangxi Zhiwu, 2000, 21(1): 1 - 8.

19 Mountford E P, Savill P S, Bebber D P. Patterns of regeneration and ground vegetation associated with canopy gaps in a managed beechwood in southern England[J]. Forestry, 2006, 79(4): 389 - 408.

20 王万章, 洪添胜,李捷,等. 果树农药精确喷雾技术[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 98 - 101.
Wang Wanzhang, Hong Tiansheng, Li Jie, et al. Review of the pesti-cide precision orchard spraying technologies [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 98 - 101. (in Chinese)

21 胡理乐, 朱教军, 李俊生, 等. 林窗内光照强度的测定方法[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5057 - 5065.
Hu Lile, Zhu Jiaojun, Li Junsheng, et al. Reviews on methods of measuring light intensities within forest gaps[J]. Acta Ecologica Sinice, 2009, 29(9): 5057 - 5065. (in Chinese)

22 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222 - 230.
Ge Wenjie, Zhao Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222 - 230. (in Chinese)

23 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报, 2013,44(10): 216 - 226.
He Yong, Nie Pengcheng, Liu Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 - 226. (in Chinese)

24 李道亮. 农业物联网导论[M]. 北京:科学出版社, 2012.

25 Miller E E, Norman J M. A sunfleck theory for plant canopies I. Lengths of sunlit segments along a transect[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(5): 735 - 738.

26 Chen J M, Rich P M, Gower S T, et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D24): 29429 - 29443.