doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.043

冠层反射光谱测量中主动光源光谱稳定性控制*

丁永前[1]　李　杨[2]　谭星祥[2]　曹卫星[1]　朱　艳[1]

(1.南京农业大学国家信息农业工程技术中心,南京 210095;
2.南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室,南京 210031)

摘要:结合自主研发的冠层反射光谱测量装置,对装置主动光源采用的波长 730 nm 和 810 nm 两种窄带 LED 的光谱稳定性进行了研究。实验结果表明:两种 LED 在未加特殊控制、按照测量要求高频脉动点亮时,结温均显著升高,造成光源光谱峰值波长的线性红移和发光强度的线性降低,严重影响测量装置测量结果的稳定性和可靠性。提出了一种间歇式脉动驱动 LED 的方法,该驱动方法使 LED 工作时结温的升高幅度保持在 2℃以内,峰值波长的波动小于 1 nm。最后该驱动方法被嵌入到反射光谱测量装置中,进行了室内及田间稳定性测试实验,反射光谱响应值最大相对波动率小于 5%。

关键词:作物冠层　反射光谱　主动光源　光谱稳定性

中图分类号:S123;TP702　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)06-0284-07

引言

研究表明,利用作物冠层的光谱信息可以有效实现作物生长特征和植株营养状况的动态监测[1-5],相比于传统的物理和生化方法研究作物的营养状况,采用冠层反射光谱传感技术来获取作物的生长信息指标具有快速、便携、无损、不受时空限制等突出优点,是农业信息化领域研究热点和迫切需要的技术手段[6-8]。发达国家已有作物冠层光谱测量仪器的商用产品问世[9-10],国内研究尚处于实验研究阶段,目前国外的主流产品都采用主动光源的形式,其主要特征是仪器自带能发射特定波长的主动光源(多采用发光二极管,即 LED),该类仪器能消除外部光环境对测量结果的影响,是当前国内外的主要研究方向。

LED 器件具有体积小、寿命长、亮度高、功耗低等优点,被广泛采用为光谱检测及分析仪器的光源[11-13]。但目前市场上比较成熟的 LED 芯片的电光转换效率仅能达到 30%,还有 70%的能量转化成了热量[14],从而导致 LED 结温的升高,而结温的升高又会影响 LED 发光光谱的稳定性,具体表现为:LED 发光光谱峰值波长红移、正向电压降低、相对光强减小等现象[15-17]。而在冠层反射光谱测量中,往往对 LED 主动光源的发光光谱波长范围和发光强度有严格要求,因此,LED 结温变化有可能影响测量装置的可检测性、测量结果的稳定性和科学性,实现主动光源光谱稳定性是实现冠层反射光谱有效测量的前提。

本文结合自主研发的作物冠层反射光谱测量装置,研究 LED 结温对其发光光谱稳定性的影响,对如何控制 LED 的结温、实现主动光源光谱稳定性的方法进行研究,给出冠层反射光谱测量装置在田间稳定性测试结果。

1　材料与方法

1.1　冠层反射光谱测量装置

图 1 为自主研发的冠层反射光谱测量装置的功能结构图,该测量装置总体上可分为主动光源、信号检测单元、信号处理模块和主控单元等部分。主动光源采用峰值波长分别为 730 nm 和 810 nm 的窄带 LED 以一定顺序排列组成 LED 阵列,通过单片机控制恒流源模块产生驱动电流,驱动两种 LED 阵列发出高频脉动光,经柱面镜聚焦以后成为具有规则形状的条形光;检测单元由窄带滤光片和光电传感器组成,承载作物生长信息的高频脉动反射光及缓变环境反射光叠加在一起通过窄带滤光片后被光电传感器接收;光电传感器的响应信号经过信号处理模块一系列信号调理电路处理之后,环境反射光的响

收稿日期:2013-07-30　修回日期:2013-08-31

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B04)、中央高校基本科研业务费资助项目(KYZ201127)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:丁永前,副教授,博士,主要从事农业信息化和自动化研究,E-mail:yongqiand@njau.edu.cn

应被滤除，装置最终检测出作物冠层对主动光源的反射光谱响应。

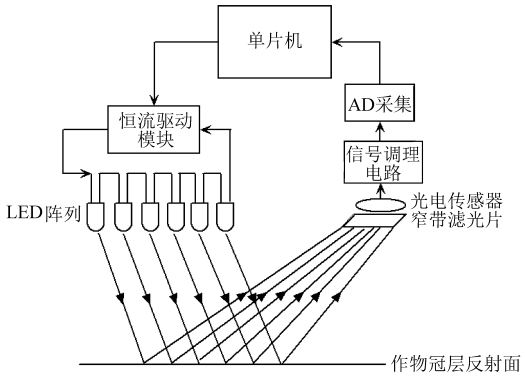

图 1　冠层反射光谱测量装置功能结构图

Fig. 1　Functional block diagram of canopy reflectance spectrum measurement instrument

依据南京农业大学国家信息农业工程技术中心对于作物生长指标敏感波段研究成果[4-6]，对本文自主研发的测量装置主动光源两个光谱检测波长范围的要求分别为：(730 ± 5) nm 和(810 ± 10) nm；同时要求测量结果具有较好的稳定性，在被测对象不变时，测量结果相对波动小于 5%。为达到此测量要求，本文采用窄带 LED 和滤光片配合使用的方式加以实现，使窄带 LED 的峰值波长位于检测波长测量范围之内，以获取测量装置较大的信噪比，滤光片滤除检测波长允许范围之外的冠层反射光。

本文的研究目的在于探求一种 LED 工作模式和控制方法，使 LED 在测量过程中保持中心波长和发光强度的基本稳定，最终实现 LED 光谱的稳定性。

1.2　LED 光谱测量实验平台

由于实际的冠层反射光谱测量装置的光源是由若干性能参数相同的 LED 组成的阵列，为了研究方便，本文专门设计了如图 2 所示的实验装置来研究单个 LED 的结温与其发光光谱特征之间关系，并根据研究结果提出控制 LED 结温的控制方法。

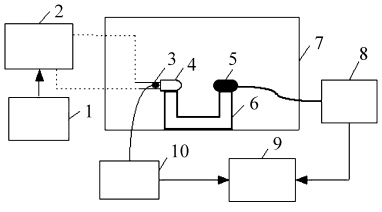

图 2　LED 光谱特征测量实验装置原理图

Fig. 2　Experimental device of LED spectral measurement

1. 单片机　2. LED 恒流驱动模块　3. 热电偶传感器　4. 待测窄带 LED　5. 光纤探头　6. 支架　7. 恒温箱　8. 微型光纤光谱仪　9. 计算机　10. 数据采集卡

图 2 所示实验装置中待测窄带 LED 分别采用中心波长为 730 nm 和 810 nm 的 LED。通过单片机给 LED 驱动恒流模块提供控制信号，控制 LED 的点亮和熄灭；恒温箱(温度可调范围为 25 ~ 95℃，温度波动度为 ± 1℃)，用来控制 LED 的环境温度；微型光纤光谱仪为杭州晶飞科技有限公司生产的 FLA4000 型光谱检测仪，测量范围为 400 ~ 1 100 nm，分辨率为 0.1 nm，用来采集和记录光纤接收到的 LED 光谱信息；采用 K 型热电偶作为测温探头，与被测 LED 的管脚焊接在一起，以有效感测 LED 管脚的温度；数据采集卡用来采集热电偶传感器测量到的 LED 的管脚温度，并通过 USB 发送给计算机保存相关数据；支架用来支撑 LED 和光纤探头，保证实验过程中 LED 与光纤探头相对位置的一致性。

在实验过程中，实验装置单个 LED 的工作方式和冠层反射光谱测量装置光源的实际工作方式相同，即 LED 均采用高频脉动的方式点亮，脉动工作频率为 2 kHz。LED 的额定工况是指在脉动工作频率下，波长 730 nm LED 和 810 nm LED 的峰值电流分别为 90 mA 和 150 mA。

1.3　结温的测量方法和原理

影响 LED 发光光谱稳定性的根本因素是 LED 的结温，结温的变化将导致 LED 发光光谱峰值波长的变动，从而影响 LED 的整体发光功率和光强的变化。因此，快速、准确地测量 LED 的结温是本文的关键技术之一。目前已报道了很多种测量 LED 结温的方法[18]。综合考虑 LED 封装的特点和测量精度两个方面的影响，选择管脚测温法来测量 LED 的结温，这种方法具有非破坏性、精确性、简易性，被广泛应用于 LED 结温的测量中[19-20]。

管脚测温法是利用 LED 器件的热传输性质，通过测量 LED 管脚温度和芯片消耗的电功率，以及热阻来确定 LED 结温，该方法能够通过测量管脚的温度，准确地计算出 LED 芯片的结温[21]。LED 芯片结温和管脚温度的关系为

$$T_j = T_P + P_j R_{jp} \tag{1}$$

式中　T_j——LED 芯片的结温，℃

T_P——LED 管脚温度，℃

P_j——LED 消耗的电功率，W

R_{jp}——从芯片到管脚的热阻，一般由厂家给出，或者由实验确定，℃/W

2　实验结果分析与讨论

2.1　LED 额定工况下结温及发光光谱的变化

图 3 为恒温箱设定为 25℃时，两种 LED 在额定工况下，结温随时间的变化曲线；图 4 是和图 3 实验过程同步记录的两种 LED 的光谱图，图中省略了部分中间过程的光谱曲线数据。

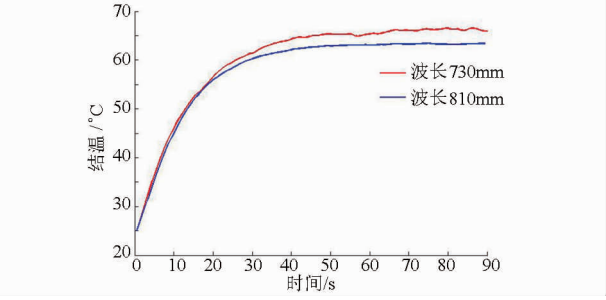

图 3 LED 结温随时间的变化曲线

Fig. 3 Changes of LED junction temperature over time

图 3 表明:LED 在额定工况下点亮时,其结温有一个显著升高的过程,两种 LED 的结温均在 60s 以后基本达到稳定,730 nm LED 的稳定温度为 65℃,810 nm LED 的稳定温度为 63℃。这是由于 LED 在工作过程中不仅产生光能,还产生大量热能,当内部产热和外部散热达到平衡时,结温基本保持稳定。

图 4 表明:LED 在额定工况下点亮时,其峰值波长和发光强度都发生了改变,730 nm LED 的峰值波长从 730.6 nm 红移至 738.0 nm,已超出对检测波长范围的要求;同时,LED 的相对光强下降了 20.6%,810 nm LED 峰值波长从 810.4 nm 红移至 819.3 nm,已处在允许检测波长范围的边界;同时,LED 的相对光强下降了 26.0%。

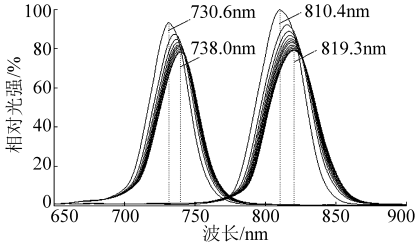

图 4 LED 相对光强与峰值波长的关系曲线

Fig. 4 Changes of LED emission spectra over time

结合图 3 所示的实验结果看,在结温上升过程中,LED 的发光光谱是变化的,在此过程中冠层反射光谱测量装置的测量值也将有一个变化的过程,并在 60 s 以后渐趋稳定。就实现冠层反射光谱测量装置的稳定测量而言,可以通过装置的预热得以解决;但就装置测量结果的有效性和科学性而言,由于结温变化过大已无法满足测量要求,因为结温的升高会导致 LED 的发光波段超出许可的波长范围或接近许可波长范围的边界,由于滤光片的作用将导致测量装置检测到的冠层反射光谱响应信号变小,信噪比降低,影响测量结果的有效性;同时也影响测量结果的科学性,因为 LED 的发光波段越靠近允许检测波长范围的峰值波长,则测量结果的可信度越高。

2.2 LED 结温与其峰值波长及发光强度的关系

为了进一步研究 LED 结温与其峰值波长及发光强度的关系,利用图 2 所示实验装置,通过恒温箱改变 LED 的环境温度来展开研究。

当 LED 不发光时,LED 的结温将和所处的环境温度保持一致,为了使 LED 结温成为一个可控的因素,对 LED 采用小电流供电、恒温箱控制 LED 结温的方式,研究结温对峰值波长和发光强度的影响。图 5 是两种 LED 在 25℃下,驱动电流 5 mA 的结温变化曲线,图 5 表明,在 5 mA 小电流驱动下,730 nm 和 810 nm LED 发热导致的结温升幅分别为:0.8℃和 0.5℃,可以近似认为 LED 结温由环境温度决定,通过调节恒温箱的温度可达到控制 LED 结温的目的。

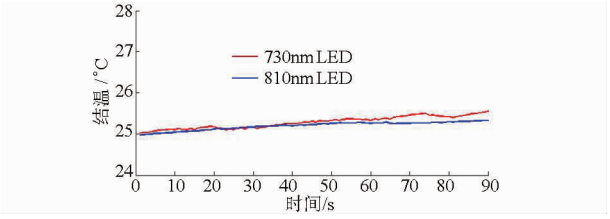

图 5 LED 结温随时间的变化曲线

Fig. 5 Changes of the LED junction temperature over time

LED 在 5 mA 小电流驱动下,调节恒温箱的温度,使之在 25℃到 75℃之间变化,每次温度调节增幅为 5℃,图 6 和图 7 分别记录了不同结温条件下两种 LED 的峰值波长及其相对光强的变化情况,实验过程中发现,结温恒定时,LED 的峰值波长和相对光强表现出了非常好的稳定性,其最大相对波动率小于 1%。

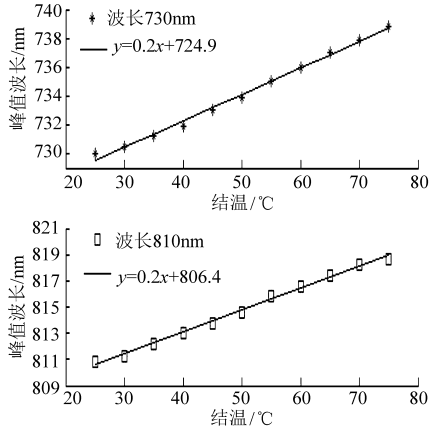

图 6 LED 峰值波长随结温的变化曲线

Fig. 6 LED peak wavelength changes with junction temperature

图 6 和图 7 的实验结果表明:①结温会导致两种 LED 的峰值波长发生红移,同时会使 LED 发光强度降低。②两种 LED 的峰值波长和结温之间、发光强度和结温之间都有良好的线性关系。③LED 结温稳定将保证 LED 发光光谱的稳定,即峰值波长和发光强度的稳定。

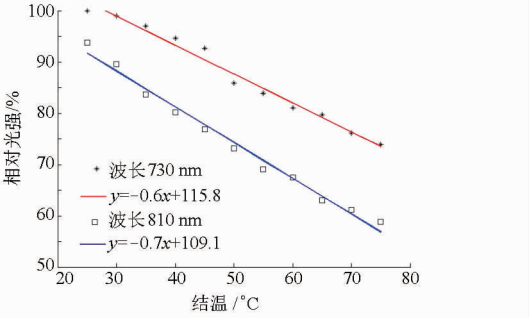

图 7　LED 相对光强随结温的变化曲线

Fig. 7　Changes of LED relative light intensity over junction temperature

2.3　LED 光谱稳定性控制方法

从 2.2 节的实验结果来看，虽然降低 LED 的驱动电流可以使其结温基本保持不变，但在较小电流驱动下，两种 LED 的发光强度十分微弱，不能满足测量装置对作物冠层的反射光谱检测的需要。

针对冠层反射光谱可检测性而言，额定工况驱动 LED 时，检测装置容易获得较高的信噪比，冠层反射光谱的可检测性强；但结合 2.1 节的实验结果来看，LED 在额定工况下工作时，由于结温的升高，使得 LED 无法提供测量装置所要求的检测光谱，主要表现为：光谱峰值波长红移至检测波长允许范围的边界，甚至是检测波长之外，这一方面将严重影响检测装置的信噪比，同时也将影响检测结果的有效性和科学性。

因此，为了满足冠层反射光谱的可检测性和有效性，必须对 LED 的工作方式进行有效地控制，使其既能抑制 LED 结温的变化，又能保证 LED 发光光谱的稳定性。

2.3.1　控制方法原理

为了控制 LED 的结温，保证装置光源的光谱稳定性，同时保证反射光谱的可检测性，本文提出了一种间歇式脉动驱动 LED 的控制方法，其原理是：使 LED 间歇式工作于额定工况下，从而达到减少 LED 的热积累、降低 LED 结温的目的。LED 的驱动控制方式如图 8 所示。

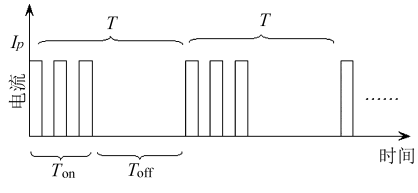

图 8　LED 间歇式脉动驱动电流原理图

Fig. 8　Schematic diagram of LED intermittent pulse-driven current

图 8 中 T 表示 LED 间歇式工作周期，I_p 表示 LED 的额定驱动电流，T_{on} 表示一个间歇式工作周期内 LED 的高频脉动点亮时间，T_{off} 表示一个间歇式工作周期内 LED 的熄灭时间。

根据自主研发的冠层反射光谱测量装置信号处理电路的特征，获取一个有效的冠层反射光谱数据的时间为 15 ms，因此，将 T_{on} 设置为 15 ms。T_{off} 的设定可以通过实验观察 LED 结温变化情况加以确定。

2.3.2　控制方法的实验验证

在农田作物冠层反射光谱测量中，分为手持式静态测量和机载式动态测量，机载动态测量时一般车辆行驶速度为 3 ~ 5 km/h，因此，测量装置数据的更新率达到 10 Hz 已能满足动态测量要求，本文给出有效数据更新率为 10 Hz 时的实验结果，以说明间歇式脉动控制方式对抑制 LED 结温升高的效果。

图 9 ~ 11 是 T_{on} = 15 ms、T_{off} = 85 ms、恒温箱设定温度为 25℃ 时，采用图 2 所示实验装置测得的 LED 结温、峰值波长及其相对光强变化曲线。

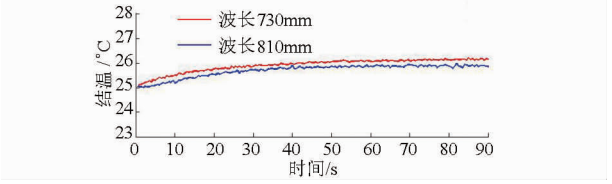

图 9　LED 结温随时间的变化曲线

Fig. 9　Changes of LED junction temperature over time

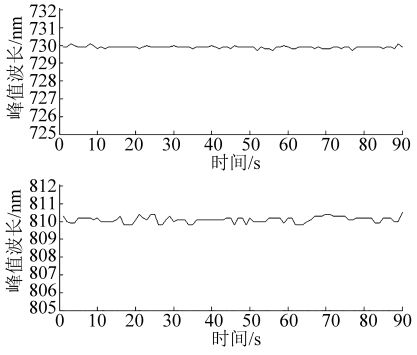

图 10　LED 峰值波长随时间的变化曲线

Fig. 10　Changes of LED peak wavelength over time

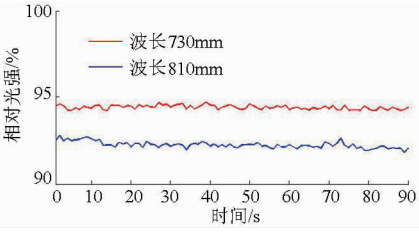

图 11　LED 相对光强随时间的变化曲线

Fig. 11　Changes of LED relative intensity over time

采用相对波动率对测量装置测量数据的稳定性进行评价，相对波动率定义为

$$R_{ref} = \frac{|D_t - D_a|}{D_a} \times 100\% \qquad (2)$$

式中　R_{ref}——相对波动率　　D_t——测量值

D_a——测量值的平均值

图 9 ~ 11 的实验结果表明:

(1) T_{on} = 15 ms、T_{off} = 85 ms 时,两种 LED 的结温升幅分别为:1.2℃和 1℃,表明此时间歇式脉动控制方式已经达到了抑制 LED 结温升高的效果。

(2) T_{on} = 15 ms、T_{off} = 85 ms 时,730 nm LED 峰值波长的波动最大为 0.8 nm,810 nm LED 峰值波长的波动最大为 0.7 nm,已满足对检测波长范围的要求。

(3) T_{on} = 15 ms、T_{off} = 85 ms 时,两种 LED 的相对光强基本保持稳定,相对波动率小于 1%。

(4) 两种 LED 以 T_{on} = 15 ms、T_{off} = 85 ms 间歇式脉动工作时,其光源光谱的稳定性满足装置的测量要求。

2.3.3 控制方法在反射光谱测量装置中的应用

为了验证间歇式脉动驱动方式在自主研发的冠层反射光谱测量中的应用效果,将该方法植入到测量装置主动光源的控制器中,在实验室内针对标准白板进行了稳定性实验。

图 12 和图 13 分别为室温条件下,自主研发的测量装置 810 nm 波长对标准白板的反射响应 AD 采样值及其相对波动率。从图中可以看到,装置的测量值体现出了很好的稳定性,相对波动率最大为 2.84%,平均相对波动率为 0.63%(相类似,730 nm 波长对标准白板的反射响应值的最大相对波动率也小于 3%)。

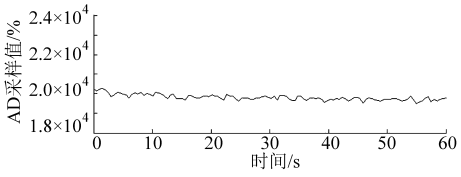

图 12 标准白板反射响应 AD 采样值

Fig. 12 AD-sampled values of reflection response of standard whiteboard

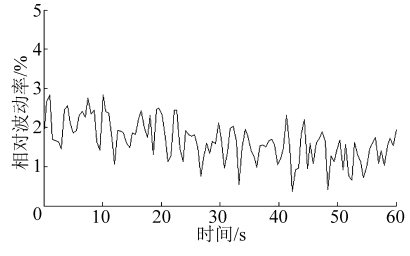

图 13 标准白板反射响应相对波动率

Fig. 13 Fluctuation ratio of the reflection response of standard whiteboard

结合图 9 ~ 11 的实验结果可以得出:

(1) 应用间歇式脉动驱动 LED 的控制方法,可以有效抑制 LED 的结温变化,结温主要取决于外界测试环境的温度,在外界环境温度变化不大时,能保证反射光谱测量装置光源的光谱稳定性。

(2) 应用间歇式脉动驱动 LED 的控制方法,在环境温度小于 40℃时(能满足实际田间测试环境),730 nm LED 和 810 nm LED 的峰值波长均符合目标检测波段要求,能保证测量结果的有效性;同时,由于测量环境温度变化将引起 LED 发光强度的变化,由此引起的测量结果的变化可以根据结温和发光强度的线性关系进行有效补偿。

2.4 冠层反射光谱测量装置田间稳定性测试

2013 年 4 月中旬在江苏省南京农业大学如皋实验基地使用自主研发的测量装置,对小麦冠层的反射光谱进行了稳定性测试实验,LED 采用本文提出的间歇式脉动驱动方式,数据有效更新率为 10 Hz。限于篇幅,本文此处仅给出 810 nm 波段反射光谱响应的数据,图 14 为 810 nm 波段冠层反射光谱响应的 AD 采样数据。

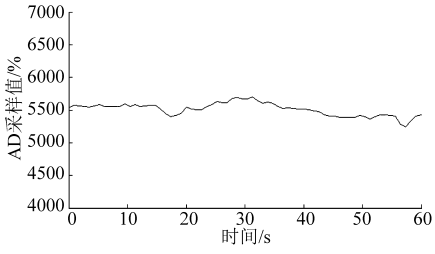

图 14 小麦冠层反射响应 AD 采样值

Fig. 14 AD-sampled values of reflection response of wheat canopy

图 15 为冠层光谱响应值的相对波动率曲线,其中最大相对波动率为 4.65%,平均相对波动率 1.53%,其中波长 730 nm 响应值的最大相对波动率也小于 5%,测量数据的稳定性表明主动光源发射光谱峰值(中心)波长和辐射强度在测量过程中保持了很好的稳定性,满足了测量要求。

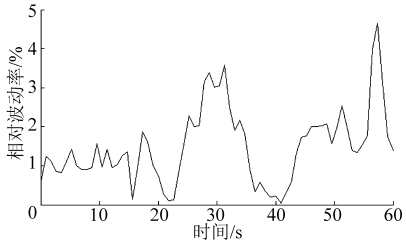

图 15 小麦冠层反射响应相对波动率

Fig. 15 Fluctuation ratio of the reflection response of wheat canopy

3 结论

(1) LED 在高频大电流持续点亮时,其结温明显上升,导致其发光光谱的变化。

(2) LED 结温与其发光光谱的峰值波长及其光强之间具有良好的线性关系,控制 LED 结温变化

即可控制其光谱的稳定性。

（3）间歇式脉动驱动控制方法可以有效抑制 LED 在工作过程中的结温变化，该方法在自主研发的冠层反射光谱测量装置中进行了应用，田间测试中反射光谱响应值相对波动率小于 5%，保证了测量光谱的稳定性，说明该方法具有实用价值。

参 考 文 献

1 Riedell W E, Blackmer T M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged heat [J]. Crop Science, 1999, 39(6): 1835 – 1840.

2 Weber V S, Araus J L, Cairns J E, et al. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes [J]. Field Crops Research, 2012, 128: 82 – 90.

3 Fernando Solari, John Shanahan, Richard Ferguson, et al. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(3): 571 – 579.

4 朱艳，李映雪，周冬琴，等. 稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系[J]. 生态学报，2006，26(10)：3463 – 3469.
Zhu Yan, Li Yingxue, Zhou Dongqin, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 26(10): 3463 – 3469. (in Chinese)

5 李映雪，朱艳，田永超，等. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系[J]. 作物学报，2006，32(3)：358 – 362.
Li Yingxue, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 358 – 362. (in Chinese)

6 姚霞，刘小军，王薇，等. 小麦氮素无损监测仪敏感波长的最佳波段宽度研究[J]. 农业机械学报，2011，42(2)：162 – 167.
Yao Xia, Liu Xiaojun, Wang Wei, et al. Optimal bandwidths of sensitive bands for portable nitrogen monitoring instrument in wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 162 – 167. (in Chinese)

7 陈青春，田永超，顾凯健，等. 基于多种光谱仪的水稻前期植株氮积累量监测[J]. 农业工程学报，2011，27(1)：223 – 229.

8 李树强，李民赞，李修华，等. 冬小麦生育早期冠层叶片光谱的特征与应用[J]. 农业机械学报，2012, 43(2)：165 – 169.
Li Shuqiang, Li Minzan, Li Xiuhua, et al. Analysis and application of spectral characteristic of winter wheat in early growth periods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 165 – 169. (in Chinese)

9 Karen McMahon. Trimble offers handheld GreenSeeker crop sensor [J]. Farm Industry News, 2012, 45 (8): 53.

10 Martin D E, López Jr J D, Lan Yubin. Laboratory evaluation of the GreenSeeker™ handheld optical sensor to variations in orientation and height above canopy[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2012, 5(1): 43 – 47.

11 李修华，李民赞，崔笛. 基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J]. 农业机械学报，2009，40(增刊)：252 – 256.
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di, et al. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 252 – 256. (in Chinese)

12 司马伟昌，张玉钧，王志刚，等. 多波长 LED 阵列光源叶绿素荧光探测仪电路的单片机实现[J]. 仪器仪表学报，2007，28(10)：1820 – 1825.
Sima Weichang, Zhang Yujun, Wang Zhigang, et al. MCU realization of chlorophyll fluorometer circuit based on multi-wavelength LED array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(10): 1820 – 1825. (in Chinese)

13 刘振方，胡亚平，张文超. 生命科学仪器中发光二极管型激发光源性能的提高[J]. 中国组织工程研究与临床康复，2007，11(9)：1692 – 1694.
Liu Zhenfang, Hu Yaping, Zhang Wenchao. Improvement in the performance of light emitting diode source for life sciences instruments[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2007, 11(9): 1692 – 1694. (in Chinese)

14 Cheng Jenhau, Liu Chunkai, Chao Yulin, et al. Cooling performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED [C]// 2005 24th International Conference on Thermoelectrics, New York: AIP Press, 2005: 53 – 56.

15 Wang Jen-Cheng, Fang Chia-Hui, Wu Ya-Fen, et al. The effect of junction temperature on the optoelectrical properties of InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes[J]. Journal of Luminescence, 2012, 132(2): 429 – 433.

16 Chen Keng, Narendran Nadarajah. Estimating the average junction temperature of AlGaInP LED arrays by spectral analysis[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(5): 701 – 705.

17 丁天平，郭伟玲，崔碧峰，等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析，2011，31(6)：1450 – 1453.
Ding Tianping, Guo Weiling, Cui Bifeng, et al. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1450 – 1453. (in Chinese)

18 饶丰，葛志晨. LED 结温测量方法[J]. 照明工程学报，2011，22(增刊)：46 – 50.

19 梁田静，张方辉，邱西振，等. 结温对高显指低色温白光 LED 光谱特性的影响[J]. 功能材料，2012，43(24)：3389 – 3392.
Liang Tianjing, Zhang Fanghui, Qiu Xizhen, et al. The influence of junction temperature on the spectral characteristics of white LED with low color temperature and high color rendering index[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(24): 3389 – 3392. (in Chinese)

20 陈挺，陈志忠，林亮，等. GaN 基白光 LED 的结温测量[J]. 发光学报，2006，27(3)：407 – 411.
Chen Ting, Chen Zhizhong, Lin Liang, et al. Methods for determining junction temperature of GaN-based white LEDs [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2006, 27(3): 407 – 411. (in Chinese)

21 郭威，陈继兵，安兵. LED 光源的结温测量方法[J]. 电子工艺技术，2012，33(6)：320 – 322，340.
Guo Wei, Chen Jibing, An Bing. Measurement of junction temperature in white LED[J]. Electronics Process Technology, 2012, 33(6): 320 – 322, 340. (in Chinese)

Control Stability of Active Light Source Spectra during Measuring Reflectance of Canopy

Ding Yongqian[1] Li Yang[2] Tan Xingxiang[2] Cao Weixing[1] Zhu Yan[1]
(1. *National Engineering and Technology Center for Information Agriculture*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210095, *China*
2. *Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: With the self-developed measurement equipment of canopy reflection spectrum, the spectral stability of two kinds of narrowband-LEDs, which were used as active light sources and had peak wavelengths of 730nm and 810nm respectively, were studied. The experimental results showed that the junction temperature of the LEDs was significantly increased when the LEDs were pulse-lighted in high frequency based on the request of the measurement. The increased junction temperature resulted in linear red-shift of the light source spectra and linear decrease of luminous intensity of the light source, which seriously affected the stability and reliability of the measuring results. A new method of driving LEDs, named intermittent pulse-driving LED, was proposed. When LEDs were driven in this method, the rise of the junction temperature could be effectively controlled below 2℃, and the red-shift of peak wavelength of light source spectra was less than 1nm. Finally using the self-developed measurement equipment of canopy reflection spectrum, in which this method was embedded, the experiments were implemented both in laboratory and wheat field to measure the reflectance response of the crop canopy. The fluctuation ratio of measured results was less than 5%. The LED-driving method proposed could be applied in developing measuring equipments for detecting reflection spectrum of crop canopy.

Key words: Crop canopy Reflectance Active light source Spectral stability

(上接第 265 页)

Cooperative Control of Flow Field and Temperature Field in Refrigerated Transport Carriage

Weng Weibing[1] Fang Dianjun[2,3] Li Qiang[1] Cao Miaolong[1] Wu Jian[1] Xu Xing[1]
(1. *Provincial Key Laboratory of Food Logistics Equipment and Technology*, *Zhejiang University of Science and Technology*, *Hangzhou* 310023, *China*
2. *Department of Production Logistics*, *Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics*, *Dortmund* 44227, *Germany*
3. *Chinese-German School for Postgraduate Studies*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: Heat balance formula of red bayberry was developed. The air flow and temperature field heterogeneity's properties of flow field in refrigerated transport carriage's physical model and the distributions of flow field and temperature field in cross sections and longitudinal sections were analyzed. The wind direction of top right adiabatic gas curtain was set perpendicular to isothermal curves to control the gas curtain fan with constant speed intermittently based on coordination principle. The test data of refrigerated transport carriage showed the highest temperature in cross sections dropped from 3.8℃ to 1.67℃, the biggest standard deviation amplitude of temperature values was 0.387 in three cross sections with length direction. The results indicated that only accelerating the gas curtain fan's speed could not improve the temperature distribution homogeneity effectively, opening the adiabatic gas curtain and adjusting the wind direction in included angle of gradient direction of isothermal curves and tangent direction of flow line based on cooperative principle could improve the temperature distribution homogeneity effectively.

Key words: Refrigerated transport carriage Temperature field Flow field Cooperative control