

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.036

作物生长信息获取多光谱传感器设计与试验*

倪军 王婷婷 姚霞 曹卫星 朱艳

(南京农业大学国家信息农业工程技术中心, 南京 210095)

摘要: 为了实时、快捷、无损获取农作物生长信息,根据作物生长指标的光谱监测机理,研制了一种四波长作物生长信息获取多光谱传感器。采用光学滤波技术提高了光辐射信息输入信噪比,依据作物冠层特征及田间作业环境实际要求,设计了适宜的探测镜头结构参数,确保了多光谱传感器灵敏度与分辨效果,应用T型电阻积分网络搭建了微弱光谱信息放大电路。通过标定,获得了多光谱传感器与FieldSpec Pro FR2500型光谱仪的关系模型,决定系数分别为0.8028、0.8068、0.8185、0.8900。对小麦的试验结果表明,该传感器的平均测量误差分别为5.6%、4.6%、1.4%、4.5%。该传感器能够较好地实现作物冠层反射光谱的实时在线检测,为作物生长监测设备的研发提供了有力支持。

关键词: 作物 生长信息 反射光谱 多光谱传感器

中图分类号: S237; TP73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0207-06

Design and Experiments of Multi-spectral Sensor for Rice and Wheat Growth Information

Ni Jun Wang Tingting Yao Xia Cao Weixing Zhu Yan

(National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To access the growth information of crops fast, non-destructively in real-time, a four band multi-spectral sensor of crop was developed based on spectral monitoring mechanism of crop growth indicators. Optical filtering technique was used to improve the input signal to noise ratio of optical radiation. Based on crop canopy characteristics and operating environment in the field, the suitable structure parameters of detection lens was designed, ensuring that sensitivity and resolution effect of multi-spectral sensor. The weak spectral information amplifying circuit was built by T-type resistance network. Through calibration, the relational model of multi-spectral sensor and FieldSpec Pro FR2500 spectrometer was obtained, the coefficient of determination of which was 0.8028, 0.8068, 0.8185 and 0.8900 respectively. The wheat test results showed that the average measurement error of the sensor were 5.6%, 4.6%, 1.4% and 4.5% respectively. The sensor could realize real-time online tests of crop canopy reflectance spectra to provide strong support for the development of the crop growth monitoring equipment.

Key words: Crop Growth information Reflection spectral Multi-spectral sensor

引言

方便快速、准确可靠且低成本地获取农作物生

长信息(氮含量、氮积累量、叶面积指数、叶干重)是实施精准农业的基础,是实现作物精确管理调控的关键。长期以来,作物生长信息获取方法是通过田

收稿日期: 2012-05-21 修回日期: 2012-06-26

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100703)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2010395、BE2011351、BE2012302)、江苏省省级现代服务业(软件产业)发展专项引导资金资助项目、江苏省工业和信息产业转型升级专项引导资金(物联网专项)资助项目、江苏省农业科技自主创新资金资助项目(SCX(12)3272)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PADA)

作者简介: 倪军,副教授,主要从事农业信息工程研究,E-mail: nijun@njau.edu.cn

通讯作者: 朱艳,教授,博士生导师,主要从事农业信息技术研究,E-mail: yanzhun@njau.edu.cn

间破坏性采样、室内生化测定,虽然结果较为可靠,但费时费工、污染环境,且在时空尺度上很难满足实时、快速、无损的要求^[1-2]。近年来,基于反射光谱识别物体特征的无损监测技术由于无破坏性,信息获取方便,实时性好等优点,被广泛用于作物生长指标及估产农学机理的研究中,为作物生长信息的快速感知提供了技术支撑^[3-5]。但这些研究大多数都是基于现有的地物光谱仪,价格昂贵,结构复杂,操作繁琐,不利于田间推广使用,而且受知识产权限制,难以二次开发^[1,6]。目前国内一些单位模仿地物光谱仪结构,研制了一些测量植被指数、作物叶片氮素、叶绿素的设备样机^[7-13],但基本上都处于实验室试制阶段,功能单一,结构复杂,成本高,仍然不能满足精准农业对农田信息低成本获取的要求,作物生长传感器的研制更是空白。

本文基于作物生长信息反射光谱监测机理,利用国家信息农业工程技术中心关于稻麦生长指标敏感波段的研究成果,研制用于监测作物生长信息(叶层氮含量、氮积累量、叶面积指数和叶干重)的多光谱传感器。

1 多光谱传感器测量原理

作物在生长过程中,叶层氮含量、叶层氮积累量、叶面积指数、叶干重等生长指标变化会引起作物冠层反射光谱变化^[14]。图1为使用美国ASD公司生产的FieldSpec Pro FR2500型背挂式野外交光谱辐射仪测量的宁麦9号在拔节期至灌浆后期冠层光谱反射率曲线(处理条件为纯氮施用量 90 kg/hm^2 ,基追比1:1)^[15]。从图中可以看出,在不同的生育时期,作物冠层反射光谱随作物生长信息变化而有明显差异。根据课题组已有的研究结果^[16-19],波长560、710、720、810 nm处光谱反射率与稻麦生长信息密切相关,且其动态变化与稻麦生长信息变化之间具有一定的规律性,因此通过光电转换器件获取这些波长的反射率信息,可以反演稻麦的生长状况。

一般地,反射率定义为物体反射能量与入射能

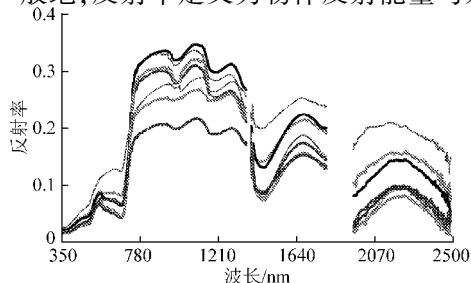


图1 小麦冠层反射光谱随生育时期的动态变化图

Fig.1 Dynamic change diagram of wheat canopy reflectance spectra in reproductive period

量的比值,光谱反射率为在某个特定波长间隔下测定的物体反射率^[20]。当波长为 λ 的太阳光谱平行投射到作物冠层叶片后产生朗伯反射,根据朗伯余弦定理,有

$$\frac{d\phi_{\lambda}}{dA d\omega} = L_{\lambda} \cos\theta \quad (1)$$

式中 L_{λ} ——作物冠层的反射辐射亮度

ϕ_{λ} ——光功率 A ——光所投射的面积

ω ——立体角 θ ——反射角

定义 M_{λ} 为作物冠层单位面积向上半球空间反射总光功率,则有

$$M_{\lambda} = \iint \frac{d\phi_{\lambda}}{dA} = \iint L_{\lambda} \cos\theta d\omega = L_{\lambda} \int_0^{0.5\pi} \cos\theta \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi_{\lambda} = \pi L_{\lambda} \quad (2)$$

若波长为 λ 的太阳光谱平行入射到作物冠层单位面积上的光功率为 E_{λ} ,根据反射率定义可得作物冠层对波长为 λ 的太阳光谱反射率 ρ_{λ} 为

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{\lambda}} \quad (3)$$

从式(3)可知,用多光谱传感器分别获取太阳光入射到作物冠层单位面积上的光功率以及冠层表面产生的辐射亮度,就可以计算出作物冠层反射率 ρ_{λ} 值。

2 多光谱传感器设计

多光谱传感器以太阳光作为光源,在结构上分为上行光传感器和下行光传感器。上行光传感器用于接收太阳光在560、710、720和810 nm波长处的辐射信息,下行光传感器用于接收对应波长作物冠层反射光辐射信息,通过光电池转换为电信号进行处理,得到作物冠层特征光谱反射率。基于冠层反射率、耦合作物生长模型,便可获取作物叶层氮含量、叶层氮积累量、叶面积指数、叶干重等生长信息。传感器装置采用一体化设计,方便集成与移植,适合野外测试环境,如图2所示。

2.1 下行光传感器设计

下行光传感器垂直面向目标冠层,测量作物冠

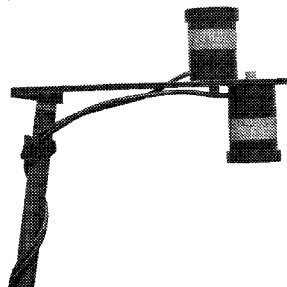


图2 多光谱传感器图片

Fig.2 Multi-spectral sensor

层的反射光谱。下行光传感器由4个特征波长分别为560、710、720和810 nm的探测镜头组成,采用光学滤波技术提高光辐射信息输入信噪比,每个探测镜头仅由光谱滤光片和光电探测器组成,光路简单,保证了信号传输的可靠性,突破了以往作物氮素监测仪光路复杂、大量使用光学器件的弊病,如图3所示。光谱滤光片选用窄带干涉滤光片,其材质为光学玻璃,中心波长为特征波长 ± 2 nm,中心波长透过率65%~70%,峰值透过率65%~70%,带宽9 nm,截止率小于0.000 01%,不仅极大地抑制了其他波长光谱信息进入探测镜头,提高传感器测量精度,而且保证了传感器灵敏度的一致性。光电探测器选用光电二极管,光谱响应范围为400~1 100 nm,灵敏度为0.55 A/W,短路电流最大为120 μ A;4个光电探测器封装在同一底座上,增强了系统的可靠性。探测镜头设计关键是光阑参数的确定,既要保证传感器系统具有较高的分辨率,还要确保传感器的信号强度。由于作物在三维空间上均有变化,作物个体间往往存在不同的间隙,造成其在水平面上的不连续性,叶面积密度分布并非均匀,经典物理的镜面反射和漫反射都不足以解决复杂的现实问题。因此必须依据作物冠层特征、叶面积密度分布特点,设计探测镜头光阑结构。

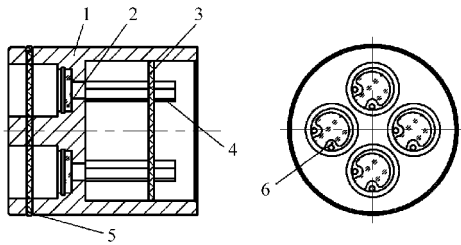


图3 下行光传感器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of sensor's downlink optical path

1. 屏蔽机壳 2. 光谱滤光片 3. 光电探测器底座 4. 固定螺丝
5. 滤波圈 6. 弹簧压片

当太阳光照射到作物冠层时,下行光传感器接收作物冠层反射光信息。根据图4反射式光电检测系统传输光路可知,光电探测器的有效几何面积 A_p 、视场角 β 与视场面积 ΔA 之间的关系为^[21]

$$\Delta\omega = \frac{A_p}{H^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\Delta A}{H^2} \quad (5)$$

式中 $\Delta\omega$ ——光电探测器对冠层所张开的立体角
 H ——探测器到冠层的垂直距离

光电探测器接收到的总能量 E 正比于 $\Delta\omega\Delta A$,即 $E \propto \Delta\omega\Delta A = A_p\beta$ 。对于选定的光电探测器,其有效几何面积一定,设计较大的视场角 β 会获得较强

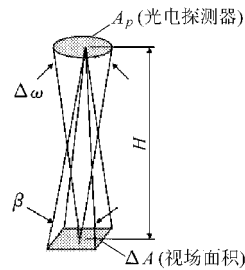


图4 反射式光电检测系统传输光路

Fig. 4 Transmission optical path of reflective photoelectric detection system

的光谱信息,有利于信号的获取与处理;但是田间作物生长姿态具有很强的随机性,冠层叶面积密度分布并非均匀,较大的检测视场面积必然会忽略对象的差异性,获取的信息不完整且不精确,带有较大的不确定性。为了确保探测的灵敏度与分辨效果,综合两者性能,设计传感器视场角为 $25^\circ \sim 30^\circ$,当距作物冠层高1~1.3 m时,视场范围是直径为高度一半左右的圆形区域。

探测镜头参数估算如图5所示。

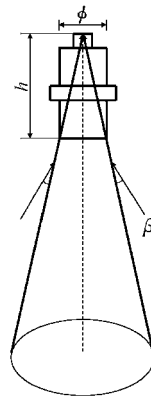


图5 探测镜头参数估算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of detection lens parameters

下行光传感器距离作物冠层高度1 m,视场角取 27° ,探测区域直径为0.5 m,设光阑孔径为 ϕ ,光阑孔深为 h ,则有

$$\frac{250}{1\ 000 + h} = \tan \frac{\beta}{2} \quad (6)$$

$$\frac{\phi}{2h} = \tan \frac{\beta}{2} \quad (7)$$

由式(6)、(7)得,光阑孔径为12.8 mm时,孔深为26 mm。此结构确保了传感器系统较高的分辨率,同时增强了传感器的信号强度。

2.2 上行光传感器设计

上行光传感器是由4个特征波长分别为560、710、720和810 nm的探测镜头组成。为了消除传感器结构、材质对光信号传输的影响,上行光传感器探测镜头的结构参数设计、元器件匹配与下行光传感器相同。上行光传感器获取太阳光辐射信息,为

了减小太阳角度变化对入射光信息的影响,设计余弦校正器进行光谱纠正,并将其敷贴于探测镜头光阑表面,光谱信号经光电探测器转换后通过屏蔽电缆引出。

2.3 信号放大电路设计

作物冠层反射光信息比较微弱,光电探测器输出信号只有微安级,极易受到干扰。如何可靠、不失真地放大这一微弱信号是整个信号调理电路设计的首要环节。图6是设计的信号前置放大电路。

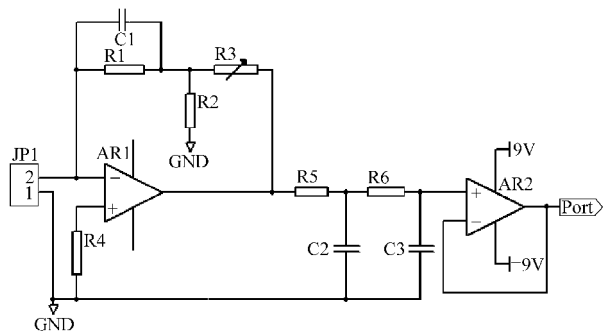


图6 多光谱传感器信号放大电路

Fig. 6 Signal conditioning circuit of multi-spectral sensor

由AR1、R1、R2、R3和C1构成T型电阻积分网络,将光电流信号转换为具有一定幅值的电压信号。从图中可知,反馈电阻R1阻值越大,光电流信号转换的灵敏度越高,但是对电阻、量程转换开关的绝缘要求就越高,整个电路的稳定性就难以保证,同时还会引起电阻的热噪声电流。采用T型电阻积分网络,可以保证在反馈电阻R1阻值适中的条件下,通过调节网络电阻比值,得到电路较高的增益^[22]。不

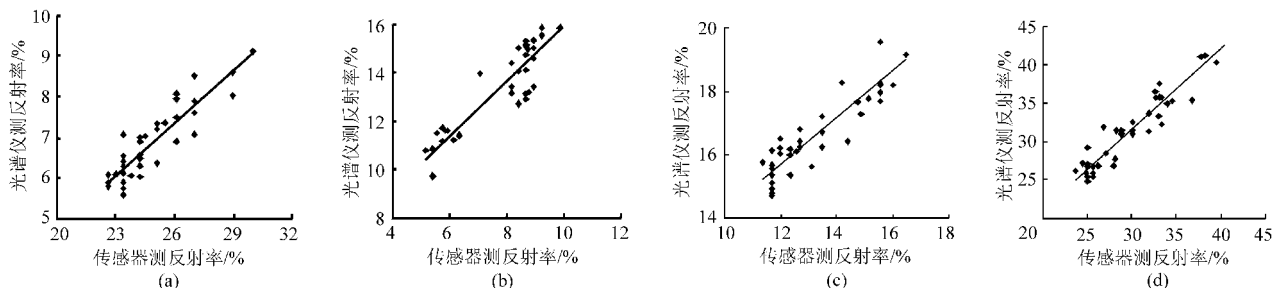


图7 传感器与光谱仪拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve between sensor and spectrometer

(a) 560 nm (b) 710 nm (c) 720 nm (d) 810 nm

3.2 验证试验

试验于2011年5月7日在同一试验田进行。选择另外独立的6个小区测试小麦冠层反射率,测试条件与方法同标定试验。将由标定方程获得的小麦冠层反射率与FieldSpec Pro FR2500型光谱仪同波段测量值进行比较。测量数据如表1所示。

由表1可以看出,相对FieldSpec Pro FR2500型光谱仪的测量值,多光谱传感器560 nm探测镜头的平均测量误差为5.6%,710 nm探测镜头的平均测

仅减小了大电阻热噪声的影响,同时还降低了对运放输入偏置电流的影响。R5、R6、C2和C3构成低通滤波电路,滤除信号中的高频干扰。AR2构成射极跟随器,降低系统输出内阻,提高带负载能力。

3 试验与结果分析

3.1 标定试验

试验于2011年4月18日在扬州市仪征新集试验田进行。设置6个施氮水平N0(0 kg/hm²)、N1(75 kg/hm²)、N2(150 kg/hm²)、N3(225 kg/hm²)、N4(300 kg/hm²)、N5(375 kg/hm²),2个重复,基追比5:5,基肥在播种前施入,追肥在拔节时施入;试验品种为扬麦16和宁麦13。测试天气晴朗、无风,环境稳定,测量时间从10:00到14:00;试验中,运用研发的多光谱传感器与美国ASD公司生产的FieldSpec Pro FR2500型光谱仪同步测定小麦冠层反射光谱,测量时多光谱传感器垂直向下,下行光传感器距小麦冠层垂直高度1 m,每个小区测量6个点,每个点测5次取平均值。分别记录FieldSpec Pro FR2500型光谱仪在560、710、720和810 nm处的反射率以及多光谱传感器输出值,采用一元线性多项式对测量数据进行最小二乘拟合,得拟合方程为

$$y_{560} = 0.433x - 3.913 \quad (R^2 = 0.8028, \text{RMSE 为 } 0.399)$$

$$y_{710} = 1.157x + 4.420 \quad (R^2 = 0.8068, \text{RMSE 为 } 0.807)$$

$$y_{720} = 0.742x + 6.802 \quad (R^2 = 0.8185, \text{RMSE 为 } 0.560)$$

$$y_{810} = 1.054x + 0.002 \quad (R^2 = 0.8900, \text{RMSE 为 } 1.707)$$

拟合曲线如图7所示。

量误差为4.6%,720 nm探测镜头平均测量误差为1.4%,810 nm探测镜头平均测量误差为4.5%。可见利用多光谱传感器能够较好地实现作物冠层特征光谱反射率的实时在线测量。

4 结束语

设计了一种作物生长信息获取多光谱传感器,用于探测稻麦冠层反射特征光谱。传感器高58 mm,口径48 mm,视场角27°,具有4个探测镜

表1 FieldSpec Pro FR2500型光谱仪测量值与多光谱传感器测量值比较

Tab. 1 Measured values between FieldSpec Pro FR2500 spectrometer and multi-spectral sensor

%

560 nm			710 nm			720 nm			810 nm		
光谱仪	传感器	相对误差	光谱仪	传感器	相对误差	光谱仪	传感器	相对误差	光谱仪	传感器	相对误差
6.01	6.58	9.6	10.22	10.68	4.5	16.84	16.81	0.2	40.81	42.58	4.3
6.10	6.21	1.9	10.63	10.68	0.5	16.05	16.23	1.1	39.64	40.73	2.7
5.87	6.21	5.8	9.92	10.87	9.5	15.90	16.23	2.0	41.03	42.67	4.0
5.69	6.58	15.7	10.63	11.28	6.2	16.10	16.23	0.8	35.85	40.31	12.4
5.86	6.21	6.1	10.95	10.87	0.8	15.90	15.96	0.4	35.04	39.85	13.7
6.24	6.58	5.5	10.29	11.28	9.7	16.38	16.23	0.9	37.44	39.89	6.5
7.24	7.15	1.3	11.22	11.52	2.7	16.45	16.52	0.4	40.30	41.65	3.3
5.98	6.05	1.2	12.04	11.12	7.6	16.12	16.01	0.7	40.30	41.65	3.3
6.64	6.96	5.0	11.01	10.68	3.0	16.48	16.23	1.5	41.03	42.67	4.0
6.33	6.21	1.8	10.63	10.68	0.5	15.24	15.47	1.5	42.92	43.53	1.4
8.52	8.18	4.0	10.81	11.28	4.4	16.10	15.96	0.9	43.29	44.19	2.1
7.88	7.83	0.6	10.68	11.06	3.5	15.40	15.96	3.6	46.10	44.22	4.1
7.84	8.18	4.4	11.69	10.87	7.1	14.72	15.47	5.1	41.32	41.85	1.3
8.09	7.39	8.6	10.54	10.87	3.0	15.76	15.96	1.3	44.33	43.73	1.4
8.95	7.83	12.5	11.37	10.68	6.0	16.05	15.96	0.5	44.50	43.53	2.2

头,采用560、710、720、810 nm滤光片分光,结构简单、集成度高、可靠性强、成本低、携带方便;传感器通过航空插座适配,具有较强的通用性。通过标定试验,建立了FieldSpec Pro FR2500型光谱仪测量值校正模型,决定系数 R^2 分别为0.802 8、0.806 8、

0.818 5、0.890 0,表明模型具有很好的相关性;对小麦的试验结果表明,该传感器的平均测量误差分别为5.6%、4.6%、1.4%、4.5%,能够较好地实现田间测试的需要,目前该传感器已经开始在农业生产中推广使用。

参 考 文 献

- 李少昆,谭海珍,王克如,等. 小麦籽粒蛋白质含量遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2009,25(2):302~307.
Li Shaokun, Tan Haizhen, Wang Keru, et al. Research progress in wheat grain protein content monitoring using remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(2): 302~307. (in Chinese)
- 田永超,朱艳,姚霞,等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. 生态学杂志,2007,26(9):1454~1463.
Tian Yongchao, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9):1454~1463. (in Chinese)
- Zhu Yan, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Analysis of common canopy reflectance spectra for indicating leaf nitrogen concentrations on wheat and rice [J]. Plant Production Science, 2007, 10(4): 400~411.
- Lee Yuh-Jyuan, Yang Chwen-Ming, Chang Kuo-Wei, et al. A simple spectral index using reflectance of 735 nm to assess nitrogen status of rice canopy [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1): 205~212.
- 郭建华,赵春江,王秀,等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展[J]. 中国土壤与肥料, 2008(4):10~14.
Guo Jianhua, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(4):10~14. (in Chinese)
- 蒋焕煜,应义斌,谢丽娟. 光谱分析技术在作物生长信息检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(6):1300~1304.
Jiang Huanyu, Ying Yibin, Xie Lijuan. Application of spectroscopy technique to obtain plant growth information [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(6):1300~1304. (in Chinese)
- 郝晓剑,郝丽娜,刘良云,等. 智能便携式NDVI测量仪[J]. 仪器仪表学报,2005,26(3):246~248.
Hao Xiaojian, Hao Lina, Liu Liangyun, et al. A intelligent portable instrument for measuring NDVI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(3):246~248. (in Chinese)
- 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):252~255.
Li Xiuhua, Li Minzan, Cui Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):252~255. (in Chinese)
- 徐志刚,朱艳,焦学磊,等. 作物氮素营养无损监测仪的光学系统设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):120~122.
Xu Zhigang, Zhu Yan, Jiao Xuelei, et al. Design of optic system for crop nitrogen non-destructive monitoring instrument [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):120~122. (in Chinese)
- 郑文刚,孙纲,申长军,等. 可见-近红外作物氮素光电测量仪开发[J]. 农业工程学报,2010,26(3):178~182.

- Zheng Wen'gang, Sun Gang, Shen Changjun, et al. Development of a visible-infrared photoelectric instrument for measuring crop nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(3):178~182. (in Chinese)
- 11 张晓东,毛罕平,倪军,等. 作物生长多传感信息检测系统设计与应用[J]. 农业机械学报,2009,40(9):164~170.
Zhang Xiaodong, Mao Hanping, Ni Jun, et al. Intelligent detection system of multi-sensor information for growing crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):164~170. (in Chinese)
- 12 Zhang X, Li M, Liu G, et al. Development of a multi-spectral detector determining leaf chlorophyll content of the cucumber in a greenhouse [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(6): 869~876.
- 13 孙刚,刘良云,郑文刚,等. 基于夫琅和费暗线原理的太阳诱导叶绿素荧光仪[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):248~251.
Sun Gang, Liu Liangyun, Zheng Wen'gang, et al. Development of a solar induced chlorophyll fluorescence monitor based on fraunhofer line principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):248~251. (in Chinese)
- 14 曹卫星. 数字农作技术[M]. 北京:科学出版社,2008.
- 15 冯伟. 基于高光谱遥感的小麦氮素营养及生长指标监测研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.
Feng Wei. Monitoring nitrogen status and growth characters with canopy hyperspectral remote sensing in wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 16 田永超,杨杰,姚霞,等. 利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J]. 作物学报,2010,36(9):1529~1537.
Tian Yongchao, Yang Jie, Yao Xia, et al. Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9):1529~1537. (in Chinese)
- 17 朱艳,吴华兵,田永超,等. 基于冠层反射光谱的棉花干物质积累量估测[J]. 应用生态学报,2008,19(1):105~109.
Zhu Yan, Wu Huabing, Tian Yongchao, et al. Estimation of dry matter accumulation in above-ground part of cotton by means of canopy reflectance spectra[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1):105~109. (in Chinese)
- 18 周冬琴,田永超,姚霞,等. 水稻叶片全氮浓度与冠层反射光谱的定量关系[J]. 应用生态学报,2008,19(2):337~344.
Zhou Dongqin, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Quantitative relationships between leaf total nitrogen concentration and canopy reflectance spectra of rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 337~344. (in Chinese)
- 19 朱艳,姚霞,田永超,等. 稻麦叶片氮积累量与冠层反射光谱的定量关系 [J]. 植物生态学报,2006,30(6):983~990.
Zhu Yan, Yao Xia, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationship between leaf nitrogen accumulation and canopy reflectance spectra in rice and wheat[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(6): 983~990. (in Chinese)
- 20 王纪华,赵春江,黄文江,等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- 21 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京:北京大学出版社,2005.
- 22 程开明,唐治德. 模拟电子技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,1995.

~~~~~

(上接第206页)

- 6 Tayebi A, McGilvray S. Attitude stabilization of a four-rotor aerial robot [C] // 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004,2:1216~1221.
- 7 Bouabdallah S, Becker M, Siegwart R, et al. Autonomous miniature flying robots: coming soon! —research, development, and results [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007,14(3):88~98.
- 8 单海燕. DI/QFT 控制器在四旋翼无人直升机飞行控制中的应用[J]. 电光与控制,2008(3):31~40.  
Shan Haiyan. Combined DI/QFT flight control for a quad-rotor unmanned helicopter[J]. Electronics Optics & Control, 2008(3): 31~40. (in Chinese)
- 9 杨明志,王敏. 四旋翼微型飞行器控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2008,16(4):485~490.  
Yang Mingzhi, Wang Min. Design of flight control system for a four-rotor mini rotorcraft [J]. Computer Measurement & Control, 2008,16(4):485~490. (in Chinese)
- 10 Zhao Xiaohui, Sanchez A, Lozano R, et al. Design and implementation of an embedded control system for small unmanned aerial vehicles; application to a four-rotor mini rotorcraft [C] // IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 414~419.
- 11 王凤花,张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报,2008,39(5):112~121.  
Wang Fenghua, Zhang Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):112~121. (in Chinese)
- 12 张智刚,罗锡文,胡炼,等. DGPS 模块动态定位精度测试与分析[J]. 华南农业大学学报,2010,31(1):102~107.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Hu Lian, et al. Study on dynamic positioning precision of 4 kinds DGPS modules [J]. Journal of South China Agricultural University, 2010,31(1):102~107. (in Chinese)