第 7 卷　第 5 期　　中国光学　　Vol. 7　No. 5
2014 年 10 月　　Chinese Optics　　Oct. 2014

文章编号　2095-1531(2014)05-0712-11

在线式分光测色仪发展现状

刘怡轩[1,2]，颜昌翔[1*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：介绍了颜色测量原理，归纳了在线式颜色测量的特点、要求及技术难点，阐述了在线式颜色测量技术发展历程。详细介绍了当前几种国外典型的在线式分光测色仪的主要技术指标、应用范围、系统结构等，指出了每一种仪器的特点和优势。从技术和应用需求两方面对在线式分光测色仪的发展趋势做了展望，为在线式分光测色仪的发展起到一定的借鉴作用。

关　键　词：分光测色仪；非接触；颜色测量；色度学；闭环控制
中图分类号：O433.1; TH744.1　　**文献标识码：**A　　doi：10.3788/CO.20140705.0712

Development and status of on-line spectrophotometer

LIU Yi-xuan[1,2], YAN Chang-xiang[1*]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn*

Abstract: The principle of color measurement is introduced, and the characteristics requirements and technical difficulties of on-line color measurement are summarized. The development process and the current state of the art of on-line color measurement technology are also presented. The specifications, applications and system structures of several advanced on-line spectrophotometes abroad are presented in detail. The characteristics and advantages of every instrument are highlighted. The development trend of on-line spectrophotometer is discussed from two aspects of technical perspective and application requirements in this paper, which will provide a reference for study on the development of on-line spectrophotometer.

Key words: spectrophotometer; non-contact; color measurement; colorimetry; closed-loop control

---

收稿日期：2014-04-15；**修订日期：**2014-06-13
基金项目：国防高新技术发展计划(863 计划)资助项目(No. 2011AA12A103)；中国地质调查局资助项目(No. 1212011120227)

1 引 言

当前工业产品的颜色指标要求越来越高,颜色差异会直接影响质量等级。与着色有关的行业,如纺织印染、造纸、染料、颜料制造、涂料、塑料着色加工以及油墨印刷等,产品颜色的正确与否是一个至关重要的质量指标。产品颜色与标准试样颜色的偏差超标,将会造成次品或废品,给企业带来严重的经济损失[1-2]。

使用颜色测量仪器来代替人眼分辨颜色可以有效地提高产品质量,而且为计算机配色提供了前提条件。分光测色仪是颜色测量中最基本的仪器,主要利用分光原理测出物体的光谱分布,经过计算求出物体色的三刺激值及其它色度参数。与光电积分式测色仪相比,其测量精度高,可方便获得表征颜色的各种参数,如今已经成为颜色测量行业应用最为广泛的仪器[3]。通常分光测色仪分为台式和便携式两种[4]。台式分光测色仪精度高、体积大,常用于实验室中; 便携式分光测色仪体积小,便于携带,使用范围更加广泛。这两种分光测色仪皆为接触式测量仪器,使用时被测物与仪器接触后才可进行测量。

国内印染企业大多使用离线测色法[5],将生产线上的产品取下后用台式或便携式分光测色仪测量。而在生产线上,则由经验丰富的检验人员目视测色,难以解决在大批量生产过程中,因细微的颜色渐变导致废品问题。传统的离线式颜色测量通常都滞后于生产,无法及时获得生产线上产品的颜色信息,发现产品颜色出现偏差时,很多或大批不合格的产品已经被生产出来,造成巨大浪费。

在线式颜色测量是指将颜色测量仪器安装在生产线上,对产品的颜色进行测量。在测量过程中,产品不用离开生产线,更不用停止生产,可极大地节约时间和人力成本。在线式测量中,产品随生产线连续运动,必须使用非接触式测量。因此以上两种分光测色仪都不适用于在线式颜色测量。

2 颜色测量原理

颜色测量仪器从原理上可分为光电积分式测色仪和分光测色仪[3]。光电积分式测色仪直接测量物体颜色的三刺激值,精度较低,可以获得的颜色参数有限。分光测色仪利用分光原理测出物体的光谱分布,经过计算求出物体色的三刺激值及其它色度参数。这种测色方法的实质是用比较法测量不透明物体的光谱反射率因数 $R(\lambda)$ 或透明物体的光谱透射比 $\tau(\lambda)$。$R(\lambda)$ 定义为在指定的方向上和限定的立体 ω 范围内,物体的反射光谱辐通量 $\Phi_R(\lambda)$ 与在相同条件下完全漫反射体的光谱辐通量 $\Phi_D(\lambda)$ 之比,即:

$$R(\lambda) = \frac{\Phi_R(\lambda)\,d\lambda}{\Phi_D(\lambda)\,d\lambda}. \tag{1}$$

完全漫反射体是对各种波长辐射反射比均为 1 的理想漫反射体,它无损失地反射入射辐射,并且在各个方向上有相同的亮度。绝大多数的待测物体不是完全的漫反射体,因而测量条件会对于光谱反射率因数测量的精确度和实测结果产生影响,为了提高测量精度和统一测量方法,国际照明委员会(CIE) 于 1971 年正式推荐了 4 种测量反射色的标准照明观察条件,分别为 $0/d$、$d/0$、$45/0$、$0/45$,测量结果必须说明所采用的测量条件。$\tau(\lambda)$ 定义为物体的透射光谱辐通量 $\Phi_T(\lambda)\,d\lambda$ 与入射光谱辐通量 $\Phi_0(\lambda)\,d\lambda$ 之比,即:

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_T(\lambda)\,d\lambda}{\Phi_0(\lambda)\,d\lambda}. \tag{2}$$

CIE 推荐了 3 种测量透射色的标准照明观察条件,分别为 $0/0$、$0/d$、d/d。按照式(3) 求出物体色的三刺激值:

$$\begin{cases} X = k\int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda \\ Y = k\int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda \\ Z = k\int_{380}^{780} \varphi(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda \end{cases}, \tag{3}$$

式中:X、Y、Z 为 CIE 标准色度系统的三刺激值;$\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$ 是 CIE 标准色度观察者的光谱三刺激值;$\varphi(\lambda)$ 为颜色刺激函数:

$$\varphi(\lambda) = \begin{cases} R(\lambda)P(\lambda) \\ \tau(\lambda)P(\lambda) \end{cases}, \tag{4}$$

式中:$P(\lambda)$ 为照明体相对光谱功率分布,k 为归化因子,它是将照明体(或光源)的 Y 值调整为100时得出的,即:

$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} P(\lambda)\bar{y}(\lambda)\mathrm{d}\lambda}. \tag{5}$$

CIE 还推荐了主要用于纺织印染等表面色料工业减混色(Subtractive mixture)的表示和评价的 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 颜色空间,也称为 CIE LAB 颜色空间。作为该空间三维直角坐标的明度 L^* 和色品坐标 a^*、b^* 的计算公式为:

$$\begin{cases} L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* = 500\left[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}\right] \\ b^* = 200\left[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}\right] \end{cases}, \tag{6}$$

式中:X_0、Y_0、Z_0 为标准光源照射到完全漫反射面上的三刺激值(查表可得)。ΔE^*_{ab} 为样品与标准的色差,分别测量并计算出样品与标准的 L^*、a^*、b^* 后,用此空间计算两个颜色之间的色差

$$\Delta E^*_{ab} = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\right]^{1/2}. \tag{7}$$

3 在线式颜色测量的特点和要求

在线式测量可以实时监测生产线上产品的质量情况,及时获得产品颜色信息,不仅有利于减少生产浪费,而且可有效提高生产效率。与对静止物体的离线式颜色测量相比,在线式颜色测量有以下特点[8]:被测物体是生产线上的产品,始终不停地运动,速度从每分钟几十米到上百米不等;在线测量面临着更严重的环境干扰等问题,如温度高、湿度大、灰尘多,被测样品抖动剧烈、环境光影响等。针对以上特点,在线式分光测色仪需满足以下要求[7-9]。

(1)由于被测物体的连续运动,仪器和被测物必须设计成非接触测量方式。

(2)非接触测量,环境光必然会对测量结果造成影响,为了准确测量,必须消除环境光的影响。

(3)在一次测量的时间内,被测物体的测量区域相对于位置固定的仪器有一定的位移,为了使样品的运动趋于"静止",要求一次测量的时间尽可能短。

(4)生产线的水平运动难免会导致被测物的上下抖动,而抖动会直接影响进入仪器的光谱辐通量,引起测量误差,所以要采取距离补偿措施。

(5)生产线上环境复杂,温度高、湿度大,甚至车间内有大量的酸碱气体、灰尘、强电干扰等,仪器必须具备抗环境干扰能力,便于保养,还应在使用过程中经常对仪器进行定标。

(6)生产过程是连续的,对产品颜色也需要连续测量,及时给出反馈信息,始终把握产品质量。

非接触测量方式和被测物体的连续运动是在线式分光测色仪与传统分光测色仪的主要差别,而环境光、物体运动和正常的抖动不会影响测量结果的精确性将是在线式分光测色仪的技术难点。

一个完善的颜色测量系统不仅要求测量结果准确,而且更重要的是根据测量结果,对染料控制等进行实时调节,使之符合生产要求[1]。将在线式分光测色仪与控制系统相连,形成闭环控制系统,当颜色数据不符合要求时,仪器可向控制系统发出警告,甚至直接停止生产;与控制系统相连的另一个好处是,可以远程监控颜色数据,生产管理人员或质量管理人员可以在办公室监视产品的颜色情况,也可以通过控制系统直接下达相关的命令。

4 在线式分光测色仪发展概况

美国 Industrial Development Laboratory 在1960年提出最初的装置,由于受环境光的影响,需要在仪器上加一个遮光箱,故现场使用受到很大的限制[10]。19世纪70年代末美国 Ford Aerospace & Communications Corporation 研制了一种名为"Qualscan"的在线颜色分析仪[11],它采用连续光源照明,被测样品的反射光由16个滤光片进行

分光，再用 16 个硅光电二极管接收，取得了良好的效果。1979 年美国 Macbeth 公司提出的 MS-4045 在线分光光度计，采用高能脉冲氙灯作为照明光源，用衍射光栅作分光元件，用线阵硅光电二极管作接收元件，获得了很大的成功，处于领先地位[12-13]。1983 年美国 Macbeth 公司的 On-Line Scanning Color Eye 在生产上取得了实效，在结构设计等方面显得更为合理先进[14]。

国内在线式颜色测量仪器的研究与国外相比报道较少。天津大学吴继宗等人[6]在 1984 年开始了在线测色的研究工作，并研制了一台实验装置，整个装置由测色头、分光器、电气盒、微机、脉冲光源电源 5 大部件组成，毛玻璃与椭球面环形镜的组合实现 45°环形照明，样品反射光由聚光镜收集，由光导纤维传至分色器，并且考虑了光源的不稳定及杂散光等影响，实验结果表明实验装置的原理方案及主要系统的设计可行。该校陈兴梧、周少敏等人做了误差分析及修正[5]，杂散光修正和波长纯度分析[15]等工作，使测色仪达到了一级仪器要求的重复精度。国内还报道了采用光电积分型原理的在线式测色仪研究[16-17]。

经过数十年的技术改进，国外众多厂商推出了一系列在线式分光测色仪，下面将针对几个国际上知名公司的仪器进行详述。

4.1　Hunterlab

美国 Hunterlab 公司作为世界上最重要的颜色实验室之一，具有将近 60 年的颜色测量仪器研发历史，当前有多款在线式分光测色仪在售，表 1

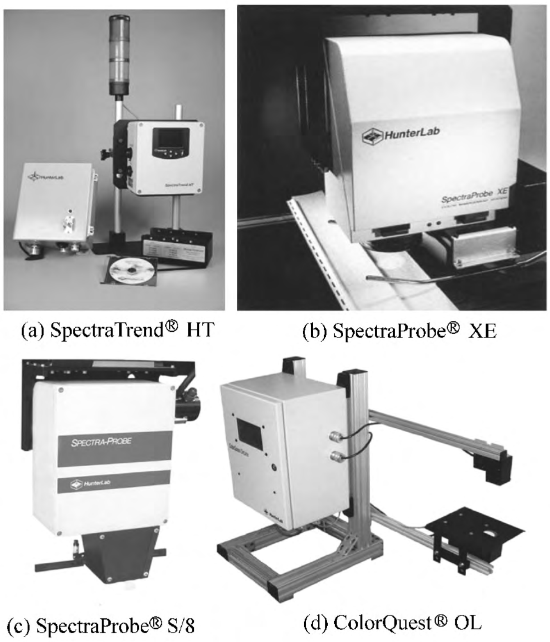
表 1　Hunterlab 在线式分光测色仪主要技术指标

Tab. 1　Specifications of Hunterlab on-line spectrophotometers

Specifications	SpectraTrend®HT	SpectraProbe®XE	SpectraProbe®S/8	ColorQuest®OL
Geometry	0/30	0/45 circumferential viewing	d/8	transmission
Viewing area/mm	25.4	65	76	25
Working Distance (nominal) /mm	100	25.4	–	–
Measurement range/mm	65 ~ 115	±6.35	12.7 ~ 25.4	51 ~ 254
Enclosure Rating	NEMA 4/IP65	NEMA 4/IP 65	NEMA 4/IP 65	NEMA 4
Communications	Ethernet(RJ45)	RS-422/RS-232	RS422/RS232	–
Minimum interval/s between measurements	1	1	1	<5
Light source	Full spectrum LED system	Pulsed Xenon lamp(filtered to approximately D65)	quartz halogen lamp	Pulsed xenon lamp
Measurement principle	Dual-beam spectrophotometer	Dual-beam spectrophotometer	–	Dual-beam spectrophotometer
Spectrometer	256-element diode array, concave holographic grating	256 element diode array, concave holographic grating	76 element photodiode array, Concaveholographic grating	–
Spectral range/nm	400 ~ 700	400 ~ 700	375 ~ 750	400 ~ 700
Spectral resolution/nm	<3	<3	10	10
Wavelength interval/nm	10	10	5	10
Photometric range/%	0 ~ 150	0 ~ 150 %, 0.01% reported	–	–
Colorimetric repeatability	$\Delta E^* ab < 0.03$(Avg) on white tile	$\Delta E^* ab < 0.02$	$\Delta E^* ab < 0.1$	–
Inter-instrument agreement	$\Delta E^* ab < 0.30$(Avg) on BCRA II Tile Set	–	–	–
Else	Built-in IR detectors	–	Automatic wavelength calibration	–

列出了4款典型仪器名称及主要技术指标。4款仪器均达到NEMA4/IP65防护级别，可以适应恶劣的工厂环境，有效做到防止灰尘、水、化学物质等对仪器的影响。通过标准的RS-422、RS-232或以太网通信可与PC连接，很容易与工厂控制系统整合，组成闭合控制。

如图1(a)所示，SpectraTrend® HT[18-19]采用0°照明/30°测量的照明观察条件，尽管不符合CIE推荐的标准照明观察条件，但在很多场合仍有广泛应用，可测量不透明的网状、单件和块状的产品，如固体、粉末、颗粒、小球等。该仪器内置高速距离探测器，同时对颜色和高度进行连续的在线非接触式测量，根据高度和可接受的颜色范围



(a) SpectraTrend® HT (b) SpectraProbe® XE
(c) SpectraProbe® S/8 (d) ColorQuest® OL

图1 Hunterlab在线式分光测色仪

Fig. 1 Hunterlab on-line spectrophotometers

可以区分产品和背景。在被测物与仪器距离100 mm时，测量区域直径为25 mm。工作距离范围为65~115 mm，高度补偿范围为50 mm，适用于各种高度的产品和不平整表面。仪器最小测量间隔为1 s。SpectraTrend®HT采用长寿命的全谱段LED作为照明光源，可以保证高强度的光输出。仪器为双光束分光系统设计，分光元件采用全息凹面光栅，探测器为256 pixel的光电二极管阵列。其光谱范围为400~700 nm，光谱分辨率<3 mm，间隔为10 nm的数据输出。其光度范围为0~150%，重复性$\Delta E^* ab<0.03$，仪器间一致性$\Delta E^* ab<0.30$，与台式分光测色仪具有最佳的一致性。

如图1(b)所示，SpectraProbe® XE[20-21]是一个多用途、高性能的在线分光测色仪，用于对产品颜色的持续测量、分析和报告，可以用来更快地优化生产工艺，更准确地保持产品质量。该仪器使用0°照明/45°圆周测量的条件，可以测量各种方向性和光泽的表面，广泛应用于纺织品、纸张、塑料和卷材连续涂覆等测量。被测物与仪器距离25.4 mm时，测量区域直径为65 mm，工作距离范围为25.4 mm±6.35 mm。仪器测量速度为每秒1次。SpectraProbe®XE采用脉冲氙灯作为照明光源，经过滤光片的输出光近似为D65标准照明体，光源寿命大于15亿次闪光，采用全息凹面光栅和256像元的光电二极管阵列的双光束分光系统设计，如表1所示，分光系统指标与Spectra-Trend ® HT基本一致。光度范围为0~150%，最小显示分辨率为0.01%。重复性$\Delta E^* ab<0.02$。

如图1(c)所示，SpectraProbe® S/8[22-23]用于非接触在线式金属膜和高镜面反射光产品的颜色测量，如镀膜玻璃的第一表面。使用漫反射光照明(包含镜面反射光)/8°测量的条件，测量结果与实验室中$d/8$测量条件的仪器一致。被测物与仪器距离25.4 mm时，测量区域直径为76 mm，工作距离范围为12.7~25.4 mm。仪器最小测量间隔为1 s。SpectraProbe® S/8采用钨灯作为照明光源，分光系统采用全息凹面光栅和76像元的光电二极管阵列，光谱范围为375~750 nm，光谱分辨率为10 mm，间隔为5 nm的数据输出，重复性$\Delta E^* ab<0.1$。该仪器具有自动光谱定标功能，一个由电磁铁驱动的内部钕镨混合物滤光片会自动插入和移出光路，用于光谱定标。

ColorQuest® OL[24]用于非混浊透明物体颜色在线测量，如薄膜、薄片等。如图1(d)所示，由于透射式测量，照明和接收装置被安装在一个支撑结构上，样品从中间通过。照明区域直径为35 mm，测量区域直径为25 mm，被测物与接收装置距离为51~254 mm。仪器最小测量间隔小于

5 s。ColorQuest® OL 采用脉冲氙灯作为照明光源，光源寿命大于 10 亿次闪光，照明光和接收光均由光纤束传送。仪器为双光束分光系统设计，光谱范围为400 ~ 700 nm，光谱分辨率为 10 mm，间隔为 10 nm 的数据输出。另外，对于混浊透明物体，可用 ColorQuest® OL Haze 同时测量颜色和混浊度[25]。

4.2　X-Rite

美国 X-Rite（爱色丽）作为当今最大的颜色质量管理公司，研发的非接触在线检测系统 Vericolor® Spectro[26-27] 是一种可实现高品质测量且经济实用的检测系统，可广泛应用于各种行业，如图 2 所示。该系统允许安装在生产线的上游，在生产过程中尽早检测出色彩变化，减少报废成本。由于采用了专利的光源设计，系统对荧光灯、钠灯和白炽灯等环境光不敏感，无须改变工厂的照明条件，更无须安装遮光设施。该系统通过了 NEMA-4/IP56 的防护级别审核，可防液、防尘、防污染，并能经受冲击和振动。该系统不仅设计坚固，而且维护方便，仅需进行日常的清洁和每月一次的校正即可。系统能通过 RS-232 与 RS-485 等多种数据接口与 PC 或 PLC 连接并传输数据。系统软件基于 Windows 操作系统，使用方便，包括具有实时视觉监控和趋势图形，而且生成的数据可以以 EXCEL 文件的形式记录。

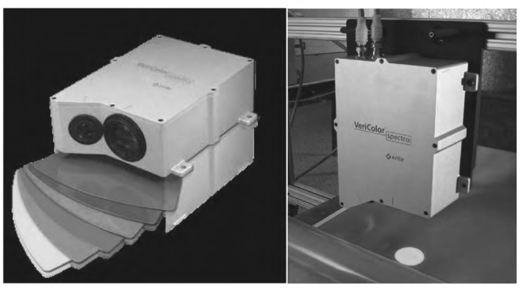


图 2　X-Rite VeriColor® Spectro 非接触在线检测系统

Fig. 2　On-line measurement system X-Rite VeriColor® Spectro

Vericolor® Spectro 指标如表 2 所示，采用 0°/30°或 30°/0° 的测量条件（测量结果基于 0°/30°），为双光束分光系统设计，光谱范围为 400 ~ 700 nm，通过 10 nm 间隔的可见光光谱分析可提供精确的 L^* a^* b^* 绝对值数据。光源为全谱段 LED，寿命大于一千万次测量。系统测量精度高，短期重复性 $\Delta E^* ab$ 为 0.03，仪器间一致性 $\Delta E^* ab$ 为 0.3。仪器单次测量时间为 750 ms，最小测量间隔为 1 s。名义测量距离为 101.6 mm，测量区域直径为 25.4 mm，且当测量距离偏差在 ±5.0 mm之内，引起的色差 $\Delta E^* ab < 0.20$，受距离波动的影响较小，连续生产中无需使用稳定滚筒。

表 2　X-Rite VeriColor® Spectro 主要技术指标

Tab. 2　Specifications of X-Rite VeriColor® Spectro

Specifications	VeriColor® Spectro
Instrument type	Dual-beam spectrophotometer
Geometry/(°)	0/30 or 30/0
Spectral range/nm	400 ~ 700
Wavelength interval/nm	10
Measurement size/mm	25.4
Measuring distance/mm	101.6
Measurement range	±5.08 mm with 0.2 $\Delta E^* ab$ max
Light source	Full System LED
Photometric range/%	0 ~ 150
Measurement time/ms	750
Measurement interval/s	1
Enclosure rating	NEMA 4/IP56
Communications	RS-232, RS-485, PLC, Discreet i/o
Colorimetric Repeatability	$\Delta E^* ab < 0.03$ on a white ceramic tile
Inter-Instrument Agreement	$\Delta E^* ab < 0.3$ based on 12 BCRA Series II tiles

4.3　GretagMacbeth

瑞士 GretagMacbeth（格灵达麦克贝斯，现为 X-Rite 子公司）公司是世界色彩控制与色彩管理技术领域的领导者，于在线颜色测量领域开发多款产品，广泛应用于造纸、玻璃、塑料制品等生产过程，如 ERX40 用于在线式白度测量，ERX54 用于在线式透射样品颜色测量，CarFlash 用于汽车车身颜色测量，这里不再一一介绍，仅对用于纸张颜色测量的在线式分光测色仪 ERX50[28-30] 做详细分析。

纸张生产过程中，如果颜色走偏了，一般需要

手动控制调整染料配方，直到重新调整好，会产生许多次品。配色很难可以一次就达到目标值，一般颜色修正要重复几次。这将消耗大量的时间、纤维和颜料，而且不合格纸将会被循环使用或者处理掉，造成不必要的浪费。GretagMacbeth 作为完备的系统供应商，提供了正确的解决方案。如图3所示，在线式分光测色仪 ERX50 是一套完整的颜色测量和闭环颜色控制系统，可应用于所有的纸和纸板产品。ERX50 的测量结果与标准颜色值进行比较，通过软件计算一步即可得出颜料的修正值，控制计量泵调整颜料剂量配比，无需反复修正即可完成颜色修正。ERX50 通常在纸张卷曲前进行颜色测量，此处质量接近成品纸，对闭环颜色控制而言，此处也是最佳位置，而且与实验室仪器的相关性非常好。ERX50 适用于所有连续的、非接触的颜色测量场合，可以测量任何纸张的所有颜色(包含或者不含荧光增白剂)。测量系统一年365天，24 h 不间断地连续测量颜色，每天自动的内部校正能保证良好的精确性和重复性，使操作员从控制中解放出来。

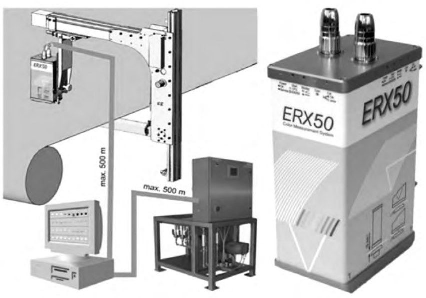


图3 GretagMacbeth ERX50 在线式分光测色仪

Fig. 3 GretagMacbeth ERX50 on-line spectrophotometers

ERX50 为非接触式测量，由于一种特殊的距离补偿装置，即使样品有几毫米的距离抖动，测量结果仍然很稳定。环境光、车速或正常的抖动不会影响测量结果的精确性，这一优点尤其适合在线非接触颜色测量。ERX50 可以测量荧光样品的颜色，通过 UV 控制，基础颜色和荧光增白剂的效果会分开测量，因此调色时两者可以分开来独立控制。仪器设计紧凑、简洁、结实，达到 IP65 防护级别，防尘防水，很少需要维修。为了保证精准的测量结果和长期的稳定性，系统自动校正功能中包括标准白板校正和自动光谱定标。自动内部校正系统使用自带的内部标准白板，在测量过程中按一定的时间周期自动地进行内部校正，无需人工干预。ERX50 通过 USB 和计算机连接起来，测量数据可以传输到计算机，CAN 总线能保证计算机和测量系统远达 500 m 的通讯。

表3 GretagMacbeth ERX50 主要技术指标

Tab. 3 Specifications of GretagMacbeth ERX50

Specifications	GretagMacbeth ERX50
Instrument type	Dual-beam spectrophotometer
Geometry/(°)	45 circular/0
Spectrometer	401 channels
Spectral range/nm	330 ~ 730
Wavelength interval/nm	1
Spectral resolution/nm	1
Measurement size	12 mm diameter
Measuring distance/mm	10
Measurement range	±4 mm typ. with $\Delta E^* ab < 0.15$
Light source	2 Xenon flash lamp
UV adjustment	lamp 1: D65 approximated, UV adjustable; lamp 2: no UV, wavelength limit typ. 420 nm
Photometric range/%	0 ~ 150
Measurement time/ms	20
Measurement interval/s	3 ~ 20
Enclosure rating	IP65
Communications	CAN-Bus, with interface converter on USB
Colorimetric repeatability	$\Delta E^* ab < 0.1$
Inter-instrument agreement	avg. $\Delta E^* ab < 0.3$ based on 12 BCRA Series II tiles
Weight/kg	approx. 5
Size/mm^3	170 × 110 × 295

ERX50 指标如表3所示。系统采用 45°环形照明/0°接收的标准照明观察条件(符合 CIE 标准)，采用完全的双光路设计，由两个相同的高分辨率分光系统组成，分光元件为全息凹面光栅，光谱范围为 330 ~ 730 nm，1 nm 的光谱分辨率和 1 nm的光谱测量间隔使测量结果十分精确。测

量距离为 10 mm 时,测量区域直径为 12 mm,测量距离抖动为 ± 4 mm,引起的色差 $\Delta E^* ab < 0.15$。采用 2 个脉冲氙灯作光源,一个氙灯光谱分布近似 D65,另一个氙灯截去紫外光(UV) ,用于荧光样品颜色测量。单次测量时间为 20 ms,测量间隔从 3 s 到 20 s 可调。仪器具有较好的精度,重复性 $\Delta E^* ab < 0.1$,仪器间一致性 $\Delta E^* ab < 0.3$。

测量时,脉冲氙灯发出的光照射在样品上,样品表面法线方向的反射光将被收集并被导入到分光系统中; 同时,另一个光谱仪将测量光源的能量分布以用于光源发光能量波动的补偿。分光系统将测量到的光信号按波长分解,通过 401 个光电传感器进行测量,测量信号经放大和数字化处理,由微处理器计算得到修正的光谱反射数据。从 330 nm 到 730 nm 的 401 个反射率数据是所有进一步计算的基础,最终得出样品颜色参数。

4.4 KONICA MINOLTA

日本 KONICA MINOLTA(柯尼卡美能达) 公司在颜色测量领域具有很高的地位,在台式分光测色仪和便携式分光测色仪领域技术先进,市场占有率名列前茅。直到 2013 年才在北美市场推出第一台非接触在线式颜色测量系统 NC-1 [31] ,如图 4 所示。需要指出该系统并不是分光测色仪,而是光电积分式色度计,在此仅作简单介绍。

图 4　柯尼卡美能达 NC-1

Fig. 4　KONICA MINOLTA NC-1

该系统集成过程控制系统,因此可提供闭环控制。系统采用多方向 22°照明/0°接收的测量条件,并不符合 CIE 推荐的测量条件,但由于采用了多方向照明,系统可测量质地粗糙的、不平坦的物体,在食品、建筑材料、塑料、药品等行业中可以得到良好的应用。与传统单个传感器的在线系统相比,NC-1 每个控制器可监控多达 5 个传感器,更适用于宽的生产线,单个传感器最大测量速度高达 20 次/s。在恶劣的生产环境中,IP66 级别的防护措施,保证该系统耐用可靠。分析软件可由控制面板进入,也可由计算机进入,极大方便远程控制。NC-1 主要技术指标如表 4 所示,光源采用钨丝灯,具有反射色和透射色两种测量模式,静态条件下反射测量区域直径为 10 mm,透射测量区域直径为 28 mm,名义工作距离为 70 mm,可接受的垂直抖动范围为 ± 5 mm,重复性 $\Delta E^* ab$ 为 0.04。

表 4　柯尼卡美能达 NC-1 主要技术指标

Tab. 4　Specifications of KONICA MINOLTA NC-1

Parameter	Value
Geometry	22 multi-directional/0
Light source	Halogen
Measurement modes	Reflectance and transmittance
Measurement speed (minimum)	1 sensor: 0.05 s/ 5 sensors 0.08 s
Measurement size	Static: 10 mm Refl/ 28 mm Transm
Number of sensors per control unit	1 ~ 5
Measuring distance	65 ~ 75 mm
Acceptable vertical flutter	± 5 mm
Interface	USB 2.0, RS-232
Repeatability(30 reads)	$\Delta E^* ab < 0.04$(white tile)
Enclosure rating	IP66

5 在线式分光测色仪的发展趋势

纵观在线式分光测色仪发展历程及现状,从技术层面来看,未来在线式分光测色仪的发展趋势如下。

(1) 上述在线式分光测色仪中,多数都采用了双光束分光系统的结构,可有效补偿光源发光不稳定对测量造成的影响,从而使仪器具有非常好的测量精度,这在采用脉冲氙灯作为光源的仪器中是非常必要的。当前双光束分光系统在分光

测色仪中已较多采用，未来必将成为标配。

（2）通常认为分光测色仪的光谱分辨率和采样间隔都在 10 nm 左右即可保证足够的测量精度，当前在线式分光测色仪多数也采用这个指标，但 1 nm 光谱分辨率和采样间隔的仪器已经出现。随着光电探测器技术的成熟和广泛使用，在线式分光测色仪的光谱分辨率和采样间隔必将朝着更高方向发展。

（3）越来越多的仪器会采用内部自动校正功能，包括标准白板校正和光谱定标。只有经常的内部自动校正才能保证仪器良好的精确性和重复性。

（4）未来仪器必将具有更好的重复性，与台式分光测色仪具有更佳的仪器间一致性。

从当前的应用需求来看，未来在线式分光测色仪主要向以下几个方面发展：通用性强，可广泛应用于各种行业；快速的信息反馈及闭环控制，可以用来更快地优化生产工艺，更准确地保持产品质量；更好的稳定性及更长的使用寿命；更友好的软件，完善的数据管理，方便操作人员控制，减轻劳动量。

6 结束语

本文归纳了在线式颜色测量的特点、要求及技术难点，简要介绍了国内外发展历程，详细介绍了当前国外典型的在线式分光测色仪，并对发展趋势做出展望。国外在线式分光测色仪已有几十年发展历史，技术比较成熟，当前有多款成熟产品在售，均解决了环境光、被测物运动和抖动不会影响测量结果精确性的技术难点，满足较高的防护级别，可以很好地适应恶劣的工厂环境；通过数据接口，皆可形成闭环控制，并且部分仪器具有距离探测器或自动定标功能。这些仪器可为企业带来可观的经济效益。与国外相比，国内在线式颜色测量仪器的研究起步晚，成果较少，存在较大的差距，而且近十年来，在线式分光测色仪方面鲜有报道。进口仪器昂贵的价格让国内大多数中小企业望而却步，因而只能依赖传统的离线式测量，很大程度上限制了其发展。本文将对在线式颜色测量仪器的发展起到一定的借鉴作用，相信不久的将来会推动在线式分光测色仪的国产化。

参考文献：

[1] WILLIS R F. On-line continuous color monitoring[J]. *Textile Chemist and Colorist*, 1992, 24(2): 19-22.

[2] BROWN W T. Recent developments in on-line colour measurement of textiles[J]. *American Dyestuff Reporter*, 1984, 73(3): 28-32.

[3] 汤顺青. 色度学[M]. 北京：北京理工大学出版社，1990：152-153.
TANG SH Q. *Colorimetry*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 152-153. (in Chinese)

[4] HIRSCHLER R, GAY J. Industrial Colour Measurement-the State of the Art[C]. 9th Congress of the International Color Association. International Society for Optics and Photonics, Rochester, USA, June 24-29, 2002, 4421: 773-776.

[5] 陈兴梧，田学飞. 纺织品颜色的在线测量[J]. 计量学报，1997，18(12)：71-76.
CHEN X W, TIAN X F. The on-line colour measuring of the textile fabric[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1997, 18(12): 71-76. (in Chinese)

[6] 吴继宗，鹿景荣，田学飞，等. 运动物体表面色的在线检测[J]. 仪器仪表学报，1989，10(2)：113-120.
WU J Z, LU J R, TIAN X F, *et al*.. On-line surface color measurement of moving object[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1989, 10(2): 113-120. (in Chinese)

[7] KEESE S H. Factors affecting the potential of on-line colour measurement[J]. *Textile Chemist and Colorist*, 1988, 20(4): 15-18.

[8] 华小兵. 怎样选择在线颜色测定系统[J]. 纺织导报，1994，3：25-26.
HUA X B. How to select on-line color measurement system[J]. *China Textile Leader*, 1994, 3: 25-26. (in Chinese)

[9] WERSCH V K. On-line colorimetry in continuous dyeing from the machine Builder's point of view[J]. *International Textile Bulletin*, 1990, 36(2): 21-41.

[10] BEST R H. Online color monitoring [J]. *American Dyestuff Reporter*, 1979, 68(11): 34.

[11] SUCHECKI S M. Carpet coloring technology: a strong outlook [J]. *Textile Industries*, 1979, 143(5): 42-49.

[12] KISHNER S J. An on-line spectrophotometer for color measurement of moving samples [C]. 4th IFAC Conference on Instrumentation and Automation in the paper, Rubber, Plastics and Polymerisation Industries, June 3-5, 1980, Ghent BELGIUM, 1980: 55-61.

[13] KISHNER S J. An on-line spectrophotometer for color measurement in textiles [C]. Book of Papers, National Technical Conference of AATCC, October 3-5, 1979 Cherry Hill, USA, 1979: 340.

[14] KAZMI S Z, GRADY P L, MOCK G N. On-line color monitoring in continuous textile dyeing [J]. *Isa Transactions*, 1996, 35(1): 33-43.

[15] 周少敏，鹿景荣，吴继宗. **在线测色中的杂散光修正和波长纯度分析** [J]. 光学仪器，1988，10(6): 1-8.
ZHOU SH M, LU J R, WU J Z. The elimination of the stray light and the analysis of the wavelength purity in on-line color measure [J]. *Optical Instruments*, 1988, 10(6): 1-8. (in Chinese)

[16] 牟晶晶，徐海松，许东晖. **在线色差检测的误差修正方案设计** [J]. 光电工程，2007，34(2): 37-40.
MOU J J, XU H S, XU D H. Design of error correction scheme for online color-difference measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(2): 37-40. (in Chinese)

[17] 庞小兵，黄东胜，邹富顺. **在线式光纤传感颜色识别系统的设计** [J]. 自动化仪表，2010，31(9): 11-14.
PANG X B, HUANGG D SH, ZOU F SH. Design of the online color recognition system with optical fiber sensor [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2010, 31(9): 11-14. (in Chinese)

[18] SpectraTrend ® HT SPECIFICATIONS [EB/OL]. (2007-08-13) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[19] SpectraTrend ® HT [EB/OL]. (2007-09-11) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[20] SpectraProbe ® XE Specifications [EB/OL]. (2008-01-07) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[21] SpectraProbe ® XE The Solution for On-Line Color Measurement [EB/OL]. (2008-10-07) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[22] SpectraProbe ® S/8 Specifications [EB/OL]. (2006-09-05) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[23] SpectraProbe ® S/8 On-Line Color Measurement of Coated Glass [EB/OL]. (2006-10-07) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[24] ColorQuest ® OL On-Line Transmission Color Measurement. [EB/OL]. (2006-05-08) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[25] Haze ColorQuest ® OL Haze On-Line Transmission Color and Haze Measurement [EB/OL]. (2006-05-08) [2014/4/10] http://www.hunterlab.com/on-line-spectrophotometers.html.

[26] VeriColor ® spectro Affordable Non-Contact Color Spectrophotometer [EB/OL]. (2007-08-07) [2014/4/10]. http://www.xrite.com.

[27] VeriColor ® Spectro Non-Contact Spectrophotometer Setup and Operator Manual [EB/OL]. (2007-08-07) [2014/4/10]. http://www.xrite.com.

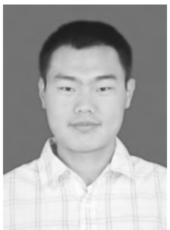
[28] On-Line Color Measurement on any Paper Machine [EB/OL]. (2008-06-06) [2014/4/10]. http://www.erx50.com/en.

[29] On-Line Color Measurement System ERX50 [EB/OL]. (2008-01-29) [2014/4/10]. http://www.erx50.com/en.

[30] User Manual Spectrophotometer ERX50 [EB/OL]. (2008-04-02) [2014/4/10]. http://www.erx50.com/en.

[31] NC-1 IN-LINE COLOR MEASUREMENT SOLUTION. [EB/OL]. (2013-09-12) [2014/4/10]. http://sensing.konicaminolta.us/products/nc-1-inline-solution.

作者简介:



刘怡轩(1987—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,2010年于太原理工大学获得学士学位,主要从事光谱仪器设计方面的研究。E-mail: liuyixuanhx@163.com

颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★ 荷兰Scopus数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技核心期刊数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
编辑出版《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics.net.cn
邮件地址:chineseoptics@ciomp.ac.cn; zggxcn@126.com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061　　传　真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路3888号(130033)