文章编号 1004-924X(2018)12-2881-07

曲面透明件雾度和透光率实时测试仪

刘洪兴*,李宪圣,孙景旭,陈长征,李俊秋
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为了实现大型曲面透明件雾度和透光率的实时测量,设计了一种由 LED 作为光源、双积分球作为信号测量端的雾度和透光率测试仪。在系统工作原理上完成了透光率和雾度的理论推导,然后进行了光源光谱分布对系统测试结果影响的仿真分析,光学设计,积分球参数设计以及支撑调整机构设计,提高了系统的测试精度和效率。最后,对大型曲面透明件雾度和透光率实时测试仪进行标定和样品测试。测试结果表明:标准雾度片的透过率绝对误差均小于 0.4%,雾度绝对误差均小于 0.3%,用户提供样品的透过率测量值与理论计算值的偏差亦小于 0.4%,满足用户要求。

关 键 词:光度学;雾度;透光率;双积分球
中图分类号:O432.2 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20182612.2881

Haze and transmittance real-time tester for curved-surface and transparent samples

LIU Hong-xing*, LI Xian-sheng, SUN Jing-xu, CHEN Chang-zheng, LI Jun-qiu

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
**Corresponding author, E-mail: lhxing_888@126.com*

Abstract: In order to realize the real-time measurement of haze and light transmittance for large-surface transparent samples, a haze and transmittance tester using LED as the light source and a double integrating sphere as the signal measurement part was designed. First, the theoretical derivation of the light transmittance and haze was completed on the basis of the system scheme. Second, simulation analysis of the light source spectral distribution affecting measurement, optical design, integrating sphere parameter design, and support adjustment mechanism design were completed, increasing the test accuracy and efficiency. Finally, calibration and sample testing of the haze and transmittance real-time tester were conducted. The test results show that the transmittance absolute error of the standard haze sample is less than 0.4% and its haze absolute error is less than 0.3%. Moreover, the transmittance deviation between the measured value and theoretically calculated value of the samples from the subscriber is also less than 0.4%, which confirms the claim of the subscriber.

Key words: photometry; haze; transmittance; double integrating sphere

收稿日期:2018-05-02;**修订日期**:2018-07-20.
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引　言

光学材料的光学特性一般分为两类：一类为传递特性，包括光的透过、反射、散射及折射等；另一类为光的转换特性，包括光的吸收、光热、光化、光电及光致变色等。表征光传递特性的常用指标有透过率、雾度、折射率、双折射及色散等。其中，透光率是表征透明、半透明材料透射特性的一个重要指标；雾度是描述透明、半透明材料透射光中散射特性的重要参量，它表征了材料对透射光的散射能力[1-3]。

国标 GB/T2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》规定了透明塑料透光率和雾度测试的两种测定方法[4]：雾度计法和发光光度计法。该标准还规定透过试样的光通量与射到试样上的光通量之比为透光率；透过试样而偏离入射方向 2.5°以上的散射光通量与透射光通量之比为雾度。一般来说，透光率与雾度成反比关系，即透光率高的材料，其雾度低；反之亦然。但有些材料的情况并不是如此，例如毛玻璃透光率较高，但其雾度也比较大。透过率和雾度既相互联系又相互制约。在航空飞机设计制造领域，飞机风挡屏的透光率和雾度会直接影响飞行员的视见距离和图像分辨能力，因此研究这两个性能指标，对保证飞行安全具有重大意义。

常规的透光率/雾度仪，如上海物光公司推出的透光率雾度测定仪 WGT-S，主要由光源、入口窗、孔隙和透镜等构成一个照明准直系统，产生发散角小于 2.5°的平行入射光；并且使用机械调制对平行光的调制，配合锁相放大技术来完成对光电探测信号的解调。积分球作为集光器和匀光器，收集直接入射或透射的光通量，积分球除了入光口和探测器开口，正对入光口的位置设计了一个出光口，该出光口附近还有一个出光口，一块可移动的标准反射板可切换这两个开口的开关，以实现积分球与光陷阱连通位置的改变。光陷阱能够吸收进入光陷阱的所有光通量，避免它反射回到积分球内。由于测量物理量为光度量，因此，探测器的响应曲线应符合人眼的视见响应函数，可通过选用人眼响应探测器来实现。此外，美国霍尼韦尔国际公司采用面阵图像传感器的方式实现光源通过测试样品后透射能量和各个散射角度能量的分布以测量雾度[5]，该方法适合于测量片状材料。韩国三星电机株式会社[6]在样品和积分球之间增加零透镜和液体透镜，根据样品的类型，液体透镜改变所施加的电压，以改变曲率和焦距，从而将入射到积分球上的光转换成平行光，因而不管样品的形状如何，都可以精确测量雾度。该方法虽然能解决曲面透镜的雾度测试，依然无法实现航空生产中对大面型自由曲面透明件的现场测量，此外该方法操作繁琐，需要切换光陷阱和标准漫反射板。

本文针对航空生产中大面型自由曲面透明件的现场测量，遵循国标 GB/T2410-2008 的规定和要求，设计了一种用于大型曲面透明件雾度和透光率实时测试仪器。该仪器以电调制方式的 3000 K 发光二极管(Light Emitting Diode，LED)作为照明光源，采用双积分球以及人眼响应探测器收集采集能量，其中一个积分球用于收集测量散射能量，一个积分球用于收集测量透射能量，并对雾度和透过率进行了理论推导。

2 大型曲面透明件雾度和透光率实时测试仪系统设计

大型曲面透明件雾度和透光率实时测试仪主要由信号发射端、信号接收端、电控箱、电脑以及机械调整机构组成。信号发射端包括光源和准直系统，信号接收端包括散射光测试积分球、透射光测试积分球、探测器以及监视摄像头等。其主要工作原理为：信号发射端发出的光经过调制以及准直，通过测试样品后进入信号接收端，超过2.5°以上的散射光进入散射光测试积分球。散射光测试积分球上安装人眼响应探测器，用于测量散射积分球内的光信号。透射光进入透射积分球，透射光测试积分球安装人眼响应探测器、监视摄像头以及监视靶标。人眼响应探测器用于测量透射积分球内的光信号，监视靶标配合监视摄像头用于测试光路的对准和实时监视。电控箱用于光源的驱动和调制、人眼响应探测器数据采集以及监视摄像头的视频采集，测试原理如图 1 所示。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

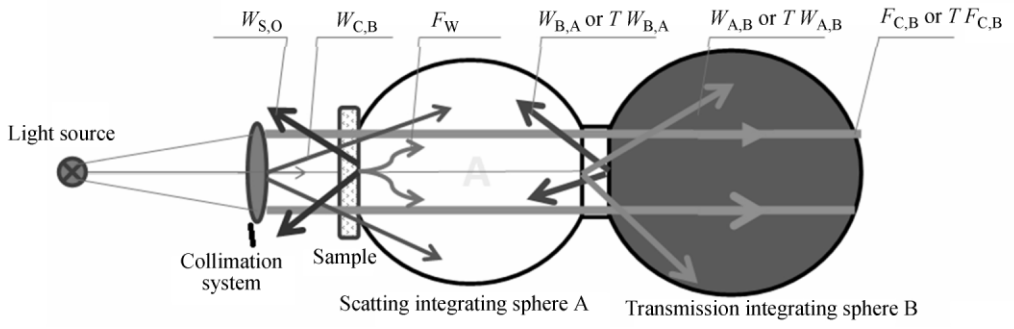

图 1　雾度和透光率测试原理

Fig. 1　Principle schematic of haze and transmittance real-time tester

图 1 中，$W_{S,O}$ 是从散射积分球中向外溢出的光通量，该光通量的溢出不影响雾度测量值；$W_{C,A}$ 是平行光管发出的进入到积分球内的散射光通量（平行光管散射），由于该光通量可能与样品雾度散射相近，因此会引入较大的测量偏差；加样品后的光通量为 $T \cdot W_{C,A}$，T 表示加样品的透光率，F_W 为样品雾度产生并进入到积分球 A 内的光通量；$T \cdot W_{B,A}$ 和 $W_{B,A}$ 分别为有无样品时，由积分球 B 对积分球 A 发出的辐射；$T \cdot W_{A,B}$ 和 $W_{A,B}$ 为有无样品时积分球 A 对积分球 B 的辐射，由于积分球 A 内的辐射主要是样品雾度散射或平行光管散射的光通量，该光通量一般小于总光通量的 10 倍，再经积分球 A 的衰减后其数值更低，因此该项可忽略；$T \cdot F_{C,B}$ 或 $F_{C,B}$ 为有无样品时平行光进入到积分球 B 内的光通量。

在没加样品时，散射光测试积分球入射辐射光通量 $F_{I,A}$ 包括由平行光管光学元件雾度产生的杂散辐射 $W_{C,A}$ 以及经由透射积分球 B 对散射积分球发出的光通量 $W_{B,A}$，可表示为：

$$F_{I,A}=W_{C,A}+W_{B,A}. \tag{1}$$

透射光测试积分球入射辐射光通量 $F_{I,B}$ 包括平行光管发出的辐射在散射样品内的通量 $F_{C,B}$ 和积分球 A 发出的漫反射通量 $W_{A,B}$，即：

$$F_{I,B}=W_{C,B}+W_{A,B}, \tag{2}$$

该量值很小可以忽略。

不加样品前散射光测试积分球和透射光测试积分球接收到的光通量 F_I 为：

$$F_I=F_{I,A}+F_{I,B}. \tag{3}$$

在添加测试样品后，散射光测试积分球入射辐射光通量 $F_{O,A}$ 包括由样品散射（雾度）辐射通量 $F_{W,A}$ 以及未放置样品前散射积分球经过样品产生的辐射通量 $T \cdot (W_{C,A}+W_{B,A})$，可表示为：

$$F_{O,A}=F_{W,A}+T \cdot (W_{C,A}+W_{B,A}). \tag{4}$$

透射光测试积分球入射辐射光通量 $F_{O,B}$ 包括平行光经过样品后进入透射光测试积分球中的光通量（$T \cdot F_{C,B}$）以及散射光测试积分球对透射光测试积分球产生的光通量（$F_{W,B}+T \cdot F_{A,B}$），可以表示为：

$$F_{O,B}=T \cdot F_{C,B}+T \cdot F_{A,B}+F_{W,B}. \tag{5}$$

此时散射光测试积分球和透射光测试积分球接收到的光通量 F_O 为：

$$F_O=F_{O,A}+F_{O,B}. \tag{6}$$

加入样品后，散射积分球内产生的雾度光通量为：

$$F_W=F_{O,A}-F_{I,A}. \tag{7}$$

透光率 T 的计算公式为：

$$T=\frac{F_O}{F_I}, \tag{8}$$

雾度 W 的计算公式为：

$$W=\frac{F_W}{F_O}. \tag{9}$$

2.1　光源的选择

GB/T 2410-2008（透明塑料透光率和雾度的测定）中对光源的要求为：光源和光检测器的混合光经过过滤后应为符合国际照明委员会（CIE）1931 年标准的 C 光源或 A 光源。采用 3000K LED 光源作为照明光源，A 光源和系统采用的 3000K 暖白 LED 光谱分布对比如图 2 所示。

针对图 2 中的测试光源和 A 光源差异，本文定量分析了两者差异对透光率和雾度测试结果的影响。选用用户提供的三类样品，其光谱透过率曲线如图 3 所示。分别采用测试光源和 A 光源对人眼响应视觉函数以及测试样品的光谱透过率进行加权相乘和积分计算[7]，得到三种样品的透

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

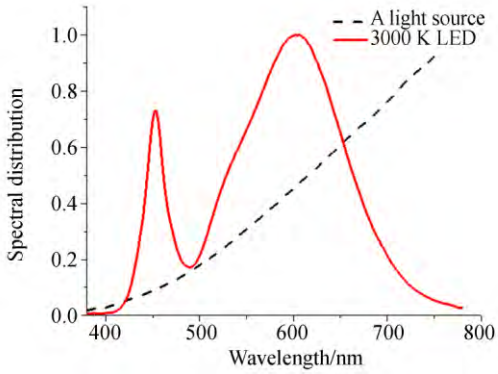

图 2　A 光源和试验用光源对比

Fig. 2　Comparison of light source A and experimental light source

过率如表 1 所示，绝对透过率误差均小于 0.1%，当测试样品的透过率在人眼响应谱段变化剧烈时，绝对透过率测试误差会稍微增大。对于特定的样品雾度值是散射能量与总透射能量的比值，雾度指标不受光源的影响。因此，可以采用 3000 K 暖白 LED 作为系统的照明光源[8-9]。

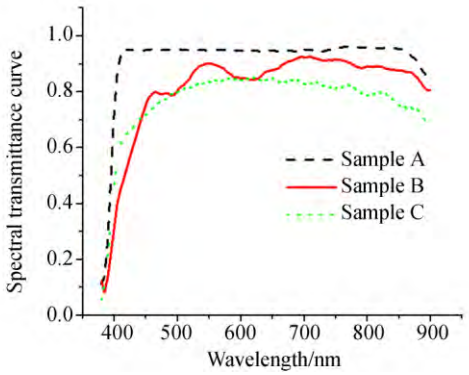

图 3　三类样品的光谱透过率曲线

Fig. 3　Spectral transmittance curves of three kinds of samples

表 1　光源光谱透过率测试结果

Tab. 1　Test results of spectral transmittance of light sources

	A 光源			3000 K 光源			透过率
	加样品	未加样品	透过率/%	加样品	未加样品	透过率/%	偏差/%
样品 A	34.60	36.48	94.849	69.80	73.58	94.858	0.009
样品 B	31.65	36.48	86.767	63.89	73.58	86.826	0.059
样品 C	30.47	36.48	83.546	61.48	73.58	83.557	0.011

考虑到散射光强信号微弱，采用调制和锁相放大的方式对微弱光信号进行采集。光信号的调制可分为机械调制和电调制两种方式。其中，机械调制法是采用机械斩波方式对信号进行调制，机械斩波器由直流电机驱动以一定的转速转动。电调制法是指对光源驱动电流进行方波调制，以实现光信号的输出调制。机械调制所用的斩波器经过长期的工作，容易发生松动和变形，这会造成调制的目标信号与参考信号之间的相位漂移，从而导致测量结果的重复性差。电调制法替代传统的机械调制，可以提高调制/参考信号的稳定性。综合考虑本文选择电调制法进行信号调制。

采用 2 MHz 有源晶振经可编程逻辑器件 CPLD 进行 1000 分频，得到 2 kHz 的方波信号用来作为驱动电路的调制信号和锁相放大器的参考信号。考虑到调制电路距离 LED 驱动电路及锁相放大器距离较远，因此采用 RS422 驱动电路进行驱动，同时提高信号的抗干扰能力。

2.2　光学设计

光路的准直性直接影响透过率和雾度的测试结果，因此对光路进行光学设计，以保证 LED 发出光的准直性。光学系统设计如图 4 所示，系统口径为 20 mm，F 数为 5，发散角为 10′。

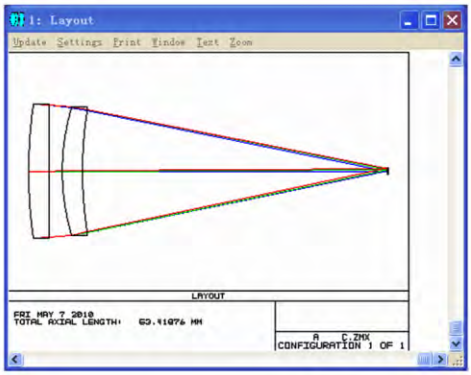

图 4　光学系统设计图

Fig. 4　Layout of optical system

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3　积分球设计

系统采用双积分球结构方案，双积分球的结构设计需要保证超过 2.5°以上的散射光进入散射光测试积分球，散射积分球上安装人眼响应探测器，透射积分球上安装人眼响应探测器、监视摄像头和监视靶标，如图 5 所示，散射积分球入口和出口边缘连线与水平线夹角为 2.5°，使超过2.5°的散射光进入散射积分球。

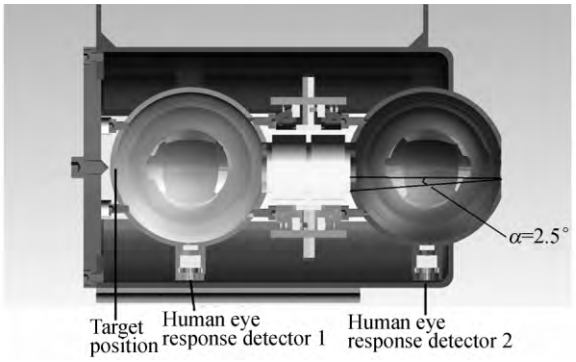

图 5　双积分球结构设计

Fig. 5　Design of double integrating sphere

积分球能量传递公式如下[10]：

$$E_{out}=\frac{\Phi_{in}}{A}\cdot\frac{\rho}{1-\rho(1-f)}=\frac{\Phi_{in}}{A}\cdot F, \quad (10)$$

其中：E_{out}为积分球出光口以及积分球内表面的辐射照度；Φ_{in}为积分球的输入辐射功率；f 为积分球开口比；A 为积分球的内表面面积，$A=\pi d^2$；ρ 为内表面涂层的光谱反射率，可视为常数；$F=\frac{\rho}{1-\rho(1-f)}$，即为积分球衰减系数。

由积分球能量传递公式可知，在入射能量和开口比确定的情况下，积分球内表面的辐射照度与积分球内表面的反射率相关。积分球涂层设备的使用对象为大型曲面透明件，透射球的入射能量是散射球入射能量的数十倍。为此，这里采用透射积分球涂灰色漫反射涂层，散射积分球涂高漫反射涂层，光谱反射率为 97%，并在人眼响应谱段的光谱反射率具有很好平坦性，使得散射积分球的能量系数是透射积分球能量系数的 30 倍左右，以保证探测器的探测信号能量相当。

散射积分球开口比为 3%，透射积分球开口比为 1.5%。根据积分球能量传输公式，求得透射积分球的反射率为 35.55%，该反射涂层在人眼响应谱段的光谱反射率具有很好的平坦性。

2.4　支撑调整机构设计

为了满足各种规格型号飞机风挡玻璃透明度及雾度的测试需求，测试系统需要设计信号发射端和信号接收端的支撑和调整机构，支撑调整装置主要由光源照明组件支撑调整机构、探测接收组件支撑调整机构及平移车构成。

为了保证光源照明组件出光口、探测接收组件入光口光轴与样品垂直且保证二者的光轴同轴，需要光源照明组件、探测接收组件均能实现六自由度调整；同时光源照明组件、探测接收组件在调整后能够通过机械锁紧机构锁固。

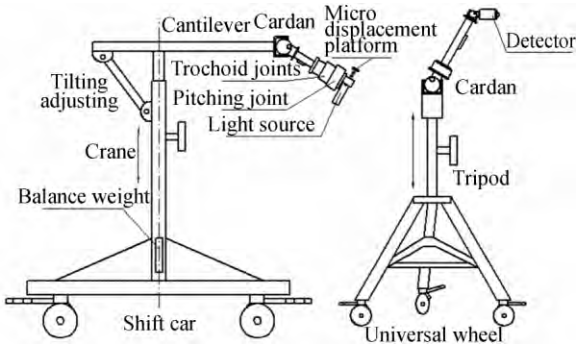

图 6　发射端和接收端支撑及多维调整机构示意图

Fig. 6　Schematic diagram of support and multi-dimensional adjustment mechanism for emitting and receiving parts

3　系统标定与测试

系统在使用前需要进行标定，系统标定即为散射光测试积分球 A 和透射光测试积分球 B 响应度的标定。标定过程中，在加入样品前，积分球接收到的光通量为：

$$F_I=F_{I,A}+F_{I,B}=\frac{DN_{I,A}-DN_{DARK,A}}{R_A}+\frac{DN_{I,B}-DN_{DARK,B}}{R_B}, \quad (11)$$

其中：$DN_{I,A}$和 $DN_{I,B}$为在未加入样品前两个积分球的输出信号，$DN_{DARK,A}$和 $DN_{DARK,B}$为在光源关闭状态下两个积分球的输出信号（暗信号），R_A 和 R_B 分别为散射光测试积分球 A 和透射光测试积分球 B 的响应度。

在加入样品后，积分球接收到的光通量为：

$$F_O=F_{O,A}+F_{O,B}=\frac{DN_{O,A}-DN_{DARK,A}}{R_A}+\frac{DN_{O,B}-DN_{DARK,B}}{R_B}, \quad (12)$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中：$DN_{I,A}$和 $DN_{I,B}$为加入样品后两个积分球的输出信号。

加入样品后，散射光测试积分球 A 的雾度光通量 F_W 为：

$$F_W=F_{O,A}-F_{I,A}=\frac{DN_{O,A}-DN_{\mathrm{DARK},A}}{R_A}-T\cdot\frac{DN_{I,A}-DN_{\mathrm{DARK},A}}{R_A}=\frac{DN_{O,A}-T\cdot DN_{I,A}-(1-T\cdot DN_{\mathrm{DARK},A})}{R_A}\approx\frac{DN_{O,A}-T\cdot DN_{I,A}}{R_A}. \tag{13}$$

注意，上式计算中需要标定积分球光通量的响应度。将式(11)、(12)和(13)带入式(8)和(9)可得透光率和雾度。透光率计算公式为：

$$T=\frac{F_O}{F_I}=\frac{\dfrac{DN_{O,A}-DN_{\mathrm{DARK},A}}{R_A}+\dfrac{DN_{O,B}-DN_{\mathrm{DARK},B}}{R_B}}{\dfrac{DN_{I,A}-DN_{\mathrm{DARK},A}}{R_A}+\dfrac{DN_{I,B}-DN_{\mathrm{DARK},B}}{R_B}}=\frac{(DN_{O,A}-DN_{\mathrm{DARK},A})+\dfrac{R_A}{R_B}(DN_{O,B}-DN_{\mathrm{DARK},B})}{(DN_{I,A}-DN_{\mathrm{DARK},A})+\dfrac{R_A}{R_B}(DN_{I,B}-DN_{\mathrm{DARK},B0})}, \tag{14}$$

雾度计算公式为：

$$W=\frac{F_W}{F_O}=\frac{\dfrac{DN_{O,A}-T\cdot DN_{I,A}-(1-T\cdot DN_{\mathrm{DARK},A})}{R_A}}{\dfrac{DN_{I,A}-DN_{\mathrm{DARK},A}}{R_A}+\dfrac{DN_{I,B}-DN_{\mathrm{DARK},B}}{R_B}}=\frac{DN_{O,A}-T\cdot DN_{I,A}-(1-T)\cdot DN_{\mathrm{DARK},A}}{(DN_{O,A}-DN_{\mathrm{DARK},A})+\dfrac{R_A}{R_B}(DN_{O,B}-DN_{\mathrm{DARK},B})}. \tag{15}$$

通过透光率公式可以得到：

$$T\cdot DN_{I,A}-DN_{O,A}-(T-1)\cdot DN_{\mathrm{DARK},A}=\frac{R_A}{R_B}[DN_{O,B}-T\cdot DN_{I,B}-(1-T)\cdot DN_{\mathrm{DARK},B}], \tag{16}$$

采用标定过的雾度标准样品完成对系统的标定，得到 R_A/R_B，中国计量院提供 5 组标准雾度片 $S_1\sim S_5$，因此 R_A/R_B 可通过线性回归方式得到。

采用标定后系统对标准雾度片进行测试，实测结果和标准值对比以及绝对误差如表 2 所示。

表 2　雾度片的透光率和雾度的测量结果

Tab. 2　Measurement results of transmittance and haze of standard haze samples　(%)

雾度片编号	透光率测量值	透光率标准值	雾度测量值	雾度标准值	透光率绝对误差	雾度绝对误差
S_1	87.8	88.0	1.12	1.00	−0.2	0.12
S_2	86.7	86.5	4.20	4.03	0.2	0.17
S_3	82.9	83.0	10.11	9.90	−0.1	0.21
S_4	77.2	77.5	20.21	20.01	−0.3	0.20
S_5	72.2	72.3	32.11	31.88	−0.1	0.23

此外，采用本装置对 3 个样品进行测试，得到 3 个样品的透过率和雾度值，与 3 个样品的光谱透过率与 A 光源以及人眼响应函数的计算值相比较，绝对误差分别为 0.32%、0.02% 以及 0.29%，表明该设备的测试结果是正确的。

4　结　论

本文设计了用于大型曲面透明件的雾度和透光率实时测试仪，仿真分析了 3000 K LED 光源

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对透过率和雾度的测量结果与 CIE A 光源测量结果的偏差。仿真结果表明，对于用户要求测试的样品，两者具有很好的一致性。在此基础上分别对信号发射端、信号接收端进行光学设计、机械设计和电子学设计，并进行了系统标定，标定后对雾度标准片以及样品材料进行测试，透过率测试的绝对误差均小于 0.4%，雾度绝对误差小于 0.3%。

该系统在保证测量精度的前提下，与传统透过率雾度仪相比可实现成型的大面积复杂面型的飞机风挡屏的在线测量，简化了测量步骤，可同时测得透光率和雾度，提高了测量效率。LED 作为光源，具有发光效率高、寿命长、发光稳定性好等众多优点，并且采用电调制方式，更有利于实现小型号和轻量化。

参考文献：

[1] 卢进军，刘卫国，潘永强编著. 光学薄膜技术[M]. 北京：电子工业出版社，2011.
LU J J, LIU W G, PAN Y Q. *Optical Thin Film Technology* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011. (in Chinese)

[2] 陈晓勇. 塑料薄膜雾度及其控制的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料，2010，8(2)：27-32.
CHEN X Y. Research Progress on haze of plastics film and its control[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(2): 27-32. (in Chinese)

[3] 王文高. 玻璃表面雾度测量系统重复性和再现性分析[J]. 玻璃，2012(2)：26-29.
WANG W G. Glass surface haze measurement system repeatability and reproducibility analysis[J]. *Glass*, 2012(2): 26-29. (in Chinese)

[4] 中华人民共和国国家标准 GB/T2410-2008 透明塑料透光率和雾度的测定[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
National standard of the People's Republic of China GB/T2410-2008. Determination of the luminous transmittance and transparent plastics[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[5] 霍尼韦尔国际公司. 用于测量片状材料或其它材料的雾度的装置和方法：中国，CN 102422148 A[P]. 2012-04-18.
Honeywell International. Mesearment equipment and methods for flaky material and other materials: Chinese Patant, CN 102422148 A[P]. 2012-04-18. (in Chinese)

[6] 三星电机株式会社. 雾度测量方法及其装置：中国专利，CN1920534 A[P]. 2007-02-28.
Samsung Electric Co., Ltd. Mesearment method and equipment for haze: Chinese Patant, CN1920534 A[P]. 2007-02-28. (in Chinese)

[7] 陈风，郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学 精密工程，2008，16(3)：415-419.
CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)

[8] 金鹏，喻春雨，周奇峰，等. LED 在道路照明中的光效优势[J]. 光学 精密工程，2011，19(1)：51-55.
JIN P, YU CH Y, ZHOU Q F, *et al*.. Superior application of LED to street lighting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 51-55. (in Chinese)

[9] 赵星，吴宏超，宋丽培，等. 微型投影机自由曲面 LED 聚光器的设计[J]. 光学 精密工程，2010，18(10)：2123-2129.
ZHAO X, WU H CH, SONG L P, *et al*.. Design of freeform LED concentrator for micro-project [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2123-2129. (in Chinese)

[10] 刘洪兴，任建伟，刘则洵，等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学 精密工程，2012，20(7)：1447-1456.
LIH H X, REN J W, LIU Z X, *et al*.. Design of integrating sphere solar spectrum simultor based on xenon lamp and LEDs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1447-1456. (in Chinese)

作者简介：

刘洪兴(1986－)，男，山东聊城人，博士，主要从事光学遥感器辐射定标以及光谱分布可调谐光源方面的研究。E-mail：lhxing_888@126.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net