

敦煌壁画颜料颜色非接触式测量条件优化研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.03.012

张雨豪 王 辉
史太川

武汉大学
印刷与包装系
湖北 武汉 430079

摘 要: 针对敦煌壁画颜料颜色的非接触式测量,以接触式颜色测量设备测得的光谱数据为参考,利用非接触式测量设备 PR705 光谱辐射度计,在不同照明和测量距离条件下,测量敦煌壁画色卡的光谱数据,并通过计算得到不同照明和测量距离条件下色块样本的光谱均方根(RMS)误差和色差(ΔE),以此作为评价测量结果的参数,通过优化拟合方法获得这两个指标关于照明和测量距离的函数关系,进而分析照明和测量距离对颜色测量精度的影响,从而实现测量条件的优化,提高颜色测量精度。研究表明,测量距离为 0.5~1.0 m 和 2.0~2.5 m、照明距离为 3.0~3.5 m 的条件下,测量结果与参考值的 RMS 和 ΔE 均较小,可获得较好的测量精度,且光谱误差 $RMS < 0.006$,色差 $\Delta E < 0.5$ 。

关键词: 敦煌壁画颜料; 颜色测量; 测量条件; 优化拟合

中图分类号: P574.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2017)03-0082-07

0 引言

敦煌壁画作为我国宗教艺术文化的载体,具有重要的研究价值,其复制与再现工作正逐步受到各界的广泛重视^[1-2]。其中,壁画颜色的准确测量是敦煌壁画复制与再现的关键问题之一^[3-4]。

颜色测量是指利用特定的测量设备,在一定的条件下获取目标物体颜色信息的过程。根据不同仪器的测色原理导致测量条件的差异,可以将颜色的测量方法分为接触式测量和非接触式测量^[5-6]。接触式测量的仪器包括密度计、分光光度计、光电积分测色仪等,针对这类测色仪器,国际照明委员会(International Commission on illumination, CIE)对其测量的照明、几何条件等给出了明确的标准^[7]。对于非接触式测量设备,并未有明确的测量条件规定。对于诸如敦煌壁画等宝贵文化遗产及文物而言,任何的接触式测量都

存在损坏文物的风险,因此,需要采用非接触式颜色测量方法获取其颜色信息^[8-9]。

D. J. Gozalo-Diaz 等人^[10]较早提出了非接触式颜色测量的方案,但是他们并没有研究测量条件对测量结果造成的影响。万晓霞等人^[11]提出用数码相机作为测色仪器,以获取敦煌壁画的颜色信息,并且制作了敦煌色卡,但是他们的研究中未考虑测量条件对测量值造成的影响,而且通过数码相机仅能够获取对象的 RGB 值,并不能获取光谱辐照度信息。在实际实验过程中发现,在对敦煌壁画进行非接触式颜色测量时,测量距离和照明距离对测量结果都有较大的影响。但目前尚未有针对壁画颜色非接触式测量几何条件优化的相关研究。为了在不损害壁画的前提下准确地测量壁画颜色信息,本研究以 PR705 光谱扫描辐射度计作为测量仪器,以 Macbeth Color Checker 24 标准色卡和敦煌彩绘文物数字化保护色卡为实验

收稿日期: 2017-02-24

作者简介: 张雨豪(1993-),男,湖北襄阳人,武汉大学硕士生,主要研究方向为颜色测量和印刷适性,

E-mail: 332807957@qq.com

对象,通过优化拟合的分析方法,提出了基于敦煌壁画颜料颜色测量的最优化测量条件,以期当前敦煌壁画及其他艺术品的复制和再现研究中的颜色测量和评价提供一定的理论参考。

1 基本理论

1.1 颜色基本理论

1.1.1 光谱反射率与三刺激值

光谱反射率是物体反射的光通量与入射到物体的光通量之比。它反映了物体对光谱的选择吸收性能,直接决定着物质的颜色属性。

三刺激值是引起人体视网膜对某种颜色感觉的3种原色的刺激程度量,其可以由光谱反射率与光源相对光谱功率分布和标准观察者三刺激函数进行积分计算得到。

本实验中使用 PR705 光谱扫描辐射度计对目标色块进行测量,得到色块在特定光源下的光谱辐照度值,将其与标准白板进行比较,即可以得到目标色块的光谱反射率 $\rho(\lambda)$,进一步通过色度学积分公式,即可计算得到目标色块的三刺激值 X 、 Y 、 Z ,如式(1)~(2)所示。

$$\rho(\lambda) = \frac{v_t}{v_s} r_s, \quad (1)$$

$$\begin{cases} X = \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y = \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z = \int_{380}^{780} S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \end{cases} \quad (2)$$

式(1)~(2)中:

v_t 为目标色块的光谱辐照度值;

v_s 为标准白板的光谱辐照度值;

r_s 为标准白板的光谱反射率;

$S(\lambda)$ 为光源的相对光谱功率分布;

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为标准观察者三刺激值。

1.1.2 色度值与色差

色度值是量化地描述颜色特性的一个参数,它能够反映颜色的亮度、色调和饱和度。色差则是两种颜色之间色度的差异。国际照明委员会(CIE)提出了 CIE LAB 色度空间,并且在这一基础上提出了 CIE 1976L*a*b* 色差公式,即

$$\begin{cases} L^* = 116f(Y/Y_0) - 16, \\ a^* = 500[f(X/X_0) - f(Y/Y_0)], \\ b^* = 200[f(Y/Y_0) - f(Z/Z_0)]. \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_0 、 Y_0 、 Z_0 分别为 CIE 标准照明体的三刺激值,且 $X_0=96.4221$, $Y_0=100.0000$, $Z_0=82.5221$;

$$f(I) = \begin{cases} I^{1/3}, & I > 0.008856; \\ 7.787I + 16/116, & I \leq 0.008856. \end{cases} \quad (4)$$

色差计算公式如式(5)所示。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2}. \quad (5)$$

式中: ΔE^* 为色差;

Δa^* 、 Δb^* 、 ΔL^* 分别为样品色与目标色的色度值之差。

1.2 二元曲面拟合

二元曲面拟合,即根据实验实际测得的数据,求取函数 $f(x, y)$ 与变量 x 及 y 之间的关系式,使其函数曲面通过或近似通过所有的实验测试点。也就是说,使所有实验数据点能近似地分布在函数 $f(x, y)$ 所表示的空间曲面上。

本实验采用最小二乘法实现二元曲面拟合。设实际试验测试点数据为 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, \dots, n$), 则曲面拟合函数为

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j. \quad (6)$$

式(1)由多项式系数 a_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$) 唯一确定。为了确定多项式系数 a_{ij} , 定义误差函数为

$$E(a_{ij}) = \sum_{i=0}^n [z_i - f(x_i, y_i)]^2. \quad (7)$$

误差函数式(7)应在所有测试点带入后有最小值,也就是将问题转化为确定多项式系数,使得误差函数取极值的问题。当函数对各变量的偏导数都为零时,函数有极值,即满足

$$\frac{\partial E(a_{ij})}{\partial a_{ij}} = 0, \quad i, j=1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

求解出关于多项式 a_{ij} 的方程组式(8),即可以求得二元曲面拟合函数 $f(x, y)$ 。

1.3 敦煌壁画颜料与敦煌壁画色卡

颜料(pigment)即能让物体着色的粉末状物质,一般分为无机颜料和有机颜料两类。颜料成分的来源较为广泛,可以从矿物和动植物中提取得到。已有研究表明:敦煌壁画颜料中,红色主要来源于朱砂和铅丹,蓝色主要来源于青金石和石青,绿色主要来源于

氯铜矿和石绿^[12-13]。可见,敦煌壁画颜料主要来源于矿石,属于无机颜料,其颜色属性与油画、水粉画等使用的颜料有着较大的区别,往往具有较高的饱和度和光泽度。

目前,在敦煌壁画的保护和再现研究中,大多研究者使用高分辨率 RGB 三通道的数码相机采集壁画的颜色信息,但是敦煌壁画颜料的颜色较为丰富,壁画的色域远远大于数码相机的色域,数码相机难以获取到敦煌壁画中高饱和度的颜色。而且颜色信息在不同设备间传递和在显示设备上呈现时,均会出现偏差,导致壁画颜色失真,需要根据敦煌壁画颜料的颜色属性制定专门的敦煌壁画色卡,用于壁画保护工作的颜色校正。敦煌壁画颜料色卡的研发,已经通过前期对敦煌壁画颜料的材质、制作工艺等方法的调查研究,模拟样本的制备以及综合主客观综合评价等方法完成^[11]。

2 实验设计

2.1 设备与材料

本实验使用 Photo Research 705 (PR705) 光谱辐射度计作为非接触式测量用仪器,选用 X-Rite SpectroEye 7000A 分光光度计作为接触式测量用仪器,选用爱玲珑 scanlite1000 光源(标准的 A 光源)作为照明光源,选用敦煌彩绘文物数字化保护色卡作为测量对象。

为了使样本表面的光照更加均匀,实验过程中采用 CIE 推荐的 $45^\circ/0^\circ$ 的颜色测量几何条件,即光源安置在被测对象两侧 45° ,测量仪器与被测对象垂直,如图 1 所示。

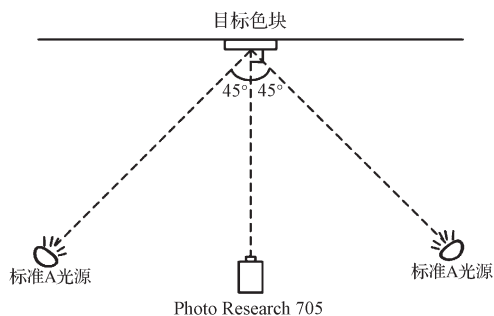


图 1 非接触式测量的几何条件

Fig. 1 Geometric condition of non-contact measurement

2.2 实验方法

实际测量实验结果表明,在壁画颜色的非接触式

测量中,测量距离和照明距离对测量结果影响较大。因此,本实验将上述两项设为变量因素。使用 PR705 光谱辐射度计对敦煌色卡的色块进行测量,获取该颜色在不同测量距离和照明距离下的光谱辐射度值,再测出相同测量条件下标准白板的光谱辐射度值,为保证测量精度,每次对色块进行测量前,需先用标准白板进行校正。

根据公式(1)~(4)算出该色块的光谱反射率及色度值,以接触式测量仪器 SpectroEye 7000 A 测得的结果为该色块的标准光谱反射率值,即可以得到该色块的光谱误差均方根 (root mean square, RMS) 误差值以及色差值 ΔE ,并且以此作为评判测量结果优劣以及确定优化条件的参数。

本实验选择敦煌壁画颜料色卡中朱砂、朱磬、石黄、头绿、青金石和浅中灰等 6 个具有代表性的颜料色块作为实验对象,并且参考已有相关文献以及实际测量经验,选取测量距离为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m, 照明距离为 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 m, 通过改变测量距离和照明距离,对每种颜色进行 25 组测量实验。

对所得实验结果进行曲面拟合处理,得到 RMS 和 ΔE 关于测量距离和照明距离的函数关系,进而确定当 RMS 和 ΔE 较小时的测量距离和照明距离,最终确定敦煌壁画颜料颜色非接触式准确测量的优化组合条件。

3 实验结果与分析

3.1 测量距离对非接触式颜色测量的影响

以青金石色块为例,所得测量距离对 RMS 和 ΔE 的影响如图 2~3 所示。

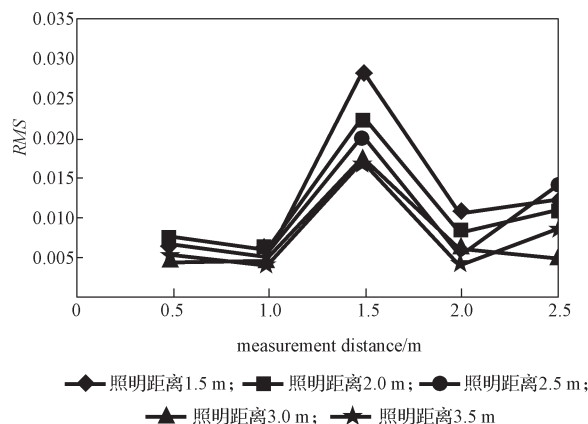
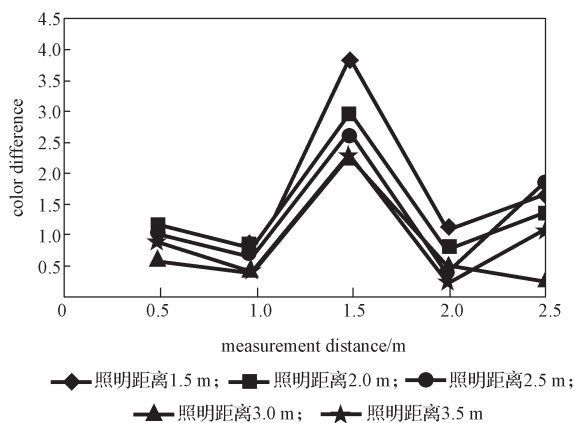


图 2 测量距离对测量结果 RMS 的影响 (青金石)

Fig. 2 Impact of measurement distance on RMS (lazurite)

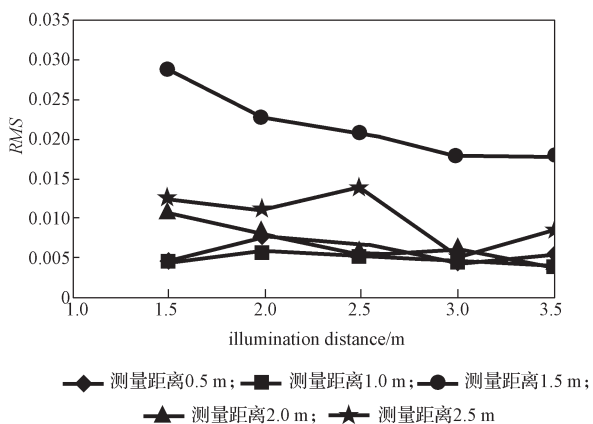
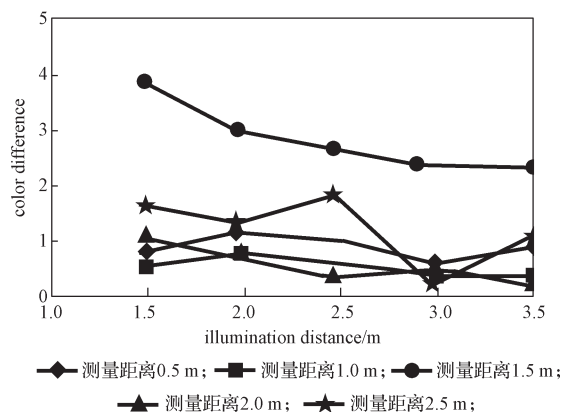
图3 测量距离对测量结果 ΔE 的影响 (青金石)Fig. 3 Impact of measurement distance on ΔE (lazarite)

从图2和3所示测量结果可以得知:在照明距离以及其他测量条件一定时,随着测量距离的增大,色块的色差和光谱误差均呈现出先略微减小、后显著增大、继而显著回落、最后大多再度缓慢回升的变化趋势。实验条件下,当测量距离为1.0 m和2.0 m时,色块的光谱误差和色差值均较小。当照明距离为3.0 m时,测量距离在达到1.5 m后,色块的色差和光谱误差均持续减小,不呈先减小后增大的变化趋势,这可能是由测量误差所致。

对于绝大多数颜色,当色差值 ΔE 小于1.0时,人眼察觉不出颜色的差异;而当色差值 ΔE 大于2.0时,颜色有较为明显的差异。可见,测量距离为1.5 m时的测量结果存在明显色差,而测量距离为1.0 m和2.0 m时,测量结果较为理想。以其他色块为实验对象时,均得到了相同的测量结果。

3.2 照明距离对非接触式颜色测量的影响

以青金石色块为例,所得照明距离对 RMS 和 ΔE 的影响如图4~5所示。

图4 照明距离对测量结果 RMS 的影响 (青金石)Fig. 4 Impact of illumination distance on RMS (lazarite)图5 照明距离对测量结果 ΔE 的影响 (青金石)Fig. 5 Impact of illumination distance on ΔE (lazarite)

从图4和图5所示照明距离对测量结果的影响曲线可以得知:当测量距离以及其他测量条件一定时,随着照明距离的增大,光谱误差值和色差值均呈现出无规律的变化现象,但是总体来说变化比较平稳。以其他色块为实验对象时,也得到了相同的结果。由此可以得知,照明距离对非接触式颜色测量的测量结果影响相对较小。

3.3 优化拟合结果分析

假设壁画非接触式颜色测量的光谱误差 RMS 和色度差 ΔE 分别与测量距离 x 和照明距离 y 存在函数关系,并且函数关系式分别为 $RMS=f(x, y)$, $\Delta E=g(x, y)$ 。采用最小二乘法对其进行多项式拟合,则有

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j, \quad (9)$$

$$g(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i y^j. \quad (10)$$

式中 a_{ij} , b_{ij} ($i=0, 1, \dots, m$; $j=0, 1, \dots, n$)是待定参数,其中 m , n 为拟合多项式的最高阶次。

最高阶次的选取直接关系着多项式拟合的精度,阶次太低,会出现明显的区块效应;阶次太高,会出现过度拟合的现象。实验中对每种色块分别选取5组测量距离和5组照明距离进行测量,共得到25组函数值 RMS 和 ΔE ,故最高阶次不宜超过4阶,经尝试,取 $m=n=4$ 。即最高阶次为4时,能够得到比较满意的拟合结果。

以青金石色块为例,将计算结果(见表1和表2)用Matlab进行4阶多项式拟合,所得拟合结果见表3~表6。

表 1 青金石色块的多项式拟合用光谱误差数据

Table 1 Polynomial fitting points data of lazurite

照明距离	测 量 距 离				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_1	0.004 730	0.004 591	0.028 775	0.010 487	0.012 304
y_2	0.007 621	0.005 863	0.022 754	0.008 122	0.010 915
y_3	0.006 739	0.005 156	0.020 766	0.005 281	0.013 904
y_4	0.004 342	0.004 652	0.017 871	0.006 053	0.004 934
y_5	0.005 277	0.003 926	0.017 765	0.003 815	0.008 371

表 2 青金石色块的多项式拟合用色度数据

Table 2 Polynomial fitting points data of lazurite

照明距离	测 量 距 离				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
y_1	0.834 952	0.538 520	3.877 751	1.054 635	1.627 365
y_2	1.162 933	0.791 590	2.981 962	0.738 992	1.338 821
y_3	1.013 401	0.645 334	2.682 535	0.352 907	1.824 408
y_4	0.575 691	0.373 569	2.323 029	0.511 235	0.245 152
y_5	0.893 938	0.390 293	2.337 025	0.219 737	1.057 604

表 3 青金石色块的 RMS 多项式拟合系数 a_{ij}

Table 3 Polynomial fitting coefficient a_{ij} of lazurite RMS

多项式指数	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$j=0$	0.272 6	-0.593 2	0.807 6	-0.400 3	0.065 99
$j=1$	-0.221 7	-0.052 75	0.009 081	0.001 878	
$j=2$	0.164 2	0.012 39	-0.003 052		
$j=3$	-0.049 25	-0.000 325 1			
$j=4$	0.005 148				

表 4 青金石色块的 ΔE 多项式拟合系数 b_{ij}

Table 4 Polynomial fitting coefficient b_{ij} of lazurite ΔE

多项式指数	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$j=0$	48.87	-88.17	118	-58.68	9.776
$j=1$	-47.53	-6.546	1.48	0.080 3	
$j=2$	33.69	1.362	-0.314 7		
$j=3$	-9.911	-0.039 86			
$j=4$	1.036				

表 5 青金石色块的 RMS 拟合优度

Table 5 Fitting goodness of lazurite of RMS

SSE	R-sqaure	Adjusted R-square	RMSE
0.000 051 79	0.953 6	0.888 6	0.002 276

表 6 青金石色块的 ΔE 拟合优度

Table 6 Fitting goodness of lazurite of ΔE

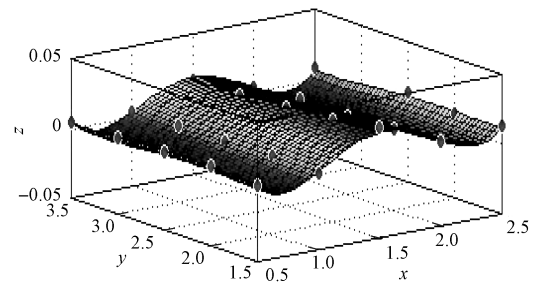
SSE	R-sqaure	Adjusted R-square	RMSE
1.405	0.935 8	0.846 0	0.374 9

由表 5 和表 6 中的数据可以得知, 对于青金石色块测量结果 RMS 的多项式拟合, 其 SSE (和方差)

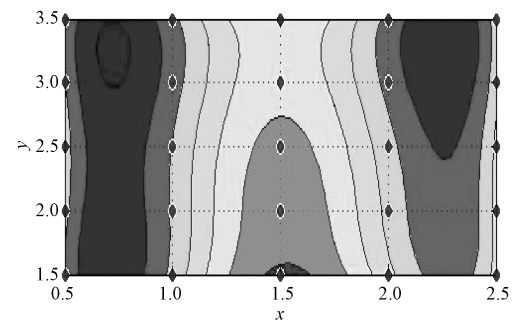
为 0.000 051 79, RMSE (均方根) 为 0.002 276, 均接近于 0, 说明拟合结果与原始数据的契合度较高, 拟合结果较好; 且其 R-square (确定系数) 为 0.953 6, Adjust R-square (校正后确定系数) 为 0.888 6, 均接近于 1, 说明拟合模型选择较为准确, 数据预测较为成功。

对于青金石色块测量结果 ΔE 的多项式拟合, 其 SSE 为 1.405, RMSE 为 0.374 9, 与 RMS 相比均较大, 这是由于 ΔE 的值普遍比 RMS 值大造成的。R-square 和 Adjust R-square 均接近于 1, 说明对于 ΔE 的拟合结果比较理想。

将得到的拟合多项式做成三维曲面图和二维等高线图, 如图 6 和图 7 所示。

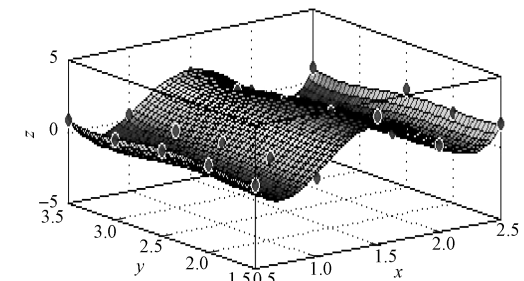


a) 三维曲面图



b) 二维等高线图

图 6 青金石色块的 RMS 多项式拟合结果
Fig. 6 Polynomial fitting results of lazurite RMS



a) 三维曲面图

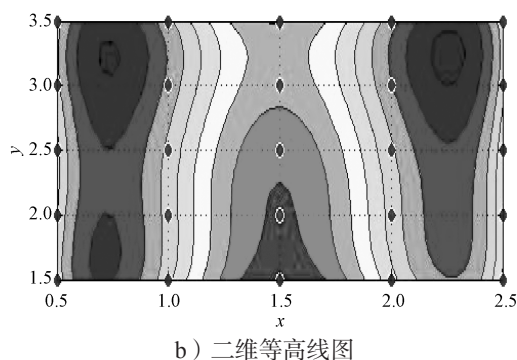


图7 青金石色块的 ΔE 多项式拟合结果

Fig. 7 Polynomial fitting results of lazurite ΔE

由图6和图7所示三维曲面图可知:由 x 轴方向变化趋势可以看出, RMS 和 ΔE 随着测量距离的增加,呈波浪形变化,且在0.5~1.0 m以及2.0~2.5 m区域内达到最小值,在1.5 m附近达到最大值;由 y 轴方向的变化趋势可以看出, RMS 和 ΔE 随着照明距离的增加,呈略微减小的趋势,但变化不明显。

由图6和图7所示二维等高线图可以看出,当测量距离为0.5~1.0 m、照明距离为3.0~3.5 m时, RMS 和 ΔE 的值均达到最小,且 ΔE 小于0.5,这说明该测量条件下,非接触式颜色测量结果与标准测量结果最为接近。

对其他色块进行拟合得到的结果具有相同的结论,故该测量条件为本实验得出的敦煌颜料颜色测量的优化条件。

4 结语

通过对多种敦煌颜料色块的颜色测量及优化拟合,提出了一种针对敦煌壁画的非接触式测量的优化测量条件。

实验以接触式测量结果为标准,采用PR705对敦煌色卡进行非接触式测量,将测量结果与标准值进行比较得出 RMS 和 ΔE ,并以此作为评价测量结果的参数,采用优化拟合的方法得出 RMS 和 ΔE 关于测量距离和照明距离的函数关系。实验结果表明,测量距离在0.5~1.0 m和2.0~2.5 m,照明距离在3.0~3.5 m的条件下,测量结果与标准值的色差最小,故该条件即为本实验提出的优化条件。

研究表明,在给定的测量条件下,敦煌壁画的颜色信息能够被准确地获取,从而为敦煌壁画颜色的测量、复制精度评价以及保护提供了有力支撑,

同时也为其它类型艺术品颜色非接触式测量条件优化提供了参考。

参考文献:

- [1] 孙佳石. 敦煌壁画颜色还原校正方法的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.
SUN Jiashi. Study on Color Correction of Dunhuang Mural Reproduction[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2005.
- [2] 周丰昆, 陈淑芳, 李震, 等. 敦煌壁画计算机存贮与管理中的颜色还原矫正[J]. 敦煌研究, 1996(3): 168-171.
ZHOU Fengkun, CHEN Shufang, LI Zhen, et al. Color Reduction Correction in Computer Storage and Management of Dunhuang Mural[J]. Dunhuang Research, 1996(3): 168-171.
- [3] 雷江胜, 补雅晶. Kubelka-Munk理论及其在混合矿物颜料配色中的应用[J]. 包装学报, 2017, 9(1): 28-33.
LEI Jiangsheng, BU Yajing. Kubelka-Munk Theory and Its Application in Color Matching of Mixed Mineral Pigments[J]. Packaging Journal, 2017, 9(1): 28-33.
- [4] 李焕, 李俊锋, 李婵, 等. 矿物颜料颗粒度对色彩的影响[J]. 包装学报, 2015, 7(4): 29-34.
LI Huan, LI Junfeng, LI Chan, et al. The Effects of Mineral Pigment Particle Size on Color[J]. Packaging Journal, 2015, 7(4): 29-34.
- [5] 刘娟. 颜色测量方法[J]. 印刷质量与标准化, 2008(6): 34-37.
LIU Juan. Color Measurement Methods[J]. Printing Quality & Standardization, 2008(6): 34-37.
- [6] 李宏光, 吴宝宁, 施浣芳, 等. 几种颜色测量方法的比较[J]. 应用光学, 2005(3): 60-63.
LI Hongguang, WU Baoning, SHI Huanfang, et al. The Comparison of Multicolor Measurement Methods[J]. Journal of Applied Optics, 2005(3): 60-63.
- [7] 何成栋, 万晓霞, 黄新国, 等. 照明与观察几何条件对镀铝纸颜色测量的影响[J]. 包装工程, 2016(15): 7-11.
HE Chengdong, WAN Xiaoxia, HUANG Xinguo, et al. The Influence of Illuminant/Geometric Observation Conditions on Color Measurement of Silver-Foiled Paper[J]. Packaging Engineering, 2016(15): 7-11.
- [8] BERNIS R S, ZHAO Y H, TAPLIN L A, et al. The Use of Spectral Imaging as an Analytical Tool for Art

- Conservation[C/OL]//Presented at the American Institute of Conservation Annual Meeting. Los Angeles: American Institute of Conservation Annual, 2009. [2017-02-12]. <https://www.mendeley.com/research-papers/spectral-imaging-analytical-tool-art-conservation/>.
- [9] 李志杰, 庞也驰, 虞朝阳. 浅谈艺术品复制非接触式扫描技术的应用[J]. 中国印刷, 2015(7): 83-84.
LI Zhijie, PANG Yechi, YU Zhaoyang. Introduction to Art Replication Non-Contact Scanning Technology Application[J]. Chinese Printing, 2015(7): 83-84.
- [10] GOZALO-DIAZ D J, LINDSEY D T, JOHNSTON W M, et al. Measurement of Color for Craniofacial Structures Using a 45/0-Degree Optical Configuration[J]. Journal of Prosthetic Dentistry, 2007, 97(1): 45-53.
- [11] 万晓霞, 梁金星, 孙志军, 等. 敦煌壁画色卡及其制作方法: CN105751807A [P]. 2016-07-13.
WAN Xiaoxia, LIANG Jinxing, SUN Zhijun, et al. A Study on How to Make Color Charts for the Digital Protection of Dunhuang Art Paintings: CN105751807A [P]. 2016-07-13.
- [12] 陈江晓. 敦煌石窟壁画色彩研究[D]. 重庆: 西南师范大学, 2005.
CHEN Jiangxiao. A Study on the Color of Dunhuang Cave's Murals[D]. Chongqing: Southwest China Normal University, 2005.
- [13] 徐勇. 敦煌壁画的材料研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
XU Yong. Research Significance on Materials and Technique for Dunhuang Murals[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.

Optimization Study on the Condition of Non-Contact Color Measurement of Dunhuang Mural Pigment

ZHANG Yuhao, WANG Hui, SHI Taichuan

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Aimed at the non-contact color measurement of Dunhuang mural pigment, by taking reference from the spectroscopic data of contact color measurement devices, non-contact device PR705 for spectral radiosity was used to measure the spectroscopic data of Dunhuang murals with the condition of different illumination and measure distances. The calculated RMS and ΔE of the color charts with different illumination and measure distances were used as the parameters for evaluation, the functional relationship between them was obtained by optimal fitting. The effects of measure distance and illumination on accuracy of pigment measurement were analyzed in order to realize the optimization of measuring condition and enhance the measurement accuracy. The results showed that performance of measurement accuracy was optimal when measurement distance was in the range of 0.5~1.0 m and 2.0~2.5 m, with the illumination distance in the range of 3.0~3.5 m, while the RMS and ΔE reached the minimum, with RMS less than 0.006, ΔE less than 0.5.

Keywords: Dunhuang mural pigment; color measurement; measuring condition; optimal fitting