

文物所载模糊信息的清晰化提取技术应用概述

◎白广珍¹ 宋朋遥² 张 兴²

(1. 山东省文物保护修复中心 山东济南 250109; 2. 山东博物馆 山东济南 250010)

摘 要：因为腐蚀老化等原因，文物所载的文字图案等珍贵信息往往变得模糊，难以辨认。本文系统阐述了文物字迹图案等模糊信息清晰化提取技术的相关研究和实践情况，并根据作用机理梳理为光学放大、增强反差、改变光源、改善光路、图像增强、化学反应等。点明了准确深刻理解文物结构工艺、文物材料老化机理和光的运动规律是科学解决清晰化提取文物所载字迹图案等模糊信息的先决因素。

关键词：文物模糊信息；文物信息提取；褪色重现；图像增强

文物是历史的实物见证，是不可再生的珍贵资源。除了本身的造型和工艺外，文物珍贵价值的体现往往是其所载的文字、图案等信息，如青铜器、陶瓷器上的铭文和纹饰。而像简牍的墨书、石碑的刻字，书画的书法与绘画等更是文物珍贵价值的核心所在。这些文字图案相比文物造型等更直接释放真实的历史信息，比如提供了器物制作的年代，交代了某一历史事件等。这些包括政治、军事、经济、文化等古代各方面情况的文物信息，与史书相互佐证，为探究历史提供了重要的研究资料。

然而历经千年风雨，青铜器易锈蚀、石头易风化、简牍易变色、书画易褪色，其上的文字、图案等文物信息往往因为本身所依存结构破坏崩塌或承载材料老化变色等，变得模糊不清，肉眼难以辨别。作为文物保护和考古工作者，如何采取现代无损的技术手段，让模糊文字图案信息重现、清晰化，深度挖掘文物价值，让不断消亡的珍贵信息尽可能全

面地保留下来是值得探讨和研究的问题。

一、清晰化提取技术手段

在以往文物保护工作中，如何清晰化提取或揭示文物所载字迹图案等模糊信息，在实践中也有不少成功的办法。

比如青铜器因锈蚀等原因产生的表面附着物往往模糊或掩盖了铭文纹饰，可以采取物理机械方法或者化学清洗剂去除表面附着物，从而让被遮盖的铭文纹饰重现。也可以进行 X 射线探伤，通过表面附着物与铭文纹饰的透射度不同，从而在 X 光底片上区别开来。

刚出土的简牍往往颜色发黑，上面的墨书与背景同色，往往难以辨别，我们可以通过简牍脱色或者使用红外照相让墨书字迹显现出来。

传拓技艺可以说是最早的文物信息清晰化提取技术实践。^[1]石碑刻划文字图案虽有凸凹之别，但

与本体同色,远观难辨,尤其是随石质风化剥蚀,所刻印记变得更模糊,故人们多使用传拓工艺将其上刻划文字图案提取下来,方便传播研习,也解决了碑刻不易搬动、其上文字传播困难的问题。

在文物保护实践工作中,遇到文物模糊信息问题时,如何选择合适的清晰化提取技术,提取方法的作用机理是什么,什么情况下适用于什么方法,经归纳总结,这些手段的作用机制可以分为光学放大、增强反差、改变光源、改善光路、图像增强、化学反应等。了解其中的作用机制,有助于文物保护工作者科学筛选最适宜的处理方法。

二、清晰化提取技术作用机理

(一) 光学放大

人眼能看到外界的一切,是因为眼睛作为视觉器官,外界光线进入眼睛转化为电信号而被大脑处理从而呈现出来。根据研究,人眼的分辨能力有限,最小分辨视角为 $1'$,再据瑞利判据可以得出在25厘米的视距下的最小分辨距离大约为0.1毫米,人眼很难把小于这个尺寸的物体从视野背景中识别出来。^[2]

在文物保护研究中,为弥补人眼视觉的不足,多使用放大镜、体式显微镜、超景深显微镜^{[3][4]}等辅助进行显微观察,发现肉眼无法看到的内部结构和细节情况。

(二) 增强反差

除了人眼分辨能力的客观因素,被观察对象的对比度、背景亮度同样影响人眼的分辨能力。当被观察对象具有高亮度且与背景存在较大反差,人眼更容易分辨出来。所以可以利用“增强反差”的方式,使文物上那些难以分辨的文字图案信息在视野中更加清晰。

1. 传拓工艺

针对漫漶不清的历史碑文,传拓技艺是有效增强其视觉反差的方法。传拓技艺的基本内容是使用宣纸紧贴于石刻等之上,然后对宣纸进行扑墨,使其凸起处因着墨变黑,凹陷处因不着墨而呈宣纸本色(白色),从而做出黑白对比反差强烈的拓片作

品。拓片有这些特点:一是原比例提取复制,保持了信息的真实可靠性;二是可以方便携带,利于传播研究;三是在光线上增强了色彩反差,碑刻所携带文字图案更能凸显出来,便于阅读。除了碑刻文物,传拓工艺对岩画、石刻造像、陶瓷砖瓦、铜铁铸器、古代货币、甲骨文字等类别文物刻划印记的提取和增强识别具有独特显著的作用。^[5]

2. 数字拓片

传拓工艺往往使用胶水让宣纸与石刻等粘合,使用打刷不断捶打让宣纸与字口等处贴合紧密,使用拓包沾取墨汁或扑或擦让宣纸着墨,而这些工艺特点会对石刻等文物产生不利影响。^[6]比如连续的机械打碰,极易让石材受损,导致结构变松动、有字边沿部位脱落等;纸张透墨而使石材污染,字迹更难辨认;墨和胶水中的蛋白质,为微生物的大量繁殖提供了食物来源。另外频繁传拓导致石材不断发生干湿变化,也会激活内部可溶盐,诱发各类病变^[7],比如会吸附和外引内部的可溶盐,产生微小的盐分输送迁移通道,进而破坏内部结构;内部可溶盐重结晶而产生体积变化,从而使内部产生应力,这些因素会导致石质文物开裂粉化等。认识到传拓工艺的现实危害,现在各级文物管理部门对珍贵文物的传拓工作施行严格的审批管理措施。

随着信息技术的不断发展,现在出现了传统传拓的替代工艺,就是非接触式的“数字拓片”技术。数字拓片的实现形式有:一是先进行摄影,然后对照片进行电脑渲染处理;二是采取三维激光扫描的方式,这些都可以实现与传统传拓工艺相近的效果,满足研习需求。^{[8][9][10][11]}这些实践证明,制作数字拓片的方法可行性高,具备非接触和无损性等优点,且制作的文物拓片具有可测量性,是个不错的文物数字化手段。

(三) 改变光源

在普通日光和一般照相下难以分辨的文物上的模糊图文信息,可以采取改变光源的办法来辨别、提取平常无法看到的信息。这方面也有不少的实践手段,比如X射线照相、红外照相和多光谱、高光谱技术等。

1. X射线照相

X射线照相,常用于工业探伤、文物及考古学实践研究中。^[12]X射线对不同厚度、材质物体穿透能力的不同,在感光底片上会表现出不同黑白对比度的透视图像,可以显示器物内部结构特征和工艺特点。比如揭示被锈蚀物覆盖的青铜器铭文及纹饰^[13],清晰提取书画文物的模糊印章^[14]等。

2. 红外照相

红外照相原理是采取红外线为光源拍摄物体,物体对于红外线吸收程度的不同,会形成黑白对比强烈的反射成像图像。比如黑色碳墨可强烈吸收红外线,而木材、皮革类则对红外线有高透光性^[15],所以红外照相在文物保护和考古研究中,广泛应用于简牍文物墨书信息的拍摄提取。^{[16][17][18]}除了简牍文物,红外照相也适用于壁画细部特征展现上^[19],尤其是壁画底稿墨线和修改痕迹等模糊和隐藏信息的提取^[20]。

3. 多光谱、高光谱技术

高光谱技术起源于20世纪70年代初的多光谱遥感^[21],现已普遍应用于地球遥感、环境监测和文物考古等多种领域。具体实践方面,杨海亮等使用多光谱成像系统和微型光谱仪对正德八年(1513)诰命纺织文物进行了研究。^[22]多光谱的红外光波段能对纺织品文物上的模糊墨书字迹清晰地成像,还可以发现肉眼难以观察到的纺织破损纹理组织。侯妙乐等对彩绘文物进行高光谱成像研究。^[23]同样可以实现突出显示视觉模糊和隐含的图像信息,比如轮廓和底稿信息、以往修补痕迹、擦除或污损笔迹和隐形病害等。

郭新蕾对故宫博物院藏的由于年代侵蚀而受损严重且长满霉渍、字迹难辨的古代木雕印章进行了高光谱成像分析。^[24]由于印章表面含有大量朱砂,为了提取印章的字迹信息,提取朱砂的光谱特征,利用朱砂光谱特征波段进行指数运算均可以有效提取出印章的字迹信息,使有效信息得到了增强。

(四) 改善光路

文物上字迹图案等信息的视觉模糊,除了表面有灰尘遮盖、显色物质减少或褪色等因素外,还有

一个重要因素是发色材料和基底材料发生老化酥粉,导致紧密度下降,产生了大量的空隙,这样射入的光线发生了更多的散射、透射和漫反射,导致反射回来的光减少,从而在人眼看来视觉目标的颜色饱和度和降低和淡化,从而表现为模糊和难以分辨。

对于此类褪色文物字迹图案信息清晰重现技术的研究和实践,以陕西师范大学李玉虎教授为首的研究团队造诣颇深。他们对清代圣旨墨迹褪色模糊机理和重现方法进行研究。^{[25][26]}揭示了圣旨墨迹褪色模糊机理,认为炭黑颗粒的流失是导致字迹褪色的第一因素,原因是长期卷曲存放局部受力不一致导致部分墨迹出现松动脱落,以及墨里的胶料长久发生降解失效,降低炭黑颗粒的粘附,引起炭黑颗粒的流失。另外墨中胶料和圣旨基质的部分降解均可改变圣旨的微观结构,以至于光在字迹内部发生更多散射而不是有效反射,也是导致墨迹褪色模糊的重要因素。

对于这类褪色现象,可以通过调字迹部分的微观结构,改善光路,提高显色物质对入射光的吸收能力,即可显现其本来的字迹。他们实验了纳米二氧化硅、高分子成膜材料分别渗入老化的墨迹层和填补基层裂缝和空洞,改善字迹附近的光路,书写墨迹颜色变深,都达到了良好的模糊字迹较清晰显现的效果。他们同时对风化褪色严重的彩陶文物^[27]、唐代褪色壁画^[28]进行模糊视像重现研究,它们的模糊机制与圣旨文物类似。以离子液体为显现剂,研究彩绘文物显现前后结构和组成变化,从而证明褪色文物彩绘表面颗粒间和空隙间的空气界面增强了彩绘表面光散射强度,是彩绘颜料层清晰度降低的原因。而经过处理后,离子液体填充了彩绘表面颗粒和内部空隙,彩绘表面光散射强度降低,对光吸收能力增加,因此褪色彩绘变得清晰。

而纳米二氧化硅在造纸行业有着广泛的实际应用。^[29]造纸过程中纳米 TiO_2 加入到纸张涂料体系中,可以让纸张更加平整均匀,降低光线的穿透率,改善纸张的光学性能;同时因纳米 TiO_2 粒径小、比表面积大、表面层内原子所占比例大,可与涂料体系中的聚合物胶体充分作用增强粒子与基体的界

面黏合,填充微观空隙结构,改善纸张涂层的印刷适性。

(五) 图像增强

随着计算机技术的不断发展,各类以噪声分离、算法和深度学习为基础的图像增强技术不断应用于文物的模糊图像清晰化方面。

上世纪90年代,上海大学等就利用计算机技术,通过针对文档和照片的处理算法,清除图像中的多种污渍和噪声干扰,让混浊扩散的档案字迹变得清晰可鉴。^[30]张一夫在对碑帖图像及其噪声分类的基础上,利用了多种不同的去噪算法去除图像中的噪声,然后引入改进了基于谱直方图的纹理分割,效果很好。^[31]唐炯婷提出基于文本图像的盲恢复算法,用于模糊字迹图像恢复的研究。^[32]张商珉以侯马盟书碑文图像为研究对象,深入比较研究了ZS、LW及EPTA 3种细化算法,并提出改进的细化算法提取盟书文字的骨架信息,随后采用形态学运算对骨架进行毛刺去除和均匀膨胀以恢复残缺笔段,最后使用颜色迁移的方法使修复后的文字与其背景尽量靠近原貌,并提出基于HSV空间的彩色图像增强算法,获得视觉效果有较大提升的碑文图像。^[33]

张伟等^[34]和覃庆炎等^[35]均以长沙简牍博物馆所收藏的简牍文物为研究对象,对简牍文字的提取清晰化和虚拟修复进行了研究。前者是利用文字轮廓边缘在从文字像素过渡到背景像素时存在比较明显的灰度差值,使用Canny边缘检测方法提取文字轮廓,然后再通过设置灰度阈值和人机交互相结合的方式对文字轮廓进行修复。后者是利用反锐化掩模法对简牍图像进行增强。上述试验都表明对简牍图像文字信息具有良好的增强效果。

古代石刻因为风化、雨水侵蚀、植物生长、人为刻划等因素容易在碑面形成各种长短不一的深痕,有些形态与刻纹类似,极易干扰正常文字的识读。段荧尝试使用深度学习的图像修复方法,对古代石刻文献中不规则的干扰区域进行修复,取得较好结果。^[36]


(六) 化学反应

变色反应是化学反应中并不少见的一种,也可以将其利用,作为褪色物质显色的手段。1989年李玉虎研制的碱性字迹恢复剂可以将因分子醌型结构发生变化的档案字迹褪色能恢复到接近书写时的清晰程度。^[37]近年也有研究蓝黑墨水的褪色问题,褪色原因有显色元素 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,另外墨水中的染料也会发生氧化,发色基团分子结构被改变,这些都会导致墨迹的褪色、失色。^[38]恢复方法有化学法,如单宁、硫化铵等,另外使用红外、紫外照相也可以进行数字图像显现。

简牍文物常出土于潮湿地下环境,多呈饱水状态,出土之后受到光照和空气氧化等影响,木质素中发色基团会发生化学反应生成深色物质^[39]、三价铁离子也与竹材中的酚类衍生物反应生成深色化合物^[40],这些都会导致简牍文物颜色极易迅速加深。简牍颜色发深发黑,使得其上墨迹与背景反差降低,肉眼模糊不清,普通照相也很难识读,极大影响史料价值的提取鉴别,除了上文提到红外照相技术外,使用化学脱色方法^[41],漂淡简牍木材颜色,增强简牍与墨书的颜色反差,也是让模糊信息清晰重现的有效途径。

三、结语

综上所述,文物所载的文字图案等图文信息是珍贵的历史研究资料,但由于腐蚀、老化等原因,很多出现了被掩盖或褪色失色现象,导致在人眼视觉上弥漫不清。让模糊文字图案信息清晰化,给予研究者更清晰的历史信息,是文物保护工作者的工作职责和担当。直接使用物理、化学方法作用于文物本体是传统的处理方法,这些方法往往很难见效,甚至可能对文物本体造成不必要的损伤。随着科学技术的不断发展,涌现出各种各样的现代手段,科学的文物表面模糊字迹、图案的清晰化提取技术可以在不接触或不损害文物本体的情况下,探明文物表面的字迹和图案信息,进一步指导文物本体的保护和修复。

作为文物保护工作者,深入研究文物中的文字图案信息生成过程和褪变机理,了解清晰化提取技术的工作机制,才能有的放矢地找寻到合适的让模糊文字图案信息恢复、重现和清晰化提取的路径和方法。做的这些,一是要掌握文物、物理光学、材料化学等专业知识,熟悉文物制作工艺,熟悉材料老化过程,熟悉光线运行规律。二是注重信息技术的使用,以噪声分离、算法和深度学习为基础的图像增强技术等可以对模糊图像清晰化方面起到很好的作用。三是多借鉴其他行业成熟技术和研究成果,例如上述的X射线照相就是医学中常用的,而公安刑侦中用到的各类模糊信息的显现提取技术更是值得借鉴引入。四是注重多种方法的联用,可以起到加成作用。比如将数字图像增强技术引入到文物X光照片中^[42],经过图像增强后,文物X光图像的边缘细节增强,对比度提高,有用信息能从背景中更加凸显。

注释:

- [1] 冀晓锐:《古老神奇的复制术——传拓》,《文物世界》2015年第1期。
- [2] 赵凤奎:《人眼的最小分辨视角》,《唐山师范学院学报》2008年第5期。
- [3] 孙凤等:《汉阳陵东阙门出土蓝紫色颜料的科学分析》,《光谱学与光谱分析》2018年第5期。
- [4] 杨娟等:《拓片表面“墨霜”的成分及形成原因分析》,《光散射学报》2018年第2期。
- [5] 郭玉海:《响拓、颖拓、全形拓与金石传拓之异同》,《故宫博物院院刊》2014年第1期。
- [6] 景娅娅等:《浅谈传拓对石质文物的损害》,《文物修复研究 2015-2016》,中国文联出版社,2016年,第468~472页。
- [7] 张虎元等:《壁画地仗中盐分的毛细输送机制研究》,《岩土力学》2016年第1期。
- [8] 朱晓丽等:《基于photoshop实现浮雕图像“数字拓片”的技术研究》,《计算机科学》2008年第12期。
- [9] 朱晓丽等:《基于MATLAB实现石刻浮雕

图像“数字拓片”技术的研究》,《计算机科学》2009年第2期。

- [10] 张园林:《基于三维模型的碑刻数字拓片生成技术及应用》,浙江大学硕士学位论文,2018年1月。
- [11] 胡春梅等:《基于激光点云和近景影像的数字拓片生成方法》,《激光杂志》2017年第9期。
- [12] 杨军昌等:《X光照相技术在文物及考古学研究中的应用》,《文物保护与考古科学》2001年第1期。
- [13] 杨忙忙等:《X—光透视技术在文物保护中的应用》,《文博》1999年第6期。
- [14] 祝鸿范等:《软X射线检验在文物鉴定上的应用》,《无损检测》1982年第6期。
- [15] 钱育华:《红外照相技术及应用(I)》,《感光材料》1996年第1期。
- [16] 萧圣中:《用红外线成像系统拍摄楚简的初步收获》,《江汉考古》2005年第1期。
- [17] 管理等:《江西南昌西汉海昏侯刘贺墓出土竹简室内清理保护》,《文物》2020年第6期。
- [18] 冯令儒等:《银雀山汉简的保护与影像采集》,《孙子研究》2018年第3期。
- [19] 严静等:《甘泉金代画像砖墓现场保护与整体搬迁》,《文物保护与考古科学》2019年第3期。
- [20] 张遥等:《应用红外摄影研究木梯寺烟熏壁画》,《光谱学与光谱分析》2020年第11期。
- [21][22] 王先华、王乐意、乔延利:《遥感中的高光谱技术及应用》,《光电子技术与信息》2001年第6期,第7~14页。
- [23] 侯妙乐等:《高光谱成像技术在彩绘文物分析中的研究综述》,《光谱学与光谱分析》2017年第6期。
- [24] 郭新蕾:《基于成像光谱数据的文物隐藏信息提取研究》,中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所)硕士学位论文,2017年6月。
- [25] 赵光涛等:《清代圣旨字迹显现研究》,《档案学研究》2017年第3期。
- [26] 豆静杰等:《清代圣旨褪色墨迹显现加固

研究》，《档案学通讯》2015年第1期。

[27] 翟倩：《风化褪色史前彩陶显现加固研究》，陕西师范大学硕士学位论文，2018年5月。

[28] 郑丽珍：《光散射与文物彩绘的褪色与显现研究》，陕西师范大学博士学位论文，2018年5月。

[29] 李滨、李友明、陆瑞江：《改性纳米 TiO_2 对纸张涂料及涂布纸性能的影响》，《化工学报》2010年第1期。

[30] 姜龙飞：《让湮远的历史清晰起来——“档案材料模糊褪变字迹、图像恢复处理系统”现场演示目击记》，《上海档案》1998年第6期。

[31] 张一夫：《碑帖图像文字的分割与提取》，哈尔滨工业大学硕士学位论文，2013年12月。

[32] 唐姘婷：《模糊字迹图像恢复的研究》，华北电力大学硕士学位论文，2012年3月。

[33] 张商珉：《侯马盟书碑文及色彩虚拟修复技术研究》，中北大学硕士学位论文，2017年4月。

[34] 张伟等：《Canny 边缘算子在简牍文字修复中的应用》，《微计算机信息》2008年第9期。

[35] 覃庆炎等：《反锐化掩模法在简牍文字增

强中的应用》，《微计算机信息》2008年第3期。

[36] 段荧：《古代石刻文献不规则干扰修复算法研究》，昆明理工大学硕士学位论文，2021年3月，第58～60页。

[37] 刘炳琦：《李玉虎解决档案褪变字迹恢复的难题获恢复字迹的保护等多项成果，填补了国内空白》，《四川档案》1987年第5期。

[38] 孙立业等：《蓝黑墨水字迹褪色与显现研究》，《兰台世界》2014年第12期。

[39] 方北松等：《饱水竹简变色机理的初步研究》，《中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集》，科学出版社，2007年，第373页。

[40] 张金萍等：《饱水竹简变色原因的研究》，《文物保护与考古科学》2003年第4期。

[41] 毛志平等：《长沙走马楼西汉饱水简牍的保护处理》，《江汉考古》2019年S1期。

[42] 相建凯等：《图像增强在文物X光图像中的应用》，《激光与光电子学进展》2019年第6期。

（责任编辑：林晓君）