

近床面风沙输移风洞实验的光学测量研究进展

周晓斯, 张洋, 王元, 李敏

西安交通大学流体机械及工程系, 西安 710049

摘要 近床面风沙输移是一个复杂的多尺度非线性随机过程, 一直以来都是风沙物理学领域持续关注的热点问题, 对此过程的准确测量则变得尤为关键。本文回顾了近年来针对近床面风沙输移风洞实验的光学测量技术, 主要包括激光测速、高速摄影及一些新兴手段, 并简要评价了其特点和适用性。最后, 对目前存在的问题及未来的发展趋势进行了探讨。

关键词 风沙输移; 风洞实验; 光学测量; 激光测速; 高速摄影

近地表面风沙输移是由风沙蠕移运动、跃移运动和悬移运动组成的综合性多尺度运动形式^[1-5]。其中, 近床面沙粒的跃移运动在风沙运动中扮演主导地位, 也常常是其他风沙运动形式的主要启动机制^[6]。从流体力学角度来看, 近床面沙粒跃移运动过程属于典型的边界层内气固两相流动过程。沙粒在风介质作用下脱离沙床面进入气流, 又在重力作用下回到沙床并且碰撞其他沙粒进入气流, 形成稳定的跃移风沙流运动。跃移风沙流运动形式具有复杂的流动机理, 流动中不仅气流与沙粒间存在强烈的相互作用, 沙粒间、沙粒与床面间也存在强烈的碰撞作用。跃移风沙流中沙粒运动速度和沙粒浓度在空间的分布极不均匀, 沙粒碰撞过程具有很强的随机性, 这些都为风沙运动的研究工作带来了极大挑战。

针对近床面风沙运动的测量研究工作, 野外观测作为最早的研究手段, 能够最直接获得真实情况下的观测数据资料^[1,3-4,7]。然而, 由于野外观测所受气候、环境等因素的影响较大, 观测结果往往带有地域性, 不利于获得普适规律性。为了克服野外观测存在的诸多不足, 环境风洞实验被引入到风沙运动的研究中^[7], 并成为了风沙研究中必不可少的重要实验手段。根据相似理论专门为风沙两相流动实验研究而设计的风洞系统, 通过人工产生能够模拟野外近地表面层气体流动的风场分布, 继而能够以“主动干预”形式任意复现风介质作用下的沙粒自然运动过程。通过在风洞系统中引入不同形式的流场测量装置, 即可实现近床面风沙微、宏观运动尺度的实验测量研究^[4,8]。

随着光学、图像处理和计算机技术的迅猛发展, 光学测量在整场、瞬态和非接触方面的优势使其逐渐在风沙运动风

洞实验研究中占据主导地位。早期由于技术条件水平的限制, 应用于风沙运动实验研究的光学测量手段主要包括普通胶片摄影术^[7]、频闪胶片摄影术^[9-10]和高速胶片摄影术^[11-13]。随着测量仪器技术的不断进步和实验方法的不断改进, 以激光测速和高速数字摄影及其图像处理为代表的数字光学测量手段被引入到风沙风洞实验研究中, 并很快成为风沙光学测量研究的主流。以此研究手段所获得的风沙研究成果十分丰富, 有力地提高了风沙运动的总体研究水平并促进了风沙物理学的进一步发展。本文对数字光学测量在风沙输移风洞实验研究中不同方面的研究进展进行阐述, 对最新出现的风沙物理学领域风洞实验研究的新系统和新手段进行简要介绍, 并对存在的问题进行简要的分析, 最后对风沙输移风洞实验的未来发展趋势进行展望。

1 基于激光测速的非接触式光学测量

激光测速非接触式光学测量是激光技术和计算机技术相互结合的产物。激光测速光学测量手段一经引入到风沙输移的风洞实验研究中, 便因其在整场、瞬态和非接触等方面的显著优势而成为目前风沙风洞测量研究的主流。21世纪以来, 多种高起点的适合于风沙两相流场测量的激光测速实验设备被应用到风沙运动研究当中。以中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室董治宝为代表的研究团队, 在国内率先引进相位多普勒测速仪(phase doppler anemometer, PDA)以及粒子成像测速仪(particle image velocimetry, PIV), 用于开展基于激光测速的非接触式光学测量风沙运动实验研究, 这也是当时最先在国际上将其应用于风沙物理学研究^[14-15]。

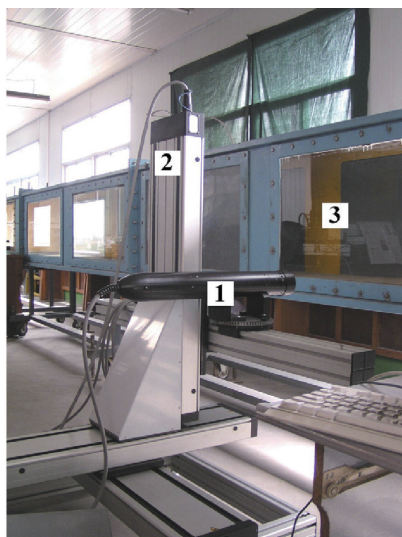
收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11402190, 11272252)

作者简介: 周晓斯, 博士研究生, 研究方向为环境动力学及风沙动力学, 电子邮箱: zhouxs@stu.xjtu.edu.cn; 王元(通信作者), 教授, 研究方向为环境模拟与环境动力学、复杂流动的微观分析与实验, 电子邮箱: wangyuan@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 周晓斯, 张洋, 王元, 等. 近床面风沙输移风洞实验的光学测量研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 43-50. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.004

PDA(美国习惯称为 phase doppler particle analyzer, PDPA)是一种以多普勒效应为基本原理的三维单点测量的激光测速系统,可同时测量颗粒速度和球形粒子的粒径。借助于PDA, Dong等^[16-17]陆续开展了不同沙床面风沙流速度分布测量研究,结合垂直集沙仪,获得了输沙率分布并计算了沙相浓度^[18]。Kang等^[19]针对Dong等的实验测量结果,采用PDPA(图1),对近床面跃移风沙流开展了更为详细的测量研究,获得了沙相速度、沙相速度脉动和沙相湍动等的统计分布信息;并通过沙粒跃移运动测量,获得了沙粒起跃速度参数的概率分布^[20]。Rasmussen和Sørensen^[21]采用与PDA原理相同的激光多普勒测速仪(laser-doppler anemometry, LDA)对近床面风沙流的沙粒速度和沙相流量密度进行了测量。LDA获得的流量密度沿高度分布与大部分采用垂直集沙仪所获得的数据相类似。当采用沙相流量密度计算总输沙率时,除了起动风速阈值附近存在较大偏差外,其余情况均与直接测量的总输沙率结果相吻合。基于PDA的风沙运动测量可获得单沙粒空间运动速度和速度脉动的统计特性数据^[16-17,19],但由于仅能单点测量以及无法跟踪观察单一沙粒运动过程的缘故,PDA在跃移沙粒微观碰撞动力学连续过程以及跃移风沙流宏观整场运动规律的揭示上存在短板。



1—发射探头;2—三轴旋转系统;3—风洞玻璃窗

图1 风洞实验PDPA测量系统^[19]

Fig. 1 Experimental layout of PDPA

与PDA不同,PIV是一种瞬态、整场的激光测速方法,可获得流动断面的整场流动信息(图2)。经过不断努力,PIV技术目前已经实现了单相、两相及至多相流动的测量。PIV在单相流动测量中的优良表现,使得它不仅能够获得复杂风场的平均速度分布^[22],同时还可以获得风场湍流强度、湍动能、涡量及雷诺应力参数分布信息^[23]。在沙粒运动方面,相比于PDA,PIV可同时获得大量沙粒样本平均运动参量,这对于贴近床面的包含密集沙粒运动的风沙流测量具有独特的优势。Dong等^[24]借助粒子成像测速仪-米氏散射扩散(PIV-

MSD)技术,对近床面风沙流浓度进行了测量,获得了较为准确的沙相浓度高度分布特性。随后,Dong等^[25]通过PIV获得的沙相平均速度场和浓度场,计算得到了输沙率的高度分布特性。结果表明,PIV所获得的输沙率分布能够呈现出沿高度往上先增加后减小的趋势,这与以往采用传统集沙仪所获得的输沙率高度分布特性不完全相同^[26]。研究者指出,在贴近床面的高浓度沙粒区域,侵入式集沙仪所获得的输沙率往往被忽略,而采用非接触式PIV可以通过测速和浓度计算得到,体现出了PIV在高浓度颗粒运动测量上的优势。Yang等^[27]采用PIV对近床面风沙流进行了详细测量研究并指出,在沙粒速度空间分布的测量上,PIV要优于传统的高速摄影法和PDA技术。Creysseels等^[28]借助PIV和粒子跟踪测速(particle tracking velocimetry, PTV)技术,对湍流边界层内的沙粒跃移运动进行了实验测量,获得了沙相浓度和沙相速度的高度分布特性。研究表明,沙相浓度随高度的增加呈现指数衰减变化;而沙相速度沿高度呈线性变化,且基本与风速无关。研究结果与击溅函数特性密切相关。针对不同测量手段在风沙流研究中的优缺点,Dong等^[29]通过对比不同测量手段下所得到的跃移沙粒的速度分布,客观指出了不同测量手段所具有的优缺点,对测量手段的应用上需要针对具体问题进行有效性的验证。事实上,就风沙运动测量领域而言,普通PIV显示出了系统测量频率偏低的缺陷^[30]。PIV虽然可以获取风沙流两相瞬时整场信息,但无法有效跟踪沙粒运动轨迹,在单颗沙粒微观动力学的测量能力上并不突出。

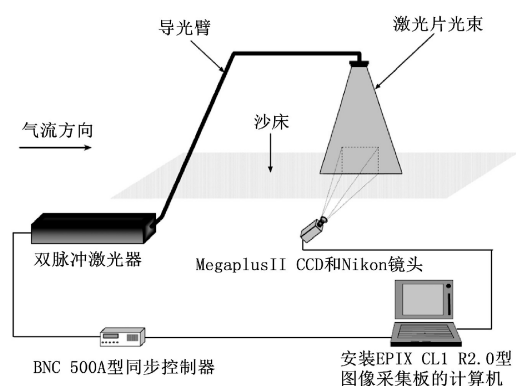


图2 风洞实验PIV测量系统组成简图^[29]

Fig. 2 Diagram of the components of typical particle image velocimetry setup

激光测速非接触式光学测量手段在风沙动力学不同领域(微观或宏观)的测量研究中虽然或多或少的存在自身固有缺陷,然而经过十几年的不断发展,很多局限性已经随着测量仪器技术的进步以及测量方法的改进而不断得到克服^[31]。不可否认,激光测速是现今风沙输移风洞实验测量手段的主流,也将是未来的发展趋势。进入21世纪第2个10年,激光测速在风沙风洞实验中得到深入和拓展,涌现了很多具备特色的研究内容。例如,Han等^[32]采用PIV对风洞中

湿沙粒在沙床面附近的跃移过程进行了光学测量(图3),并采用标准垂直集沙仪测量了跃移输沙率分布。研究侧重于分析总输沙率与湿度之间的定量关系。当沙床面湿度较高时,湿度是跃移的主导因素;而当湿度低于某一临界值时,风速将重新主导沙粒跃移。Bo等^[33-34]在风洞系统中借助反向镜引入PIV横向激光片光,用以避免风洞顶部垂直引入片光所造成的沙床面反光对测量精度的影响。结合改进的PTV,对跃移沙粒的起跳和入射速度进行了测量。首先分析了观测高度对沙粒起跳和入射速度概率分布的影响^[33],同时分析了沙粒粒径和风速对沙粒起跳速度概率分布的影响^[34]。Zhang等^[35]在风洞内实现了沙尘沉积过程的测量研究(图4)。采用PDA测量了模拟地表黏性平滑林木和水表面情况下的沙尘沉积速度和粒径分布。研究证实了PDA对于沙尘运动测量的有效性,测量结果对于发展和验证沙尘沉积方案具有参考意义。

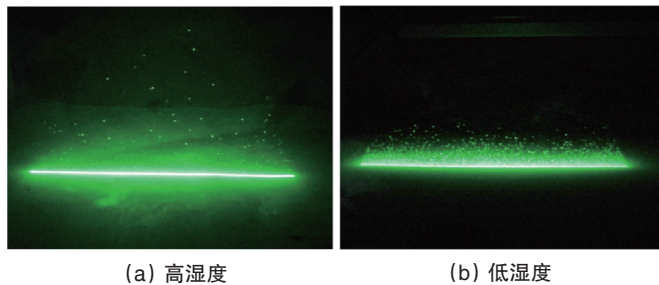


图3 不同湿度条件下沙粒跃移PIV测量图像对比^[32]

Fig. 3 Photograph of PIV indifferent moisture contents

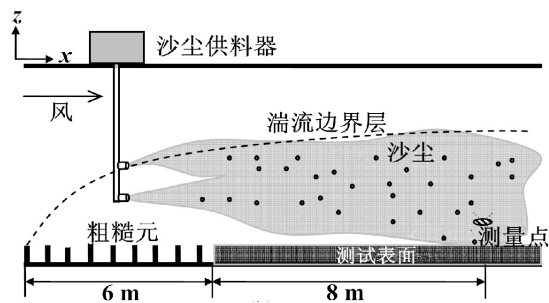


图4 沙尘沉积风洞测量系统^[35]

Fig. 4 Configuration of the wind-tunnel experiment for dust deposition

2 基于高速摄影和图像处理的非接触式光学测量

基于高速摄影和图像处理的非接触式光学测量技术是目前风沙两相流测量中另外一种有效的实验研究手段^[30-31]。该技术的主要特点是将高速摄影与图像处理有效结合,其中高速摄影可通过高速数字相机(采用非激光或激光光源)或引入PIV(采用激光光源)并结合高速数字相机形成高速PIV系统来获取测量图像序列,具有较大的灵活性。而后期图像

处理可通过开发有效的粒子跟踪测速算法提取沙粒相图像信息,从而摒弃掉不再适用的互相关PIV图像处理算法,继而能够对风沙流动的物理本质进行有效揭示。笔者所在课题组近年来在这一风沙测量技术的研究中获得了丰富的成果。在跃移风沙流的光学测量方面,Zhang等^[36]通过高速数字相机获取近床面沙粒跃移图像,并采用PTV提取了跃移沙粒的瞬时速度场。随后,Wang等^[37]借助高速数字相机实现频闪摄影术,并开发图像处理方法,针对跃移沙粒与沙床面发生碰撞的微观动力学过程进行了深入测量研究(图5),加深了对沙粒跃移过程的了解。然而,该研究方法仅适用于沙粒浓度较低的情况。Liu等^[38]采用高速数字相机记录沙粒跃移运动,并采用热线风速仪同步测量风场湍流脉动。通过引入小波分析方法,对沙相浓度响应风场湍流脉动速度过程进行了深入分析,加深了对跃移沙粒与流体相互作用机理的了解。Zhang等^[39]建立一种快速PTV算法,能够自动处理较大数量的通过高速数字相机获取的沙粒跃移运动轨迹图像,获取跃移沙粒速度和加速度场信息。为获得更为准确的风沙两相流场信息,Zhang等^[40]基于二维粒子成像测速仪(2-D PIV)并结合PTV算法,实现了跃移风沙两相流的PIV-PTV同步测量。随后,基于PIV的风沙运动测量方法被深入发展和改进,实现了基于立体粒子成像测速仪(SPIV)的跃移风沙流在流向、垂向以及关注度偏低的横向方向上的运动测量^[41]。而基于荧光示踪粒子法的PIV测量技术也已经被引入到跃移风沙流的三维度测量当中^[42]。

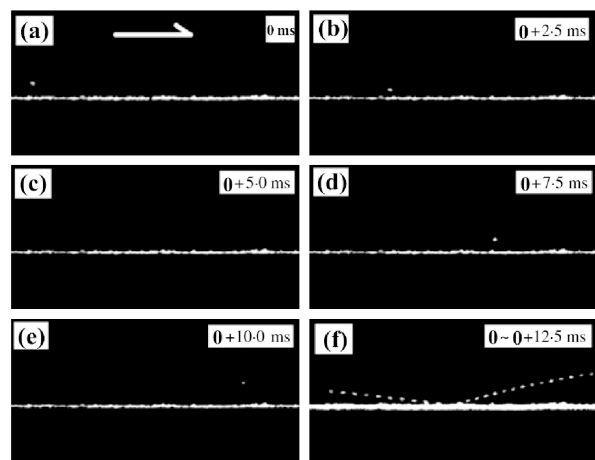


图5 高速相机拍摄沙粒跃移图像序列(a)~(e)及合成轨迹(f)^[37]

Fig. 5 A sequence of time images of sand saltation (a) to (e) and composite trajectory image (f)

作为与沙粒跃移运动有直接关联的沙粒蠕移运动是风沙输移中的一个关键环节。对沙粒蠕移运动的研究将有助于对沙粒跃移本质规律的深入了解。基于高速摄影和图像处理的非接触式光学测量技术同样被引入到沙床面沙粒蠕移运动的测量研究。Wang等^[43]首次采用高速数字相机对沙

床面沙粒蠕移运动进行了成像测量,建立了体照明下平坦沙床沙粒蠕移测量方法。基于新的PTV算法,获得了蠕移沙粒的速度和轨迹,并计算了蠕移输沙率。随后,Zhang等^[44-45]实现了基于高速摄影和PTV图像处理的完备沙粒蠕移测量过程(图6)。通过改进PTV算法提取沙粒蠕移轨迹,对比了沙粒蠕移的碰撞起动速度和流体起动速度。深入分析了沙粒蠕移的细观特性,指出了风速增加将增强沙粒蠕移的间歇性,使其转变为跃移运动。在上述对近床面风沙跃移和平坦沙床沙粒蠕移测量研究的基础上,Zhang等^[46]成功实现了非自然手段的风洞沙床谐振以及拟自然手段的上游来流补沙实验条件下的缩尺新月沙丘演化行为的光学测量,初步揭示了沙粒微观运动与沙丘宏观演化行为之间的相关性机理。

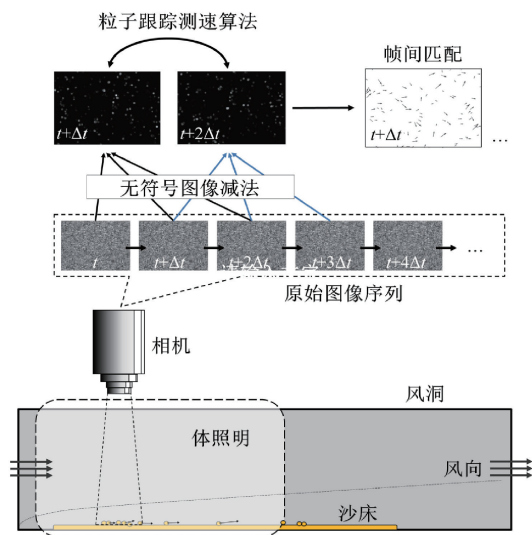


图6 沙粒蠕移风洞实验装置原理及PTV图像后处理过程
Fig. 6 Schematic of experiment setup and PTV post-processing procedure

基于高速摄影和图像处理的非接触式光学测量技术能够成功应用于风沙输移运动的研究,除了必须具备能够快速准确记录沙床面沙粒的跃、蠕移运动图像信息的技术之外,基于PTV算法的图像处理技术的适用性和准确性也是其中至关重要的关键一环,甚至能够最终决定研究的成败。为此,PTV算法的发展和改进,成为了风沙两相流风洞实验中的另外一个具有独特亮点的研究方向。以Zhang等^[47-51]为代表的研究者在这一领域做了大量的研究工作,包括对RM-PTV算法的改进^[47],对DT-PTV算法的改进^[48-49],并建立了VD-PTV算法^[50-51]。以上这些都有效地提高了PTV算法在流场可视化以及风沙两相流图像处理中的应用水平。

针对基于高速摄影和图像处理的非接触式光学测量风沙输移风洞实验,研究者在不断提升实验仪器测量水平和实验精度的同时,也在不断积极拓展研究点和改进实验方法。Beladjine等^[52]为深入研究粒-床碰撞微动力学过程,精妙设

计了一个气枪发射颗粒并碰撞击溅床面颗粒的实验装置(图7)。通过调节入射颗粒速度、入射角度等参数,模拟了粒-床碰撞的三维度跃移过程;通过高速摄影获得了颗粒运动图像。这一研究与Wang等^[57]和Ammi等^[53]的风洞测量研究有相似之处。事实上,该研究的实验平台并不是风洞,不能算是沙粒跃移运动的风洞测量实验。然而,该研究却提供了一个很有趣的切入点,即可以通过改进平台来开展存在风沙运动的行星表面沙粒跃移运动的模拟研究^[54]。Wang等^[55]采用激光作为片光光源,借助高速相机,对研究关注点偏低的跃移沙粒的横向运动进行了详细测量。研究指出,决定沙粒横向运动的因素是三维湍流风场而非沙粒与床面的横向碰撞行为。Ho等^[56]借助风洞系统,侧重于沙粒跃移高度和长度的测量研究。采用粒子跟踪测速方法,实际上是采用激光作片光光源,通过高速相机获取运动图像,并通过后处理获得沙粒的起跃速度^[57],继而计算出跃移高度。而为了获得沙粒跃移长度的分布,他们引用了一个简单的水平沙陷阱(集沙仪)来对跃移沙粒进行收集并分析(图8)。Zhang等^[58]在风洞中通过引入沿流向方向的氙光光源作为片光,采用高速相机并结合PTV方法^[59],获得了带有阻沙栅栏沙床表面沙粒跃移的运动轨迹。研究表明,在栅栏形成的尾迹区域,沙粒冲击速度的概率密度分布与无栅栏的情况比较一致,符合对数正态分布。冲击速度的水平分量减小程度很高,碰撞过程中跃移沙粒能量损失很大,表明阻沙栅栏有效地减缓了沙粒的进一步跃移进程。

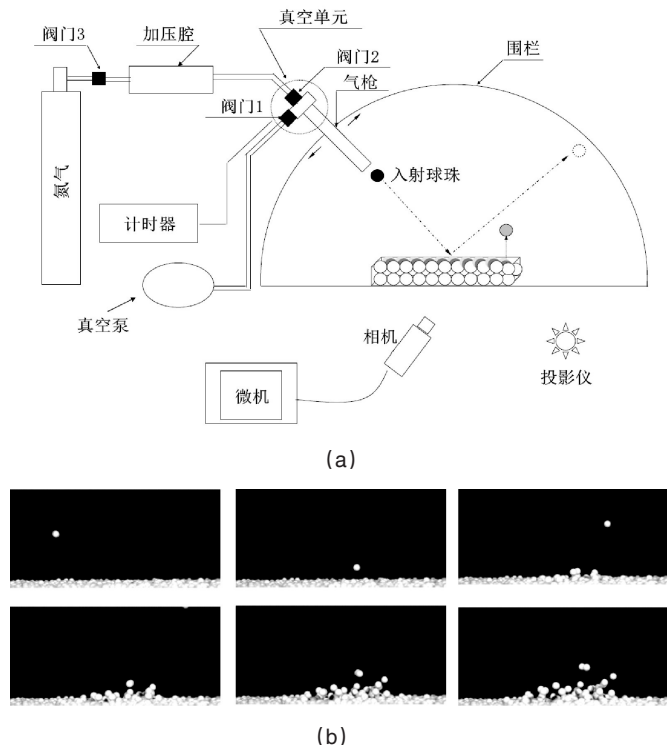


图7 沙粒击溅实验装置示意(a)及粒床碰撞过程图像序列(b)^[52]
Fig. 7 Experimental setup for model sand particle splash experiment (a) and successive snapshots of the collision (b)

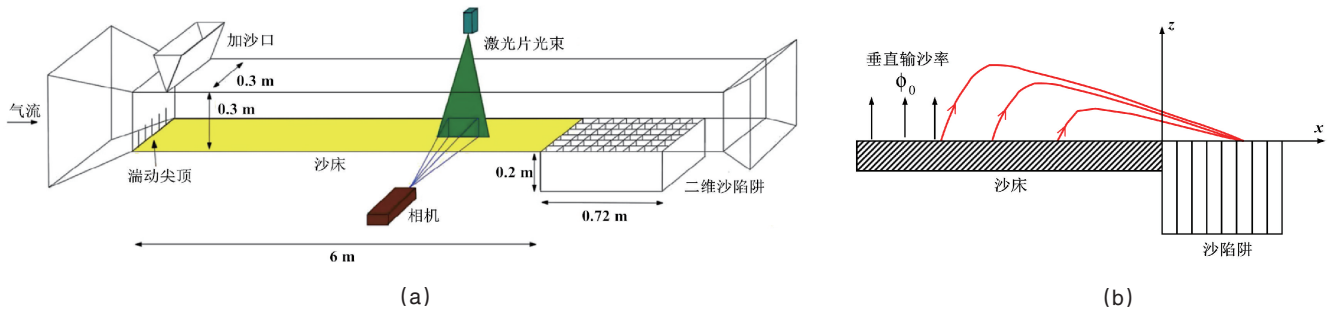


图8 沙粒跃移风洞实验装置(a)及集沙过程示意图(b)^[56]

Fig. 8 Sketch of wind tunnel (a) and the illustration of the collection process in the sand trap (b)

3 风沙输移风洞实验测量新兴手段

随着人类航天技术的进步以及深空探测的发展,人类已不仅仅只关注地球表面的风沙运动过程,而逐渐延伸到了太阳系内的其他存在风沙运动的星球之上,并由此诞生了行星风沙物理学^[60],组成了行星科学研究的一部分。由于地外行星表面大气环境的物理参数(包括密度、黏度、温度、湿度及重力等)均与地球的情况存在很大区别,不可能在地球表面采用常规风沙环境风洞模拟地外星球开展实验测量研究。过往针对地外行星表面风沙运动的研究大多通过数学建模进行预测,而预测的准确性无法得到有效验证。一方面,人类现有的技术能力还无法实现送人到其他星球表面开展风沙运动的实地实测;另一方面,风沙动力学新模型的建立和应用必然需要测量数据的对比验证。随着风洞实验技术的进步,近年来,众多致力于开展行星风沙物理学研究的研究者突破传统,积极自行研发能够模拟行星表面大气环境的风洞实验系统,成为风沙物理学风洞实验的一抹新亮点,获得广泛关注^[8, 61-62]。过往较为著名的行星环境风洞系统是NASA用于研究火星风沙运动的MARSWIT(Mars surface wind tunnel)系统^[60],该风洞系统可用于不同压强环境下的风沙运动模拟。然而,由于该风洞系统的风速依赖于压强变化,且不

能控制温度,因此不适用于沙尘挟带/输移的研究。最近,丹麦奥尔胡斯大学独立研制了一套环境风洞模拟器(Aarhus Wind Tunnel Simulator II, AWTSII)^[61],该风洞系统外部为一个热真空舱体,内部嵌有闭式回路风洞(图9)。AWTSII具备控制风速、压强、温度、湿度和大气组分等模拟参数的能力,可用于开展行星表面大气层内风沙运动过程的风洞模拟和测量研究,可以说是体现了目前行星风沙物理学风洞实验的最高水平^[54]。

非接触式光学测量是现今风沙输移风洞实验的主流测量手段。对于行星风沙物理学风洞系统而言,非接触式光学测量同样是首选的测量手段。借助高端的环境风洞系统并结合先进的光学测量手段,研究者有望在地外行星表面风沙运动风洞模拟研究中获得新突破。Rasmussen等^[54]采用LDA,通过AWTSII风洞系统舷窗射入激光光束,测量了不同压强不同气体组分环境下雾化硅球形颗粒的沉降速度,获得了速度分布特性,初步显现了AWTSII风洞系统结合激光测速光学测量在地外行星风沙运动模拟研究中的潜力(图10)。这表明,借助该风洞系统开展不同环境下的沙尘沉降测量是可行的。研究者目前正在准备尝试借助AWTSII风洞系统开展火星大气低密度环境下沙粒跃移过程的测量研究^[54]。



图9 AWTSII风洞系统,可见内部测试段和外部的冷却系统^[61]

Fig. 9 Wind tunnel, viewing the test section in the background, as well as the external part of the cooling system

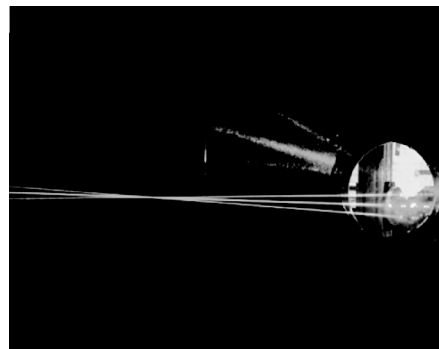


图10 在AWTSII风洞系统中采用LDA测试雾化硅球形颗粒的沉降速度^[54]

Fig. 10 LDA system testing the settling velocity of aerosolized silica spheres inside the AWTSII environmental wind tunnel

4 风沙输移风洞实验亟待解决的问题

作为现今风沙输移风洞实验主流手段的现代数字光学测量技术,在对风沙运动尤其是近床面沙粒跃、蠕移运动的准确测量方面,显示出了强大的优越性,有力地推动了风沙物理学研究进展。而面对风沙运动的研究发展现状和不断涌现的相关全新科学问题,目前风沙输移的风洞实验研究不可避免地仍然存在诸多需要进一步解决的问题。

首先,在运动沙粒速度场测量方面,研究者已经从过往的主要集中关注风沙动力学的二维问题逐渐过渡到热衷于关注风沙动力学的三维全流场速度特性的研究。目前针对风沙运动三维速度场的测量研究,不论是激光测速还是高速摄影与图像处理^[41-59],在研究深度和研究成果上,均大大逊色于风沙运动二维速度场的测量研究。风沙三维速度场的光学测量依赖于具备较高时间解析度和空间分辨率的三维PIV成像系统技术的发展,而目前三维PIV应用于风沙运动测量仍处于初期阶段。实际上,跃移沙粒的横向速度同样是一个相当重要的参数,尤其是因跃移运动而引起的沙粒蹦移,其横向速度往往表现显著^[63]。沙粒横向运动的一个重要贡献是影响宏观沙构型例如沙丘的演化进程。因此,如何借助光学测量手段开展从微观沙粒流到宏观沙构型运动行为的跨尺度和多维度同步测量^[46,64],必然是目前风沙测量研究中的一个重要课题。

其次,在输沙率测量方面,目前大多数风沙流风洞实验输沙率测量仍主要集中在使用集沙仪。集沙仪在使用过程中体现出了简单实用的特点,然而集沙仪效率一直是影响输沙率测量精度的一大障碍。使用垂直集沙仪直接侵入风沙场中,必然会对流场形成扰动和阻滞效应;而使用水平集沙仪则存在边缘影响和沙粒反弹问题,这些都将引起集沙效率的不确定性,继而严重影响测量精度。尽管集沙仪一直得到改进和发展,也适时出现了一些新的技术手段,例如将集沙仪与测力传感器相结合以及采用颗粒碰撞传感器等,然而这些测量手段都因自身的局限性而得不到推广应用^[61]。最近在风洞实验中尝试使用的激光颗粒计数传感器在输沙率的高频高分辨率测量方面有了较大改善^[65],然而该测量方法仍不可避免地侵入流场造成干扰,并且在高浓度风沙流尤其是贴近床面沙量测定的适用性和准确性方面,仍存在质疑。风沙运动研究其中的一个重要内容就是准确揭示输沙率与沙粒速度、输沙率与沙粒浓度之间的本质关系。然而,相比速度测量技术水平的发展,输沙率测量并未得到足够的重视,其发展水平存在滞后。实际上,自然界近地表面层真实阵风风场通常呈现出非稳定性,复杂湍流脉动风场必然引起输沙率的不断波动特性^[66-67]。阵风条件下,集沙仪所获得的短时间内输沙率的时均值^[7]通常与真实输沙率存在偏差。在这样的现状下,采用非接触式光学测量手段来获取准确的输沙率分布必将成为现有技术条件下的最佳选择^[68]。目前,PIV测量及高速摄影已经能够获得低浓度条件下沙粒的浓度场分布^[24,69-71],通过沙粒浓度场在不同时刻的图像序列,即可推

算出风沙流输沙率的分布^[31]。尽管如此,如何能够提高测量水平以胜任非定常不连续性变化浓度场下输沙率的准确测量仍然是目前亟待解决的问题。同时,由于输沙率与阵风频率具有相关性^[72],如何实现阵风风场中输沙率的精确高频测量也是目前风沙测量研究中的一个重要课题。

最后,在行星风沙物理学环境风洞模拟研究方面,尽管研究者依据地外行星科学探测数据,在特定环境风洞模拟器中已经成功复现出了模拟的行星大气环境(包括密度、粘度、气压、温度、湿度等)。然而由于在地球上很难在环境风洞中模拟真实的地外行星重力条件以及由此而引起的近行星表面边界层内的气体流动情况,导致针对贴近行星表面风沙运动的实验测量面临很大的挑战性^[73]。以地球重力环境下所获得的测量数据的可靠性必然存在质疑,尤其是受重力影响较大的沙粒跃移碰撞的微观动力学过程,往往与模型预测结果发生很大偏离。实际上,目前的行星环境风洞模拟器结合光学测量技术主要还是集中在大气层大尺度范围内气固液多相流动的测量研究,例如沙尘输移或大气气溶胶运动分布等^[54]。总之,如何更加准确地开展贴近地外行星表面风沙运动的风洞模拟,依旧是目前风沙物理学和行星科学需要共同努力的目标。

5 结论与展望

风沙物理学领域中,环境风洞及其配套的测量设备无疑是人类用于主动模拟风沙运动行为并揭示风沙运动普适规律的强大利器。以激光测速和高速摄影及其图像处理为代表的数字光学测量作为现今风沙输移风洞实验的主流测量手段,已经实现了从风沙场单点测量到风沙场高频整场瞬时测量的技术跨越,极大地提升了对从微观风沙动力学到宏观风沙流结构本质规律的认识。随着激光全息高速三维PIV、高速摄影技术及PTV技术的不断提升,数字光学测量将以更为优异的时空解析能力实现风沙输移这一复杂随机非线性多场系统的跨尺度和多维度同步测量。同时,随着新兴环境风洞模拟设备技术的涌现,有望结合光学测量技术深入开展贴近地外行星表面风沙运动的风洞模拟,进一步揭示机制,认识规律,提升风沙物理学研究水平。

参考文献(References)

- [1] Pye K, Tsoar H. Aeolian sand and sand dunes[M]. London: Unwin Hyman, 1990.
- [2] Anderson R S, Sørensen M, Willetts B B. A review of recent progress in our understanding of aeolian sediment transport[M]//Aeolian Grain Transport I. Vienna: Springer, 1991: 1-19.
- [3] Nickling W G, McKenna Neuman C. Aeolian sediment transport[M]//Geomorphology of Desert Environments. New York: Springer, 2009: 517-555.
- [4] Zheng X J. Mechanics of wind-blown sand movements[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [5] Duran O, Claudin P, Andreotti B. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws[J]. Aeolian Research, 2011, 3(3): 243-270.

- [6] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(10): 106901.
- [7] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941.
- [8] Merrison J P. Environmental wind tunnels[M]//Wind Tunnels. Rijeka: Intech, 2011: 1-22.
- [9] Nalpanis P, Hunt J C R, Barrett C F. Saltating particles over flat beds [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 251: 661-685.
- [10] Zou X Y, Cheng H, Zhang C L, et al. Effects of the Magnus and Saffman forces on the saltation trajectories of sand grain[J]. *Geomorphology*, 2007, 90(1-2): 11-22.
- [11] Willetts B B, Rice M A. Collisions in aeolian saltation[J]. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1): 255-265.
- [12] McEwan I K, Willetts B B, Rice M A. The grain/bed collision in sand transport by wind[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(6): 971-981.
- [13] Rice M, McEwan I K, Mullins C E. A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 383-392.
- [14] 董治宝. 中国风沙物理研究 50 年(I)[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 293-305.
Dong Zhibao. 50 years of physical research on Aeolian sand in China (I) [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 293-305.
- [15] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50 年(II)[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 795-815.
Dong Zhibao, Zheng Xiaojing. 50 years of physical research on Aeolian sand in China(II)[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 795-815.
- [16] Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. Velocity profile of a sand cloud blowing over a gravel surface[J]. *Geomorphology*, 2002, 45(3-4): 277-289.
- [17] Dong Z B, Liu X P, Wang X M, et al. Experimental investigation of the velocity of a sand cloud blowing over a sandy surface[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(3): 343-358.
- [18] Liu X P, Dong Z B. Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud[J]. *Geomorphology*, 2004, 60(3-4): 371-381.
- [19] Kang L Q, Guo L J, Gu Z M, et al. Wind tunnel experimental investigation of sand velocity in aeolian sand transport[J]. *Geomorphology*, 2008, 97(3-4): 438-450.
- [20] Kang L Q, Guo L J, Liu D Y. Reconstructing the vertical distribution of the aeolian saltation mass flux based on the probability distribution of lift-off velocity[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1-2): 1-15.
- [21] Rasmussen K R, Sørensen M. Vertical variation of particle speed and flux density in aeolian saltation: Measurement and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(F2): F02S12.
- [22] Dong Z B, Luo W Y, Qian G Q, et al. A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1-2): 82-93.
- [23] Dong Z B, Luo W Y, Qian G Q, et al. A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 193-207.
- [24] Dong Z B, Wang H T, Zhang X H, et al. Height profile of particle concentration in an aeolian saltating cloud: A wind tunnel investigation by PIV MSD[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 2004, doi: 10.1029/2003GL017915.
- [25] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D16): D16111.
- [26] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. *Geomorphology*, 2002, 49(3-4): 219-230.
- [27] Yang P, Dong Z B, Qian G Q, et al. Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: wind tunnel measurements by particle image velocimetry[J]. *Geomorphology*, 2007, 89(3-4): 320-334.
- [28] Creyssels M, Dupont P, Moctar A O E, et al. Saltating particles in a turbulent boundary layer: experiment and theory[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 625: 47-74.
- [29] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Measuring the velocity of sand particles in an air/particle two-phase flow: A comparison of several commonly used methods[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2010, 2(3): 0185-0197.
- [30] 王元, 杨斌, 王大伟. 风沙两相流动光学测量及图像处理技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2010, 24(1): 55-64.
Wang Yuan, Yang Bin, Wang Dawei. Advances in wind-blown sand flow optical measurement and image processing techniques[J]. *Journal of experiments in fluid mechanics*, 2010, 24(1): 55-64.
- [31] 杨斌, 王元, 王大伟. 风沙两相流测量技术研究进展[J]. *力学进展*, 2006, 36(4): 580-590.
Yang Bin, Wang Yuan, Wang Dawei. Development of wind-sand flow measurement techniques[J]. *Advances in mechanics*, 2006, 36(4): 580-590.
- [32] Han Q J, Qu J J, Liao K T, et al. A wind tunnel study of aeolian sand transport on a wetted sand surface using sands from tropical humid coastal southern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(5): 1375-1385.
- [33] Bo T L, Zheng X J, Duan S Z, et al. Analysis of sand particles' lift-off and incident velocities in wind-blown sand flux[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, 29(2): 158-165.
- [34] Bo T L, Zheng X J, Duan S Z, et al. Influence of sand grain diameter and wind velocity on lift-off velocities of sand particles[J]. *The European Physical Journal E*, 2013, 36: 50.
- [35] Zhang J, Shao Y, Huang N. Measurements of dust deposition velocity in a wind-tunnel experiment[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014, 14(17): 8869-8882.
- [36] Zhang W, Wang Y, Lee S J. Two-phase measurements of wind and saltating sand in an atmospheric boundary layer[J]. *Geomorphology*, 2007, 88(1-2): 109-119.
- [37] Wang D W, Wang Y, Yang B, et al. Statistical analysis of sand grain/bed collision process recorded by high-speed digital camera[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(2): 461-470.
- [38] Liu J, Wang Y, Yang B. Wavelet packet analysis of particle response to turbulent fluctuation[J]. *Advanced Powder Technology*, 2012, 23(3): 305-314.
- [39] Zhang Y, Wang Y, Jia P. Measuring the kinetic parameters of saltating sand grains using a high-speed digital camera[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(6): 1137-1143.
- [40] Zhang W, Wang Y, Lee S J. Simultaneous PIV and PTV measurements of wind and sand particle velocities[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 45(2): 241-256.
- [41] Yang B, Wang Y, Zhang Y. The 3-D spread of saltation sand over a flat bed surface in aeolian sand transport[J]. *Advanced Powder Technology*, 2009, 20(4): 303-309.
- [42] Yang B, Wang Y, Liu J. PIV measurements of two phase velocity fields in aeolian sediment transport using fluorescent tracer particles [J]. *Measurement*, 2011, 44(4): 708-716.
- [43] Wang Y, Wang D W, Wang L, et al. Measurement of sand creep on a flat sand bed using a high-speed digital camera[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(6): 1705-1712.
- [44] Zhang Y, Wang Y, Jia P. Investigation of the statistical features of sand creep motion with wind tunnel experiment[J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 1-7.
- [45] Zhang Y, Wang Y, Yang B, et al. Measurement of sand creep on a flat sand bed using a high speed digital camera: Mesoscopic features of

- creeping grains[J]. *Sedimentology*, 2016, 63(3): 629–644.
- [46] Zhang Y, Wang Y, Jia P. Evolution of downsized crescent-shaped dune in wind tunnel experiment[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(1): 143–151.
- [47] Jia P, Wang Y, Zhang Y. Improvement in the independence of relaxation method-based particle tracking velocimetry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5): 055301.
- [48] Zhang Y, Wang Y, Yang B. Improvement of the delaunay-tessellation particle tracking algorithm in the flow visualization research[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 411–414: 2134–2137.
- [49] Zhang Y, Wang Y, Jia P. Improving the Delaunay tessellation particle tracking algorithm in the three-dimensional field[J]. *Measurement*, 2014, 49: 1–14.
- [50] Zhang Y, Wang Y, He W B, et al. Application of a novel particle tracking algorithm in the flow visualization of an artificial abdominal aortic aneurysm[J]. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 2014, 24(6): 2585–2591.
- [51] Zhang Y, Wang Y, Yang B, et al. A particle tracking velocimetry algorithm based on the voronoi diagram[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(7): 075302.
- [52] Beladjine D, Ammi M, Oger L, et al. Collision process between an incident bead and a three-dimensional granular packing[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(6): 061305.
- [53] Ammi M, Oger L, Beladjine D, et al. Three-dimensional analysis of the collision process of a bead on a granular packing[J]. *Physical Review E*, 2009, 79(2): 021305.
- [54] Rasmussen K R, Valance A, Merrison J. Laboratory studies of aeolian sediment transport processes on planetary surfaces[J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 74–94.
- [55] Wang Z T, Zhang Q H, Dong Z B. A wind tunnel investigation on the transverse motion of aeolian sand[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2011, 3(1): 0013–0016.
- [56] Ho T D, Valance A, Dupont P, et al. Aeolian sand transport: Length and height distributions of saltation trajectories[J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 65–74.
- [57] Ho T D, Dupont P, Moctar A O E, et al. Particle velocity distribution in saltation transport[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(5): 052301.
- [58] Zhang N, Lee S J, Chen T G. Trajectories of saltating sand particles behind a porous fence[J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 608–616.
- [59] Zhang N, Kang J H, Lee S J. Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles[J]. *Geomorphology*, 2010, 120(3–4): 224–232.
- [60] Greeley R, Iversen J D. *Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [61] Holstein-Rathlou C, Merrison J P, Iversen J J, et al. An environmental wind tunnel facility for testing meteorological sensor systems[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 447–457.
- [62] Merrison J P. Sand transport, erosion and granular electrification[J]. *Aeolian Research*, 2012, 4: 1–16.
- [63] Hersen P. On the crescentic shape of barchan dunes[J]. *The European Physical Journal B*, 2004, 37(4): 507–514.
- [64] 贾攀, 王元, 张洋. 缩尺沙丘演化特性的风洞实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(5): 67–71.
Jia Pan, Wang Yuan, Zhang Yang. Experiment on evolution of downsized dunes in wind tunnel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(5): 67–71.
- [65] Barchyn T E, Hugenholtz C H, Li B L, et al. From particle counts to flux: Wind tunnel testing and calibration of the ‘Wenglor’ aeolian sediment transport sensor[J]. *Aeolian Research*, 2014, 15: 311–318.
- [66] Butterfield G R. Grain transport rates in steady and unsteady turbulent airflows[J]. *Acta Mechanica Supplementum*, 1991, 1: 97–122.
- [67] Rasmussen K R, Sørensen M. Aeolian mass transport near the saltation threshold[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 413–422.
- [68] Butterfield G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport: High-resolution measurements in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 393–412.
- [69] 杨斌, 王元, 王大伟. 风沙流中沙粒相输移的测量[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(7): 846–850.
Yang Bin, Wang Yuan, Wang Dawei. Particle image velocimetry measurement of sand transport driven by wind in wind tunnel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(7): 846–850.
- [70] 杨斌, 王元, 刘江, 等. 风沙流中沙粒相浓度的高频测量[J]. *实验流体力学*, 2010, 24(5): 47–50.
Yang Bin, Wang Yuan, Liu Jiang, et al. High-frequency measurement of the sand phase's concentration in wind-sand flow[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(5): 47–50.
- [71] 杨斌, 张伟, 张洋, 等. 非定常风沙流中风速脉动对沙粒相瞬时浓度影响的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2013, 27(3): 47–50.
Yang Bin, Zhang Wei, Zhang Yang, et al. Experiment study of the wind fluctuation's effect on the sand concentration in unsteady wind-sand flow[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(3): 47–50.
- [72] Butterfield G R. Transitional behaviour of saltation: Wind tunnel observations of unsteady winds[J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39(3): 377–394.
- [73] Lorenz R D, Zimelman J R. *Dune worlds: How windblown sand shapes planetary landscapes*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2014.

Review of optical measurement of near-surface aeolian sand transport in wind tunnel experiment

ZHOU Xiaosi, ZHANG Yang, WANG Yuan, LI Min

Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract Near-surface aeolian sand transport is a very complex process which involves the problems of multiple scales, nonlinearity and randomness, so it has always been a focus of the study in wind-blown sand physics. This paper reviews the recent development of optical measurement techniques in wind tunnel experiments, including laser velocity measurement, high-speed photography, and other novel systems. Their properties and applicabilities are briefly analyzed. Finally, some existing problems and future issues in wind tunnel experiment of aeolian sand transport based on the optical measurement are discussed.

Keywords aeolian sand transport; wind tunnel experiment; optical measurement; laser velocity measurement; high-speed photography

(责任编辑 刘志远)