

AR 技术在油气田地面工程设计中的应用及前景

程浩力¹ 刘中民^{1,2} 蔡峰峰¹ 张连来¹ 马晓天¹ 孙学艺¹ 胡京民³ 王 鹏⁴

1. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100085;

2. 中国石油工程建设有限公司, 北京 100120;

3. 国家石油天然气管网集团有限公司工程建设本部, 北京 100013;

4. 国家管网集团榆济管道有限责任公司, 山东 济南 250101

摘 要: 基于 AR 技术的可穿戴设备可以将计算机生成的图像叠加到现实世界, 用户可以看到覆盖有数字数据的真实世界。近 10 年来, AR 技术已从研究实验室转到了广泛的可商用技术, 逐步应用于医疗、制造、工业设计、娱乐、市场营销和军事等方面。概述了 AR 可穿戴设备在近 5 年内的里程碑发展应用案例, 回顾了近 5 年内在石油和天然气行业中 AR 技术的一些成功应用案例及影响。针对 AR 技术在油气田地面工程设计工作中的应用前景, 从站场设计、线路设计及配合施工等方面进行了探讨。由于 AR 技术能够提供实时信息, 其在油气田地面工程中从设计至运维的全寿命周期中将具有不可忽视的应用前景并将会在石油天然气行业数字化转型道路中占有一席之地。

关键词: 增强现实; 油气田地面工程; 可穿戴设备; 数字化转型

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.03.019

Application and prospects of AR technology in oil and gas field surface engineering design

CHENG Haoli¹, LIU Zhongmin^{1,2}, CAI Fengfeng¹, ZHANG Lianlai¹,

MA Xiaotian¹, SUN Xueyi¹, HU Jingmin³, WANG Peng⁴

1. CPECC Beijing Design Branch, Beijing, 100085, China;

2. CPECC, Beijing, 100120, China;

3. Headquarter of Engineering Construction, PipeChina, Beijing, 100013, China;

4. Yuji Pipeline Co. Ltd. of PipeChina, Jinan, Shandong, 250101, China

Abstract: An AR (Augmented Reality) head-mounted display could overlay computer-generated image to the real world. With AR head-mounted display, the users can see the real world overlaid with digital data. In the past decade, the AR technology developed from research laboratory to widely available commercial technology has gradually become available in a number of application areas such as medical,

收稿日期: 2021-03-09

基金项目: 中国石油集团工程股份有限公司科研项目“数字化/智能化油田地面工程关键技术研究与应用”(2018ZYGC-02-03)

作者简介: 程浩力(1984-), 男, 河北邢台人, 工程师, 硕士, 主要从事油气集输、油气储运设计及研究工作。E-mail: cpebj_chenghaoli@163.com

manufacturing, industrial design, entertainment, marketing, and military fields. This paper presents a history of the milestones in AR display development in the past 5 years, and also reviews some cases study of successful AR applications in oil and gas industry and the impact. In view of the application of AR technology in the engineering design of oil and gas surface facilities, the application prospects in field station facilities design, pipeline routing design and technical support during site construction are discussed. Because of its ability to provide real-time information, AR is a promising application for the entire life cycle of oil and gas field surface facilities from design to operation and maintenance, and will occupy a prominent place in the digital transformation of the oil and gas industry.

Keywords: Augmented reality (AR); Oil and gas field surface facilities engineering; Head-mounted display; Digital transformation

0 前言

1977年《星球大战》系列电影正传第一部《星球大战:新希望》中,展示了一种非常超前的全息影像技术,它作为电脑特效出现,但是却预测了未来。30年后,3R技术(虚拟现实:Virtual Reality, VR;增强现实:Augmented Reality, AR;混合现实:Mix Reality, MR)使得《星球大战》系列电影所展现出来的未来科技已经逐渐成为现实,并成了当前科技界的热点。VR技术是电脑模拟的虚拟世界,强调沉浸感,目前已成熟应用于游戏及影视娱乐;AR技术为将虚拟信息叠加至真实世界中,强调现场感及交互性,已逐渐在商业和工业中推广;MR技术作为AR技术的进一步发展,更强调在真实世界强化虚拟对象,虚拟物体和真实世界中的物体能够相互遮挡并可相互自然地融合及实时互动,具有真实空间感,目前正在发展完善。广义来说,AR比MR更宽泛,MR比AR更加严格,MR可视为AR的子集。虚拟图像与现实世界无缝融合的AR技术以及建立在AR技术之上的MR技术已在医学、娱乐、教育和工程等各方面逐步进入实质性应用。随着AR技术涉及的软件和硬件的提升,近5年来,逐渐走向成熟的AR技术在石油天然气行业中的应用案例也越来越多。

以云计算(Cloud Computing)、移动互联(Mobile Connectivity)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)、大数据(Big Data)和工业物联网(Industrial Internet of Things, IIoT)等为代表的第四次工业革命(The Fourth Industrial Revolution, 4IR)带来的浪潮以及全球新冠疫情大流行和低价油带来危机,数字化转型对于石油公司来说已从尝试探索变成了迫在眉睫的生存之道。石油公司的很多项目也开始采用包括智慧管网、数字孪生等在内的技术^[1-2],AR技术与其他第四次工业革命的技术相互融合,已经开始作为很多石油公司数字化道路上采用的技术手段,在降低成本、提高运营效率和提高工作场所安全等方面发挥了重要作用。为此,回顾了AR技术近年

来商用发展及市场化成功的可穿戴设备在石油工业中的使用案例,探讨了AR技术在油气站场设计、线路设计及现场配合施工中的应用前景,期望对行业内有兴趣研究及使用AR技术的设计人员提供参考。

1 AR技术简介及商用发展

Azuma R T^[3]在1997年提出的AR定义是目前被广泛接受的定义,即AR是具有虚实结合、实时交互、三维注册等三个特征的系统。第一个真正的计算机生成的AR体验可以追溯到计算机图形学(CAD)之父和VR之父Sutherland I E的成果,他于1963年在麻省理工学院开发了世界上第一个交互式图形应用^[4],1968年他与Bob Sproull一起创建了第一个原型AR系统^[5]。Sutherland I E的理念随后在NASA及美国空军为代表的美国军政部门及一些大学的实验室中一直默默发展,电脑和工业领域在几十年后才体会到其理念带来的划时代变革^[6]。以Azuma R T为代表的美国学者一直在跟踪调查AR技术在理论和应用方面的进展^[3,7-9],中国学者在21世纪初开始大量跟踪AR技术的发展^[10-14]。1999年,Kato H及Billinghurst M^[15]基于C/C++开发了开源AR软件开发工具包ARtoolKit,并在华盛顿大学HIT实验室发布,该工具使开发人员无需构建自己的跟踪系统即可构建AR应用程序,很多程序员基于此项开源代码完成了AR程序及应用的创建。AR显示设备可以使得用户同虚拟现实内容进行自然交互,而虚拟内容则与周围的现实世界融为一体,用户则可以始终保持与现实世界的互动^[8]。21世纪初,AR技术在博物馆及主题公园的虚拟展示及体育比赛转播中开始逐渐应用,随后应用于游戏及电视直播领域。随着基于Flash、智能手机及全球商业营销的发展,AR技术在21世纪第10个年头得到了发展,2015—2017年短短两年间,从微软、亚马逊、苹果、谷歌等老牌科技公司到AR初创公司,行业新品如雨后春笋般出现。

2015年1月微软公司发布了头戴式显示器 Microsoft

HoloLens, 2019 年 2 月又发布了升级版的 HoloLens 2。微软公司的 HoloLens 采用 MR 技术将计算机图像与现实视野相结合,以真实自然的方式实现全息图的触摸、抓握和移动,目前已广泛应用于军队军工、航空航天、医学、汽车等领域,成为迄今为止最为成功及实用的 AR 头戴显示设备之一。

2017 年 4 月 AR 初创公司 RealWear 推出了带有 AR 功能的 RealWear HMT-1 工业可头戴计算机,2018 年 6 月推出了可用于石油化工行业环境的 RealWear HMT-1 Z1 防爆型工业头戴计算机,RealWear 头戴计算机一经推出,就广泛应用于工业领域。

2017 年 6 月和 8 月,苹果公司和谷歌公司分别公布了各自的 AR 开发平台 ARKit 和 ARCore,使得软件开发者在应用广泛的 iOS 和 Android 系统上开发了大量的 AR 应用工具。

2021 年 1 月 13 日 IDC 发布了 2021 年 AR /VR 市场 10 大预测,其中预测中国市场规模仍将保持支出规模第一的位置,将占到全球 56%^[16]。2020 年 12 月 26 日中国国家发展改革委联合教育部、科技部、工业和信息化部等多部委发布《关于推动公共实训基地共建共享的指导意见》中提出指导支持各地加强公共实训基地建设,鼓励在公共实训基地开展新产业、新技术、新业态培训,助推 VR、AR、AI 和电子商务的应用。

面对中美迅速发展的 VR /AR /MR 的产业,欧盟 2020 年 12 月发布的《数字时代的欧洲媒体:支持复苏和转型的行动计划》^[17]中,提到希望建立统一的 VR /AR 产业联盟以促进跨行业合作,从而确保欧洲在所述领域的领先地位,预计到 2030 年,VR /AR 有望为全球经济带来约 1.3 万亿欧元的产值。

2 AR 可穿戴设备在石油工业的探索应用

已持续近 1 年的低油价及全球新冠疫情大流行的局面,使得石油公司不得不面对削减成本、远程办公、远程协助、远程维护检修等问题,各大石油公司被迫将尚在尝试中的数字化转型提前推到前台,AR 技术也越发得到石油公司的关注和应用。石油公司已开始认识到 AR 技术在远程检查维护、远程监控、远程员工培训和远程协助中的优势。目前,石油公司已开始与微软公司、谷歌公司等科技巨头合作开发专用的 AR 技术及穿戴设备,一些 AR 科技初创公司及游戏引擎开发公司也逐渐参与其中以满足石油公司的特殊需求,目前 AR 技术在石油天然气领域的应用已经逐步推广。

英国石油巨头 BP 公司很早就开始尝试可视化技术和 AR 技术的开发应用,并大力发展数字孪生技术,开展数字化转型的努力。2017 年,BP 公司使用 AR 初创公司

Fieldbit 公司的 Fieldbit Hero 智能眼镜,使用实时视频使在控制室的专家可以看到现场技术人员的所见,从而确保问题的准确诊断。然后,使用 AR 技术,Fieldbit Hero 智能眼镜可使专家在技术人员从事设备修复工作时,将易于理解的视觉指令和来自控制系统的实时数据叠加到技术人员的视野中。通过 AR 技术的使用,BP 公司提高了运营安全性和运营效率^[18]。Fieldbit Hero 智能眼镜在 BP 公司的应用见图 1。



图 1 Fieldbit Hero 智能眼镜在 BP 公司的应用照片

Fig. 1 Application of Fieldbit Hero smart glasses in BP

2018 年,雪佛龙公司与微软公司合作,为其现场技术人员配备了微软 HoloLens 头显来开展日常维护及专家远程指导。借助 HoloLens 头显远程协助的优势,雪佛龙公司位于各地的专家可以为分布全球的工厂和项目提供远程指导,不同工厂及项目的员工也可以远程协作及协助,从而使得旅行成本及相关风险得到降低,并提高了效率^[19]。微软公司 HoloLens 头显在雪佛龙公司的应用见图 2。



图 2 微软公司 HoloLens 头显在雪佛龙公司的应用照片

Fig. 2 Application of Microsoft HoloLens in Chevron

2018 年 5 月,霍尼韦尔公司发布了智能可穿戴设备 Skills Insight,该设备结合了 RealWear HMT-1Z1 头显和霍尼韦尔 Movilizer 平台,支持危险场所现场服务运营。可响应语音并具有作业程序可视化、实时数据可视化、视频捕捉及回放、语音控制及搜索、远程专家待命、地理定位及导航、资产可视化、紧急疏散及救助等功能^[20]。2019 年,壳牌公司为开展数字化转型,联合霍尼韦尔公

司在美国、中国、德国等 12 个国家和地区的运营地点部署 RealWear HMT-1Z1 头显并通过专家远程指导方式成功解决故障。2020 年 7 月,法国石油巨头道达尔公司在美国得州拉波特的聚丙烯工厂中部署了 RealWear HMT-1Z1 头显,其远程协助功能使得道达尔公司在专家差旅成本及新冠疫情防控上取得了明显的效果。RealWear HMT-1Z1 头显在霍尼韦尔公司的应用见图 3。



图 3 RealWear HMT-1Z1 在霍尼韦尔公司的应用照片

Fig. 3 Application of RealWear HMT-1Z1 in Honeywell

中东石油巨头沙特阿美石油公司的奥斯曼尼亚天然气工厂使用无人机和头戴设备来检查管道和机械设备,帮助工厂缩短了 90% 的检查时间。2020 年,沙特阿美石油公司利用 AR 设备远程监视设备和材料制造,评估了韩国的钢管制造商。沙特阿美石油公司认为 AR 头戴设备的使用不仅降低了新冠疫情传播风险,还为沙特阿美石油公司的数字化转型计划锦上添花。

De Souza Cardoso L F 等学者^[21]调查了 2012—2018 年间 AR 技术在工业中的应用,涉及建筑工程和设施管理(AEC/FM)、航空、汽车、电子/自动化、能源、政府、物流、船舶和机械等领域,发现 AR 技术在提高生产灵活性、降低操作时间、提高生产质量、增加操作人员安全及健康、促进决策等方面均有显著效果。2021 年 10 月,著名数据分析公司 GlobalData 发布了《石油和天然气的增强现实》(Augmented Reality in Oil and Gas)报告^[22],报告预计未来三到五年内 AR 技术有可能对油气行业的传统运营部门产生颠覆性影响。

3 AR 技术在油气地面工程设计中的应用

3.1 站场设计

AR 技术在景观设计、城市规划及工程评价等领域的应用已得到众多学者的研究和探索,王靖滨等人^[23]基于 Visual C/C++ 6.0 开发工具实现了 AR 景观规划系统,将设计对象和真实世界相融合并对设计人员提供了良好的帮助。管涛等人^[24]设计并实现了基于增强现实的虚拟小区规划系统,证明了增强现实技术在小区规划应用中的优势。申杰等人^[25]利用 AR 技术对大型建设

项目可视化评价进行了探讨,结果表明采用 AR 技术提高了工作效率并带来巨大的经济效益。Phan V T 等人^[26]基于 AR 技术和 Google Earth 创建了 ARcdesk 程序,方便建筑设计和城市规划。

已在景观设计及城市规划中探索使用的 AR 技术,在油气管道站场规划设计中同样有着光明的应用前景。雪佛龙公司在墨西哥湾的马洛油田中,设计工程师将 3D 设计模型全息投影到会议室中,使得现场工程师和专家能够准确看到模型外观,并在部件装配前测试间距、评估安全性并核验其他设计问题。

油气管道设计中广泛使用的 CAD、PDS、SP3D、PDMS 等设计软件完成的 3D 模型往往只停留在设计人员电脑中,在常规工程建设现场最终都是以打印的 2D 平面图纸作为结果,使用效果大打折扣。AR 技术的使用可以将 3D 模型的全息影像投射到现实世界,将设计成果可视化,提升了工程师对模型进行评估和改进的能力。例如,设计人员可以结合 AR 开发平台编辑应用程序,将设计模型及成果导入头显等 AR 设备,采用 AR 在现场完成等比例的站场 3D 模型投影后,设计和施工工程师可以置身其中,对模型按照实物状态进行审核,亲身体会置于现场的模型,确定设计合理性,在施工之前发现问题并及时处理;监理工程师在现场施工过程中及施工完成后,可以摒弃耗时的常规 2D 图纸现场校核模式,采用 AR 技术将模型投射到实体上进行对比,从而评估实物同 3D 设计模型的匹配度,提升质检的准确性和效率;运营工程师可以走进投射到现场的虚拟工艺装置区,体验设备及管道的人体工程学情况,在工程完成前对装置区各功能进行熟悉及模拟操作,不仅能提前将问题在施工前及时反馈给设计改进,还能有助于提高操作熟练程度和投产安全。

AR 技术的可视化功能使得各类工程师在项目完成前就能达到身临其境的状态,在设计、模型审查、施工及运营等整个项目生命周期都可以起到辅助作用。

3.2 线路设计

AR 技术目前已在地理信息系统及城市地下管网规划中得到尝试应用。孙敏等人^[27]提出了 ARGIS 概念,将地理信息系统(GIS)同 AR 技术相结合,使得 GIS 的虚拟数字化空间同 AR 的实时交互有效结合。常勇等人^[28]提出了基于 RTK GPS 同测角传感器相结合的户外混合 AR 系统,探讨并验证了其在地下管网 3D 可视化中的应用,使用 AR 技术可以观察到地下纵横交错的各类管线的走向、相互位置,并可进行相关的查询和分析,有效地解决管网管理中存在的很多难题。周玲等人^[29]设计了城市地下管网 AR 系统,利用 ARCore 实现了管道模型的虚实融合,可以多方位实时查看。

目前管道线路的设计基本上是基于2D的平面断面图设计,今后,在油气管道线路设计中,AR技术的3D虚实结合显示模式在以下两方面会有一定的发展空间。

1)在油气管道大中型穿跨越设计中,借助AR技术,可以将设计图纸同地理信息系统或Google Earth相结合,将设计成果同现场的数字化3D地形结合,专业内校审及设计方案评审阶段都可以让参与者体验设计成果的实际效果,从而给出更好的指导意见,有助于设计成果的完善。

2)在管道完成设计后,导入AR应用程序,并将已建管道、已建光电、已建道路、房屋等测量信息3D化后导入AR程序,使用AR设备即可以看到拟建管线同已建设施的空间位置关系,有利于判断穿越方式、穿越埋深、管道走向、安全距离等是否合理。

3.3 配合施工

何波等人^[30]采用文献分析法对2013—2019年间工程施工中AR技术应用的文献进行了分析,研究发现AR技术在进度监控、质量控制、组装模拟等方面得到较多的应用,同时指出AR技术在施工时面临的位置感知、对齐和遮挡等问题需要进一步解决。2019年6月,中国石油在陕京四线采用了RealWear HMT-1Z1配合施工,减少了专家及设计人员出差成本。

AR技术在配合施工具备的优势表现在以下两方面。

1)远程指导,节省成本。目前设计单位现场配合施工的主要方式是通过各种交通工具到现场实地出差,项目投产之前往往需要不同专业数十人现场配合施工。采用AR技术后,现场仅需要在不同场区配备少量主要专业的设计人员,各专业负责人则可以在单位办公室通过与现场设计人员头戴的AR设备连线,设计成果导入AR设备后连线双方均可以看到,办公室的专业负责人可以在设备上输入及标识解决办法或语音沟通指导,现场人员随时读取,从而解决问题。AR技术的采用,不仅使人员差旅成本降低,还降低了差旅过程中的风险;同时由于免除了往返时间,提高了解决问题的效率;使设计负责人在短时间内为不同项目远程指导更加便利。

2)设计成果可以在现场可视化、数字化 workflow、提高生产效率并减少错误。比如,将管道线路全线的压力、管径、壁厚、埋深、穿越等设计参数输入AR系统,配合AR系统的定位及现场3D全息投影技术,设计人员头戴AR设备,在现场实时看到正在施工或将要施工的虚拟管线,并可随时调出该处管线的埋深、穿越情况、压力、管径等信息,提高了发现问题和解决问题的能力,提高了工作效率。

3.4 数字化成果交付

随着4IR时代的到来及快速发展,近年来,工程建设

领域已逐渐从传统的设计施工模式全面转入数字化时代^[31-35]。对于各工程设计公司,设计成果的数字化移交是其发展目标之一及实现数字化转型的标志。设计成果数字化移交不仅推动了工程设计公司业务的转变和进发,最重要的效果是使得业主运营单位可以在后续依据数字化移交的数据文件及3D模型实现厂/站,及其站外管道的全生命周期的数字化,方便开展资产管理及运维管理。具备的虚实结合、实时互动及数据检索等功能的AR/MR技术可结合3D数字化移交成果,在生产企业的员工培训、维修前演练、运营维护过程中的指导等方面发挥作用。

4 结论与思考

低油价、新冠疫情及第四次工业革命带来了石油工业数字化转型的迫切需求,大数据分析、工业物联网、机器人与无人机、人工智能、云计算、3D打印、虚拟现实/增强现实/混合现实等数字化领域的新技术逐渐得到应用,中国石油企业在创建智慧管网等数字化转型方面已经开始探索及发力。在全球新冠疫情大流行及低油价带来的行业危机中,提高效率 and 远程办公(远程协助、远程培训等)的常态化将促进AR/MR等新技术的使用和发展。

目前,AR技术随着智能手机和平板电脑的广泛应用已逐渐普及,随着软硬件的进步及同物联网、大数据和人工智能等技术相结合,AR可穿戴设备在石油和天然气工业中将易于发挥作用。AR/MR头戴设备具有解放双手的用户界面、远程指导、减少差旅、智能检索、数据可视化、数字化 workflow 等功能,对油气管道的设计、施工、运营都会产生积极影响,也对提高生产效率、增强工作场所安全、降低成本至关重要。

参考文献:

- [1] 陈传胜,李丹,尹恒,等.智能管道发展现状及具体领域智能化的探讨[J].天然气与石油,2020,38(5):133-138.
CHEN Chuansheng, LI Dan, YIN Heng, et al. Development status of smart pipeline system and discussion on its intellectualization application in this specific field [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (5): 133-138.
- [2] 李柏松,王学力,徐波,等.国内外油气管道运行管理现状与智能化趋势[J].油气储运,2019,38(3):241-250.
LI Baisong, WANG Xueli, XU Bo, et al. Operation and management status and intelligentization trend of global oil and gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38 (3): 241-250.
- [3] AZUMA R T. A survey of augmented reality [J]. Teleoperators

- and Virtual Environment, 1997, 6 (4): 355-385.
- [4] SUTHERLAND I E. Sketchpad: a man-machine graphical communication system [C] //Proceedings of Twenty-Five Years of Electronic Design Automation. New York: Association for Computing Machinery, 1988: 507-524.
 - [5] SUTHERLAND I E. A head-mounted three dimensional display [C] //Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference. New York: Association for Computing Machinery, 1968: 757-764.
 - [6] BILLINGHURST M, CLARK A, LEE G. A survey of augmented reality [J]. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, 2015, 8 (2-3): 73-272.
 - [7] AZUMA R T, BAILLOT Y, BEHRINGER R, et al. Recent advances in augmented reality [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21 (6): 34-47.
 - [8] AZUMA R T. The most important challenge facing augmented reality [J]. Teleoperators and Virtual Environments, 2016, 25 (3): 234-238.
 - [9] AZUMA R T. The road to ubiquitous consumer augmented reality systems [J]. Human Behavior and Emerging Technologies, 2019, 1 (1): 26-32.
 - [10] 陈 靖, 王涌天, 闫达远. 增强现实系统及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(15): 72-75.
CHEN Jing, WANG Yongtian, YAN Dayuan. The application of augmented reality [J]. Computer Engineering and Applications, 2001, 37 (15): 72-75.
 - [11] 柳祖国, 李世其, 李作清. 增强现实技术的研究进展及应用[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(2): 222-225.
LIU Zuguo, LI Shiqi, LI Zuoqing. Development and application of augmented reality [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15 (2): 222-225.
 - [12] 王涌天, 刘 越, 胡晓明. 户外增强现实系统关键技术及其应用的研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 329-333.
WANG Yongtian, LIU Yue, HU Xiaoming. Study on key technique and application of outdoor AR system [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15 (3): 329-333.
 - [13] 朱森良, 姚 远, 蒋云良. 增强现实综述[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 767-774.
ZHU Miaoliang, YAO Yuan, JIANG Yunliang. A survey on augmented reality [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9 (7): 767-774.
 - [14] 齐 越, 马红妹. 增强现实: 特点、关键技术和应用[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(5): 900-903.
QI Yue, MA Hongmei. Augmented reality: characteristics, key technology and applications [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2004, 25 (5): 900-903.
 - [15] KATO H, BILLINGHURST M. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system [C] //Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, 20-21 October, 1999, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 1999: 803809.
 - [16] IDC. IDC 发布 2021 年 AR/VR 市场 10 大预测 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-02-17]. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prCHC47313321>.
IDC. IDC published 10 AR/VR market predictions for 2021 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-02-17]. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prCHC47313321>.
 - [17] European Commission. Europe's media in the digital decade: an action plan to support recovery and transformation [R]. Brussels: European Commission, 2020: 12.
 - [18] BP. Smarter tech: the consumer electronics revolution coming to the gas field [EB/OL]. (2017-11-16) [2021-02-10]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/smarter-technology-in-bp-us-lower-48-natural-gas-business.html>.
 - [19] Chevron. How we learned from NASA and the Microsoft hololens team to make virtual teleportation a reality [EB/OL]. (2018-12-14) [2021-02-10]. <https://www.chevron.com/stories/how-we-learned-from-nasa-and-microsoft-hololens-team-to-make-teleportation-a-reality>.
 - [20] Honeywell. Honeywell introduces new intelligent wearables for industrial field workers [EB/OL]. (2018-05-03) [2021-02-10]. <https://www.honeywell.com/us/en/press/2018/05/honeywell-introduces-new-intelligent-wearables-for-industrial-field-workers>.
 - [21] DE SOUZA CARDOSO L F, MARIANO F C M Q, ZORZAL E R. A survey of industrial augmented reality [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 106159. 1-106159. 12.
 - [22] GlobalData. Augmented reality in oil and gas [R]. London: GlobalData, 2020: 3.
 - [23] 王靖滨, 李 明, 耿卫东, 等. 基于增强现实技术的景观规划系统[J]. 中国图象图形学报, 7A(4): 95-100.
WANG Jingbin, LI Ming, GENG Weidong, et al. Scene-planning system based on augmented reality technique [J]. Journal of Image and Graphics, 7A (4): 95-100.
 - [24] 管 涛, 李利军. 增强现实在小区规划中的应用研究[J]. 工程图学学报, 2006, 27(5): 50-54.
GUAN Tao, LI Lijun. The application research of augmented reality in residential area planning [J]. Journal of Engineering Graphics, 2006, 27 (5): 50-54.
 - [25] 申 杰, 刘浩吾. 扩充现实技术在工程评价方面的应用[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2001, 16(4): 79-84.
SHEN Jie, LIU Haowu. Application of augmented reality (AR) technique to the evaluation of projects [J]. Journal of

- Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition), 2001, 16 (4): 79-84.
- [26] PHAN V T, CHOO S Y. A combination of augmented reality and google earth's facilities for urban planning in idea stage [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 4 (3): 26-34.
- [27] 孙敏, 陈秀万, 张飞舟, 等. 增强现实地理信息系统[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 906-913.
SUN Min, CHEN Xiuwan, ZHANG Feizhou, et al. Augment reality geographical information system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40 (6): 906-913.
- [28] 常勇, 何宗宜. 户外增强现实技术及其在地下管网3D可视化中的应用[J]. 测绘通报, 2005(11): 57-60.
CHANG Yong, HE Zongyi. Technology of augmented reality and its application in 3D visualization of underground pipeline [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005 (11): 57-60.
- [29] 周玲, 陈强. 城市地下管网增强现实系统研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 251-256.
ZHOU Ling, CHEN Qiang. Research on augmented reality system of urban underground pipe network [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56 (1): 251-256.
- [30] 何波, 张慎, 邱文航, 等. 增强现实技术在工程施工中的应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37 (2): 93-98.
HE Bo, ZHANG Shen, QIU Wenhong, et al. Overview on application of augmented reality technology in engineering construction [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37 (2): 93-98.
- [31] 闫婉, 任玲, 宋光红, 等. 数字化协同设计对智能油气田建设的支持[J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 110-115.
YAN Wan, REN Ling, SONG Guanghong, et al. Digital collaborative design supports the construction of intelligent oil & gasfields [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (3): 110-115.
- [32] 汤晓勇, 孙子杰, 王鸿捷, 等. 智能油气田标准体系研究[J]. 天然气与石油, 2019, 37(5): 115-118.
TANG Xiaoyong, SUN Zijie, WANG Hongjie, et al. Research on standardization system of intelligent oil and gas fields [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37 (5): 115-118.
- [33] 王鸿捷. 智能油气田数字化交付研究[J]. 天然气与石油, 2020, 38(3): 108-111.
WANG Hongjie. A study on digital delivery of smart oil and gas field [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (3): 108-111.
- [34] 李遵照, 王剑波, 王晓霖, 等. 智慧能源时代的智能化管道系统建设[J]. 油气储运, 2017, 36(11): 1243-1250.
LI Zunzhao, WANG Jianbo, WANG Xiaolin, et al. Construction of intelligent pipeline system in the era of smart energy [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36 (11): 1243-1250.
- [35] 李海润. 智慧管道技术现状及发展趋势[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 129-132.
LI Hairun. The status quo & development trend of smart pipeline technology [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (2): 129-132.



(上接第 81 页)

- [17] 唐邦忠,沈 华,才 博,等.束鹿泥灰岩致密油水平井体积压裂技术研究[J].天然气与石油,2014,32(4):43-45.
TANG Bangzhong, SHEN Hua, CAI Bo, et al. Research on volume fracturing technique in horizontal tight oil wells of bunge marl [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 32 (4): 43-45.
 - [18] 黄 东,李育聪,刘 敏,等.川中地区中侏罗统沙溪庙组一段油气藏特征及勘探潜力评价[J].中国石油勘探,2017,22(2):44-49.
HUANG Dong, LI Yucong, LIU Min, et al. Oil and gas reservoir characteristics and exploration potential evaluation of the first member of the Shaximiao formation, middle Jurassic, central Sichuan region [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22 (2): 44-49.
 - [19] 金 涛,陈 玲,郭蕊莹,等.四川盆地公山庙油田大安寨段致密油刻度区地质解剖[J].天然气勘探与开发,2014, JIN Tao, CHEN Ling, GUO Ruiying, et al. Geological anatomy of the tight oil scale area in the Dayanzhai section, Gongshanmiao oilfield, Sichuan basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2014, 37 (3): 19-23.
 - [20] 李登华,李建忠,张 斌,等.四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J].石油学报,2017,38(7):740-752.
LI Denghua, LI Jianzhong, ZHANG Bin, et al. Formation condition, resource potential and sweet-spot area prediction of Jurassic tight oil in Sichuan basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38 (7): 740-752.
 - [21] 邹 娟,金 涛,李雪松,等.川东地区下侏罗统勘探潜力评价[J].中国石油勘探,2018,23(4):30-38.
ZOU Juan, JIN Tao, LI Xuesong, et al. Evaluation of lower jurassic exploration potential in the eastern Sichuan region [J]. China Petroleum Exploration, 2012, 23 (4): 30-38.