第 8 卷 第 4 期
2019 年 7 月

集 成 技 术
JOURNAL OF INTEGRATION TECHNOLOGY

Vol. 8 No. 4
Jul. 2019

引文格式：
陈星辉, 赛景波, 李新梦, 等. 基于无人机航拍的油气管道监管系统设计与实现 [J]. 集成技术, 2019, 8(4): 52-62.
Chen XH, Sai JB, Li XM, et al. Design and implementation of oil and gas pipeline monitoring system based on aerial photography of unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Integration Technology, 2019, 8(4): 52-62.

基于无人机航拍的油气管道监管系统设计与实现

陈星辉 赛景波 李新梦 刘寒迪

（北京工业大学信息学部 北京 100124）

摘 要 油气管线布设范围广、跨度大，对于安全性要求极高，日常检修工作繁重。为了提高检修效率，该文提出并开发了一套基于无人机航拍的油气管道监管系统。系统采用浏览器/服务器架构，结合网络地理信息系统（WebGIS）和云平台技术，实现了轨迹规划、飞行任务管理、无人机飞行数据、飞行轨迹、航拍视频实时显示、检测识别预警、历史回放等功能。实验结果表明，该系统可靠实用，可使石化工作人员及时有效地了解管道情况，对管道损坏或灾情异常做出及时应对，达到了油气管道全面有效的远程监测和管理。

关键词 无人机；管道监测；浏览器/服务器；网络地理信息系统
中图分类号 TN2 **文献标志码** A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20190221001

Design and Implementation of Oil and Gas Pipeline Monitoring System Based on Aerial Photography of Unmanned Aerial Vehicle

CHEN Xinghui SAI Jingbo LI Xinmeng LIU Handi

(*Department of Information Science of Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*)

Abstract Oil and gas pipelines have a wide range of layout, long span, and that makes the daily maintenance work very laborious. To improve efficiency of maintenance, an oil and gas pipeline supervision system based on unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography is proposed and realized in this work. The system is based on brower/server architecture, and adopts the geographic information system and cloud platform technologies, which can realize trajectory planning, mission management, unmanned aerial vehicle flight data, flight trajectory, aerial video real-time display, fault early warning and playback of historical events etc. With the implementation of the proposed system, the petrochemical maintainers can understand real-time condition of the pipelines and response to the damage or disaster more efficiently.

Keywords unmanned aerial vehicle; pipeline monitoring; brower/server; WebGIS

收稿日期：2019-02-21 修回日期：2019-05-22

作者简介：陈星辉，硕士研究生，研究方向为通信工程、地理信息系统应用与开发；李新梦，硕士研究生，研究方向为图像的检测与识别；刘寒迪，硕士研究生，研究方向为图像处理；赛景波（通讯作者），副教授，硕士研究生导师，研究方向无线通信、移动 IP 及嵌入式系统，E-mail：saijingbo@bjut.edu.cn。

1 引 言

随着经济的发展，各国对能源的需求越来越大，我国的大型能源工程“西气东输”在中国经济的稳步发展中起到了重大作用。近年来，中国油气管道工程建设平稳推进，截至 2017 年，中国油气管道总里程累计约 13.31 万千米[1-2]。在庞大的能源工程面前，安全问题成为重中之重。

传统的对油气管道泄漏进行检测的方法往往是通过探测仪和人力巡逻。依靠人力，工作量大，条件艰苦，特别是山区、沼泽及无人区等地的油气管道的巡检，或是在冰灾、水灾、地震、滑坡、夜晚期间的巡线检查[3-5]，花费时间长、人力成本高、困难大，并有一定危险性，且不能实时地对石油管道进行全面监控，所以不能有效地保证石油管道线路的安全运输。目前，遥感手段成为管道监测的有效手段。常用的遥感手段主要包括卫星、有人机和无人机。其中，卫星成像分辨率较低，且回传周期较长，不能全天覆盖监测，也难以实现突发状况的应急监测；有人机风险较大，巡检的成本较高，且作业流程繁琐，不适合应用于实时监测。如今，无人机技术发展越来越成熟，已被广泛地运用在生活和工作中。无人机多在近地低空环境下飞行，以完成侦查、巡逻、救援、航拍等任务[6-7]，可很好地应用在油气管道监测中。从效率、成本、危险性、实时性和全面性五方面进行对比发现，无人机巡检明显优于传统人工巡检，具体如表 1 所示。

在国外，无人机遥感监测在管道行业的应用已经非常广泛[8]。2010 年，英国陆上石油天然气组织研发了首例功能齐全的无人机检查系统 flare stacks（火炬），这个系统使得工程师可以实时有效地监测管道的重点位置和管道及其附近详情，为管道的维护和管理减少了时间和预算[9-11]。2012 年，英国石油公司（BP）开发适用于美国阿拉斯加普拉石油管道的无人机巡检系统，对美国阿拉斯加管道和加拿大阿兰斯管道定期使用无人机进行巡护，防止第三方破坏、观察地面活动和泄漏检测等[12]。近年来，我国以大疆无人机为首涌现出很多无人机品牌，无人机技术不断成熟，将无人机应用于油气管道领域也越来越广泛。例如，在庆铁线扩能改造管道建设中，无人机帮助施工单位优化选线、放线，选择施工场道路等；在西气东输管道地质灾害调查中，通过无人机遥感图像确定滑坡、崩塌等地质灾害发生的位置、类型、规模等[13]；在管道巡检方面，无人机已应用于中石油新疆果子沟地段管道、黑龙江加格达奇管道和潍坊至东营天然气管道[14]。

随着互联网、无人机技术、大数据云平台技术、地理信息系统（Geographic Information System，GIS）技术[15-16]、智能识别技术的发展，石油管线遥感监测与大数据处理、GIS 平台、目标检测与识别技术相结合的研究成为人们关注的重点。国外将 GIS 应用于油气管道方面始于 20 世纪 80 年代中期，当时主要用于原油管线的线路设计；20 世纪 90 年代，GIS 已用于管道风险区划。21 世纪，随着网络技术发展，网络地理信息系统（WebGIS）技术[17-18]应用于油气管道的定期风

表 1 巡检方式对比

Table 1 Comparison of inspection mode

巡检方式	比较项				
	效率	成本	危险性	实时性	全面性
传统巡检（人工）	巡检时间长，效率低	人力成本高	艰苦地区，存在危险	差	差
无人机巡检	无人机机动灵活，效率高	性价比高	环境适应力较强，安全可靠	实时性，可用于应急监测	监测范围广，全面性强

险评估和应急响应机制，并组建国家管道 GIS 数据库[19]。相较于国外，我国的 GIS 应用也随着技术的不断普及而持续发展，并取得了一些成果。2010 年，朱本廷[20]提出了一个基于 WebGIS 的油气管道事故应急救援系统，能够最大限度地减少管道事故造成的人员伤亡、经济损失和环境污染。2016 年，吴佳怡等[21]以青岛市黄岛区为例，设计了一套基于 GIS 的石油天然气综合监管系统，实现了油气管道数字化管理模式。

虽然，国内外已经采用无人机对油气管道进行巡检，但无人机管线巡检是一个复杂的系统工程，涉及到任务规划、数据传输、视频传输、数据处理、识别报警、统计分析和终端应用等诸多环节，目前尚未形成多数据集中处理与智能分析的综合应用平台。这也是无人机管线巡检尚未形成规模化应用的原因之一。

针对以上情况，本文基于无人机航拍、云平台、WebGIS 技术和目标检测识别技术，采用浏览器/服务器(Brower/Server，B/S)架构，构建了一套油气管道监管系统。通过把无人机与互联网、GIS 相关联，将无人机的实时位置、飞行信息和监测视频实时回传到客户端，有效地实现了油气管道的实时监测和管理。

2 系统方案与关键技术

2.1 系统方案

本系统主要由无人机数据采集系统、云端服务器和客户端三部分组成。其中，数据采集端主要对无人机的飞行姿态数据、位置数据(即 pos 数据)和航拍的视频数据进行采集，之后通过 3G/4G 网络转发至云端服务器对数据进行管理、存储和转发等处理。客户端是整个系统的用户操作平台，它是一个依托地理信息系统，集成数据管理系统、数据分析系统、任务管理系统和用户管理的多功能信息应用平台。该系统采用 B/S 架构设计，用户无需安装客户端软件就可以在任何具备浏览器的机器上进行业务处理，为用户提供强大的远程操作功能[22]，同时也提升了本系统的实用性和多功能性。系统设计框图如图 1 所示。

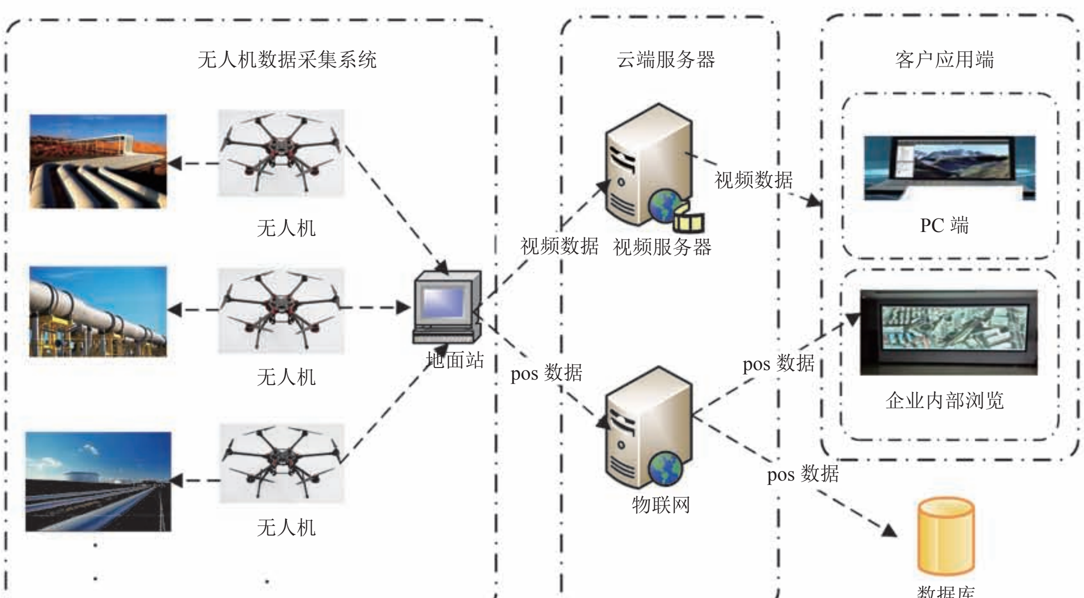


图 1 系统设计框图

Fig. 1 The block diagram of system design

2.2　关键技术

2.2.1 WebGIS 技术介绍

WebGIS 是 Web 技术与 GIS 技术结合的产物及基于网络的地理信息服务，用户可通过浏览器客户端从 WebGIS 服务器获取地理信息[23]，实现地理信息的交流与共享。在客户端用 OpenLayers 实现地图数据的加载及对地图数据的访问[24]。OpenLayers 是一个专为 WebGIS 客户端开发提供的 JavaScript 类库包[25]，用于实现标准格式发布的地图数据访问，同时还有一些拓展功能，如图层控制、矢量画图功能，方便动态地展现“点、线和面”这样的地理数据，具体结构如图 2 所示。本系统中轨迹的实现就是基于 Openlayers 该功能。

2.2.2 物联网平台介绍

本文系统通过物联网平台，实现了无人机数据和云端的双向通信。其中，无人机设备通过消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport，MQTT)协议接入物联网平台，然后将设备产生的消息，即无人机的 pos 数据，通过 HTTP/2 通道推送至企业服务器，以作后续处理。MQTT 协议是基于发布/订阅(Publish/Subscribe，PUB/SUB)的异步通信模式，无法实现服务端下发指令给设备端，同时设备端返回响应结果的场景。为此，物联网(IoT)平台基于 MQTT 协议制定了一套请求和响应的同步机制，无需改动 MQTT 协议即可实现同步通信。当企业服务器端发起远程过程调用(Revert Remote Procedure Call，RRPC)时，物联网设备端只需要在 TimeOut(超时)内，按照固定的格式回复 PUB 消息，服务端即可同步获取 IoT 设备端的响应结

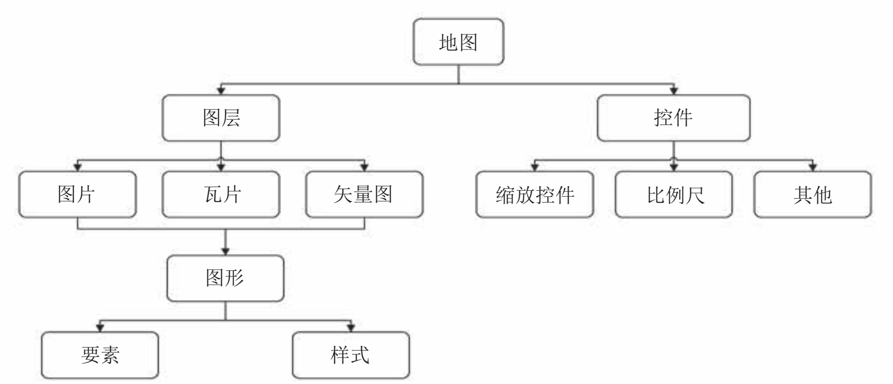


图 2　OpenLayers 结构图

Fig. 2　The structure diagram of OpenLayers

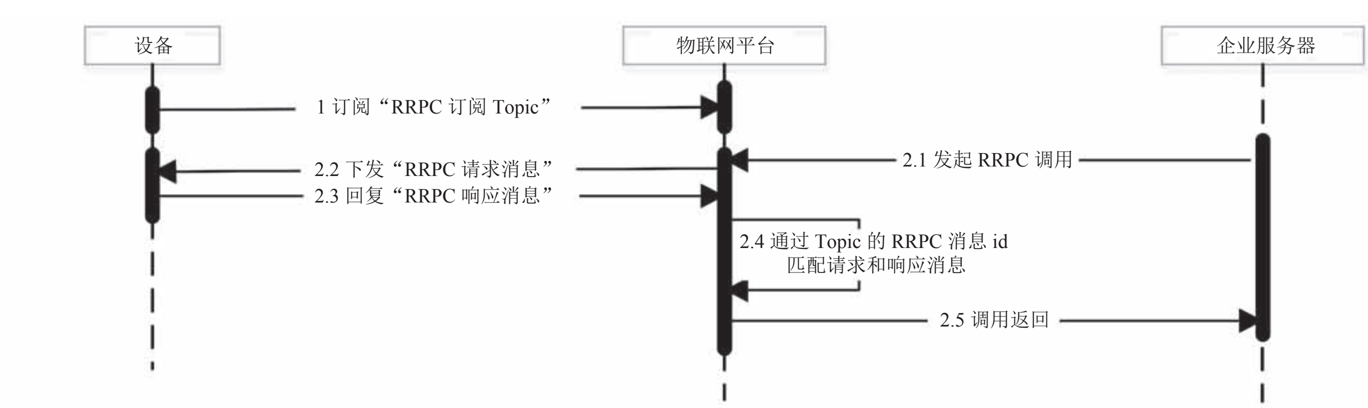


图 3　远程过程调用原理图

Fig. 3　The schematic diagram of revert remote procedure call（RPPC）

果。RRPC 原理如图 3 所示。

具体步骤如下：

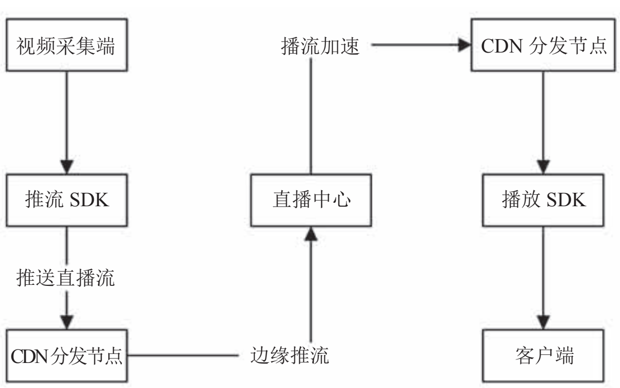
(1) 物联网平台收到来自企业服务器的 RRPC 调用，下发一条 RRPC 请求消息给设备。

(2) 设备收到下行消息后，按照指定 Topic 格式(包含之前云端下发的唯一 RRPC 消息 id) 回复一条 RRPC 响应消息给云端，云端提取出 Topic 中的消息 id，与之前的 RRPC 请求消息匹配上，然后回复给用户服务器。

(3) 如果调用时设备不在线，那么云端会给用户服务器返回设备离线的错误；如果设备没有在超时时间内回复 RRPC 响应消息，那么云端会给用户服务器返回超时错误。

2.2.3 视频直播服务介绍

视频直播服务是基于领先的内容接入与分发网络和大规模分布式实时转码技术打造的音视频直播平台[26-27]，提供便捷接入、高清流畅、低延迟、高并发的音视频直播服务。视频直播的工作原理如图 4 所示。



CDN：内容分发网络；SDK：软件开发工具包

图 4 视频直播原理图

Fig. 4 The schematic diagram of video live

在本系统中，视频直播流程主要分为视频采集、推流、分发、播放几个关键阶段：

(1) 采集，是视频直播开始的第一个环节，地面站接收来自无人机的视频数据，即直播的过程。

(2) 推流与转码，用推流设备或软件推流，在数据传输的整个过程中从采集端到服务器端，再到边缘节点，以及从边缘节点到播放端。为了让采集端的流适配各个平台端不同协议，一般都会在服务端进行转码处理，即将视频文件转成不同格式，如实时消息传输协议(Real Time Messaging Protocol，RTMP)、HLS(HTTP Live Streaming) 和 FLV(FLASH VIDEO) 等不同协议。本系统中，无人机通过微波把视频数据传送至地面站，之后地面站通过三卡设备，把视频推送至视频服务器。

(3) 分发，为了优化终端观看直播的体验，一般都会采用内容分发网络(Content Delivery Network，CDN) 进行内容分发加速，实现高并发等能力。

(4) 客户端播放。

2.2.4 检测识别技术

检测识别是系统的另一重点和难点。本系统主要针对管道 100 m 范围内是否有违章占压(车辆) 和地质灾害进行检测识别。对于车辆的检测识别，本系统利用 SSD(Single Shot MultiBox Detector) 算法。该算法采用 VGG-16 作为基础模型，然后在 VGG-16 的基础上新增了卷积层来获得更多的特征图以用于检测，其网络结构如图 5 所示。对于地质灾害的识别，本系统采用全卷积神经网络(Fully Convolutional Networks，FCN) 进行特征提取，然后使用条件随机场/马尔可夫随机场(Conditional Random Field/Morkov Rondom Field，CRF/MRF) 进行分割识别。FCN 的网络结构如图 6 所示，输入可为任意尺寸的彩色图像，输入与输出尺寸相同，深度为 21(20 类目标＋背景)。实际检测结果如图 7、8 所示。

3 系统功能设计

3.1 数据接入方案

数据接入方案的实现如图 9 所示。

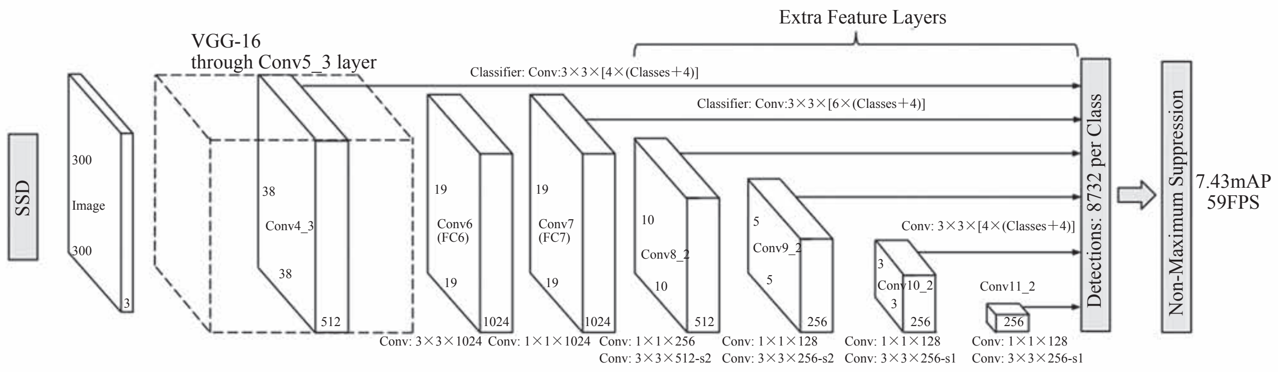


图 5　SSD 网络结构图

Fig. 5　The network structure diagram of single shot multibox detector

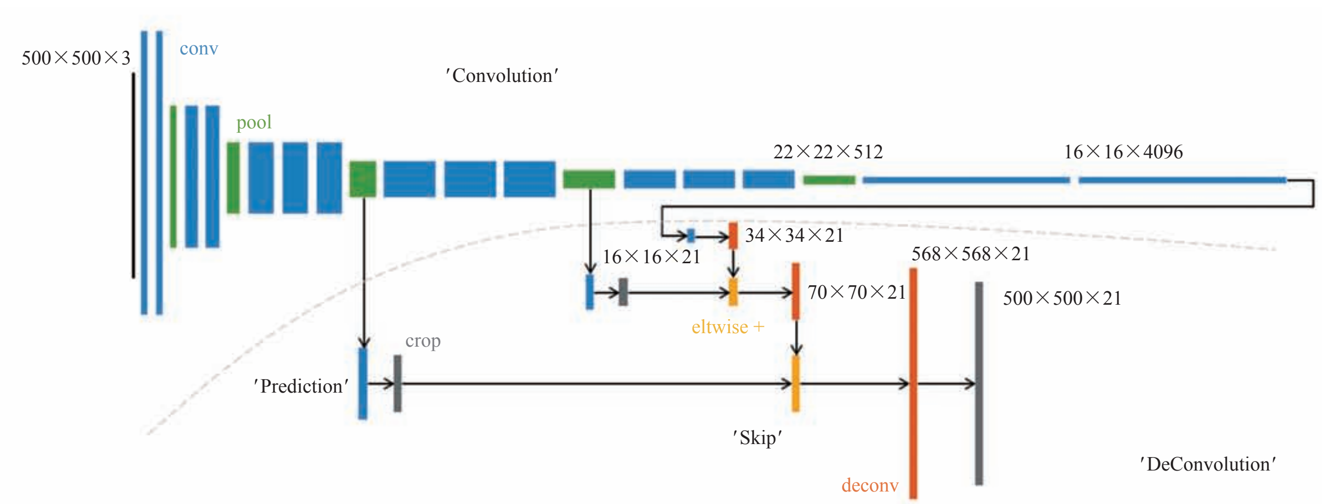


图 6　全卷积神经网络结构图

Fig. 6　The network structure diagram of fully convolutional networks

图 7　车辆识别

Fig. 7　Vehicle identification

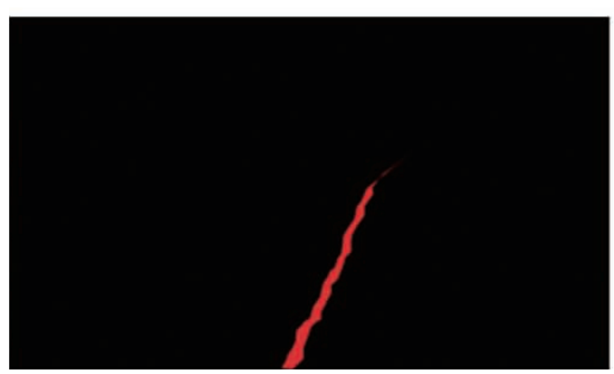
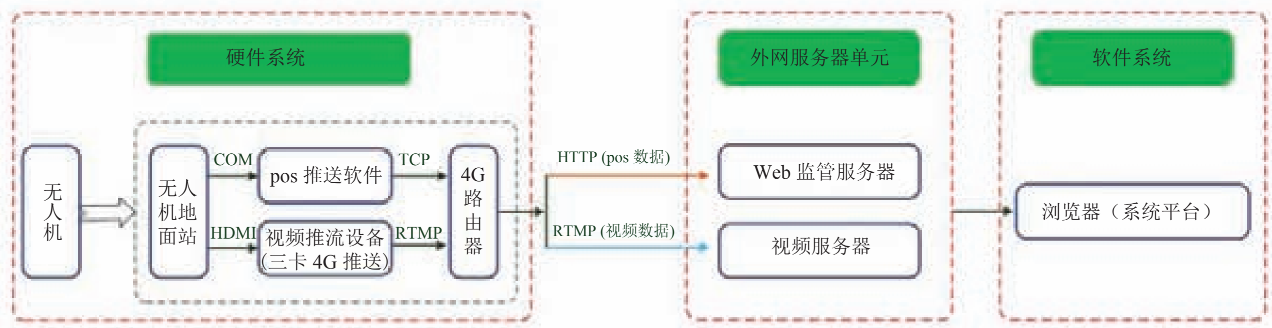


图 8　裂缝识别

Fig. 8　Crack identification



COM：串行通讯端口；TCP：传输控制协议；HDMI：高清多媒体接口；HTTP：超文本传输协议；RTMP：实时消息传输协议

图 9 数据接入方案图

Fig. 9 Data access scheme diagram

无人机航拍的数据，首先通过机载的微波电台传输到无人机地面站，并在地面站将无人机的 pos 数据与视频数据分别采集出来；然后，通过 pos 推送软件和视频推流设备推送至 4G 路由器；最后，转发至外网服务器上。其中，无人机 pos 数据转发到 Web 服务器上，视频数据则转发至视频服务器，最后用户可通过浏览器(客户端平台软件)查看数据。

3.2 系统功能

软件系统是用户的操作平台。该系统是一个把包含地图信息、管道信息、无人机设备信息、属性数据信息和业务数据信息集中处理，以图文和视频综合展现管道详情的智能化系统，在保障油气安全运输方面具有重要作用。该软件系统的具体功能如图 10 所示。

(1)地理信息分系统

该系统主要包括地图显示与图层管理、管道显示与管理。该系统基于 WebGIS 技术，建立标准化的无人机巡检数据模型和可视化平台，并基于 B/S 架构实现综合展示。

(2)巡检控制分系统

该系统主要包括任务管理、实时监测和历史回放。基于开放式开发平台，根据不同场景，实现无人机配置和选型、轨迹规划及无人机业务巡检功能。任务管理功能主要是对无人机需要执行的任务进行添加、删除、修改和查看，实现对飞行任务的管理。每次执行任务前只有在系统先添加任务，才能在客户端实现实时监测和历史监测功能。添加任务中，除了填写无人机的基本信息，还实现了无人机飞行轨迹的规划。

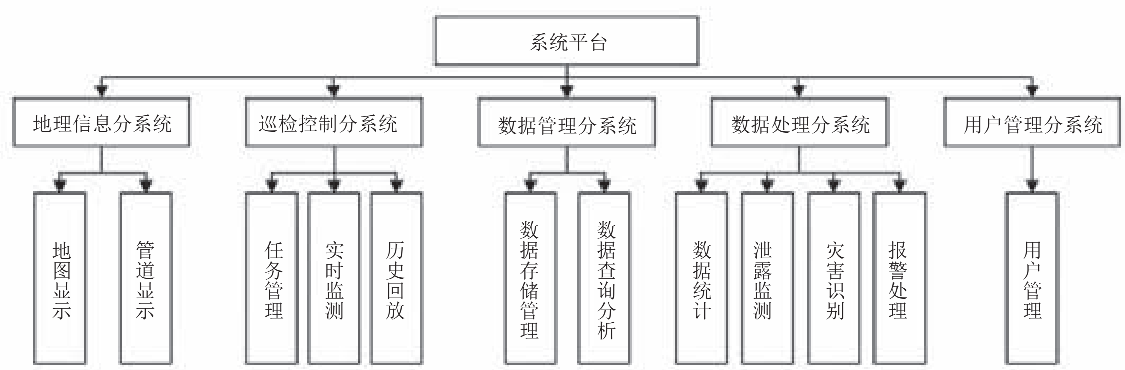


图 10 客户端功能框图

Fig. 10 Client function block diagram

(3)数据管理分系统

该系统包括地图信息、管道信息、无人机设备信息、属性数据信息和业务数据信息等。数据库管理分系统主要是对各种数据的在线管理，在平台可直接进行数据的增删改查，实现数据库管理功能。

(4)数据处理分系统

该系统主要包括数据统计、检测识别和报警处理功能。其中，数据统计用柱状图、折线图、饼状图表示，可直观地看出近来飞行任务的情况。另外，对视频中发现的管道周边有违章占压、地质灾害等情况进行报警，同时填写报警信息并上报，以便工作人员及时做出处理。

(5)用户管理分系统

对用户进行管理，使平台满足多层级、多用户的协同作业和权限分配。

4　系统测试及结果

4.1　系统测试

本系统在陕西榆林油气管线巡检任务中进行了测试应用，巡检距离 50 km，巡检无人机采用 HY-16T 固定翼无人机(图 11)，具体参数如表 2 所示。通过 4G 网络将无人机数据推送到云端服务器，在客户端即应用平台，按实际实验填写相关信息并规划轨迹，提交添加飞行任务，如图 12 所示。当无人机执行任务时，只要数据接入平台，就可以实时监测无人机及航拍的视频数据。视频直播效果如图 13 所示，无人机轨迹参数效果如

图 11　HY-16T 无人机

Fig. 11　HY-16T unmanned aerial vehicle

图 12　添加任务

Fig. 12　Add task

表 2　无人机参数

Table 2　Unmanned aerial vehicle parameters

名称	参数	名称	参数
全长	2.0 m	最大作业高度	海拔 3 500 m（电动）
全高	0.6 m	巡航速度	70～90 km/h
翼展	4.4 m	自主飞行模式	GPS 导航
最大起飞重量	19 kg	测控任务半径（通视条件下）	60 km
电机功率	1 800 W	起降方式	弹射起飞、伞降
最大续航时间	2 h	最大抗风能力	6 级（弹射起飞）
弹射起飞速度	55 km/h	动力系统	高效无刷电机
降落速度	60 km/h	动力电类型	高效锂离子电池

图 14 所示。

系统还对管道危害物进行了测试。巡检任务主要是在滑坡附近，启动系统自动检测识别工具对无人机传回的视频进行智能分析。若检测出有塌方出现，则预警上报。具体实现如图 15、16 所示。

图 13　视频播放

Fig. 13　Video playback

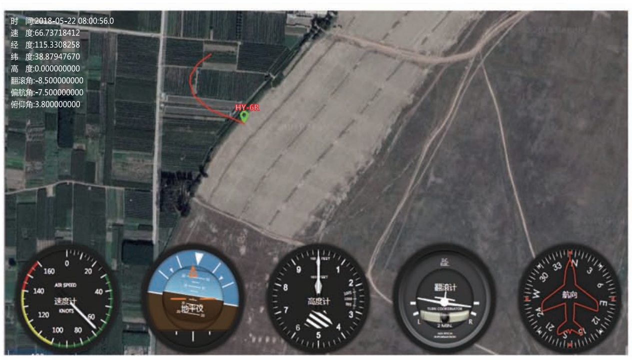


图 14　数据和轨迹显示

Fig. 14　Data and track display

4.2　结果分析

本系统经过多次轨迹测试发现，巡检 50 km 管道，人工至少需要 10 天，而无人机耗时不到 1 h。随后，选取分辨率为 1 080 p，帧率为 25 帧/秒的视频，分别在 WiFi、中国移动 4G、中国联通 4G 和中国电信 4G 进行网络测试。结果显示，在网络稳定情况下，播放画面流畅，基本无延时；在偶尔网络不稳定的情况下，会出现卡顿，视频有短暂的延时，经多次测试，最大延时不超过 200 s。由于延时偶尔出现，可忽略不计。石珺等[26]也提到相关问题，该问题由网络不稳定造成，是目前相关行业普遍存在的。而随着 5G 网络时代的到

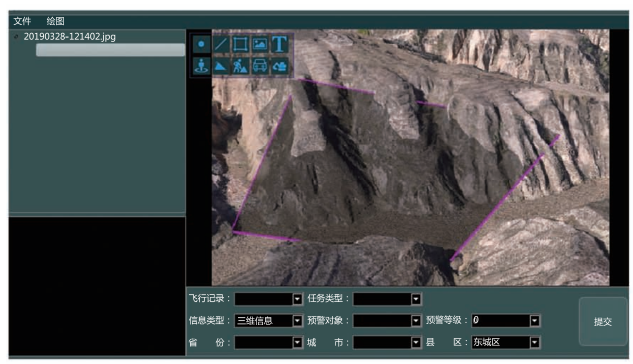


图 15　预警上报

Fig. 15　Early warning report

图 16　预警信息

Fig. 16　Early warning information

来，该问题将迎刃而解。

轨迹数据和添加任务时规划的轨迹误差不超过 10 m；轨迹数据和视频数据的时间误差小于 2 min，确保了视频画面和飞机位置的对应，验证了其实时性强的特点。在最高时速 90 km/h、巡航速度 70 km/h 的条件下，从起飞点到距离起飞点 10 km 外的检查点只需要 10 min，验证了其可用于应急监测。此外，测试过程中，无人机进入人工难以巡检的地势险峻的山坡、谷底，发现常年无法监测到的管道出现了严重锈蚀，对此进行了预警上报。这表明无人机巡检具有环境适应力强、监测范围广、全面性强的优势。

作业中模拟的视频检测识别经多次实验，可成功检测出管道上方出现的违章占压、地质灾害等，能进行有效预警。虽然有部分不太明显的地形和较小车辆没有识别出来，但失败率极低，可忽略不计。重要功能的具体测试结果如表 3 所示。

表 3　功能测试结果

Table 3　Functional test results

系统功能	实验次数	失败次数	成功率（%）
轨迹规划	100	0	100
实时轨迹	100	0	100
实时视频	100	0	100
地质灾害识别	150	1	99.3
车辆识别	200	2	99
预警	200	2	99

目前，国内外在很多领域都已经采用无人机进行巡检，如海洋、农业、航拍等，但还没有一款集数据集中处理与智能分析为一体的综合应用平台。本文基于无人机航拍、云平台和 WebGIS 技术，设计了基于无人机航拍的油气管道监管系统，实现了无人机数据集中处理与智能分析。实验表明，系统实用可靠，可以实时全面地对管道进行监测，保证管道的安全运输。工作人员只需要一台连网的电脑就可以实时监测管道及周边的环境，发现异常可通过网络上报，解决了传统人工通过实地检查、记录、发现异常再上报的工作流程中存在的操作复杂、人力成本高、环境艰苦等问题。目前该系统已在中石化公司试运行。

5　结　论

本文设计的基于无人机航拍的油气管道监管系统，使用户在客户端就可以实时监测油气管道情况，简单实用。该系统结合 WebGIS 技术，实现了地理信息共享；结合视频直播服务，实时观看直播视频，实时有效地了解管道详情，实现了对管道的监测。另外，该系统对油气泄漏和灾情事故也能快速做出应对措施，方便对管道的管理，并且提高了工作效率。针对管道的一些危险情景，该系统还能有效地保证工作人员的安全，对石化部门和相关执法部门的管理工作极有意义。

参 考 文 献

[1] 中国报告网. 2017 年中国油气管道行业发展及展望(上)[EB/OL]. 2018-06-12 [2019-02-20]. http://news.chinabaogao.com/huagong/201806/0612342M22018.html.

[2] 高鹏, 高振宇, 杜东, 等. 2017 年中国油气管道行业发展及展望 [J]. 国际石油经济, 2018(3): 21-27.

[3] 杨伟, 杨帆. 无人机在长输管道常规巡检中的应用 [J]. 能源与节能, 2015(11): 132-133.

[4] 欧新伟, 周利剑, 冯庆善, 等. 无人机遥感技术在长输油气管道管理中的应用 [J]. 科技创新导报, 2011(15): 77-78.

[5] 李器宇, 张拯宁, 柳建斌, 等. 无人机遥感在油气管道巡检中的应用 [J]. 北京测绘, 2016, 35(3): 128-132.

[6] 田建宏, 高生飞, 张萍, 等. 无人机低空航拍遥感在应急测绘保障中的应用 [J]. 甘肃科技, 2015, 31(4): 57-61.

[7] 李忠强, 唐伟, 张震, 等. 无人机技术在海洋监测中的应用研究 [J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(7): 42-44.

[8] Bartholmai M, Neumann P. Micro-drone for gas

measurement in hazardous scenarios via remote sensing [C] // Wseas International Conference on Remote Sensing, 2010: 149-152.

[9] 喻言家, 雍岐卫. 无人机油气管道巡线系统发展现状及建议 [J]. 天然气与石油, 2017, 35(2): 22-23.

[10] Connolly M, Buchan P. The use of multi rotor remotely operated aerial vehicles (ROAVs) as a method of close visual inspection (CVI) of live and difficult to access assets on offshore platforms [C] // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2014.

[11] 郭保录, 李朝荣, 乐洪宇. 国外无人机技术的发展动向与分析 [J]. 红外, 2014, 35(3): 37-42.

[12] Bondur VG. Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas areas and facilities [J]. Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 2011, 47(9): 1007-1018.

[13] 康煜姝, 武斌. 无人机在油气长输管道中的应用 [J]. 当代化工, 2015, 44(8): 2045-2047.

[14] 高姣姣. 高精度无人机遥感地质灾害调查应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

[15] Miao R, Song J, Zhu YQ. 3D geographic scenes visualization based on WebGL [C] // 2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics, 2017: 1-6.

[16] Yu CH. Research on emergency logistics decision support system design under data ming & WebGIS technology [C] // 2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS), 2016: 375-378.

[17] Du K, Chu J, Sun Z. Design and implementation of monitoring system for agricultural environment based on WebGIS with Internet of Things [C] // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016: 171-178.

[18] Cardoso D, Alves R, Pires JM, et al. Gisplay-extensible web API for thematic maps with WebGL [C] // International Conference on Computational Science and Its Applications, Springer, Cham, 2017: 674-689.

[19] 徐光岩. 基于移动 GIS 油田管线巡检系统设计与实现 [D]. 西安: 西安大学, 2009.

[20] 朱本廷. 基于 WebGIS 的油气管道事故应急救援系统模型研究 [D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2010.

[21] 吴佳怡, 韩李涛, 石梦, 等. 基于 GIS 的石油天然气管道综合监管系统——以青岛市黄岛区为例 [J]. 北京测绘, 2016, 31(3): 128-132.

[22] 赵铁松, 王晓云, 李伟, 等. 基于 B/S 架构和开源 WebGIS 平台的气象观测站网可视化系统 [J]. 气象科技, 2013, 41(1): 57-61.

[23] 任岳森, 罗美雪, 孙芹芹, 等. 基于 WebGIS 的海洋信息共享发布系统平台 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(10): 22-25.

[24] 张楠西, 赵德群, 石珺, 等. 基于 WebGIS 的海事监测系统的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(6): 62-66.

[25] 胡栋鹏, 胡晶. 基于 OpenLayers 的矢量数据可视化系统 [J]. 计算机产品与流通, 2018(2): 165-166.

[26] 石珺, 赛景波, 张楠西, 等. 基于 RED5 无人机直播系统的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(8): 100-103.

[27] 马燕, 王磊, 席岩, 等. 流媒体实验平台搭建与研究 [J]. 广播与电视技术, 2011, 38(11): 46-46.