引文格式：刘运才,程志新,王帅,等. 北斗三号自动化监测系统在南水北调中线工程的应用[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):109-113. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.04.024

北斗三号自动化监测系统在南水北调中线工程的应用

刘运才[1]，程志新[2]，王　帅[1]，王玲玲[1]，罗喻真[2*]
（1. 中国南水北调集团中线有限公司天津分公司，天津 300380；2. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：为监测南水北调中线干线天津辖区的沉降状态，建设了北斗三号(BDS-3)自动化沉降监测系统，由85个北斗监测站，17个基准站、数据收发中心、数据解算平台和云平台服务器组成。采用与国家CORS基准站联测和双基准站解算的设计模式，克服了基准站不均匀沉降的问题。通过分析本系统2023年的监测数据，验证了系统数据内外符合精度优于5 mm，并与InSAR沉降监测结果整体趋势一致，证明了本系统的精确性和可靠性。

关键词：BDS-3；南水北调；自动化监测系统；沉降监测
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0109-05

Application of Beidou-3 Automatic Subsidence Monitoring System in the South-to-North Diversion Middle Route Project

LIU Yuncai[1], CHENG Zhixin[2], WANG Shuai[1], WANG Lingling[1], LUO Yuzhen[2]
(1. Tianjin Branch of China South-to-North Diversion Middle Route Corporation Limited, Tianjin 300380, China;
2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To monitor the subsidence status of Tianjin jurisdiction of the main line of South-to-North Diversion Middle Route, we constructed the Beidou-3 automatic subsidence monitoring system. This system consists of 85 Beidou monitoring stations, 17 datum stations, data transceiving and receiving centers, data solving platform and cloud platform server, and adopts the design mode of joint measurement with the national CORS benchmark station and dual benchmark stations solving, which overcomes the problem of uneven settlement of benchmark stations. By analyzing the monitoring data of this system in 2023, we found that the internal and external conformity accuracy of this system were better than 5 mm. The monitoring results were consistent with the InSAR subsidence monitoring results, proving the accuracy and reliability of this system.

Key words: Beidou-3, South-to-North Diversion Project, automatic monitoring system, subsidence monitoring

南水北调中线干线工程天津段，输水线路长度超过150 km，穿过两处大范围漏斗状沉降区域。华北平原京津唐一带最大年沉降量高达0.10 m以上，区域沉降可能造成保水堰下沉起不到保水作用，影响工程的输水安全[1]。针对此类大型水利工程，常利用合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）技术进行沉降监测[2-3]，虽然InSAR能够提取地表微小形变信息，且具有受天气影响小、覆盖范围大、成本低、测量精度高的优势，然而，InSAR技术点位分辨率较低，数据分析和观测时间都严重滞后。传统的水准测量、三角高程测量[4]等方法外业工作强度大、周期长、时效性差，因此需要一种适用于长距离线性输水工程的快速解算、实时性强、自动化的沉降监测系统。

自2020年7月1日北斗三号卫星导航系统（BDS-3）建成并投入使用，BDS-3以其精度高，独立自主可控等优势迅速获得推广，在国家重大工程的高精度沉降监测方面发挥了重要作用[4]。如桥梁、铁路、天津南港LNG接收站等大型工程等都采用了BDS-3系统进行高精度沉降监测[5-8]。

为保障南水北调工程输水安全，掌握南水北调干线天津辖区重点水工建筑物的实时沉降状态，提高南水北调工程智能化自动化安全监测水平，天津分公司于2022年建设了BDS-3自动化沉降监测系统，并在2023年稳定运行一年。

1　BDS-3沉降监测系统建立

1.1　监测站网分布

南水北调中线干线天津段155 km输水线路采用BDS-3沉降监测系统，沿线布设85个监测点，间隔约2 km，编号从JC01到JC85。由于监测站网为狭长线状，几何强度差，可靠性不高，且途径漏斗区域，存

第一作者简介：刘运才（1990—），本科，工程师，从事工程管理工作，E-mail：844481654@qq.com。
通信作者：罗喻真（1986—），硕士，研究方向为精密工程测量、安全监测，E-mail：181258956@qq.com。

在不均匀沉降问题。为解决这些问题，沿线布设17个基准站，间隔10 km，每2个基准站之间平均有5个监测站，保证基线距离小于5 km，并采用双基准站解算模式，提高监测精度。同时，选取3个框架基准站，每月与国家CORS基准站联合解算，更新基准站高程，解决不均匀沉降问题。为验证精度，在JC85点安装沉降位移计，并在沿线安装7个角反射器，利用SAR数据对重点区域进行高精度监测。

1.2 沉降监测系统组成

BDS-3沉降监测系统是由四部分组成：北斗监测站、数据收发中心、数据解算平台和云平台服务器。

为了实现实时监控，将北斗监测数据通过4G通信网络，传递到数据收发中心，将原始数据进行备份后再通过局域网络上传到数据处理中心进行自动化解算，最终将解算结果通过云平台发布，相关人员凭借查看权限通过云平台服务器实时了解沉降状态，数据流程如图1所示。

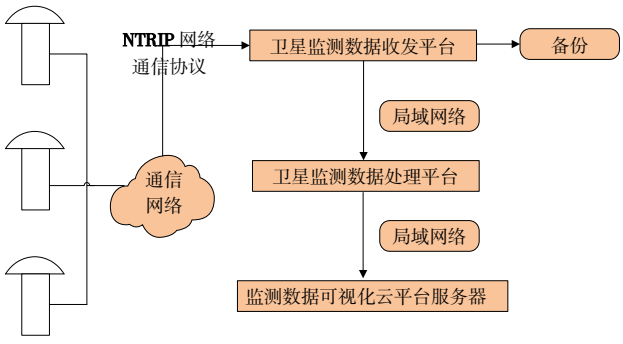


图1 北斗沉降监测系统数据流程

系统主要以24 h解算一组监测点沉降数据的解算模式，同时为了满足特殊情况的应急监测，也兼容1 h和5 min解算一次沉降的解算模式。

1.2.1 北斗监测站

北斗监测站主要由3个部分组成：①国产北斗三号接收机及接收天线用于接收北斗系统的信号并采用4 G网络向数据处理中心上传观测数据；②供电系统采用太阳能+蓄电池的供电方案。太阳能板面充分考虑当地日照时长，可至少满足连续14 d阴雨天气的持续供电，基准站为保证长期稳定运行，采用市电+太阳能双保险模式供电。③防雷系统置了避雷针、接地系统、电源线感应避雷器等防雷措施，有效防止雷电对监测自动化系统的破坏。

1.2.2 数据收发平台

各个北斗监测站的卫星数据通过无线传输的方式，利用NTRIP网络通信协议，将编码为RTCM二进制格式的卫星观测数据传送至数据收发平台，并再上传到解算平台前，解码为RINEX格式并存档备份，供后续数据解算平台使用。

1.2.3 数据解算平台

将所有监测点数据接入数据解算平台后，对需要解算的站点进行解算间隔、滤波参数、星座系统、解算核心、解算策略等系统化配置，生成解算任务，通过消息传递机制对解算任务进行分发，实现大规模并行解算。

根据任务要求，自动截取不同时间间隔数据按24 h、1 h、5 min 3种模式解算。数据解算关键步骤如下：①观测文件、广播星历、天线文件等特定文件的读取；②利用标准单点定位计算GNSS概略坐标，剔除过大观测粗差和卫星星历粗差；③对卫星、接收机的天线相位中心进行改正、固体潮改正、码偏差改正、相对论效应，消除因各类系统性误差；④对于短基线，忽略电离层延迟误差；对于长基线，采用LC无电离层组合消除电离层延迟的影响；⑤利用Saastamoinen模型修正对流层延迟、静力学延迟导致的误差[9]；⑥对于高程相近的短基线，认为基准站和流动站间的对流层湿延迟相同，忽略该延迟，对于高程相差较大或较长的基线，认为基准站和流动站间湿延迟不同，将其设为未知数[10]；⑦根据卫星高度角选择参考卫星，组成伪距、相位和多普勒观测值的单差、双差、三差观测值；⑧利用TECR+MW方法探测周跳，并初始化模糊度参数[11]；⑨逐历元估计模糊度参数、坐标参数、对流层湿延迟参数（如有），根据模糊度固定条件固定模糊度参数；⑩逐历元探测观测值粗差，自适应进行方差膨胀抗差处理，剔除粗差或削弱粗差的影响[12]；⑪逐历元反向卡尔曼滤波，得到解算结果。

1.2.4 云平台服务器

云平台服务器是一个可视化的远程监测平台，集成了数据接收、任务调度、精密处理和结果播发模块，可以远程对监测点沉降进行实时监测，通过线上传输的方式将监测数据发送给系统来实时存储、解算、分析和展示，实现系统互联互动。

用户通过账号密码登录云平台，可查看各监测点的沉降数据，并可按指定的时间范围生成沉降曲线。系统支持数据扩展，可支持新增站点或其他传感器，纳入云平台统一管理。

1.3 沉降监测点高程解算关键模式

1.3.1 与国家CORS基准站联测更新基准站坐标

整个监测网由17个基准站和85个监测点组成。

因为监测站点分布155 km，途经2个不均匀沉降区，因此基准点所在位置也存在不均匀沉降，如果基准点的坐标更新不及时，会造成监测点高程解算不准确。

为了有效提高解算精度、可靠性和时效性，采用了与国家CORS基准站联测更新系统坐标的模式，解决了本系统基准站高程更新的难题，解算模式如图2所示。

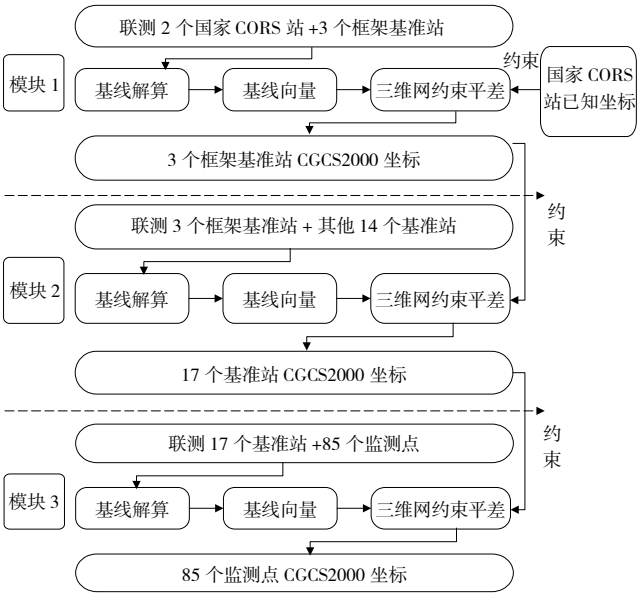


图2　BDS-3沉降监测系统自动化解算流程

利用CORA GPS计算对2种处理模式下重复基线较差、异步环闭合差以及最弱点进行统计，统计结果见表1、表2。明显可见2个CORS站+3个框架基准站再到14个基准站的解算模式优于2个CORS站+17个基准站的模式。

表1　解算误差统计/%

解算模式	误差项目	范围			
		[0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]
2CORS+3框架基准站	重复基线较差	96.7	3.3	0	0
	异步环闭合差	100	0	0	0
2CORS+17基准站	重复基线较差	50	30	20	0
	异步环闭合差	80	13.3	6.7	0

表2　最弱点统计表/mm

解算模式	点名	MX	MY	MZ	MP
2CORS+3框架基准站	JZ11	0.9	1.6	1.4	2.3
2CORS+17基准站	JZ17	4.5	5.3	7.1	10.0

1.3.2　双基站计算监测点模式

为了便于对监测点进行较高精度的数据处理，监测网采用两端的基准站解算其间的变形监测点，实现不同频率的监测点高程更新。每个监测点的CGCS2000坐标，都由附近的2个基准站进行2次基线解算，取两端基准站解算结果加权平均值，计算该点的CGCS2000坐标。结合基准站和沿线距离，将该工程划分为16个区域，每个区域包含的3~6个监测点。

采用双基站解算模式，不仅有效提高了系统的监测点解算精度，还可以在基准站数据暂时丢失或者出错时，仍能采用单基准站解算的方式保证监测点数据正常解算，从而提高了系统的稳定性。

为验证本套系统采用的双基站解算模式合理，结果符合系统设计精度要求。分别采用双基准站模式和单基准站模式，提取系统22年9月5日—7日采集的3日观测数据，对数据处理采用基线解算、质量检验和整网平差，分别获得两组85个监测点在CGCS2000下的坐标。利用CORA GPS计算对2种处理模式下重复基线较差、异步环闭合差以及最弱点进行统计，统计结果见表3、4。

表3　解算误差统计/%

解算模式	误差项目	范围			
		[0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]
单基站解算	重复基线较差	65	20	15	0
	异步环闭合差	61.5	38.5	0.0	0
双基站解算	重复基线较差	100	0	0	0
	异步环闭合差	85.7	7.15	7.15	0

表4　最弱点统计表/mm

解算模式	点名	MX	MY	MZ	MP
单基站解算	JC21	3.8	4.5	6.3	8.6
双基站解算	JC02	1.5	2.6	2.3	3.8

1.4　1985国家绝对高程获取

为了保持基准站网观测成果的连续性，并满足输水调度等方面延展应用的需求，本项目经国家一、二等水准点高程引测，结合先进的高程异常建模技术，获取各基准站、监测点及其建筑物顶部的1985国家高程，实现监测成果与南水北调工程现有高程基准的统一[14]。1985国家绝对高程获取的技术流程如图3所示。

2　沉降监测系统的精度验证

在整个BDS-3沉降监测系统建成后，为了检验该沉降监测结果的精度和可靠性，进行了内符合精度验证实验和外符合精度验证实验。

2.1　内符合精度验证实验

选取天津管理处的13个监测点的12个月监测数据，解算出间隔24 h高程（日解），每个监测点有365个高程点。对每个高程点，以第一个高程值为初值，所有

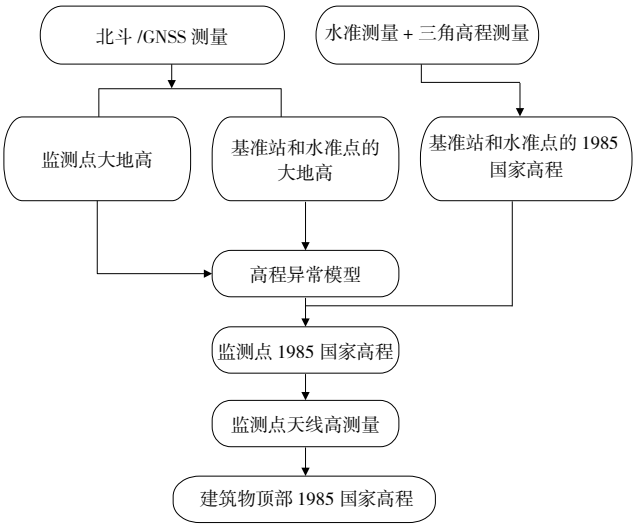


图3 BDS-3沉降监测系统1985国家绝对高程技术流程

高程值减去初值，得到该点的沉降序列。基于该沉降序列计算每个监测点的内符合精度[15]。部分监测点内符合精度统计结果见图4。

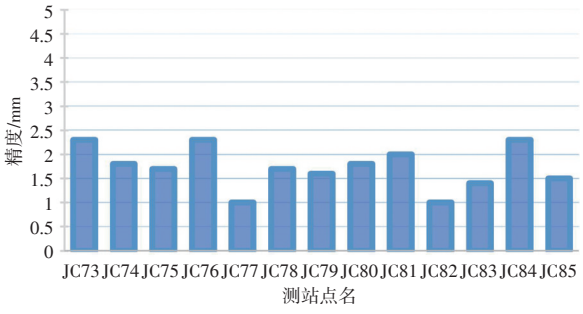


图4 实验区域内监测点的符合精度

由图4可以看出，实验区域中各点日解的精度均优于2.5 mm，平均内符合精度为1.7 mm。

2.2 外符合精度验证实验

外符合精度实验采用与沉降位移计对比实验。在监测点JC85的GNSS天线下方加装沉降位移计，通过沉降位移计的调节量和GNSS监测高差对比，评价监测系统的外精度指标。位移计的测量精度为0.2 mm，量程最大90 mm，在短时期内近似作为该点高程变化的真值。

在一个月内的不同时间段对位移计进行了5次随机调节。随后立即读取该点BDS-3沉降系统监测的沉降量与位移计调节沉降量进行对比。

经外符合精度测试表明，本系统北斗沉降监测误差绝对值均小于2.5 mm，标准差为1.5 mm，完全满足±5 mm沉降监测精度的要求。

2.3 沉降监测系统与InSAR监测数据对比

2022年12月—2023年12月，南水北调天津公司收集了工程范围内的Sentinel-1升降轨数据，并在工作区内选取合适点位安装了角反射器。利用短基线时间序列分析方法进行InSAR数据分析处理，获得该阶段天津干线工程沿线地区地面沉降信息。共有InSAR地面沉降监测点133万个，点密度达到310 p/km^2。

将2023年天津干线71个重要输水建筑物的年沉降量InSAR监测结果和BDS-3系统监测结果进行统计对比，BDS-3沉降监测系统得到的各监测点沉降趋势与InSAR数据得到的沉降趋势基本一致，吻合程度高，两者偏差绝对值最大23 mm，标准差为12 mm，可以证明BDS-3沉降监测系统长期监测成果的可靠性。

两者之间的误差原因为InSAR的沉降量为大范围监测得到的内插值，BDS-3系统监测数据为固定点精确值，两者测量的具体位置略有不同，因此存在一定的误差。

3 BDS-3沉降监测系统的实际应用

3.1 沉降监测系统的运行情况

1）北斗沉降监测系统自2022年12月起建成投入运行，截至2023年12月，已稳定运行1 a多了。在此期间，北斗监测系统稳定运行，数据完整度99%以上。北斗监测系统的建立为南水北调管理部门提供了重要的沉降参考数据。

2）北斗沉降监测系统大幅提高了南水北调中线沉降监测效率的同时，也极大降低了沉降监测的费用、时间和人力等成本。

3）管理部门已经将北斗监测系统纳入工程安全管理制度，要求责任人每天登陆北斗监测系统巡查各监测点沉降情况，并每月上报各监测点月度沉降数据，更及时有效的掌控了南水北调工程的输水安全。

3.2 沉降情况分析

从2023年1月至12月的BDS-3沉降监测系统的监测数据来看，天津干线途径两块明显的漏斗沉降区域，西侧沉降区范围为4#保水堰至44#通气孔，最大年沉降量为−74 mm·a^{-1}。东侧沉降区范围为52#通气孔至64#通气孔范围，最大年沉降量为−38 mm·a^{-1}。漏斗沉降区外部东西两侧基本保持稳定，2023年内整体略有抬升，东侧3#通气孔至23#通气孔，平均抬升量为10 mm，西侧63#通气孔至外环河出口闸范围的天津片区，2023年内略有抬升，平均抬升4 mm·a^{-1}。其原因是随着南水北调工程的建成，大幅减少了河北天津地区地下水开采量，再加上2023年雨水充足，地下水水位回升，造成地面高程略有抬升。

4 结 语

本文介绍了BDS-3沉降监测系统的建设架构、解算方式，精度验证和运行情况，通过精度试验以及与InSAR的结果对比，验证了该监测系统优于±5mm的沉降监测精度和可靠的监测结果。说明了BDS-3沉降监测系统在南水北调中线干线天津区沉降监测数据的稳定性和可靠性，对比传统水准和InSAR监测手段具有实时性，持续性，自动化程度高，智能化程度高等特点，为管理部门掌握南水北调工程的沉降状态发挥了重要作用[15]。

参考文献

[1] 刘佳,王玲玲,谢宜静. 区域沉降对保水堰保水性能影响研究[J]. 东北水利水电,2023,41(7):57-59

[2] 魏以宽,闵天,邹崇尧,等. 基于InSAR的武汉地区2016—2021年地面沉降监测[J].地理空间信息,2023,21(10):69-72

[3] 凌峻,张伟. 基于SBAS-InSAR的南水北调淅川县段沉降监测与分析[J]. 人民珠江,2023,44(增刊):207-212

[4] 杨元喜,任夏,贾小林,等.以北斗系统为核心的国家安全PNT体系发展趋势[J].中国科学(地球科学),2023,53(5):917-927

[5] 高建东,王勇,安江雷,等. 一种多源地面沉降监测数据融合方法及其应用[J]. 测绘通报,2023(10):158-162

[6] 朱颖,赵欣欣,孙大奇,等. 北斗卫星监测大跨桥梁基础变位算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(2):168-174

[7] 田孟磊. 北斗定位技术在高速铁路沉降变形监测中的应用[J]. 智能城市,2021,7(12):71-72

[8] 金樱,卢琳,马瑞莉,等. 天津南港LNG接收站沉降监测点位布设[J]. 煤气与热力,2022,42(4):12-14

[9] 谭勇,姚宜斌. 常用对流层延迟修正模型的适用性分析及精化[J]. 测绘科学,2022,47(6):15-20

[10] 刘英,王皓,高海阳,等. 三种对流层延迟改正模型的精度比较分析[J]. 北京测绘,2023,37(6):829-834

[11] 王福丽,韦铖,李明君. 联合MW和TECR法进行GPS/GLONASS双频非差数据周跳的探测与修复[J]. 城市勘测,2016(5):87-90

[12] 景策,黄观文,张勤,等. 方差膨胀模型用于GNSS/加速度计融合变形监测[J]. 大地测量与地球动力学,2023,43(5):491-497

[13] 王剑超,高成发,刘濛濛,等. 北斗三号带状CORS系统基准站布设距离研究[J]. 测绘工程,2024,33(1):62-70

[14] 武浩,邹进贵,赵胤植,等. 多种高程拟合方法在大型干线工程中的应用研究[J]. 测绘技术装备,2023,25(3):62-66

[15] 张熙. GNSS数据质量评估及预处理相关问题的研究[D].郑州:信息工程大学,2020

（上接第90页）

[2] Yang J, Du Y, Wu C, et al. Growth and Development Characteristics of Super-high-yielding Mid-season Japonica Nice[J]. Frontiers of Agriculture in China,2007,1(2):166-174

[3] 丁艳锋,赵长华,王强盛. 穗肥施用时期对水稻氮素利用及产量的影响[J]. 南京农业大学学报,2003,26(4):5-8

[4] 徐寿昌,熊伟,徐华德,等. 三交杂交水稻的育种研究[J]. 江西农业学报,2002,14(3):12-16

[5] 孔志平,竺婧,黄成裕,等. 2020年气象条件对江苏水稻生产的影响[J]. 湖北农业科学,2021,60(增刊):162-165

[6] 罗明帆,王冬至. 基于长时序遥感影像的珠三角水稻种植范围提取[J]. 地理空间信息,2021,19(7):6-10

[7] 林娜,陈宏,李志鹏,等. 基于GF-1号影像的南方水稻种植信息提取[J]. 地理空间信息,2021,19 (3):60-63

[8] 郑小波,陈娟,康为民,等. 利用MODIS监测高原水稻生育期和长势的方法[J]. 中国农业气象,2007,28(4):453-456

[9] 孙华生,黄敬峰,彭代亮. 利用MODIS数据识别水稻关键生长发育期[J]. 遥感学报,2009,13(6):1 122-1 137

[10] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, et al. A Crop Phenology Detection Method Using Time-series MODIS Data[J]. Remote Sensing of Environment,2005,96(3-4):366-374

[11] 杨振忠,方圣辉,彭漪,等. 基于机器学习结合植被指数阈值的水稻关键生育期识别[J]. 中国农业大学学报,2020,25(1):76-85

[12] 徐建鹏,王杰,徐祥,等. 基于RAdam卷积神经网络的水稻生育期图像识别[J]. 农业工程学报,2021,37(8):143-150

[13] Arino O, Bicheron P, Achard F, et al. The Most Detailed Portrait of Earth[J]. Eur Space Agency,2008,136(5):25-31

[14] Zhang M L, Zhou Z H. ML-KNN:A Lazy Learning Approach to Multi-label Learning[J]. Pattern Recognition, 2007,40(7):2 038-2 048

[15] Chou P A. Optimal Partitioning for Classification and Regression Trees[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,1991,13(4):340-354

[16] Noble W S. What is a Support Vector Machine?[J]. Nature Biotechnology,2006,24(12):1 565-1 567

[17] Huang D, Xu S, Sun J, et al. Accuracy Assessment Model for Classification Result of Remote Sensing Mage Based on Patial Sampling[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017,11(4):1-13