



2024水利企业发展论坛

现代雨水情测报技术及装备 构筑防洪避险“三道防线”

陆云扬

水利部南京水利水文自动化研究所

2024年9月24日 青岛

目录/Contents

01

“三道防线” 基本概念及需求

02

“第一道防线” 天、空基技术及装备

03

“第二道防线” 地基技术及装备

04

“第三道防线” 水位流量监测技术及装备

05

结语及建议



01

“三道防线” 基本概念及需求



一、“三道防线”基本概念及其需求



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

基本术语

三道防线

- “三道防线”是以流域为单元，由气象卫星和测雨雷达、雨量站和水文站组成的雨水情监测预报体系。通过“天空地”立体监测手段对流域雨水情进行实时监测和预报预警，以便及时采取措施应对可能出现的洪涝等灾害。



一、“三道防线”基本概念及其需求

天基： 气象卫星
静止：风云四号、葵花九号；
极轨：风云三号—G星

空基： 测雨雷达

第一道防线

构建卫星-雷达第一道防线有助于延长洪水预见期、提高精准度

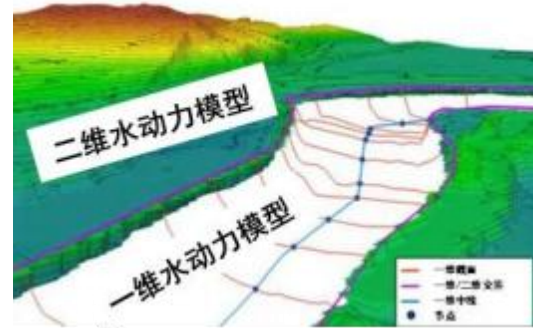
地基： 雨量站

第二道防线

第三道防线

水文站

洪水演进水动力学模型





一、“三道防线”基本概念及其需求



Since 1940

南京水利水文自动化研究所

“概念”解读

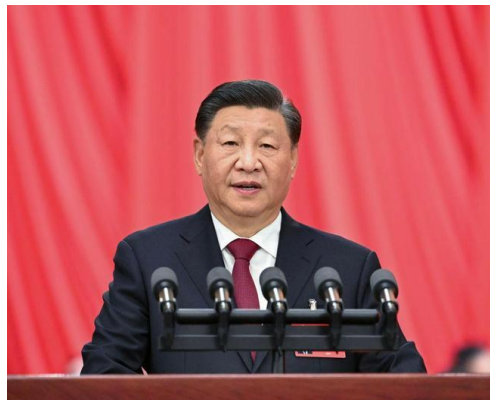
- 第一道防线是气象卫星和测雨雷达加产汇流水文模型、洪水演进水动力学模型，第二道防线是雨量站加产汇流水文模型、洪水演进水动力学模型，第三道防线是水文站加洪水演进水动力学模型，每一道防线都要实现监测信息有效转化，发挥监测预报作用。
- 第一道防线要将可能降雨转化为可能发生的洪水，实现“云中雨”洪水预报作业；第二道防线要将实际降雨量转化为可能发生的洪水；第三道防线要将洪峰、洪量等监测信息转化为洪水演进情况并传递到下游断面。



一、“三道防线”基本概念及其需求



Since 1940
南京水利水文自动化研究所



- 党中央高度重视防灾减灾工作，习近平总书记提出“两个坚持、三个转变”防灾减灾救灾理念，坚持“预”字当先，关口前移，不断提升监测预警能力，可以让有关部门对灾害早发现、早处置，为群众提前转移避险提供时间保障。

- 李国英部长在今年6月现代化雨水情监测预报体系建设现场推进会的讲话中指出：
 - 现代化雨水情监测预报体系的**总体架构**：“一二三四”；
 - 抓住**两项重点**：第一项是硬件，即**现代化水文信息感知与监测设备**
 - “云中雨”、“落地雨”、水流、下垫面





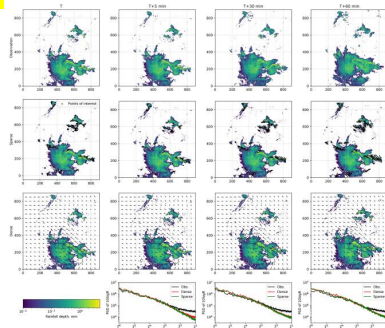
一、“三道防线”基本概念及其需求



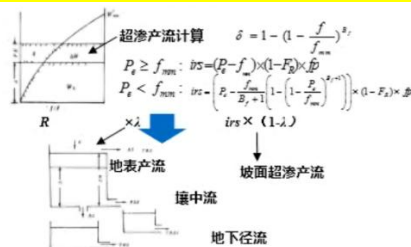
Since 1940
南京水利水文自动化研究所

- 前瞻、及时、准确的雨水情监测预报信息，是做好洪水灾害防御工作的重要前提和保障。暴雨洪水往往来得快、来得急，传统监测预报手段预见期短、预报精准度不高。习近平总书记强调，要加强雨情水情监测预报预警，补好灾害预警监测短板，科学精准预测预报。党的二十届三中全会对完善风险监测预警体系作出部署。要在洪水灾害防御中赢得先机，就必须以流域为单元，构筑雨水情监测预报“三道防线”，从“落地雨”监测预报向“云中雨”监测预报转变、从本站洪水测报向洪水演进传导预报转变，形成贯通“云雨水”、覆盖“天空地水工”的完整监测预报链条，实现延长洪水预见期与提高洪水预报精准度的有效统一。

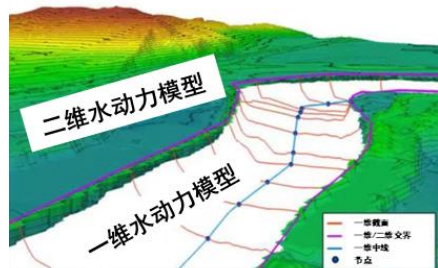
短临降雨预报模型



产汇流水文模型



洪水演进水动力学模型

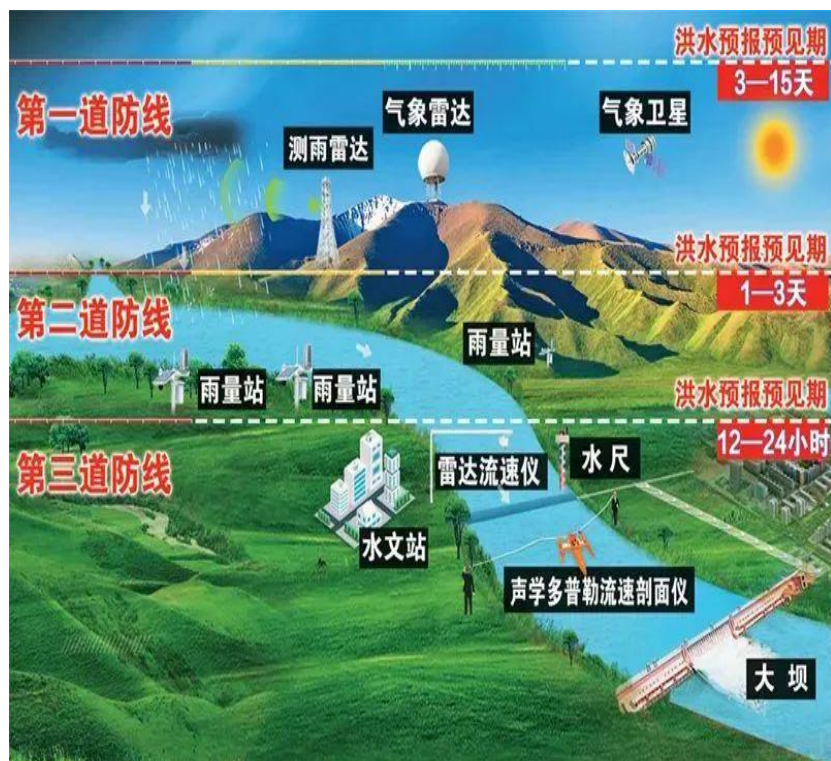




02

“第一道防线” 天、空基技术及装备

第一道防线定义



“第一道防线”由气象卫星和测雨雷达加降雨预报模型、产汇流水文模型、洪水演进水动力学模型组成，实现对“云中雨”监测预报。以流域为单元解析气象卫星数据，开展强降雨定量化预报预警，运用测雨雷达对近地面大气中的液态水开展实时超精细化监测和短临暴雨预警，利用激光雷达更新提取下垫面数据，耦合模型对“降雨—产流—汇流—演进”洪水形成演进全过程进行分析推演，在降雨之前就对可能发生的洪水作出预报。雨水情监测预报“第一道防线”的技术装备为采用**天基技术的气象卫星**和采用**空基技术的测雨雷达**，主要功能是对区域降雨进行监测预报预警，实现大范围降雨空间分布的实时监测和洪水预报预见期3~15天的预报预警，同时与第二道、第三道防线联合运用，提高洪水预报准确率，**延长预见期**。

“第一道防线” 天基技术及装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

云中雨

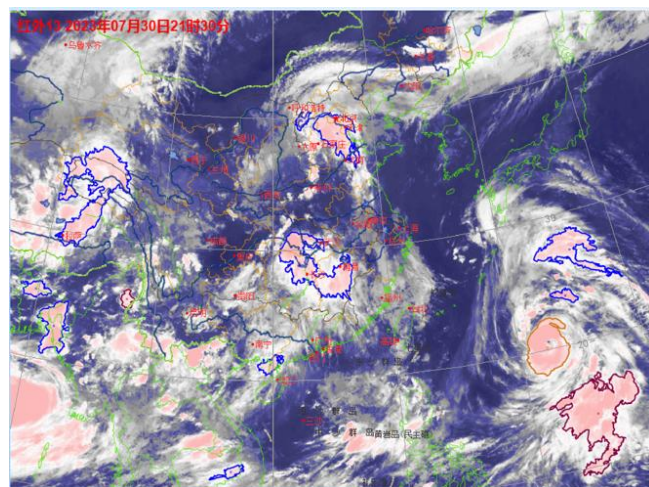
落地雨

卫星遥感降雨监测

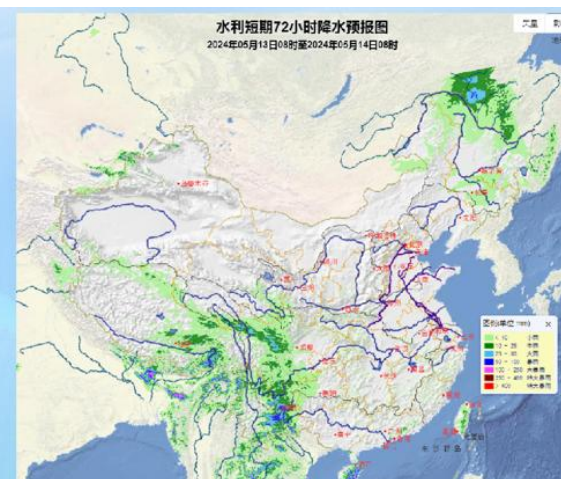
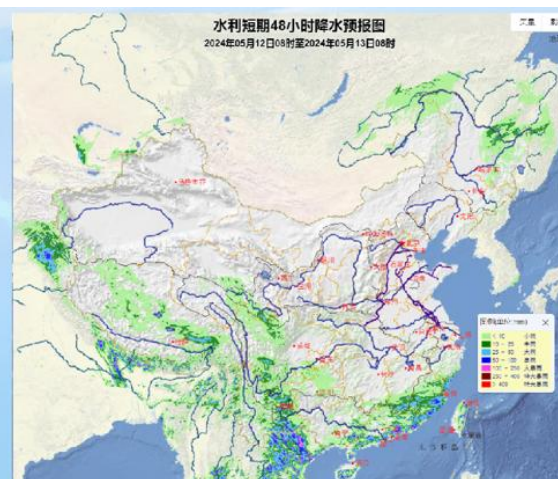
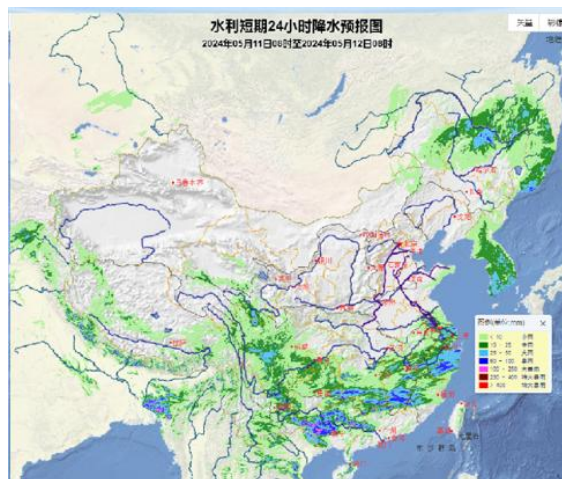
GNSS水汽含量监测

水利测雨雷达

- ❑ 卫星遥感测雨技术:大范围空间连续的观测
- ❑ 数据获取: 共享, 中国风云4号、日本葵花9号等 (静止卫星)
- ❑ 时空分辨率: 0.5~4km、15min
- ❑ 发展本地化数据产品的适应算法, 提高卫星降水监测精度



卫星云图暴雨云团预警图



水利短期24、48、72h降水预报图

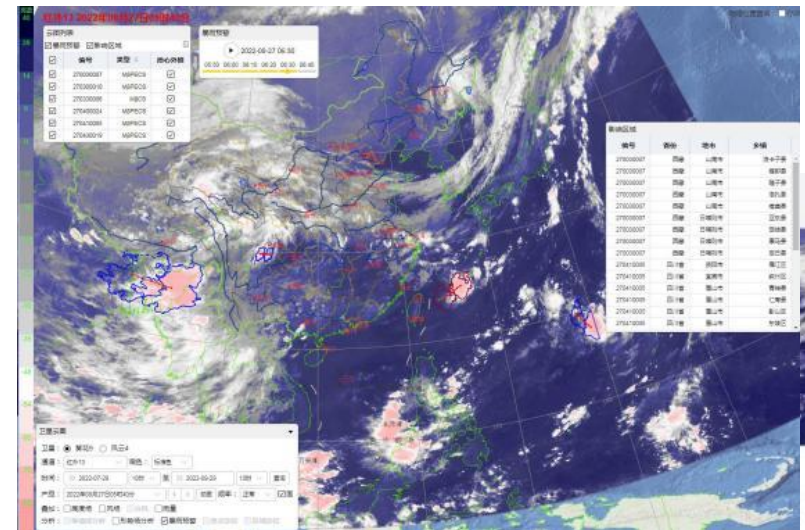


气象卫星遥感降雨监测技术

主要原理是识别全国范围当前生成的强对流暴雨云团，并通过外推算法提前1~3小时自动发布地市级短临强降雨风险预警，监测范围覆盖全国，时间频次高，但空间分辨率低、精准度不高。

天基的技术路线：

1. 卫星数据预处理
2. 云团识别
3. 云团编号和特征参数提取
4. 云团追踪
5. 确定持续时间
6. 识别强对流系统
7. 强对流外推预报
8. 预警信息发送



风云4号卫星





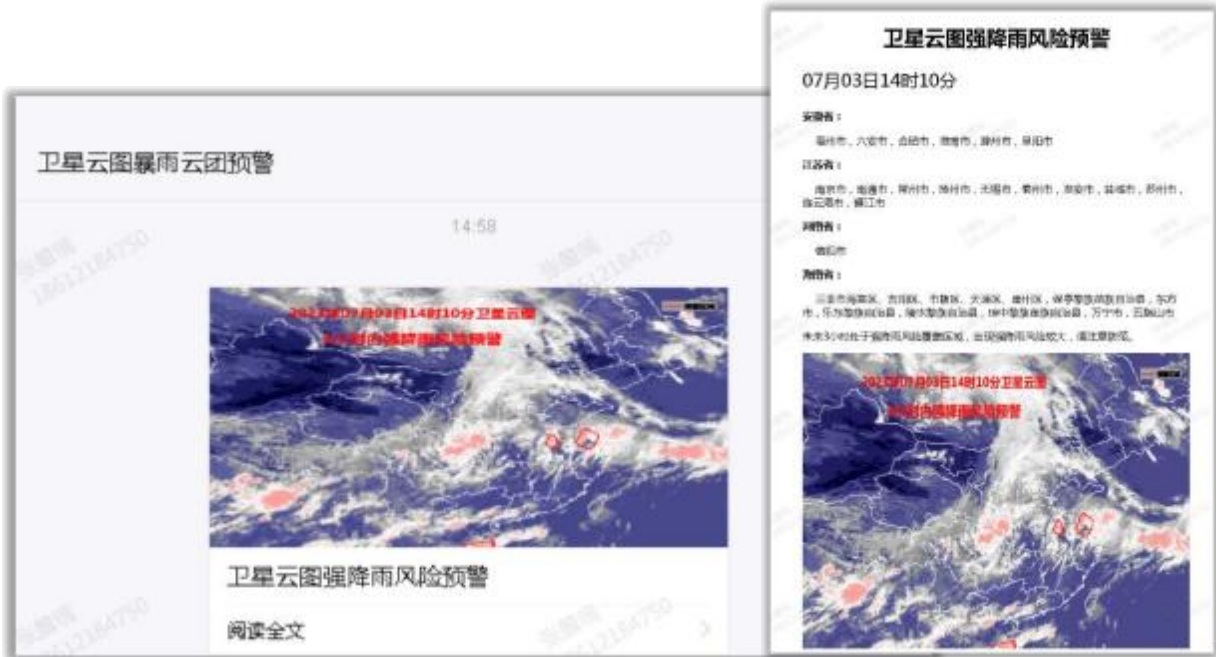
“天基” 手段技术试点应用成果

今年，水利部信息中心通过研发风云4号和葵花9号静止轨道气象卫星多通道遥感云图产品识别强对流暴雨云团算法，实现暴雨云团覆盖范围实时提取、外推3小时预报和对未来1~3小时内可能发生短临强降雨风险地区（地市级）的自动预警。

预警准确率评估：2023年5月22日至9月3日

	预警次数	预警地市数	合格率
全国地区	1352492人 (次)	23283个(次)	51.8%
华南地区	1342次	5212个(次)	51.7%
西北地区	1691次	3152个(次)	27.4%
其他地区	2194次	14919个(次)	56.9%

- 优点：覆盖全国（包括国际河流）
- 缺点：1.精度低（最高为逐小时4×4千米网格）
2.定量化预警难



云中雨

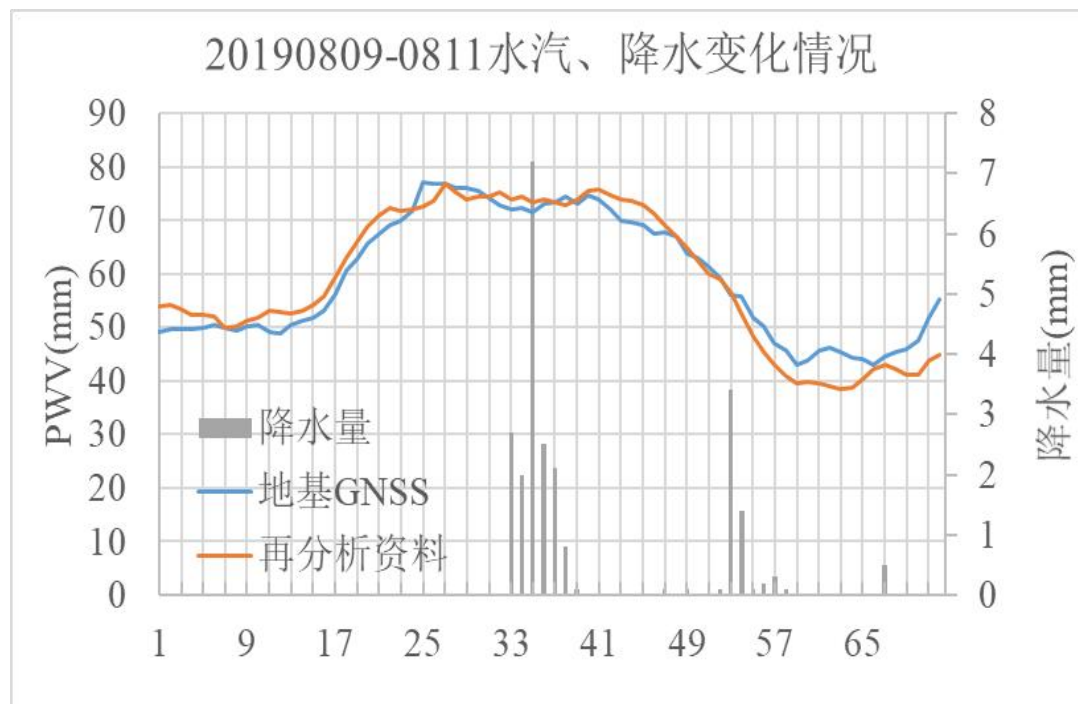
落地雨

卫星遥感降雨监测

GNSS水汽含量监测

水利测雨雷达

GNSS水汽含量监测



- ❑ 基于全球导航卫星系统GNSS网的水汽含量高精度监测技术
- ❑ 可降水量观测 (PWP) : 信号延迟、气象数据 (如气压和温度)
- ❑ 降水强度估算: 信号衰减, 精度低于雷达
- ❑ 提高精度: PWP与其他监测技术相融合

◆ 欧洲GNSS水汽网络 (E-GVAP) : 提高短期天气预报的准确性, 暴雨和雷暴等极端天气、洪水预警

◆ 日本气象厅 (JMA) : 监测台风, 特别预警台风引发的暴雨和洪水风险, 20-30km

“第一道防线”空基监测技术及装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

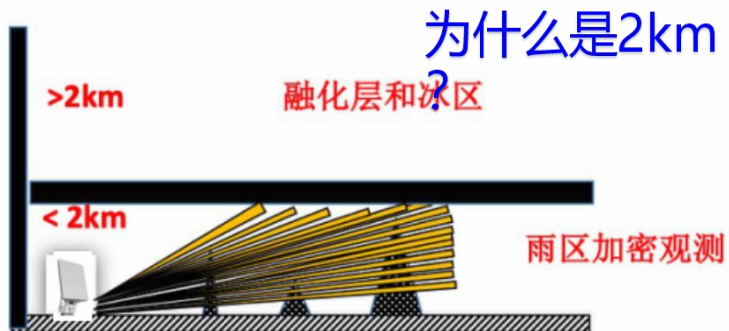
云中雨

落地雨

卫星遥感降雨监测

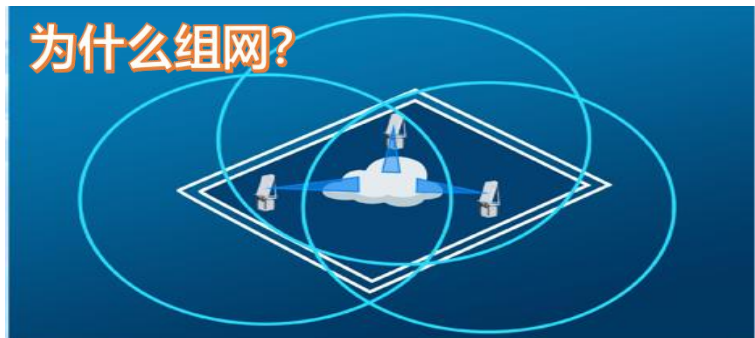
GNSS水汽含量监测

水利测雨雷达



- 持续性降水的主要云层
- 降水发生后很快就能到达地面

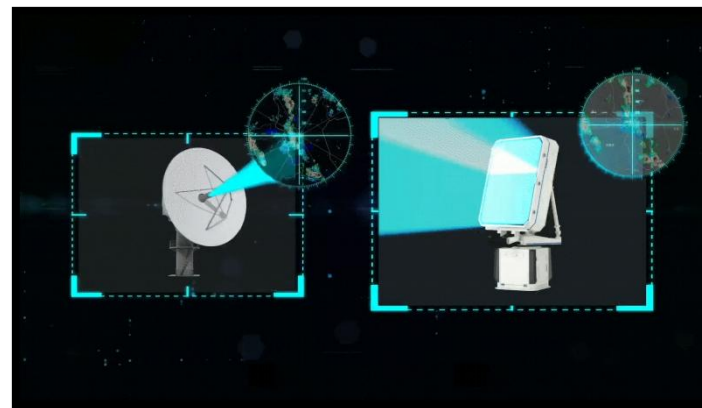
为什么组网?



减少盲区、扩大范围、降低衰减



机械型



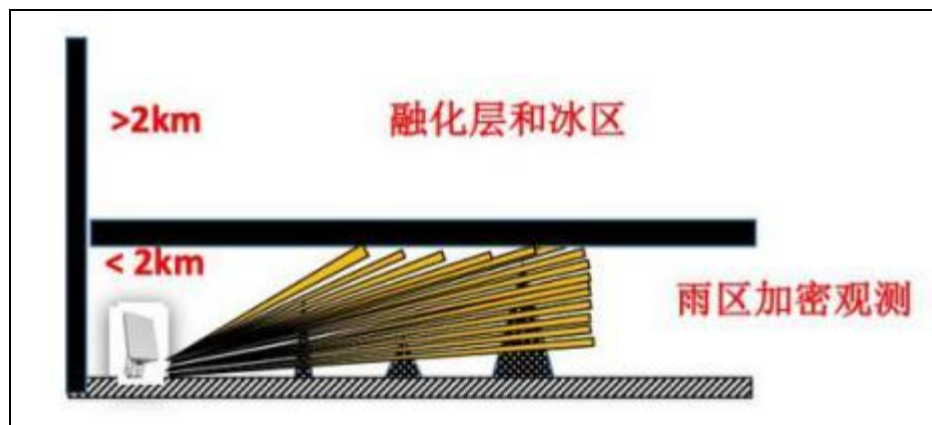
相控阵型

机械测雨雷达	性能区别	相控阵测雨雷达
≤5min	时间分辨率	≤60s
≤75m	空间分辨率	≤30m
≥12个仰角	体扫作业模式	≥35个仰角



水利测雨雷达——监测预报预警 “空基” 技术

以地面以上 2km 垂直高度大气中的液态水为主要探测目标物的雷达，通过以雷达站为中心、半径 $\geq 45\text{km}$ 水平范围内、地面以上至 2km 垂直高度大气中**无缝的连续仰角步进扫描作业**，实现近地面层液态水含量的精细化测量，提高面雨量监测精度。



地面以上2km垂直高度大气中的液态水
为主要探测 目标物的雷达



实现对直接决定面雨量监测精度的近地面
层液态水含量的精细化测量。



水利测雨雷达——监测预报预警“空基”技术

主要原理是通过应用多种雷达回波反演区域空间降雨分布，并通过外推算法提前1~3小时自动发布地市级及其以下区域短临强降雨风险预警，时间频次高，空间分辨率较高，精准度较高，但覆盖范围仅限于雷达监测区域，不能覆盖全国。



气象天气雷达



水利测雨雷达



天气雷达测雨短板

(1) 天气雷达对近地面液态水探测覆盖不足

对0-20km探测高度范围内的所有类型（雨、冰、雪、雷暴大风、龙卷、下击暴流等）气象目标，而对于降雨监测（液态水探测）需要的大气低层覆盖率仅有约33%左右。

(2) 估算降水量与地面雨量站相比偏差较大

天气雷达探测波长长、单极化观测为主、扫描模式主要集中在大气中高层，直接估算的是大气中高层（地面以上3-5km）降水量，业务运行估算降水量与地面雨量站相比偏差较大（平均在40%以上）。

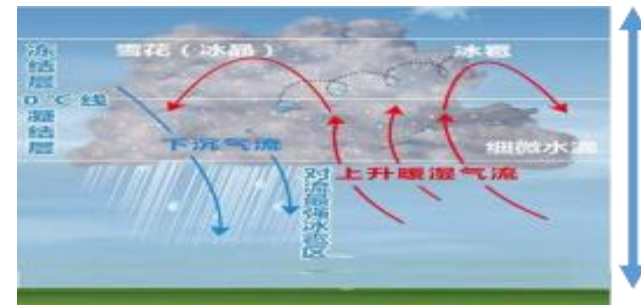
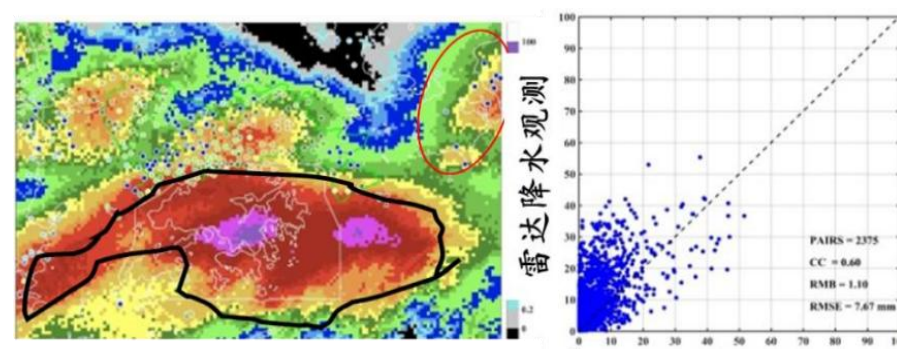
(3) 时空精度不满足精细化降雨监测需求

天气雷达降雨测量采用的作业模式是6分钟完成9个仰角0-20km探测高度范围内全方位立体扫描，输出产品精度为逐10分钟1km×1km；

后续补盲增加部署的X波段天气雷达虽然精度高，由于要加入天气雷达整体组网，且多为单部部署，必然会通过融合算法降低精度组网。



天气雷达覆盖山洪防治区分布图





水利测雨雷达特点

(1) 实现了超精细化的组网降雨监测

3部相控阵型测雨雷达组网能够实现有效覆盖1万平方公里范围（相控阵型，逐40秒、30米×30米；机械型，逐5分钟、75米×75米）网络的超精细化降雨快速监测

(2) 实现了精细网格化的降雨预报预警

具备逐分钟更新快速外推未来1~3小时精细化降雨预报和乡镇级临近（未来1~3小时）暴雨自动预警的能力

(3) 水利测雨雷达估算降雨准确度高

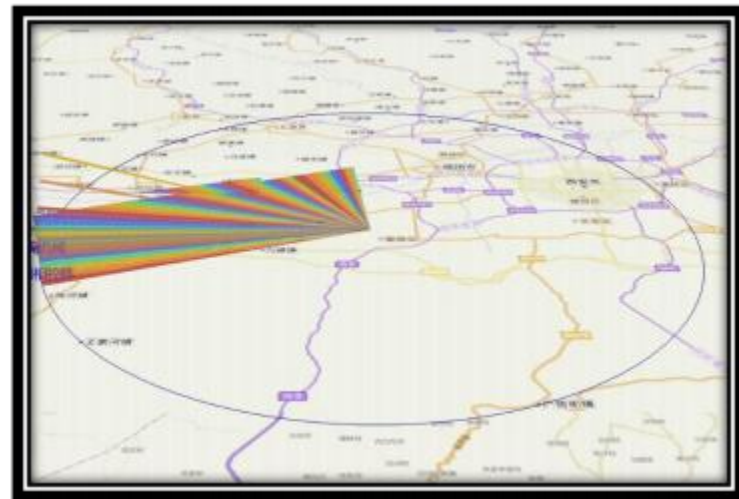
从2022年河北雄安和湖南湘江相控阵型测雨雷达试点应用看，估算1小时降水量与地面雨量站偏差约15%，比天气雷达与地面雨量站偏差减小55%左右

(4) 水利测雨雷达运行稳定、故障率低

2022年1月开机以来，两个试点区的7部相控阵测雨雷达一直不间断连续运行，出现的故障都是由于电力和网络中断导致，未出现因雷达硬件故障导致的停机



地面以上2km垂直高度大气中的液态水
为主要探测 目标物的测雨雷达



实现对直接决定面雨量监测精度的近地面
层液态水含量的精细化测量。



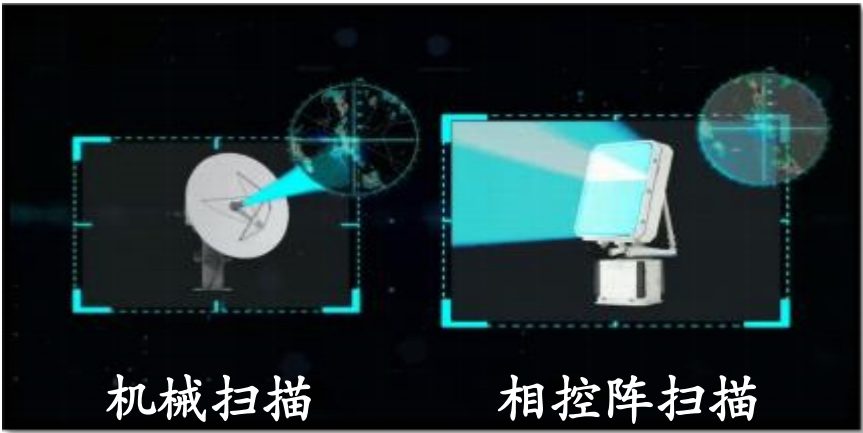
水利测雨雷达定型——确定雷达作业方式

根据水利业务特点（布局结构、间距测算、覆盖能力、遮挡考虑、地形考虑、协同观测、补盲区间），针对性设计水利测雨扫描模式。

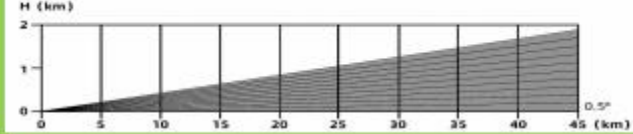


机械测雨雷达
作业方式：

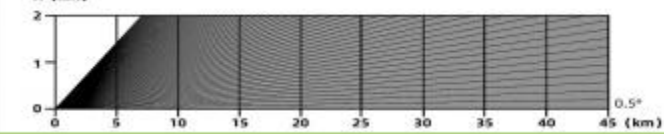
	范围	步进
水平扫描	0-360°	≤1°
垂直扫描	地表垂直高度2km以下	≤0.5°
	地表垂直高度2km以上	≤2°
垂直扫描层数	≥12层	
体扫时间	≤5min	
探测距离	≥45KM	
径向分辨率	≤30m	



近地面覆盖能力：地面以上2km层数≥12层



近地面覆盖能力：地面以上2km层数≥35层



机械测雨雷达	性能区别	相控阵测雨雷达
≤5min	时间分辨率	≤60s
≤75m	径向分辨率	≤30m



相控阵测雨雷达
作业方式：

	范围	步进
水平扫描	0-360°	≤1°
垂直扫描	地表垂直高度2km以下	≤0.5°
	地表垂直高度2km以上	≤2°
垂直扫描层数	≥35层	
体扫时间	≤1min	
探测距离	≥45KM	
径向分辨率	≤30m	

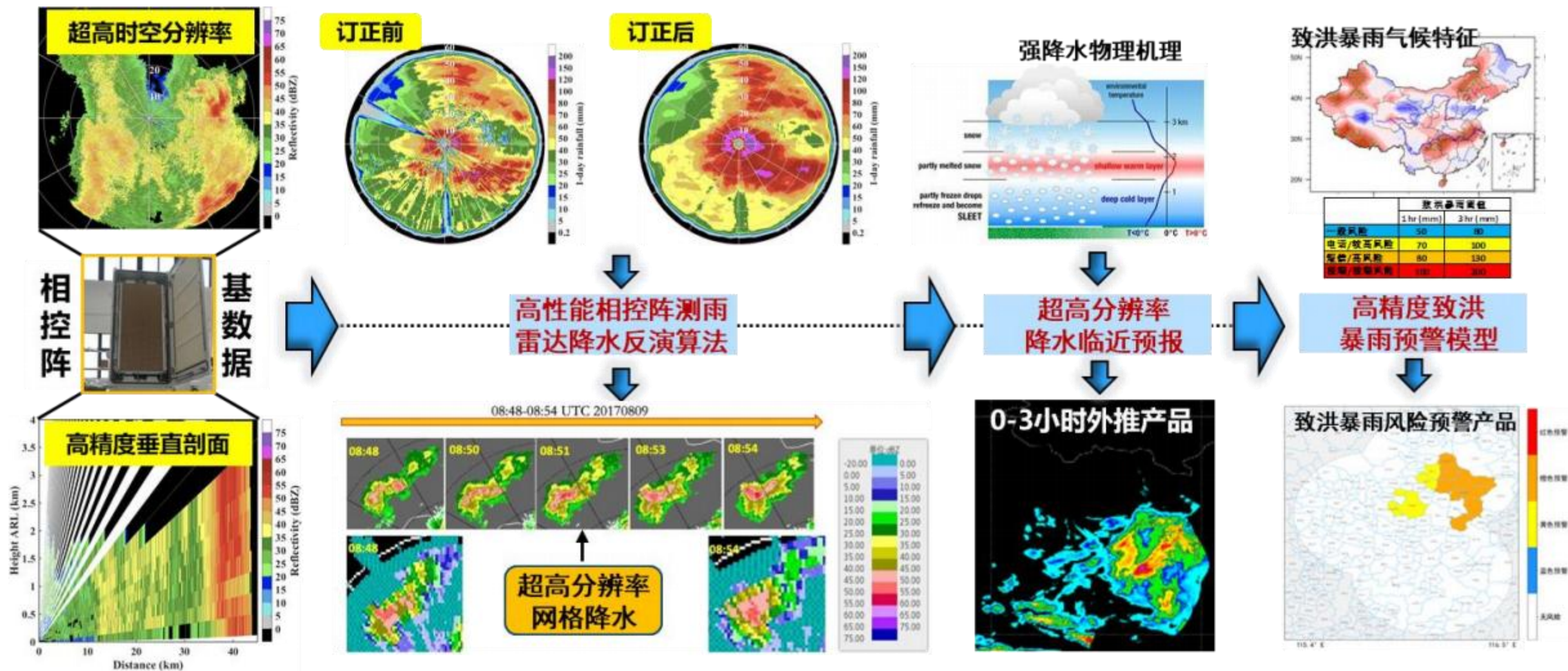
“第一道防线” 空基技术及装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

核心技术

根据水利业务需求，研发高精度致洪暴雨监测预警核心技术

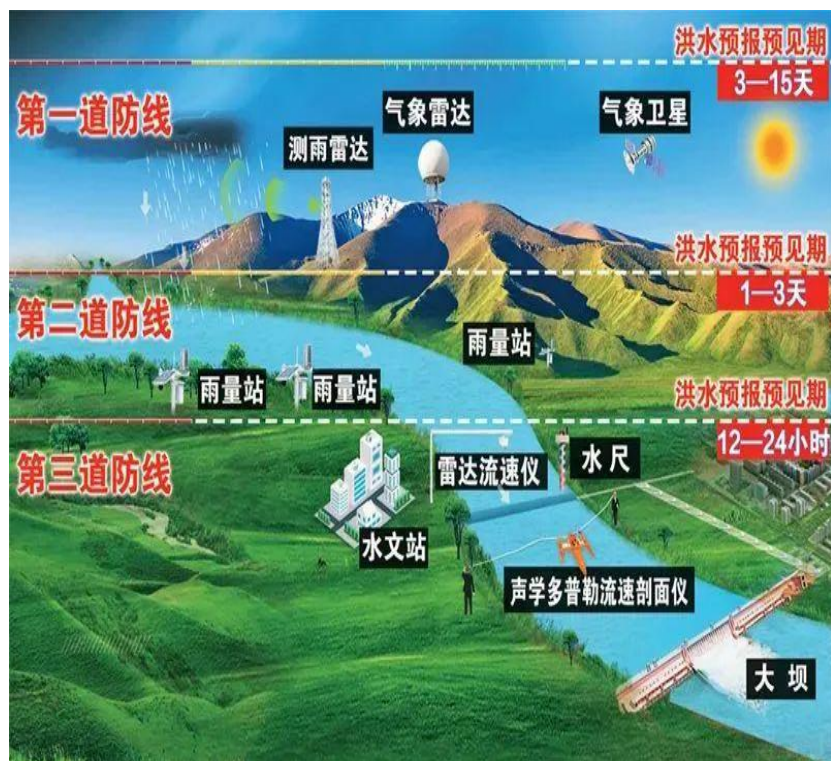




03

“第二道防线” 雨量监测技术及装备

第二道防线定义



“第二道防线”。由雨量站加产汇流水文模型、洪水演进水动力学模型组成，实现对“落地雨”监测并开展洪水形成演进预报。通过构建现代化雨量监测站网，在实时精准监测“落地雨”的基础上，对接“第一道防线”监测预报成果，耦合模型对“产流—汇流—演进”过程进行分析推演，动态调整山洪灾害预警阈值，在洪水发生之前对洪水过程作出预报，在保证预见期的同时，提高预报精准度。

雨水情监测预报“第一道防线”的技术装备为采用**地基雨量监测站网**，主要功能是对区域降雨进行监测预报预警，实现大范围降雨空间分布的实时监测和洪水预报预见期1~3天预报预警，同时与第一、第三道防线联合运用，提高洪水预报准确率，**延长预见期**。



建设现状：截至2022年底，按独立雨量测站统计，全国水文部门共有雨量站53413处（若包括有雨量观测项目的水文站、水位站，监测雨量的水文测站合计达6.9万处）。其中，基本雨量站14823处、专用雨量站38590处。雨量站自动监测率达到100%。

建设内容

● 一般区域要求

不同面积级规划的最少降水量站数表

面积 (km ²)	≤10	50	100	200	500	1000	2000	3000
降水量站数	3	5	6	8	10	13	20	30

● 重点区域要求

暴雨洪水来源区、山洪灾害易发区、大型水库工程、重大引调水工程防洪影响区等重要流域

重点区域不同面积级规划最少降水量站数表

面积 (km ²)	≤10	50	100	200	500	1000	2000	3000
降水量站数	4	7	10	15	20	25	40	60



2012年以来水文部门雨量站发展变化情况

● 布设原则

- ① 应在分析范围内均匀分布，平均单站面积不宜大于100km²，荒僻地区可放宽。
- ② 在流域迎风面、地形坡度大于15°的地区宜加密布设降水量站。
- ③ 小型水库应至少布设1处降水量站。

◆ 存在问题

1. 降雨量**监测站网密度**不足
2. 单站雨量**监测精准度**不高
3. **信息传输保障**不高
4. 降雨观测由**风引起的不确定性误差**尚未考虑
5. **面降雨测算精准度**不高

◆ 建设目标

1. 提高**面降雨测算精度**
2. 遥测雨量站**全自动**监测
3. 重要站点实现**大中小雨强**、**全类型**（雨、雪）、**全时程**自动监测。

◆ 技术方案



通过站点建设、数据共享方式，可提升监测站网密度

- ⑩ **数据共享**：接入气象等其他部门降雨监测数据，经**数据质量分析评估**后投入生产应用；
- ⑩ **站点建设**：水文已建和共享站点分布，针对**暴雨洪水集中来源区、山洪灾害易发区**以及**大型水库工程、重大引调水工程防洪影响区**等区域，根据**区域特点和站网密度规范要求**，增加雨量站点，填补空白区域，增强区间降雨数据获取能力，为预报提供基本数据支撑。

高分辨力翻斗雨量计监测精准度的提高，为单站降水监测精度的提升提供了保障

- ⑩ 高分辨力翻斗雨量计精度影响因素：**翻斗翻转误差**
- ⑩ 将**微虹吸装置**与0.1mm**翻斗雨量计**相结合，已研制了**微虹吸翻斗式雨量计**，通过虹吸作用将自然降雨的**变雨强**过程转化为**恒定雨强**后流入计量翻斗，而后进行降雨量监测。经实验测试，微虹吸翻斗式雨量计设备稳定性优于单翻斗雨量计，且**测量误差可达到国家I类标准**。

通过站点监测环境建设、开展风速监测等方式，将风对降雨的影响纳入降雨量监测过程

- ⑩ 雨量计环境建设：稠密而均匀的植被的地方、合适的围栏、安装防风圈等方式，可降低风对降雨观测影响(WMO)。
- ⑩ 开展风速自动监测：在区域内重要雨量站点，同步开展风速自动监测，分析区域风速对降雨影响规律，进行降雨订正。
- ⑩ 目前国内已有相关研究，探究防撞圈安装避免雨量计器口发生风场变形的最佳安装方式，基于单站降水量的简易订正方案。研究了风对北京降水记录及变化趋势的影响，并对年平均雨量数据进行了订正。

重要水文站点配备不同分辨力、不同类型雨量器实现全降水强度、全降水形态自动监测

- ⑩ 重要水文站点可配备2种或以上不同分辨力降雨监测设备，实现大中小雨强降雨精准监测
- ⑩ 需开展固态降水监测地区，选择称重式雨量计或者雨雪量计，从而实现液态、固态全降水形态监测
- ⑩ 配备2种或以上雨量器，也可防止因1台设备故障导致降雨监测数据丢失。如气象部门气象站配备的是翻斗式雨量器、称重式雨量计组合方式，其中翻斗式雨量计采用的是3+1模式（3台同时使用，1台备用）。

通讯信道双备份，提高数据传输保障

- ⑩ 北斗卫星系统短报文业务已实现全国范围覆盖，可实现在无人区，公网弱信号，无公网等地区的传输。
- ⑩ 构建以4G/5G公网为主，北斗卫星为辅的双通讯信道，将进一步提高测站数据传输能力，降低或避免因通信公网中断，导致雨情监测信息无法及时传输



通过地面雨量站-雷达、地面雨量站-卫星数据融合算法，可进一步提高面雨量测算精度。

- ⑩ 雷达观测能反映降水的空间分布
- ⑩ 卫星对雨区识别的准确性较高，可提供大范围的降水场估计
- ⑩ 利用地面雨量站-雷达、地面雨量站-卫星数据融合技术，充分利用卫星、雷达提供的降水暴雨中心和流域的降雨分布数据，可为面雨量测算提供因地面雨量站网密度不足或意外导致雨量站数据丢失情形下的**插补数据**，从而提高面雨量测算精度

站点建设及维护成本低、建设快捷、运维方便、降雨数据获取高效、

- ⑩ 雨量监测站主要投资为**设备投资**，测站设备包括雨量计、报讯通信装备、供电系统等，设备价格低
- ⑩ 雨量站建设占地面积小，通常不需征地，且站点不需自来水、市电、光纤通信线路接入，建站方便，整体建设投资低
- ⑩ 遥测站点建设完成后**无人值守**，主要是定期（约3月/次）进行雨量计清洗，**运维简便**，可大大节约人力成本

“第二道防线” 地基雨量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

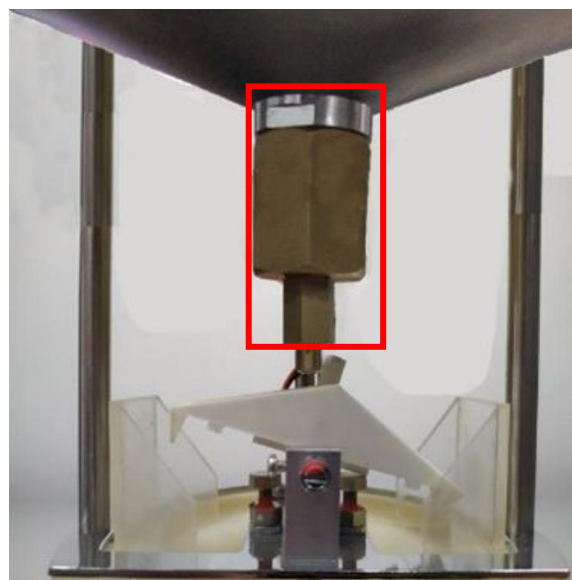
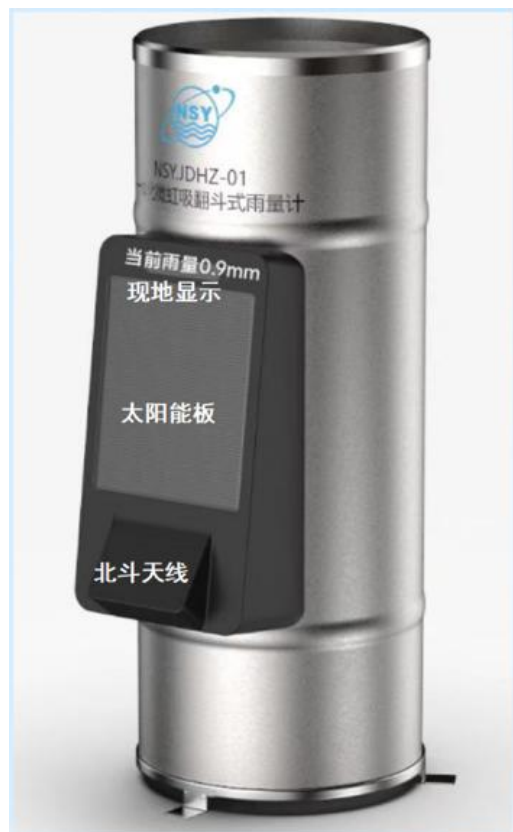
云中雨

落地雨

一体化高精度微虹吸翻斗式雨量计

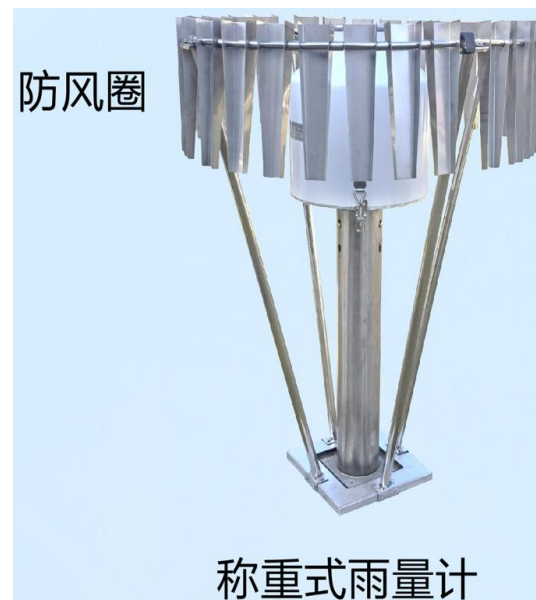
称重式雨雪量计

基于光电技术雨量计



微虹吸-高精度，一体化-高集成度

- 翻斗分辨率: 0.1mm、0.5mm;
- 雨强范围: 0~4 (10) mm/min;
- 计量误差: I级($\leq +2\%$);



降水的全过程、全自动监测

- 降水量分辨率: 0.01mm
- 测量精度: $\pm 1\%$ FS
- 工作环境温度: $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$



新疆阿勒泰库威站



西藏唐古拉冰冻圈站

“第二道防线” 地基降水监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

云中雨

落地雨

一体化高精度微虹吸翻斗式雨量计

称重式雨雪量计

基于光电技术雨量计

光学雨雪量计



通过一个发射器发射一束扁平的红外光，光线穿过空气后聚焦到一组光敏接收器件上，雨、雪、雾等天气变化会影响红外光的强度变化，通过分析多个通道的数据从而来计算降雨强度、降雨量等天气状况和能见度。

雨滴谱仪：测得雨滴谱信息

降水类型识别：毛毛雨、小雨/雨、雨、雨加雪、雪、米雪、冻雨、冰雹等8种降水类型

压电雨雪量计



陶瓷压电片，利用压电振子的压电效应，将机械位移(振动)变成电信号，然后根据雨滴冲击能量转变的电压波形的变化，通过采集压电片输出信号的峰值电压来计算相应的雨滴尺寸和体积，从而实现单个雨滴重量测算，进而计算降雨量。

WMO：区分降雨和冰雹类型是有明显优势

“第二道防线” 地基降水监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

云中雨

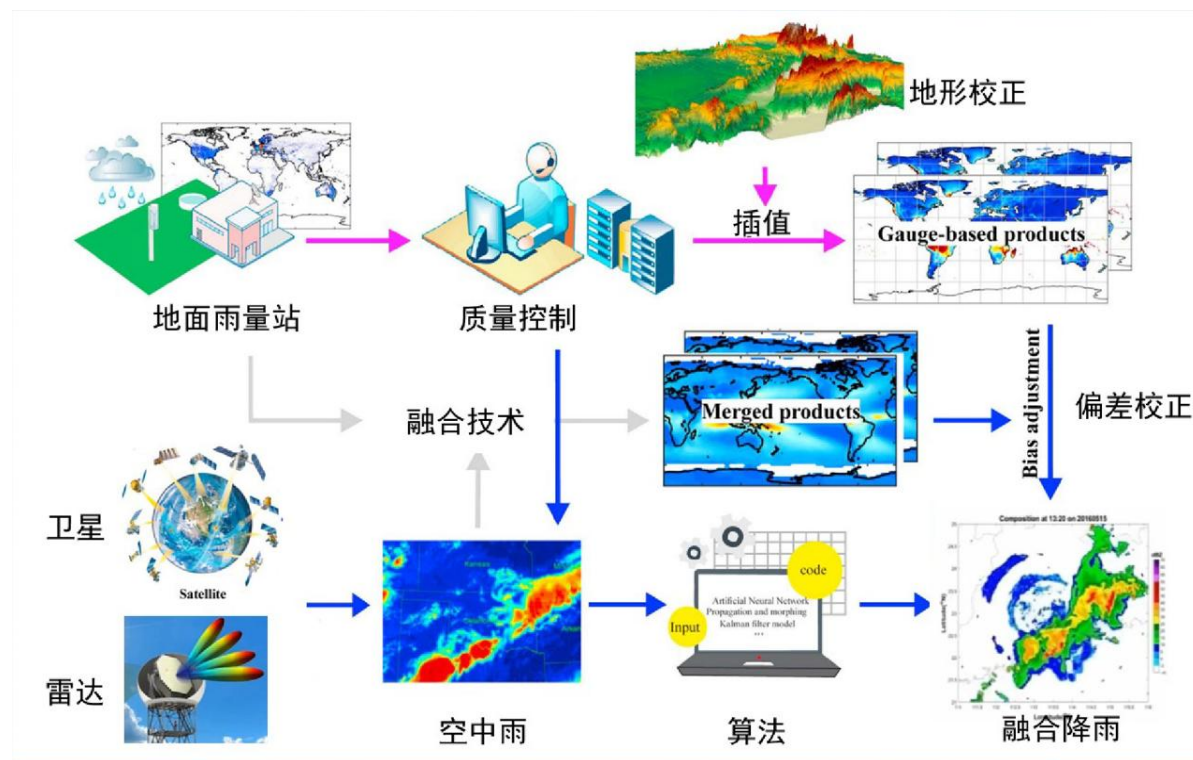
落地雨

全过程

全量程

全要素

高精度流域面雨量



多源信息融合的面降雨计算模型

雨量计校准率定



便携式雨量计校准装置

地面降水监测



高精度翻斗式雨量计



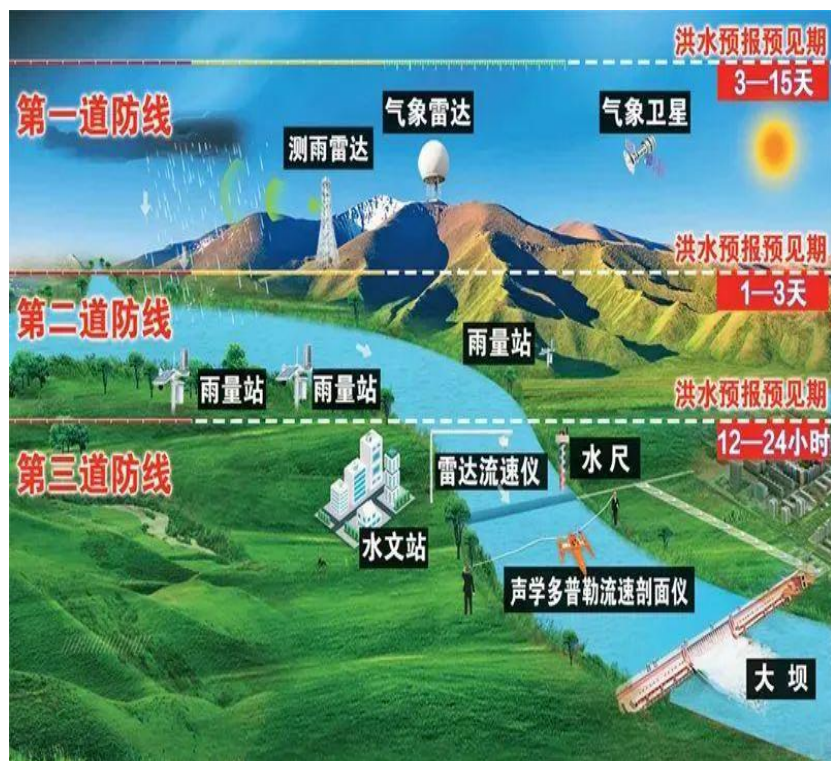
称重式雨量计



04

“第三道防线” 水位流量监测技术及装备

第三道防线定义



“第三道防线”。由水文站加洪水演进水动力学模型组成，实现对洪水演进过程监测预报。通过构建现代化水文监测站网，在实时精准监测江河湖库水位、流量等要素变化的基础上，对接“第二道防线”监测预报成果，耦合模型对洪水演进进行测报预报。水文站在对本站洪水进行精准测报的同时，向下游水文站或断面预报洪水演进信息，实现滚动传导预报，进一步提高预报精准度。

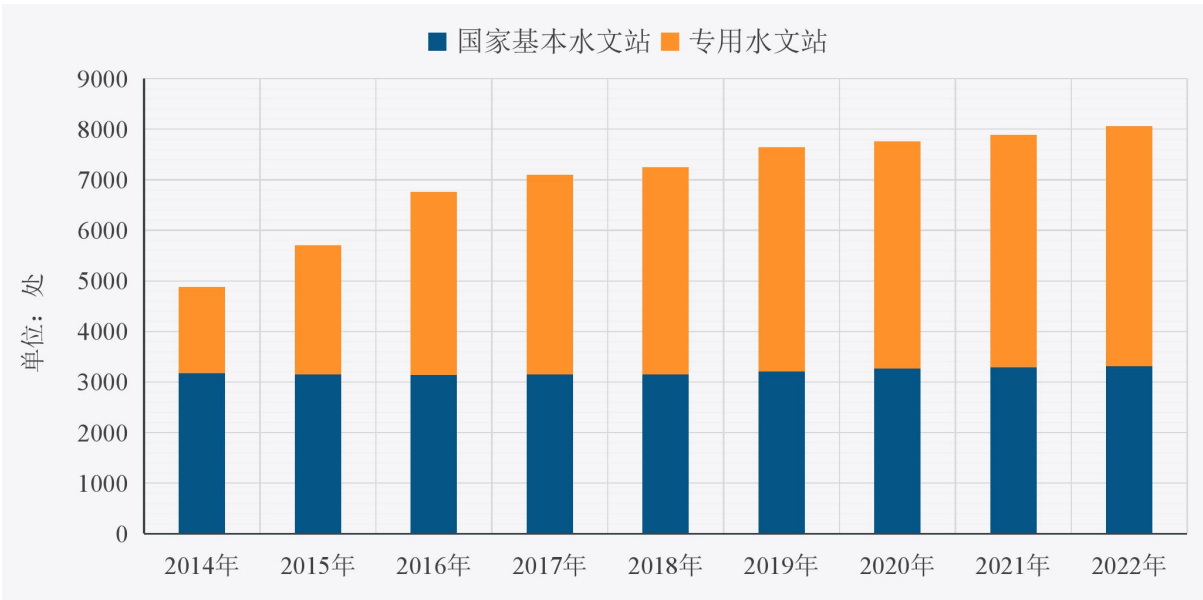
雨水情监测预报“第三道防线”的技术装备为采用**地基水位流量监测站网**，主要功能是对区域降雨进行监测预报预警，实现大范围降雨空间分布的实时监测和洪水预报预见期12~24小时预报预警，同时与第一、第二道防线联合运用，提高洪水预报准确率，**延长预见期**。



建设现状：截至2022年底，全国共建成水文站8063处，其中国家基本水文站3312处（含非水文部门管理的国家基本水文站69处）、专用水文站4751处。

流域（片）水文站分布情况

流域（片）	长江	黄河	淮河	海河	珠江	松辽	太湖	总计
水文站数量	2602	1232	963	655	982	849	780	8063



近年来水文站发展变化情况

建设内容：

- 建立覆盖全面的水文监测体系，实现大江大河及其主要支流水文（位）监测全覆盖。
- 有防洪任务的流域面积200-3000km²的中小河流水文（位）监测全覆盖。
- 在流域面积50—200km²的中小河流重要暴雨洪水易发区布设水文（位）站，补齐中小型水库、山洪灾害水文监测空白。
- 持续推进水文实验站点建设。



“水文站网”——地面水位流量监测



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

存
在
问
题

1

站网密度不够



- 大江大河水文站点尚有不足
- 中小河流水文监测存在空白
- 小型水库雨水情监测仍然薄弱
- 蓄滞洪区水文监测设施严重缺乏
- 水利工程和调度等人类活动影响监测不够

2

在线自动化监测水平不高



- 自动化监测率不高
- 超标洪水监测能力不足
- 新技术应用有待提升

3

应急监测能力不够



- 基层应急监测设备配备不足
- 水文巡测车严重缺乏

4

监测报汛的保障能力不足



- 测报设备老化严重
- 通信卫星信道配备不足
- 应急信息报送机制有待健全

5

水文站防洪测洪标准偏低



- 水文测站建设标准偏低
- 测验设施设计考虑不周



◆ 建设目标

第三道防线以洪水告警、灾害警示为目标，为洪水防御提供最为精准的数据支撑。

- 一是完善水文监测站网，提升水文监测覆盖率；
- 二是提高测验设施防洪标准，提高装备自动化监测水平，强化洪水在线监测能力；围绕水文监测全要素全量程全自动的发展目标，加快流量在线监测系统建设，有效提升监测效率；
- 三是提升应急监测能力，保障报汛畅通。



- (1) **加密水文站网**，补充水利工程和调度水文信息监测，提高站网监测覆盖度，支撑洪水演进预报精度。
- (2) **在线自动化监测**方面，应用**新监测技术及一体化集成技术设备**，提高监测效率，降低监测成本。
 - ✓ **水位**监测方面，发展斜侧水位监测方式；
 - ✓ **流速/流量**监测方面，加强声、光、雷达先进技术应用，发展声层析断面平均流速直接测量技术及断沙流量一体化测量的ADCP、多波束等技术，大洪水时，以非接触设备应用优先，应用侧扫雷达。
 - ✓ **冰情**监测方面，冰厚及水深监测技术可采用冰水情一体化双频雷达测量系统，浮冰条件下流速监测可采用非接触式的无人机影像法。
 - ✓ **泥沙**测验方面，对于大泥沙含量可采用光电测沙仪，对于小含沙量可采用量子点光谱测沙仪和多频声学测沙仪；发展断沙直接测量如ADCP、多波束技术。
- (3) **应急监测**方面，应急基础设施建设按平战结合原则建设。对洪水淹没范围的监测实施雷达卫星、无人机、视频监控技术方法。
- (4) 在**汛情报送**方面，实施自动报汛为主，人工加报为辅的方案。移动无线通信+卫星通信设备。

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流量

浮子水位计

压力式水位计

一体化毫米波雷达水位计

视频水位计



浮子水位计

- ◆ 基于浮力和杠杆原理，显示水位变化
- ◆ 经久耐用，性能稳定，水位观读精确
- ◆ 需有配套水位观测井，能减少风浪波动影响



压力式水位计

- 根据压力与水深成正比关系的静水压力原理
- 广泛应用于无水位井、边坡不规则等岸坡
- 含沙量大和盐度影响的不适用

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

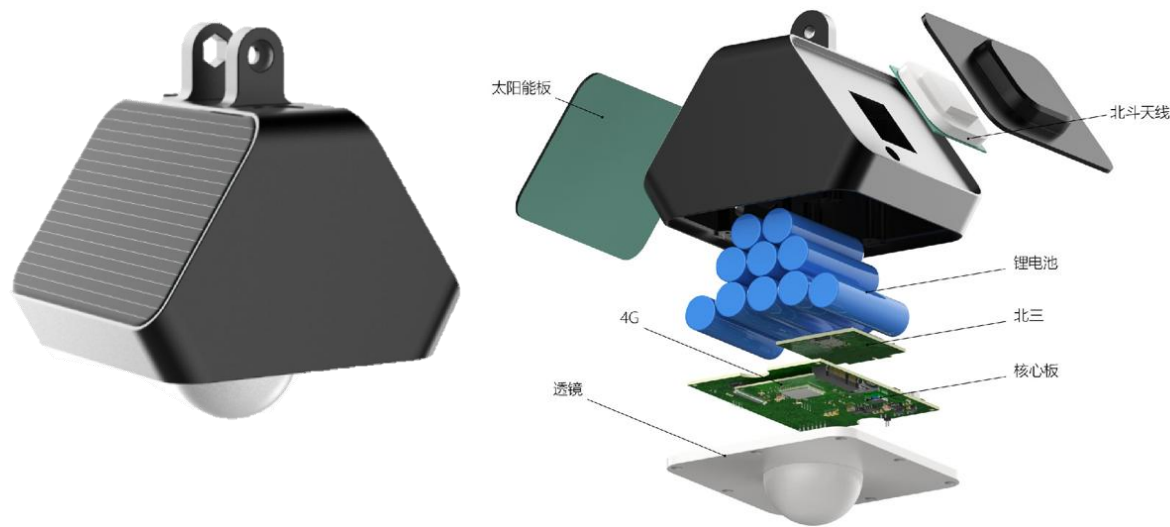
流速\流量

浮子水位计

压力式水位计

一体化毫米波雷达水位计

视频水位计



■ 关键技术和性能指标

调频连续波

关键技术

高精度距离算法

干扰物排除算法

➤ 在毫米波雷达水位计的基础上增加**RTU、太阳能板、充电控制、数据通信**等模块，实现水位的**测算、发送和存储设备的一体化集成**

- 非接触、高精度、快速响应
- 水位量程：0.5 ~ 30m
- 测量精度：1级精度

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

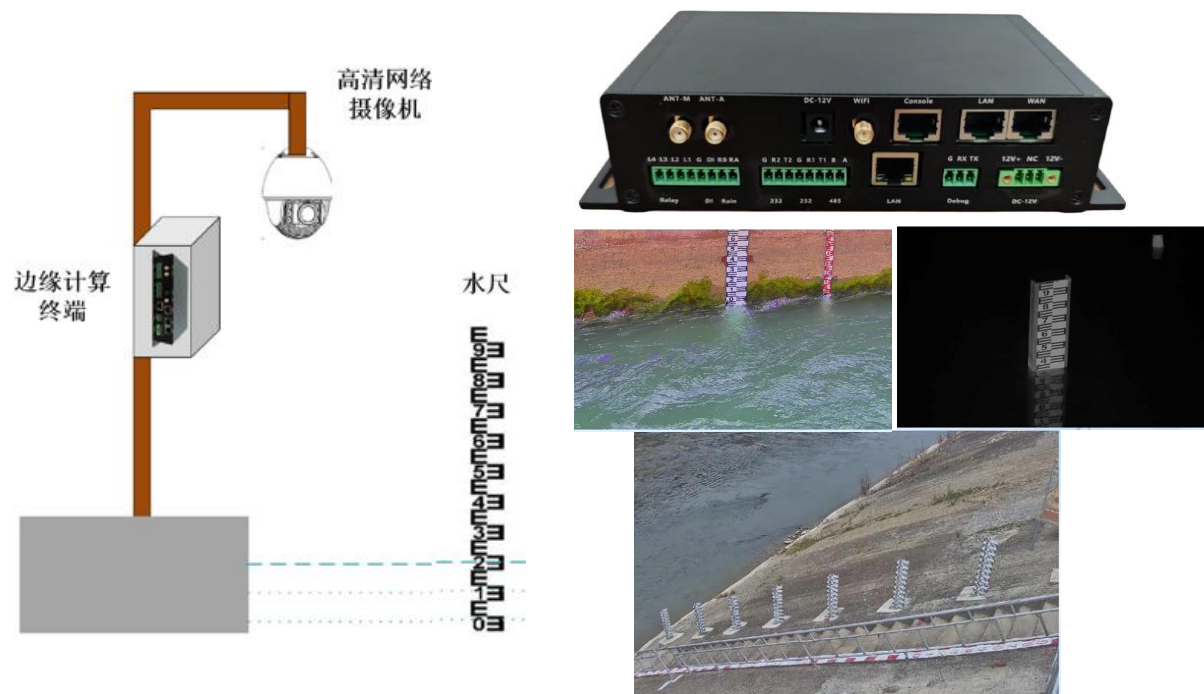
流速\流量

浮子水位计

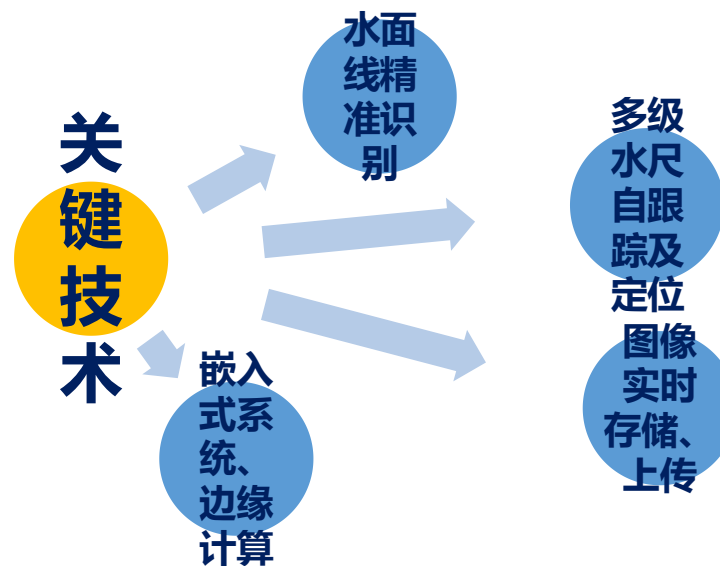
压力式水位计

一体化毫米波雷达水位计

视频水位计



■ 特点和性能指标



- 边缘计算终端、视频摄像机、水尺及太阳能供电系统
- 内置嵌入式浏览器，实现设备一体化管理

- 分辨力：1mm
- 工作距离：≤100m
- 准确度：±1cm

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

声学多普勒流速剖面仪

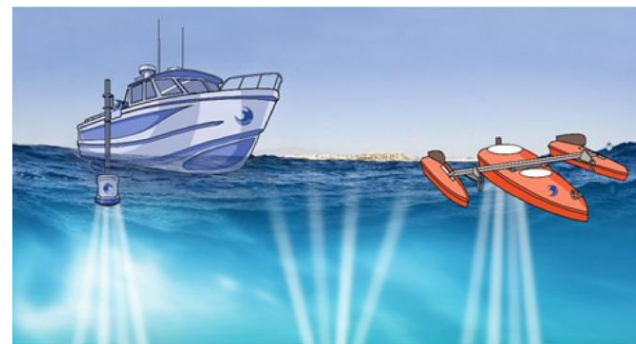
声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测

走航式ADCP

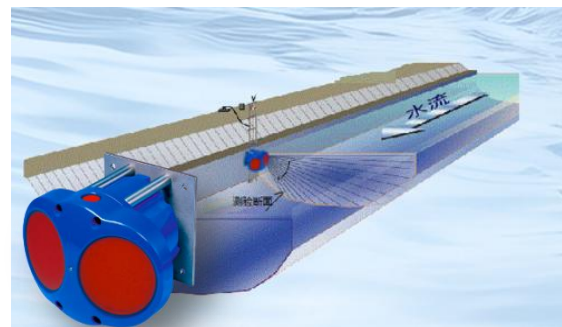
- 载体：无人船
- 流量计算：流速面积法
- 通过声学传感获得断面多层多点水深和流速积分得到断面流量



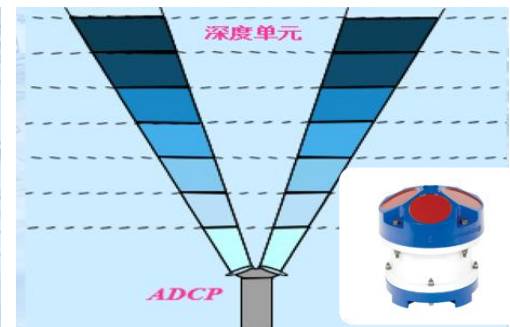
走航式ADCP应用示意图

固定式ADCP

- 安装方式：水平H-ADCP、垂向V-ADCP
- 流量计算：层（水平或垂直）流速-断面平均流速
- 水体含沙量及水位变幅不宜过大，含沙量 $\leq 10\text{kg/m}^3$
- H-ADCP安装断面具有一定水深，宽深比一般要求 $< 40:1$
- 安装位置无扰水植物



H-ADCP



V-ADCP

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

声学多普勒流速剖面仪

声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测

声层析流速仪

原理：通过分析声波在水中传播的时间、路径和速度等特性，来推断出水的物理参数（如流速、温度）以及整个流场的分布。

流场反演：多声基站组网监测+水动力学数值模型

全向水声换能器，探头无须严格对准，安装便捷

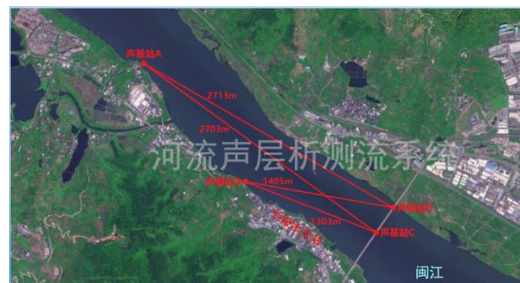
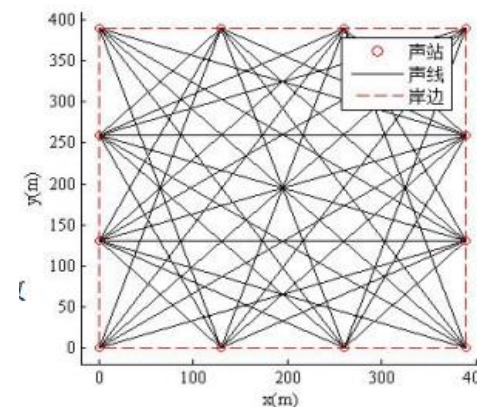
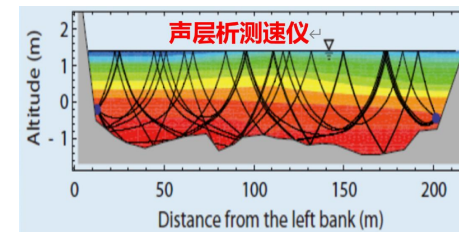
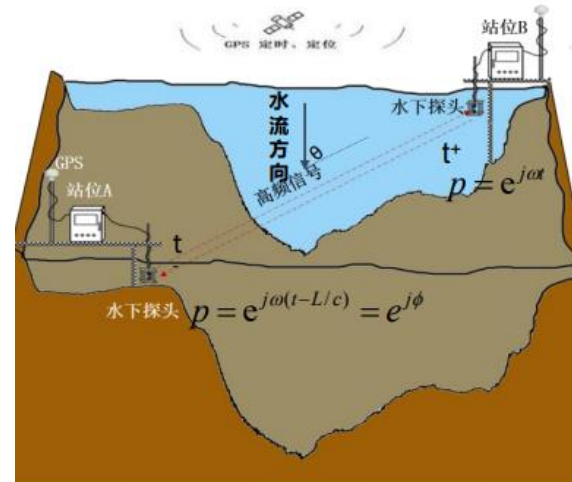
技术指标：

流速分辨率： $\leq 0.004\text{m/s}$;

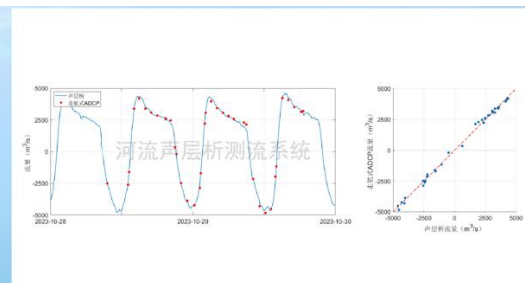
测量距离： 10~300m、300m~800m、800m~5km可选

;

流速范围： $\pm 6\text{m/s}$;



竹岐水文站安装布局图



竹岐水文站比测结果图

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

声学多普勒流速剖面仪

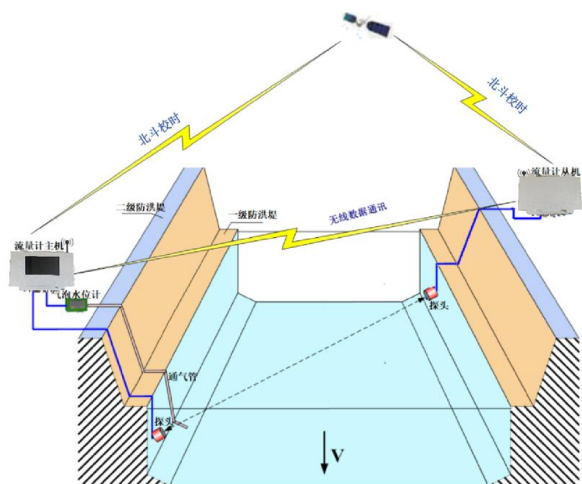
声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测

时差法流速仪

- 测量超声波信号顺流、逆流传输时间差
- 北斗卫星校时技术



超声波时差法测流系统示意图



声学时差法测流设备

- 河宽: $\leq 2000\text{m}$ 、适用水深: $\geq 1\text{m}$
- 换能器频率: $28 \sim 200\text{kHz}$
- 流速测量范围: $0 \sim 10\text{m/s}$
- 流速测量分辨力: 0.001m/s
- 最大测量误差: $\pm 1.5\%$ 实测流速 $\pm 0.02\text{m/s}$



“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

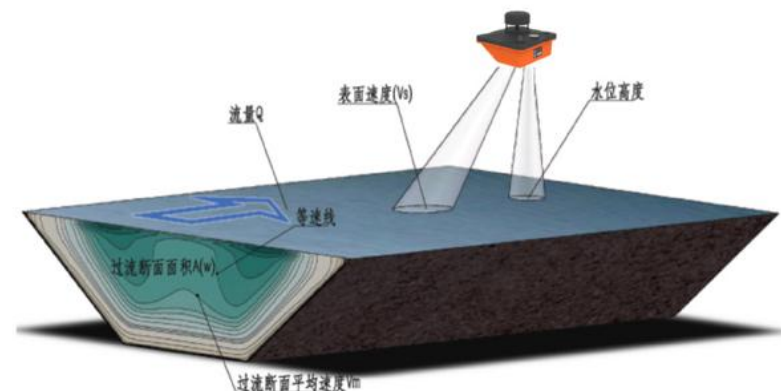
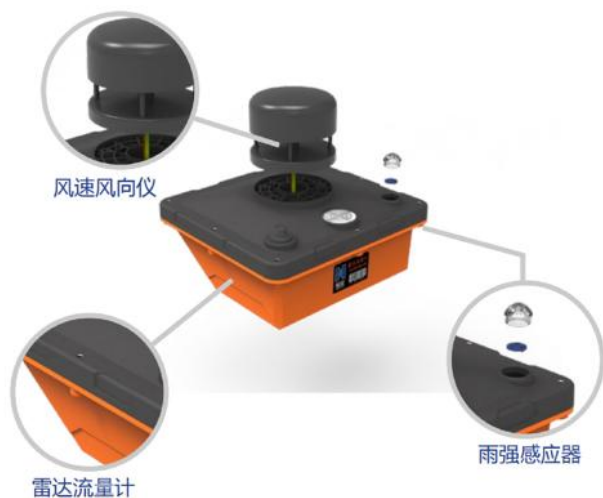
流速\流量

声学多普勒流速剖面仪

声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测



- 测速范围: 0.03~20m/s
- 测速精度: +0.01m/s ; $\pm 1\%$
- 测距范围: 0-45m
- 测距精度: $\pm 1\text{mm}$
- 多普勒效应, 频率变化, 计算流速
- 集水位、流速、雨强和风速风向测量传感器于一体, 自动补偿外界环境因素对测值造成的干扰
- 前端边缘计算: 基于实测数据结合算法直接输出流量值

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

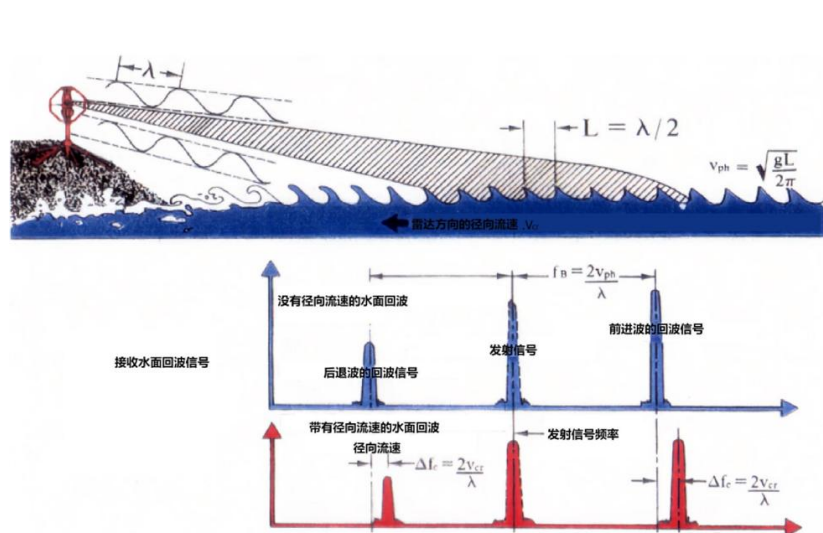
声学多普勒流速剖面仪

声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测

侧扫雷达



主要功能:

具有测量高分辨率表面流速，实现河流表面流流场分布测量的功能

关键技术指标

- 最大扫描角度: $\geq 60^\circ$;
- 最大测量距离: $\geq 300\text{m}$;
- 测速范围: $0.2\text{m/s} \sim 20\text{m/s}$;
- 测速精度: $\pm 0.01\text{m/s}$ (速度 $< 1\text{m/s}$ 时), $\pm 1\%$ 实测值(速度 $\geq 1\text{m/s}$ 时)

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

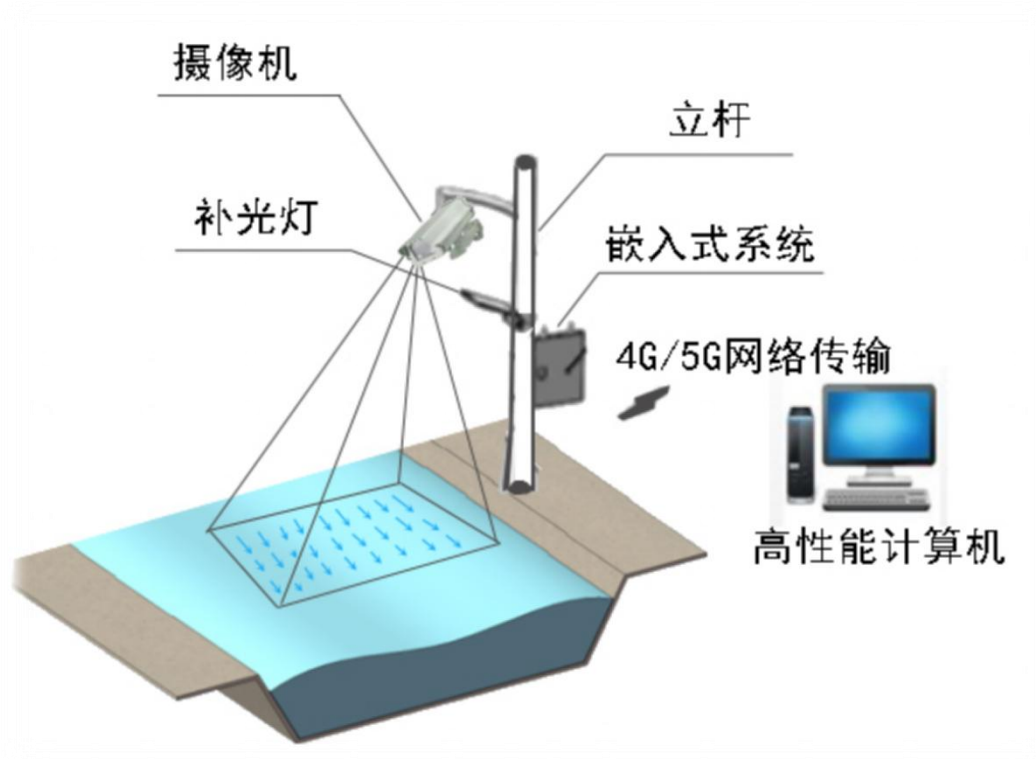
流速\流量

声学多普勒流速剖面仪

声层析、时差法流速仪

雷达流速仪

高性能视频流场监测



AI +

- STIV: 表面流速、利用自然波纹或漂浮物
- 流速范围
- 粒子可见性
- 噪声水平

- PIV: 流场测量, 密集且分布均匀示踪粒子
- 环境光照

- LSPIV: 流场测流, 无须人工示踪粒子

- OP: 表面流速估算, 无示踪粒子/漂浮物

- PTV: 低密度/单个粒子跟踪

特征提取

算法选择

流速计算

性能指标

- 测速范围: 0.3 ~ 20m/s
- 测速精度: $\pm 0.02\text{m/s}$; $\pm 2\%\text{FS}$

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

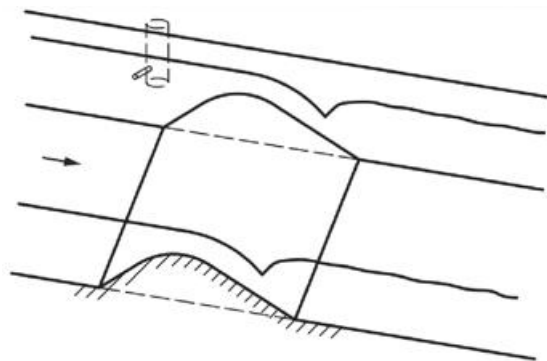
流速\流量

水力学

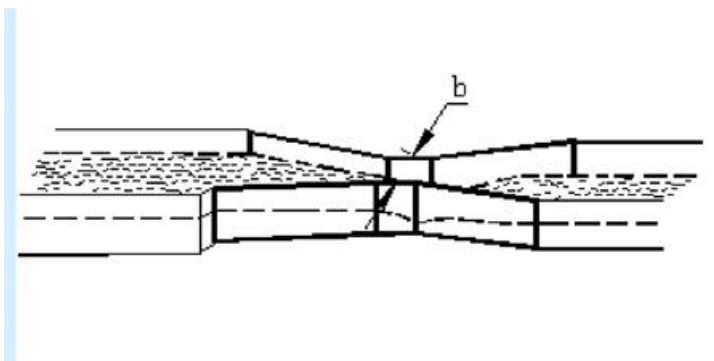
雷达视频测流系统

自动缆道测流平台

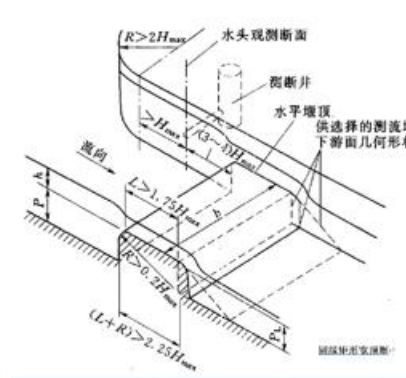
高洪测验杆/塔



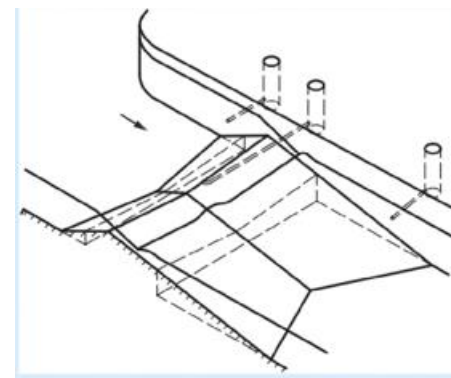
三角形剖面堰(流线型)



三角形剖面堰(平坦V型)



巴歇尔堰



宽顶堰

堰槽法测流是利用规范堰槽和高精度的水位观测，采用水力学方法计算流量，实现流量的自动监测。

适应中小河流低水、小流量的自动监测和灌渠的流量自动监测；

关键技术指标：

- 宽顶堰流量计算不确定度：3~5%；
- 三角形剖面堰和平坦V形堰流量计算不确定度：2~5%

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

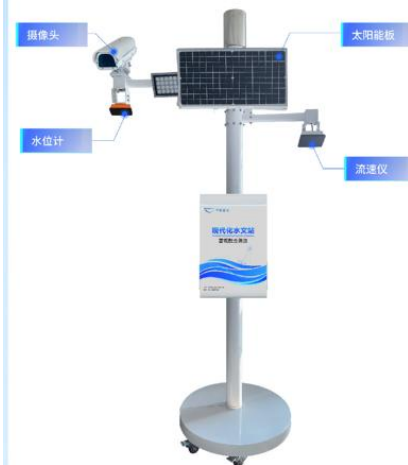
流速\流量

水力学

雷达视频测流系统

自动缆道测流平台

高洪测验杆/塔



- 采用多普勒流速仪瞬时姿态、水体表面风速、水体表面流速耦合模型反演断面深层流，实现了流体表面流速采集精度与断面流量反演
- 实时监控流速信号频谱分布分析，智能分析流速信号质量并复测
- 视觉AI图像分析技术，集成视觉测流系统，多种测量方式同时进行，提高测量精度

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

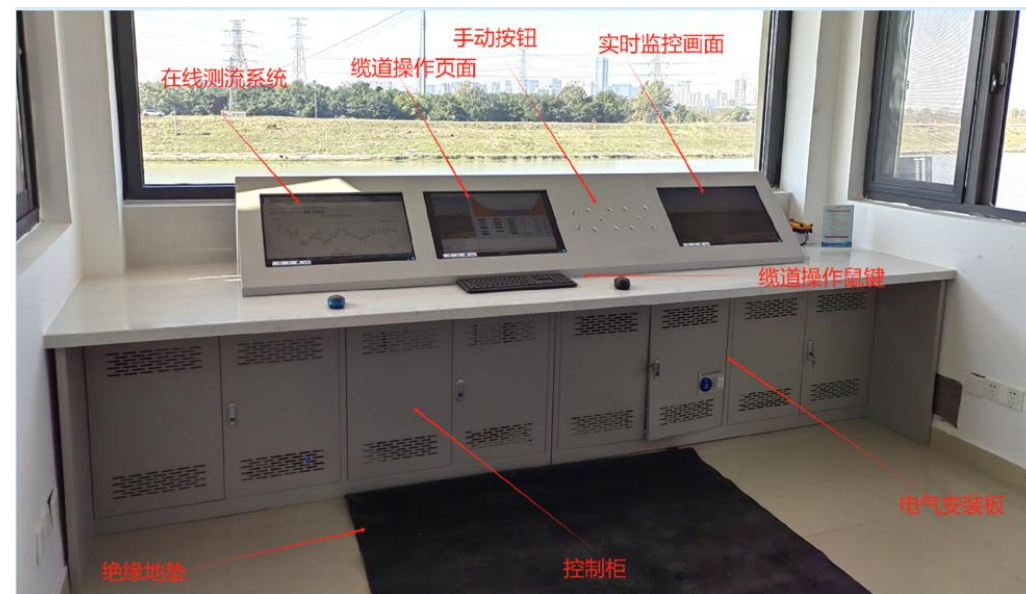
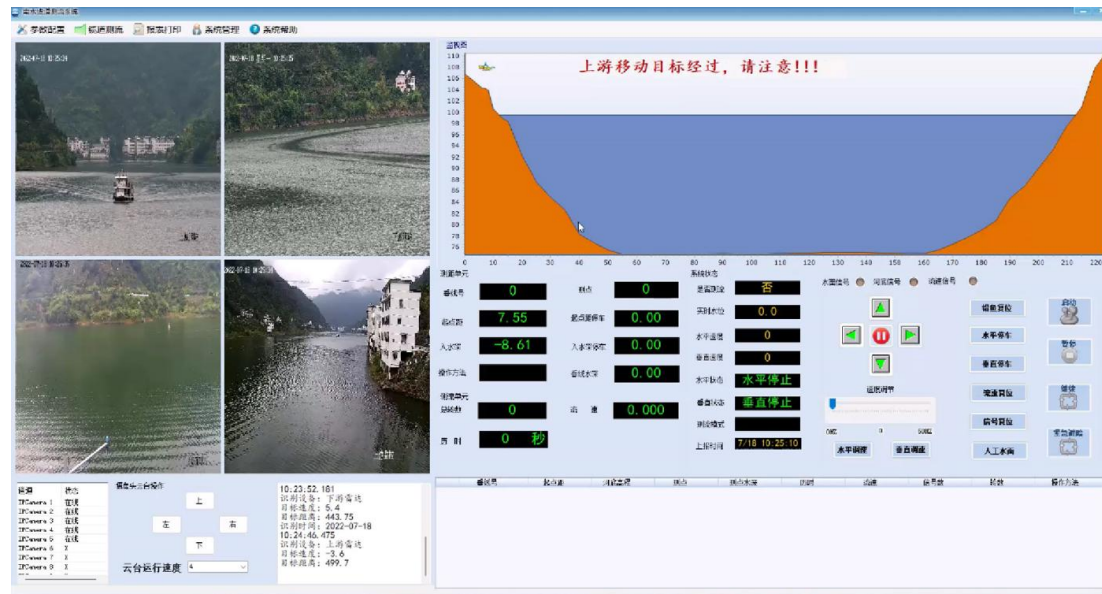
流速\流量

水力学

雷达视频测流系统

自动缆道测流平台

高洪测验杆/塔



- 多设备搭载：可搭载转子流速仪、雷达波流速仪、ADCP、多仓采样器等多种测验设备，完成多任务测验
- 中高低水位流量测验：转子流速仪、ADCP、雷达波流速仪
- 水文缆道测流智能避障预警技术
- 具有现地、移动、远程控制多种操控模式，
- 水位变幅情况，自主选择测验方式

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

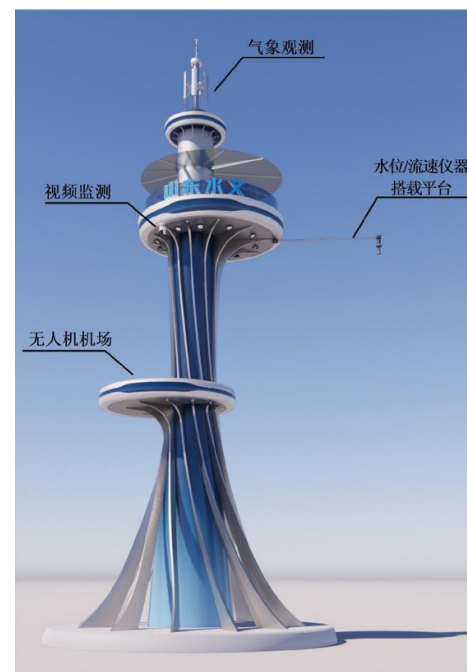
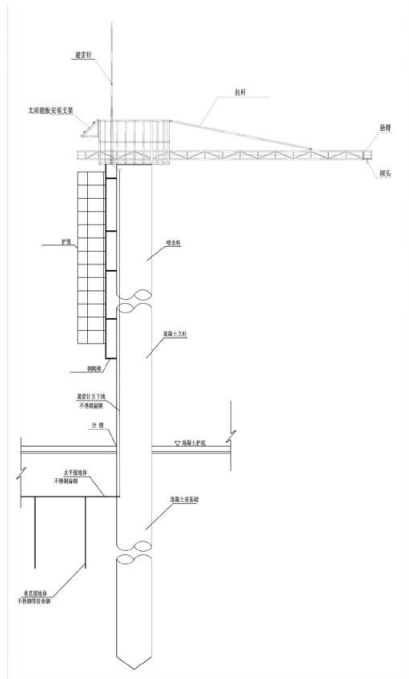
流速\流量

水力学

雷达视频测流系统

自动缆道测流平台

高洪测验杆/塔



高洪水测验水文杆

水文塔

- 高洪水测验水文杆、水文塔用于高洪条件下的水文测验，主要配置水位和流速传感器用于水位和流速监测
- 可根据需要搭载其他不同的监测装置，以完成多要素的水文测验工作
- 水文杆、水文塔高度和基础可根据防洪标准配置，适应不同防洪和抗洪标准

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

应急监测

无人机

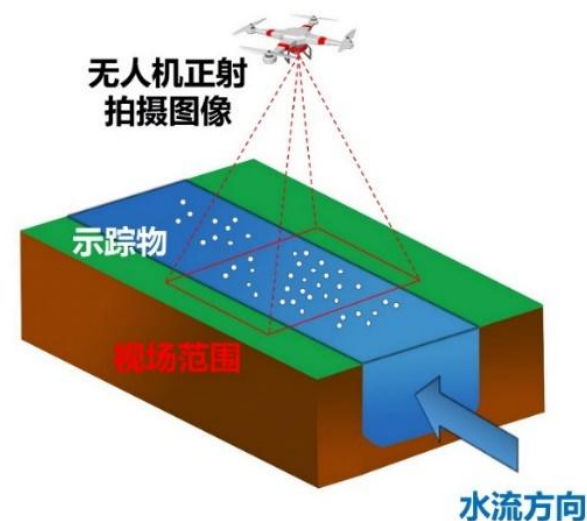
无人船

水文应急监测车

多要素应急监测装备

无人机应急监测

□ 通过无人机平台搭载雷达测速仪和雷达测距仪在河道断面指定位置开展非接触式测流，将测得的表面流速数据回传至测流软件中计算断面流量。



“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

应急监测

无人机

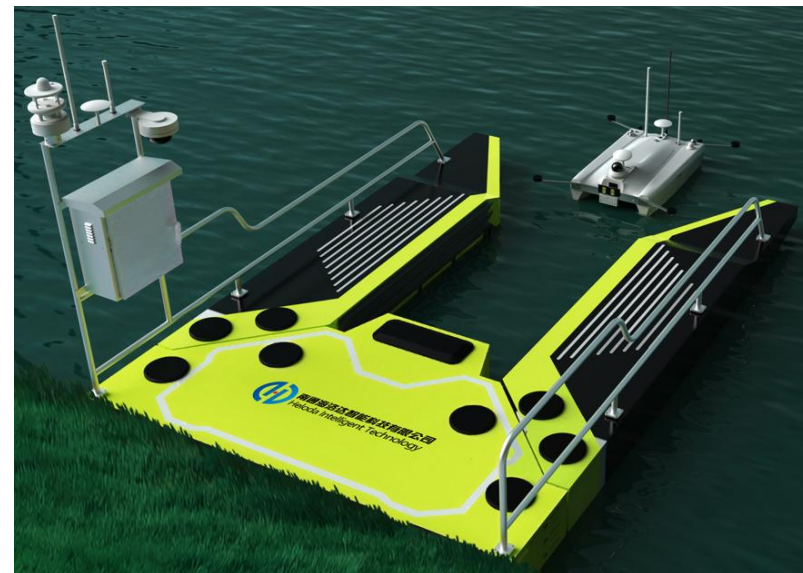
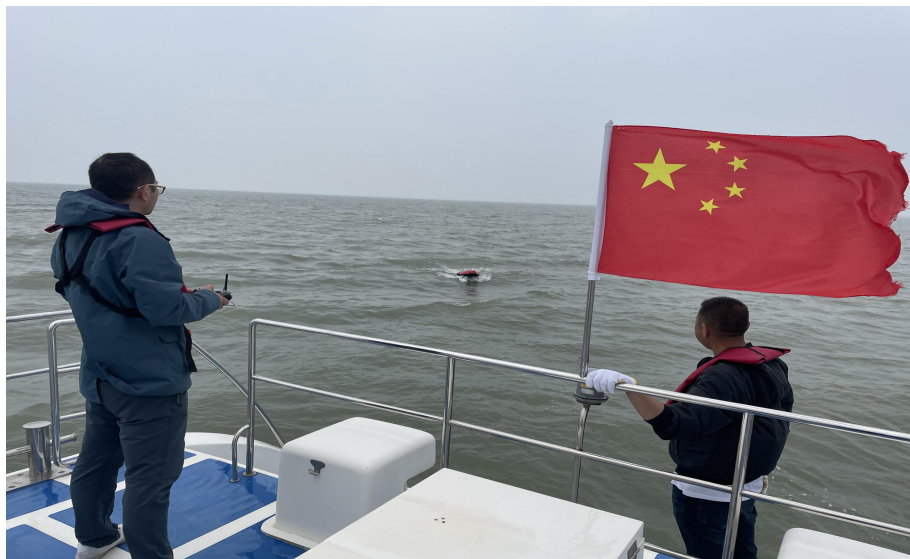
无人船

水文应急监测车

多要素应急监测装备

无人船应急监测

□ 由无人船、走航式ADCP、测深仪、GNSS等，可以实现自动导航功能，遥控距离5km-15km



“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

应急监测

无人机

无人船

水文应急监测车

多要素应急监测装备

水文应急监测车



应急监测指挥车作为“移动指挥中心”包括指挥调度、应急通信、场景采集和综合保障四大系统，集成视频会商、雨水情调度等功能模块。解决应急条件下水文测验指挥调度问题



水文应急监测车作为“移动水文站”可搭载无人机、遥控船、在线视频等现代化流量监测方式，解决全河段、全时程、多要素水文应急监测问题

“第三道防线” 水位流量监测技术装备



Since 1940
南京水利水文自动化研究所

水位

流速\流量

应急监测

无人机

无人船

水文应急监测车

多要素应急监测装备

水文多要素应急装备

主要特色:

- 便捷性:采用高强度模块化箱体封装、支架采用可伸缩折式, 安装快捷、运输方便
- 多要素监测:可监测水位、雨量、流速、气象(风速风向、气压、温湿度、光照度)等水文要素
- 双信道:数据传输采用双信道, 并可在现地组建局域网实现短距离通讯
- 供电方式: 12VDC 锂电池太阳能供电





05

结语及建议



五、结语

- 近年来，水利部门在雨水情监测预报体系建设方面开展了一系列探索性实践。硬件方面，积极推进卫星遥感、无人机、超声波、雷达、视频解析等技术应用，实现从过去以固定站点和断面为主的监测模式，向“天空地水工”一体化迈进。水利部在北京开展现代化雨水情监测预报体系试点建设，组网建设3部国产相控阵水利测雨雷达，实现了对永定河流域北京段以及北京主城区“云中雨”超精细网格化监测预报，并配备多波束水下地形测量船、无人机搭载激光雷达、侧扫雷达等新设备，全面提升雨水情监测感知能力。
- 软件方面，积极推进基于现代化水文信息感知与监测数据的分析计算数学模型研发应用，为洪水防御提供中长期、短期、短临雨水情预报成果。今年珠江流域北江特大洪水期间，水利部门利用“第一道防线”提前2天预报北江可能发生50年一遇特大洪水，利用“第二道防线”提前1天更新预报洪水重现期将达到100年一遇，在主要支流出现洪峰后利用“第三道防线”开展下游洪水演进预报，为北江洪水调度提供了超前精准的决策支持。

1) 雨水情监测应实现测得到、测得准、报的出、报的及时

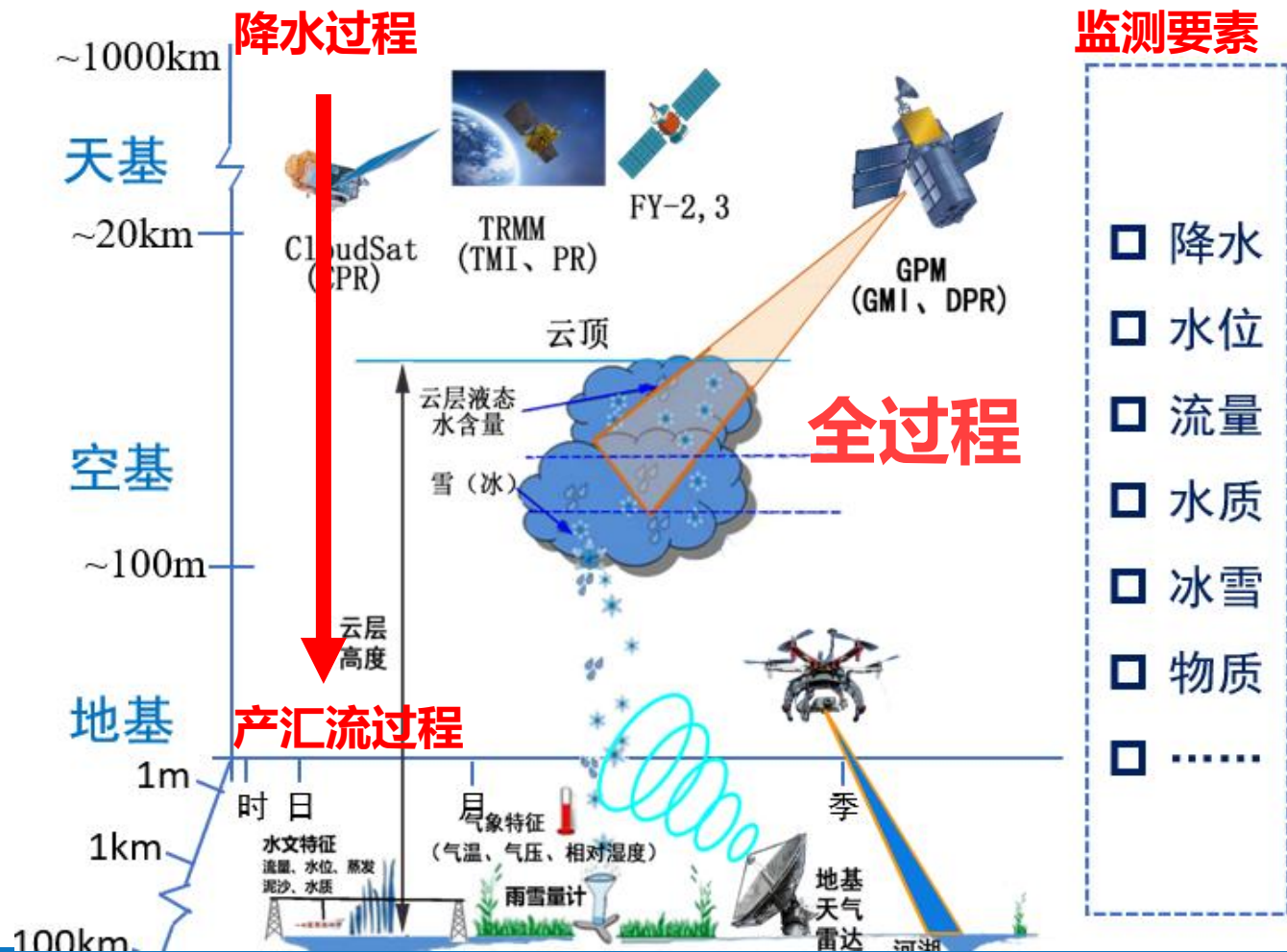
全量程

监测方案

- 固态、液态降水
- 高、中、低水位
- 大、中、小流量

一站一策

- 地理差异
- 监测目标



驱动/影响因素

- 驱动蒸发的辐射
- 影响蒸发的风速
- 影响降水观测的风速

按需配备

- 监测任务
- 业务需求

全要素

2) 雨水情监测现代化发展应实现“三全三高”。

- **监测要素**：在空间尺度上实现对降水、蒸发、水位等监测信息“面”上**全要素**的详尽掌握，包括**水量、水质、水生态及驱动/影响因素**等；
- **监测要求**：在时间尺度上实现春夏秋冬不间断**全天候**的**自动**在线监测能力，在时间、空间尺度上满足水文预测预报的全方位需求，以实现**全过程**（**全量程、全场景**）监测要求，并需满足**高精度、高频率、高适应**要求。
- **监测手段**：点、线、面一体化；多源信息融合。

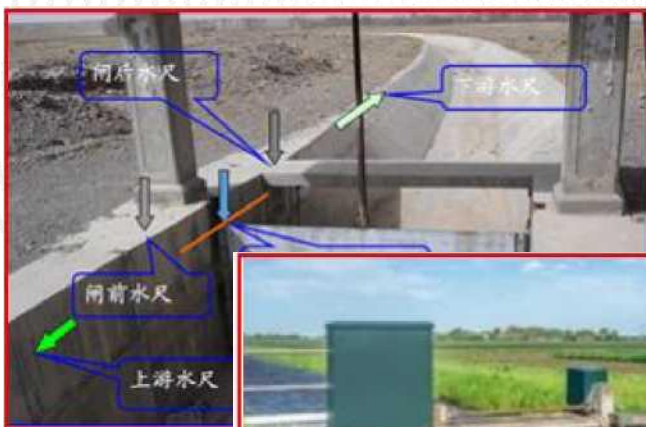
◆ 雨水情监测现代化发展是数字孪生水文**的基础**

◆ 数字孪生水文是水文现代化建设的**重要技术支撑和显著标志**

◆ 数字孪生水文是数字孪生流域（水网、工程、灌区）和智慧水利建设的**核心组成**

3) 准确把握水工建筑物监测的适宜性和有效避免水文现代化智慧监控系统改造过程中水力条件的重大改变

闸门用于关闭和开放泄（放）水通道的控制设施，是渠系建筑物的重要组成部分，可用以拦截水流，控制水位、调节流量、排放泥沙和飘浮物等；建筑物可以用来测流但并不意味着所有建筑物都适宜用来测流。同时应考虑到河流湖泊的监测点智慧监控工程设施建设的不得造成河流水系水力条件的重大改变。



9 渠系建筑物量水

9.1 一般规定

设施完好，平稳流入，符合水力学计算条件

9.1.1 用作量水的渠系建

- a) 建筑物本身完整
- b) 闸前水尺应设在闸前，不得设在闸后，且应设在闸前水流平稳处，不得设在闸后水流湍急处
- c) 建筑物前、后，闸孔或闸墩中无泥沙淤积及杂物阻水
- d) 符合水力计算要求，水位差大于5 cm，水流呈淹没流状态时，其淹没度不应大于0.5
- e) 侧向引水时，水流速度应小于0.7 m/s，并平稳地流入建筑物；正面引水时，水流应沿建筑物整个孔口宽度对称进入建筑物
- f) 利用多孔建筑物量水时，各孔闸孔距起高度应一致

9.1.2 建筑物尺寸测量与误差，应符合下列要求：

- a) 用以量水的多孔建筑物，各孔宽度及高程应一致
- b) 建筑物尺寸应用钢尺测量，计算出几何尺寸的平均值作为计算值
- c) 建筑物几何尺寸的允许误差为±0.01 m

9.2.2 水尺构造与量水

9.2.2.1 上游水尺应设在闸前断面，当闸前无渐变段时，水尺距闸前距离

9.2.2.2 下游水尺应设在闸后断面，当闸后无渐变段时，水尺距闸后距离

9.2.2.3 闸前水尺可直接设在闸前，闸后水尺可直接设在闸后

9.2.2.4 闸前水尺可直接设在闸前，闸后水尺可直接设在闸后

9.2.2.5 闸前水尺可直接设在闸前，闸后水尺可直接设在闸后

9.2.2.6 各水尺零点均应与闸底位于同一高程，允许误差为±0.002 m

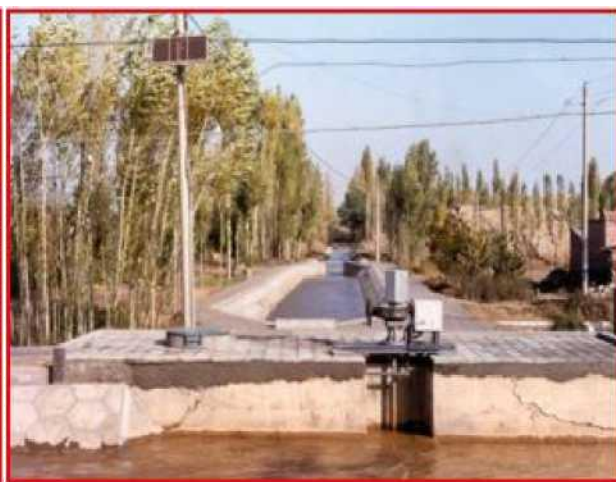
9.2.2.7 上下游水尺可设在渠系边坡上或设在量测台上，也可设置在观测井内

水流平稳，上游水位尺于3-5倍最大水深，下游对水流无影响

$$Q_s = \sigma_s u_{be} \sqrt{2gH_0}$$

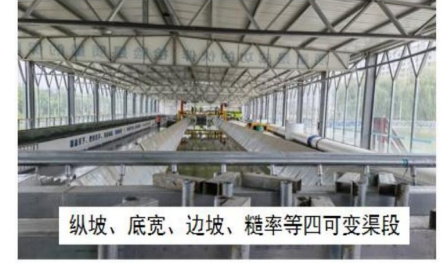
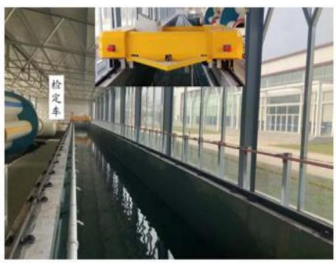
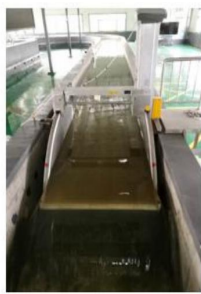

4) 因地制宜选择水文现代化智慧监控系统的布设方式

各新建水文（水位）站点和应急监测系统建设规划应达到“一站一策”，并满足明目标、补空白、强手段、融数据、提能力要求。按照水文站的多要素、全天候不同过程覆盖的监测要求，尽量采用自动在线监测手段，并结合必要的人工补测和校准成果，以实现数字水文站的“一站一址”（如：一个水文站有多个水位、流量等监测点的站内地址复合问题）、“一数一源”（如：一个水文站有多个水位、流量等监测点的数据确值问题）的数字化信息交互。



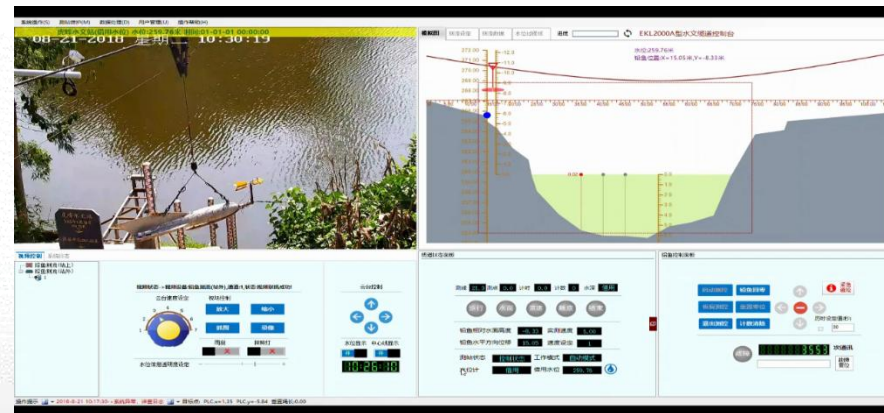
5) 切实有序开展水文仪器及监测设施水文参数比测校测和仪器检定工作。

- 1、在水文参数比测校测和仪器检定方面，对于新型水文仪器新设备在投产之前，必须在水文特性相近的测站进行一定时间和一定变幅量程条件下的准确度比测。
- 2、可采用多点同时框架式流速仪法、几何检验法、层流速法、走航ADCP、移动测流车等进行比测；
- 3、积极探索制定水文监测设施现场测试规范；选择有相关资质的单位开展各水文监测要素的现场测定以满足其量值溯源要求。



6) 数字赋能着力建设现代化数字水文站

- > 基于北斗系统实现水系的计算机识别，基于物联网技术实现水文测验和自动在线监控设施的数字赋能，基于水利专业模型实现水文水资源的优化配置，基于自主创新实现水文站监控设施提档升级，坚持科技引领，完成国家级基本站和一般水文、水位站及雨量站的数字孪生，建设现代化数字水文站；
- > 不断充实完善水文测验和自动在线监控设施，快速提升水文站水文信息捕捉与感知能力，动态掌握水系全域水情信息；
- > 通过智慧化模拟进行水文站断面全域的水资源调度与管理，以区域全程量测控整体规划与系统实施为切入点，推进河流水资源安全集约利用，实现水系输配水服务的安全性、公平性、可靠性和灵活性，全面提升河湖高质量发展新动能。





Since 1940

南京水利水文自动化研究所

谢谢!

敬请批评指正

水利部
南京水利水文自动化研究所