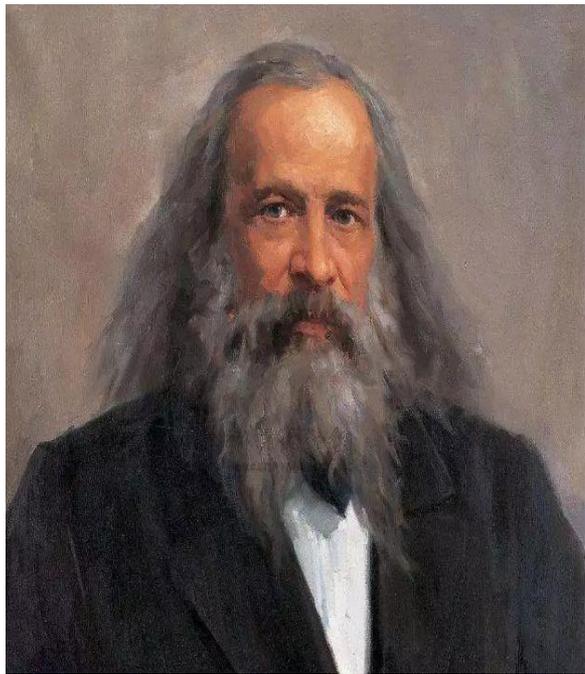


累世量丈度精國中

复杂环境下摄影测量的应用及发展

北京普达迪泰科技有限公司 朴 凯

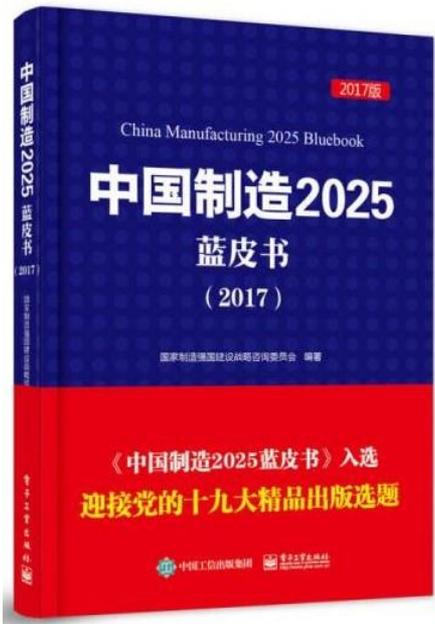
2022年10月24日



门捷列夫

- “科学是从测量开始的”
- “没有测量就没有科学，至少是没有精确的科学、真正的科学”
- “测量是科学的基础”

Base quantity	Base unit	Symbol
time	second	s
length	metre	m
mass	kilogram	kg
electric current	ampere	A
temperature	kelvin	K
amount of substance	mole	mol
luminous intensity	candela	cd



“没有精密的测量，就没有精密的产品”

-----德国

“中国装备制造要实现突破，首先要解决制造质量问题，其关键是能否建立起坚实的技术基础支撑能力，而核心关键是能否建立起超精密测量能力。没有超精密测量，就不会有高质量的高端装备制造。”

-----中国工程院院士 谭久彬

测量是高端制造的重要内容



FAST测控总师
朱立春

“如果把FAST比作一只眼睛，是测量
让‘天眼’睁开了眼睛”

测量在提供精度的同时，
也赋予了智能化现代工业以灵魂。

美国国内仪器产值仅占工业总产值的4%，但对国民生产总值(GNP)的拉动作用则达到了66%。

-----美国国家标准与技术研究院的分析报告

科学研究的**先行官**

工业生产的**倍增器**

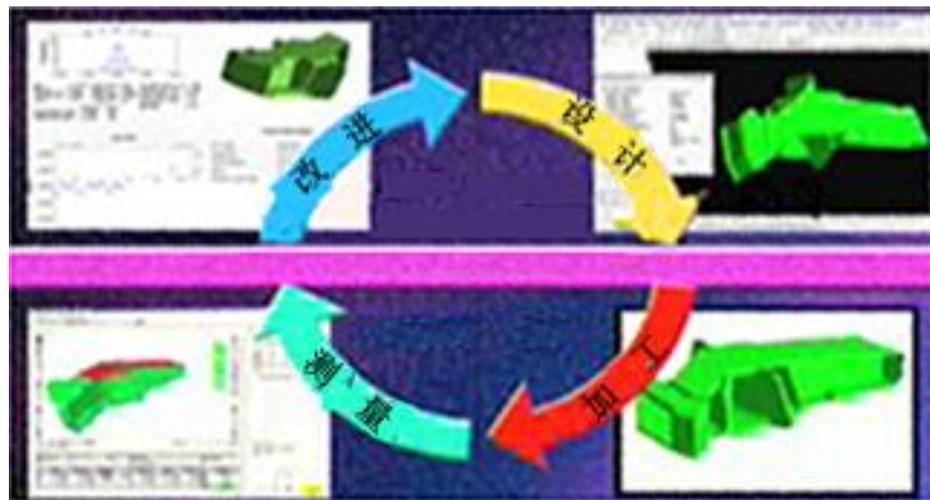
军事上的**战斗力**

社会生活中的**物化法官**

• 智能制造关键技术之一

几何量精密测量技术：零部件检测、整体产品测量、在位测量、在线检测，

测量不再仅仅是
“服务“行业，地位正在从“配角”
向“主角”转变



汇报内容

01

高精度测量系统介绍

02

工业摄影测量系统

03

复杂环境下摄影测量的应用

04

国内高精度测量现状及摄影测量发展趋势

高精度测量系统 (非正交) 介绍

累世量文度精國中

通用高精度测量系统



全站仪



IGPS



激光跟踪仪



坐标测量机



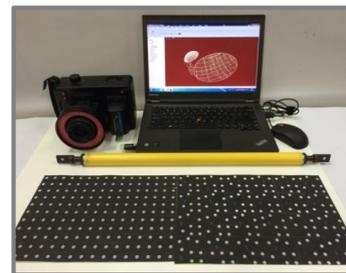
电子经纬仪



激光雷达



激光扫描仪



摄影测量



高精度测量系统 (非正交) 介绍

累世量文度精國中



全站仪



IGPS



电子经纬仪



坐标测量机

基于点、线特征流水线为主的工业化



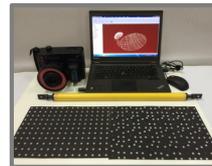
激光跟踪仪



激光雷达



激光扫描仪



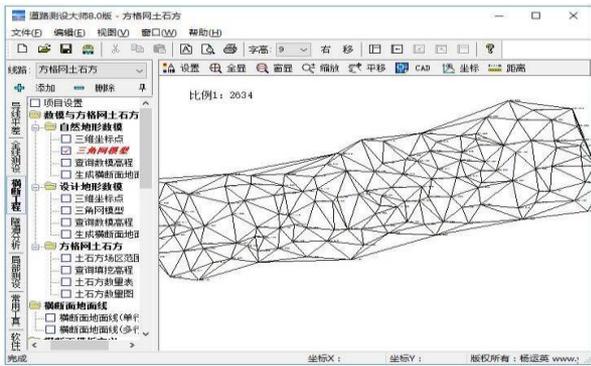
摄影测量

正在满足三维特征智能为主的工业化

原理：极坐标测量

模式：“一距两角”

特点：设站简单、操作容易、测程远

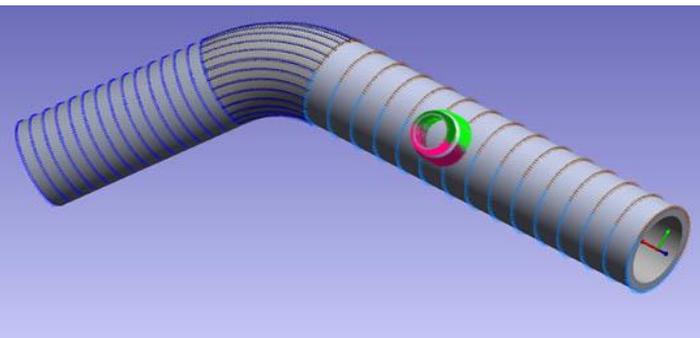
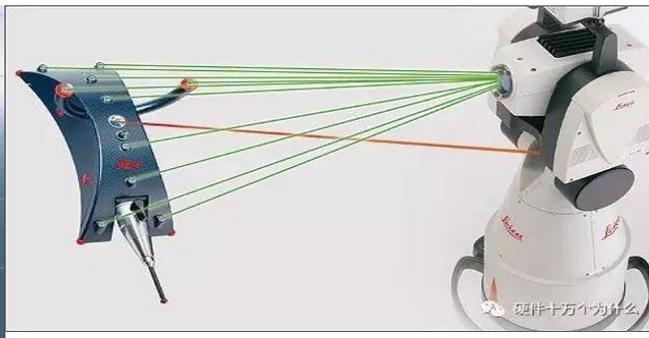
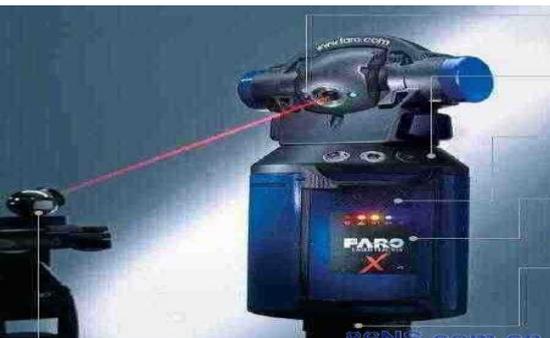


点号	观测角	改正数	改正后角值	坐标方位角 (假方位)	边长 S m	坐标增量 m		改正后增量 m		坐标 m	
						$\Delta x' = S \cos \alpha$	$\Delta y' = S \sin \alpha$	Δx	Δy	x	y
1	87.50.39			224.32.00	149.630					500.000	500.000
2	89.14.08				119.582						
3	87.29.02				119.985						
4	125.06.29				48.291						
5	150.20.22				71.744						
1										500.000	500.000
Σ											

$f_x = \sum \Delta x - \sum \beta_n$ $f_y = \sum \Delta y$ <p>各角改正数: $v_i = -f_x / n$</p> <p>导线全长闭合差: $f_c = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$</p>	$f_m = \pm 24'' \sqrt{n}$ $f_s = \sum \Delta y$ $K = f_c / \sum S$	
--	--	--

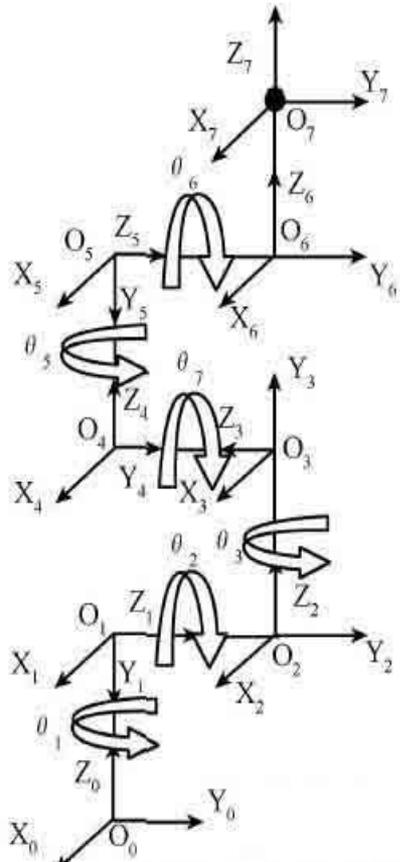
高精度测量系统介绍

激光跟踪测量系统是工业测量系统中一种高精度的大尺寸测量仪器。不仅可以对**静止目标**的三维高精度测量，而且可以实现对**运动目标**的跟踪测量。激光跟踪仪操作简便，可以实时扫描测量和三维点云显示，**精度较高、接触测量、测量速度慢、场地受限。**



高精度测量系统介绍

关节臂式坐标测量系统体积小、重量轻、可在现场进行测量。与正交式三坐标测量机相比，测量速度快，且无需考虑路径优化等问题，使用更加灵活、快捷。主要应用于**制造器件的尺度测量**。



球体2

-特征/球体, 直角坐标, 外
 理论值/ $\langle 556.657, -267.415, 33.532 \rangle, \langle 0, 0, 1 \rangle, 15.049$
 实际值/ $\langle 556.657, -267.415, 33.532 \rangle, \langle 0, 0, 1 \rangle, 15.049$
 测定/球体, 5
 触测/基本, 常规, $D=0, \langle 558.262, -265.753, 40.693 \rangle, \langle 0$
 触测/基本, 常规, $D=-0.001, \langle 553.221, -263.995, 39.28$
 触测/基本, 常规, $D=0.001, \langle 551.698, -269.677, 38.718$
 触测/基本, 常规, $D=-0.002, \langle 554.739, -269.358, 40.54$
 触测/基本, 常规, $D=0.002, \langle 556.155, -265.599, 40.815$
 终止测量/

球体3

-特征/球体, 直角坐标, 外
 理论值/ $\langle 449.368, -241.034, 33.323 \rangle, \langle 0, 0, 1 \rangle, 15.011$
 实际值/ $\langle 449.368, -241.034, 33.323 \rangle, \langle 0, 0, 1 \rangle, 15.011$
 测定/球体, 6
 触测/基本, 常规, $D=0.001, \langle 443.243, -240.99, 37.658 \rangle$
 触测/基本, 常规, $D=-0.001, \langle 444.705, -240.561, 39.18$
 触测/基本, 常规, $D=0, \langle 450.527, -242.061, 40.666 \rangle, \langle 0$
 触测/基本, 常规, $D=0, \langle 451.749, -246.716, 37.609 \rangle, \langle 0$
 触测/基本, 常规, $D=0, \langle 447.43, -246.856, 37.645 \rangle, \langle -0$
 触测/基本, 常规, $D=0, \langle 446.697, -245.283, 38.902 \rangle, \langle -0$
 终止测量/



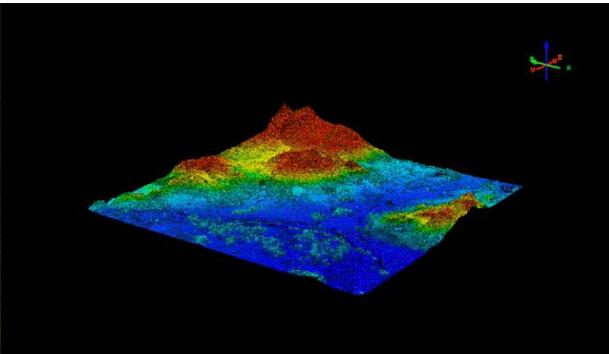
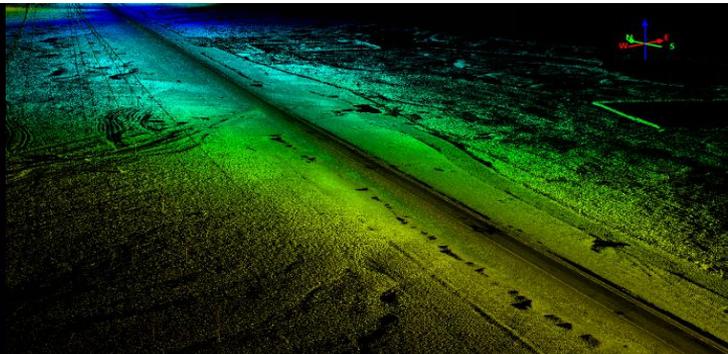
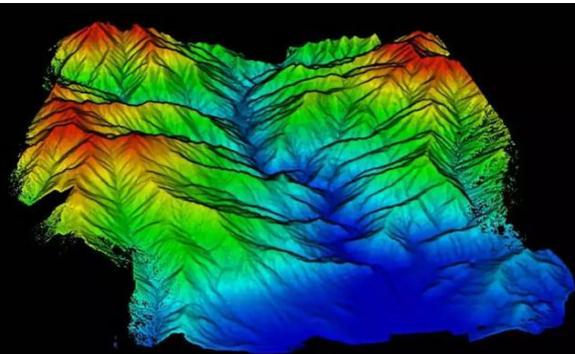
电子经纬仪系统是根据角度空间**前方交会**原理获取空间三维坐标。具有精度高、范围大、建立系统方便、但劳动强度大的特点。



测站	目标	竖盘位置	竖盘读数 (° ' ")	半测回竖直角 (° ' ")	指标差 (")	一测回竖直角 (° ' ")
1	A	左	88° 24' 30"	1° 36' 30"	-45"	1° 35' 45"
		右	271° 25' 0"	1° 35' 0"		
	B	左	88° 34' 30"	1° 26' 30"	-45"	1° 25' 45"
		右	271° 25' 0"	1° 25' 0"		
	C	左	88° 16' 30"	1° 44' 30"	-45"	1° 43' 45"
		右	271° 43' 0"	1° 43' 0"		
	D	左	88° 24' 0"	1° 36' 0"	-45"	1° 35' 15"
		右	271° 34' 30"	1° 34' 30"		
	E	左	88° 13' 30"	1° 47' 30"	-45"	1° 46' 45"
		右	271° 46' 0"	1° 46' 0"		

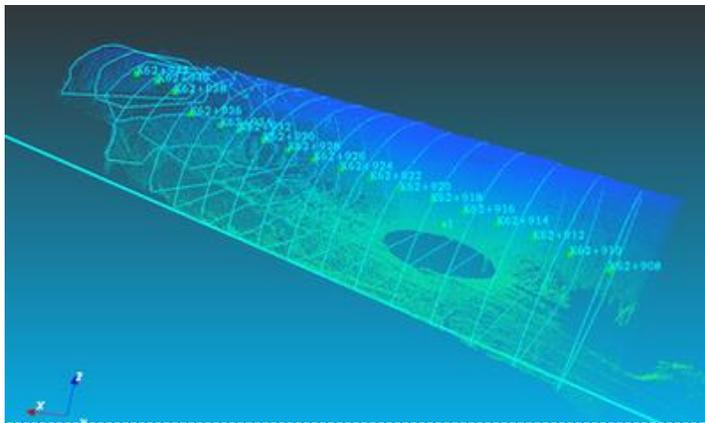


激光雷达是近年使用较多的测量/测绘仪器。具有结构简单, 测量精度高、可控性好、扫描速度快、便携性好, 但受环境环境影响。

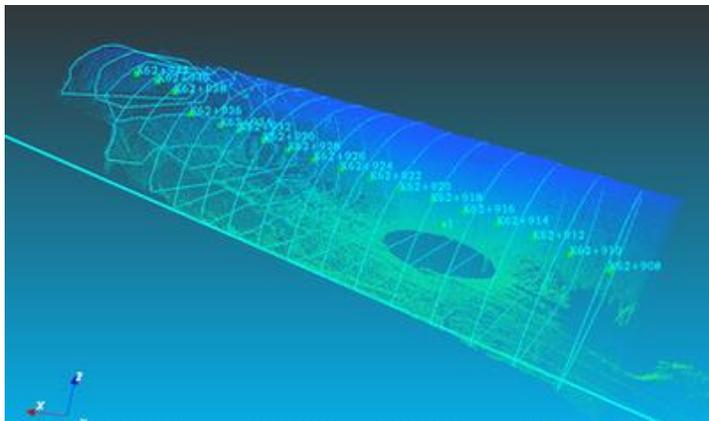




激光扫描是一种从复杂实体或实景中重建目标合景三维数据及模型的技术，具有速度快、高密度、高效率、成本低的特点。



- 1、八大系统在测量精度、范围以及测量方式等方面各具特点，互为补充，在不同测量环境、针对不同测量对象均有广泛应用。
- 2、测量系统特别是测量仪器设备是随着工业化发展而发展，当前需要适应满足与工业化智能趋势相适应的测量方式。



汇报内容

01

高精度测量系统介绍

02

工业摄影测量系统

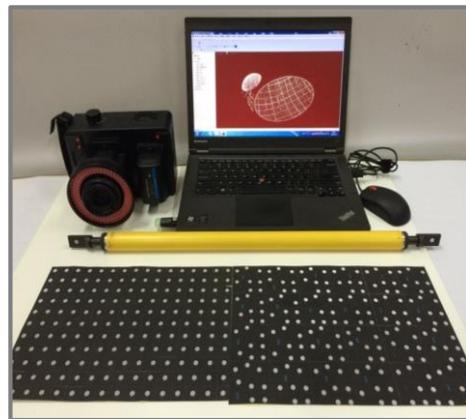
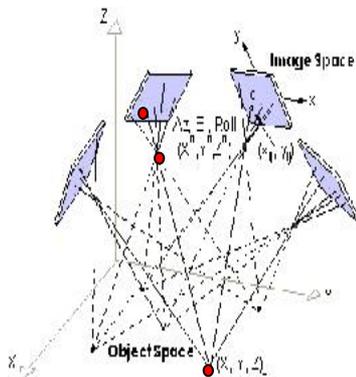
03

复杂环境下摄影测量的应用

04

高精度测量现状及发展趋势

- 1、**摄影测量**：是指利用相机对被测目标拍摄像片，通过图像处理和摄影测量处理，以获得目标的几何形状和运动状态。
- 2、**原理**：测量原理和经纬仪测量系统一样，均是**三角形交会法**
- 3、**数学模型**：目标点、相机中心和像点**三点共线**



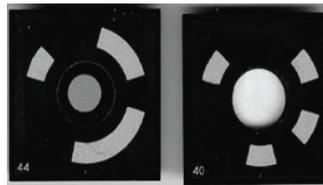
工业摄影测量系统

相机

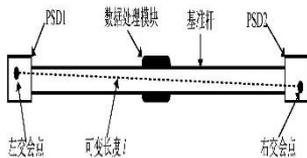


系统组成

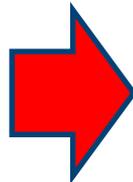
标志点



附件



软件



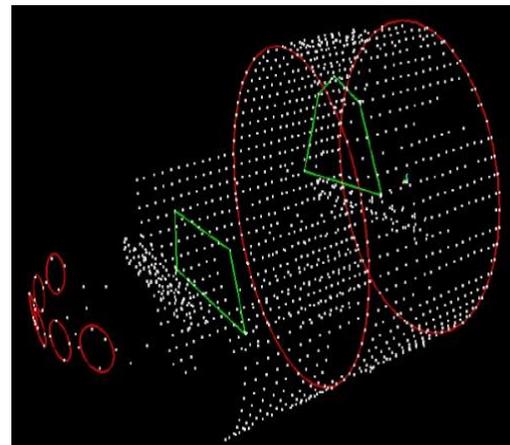
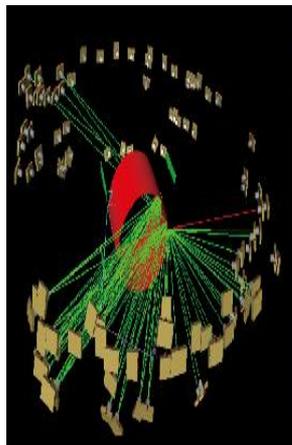


关键技术：

- 数字相机及其标定：径向、偏心、像平面、内方位元素误差
- 数字图像采集：靶标的设计和利用
- 特征图像处理：灰度加权质心法
- 像点自动匹配：基于两幅影像上核线约束条件
- 测量网形的设计与优化

方向：高速，超高速，超大规模图像的大数据快速平差技术

- 1、测量范围：形位公差+相对姿态+物体形状、尺寸 && 时间
- 2、服务领域：航空、航天、核电、船舶以及智能制造等
- 3、优势：大尺寸、动态、复杂环境、施测周期短、精度可靠



工业摄影测量系统

- 与计算机视觉的联系及区别

- 1、理论基础是一致，研究内容和目标上十分相近

- 2、研究内容和侧重点的不同：

- 出发点（应用）、基本公式、数学处理算法等

- 学科交叉越来越多

- 计算机视觉、机器视觉、机器人视觉、
视觉测量、人工智能与模式识别

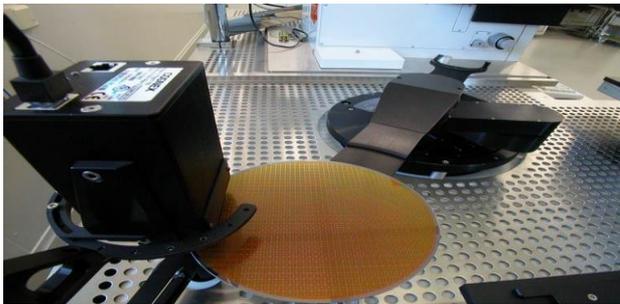
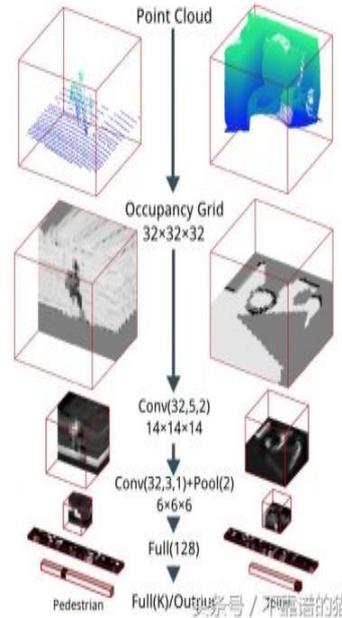


图 1：计算机视觉与其他学科的相互关系



三维机器视觉的测量原理-1

技术类型

双目视觉

测量原理

- 两个视点观察
- 三角测量间接计算

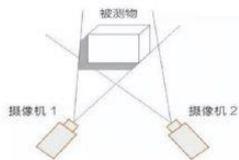
精度/范围

- 毫米级
- 2m以内

影响因素

- 光照及物体纹理

示意图



典型场景

- 码垛（货物搬运及整齐码放）
- 工业零部件精细分拣
- 快速弧线焊接路线的设定

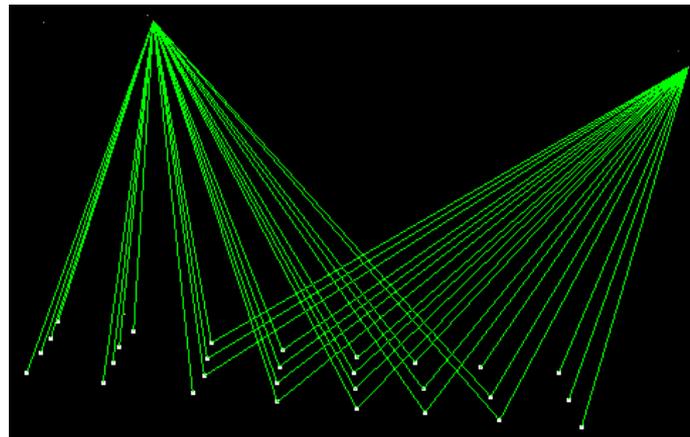
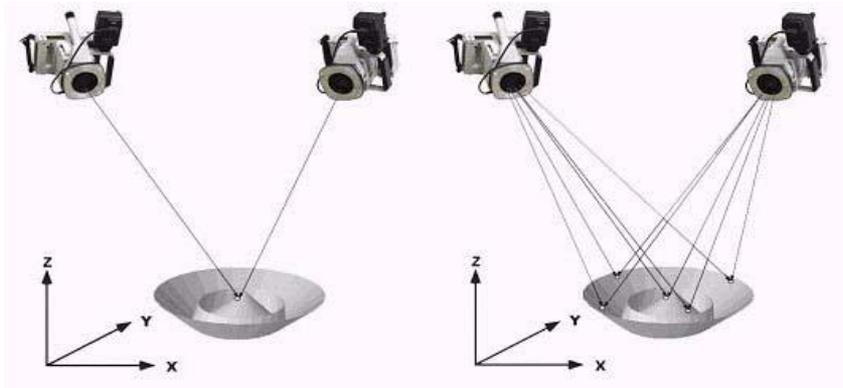


产品规格

型号(项目)	三维摄影测量
测量方式	非接触式面测量
数码相机	专业测量相机
分辨率	4256*2832/7360*4912
测量精度	3um+3um/m
操作环境	兼容 Windows98/NT/2000/XP/WIN7
附件	基准尺, 编码点, 非编码点
后处理软件	IDPMS 专业软件
应用领域	几何尺寸检测, 变形测量, 逆向工程分析等

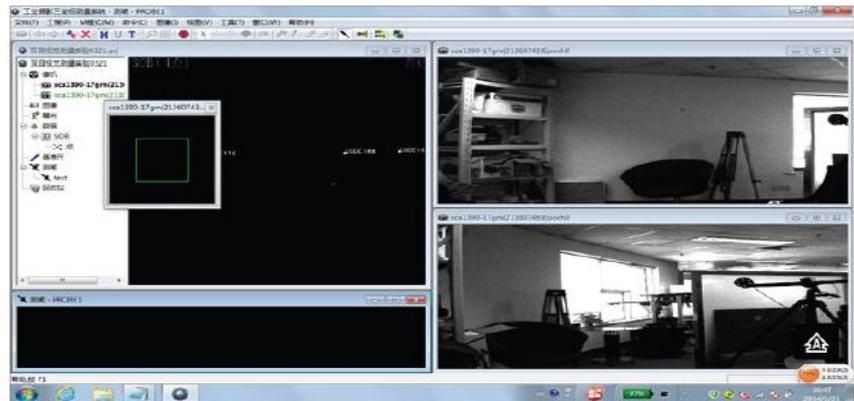
1、多基站数字摄影测量系统

使用数字相机，在不同的位置和方向，对同一物体进行拍摄获取图像，软件自动处理图像，通过图像匹配等处理及相关数学计算后得到点的三维坐标。（人，机器人，无人机，汽车…）



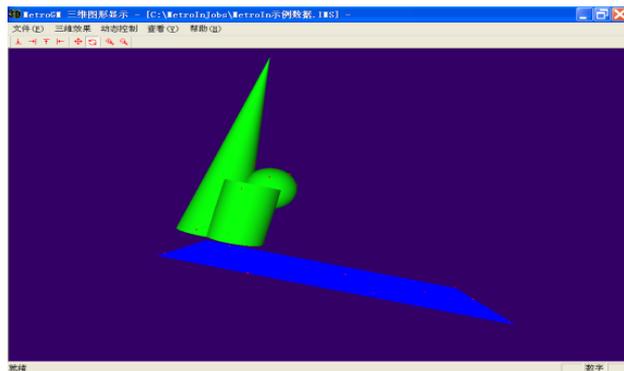
2、双(多)目视觉测量系统

系统采用两台高速像机动态或静态采集被测对象的图像，通过系统软件的图像处理、目标识别、自动匹配、三维恢复等过程后，实时测量被测对象的空间位置、姿态及变形，应用于三维扫描、振动监测、微变形测量、真空等特殊环境中的三维监测、视觉导航等。



3、多传感器智能工业测量系统

系统依据空间角度、距离、光束等数据信息，静态或动态地获取目标点的空间三维坐标。并依据三维坐标对产品的空间尺寸、位置、姿态、形位误差等进行数学分析。用于大型工业产品、生产设备、试验设施等的空间大尺寸几何测量或安装调试。



工业摄影测量系统——产品形态

世界量文度精國中



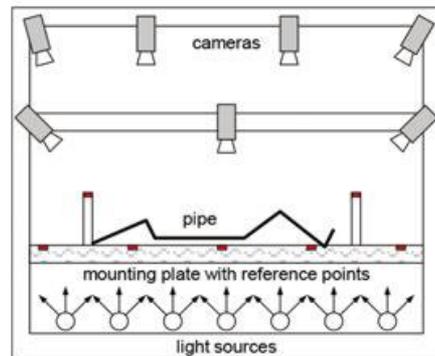
单相机与测笔



双相机与测笔



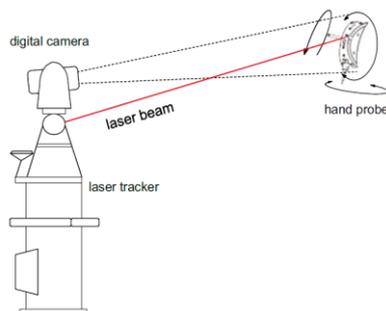
相机、与测笔一体化



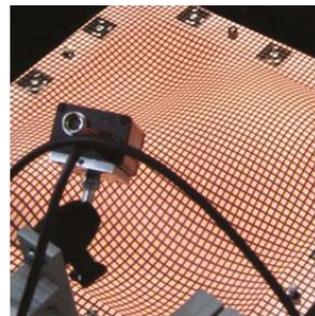
弯管测量系统



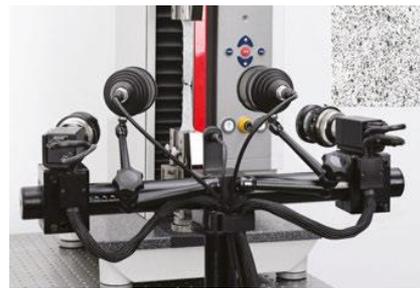
机器人整合双目测量



角度与图像一体化



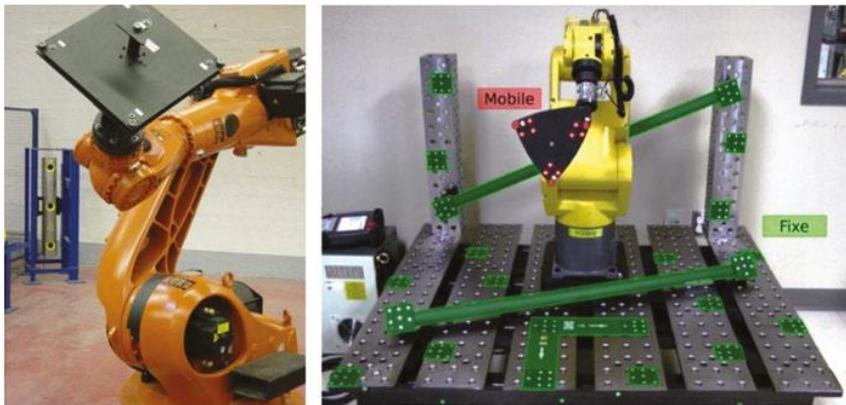
多相机与网格投影



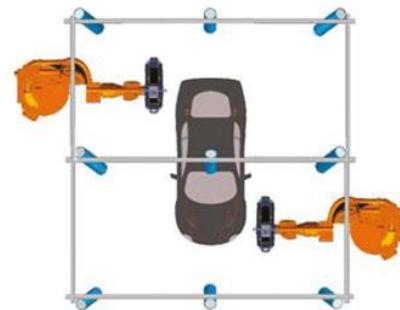
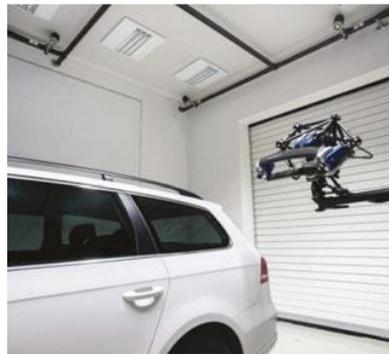
图像相关测量系统

工业摄影测量系统——应用模式

中国精度丈量世界



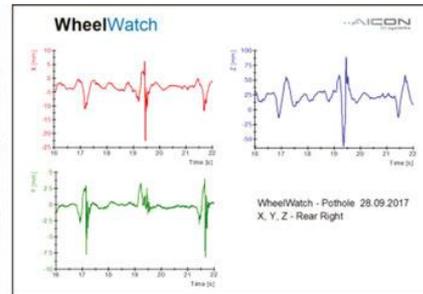
机器人标定



自动化曲面测量



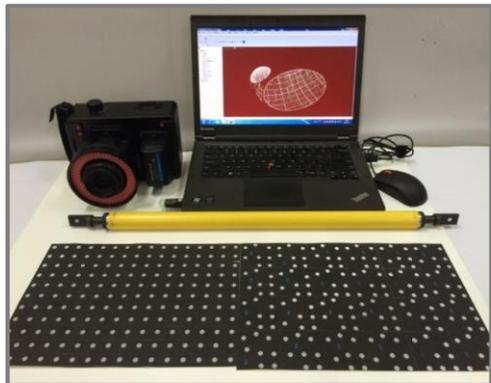
相机与投影装备进行面型与特征检测



六自由度测量

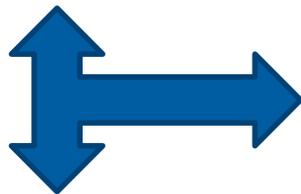
适应范围：

特别适用于待测点众多、目标不可接近、目标处于运动状态、目标处于变形、震动、有害环境、无稳定的优越感架设平台等情况。





相机：硬件的迭代和更新，更加专业



功能模块化
系统一体化
设备通用化



软件：算法的完善和加强，更加精细



汇报内容

01

高精度测量系统介绍

02

工业摄影测量系统

03

摄影测量技术在智能制造中的应用

04

国内高精度测量现状及趋势

在大科学工程中的应用

1、500米口径射电望远镜 (FAST) : 面型大、测量精度高、实时性强、馈源高动态

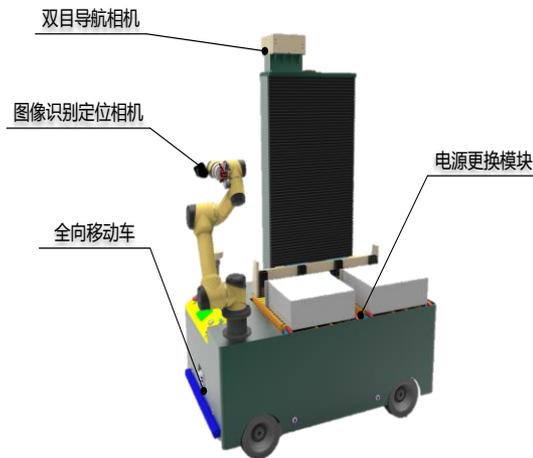
- 单元面板测量 (4450块) : 自动化摄影测量
- 反射面节点测量 (2250个) : 全站仪72台 (平差、高差大、气象条件差影响测量精度对算法模型要求高)
- 馈源支撑: 通过算法解决多台全站仪无法同步测量问题



在大科学工程中的应用

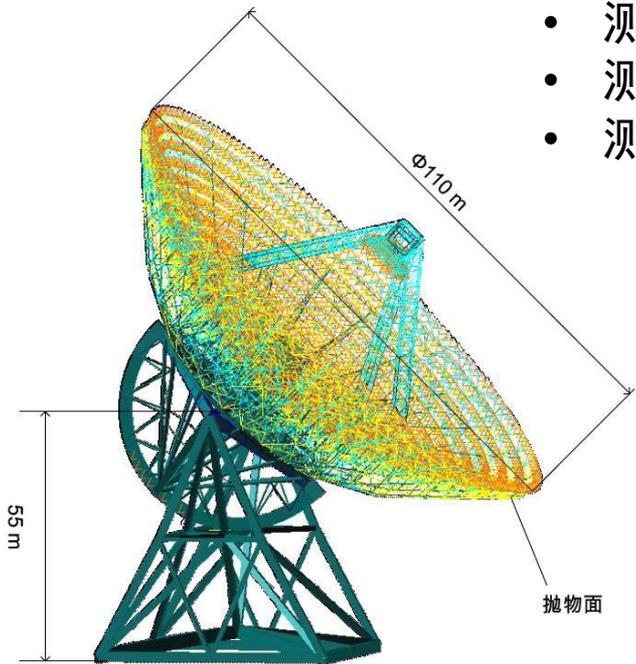
2、上海硬X射线自由电子激光装置：环境高危、有辐射、范围大、自动化程度高

- 利用**摄影测量技术**和**激光跟踪仪**建立高精度准直基准，精度达到400米0.2mm
- 建立了大范围、高精度自动测控网，进而实现基于**机器人的自动化测量维修**



在大科学工程中的应用

3、新疆天文台110米全可动被架式射电望远镜 (QTT)



- 测量尺寸**大**：110米直径
- 测量精度**高**：0.05毫米，相对精度达**50万分之一**
- 测量速度**快**：约**1 min**

现有测量系统无法
满足测量需求

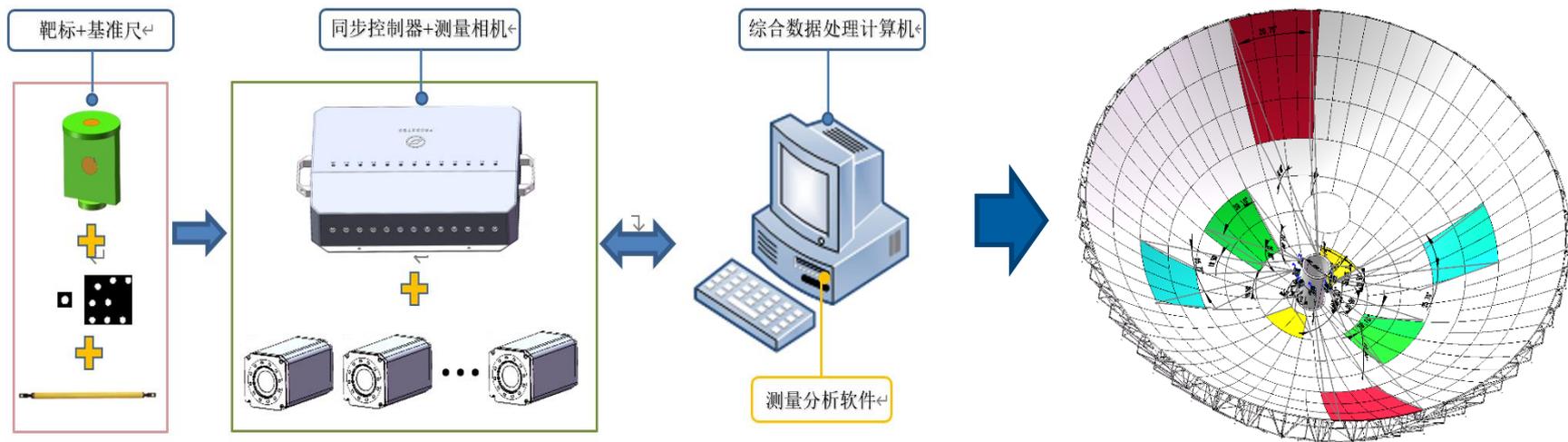
需要新的测量技术解决方案

世界上最大被架式全可动射电望远镜

在大科学工程中的应用

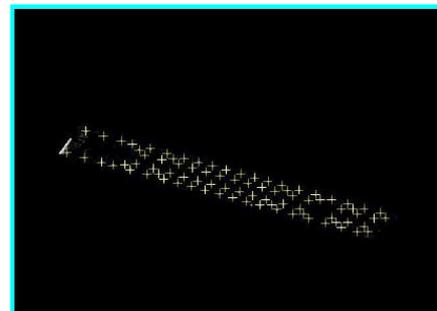
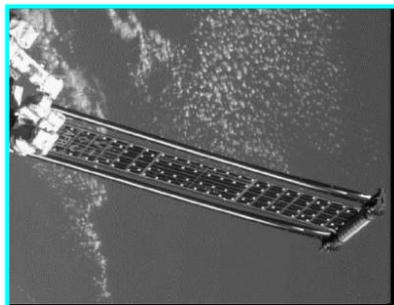
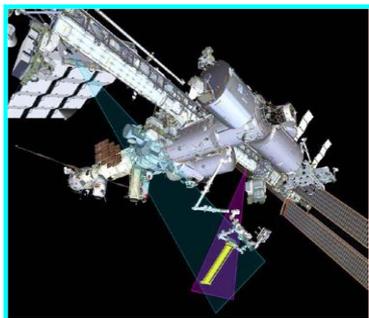
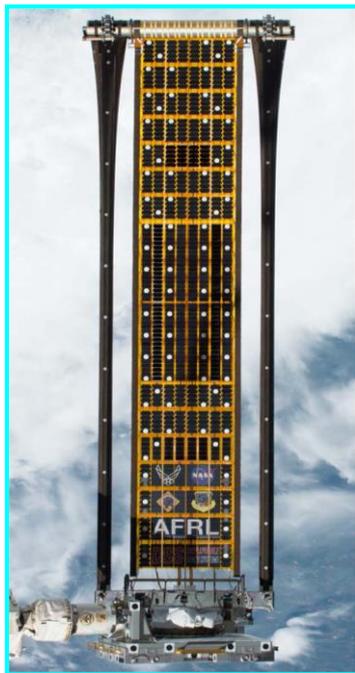
3、新疆天文台110米全可动被架式射电望远镜 (QTT)

难点： 计时、多台设备同步影像的判定以及海量数据的传输、存贮与处理



在大科学工程中的应用

5、太阳翼在轨展开振动测量



空间测量标志研制，空间相机标定算法。

关键技术：空间标定，空间测量标志

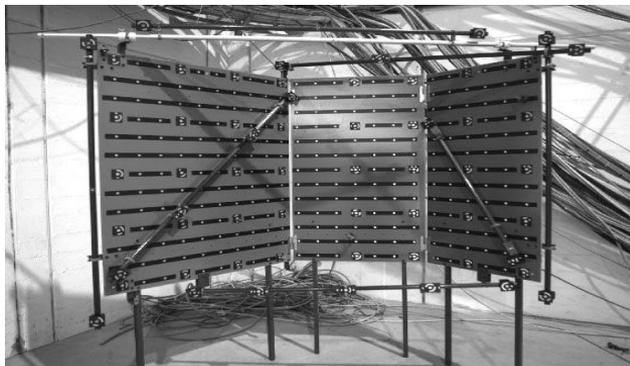
解决问题：在真空高低温、空间辐射、原子氧环境条件下实现
测量标志长周期使用效率不衰减。

在大科学工程中的应用

6、CERN(欧洲核子研究中心)

近景摄影测量系统，该系统包括几台柯达DCS460 和 DCS660 相机以及软件。主要用于15m~20m高的目标测量以及一些特定区域的监测。

CE
RN
相
机
标
定
用
模
板



使用的测量标志



CERN运用摄影测量于
CMS Barrel Yoke, 精度0.5mm

摄影测量应用的几个场景

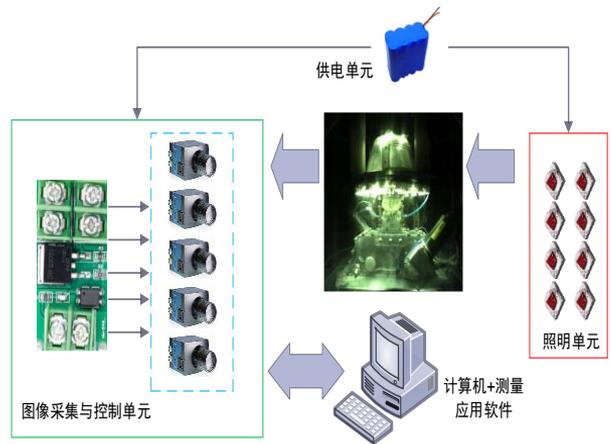
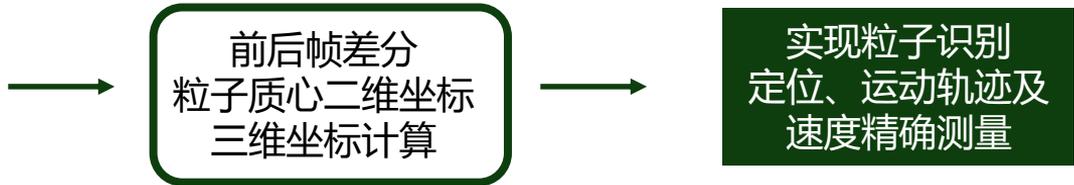
1、高速粒子跟踪测量

难点:

多目高速同步、多角度采集高速粒子图像数据



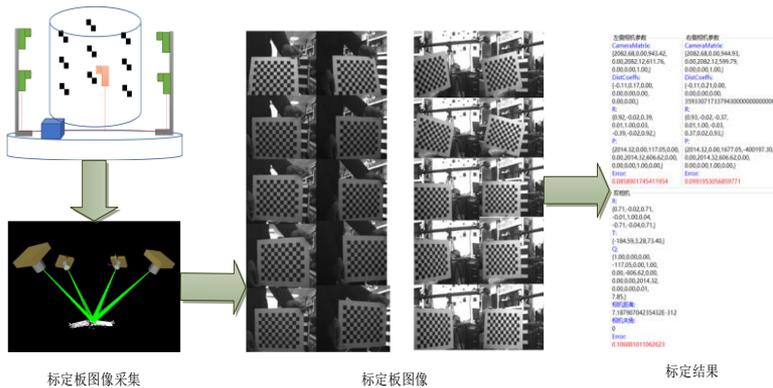
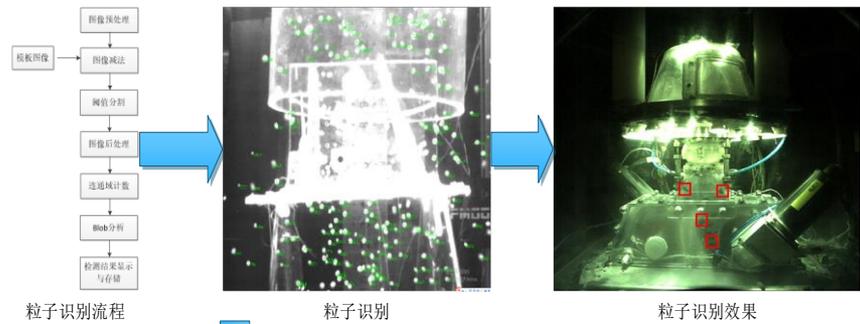
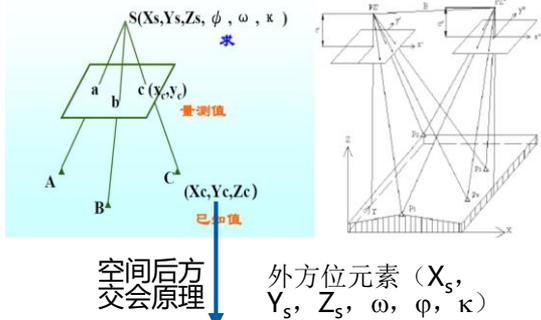
高速相机图像采集



摄影测量应用的几个场景

1、高速粒子跟踪测量

工作流程



(a) 测量系统内外参标定

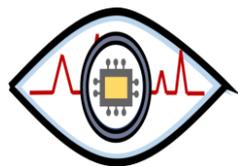


(b) 图像数据分析解算

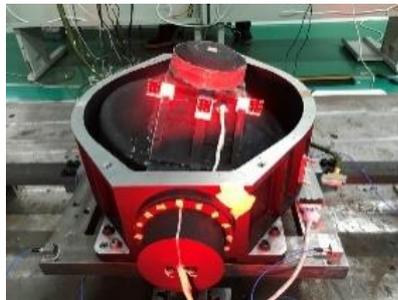
摄影测量应用的几个场景

2、控制力矩陀螺转速测量

难点：相机内外参标定、陀螺与相机同步控制（触发精度 $10\ \mu\text{s}$ ）



$\geq 5000\ \text{fps}$



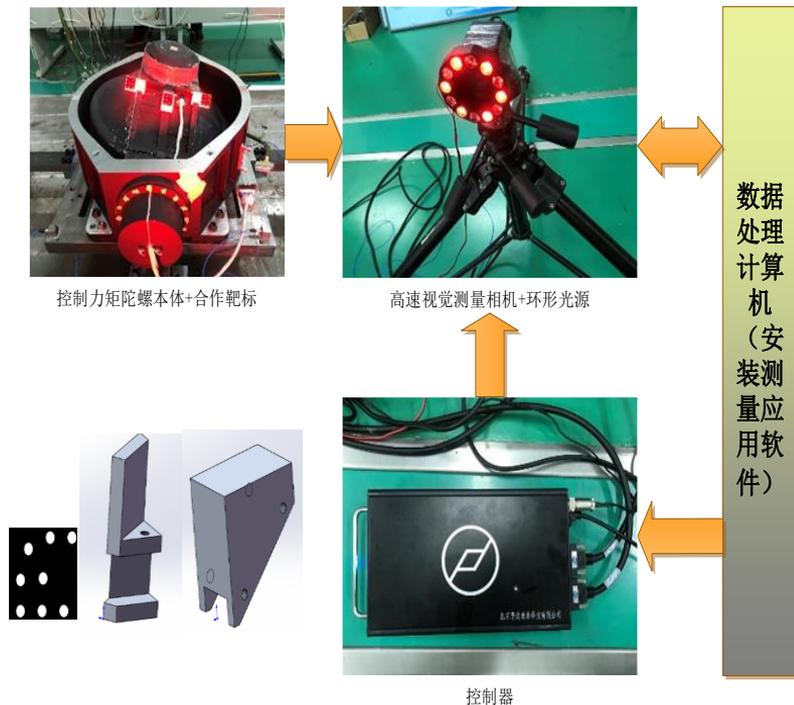
像素点高精度提取算法结合时间信息计算不同时刻的转速

实现控制力矩陀螺转速精确测量

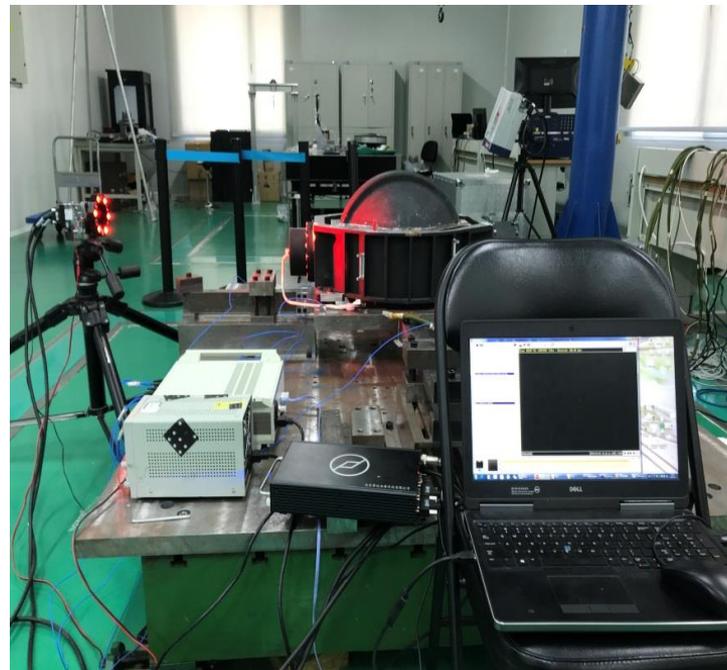
单目高速采集不同时刻合作靶标图像数据

摄影测量应用的几个场景

2、控制力矩陀螺转速测量



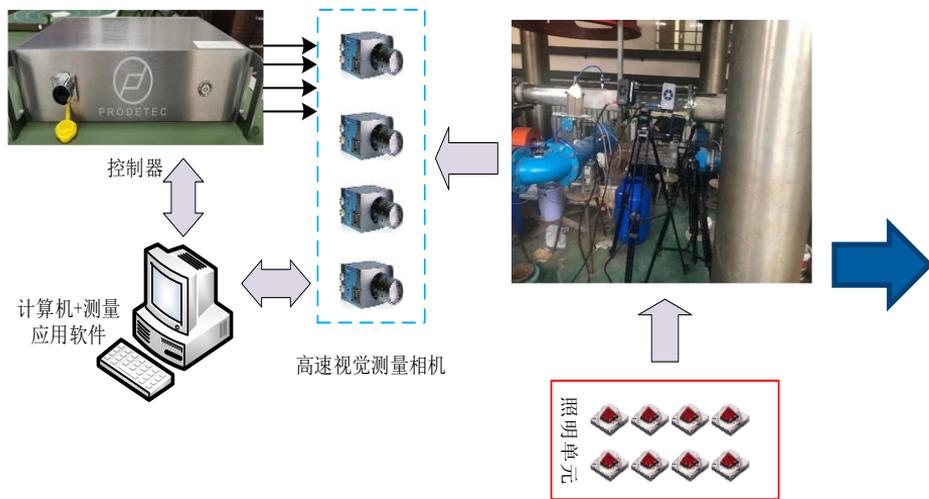
(a) 测量系统设备构成



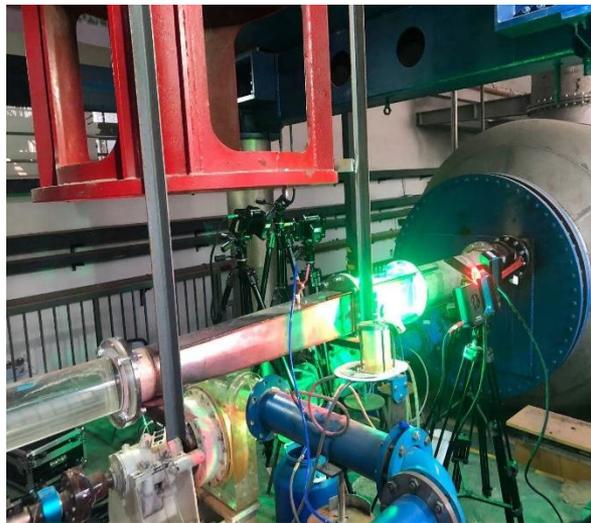
(b) 测试现场系统设备整体连接

摄影测量应用的几个场景

3、核电站水泵吸水池内气泡的运动轨迹及体积大小测量



(a) 测量系统设备构成

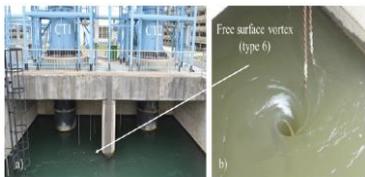
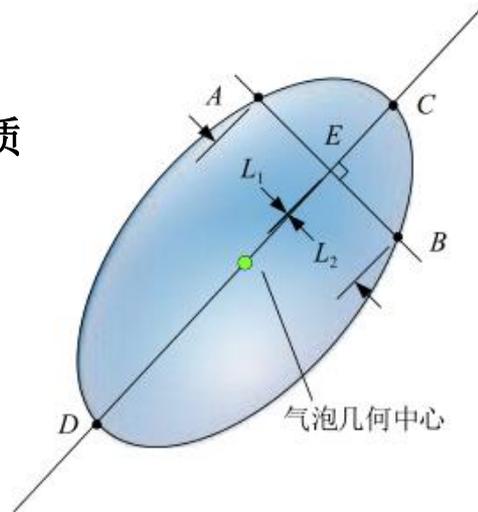


(b) 测试现场系统设备整体连接

摄影测量应用的几个场景

3、核电站水泵吸水池内气泡的运动轨迹及体积大小测量

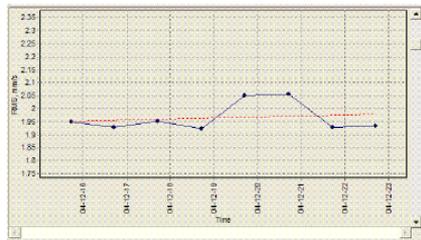
- 通过重心法求取**气泡质心坐标**；计算每幅图像中左右两个气泡的质心位置，确定相邻气泡之间的位移大小（以像素为单位）；同时，根据测量相机曝光时间，计算气泡的速度大小
- 通过Canny边缘检测算法获得气泡的边缘图像；以气泡质心的横坐标所在的垂直线为回转轴，计算**气泡的体积大小**，将以两侧边缘为母线计算的体积取平均值作为最终的气泡体积



多目高速同步、多角度采集
高速气泡图像数据

气泡边缘检测
气泡位置的
三维点坐标计算

实现气泡
运动轨迹
及体积精
确测量



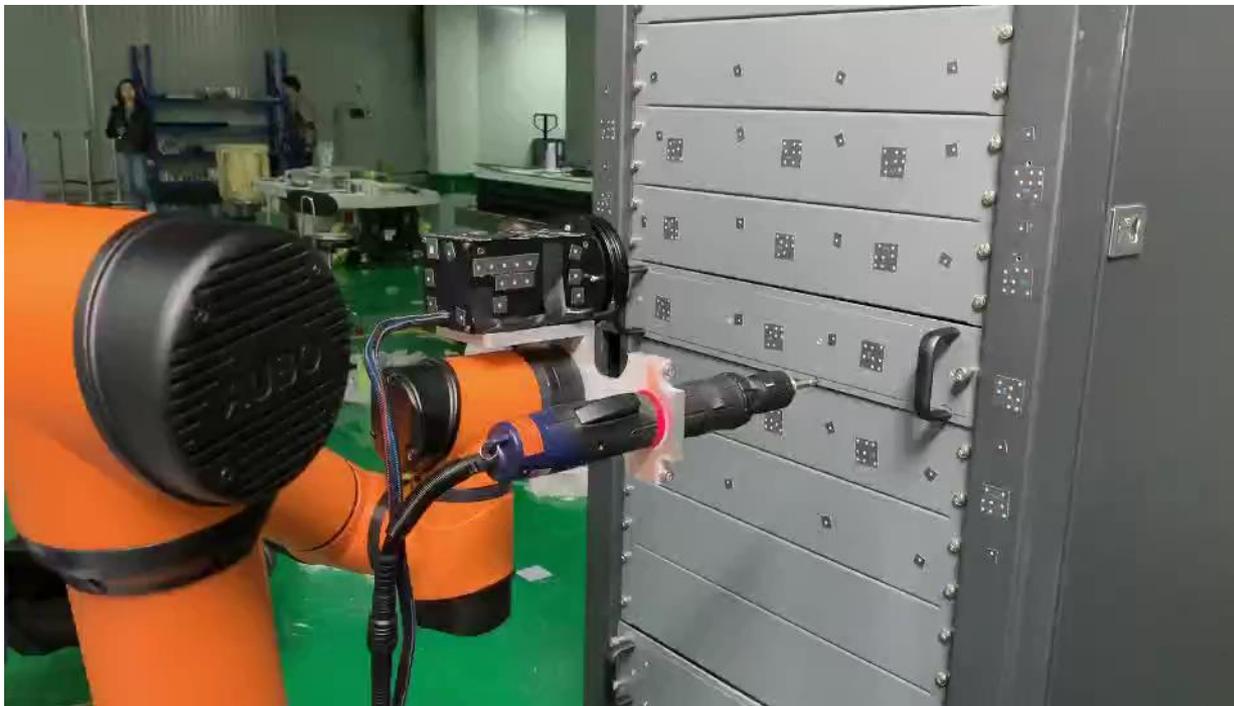
在智能制造中的应用

优点：与当前其它测量系统相比，工业摄影测量系统以其智能化程度高、采集数据量大、测量速度快/可实现非接触测量，受外部环境影响小，对硬件依赖程度低，成为智能制造领域中的主要测量技术手段。特别在几何量（几何尺寸、型位误差等）精密测量测试技术有特别的优势。

两大应用：

1、可作为自动化控制系统的**眼睛（测量传感器）**，为机器人、AGV车与自动化生产线等提供空间位置，姿态与尺度信息，实现柔性导航、引导功能。

2、可作为智能检测与测量分系统独立工作，进行**尺寸测量与智能识别**。



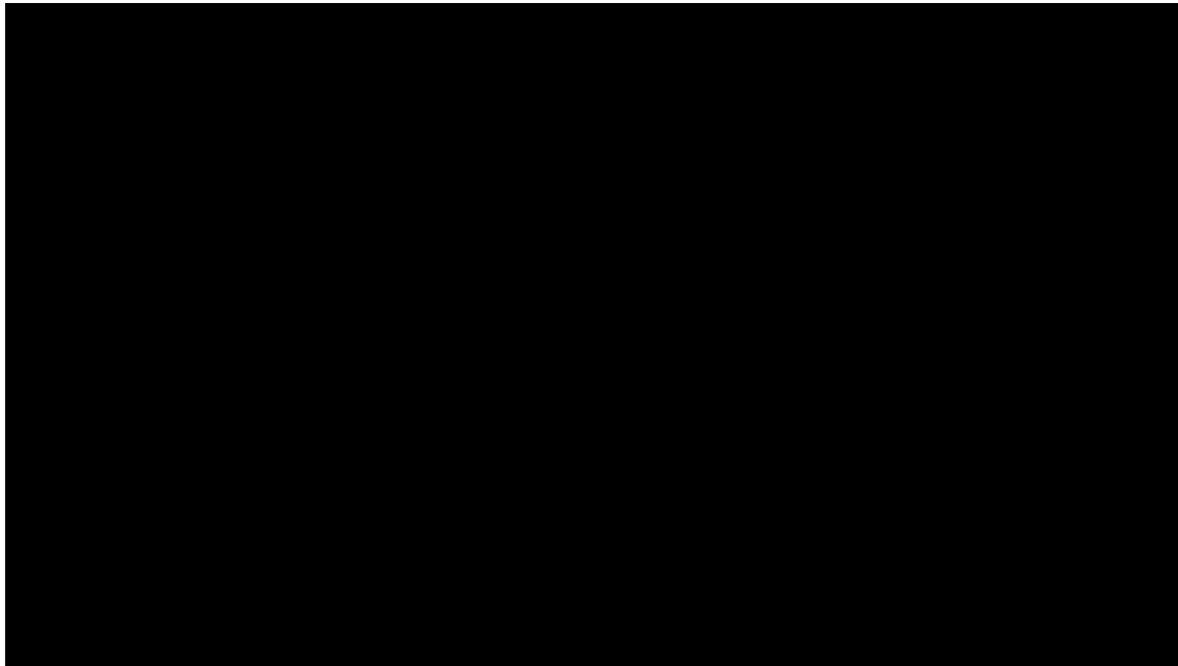
核辐射环境下检修机器人



空间航天器燃料自动加注对接视觉引导系统



FDJ智能柔性检测系统



目标任务：

实现装备非接触式自动化检测，提高检测效率和检测精度。主要检测任务包括安装尺寸、管路间隙检测、零组件缺失检测、焊缝检测、孔检测、外观缺陷检测等。

技术特点：

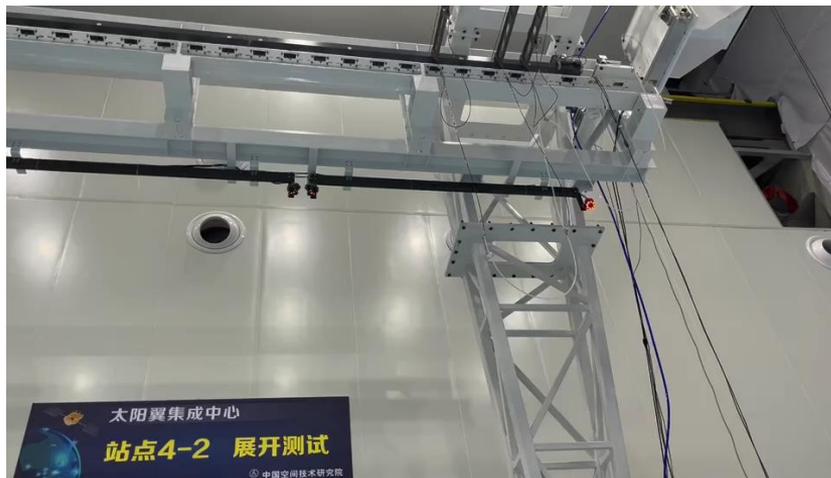
- (1) 精度高；
- (2) 非接触；
- (3) 自动化；
- (4) 任务规划速度快；

应用领域：

高端装备制造行业

在智能制造中的应用

中国航天丈量世界



汇报内容

01

高精度测量系统介绍

02

工业摄影测量系统

03

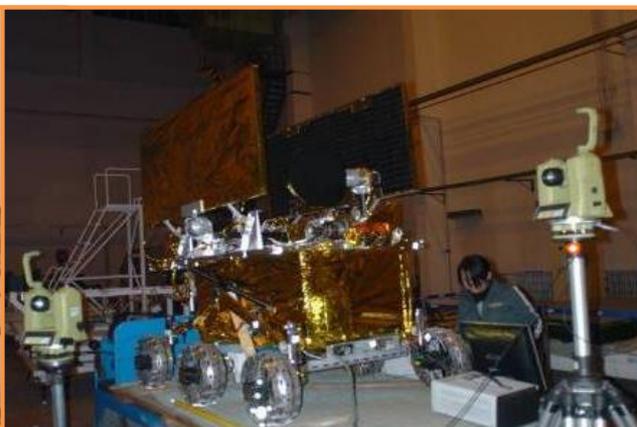
摄影测量技术在智能制造中的应用

04

高精度测量现状及发展趋势

需求变化

- 1、测量目标的**尺寸**越来越大；
- 2、测量**精度**要求越来越高；
- 3、测量目标及现场**环境**越来越复杂；
- 4、**动态化，智能化**测量需求越来越多。



通用精密测量系统

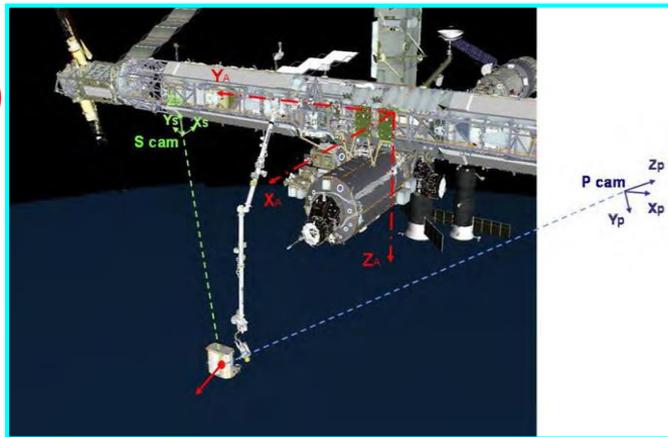


综合测量解决能力

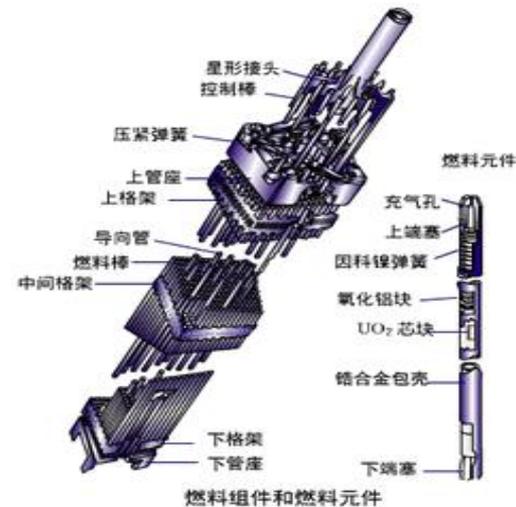
整精密理念：各用所长+相互补充+相互认证=融合提质

高精度测量技术发展趋势

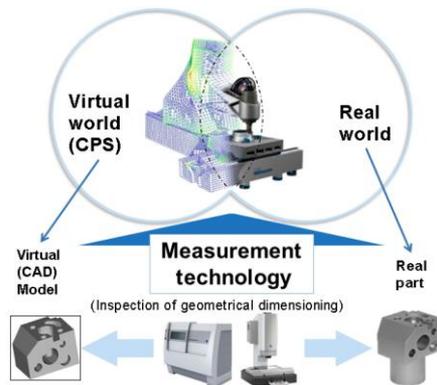
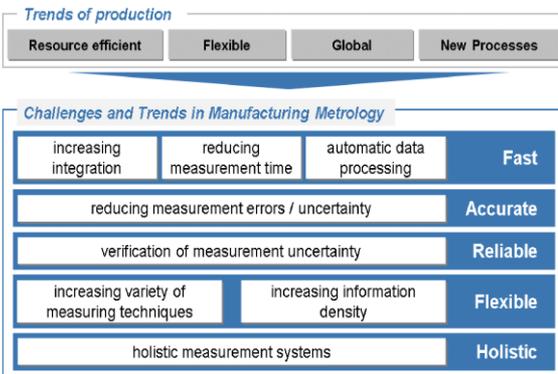
空间测量与装配保障技术(空间机器人)



极端环境测量与智能化



工业4.0 四大关键技术之一



➤➤ 高精度测量技术发展趋势

- ▲ 新技术的发展和市场的需要为摄影测量的高质量发展提供了机会。
- ▲ 以摄影测量技术为代表非接触式的光学测量已经成为未来发展一个主流方向，特别是在光场技术发展下，在融合计算机视觉的相关理论，应用计算机技术、数字图像处理技术、模式识别等学科的理论和方法，再加上数字相机等硬件的改进和发展，
- ▲ 国家对测量相关领域发展的重视

为实现弯道超车的提供了内外部条件

摄影测量应用的几个课题：

- 1、**多摄站摄影测量技术**，对工厂流水生产线上的产品，并借助机器人对产品实施快速的导向、摘选和分类。
- 2、基于遥控操作装置系统的深海海底测量与探测，以及**混水状态**下目标物的**摄影与三维形态重建**。
- 3、**高速摄影测量手段**，计时、多台设备同步影像的判定以及海量数据的传输、存贮与处理。

摄影测量应用的几个课题：

4、基于满足各类应用**检测场景的摄影测量模块技术**。如，基于舰载矿石量的数字摄影测量系统、基于结构光和主速摄像机的车载隧道断面测量系统、车载高速公路路面现状检测系统、火车车轮踏面外形自动检测系统、三维高速过程摄影测量记录系统、检查机械转动轴偏心的测量系统、**混沌水下目标**的一种数字摄影测量系统。

未来：硬件不断更新、理论不断丰富、应用不断拓宽。

中国工匠精神丈量世界



感谢各位专家聆听!

补强民族工业之翼，擦亮数字社会之眼!