



# CEPC alignment and installation EDR plan

**Wang xiaolong**

On behalf of CEPC Alignment and Installation Group

CEPC DAY  
Feb. 28, 2024, IHEP

# Contents

---

1. 前期工作回顾
2. **EDR**工作

# TDR comments

1. 准直精度要求提的太高了，要考虑地基运动、温度影响。
2. 磁铁标定方面需要研究特定的标定方法、工具、测试平台，自动化测量。
3. 骨干网测量精度估算太乐观。
4. 需要每年开展平滑准直。

1 The misalignment errors presented are very challenging for all the components in the injectors, booster and main ring. They should integrate the ground motion expected between two consecutive measurement and adjustment campaigns and other parameters as temperature gradients, mechanical constraints, etc. The  
2 fiducialisation accuracy is not achievable by standard techniques and will require very specific methods, tools and test benches for automated measurements. Given the number of components, the fiducialisation measurements  
3 will have to be launched at least two years before the installation begins. The determination precision for the underground network seems very optimistic just using TS60 instruments and long-distance measurements. The  
4 smoothing measurements (with an expected duration of 7 months) will have to take place every week. In the  
5 MDI area, a solution to link the tunnels on either side of the detector is proposed before the detector installation but another is required once the detector is in place.

6 The committee welcomes the proposal to monitor the tunnel deformation using alignment sensors but a clear strategy has to be proposed as their implementation does not appear in the installation schedule and their integration is not shown in the tunnel cross-section presented during the review.

7 Smoothing measurements and adjustment must be included in the general schedule of installation, as they take a significant time.

5.MDI:探测器就位后要解决两端设备的联系测量问题。

6.变形监测传感器安装方案。

7.平滑准直需要花很多时间，要包含在安装时间计划中。

# TDR recommendations:

---

## A.30.2 Recommendations:

1. Relax the alignment requirements in all area wherever possible;
  2. Launch the development of methods and tools for high accuracy fiducialisation;
  3. Propose an alignment strategy of the main machine integrating the deformation measurements;
  4. As soon as the site location is chosen, geodetic studies should be launched, including the implementation and realisation of reference frames and the determination of the equipotential surface of gravity, at both surface and underground-tunnel levels;
  5. Regarding the required 0.1 mm magnet alignment accuracy, analyse and reconsider if the HLS-monitor accuracy of  $\pm 0.01$  mm can be relaxed;
  6. R&D must be pursued on other key subjects such as geodetic aspects and alignment systems. The committee recommends launching collaborations with international laboratories having the expertise and experience in order for readiness by 2026 to be achieved.
1. 放松准直要求
  2. 研发高精度标定方法、工具。
  3. 提出结合变形测量的准直对策。
  4. 开展大地测量研究。
  5. HLS精度可以降低。
  6. 开展国际合作，研发新的技术。

## ● 国内专家建议

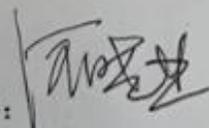
1. 细化各准直环节的误差分配。
2. 进一步细化区域大地测量方案，分析大地水准面模型对准直精度的影响。
3. 完善从地面到地下隧道的基准坐标传递。
4. 进一步分析和研究隧道网测量仪器精度和控制网测量精度。
5. 充分考虑温度、气压、湿度等环境因素对测量的影响。
6. 分析和研究对撞区高精度变形监测方案，深入细化对撞区精密准直方案。
7. 开展自动化测量方法和设备研究，提高准直效率。
8. 对上述关键技术和方法进行验证。

### 评审意见

2023年9月1日，中国科学院高能物理研究所环形正负电子对撞机（CEPC）项目组在北京怀柔 PAPS 会议室组织召开了 CEPC 加速器准直方案评审会，评审组（名单附后）听取了 CEPC 准直方案报告（报告人：王小龙），经讨论，专家建议如下：

1. 根据大尺度准直精度要求细化各准直环节的误差分配。
2. 进一步细化区域内大地测量方案，分析大地水准面模型对准直精度的影响。
3. 完善从地面到地下隧道的基准坐标传递。
4. 进一步分析和研究隧道网测量仪器精度和控制网测量精度。
5. 充分考虑温度、气压、湿度等环境因素对测量的影响。
6. 分析和研究对撞区高精度变形监测方案。深入细化对撞区精密准直方案。
7. 开展自动化测量方法和设备研究，提高准直测量效率。
8. 对上述关键技术和方法进行验证。

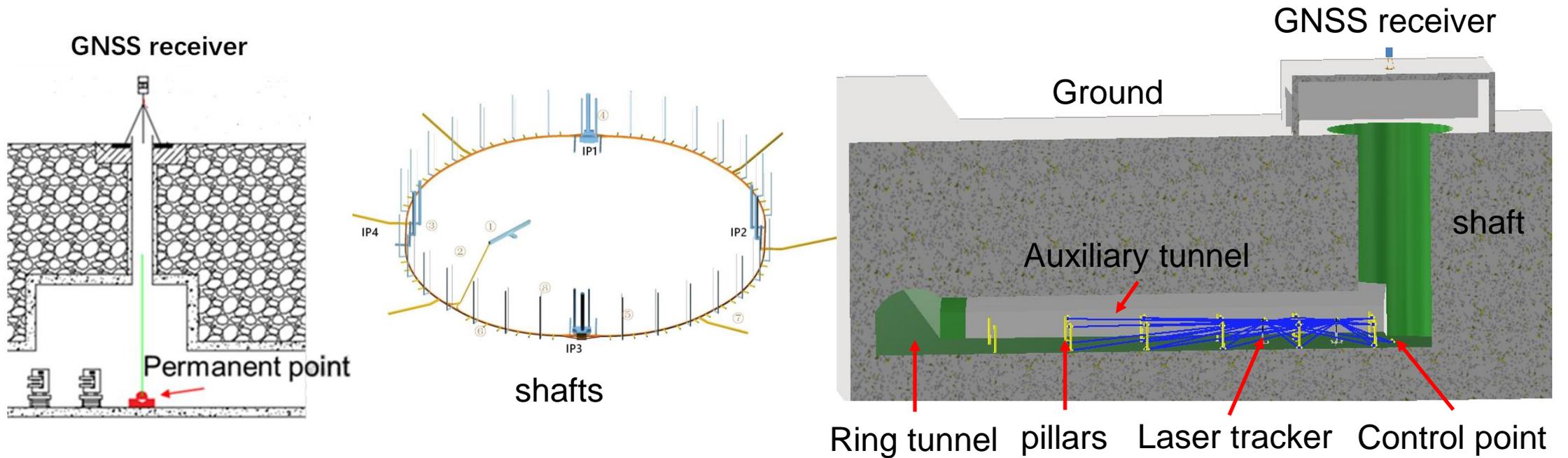
评审组长签字：



2023年9月1日

### 3、CEPC alignment control network

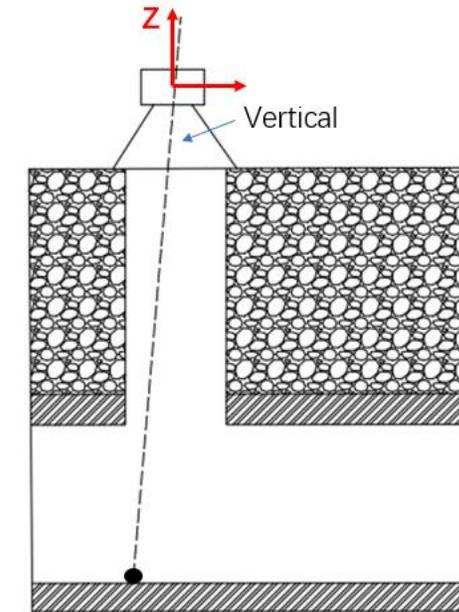
- Surface control network ground and tunnel connection measurement:
  - GNSS measurement must be carried out on the ground.
  - The connection measurement between the ground and the tunnel can be carried through boreholes or shafts.



### 3、CEPC alignment control network

- Connection measurement:
  - Measurement instrument is centered to the control point along the vertical.
  - It needs to calculate the coordinate difference between the ground point and the tunnel control point.
  - The distance  $D$  from the ground point to the tunnel control point can be measured by using a tape, a steel wire or a total station.

CEPC coordinate system

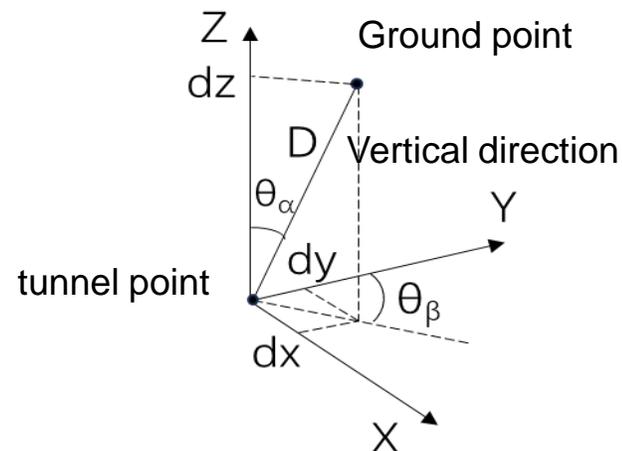


transit square



borehole

CEPC coordinate system



Accuracy: 0.5mm/(100m, 1arcsec.)

$$\begin{cases} dx = D \sin \theta_\alpha \cos \theta_\beta \\ dy = D \sin \theta_\alpha \sin \theta_\beta \\ dz = D \cos \theta_\alpha \end{cases}$$

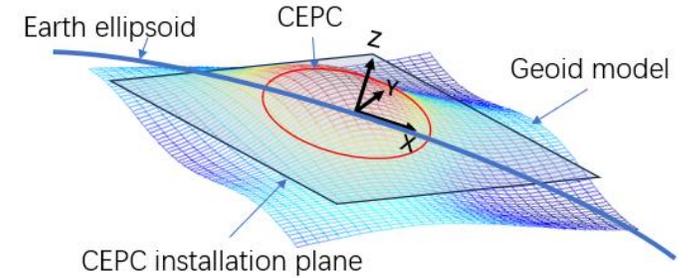
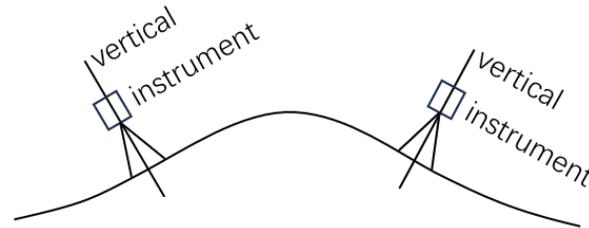
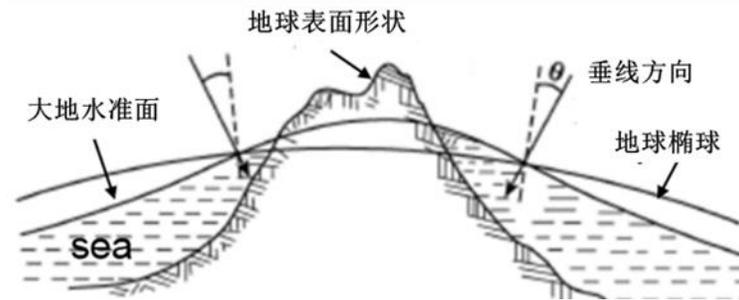
According the vertical direction of the ground point and the distance  $D$  to calculate the coordinate differences

## 二、EDR工作

---

1. 大地水准面精化
2. 视觉仪
3. MDI精密准直技术
4. 散射激光多目标测距系统
5. 深长孔径磁铁中心测量技术
6. 仪器隔振装置
7. 隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究

# 1. 大地水准面精化



- The Earth's surface is irregular, and conducting measurements on its surface requires using the geoid as a datum.
- CEPC will be installed reference to a plane, so it is necessary to accurately determine the position relationship between the irregular geoid and the installation plane through the geoid refinement.

# 1. 大地水准面精化

- FCC大地水准面精化研究

- 2021~2022, 联合IGN (Institut

Géographique National),

Swisstopo (Federal Office of

Topography), 苏黎世理工学院

- 高程异常偏差范围:

-33mm~47mm, 标准偏差18mm。

- 垂线偏差范围:  $-3.01'' \sim 4.89''$ ,

标准偏差1.53''。

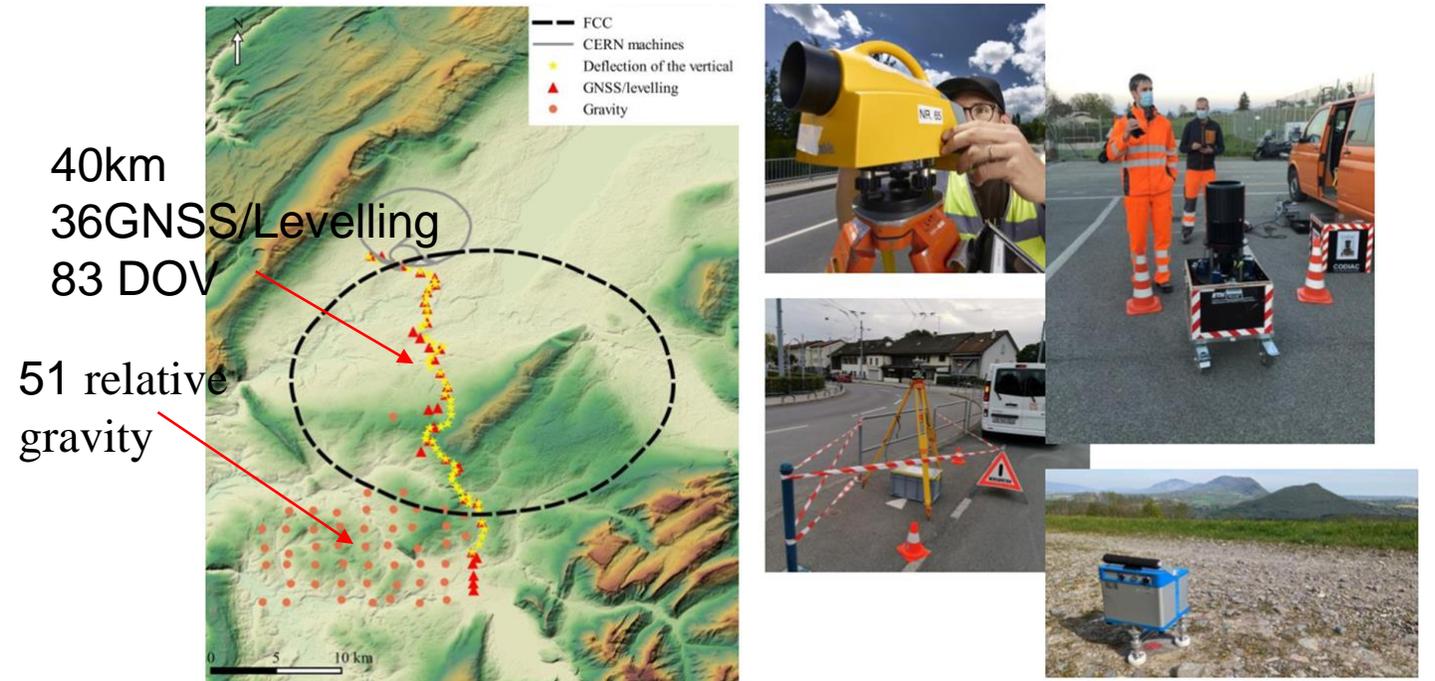
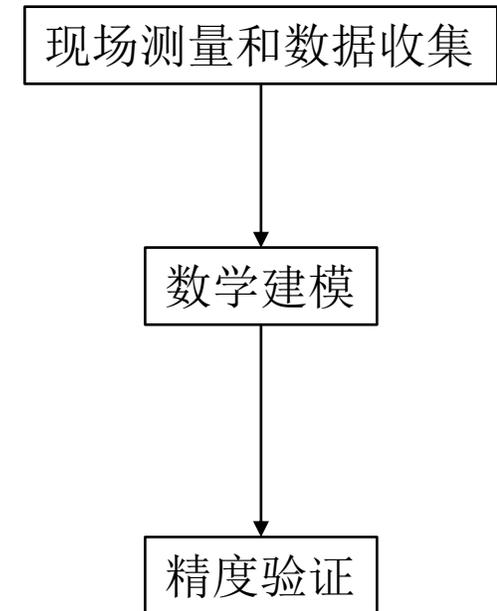
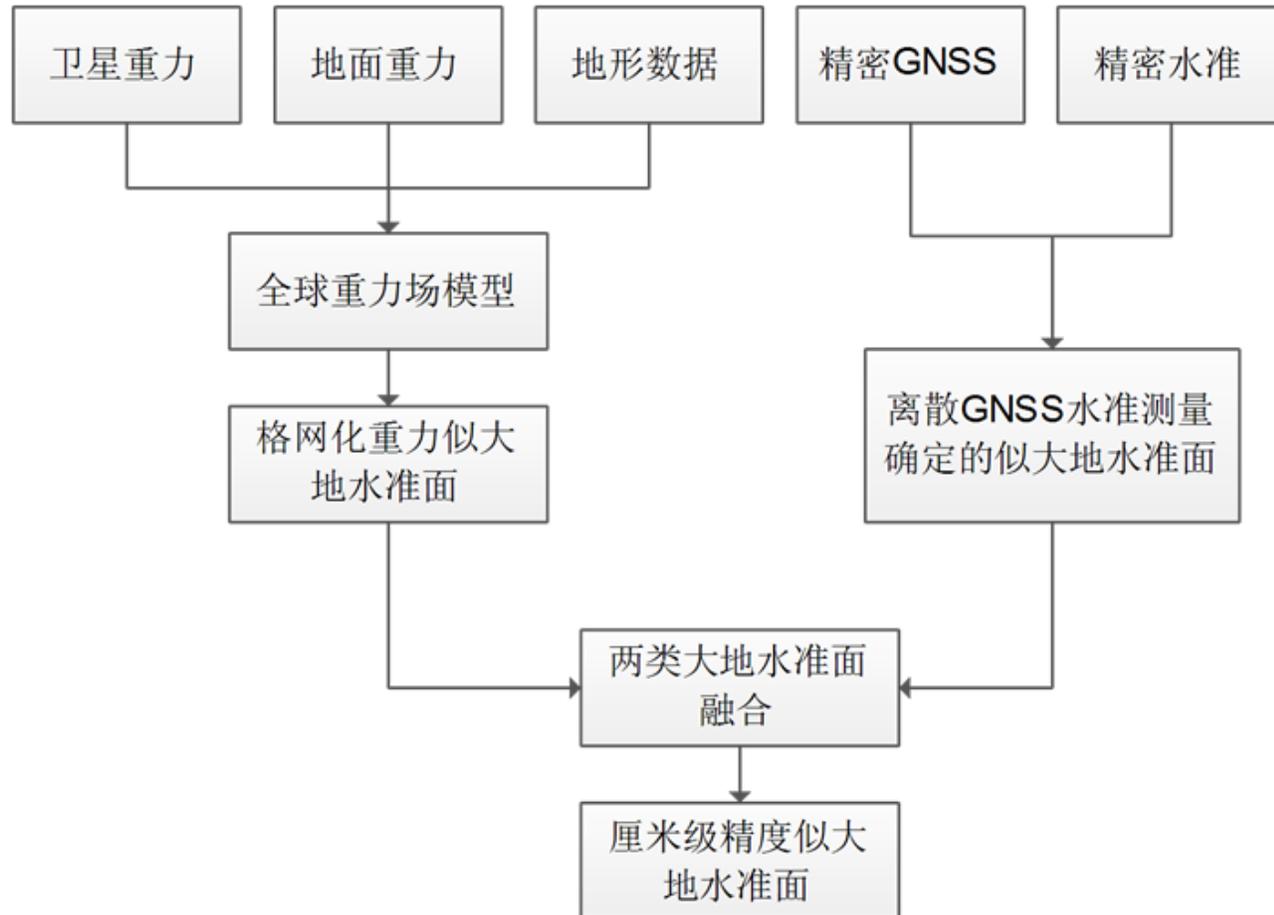


Figure 1: Geodetic control profile (GNSS/levelling and deflection of the vertical) established, and gravity data acquired for the computation, control, and validation of the geoid model.

# 1. 大地水准面精化

- 大地水准面精化方案

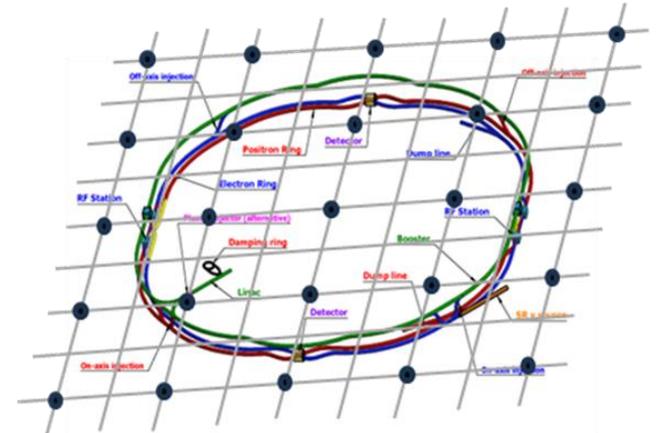


# 1. 大地水准面精化

- Data collection: Collecting gravity data within a 300km radius of CEPC. Carry out supplementary measurement in areas lacking gravity data.

- Field survey:

- Build 25 observation points in a range of  $32\text{km} \times 32\text{km}$  covering the CEPC area. The observation points will be distributed in a grid pattern with a distance of 5-10km.
- On each observation point performing GNSS, level, and vertical deflection measurement.



- Mathematical modeling:

- Using the collected gravity data and EIGEN6C4 according to the Stokes-Helmert method to calculate the gravity quasi-geoid.

- Personnel, workload and time estimation

Work content	Instrument (number)	Group × (number of people / group)	Workload	Week
Site survey	Pick-up truck (4)	4 × (4)	800km <sup>2</sup>	8
GNSS	GS10+AR20 (16)	16 × (2)	25 points	2
Level	DNA03 (8)	8 × (4)	480km	6
Vertical deflection	Hangguang zenithal camera (1) GNSS receiver (1)	1 × (4)	25 points	8
Gravity	CG6 (1) LCR (1) 、 GNSS receiver (2)	2 × (4)	Depend on site selection	
Data processing	Desktop computer (8)	1 × (8)		8
Accuracy verification	GS10+AR20 (16)、 DNA03(5)、 zenithal camera (1)	1 × (24)	16 points, 100km	8

# 1. 大地水准面精化

---

- 研究内容

- ① 利用地形数据、重力数据进行地形均衡重力异常归算方法。
- ② 格网重力似大地水准面模型构建方法。
- ③ 格网重力似大地水准面与实测高程异常、垂线偏差的融合处理方法。
- ④ 地面大地水准面模型向地下传递的方法。
- ⑤ 建模数据的测量方法：重力、GNSS、水准、垂线偏差。
- ⑥ 分析大地水准面模型对准直精度的影响

# 1. 大地水准面精化

---

- 开展大地水准面精化实验：在长、宽超过10km的区域范围开展测量，建立似大地水准面模型，进行精度验证。

- 主要技术指标

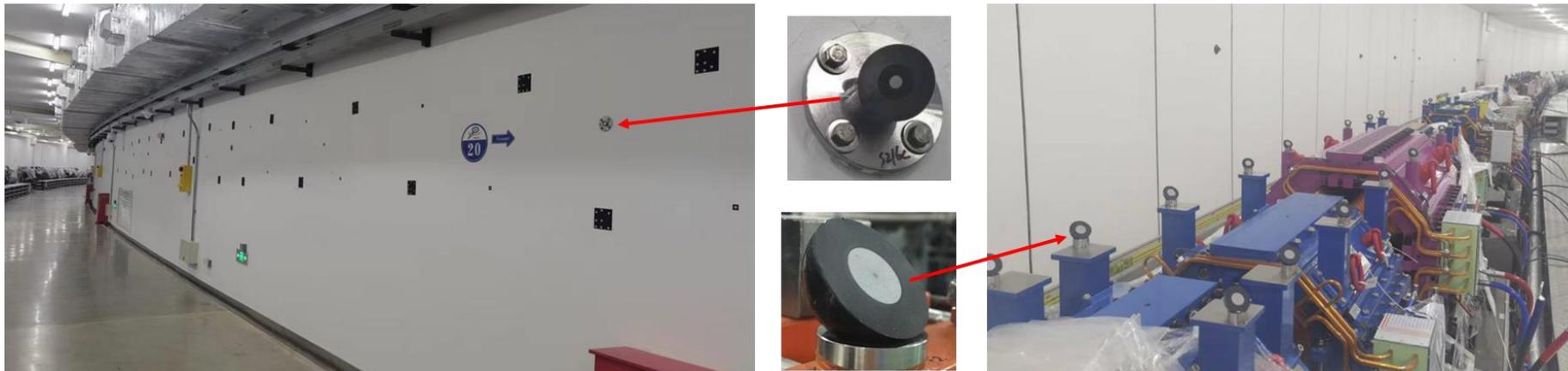
技术参数	预期精度	目前水平
高程异常精度	优于10mm	18mm
垂线偏差精度	1"	大于1.5"

## 2. 视觉测量仪

- In Dec. 2023, a measurement experiment was conducted in HEPS storage ring.



- Paste encoded targets on the wall for image match and point recognition.
- Hemisphere targets for control points and magnet fiducials measurement.



## 2. 视觉测量仪



- The range of the measurement experiment is half of the ring and took 10 days, 4 times faster than using a laser tracker.
- Adopt set up station measurement method. Each station the visual instrument is leveled, and the horizontal and vertical angles of each picture were measured. A total of 250 stations were measured, approximately 20~30 pictures were taken in each station.
- The observations are being processed.

## 2. 视觉测量仪

---

- 研究内容
  - 高精度测距仪研发
  - 像距同轴视觉仪结构与研发。
  - 新型视觉仪标定、校准。
  - 新型视觉仪平差算法研究。
- 主要技术指标

技术参数	预期目标
测量速度	优于跟踪仪4倍
测量精度	测站数据与跟踪仪测站数据拟合精度优于0.1mm

# 3. MDI精密准直技术

- 拟解决问题

- ① 探测器两端设备高精度准直

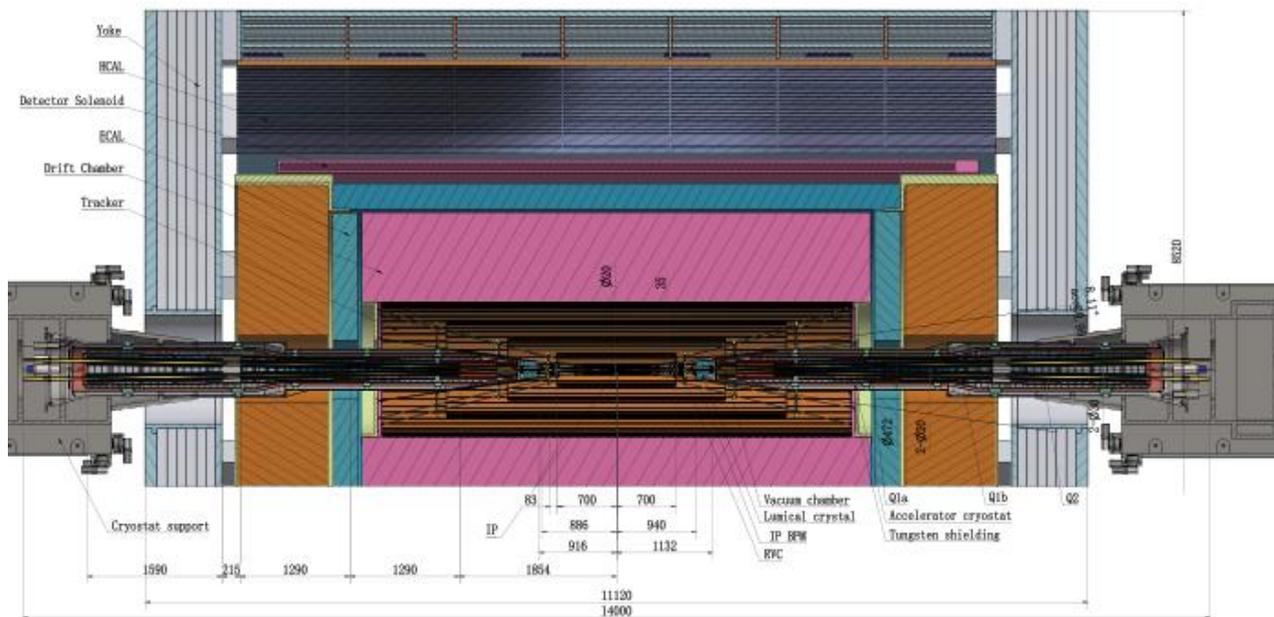
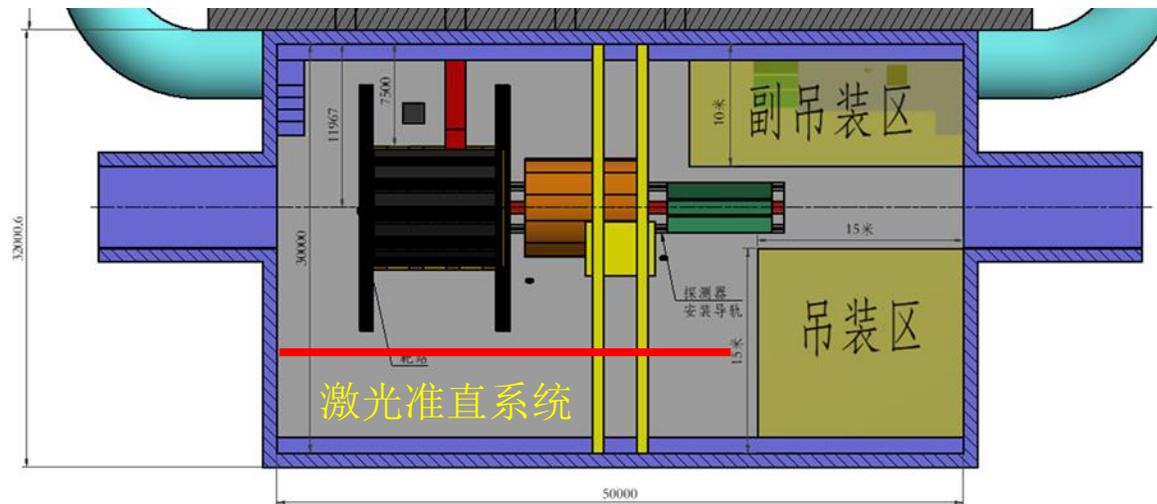
- 激光准直系统

- ② 超导铁准直精度检测

- 振动线

- ③ 恒温器变形监测

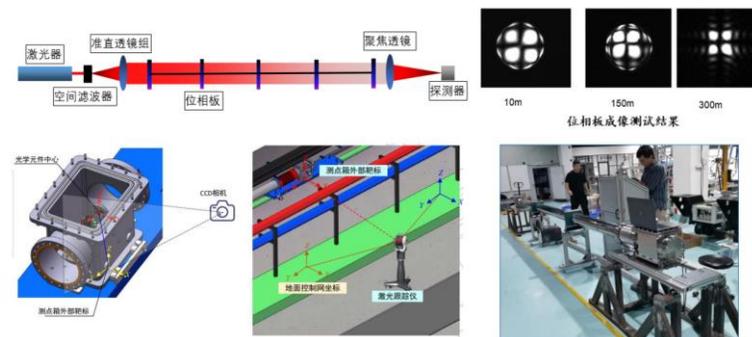
- 基于分布式光纤的变形监测系统



# 3. MDI精密准直技术

- 国内外相关技术

- 上海硬X射线自由电子激光装置为400m长波荡器段设备水平和垂直位移监测研制了一套精度0.2mm/300m的真空激光准直系统。

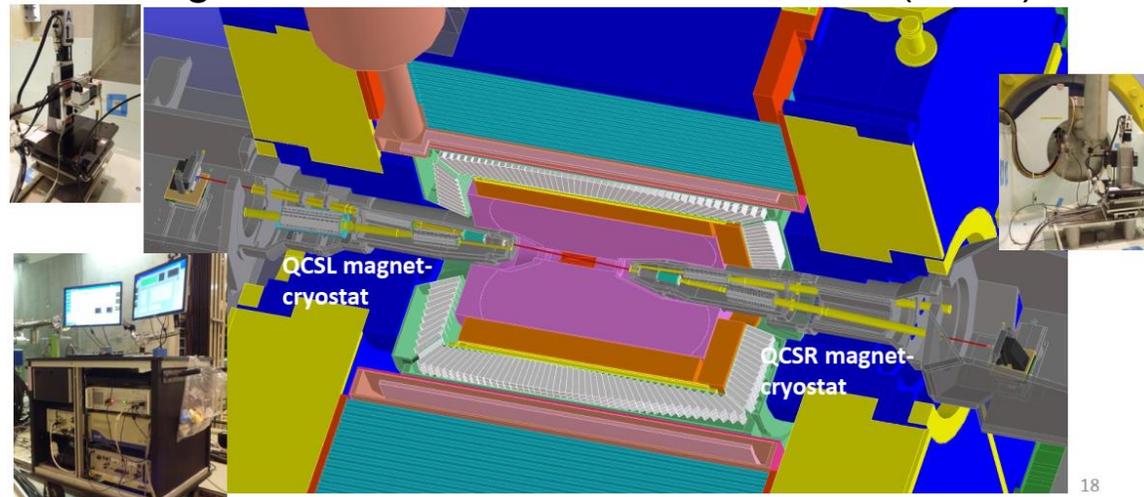


- 日本KEKB为注入器500m长直线节研制了一套60μm精度的激光准直系统。

Error category	Error source	Error (rms) [μm]
Mechanical	QPD Mounting	50
Electrical	Detector offset	15
Laser	Profile & Stability	30
Sum total		60

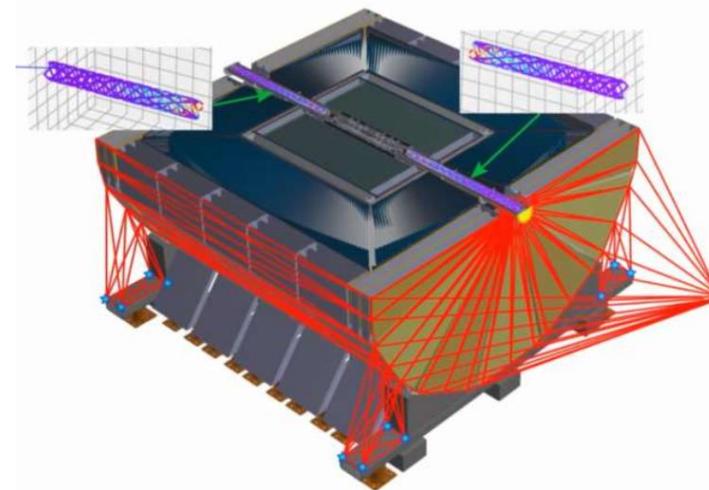
- Supper KEBB 用张力线测量系统对超导铁的准直结果进行了检测。

## Single Stretched Wire measurement (SSW)

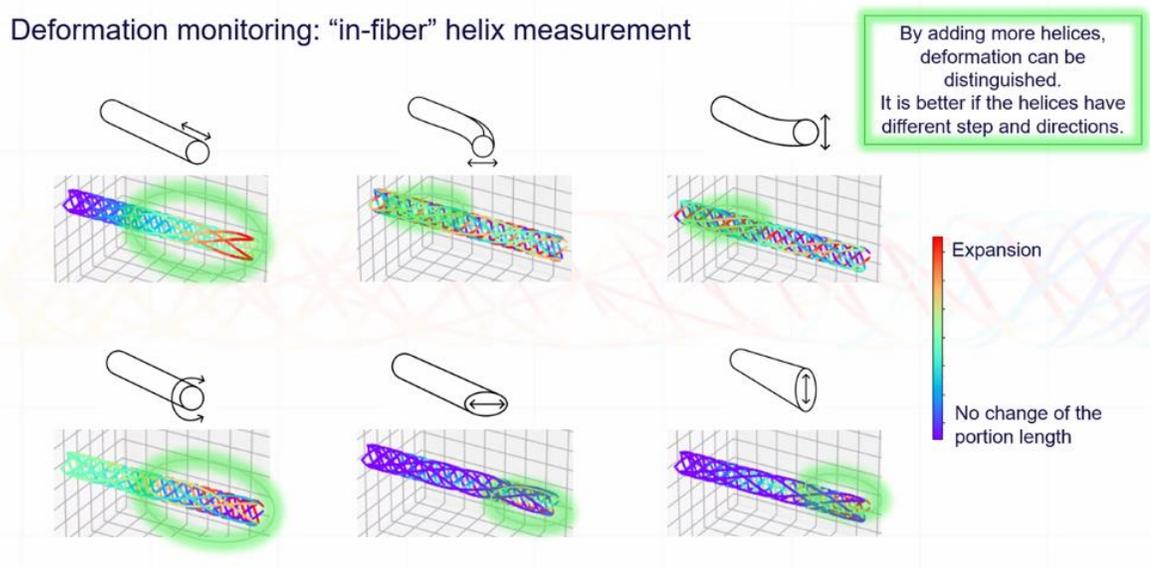


# 3. MDI精密准直技术

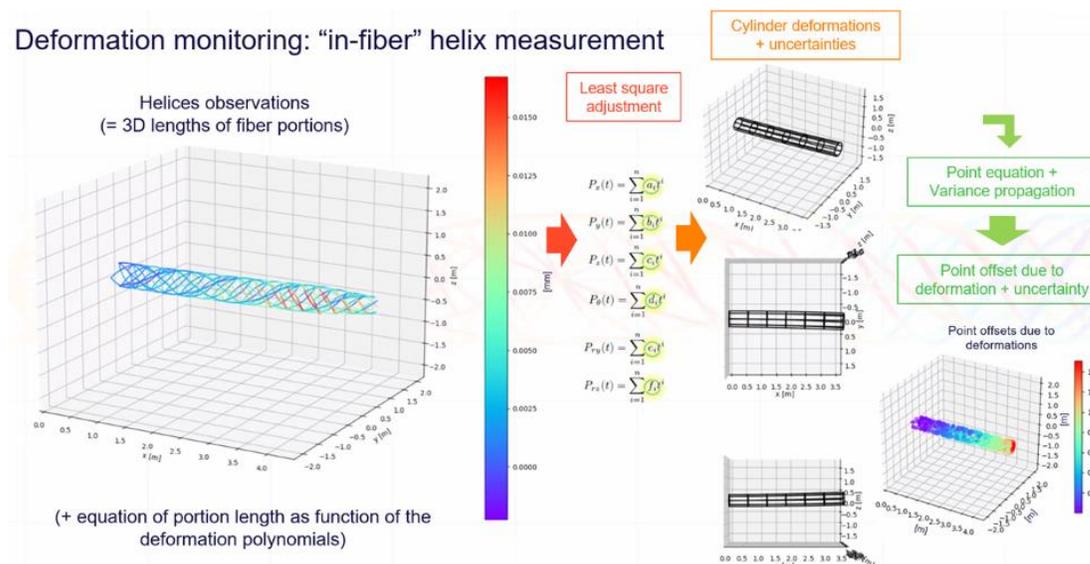
- 国内外相关技术
- FCC 基于 Frequency Scanning Interferometry (FSI) 技术的分布式光纤变形监测技术。用于恒温器的变形监测。



Deformation monitoring: "in-fiber" helix measurement



Deformation monitoring: "in-fiber" helix measurement

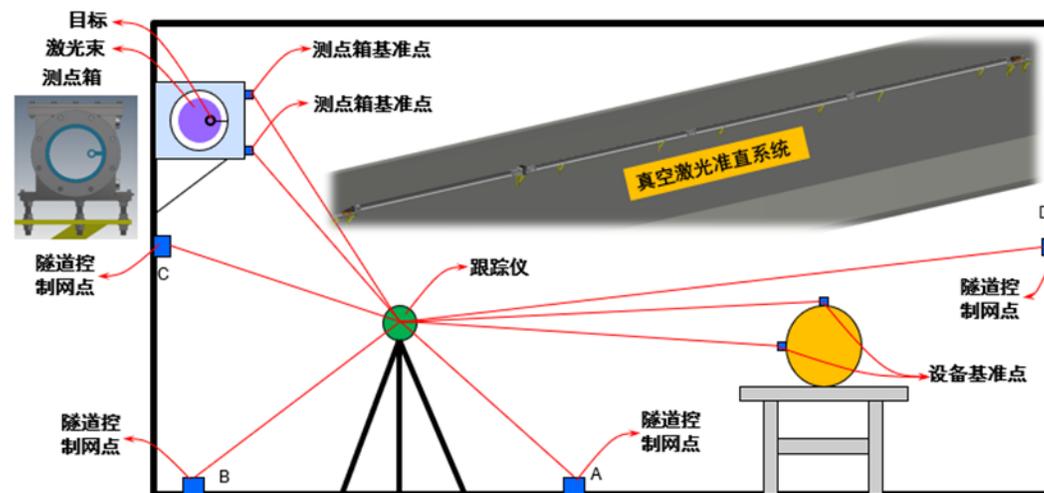
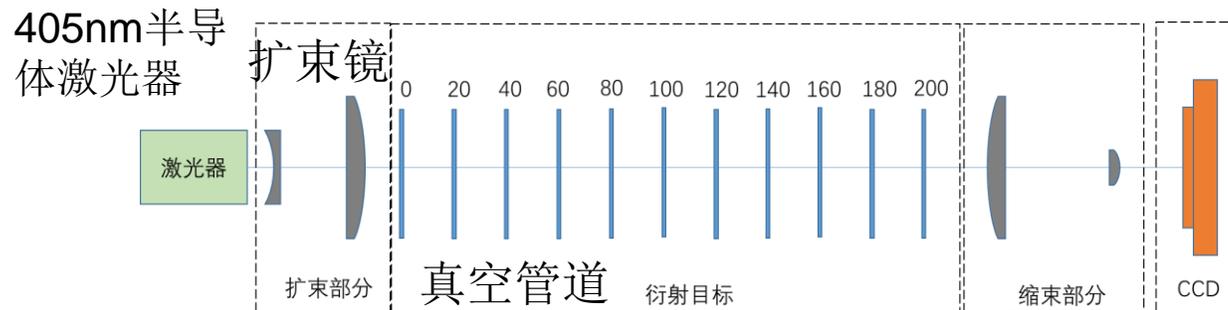


# 3. MDI精密准直技术

- 研究内容

- ① 激光准直系统

- 长激光直线基准精密准直方法
    - 基于偏差检测和闭环光路调整的长距离激光直线基准稳定性研究。
    - 基于相似性匹配算法的光斑抗噪测量实现方法。
    - 微米级激光基准引出方法



# 3. MDI精密准直技术

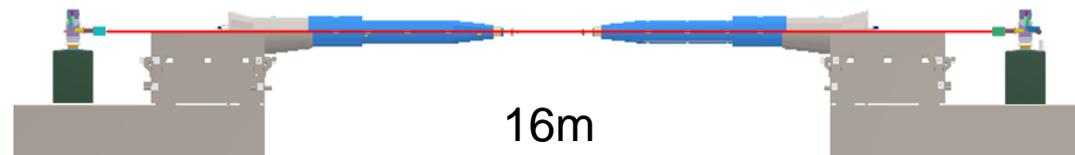
- 研究内容

- ② 振动线

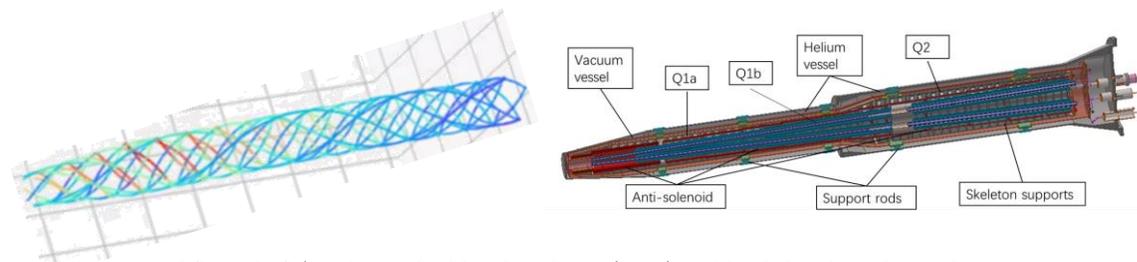
- 基于丝线位置精确测量的下垂量修正方法。
    - 超长振动线测量精度验证。

- ③ 基于分布式光纤的变形监测系统

- 基于激光干涉测量的光纤分段测距技术。
    - 基于干涉拍频傅里叶分析的多目标测量技术。



$$s = -\frac{\mu g}{2T} z(z - L) \quad S_{\max} = \frac{g}{32 f_1^2} \approx 7 \sim 8 \text{mm}$$



- 基于单光纤分段长度变化的多光纤三维变形监测网建模方法和解算方法。
    - 系统搭建方法，标定、校准方法。

### 3. MDI精密准直技术

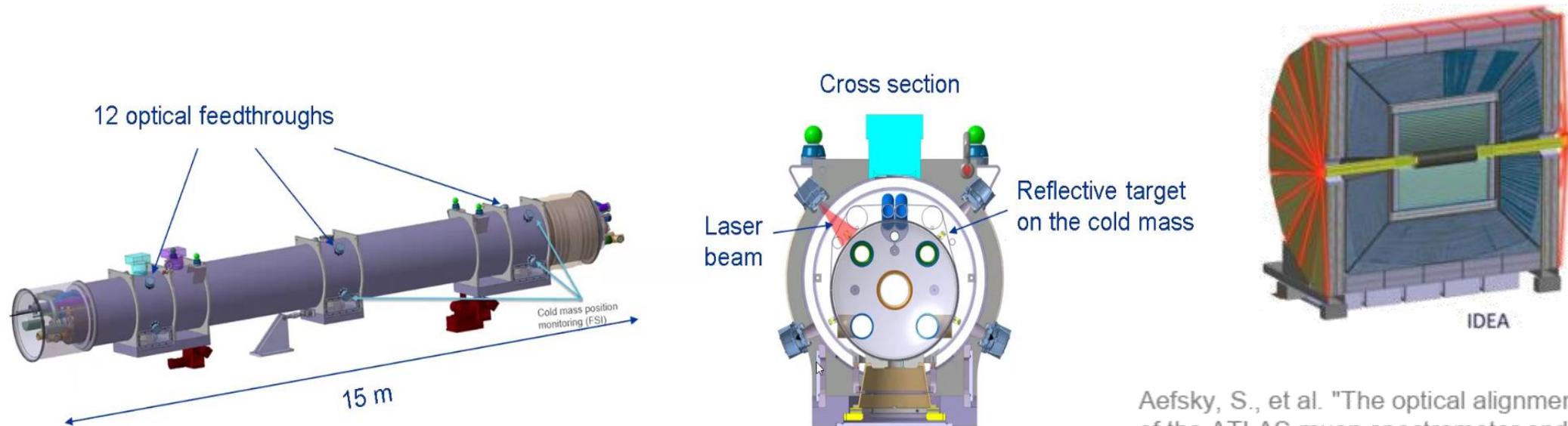
---

- 主要技术指标

技术参数	预期精度	目前水平
激光准直系统	20 $\mu$ m/30m	60 $\mu$ m/500m
振动线	10 $\mu$ m	NA
基于分布式光纤的变形监测系统	10 $\mu$ m	NA

## 4. 散射激光多目标测距系统

- 通过对一路激光扩束，实现用一路激光测量到一定范围内的多个目标的距离。
- 优点：降低造价，可以用更少的激光构成小范围测量网络，用于设备位置监测、预准直等。



Aefsky, S., et al. "The optical alignment system of the ATLAS muon spectrometer endcaps." *Journal of Instrumentation* 3.11 (2008): P11005.

# 4. 散射激光多目标测距系统

---

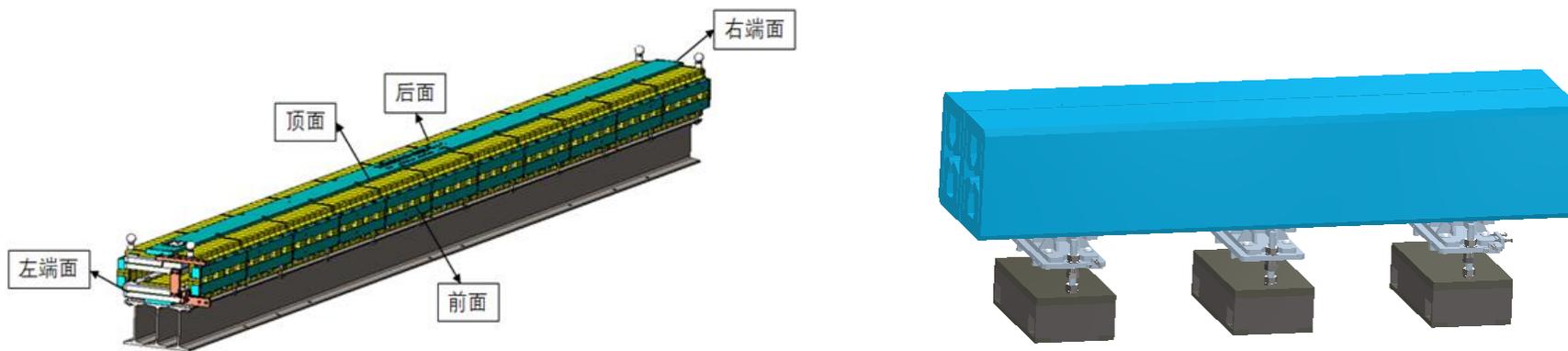
- 研究内容

- 散射激光多目标测距原理研究。
- 基于散射激光测量网络的目标三维坐标测量数学模型研究。
- 散射激光多目标测距系统搭建，测量网络优化，精度提升研究。

- 主要技术指标

技术参数	预期目标
散射角度	30°及以上
测距精度	5 $\mu$ m/m

## 5. 深长孔径磁铁中心测量技术



- 磁铁标定测量时难以用跟踪仪或三坐标机测量磁铁孔径深处的基准面，需要研究磁铁孔径深处极头基准面的测量方法。
- 拟采用基于影像测量的方法，研制与测量基准面配合良好、易于安放的影像测量基准件，通过测量基准件的目标中心得到磁铁基准面的位置信息。

# 5. 深长孔径磁铁中心测量技术

---

- 研究内容

- 基于影像测量的磁铁深长孔径测量基准件设计。
- 模糊光斑图像的高精度圆心提取算法。
- 影像数据与跟踪仪数据的联合计算方法。
- 基于影像测量的磁铁标定精度验证。

- 主要技术指标

技术参数	预期精度
光斑圆心提取精度	30 $\mu$ m
基于影像测量的磁铁机械中心标定精度	50 $\mu$ m

## 6. 仪器隔振装置

---

- 地基振动对准直仪器的测量精度和可靠性有较大影响。对测量造成不良影响的振动频率主要是在0.5~70 Hz 范围的低频微幅振动。
- 传统的被动线性隔振系统对10Hz以上的中高频振动可以起到较好的隔离和抑制作用，但其对于10Hz以下的低频及超低频的振动隔离能力较差，无法满足高精度准直工作对隔离低频带振动的需要。
- 结合准直仪器结构特点及使用环境，拟开发一种能够满足静态高刚度、宽频非线性被动隔振装置，旨在解决准直仪器在长时间工作过程中受到外界振动干扰的问题。

## 6. 仪器隔振装置

---

- 研究内容
  - 准零刚度隔振系统力学模型研究，获得系统在低频段能够有效隔振的参数条件。
  - 采用有限元方法分析不同隔振模型支反力随位移的变化关系，求得系统刚度和应力分布。
  - 研究装置在不同频率外激励下的幅值响应，以及在瞬态载荷下的实时响应。
- 主要技术指标：有效隔振频率范围**0.5-100Hz**，加速度均方根衰减率达**80%**以上。

## 7. 隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究

---

- 研究加速器隧道区域内一组监测点在时间T和温度C范围内产生的位移（包括周期运动，系统漂移和随机运动）与点间距离L、时间T，温度C之间的函数关系。
- 国内外研究情况：
  - 1991年，B.A. Baklakov 等人根据在UNK隧道和地面的测量结果，首次提出了ATL模型。公式表述为间距为L的两点在时间T内由地面产生的位移（水平位移和垂直位移）的方差满足： $dY^2 = ATL$ ，A为与环境有关的常数。CERN DESY 1995; SLAC 2000; Fermi 2010;
  - 合肥光源在直线加速器隧道用静力水准系统以10m为间隔对7个地面点进行监测（2023.3.29-2023.4.12），统计分析点位移方差计算得到A，建立了ATL模型。使用另一时间段的测量数据（2023.6.19-2023.7.03），验证ATL模型的有效性。

## 7. 隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究

---

- 研究内容

- 研究区域的监测方案设计。
- 监测对象位移与距离、时间、温度变化的函数模型构建理论。
- 基于频谱分析的周期运动模型研究。
- 剔除随机运动与周期运动的系统漂移规律研究。

# 参加人员

姓名	职务/职称	职责
董岚	研究员	技术指导
李波	高级工程师	大地水准面精化重力场模型研究
门玲鸽	高级工程师	仪器隔振及设备机械中心标定
王铜	高级工程师	大地水准面精化、视觉仪模型原理研究
梁静	高级工程师	三维定向平差及轨道平滑
柯志勇	高级工程师	磁铁标定研究
何振强	高级工程师	激光准直系统、
马娜	工程师	水准面精化长基线GNSS数据处理、静力水准系统
卢尚	工程师	激光测量技术研究
韩圆颖	工程师	深长孔径磁铁机械中心标定系统
闫路平	工程师	基于振动线的超导铁磁中心准直技术
张露彦	工程师	视觉仪, 散射激光测距
刘晓阳	工程师	大地水准面精化现场测量及综合模型建立
闫皓月	工程师	隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究和补偿模型建立
戴旭文	正高级工程师	结构设计指导
李笑	博后	基于分布式光纤的插入恒温器变形监测系统
邢宇博	博士生	视觉仪目标自动识别和角度交会算法研究
邓成耀	硕士生	多相机跟踪仪联合快速测量技术

# 进度安排

研究内容	2024	2025	2026	2027
大地水准面精化	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 测量方案设计。</li> <li>2. 建模理论研究。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 开展野外测量实验。</li> <li>2. 建立区域大地水准面模型，进行精度验证。</li> </ol>		
视觉仪	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 视觉仪标定校准。</li> <li>2. 多类观测值平差算法研究。</li> <li>3. 视觉仪隧道测量实验，系统改进。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高精度测距仪设计、系统搭建与实验。</li> <li>2. 像距同轴视觉仪结构设计，制造与装配。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 像距同轴视觉仪标定、校准。</li> <li>2. 视觉仪软件开发，优化。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 像距同轴视觉仪测量实验与优化。</li> </ol>
MDI精密准直技术	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 激光准直系统设计、激光直线基准稳定性研究。</li> <li>2. 振动线线位测量装置设计。</li> <li>3. 激光干涉测量分段测距系统设计。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 激光准直系统搭建。</li> <li>2. 振动线下垂量标定测量，实验平台搭建。</li> <li>3. 激光光纤多目标测量实验、精度验证。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 光斑探测方法实验，激光基准引出实验。</li> <li>2. 超长振动线测量实验与改进。</li> <li>3. 多光纤三维变形监测建模研究，实验平台搭建。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 多光纤三维变形监测系统校准，实验验证。</li> </ol>

# 进度安排

研究内容	2024	2025	2026	2027
散射激光多目标测距系统	1. 系统理论研究、光路设计、零部件采购、单目标测量实验。	1. 散射激光多目标测距系统准直器设计, 靶标球设计与研制。 2. 散射激光多目标测距系统搭建与实验。	1. 多目标测距系的光路优化, 算法优化, 精度提升。 2. 多目标测距系统组网方法研究。	1. 对线体、液面等多类型目标测距实验。 2. 光路封装, 系统软件设计等。
仪器隔振装置	1. 隔振器设计及力学模型研究。	1. 隔振器采购加工。 2. 模态分析、静载分析和动力学分析。	1. 自动复位装置研制及测试。	1. 隔振器与自动复位装置联合调试。
深长孔径磁铁机械中心标定系统	1. 深长孔径测量基准件设计。 2. 光斑圆心提取的算法研究及软件编写。	1. 开展测量实验。 2. 测试数据的精度统计和可靠性验证。		

# 进度安排

研究内容	2024	2025	2026	2027
隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究	<ol style="list-style-type: none"><li>1. ATL模型理论研究。</li><li>2. 测量数据收集整理。</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 监测方案设计。</li><li>2. 设备采购, 监测系统建设。</li><li>3. 数据分析研究。</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 监测对象位移与距离、时间、温度变化的函数模型构建。</li><li>2. 数据采集分析。</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 模型验证, 数据研究, 系统完善。</li></ol>

# 经费预算

研究内容	2024(万元)	2025(万元)	2026(万元)	2027(万元)	合计(万元)
大地水准面精化	20	50			70
视觉仪	20	40	10	5	75
MDI精密准直技术					95
散射激光多目标测距系统	60	40	20	25	145
深长孔径磁铁机械中心及磁中心标定系统	15	15			30
仪器隔振装置	20	25	15	10	70
隧道全域气象变化和地质运动对控制网和设备位置影响的监测及规律研究和补偿模型建立	2	10	3	0	15
总计					500

Thank You !