

机械进展、实验室准备和二氧化碳冷却系统调研

汇报人：李宇杰

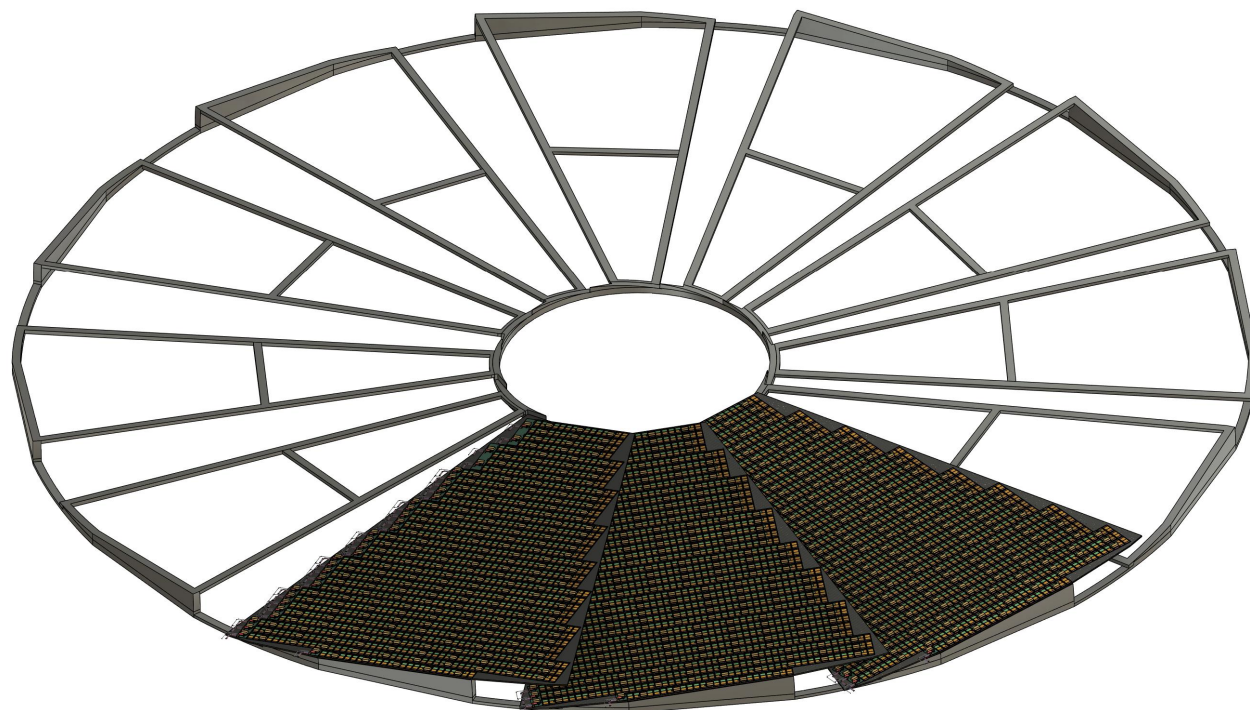
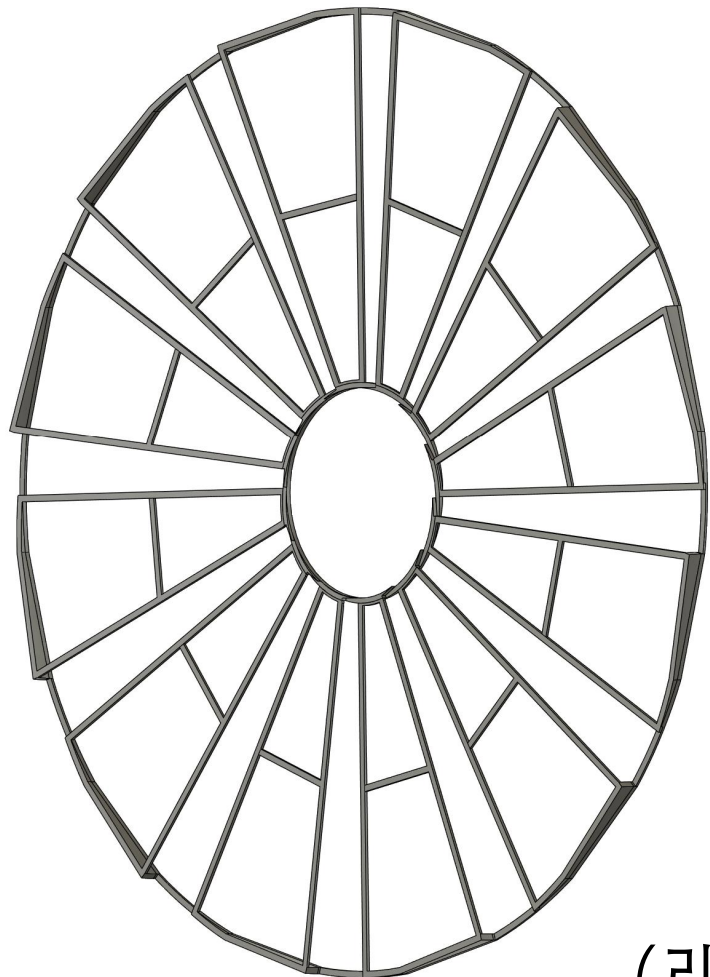
2025.05.30



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

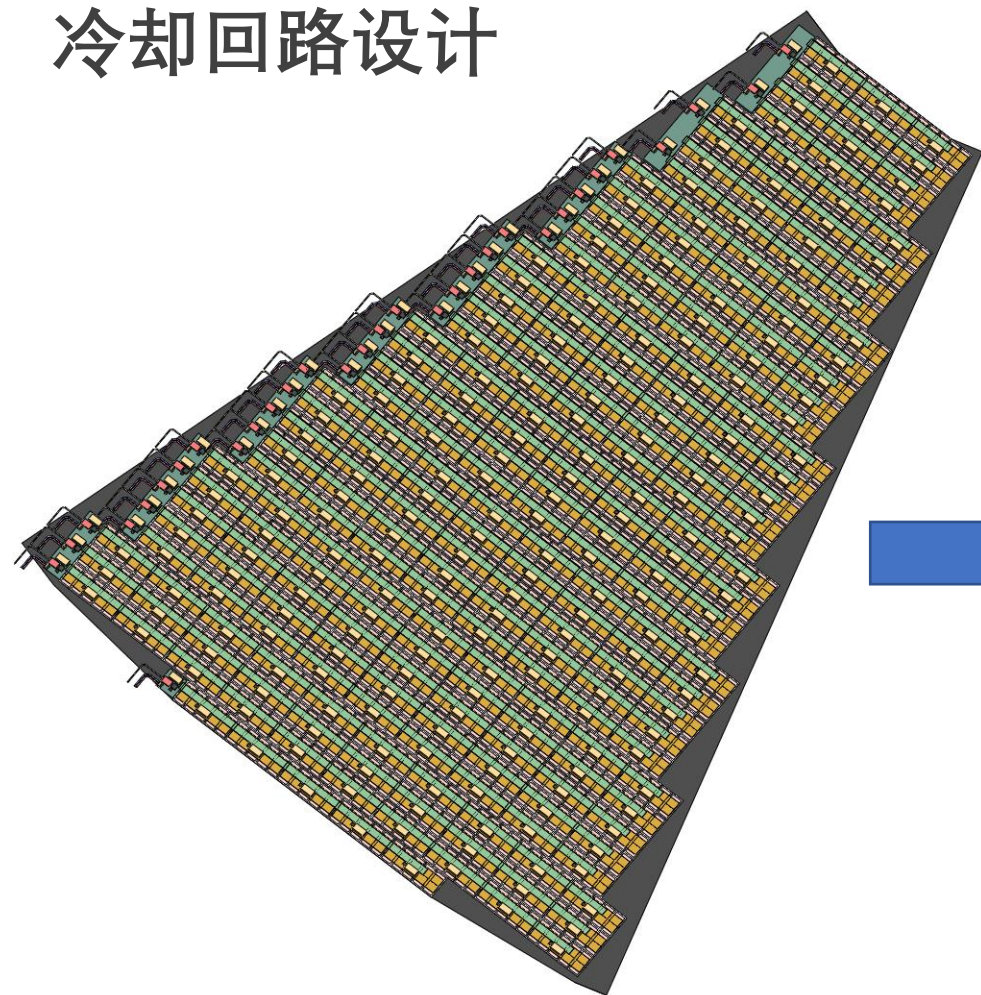
1 Backup design of the OTK 1/12 endcap (20mm×20mm)

Backup design of the OTK 1/12 endcap sector and full endcap using 20 mm× 20 mm AC-LGAD strip sensors



(张奕晗)

冷却回路设计



7个回路

3500mm

3700mm

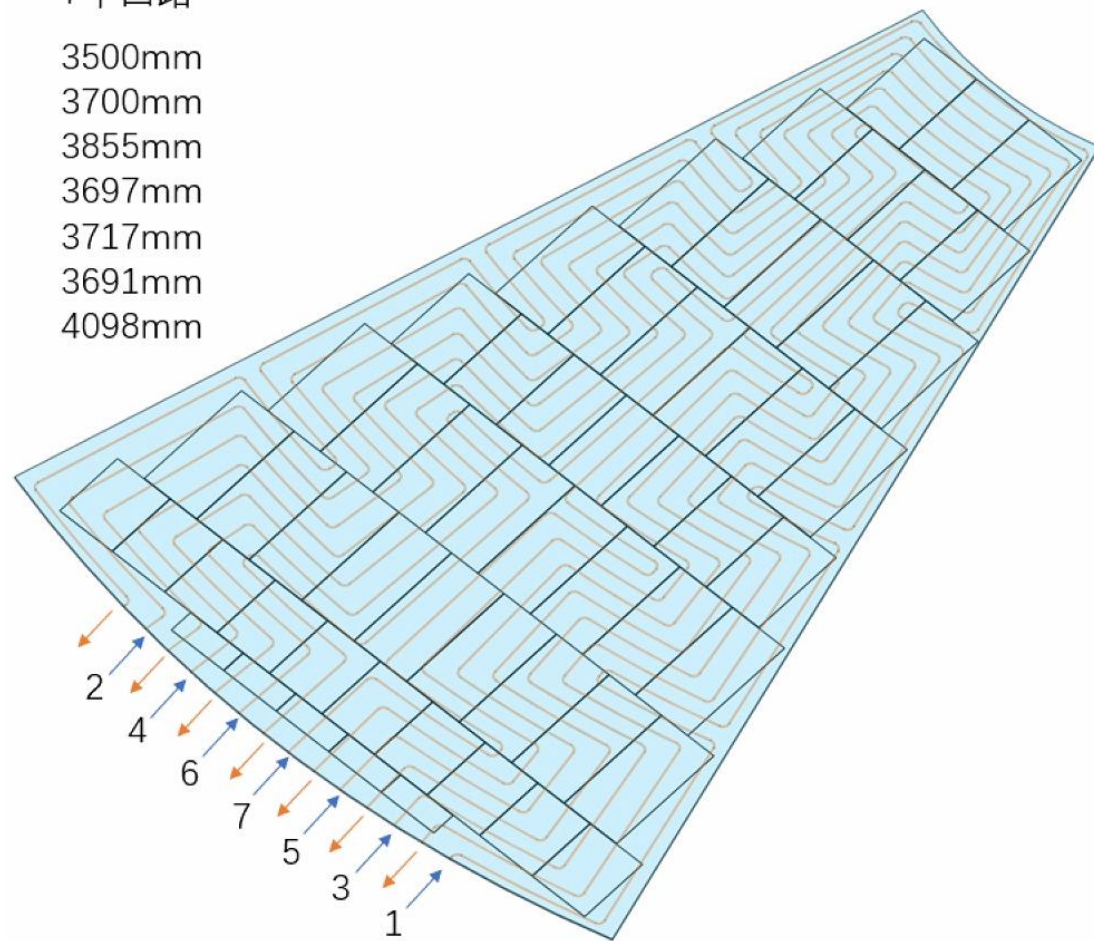
3855mm

3697mm

3717mm

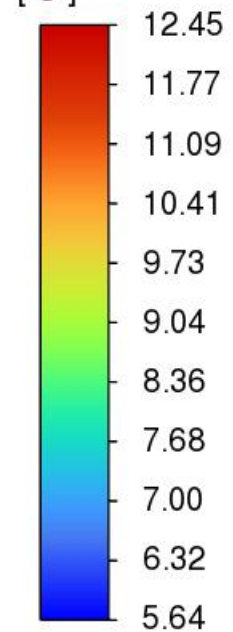
3691mm

4098mm



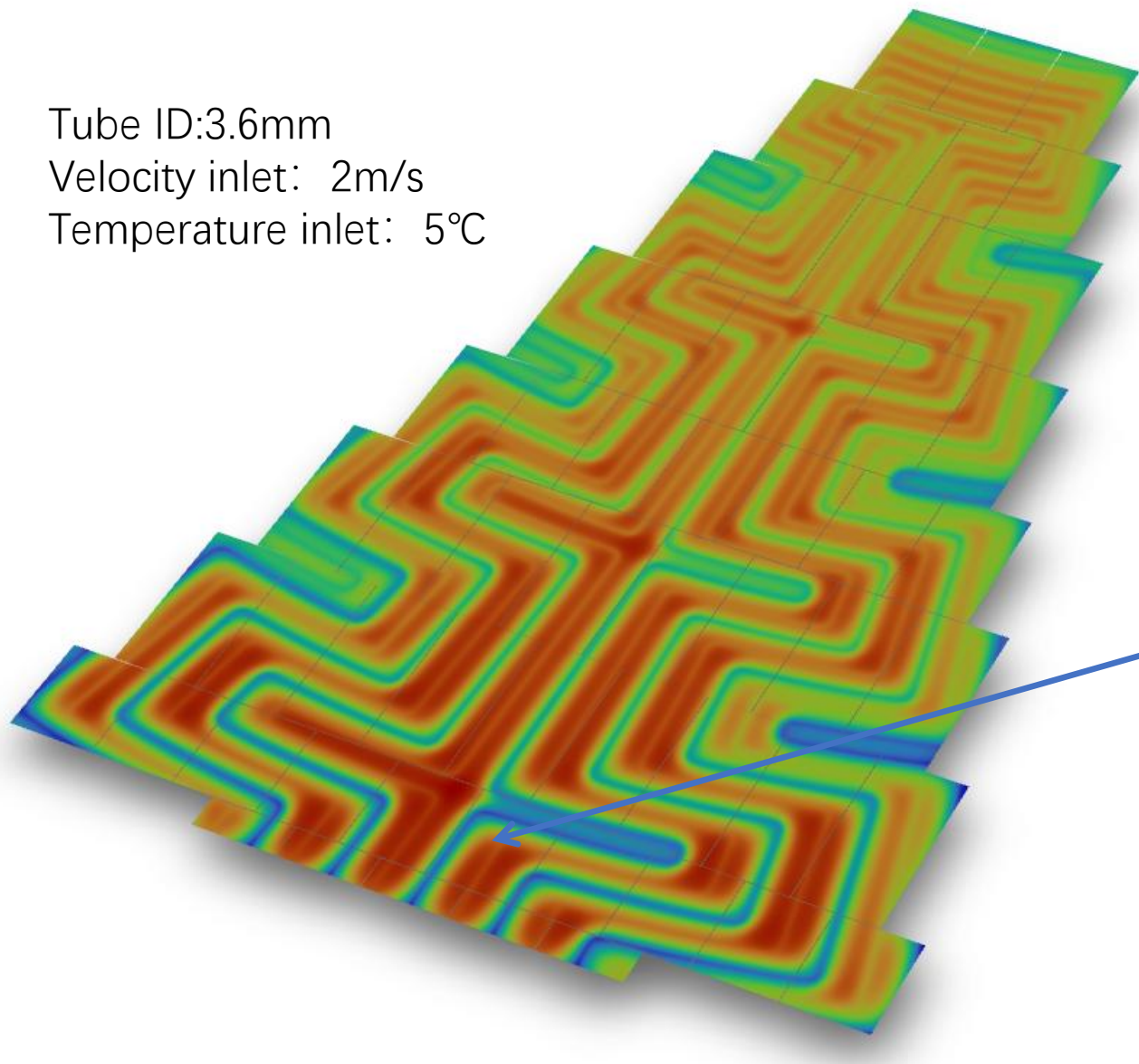
1 Backup design of the OTK 1/12 endcap (20mm×20mm)

Static Temperature
[C]

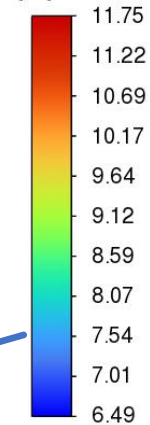


contour-1

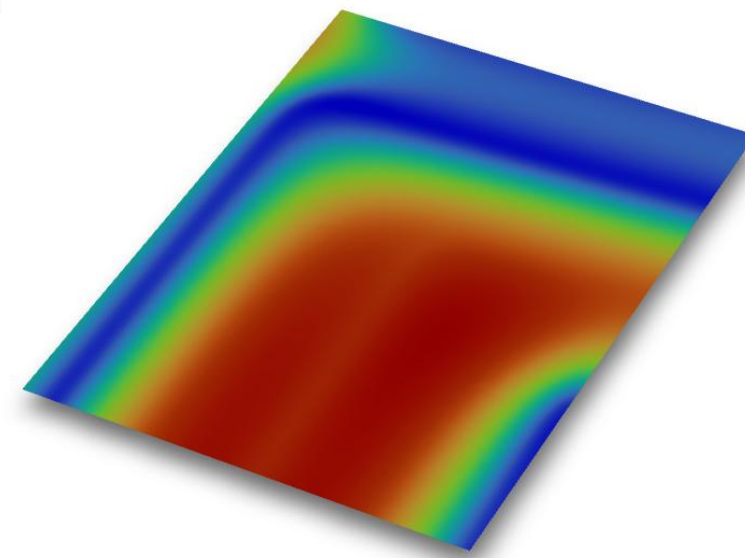
Tube ID:3.6mm
Velocity inlet: 2m/s
Temperature inlet: 5°C



Static Temperature
[C]



contour-3



其中一块温差最大的区域 (5.26°C)

一、确认实验目标

纯机械方面的实验：

- 1.测量材料/结构的静态刚度（弯曲刚度 EI 、扭转刚度 GJ/p ）
- 2.动态特性分析（共振频率、模态振型、阻尼比）
- 3.非接触式变形测量（如激光扫描、光学干涉法）

涉及到热方面的实验：

- 1.模拟负载下的温度分布测量（最高温度、温差等）
- 2.热膨胀系数（CTE）测试（温度变化下的材料膨胀行为）
- 3.高压耐受性测试（管道在高压下的破裂）

二、核心设备

1.静态特性分析

测量碳纤维复合材料结构的弯曲刚度和扭转刚度

评估材料在准静态载荷下的变形

确保结构在静态载荷下的稳定性，避免分层或破裂

核心设备

- 万能试验机（如Instron 5985）：
 - 功能：施加精确的拉伸、压缩或弯曲载荷
 - 关键参数：最大载荷250 kN，精度 $\pm 0.5\%$
- 激光位移传感器（如Keyence LK-G5000）：
 - 功能：非接触式测量试样跨中挠度
 - 关键参数：分辨率 $0.1\ \mu\text{m}$ ，采样率392 kHz

中国科学院宁波材料技术与工程研究所
公共技术中心

当前位置：首页 > 仪器共享 > 先进制造平台

仪器共享

公共技术平台

磁材材料平台

海洋材料平台

纳米材料平台

高分子材料平台

特种纤维平台

新能源平台

先进制造平台

万能试验机

型号：Instron 5985型

性能参数：最大载荷：250kN

最大速度：500mm/min

最小速度：0.00005mm/min

全速时的最大力：125kN

满载荷时的最大速度：250mm/min

速度精度： $\pm 0.05\%$ （空载或载荷恒定下）

位置控制灵敏度： $\pm 0.015\text{mm}$

载荷测量精度：示值读数的 $\pm 0.5\%$ ，载荷传感器容量的1/500以上

应变测量精度：满量程的 $\pm 0.05\%$ （使用2630-100系列引伸计）

功能和用途：主要用于高强度金属和铝合金、先进的复合材料、航空和汽车结构、复合材料、螺栓、紧固件、钢板等各种材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切等静态力学性能测试分析研究。主要测试在不同速率条件下材料样品的拉伸、压缩或弯曲强度、模量等参数，并可根据国家标准及ISO、ASTM等国际标准进行试验和提供数据测定。该机安装有2630-

宁波材料所的万能试验机

二、核心设备

2.动态特性分析

识别结构的固有频率和模态振型

测量阻尼比，评估结构在振动环境下的能量耗散能力

核心设备

- 电磁振动台（如Tira TV50350）：
 - 功能：提供可控振动激励（白噪声、正弦扫频）
 - 关键参数：频率范围0.1 Hz–10 kHz，最大推力5 kN
- 激光测振仪（如Polytec PSV-500）：
 - 功能：非接触式全场振动速度/位移测量
 - 关键参数：分辨率0.01 $\mu\text{m/s}$ ，扫描速率100 kHz



PSV-500 扫描式激光测振仪

全场扫描式激光测振仪已经革新到第五代产品，PSV-500是全球第一台全数字式扫描式激光测振仪！

Polytec全场扫描式激光测振仪是研究和开发中最先进的振动测量系统，其应用领域广泛，如NVH、声学、结构动力学、超声和FEM验证等，可测量工作变形和确定本征模态。高频型号还可用于无损检测（NDT）。

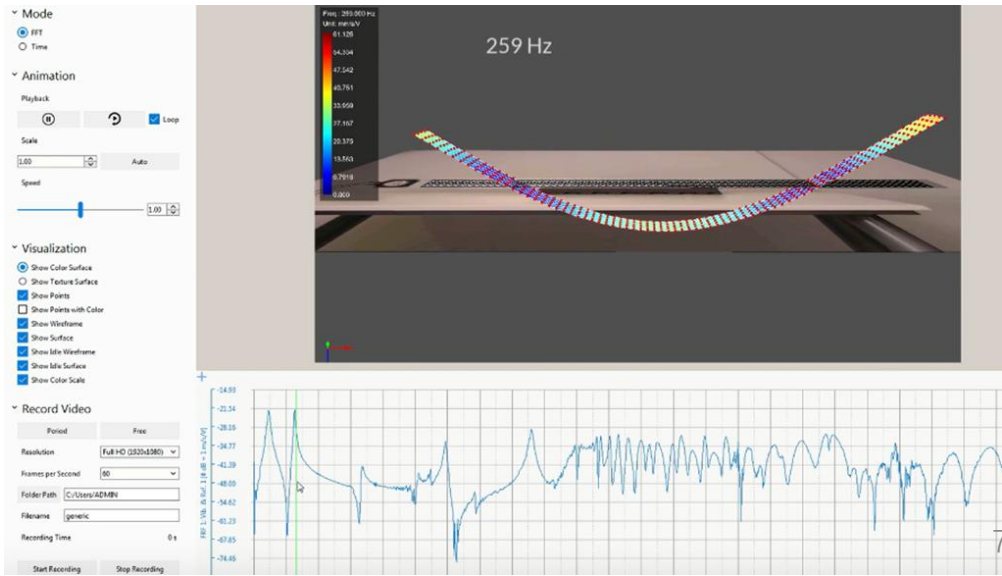
H型、M型和HV型的带宽各不相同，最高可达25 MHz。最新研发的PSV Xtra红外扫描头，最大振动速度达30m/s，尤其适用于超远距离或反光不良表面的扫描测试。

典型应用

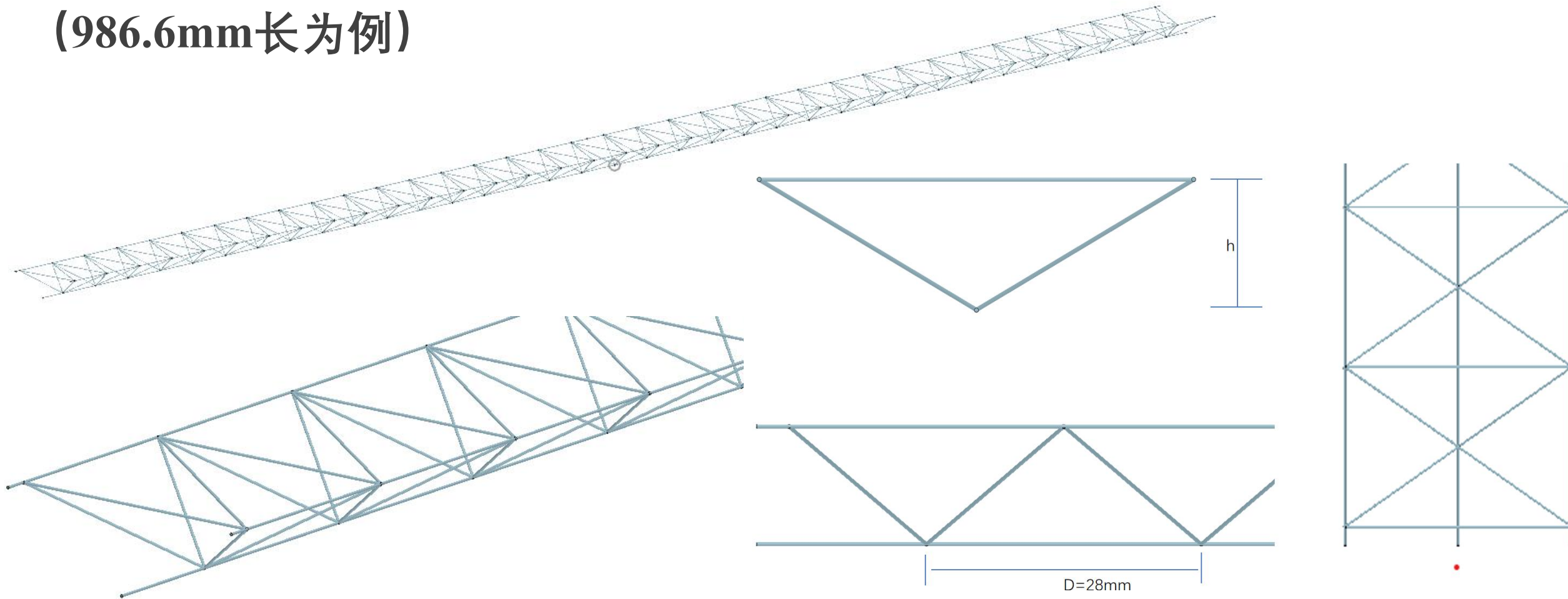
- 试验模态分析
- ODS工作变形分析
- 声学 & NVH
- 超声 & 无损检测

需要报价

扫描式激光测振仪

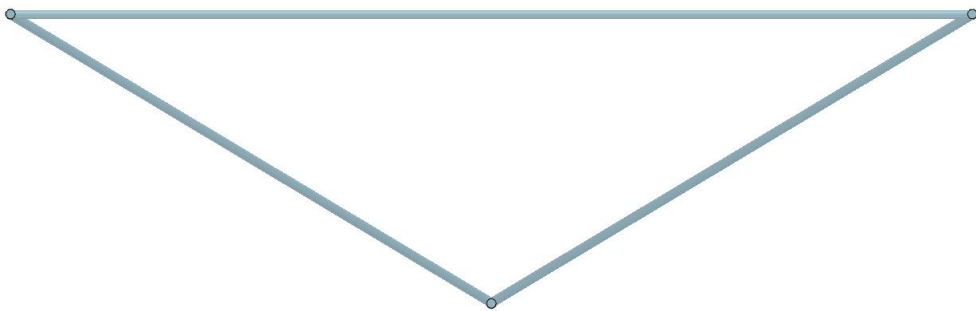


以与碳纤维厂家交流的工艺流程建立新的桶部桁架模型，以ITK内桶（986.6mm长为例）

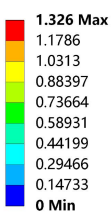


桁架上表面施加均布载荷（电子学重量）

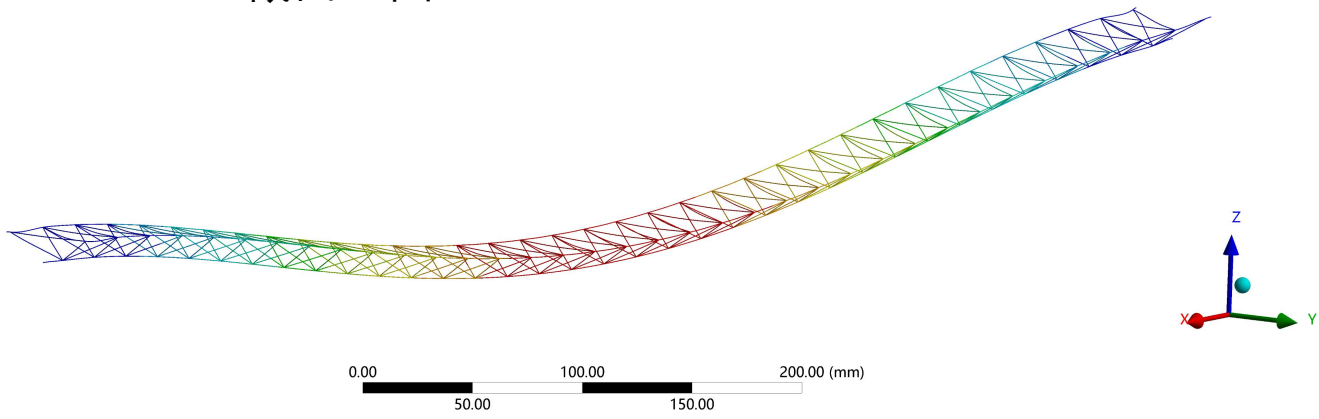
相较于tdr上的原结构（两个面）将桁架做成三个面



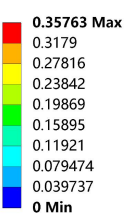
A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



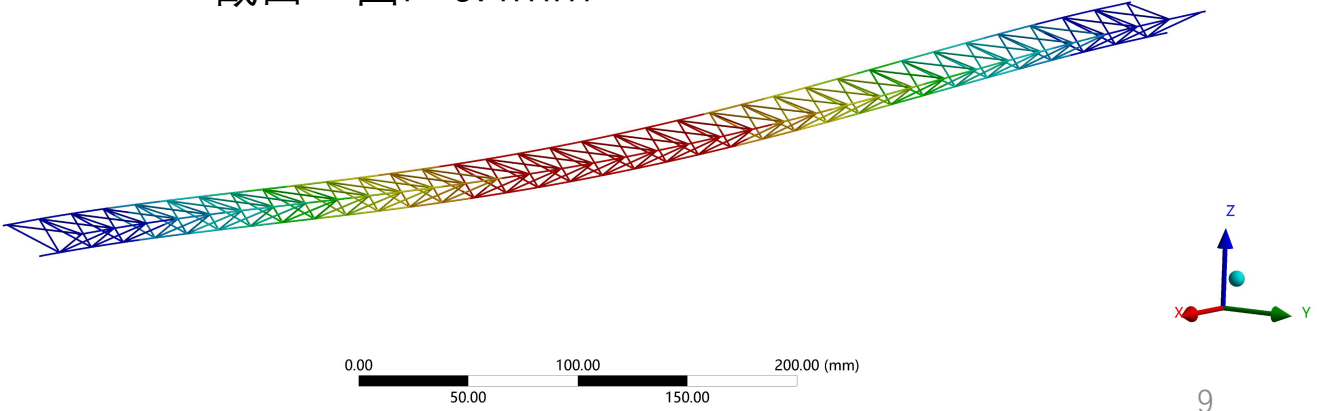
截面：圆r=0.2mm



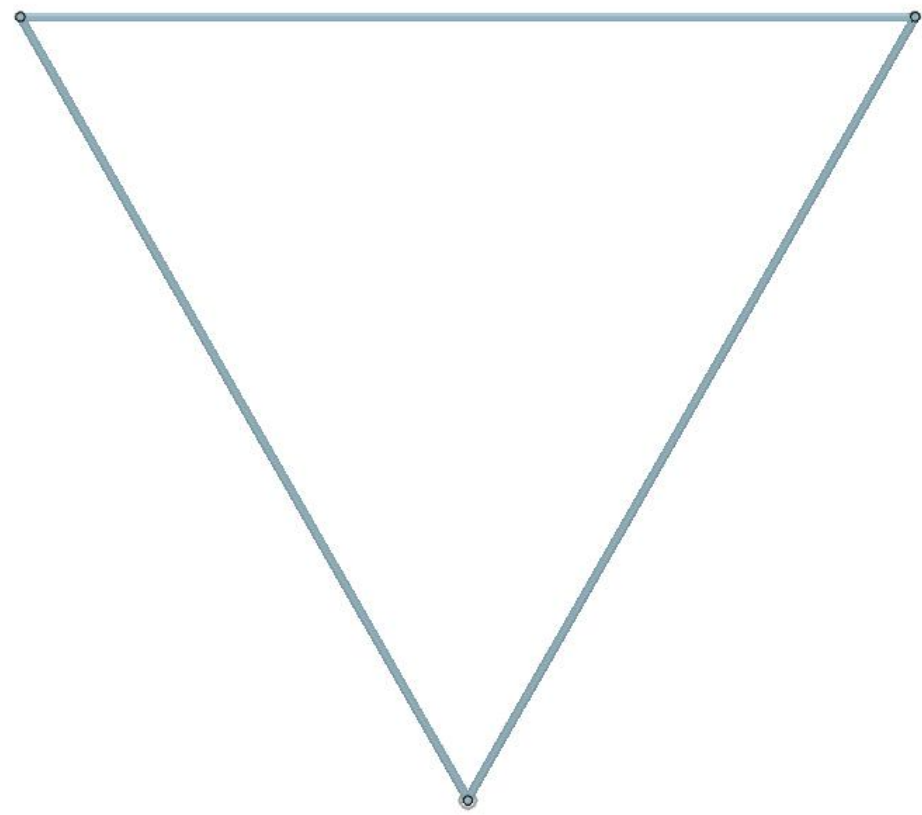
A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



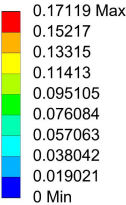
截面：圆r=0.4mm



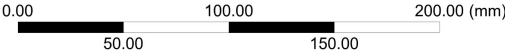
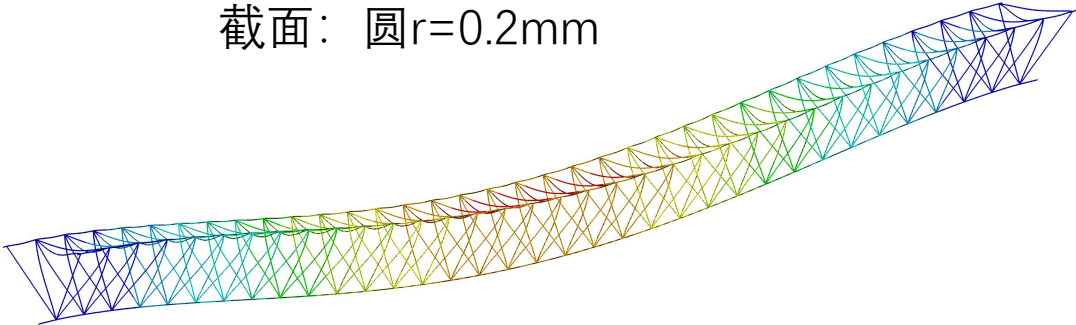
截面做成近似等边三角形



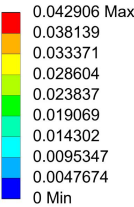
B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



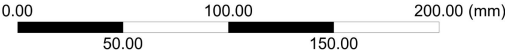
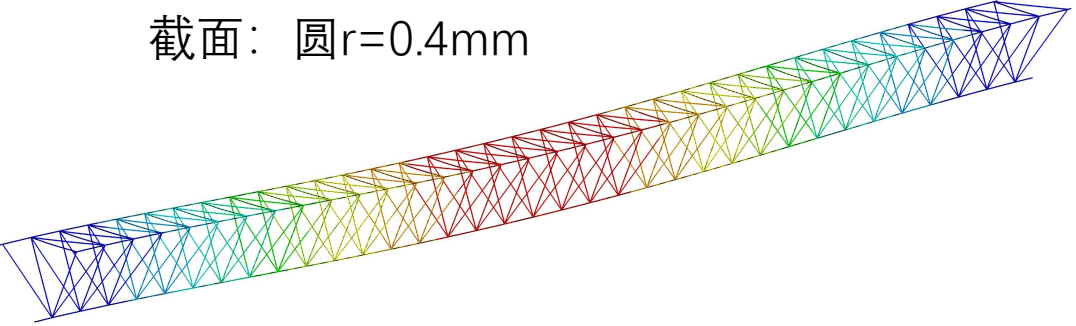
截面：圆r=0.2mm



B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

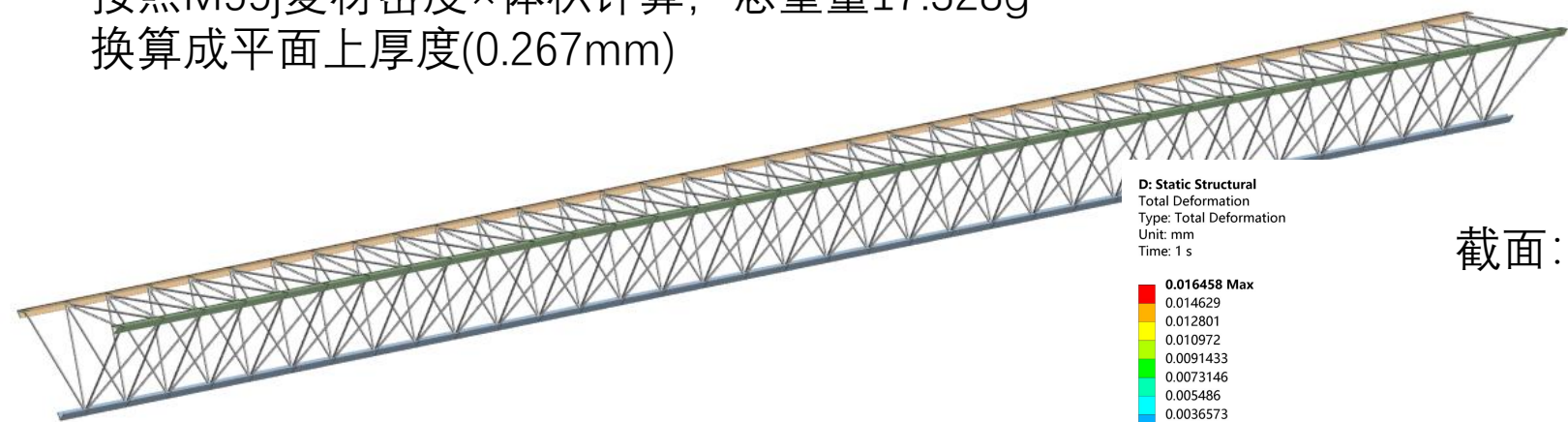


截面：圆r=0.4mm

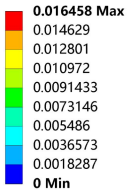


3 ITK Frame

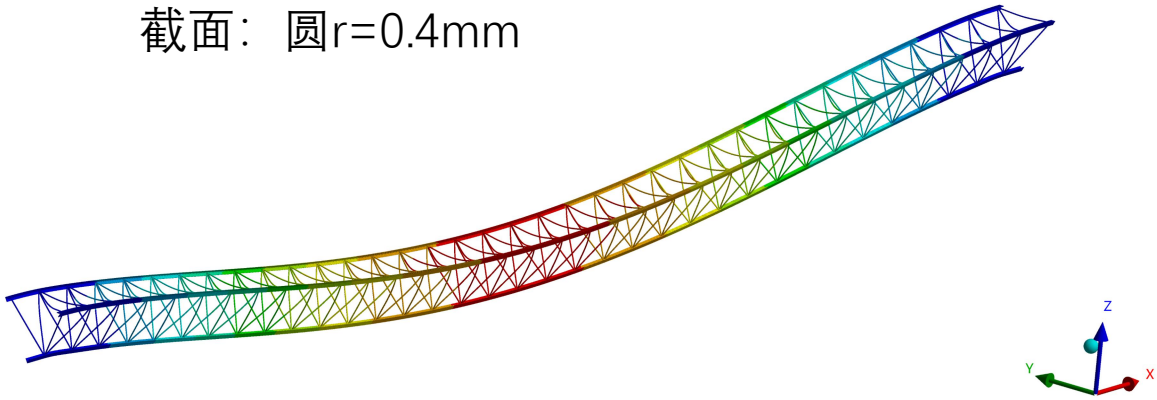
按照M55j复材密度×体积计算，总重量17.328g
换算成平面上厚度(0.267mm)



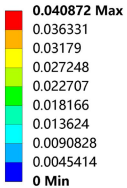
D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



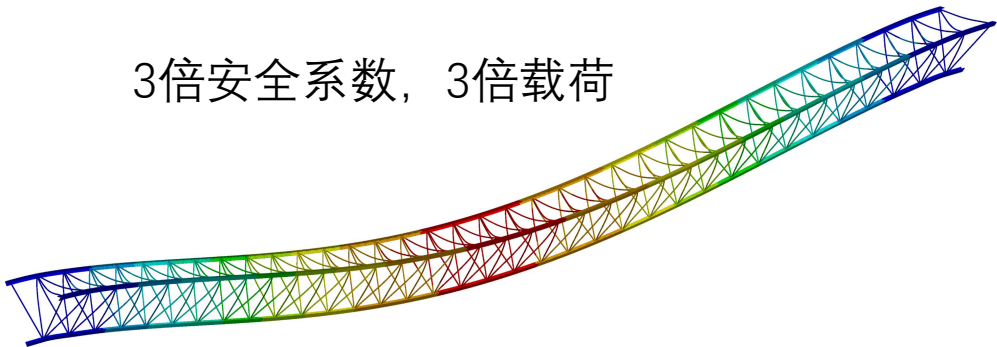
截面：圆r=0.4mm



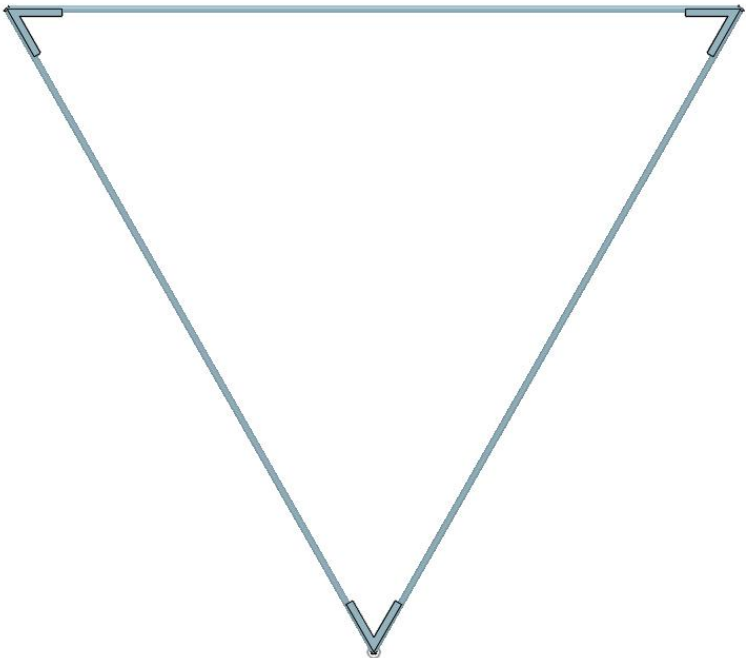
D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



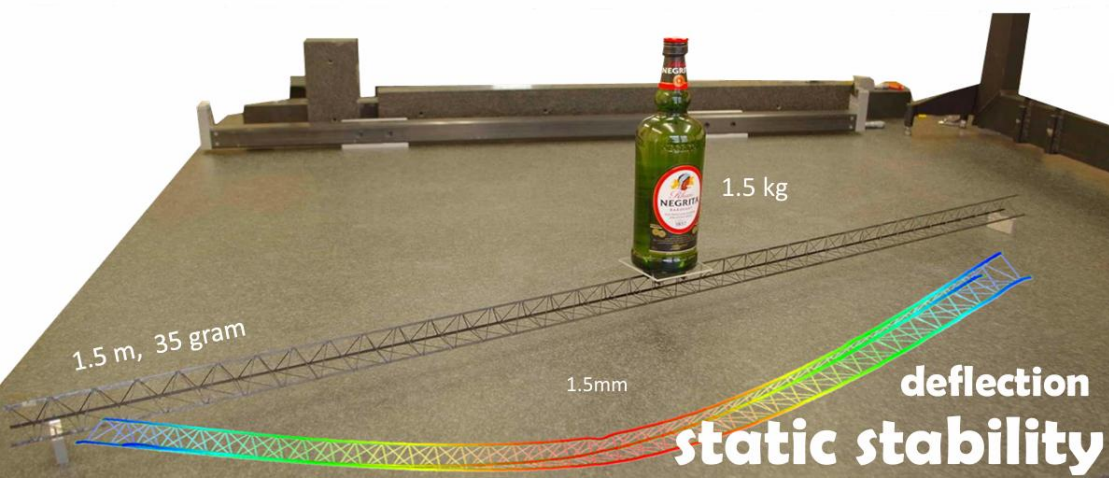
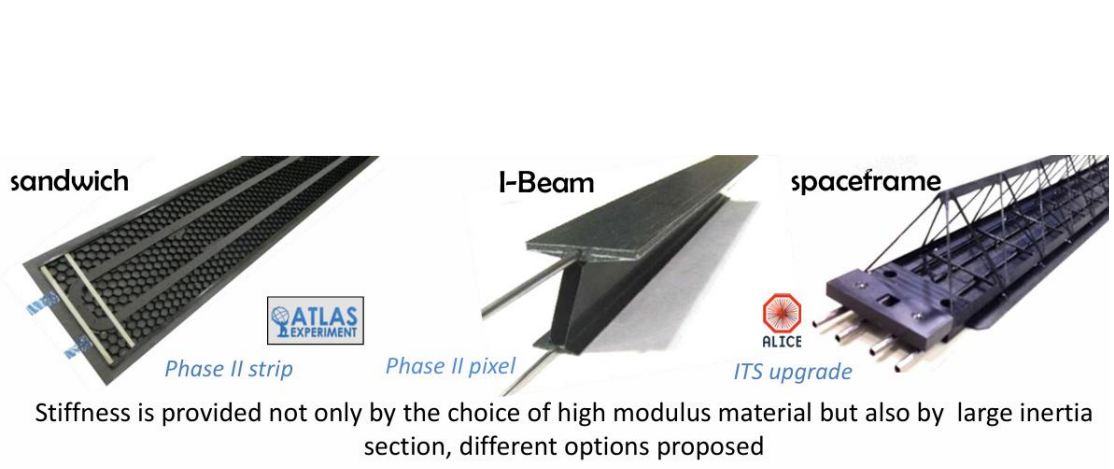
3倍安全系数，3倍载荷



三角形顶点主梁结构（与Alice OB类似）

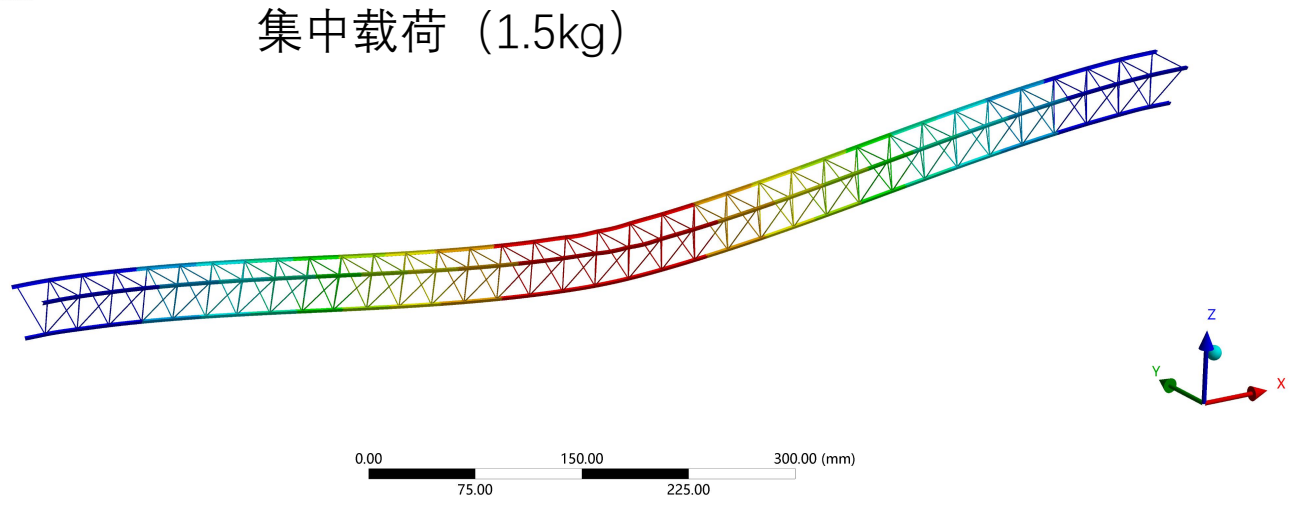
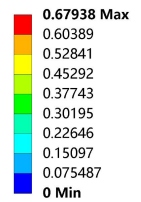


3 ITK Frame

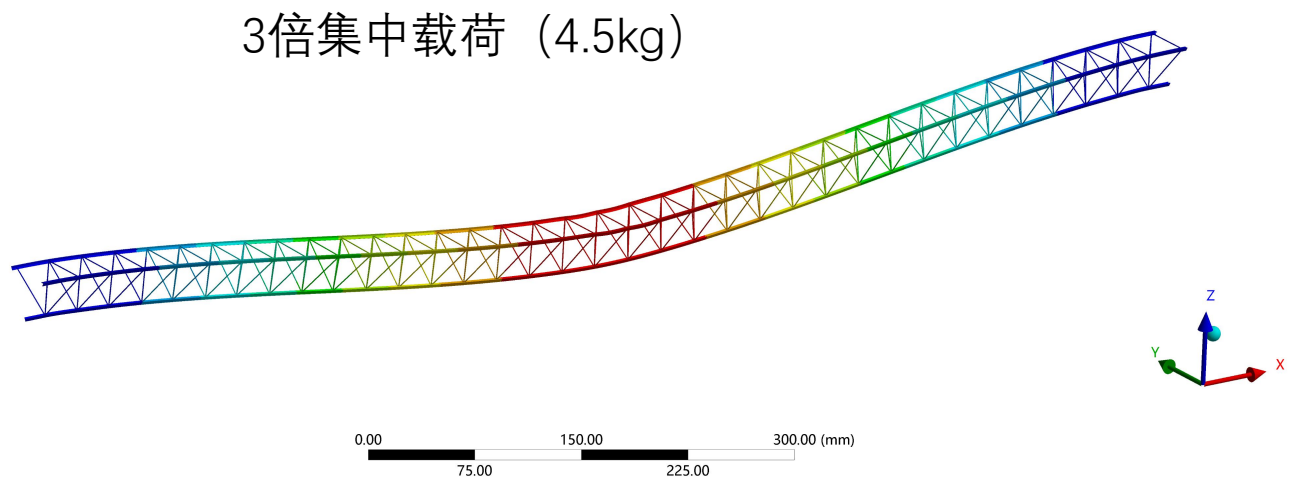
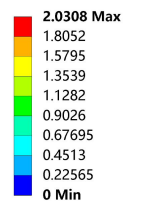


Alice OB

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

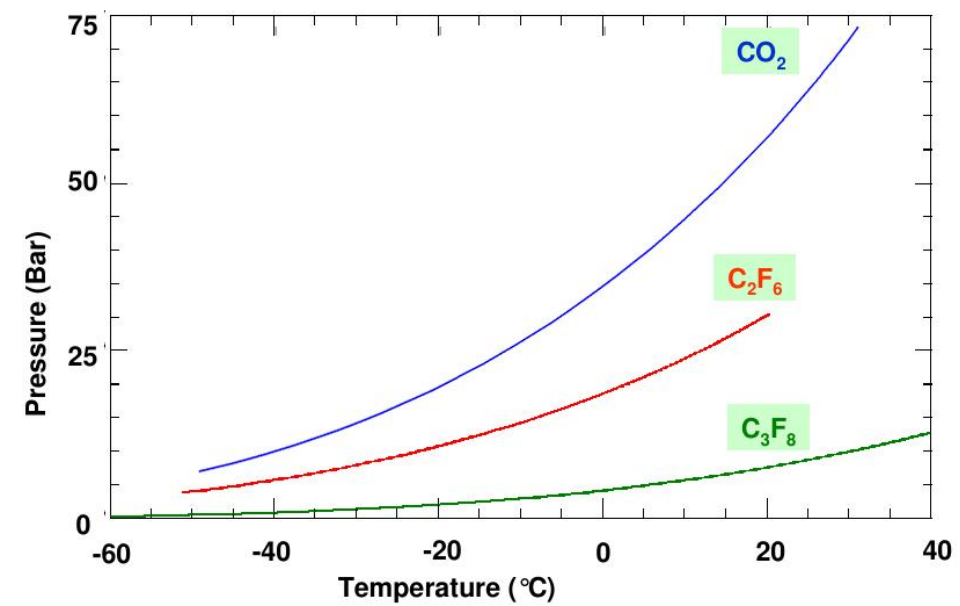


为何选择蒸发式CO₂ 冷却?

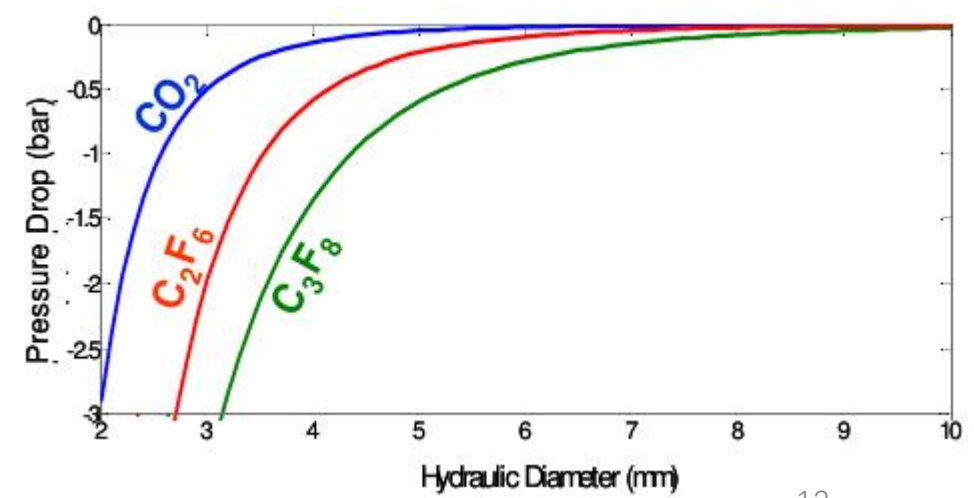
- **超高传热效率**
→ 传热系数 (α) 远高于单相 → 降低传感器与流体间温差 (ΔT)
- **低流量 & 紧凑设计**
→ 质量流量 ($\dot{m}$) 低 → 管道直径 ($\varnothing$) 更小 → 材料成本与体积减少
- **全域均匀冷却**
→ 管道温度近乎恒定 (仅受微小压差 Δp 影响) → 长距离管线仍保持稳定, 避免因热应力引起的sensor变形和破裂

为何选择CO₂ ?

- **抗辐射性极强**
→ 传统制冷剂易被电离辐射破坏, CO₂ 稳定性卓越
- **高压 & 小管径**
→ 高压流体 → 温降 (温度滑移) 极小 → 适用于微型化系统
- **环保无毒**
→ 零臭氧层破坏 (ODP=0) → 比CFC制冷剂更可持续

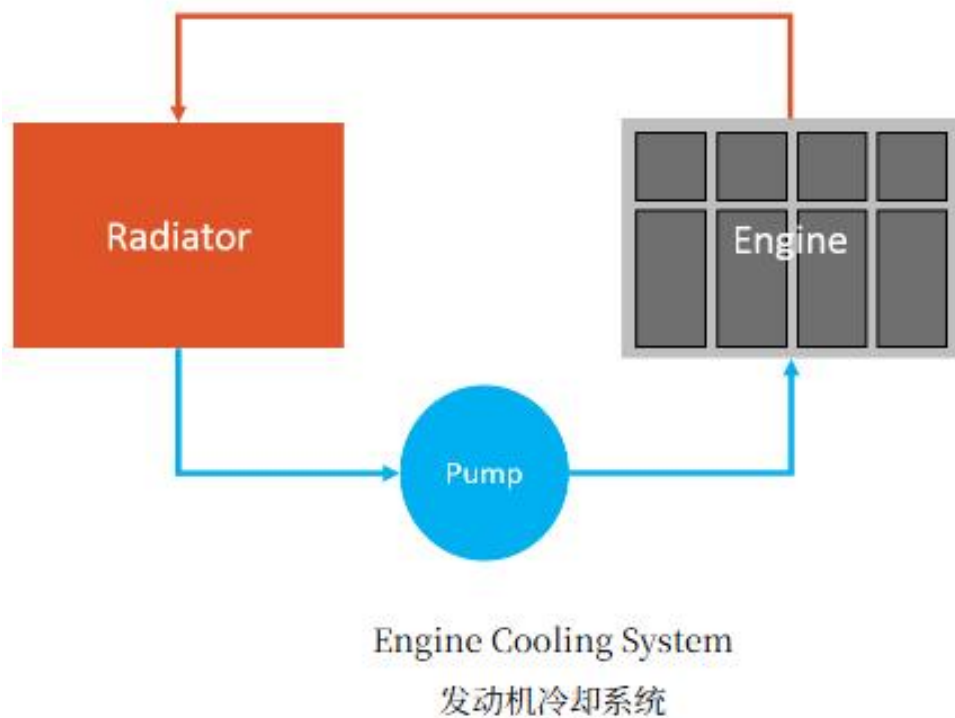


常见抗辐射制冷剂



一定流速下压降与管径的关系¹³

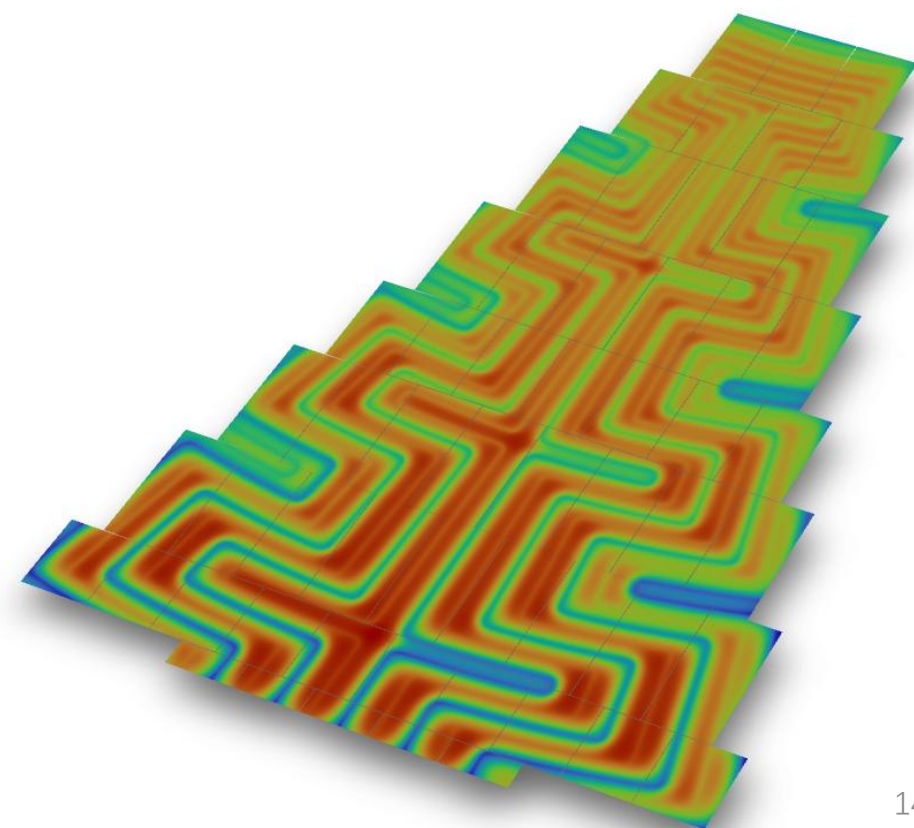
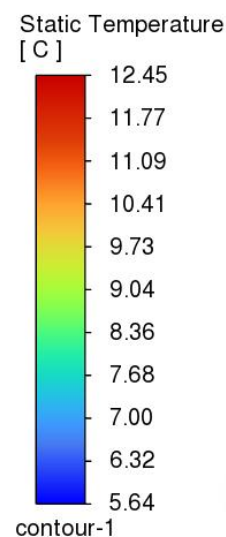
4 二氧化碳两相冷却



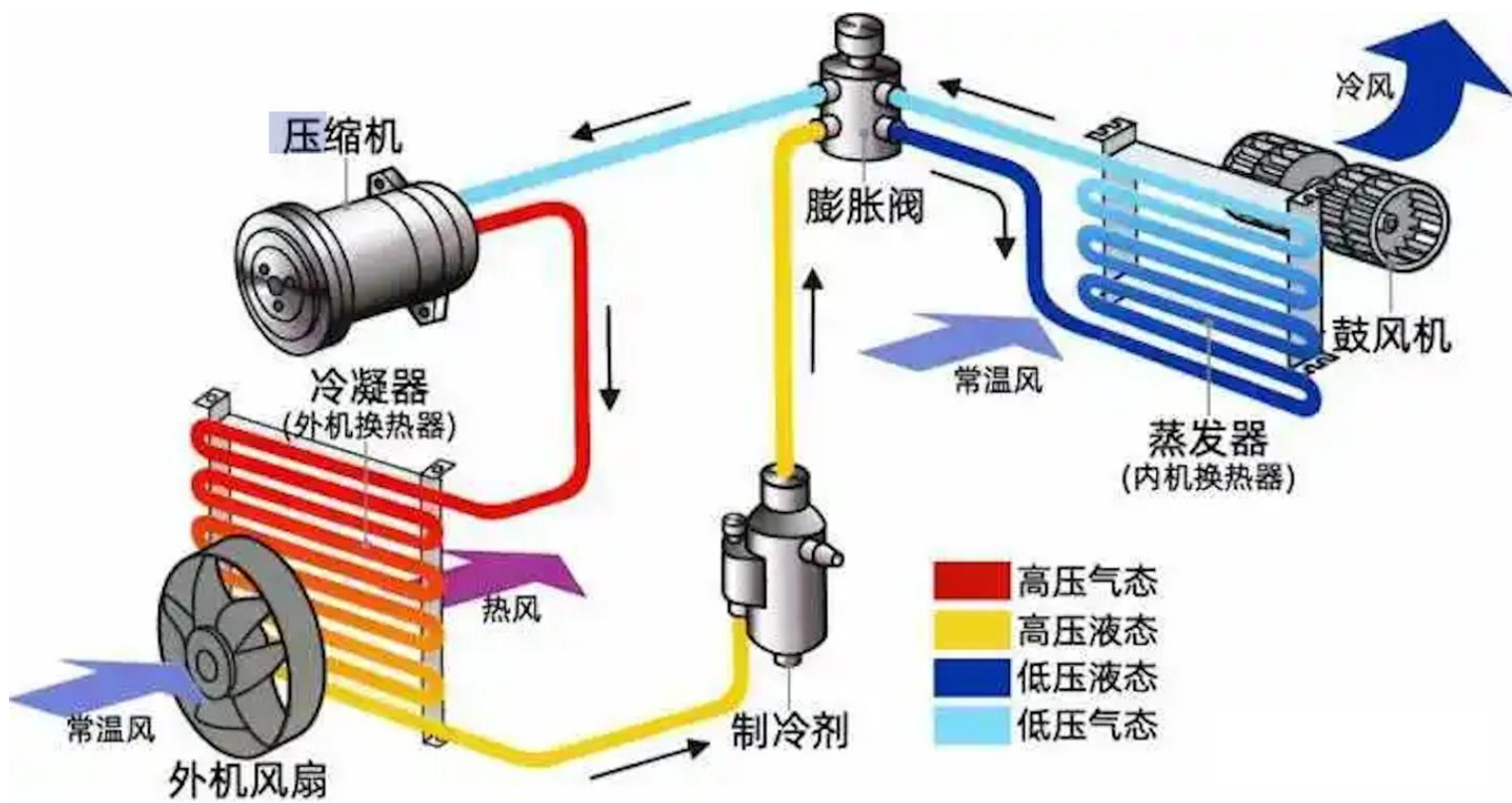
水冷系统缺点：

- 1.没有足够的空间容纳该系统
- 2.功率较大时，水冷系统物质的量很高
- 3.水在管道流动过程中温升太高，导致温差大

一个熟悉的水冷冷却系统的例子是用来冷却我们的汽车发动机。这是一种“单相”冷却系统，也就是说，液态水将热量从发动机转移到散热器，在那里它被排放到大气中。水不沸腾或蒸发（正常情况下！），液体保持液态而不会变成蒸汽。在这样的应用中，我们给水加压，从而提高它的沸点，因为我们不想让水沸腾。



4 二氧化碳两相冷却

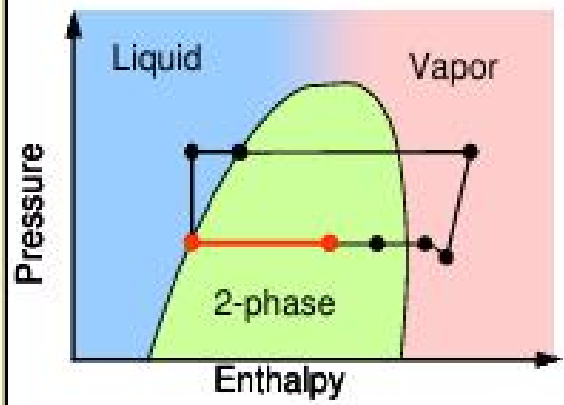
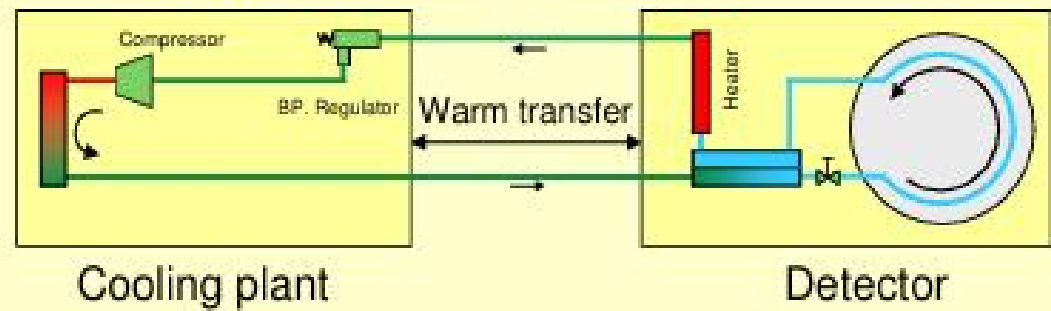


空调两相冷却系统

缺点：
需要无油压缩机
消耗的电功率大
难精确控制温度

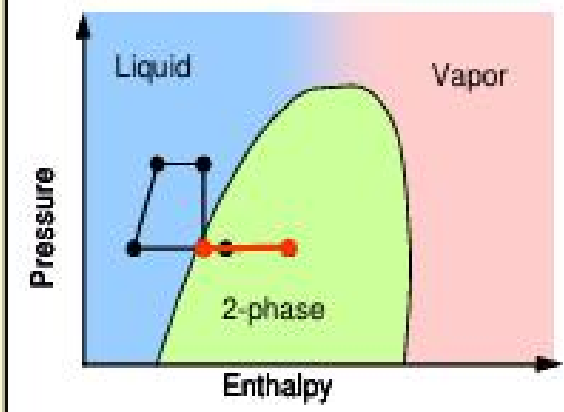
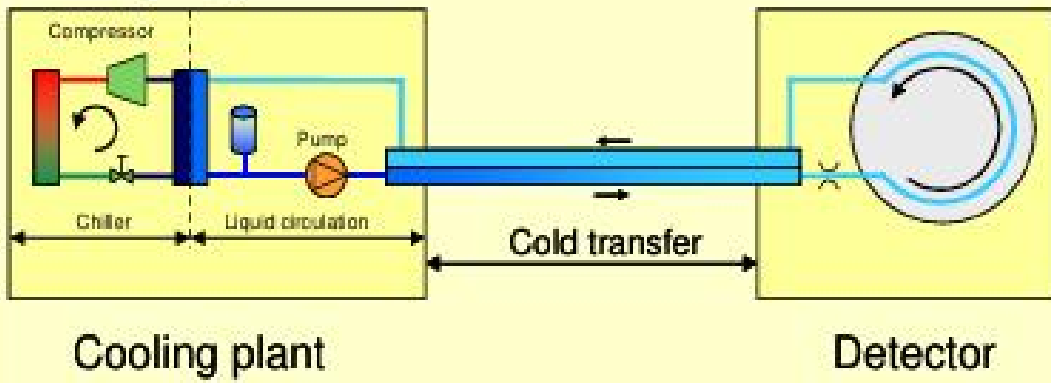
4 二氧化碳两相冷却

Traditional method: **Vapor compression system**
(Atlas)



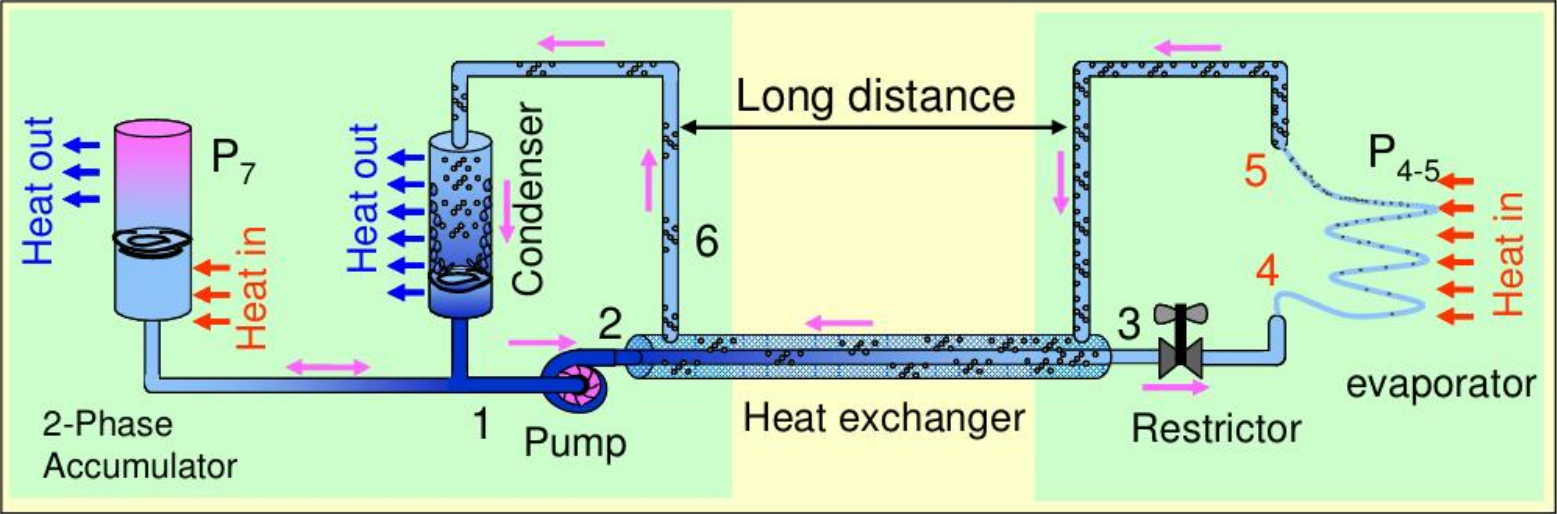
传统压缩系统的优点在于可以不使用隔热的运输管线；而泵送系统则需要冷却传输管道并且需要适当的绝缘层。绝缘层会增加额外的空间需求，但管道较小，因此所涉及的质量很可能较低。

2PACL method: **Pumped liquid system**
(LHCb)

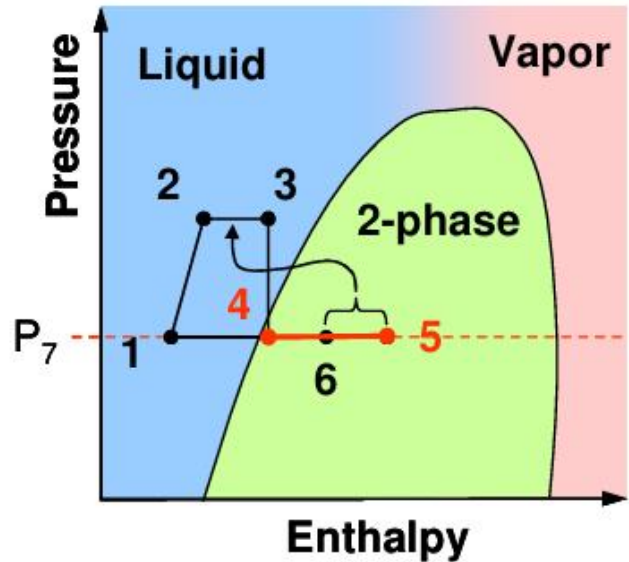


传统压缩系统的缺点是探测器内存在加热器，以蒸发剩余的液体，同时需要无油压缩机比无油泵通常更难找到。两相蓄能器泵送方法的主要优点是探测器内部有一个完整的被动蒸发器部分。在难以接触的探测器区域，不需要执行器或重要传感器。

二氧化碳两相蓄能器泵送系统 (2PACL)

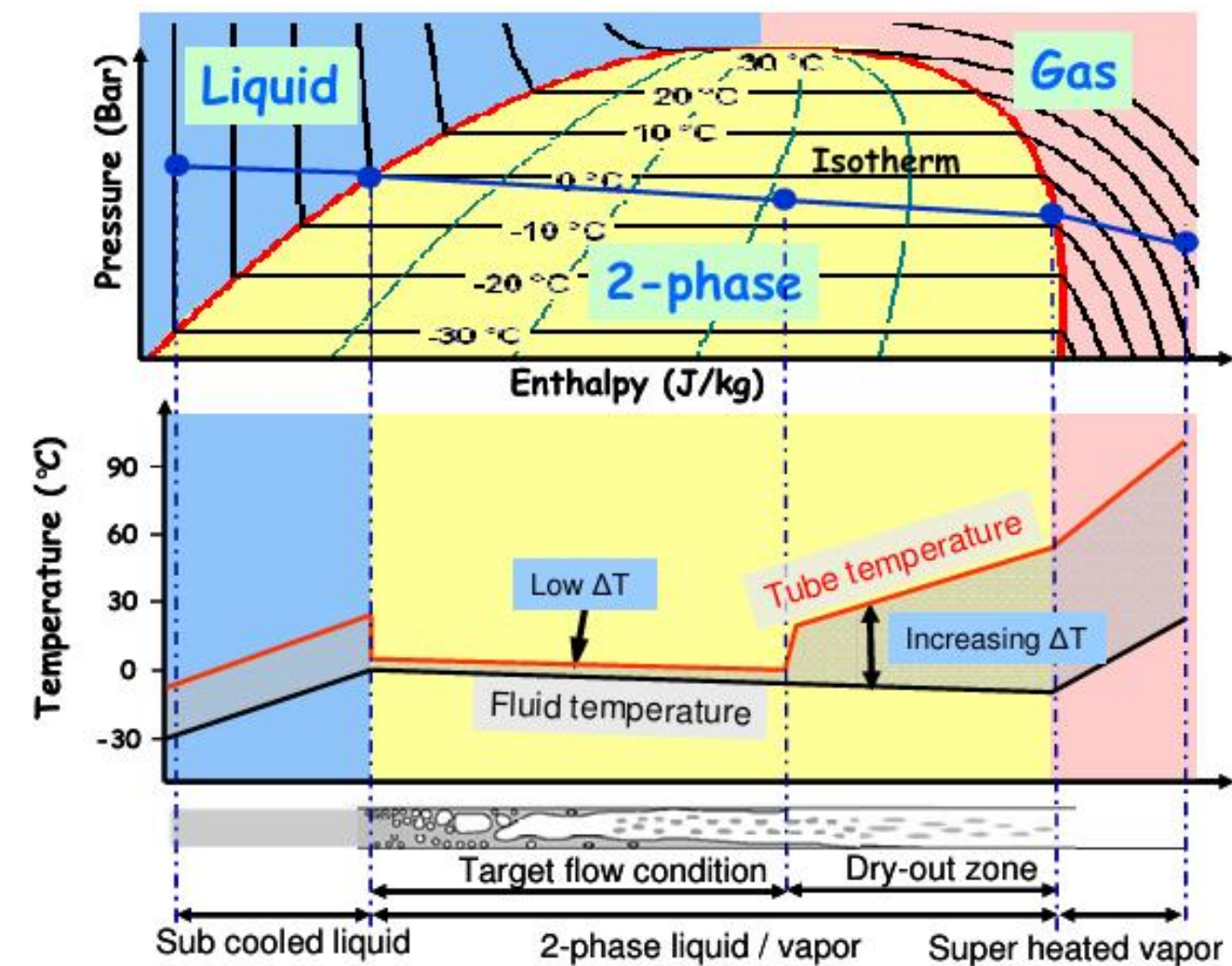


- 蓄能器：与系统并联，始终包含液态和气态CO₂的饱和混合物。蓄能器温度直接决定系统饱和压力（即蒸发温度）。
- 关键组件：泵、内部热交换器、蒸发器、冷凝器、蓄能器。



蓄能器挤压系统中的所有制冷剂，从而对其加压。如果给加上精细的电机控制，就可以精确地控制管道中的压力，从而控制二氧化碳相变的温度

4 二氧化碳两相冷却



CO₂压力焓图

黑线是流体温度，红线是管壁温度

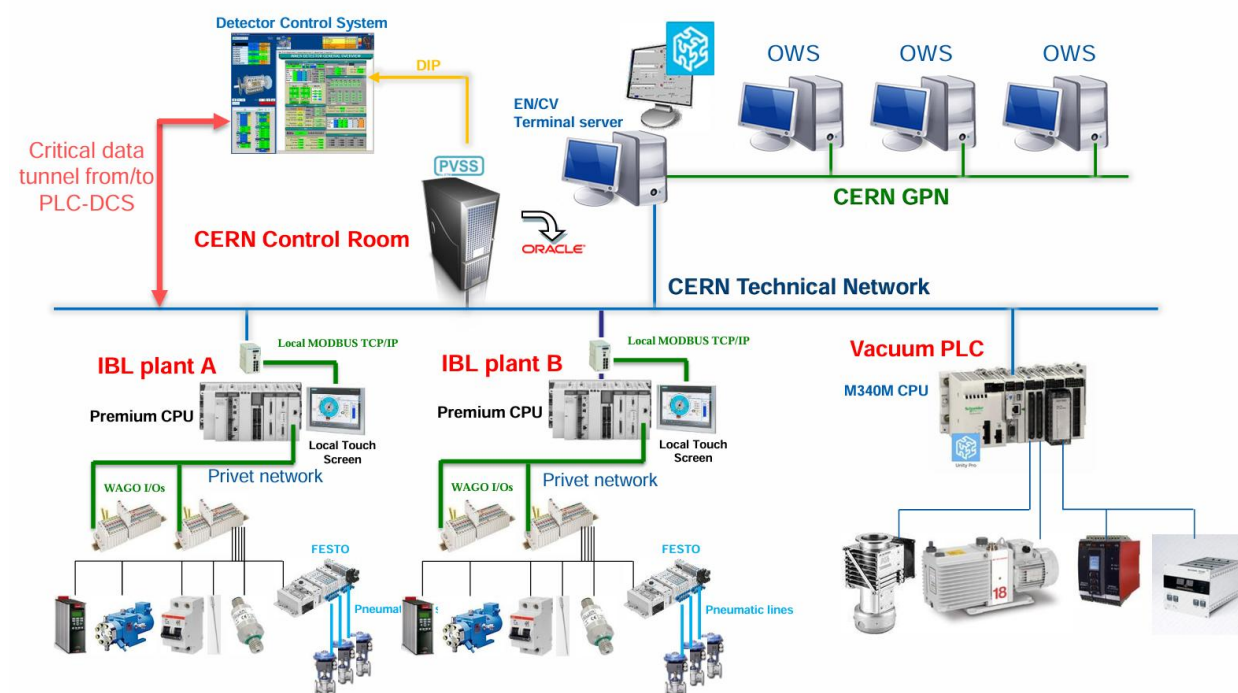
二氧化碳两相冷却控制系统

Detector Cooling CO₂ at CERN

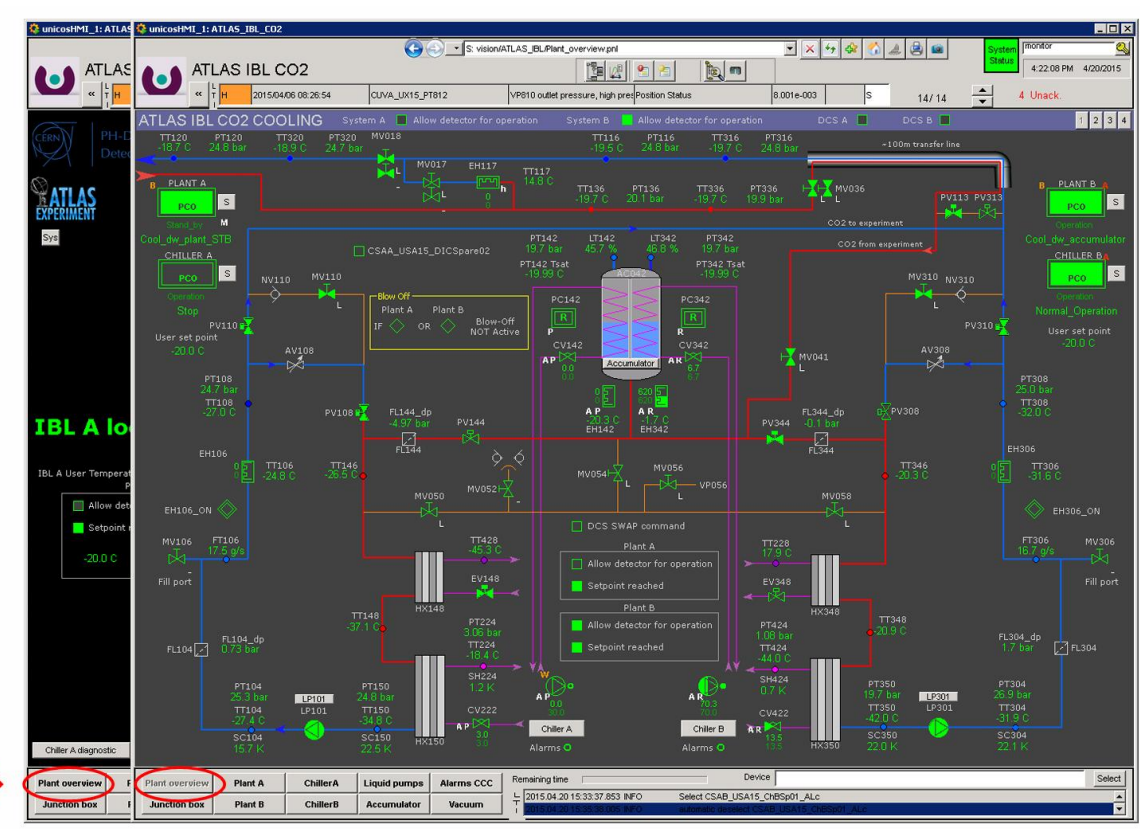
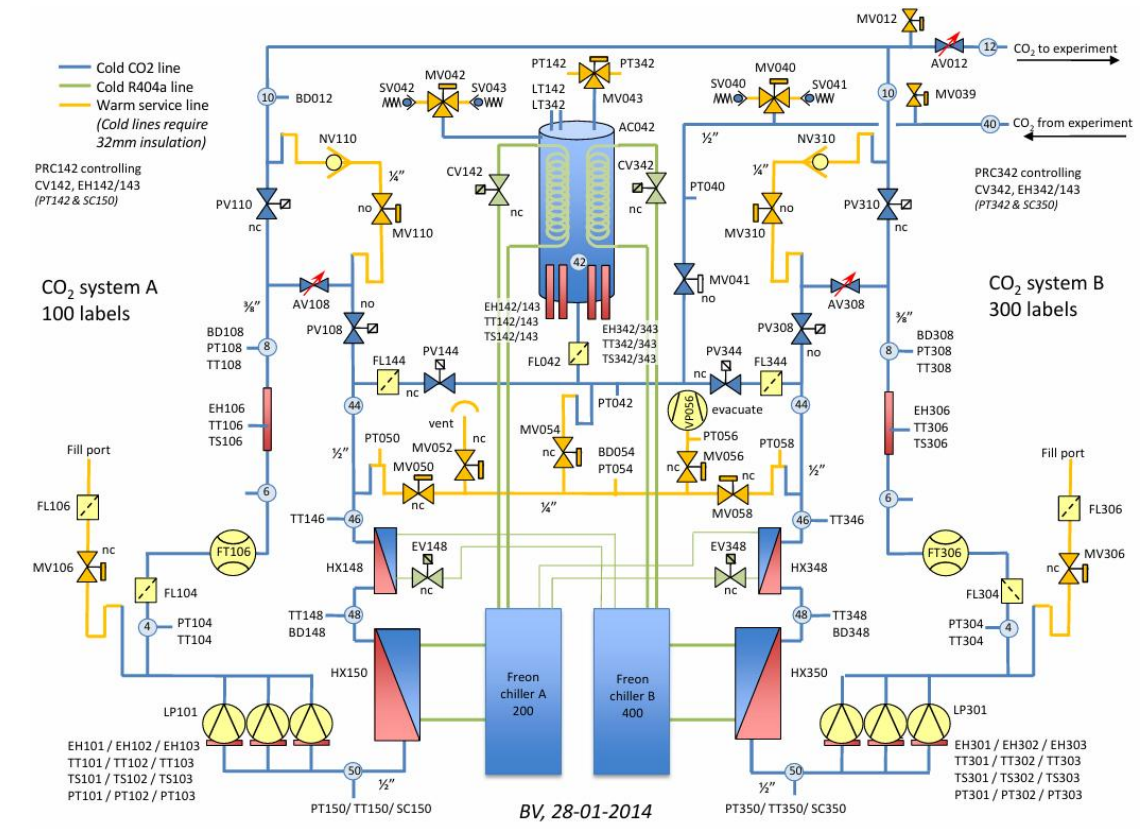


CERN开发的标准化工业控制系统框架，集成SCADA、PLC和现场层设备，支持模块化编程与自动化代码生成

IBL CO₂ cooling control system architecture



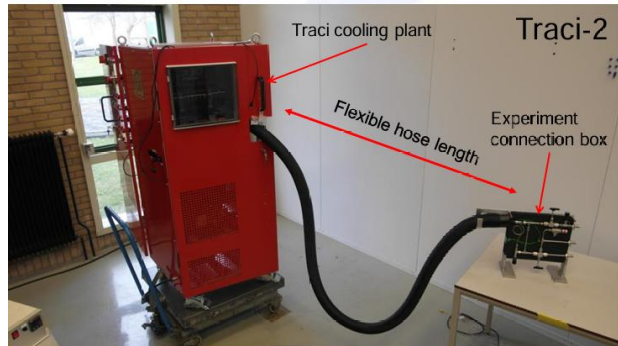
Atlas IBL CO2 cooling plants



主要系统元素：
2个独立的、冗余的冷却站核心
2个独立的、冗余的两级冷冻机
1个带有冗余控制的共同蓄冷器

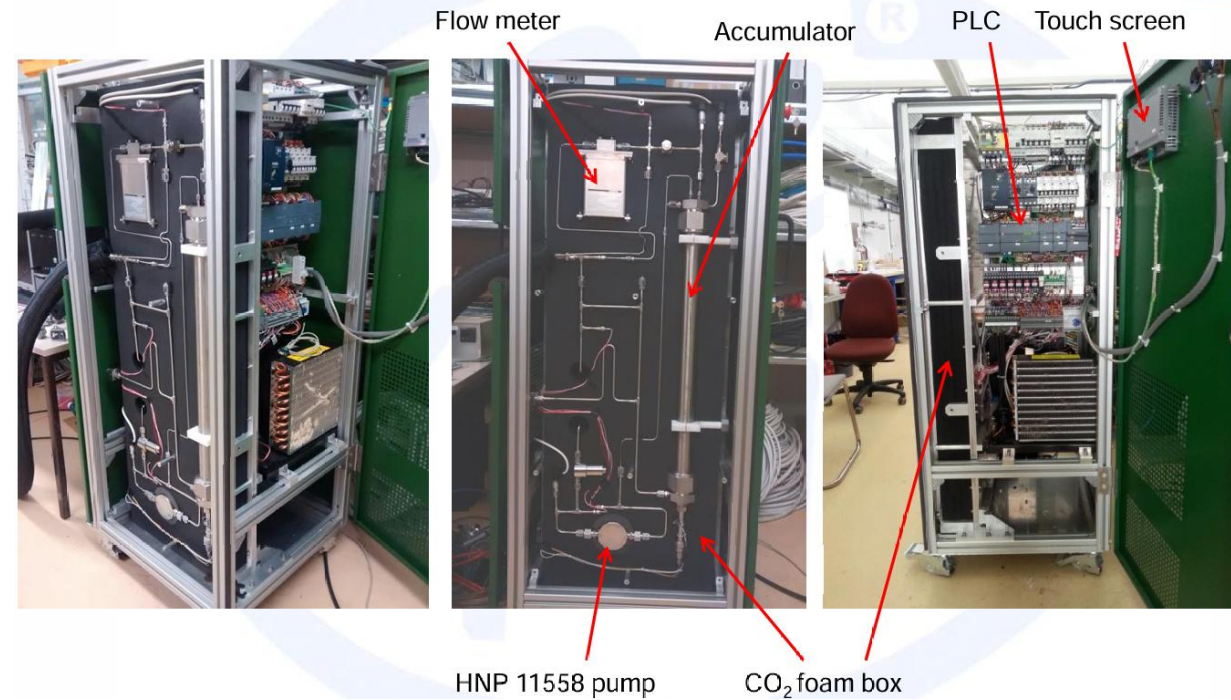
冷却实验样机 “Traci”

Traci-3 update features



- Traci-3 has been updated wrt Traci-2
 - PLC + touchscreer control
 - HNP-ceramic pump
- Traci-3 build from a revised design
 - Serial production oriented

Traci-3 internal



- 1. 桁架样件的合同、生产与测试**
- 2. 机械实验室的搭建**
- 3. 冷却系统的进一步调研和联合开发**

谢谢大家！