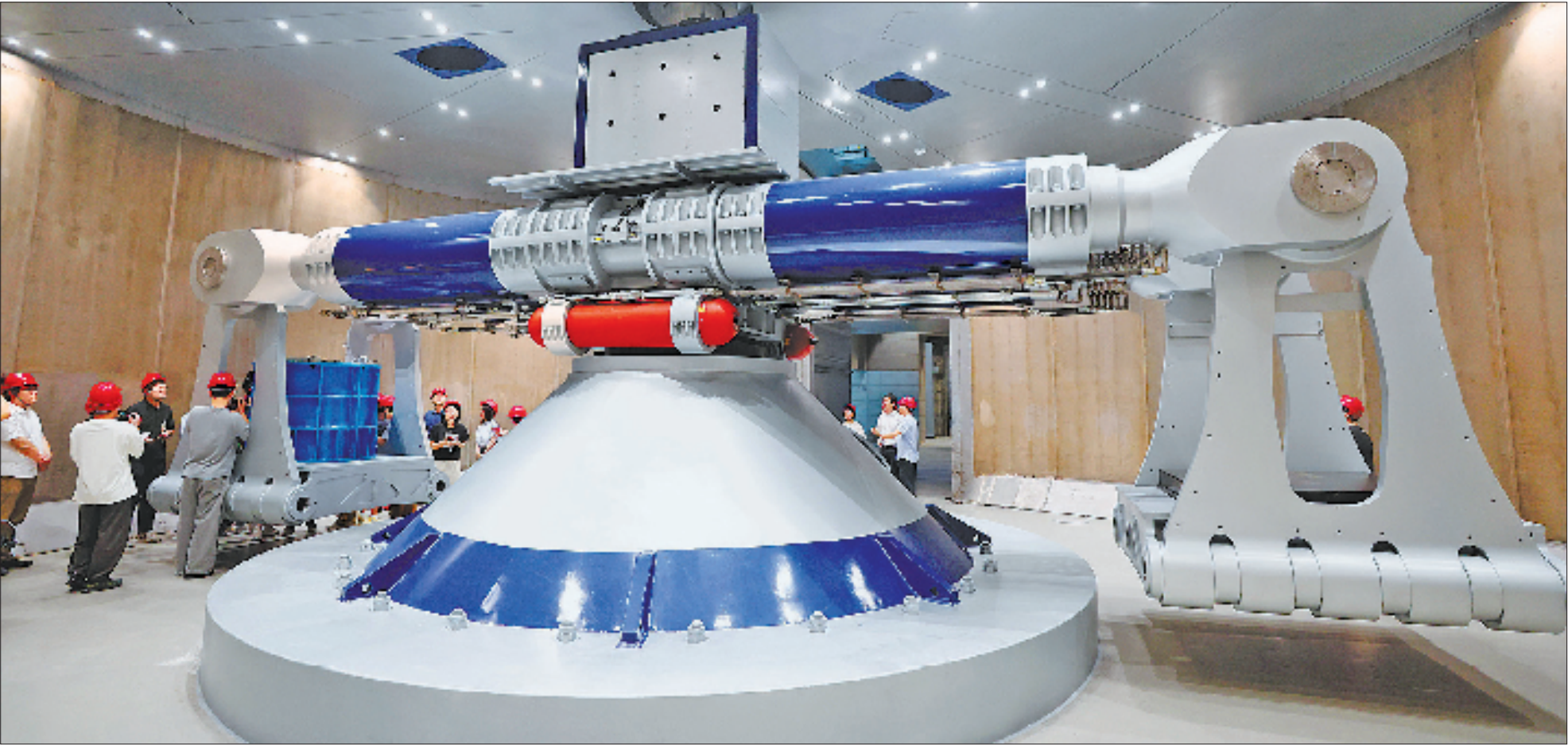


# 世界容量最大超重力离心模拟与实验装置核心设备启动 压缩时空,“一眼千年”不是梦



超重力离心模拟与实验装置启动的首台离心机主机“CHIEF1300”。

本报记者 魏志阳 姚颖康 摄

世界已经进入大科学时代。新时代以来,我国一批大科学设施建成运营,撬动关键技术突破,重大成果不断涌现,培育了新兴产业集群,为科技强国建设和经济社会高质量发展提供了坚实支撑。日前被世界权威期刊称为“全世界能力最强的离心机”的超重力离心模拟与实验装置,便是其中代表之一。

■ 本报记者 何冬健 唐骏彦

中国古代有“烂柯观棋”传说。晋人王质在山中看棋片刻,下山已是百年后。近日,由浙江大学牵头建设的国家重大科技基础设施——超重力离心模拟与实验装置(简称杭州超重力场)核心设备启动,开启科学实现“山中方一日,世上已千年”的梦想之门。

在杭州市余杭区,我们见到了它。当其核心设备之一、目前世界最大容量离心机CHIEF1300高速挥舞一双长达6.4米的巨型转臂,臂两端吊篮内可产生高达地球重力300倍的“超重力场”。这意味着科学家们几天就能洞察地质千年的演变。

杭州超重力场包含CHIEF1300、CHIEF1500和CHIEF1900三台离心机主机,以及拥有六座实验舱的18台机载装置,覆盖边坡与高坝、岩土地震工程、深海工程、深地工程与环境、地质过程、材料制备等关键研究领域。这一大科学装置如何实现“时空压缩”,让人“一眼千年”?

## “以小见大”有科学依据

科学家通常将地球表面的重力加速度(9.8米每平方秒,英文缩写为g)称为常重力,当数据超过一个单位时则称为超重力。

神舟十一号航天员陈冬描述过,飞船上升时,可达5.5倍地表重力加速度,这样的超重力会让航天员产生胸闷、呼吸不畅等反应。

作为最先启动的离心机,CHIEF1300虽然是三台中容量最小的,但也达到了1300400g·t(100倍重力加速度下,离心机有效载荷可达13吨),为全球之最。

CHIEF1300的主机室是一间占地约230平方米的圆形地下室,位于中央的离心机就像是一个能够高速“自转”的巨型“天平”。

在CHIEF1300的世界里,当转臂带着两个8吨重的吊篮高速旋转,会产生巨大的离心力场,吊篮内最高能达到300倍常重力。科学家利用这种环境,能在实验室中以小尺寸和短时间,模拟再现真实世界中需巨大空间或漫长岁月才能完成的地质演变、重大灾害和极端现象。

项目首席科学家、中国科学院院士、浙江大学教授陈云敏说,这座建成后将成为世界上超重力离心机容量最大、实验舱功能最强的多学科实验设施,核心能力在于“时空压缩”与“能量强化”。

“缩尺效应”让“以小见大”有了科学依据。例如,在100倍重力加速度下,1米高的模型可以模拟100米高边坡的灾难过程。“缩时效应”则可以使得100年的污染物质迁移过程缩至3.65天呈现。

“能量强化”让极端场景的模拟成为可能。小型爆源在超重力场“强化”下能模拟大

当量爆炸效果。

同时,国家在防灾减灾、能源开发、环境保护等领域的重大战略需求,常受限于大尺度、长周期、多因素耦合的复杂场景,难以在实验室再现。CHIEF1300和正在建设中的CHIEF1500、CHIEF1900,使构建“超重力+特殊环境”的极限实验条件成为可能,为验证前沿技术提供了前所未有的平台。

## 探索打造“极限系统”

“离心机,全世界没人造过这么大的。”回忆起2019年项目启动时的场景,项目主机组组长、浙江大学特聘副教授汪玉冰觉得“压力像山一样”。要知道,团队要造的是一套能稳定模拟百千倍重力加速度的“极限系统”,处处充满了创新,一切都需要探索。

“一方面要做到国际领先,一方面又要确保技术成熟,能顺利产出成果。”陈云敏这样阐释CHIEF建设的高难度。

对工程建设而言,光“原理上行得通”是远远不够的。技术上的所有隐患必须消除。陈云敏院士带领团队在预研阶段列出了48项关键技术。大量零部件都是为了CHIEF1300专门设计制造的。有一个质量不过关,装置建设和科学研究目标就实现不了。

最大的难题是保障转臂的“稳定性”。臂式离心机的核心是“转得快、转得稳”,CHIEF1300的转臂最大线速度能达到137米每秒。“两臂质量些许不平衡在高速条件下就会引起较大的振动,从而影响整个装置的性能。”项目总工程师、浙江大学求是特聘教授凌道盛说。

起初,团队参考了国内外同类装置的设计——在转臂的下一侧的主轴上安装两个轴承支撑。可分析和试验后发现,当重力加速度从250g增加到300g时,无法满足离心机动力稳定需求。“这条路走不通。”陈云敏院士决定,“改设计,加固定支点!”

新方案是在转臂之上增加一个轴承,就像在顶部增加支点稳住陀螺一样。同时,采用液压滑动轴承替代传统机械滚动轴承,以适应大轴径、高转速的需求。这个想法一提出,就有一些质疑的声音。“滑动轴承常用于水轮机,水轮机转动部分是圆柱形,液压轴承受力比较均匀;而离心机转臂就像主轴‘挑着的担子’,试验过程中轴承不可避免地承受不平衡力作用。”凌道盛解释。

为了验证可行性,项目团队找到了东方电气——国内最擅长重载滑动轴承研发的企业之一。双方做了上百次受力模拟。最终,

团队创造性地提出上下两端支撑、三导一推液压轴承的大容量、高离心加速度长臂的离心机结构体系。安装轴承时,垂直误差被严格控制在每米0.05毫米(5丝)内,相当于一根头发丝的直径。

另一重难关接踵而至:温度控制。当超重力离心机的转臂高速旋转时,空气摩擦产生的热量会让机室内部温度急剧升高。在此前建设的容量400g·t的超重力离心机ZJU400上进行试验时,当重力加速度达到150倍时,机室温度冲到了80℃,严重影响离心机和机载装置的运行稳定性和安全。杭州超重力场的离心机转速更快,产生热量更高。“必须控制温度。”陈云敏团队在ZJU400侧壁液冷基础上创新性提出了真空温控系统——组合使用真空和侧壁液冷,把主机室抽成真空的同时,在侧壁换热器中通入最低达-35℃的载冷剂带走离心机高速旋转产生的热量,将机室温度控制在40℃以内。

为了给离心机提供一个稳定的基础,工程队向下开挖了当时杭州最深的、相当于12层楼的基坑,四周浇了平均厚度超过2米、最厚达4米的混凝土墙,里面还加了多层钢筋网。

正是在一次次尝试、失败、再尝试中,项目团队联合国内20多家单位,攻克了48项关键技术,拿到了国内外80多项发明专利,国际首创6台机载实验装置。

“过程太艰难了,但我们最终还是成功了!”9月29日的核心设备启动仪式上,在接受记者采访时,项目总工艺师、浙江大学求是特聘教授蒋建群红了眼眶,“大家努力了这么多年,不过是阶段性成果,我们的科研之路还在继续。”

这支团队从不缺“离开”的选择,也曾有人因身体原因而不得不停下脚步,但团队成员从未失去信心,他们选择坚持。

浙江大学长聘副教授孔德琼自2017年从牛津大学归国后,便持续投身于“造波、造啸及重力流实验装置”的预研与建设工作。他表示,支撑团队坚守至今的,是深植于内心的强烈求知欲,更有每一次试验成功时,那份无可替代的自我价值实现感。

## 大装置有大用处

“国庆假期?没顾上休息。”项目高压温控深海装置负责人、浙江大学研究员王路君假期里依然与一台1米多高的圆柱形装置为伴——这是他的团队自研的“深海高压温控实验装置”,也是世界领先的深海模拟器。它可被装入CHIEF1300的吊篮,在200倍常重

力条件下模拟2000米深海的极端环境,探索可燃冰开采的新方法。

对普通人来说,可燃冰或许只是新闻里的“清洁能源”,但在王路君眼里,它关系着未来每一户家庭的能源供应。它的成分中,八成是含甲烷的物质,分布在深海底,是应对全球能源危机的理想替代能源。我国可燃冰储量丰富,可开采难度极大——深海的高压低温环境中,可燃冰一旦脱离原位就容易分解,稍有不慎就会引发海底滑坡,甚至释放大

量甲烷加剧温室效应。

“现在有了超重力,能亲手‘摸’到开采的规律。”王路君给出一组实验数据:去年在ZJU400的预研装置上,团队用100倍重力加速度模拟2000米深海水压和可燃冰储层的力学场,1小时就还原了现场416天的可燃冰开采演变过程;他们还首次尝试竖井压裂技术,把产气速率提升1倍。可他们并不满足——距离海域商业化开采需要每天20万立方米的效率,数据还差得远。

启用CHIEF1300,王路君团队的目标更进一步:模拟海床下200米厚的水合物应力状态,用分段压裂开采技术“精准唤醒”可燃冰。“相当于在实验室里造一个‘微型海底’,每一步都能看到哪里容易出问题,怎么改进。”他说,“如果能突破这个阈值,我国的海洋能源开发就能再往前近一大步,未来大家用的天然气,可能就是来自深海的

可燃冰。”

在杭州超重力场的实验大厅里,这样的“民生关联”还有很多:造啸及重力流实验装置能模拟海啸对近岸建构物致灾效应;海底重力流侵蚀海床与运移机理,为沿海城市防洪堤设计和海底地貌演变预测提供支撑;超重力振动台可复现9度烈度地震下的场地响应,验证不同加固措施的抗震效果;高压高温装置可以重现地球深部万年尺度的地质演变,为深部地球科学研究提供关键约束……就连材料科学团队,也在超重力下制备出强度提升45%的铜钨合金,强度提高60%、塑性提高20%的铜镍锡合金等,有望解决高铁用高强导电材料、高强高弹性轴承材料等关键零部件的“卡脖子”问题,让中国制造的高铁走向全球。

未来,当这些在超重力环境下验证的技术应用于实际,每个人都能受益:使用的能源更加清洁,居住的房屋更加安全,交通工具更有效率……

杭州超重力场更是一个开放的平台。预计其建成后,海内外用户将超1000家。“希望全球学者带着好奇心来这里尝试,一起探索人类超重力领域的认知边界。”陈云敏说。



超重力离心模拟与实验装置实验大楼。

本报记者 魏志阳 姚颖康 摄

🔗 链接

## 我国部分代表性大科学装置

自20世纪80年代中国建设首个大科学装置算起,目前全国已经布局建设、在建和运行的重大科技基础设施项目总量超70个,数量上已处于世界领先梯队,技术上也逐渐实现部分领跑。

让我们一起走进部分具有代表性的大科学装置,看它们何以“大”。

### 北京正负电子对撞机

北京正负电子对撞机位于天安门广场向西约15公里,形似一只羽毛球拍。这是中国第一台大科学装置。它由北向南卧在地下,由一台长202米的直线加速器、一组共200米长的束流输运线、一台周长240米的储存环加速器、一座高6米重700吨的大型探测器“北京谱仪”和14个同步辐射实验站等组成。

微观粒子的性质不像宏观物质一样易于直接观察。正负电子对撞机使正负电子产生碰撞,以产生新的基本粒子。科学家通过对这些数据的处理和分析,进一步揭示微观世界的奥秘。

1988年,北京正负电子对撞机宣布建造成功。凭借它产出的数据,中国科学家取得了一批在国际高能物理界有影

### 500米口径球面射电望远镜

500米口径球面射电望远镜位于贵州省平塘县,占地面积约25万平方米,由主动反射面系统、馈源支撑系统、测量与控制系统、接收机与终端系统及观测基地等几大部分构成。它是世界上最大、最灵敏的单口径球面射电望远镜,也被称作“中国天眼”。

自2016年落成启用至今,“中国天眼”帮助人类探索宇宙的起源、演化及其结构,为理解宇宙中的前沿科学问题提供了重要的观测数据,也为国际科学界交流与合作搭建了重要平台。

2017年10月,“中国天眼”宣布发现首批新脉冲星,这是中国人首次利用自己独立研制的射电望远镜发现脉冲星。目前,“中国天眼”已发现的脉冲星数量达到1152颗,这一数量早已远超同一时期国际上其他望远镜发现脉冲星数量的总和。

### 高海拔宇宙线观测站

高海拔宇宙线观测站,也被大家叫作“拉索”。它是目前世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的伽马射线探测装置,位于四川省稻城县海拔4410米的海子山上,占地面积约1.36平方公里,像一个巨大的“圆盘”铺展在大地上。

2023年,“拉索”顺利通过国家验收,正式投入运行。它的任务是接住从外太空“洒”向地球的宇宙射线,让科学家借此发现宇宙深处的未知世界,破解宇宙射线起源的谜

### 空间环境地面模拟装置

空间环境地面模拟装置位于黑龙江省哈尔滨市,坐落于一片面积接近50个足球场大小的区域。这是我国航天领域首个大科学装置,于2024年通过国家验收。

该装置能够综合模拟真空、辐照、弱磁等九大类空间环境因素,揭示其对材料、器件、系统及生命体的影响规律,为航天器的高可靠与长寿命运行、航天员长期太空驻留等提供关键研究支撑。这意味着未来许多需要抵达太空才能进行的实验,在地面上就能完成。

作为一个面向全球开放的科研共享平台,截至目前,空间环境地面模拟装置已累计为国内外科研团队提供超过6万小时的实验服务。

### 高能同步辐射光源

高亮度的特性决定了同步辐射光源可以用来做许多常规光源所无法进行的工作。

北京怀柔的雁栖湖畔,正在建设的高能同步辐射光源是世界上设计亮度最高的第四代同步辐射光源,建成后将发出地球上“最亮的光”,可提供纳米探针、非弹散射、相干衍射、超高时间分辨等多种前沿实验方法。

这也是中国第一台高能同步辐射光源,结合能量高达300千电子伏特的高能X射线,助力实时、原位、实际工况的物质微观结构及其演变机制解析,开展更灵敏、更精细、更快速、更复杂和更接近实际工作环境的科学研究。项目预计在2025年底完成一期工程。

(本报记者 严粒粒 综合整理)



晨光下的高能同步辐射光源。

新华社发