

综 述

## 科学试验用离心机发展综述

黎启胜, 许元恒, 罗龙

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 分别阐述了国内例行试验离心机、土工离心机、载人离心机和精密离心机等四类科学试验用离心机的发展历史和现状;从研制单位角度出发,通过实例分别对世界各国科学试验用离心机的现状进行了详细的介绍;最后对科学试验用离心机的发展趋势作了剖析,提出了海工离心机、巨型土工离心机、高保真飞行模拟器、复合环境试验离心机和高精度离心机等五个发展方向。

**关键词:** 科学试验用离心机; 例行试验离心机; 土工离心机; 载人离心机; 精密离心机

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.001

**中图分类号:** TJ05; V416 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)05-0001-10

### Review on Development of Centrifuge for Scientific Tests

LI Qi-sheng, XU Yuan-heng, LUO Long

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** Firstly, the paper introduced the development history and current status of four types of centrifuges for scientific tests in China, including Duty Experiment Centrifuge, Geotechnical Centrifuge, Human Centrifuge and Precise Centrifuge. Secondly, according to the developers of centrifuges, the review introduced in details the current status of centrifuges for scientific tests used in different countries all over the world using examples. At last, the development trends of centrifuges for scientific tests were analyzed, and five development directions were proposed, including centrifuge for ocean engineering, gigantic geotechnical centrifuge, flight simulator of high exactness, centrifuge for composite environment examination and centrifuge of high precision.

**KEY WORDS:** centrifuge for scientific tests; duty experiment centrifuge; geotechnical centrifuge; human centrifuge; precise centrifuge

科学试验用离心机是指利用高速旋转的转臂(台)产生若干倍数于重力的离心力以模拟产品(人)所承受的力学环境,用于科研人员开展科学研究、试验检测的设备。目前,世界上开展科学试验用的离心机主要有:应用于航空、航天等军工行业的例行试验

离心机;应用于交通、水利等行业的土工离心机;应用于飞行员或宇航员训练的载人离心机;以及应用于计量领域的精密离心机。

具有科学意义离心设备的想法最早出现于1868年,法国人提出利用缩模方法对英法海峡金属桥梁进

收稿日期: 2015-09-02; 修订日期: 2015-09-10

Received: 2015-09-02; Revised: 2015-09-10

作者简介: 黎启胜(1965—),男,湖北人,硕士,研究员,主要从事装备环境试验测试技术方面研究工作及离心机等非标设备的设计工作。

**Biography:** LI Qi-sheng (1965—), Male, from Hubei, Master, Researcher, Research focus: equipment environmental test technology and design of nonstandard equipment including centrifuges.

行研究。到了1931年第一台具有科学试验意义的土工离心机在美国哥伦比亚大学问世<sup>[1]</sup>。从此科学试验用离心机在漫长的近一个世纪里有条不紊地在世界各国孕育,主要集中在欧美、日本等发达国家,中国在20世纪50年代末也逐步兴起各种离心机的研制。

## 1 国内离心机发展历程及现状

中国科学试验用离心机事业,崛起于世界离心机的快速发展期,坚持以研究所为主、跨越式发展的路子。经过近50年发展,掌握了离心机研制的关键技术,培养了一批技术骨干,积累了丰富的工程实践经验,已经使得中国科学试验用离心机在世界离心机研制领域占据了一席之地。

### 1.1 例行试验离心机

由于航空、航天研究及试验需要,中国科学院581组(北京卫星环境工程研究所前身)早在1962年和1967年就分别研制了第一代中型、大型物体离心机,拔得中国大型物体离心机研制的头筹,而后又陆续研制了第二代、第三代以及出口型物体离心机<sup>[2]</sup>。在同一时代,中国工程物理研究院总体工程研究所(以下简称中物院总体所)成功研制了用于核武器环境试验的“亚洲一号离心机”,如图1所示。该机半径、容量和功率均为当时亚洲之最,经过两次电气系统升级,目前仍在服役。

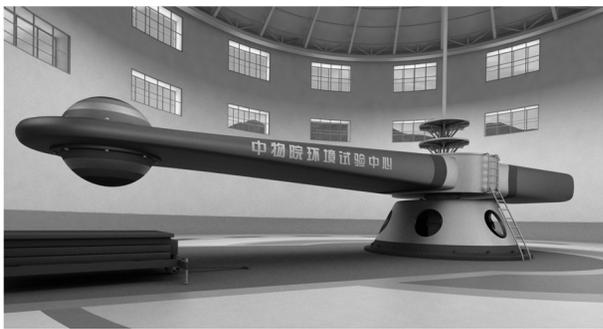


图1 一号离心机

Fig.1 NO.1 duty experiment centrifuge

中物院总体所于1997年攻克复合例行离心机核心技术,成功研制了用于加速度模拟试验、离心力-气动力和离心力-气动力-温度等复合试验的“二号离心机”<sup>[3]</sup>。2000年以来,中物院总体所承担了国内主要的大型例行试验离心机研制。2013年交付的DR707-1-CEN振动离心复合离心机如图2所示,该机

实现了导弹再入过载-振动环境模拟。目前,正在研制具有超长半径(达13 m)、超大容量(650g-t)的例行试验离心机。



图2 DR707-1-CEN复合离心机

Fig.2 DR707-1-CEN composite test centrifuge

我国的例行试验离心机是伴随着国防事业的日益强大而发展起来的,其功能从单一向复合演变,有效半径不断增加,容量不断增大,在国防事业中继续发挥重要的作用。

### 1.2 土工离心机

由于大型水利建设、交通工程的需要,我国于20世纪80年代开始发展离心模拟技术。长江科学院于1983年建成了当时国内容量最大的土工离心机,为我国离心机试验技术的发展和创新的创新奠定了重要的基础<sup>[4-5]</sup>。北京卫星环境工程研究所于1991年成功研制了容量为450g-t的土工离心机,其部分性能已达当时世界先进水平。中国直升机研究所于1992年研制成功NHRI-400g-t土工离心机<sup>[6]</sup>。香港科技大学于2002年建成了代表现代化发展水平的400g-t大型土工离心机,配备双向振动台、四维机械手、网络数据采集及处理功能。进入21世纪以来,中物院总体所抓住机遇,厚积薄发,先后承担了TLJ-200, TLJ-150, ZJU-400, TLJ-500等一系列不同规格土工离心机的研制,成为我国土工离心机研制的龙头,其大型土工离心机的研制能力代表我国在该领域的最高水平。

其中最值得称道的是交付同济大学的TLJ-150和交付成都理工大学的TLJ-500两台离心机。TLJ-150土工离心机是国内首台自主研制的具备缩比模型地震模拟试验和动态打桩、挖掘等施工过程模拟的多功能复合离心机。该机的研制成功填补了国内大型土工试验离心机(多功能、离心振动复合型)的空白<sup>[7]</sup>,其外形如图3所示<sup>[8]</sup>。TLJ-500如图4所示,是目前国内载荷容量最大的土工离心机,配置的机载动态施工过

程模拟机器人能够适应 150g 的离心环境,配置的缩比模型地震模拟台,与国际同类设备相比,其规模和性能指标更高。

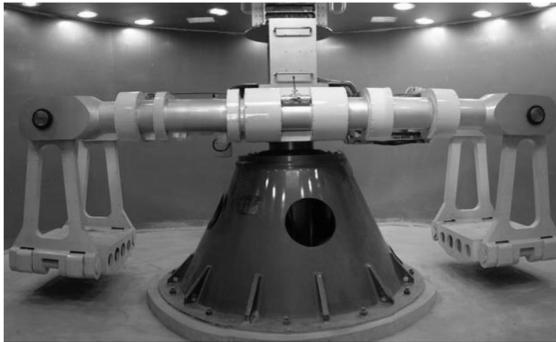


图3 TLJ-150土工离心机

Fig.3 TLJ-150 geotechnical centrifuge



图4 TLJ-500土工离心机

Fig.4 TLJ-500 geotechnical centrifuge

经过多年的发展,我国的土工离心机研制能力已达到国际先进水平。土工离心机的功能在不断完善和拓展,除具备传统功能外,配备振动台和机器人等专用装置后还可进行地震模拟分析、隧道挖掘、水位升降等试验研究,将继续在我国的重大的工程项目及基础建设领域继续发挥不可替代的作用。

### 1.3 载人离心机

载人离心机是开展飞行员选拔、训练以及防护研究的重要装备,是提升飞行员加速度耐受能力、减少飞行事故、提升飞行员战斗力的有效途径。我国与欧美等发达国家同时开始载人离心机的研制,原上海机电产品设计院于1965年研制了我国第一台载人离心机,北京卫星环境工程研究所在1985年研制了特大型人/物两用离心机。中国直升机设计研究所凭借其在轻质、高刚度臂架设计制造方面的优势<sup>[4]</sup>,在1998年研制了HYG08载人离心机,如图5所示,用于宇航员训

练。中物院总体所依托雄厚的综合实力和长期的离心机研制技术积累展开了载人离心机技术的开发,于2012成功研制用于新一代战机救生装备产品检测的“动态载荷模拟系统”,其性能已经达到高性能载人离心机的指标要求。目前在研的高性能载人离心机<sup>[9]</sup>如图6所示,具备提供持续三个自由度载荷以及飞行模拟功能,主要瞄准第三、四代战机飞行员训练,主要性能指标与世界最先进水平相当。



图5 HYG08 载人离心机

Fig.5 HYG08 human centrifuge

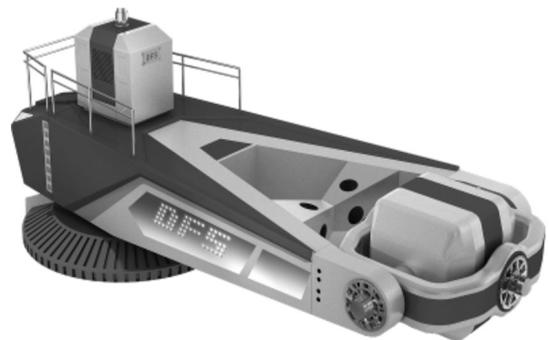


图6 DFS高性能载人离心机

Fig.6 DFS high-performance human centrifuge

随着我国新一代战机不断入役,为保证训练的针对性和保密性,军方迫切需要高性能载人离心机实现国产化,这给我国载人离心机带来了难得的发展机遇。新一代载人离心机集加速度载荷训练和飞行模拟为一体,性能稳定,控制精度高,正向着世界先进水平迈进。

### 1.4 精密离心机

精密离心机是进行加速度计离心试验的核心设备<sup>[10-11]</sup>,其通过提供高精度加速度作为输入量,标定惯性产品的输出性能。中物院总体所研制的加速度不

确定度为  $1.0 \times 10^{-5}$  的 JML-100J 高精度精密离心机如图 7 所示,最大加速度达到了 100g。近年来,国内开展了期望达到  $10^{-6}$  量级精密离心机的研制工作,如哈尔滨工业大学在研的 JML-01 精密离心机,加速度不确定度指标期望值为  $3 \times 10^{-6}$ ,加速度范围为 0.25g ~ 30g;中国航空工业总公司第 304 研究所在研的臂式精密离心机加速度不确定度指标期望值为  $2 \times 10^{-6}$ ,半径为 2.5 m,其加速度范围为 0.1g ~ 40g<sup>[12-13]</sup>。中物院总体所承担的国家重大科学仪器设备开发专项之一的“高精度惯性仪表校准检测装置研制及应用”项目,研制的离心机型号为 JML-100G,外形如图 8 所示。其加速度不确定度达  $1.4 \times 10^{-6}$ ,稳态线加速度达到 100g,填补了我国 1g ~ 100g 量程范围内加速度相对不确定度达到  $10^{-6}$  量级精密离心机的空白。

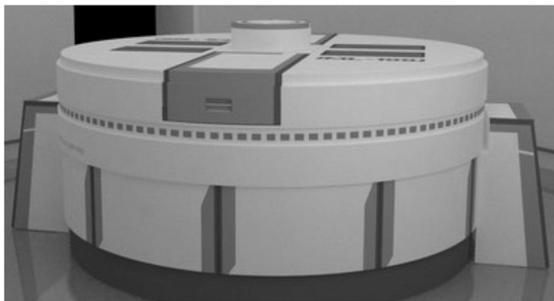


图 7 JML-100J 精密离心机  
Fig.7 JML-100J precision centrifuge

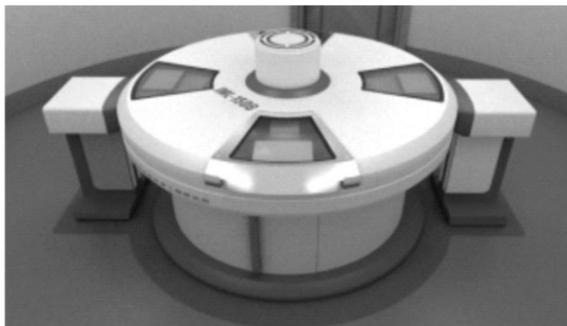


图 8 GJML-100G 精密离心机  
Fig.8 GJML-100G precision centrifuge

目前,我国精密离心机正朝着更精确的加速度不确定度水平、大负载、多轴等方向发展。

## 2 国外发展现状

科学实验用离心机的研制和应用水平在一定程度上体现了一个国家的综合实力,世界离心机强国主

要有俄罗斯(前苏联)、美国、法国、日本、英国等,而它们的离心机发展历史和现状又各有不同。

### 2.1 俄罗斯离心机

俄罗斯是最早利用土力学模型进行试验的国家之一,在土工离心机、例行离心机方面起步很早,而他们的精密离心机代表着世界最先进水平。

20 世纪 80 年代之前,俄罗斯就为基础建设、军事设施等建造了 20 多台不同结构的离心机。俄罗斯研制的 А з ИС-2 例行试验离心机,配备了电动-机械振动台,可进行静力、振动和爆炸试验。该离心机容量很大,其性能指标如下:有效半径为 5.5 m,最大加速度为 500g,最大容量为 1500g-t<sup>[2,14]</sup>。俄罗斯在 1984 年建造的 TsF-18 载人离心机如图 9 所示,该机转臂长 18 m,最大加速度为 30g,加速度变化率为 5 g/s,配备了 3 个座舱,可用作训练航天员、医学研究、控制降落等。俄罗斯目前建造了宇航员水中训练中心,这是世界上最先进的载人离心机之一,如图 10 所示。该机转臂达 18 m,最大加速度为 13g,主要用作宇航员过载适应性训练。



图 9 TsF-18 离心机<sup>[17]</sup>  
Fig.9 Tsf-18 centrifuge

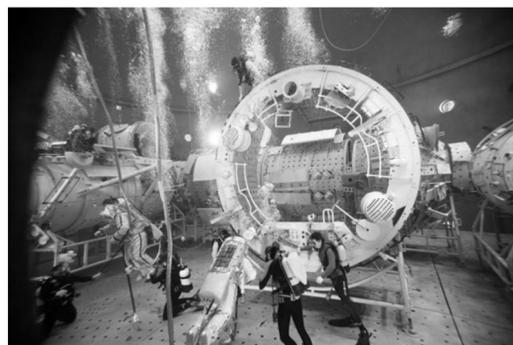


图 10 俄罗斯宇航员水中训练中心<sup>[18]</sup>  
Fig.10 Russian cosmonaut training center in water

俄罗斯的精密离心机研制起步也比较早,水平也

相当高。在前苏联时期,位于圣彼得堡的门捷列夫计量院和莫斯科转子联合体研制的精密离心机精度已经达到 $10^{-6}$ 水平。据相关资料,俄罗斯门捷列夫计量院研制了ДЦ-2和ДЦ-3型双轴精密离心机,其中ДЦ-3型离心机中央台产生 $0.8g \sim 50g$ 加速度,综合精度为 $(2 \sim 5) \times 10^{-6}$ ,边缘台产生 $0.8g \sim 25g$ 加速度,谐波加速度频率为 $0.5 \sim 30 \text{ Hz}$ <sup>[15-16]</sup>。

## 2.2 日本离心机

日本是较早开展土工模型试验的国家,通过引进吸收和仿制商业离心机,建造了不少土工离心机,其土工离心机上大多配置了车载地震模拟台,用以开展缩比模型地震模拟试验。

1984年日本港湾技术研究所建造了一台转臂长3.4 m,加速度达115g,容量为300g-t的离心机<sup>[19-22]</sup>。1997年日本土木研究所(PWRI)建造了一台具有长转臂、大加速度、且有振动台的离心机<sup>[23]</sup>。该机转臂长6.6 m,最大加速度为150g,容量为400g-t。目前日本拥有容量达700g-t的大型离心机<sup>[24]</sup>,如图11所示,该机转臂达7 m,最大加速度为100g。



图11 Obayashi土工离心机

Fig.11 Obayashi geotechnical centrifuge

## 2.3 法国离心机

法国科学家菲利普(E. Phillips)在世界上首先提出利用惯性力模拟重力,为离心机进行土工模型试验奠定了理论基础。在此后的一百多年时间里,法国从武器例行试验的离心机改装,不断系列化、标准化升级,逐步成为现代离心机大国。

为法国提供土工离心机的主要制造公司是Actidyn(艾科动力高科技有限公司),其为法国桥梁公路研究院(LCPC)研制了Acutronic680型土工离心机<sup>[2]</sup>,如图12所示。该机采用自平衡系统,前后带整流罩的吊篮。性能为参数如下:有效半径为5 m,最高加

速度为200g,载荷容量为200g-t。

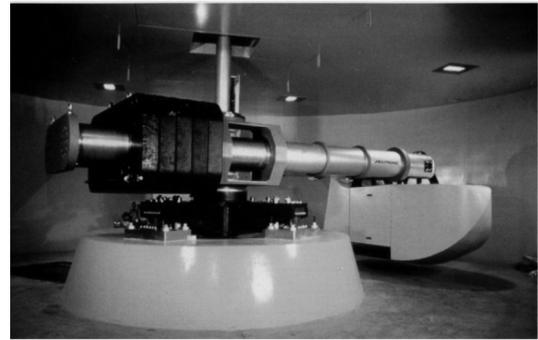


图12 Acutronic680土工离心机

Fig.12 Acutronic680 geotechnical centrifuge

Actidyn公司以680型离心机为基础,陆续开发出661,665,685等型号,成为世界范围内颇具影响力的土工离心机供货商。1995年,该公司为美国陆军工程师兵团水道试验站(WES)建造了容量达1144g-t的离心机,位于美国中部密西西比州Vicksburg<sup>[25]</sup>。如图13所示,该离心机机半径为7 m,在离心加速度143g下负载8 t。现在Actidyn离心机实现了标准化,主打产品为C60到C90的C系列<sup>[26]</sup>。



图13 WES土工离心机

Fig.13 WES geotechnical centrifuge

## 2.4 奥地利离心机

Actidyn公司为韩国研制的土工离心机KOCED如图14所示<sup>[27-28]</sup>。离心机半径为5 m,最大容量为240g-t。配有二维振动台和四维机器人,能够进行多种复合环境的土工模拟试验。

奥地利金属系统技术股份有限公司(Austria Metall System Technik GmbH,简称AMST)以研制载人离心机为主<sup>[29]</sup>。从2005年为中国研制载人离心机起,AMST先后为德国、俄罗斯、印度、新加坡、波兰等成功研制了7台HTC系列的载人离心机。图15为AMST



图14 KOCED 土工离心机  
Fig.14 KOCED geotechnical centrifuge



图16 Sandia 国家实验室离心机  
Fig.16 Sandia national laboratory centrifuge

2011年10月交付波兰的HTC-Ⅷ载人离心机。HTC-Ⅷ转臂采用桁架结构,能够大幅度降低系统的转动惯量,从而降低系统功耗,节约成本,但是由于桁架结构刚度较低,导致系统刚度低,结构响应迟缓,不利于飞行实时模拟。

Davis 联合建造(如图17所示)<sup>[30]</sup>,后于1986年经拆装安装到 UC Davis。该离心机原本是一台例行试验离心机,经过改造成为土工离心机,加速度最高达300g,模型箱中土料的最大质量可达1.4 t,从转轴到模型箱底部距离为9.1 m。



图15 HTC-Ⅷ载人离心机  
Fig.15 HTC-Ⅷ human centrifuge



图17 UC Davis 离心机及振动台  
Fig.17 UC centrifuge and table vibrator

## 2.5 美国离心机

在美国诞生了世界第一台土工离心机,之后在土工离心机领域,美国经历了从境外公司进口到自主开发的过程,现其研制能力与欧洲和日本相当。在武器、航空航天领域的例行试验离心机和载人离心机,以及精密离心机方面,美国无疑走在世界前列。

作为武器装备研制的传统强国,美国例行试验离心机的研制起步较早,数量多,涉及多家单位,如美国波音公司、美国 Sandia 国家实验室、美国国家航空航天局(NASA)、维勒实验室等。图16为美国 Sandia 国家实验室的例行试验离心机,该机有效半径为8.84 m,加速度可达100g,可进行离心、振动、冲击等多种复合试验。

美国加州大学 Davis 分校的离心机于1978年由美国国家航空航天局(NASA)与加州大学戴维斯分校 UC

维勒实验室(Wyle Laboratories)是美国著名的实验设备制造商<sup>[31]</sup>,不仅研制历史悠久,而且研制种类齐全,例行试验离心机上主要以标准化、模块化的设计为主,能够进行多种复合试验,如离心、振动、温度、气候等。20世纪90年代中期,进入训练模拟器领域<sup>[2]</sup>。如图18所示的维勒实验室载人离心机,用于F-16飞行员飞行模拟训练,其技术性能参数如下:半径为6.1 m,加速度范围为1~30g,加速度变化率为0.1~6 g/s。2005年,维勒实验室开始为韩国水里公社(KOWACO)建造一台600g-t的大型土工离心机,有效半径达8 m<sup>[32]</sup>。遗憾

的是该机在2007年调试期间发生转臂断裂,吊篮撞入机室混凝土护壁,幸好机室位于地下,避免了次生灾害,但仍造成了巨大的负面影响。



图18 Wyle载人离心机

Fig.18 Wyle human centrifuge

美国环境构建公司 (Environmental Tectonics Corporation, ETC) 是飞行人员训练设备领域的佼佼者,其运动模拟技术工程突出。其研制的 ATFS-400 离心机 (如图 19 所示) 是目前世界上最先进的高性能载人离心机,技术性能参数如下:旋转半径为 7.6 m,最大径向加速度为 12g,最大启动率为 10 g/s,舱内配有窗外  $120^{\circ} \times 70^{\circ}$  视景显示器<sup>[33]</sup>。美国 ETC 公司为日本航空自卫队研制了载人离心机,该离心机转臂为 7.62 m,最大加速度为 12g,加速度增长率为 6 g/s<sup>[2]</sup>。



图19 ATFS-400 载人离心机

Fig.19 ATFS-400 human centrifuge

美国麻省理工学院 (MIT) 仪表实验室早在 40 年前就开始了惯性仪表方面的研究工作,CGC<sup>[34]</sup> (Contrares-Goers Cooperation) 公司已为惯性仪表和系统的测试与鉴定提供了 500 多种测试设备,形成了一套完整的系列,能进行陀螺仪、加速度计和惯导系统的标定和测试。CGC 公司研制的带双轴转台的 444C, 445 及 450 型离心机 (三轴离心机) 加速度不确定度已达  $10^{-6}$  量级水平。20 世纪 60, 70 年代, Genisco 公司研制的 G460, G460S 双轴精密离心机在英、法、德等多国

得到广泛应用,其边缘台位置精度为 10", 最高转速达到  $1500(^{\circ})/s$ 。

## 2.6 其他国家

除以上国家外,还有些国家是不得不提的,如 20 世纪 70 年代引领世界离心机潮流的英国,离心机数量不多却独树一帜的荷兰。

英国是继俄罗斯后最早开展离心模拟试验的国家,主要由剑桥大学和曼彻斯特大学科技学院进行土工离心机研制,他们应用模型试验解决了不少工程问题,如模拟地震对沙土液化的研究、海洋石油平台的稳定分析等,促进了离心模型试验在世界上更广泛的应用与发展。剑桥大学先后研制了 MK I, MK II 及 CUDE 离心机。诺丁汉大学研制的土工离心机,加速度最大可达 150g,最大载荷达 500 kg (100g 条件下)<sup>[35]</sup>。

在载人离心机方面,英国也有所发展,英国空军先后建造了两台载人离心机,较先进的一台转臂达 7.62 m,最大加速度为 25g,加速度变化率为 15 g/s。该机具有动态飞行模拟能力,可用于飞行员的高 g 值训练<sup>[36]</sup>。

荷兰离心机数量并不多,但研制的土工离心机都有自身的特点,不仅载荷容量大,而且构造奇特,性能指标较为先进,值得深入探讨。Delft 土工研究所土工离心机<sup>[37-39]</sup>如图 20 所示,该机 1996 年投入运行,旋转臂长 6 m,容量达 900g-t。



图20 Delft 土工离心机

Fig.20 Delft geotechnical centrifuge

## 3 发展趋势

科学技术的发展离不开试验研究平台,装备能力的提升离不开试验检测平台,战斗力的提高依赖于训练手段的提高。基于能源安全、环境安全等因素,深海资源开发、地下污染长期防控、城市场地与建筑群整体防震等国家重大工程指引土工离心机功能向高、

精、尖方向发展,多功能、复合型超大型(1000g-t以上)土工离心机的研制将成为今后总的发展趋势。基于对军事安全等因素的考虑,武器突防的需要,复合环境模拟、多自由度、高动态、高精度的飞行环境模拟成为例行离心机的发展方向;基于武器精确打击的需要,精密离心机规模将由元件级向部件级试验发展。

### 3.1 海工离心机

伴随着陆地资源匮乏的危机,世界各国对海洋资源的开发利用日益增强。2003年国务院发布了全国海洋经济发展规划纲要<sup>[40]</sup>,提出了建设海洋强国的伟大目标。2011年国务院关于中国第十二个五年规划纲要<sup>[41]</sup>中明确指出要推进海洋经济的发展,提高海洋开发、控制、综合管理能力。国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要<sup>[42]</sup>进一步阐明要发展海洋油气、运输、渔业等产业,合理开发利用海洋资源,加强渔港建设,保护海岛、海岸带和海洋生态环境。无论是海洋开发,还是海上维权,都与海洋土木工程科学技术密切相关<sup>[43]</sup>。

通过研制物理模拟科学试验装置及相关测试技术,实现对浅海到深海环境条件下各种海工结构与海床基础相互作用系统动力行为的再现、模拟和评价,是当前最为有效的途径之一。海工离心机的研制,主要着眼于再现和研究海洋环境下各种海工结构与海床系统的多尺度、多过程物理力学行为,以“再现海流、海浪、海风、海底地震、深海环境等海洋荷载及其耦合作用,揭示其对海洋流体-海工结构-海床土体三者之间动力相互作用的影响规律和破损机理”为重大科学命题。

### 3.2 巨型土工离心机

离心力场中的加速度并不是一个常数,而是随转动半径的增大而增大,模型与原型之间的误差随离心机半径 $R$ 的增大而减小<sup>[44]</sup>,因而大转臂的巨型土工离心机在模拟试验时具有更高的精度。加之小容量的离心机无法模拟将来的大型工程,更催生了巨型土工离心机的发展。随着时代的发展,巨型土工离心机在300 m以上高坝安全性、千米级深地深海工程、百年跨度地下环境污染、平方公里尺度城市地震安全、千米尺度飞行器撞击及高能爆炸研究方面将大有用处。

目前巨型土工离心机还有以下难题亟待解决。

1) 离心机主机:高 $g$ 值下的主机结构、强度、安全问题,气动功率与温升问题,超大功率驱动与电机问题,气动噪声与转臂振动问题,真空及密封技术问题;

2) 专用实验设备:适应多学科研究试验的专用设备研发;

3) 测量设备:高 $g$ 值下如何获得数据,传感器、数据采集及远程实时传输问题<sup>[45]</sup>。

### 3.3 高保真飞行模拟器

目前载人离心机的一个主要用途是用于飞行员的动态模拟飞行训练,被世界各国空军广泛应用。事实证明,使用离心机进行模拟飞行训练是行之有效的方法。为进一步延伸飞行模拟器的功能,让其实用性进一步提高,甚至达到真实战机训练的效果,高保真无疑是飞行模拟器需要不断提升的主要方向之一。

高保真即让离心机无限逼近真实的模拟飞机环境,能提供准确的模拟飞行载荷,在模拟座舱内配置飞机操纵元件、视景等,让飞行员的感受与真实场景一致,提升飞行员的抗荷载能力,并能够从主动操作中提升实战能力。为模拟真实的飞机环境,将来的离心机动态飞行模拟功能将更加全面,不但能够进行驾驶模拟、抗荷载训练,还能模拟真实的空中格斗,从而进行更为复杂的战术、战法研究<sup>[46]</sup>。为实现如此复杂的功能,对离心机控制算法、显示、数值模拟等提出了更高的要求,同时还要求离心机有更高的动态能力。

### 3.4 复合环境试验离心机

复合环境试验主要是针对土工离心机和例行试验离心机,采用复合环境进行模拟试验可以得到更加准确的结果,目前离心机实现多种复合环境试验的相关技术正在不断被突破。

土工离心机需要集众多功能于一身,要能满足离心-振动-温度复合、离心-爆炸复合、离心-撞击复合、离心-气动复合,模拟降雨、冰冻、水位升降,配备机械手进行打桩、拔桩、隧道开挖等功能。随着航天航空及军工产品高性能、高可靠的发展趋势,要求例行试验离心机不但能进行稳态试验,还要能进行动、静态复合,多种力学环境下的综合试验,可满足离心-振动、离心-气动-温度等复合环境试验的要求。

### 3.5 高精密度离心机

惯性仪表作为惯性技术的核心部件,广泛应用于航空、航天、航海、军事领域,如何确保惯性仪表的精度至关重要。精密离心机作为实现惯性仪表精度标定的核心设备,其自身精度从根源上决定了惯性导航和惯性制导的精度<sup>[46-48]</sup>。因此,对于用于高精度惯性仪表测量标定的高精密度离心机研制,国内外都给予了

高度的关注和投入。在国外,美国和俄罗斯精密离心机加速度不确定度已经突破了 $10^{-6}$ 级。中物院总体所后来居上,研制完成的 $10^{-6}$ 量级精密离心机已经通过校准,并投入应用。

精密离心机除了提高加速度精度以外,从单轴到多轴、从元件级到部件级标定也是重要发展方向。在精密离心机领域,国内研制单位还有很大的发展空间。

## 4 结语

科学试验用离心机作为专业的基础试验设备,在土木工程、抗震救灾、能源开发、航空航天等领域有着广阔的应用前景。随着工业技术的发展,科学试验用离心机的研制技术日益成熟,无论是国内还是国外都涌现出更为专业的研制团队。需求带动发展,正是由于心无旁骛的专业团队与用户之间的紧密联系,才有科学试验用离心机今天的成就。展望未来,科学试验用离心机还有许多理论要提升,许多技术要突破,这注定是一个欣欣向荣的大舞台。

### 参考文献:

- [1] 冉光斌. 土工离心机及振动台发展综述[J]. 环境技术, 2007(3): 26—29.  
RAN Guang-bin. Summarization of Geotechnical Centrifuge and Table Vibrator's Development[J]. Environmental Technology Magazine, 2007(3): 26—29.
- [2] 贾普照. 稳态加速度模拟实验设备—离心机概论及设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
JIA Pu-zhao. Steady-state Acceleration Simulation Test Equipment—Centrifuge conspectus and Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [3] 邹光灿, 李国济, 林明. 200g-t 复合离心机研制[R]// 成都: 四川科学技术出版社, 1998.  
ZOU Guang-can, LI Guo-ji, LIN Ming. Design of 200g-t composite test centrifuge[R]// Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998.
- [4] 程永辉, 李青云, 饶锡保, 等. 长江科学院土工离心机的应用与发展[J]. 长江科学院院报, 2011, 10(28): 163—169.  
CHENG Yong-hui, LI Qing-yun, RAO Xi-bao, et al. Application and Development of Geotechnical Centrifuge in Yangtze River Scientific Research Institute[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 10(28): 163—169.
- [5] 王学东. 长江科学院大型离心机的研制[J]. 长江志季报, 2000(1): 13—14.  
WANG Xue-dong. Development of Large Geotechnical Centrifuge in Yangtze River Scientific Research Institute[J]. Journal of Yangtze River Quarterly Reports, 2000(1): 13—14.
- [6] DOU Y, JING P. Development of NHRI-400g-t Geotechnical Centrifuge[J]. Centrifuge, 1994, 94: 30—35.
- [7] 林明. 150g-t 土工离心机研制[C]// 土工测试技术实践与发展—第24届全国土工测试学术研讨会论文集. 南京: 黄河水利出版社, 2005.  
LIN Ming. Development of 150g-t Geotechnical Centrifuge [C]// Practice and Development of Geotechnical-test Technology—The 24st Chinese Academic Conference Corpus about Geotechnical-test Technology. Nanjing: The Yellow River Water Conservancy Water Conservancy Press, 2005.
- [8] <http://www.caep.ac.cn/kxyj/lxysxxk/kxzz/10330.shtml>[EB/OL]. 2012.
- [9] 唐贤平, 宋琼. 会当凌绝顶—中物院总体所科学试验用离心机研制技术发展综述[J]. 国防科技工业, 2015, (7): 58—60.  
TANG Xian-ping, SONG Qiong. Be One-up Extremely—Review of Development for Centrifuge of ISE.CAEP[J]. Journal of Technological Industry for National Defence, 2015, (7): 58—60.
- [10] 于治会. 加速度计的静态校准[J]. 宇航计策技术, 2000, 20(2): 42—44.  
YU Zhi-hui. Captive Demarcation of Accelerometer[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2000, 20(2): 42—44.
- [11] 熊磊, 何懿才, 龙祖洪, 等. 精密离心机不确定度分析与应用[J]. 航空计测试技术, 2003, 23(6): 36—37.  
XIONG Lei, HE Yi-cai, LONG Zu-hong, et al. Uncertainly Analysis and Application of Precise Centrifuge[J]. Aviation metrology & Measurement Technology, 2003, 23(6): 36—37.
- [12] 夏丹, 刘军考, 陈维山, 等. 基于灵敏度分析的精密离心机负载盘的优化设计[J]. 机械设计, 2006, 23(11): 7—10.  
XIA Dan, LIU Jun-kao, CHEN Wei-shan, et al. Optimization Design of Loading Disc of Precision Centrifuge Based on Sensitivity Analysis[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(11): 7—10.
- [13] 潘圣浩. 精密离心机卸荷系统的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
PAN Sheng-hao. Study and Design of Precision Centrifuge Unloading System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [14] 孙述祖. 土工离心机设计综述[J]. 水利水运科学研究, 1991(1): 111—113.  
SUN Shu-zu. Review of Design for Geotechnical Centrifuge [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1991(1): 111—113.
- [15] 刘健. 线加速度模拟转台—离心机动态半径测试的研究[D].

- 天津:天津大学,2007.
- LIU jian. Study on Test Method of Dynamic Radius of Linear Acceleration Analogue Revolving Table—Precision Centrifuge [D]. Tianjin:Tianjin University,2007.
- [16] 刘洪丰,王雷,任多立,等. 门捷列夫计量院双轴精密离心机[J]. 导航与控制,2003,2(2):73—76.
- LIU Hong-feng, WANG Lei, REN Duo-li, et al. Two-axis Precision Centrifuge in Mendeleev Institute For Metrology[J]. Journal of Navigation and Control,2003,2(2):73—76.
- [17] TsF.18Centrifuge[EB/OL].[2008]. <http://sa.qa.elro.com/media/info/equipment/tsr18>.
- [18] <http://junshi.xilu.com/2010/0305/news-349-69653.html>.
- [19] 寺師,昌明. 遠心力載荷装置の開発とその適用[R]. 港湾技術研究所報告,1985.
- SI Shi, CHANG Ming. Development and Application of Centrifugal Force Loading Device[R]. Harbor Technology Institute Report,1985.
- [20] TERASHI M. Development of PHRI Geotechnical Centrifuge and Application[R]. Report of the Port and Harbour Research Institute,1985.
- [21] 中国水利工程原型观测、室内测试仪器考察团. 日本高土石坝原位观测及室内仪器考察简报[J]. 水利水运工程学报,1982(2):121—122.
- The Observation Group of China for Water Conservancy Prototype and Indoor Test Instrument. High Earth Rockfill Dam in Situ Observation and Indoor Equipment Inspection Report[J]. Hydro-Science and Engineering,1982(2):121—122.
- [22] TERASHI M. Development of PHRI Geotechnical Centrifuge and its Application[R].PARI Report 024-03-03,1985.
- [23] Large-scale Geotechnical Dynamic Centrifuge[EB/OL]. [2009-02-01]. [http://www.pwri.o.jp/eng/outline/facility/b\\_b9.html](http://www.pwri.o.jp/eng/outline/facility/b_b9.html).
- [24] MATSUDA T, HIGUCHI S. Development of the Large Geotechnical Centrifuge and Shaking Table of Obayashi[C]// Physical Modelling in Geotechnics: ICPMG' 02. Lisse: A A Balkema Publishers,2002.
- [25] LEDBETTER R H, STEEDMAN R S, SCHOFIELD A N, et al. United-States-Army Engineering Centrifuge Design[C]// Rotterdam: Balkema, International Conference Centrifuge 94, 1994:63—68.
- [26] Actidyn[EB/OL]. 2015. <http://www.actidyn.com>.
- [27] KIM D, KIM N, CHOO Y, et al. A Newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2013,17(1):77—84.
- [28] KIM D S, CHO G C, KIM N R. Development of KOCED Geotechnical Centrifuge Facility at KAIST[C]// Physical Modeling in Geotechnics-6th ICPMG.AK Leiden: Taylor & Francis/Balkema,2006:147—150.
- [29] [Http://www.amst.co.at/AMST\[EB/OL\].](http://www.amst.co.at/AMST[EB/OL].) 2015.
- [30] KUTTER B L, LI X S, SLUIS W, et al. Performance and Instrumentation of the Large Centrifuge at Davis[C]// Proceedings International Conference Centrifuge 91, USA: Boulder/Colorado,1991,19—26.
- [31] Wyle Laboratories[EB/OL]. <http://www.wylelabs.com/about-wyle.html/>,2008.
- [32] HA I S, SEO M W, JUNG W S, et al. Development of a Large Scale Geotechnical Centrifuge in KOWACO[C]// Physical Modeling in Geotechnics-6th ICPMG, AK Leiden: Taylor & Francis/Balkema,2006,135—140.
- [33] [www.etcTacticaFlight.com\[EB/OL\].](http://www.etcTacticaFlight.com[EB/OL].) 2015.
- [34] 房振勇,吴广玉. 国内外惯导用中型精密离心机“鸟笼”的发展现状比较分析[J]. 中国惯性技术学报,2003,11(2):68—72.
- FANG Zhen-yong, WU Guang-yu. Comparative & Analysis on Development of "Birdcage" of Middle-sized Precision Centrifuge Used in Inertial Navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2003,11(2):68—72.
- [35] ELLIS E A, COX C, YU H S. A New Geotechnical Centrifuge at the University of Nottingham, UK[C]// Physical Modeling in Geotechnics-6th ICPMG. AK Leiden: Taylor & Francis/Balkema,2006,147—150.
- [36] 陆惠良. 载人离心机及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- LU Hui-liang. Human Centrifuge and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2004.
- [37] [Http://www.deltares.nl\[EB/OL\].](http://www.deltares.nl[EB/OL].) 2015.
- [38] NELISSEN H A M. The Delft Geotechnical Centrifuge[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge 91. USA: Boulder/Colorado,1991:35—42.
- [39] ALLERSMA H G B. The University of Delft Geotechnical Centrifuge[C]// Proc Centrifuge 92. 1992,47—52.
- [40] 中华人民共和国国务院. 全国海洋经济发展规划纲要[Z]. 2003.
- The State Council of the People's Republic of China. Plan for the National Marine Economy Development[Z]. 2003.
- [41] 国家发展与改革委员会. 中国第十二个五年规划纲要[Z]. 2011.
- National Development and Reform Commission. The Twelfth Five-year Plan of the People's Republic of China[Z]. 2011.
- [42] 中华人民共和国国务院,国家发展与改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[Z]. 2011.
- The State Council of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission. The Twelfth Five-year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China[Z]. 2011.

- Shaking Table System for Geotechnical Centrifuge[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2005, 36(5): 19—21.
- [9] 牛宝良,王珏. 离心机上的垂直振动台时域建模与仿真[J]. 长江科学院院报, 2012(4): 75—76.  
NIU Bao-liang, WANG Jue. Time Domain Modeling and Simulation with Vertical Vibration Hydraulic Shaker on Centrifuge [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012(4): 75—76.
- [10] 王珏,牛宝良,胡绍全. 离心场中二维地震模拟振动台建模与仿真[J]. 机床与液压, 2008(10): 144—145.  
WANG Jue, NIU Bao-liang, HU Shao-quan. The Modeling and Simulation of a 2D Earthquake Simulation Shaker in Centrifuge[J]. Journal of Machine Tool and Hydraulics, 2008(10): 144—145.
- [11] 濮家骝. 土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 92—94  
PU Jia-liu. The Development of Geotechnical Centrifuge Model Test and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 92—94.
- [12] RODGERS J D, CERICOLA F, DOGGETT J W, et al. Vibration: Combined Vibration and Centrifuge Testing[C]// Shock and Vibration Symposium. VA: Virginia Beach, 1989.
- [13] 孙锐,袁晓铭,王永志. NEES系统中振动离心机最新进展及国内振动离心机发展设想[J]. 世界地震工程, 2010(1): 31—39.  
SUN Rui, YUAN Xiao-ming, WANG Yong-zhi. The Latest Developments in the Vibration Centrifuge and the Development of the Domestic NEES System[J]. World Earthquake Engineering, 2010(1): 31—39.
- [14] ZHANG Xiang-wu. Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering[C]// The 9th Academic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing, 2003: 228—233.
- [15] 严侠,牛宝良,米晓兵. 液压振动台试验系统中的控制系统集成设计[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 274—275.  
YAN Xia, NIU Bao-liang, MI Xiao-bing. Integrated Design of Control System of Hydraulic Vibration Table[J]. Equipment Environment Engineering, 2008, 5(6): 274—275.

(上接第10页)

- [43] 国家自然科学基金委. 国家自然科学基金委—十二五发展规划[Z]. 2011.  
Natural Science Foundation of China. Natural Science Foundation of China—the 12th Five-year Plan[Z]. 2011.
- [44] 白冰,周健. 土工离心模型试验技术的一些进展[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(1): 36—39.  
BAI Bing, ZHOU Jian. Some advances in Geotechnical Centrifuge model test technology[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2001, 25(1): 36—39.
- [45] 林明. 国内土工离心机及专用试验装置研制的新进展[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 80—84.  
LIN Ming. Progress of Geotechnical Centrifuge and Specialized Test Device in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 80—84.
- [46] 陈岩. 精密离心机误差分析与补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
CHEN Yan. Study on Error Analysis and Methods of Compensating for the Precision Centrifuge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [47] 卢永刚,黎启胜,张映梅,等. 高精度精密离心机的发展及关键技术分析[C]// 中国工程物理研究院机械工程2011年学术年会论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院机械工程学会, 2011, 144—147.  
LU Yong-gang, LI Qi-sheng, ZHANG Yin-mei, et al. Development and Key-technology Analysis of High Precision Centrifuge[C]// The 2011 Academic Conference Corpus of Mechanical Engineering of China Academy of Engineering Physics. Mianyang: Mechanical Engineering Society of China Academy of Engineering Physics, 2011, 144—147.
- [48] 王珏,宋琼,牛宝良. 高动态离心机系统建模与仿真[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 285—291.  
WANG Jue, SONG Qiong, NIU Bao-liang. Modeling and Simulation of High Dynamic Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 285—291.