土工离心机多轴机器人系统设计综述

洪建忠, 冉光斌, 余小勇, 扬永生, 刘小刚, 陈磊, 刘仕钊

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621000)

摘要:详细地介绍了土工离心机不停机状态下进行试验模拟的重要设备——离心机机器人系统。 在总结国内外同类设备的基础上,重点针对近年来中国工程物理研究院总体工程所研制的土工离心 机多轴机器人系统进行分析。对该类设备结构设计、电气控制系统设计的关键技术问题和难点进行 了介绍。目前中国工程物理研究院总体工程研究所研制的土工离心机多轴机器人最大加载能力可 以达到1扭矩±10 N·m,x,y,z方向加载力分别为±2 500,±2 500,±18 000 N,且具备循环加载能 力。随着技术的发展,土工离心机机器人系统将在土工离心模型试验过程中发挥更加重要的作用。 关键词:土工离心机;多轴机器人;模型试验 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.05.005 中图分类号:TJ05; V416 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2015)05-0034-06

Design of Multi-axis Robotic Manipulator on Geotechnical Centrifuge

HONG Jian-zhong, RAN Guang-bin, YU Xiao-yong, YANG Yong-sheng, LIU Xiao-gang, CHEN Lei, LIU Shi-zhao (Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: This paper detailedly introduced the multi–axis robot manipulator of geotechnical centrifuge – one of the most important facilities for in–flight centrifuge test. Based on the summary of similar facility in the world, the paper focused on the multi–axis robot manipulator manufactured by the Institute of Systems Engineering. The paper introduced the key technical issues and difficulties in the design of the structure and the electrical control system. The maximum load capacities of the robot can reach up to $\pm 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ torque, and $\pm 2500 \text{ N}$, $\pm 2500 \text{ N}$, $\pm 18000 \text{ N}$ forces in the *x*, *y*, *z* directions. With the development of multi–axis robot manipulator, the multi–axis robotic manipulator will play a more important role in geotechnical centrifuge tests.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; multi-axis robotic manipulator; model test

随着土工离心模拟试验技术的发展,在离心机不 停机状态下对土工模型连续进行挖掘、加载等多个动 作,可以逼真地模拟实际的施工过程,从而为离心机 上缩比模型研究提供有效的技术手段。

土工离心机机器人系统是在离心机不停机状态 下进行多种试验模拟的有效手段,一般包括多轴机器

作者简介:洪建忠(1968—),男,四川西昌人,工程硕士,高级工程师,主要从事离心机及非标设备研发。

Biography: Jianzhonghong (1968—), Male, from Xichang, Sichuan, Engineering master, Senior engineer, Research focus: centrifuge and nonstandard facility design.

收稿日期: 2015-07-26; 修订日期: 2015-08-10

Received: 2015-07-26; Revised: 2015-08-10

人系统、盾构模拟机器人系统^{II}、抛填模拟机器人系统 等。其中盾构模拟机器人主要用于在不停机状态下 模拟地下空间盾构机挖掘过程,抛填机器人则用于模 拟筑坝、抛填过程,而使用最多的离心机多轴机器人 系统是安装在离心机吊篮内模型箱上的通用平台。 在计算机控制下通过预先设定不同的程序,可以实现 更换不同的工具,工具头在*x*,*y*,*z*三个坐标方向移动 和绕*z*轴转动,从而实现不停机状态下的挖掘、加载等 动作等。文中重点介绍离心机多轴机器人系统。

1 国内外的土工离心机多轴机器人系统

1996年,法国道桥试验中心(LCPC)成功研制了 世界上第一台离心机四轴机器人系统,如图1所示。 随后美国RPI(Rensselaer Polytecnic Institute)土工离心 研究中心也装备了类似的土工离心机机器人系统,如 图2所示。这些机器人在x,y方向的加载能力一般 为±250~±1000N,z向加载能力为±3000~±5000 N,绕z轴360°转动,可以提供±5N·m的扭矩。日本 交通厅土木研究所也自行研制了类似的机器人系统, 如图3所示。



图 1 法国道桥试验中心(L.C.P.C)四轴机器人 Fig.1 Four-axis robotic manipulator from L.C.P.C France



图 2 美国 RPI 离心机机器人 Fig.2 Multi-axis robotic manipulator from RPI



图 3 日本土工离心机多轴机器人 Fig.3 Multi-axis robotic manipulator from Japan

香港科技大学从2000年开始在400g-t土工离心 机上研制并装备了多轴机器人系统^[2],如图4所示。该 机器人不仅可以携带多个工具头工作,而且在各个方 向的加载能力有了进一步的提高,控制功能更加完 善,图形化的人机界面友好,可以完成更大、更复杂的 土工模型试验^[3]。



a 实物照片



图4 香港科技大学四轴机器人系统及其人机界面(GUI) Fig.4 Multi-axis robotic manipulator and GUI from HKUST

中国工程物理研究院总体工程研究所近年来为国

内多家单位研制了技术指标先进的土工离心机多轴机 器人系统。系统x,y方向加载能力最大达到±2500N, z向加载能力最大可达到±18000N,绕z轴加载扭矩 达到10N·m,携带多个可更换工具头,提供多路电、气 接口,可以在不停机状态下完成较为复杂的土工试验 任务,功能指标处于国际先进水平,如图5所示。



图 5 中物院总体所研制的技术指标先进的多轴机器人系统 Fig.5 Multi-axis robotic manipulator from Institute of Systems Engineering CAEP

另外中物院总体工程研究所还为成都理工大学 和同济大学研制了液压驱动的三轴机器人及坑洞挖 掘装置,如图6所示。由于该机器人采用液压驱动,可



图6 液压驱动的三轴机器人系统

Fig.6 Multi-axis robotic manipulator power driven by hydraulic pressure

以在更高的离心加速度场中工作,目前液压驱动多轴机器人系统最高可以在150g下工作。

2 土工离心机多轴机器人设计的关键 技术及难点

由于土工离心机多轴机器人系统在高加速度场 中工作⁴⁴,因此对机器人结构设计及控制系统都提出 了较高的要求,特别是工具头更换需要较高的定位精 度,如变形较大或控制精度不够,则易导致抓取工具 失败,进一步影响机器人的工作,甚至造成试验失败、 设备损坏事故等。下面对土工离心机多轴机器人设 计的关键技术及难点进行简要介绍。

2.1 直线运动机构及驱动系统

土工离心机多轴机器人沿坐标向直线运动,一般 采用直线导轨导向和承受移动支架的过载,直线导轨 外形如图7所示。由于直线导轨具有承载能力强、刚 性好、抗倾覆力矩大、摩擦小等特点,适合作为离心场 下机器人的导向、承载轨道。



图 7 直线运动导轨 Fig.7 Linear driving mechanism

机器人支架沿直线导轨的运动一般采用液压驱动和电机驱动两种方式。液压驱动方式主要用于高过载条件下工作的机器人(一般离心加速度大于100g)。电机驱动定位准确,有利于实现更换工具,是目前高精度离心机机器人系统较常采用的方式。其中电机驱动又包含以下几种方式:直线电机直接驱动;交流永磁电机驱动齿轮齿条机构产生直线运动;交流永磁电机直接驱动高精度滚珠丝杠-螺母机构产生直线运动;交流永磁电机构产生直线运动。

其中直线电机直接驱动方式具有结构简单,内置 光栅位移传感器定位精度高等优点,但直线电机驱动 力较小,价格较贵,目前使用不多。 交流永磁电机驱动齿轮齿条机构产生直线运动,结构简单,但定位精度不够高,香港科技大学土工离心机机器人的x方向采用了这种驱动方式⁶(如图8所示)。







采用交流永磁电机驱动高精度滚珠丝杠-螺母机 构产生直线运动,可以沿坐标方向产生更大的推力, 有利于土工模型在离心试验中模拟各种挖掘、加载等 过程。同时由于采用外置光栅(或磁栅)定位,可以补 偿由于加速度过载造成支架变形对定位精度的影响, 可以更好地保证定位精度。目前土工离心机机器人 系统多采用这种驱动方式,如法国LCPC的机器人系 统(如图7所示),香港科技大学机器人的y方向也采 用了这种驱动方式,中物院总体工程研究所近年来设 计的离心机机器人也大量采用这种驱动方式(如图9 所示)。

电机直接驱动高精度滚珠-丝杠机构,随着离心加速度的增加,滚珠-丝杠自身变形增大,会导致驱动阻力增大,甚至出现卡滞等情况。采用电机通过齿形带驱动高精度滚珠丝杠-螺母的方式,则可以较好地避免卡滞现象的出现,美国RPI土工离心机机器人就采用了类似的结构设计。



图 9 土工离心机机器人采用电机驱动高精度滚珠-丝杠 Fig.9 Multi-axis robotic manipulator driven by ball screw

2.2 快换工具头及z向加载支架

快换工具头是土工离心机多轴机器人实现离心 机不停机状态下更换工具的关键部件,包括一个主控 盘及多个工具盘,如图10所示。一般采用气动或液压 驱动,经过精心设计,其抓紧力及力矩可以保证专用 工具(如圆锥贯入仪等)在离心力作用下不会脱出。 同时快换工具头还可以提供多通道电信号接口及气 路接口,供试验使用及工具头测试信号输出。



图 10 土工离心机机器人快换工具头 Fig.10 Working tool adopter

z向加载支架是实现z向加载的关键部件,一般采 用电机驱动滚柱丝杠加载,同时为保证离心力作用下 加载头自锁,z向电机需配备内置制动器。z向加载力 传感器信号通过工具头的电信号通道输出。

2.3 机器人控制系统及人机交互界面

多轴机器人控制系统由主控计算机、多轴控制器

及接口、控制软件、位置反馈元件等构成,其中主控计 算机位于地面控制间,通过以太网与多轴控制器通 信,各轴电机驱动器位于离心机转臂靠近转轴部位。 这样可以承受较小的离心加速度过载,保证离心机运 转时正常驱动位于离心机吊篮内的多轴机器人系统。

多轴控制器及电机驱动器采用与机床数控加工 中心同样的控制方式,可以实现各轴电机的精确定位 及多轴联动状态插补运算等功能。为消除离心加速 度造成机器人构件变形和正反向运转间隙对定位精 度的影响,除采用电机自带编码器作为位置反馈元件 外,还增加磁栅尺作为位置反馈器件,构成双闭环位 置控制系统,实现机器人的准确定位。

考虑到示教功能以及调试方便,多轴机器人除采 用计算机控制外,还具有手动控制功能。同时机器人 具备图形化的人机交互界面GUI(如图11所示),可以 方便地输入规定的运行轨迹,在地面试运行确认无误 后,再上离心机进行试验。多轴机器人控制系统组成 如图12所示。



图 11 多轴机器人图形化的人机交互界面 Fig.11 GUI of multi-axis robotic manipulator



图 12 多轴机器人控制系统组成 Fig.12 Control system of multi-axis robotic manipulator

3 其他类型的土工离心机机器人系统

如上所述,随着土木工程问题研究的深入¹⁷,除土 工离心机多轴机器人系统外,还开发出了多种土工离 心机机器人系统,如盾构模拟机器人系统、抛填模拟 机器人系统等¹⁸,分别简要介绍如下。

3.1 土工离心机盾构模拟机器人系统

离心机盾构模拟机器人如图 13 所示(日本 Toshi Nomoto, Shinichiro Imamura 1999),模型盾构由三层管 子组成:最外面是一层刚性护筒,直径最大;中间是一 层铝合金管,用来模拟隧道衬砌,直径次之;最里面一 层是刚性盾构排土管,直径最小。离心机上盾构模拟 的掘进过程可通过如下方法实现:首先将上述三层管 子组成的模型盾构准备好,待离心加速度达到一定值 后,盾构向土箱内推进;当推进至预定位置处机器停 止,此时将最外层的护筒向后拔出。由于护筒与中间 的铝合金管之间存在间隙即盾尾间隙,土体就会向铝 合金管移动,为了避免盾尾间隙被土体填弃导致地层 损失引起的地表沉降,须及时向盾尾间隙内注入浆 液,试验过程中通过激光位移传感器检测土体沉降等 参数。

3.2 土工离心机抛填模拟机器人系统

采用液压缸驱动抛填机器人系统,装料斗及其开 合控制装置组成装料斗系统,安装在抛填主架上,其 作为一个整体可以在抛填主架上来回移动,使用位置



图 13 土工离心机盾构模拟机器人系统 Fig.13 Miniature of shield tunneling robotic manipulator

传感器以精确调节抛填的具体位置。装料斗系统的 位置改变是由位置控制液压缸驱动,使其沿着滑动导 轨移动来实现的,位置控制液压缸为双出杆双作用形 式。活塞杆固定,缸体与装料斗系统固装在一起。

4 结语

随着土工离心模拟试验要求的不断提高,土工离 心机机器人系统也不断向前发展,新的多功能模拟系 统层出不穷,如降雨模拟系统、模型动态加载系统等, 机器人系统承受的加速度值也越来越高。这些都为 土工离心机机器人的设计提出了更高的要求,土工离 心机机器人系统的进步也为土工试验模拟能力的提 高打下了坚实的基础。

参考文献:

- NOMOTO T, IMAURA S, HAGIWARA T, et al. Shield Tunnel Consruction In Centrifuge[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4):289—300.
- [2] NG C W W, VAN LAAK P A, TANG W H, et al. The Hong Kong Geotechnical Centrifuge and Its Unique Capabilities[J].

Sino-Geotechnics, 2001, 83:5-12.

- [3] DERKS F, MERLIOT E, GARNIER J, et al. On-board Remote-controlled Centrifuge Robot[C]// Proc Centrifuge98.
 1998:97-102.
- [4] KIM D S, CHO G C, KIM N R. Development of KOCED Geotechnical Centrifuge Facility at KAIST[C]// Physical Modeling in Geotechnics.2006:147—157
- [5] SHEN C K, LI X S, NG C W W, et al. Development of a Geotechnical Centrifuge in Hong Kong[C]// Proc Centrifuge 98.1998:13—18.
- [6] SCHOFIELD A N. Cambridge Geotechnical Centrifuge Operation[J]. G é otechnique, 1980, 20(3):227–268.
- HA I S, SEO M W, JUNG W S, et al. Development of a Large Scale Geotechnical Centrifuge in KoWACo[C]// Physical Modelling in Geotechnics—6th ICPMG06. Hongkong, 2006: 135—139.
- [8] 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 Modern Test Technologe[J]. Dam Observation and Geotechnical Test,2001,25(1):36—39
- [9] 李景林,王剑平,徐光明,等. 离心模型试验模拟机坑开挖的一种新方法[J]. 水利水运工程学报,2000,4(4):69—71.
 LI Jing-lin, WANG Jian-ping, XU Guang-ming, et al. A New Method for Simulation of Excavation in Centrifugal Model Test
 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2000,4(4):69—71
- [10] 朱维新. 用离心模型研究土石坝心墙裂缝[J]. 岩土工程学报,1994,16(6):82—95.

ZHU Wei-xin. Application of Centrifuge to Model Craking of Earth-rockfill Dam Core[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 16(6):82—95.