

土工离心机研制概述

赵玉虎, 罗昭宇, 林明

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 简要介绍了土工离心机发展状况, 结合TLJ-500型土工离心机设计情况, 重点就土工离心机研制及设计需关注的问题进行讨论。比较了土工离心机的总体布局和三种不同主机结构方式的优缺点, 就离心机最大加速度、有效半径、容量等土工离心机设备研制的相关指标确定进行了讨论。详细描述了土工离心机主传动系统, 转动系统, 油、水、气旋转接头系统, 控制系统, 测试系统等系统设计情况。针对离心机消耗功率、主机室内温升、实验室噪音控制等问题, 对实验室建设提出几点建议。

关键词: 土工离心机; 结构设计; 电气设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.003

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0019-09

Overview of Development of Geotechnical Centrifuge

ZHAO Yu-hu, LUO Zhao-yu, LIN Ming

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

ABSTRACT: The development of geotechnical centrifuge was briefly introduced. Combining with the design of TLJ-500 geotechnical centrifuge, the key issues related to geotechnical centrifuge design that needed to pay attention to were discussed. Comparisons of general layout of geotechnical centrifuge and the advantages and disadvantages of three different modes of the host structure were made. The maximum acceleration, the effective radius, capacity and other relevant indicators were discussed. The main drive system, the rotation system, the swivel system, the control system, the test system and so on were described in detail. Some suggestions on laboratory construction were proposed focusing on aspects of the consumed power of the centrifuge, the temperature variation of the machine hall and the demand for controlling the noise in the laboratory.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; structure design; design of electrical control system

土工离心机是土力学研究中的重要设备, 其试验结果可用来验证数值分析计算方法与计算结果, 是重现土工原形物理过程的一种有效方法^[1]。

1869年法国人 E. Phillips 首次提出利用离心机做

模型试验的设想, 1931年美国哥伦比亚大学的 Philip Bucky 将此技术应用于煤矿坑顶稳定性的模型试验中, 因所用的离心机半径过小, 难以定量观测模型变化, 也就没有继续进行下去^[2]。苏联于1974年建成了

收稿日期: 2015-07-25; 修订日期: 2015-08-28

Received: 2015-07-25; Revised: 2015-08-28

作者简介: 赵玉虎(1964—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 主要研究方向为非标设备电气设计。

Biography: ZHAO Yu-hu(1964—), Male, from Xi'an, Shaanxi, Senior engineer, Research focus: electrical design of non-standard equipment.

半径为 5.5 m, 容量达到 1500g-t 的离心机^[3]。因其结构形式单一, 测量设备简单, 限制了它在岩土工程研究领域更大的发展。

20 世纪 60 年代后期, 英国先后在 Schofield 等的领导下建立了近 10 台离心机^[4], 之后世界上许多国家相继建立了不同规模的岩土离心机。20 世纪 80 年代以来, 土工离心模型试验在设备的数量、容量以及技术和应用领域都有了极迅速的发展, 成为岩土力学新的学科前沿和焦点^[5]。

在中国, 虽然早在 20 世纪 50 年代就曾考虑将离心模拟应用到结构工程方面的问题中, 但土工离心机的应用直到 1982 年南京水利科学研究院利用小型离心机和 1983 年由长江科学院研制成我国第一台大型离心机, 才开始了我国土工离心机的历史。中国工程物理研究院总体工程研究所利用 40 多年应用和研制离心机的经验, 先后完成了精度最高, 容量最大, 具有温度、振动、机械手等复合功能最强的离心机产品研发。离心机产品涉及航天、航空、兵器、电子、水利、电力、高校等领域, 离心机研制技术达到国内领先水平。根据不同用户研究需要配置许多有各自特点的系统, 如动、静态数据采集系统, 动态模拟试验中的打、拔桩及坑、洞开挖机械人系统, 模拟地震波形的振动系统等, 进一步拓宽了试验研究的范围^[6]。

文中简要介绍了土工离心机发展状况, 结合 TLJ-500 型土工离心机设计情况, 重点就土工离心机研制及设计需关注的问题进行讨论。

1 土工离心机

1.1 组成

土工离心机由主机、电气控制、测试系统及辅助系统等部分构成, 如图 1 所示。其中主机部分由转臂、吊篮、模型箱、平衡配重、电机、减速箱、传动支撑、主轴等组成^[7-8], 电气控制部分由计算机、控制柜、驱动装置等组成。按试验设定的运行程序, 由电机通过减速箱驱动转臂在密闭机室内做高速旋转, 根据运动学原理, 当转臂以角速度为 ω 绕主轴旋转时, 旋转半径为 R 的模型箱处所产生的向心加速度为 $a=R\omega^2$ 。若加速度为 2500 m/s^2 , 则放置在模型箱内的按原形物进行缩比 250 倍的模拟试件, 其体积与质量都将被放大约 250 倍。实验过程中, 模拟试件的应力、应变、时间等许多参数将发生变化, 这种变化与地面原形物的变化以某种相似规律建立关系, 土工离心模型试验, 就是利用

已验证的相似原理代替地面物理原形进行物理性态研究和探索性研究。

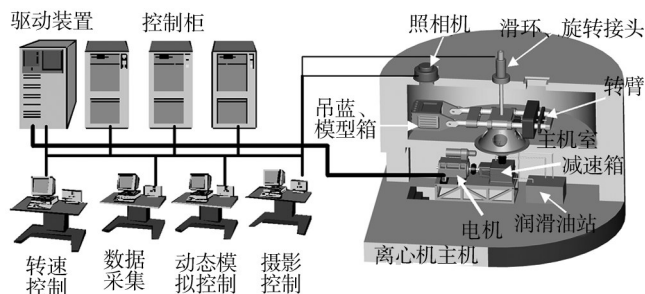


图1 土工离心机

Fig.1 Geotechnical centrifuge

测试系统及辅助系统是岩土离心机中非常重要的组成部分, 能提供多种离心模型试验研究所需要的功能, 是整机综合性能指标先进性的重要体现。一般由动静态测量系统、高速摄影系统、动力源及其他配套系统组成。

1.2 主机布局

离心机主机可采用三层布局和两层布局两种方式。两层布局方式如图 2 所示, 即中层和顶层, 中层挖电机坑, 用于安装电机、减速器等。两层布局的优点是离心机结构更加紧凑, 节约土建费用, 同时由于离心机基础直接安装在地面上, 振动台的震动不会对机室地板造成影响。图 3 为 Colorado 大学 400g-t 土工离心机的两层布局方式。

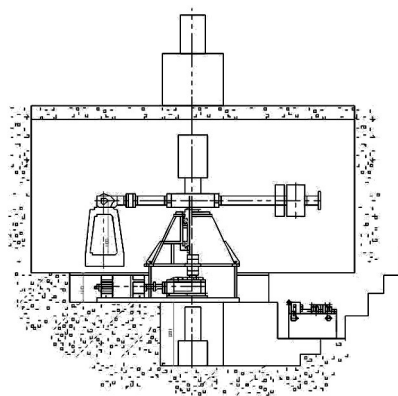


图2 离心机主机两层布局方式

Fig.2 The two-layer layout of centrifuge host

成都理工大学土工离心机采用如图 4 所示的三层布局结构形式^[9]。

底层在离心机室地面以下, 主要用于安装离心机传动系统中的电机、减速器、稀油润滑站, 以及油、水、

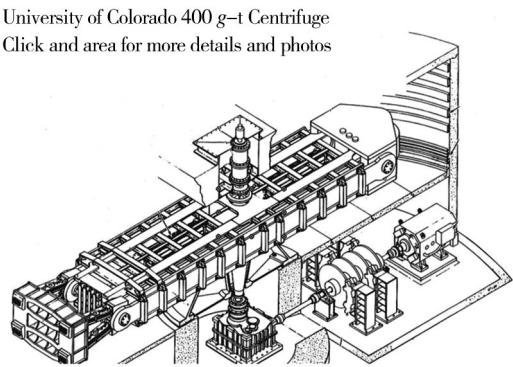


图3 Colorado大学400g-t土工离心机的两层布局方式
Fig.3 The two-layer layout of 400g-t geotechnical centrifuge in Colorado University

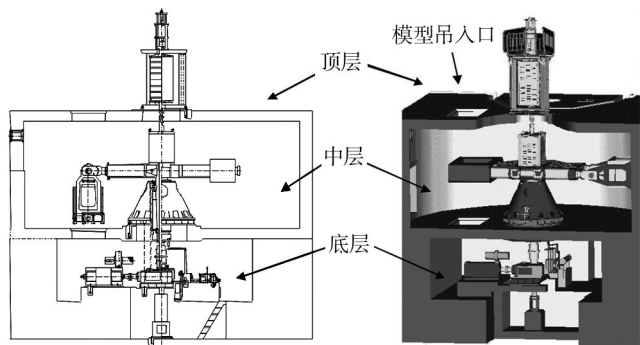


图4 主机总体布局示意
Fig.4 Overall layout

气旋转接头等系统。

中层,也就是离心机室,主要用于安装离心机转动系统(包括转臂、配重系统、吊斗等)、传动支撑系统部分(包括主轴系和机座等)和下仪器舱等。该层是离心机试验模型安装和转臂配平衡等工作开展的主要工作场所。

顶层在离心机室顶面以上,主要用于安装上仪器舱、集流环系统等。

这种布局是国内外大型离心机普遍采用的布局方式。其特点是将离心机的转动系统部件封闭在一个相对独立的密闭空间,通过合理的机室设计可以有效地减小离心机运行的气动功率,控制离心机机室的温度和噪声,并起到相应的安全防护作用。另外,这种布局,有利于离心机不同系统部件的安装、维护,减小相互之间的干扰和影响。

1.3 主机结构

土工离心机主机结构一般有三种方式。

1.3.1 双吊斗、对称臂结构

双吊斗、对称臂结构如图5所示,该布局具有大臂完全对称,配平衡结构简单的优点,可同时对两个模型进行试验,节约试验周期和时间。其缺点是转臂较重、转动惯量大、迎风面大等,惯性功率和风阻功率都较大,能耗较高。另外使用两个吊斗,制造成本增高。四川大学25g-t土工离心机采用了该结构方式。

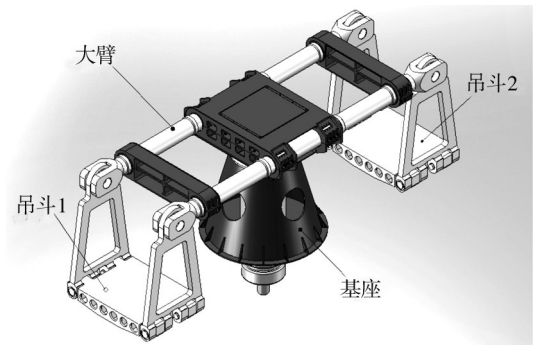


图5 离心机转臂双吊斗、对称臂结构
Fig.5 The centrifuge arm bucket and symmetrical double arm structure

1.3.2 双吊斗、不对称臂结构

该结构方案中只有一个工作吊斗,另外一个吊斗只用于对离心机大臂进行配平衡,因此可以将配平衡吊斗设计成良好的气动特性,从而减小风阻功率(如图6所示)。同时由于转臂不对称,减小了转臂转动惯量,有利于减小惯性功率。如北京水利科学研究院的450g-t土工离心机和西南交通大学100g-t土工离心机就采用了该结构方式(如图7所示)。

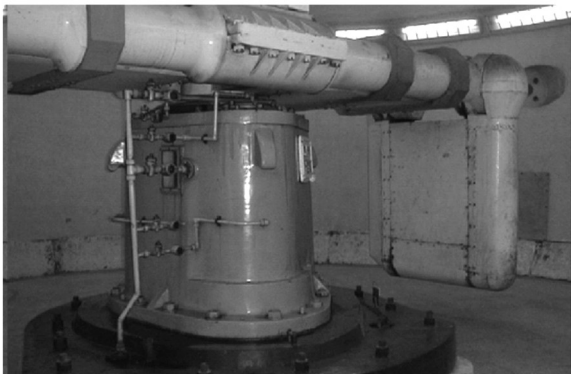


图6 IWHR450g-t土工离心机转臂结构
Fig.6 The arm structure of IWHR450g-t geotechnical centrifuge in Southwest Jiaotong University

1.3.3 单吊斗、不对称臂结构

该结构方案只有一个吊斗用于安装模型箱、机械



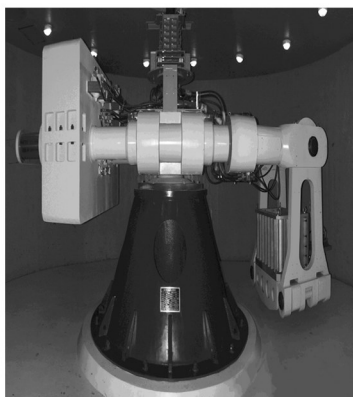
图7 西南交通大学 100g-t 土工离心机转臂结构

Fig.7 The arm structure of 100g-t geotechnical

手或离心机激振系统,大臂采用可移动的配重块或增加配重块进行配平衡,具有结构紧凑、功能齐全、安全可靠的优点,如法国 L.C.P.C 的 5.5 m 臂长土工离心机即采用了该结构方式(如图 8a 所示)。同济大学的 150g-t 土工离心机也采用了该结构方式(如图 8b 所示)。



a 法国 L.C.P.C



b 同济大学 150g-t 离心机



c 成都理工大学 500g-t 离心机

图8 离心机单吊斗、不对称臂结构

Fig.8 Single bucket centrifuge and asymmetric arm structure

综上所述,三种结构方式各有利弊,成都理工大学的土工离心机结合实际使用情况进行主机结构设计(如图 8c 所示)。

1.4 离心机相关参数确定

TLJ-500 型土工离心机是中国工程物理研究院总体工程研究所为成都理工大学研制的一台供科研、教学用的大型离心试验设备。有效荷重在 250g 下能达到 2 t,为目前亚洲最大的土工离心机。该设备于 2012 年交付用户使用,已完成 50 多项土工离心模型试验,取得了良好的社会效益和明显的经济效益^[10]。下面就该设备相关参数确定进行讨论。

1.4.1 离心机最大加速度的确定

离心机最大加速度值越大,缩比模型可以模拟的原型越大。若缩比过大,由于模型材料颗粒尺寸、传感器尺寸不可能无限缩小,试验误差会增大。同时离心机设计制造难度也加大,制造费用增加。

一般的土工离心试验(95%以上)都只在 180g 以下进行,而成都理工大学因要模拟较大的地质体,因此 TLJ-500 型土工离心机的最大加速度值定义到 250g,这样可以在满足使用要求的前提下,获得较为理想的性价比。

1.4.2 离心机有效半径 R 的确定

离心模型试验中取模型重心约 1/3 处至离心机转轴中心的距离称为有效半径 R ,离心机有效半径越长,则模型加速度梯度越小,则在模拟精度一定的条件下,允许的试验模型可以越大。表 1 为模型箱高度为 1 m 和 1.2 m 条件下,不同离心机有效半径,模型底部应力大于原型底部应力的误差值。

考虑到模型尺寸(模型箱大),TLJ-500 型土工离

离心机有效半径 R 取 4.5 m (到吊斗底板约 4.5 m),则采用 1 m 或 1.2 m 高模型箱,模型底部应力大于原型底部应力的误差值可以控制在 5% 以内。

1.4.3 离心机容量的确定

离心机容量设为 500g-t,按照大模型箱有效空间为 1.2 m × 1 m × 1.2 m (长 × 宽 × 高),设模型质量为 2600 kg (按照相对密度为 1.8 的沙模填满箱),模型箱质量取 1100 kg,则离心机可以带大模型箱运行到 135g。

表1 离心机有效半径、模型箱高度对试验精度的影响

Table 1 The influence of the effective radius of the centrifuge and the height of the model box on the accuracy of the test

模型箱 高度/m	离心机有效半径/m				
	3.7	4	4.2	4.5	4.7
1	4.5%	4.2%	3.9%	3.7%	3.5%
1.2	5.4%	5%	4.8%	4.4%	4.2%

2 离心机设计

大型土工离心机的主要特点是连续工作时间长、加速度高、载荷重、旋转半径大、辅助设备多。设计时需综合考虑主机与辅助系统的相互影响,使整机布局合理,使用维护、操作方便。离心机设计分主传动系统设计、转动系统(工作吊斗、转臂、模型箱)、旋转接头(油、水、气)、控制系统、测量系统及辅助系统等部分。

2.1 离心机主传动系统

离心机主传动系统的功能是将电机动力传递给离心机主轴,从而带动离心机大臂转动。由于设备运行时间较长,一般在12 h以上,设计中重点考虑系统的通风散热,以及减速箱和主轴承系的润滑与降温问题,为减速箱、轴承配备润滑油站和相应的水冷却系统。此驱动方式是国内外离心机最常用的传动方式,主要由电机、减速器、联轴器、传动支承组成,其结构如图9所示。

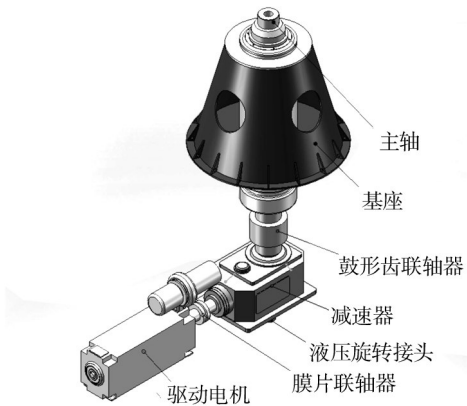


图9 离心机主传动系统

Fig.9 The main drive system of the centrifuge

2.2 转动系统

转动系统主要包括工作吊斗、转臂、模型箱、不平

衡力检测系统与固定配重等部件,如图10所示。

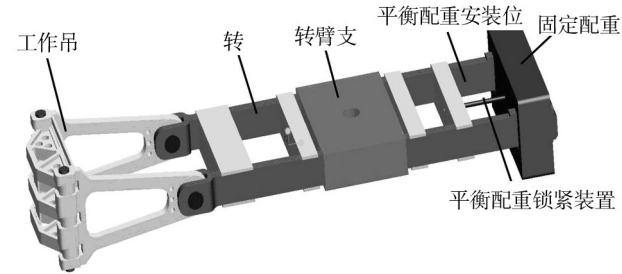


图10 转动系统结构

Fig.10 Rotation system structure

2.2.1 转臂

转臂是传递扭矩、带动模型旋转达到使用要求的关键部件,在运转中承受着动、静载荷。其结构形式、截面形状的选择直接影响离心机的风阻功率、惯性功率及离心机的稳定运行。

综合考虑风阻功率、转动惯量等因素的影响,并结合使用方对设备外观的要求,在使用功率一定的情况下,进行优化设计。转臂的结构设计除了满足强度、刚度外,还要确保其自身的固有频率不与激振器频率相同,避免发生共振而造成设备损坏^[11]。

转臂方案采用单吊斗,不对称长短臂梁式结构,一端为工作端,另一端为配重端,转臂上、下两面加盖板,使结构外形更整洁。转臂系统和主轴之间采用胀套联接方式。

2.2.2 工作吊斗

工作吊斗是联系模型箱与转臂的纽带,处于最大加速度场中。合理设计结构外形可明显降低离心机的功耗^[12],如图11所示。一般采用高强度材料制造,既减轻质量又满足功能要求,选择吊耳平台组合结构,保证在最大载荷作用下的精度,平台变形应控制在1~2 mm之间。在不影响系统质量、最大载荷的条件下,将精度控制在0.5 mm以内,有利于提高试验精度。

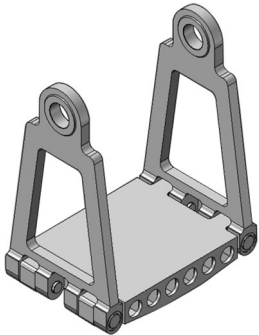


图11 工作吊斗

Fig.11 Working nacelle

2.2.3 模型箱

理想情况下,离心机应按模型试验的缩比关系配备多种几何比尺的模型箱,以适应不同模型试验需要。在模型箱设计中力求强度高、刚度大、质量轻、变形小,最大限度地增加试验模型所占的质量比,因此,多采用铝合金铸件加工而成,其模型与模型箱的质量比可以做到1:0.5。为减小模型箱内侧在模型试验时的边界效应,内表面需要采取专门的工艺加工制造。模型箱采用合金铝拼装式结构,如图12所示。

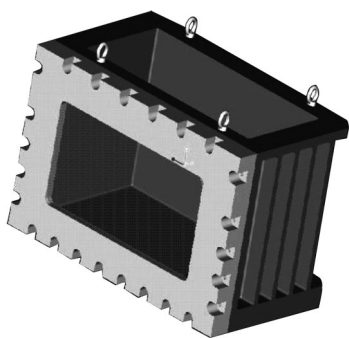


图12 模型箱
Fig.12 Model box

为了对模型进行观察和摄影,在模型箱的一个侧面上设置透明窗体,为摄影、摄像、模型制作提供条件。

2.3 油、水、气旋转接头

油、水、气旋转接头,是实现由地面向离心机上提供一定压力流动介质的中间活动过渡环节(为动态系统提供液压驱动接口),是实现离心机上各种操作与试验所必须的前提条件。旋转密封材料与结构形式都是专门特殊设计而成,其中,密封材料采用特制的耐高温、低摩擦系数且具有自润滑性能材料制造。结构设计上在旋转密封处要采取特殊工艺与特殊结构,才能保证性能,如图13所示。供油压力应大于20 MPa,流量大于50 L/min。

旋转接头安装在减速器输出轴的下端,这样的布局可消除旋转接头装拆及对其他系统造成的影响,同时降低安装、维修的难度。油、水、气介质将通过预先铺设在减速器输出轴和离心机主轴内的管道传送到转动系统的相应位置。

2.4 控制系统

该系统主要由离心机转速控制与安全连锁保护系统两个部分组成^[13]。设计采用PLC手动控制与专用

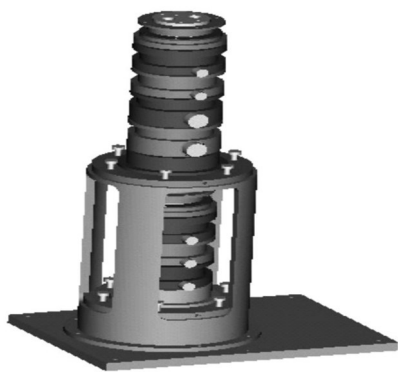


图13 旋转接头
Fig.13 Rotary joint

操控软件控制两种控制方式,以最大程度上满足系统运行安全性与试验操作便利性的要求,控制系统的结构如图14所示。

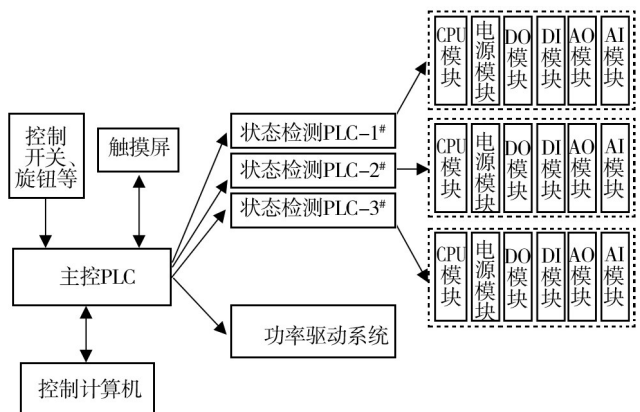


图14 控制系统结构
Fig.14 Control system structure

2.4.1 离心机转速控制

离心机在加速与减速过程中会出现角加速度,此时,模型不仅受到离心力作用,还受到切向加速度引起的惯性力的作用,过大的切向加速度会改变模型受力的方向,影响试验精度。前苏联学者B.B.克莱奇米尔就曾经建议,模型的切向加速度与它的合成加速度的比值应小于0.01,在控制离心机加速和减速过程中要平滑和缓慢地进行,不宜过快。根据不同使用要求一般取10~15 min。转速控制主要采用数字化直流控制,转速稳定度控制在0.01%以内。

2.4.2 安全连锁保护系统

安全连锁保护系统对离心机转臂平衡状态^[14]、轴承温度、电机电流等主要参数进行实时监视与测量,判断与处理运行过程中的异常状态,确保离心机安全、可靠地运行。

该系统包括安装在离心机系统各处的传感器,采集存储全系统运转状态监测信息的状态检测PLC,以及集成于主控PLC、控制计算机中的安全连锁保护软件模块构成。安全连锁保护系统要求采用独立、多裕度可靠的安全设计原则,其模块组成如图15所示。

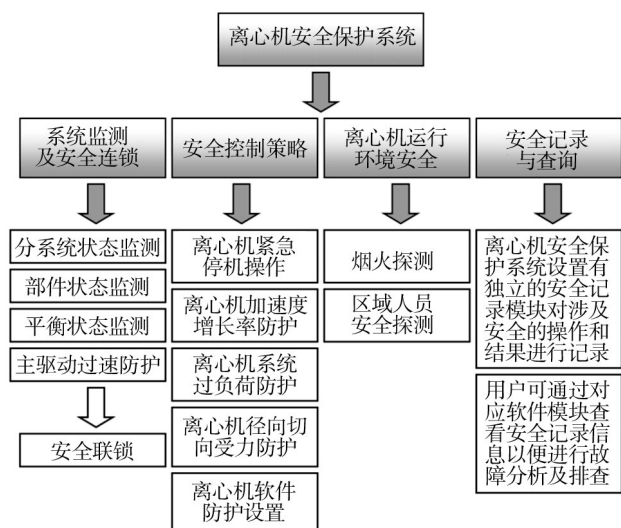


图15 安全连锁保护系统模块组成

Fig.15 Module composition of safety interlocking protection system

2.5 测试系统

离心模型的测试系统主要由各种传感器、数据采集、图像系统等组成。各种传感器测量信号通过数字变换后,经有线或无线网传输到地面,地面计算机可以对离心机上的调理器进行参数设置^[15],包括应变参数、增益、平衡、激励电流等。这种传输方式能解决滑环接触电阻的变化对数据传输的影响问题。

信号的传输是离心机上数据采集系统的关键环节,制约着系统采样率与信号传输质量的提高,为解决传统电滑环接触电阻变化对信号的影响问题,采用光纤滑环与无线传输两种方式传输信号。

根据国内土工离心实验的情况看,静态离心实验比较多,主要以压力、应变、位移量测量为主,一般采用静态测量系统就能够完成实验测试要求,如图16所示。随着振动台等动态系统的发展,有部分离心机上也配置了动态测量系统,动态信号测量与采集系统由测量模块、上下位计算机组成,如图17所示。

静态信号的测量与采集,可以采用分散式数据采集模块构成完整的静态数据采集与处理系统。可测量应变、电压、温度等信号。数据采集模块安装在离心机上,经专用数据传输网络和信号环,将数据以串行传输方式送至地面微机进行存储、处理。

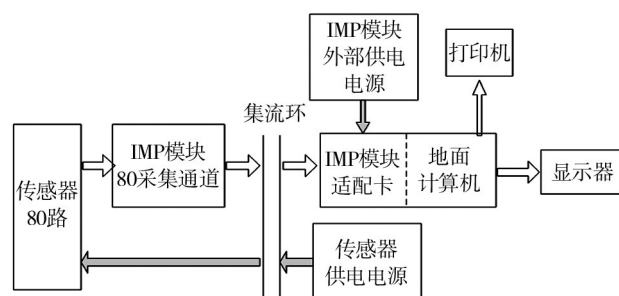


图16 静态测量系统

Fig.16 Static measurement system

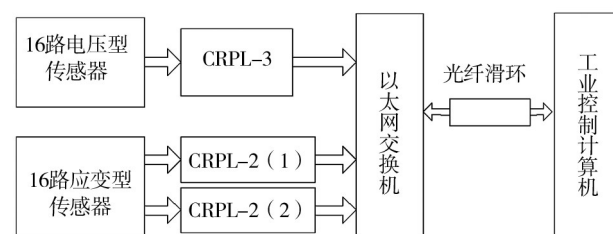


图17 动态测量系统

Fig.17 Dynamic measurement system

80通道静态与32通道动态数据采集相结合组成112通道数据采集系统,可以满足该离心机的数据采集需要^[16]。

2.6 离心机消耗功率问题

离心机是在空气流场中运转,所消耗的总功率主要由惯性功率、摩擦功率和风阻功率三部分组成^[17],摩擦功率是恒定的。在启动过程中,角加速度是确定功率的主要因素,由于启动过程比较缓慢,并不是离心机消耗功率最大点,主要是惯性功率较大,在恒速运行时,风阻功率是主要因素。风阻功率是总消耗功率的主要方面,取决于离心机旋转部分所处的空气流场状态和转臂、吊篮的外形,即空气旋转速度(m/s)、空气密度(kg/m³)、臂端线速度(m/s)、吊篮的迎风面积(m²)等。为了减少风阻功率,将离心机转动系统放在密闭机室内,使机室内的空气随着转动,要综合考虑转臂、吊篮结构的外形与密闭机室空间尺寸、形状,使机室内空气的随流比与转臂、吊篮的风阻系数有良好的匹配,降低功率消耗。对于加速度很高的离心机,可采用机室抽真空的方式解决功率消耗问题。

2.7 主机室内温升问题

离心机长时间运行时,机室温升比较高。过高的

机室温度将对在机室中使用的传感器、电子仪器带来一定的影响。从西南交通大学的100g-t离心机12 h连续运行情况看,如果对机室不采取降温措施,预计机室温度可达80℃。土建中可以考虑采取以下降温措施:在机室壁上安装散热板,可降低机室温度,这种方法简单、经济,效果一般;采用机室墙壁水冷却系统,即在离心机机室内壁设置循环冷却水系统来达到降温的目的,降温效果明显;机室采用全金属外壳降温效果比较明显;机室顶部和下部中间位置开通风孔并增加制冷降温和排风措施,降温效果明显。

2.8 其他问题

1) 实验室噪音控制问题。离心机运行时将产生比较大的噪音,建议在地下室、机室外围增加吸音材料,这样做可减小噪音。

2) 地下室通风防潮问题。地下室要作好防水处理,不得有渗透,保持地下层与外界空气畅通,有较好的通风条件。

3) 实验室配电中的主动力供电与控制系统用电的隔离问题。在配电时一般将电机供电与测控系统供电分开,这样对测控系统的干扰较小。

3 土工离心机的发展研究

今后几年,多功能、复合型土工离心机的研制将成为总的发展趋势。在离心机设计上会遇到如下难题。

1) 超大功率驱动与电机问题;气动噪声与转臂振动问题;高 g 值下主机结构、强度、安全问题;机室真空及密封技术问题^[18]。

2) 离心机上所使用的各种介质的传输与控制等方面,需要作进一步的研究与探索,如提高多路、大流量油、水、气旋转接头的密封性、可靠性及可维修性。

3) 离心机上的图像测量系统是获得试验结果的重要环节,由于环境特殊,对于瞬时变化信号采集、传输的实时性受到限制。将多路光纤滑环(10路)及高速照相系统应用在离心模型的变形监测中,是一种高效、先进的模型试验技术。

4) 实现离心机上大 G 值(250 g)水位升降、降雨模拟实验功能也是近期亟待进一步开展研究的工作。

5) 适应多学科研究试验的专用设备研发。对特殊模型箱设计方面要有新的突破,如柔型模型箱、冻融模型箱的设计,以适应功能更为完善的试验要求。对以上能够想到的或未知的技术难题,在国内应开展

联合研究,进一步推动我国离心机研制与试验研究迅速发展,为巨型离心机研制做好技术储备。

4 结语

近年来,我国土工离心建模技术取得了很大的进步,对大型土工离心机的需求增多。设备性能、功能向高、精、尖、难方向发展,我国设备研制能力已达到国际领先水平。在土力学基础理论研究方面,对桩基础、地震模拟、斜坡地质灾害与边坡稳定、隧道与地下工程、软土地基与基础、高速铁路和公路路基稳定、高填方及土石坝稳定性等环境试验及应用技术研究都取得了许多重要成果,为大型工程项目的建设发挥了重要作用。用户的需求是科技创新的原动力,因此,不断提高土工离心机设计水平,是今后前进和努力的方向。研制更先进的土工离心机,开发更多功能的专用试验装置^[19],为不断拓宽离心模拟试验研究领域搭好平台,是从事土工离心机系统研发团队、工程技术人员的责任和挑战。

参考文献:

- [1] 潘时声. 离心机运行时入桩设备研制和桩基础离心实验研究[D]. 北京:清华大学,1995.
PAN Shi-sheng. The Development of Piling Equipment for Running Centrifuges and Research on Centrifugal Experiment of Pile Foundation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [2] BUCKY P B. The Use of Models for the Study of Mining Problems[J]. Am Inst Met Eng Tech Pub, 1931, 425: 28—30.
- [3] 朱维新. 土工离心机模型实验研究概况[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 82—94.
ZHU Wei-xin. Centrifuge Modelling for Geotechnical Engineering in the World[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 82—94.
- [4] SCHOFIELD A N. Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modeling[C]// Intern Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1981.
- [5] 濮家骝. 土工离心机模型实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 Trend of Geotechnical Centrifuge Model Test and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 92—94.

- [6] 林明, 吴文凯, 蒲浩. 岩土离心机设计与发展概述[J]. 工程设计与力学环境, 2003(4): 62—67.
LIN Ming, WU Wen-kai, PU Hao. Overview of Geotechnical Centrifuge Design and Development[J]. Engineering Design and Mechanical Environment, 2003(4): 2003—67.
- [7] 林明. 150g-t 土工离心机研制[C]// 第24届全国土工测试学术研讨会论文集. 北京, 2005.
LIN Ming. Development of 150g-t Geotechnical Centrifuge [C]// Proceedings of the 24th National Symposium on Geotechnical Testing. Beijing, 2005.
- [8] 黎启胜, 刘凯利. 100g-t 土工离心机设计方案报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院结构与力学研究所, 1998.
LI Qi-sheng LIU Kai-li. 100g-t Geotechnical Centrifuge Design Report[R]. Mianyang: Institute of Structure and Mechanics of Chinese Academy of Engineering Physics, 1998.
- [9] 罗昭宇. 土工离心机机械系统方案设计报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2008.
LUO Zhao-yu. Geotechnical Centrifuge Mechanical System Scheme Design Report[R]. Mianyang: Institute of Systems Engineering of Chinese Academy of Engineering Physics, 2008.
- [10] 赵玉虎. TLJ-500 土工离心机研制总结报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2014.
ZHAO Yu-hu. TLJ-500 Geotechnical Centrifuge Development Summary Report[R]. Mianyang: Institute of Systems Engineering of Chinese Academy of Engineering Physics, 2014.
- [11] 冉光斌, 罗昭宇, 刘小刚. 土工离心机吊篮的设计及优化方法[J]. 机械设计, 2009, 26(11): 68—70.
RAN Guang-bin, LUO Zhao-yu, LIU Xiao-gang. Design And Optimization Method of The Basket of Geotechnical Centrifuge [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(11): 68—70.
- [12] 冉光斌. 恒加速度离心机转臂的稳健设计方法[J]. 机械设计, 2008(5): 5—7.
RAN Guang-bin. Robust Design Method of The Invariable Acceleration Centrifuge's Swing Arm[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(11): 68—70.
- [13] 赵玉虎. 土工离心机电气系统方案设计报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2008.
ZHAO Yu-hu. Geotechnical Centrifuge Electrical System Scheme Design Report[R]. Mianyang: Institute of Systems Engineering of Chinese Academy of Engineering Physics, 2008.
- [14] 赵玉虎, 林明. 力传感器在离心机平衡检测与保护系统中的应用[C]// 四川省电子学会传感器技术第九届学术年会论文集. 2005: 101—105.
ZHAO Yu-hu, Lin Ming. Application Of Force Sensor In The Balance Detection and Protection System Of The Centrifuge [C]// Proceedings of Sichuan Province Electronic Academic Sensor Technology 9th Academic Annual Conference, 2005: 101—105.
- [15] 谢欣. 土工离心机数据采集与监测系统研制报告[R]. 北京: 水利水电科学研究院, 1990.
XIE Xin. Geotechnical Centrifuge Data Acquisition and Monitoring System Development Report[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower, 1990.
- [16] 赵玉虎. 土工离心机电气系统工程设计报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2008.
ZHAO Yu-hu. Geotechnical Centrifuge Electrical Systems Engineering Design Report[R]. Mianyang: Institute of Systems Engineering of Chinese Academy of Engineering Physics, 2008.
- [17] 孙述祖. 土工离心机设计综述[R]. 南京: 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 1990.
SUN Shu-zu. Review of Geotechnical Centrifuge Design[R]. Nanjing: Geotechnical engineering department of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1990.
- [18] 林明. 国内土工离心机及专用实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.
- [19] 林明. 土工离心机及其在工程结构模拟实验中的应用[C]// 第八届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2011: 459—465.
LIN Ming. Geotechnical Centrifuge and Its Application In Engineering Structure Simulation Experiment[C]// Proceedings of the 8th National Engineering Structure Safety Protection Academic Conference. Mianyang: Institute of Systems Engineering of Chinese Academy of Engineering Physics, 2011: 459—465.