

理论与实验研究

TLJ-60A型土工离心机转臂系统力学分析与
实测分析

余绍蓉, 杜强, 李心耀, 王军

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 目的 评估 TLJ-60A 型土工离心机转臂系统能否满足强度要求, 并提出改进建议。方法 对转臂系统建立三维有限元数值模型, 确定载荷条件和边界条件, 计算关键部位的最大等效应力, 给出材料使用建议。在建成后离心机运行中进行应变响应实测, 并就计算结果与实测数据进行比较分析。结果 数值模拟结果与实测结果吻合较好, 平均差异为 4.5%, 最大差异为 12.46%, 数值模拟偏保守。结论 评估结果及改进建议是正确的, 支撑了设备研制的一次成功。

关键词: 土工离心机; 转臂; 强度; 数值模拟; 试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.006

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0040-05

Mechanical Analysis and Testing of Rotary Arm System of TLJ-60A
Geotechnical Centrifuge

YU Shao-rong, DU Qiang, LI Xin-yao, WANG Jun

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

ABSTRACT: Objective To evaluate whether the rotary arm system of TLJ-60A geotechnical centrifuge can meet the strength requirement and give some suggestions. **Methods** The 3-dimensional finite element numerical model was built and the boundary and load conditions were determined. Then the maximum equivalent stresses in key locations of the rotary arm system were calculated and a suggestion on the material selection was given. After the centrifuge assembling, the strains of the corresponding locations were tested in a working condition. **Results** It showed that the numerical results agreed well with the test results. The mean difference was 4.5%, the maximum difference was 12.46%; and the numerical results were conservative. **Conclusion** The evaluation and the suggestions were correct, which supported the one-time success of the equipment.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; rotary arm; strength; numerical simulation; test

离心机被人类所利用, 大约已有两百多年的历史^[1-2], 目前已在航空^[3]、航天^[4]、土木与水利工程^[5-9]等

收稿日期: 2015-07-24; 修订日期: 2015-08-10

Received: 2015-07-24; Revised: 2015-08-10

作者简介: 余绍蓉(1976—), 女, 重庆人, 硕士, 主要研究方向为复杂结构非线性力学分析。

Biography: YU Shao-rong(1976—), Female, from Chongqing, Master graduate student, Research focus: nonlinear mechanical analysis of complicated structure.

诸多领域得到了很好的应用。根据离心机的用途,可分为土工离心机、工业离心机、载人离心机以及其他专用离心机。由于离心场中对结构的力学行为具有缩尺效应,因此可以用较小的模型试验来研究大型土工结构的力学行为。鉴于此,土工离心机已经成为岩土力学研究中开展土工模型试验的重要设备,其应用几乎涉及所有岩土工程研究及试验^[10-11]。对于这种大型的、反复使用的科学试验设备,几乎每一台均需要根据用户的技术要求进行专门设计,因此其设计、加工、安装和调试均希望一次成功,否则将会造成极大的浪费。同时目前设计的离心机都没有通过试验验证其安全性与可靠性。在此情况下,数值模拟就成为离心机设计安全性、可靠性、经济性的重要依据。

随着现代计算技术及计算机软、硬件的飞速发展,有限元等数值模拟方法克服了以往耗时量大、操作复杂、精度不足等缺点,已逐渐成为工程结构领域有效的实用计算方法^[12]。文中以TLJ-60A土工离心机为例,在简述其结构和工作原理的基础上,介绍了转臂系统的三维有限元模型和分析结果,最后通过与建成后离心机转臂系统实测数据进行比较,证明了数值模拟的有效性。

1 离心机简介

1.1 结构组成

土工离心机由主机系统和辅助系统两部分组成,其中主机系统由转动系统(包括转臂、吊篮、模型箱、配重块或配重吊篮等组成)、传动系统(包括电机、减速器、传动支承、主轴等组成)和控制部分(包括计算机、控制装置等)组成,如图1所示。TLJ-60A型土工离心机转臂系统和双吊斗的结构如图2所示。在离心试验状态下,试件置于吊斗中,吊斗及内部试件在离



图1 TLJ-60A离心机

Fig.1 TLJ-60A geotechnical centrifuge

心力作用下处于水平位置,此时,吊斗与试件对离心机转臂的作用力主要表现为拉力。土工离心机的转臂系统由拉力带、转臂支撑、工字梁 I 和工字梁 II 组成。拉力带与转臂支撑、工字梁 I、工字梁 II 之间通过焊接成一体,拉力带叉耳孔嵌有衬套。

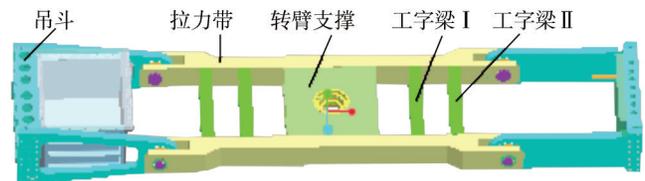


图2 转臂系统

Fig.2 Rotary arm system

1.2 工作原理

土工离心试验是利用土力学普遍相似原理,将土工相似模型置于高速旋转的离心机中形成的高惯性力场($a = r\omega^2$)。土是一种非线性变形材料,它的形状受应力水平的影响。当对土工构筑物进行物理模拟时,首要条件是保证模型的应力水平与原型相同。利用高速旋转的离心机,在模型上施加 n 倍重力的离心惯性力,补偿模型因缩尺 $1/n$ 所造成的自重应力损失,达到与原型相同的应力水平,这样就可以在模型中再现原状土工构筑物的性态。重力与惯性力是等效的,而土的性质又不因加速度的变化而改变,因此,离心模拟技术对于以重力为主要载荷的土工构筑物来说特别有效。在进行土工模型试验时,土工离心模型中的各项参数应与原型有一定的相似关系,才能保证模型反映原型的性状。这种相似关系称为比尺关系,比尺关系可以通过物理方程或量纲分析确定下来^[2]。

2 数值模拟

2.1 有限元模型

根据TLJ-60A土工离心机的结构和受载特征,将离心机转臂简化为1/4面对称模型,有限元模型采用八节点六面体单元进行离散。转臂支撑、工字梁 I、工字梁 II 和衬套与拉力带之间均按固联处理,衬套与销轴之间按接触考虑。在销轴上固联了两块板,在板上施加拉力 F 来模拟吊斗、试件在离心状态下对转臂的拉力,如图3所示。在有限元模型的对称面上施加面对称约束,在离心机转臂支撑与主轴连接部位(表

面)施加固支约束。拉力带、转臂支撑等部件的材料为16Mn,屈服强度为300 MPa;工字梁 I 和工字梁 II 的材料为Q235,屈服强度为235 MPa;衬套的材料为35CrMnSi,屈服强度为735 MPa。坐标定义:以离心机主轴中心为坐标原点,以中心指向试验吊篮方向为x轴,以垂直地面指向上方为z轴,y轴由右手法则确定。

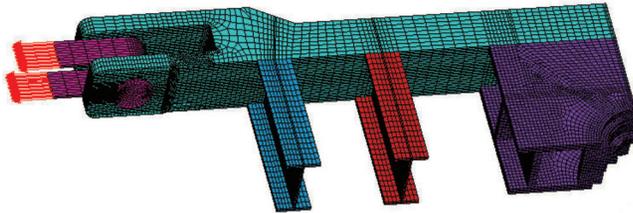


图3 转臂系统有限元模型

Fig.3 Finite element model of the rotary arm system

2.2 载荷情况

模型加模型箱质量为335 kg,最大过载为200g,有效旋转半径 $r=2$ m,由此得到转臂工作时的最大角速度为:

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{a}{r}} = 31.305 \text{ rad/s} \quad (1)$$

离心机稳定运行时,转臂主要受到吊斗(质量为587 kg)及模型和模型箱的离心力作用,离心力为:

$$F=ma=1\ 807\ 120 \text{ N} \quad (2)$$

同时考虑结构各部件自重的影响(重力加速度为

9.8 m/s^2)。

2.3 转臂系统有限元计算结果

图4给出了工况二转臂系统各部件的等效应力云图,表1给出了转臂系统各部件的最大等效应力和安全系数。转臂系统的最大等效应力为313 MPa,出现在衬套上,安全系数为2.35。拉力带的最大等效应力为206 MPa,安全系数为1.46,发生在拉力带销孔内边缘,其为拉应力。工字梁 I 的最大等效应力为67.8 MPa,安全系数为3.47,发生在工字梁 I 与拉力带焊接处;若考虑0.9的焊缝系数,安全系数为3.12。工字梁 II 的最大等效应力为68.6 MPa,安全系数为3.43,发生在工字梁 II 与拉力带焊接处;若考虑0.9的焊缝系数,安全系数为3.08。转臂支撑的最大等效应力为160 MPa,安全系数为1.88,发生在转臂支撑与拉力带焊接处;若考虑0.9的焊缝系数,安全系数为1.69。

表1 转臂系统各部件应力计算结果和安全系数

Table 1 Calculated stresses and safety coefficients in different parts of the rotary arm system

部件	整体	衬套	拉力带	工字梁 I	工字梁 II	转臂支撑
应力/MPa	313	313	206	67.8	68.6	160
安全系数	2.35	2.35	1.46	3.12	3.08	1.69

按照土工离心机行业内部标准,关键部位的安全系数不小于2.0的要求,为此向设计部门建议拉力带

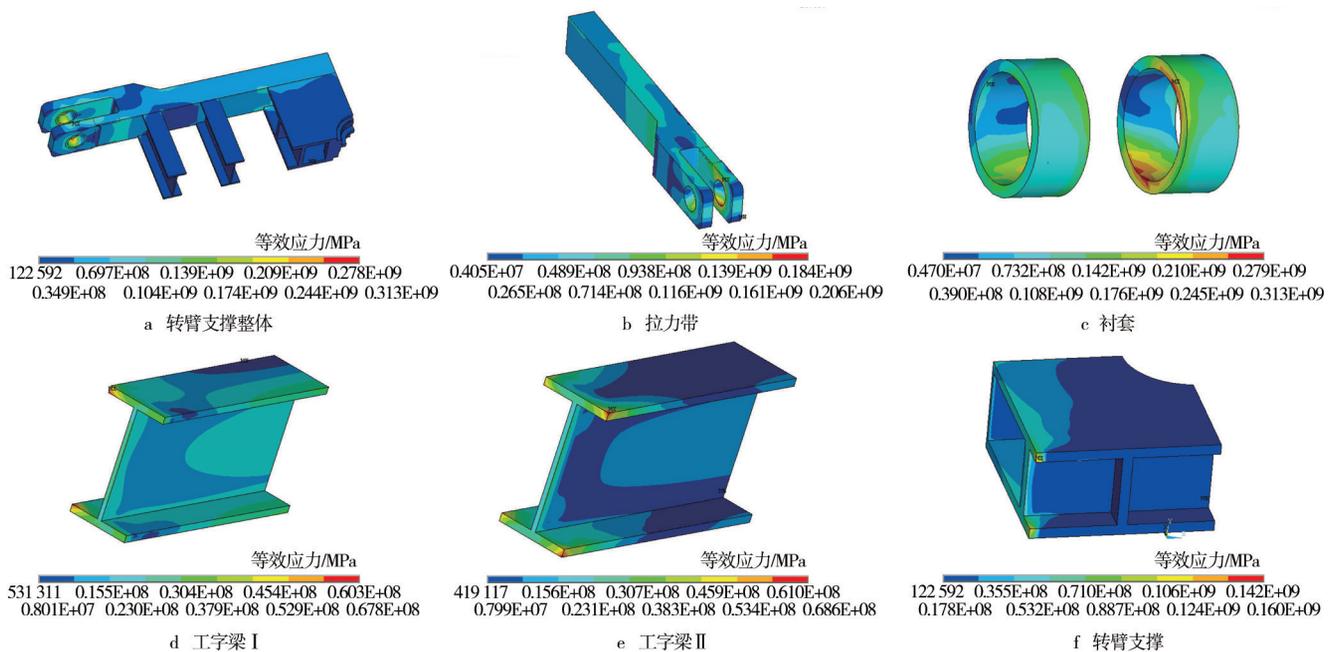


图4 转臂系统各部件等效应力计算结果

Fig.4 Calculated stresses in parts of the rotary arm system

和转臂支承更换一种强度更高的钢材料,如35CrMo,其屈服强度约为500 MPa。这样,拉力带安全可达2.43,转臂支撑安全系数可达2.81,满足行业内部标准要求。该建议已被设计部门采纳。

3 离心机运行中的应变实测

3.1 应变测点布局设计

在离心机转臂上布置9个应变测点,见表2和图5。每个测点使用45°应变花测量三个方向的应变(ϵ_{0° , ϵ_{45° 和 ϵ_{90°)。

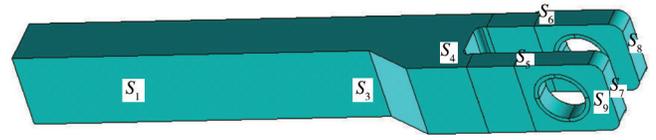


图5 拉力带应变测点布局

Fig.5 Strain measurement points on the tension band

需要指出,试验中测点的布局设计是非常重要的。首先,测点布局应反应转臂整体受力规律,关注受力严酷部位。其次,测点要与应力集中部位保持一定的距离,否则测点位置的少许差异,将导致测量结果的较大差异,试验结果与数值结果的比较变得困

表2 应变测点布局

Table 2 Setup of the strain measurement points

部位	测点	部件	位置描述	应变花方向
拉力带	S ₁	拉力带外侧	距拉力带上端面95 mm,距拉力带远端面(吊篮侧)941 mm,距拉力带中心508 mm	
	S ₂	拉力带内侧	距拉力带上端面95 mm,距拉力带远端面(吊篮侧)941 mm,距拉力带中心508 mm	ϵ_{0° 顺臂方向, ϵ_{90° 指向上端面
	S ₃	拉力带外侧	距拉力带上端面95 mm,距拉力带远端面607 mm,距拉力带几何不连续部位24 mm	
叉耳	S ₄	上端面	距叉耳外形面39 mm,距拉力带远端面354.5 mm	
销孔	S ₅	外耳片	距外侧面23 mm,距拉力带远端面189 mm	ϵ_{0° 顺臂方向, ϵ_{90° 指向外
上端面	S ₆	内耳片	距外侧面28 mm,距拉力带远端面184 mm	
远端面	S ₇	外耳片	距上端面90 mm,距外侧面23.3 mm	ϵ_{0° 指向上端面, ϵ_{90° 指向外
	S ₈	内耳片	距上端面90 mm,距外侧面23.5 mm	
叉耳侧面	S ₉	外耳片	距上端面90 mm,距拉力带远端面10 mm	ϵ_{0° 顺臂方向, ϵ_{90° 指向上端面

难。最后,测点还应布置在操作方便的位置,以免因操作不变而导致操作精度下降。

3.2 应力测试结果

根据45°应变花测试结果可计算出测点的主应力,见式(3)和式(4):

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot$$

$$\left[\frac{1 + \mu}{2} (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ}) + \frac{1 + \mu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{45^\circ})^2 + (\epsilon_{90^\circ} - \epsilon_{45^\circ})^2} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot$$

$$\left[\frac{1 + \mu}{2} (\epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ}) - \frac{1 - \mu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_{0^\circ} - \epsilon_{45^\circ})^2 + (\epsilon_{90^\circ} - \epsilon_{45^\circ})^2} \right] \quad (4)$$

式中: σ_1 为第一主应力; σ_2 为第二主应力; E 为材料弹性模量, $E=2 \times 10^5$ MPa; μ 为泊松比0.28; ϵ_{0° 为0°方向线应变; ϵ_{45° 为45°方向线应变; ϵ_{90° 为90°方向线应变。

由此可计算出测点的等效应力 σ_e ,如式(5):

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

测点S₁—S₉的应变实测结果分别为40.3, 54.6, 73.2, 51.6, 65.9, 63.4, 94.8, 112.2, 66.5 MPa。

4 计算结果与实测结果的比较

表3给出了在200g满负荷稳定运行时试验测试结果与数值模拟结果的比较。总体上计算结果与试验结果吻合较好,两种方式得到的等效应力相对差异最大为12.46%,且仅有2个点的试验结果与计算结果

相对误差大于10%，分别是 S_5 和 S_6 ，其余点的试验结果与计算结果相对误差小于7%。

表3 计算结果与测试结果对比

Table 3 Comparison between the calculated and measured results

测点号	测试等效应力/MPa	计算等效应力/MPa	相对差异/%
S_1	40.3	41.1	1.99
S_2	54.6	56.2	2.93
S_3	73.2	72.8	-0.55
S_4	51.6	51.5	-0.19
S_5	65.9	72.8	10.47
S_6	63.4	71.3	12.46
S_7	94.8	98.5	3.90
S_8	112.2	115.4	2.85
S_9	66.5	71.1	6.92

上述结果表明，对该离心机转臂系统的模型简化、边界条件的处理、载荷处理、材料参数的选取是比较合理的。同时，文中在测点布局设计中提出的原则，对数值模拟与实测结果的比较也提供了非常有利的条件。如果因测点布局不当，不仅会导致计算结果与实测结果的吻合度下降，更重要的是难以评价和修正数值模拟方法和模型，从而更好地支撑今后的设计评估。

5 结语

文中建立了TLJ-60A转臂系统三维有限元模型，给出了在满负荷200g下转臂系统各部件的最大等效应力和安全系数，针对安全系数小于2.0的部件，提出了更换高强度钢材料的建议。离心机建成运行后，对选取点应力进行了应力测试试验，测试结果表明数值模拟结果与试验测试情况吻合较好，平均相对差异为4.5%，最大相对差异为12.46%。此外，总体上看，计算结果比试验结果略大（尤其在关键受力部位叉耳上），说明数值模拟结果比实际情况略偏保守，因此数值模拟结果可信。

文中对离心机的模型简化方法、边界条件和载荷处理方法，以及测点布局设计，均可供其他土工离心机研发提供参考。

参考文献：

[1] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机设计(6) [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 593—600.
 JIA Pu-zhao. Steady State Acceleration Simulation Test

Equipment: Centrifuge Design (Part VI) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 593—600.

[2] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机的设计(8) [J]. 航天器环境工程, 2010, 27(21): 247—265.
 JIA Pu-zhao. Steady State Acceleration Simulation Test Equipment: Centrifuge Design (Part VIII) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 2010, 27(21): 247—265.

[3] 陈胜来, 朱长春, 邓志刚. 某油箱离心试验吊篮动平衡分析 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 243—246.
 CHEN Sheng-lai, ZHU Chang-chun, DENG Zhi-gang. Dynamic Balance Analysis of Suspended Basket in Centrifugal Test of Gasoline Tank [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 243—246.

[4] 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.

[5] 徐光明, 顾行文, 任国峰, 等. 防波堤椭圆形桶式基础结构的贯入受力特性实验研究 [J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 1—8.
 XU Guang-ming, GU Xing-wen, REN Guo-feng, et al. Penetration Resistance and Wall Friction of Ellipse Lower Bucket of Breakwater into Soft Ground in Centrifuge [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(1): 1—8.

[6] 冯研, 蒋关鲁, 陈伟志, 等. 离心模型试验预测复合地基沉降的精度 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(1): 105—110.
 FENG Yan, JIANG Guan-lu, CHEN Wei-zhi, et al. Accuracy of Settlement Prediction of Composite Foundation by Centrifuge Model Tests [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(1): 105—110.

[7] 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, 28(10): 141—147.
 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, 28(10): 141—147.

[8] 张荣, 蒲浩, 牛宝良, 等. 土工离心机撞击模拟试验测控装置设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(11): 3026—3028.
 ZHANG Rong, PU Hao, NIU Bao-liang, et al. Design of Test and Control Device of Crashing Simulation Test for Geotechnical Centrifuge [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(11): 3026—3028.

[9] 陈虎, 罗强, 孟伟超. 土工离心机路堤地基弯沉式差异沉降控制装置研制与试验, 实验技术与管理, 2013, 30(12): 96—100.
 CHEN Hu, LUO Qiang, MENG Wei-chao. Development and

表1 优化前后吊篮的最大等效应力

Table 1 Maximum von Mises stress of optimizational structure

部件	最大等效应力/MPa	
	优化前	优化后
吊耳	772.9	405.0
销轴	1252.64	511.3
底部平台	99.5	306.0

3 结论

文中对吊篮结构的初始设计方案进行了有限元接触分析,在此基础上开展了吊篮各部件的优化分析。优化后吊篮结构的力学分析结果表明,吊篮各部件的应力大幅度下降,尤其是吊耳和销轴这两个关键承力部件应力分别下降了48%和59%。通过优化后得到了满足强度要求的吊篮结构参数。

参考文献:

- [1] 白冰,周健. 土工离心模型试验技术的一些进展[J]. 西部探矿工程,2000(4):8—11.
BAI Bing, ZHOU Jian. Progress Report of the Soil Centrifugal Model Test[J]. West-China Exploration Engineering, 2000(4):8—11.
- [2] 刑建营,刑义川,梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与思考[J]. 水利与建筑工程学报,2005,3(1):27—30.
XING Jian-ying, XING Yi-chuan, LIANG Jian-hui. Review of the Soil Centrifugal Model Test[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005.3(1):27—30.
- [3] 王东升,刘青林,钟继根,等. 某型号离心机吊篮拓扑优化设计[J]. 航天器环境工程,2009,26(3):254—258.
WANG Dong-sheng, LIU Qing-lin, ZHONG Ji-gen, et al. Topological Optimization of the Nacelle on Centrifuge[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009,26(3):254—258.
- [4] 陈磊,洪建中,杨永生,等. 相对变形约束下某离心机吊篮拓扑优化设计[J]. 航天器环境工程,2012,29(1):100—103.
CHEN Lei, HONG Jian-zhong, YANG Yong-sheng, et al. Topological Optimization of the Nacelle on Centrifuge Via Relative Deformation Constraint[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012,29(1):100—103.
- [5] 冉光斌,罗昭宇,刘小刚,等. 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 Methods of the Nacelle on Soil Centrifuge[J]. Journal of Machine Design, 2009,26(11):68—70.
- [6] 冉光斌,洪建中,刘小刚. 巨型多功能土工离心机吊篮的设计[J]. 机械设计,2011,28(10):33—36.
RAN Guang-bin, HONG Jian-zhong, LIU Xiao-gang. Design of the Nacelle on Giant and Multifunctional Soil Centrifuge[J]. Journal of Machine Design, 2011,28(10):33—36.
- [7] MOTTERSHEAD J E, PASCOE S K, ENGLISH R G. A General Finite Element Approach for Contact Stress Analysis[J]. Int J Numer Meth Eng, 1992,33:765—779.
- [8] REDDY J N. Penalty-finite-element Analysis of 3-D Navier-Stokes Equations[J]. Compu Meth Appli Mech Engng, 1982,35:87—106.
- [9] KIKUCH N. A Smoothing Technique for Reduced Integration Penalty Methods in Contact Problems[J]. Int J Numer Mech Engng, 1982,18:343—350.
- [10] KANTO V, YAGAWA G. A Dynamic Contact Buckling Analysis by the Penalty Finite Element Method[J]. Int J Numer Mech Engng, 1990,29:755—74.
- [11] REDDY M P, REDDY J N, AKAY H U. Penalty Finite Element Analysis of Incompressible Flows Using Element by Element Solution Algorithms[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1992,100:109—205.
- [12] 张洪才,何波. 有限元分析—ANSYS13.0从入门到实战[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
ZHANG Hong-cai, HE Bo. FEM Analysis for ANSYS13.0[M]. Beijing:China Machine Press, 2011.

(上接第44页)

Test of Control Device with Geotechnical Centrifugal for Deflection Type Differential Settlement of Embankment Foundation[J]. Experimental Technology and Management. 2013,30(12):96—100.

- [10] 林明,王新伦,冯晓军,等. 60g-t土工离心机电气系统设计[J]. 兵工自动化,2004,23(1):58—60.
LIN Ming, WANG Xin-lun, FENG Xiao-jun, et al. Design of Electrical System for 60g-t Geotechnical Centrifuge[J]. Ordnance Industry Automation, 2004,23(1):58—60.
- [11] 冉光斌. 土工离心机及振动台发展综述[J]. 环境技术,

2007,8(3):25—29.

- RAN Guang-bin. Summarization of Geotechnical Centrifuge and Table Vibrator's Development[J]. Environmental Technology, 2007,8(3):25—29.
- [12] 冯立成,周密,易泽明. 离心机复杂转鼓的有限元优化计算[J]. 机械强度,2002,24(2):295—297.
FENG Li-cheng, ZHOU Mi, YI Ze-ming. Optimum Calculation of Complicated Centrifuge Basket with the Method of Finite Element[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002,24(2):295—297.