

600g-t 土工离心机吊篮力学分析与强度设计

杨玉明, 刘远东, 王沪毅

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 对600g-t土工离心机的吊篮各部件开展力学分析与强度设计。**方法** 基于土工离心机的吊篮结构初始设计方案,利用Ansys有限元分析软件,采用非线性接触算法开展吊篮优化力学分析。**结果** 通过优化设计,吊篮结构相对于初始结构各部件的最大应力下降39%~59%。**结论** 优化后的吊篮结构满足强度要求。

关键词: 土工离心机; 吊篮; 接触非线性; 优化设计

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.007

中图分类号: TJ05; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0045-05

Mechanical Analysis and Strength Design of the Nacelle on the 600g-t Geotechnical Centrifuge

YANG Yu-ming, LIU Yuan-dong, WANG Hu-yi

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: **Objective** To carry out the mechanical analysis and strength design of the nacelle on the 600g-t geotechnical centrifuge. **Methods** Referring to the original designs of the nacelle on the centrifuge, non-linear contact analyses were carried out on the nacelle of the 600g-t centrifuge by utilizing the contact algorithm in the software ANSYS, and optimizations of the mechanical behaviors of each part of the nacelle were done accordingly. **Results** FEM results revealed that the maximum von Mises stress of the each part of the nacelle was reduced by 39%~59% after optimization compared to the initial values. **Conclusion** Optimized structure of the nacelle satisfied the strength requirements.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; nacelle; contact non-linear; optimization

土工离心机是用来模拟重力场,进行土工建筑物缩模试验研究的重要设备。土工离心模型试验是将 $1/n$ 的模型置于离心机中,在 n 倍 g 离心加速度的空间进行试验。由于惯性力与重力绝对等效,且高加速度

不会改变工程材料的性质,从而使模型和原型的应力、应变相等,变形相似,塑性区发展和破坏过程相似,以获取原型变形破坏机理和破坏过程的物理模拟试验技术^[1-2]。土工离心机由传动系统、转臂系统、吊

收稿日期: 2015-07-24; 修订日期: 2015-08-15

Received: 2015-07-24; Revised: 2015-08-15

作者简介: 杨玉明(1969—),女,四川绵阳人,硕士,副研究员,主要研究方向为结构力学分析。

Biography: YANG Yu-ming, (1969—), Female, from Mianyang, Sicuan, Master, Associate researcher, Research focus: mechanical analysis of struture.

篮几大部件构成。吊篮是试验件的承载结构,试验件放置于模型箱中,模型箱安装在吊篮底部平台上,吊篮上端通过销轴连接于转臂的末端。在工作状态下,吊篮自身所受的重力产生离心力,离心机转速越高,离心力越大。模型箱及试验件也将产生很大的离心力,该离心力作用于吊篮平台上,因此,吊篮是关键的承力系统。这要求吊篮是高比强度、高比刚度的结构体系,在其强度设计和力学分析中,通常需对吊篮进行优化设计,文献[3—6]针对多个型号的离心机吊篮结构整体开展了优化设计,得到了满意的结果。

文中的土工离心机的容量为600g-t,有效旋转半径为5 m,有效旋转半径处(模型试验中心)的最大加速度达到200g,最大转速达到19.8 r/s,是目前国内较大的土工离心机。在对离心机吊篮初始设计方案进行力学分析的基础上,对吊篮开展了优化设计。因吊篮由多个部件构成,对吊篮作整体优化分析约束条件太多,不易收敛到满意的结果。不同于文献[3—6],文中对结构的各个部件开展优化分析,在对吊篮结构作整体计算。通过优化设计,得到了满足强度要求的吊篮结构参数。

1 计算方法

1.1 接触算法

吊篮部件之间的连接为接触配合连接,吊耳与上端的向心关节轴承和下端的销轴均为接触配合,底部平台与销轴之间也为接触配合,在结构的力学响应分析中需要采用接触算法。

接触问题属于高度复杂的非线性问题,表现在接触的区域随时间不断变化,约束条件非常复杂,接触界面的摩擦条件也十分复杂。分析复杂的接触非线性力学问题,通常采用Lagrange乘子法和罚方法^[7-11]。

Lagrange乘子法和罚方法是把约束条件乘以Lagrange乘子 λ 或罚参数 α ,并引入离散结构系统的变分公式,从而处理复杂的约束条件。Lagrange乘子作为独立的变量,即在平衡方程中增加了场变量,从而导致计算量增加。罚函数法是引入罚参数以消去平衡方程中的某一场变量,其困难在于罚参数的选择,会出现收敛性问题。

在接触分析中,通过位移约束来阻止网格的交叠,而且还要控制接触面网格的相互滑动。接触模型把可能发生相互接触的体(面或线)分为接触体和目标体,在增量方法的某步迭代中,当接触体上的节点 k

进入目标体的目标单元内时,若发生交叠,则通过返回节点 k 到目标单元的边界上。当接触体上的节点 k 是在滑动接触中,则位移约束应仅施加法向约束。约束方程为:

$$\delta_i - L_i \Delta u_{i+1} = 0 \quad (1)$$

对于Lagrange乘子法,增量平衡方程为:

$${}^t K \Delta u_{i+1} = {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F_i + {}^{t+\Delta t} C_i + L_i^T \lambda_{i+1} \quad (2)$$

将式(1)的约束方程引入罚方法的平衡方程,其增量迭代方程为:

$$[{}^t K + \alpha L_i^T L_i] \Delta u_{i+1} = {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F_i + {}^{t+\Delta t} C_i + \alpha L_i^T \delta_i \quad (3)$$

ANSYS软件具有较强的接触分析功能,支持点-点接触、点-线接触、点-面接触、点-体接触、面-面接触、面-体接触,通过调节法向接触刚度、初始接触关闭条件、切向罚刚度等实常数,可以提高收敛速度以及计算精度。文中采用Ansys软件增进的拉格朗日方法——Augmented Lagrangian Method来分析结构的接触非线性。该方法可寻找到精确的拉格朗日乘子,对罚函数进行修正迭代^[12]。

1.2 优化分析方法

优化设计包括设计变量、目标函数和约束条件三个要素。目标函数表述为:

$$F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为设计变量。

约束条件为:

$$G_i(X) \leq 0, i=1, 2, \dots, n_1 \quad (5)$$

或:

$$H_j(X) = 0, j=1, 2, \dots, n_2 \quad (6)$$

$G(x)$ 是不等式约束, $H(x)$ 是等式约束。目标函数是优化所要求最优设计性能,一般以结构的某要素作为目标函数,如质量最小或体积最小等。文中以Ansys软件来作结构的优化分析。

2 吊篮有限元分析及优化设计

2.1 吊篮结构

离心机吊篮由2个吊耳、底部平台以及销轴构成,如图1所示。其中,底部平台是由4根梁、加强筋板、底板和顶板焊接在一起的整体,底部平台的顶板上放置试验用模型箱。销轴用于连接底部平台与吊耳,吊篮的上端通过向心关节轴承与转臂系统的拉力带叉耳相连接。吊耳与销轴采用高强度钢34CrNi3Mo,底

部平台采用Q690。离心机运转时,离心机主轴带动转臂旋转,转臂带动吊篮旋转,吊篮及模型箱受到离心力的作用。

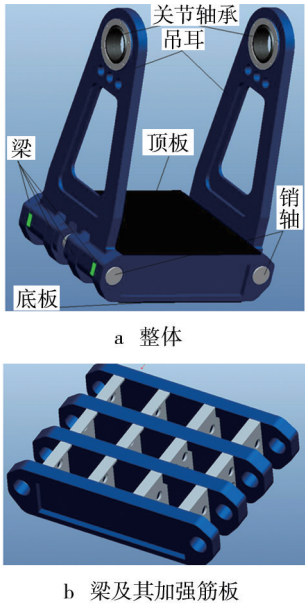


图1 吊篮结构
Fig.1 Structure of nacelle

2.2 有限元分析结果

吊耳上端孔与向心关节轴承为接触配合,连接吊耳与底部平台的销轴与吊耳下端孔和梁的孔也为接触配合,在这些接触配合部位建立面-面接触单元。由于

结构和载荷的对称性,取1/4吊篮来建模。有限元模型如图2所示。在对称面施面对称约束,在吊耳上端向心关节轴承内的销轴两端施加固支约束。

吊篮受到的角速度为19.8 rad/s,模型箱及试验件产生600g-t离心力,以压力的形式作用于吊篮底部平台上。在这两个载荷的作用下,吊篮的力学响应如图3所示。图3表明,吊耳上端孔、吊耳下端孔边缘、梁的孔边缘以及销轴退刀槽边缘存在应力集中,其中,吊耳的最大应力达到了772.9 MPa,销轴的最大等效应力达到1252.6 MPa,超过了材料的屈服强度。吊篮不满足强度要求。

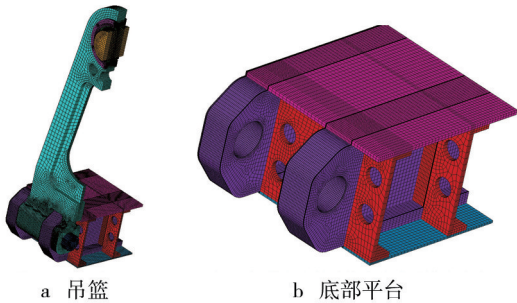


图2 吊篮有限元模型
Fig.2 FEM model of nacelle

2.3 吊篮结构优化设计

2.3.1 吊篮结构优化设计思路

图3的结果表明,吊耳上端孔以及下端销轴的应

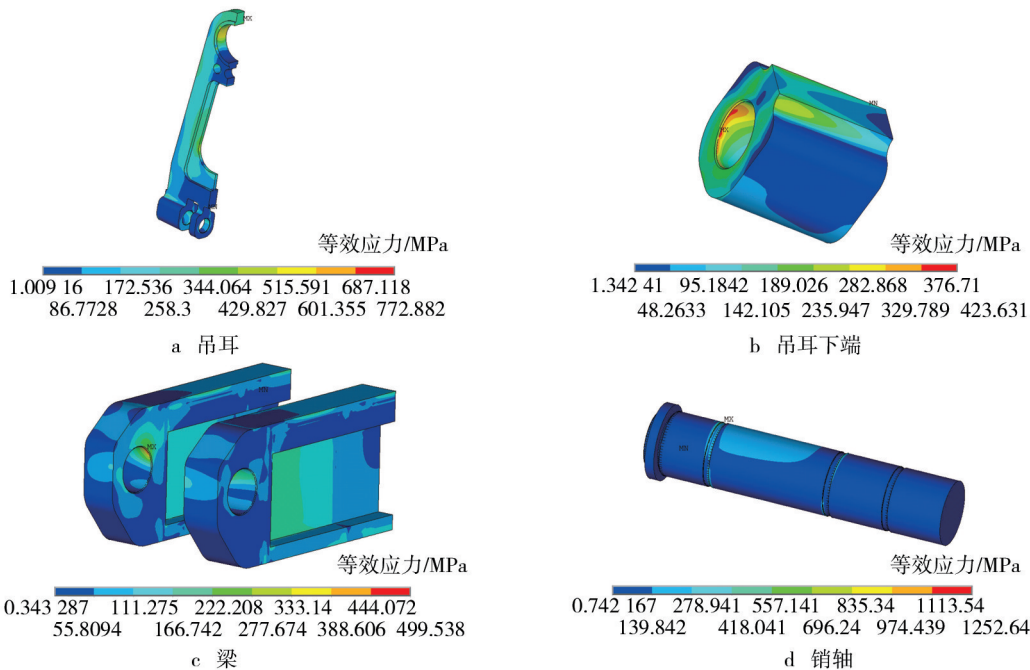


图3 初始结构的等效应力
Fig.3 Nephogram of von Mises stress of original structure

力较大。在离心机工作状态下,结构自身所受的重力产生离心力,质量越大,离心力越大。为减小离心机工作状态下吊篮受到的离心力,吊篮应设计为质量轻而刚度大的结构,据此对吊篮作了优化分析。因吊耳和销轴是关键承力件,吊耳上端是关键承力部位,对吊耳上端以及销轴进行加强,减轻吊篮底部平台的质量以降低吊篮自身的重力。对吊耳、销轴、底部平台以质量最小为目标,以应力满足强度要求为约束条件进行了优化。优化后吊篮结构作了以下改进:

- 1) 增加吊耳上端孔凸台轴向长度及厚度,增加吊耳上端外缘直径;
- 2) 将销轴由实心轴改为空心轴,并增加销轴外径,达到提高销轴抗弯截面模量、减轻销轴质量的目的;

3) 增加加强筋板减重孔直径,梁的中间筋板开减重孔,底板厚度减薄。

图4为优化前、后的结构。

2.3.2 优化后吊篮结构力学响应

图5为优化后吊篮结构的等效应力云图。图5表明,优化后吊篮各部件的应力分布规律与优化前基本一致,但各部件的最大等效应力值较优化前下降很多。优化前、后吊篮结构各部件的最大等效应力见表1。可以看出,优化后吊耳的最大等效应力较优化前下降了48%,销轴的最大等效应力较优化前下降了59%,底部平台的最大等效应力较优化前下降了39%。优化后的吊篮结构的强度满足设计指标要求。

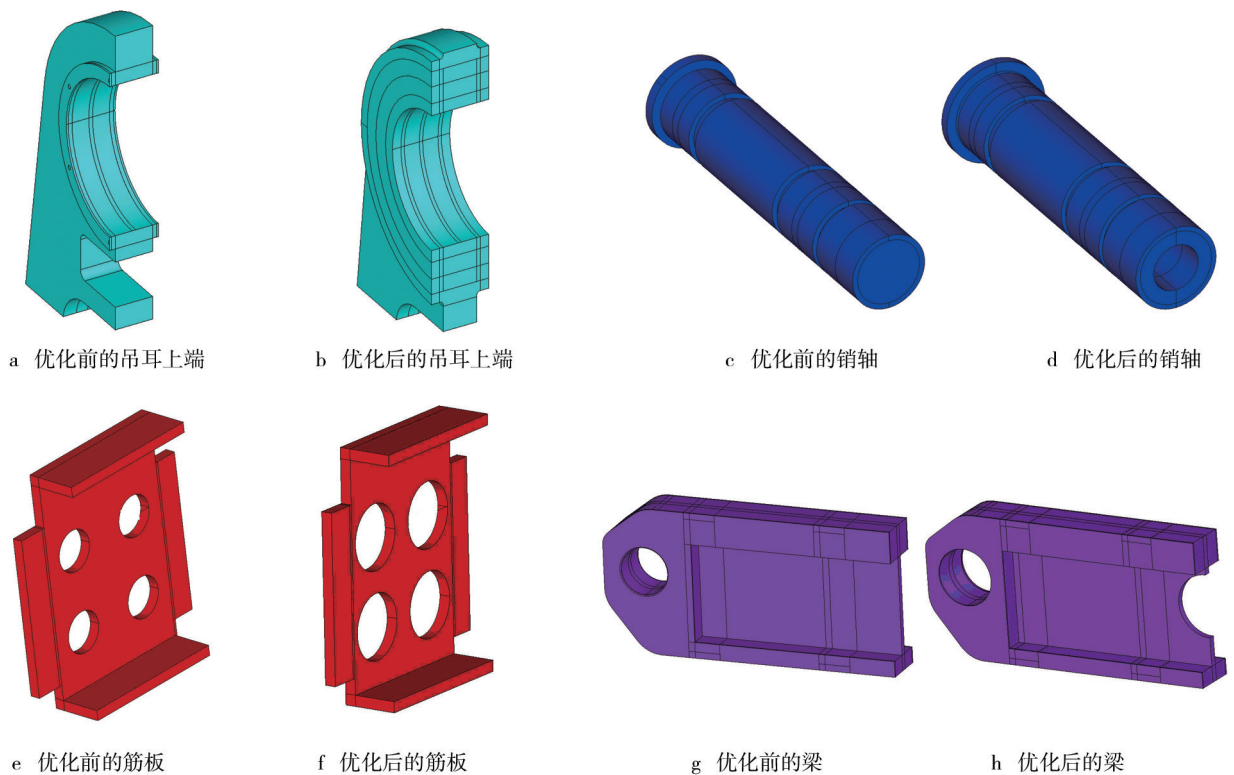


图4 优化前后吊篮部件结构

Fig.4 Comparison of part structure of nacelle before and after optimization

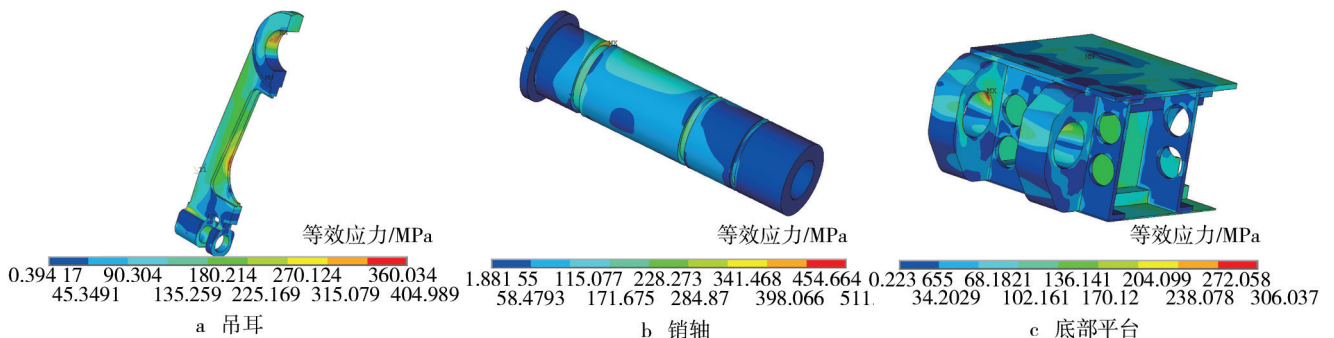


图5 优化结构的等效应力

Fig.5 Von Mises stress of optimizational structure

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 Geltechnical 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]. Ord-nance 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.