

DOI: 10.11779/CJGE2022S2014

# 高速土工离心机转臂设计与研究

许元恒, 冉光斌, 陈红永

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 转臂是高速土工离心机承载的关键部件, 现有集成式转臂所能达到的离心加速度有限, 而采用整体锻造加工、兜装方式负载的整体式转臂则可实现高离心加速度设计。根据整体式转臂的结构特点, 将其分为主臂段和兜装段进行针对性设计, 主臂段采用变截面等强度设计, 兜装段则分别对兜装根部的圆角和兜装梁的轻量化进行了对比设计。采用有限元分析方法对设计结果进行分析校核, 结果表明, 在离心加速度 1700.4g 下该转臂最大应力小于 450 MPa, 安全系数大于 2, 该转臂所能承受离心加速度远超现有水平, 对实际工程有参考意义。

**关键词:** 土工离心机; 转臂; 变截面; 优化设计

中图分类号: TH122, TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2022)S2 - 0062 - 04

**作者简介:** 许元恒(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事离心机结构设计。E-mail: xuyuanheng@foxmail.com。

## Study and design of rotary arm of geotechnical centrifuge with high speed

XU Yuan-heng, RAN Guang-bin, CHEN Hong-yong

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

**Abstract:** The rotary arm is the key component of geotechnical centrifuge to support loads. The centrifugal acceleration of the assembly rotary arm is limited. The high acceleration design of the rotary arm can be realized by using the whole forging process and carrying loads. According to its structural characteristics, the integral rotary arm is divided into the main arm section and the pocket section. The main arm section is designed with variable cross-section and equal strength. For the pocket section, the lightweight design of the fillet at the pocket root and the pocket beam is compared respectively. The finite element analysis method is used to analyze the design results. The results show that the maximum stress of the rotary arm is less than 450 MPa and the safety factor is greater than 2 at 1700.4g. The acceleration of rotary arm exceeds the level of the existing centrifuge, which is of reference significance for practical engineering.

**Key words:** geotechnical centrifuge; rotary arm; variable cross-section; optimization design

## 0 引言

土工离心模型试验是将缩比模型(原模型的  $n$  分之一)置于旋转的离心机中, 利用  $ng$  ( $g$  为重力加速度)离心加速度作用, 来再现原模型的应力状态<sup>[1-3]</sup>。离心机作为离心模型试验的平台, 评价其能力的重要指标为可达到的加速度值(重力加速度的倍数)和容量(负载模型质量与最大离心加速度值的乘积, 单位为  $g \cdot t$ )。随着离心模型试验规模不断增大, 要求新建离心机在容量增大的基础上, 还要实现更高离心加速度, 最高需求已到达 1500g, 然而现有土工离心机最高加速度仅为 350g。转臂作为离心机的主承力件, 其结构承载能力是离心机实现高离心加速度的一项关键因素。

现有土工离心机均采用集成式转臂, 可分为两类: 装配式转臂, 焊接式转臂。装配式转臂的结构形式是, 两侧设置圆柱形或矩形拉力带来承力, 中间设置多处定位环并通过螺钉与拉力带装配。这种转臂的特点是:

受力较好, 成本低, 工艺性好; 由于定位环与拉力带之间有较多装配关系, 致使转臂在工作过程中存在较多约束和较大接触应力, 如要实现高加速度, 怎样克服应力集中将是一大难题。世界上最大容量的离心机美国陆军工程师兵团离心机就是采用的这种转臂, 其容量达到 1260  $g \cdot t$ , 最大加速度达到了 350g<sup>[4]</sup>。焊接式转臂拉力带多为板材或方钢等型材焊接而成, 设多处定位环与拉力带焊接<sup>[5-6]</sup>。这类转臂应用较多, 如日本土木研究所拥有的容量达 400  $g \cdot t$  土工离心机就采用焊接框架式转臂, 最大加速度 150g<sup>[7]</sup>。其特点是: 结构简单, 工艺性好; 焊接处力学特性难以保证, 转臂风阻较大; 大尺寸件之间的焊接用料难以均等, 容易出现较大变形, 导致受力能力差, 易出现转动不平衡, 目前最大离心加速度还未突破 150g。

为了让土工离心机实现更高的离心加速度, 笔者所在团队提出了一种整体锻造加工转臂, 同时采用兜装方式承载。然而离心加速度越高, 整体式转臂内部及兜装梁根部的应力也越高, 甚至超过材料极限。笔者合理设计一种整体锻造加工转臂式结构, 有效半径为 3 m, 在安全裕度为 2, 负载 10 kN 的条件下可实现 1700.4g 的离心机加速度。

## 1 转臂工况

离心机结构如图 1 所示, 负载采用兜装方式安装在转臂两端, 转臂被传动支承可旋转支承, 在传动支承下方的电机通过主轴带动转臂旋转。离心机有效半径  $r'$  (单位: m) 为负载质心  $C'$  到转臂旋转中心的距离, 离心机对负载产生的离心加速度  $a$  (单位:  $\text{m/s}^2$ ) 与转速  $\omega$  (单位:  $\text{rad/s}$ ) 之间的关系可表示为

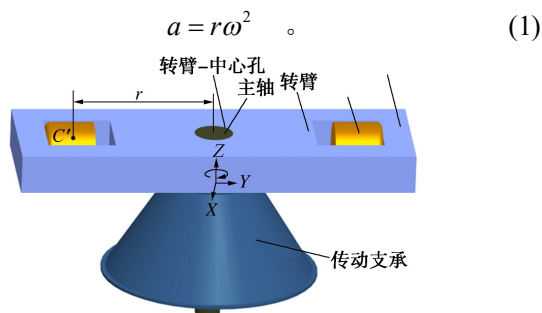


图 1 离心机结构简图

Fig. 1 Structural sketch of centrifuge

负载简化为圆柱体结构, 转臂材料为 35CrNi3MoV, 其力学参数见表 1。

表 1 35CrNi3MoV 力学性能参数

Table 1 Parameters of mechanical performance of 35CrNi3MoV

材料名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa
35CrNi3MoV	7850	210	0.3	900

## 2 设计方法

根据结构因素, 将转臂分段设计 (见图 2), 分为主臂段和兜装段, 兜装段与负载直接接触, 其末端将是主臂段的设计起点。兜装段的设计难点在于兜装梁的高刚度与轻量化设计、兜装根部应力过大, 而主臂段的设计难点则是轻量化设计。

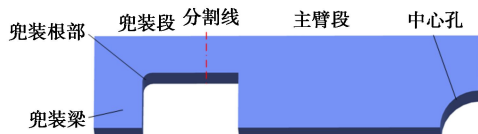


图 2 转臂结构初始 1/8 模型

Fig. 2 1/8 model of initial structure of rotary arm

### 2.1 主臂段轻量化设计

主臂段轻量化设计的极限是全段应力相等, 满足等应力的结构应是顺臂方向截面面积逐渐减小的结构, 其假想形状如图 3 所示。

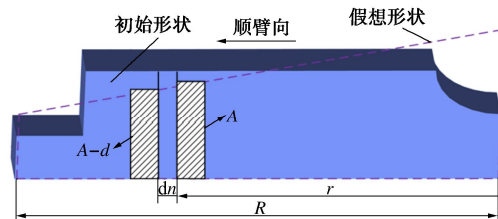


图 3 变截面设计分析

Fig. 3 Design and analysis of variable section

在转臂中取可微小段进行分析, 小段变化质量产生的离心力刚好由截面面积的变化量承担时, 即实现等应力, 则有

$$\delta dA = -A\rho\omega^2 r dr \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为转臂设计应力值;  $A$  为截面面积;  $\rho$  为材料密度;  $r$  为转臂任意点旋转半径;  $\omega$  为离心机转速。变换式 (2) 可得

$$\frac{1}{A} dA = -\frac{\rho}{\delta} \omega^2 r dr \quad (3)$$

对式 (3) 积分,

$$\int \frac{1}{A} dA = \int -\frac{\rho}{\delta} \omega^2 r dr \quad (4)$$

进一步得

$$\ln A = -\frac{\rho}{2\delta} \omega^2 r^2 + C \quad (5)$$

式中,  $C$  为常数。主臂段的设计起点为兜装段截面, 其面积为式 (5) 的特解, 即  $r$  为图 3 中  $R$  处。

$$A_T = Ce^{-\frac{\rho}{2\delta} \omega^2 R^2} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) 得

$$A = A_T e^{\frac{\rho}{2\delta} \omega^2 R^2 - \frac{\rho}{2\delta} \omega^2 r^2} \quad (7)$$

式 (7) 表达了转臂截面面积与转臂半径的关系, 若假设转臂厚度一致, 且为 1 m, 则可为转臂的外轮廓。初设一  $A_T$  值, 并将各值代入式 (7), 可得如图 4 所示外轮廓曲线。

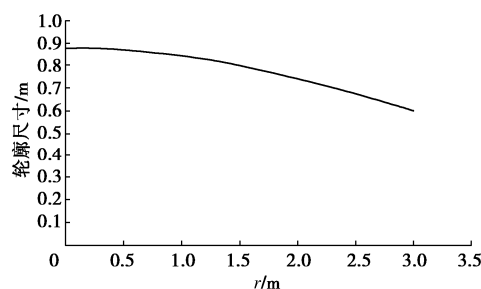


图 4 转臂变截面轮廓曲线

Fig. 4 Curve of variable section profile of rotary arm

## 2.2 兜装段设计

### (1) 兜装梁根部设计

兜装梁根部应力较大, 甚至不恰当的根部设计将导致应力计算不收敛。笔者尝试了不同根部设计: 圆角, 椭圆角, 二次样条曲线圆角, 1300g 下不同根部设计应力比较如图 5 所示, 可以看出二次样条曲线圆角设计最优, 这种设计适应性强, 能很方便地随兜装梁的刚度进行实时调整。

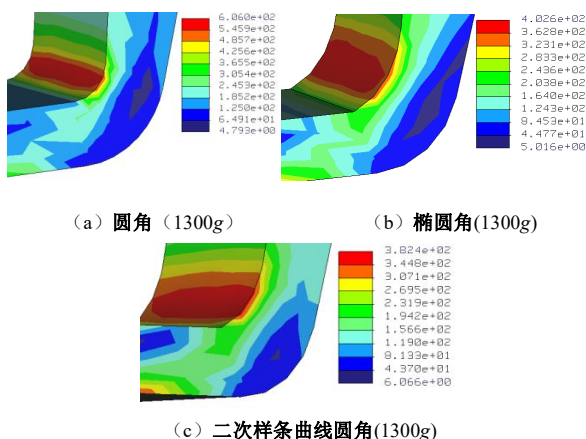


图 5 不同根部设计下的应力比较

Fig. 5 Comparison of stress under design of different roots

### (2) 兜装梁轻量化设计

兜装梁的初始设计结构如图 6 所示。

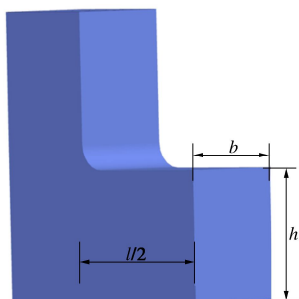


图 6 兜装梁

Fig. 6 Pocket beam

梁的应力估算如下式:

$$\delta_{\max} = \frac{M_{\max}}{W}, \quad (8)$$

式中,  $\delta_{\max}$  为梁上最大应力值,  $M_{\max}$  为梁上最大弯矩,  $W$  为梁截面的抗弯模量。

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{24}, \quad (9)$$

式中,  $q$  为梁平面的均布载荷,  $l$  为梁的跨距。

$$q = \frac{(bhl\rho + m)a}{bl}, \quad (10)$$

式中,  $b$  为梁宽度,  $h$  为梁的高度,  $m$  为负载质量。

$$W = \frac{h^3b}{6}. \quad (11)$$

由式 (8) ~ (11) 可得

$$\delta_{\max} = \frac{al^2(bhl\rho + m)}{4h^3b^2}. \quad (12)$$

式 (12) 表明, 只要有足够的用料梁结构, 能够抵抗无论多大的离心加速度。但在兜装根部设计时, 梁轻量化至关重要, 兜装梁轻量化设计对结构整体产生很大的影响 (见图 7)。从图 7 可以看出通过增加量厚度, 并设椭圆减重孔, 可在提升量刚度同时有效减轻梁的重量。椭圆孔的位置个数和位置可通过尺寸优化方法去确定, 详细方法见文献[8, 9]。

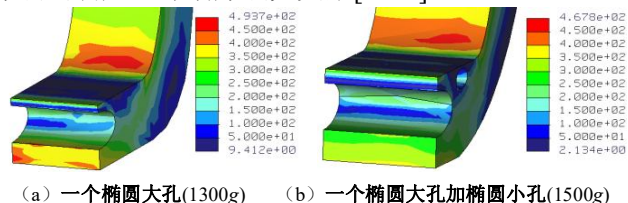


图 7 兜装梁轻量化设计对整体应力的影响举例

Fig. 7 Examples of influence of lightweight design of pocket beams on overall stress

## 3 设计结果

转臂设计结果如图 8 所示, 主臂段采用变截面等强度设计; 合理设计兜装梁刚度与兜装梁根部的关系, 转臂兜装梁采用桥梁轻量化设计的思路, 使负载载荷主要以压应力转向两侧。据分析该结构在 1700.4g 的离心加速度下, 安全系数达到 2 的要求。

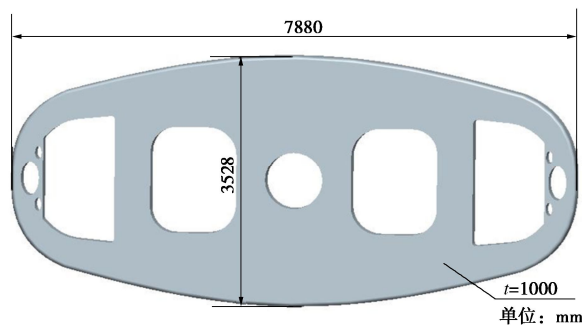


图 8 转臂最终设计结果

Fig. 8 Final design results of rotary arm

## 4 设计验算

### 4.1 边界条件

分析采用 ANSYS workbench17.0 分析软件, 对模型进行简化处理, 去除对结果影响不大且不关心的局部小倒角, 施加的边界条件如下: 采用 1/8 模型开展分析, 在  $xyz$  三方向分别施加对称约束边界条件 (见图 9)。在兜装面建立直径为 1100 mm 的圆面, 施加四分之一负载即 2.5 kN 的集中质量, 集中质量质心在距转轴中心 3 m 处。在中心孔上施加绕中心轴 74.53 rad/s 的转动速度, 对应的离心加速度为 1700.4g。

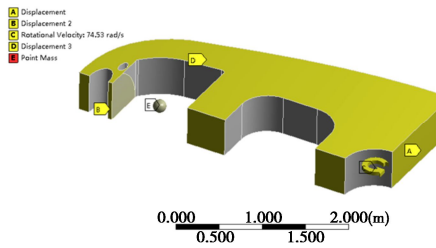


图 9 约束及边界条件示意图

Fig. 9 Schematic of constraints and boundary conditions

#### 4.2 分析结果:

为保证计算精度, 网格均采用六面体单元。为验证局部收敛性, 采用两种网格进行计算, 如图 10 所示, 网格 2 对关注部位进行了加密处理。

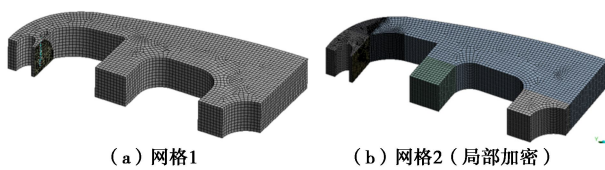


图 10 网格

Fig. 10 Grid

两种网格的计算结果分别如图 11, 12 所示。从图 11, 12 可以看出, 不同密度网格下应力无实质差别, 计算结果是收敛的; 转臂最大应力均小于 450 MPa, 满足安全系数为 2 的要求; 转臂主体的应力较为均匀, 证明变截面等强度设计方法是有效的。

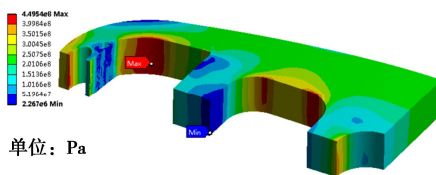


图 11 网格 1 等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress nephogram of Grid 1

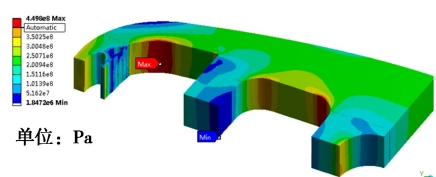


图 12 网格 2 等效应力云图

Fig. 12 Equivalent stress nephogram of Grid 2

## 5 结 论

本文对高速土工离心机整体式转臂进行了分段设计, 在不断优化和迭代后, 最终设计的转臂实现了超离心机加速度承载能力。具体可得出以下 4 点结论: ①找到一种转臂变截面等强度设计方法; ②二次样条圆角能有效降低兜装梁根部应力; ③兜装梁轻量设计能有效降低结构应力; ④所设计的结构能承载 1700.4g

的离心加速度, 可作为实际工程应用的参考。

相较于传统结构, 整体式转臂加工难度更大、加工周期更长, 而如何改善其工艺性有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机概论与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (JIA Pu-zhao. Steady-State Acceleration Simulation Test Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 黎启胜, 许元恒, 罗 龙. 科学试验用离心机发展综述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 1 - 10, 87. (LI Qi-sheng, XU Yuan-heng, LUO Long. Review on development of centrifuge for scientific tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 1 - 10, 87. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] LEDBETTER R H, STEEDMAN R S, SCHOFIELD A N, et al. US Army's engineering centrifuge: design[C]// Proc Centrifuge 92, Lisboa, 1992.
- [5] 陈 磊, 洪建忠, 赵世鹏, 等. 长转臂离心机转臂设计[J]. 装备环境工程, 2015(5): 121 - 124, 135. (CHEN Lei, HONG Jian-zhong, ZHAO Shi-peng, et al. Design of rotating arm of long-arm centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015(5): 121 - 124, 135. (in Chinese))
- [6] 冉光斌, 余绍蓉, 刘小刚, 等. 土工二维振动离心机转臂的设计研究[J]. 工程设计学报, 2013, 20(1): 70 - 74. (RAN Guang-bin, YU Shao-rong, LIU Xiao-gang, et al. Research and design of swing arm system of two-dimensional geotechnical centrifugal shaker[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2013, 20(1): 70 - 74. (in Chinese))
- [7] TERASHI M. Development of PHRI Geotechnical Centrifuge and Its Application[R]. Tokyo: Port and Harbour Research Institute, 1985.
- [8] 张继春, 徐 斌, 林 波. Pro/ENGINEER Wildfire 结构分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. (ZHANG Ji-chun, XU Bin, LIN Bo. Pro/ENGINEER Wildfire Wildfire Structure Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese))
- [9] 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, et al. Design and optimization method of the suspended basket of geotechnical centrifuge[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(11): 68 - 70. (in Chinese))

(编校: 孙振远)