

转臂式高速离心机减阻设计及机室流场特性研究

陈红永^{1,2}, 杨鑫¹, 黎启胜¹, 龚志斌¹, 宋琼¹, 李心耀¹, 尹益辉^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 621999 绵阳;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 621999 绵阳)

摘 要: 风阻功率是大型转臂式土工离心机驱动功率设计的重要依据, 机室流场具有随流、温升、流速高等特点。为降低风阻需对转臂或吊篮采取整流减阻设计。针对两型分别采用转臂整流和整流罩减阻的离心机, 开展了基于 CFD (computational fluid dynamics) 的气动特性仿真, 通过优化仿真参数获得离心机高速运行时的机室内部流场流场特性及离心机风阻功率, 并通过型线设计对离心机整流罩进行了气动阻力系数优化。研究表明: 高速离心机低气压运行时机室下壁面的摩擦阻力矩占主导, 高于周向壁面的摩擦阻力矩; 吊篮不采用整流罩时, 在迎风端面肩部出现了流动分离, 压差阻力较大; 采用整流罩后, 吊篮前缘肩部的分离被削弱, 总阻力系数大幅降低。研究表明对于高速离心机开展整流设计是必要的, 通过转臂外形设计及整流罩设计, 可有效降低风阻功率, 更有益于控制机室温升。

关键词: 转臂式离心机; 高速转动; 流场; CFD; 整流罩

中图分类号: TU43; O351.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.015

文章编号: 1000-4939(2026)01-0164-07 **CSTR:** 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.015

Drag reduction and air flow field characteristics of high speed centrifuge chamber

CHEN Hongyong^{1,2}, YANG Xin¹, LI Qisheng¹, GONG Zhibin¹, SONG Qiong¹, LI Xinyao¹, YIN Yihui^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, 621999 Mianyang, China;

2. Sichuan Key Laboratory of Impact and Vibration of Engineering Materials and Structures, 621999 Mianyang, China)

Abstract: The wind resistance power is an important basis for the design of the driving power of the large rotary arm geotechnical centrifuge. The flow field in the chamber has the characteristics of following flow, temperature rise, and high flow rate. In order to reduce the wind resistance, it is necessary to adopt rectification and drag reduction design for the swing arm or cradle. For the two types of centrifuges that adopt rotary arm rectification and fairing drag reduction, the aerodynamic characteristics simulation based on computational fluid dynamics (CFD) is carried out. The flow field characteristics of the internal flow field of the centrifuge chamber and the wind resistance power of the centrifuge are obtained by optimizing the

收稿日期: 2023-05-03

基金项目: 十三五国家重大科研基础设施建设资助项目 (No. CHIEF1500)

通信作者: 杨鑫, 副研究员. E-mail: 413yangx@caep.cn

引用格式: 陈红永, 杨鑫, 黎启胜, 等. 转臂式高速离心机减阻设计及机室流场特性研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 164-170.

CHEN Hongyong, YANG Xin, LI Qisheng, et al. Drag reduction and air flow field characteristics of high speed centrifuge chamber[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 164-170.

simulation parameters, and the aerodynamic resistance coefficient of the centrifuge fairing is optimized through the profile design. The results show that when the high-speed centrifuge operates at low pressure, the friction resistance moment on the lower wall of the chamber is dominant, higher than that on the circumferential wall. When the basket does not use the fairing, the flow separation occurs at the shoulder of the windward end face, and the pressure difference resistance is large. After the fairing is adopted, the separation of the front edge shoulder of the basket is weakened, and the total drag coefficient is greatly reduced. The research shows that it is necessary to carry out rectification design for high-speed centrifuge. Through the shape design of the rotating arm and the design of the fairing, the wind resistance power can be effectively reduced, and it is more beneficial for controlling the room temperature rise of the centrifuge.

Key words: arm centrifuge; high velocity rotation; air flow field; CFD; fairing

大型土工离心机是开展岩土模型试验的重要设备,在土木、岩土工程等领域有着广泛的应用^[1-5]。随着工程需求向大型工程和深地研究拓展,土工离心机也正向高速和重载方向发展^[6-8]。离心机风阻功率对于温控系统设计、驱动电机选型等至关重要,估算风阻功率需要掌握离心机运行过程中机室流场特性。

常用的离心机风阻功率估算方法有基于半解析法的工程估算方法等。黄鹏等^[9]基于动量矩定理和流场的线性分布假设等半解析方法,推导了随流比参数,分析了离心机启动过程及运行时的风阻功率;尹益辉等通过将机室中空气与离心机转臂作用力矩分为迎风面、顺风面和背风面力矩,从力矩平衡条件推导了驱动功率向风阻产热的转化关系,分别针对密闭型机室^[10]和开口型机室^[11]开展了风阻功率分析;王永志等^[12]建立了大型土工离心机风阻功率简化模型和计算方法,采用两台离心机实测数据进行了对比验证;郝雨等^[13]采用 CFD (computational fluid dynamics) 方法分析了某中低速土工离心机的风阻功率,获得了机室流场特性,并与实测值进行对比验证;郭铁楠等^[14]利用 k - ω 湍流模型和多参考系方法,对 ZJU400 土工离心机进行机室流场数值模拟,将模拟风阻功率、流场和温度场结果与实验进行对比验证,风阻功率与实测数据偏差 $<10\%$;徐太栋等^[15]采用 RNG k - ε 湍流模型与增强型近壁面方法对精密离心机的风阻功率进行了 CFD 仿真,通过分析获得了离心机负载的风阻波动最小的整流方案设计。以上研究对象转速较低,分析机室气动特性时无需特殊的计算策略,对于高速离心机转臂端部线速度较高,需要发展新的计算策略;且针对高速运行的离心机,需要采用特殊的减阻设计,对其转臂或吊篮采用整流气动整形优化设计,也需要对机室流场

特性进行仿真研究。

通过开展转臂式高速离心机运行的流场分析理论讨论,针对某型转臂整流(无整流罩)高速离心机开展了机室流场分析,获得了机室的压力等分布规律;建立了某型带整流罩式高速-重载一体离心机的 CFD 分析模型,开展了整流罩对机室流场特性的影响分析。

1 离心机机室流场 CFD 分析方法

表征流体运动的物理模型是流体力学方程组,包括连续性方程、动量方程和能量方程。离心机机室内流场的模拟实质上就是对可压缩理想气体 N-S 方程的求解。在机室内流场计算问题中,雷诺数 (Re) 通常比较高,离心机吊篮及转臂周围的流场将会出现湍流及大尺度分离现象。湍流流体质点的速度、压力等物理量会在时间和空间上出现脉动值。湍流脉动尺度小并且频率很高,因此直接模拟会带来巨大的计算量。为了考虑湍流效应,通常在计算中引入脉动项来表征湍流运动,离心机流场满足以下控制方程。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_i \\ \frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' \Phi'} \right) + S_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为流体速度; t 为时间; μ 为动力学黏性系数; $\bar{u}$ 为脉动速度; S 为输运方程源项。式(1)中3式分别为张量形式的时均连续性方程、雷诺平均 N-S 方程和标量的输运方程。与通常的 N-S

方程相比,时均方程中多出的一项定义为雷诺应力项。

离心机运行时,转臂会带动机室内空气旋转产生封闭或开口旋转流场,基于 CFD 开展机室流场仿真的计算方法可分为 3 类:旋转坐标系法、滑移网格法和动网格法。旋转坐标系法实际上是在某个旋转角速度下每个单元体的稳态近似解,其求解得到的是离心机流场充分发展后的平均流场。如果要得到离心机在不同时刻的瞬态流场,则需要利用滑移网格法或者动网格计算非稳态流场。利用滑移网格技术可将机室内流场区域分为靠近离心机周围的旋转运动区域和靠近机室壁面附近的静止区域,旋转区域和静止区域为以转轴为中心的同圆心圆域,并且在

两个区域之间形成网格分界面。旋转域与静止域相互之间沿着分界面转动,并且在分界面上进行数值交换。需要说明的是,高速离心机吊篮线速度常会达到 0.5 马赫以上,因此需采用可压缩气体模型。同时,为了保证计算的精度及稳定性,采用了如下的计算策略:首先采用多重参考系法以较低的转速进行计算,待流场收敛后逐步增加转速直到达到预定值;其次以多重参考系法计算得到的稳态流场作为滑移网格计算非稳态流场的初始流场开始计算。这样的计算策略相对于直接进行滑移网格计算避免了初始时刻沿轴向的较大压力梯度,提高了计算的稳定性。

所采用计算方法及计算参数设置见表 1。

表 1 计算方法及参数设置

Tab. 1 Calculation method and parameter settings

条目	方法或参数
N-S 方程求解器	密度基隐式求解器
湍流模型	RNG $k-\varepsilon$, 尺度化壁面函数
离散方法	流动参数采用二阶迎风格式、湍流参数采用 Quick 格式
旋转流场算法	MRF(稳态)转速 70 rad/s
机室空气	可压缩理想气体
边界条件	离心机采用绝热壁,机室上、下壁面采用绝热壁,机室圆周面采用等温壁(300 K)
网格建模	离心机表面及机室壁面设置边界层网格, $y^+ = 20$, 边界层厚度 5 mm, 首层网格为 0.01 mm, 边界层网格 21 层;在吊篮周围采用局部分块加密,机室流场整体计算网格数为 1.2×10^7

2 转臂整流高速离心机机室流场分析

基于前文仿真方法,对某转臂整流高速离心机模型开展了流场仿真,该型离心机由于运转速度和 g 值过高,附加整流罩会导致强度和连接刚度问题,无法采用附加整流罩方式整流,故通过将转臂设计为减阻气动外形以达到整流的目的。离心机转臂外形如图 1 所示,转臂半径 3.5 m,宽度和高度分别为 1.2 m 和 0.8 m,运行转速为 70 rad/s。因高速离心机在常压下运行会导致温升过高,因此设计在低气压下运行,考虑机室壁面粗糙度影响,设置机室初始流场压力为 3 kPa。机室压力分布如图 2 所示;图 3 所示为沿机室半径方向的静压分布曲线;机室周向壁面压力分布如图 4 所示;图 5 和图 6 为机室周向壁面上不同高度处的压力分布曲线。图 6 中横坐标为周向角度,纵坐标为壁面的静压。 z 为不同高度, $z=0$ 为转臂中心截面位置。 0° 位置代表 $x = \max, y =$

0 所处的位置。

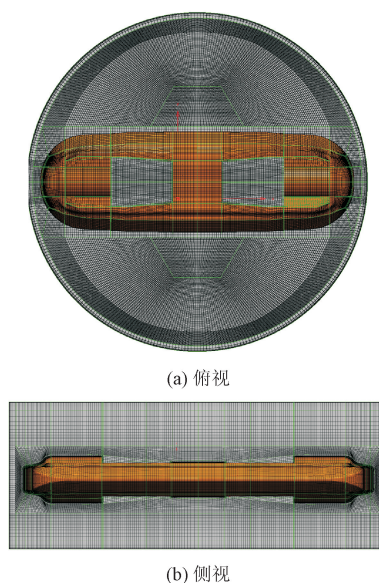


图 1 转臂整流高速离心机模型

Fig. 1 Model of fairing shape arm high velocity centrifuge

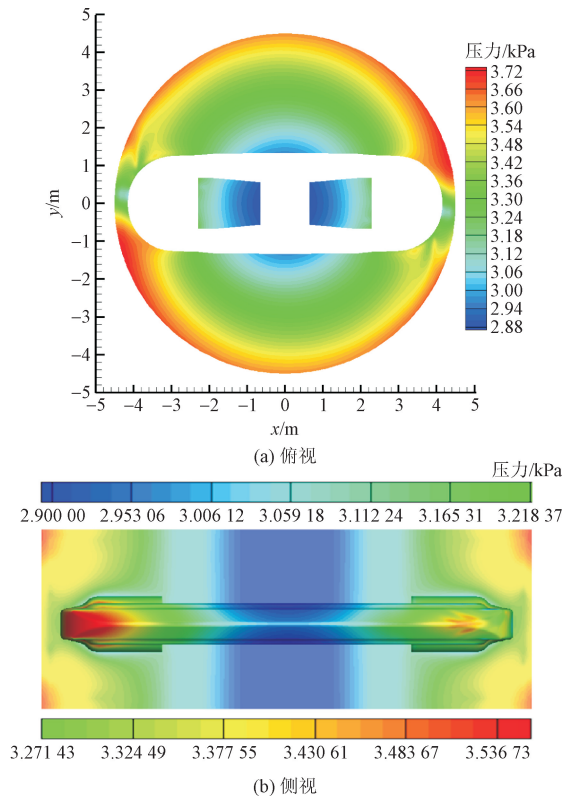


图2 3 kPa 低气压下离心机 70 rad/s 速度运行机室压力分布

Fig. 2 Distribution of pressure in chamber under low atmospheric pressure of 3 kPa and 70 rad/s

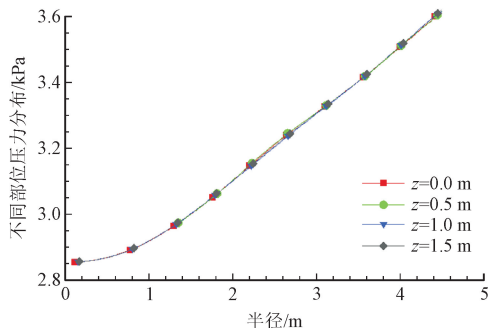


图3 沿机室半径方向压力分布曲线

Fig. 3 Distribution curve of pressure in chamber along the diameter direction

由图2和图3分析可知,机室中心位置处压力约为 2.85 kPa,机室壁面附近压力约为 3.65 kPa,压力沿半径方向的递增趋势,且越靠近机室壁面,压力梯度越大。

由图4~图6分析可知,机室圆周面上压力分布与转臂位置有关,靠近转臂端头附近压力较高,在切向前部形成低压区,在尾迹区形成高压区;距机室中心相同的位置处,机室压力沿天地方向分布差别不明显,迎风侧与机室壁面之间区域压力略高,这是由于机室随流空气在离心机运行过程中,被转臂端面

与机室壁面压缩所致。流场分析结果与文献[13]结果一致。

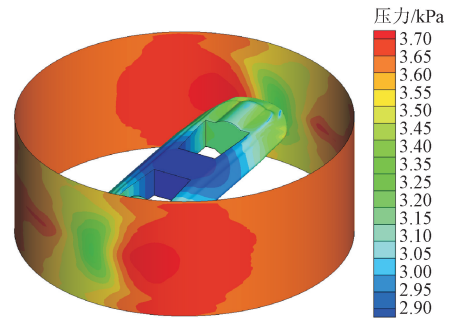


图4 机室圆周壁压力分布云图

Fig. 4 Pressure distribution nephogram of chamber wall along the square

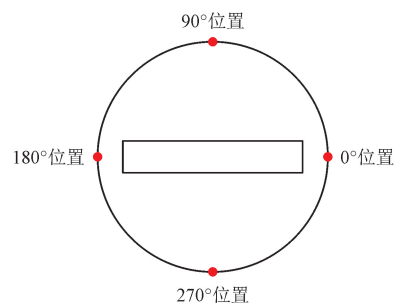


图5 角度位置示意图

Fig. 5 Sketch of the angle positions

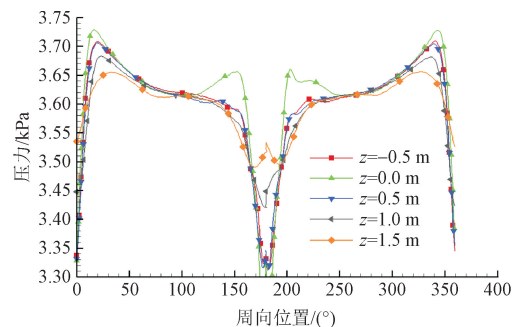


图6 机室周向壁面上不同高度处的压力分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of pressure at different height position of the chamber square wall

图7为3 kPa 低气压工况下速度分布云图,图8所示为沿机室半径方向的速度分布曲线。图7和图8结果表明,机室内速度分布情况与压力分布类似,沿机室半径方向呈逐渐递增的分布规律。机室内速度最大区域出现在整流罩外沿及整流罩尾迹区域,最大速度约为 310 m/s。速度沿半径方向递增。机室流场分布规律与郭轶楠等^[14]研究结果类似。

表2为机室3 kPa 条件下高速离心机所受气动力矩及风阻功率,以及机室壁面所受气动力矩情况,在此条件下高速离心机风阻功率约为 134.2 kW。从力矩构成来看,机室下壁面力矩为 1.119 5 kN · m,周

壁为 $0.762 \text{ N} \cdot \text{m}$, 下壁面为周壁面的约 1.5 倍, 可见下壁面摩擦力矩占主导。

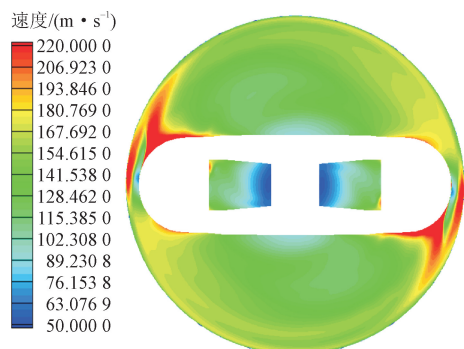


图7 3 kPa 低气压工况下速度分布云图

Fig. 7 Distribution nephogram of velocity in chamber under 3 kPa low pressure condition

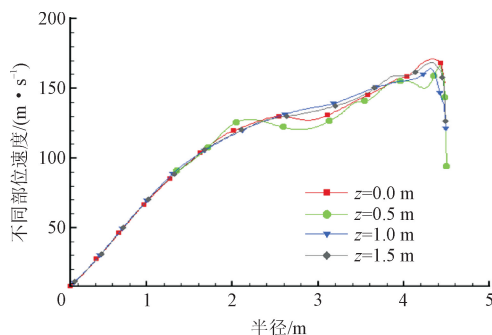


图8 沿机室半径方向速度分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of velocity in chamber along the diameter direction

表2 3 kPa 条件下离心机、机室壁面受力及风阻功率

Tab. 2 Aerodynamic force of chamber wall and wind resistance power under atmospheric pressure of 3 kPa

项目	所受力矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	占比/%	风阻功率/ kW
高速离心机	1.916 7	—	134.2
机室下壁面	1.119 5	58.4	—
机室周壁面	0.762 0	41.6	—

3 有整流罩离心机减阻分析

3.1 整流罩气动外形设计

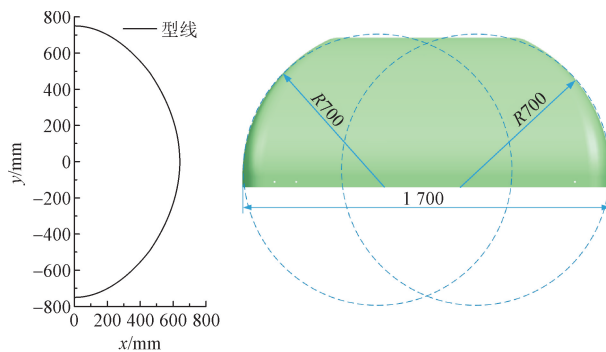
针对另一高速-重载一体大型离心机, 开展其在离心加速度为 $200g$ (运行转速 16.7 rad/s) 的运行的土工离心机开展吊篮整流罩设计。考虑机室内空气随流影响, 吊篮整流罩最大来流速度约为 0.15 马赫, 处于亚声速区域, 因此可考虑采用翼型前缘弧段作为整流罩迎风面和背风面外形。整流罩气动外形主体采用翼型方案、两端采用圆弧面。翼型型线采

用 Bernstein 多项式表达如下

$$\eta(\psi) = \psi^{N_{c1}} (1 - \psi)^{N_{c2}} \sum_{i=0}^n A_i \frac{n!}{i! (n-i)!} \psi^i \cdot (1 - \psi)^{n-i} + \psi t \quad (2)$$

式中: ψ 和 η 为翼型外形坐标; n 为 Bernstein 多项式阶数; N_{c1} 、 N_{c2} 为翼型型线参数; A_i 为 Bernstein 多项式阶数系数。

根据吊篮几何外形尺寸, 采用全包围方式, 处于低亚声速区域, 因此采用翼型前缘弧段作为侧面整流罩迎风侧和背风侧外形。如图 9(a) 所示为侧面整流罩气动外形型线, 侧面整流罩沿天地方向对称。考虑到机室内随流空气绕离心机转轴旋转, 为进一步减小气动阻力, 在整流罩尾端以圆弧面收尾, 圆弧面接近随流空气旋转速度方向, 如图 9(b) 所示。



(a) 侧面整流罩气动外形型线 (b) 整流罩两端圆弧收尾示意图

图9 整流罩气动外形设计

Fig. 9 Aerodynamic design of the fairing shape

3.2 整流罩气动阻力分析

为分析整流罩的减阻效果, 按照 3.1 中气动外形对吊篮整流罩和未整流罩 2 种工况下吊篮的气动性能进行 CFD 仿真。若考虑吊篮未加装整流罩, 其垂直于转臂的横截面为长方形。图 10 给出了计算得到的吊篮横截面的压力分布云图和速度等值线图。

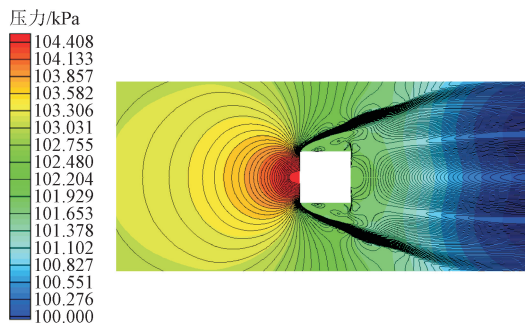


图10 未整流吊篮横截面压力分布云图

Fig. 10 Pressure distribution contour at the cross-section of the centrifuge basket without fairing

由图 10 可知, 当气流流经吊篮时, 在吊篮迎风

端面肩部出现了流动分离,且在吊篮背风面也出现了大尺度的分离。从压力云图可以看出,吊篮前缘压力升高,后缘压力降低,造成了较大的压差阻力。

图11为离心机转臂及整流罩表面压力分布云图。由图11可知,机室内流场压力沿机室半径方向逐渐升高,整流罩迎风侧外缘部位压力明显高于其余部位。从整流罩局部截面图可知,上下盖板与模型箱之间空腔区域在离心场作用下压力自开口处至尾端呈现增大的趋势。内部空腔区域压力大于外部环境压力,致使盖板承受沿面法向向外的压力载荷,在整流罩开展结构设计时需考虑气动载荷作用。

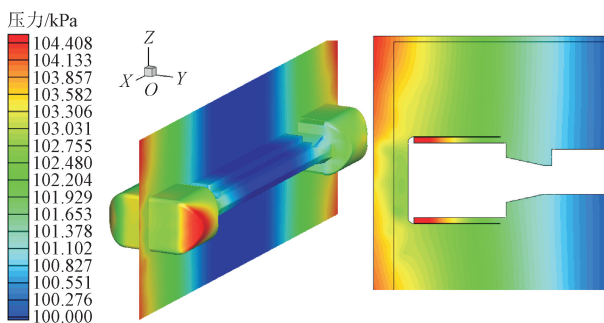


图11 离心机转臂及整流罩表面压力分布云图

Fig. 11 Pressure distribution nephogram on the surface of centrifuge arm and fairing

图12为整流后机室周向吊篮横截面压力分布云图及速度等值线图,分析可知,加装整流罩后吊篮前缘肩部的分离被削弱,背风侧未出现大尺度分离流动。

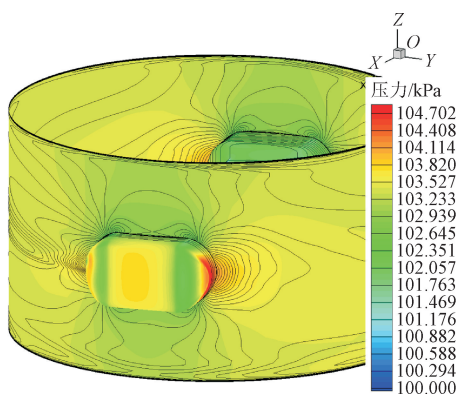


图12 机室周向截面压力云图及速度等值线图

Fig. 12 Pressure distribution nephogram and air velocity contour at the cross-section of the centrifuge chamber square

表3所示为整流前后吊篮阻力系数对比。从表中可知,虽然加装整流罩后吊篮的黏性阻力系数会略微增大,但是却可以很大程度上减小压差阻力系数,最终总的阻力系数大幅减小。因此针对高速离心机吊篮开展整流罩设计,可以大大降低离心机运

行时的风阻功率,对离心机温控设计有益。

表3 整流前后吊篮阻力系数对比

Tab. 3 Aerodynamic drag coefficient of the centrifuge basket with and without fairing

工况	压差阻力系数	黏性阻力系数	总阻力系数
未整流(仿真)	1.05	0.03	1.08
加装整流罩	0.35	0.05	0.40

4 结 论

本研究针对两型转臂外形整流及整流罩减阻的高速离心机,开展了机室流场特性仿真研究,获得以下结论。

1)机室内流场压力沿半径方向递增,且越靠近机室壁面,压力梯度越大;同一位置处机室压力沿天地方向分布差别不明显,迎风侧与机室壁面之间区域压力略高。

2)机室内速度分布情况与压力分布类似,沿机室半径方向呈递增;机室内速度最大区域出现在转臂/吊篮外沿及其尾迹区域。

3)高速离心机低气压运行时机室下壁面的摩擦阻力矩占主导,高于周向壁面的摩擦阻力矩。

4)吊篮不采用整流罩时,在迎风端面肩部出现了流动分离,且在吊篮背风面也出现了大尺度的分离,导致压差阻力较大;采用整流罩后,吊篮前缘肩部的分离被削弱,总阻力系数大幅降低。

参考文献:

- [1] 赵玉虎,罗昭宇,林明. 土工离心机研制概述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 19-27.
ZHAO Yuhu, LUO Zhaoyu, LIN Ming. Overview of development of geotechnical centrifuge[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(5): 19-27(in Chinese).
- [2] 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 Changjiang River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 80-84(in Chinese).
- [3] 陈正发,于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 4026-4033.
CHEN Zhenghua, YU Yuzhen. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(S2): 4026-4033(in Chinese).

- [4] 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 Yonghui, LI Qingyun, RAO Xibao, et al. Application and development of geotechnical centrifuge in Yangtze River scientific research institute[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 141-147 (in Chinese).
- [5] DOU Y, JING P. Development of NHRI - 400g. t geotechnical centrifuge[J]. Centrifuge, 1994, 94: 69-76.
- [6] 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.
LI Qisheng, XU Yuanheng, LUO Long. Review on development of centrifuge for scientific tests[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(5): 1-10 (in Chinese).
- [7] 陈云敏, 韩超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1887-1894.
CHEN Yunmin, HAN Chao, LING Daosheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(12): 1887-1894 (in Chinese).
- [8] 冯振, 殷跃平. 我国土工离心模型试验技术发展综述[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 323-331.
FENG Zhen, YIN Yueping. Statw of the art review of geotechnical centrifuge modeling test in China[J]. Journal of engineering geology, 2011, 19(3): 323-331 (in Chinese).
- [9] 黄鹏, 尹益辉, 李顺利, 等. 离心机风阻功率及启动过程分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 105-110.
HUANG Peng, YIN Yihui, LI Shunli, et al. Analysis of wind resistance power and starting process of centrifuge[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(5): 105-110 (in Chinese).
- [10] 尹益辉, 余绍蓉, 冯晓军, 等. 密闭机室型土工离心机的风阻功率[J]. 绵阳师范学院学报, 2010, 29(2): 1-5.
YIN Yihui, YU Shaorong, FENG Xiaojun, et al. Aerodynamic power of geotechnical centrifuges with closed chamber[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2010, 29(2): 1-5 (in Chinese).
- [11] 尹益辉, 余绍蓉, 冯晓军, 等. 机室开有通风口的土工离心机的风阻功率[J]. 绵阳师范学院学报, 2010, 29(5): 1-5.
YIN Yihui, YU Shaorong, FENG Xiaojun, et al. Aerodynamic power of geotechnical centrifuges with holed chamber[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2010, 29(5): 1-5 (in Chinese).
- [12] 王永志, 陈卓识, 孙锐. 土工离心机稳态风阻功率简化估算方法与冷却设计优化[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增刊1): 909-914.
WANG Yongzhi, CHEN Zhuoshi, SUN Rui. Simplified calculation technique of steady-state wind resistance power for geotechnical centrifuge and optimization cooling design[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014, 34(S1): 909-914 (in Chinese).
- [13] 郝雨, 尹益辉, 万强, 等. 基于 CFD 的土工离心机风阻及流场特性分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 52-56.
HAO Yu, YIN Yihui, WAN Qiang, et al. Wind resistance and flow field characteristic analysis of geotechnical centrifuges based on CFD[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(2): 52-56 (in Chinese).
- [14] 郭铁楠, 杨毅, 王亚林, 等. 基于 ZJU400 土工离心机的 CFD 模拟方法[J]. 装备环境工程, 2020, 17(11): 85-89.
GUO Yinan, YANG Yi, WANG Yalin, et al. CFD simulation method based on ZJU400 geotechnical centrifuge[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(11): 85-89 (in Chinese).
- [15] 徐太栋, 杜平安, 王炼, 等. 基于 CFD 的精密离心机风阻优化[J]. 工程设计学报, 2014, 21(6): 572-577.
XU Taidong, DU Ping'an, WANG Lian, et al. Optimization design of wind resistance for precision centrifuge based on CFD[J]. Journal of engineering design, 2014, 21(6): 572-577 (in Chinese).

(编辑 张璐)