基于 CFD 的土工离心机风阻及流场特性分析

郝雨，尹益辉，万强，黎启胜
（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 估计土工离心机的风阻功率。**方法** 针对一稳态运行的中低速土工离心机，利用多参考坐标系（MRF）模拟转臂与墙壁之间的相对运动，对离心机稳态运行时机室内的空气流场进行 CFD 仿真，对计算流体力学仿真、解析公式方法和试验的风阻功率进行对比。**结果** 三种方法得到的风阻功率较为接近，验证了数值仿真方法的正确性。同时，研究了机室内空气流速和压力的空间分布特征，验证了经典解析公式的假设合理性。**结论** CFD 仿真方法避免了传统解析方法对试验数据的依赖和参数选取主观性，能够得到较高精度的分析结果，该研究为基于计算流体力学的土工离心机的高置信度风阻计算打下了基础。

关键词：土工离心机；计算流体力学；旋转；风阻；流场
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2018.02.010
中图分类号：TU41 **文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2018)02-0052-05

Wind Resistance and Flow Field Characteristic Analysis of Geotechnical Centrifuges Based on CFD

HAO Yu, *YIN Yi-hui*, *WAN Qiang*, *LI Qi-sheng*
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To estimate wind resistance power of geotechnical centrifuge. **Methods** Aiming at a low-to medium-speed geotechnical centrifuge rotating at stable state, multi-reference frames (MRF) was used to simulate the relative rotation between the arm and the wall, to carry out CFD simulation for the flow field in the centrifuge chamber to compare computational fluid mechanic simulation, analytic formula and wind resistance power of test. **Results** Close results of wind resistance power were obtained from three methods, verifying the correctness of numerical simulation. Furthermore, spatial distribution of flow velocity and pressure in the chamber was studied and the assumptions in traditional theoretical method were examined. **Conclusion** CFD simulation method avoids the dependency on test data and objectivity of parameter selection of traditional analytical methods. This study lays a foundation for high-fidelity estimation of centrifuge wind resistance based on computational fluid dynamics.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; computational fluid dynamics; rotation; wind resistance; flow field

近四十年来，土工离心模拟试验技术一直受到国内、外岩土工程界的关注，时至今日，土工离心机研制热潮方兴未艾，并正在向高速、巨型离心机方向发展。在土工离心机研制过程中，需要准确估计其风阻功率，以便合理选择其驱动电机和设计其温控系统[1]。

目前，对于土工离心机的风阻功率，通常采用简化的解析公式进行计算，常用的方法有 Actronic 公司的估算法、美国国家土工离心机的估算法、中国直升飞机研究所的估算法及中国工程物理研究院总体工程研究所的估算法等[2]。尹益辉、黄鹏等针对不同开

收稿日期：2017-09-29；**修订日期：**2017-10-29
基金项目：国家自然科学基金（11702279）；中国工程物理研究院总体工程研究所统筹规划项目（TCSQ041607）
作者简介：郝雨（1988—），男，河北石家庄人，博士，主要研究方向为流固耦合动力学。

口条件和结构形式的低速土工离心机风阻功率进行了解析公式研究[3-5]。尽管这些估算方法的公式各有不同，但一个共同的特点是假设机室内空气围绕对称轴做刚性转动。这些解析公式中，一些关键参数值的取定带有人为模糊性，没有将其与离心机的荷载容量、转臂和模型箱的构型等指标或特征数据充分关联，也因缺少充分的实测数据支持，以至令人不能充分确信计算结果的精度。

尽管针对土工离心机风阻功率也进行了一定的试验研究[6-7]，但目前的试验数据都是针对低速（最大线速度一般不高于 0.2 Ma）离心机，且试验数据往往只关注了风阻功率和气动热等积分数据，对机室内流场分布关注较少。

为了验证土工离心机机室内流场分布情况，为风阻功率的高可信度估算提供依据，计算流体力学（CFD）是一种较好的替代途径。尽管 CFD 方法在涡轮[8]、风机[9]等旋转机械中已有了较广泛的应用，但截至目前为止，尚没有发现针对土工离心机的 CFD 研究。

徐太栋等[10]分别利用 CFD 的稳态和瞬态方法，计算了精密离心机的风阻，并对不同外形的负载整流结构进行了优化，为离心机的风阻计算打下了方法基础。相比于精密离心机，土工离心机工作舱体积更大，转速更高，对计算提出了更高要求。

文中使用 Fluent 软件对一中低速土工离心机进行了建模、计算，借助已有实测值和解析公式计算值验证了 CFD 建模和计算的可行性，分析了中低速土工离心机稳态运行时机室内空气流场的特征，对经典解析公式的流场假设进行了验证。为解析公式的改进和高速、大容量土工离心机的风阻功率计算打下了基础。

1　计算方法

解析方法是目前土工离心机工程研制中最常用的风阻估算方法。尽管不同估算方法在公式的数学表达上各有不同，但其基本假设与思路都大同小异，例如，大多数方法都假定了机室内空气绕转轴以相同角速度旋转，即“刚体转动”假设。具体情况可见文献[2-4]，在此不再赘述。

假设离心机稳态运行时内部流场已经达到稳定，机室内空气的运动满足连续性方程和动量方程：

$$\begin{cases}\nabla\cdot(\rho \mathrm{v})=0\\ \nabla\cdot(\rho v_i \mathrm{v})=\rho \mathrm{v}\cdot\nabla v_i\end{cases} \tag{1}$$

式中：ρ 为流场中空气密度；v 是空气流速，v_i（i=x，y，z）分别为它在三个方向上的分量。

如需考虑机室内的温升效应，还需满足能量方程：

$$\nabla\cdot(\rho \mathrm{v} T)=\nabla\cdot(k\nabla T/c_{\mathrm{p}}) \tag{2}$$

式中：T 为空气温度；k 和 c_{p} 分别为空气的导热系数和绝热指数。

采用 k-ε 湍流模型，即：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i k)=\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\rho\varepsilon\\ \dfrac{\partial}{\partial}(\rho\varepsilon)+\dfrac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i\varepsilon)=\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\dfrac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\dfrac{\varepsilon}{k}P_k-C_{2\varepsilon}^{*}\rho\dfrac{\varepsilon^2}{k}\end{cases} \tag{3}$$

在转臂表面和机室内壁面，空气流速与相邻固体表面的运动速度满足一致性条件，即

$$v=v_s \tag{4}$$

方程组（1）—（4）通常使用有限体积法进行数值求解，这一过程可以利用一般的商业软件，例如 Fluent 完成。Workbench 14 中实现了基于 Fluent 的流体计算和前后处理软件的融合，为计算提供了方便。

多参考坐标系 MRF（multi reference frame）是描述系统的各个组件以不同角速度转动（例如离心机转臂与机室壁）时的流场的有力工具，它能够有效地反映系统的时间平均特性[6]。文中采用 MRF 方法模拟转臂与机室壁之间的相对运动，选取包围离心机转臂的一个圆柱形区域为动区域，区域的选择应以保证在动区域外侧，离心机转动相位对流场不产生显著影响为标准。动区域内的流体以与转臂相同的角速度绕中心轴旋转。动区域外围至机室内壁的流体区域为静区域[5]。静区域和动区域之间设置为为流体界面（interface 边界条件），以保持速度和压力的连续性条件。区域和边界条件设置如图 1 所示。

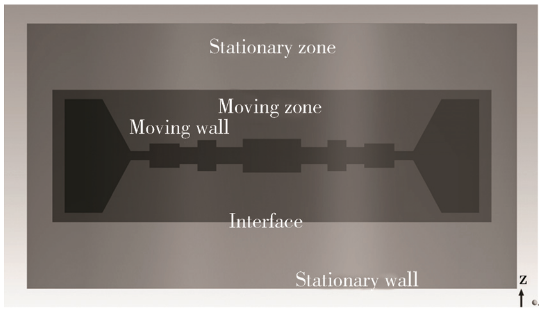

图 1　求解区域和边界条件设置

中低速土工离心机运行时，机室内流场的最大速度（转臂最远端的转动线速度）远小于声速，此时空气压缩性的影响不明显。为提高收敛速度，计算中首先不考虑空气的可压缩性和能量方程，采用压力基计算。SIMPLEC 是 FLUENT 中处理压力-速度耦合方程的一种半隐方法，相比于 SIMPLE 方法具有协调一致、收敛速度快的优点，故在分析中压力-速度耦合模式选用 SIMPLEC。压力空间离散采用 PRESTO！格式进行，其余项的离散格式均采用默认格式。迭代至计算接近收敛时，以此计算结果作为迭代初值，考

虑进空气的可压缩性和能量方程，采用密度基计算。为提高求解效率，同时保障一定的求解精度，采用 RNG k-ε 湍流模型。

2 算例

以某低速土工离心机为例进行研究,离心机转臂长度为 2.2 m，配重臂与转臂关于中心轴对称，机室半径为 2.6 m，高度为 2.8 m[4]。由于主轴和底座关于中心轴对称，位于中心区域，对空气流动影响不大，因此在计算中不予考虑。

文献[4]证明,经典解析公式的计算结果与试验吻合较好,“机室内空气按刚体作随流转动”的模型化假设具有较好的可靠性。根据该假设，离心机内机室气体运动与转臂转动相位关系不大，因此，对动区域的选择要求相对较宽松。文中选择包围离心机转臂的圆柱在半径方向和轴向各扩展 0.1 m 的区域为动区域（见图 1）。

由于土工离心机机室容积大，转臂转速高，为兼顾计算量和精度,考虑到机室内壁对流体只有摩擦力的作用，对空气流场的影响较小，故在内壁附近不加密网格。在离心机转臂表面及临近区域适当加密网格,壁面网格尺寸为 0.01 m。除靠近中心轴的区域外,其他大部分区域采用结构化网格，如图 2 所示，网格数为 2.35×10^6，更多计算表明该网格是收敛的。

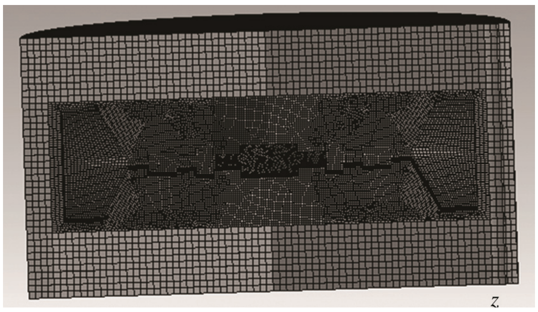

图 2 流体力学计算网格

3 结果和分析

从以上方法中可见，基于 CFD 的数值仿真方法中,除了机室和转臂的几何信息以及机室内空气的物理参数以外，不依赖于主观选取参数。在不考虑散热效应的前提下，不必依赖于试验数据，因而具有较好的应用价值。采用 Fluent 软件，对该离心机在四种不同转速（15.7，22.1，27.1，31.3 rad/s）下的风阻力矩进行计算,并与文献[4]的解析计算方法和实测结果进行对比，结果见表 1。

从表 1 中可以看出，在转速为 15.7~31.3 rad/s 范围内，三者的计算结果吻合较好，数值计算相对于实测结果的最大误差为 12.6%。

表 1 不同转速下离心机风阻力矩[4]

Speed/ $(\mathrm{rad\cdot s^{-1}})$	Numerical/ (N·m)	Theoretical/ (N·m)	Experiment/ (N·m)
15.7	334.0	318.5	382.2
22.1	660.6	624.4	728.5
27.1	981.3	941.0	996.3
31.3	1302	1256	1268.4

离心机风阻随转速的关系如图 3 所示。以转速 15.7 rad/s 下的工况为例，研究离心机机室内空气的流速和压力分布情况。事实上，不同转速下的机室内流场分布规律大体相同。图 4 为转臂以 15.7 rad/s 的角速度转动时垂直于转轴的三个不同截面上空气流线，对应的速度云图如图 5 所示，其中 z=0 为上下对称截面，z=0.5 和 z=1 分别表示距离对称截面 0.5 m 和 1 m 处的平面。从图 5 中可以看出，机室内空气流

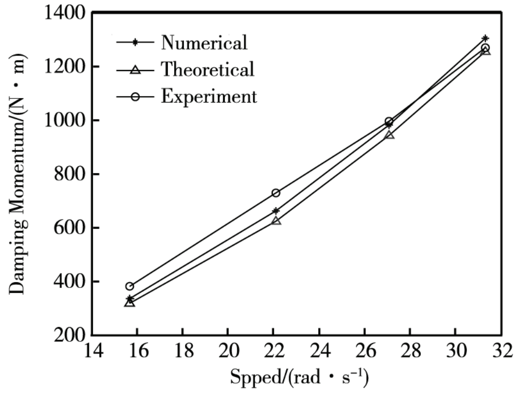

图 3 不同转速下的风阻力矩

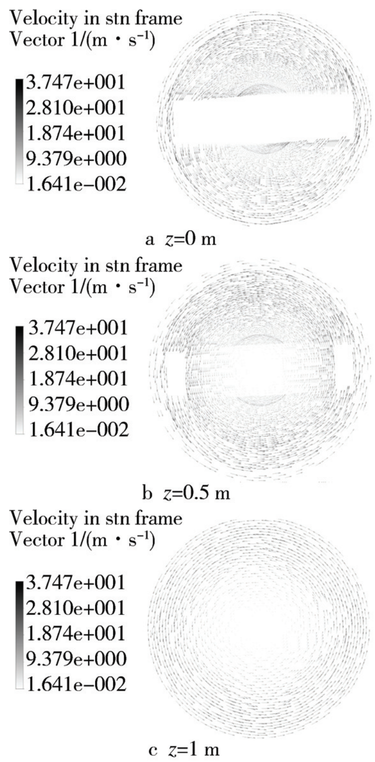

图 4 转速为 15.7 rad/s 时的流速分布

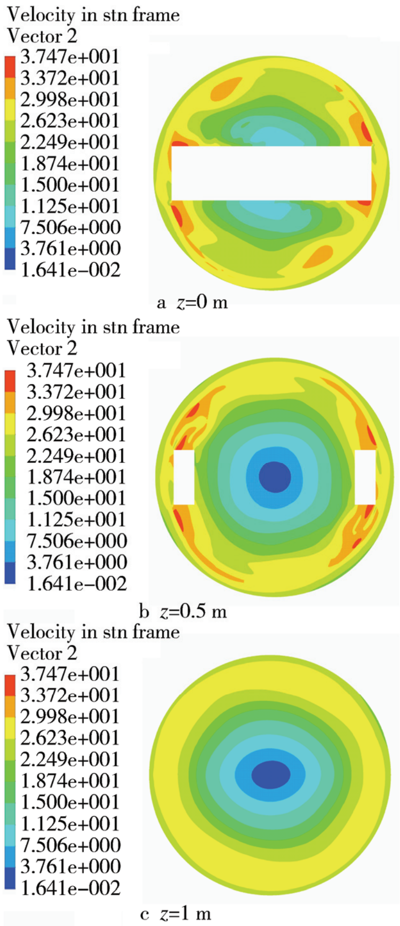

图 5　转速为 15.7 rad/s 时的速度

场大致沿圆周的切向分布，沿径向和轴向的速度分量可以忽略，这与经典解析公式中的假设一致。

以转臂中心为原点，转轴为 z 轴(向上为正方向)，沿转臂长度方向为相角 0°方位，建立柱坐标系。从图 5 中提取出不同位置处的流场周向速度，机室内不同高度和不同相位角处流场周向速度随半径的变化曲线如图 6 所示。

从图 5 和图 6 中可以看出，在远离机室侧壁和离心机转臂的地方，机室内流场速度大致与距转轴的半径成正比，流场速度只与径向坐标有关，与切向和轴向坐标关系不大，即近似满足关系式：

$$v(r,\theta,h)=\alpha\omega r \tag{5}$$

式中：v 为机场内空气的周向速度；r，θ，h 分别为三维柱坐标系中的径向、周向和轴向坐标，原点为转轴中心；ω 为转速；α 为随流比。离心机吊篮附近，由于吊篮绕流的影响，局部速度增大。在机室侧壁面附近，由于壁面摩擦的存在，流速略为减小，但是减小幅度并不大，这意味着墙壁附近的速度梯度很大，可能产生较大的摩擦阻力和温升效应。

经典解析方法对机室内大部分区域的流场近似具有较强的合理性，但是传统的解析方法未考虑机室侧壁附近的速度减小，事实上，由于经典解析方法使

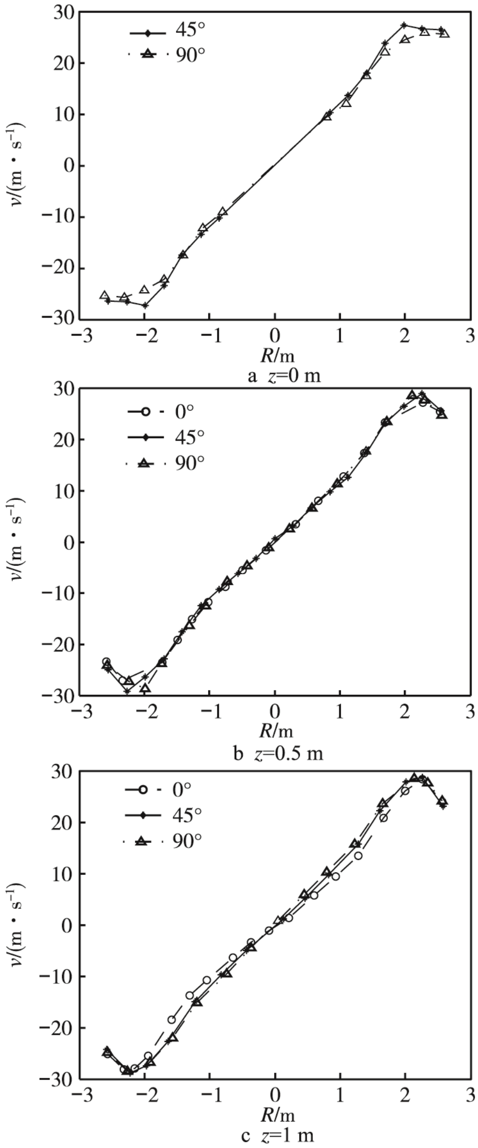

图 6　不同位置处流场切向速度曲线

用了能量守恒关系，所得到的随流比系数是一个空间平均值，在更精细的解析模型中，应当考虑机室内侧壁附近的速度衰减。

转臂表面压力分布如图 7 所示。可以看出，转臂表面压力分布仅与沿转臂长度方向的坐标有关，与高度坐标（沿转轴方向）无关。因此，在解析求解转臂上的风阻功率时，样条法是一个很好的近似方法，可以使用二维平动流场的相关结论进行离心机风阻估算和优化设计。

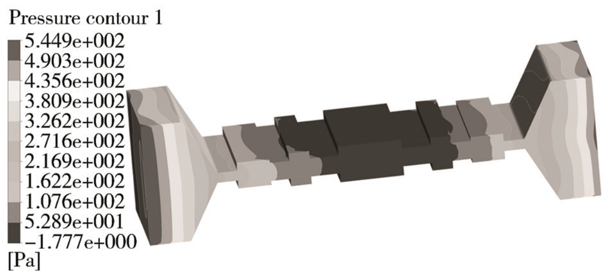

图 7　转臂表面压力分布云图

压力与 x 坐标的关系曲线如图 8 所示。可以看出，离转轴中心较远处的压力较大，压力随转臂长度方向位置大致呈二次曲线关系。迎风面压力较之背风面大，从而形成风阻力矩。由于离心机吊篮处压力大、迎风面积大、力矩大，可以估计土工离心机转臂上的风阻力矩主要由吊篮贡献。

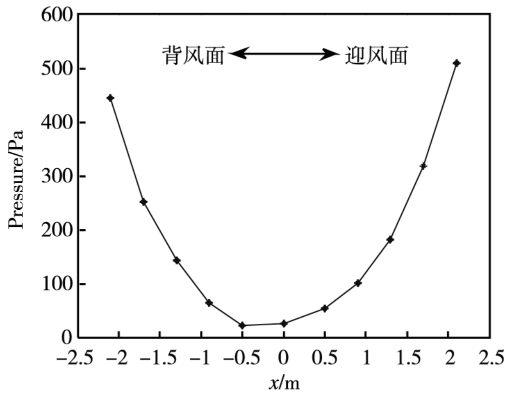

图 8 转臂表面压力随位置变化曲线

4 结论

1）CFD 方法避免了经典解析方法中参数选取的主观性和对试验数据的依赖，不必借助对流场分布规律的假设，具有较好的可信度和精度，尤其对目前尚没有充分试验数据的高速、大规模土工离心机风阻功率计算，CFD 仿真是一种较好的方案。

2）在一定转速范围内，经典解析公式和试验得到的风阻力矩与 CFD 方法接近，风阻力矩近似与转动角速度的二次方成正比，验证了文中方法的正确性。

3）机室内流场速度以围绕转轴的切向速度为主，在离机室侧壁面较远的地方，切向线速度大致与距转轴的距离成正比，侧壁面附近流速有所减小。证明了经典解析公式中的流场“刚体运动假设”能够较好反映机室内的流场特性，但在更精细的模拟中，应当对壁面附近的流速衰减进行一定的修正。

4）机室内流速和转臂表面压力只与径向坐标有关，与轴向坐标和相位角基本无关。

参考文献：

[1] NICOLAS-FONT J. Design of Geotechnical Centrifuges [M]. Balkema, Rotterdam: Centrifuge 88, 1988.

[2] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机设计(15) [J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 288-305.

[3] 尹益辉, 余绍蓉, 冯晓军, 等. 密闭机室土工离心机的风阻功率[J]. 绵阳师范学院学报, 2010, 29(2): 1-5.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 刘暾, 郭跟深, 刘长在, 等. 圆柱体绕横轴气动力和气动热的试验研究[J]. 宇航学报, 1999, 20(1): 77-82.

[7] 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): 909-914.

[8] 李娜, 吉洪湖. 涡扇发动机涡轮空气系统流动和传热性能的 CFD 分析[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2075-2081.

[9] 李少华, 岳巍澎, 王东华, 等. 基于 CFD 的旋转风轮气动性能分析[J]. 动力工程学报, 2011, 31(9): 705-708.

[10] 徐太栋, 杜平安, 王栋, 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.