

土工离心机风阻计算方法的对比研究

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** 评估不同土工离心机风阻功率估算方法的效果和优缺点, 为工程应用及未来研究发展方向提出建议。**方法** 重点以土工离心机为例, 总结几种有代表性的计算方法, 系统分析不同方法之间的共性和差异。通过一个算例, 同时结合以往离心机的设计经验, 对各种方法的效果进行对比。**结果** 法国方法、美国方法、中国工程物理研究院方法和 CFD 仿真方法在精度上依次增大, 但复杂性依次升高, 后两种方法不需借助试验来确定参数。**结论** 对于中低速土工离心机, 中国工程物理研究院方法具有较大的优势。随着土工离心机向着高速、大规模方向发展, 经典解析方法的适用性尚未得到充分验证, 基于 CFD 的高置信度仿真是一种较好的解决方案。

关键词: 土工离心机; 风阻; 流场; 随流比

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.013

中图分类号: TJ011⁺.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0061-06

Comparative Study on Estimation Methods of Wind Resistance of Geotechnical Centrifuges

HAO Yu, YIN Yi-hui, WAN Qiang, LI Qi-sheng

(Institute of Engineering Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate effects and pros-and-cons of different estimation methods for wind resistance of geotechnical centrifuges, and provide suggestions on engineering application and future research. **Methods** Geotechnical centrifuge was mainly taken as example to introduce several typical calculation methods and systematically analyze commonness and difference among the methods. The effects of different methods were compared by a classical example combined with design experience on centrifuges. **Results** French Methods, US Method, CAEP Method and CFD Simulation had a successively increasing accuracy with a successively increasing complexity. Meanwhile the later two did not depend on experimenting data in determination of parameters. **Conclusion** For geotechnical centrifuges working at low-to medium speeds, the CAEP method has an advantage over others in engineering practice. But as the development of geotechnical centrifuges to the direction of large scales and high speeds, the validity of traditional analytical methods is still not examined. High fidelity methods based on CFD seems a good option.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; wind resistance; flow field; air following flow ratio

土工离心机是土力学研究中的重要设备(如图 1 所示),土工离心试验是重现土工原型物理过程的一种有效方法^[1]。土工离心机的设想最早起源于 1869

年法国人 E. Phillips 的“弹性体平衡相似性”一文^[2],迄今为止,土工离心模型试验在设备的数量、容量以及技术和应用领域都有了极迅速的发展,成为岩土力

收稿日期: 2017-09-24; 修订日期: 2017-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11702279); 中国工程物理研究院总体工程研究所统筹项目(No. TCGH041607)

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。

学新的前沿和焦点^[3]，苏联、美国、英国、日本、法国、荷兰和中国等国家相继研制了许多不同型号的土工离心机。我国的土工离心机发展起源于20世纪80年代，清华大学、空间技术研究院等单位都做了开创性的工作。21世纪以来，中国工程物理研究院总体工程研究所成为我国土工离心机研制的龙头，其大型土工离心机的研制能力代表我国在该领域的最高水平^[4]，已成功研制从60gt（2004年）到600gt（2015）的20余台大型离心机，正在与浙江大学联合立项论证的1500gt超重力离心模拟试验装置将成为世界最大离心机装置。

风阻功率是离心机设计的重要方面，合理估计离心机稳态运行时的风阻功率，对于驱动电机的选型以及散热系统设计具有重要意义。工程研制的飞速发展既促进了包括风阻分析在内的设计技术的发展，也对风阻分析等各方面技术提出了更新更高要求。

针对土工离心机总体设计技术，文献[2,5-7]等作了很好的综述，其中对风阻分析方法也有很好的论述。随着研制工程的驱动，风阻分析方法又得到了新的发展，且现有和未来高速与超大容量土工离心机的研制实践，也迫切要求对风阻分析方法予以及时总结，以便在继承中发展，满足新型研制中对风阻分析的需要。

文中将在介绍离心机风阻功率估计的几种常用方法和最新研究进展的基础上，结合算例比较不同方法的优、缺点，为土工离心机设计和相关科学研究提供参考。

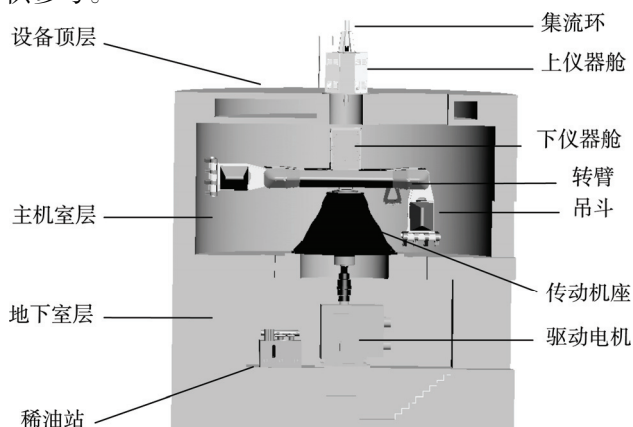


图1 典型土工离心机总体布局

1 经典计算方法

采用解析公式进行计算是目前最常用的风阻功率估计方法。鉴于离心机及离心机运行状态的复杂性和多样性，目前还没有成熟的精确计算方法，不同离心机设计机构发展出了不同的解析公式。文献[2,6]等对各种解析方法的细节作了较详细的介绍，文中在适当兼顾自明性的情况下着重于对各方法基本逻辑

的评述。

尽管离心机风阻功率解析公式各不相同，但在基本假设上有很多共同之处。该节先对各种方法的共性进行简要介绍，再深入到不同方法的“个性”中去。

1.1 流场现象及基本理论

在离心机运行过程中，机室内气团会跟着转子一起旋转，一方面减少了空气与转臂之间的相对速度，降低了风阻，另一方面增加了空气与固定边界的摩擦及相应的消耗功率。在几乎所有方法中，假设室内空气以转臂角速度的一部分做刚性圆盘转动，即流场流速仅有周向分量，且与高度和相位无关，流场周向速度表示为：

$$v = \alpha \omega r \tag{1}$$

式中： v 为流场周向线速度； ω 为转臂旋转角速度； r 为任一点距转轴的半径； α 是一个0~1之间的比例系数，称为随流比。

特定的实测和经验表明，这种假设具有一定的合理性。如刘新民针对中国工程物理研究院25gt离心机的实测表明，在半径小于转臂长度的地方，机室内空气流速大致服从正比规律，吊篮附近达到最大值，吊篮以远到侧壁内表面是一个恒定速度区^[8]。空间技术研究院LXJ-4-450离心机的试验（如图2所示）和郝雨等针对某150gt土工离心机的CFD仿真计算（如图3所示）^[9]也证明了类似结论。

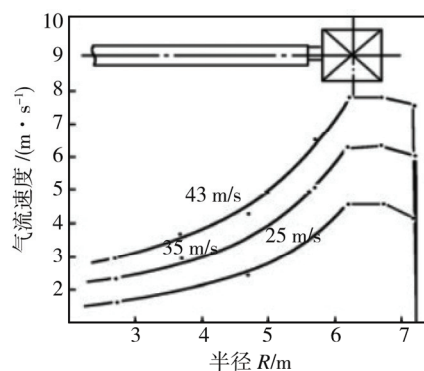


图2 LXJ-4-450离心机空气流速分布曲线

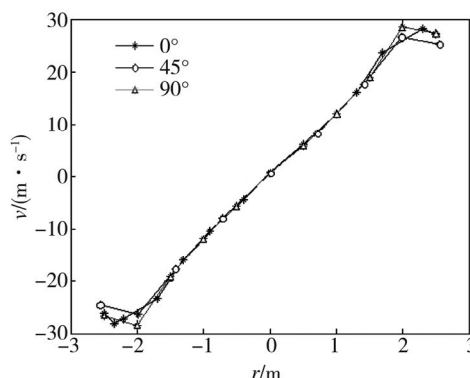


图3 150gt离心机空气流速分布曲线

在该流场模式下, 离心机转臂(包括吊篮、配重等)受到的风阻压力可用经典气动阻力公式计算:

$$F = \frac{1}{2} \rho \sum S_i v_i^2 C_i \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; S_i , v_i 和 C_i 分别为迎风面积、转臂和空气的相对速度和空气阻力系数。现有各种方法的差异主要体现在公式中参数的获得方式上。

将方程(2)沿转臂长度积分, 并利用式(1), 可得到转臂上风阻力矩的表达形式:

$$T = \frac{1}{2} \rho C (1 - \alpha)^2 \omega^2 \quad (3)$$

式中: T 为风阻力矩; C 为与转臂几何尺寸和迎风面形状有关的系数。

1.2 几种典型计算方法

1.2.1 前苏联 АЭИС-2 离心机计算方法

前苏联的研究者在经典气动阻力公式的基础上, 提出了表征速度和转子/封闭气体体积比的系数 A_i 和封闭空间气团形状的系数 B_i , 将式(2)修正为:

$$T = \frac{\rho}{2} \sum S_i \omega_i^2 C_i A_i B_i \quad (4)$$

式中: 系数 A_i , B_i , C_i 等均通过试验获得。研究者建立了缩比模型试验装置, 该装置允许通过添加附加围墙和套筒的方式改变机室尺寸, 也可换装不同的转子形状改变阻力系数, 进而测试得到不同工况下的风阻功率, 再反过来确定系数 A_i , B_i , C_i 。

1.2.2 法国 Actronic 公司计算方法

法国的方法做了更强的简化假设, 其研究者认为吊篮气动力学性能最为重要, 因而忽略了其他部件和其他因素的影响, 通过考虑吊篮在有限截面的风洞内平动, 考虑风洞截面的影响对无限流中的气动阻力系数进行了修正。所用的气动阻力公式为:

$$T = \frac{1}{2} \rho S_n C_x (\omega R - V_v)^2 \quad (5)$$

式中: C_x 为修正后的有效风阻系数; S_n 为迎风面积; R 为离心机半径; V_v 为随流空气的环向线速度, 通过风洞内压头损失平衡关系计算。

1.2.3 美国 Davis 计算方法

美国 Davis 的方法考虑了机室壁面(包括天花板、侧壁和地板)摩擦的影响, 其研究者假设机室壁面对空气的阻矩和转子对空气的带动力矩分别与相对角速度的二次方成正比, 即:

$$T_1 = \frac{\rho}{2} B_1 (1 - \alpha)^2 \omega^2; T_2 = \frac{\rho}{2} B_2 \alpha^2 \omega^2 \quad (6)$$

式中: T_1 和 T_2 分别为转臂和机室壁面对机室内空气的作用力矩; B_1 和 B_2 分别为其力矩系数。

通过建立机室内空气的动力学平衡关系 $T_1 = T_2$,

求解出随流比系数 α , 进而得到转臂上的风阻功率, 其中阻力系数与雷诺数和机室壁面的粗糙度有关, 可从有关资料中获得。

1.2.4 中国空间技术研究院方法

中国空间技术研究院在设计 LXJ-4-450 离心机时, 进行了大量试验。对吊篮缩模进行低速风洞试验, 得到不同整流形状的气动阻力系数 C_i ; 通过接近真实状态的大型模型试验及实验室风速测量, 同时抛洒纸屑观察室内气流状态, 得到机室内气流速度的分布规律(即“刚性运动”假设), 并通过其他离心机的实测数据证实了这一规律。最终通过经典风阻公式(2), 计算了多种不同工况下的转臂风阻系数、吊篮风阻系数和风阻功率。

中国直升机设计研究所计算方法的思路与中国空间技术研究院方法类似, 仅在几何相关参数方面采用了不同的公式, 故不再详细介绍。

1.2.5 中国工程物理研究院计算方法

风阻功率的研究大多停留在解决现实的工程问题上, 计算大量依赖试验数据, 给推广应用带来较大困难。中国工程物理研究院的刘新民、尹益辉等人经过长年研究, 给出了一套较为系统、全面的风阻功率计算方法, 该方法已跨越实验阶段, 在理论分析基础上取得了较好结果^[2,6]。

中国工程物理研究院计算方法^[10-11]与美国 Davis 方法在研究途径上比较相似, 它综合考虑了转子迎风面和背风面、机室壁面(包括天花板、侧壁和地板)和通风口的影响, 分别建立起转臂和机室内空气的动力学平衡关系

$$M_{\text{out}} = M_{\text{install}} + M_{\text{front}} + M_{f_0} + M_{\text{back}} + M_a \quad (7)$$

$$M_{\text{front}} + M_{f_0} + M_{\text{back}} = M_{\text{wall}}$$

式中: M_{out} 表示电机输出的有效功率; M_{front} , M_{f_0} , M_{back} 分别为转臂迎风面、顺风面和背风面的风阻力矩; M_{install} 为支座对转臂的摩擦力矩; M_a 为通风口引起的转臂风阻力矩的增量, 对于密闭机室, $M_a = 0$ 。

各力矩的表达形式为:

$$M_{\text{front}} = \frac{\rho}{2} (1 - \alpha)^2 \omega^2 \int_L C_m(r) r^3 h(r) dr$$

$$M_{f_0} = \frac{\rho}{2} (1 - \alpha)^2 \omega^2 \int_L C_{f_0}(r) r^3 2b(r) dr \quad (8)$$

$$M_{\text{back}} = \frac{C_1}{1 - \alpha - C_1} (M_{\text{front}} + M_{f_0})$$

$$M_{\text{wall}} = C_f \rho (\alpha \omega)^2 R^5 \left(\pi \eta \frac{H}{R} + 0.4 \pi - \frac{R_1^3 A_1}{2R^5} - \frac{R_2^3 A_2}{2R^5} \right)$$

式中: C_m , C_{f_0} , C_f 为阻力系数; $h(r)$ 和 $b(r)$ 分别为转臂上半径 r 处的迎风面高度和顺风面长度; R ,

H 为机室半径和高度; η 为圆弧形侧壁的摩擦阻力修正系数; R_1, A_1, R_2, A_2 分别为进风口和出风口的径向位置和面积。公式中所涉及的参数均可在手册[12]中查到。

首先根据式(7)的第二式求解得到随流比系数 α , 再进一步求解风阻功率。该方法的实际应用表明, 式(7)中顺风面摩擦力矩 M_{f_0} 与迎风面风阻力矩 M_{front} 相比可以忽略不计。显然, 该计算方法的关键是准确取定式(8)中的参数 $C_m(r), C_l$ 和 η 等。诸多实际工程计算表明, 只要这些参数取得合适, 计算结果就会有较高的精度。

2 最新研究进展

2.1 数值仿真方法

由于解析公式均建立在较强的流体模型假设基础上, 且部分参数的选取大量依赖于试验或经验, 因此, 计算结果都存在或多或少的不可控性。为此, 近年来, 中国工程物理研究院的郝雨等人开始使用 CFD 进行土工离心机风阻功率的计算^[9]。

郝雨等针对某 150gt 土工离心机, 建立了机室内流场的数值仿真模型, 应用 Fluent 软件对离心机稳态运行时的流场进行了数值仿真。计算中用 MRF 描述转臂、空气和机室壁之间的相对运动, 采用 $k-\varepsilon$ RNG 湍流模型和增强型壁面条件。计算过程中不需要借助试验数据和经验参数, 结果表明, 数值仿真与中国工程物理研究院方法和试验结果相近。同时, 针对高速土工离心机的 CFD 分析也取得了较大进展。

2.2 解析方法的改进

针对 1000gt 土工离心机的研制需求, 笔者团队最近对中国工程物理研究院计算方法进行了改进^[13]。考虑到实际流场分布(如图 2, 3 所示), 以吊篮底部最远点所在竖直线为界, 将整个机室内的空气沿径向分成内、外两个区域, 界内区域仍采用原来的“刚性运动”假设, 界外区域即间隔内区域则按随流空气的环向线速度沿径向以一定规律减小处理, 并通过一个衰减系数进行表征。通过与相应的 CFD 仿真结果比较, 表明如此改进后的空气速度计算结果更加符合机

室内空气速度分布的基本特征。该项工作从精度和离心机规模方面拓展了现有解析方法计算土工离心机风阻功率的能力。

针对机室墙壁开有通风口的土工离心机, 作者团队借助于机室温度的实测结果, 基于能量守恒原理, 反演给出了离心机稳定运行时, 机室内空气从通风口的自然出流量与离心机运行参数的关系式。同时考虑稳定旋转空气在离心力作用下的动量矩守恒, 采用小孔出流理论导出了空气从通风口的自然出流量公式。该项工作通过计算离心机稳定运行时的自然排风量, 有效提高了风阻功率的预估准确性^[14]。

3 不同计算方法比较

由于早期方法大多依赖于试验, 且部分公式仅针对特定形式的离心机有效, 难以推广实现。为了给设计者在工程计算中选择不同方法提供参考, 以中国工程物理研究院研制的某具有典型性的土工离心机为例, 比较各种方法的效果。由于早期方法中较多依赖于专门试验, 在工程中难以重现, 在算例中, 对各种方法的参数获得进行适当的改动。由于中国工程物理研究院方法被证实具有较好精度, 尽可能选取与中国工程物理研究院方法相同的等效参数, 以加强可比性。

1) 法国方法。只考虑吊篮的影响, 空气速度由按照中国工程物理研究院方法计算得到的随流比确定。由于法国方法未考虑背风面的影响, 忽略了公式(7)中 M_{back} 项。对比的主要作用在于考察吊篮对风阻的贡献率。

2) 美国方法。由于美国方法与中国工程物理研究院方法思路类似, 但同样未考虑背风面的影响, 机室壁面摩擦系数的取值方法相同。对比的主要作用在于考察背风面气动特性对风阻计算的影响。

3) 中国工程物理研究院方法, 参照文献[9]。

4) CFD 仿真方法, 参照文中第 1 节。

5) 由于前苏联方法和中国空间技术研究院方法对试验依赖较多, 计算部分相对直接, 故在此不进行对比。

计算结果对比见表 1。

表 1 不同计算方法风阻功率对比

Speed/ (rad·s ⁻¹)	Test/ kW	French Method		US Method		CAEP Method		CFD Simulation	
		Value/kW	Error/%	Value/kW	Error/%	Value/kW	Error/%	Value/kW	Error/%
15.7	6.0	4.2	-30.0	4.7	-21.7	5.0	-16.7	5.2	-13.3
22.1	16.1	11.8	-27.7	13.1	-18.6	13.8	-14.3	14.6	-9.1
27.1	27.0	22.8	-15.6	24.2	-10.4	25.5	-5.6	26.6	-1.5
31.3	39.7	33.6	-15.4	37.3	-6.0	39.3	-1.0	40.8	+1.0

容易看出,各种解析方法的计算结果均偏小,且低速工况下的误差比高速下更大,这可能是由于高速转动时摩擦力矩的影响更小,且转臂运动可以更充分带动随流空气转动造成的。

在解析方法中,中国工程物理研究院方法误差最小,且不需要过多依赖试验数据,大大降低了设计成本。法国方法只考虑了吊篮,计算最简单,但是计算结果偏差较大。事实上,文中算例及美国 Davis 土工离心机的算例均表明,吊篮的风阻力矩占总风阻力矩的 75%~85%左右;法国 680 离心机的计算结果也证

明,低速情况下该方法与试验的误差在 30%~40%左右,与算例的结论一致。美国方法介于这两种方法之间。

CFD 的数值方法误差最小,且不必事先对机室内流场分布进行假设,尤其对于“刚性运动”假设没有得到确证的高速和超大容量土工离心机是一种十分具有潜力的风阻预估方法。由于 CFD 仿真计算量大,且要求较为详细的离心机设计外形,这对其在方案阶段的应用造成限制。

各种计算方法的特点综合列于表 2。

表 2 各种计算方法的特点

	苏联方法	法国方法	美国方法	中国空间技术 研究院方法	中国工程物理研究 院方法	CFD 仿真
参数确定方法	所有系数均需试验确定	未明确说明	风阻力矩系数需通过试验获取,摩擦力通过资料获取	风阻系数和流速分布均需试验确定	《机械工程手册》,有一个参数 C_f 根据经验取为 0.05~0.1 考虑转臂和吊篮,可考虑摩擦,只能反映特征面积等宏观尺寸	只需要几何构型尺寸和粗糙度参数
考虑的转子因素	综合体现于等效系数中	只考虑吊篮	考虑转臂和吊篮	考虑转臂和吊篮	考虑机室壁面摩擦,只能反映特征面积等宏观尺寸	可视计算需求考虑局部几何尺寸
是否考虑墙壁因素	综合体现于等效系数中	综合体现于风阻系数中	考虑机室壁面摩擦	综合体现于随流比中	考虑机室壁面摩擦、通风口	可考虑墙壁摩擦,可视计算需求考虑边界层
计算复杂度	低	低	公式较复杂	低	公式复杂,计算量不大	建模复杂,计算量大
计算精度	—	低 (~30%)	中等 (~20%)	—	较高 (20%以内)	高 (10%以内)

4 结语

经过几十年的研究,不同研究者针对特定的离心机型号,各自发展出了不同的方法,但是殊途同归,各种方法的基本假设和思路都是相似的,只是在考虑的细节和参数选择上有所不同。在适用范围方面,迄今这些计算方法用于预估随流空气最大线速度低于音速和容量小于 1000gt 土工离心机的风阻功率是可靠的,但还不宜直接用于预估高速和超大容量土工离心机的风阻功率。在综合性能方面,由于中国工程物理研究院方法的参数选取来源于基于通用试验的现行手册类文献,且精度较高,尽管公式相对复杂,但编程计算非常容易,推荐采用中国工程物理研究院方法进行计算。法国方法和美国方法误差略高,但数学表达形式简单,在初设阶段对风阻功率进行定性、半定量分析或优化设计时具有独到优势。苏联方法和中国空间技术研究院方法需要大量试验参数,限制了方法的广泛应用。

CFD 仿真方法是近年来发展起来的高置信度方法,其优势在于不需要事先对流场分布进行假设,不需要试验或经验参数,只需按给定几何构型建模,然后采用成熟的 CFD 技术实施计算即可,是一种很有潜力的计算方法。但是 CFD 仿真的单次计算量大,难以应用于需要很多次建模、计算的早期方案设计或风阻优化设计中。

目前,土工离心机设计正在向着高速、大容量方向发展,中国工程物理研究院正在设计或论证的两台离心机,其最大容量分别达到 1000gt 和 1500gt。对高速土工离心机,其转臂最大线速度可接近甚至超过音速,此时经典的刚性运动假设,包括新近的改进,都尚未经过实践验证。因此,有必要进一步发展高速土工离心机风阻功率的 CFD 仿真计算方法,为离心机设计及高速情况下的解析公式进一步改进提供依据。

目前的解析方法中,均假设机室内空气速度与半径成正比,在靠近机室侧壁处可能引起较大误差。随着离心机转速的提高,转臂末端与机室壁之间的

相互作用更加强烈，目前的解析方法可能产生较大误差，因此有必要对侧壁附近的空气层进行更加精确的描述。

参考文献:

[1] 潘时声. 离心机运行时入桩设备研制和桩基础离心实验研究[D]. 清华大学,1995.

[2] 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.

[3] 濮家骝. 土工离心机模型实验及其应用的发展趋势[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 92-94.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 孙述祖. 土工离心机设计综述(二)[J]. 水利水运科学研究, 1991(2): 220-226.

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

[8] 刘新民. 25g-T 土工离心机流场分布规律试验数据整理

报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院结构力学研究所, 1989.

[9] HAO Yu, YIN Yi-hui, WAN Qiang. Wind Resistance and Flow Characteristic Analysis of Geotechnical Centrifuges Based on Computational Fluid Dynamics[C]// 19th International Conference on Finite Elements in Flow Problems. Rome, 2017.

[10] 尹益辉, 余绍荣, 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.

[11] 尹益辉, 余绍荣, 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.

[12] 沈鸿. 机械工程手册(第二卷): 基础理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[13] 尹益辉. 中国水科院高速土工离心机风阻功率和机室温升计算报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2017.

[14] 尹益辉, 范志庚, 万强, 等. 土工离心机稳定运行时机室的自然排风效应研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2017, 36(6): 1-5.