基于 ZJU400 土工离心机的 CFD 模拟方法

郭轶楠^{1,2},杨毅^{1,2},王亚林^{1,2},余俊祥^{1,2},丁德^{1,2}

(1.浙江大学建筑设计研究院有限公司,杭州 310028;2.浙江大学 平衡建筑研究中心,杭州 310028)

摘要:目的 给出可靠的 CFD 模拟方法,用于土工离心机风阻功率估算,得到流场及温度场模拟结果。 方法 针对 ZJU400 中高速大型土工离心机,利用结构化网格划分使转臂及内壁面处的 y+值 < 30,使其满足 湍流模型边界层厚度要求。利用 k-omega SST 湍流模型和 MRF 多参考系方法对 ZJU400 土工离心机进行数 值模拟,对模拟所得风阻功率、流场和温度场进行对比验证。结果 模拟所得风阻功率与 ZJU400 实测数据 偏差 <10%,模拟所得流场与文献[8]中的结果吻合,温度场与实测数据吻合。结论 针对 ZJU400 中高速大型 土工离心机的 CFD 模拟方法取得了精度较高的模拟结果,通过仿真模拟弥补了大型土工离心机实验数据缺 乏问题,减少了对实验数据的依赖,为制造设计和研究大型土工离心机提供了 CFD 模拟方法。 关键词:土工离心机;CFD 数值模拟;风阻功率;K-omega SST 湍流模型;流场;温度场 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.013 中图分类号:TU411 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2020)11-0085-05

CFD Simulation Method Based on ZJU400 Geotechnical Centrifuge

GUO Yi-nan^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, WANG Ya-lin^{1,2}, YU Jun-xiang^{1,2}, DING De^{1,2}

Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co. Ltd., Hangzhou 310028, China;
 Center for Balanced Architecture, Zhejiang University Hangzhou 310028, China)

ABSTRACT: The work aims to provide a reliable CFD simulation method for estimating the wind resistance power of geotechnical centrifuge and obtaining the simulation results of flow field and temperature field. Aiming at ZJU400 medium-to-high speed large geotechnical centrifuge, structured grid division was used to ensure the y+ value at the tumbler and the inner wall surface less than 30, thus meeting the boundary layer thickness requirement. The k-omega SST turbulence model and multi-reference frames (MRF) were used to simulate the ZJU400 geotechnical centrifuge and comparatively verify the wind resistance power and the measured data of ZJU400 was less than 10%, the simulated flow field was consistent with the results in the literature [8], and the temperature field was consistent with the measured data. CFD simulation method for ZJU400 medium-to-high speed large geotechnical centrifuge achieves high precision simulation results, which makes up for the lack of large geotechnical centrifuge experimental data through simulation and reduces the dependence on experimental data. The CFD simulation method is provided for manufacturing, designing and studying the large geotechnical centrifuge.

KEY WORDS: geotechnical centrifuge; CFD simulation; wind resistance power; K-omega SST turbulence model; flow field;

• 85 •

收稿日期: 2020-04-05; 修订日期: 2020-05-13

Received: 2020-04-05; Revised: 2020-05-13

作者简介:郭铁楠(1989—),男,硕士,主要研究方向为制冷及低温工程。

Biography: GUO Yi-nan (1989-), Male, Master, Research focus: refrigeration and cryogenic engineering.

通讯作者:杨毅(1970—),男,硕士,研究员,主要研究方向为建筑节能与环保、暖通空调、制冷及低温工程。

Corresponding author: YANG Yi (1970—), Male, Master, Researcher, Research focus: building energy conservation and environmental protection, HVAC, refrigeration and low temperature engineering.

temperature field

土工离心机能为边坡与高坝、岩土地震工程、深 海工程、深地工程与环境、地质过程和材料制备提供 必要的实验条件^[1-3]。近几年各国土工离心机快速发 展,陆续建成许多土工离心机,如英国谢非尔建成2m 半径的静力离心机^[4];韩国科学技术院(KAIST)建 成的水平双向动力离心机;成都理工大学建成5m 半径、2t负载的TLJ-500型土工离心机。浙江大学 已建成了ZJU400gt 土工离心机,目前正在筹建世界 最大超重力土工离心机,此项目为国家重大科技基 础设施。

风阻功率决定土工离心机电机选取和舱体内冷 却设计,是设计的基础条件,也是关键问题之一。对 土工离心机风阻,文献[5-8]进行了系统的研究,给出 了解析计算公式。杜延龄^[9]介绍了国外土工离心机风 阻功率经验方法。孙述祖^[10]对比了国内外的几种经验 方法计算结果和实际结果的差异。实践表明,以上方 法均存在局限性,预估的风阻功率往往比事后建成的 土工离心机的实际使用功率偏小较多。若预估风阻功 率偏小,不仅会造成选用电机功率偏小,还会因冷却 系统设计能力不足导致舱体内温度升高,严重影响设 备工作的稳定性。

文献[11]利用 CFD 方法对土工离心机进行了风 阻功率计算,但文中采用的κ-ε湍流模型第一边界层 网格需位于黏性区,即y+取值应<15。对于转速较快 的土建离心机,采用文中的网格划分方法无法实现。 文献[11]中的实验对比均是与低速土建离心机对比, 没有与中高速大型土建离心机的对比。

文中采用CFD方法对ZJU400大型土工离心机进行了数值计算,模拟计算得出不同加速度工况下风阻 功率、流场及温度场。其中风阻功率和电机实测数据 进行对比验证,流场速度和文献[8]计算结果进行对比 验证,温度场和实验数据进行对比验证。

ZJU400 土工离心机的数值模拟 方法

参照 ZJU400 土工离心机器实际尺寸,建立简化 CFD 模型,模型尺寸如图 1 所示。图示单位为 mm, 侧壁面为不锈钢水冷壁面,由转壁和实验舱组成旋转 体,调整旋转速度从而达到实验舱体内不同加速度的 实验工况。考虑气体流动为高雷诺数旋转,采用 K-omega SST 湍流模型^[12-13],打开黏性热选项。旋转 体、内壁近壁面网格第一层节点高度取 0.05 mm,y+ 值计算结果<10,满足近壁面低雷诺数模型取值。文 献[11]给出的壁面网格尺寸为 10 mm,此时 y+>1000, 不符合中高速大型土建离心机 K-omega 湍流模型边 界层要求。考虑高速旋转导致的气体可压缩性,采用 理想气体和 coupled 求解方法,计算精度除压力为二 阶精度,其他均采用三阶精度。内壁面和旋转体外壁 面的粗糙高度为不锈钢常用粗糙高度 0.05 mm。不锈 钢水冷壁外壁面为 293 K 定温壁面,壁厚 6 mm,上 下壁面边界条件为 6 mm 不锈钢壁面与 300 K 空气自 然对流换热,自然对流换热系数为 5 W/(m²·K)。





采用多参考系 MRF 模型, 流场分区如图 2 所示。 计算网格数量为 4.96×10⁷, 是 ICEM 软件划分的结 构网格, 网格质量最小值为 0.37。将旋转域和静止域 分别进行 ICEM 网格划分, 旋转域网格拓扑结构划分 如图 3a 所示, 静止域网格拓扑结构划分如图 3b、c 所示。对静止域进行边界层划分, 其中最小边界层厚 度为 0.05 mm。静止域和旋转域进行网格划分后再进 行网格合并, 得到最终 Fluent 计算网格。注意若采用 非结构化网格划分, 在 5×10⁷ 网格数量下, 最小边界 层厚度将大幅增加, 无法满足 y+计算要求。











2 风阻功率模拟结果

根据能量守恒,CFD 模拟在稳定状态下外壁面的 总散热功率即为总风阻功率。根据此方法,对10g、 21g、50g、70g、90g、120g加速度进行模拟,并 得出风阻功率,如图 4 中方块所示。ZJU400 土工离 心机在 10g、21g、30g、45g、60g、74.6g、89g、 120g下的稳定电机功率实测分别为7、16.6、25.4、 41.8、60.4、95.6、105、160 kW,如图 4 中圆点所示。

图 4 中圆点为实测电机功率,需注意电机功率减 去电机效率影响及轴承摩擦功率后才是风阻功率,电 机效率损失和轴承摩擦功率损耗占总功率比值一般 为 10%~15%。因无法获得准确的取值,这里未将这 部分损失减去。黑色方块为模拟所得风阻功率,实测 电机功率比模拟风阻功率高 10%~20%,考虑电机效 率损失和轴承功率损耗,模拟所得风阻功率和实测结 果偏差<10%。验证了数值模拟计算土工离心风机风 阻功率的可行性。



resistance power

文献[14]给出了土工离心机稳态风阻功率简化 估算方法。文中提出当设备规模、转臂结构型式、机 室空间尺寸和墙壁粗糙度等确定后,可以用式(1) 进行简化。

P=kωⁿ (1) 式中 *k*, *n* 均为常数。对模拟结果用式(1)进行 拟合,得到式(2)。

 $P=25.59\omega^{3.11}$ (2)

图 4 中的实线即为式(2)的拟合曲线,所得相 关性系数 *R*²为 0.996,单点最大误差为 4%。

土工离心机速度增加,会导致 y+计算结果增加。 若速度增加到 y+计算结果>60 时,第一边界层已处于 湍流核心区,此时计算结果准确度迅速下降。然而继 续减小边界层厚度,又可能导致网格质量下降和网格 数量过多,造成计算无法收敛。此时可通过对中低速 模拟风阻功率进行拟合得到公式(1)的表达形式, 进而估算出高加速度时的风阻功率。

3 气体流场分布模拟结果

文献[6-9]中解析计算,均需获取舱内气体速度 分布,文献[7-9]假设气流以一定值随流比跟随转臂 一起旋转。由于舱内气体速度分布测量困难,目前 国内还无实测结果。通过 CFD 模拟,能获取气体完 整的流速、温度分布,对解析计算中随流比的确定 有参考依据。

120g 加速度时,在 A-A 截面(如图 1b 所示截面 位置)的速度分布如图 5 所示。由图 5 可见,由于实 验舱长方体尖角的存在,实验舱附近气流也存在尖角 流线。由于实验舱正推面附近气体被旋转实验舱直接 推动,该区域气体速度最大。Line1 线上半径-速度的 坐标如图 6 所示。由图 6 可知,在转臂半径内空气速 度随着转臂旋转,转臂半径内的空气速度可近似为:

U_{air}=α·U_{arm} (3)
 式中:U_{arm} 为转臂速度;U_{air} 为空气速度;α 为
 随流比。模拟所得随流比为 0.6 左右,和文献[8]中计

算得到 0.55 随流比相吻合。

由图 6 可知,近壁面处速度迅速变化,产生剪切力。在稳定状态时,由力矩平衡可知,对中间区空气 产生剪切力矩与转臂提供给中间空气的力矩相平衡。





随着转速和功率的增加,舱内发热量也在增加。 若土建离心机的冷却系统设计能力不足,会导致舱内 温度升高较多,甚至超过设备安全运行工况,因此舱 内的温度场也非常重要。120g加速度时,在 A-A 截 面的温度分布如图 7 所示。从图 7 中可看出,在 120g 时,温升很小。侧壁面冷却水温度为 293 K 的条件下, 舱体内平均温度在 301 K 附近,仅有 8 ℃左右温升, 在低加速度工况下,冷却系统容易实现。

为验证温度场模拟数据的可靠性,和 ZJU400 实 测数据进行对比,对 ZJU400 采用风冷和外壁面水冷 相结合的冷却方法。ZJU400 底板设有 2 个进风口, 如图 8a 所示;顶板设有 1 个出风口如图 8b 所示。实 验是在 120 g 加速度下测试的,风冷和水冷冷却的测 量数据及结果分别见表 1 和表 2。CFD 模拟所得温度 云图为只有侧壁水冷时的结果。对比表 1、表 2,水 冷热量为风冷的近 12 倍,相比水冷,风冷带走的热 量有限,可先忽略风冷对舱体温度的影响,因此可







图 8 ZJU400 风口示意 Fig.8 Schematic diagram of ZJU400: a) bottom plate air inlet hole; b) apical plate air outlet hole

以拿来和模拟结果进行对比。由于快速旋转气体充 分混合,出风温度可认为舱内出风口区域稳定温度。 由表 1 和表 2 可知,出风口区域舱内空气温度为 289.2 K,而水冷壁面的定性温度为 281.5 K,温升为 7.7 K。出风口附近的气体温度为 301 K,相对水冷 壁面温升的模拟结果为 8 K,和实验结果相符合。考 虑风冷对舱体温度的影响,实际风冷带走了水冷热 量的 8.5%。若没有风冷带走这部分热量,温升将大 约上升至 8.35 K,与模拟结果相符合,验证了温度 场模拟结果准确性。

表 1 风冷散热测量数据及结果

Tab.1 Measurement data and results of air

cooling heat dissipation		
参数	数值	
进风口1温度	13.3 °C	
进风口1进气质量流	2.775 kg/s	
进风口 2 温度	13.2 °C	
进风口 2 进气质量流	2.127 kg/s	
出风口温度	16.2 °C	
风冷总散热量	14.5 kW	

表 2 水冷散热测量数据及结果

Tab.2	Measurement data and results of water
cooling heat dissination	

cooling near dissipation		
参数	数值	
水冷壁进水温度	7 °C	
水冷壁出水温度	10 °C	
进水流量	49 m ³ /h	
水冷壁定性温度	8.5 °C	
水冷散热量	171.2 kW	

4 结论

基于 ZJU400 土建离心机的 CFD 模拟方法,给出 了 FLUENT 的边界条件、粗糙度、计算方法,网格 拓扑结构划分和最小边界层厚度的设置。

将 CFD 模拟所得风阻功率与实测电机功率进行 了对比,对比结果吻合度较高,验证了 CFD 计算土 建离心机风阻功率的可靠性。给出了 ZJU400 风阻功 率的拟合公式,可为其他离心机风阻功率计算提供 参考。

文中给出了 ZJU400 舱体内速度、温度 A-A 截面 云图。模拟所得速度场的随流比与文献[8]计算所得随 流比相符。模拟所得温升与实验测量数据吻合,验 证了温度云图的可靠性。因舱体内温度、速度分布 实测非常困难,目前国内还没有实测数据,提供了 数值模拟获取流场参数的思路,为解析计算提供参 考和依据。

参考文献:

- [1] 袁晓铭,曹振中,孙锐,等. 汶川 8. 0 级地震液化特性 初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.
 YUAN X M, CAO Z Z, SUN R, et al. Preliminary Research on Liquefaction Characteristics of Wenchuan 8. 0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296.
- [2] 孙锐,袁晓铭,王永志,等. NEES 系统中振动离心机最新进展及国内振动离心机发展设想[J]. 世界地震工程,2010,26(1):31-39.
 SUN R, YUAN X M, WANG Y Z, et al. Latest Progress of Centrifugal Shaker in NEES and Developmental Con-

of Centrifugal Shaker in NEES and Developmental Conception of Domestic Centrifugal Shaker[J]. World Earth-

quake Engineering, 2010, 26(1): 31-39.

- [3] 杜延龄.大型土工离心机基本设计原则[J]. 岩土工程 学报, 1993, 15(6): 10-17.
 DU Y L. Fundamental Design Principles of Large Geotechnical Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(6): 10-17.
- [4] KIM Dong-soo, KIM Nam-ryong, CHOO Yun wook, et al. A Newly Developed State of the Art Geotechnical Centrifuge in Korea[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 17(1): 77-84.
- [5] NICOLAS-FONT J. Design of Geotechnical Centrifuges[M]. Balkema: Rotterdam, 1988.
- [6] 刘新民. 2#离心机风阻功率及气动热计算[M]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 1988: 1-25. LIU xin-min. Calculation of Wind Resistance Power and Aerodynamic Heat of 2 # Centrifuge[M]. Mianyang: Institute of System Engineering, CAEP, 1988: 1-25.
- [7] 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 P, YIN Y H, LI S L, et. Analysis of Wind Resistance Power and Starting Process of Centrifuge[J].
 Equipment Environmental Engineering. 2015, 12(5): 105-110.
- [8] 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 Y H, YU S R, FENG X J. Aerodynamic Power of Geoteclmical Centrifuges with Closed Chamber [J].
 Journal of Mianyang Normal University, 2010, 29(2): 1-5.
- [9] 杜延龄.大型土工离心机基本设计原则[J]. 岩土工程 学报, 1993, 15(6): 10-17.
 DU Yan-ling. Fundamental Design Principle of Large Geo—Technical Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(6): 82— 95.
- [10] 孙述祖. 土工离心机设计综述(二)[J]. 水利水运工程学报, 1991, 3(2): 219-226.
 SUN Shu-zu. Review of Design for Geotechnical Centrifuge(II)[J]. Hydraulic and Marine Science Research, 1991, 3(2): 219-226.
- [11] 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 Y, YIN Y H, WAN Q, et al. Wind Resistance and Flow Field Characteristic Analysis of Geotechnical Centrifuges Based on CFD[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 52-56.
- [12] MENTER F. Zonal Two Equation k-ω Turbelence Models for Aerodynamic Flows[C]// The 24th Fluid Dynamics Conference. Orlando, 1993.
- [13] MENTER F. Two-Equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32: 1598-1605.
- [14] 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(8): 909-914.
 WANG Y Z, CHEN Z S, SUN R. Simplified Calculation Technique for Geotechnicai Centrifuge of Steady-state Willd Resistance Power and Optimization Cooling De-

sign[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(8): 909-914