

# 低真空度下土工离心机产热机理试验研究

郑传祥, 陈建阳, 蒋建群, 林伟岸, 陈云敏

(浙江大学, 杭州 310058)

**摘要:** **目的** 为 1000 g 以上的大型高速土工离心机提供散热方案, 保证土工离心机的正常工作。**方法** 通过试验研究和理论分析相结合的方法, 研究低真空度下高速转子的产热机理, 分析散热模式。**结果** 绝对压力越高, 离心室内的升温速度越快。不同真空度下 (绝对压力 10000、5000、3000、2000、1000 Pa), 离心机驱动电机的输入功耗分别为 2.17、3.79、5.17、7.66、11.56 kW。超重力高速土工离心机的产热主要由空气与高速转子的摩擦引起的第一热源, 由高速旋转空气与离心舱壁面摩擦产生的第二热源, 还有其他机构摩擦、空气与底部顶部摩擦产生的少量热源。**结论** 第一热源产生的壁面热量可以通过设置冷却夹套快速带走, 离心舱中心产生的第二热源的热量可以通过通入适量的冷风加以冷却, 还可以通过注入冷却剂快速蒸发, 利用汽化潜热进行快速冷却。

**关键词:** 土工离心机; 风阻功率; 低真空度; 产热机理

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.014

**中图分类号:** TB66

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)03-0084-05

## Experiment of Heat Generation Mechanism of Geotechnical Centrifuge under Low Vacuum Degrees

ZHENG Chuan-xiang, CHEN Jian-yang, JIANG Jian-qun, LIN Wei-an, CHEN Yun-min  
(Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide heat dissipation solution for the large-scale high-speed geotechnical centrifuge of over 1,000 g, so as to ensure its normal operation. The heat generation mechanism of high-speed rotor under low vacuum was studied and the heat dissipation mode was analyzed in combination with experimental research and theoretical analysis. The higher the absolute pressure, the faster the temperature rise in the centrifugal chamber. The input power consumption of centrifuge's driving motor was respectively 2.17, 3.79, 5.17, 7.66 and 11.56 kW under different vacuum (absolute pressure of 10,000, 5,000, 3,000, 2,000 and 1,000 Pa). The heat of super-gravity high-speed geotechnical centrifuge was mainly generated by the first heat source from the friction of air and high-speed rotor, the second heat source from the friction of high-speed rotated air and the centrifugal tank wall, and a small amount of heat from the friction of other mechanism and the friction of air and bottom/top. The wall heat generated by the first heat source can be quickly taken away by arranging a cooling jacket, the heat of the second heat source generated in the center of the centrifugal tank can be cooled by introducing an appropriate amount of cold air, and can also be rapidly evaporated by injecting a coolant and rapidly cooled with latent heat of vaporization.

**KEY WORDS:** geotechnical centrifuge; wind resistance power; low vacuum degree; heat generation mechanism

收稿日期: 2019-09-01; 修订日期: 2019-10-18

Received: 2019-09-01; Revised: 2019-10-18

作者简介: 郑传祥 (1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为化工机械。

**Biography:** ZHENG Chuan-xiang (1968—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: chemical process machinery.

土工离心机的产热与散热研究对离心舱内仪器设备的安全运行十分重要，低加速度下转子及吊篮与空气摩擦的产热量并不太大，采用一般冷却散热方法可以实现很好的散热，达到离心舱内温度控制在低于 45 °C 的目标。随着离心加速度的增大，或者吊篮负荷的增加，产热量呈非线性几何级数的增加。当加速度达到 1500 g 的时候，直径 9 m 的土工离心机风阻功率可以达到 10 MW，相当于 50000 m<sup>2</sup> 建筑所需的制冷量。因此，在这么小的空间内要将这么多的热量散去是一个难题。目前比较有效的解决方法是对离心舱抽真空，以减小风阻功率，但是在真空条件下，产热与传热机理与常压下有所不同，即空气稀薄不利于热量传递，因此如何将离心舱内的热量在真空条件下传递出去是又一个难题。文中将通过实验对低真空度下的高加速度土工离心机产热情况进行测试与分析，为对应的散热措施提供依据<sup>[1-5]</sup>。

## 1 风阻功率的计算

### 1.1 国内外计算方法进展

目前，国内外对大型土工离心机的风阻功率  $N_w$  的计算主要有前苏联 АЭИС-2 离心机计算方法：

$$N_w = \frac{\rho}{2} \sum S_i \omega^3 C_i A_i B_i \quad (1)$$

式中：系数  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  等均通过试验获得。

法国 Actronic 公司的计算方法为：

$$N_w = \rho S_n C_x \omega (\omega R - v_v)^2 / 2 \quad (2)$$

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。

中国空间技术研究院的方法及中国工程物理研究院的计算方法为：

$$N_w = \rho C (1 - \alpha)^2 \omega^3 \psi / 2 \quad (3)$$

式中： $\rho$  为空气密度； $\alpha$  为随流比系数； $\omega$  为吊篮转速； $\psi$  为速度衰减系数。

美国 Davis 的计算方法为：

$$N_w = \rho (B_1 (1 - \alpha)^2 \omega^3 - B_2 \alpha^2 \omega^3) \quad (4)$$

式中： $B_1$  和  $B_2$  分别为其力矩系数； $\alpha$  为随流比系数。

美国公式首次分开考虑了空气与壁面的摩擦产热因素，但是没有具体的占比计算方法。可见国内外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，所有公式显示风阻功率均与高速转子的三次方成正比。

### 1.2 存在的问题

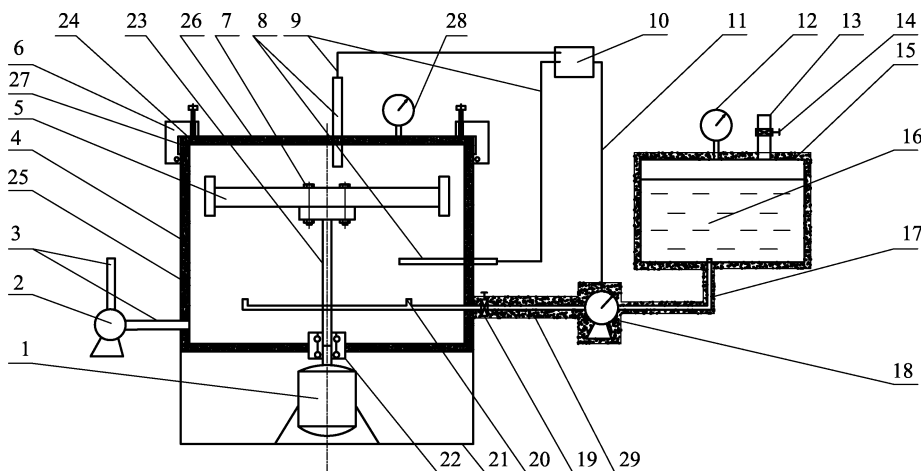
国内外对风阻功率的计算，侧重于转子与流体产生的阻力，机械部件摩擦功耗以及转子加速过程的功耗。计算得到的是舱室内整体的产热，并没有区分转臂和舱室内空气摩擦产生的热量（下称第一热源），以及旋转空气和壁面摩擦产生的热量（下称第二热源）。这样区分的目的是为了揭示土工离心机内部产热机理，从而采取更加有效的散热方法。因此只有区分好两部分产热原因，测量其各自的风阻功率，才能更有效地设计土工离心机的温控系统。

## 2 风阻功率测试

为了得到第一热源和第二热源的数据，设计了一套高速转子系统，以及相应的风阻功率测试系统，对不同的真空环境不同真空度下壁面温度、输入电机功率、产热量进行测试。

### 2.1 测试原理

测试原理如图 1 所示。在绝热效果足够好的情况



1. 驱动电机；2. 真空泵；3. 真空抽气接管；4. 带隔热层真空腔体；5. 高速转子；6. 快开铰链；7. 锁紧螺钉；8. 温度传感器；9. 温度传感器数据线；10. 温控驱动器；11. 温控驱动器数据线；12. 压力表；13. 制冷剂充装口；14. 充装口阀门；15. 制冷剂储罐；16. 制冷剂；17. 制冷剂输送管；18. 计量泵；19. 阀门；20. 制冷剂喷头；21. 承外压壳体；22. 密封装置；23. 中心转轴；24. 防冲击内衬；25. 隔热材料；26. 上盖；27. 密封垫片；28. 真空表；29. 隔热层

图 1 测试系统  
Fig.1 Test system

下,带隔热层真空腔体内高速转子与空气摩擦产生的热量与制冷剂汽化吸收的热量近似相等,因此可以通过读取计量泵的制冷剂流量来计算出高速转子与空气摩擦产生的热量。当控制真空腔体内的温度与真空腔体外的温度相同时,真空腔体本身与环境空气之间的热量传递是很少的,几乎可以忽略,从而可以减少因设备本身引起的误差。

## 2.2 测试系统

测试系统由试验机、真空泵、计量泵、电子流量计、氟利昂储罐、真空表、温度显示仪表及管线组成。

## 2.3 测试参数

在不同真空度下测得以下数据。

1)不同真空度下(绝对压力 10000、5000、3000、2000、1000 Pa)离心室内每隔 1 min 的温度,以求得升温速率。

2)不同真空度下(绝对压力 10 000、5000、3000、2000、1000 Pa),由氟利昂储罐通过计量泵,经导管向离心室内输入的液态氟利昂。维持离心机运行 30 min,或离心室温度不再上升,二者哪一个先达到就结束试验,分别测得此时的氟利昂消耗量,以求得对应产热量。

3)电机额定输入功率。通过记录输入电流和电压得到。

## 2.4 测试结果

### 2.4.1 离心室内升温情况

从测试数据可以看出,绝对压力越高,升温速度越快。这是由于绝对压力越高,空气密度越大,高速转子与空气的摩擦产热量越大,因此体现在离心室内温度越高。离心舱内的温度变化情况如图 2 所示。

### 2.4.2 不同真空度下的产热量

由于风阻功率最后均转化为热能,因此可以通过热量平衡法来测定风阻功率。在本实验中,高速转子产热量  $Q$  主要由以下几部分组成:制冷剂的显热加汽化潜热  $Q_1$ ;通过钢材壁面稳定传导的热量  $Q_2$ ;离心室内空气温度上升的蓄热量  $Q_3$ ;离心机筒体钢材的吸热量  $Q_4$ ;其他散热  $Q_5$ 。因此一段时间内,高速转子产生的热量主要为  $Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5$ ,其中  $Q_5$  包括离心舱其他壁面散热、真空抽吸带走热量及管路系统散热,这部分量均很少,略去不计。

1)制冷剂吸收的热量  $Q_1$  可通过式(5)计算:

$$Q_1 = m_1\gamma + c_1 m_1 \Delta t_1 \quad (5)$$

制冷剂为 R22,在环境温度下的汽化潜热为 234.1 kJ/kg,气体平均比热为 1.0975 kJ/(kg·K)。 $\Delta t_1$  为环境温度到离心舱内转子终了温度的差值,不同实验组 R22 的消耗质量见表 1。离心室内外温差作为显热温差,因此制冷剂带走的热量  $Q_1$  见表 1。

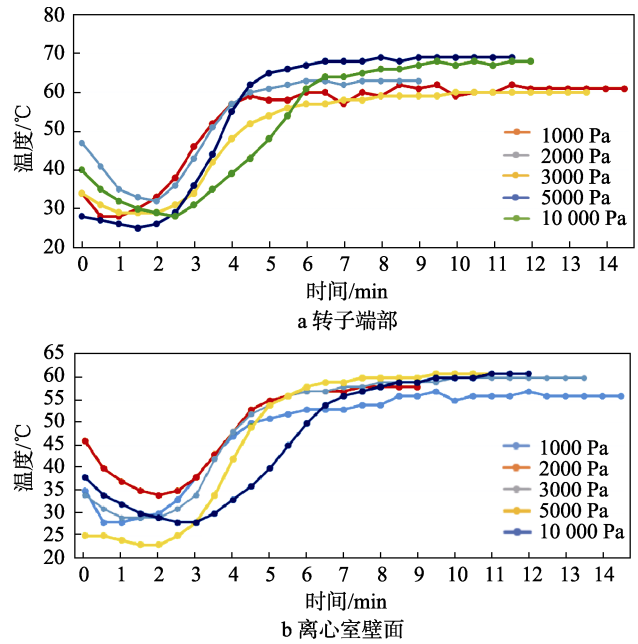


图 2 不同真空度下离心舱内的温度变化曲线  
Fig.2 Temperature variation curves of the centrifugal tank under different vacuum: a) the rotor end; b) centrifugal chamber wall

表 1 制冷剂吸收热量  
Tab.1 Heat absorbed by the refrigerant

| 压力(绝压)/Pa | $\Delta t_1$ /K | 制冷剂用量/L | $Q_1$ /kJ |
|-----------|-----------------|---------|-----------|
| 1000      | 22              | 2       | 285.05    |
| 2000      | 25              | 3       | 865.984   |
| 3000      | 27              | 6       | 1746.41   |
| 5000      | 28              | 9       | 2630.46   |
| 10 000    | 31              | 16      | 4734.16   |

2)通过离心舱壁面散走的热量。钢的导热系数为 45 W/(m·K),一个大气压下空气的导热系数为 0.0267 W/(m·K),按照线性插值法计算得 1000 Pa 下的导热系数为 0.000267 W/(m·K)。因此离心舱内的热量在真空状态下的热传导非常小,可以按照式(6)估算<sup>[11]</sup>。

$$Q_2 = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (6)$$

式中:  $t_{w1}$ 、 $t_{w2}$  为壁面内外温差;  $\lambda$  为导热系数;  $d_2$ 、 $d_1$  筒壁内外径。计算结果见表 2。

表 2 离心舱壁面散走的热量  
Tab.2 Heat dissipated by the centrifugal tank wall

| 压力(绝压)/Pa | $(t_{w1}-t_{w2})$ /K | $Q_2$ /kJ  |
|-----------|----------------------|------------|
| 1000      | 6.5                  | 29.843 082 |
| 2000      | 9.8                  | 44.994 185 |
| 3000      | 13.7                 | 62.900 035 |
| 5000      | 17.3                 | 79.428 511 |
| 10 000    | 15.5                 | 71.164 273 |

3) 离心舱内空气的热量。离心舱内的空气按照不同真空度下空气密度计算,其吸收的热量从室温上升到转子终了温度,吸收的热量为  $Q_3$ 。

$$Q_3 = c_3 m_3 \Delta t_3 \quad (7)$$

空气在不同真空度下的比热为  $1.4001 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,空气的质量是按照离心室内平均温度下计算空气的蓄热量,结果见表 3。

表 3 离心舱内空气热量  
Tab.3 Air heat inside the centrifugal tank

| 压力 (绝压) /Pa | $Q_3/\text{kJ}$ |
|-------------|-----------------|
| 1000        | 0.437 037       |
| 2000        | 0.649 756       |
| 3000        | 1.180 087       |
| 5000        | 2.408 924       |
| 10 000      | 4.424 561       |

4) 离心舱筒体吸收的热量。离心舱侧壁为一层防撞衬里,其两侧均为真空,因此其内侧的温度由传感器测得。由于外侧为真空,可以近似认为内侧和外侧热阻相等,表现在温差上,空气到壁面和壁面到空气的温差也近似相等。因此,衬里的内外壁温可以近似得到。

$$Q_4 = c_4 m_4 \Delta t_4 \quad (7)$$

钢的比热为  $502 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,衬里层的质量是  $645 \text{ kg}$ ,按照内壁实测温度与初始温度的温差计算钢的蓄热量见表 4。

表 4 离心舱筒体吸收热量  
Tab.4 Heat absorbed by the centrifugal tank barrel

| 压力 (绝压) /Pa | $\Delta t_4/\text{K}$ | $Q_4/\text{kJ}$ |
|-------------|-----------------------|-----------------|
| 1000        | 6.5                   | 1052.32         |
| 2000        | 9.8                   | 1586.57         |
| 3000        | 13.7                  | 2217.96         |
| 5000        | 17.3                  | 2800.78         |
| 10 000      | 15.3                  | 2476.99         |

### 2.4.3 风阻功率计算

由于以上热量是在一个试验单元时间内进行的,达到稳定温度的时间长短不同,因此统一换算成功率单位。同时因为这些热量的来源主要是高速转子的风阻功率,因此可以近似认为这些热量就是该时间段内的风阻功率产热。将以上热量相加后得到总热量,除以时间以后即得到对应功率。作为对比值,将试验时离心机驱动电机输入功耗列于表 5。

表 5 风阻功率计算结果  
Tab.5 Calculation results of wind resistance power

| 压力 (绝压) /Pa | $Q/\text{kJ}$ | 时间/min | 实测功耗 $P/\text{kW}$ | 显示功耗/kW |
|-------------|---------------|--------|--------------------|---------|
| 1000        | 1367.66       | 10.5   | 2.17               | 4.37    |
| 2000        | 2498.22       | 11     | 3.79               | 6.897   |
| 3000        | 4028.46       | 13     | 5.17               | 7.95    |
| 5000        | 5513.08       | 12     | 7.66               | 9.87    |
| 10 000      | 7286.64       | 10.5   | 11.56              | 11.76   |

## 2.5 讨论

### 2.5.1 产热机理

由试验可以看出,超重力高速土工离心机的产热主要由空气与高速转子的摩擦引起的第一热源,由高速旋转空气与离心舱壁面摩擦产生的第二热源,还有其他机构摩擦、空气与底部顶部摩擦产生的少量热源均计入第三热源。实验结果验证了随着真空度的提高,产热量越来越小,因此提高真空度是一个非常有效的降低风阻功率的方法。

### 2.5.2 测试结果分析

从测试结果(如图 3 所示)可以看出,开始测试的时候,由于机器本身有蓄热没有计入,因此有一定误差。当机器蓄热达到稳定以后,试验测试结果与功率表实际显示功耗越来越接近,误差越来越小。

### 2.5.3 散热方式探讨

由于第一、第二热源占据产热量的绝大部分,对

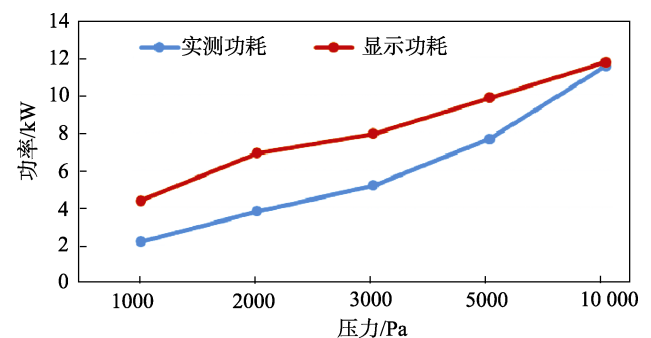


图 3 显示功耗与测试功耗  
Fig.3 Displayed and tested power consumption

散热方法可以进行对应的设计。第一热源产生的壁面热量可以通过设置冷却夹套快速带走,离心舱中心产生的第二热源的热量可以通过通入适量的冷风加以冷却,这个风量可以与真空泵的抽气速度相接近。另一种方法是注入冷却剂快速蒸发,利用汽化潜热进行快速冷却。该方法需要考虑冷却剂对环境的影响,以及如何纯化循环再利用的问题。

### 2.5.4 误差分析

在尽可能的情况下,已经考虑了所有产热和散热因素,但是由于试验设备本身的因素和测试条件的限制,还有一些误差会存在。误差主要可能的因素有以下几点。

1) 整个离心舱是金属制成,尽管在真空下稀薄空气对金属的导热系数非常小,但是机体还是会吸收一定的热量。对上顶盖的温度进行了测试,经过 8 h 的试验,温度从 29 °C 升高到 32.5 °C。下底盖也存在同样的问题,目前结构无法做到完全绝热,但是占比很小,在 15 min 内,这个散热量非常小。

2) 真空泵的抽吸带走了一定的热量,由于抽吸空气量是时刻变化的,目前没有很好的方法测定该部分热量。

3) 制冷剂在管道上有一部分吸热,数量也是非常小。

## 3 结论

通过对不同真空度下高速离心机产热量的测量,得出以下结论。

1) 随着绝对压力的升高,壁面和转子端部的温升速率均随之提高,且升温稳定后的转子温度也随之提高。

2) 离心机的产热主要由转臂与空气摩擦产热(第一热源)和空气与壁面摩擦产热(第二热源)两部分组成。根据热源产生的起因,可以通过抽真空以及往舱室通冷却剂的方法减少转臂与空气摩擦的产热,壁面部分的产热可以通过壁面以热传导的形式散去,还可以通过水冷的形式进行冷却。

### 参考文献:

- [1] YIN Yi-hui, DOU Lin-long. Aerodynamic power of geotechnical centrifuge (Institute of Structural Mechanics, CAEP, P. O. Box 919-401, Mianyang, Sichuan, 621900, China); Source: Advanced Materials Research[J]. Advanced Materials Research, 2012, 421: 788-791.
- [2] 安培浚, 赵纪东. 美国国家地震减灾计划 2008~2012 年战略计划介绍[J]. 科学研究动态检测快报, 2008(42): 1-6.  
AN Pei-jun, ZHAO Ji-dong. Introduction to the 2008-2012 National Earthquake Disaster Reduction Plan of the United States[J]. Scientific Research Dynamic Detection Express, 2008(42): 1-6.
- [3] 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(S1): 909-914.  
WANG Yong-zhi, CHEN Zhuo-shi, 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.
- [4] KRISHNAIAH S, SINGH D N. Centrifuge Modeling of Heat and Mass Transfer Through Soils[C]// 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Singapore, 2003.
- [5] 王永志. 大型动力离心机设计理论与关键技术研究[J]. 国际地震动态, 2014(5): 44-45.  
WANG Yong-zhi. Design Theory and Key Technologies of Large Power Centrifuge[J]. Journal of International Seismology, 2014(5): 44-45.
- [6] 杜延龄. 大型土工离心机基本设计原则[J]. 岩土工程学报, 1993(6): 10-17.  
DU Yan-ling. Fundamental Design Principles of Large Geotechnical Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993(6): 10-17.
- [7] 尹益辉. 大型离心机转子驱动功率的理论与实测融合分析方法研究总结报告[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 2018.  
YIN Yi-hui. A Summary Report of the Theoretical and Measured Fusion Analysis Methods for the Driving Power of Large Centrifuge Rotors[R]. Mianyang: Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [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 Yi-hui, YU Shao-rong, FENG Xiao-jun, et al. Wind Resistance Power of a Closed Chamber-type Geotechnical Centrifuge [J]. Journal of Mianyang Normal University, 2010, 29(2): 1-5.
- [9] 尹益辉, 刘远东, 王兴伦, 等. 旋臂式离心机负载转矩及其驱动电机额定功率的计算方法[J]. 机电工程, 2011, 28(6): 659-662.  
YIN Yi-hui, LIU Yuan-dong, WANG Xing-lun, et al. Calculation Method of Load Torque of Rotary Arm Centrifuge and Rated Power of Its Driving Motor[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2011, 28(6): 659-662.
- [10] 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, 2016.  
YIN Yi-hui. Calculation report of wind resistance and room temperature rise of high-speed geotechnical centrifuge of Chinese Academy of Water Sciences[R]. Mianyang: Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, 2016.
- [11] 徐尚龙, 传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
XU Shang-long. Heat Transfer Science[M]. Beijing: Science Press, 2016.