

DOI: 10.11779/CJGE2015S1009

海上风机筒型基础黏土地基离心模型试验研究

王爱霞¹, 邢占清^{2, 3}, 张 嘎¹, 符 平^{2, 3}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038)

摘 要: 在海洋工程基础设计中, 筒型基础得到越来越广泛的应用。多为饱和淤泥质土的海洋工程地基受力环境复杂, 利用离心机用较小模型可再现原型应力的特点, 采用清华大学 50 g-t 离心机对饱和淤泥质土地基上筒型基础模型进行了离心模型试验。基于试验结果分析了水平荷载施加过程中基础和地基的变形和受力特性, 以及基础周围地基中孔压的变化。基础上作用有水平静推力和风机循环荷载, 若静推力和循环荷载的幅值之和不超过临塑荷载, 循环荷载对基础变形影响有限, 若超过临塑荷载, 长期循环荷载作用造成的地基累积变形使筒与地基脱离, 从而造成筒与地基间吸力逐渐丧失, 基础发生倾倒破坏。

关键词: 筒型基础; 黏土; 离心模型试验; 临塑荷载; 循环荷载

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0041-05

作者简介: 王爱霞(1980-), 女, 工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: wax05@163.com。

Centrifugal model tests on bucket foundation in clay for offshore wind turbine

WANG Ai-xia¹, XING Zhan-qing^{2, 3}, ZHANG Ga¹, FU Ping^{2, 3}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Institute of Water

Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Beijing Water Hydropower Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The bucket foundation is widely used in ocean engineering. Most of the ocean foundations are in saturated mucky soil, meanwhile, they suffer from the complex stress environment. A series of centrifugal model tests are conducted in the bucket foundation on the saturated mucky soil to simulate the prototype stress in the foundation. Based on the analysis of the typical tests, the stress and deformation and pore pressure characteristics of the foundation are introduced under cyclic horizontal loading conditions. The horizontal static and cyclic loadings are conducted on the foundation. If the total load exceeds the critical plastic one of the foundation, its deformation is negligible, or else the accumulated deformation formed by the long-term cyclic loading makes the bucket and the ground be apart, which will cause the loss of the suction and the dumping of the bucket foundation.

Key words: bucket foundation; clay; centrifugal model test; critical plastic load; cyclic loading

0 引 言

随着近海能源的大力开发, 近海工程地基基础研究成为岩土工程领域的热点问题^[1-2]。近海地基一般为饱和砂土和淤泥质土, 承载能力较差, 且由于海洋基础受力条件复杂, 设计及施工难度较大。目前, 近海工程基础一般采用桩基础、重力式基础、筒型基础、浮式基础等基础形式^[2]。

筒型基础以其成本低、海上安装运输方便等优点, 越来越受到海洋工程尤其海上风力发电行业的青睐。筒型基础首次被成功用于丹麦的 Frederikshaven 风场, 2010 年国内道达海上风电研究院将其成功运用于海上测风塔基础。但筒型基础作为一种新兴的基础形式, 还有很多问题等待去验证和研究, 国内外科研人

员已就此做了很多研究工作^[3-7]。

本文采用离心机对从近海海域采取的淤泥试样进行了一系列的离心模型试验。对模型在小变形情况(正常工作情况)下基础的受力变形特性及地基的响应进行了试验研究, 并由变形和受力特点研究了地基的破坏形式, 对破坏机理进行了初步的探讨, 对近海风机工程建设给出初步建议。

1 试验设备

试验采用清华大学土工离心机, 有效半径 2 m,

基金项目: 中国水利水电科学研究院专项项目(监 1423)

收稿日期: 2015-03-26

最大离心加速度 250g, 最大容量 50 g·t。

试验中需要施加水平的静载荷和循环载荷。静载荷靠气缸施加, 试验过程中通过改变气缸的压力来调节静载荷的大小, 静载荷的大小采用北京正开仪器有限公司生产的 MCL-S0/S2 系列拉压力传感器测量, 其量程为 0~1000 N。循环载荷用实验室研发的一套设备来施加^[8], 通过偏心轮拉动弹簧在桩上作用一个循环的动载荷, 以其来模拟风机转动中的循环载荷, 循环载荷的大小采用同是北京正开仪器有限公司生产的 MCL-S0/S2 系列拉压力传感器, 量程为 0~800 N。筒基础的水平方向变形采用德国 Wenglor 公司生产的激光位移传感器测量, 传感器量程为 40~160 mm。筒型基础周围布置 5 个孔压传感器, 传感器量程为 500 kPa 和 700 kPa 两种。试验装置和传感器位置见图 1。

为了固定传感器和加载设备以及方便模型试样的拆装, 设计了一个水平支撑台, 将所有的设备固定安装在支撑台上, 试样制备完成后, 将支撑台安装在模型箱上即可。

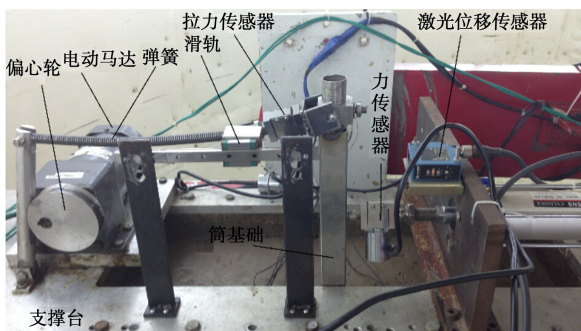


图 1 模型箱与加载设备结构示意图

Fig. 1 Photo of model box and loading equipment

2 模型制备

试验采用尺寸为 60 cm×20 cm×52 cm 的模型箱制备土样模型。基础采用不锈钢薄壁筒制成, 筒的直径为 30 cm, 高度 12 cm, 厚度 1 mm。考虑到基础模型尺寸较大, 大变形情况下可能会有较大的边界效应, 后经多次验证, 基础埋深较浅且主要发生转动倾倒破坏, 影响范围较小; 又因为本实验侧重机理研究, 重在研究破坏的过程, 边壁影响造成承载力的提高对机理分析的影响不大, 实际工程若参考承载力需要考虑这个问题。为了方便测取筒型基础周围地基土的反应, 考虑到筒基础的对称性, 取对称的半个筒进行模拟, 地基模型制备完成后, 均匀用力将筒型基础模型压入到地基中设计位置。单调载荷作用点、循环载荷作用点及位移传感器监测点距泥面处距离分别为 13, 27, 19 cm。基础模型照片与位置示意图见图 2。

试验地基采用饱和的淤泥质粉质黏土地基, 土样比重为 2.75, 塑限 $w_p=27.8\%$, 液限 $w_L=38.3\%$, 三轴固结不排水剪切试验强度指标为 $c_{cu}=6$ kPa, $\phi_{cu}=18^\circ$ 。制样干密度为 1.55 g/cm³。

饱和淤泥土地基模型制备方法为: 将足量的水和淤泥试样充分混合搅拌, 之后密封浸泡约 24 h, 保证试样充分饱和且均匀。制样采用分层制取的方法, 先在模型箱内加入一定深度的水, 制样时, 淤泥试样始终处于水面以下, 在试样中间竖向插入 8~10 根 2 cm 宽度土工织物, 起竖向砂井作用, 之后再在试样表面铺设一层土工织物垫层, 起导水和过滤的作用, 垫层上压荷载板, 荷载板上有排水孔, 以方便水的排出。采用气动千斤顶分级施加固结压力, 最大固结压力为 0.5 MPa。

土样侧面位移采用非接触位移测量系统^[9]测取。地基制备完成后, 去掉侧面玻璃板, 在试样上随机嵌入白色水磨石颗粒, 形成具有色彩差异的测量区域。

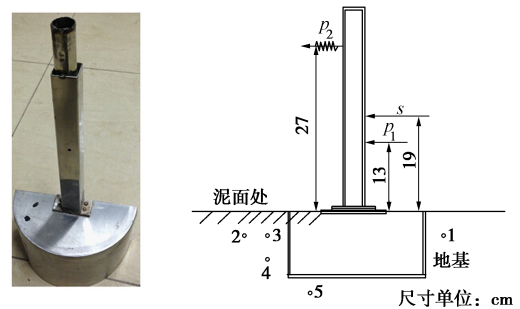


图 2 基础模型照片及位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bucket model

3 典型结果

本文采用两个平行试验对结果进行分析, 试验编号分别为 0706 与 1231, 两个试验条件相同, 只是加载条件略有不同。采用直径为 30 cm、高度为 12 cm 的筒型基础模型, 在 100g 的情况下, 对应原型筒基础直径为 30 m, 高度 12 m。加载至 100g 固结 10 min, 施加静力荷载至某一定值 (模拟风机所受水平静载荷), 稳定后施加循环荷载, 循环荷载持续作用一段时间后停止。逐级加大静荷载至另一更高值, 再次施加循环荷载。之后 1231 试验停止循环荷载, 0706 试验循环荷载持续作用。逐级施加静荷载至 680 N 左右时停止试验。本文以 1231 试验为基本试验进行介绍, 若无特殊说明, 均指 1231 试验结果。

试验结束后, 受压侧筒基压入土中 (见图 3 (a)), 受拉侧筒基被拔出土体很小一部分 (见图 3 (b)), 筒基础发生了转动。在受拉侧土体中出现一些细小的拉裂纹, 筒基础顶部与土体之间有小的脱开。

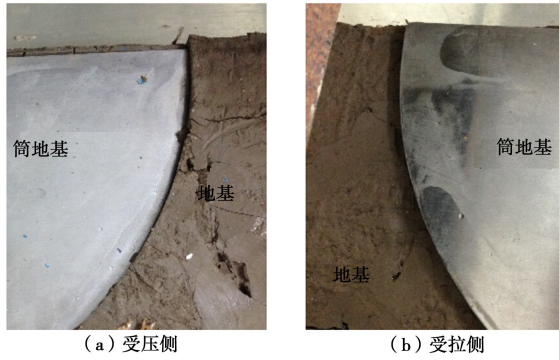


图 3 试验结束后地基基础图片

Fig. 3 Photo of bucket model after tests

基础的受力和位移都简化到泥面处进行计算。基于图像位移测量系统确定基础的转动中心后（经测算为距筒顶 4 cm 深度处），将激光传感器测得的水平位移换算至泥面处作为泥面处基础的位移。本文中所有归到泥面处的位移都按基础绕距筒顶 4 cm 处转动中心发生转动来计算。试验过程中泥面处位移的时程曲线如图 4 所示。

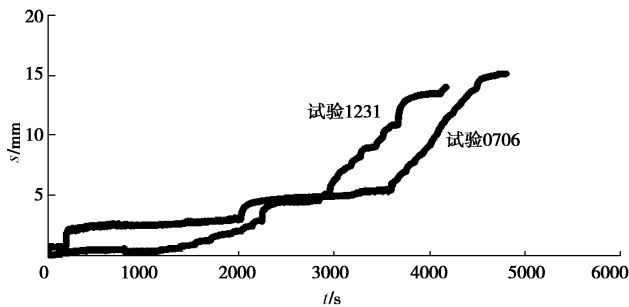
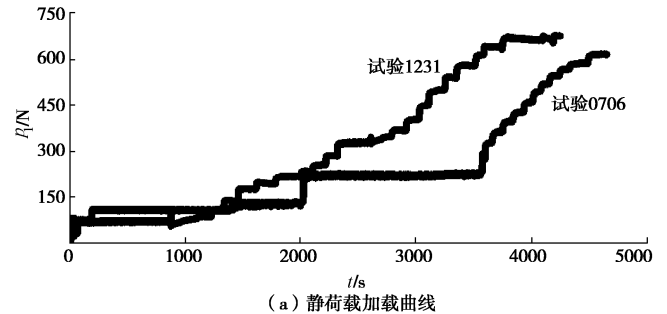


图 4 泥面处位移时程曲线

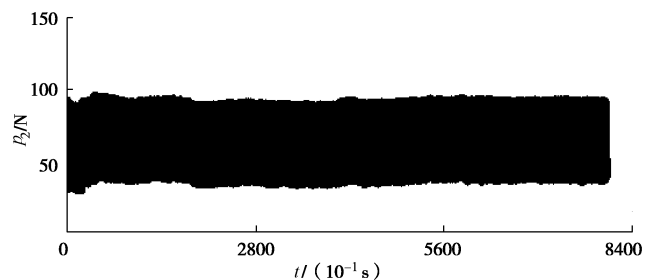
Fig. 4 Time-history curves of displacement at soil surface

试验过程中静荷载和循环荷载施加过程如图 5 所示。首先给基础一个 75 N 左右的单调荷载，之后施加循环荷载。第一阶段循环荷载在弹性阶段施加，循环荷载在 45~105 N 之间变化，循环荷载作用近 15 min 左右（800 多次循环），此时造成的筒基础的水平变形很小，所以弹簧的幅值和平均值基本保持不变，说明此时循环荷载造成的筒基础的变形都是弹性的，在弹性变形阶段，循环次数对地基的承载特性影响不大。之后逐渐增大单调荷载，至 330 N 左右后，再次施加循环荷载，由于基础水平方向的变形造成了弹簧的松弛，有效拉伸长度变短，幅值减小为第一阶段幅值的一半左右。第二阶段循环荷载刚加上时，筒基础在拉伸力下发生了一定的变形，初始段循环荷载平均值和幅值下降很快。之后在循环荷载的作用下，塑性变形逐渐增大，循环荷载平均值和幅值都有逐渐下降的趋势，但由于变形速度减慢，下降趋势减慢。循环荷载在 298~328 N 之间变化，循环荷载作用近 5 min 左右

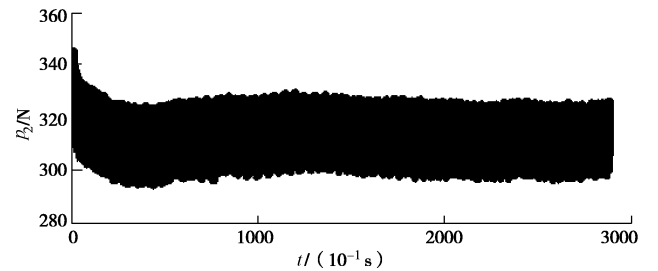
（近 300 次循环），虽然循环荷载的幅值远小于第一循环阶段，且作用时间也短的多，但造成的基础的变形远大于第一次循环。所以，在此阶段，循环荷载长期作用对基础安全影响更大。



(a) 静荷载加载曲线



(b) 循环荷载-第1次循环



(c) 循环荷载-第2次循环

图 5 试验荷载时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of stress

筒型基础的 $p-s$ 曲线如图 6 所示。可以看出曲线有两个拐点，分别对应着地基的临塑荷载 210 N 左右和极限荷载 600 N 左右。因此，两段循环荷载分别作用在弹性阶段和塑性阶段，由 $p-s$ 曲线可见，弹性阶段循环作用时间较长而且幅值较大，但在此阶段土中发生弹性变形，造成的变形累积值不大。在第二阶段循环中，虽然作用时间短且幅值相对较小，但其造成的变形累积相对较大。在临塑荷载后，循环荷载的作用表现的更明显。0706 试验由于有循环荷载的持续作用，其变形比 1231 试验增速要大， $p-s$ 曲线倾斜更明显。

图 7 给出了孔压传感器测得的、基础周围几个典型位置处孔压的发展变化曲线，共给出了 #1~#5 传感器的数据。可以看到，基础周围不同位置孔压有较大差别。固结阶段，下部孔压由于基础及土的下沉增大较多。加载过程中，左侧 #2~#4 受压部位孔压较大，

其中#4最大, #4受到右侧基础向下向左的挤压作用, 且其位置在3个左侧传感器中最偏下, 这造成其孔压最大。#2与#3水平位置相同, #2距离筒型基础较远, 所以#2孔压变化与#3变化曲线相似, 但小于#3。#5在基础绕左侧角点发生转动时, 会受到挤压作用, 加上位置较深的影响, #5孔压值较高。之后随着转动拔出, #5号位置孔压值又逐渐下降。右侧#1传感器由于基础的慢慢脱离, 开始孔压较小, 之后随着基础与右侧土体的脱离, 孔压逐渐稳定。

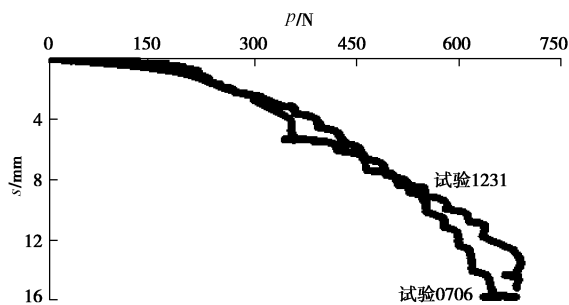


图6 泥面处 $p-s$ 曲线

Fig. 6 Loading-stress curves at soil surface

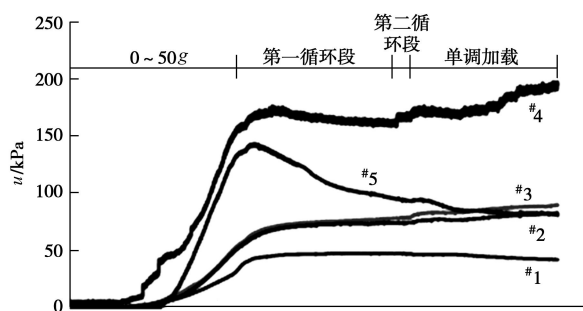


图7 试验 1231 孔压时程曲线

Fig. 7 Time history curves of pore pressure in soil

加载过程中, 上部荷载通过筒壁把力传递给其周围的土体, 由于筒基础直径较大且埋深较浅, 变形主要出现在局部, 整体上没有贯通, 地基也没有发生整体的破坏。多次试验验证, 筒的直径对地基及基础的变形有很大的影响。筒的直径大时倾向于局部破坏, 基础的刚性转动主要对筒壁周围土体影响较大。筒的直径小时, 更容易达到整体的贯通而发生整体的倾倒破坏。

图8, 9为地基中位移场的分布图, 水平位移以向右为正。由图8可见, 当水平静推力和循环荷载较小并没有超过临塑荷载时, 基础周围变形量和影响范围较小, 在静载荷和循环荷载的共同作用下, 左侧受到筒基础的挤压水平位移影响区域较大, 右侧由于受拉使得筒基础与土体有脱开的趋势, 造成土体与基础间的吸力增强, 地基内发生微小变形, 但此时筒基础和地基土体没有明显的脱开。水平荷载大于临塑荷载后

的水平位移场如图9所示, 基础周围变形量进一步扩大, 但变形没有向更大范围扩展, 变形的零点位置与图8中接近, 变形主要还是发生在筒基础的周围, 影响范围不大。若此时循环荷载反复作用, 会使得脱开区土体进一步软化, 吸力更大程度的丧失, 到某种程度会发生基础突然倾倒的情况。这在其他试验中也已得到验证。

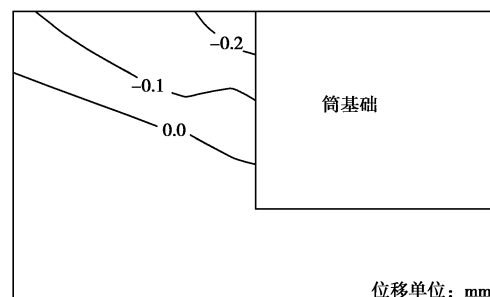


图8 较小水平力时位移场分布

Fig. 8 Displacement curves around basement under small load

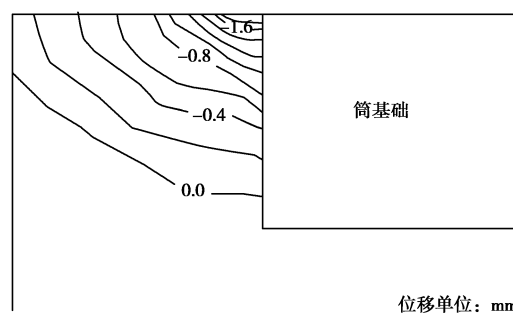


图9 较大水平力时位移场分布

Fig. 9 Displacement curves around basement under large load

4 结 论

在清华大学 50 g·t 试验机上开展了近海风机筒型基础黏土地基的离心模型试验, 利用弹簧和偏心轮设备模拟了风机运行中可能遇到的循环荷载, 通过控制气缸模拟作用在风机基础上的静推力。主要对基础在荷载作用下的变形和受力特性进行了分析, 得出了以下结论:

(1) 水平静推力小于临塑荷载时, 施加循环荷载造成的累积变形不明显。水平静推力大于临塑荷载时, 在循环荷载作用下, 受拉侧筒与地基逐渐脱开, 造成吸力逐渐丧失, 可能会使受压侧土体突然达到极限而破坏。建议设计时以临塑荷载作为设计参考荷载, 并取一定的安全系数。

(2) 随着静推力和循环力的作用, 受拉侧逐渐与土体脱开, 土体保持直立, 不再进一步变形。受压侧土体被挤压, 变形随着循环荷载的作用而累积。土体的变形主要发生在筒型基础的周围, 随着水平推力的

增加, 变形范围没有明显变大的趋势。

(3)筒基础在水平力作用下发生绕基础内某一深度的转动, 受压侧压入土体内部, 受拉侧被拔出土体, 受拉侧筒体内部出现空隙。

(4)在水平静推力和循环荷载作用下, 筒型基础周围地基受压侧的孔压升高, 另一侧孔压保持不变。孔压值大小与距离筒基础的远近有关, 距离越远孔压的变化越小。

参考文献:

- [1] 2014—2018 年中国风力发电行业投资分析及前景预测报告[R]. 深圳: 中投顾问, 2014. (Investment and forecast report on China wind power industry[R]. Shenzhen: CI Consulting, 2014. (in Chinese))
- [2] 罗承先. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 2012, 17(3): 24 - 31. (LUO Cheng-xian. Wind power generation today in the world and prospect forecast[J]. Sino-global Energy, 2012, 17(3): 24 - 31. (in Chinese))
- [3] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations[J]. Géotechnique, 2005, 55(4): 287 - 296.
- [4] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundation[J]. Géotechnique, 2006, 56(1): 3 - 10.
- [5] 刘 锟, 赵春风, 王建华. 软土地基桶形基础室内模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 477 - 480. (LIU Kun, ZHAO Chun-feng, WANG Jian-hua. Model test study of bucket foundation on soft clay strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 477 - 480. (in Chinese))
- [6] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130 - 134. (HUANG Wei-ping, LIU Jian-jun, ZHAO Zhan-hua. The state of the art of study on offshore wind turbine structures and its development[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 130 - 134. (in Chinese))
- [7] 鲁晓兵, 王义华, 张建红, 等. 水平动载下桶形基础变形的离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 789 - 791. (LU Xiao-bing, WANG Yi-hua, ZHANG Jian-hong, et al. Centrifuge test on the deformation of bucket foundation under horizontal vibration load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 789 - 791. (in Chinese))
- [8] 荣 冰, 张 嘎, 王富强. 离心场中风力电机桩基复杂加载测试设备的研制[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1596 - 1600. (RONG Bing, ZHANG Ga, WANG Fu-qiang. Complicated loading device for pile foundation of wind-driven generator in centrifugal field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1596 - 1600. (in Chinese))
- [9] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image-analysis-based displacement-measurement system for centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87 - 96.

(本文责编 黄贤沙)