

# 温度应力作用下无砟轨道板的竖向变形特征分析

奚绍良<sup>1</sup> 熊永亮<sup>2</sup> 单 傲<sup>2</sup> 周俊召<sup>2</sup>

(1. 中国铁路上海局集团有限公司徐州工务段, 221010, 徐州;

2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 为研究轨道板在温度作用下的变形和竖向温度场的变化规律, 对轨道板板角、板中等多点位的竖向位移及温度进行了长期的统计分析。结果表明: 轨道板在环境温度影响下整体翘曲位移变化呈现规律性, 一天中在午间高温时所产生的中部上拱变形量大于晚间的凹形翘曲变形量, 且边缘处的竖向变形最为明显; 板面下 20 mm 深处和 180 mm 深处的温度变化存在 3 h 的相位差值; 夏季时板面温度与环境温度呈非线性关联, 而冬季时环境温度和板面温度呈现为线性关联; 板的向下位移量大于板的向上位移量。

**关键词** 轨道交通; 轨道板; 单元板; 温度场; 竖向变形

**中图分类号** U213.2<sup>+</sup>13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.013

## Analysis of Ballastless Track Plate Vertical Deformation Characteristics under Thermal Stress

XI Shaoliang, XIONG Yongliang, SHAN Ao, ZHOU Junzhao

**Abstract** In order to study the deformation and vertical temperature field change law of the track plate under temperature action, a long-term statistical analysis of multi-point vertical displacement and temperature of the track plate angle and the plate itself is conducted. The results show that the change law of the overall track plate warping displacement under the influence of ambient temperature is regular, the amount of arch warpage generated by the track plate at high temperature during the day is greater than the concave warping deformation at night, and the vertical deformation at the plate edge is most obvious. There is a 3-hour phase difference at the 20mm depth and the 180mm depth under plate surface with the temperature variation; in summer, the plate surface temperature and the ambient temperature are non-linearly related, while in winter, the correlation between the ambient temperature and the plate surface temperature is a linear association. The downward displacement of the plate is greater than its upward displacement.

**Key words** rail transit; track plate; unit plate; temperature field; vertical deformation

**First-author's address** Xuzhou Public Works Section of China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., 221010, Xuzhou, China

单元板式无砟轨道由于其制造精度高、产品质量好、安装运输方便等一系列优点, 在我国高速铁路和城市轨道交通中得到了广泛应用。但是, 单元板式无砟轨道在地面和高架桥上使用时, 由于受到太阳辐射作用, 轨道板内温度受气温变化影响明显, 会从板内向板外形成梯度变化。这种在轨道板沿厚度方向产生的温度变化会导致轨道板的竖向变形不均匀, 产生板的翘曲或拱起, 同时轨道板的变形还受到了扣件和砂浆粘结层的约束, 从而导致轨道板产生复杂变形<sup>[1]</sup>。高速列车的运行对轨道平顺性有着极高的要求, 若轨道板的温度翘曲变形量过大, 会对轨道不平顺产生较大的影响。因此有必要对无砟轨道单元板的翘曲变形规律进行研究。

目前, 国内外有较多针对温度作用下无砟轨道结构中单元板翘曲变形的研究。在德国对此问题的研究中, 主要考虑了温度对轨道板的两种影响: 一是由轨道板的整体温度变化引起的轨道板总应力变化情况; 二是由轨道板上下表面的温度梯度引起的轨道板局部压力。日本对轨道板翘曲和预防进行了深入的研究, 发现在轨道板边角处的水泥沥青砂浆损坏严重, 且在现场测量中发现轨道板的翘曲变形。文献[2]采用有限元软件对 50 °C/m 温度梯度下轨道板的变形和应力进行建模和分析, 得出了在正温度梯度作用下轨道板的最大翘曲量为 0.65 mm、最大拉应力为 2.05 MPa 的结论。文献[3]应用数值模拟方法, 研究了严寒地区夏冬两季极端天气下由气温、太阳辐射、空气对流等显著变化引起的高速铁路 CRTS III 型无砟轨道板的瞬态温度场、温度应力及由其导致的板端翘曲、结构层间离缝、道床开裂等温度作用下的病害。针对轨道板

温度场,文献[4]监测了圆形曲线线路中 CRTS II 型无砟轨道的温度场,研究表明最高温度出现时间滞后于表面层,并且还认为竖直温度分布满足指数分布。文献[5]以大气温度和太阳辐射作为输入,建立了无砟轨道的温度场有限元计算模型,并根据已有的文献和现场试验数据,获得了使用有限元法计算双块无砟轨道温度场的相关热力学参数。

以上研究不能完全涵盖实际线路中的轨道板变形特征,且在温度场作用下对 CRTS III 型轨道板的连续变化过程还缺乏针对性的研究。本文通过对高铁线路中 CRTS III 型轨道板的变形及温度场进行长期监测,分析环境温度变化下轨道板的连续变化特征,建立了以监测数据为基础的温度场模型,以期能为工程及理论研究提供参考。

## 1 试验研究方案

在无砟轨道结构系统中,单元板受日照和大气温度等多重因素的影响,实验室模拟很难全面反映其在多重因素作用下的变化特征,故考虑在实际运营的高速铁路轨道上进行试验研究,这样可以较真实、全面地反映实际情况。现场试验在铺设 CRTS III 型板轨道的某高架高速铁路上进行。测试方法是在轨道板上安装竖向位移传感器,测点位置沿着轨道板长度方向的钢轨外侧进行布置,分别在线路上行方向承轨台与相邻承轨台中心位置、上行方向右侧偶数编号承轨台与相邻承轨台中心位置布置 2 个位移传感器。试验共计布置了 20 个传感器,如图 1 所示。考虑到本次试验是对轨道板在环境温度长期变化下的竖向位移进行测试,为保证测试传感器不受温度等因素的变化所影响,传感器应全天候防水、防尘。传感器在安装前进行了温度变化的修正,修正后的传感器在大气温度变化环境下

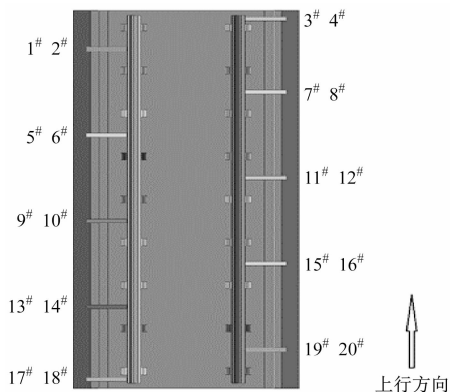


图1 位移传感器布置示意图

位移的漂移在 0.1 mm 以下,可以满足测试数据分析的精度要求。

为观测轨道板不同部位的温度和大气环境温度,试验时还在轨道板上布置了温度传感器。温度传感器布置在轨道板不同深度,从轨道板上表面垂直钻孔埋入,位置为板中心位置和距离轨道板边缘 80 mm 处,各测点垂直埋深分别距板面 20 mm、100 mm、180 mm,如图 2 所示。

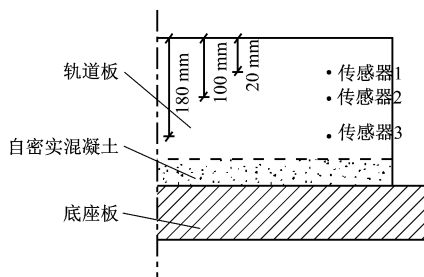


图2 温度传感器垂直埋设示意图

布置好位移传感器和温度传感器后,可对轨道板的板温和不同部位的竖向位移进行不间断地测试。测试数据通过轨旁记录仪实时记录并传输到存储数据中心计算机内,用以实时观察轨道板在不同季节、不同温度和不同天气状态下各部位竖向位移以及气温和板温的变化情况。

## 2 环境温度下的轨道板位移特征

### 2.1 轨道板整体位移变化情况

数据显示,受太阳热辐射和环境温度热对流能量输入的影响,轨道板的温度呈现出上热下冷的变化特征,轨道板中部随着温度升高产生了拱起,主要表现为:板的边缘部位产生了向下位移;板的中部产生了向上的位移;在总体变形中,边缘向下竖向位移的幅度大于中部向上竖向位移幅度。例如,在环境温度为 36 ℃ 的条件下,中部拱起约 0.3 mm,边缘部位向下位移量达到了 1 mm 左右。

随着气温的下降,尤其是太阳辐射的减弱,轨道板的表面温度逐渐下降。轨道板的温度由上热下冷转为上冷下热,轨道板原来的上拱逐步减小、消失,并在一定情况下中部还会产生下凹,边缘部位产生向上位移。总体上,轨道板中部下凹的位移变化幅度小于轨道板中部上拱的位移变化幅度。图 3 为 2#、3#、4#、6# 测点在一天内的位移变化情况,可以看出板中不同部位的竖向位移随环境温度变化都呈现上翘下沉变化;非常明显的是,轨道板中

部的位移变化小于边缘部位的位移变化,且越接近板角其位移变化量越大;气温升高造成的下沉量明显大于气温降低造成的上翘量。

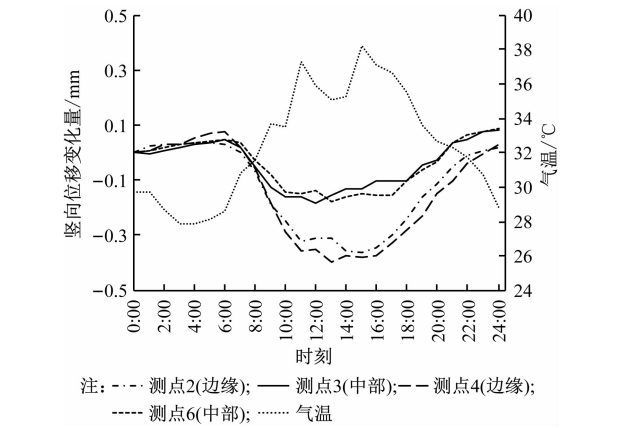


图3 板随环境温度变化的竖向位移量

2.2 轨道板竖向位移变化过程

随着环境温度变化,轨道板竖向位移的变化过程也有一定的规律性。以一天为例,从0时开始至6:00,随气温的下降板角出现约0.2 mm的上翘,板的变形呈现为凹形上翘状态。由于环境温度变化不大,其竖向位移也相对较小;6:00至11:00,随着日照增强气温上升,板由上冷下热凹形翘曲进入中部上拱变形状态,板角最大下沉量约为0.3 mm;11:00至16:00,板的上拱变形状态更明显,板角的下沉量约为0.7 mm,达到了一天的峰值;16:00至24:00,随着环境温度的下降,板进入上拱变形修复区段,轨道板缓慢恢复至平整状态。

对晴天来说,最主要的环境变量是温度和日照。其中:温度通过热对流方式将能量传递给轨道板;日照通过热辐射方式将能量传递给轨道板。本次测试中的环境温度可表示为热对流能量交换和轨道板变形的关系。如图4所示,对连续3天的环境温度和轨道板非板中位移进行监测后发现,气温和板的变形都存在周期变化规律,即在晴天时轨道板都会循环进行上述所描述的三种状态:凹形翘曲变形状态、中部上拱变形状态和平整状态。每日午时,轨道板的上拱变形最为剧烈,板角最大下沉量为1 mm,此刻轨道板和外界的能量交换最为活跃,而混凝土相对固定的热传导率导致轨道板内能量分布不均匀,使得轨道板发生变形。而在晚间轨道板和外界的能量交换相对较弱,因此轨道板产生的变形量与午间比相对较小。

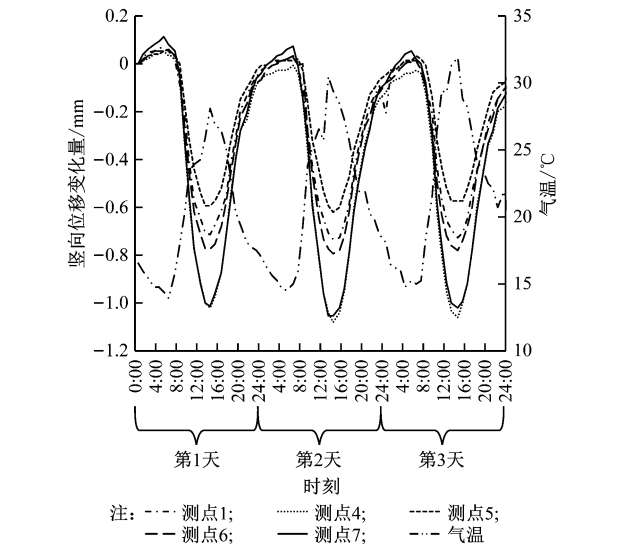


图4 晴天时气温与板角位移变化曲线

3 轨道板温度场变化特征

轨道板温度场的变化是导致板凹型翘曲变形和中部上拱变形的直接原因,这主要是因为温度场的不均匀使得板内出现应力差,从而产生应力不平衡。因此,有必要对轨道板的温度场进行研究。

3.1 板面温度变化

轨道板的最高温度与最低温度均出现于轨道板的板面,而板面是轨道板温度向下传递的源面,有必要对轨道板的板面温度进行分析。夏季和冬季的气温分别处于一年中最高与最低的阶段,对混凝土轨道板结构来说,夏季与冬季是一年中的最不利状态。因此,选择夏季与冬季的温度场进行分析。由图5可知,夏季时轨道板的板面温度大多高于气温,且随着气温的升高,气温与板面温度的温差会逐渐变大,因此板和环境之间的能量交换以吸

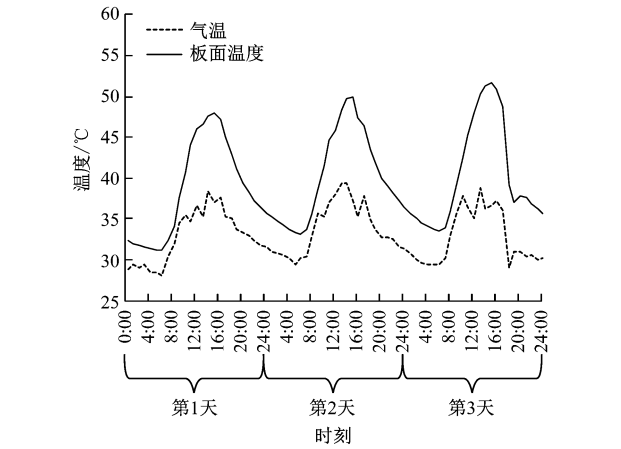


图5 夏季气温与板面温度的关系

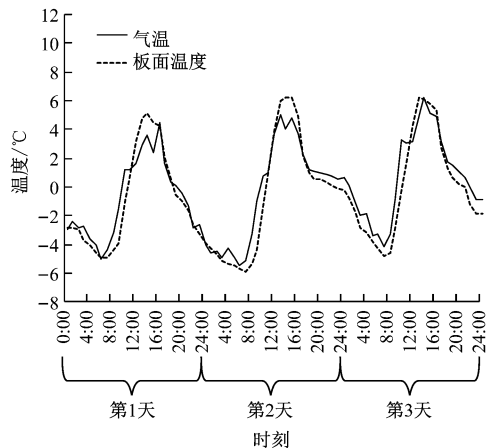


图6 冬季气温与板面温度的关系

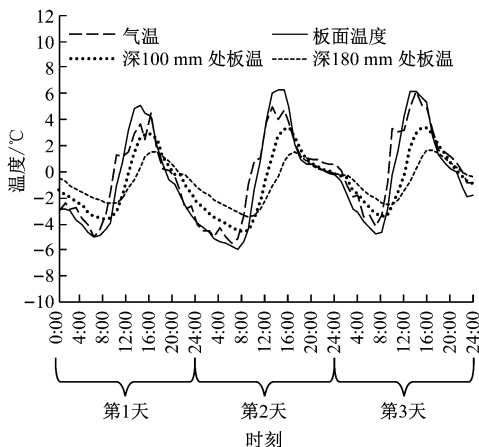


图8 冬季时轨道板不同深度处的板温

收为主。由图6可知,冬季时轨道板的板面温度与气温的大小基本一致,二者之间的差别很小。结合图5和图6可以得出结论:夏季和冬季中环境温度和板面温度都存在周期关联性。在夏季时随环境温度升高,板面温度显然增加更迅速,二者关联存在非线性;而在冬季,环境温度和板温这种关联性呈现为线性。究其原因主要是由于夏季环境气温单位时间变化率较大,冬季单位时间温度变化率较小,而混凝土竖向温度传递的速率较为恒定的缘故。

### 3.2 轨道板温度场变化规律

一般来说,轨道板发生竖向翘曲变形主要是因为温度在混凝土板传递的过程中存在滞后性,从而导致板在竖向存在温度梯度。分析图7和图8,无论夏季与冬季,在一天的24 h内,环境温度和轨道板内各测点温度均存在周期性变化。分析图7和图8中各测点最低和最高温度的拐点,随着测点深度的增加,温度测点的拐点越滞后。在夏冬两季的板面和180 mm深度测点处拐点的滞后时间均为3 h,

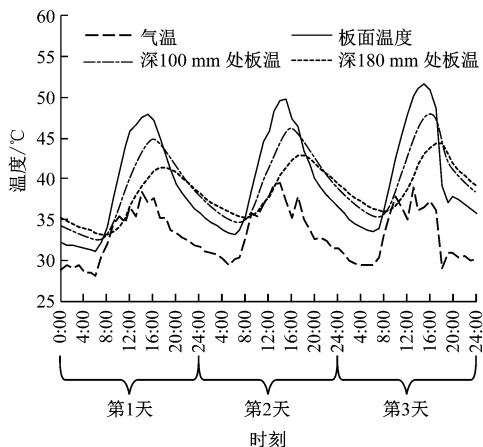


图7 夏季时轨道板不同深度处的板温

显然这种滞后性与季节的关系不大。此外,板面、100 mm深处、180 mm深处3个测点相互之间的温度差值均随环境温度的升高而增大。根据相关研究,板内竖向温度梯度将呈现指数分布<sup>[4]</sup>。图9为统计数据生成的板面下20 mm深处和180 mm深处测点最大温差时的温度梯度曲线,其拟合函数如下。

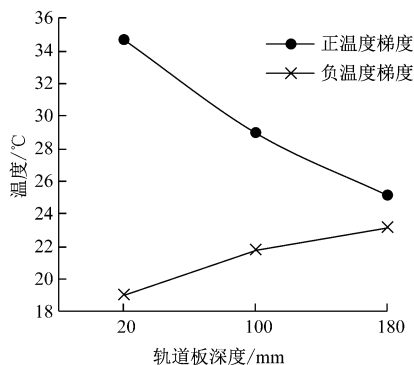


图9 最大温差时板内温度梯度竖向分布

最大正温度梯度时板内温度梯度分布函数为:

$$y = 40.414 e^{-0.16x} \quad (1)$$

最大负温度梯度时板内温度梯度分布函数为:

$$y = 17.487 e^{0.0975x} \quad (2)$$

式中:

$x$ ——轨道板竖向深度;

$y$ ——板内温度。

## 4 结论

1) 轨道板在环境温度影响下整体翘曲位移变化呈现规律性,在一天中轨道板在午间气温较高时产生的中部上拱变形量大于晚间气温较低时的凹型翘曲变形量,且边缘处的竖向变形最为明显。

(下转第62页)

测值总是滞后于实际值。变权组合模型的预测值拟合曲线在每一期都非常接近实际值曲线,这表明了变权组合模型能有效处理实际预测中出现的异常值问题,具有比单一预测模型更好的稳定性。

4) 由表 2 中数据可见,采用各模型预测的第 7 期车轮踏面磨耗量分别为  $134.52\ \mu\text{m}$ 、 $134.87\ \mu\text{m}$ 、 $136.48\ \mu\text{m}$ 、 $135.48\ \mu\text{m}$ 。其中,变权组合模型的预测值  $135.48\ \mu\text{m}$  与第 7 期实际值  $135.70\ \mu\text{m}$  间的误差最小,预测精度达到了 99.8%,从而进一步验证了采用变权组合模型用于预测车辆车轮踏面磨耗变化的可靠性和优越性。

## 5 结语

针对地铁车辆车轮踏面磨耗变化趋势的预测问题,基于选取的 3 种单一预测模型建立了最优非负变权组合预测模型,并将其应用于车轮踏面磨耗变化趋势的预测中。实例验证结果表明,本文提出的变权组合预测方法具有比各单一预测方法更高的预测精度和稳定性,模型实用性更强,可为地铁车辆在实际运行过程中车轮踏面磨耗量的准确预测提供了一种可行的求解方法。

## 参考文献

- [1] 冯其波,张志峰,陈士谦,等. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法[J]. 中国激光,2008,35(7):1059.
- [2] 方宇,王振龙,田中玉,等. 一种城市轨道交通车辆轮对参数动态检测新方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(9):132.
- [3] 高岩. 轮对几何尺寸自动与动态在线测量方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

- [4] 汤旻安,李滢. 灰色系统理论在地铁轮对踏面磨耗预测中的应用[J]. 铁道学报,2014,36(12):35.
- [5] 衷路生,陈立勇,龚锦红,等. 基于耦合模拟退火优化最小二乘支持向量机的车轮踏面磨耗量预测[J]. 计算机应用研究,2015,32(2):397.
- [6] 尹柯,蒋军成. 预测法在安全生产中的应用研究评述及展望[J]. 中国安全科学学报,2012,22(6):111.
- [7] 陈华友. 组合预测方法有效性理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008:31.
- [8] 邵梦汝,程天伦,马晓晨. 基于灰色神经网络的铁路货运量组合预测[J]. 交通运输工程与信息学报,2016,14(3):129.
- [9] 张昌娟,焦锋,赵波,等. 基于灰色-马尔可夫模型的刀具磨耗预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(6):807.
- [10] 谢朋朋,黄腾,刘阳. 变权组合预测模型在大坝沉降监测中的应用[J]. 测绘工程,2015,24(4):74.
- [11] 任超,梁月吉,庞光锋,等. 最优非负变权组合模型在大坝变形中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(6):162.
- [12] 王永刚,郑红运. 基于最优变权组合模型的航空运输事故征候预测[J]. 中国安全科学学报,2013,23(4):26.
- [13] 李志涛,张宇峰,姚藩照,等. 变权重组合预测模型在生活垃圾产量预测计算中的应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(2):97.
- [14] 王新民,崔巍. 变权组合预测模型在地下水水位预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(6):1101.
- [15] 刘思峰,杨英杰,吴利丰,等. 灰色系统理论及其应用(第 7 版)[M]. 北京:科学出版社,2014:25.
- [16] 谌小丽,陈景雅,王坤. 基于指数平滑法对我国私家车保有量的预测[J]. 华东交通大学学报,2013,30(1):58.
- [17] 刘晓叙. 灰色预测与一元线性回归预测的比较[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2009,22(1):107.

(收稿日期:2018-07-24)

(上接第 57 页)

2) 轨道板翘曲通过温度、日照等方式与外界进行能量交换。轨道板板面是能量交换的源面,但受混凝土热传导率的影响,板的变形与环境温度变化存在着一定的滞后性,板面下 20 mm 深处和 180 mm 深处的温度变化存在 3 h 的滞后时长。

3) 夏季时随环境温度升高,板面温度升高更为迅速,二者关联存在非线性;而在冬季,环境温度和板面温度的关联性呈现为线性。

4) 轨道板在环境温度影响下的整体翘曲位移变化情况中,板的向下位移量大于板的向上位移量。

## 参考文献

- [1] 王继军,尤瑞林,王梦,等. 单元板式无砟轨道结构轨道板温度翘曲变形研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(3):9.
- [2] 易图兵,赵勤俭,肖伟. 哈大铁路客运专线 CRTS I 型轨道板温度变形及应力数值分析[J]. 铁道标准设计,2012(5):37.
- [3] 郭超,陆征然,吕菲,等. 严寒地区 CRTS II 型无砟轨道板温度特性研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(9):29.
- [4] 戴公连,苏海霞,闫斌. 圆曲线段无砟轨道横竖向温度梯度研究[J]. 铁道工程学报,2014,31(9):40.
- [5] 李健. 双块式无砟轨道温度场试验研究及数值分析[D]. 成都:西南交通大学,2015.

(收稿日期:2019-05-28)