



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2017.02.030

高艳平, 杨洋, 王杰, 等. Hyperbolic Logistic 叠加模型预测地基沉降[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 198-202. GAO Yarr ping, YANG Yang, WANG Jie, et al. Prediction of foundation settlement by hyperbolic logistic superposition model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 198-202. (in Chinese)

# Hyperbolic-Logistic 叠加模型预测地基沉降

高艳平<sup>1</sup>, 杨洋<sup>2</sup>, 王杰<sup>1</sup>, 葛浩<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

**摘要:** 针对 Hyperbolic 模型和 Logistic 模型的优缺点, 提出 Hyperbolic Logistic 叠加模型, 该叠加模型综合了两种单项预测模型的优点, 以期达到高精度的预测结果。结合发电厂地基沉降现场观测数据, 利用 Hyperbolic Logistic 叠加模型预测地基沉降, 并与单项沉降预测模型的拟合结果进行比较分析。结果表明: 与两种单项预测模型的预测结果相比较, 叠加模型减小了系统误差, 提高了整体的预测精度, 拟合结果可靠, 适用于发电厂地基沉降量的预测。新模型具有一定的适用性, 是一种分析预测地基沉降的有效方法。

**关键词:** Hyperbolic 模型; Logistic 模型; 叠加模型; 沉降预测

**中图分类号:** TU4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0198-05

## Prediction of foundation settlement by hyperbolic logistic superposition model

GAO Yarr ping<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, GE Hao<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Research Institute of Water Resources and Hydropower Survey and Design, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** In view of the advantages and disadvantages of Hyperbolic model and Logistic model, we put forward the Hyperbolic Logistic model. The model integrated the advantages of both single forecasting models so as to achieve high accuracy. Based on the observation data of the foundation settlement at power plants, the Hyperbolic Logistic superposition model was used to predict the ground settlement, and the results were compared with the results of the single settlement forecasting models. The results showed that, compared with the forecasting results of the two single forecasting models, the superposition model reduced system error and improved the accuracy of prediction. The fitting results were reliable, and can be applied to the foundation settlement prediction of power plants. The new model is feasible, and is an effective method to analyze and predict foundation settlement.

**Key words:** Hyperbolic model; Logistic model; superposition model; settlement prediction

地基沉降观测对建(构)筑物的优化设计、安全施工和运营尤为重要,也便于预测地基沉降量,了解沉降发展规律。目前,地基的沉降计算方法基本可分为三大类:一是基于土体固结理论的计算方法,其精度往往依赖于工程技术人员的经验,计算结果与实测值存在较大的误差。二是数值计算分析方法,它是基于本构模型与比奥固结理论相结合而得到的

一种计算方法,但现有的关于土的本构模型的描述能力在精度和条件方面仍然有限,相关计算参数的取得也很难与实际情况相符,在工程中的实际运用受到一定限制。三是基于实际沉降观测资料的曲线拟合沉降预测方法,该方法利用实测沉降数据推算沉降量,避免了理论计算假设条件和室内试验存在的问题,现阶段利用实测沉降资料进行沉降计算有

收稿日期: 2016-01-07    修回日期: 2016-05-17    网络出版时间:

网络出版地址:

作者简介: 高艳平(1990-),女(满族),河北隆化人,主要从事岩土工程等相关研究工作。E-mail: 760761994@qq.com

着重要的意义。基于实测数据预测地基沉降方法分为两种,一种是静态预测法,包括指数法<sup>[12]</sup>、沉降速率法<sup>[34]</sup>、星野法<sup>[5]</sup>、Asaoka(浅岗法)法<sup>[67]</sup>、三点法<sup>[8]</sup>等;一种是动态预测法,包括灰色模型预测法<sup>[910]</sup>、人工神经网络法<sup>[1112]</sup>、支持向量机法<sup>[1314]</sup>等。这些沉降预测方法各有优缺点及各自适用条件,可解决不同条件的地基沉降预测问题,但由于参数求解、地质条件、建筑物特点等因素的影响,致使模型的预测结果存在一定差异。为了提高预测的精度,很多学者以加权方式对多种沉降预测模型进行组合<sup>[1516]</sup>,综合运用多种模型的特点,提高预测模型的精度,扩大预测模型的适用范围。然而,对于加权组合模型预测地基基础沉降而言,权重的确定比较复杂。

本文针对地基沉降特点,结合 Hyperbolic 模型和 Logistic 模型的优点,提出 Hyperbolic Logistic 叠加模型,最大限度地提高预测精度,并利用该叠加模型对某发电厂地基基础进行沉降预测,将其预测结果与 Hyperbolic 模型、Logistic 模型的预测结果进行比较。

## 1 Hyperbolic Logistic 叠加模型

### 1.1 叠加模型的建立

Hyperbolic 模型,即双曲线模型<sup>[1718]</sup>。双曲线模型最早由尼奇波罗维奇提出,其假定沉降量  $S_t$  随时间  $t$  的发展过程符合双曲线的形式,则任意时间  $t$  的沉降量可用下式表示:

$$S_t = S_0 + (t - t_0)(\alpha + \beta(t - t_0))^{-1} \quad (1)$$

式中:  $S_t$  为  $t$  时刻对应的沉降量(mm);  $t$  为经过的时间(d);  $t_0$ 、 $S_0$  为曲线拟合起始参考点的时间及对应沉降量;  $\alpha$ 、 $\beta$  为待求参数。

Logistic 模型,即泊松曲线模型、推理曲线模型<sup>[1920]</sup>。在时间序列预测中,Logistic 曲线的数学表达式为:

$$S_t = L(1 + a \exp(-bt))^{-1} \quad (2)$$

式中:  $S_t$  为时刻  $t$  对应的预测沉降量(mm);  $t$  为经过的时间(d);  $a$ 、 $b$ 、 $L$  为待求参数,其中,  $a > 0$ 、 $b > 0$ , 当  $t \rightarrow +\infty$  时,  $S_t \rightarrow L$ , 即  $L$  是最终沉降量。

Hyperbolic 模型参数少,求解简单,能满足一定的精度要求,被广泛应用在工程实践中。该模型预测前期能力较差,预测中后期的能力较强,比较适合中长期的地基沉降预测,且预测结果偏于保守。而 Logistic 模型求解较为复杂,其曲线的变化规律与地基沉降变化规律相似,能够预测全过程的地基沉

降。然而,在实际工程应用中,Hyperbolic 模型和 Logistic 模型在某些情况下的地基沉降预测存在精确差异。

鉴于此,本文尝试将 Hyperbolic 模型与 Logistic 模型两种单项预测模型叠加起来,综合这两种单项预测模型的优点,建立 Hyperbolic Logistic 叠加模型。因此,地基沉降预测的 Hyperbolic Logistic 叠加组合的数学模型为:

$$S_t = S_0 + (t - t_0)(a + b(t - t_0))^{-1} + L(1 + c \exp(-bt))^{-1} \quad (3)$$

式中:  $S_t$  为  $t$  时刻的地基沉降量(mm);  $t$  为经历的时间(d);  $t_0$ 、 $S_0$  为第一次沉降观测对应的时间及沉降量;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $L$  为待求参数,且均大于零。

### 1.2 叠加模型的参数求解

利用 Hyperbolic Logistic 叠加模型预测地基沉降具体的方法是:根据发电厂地基基础进行现场沉降观测,得到沉降量与时间的实测数据,对实测数据进行拟合,得到叠加模型表达式的各个参数值,则获得了拟合方程式及拟合曲线。本文利用 Matlab 曲线拟合工具箱进行拟合求解,以误差平方和、相关系数、根的均方差作为目标来评定拟合结果的优劣。

## 2 工程实例分析

根据不同地质条件的某两个发电厂(记为发电厂 1,发电厂 2)建筑物进行现场沉降监测,得到地基沉降资料,分别应用 Hyperbolic 模型、Logistic 模型、Hyperbolic Logistic 叠加模型预测地基沉降,比较分析三种模型的地基沉降拟合预测能力。

### 2.1 发电厂 1 的实例分析

发电厂 1 位于河北省某海港区,工程规划容量  $8 \times 600$  MW。厂区场地处于滨海平原,地势平坦,原场地遍布鱼塘、虾池和沟渠,场地回填整平后地面标高 2 00 m 左右。地层主要为第四系全新统(Q4)及上更新统(Q3)海相及海陆交互沉积。该发电厂锅炉地基沉降点的观测时间自 2004 年 5 月 3 日开始,到 2008 年 11 月 9 日止,共观测 1 651 d,以前 1 221 d 的观测数据建模,以最后两次的实测数据做检验样本。表 1 是发电厂 1 锅炉某观测点的实测沉降数据与 Hyperbolic Logistic 叠加模型预测值的比较。

由表 1 可知,Hyperbolic Logistic 叠加模型的地基沉降计算值与实测值较为一致,且最后两次预测

样本的实测值与预测值分别相差 0.34 mm, 0.03 mm, 说明 Hyperbolar Logistic 叠加模型能够反应地基沉降随时间的发展趋势, 并能够精确预测地基沉降量。图 1 是应用 Hyperbolar 模型、Logistic 模型、Hyperbolar Logistic 叠加模型预测该观测点的地基沉降预测量-时间曲线与实测沉降量-时间曲线的比较。

表 1 实测沉降值与叠加模型拟合值的比较

Tab. 1 Comparison between the measured settlement values and fitted values of the superposition model

时间 / d	施工进度	实测沉降值 / mm	预测值 / mm	残差 / mm
37	二层	0.1	0.57	0.47
67	三层	1.3	2.16	0.86
111	4层框架	2.1	4.15	2.05
128	大板梁吊装完成后	6.1	4.87	-1.23
142	气包吊装完毕后	6.6	5.46	-1.14
185	受热面安装	6.5	7.34	0.84
223	受热面安装	8.6	9.16	0.56
254	受热面安装完成	12.4	10.78	-1.62
298	受热面安装完成	13.8	13.17	-0.63
325	受热面安装完成	14.5	14.62	0.12
330	1号炉压水前	14.4	14.88	0.48
350	1号炉压水后	15.2	15.88	0.68
379	炉本体安装完毕	17.1	17.19	0.09
414	送风管道和送粉管道安装完毕	18.4	18.52	0.12
446	送风管道和送粉管道安装完毕	20.1	19.49	-0.61
477	安装完毕, 点火	19.8	20.22	0.42
508	点火调试	20.3	20.79	0.49
539	全面调试	21.5	21.23	-0.27
564	全面调试	21.1	21.51	0.41
593	发电运行	22	21.78	-0.22
626	发电运行	23.1	22.02	-1.08
719	运行	22.6	22.50	-0.10
905	运行	23.1	23.05	-0.05
1 069	运行	23.1	23.37	0.27
1 221	运行	23.2	23.60	0.40
1 451	运行	24.2	23.86	-0.34
1 651	运行	24.07	24.04	-0.03

由图 1 可知, Hyperbolar Logistic 叠加模型的地基沉降预测值比 Hyperbolar 模型、Logistic 模型的预测值更加接近实测值, 表明 Hyperbolar Logistic 叠加模型能够很好的反应地基沉降规律。表 2 是 Hyperbolar 模型、Logistic 模型、Hyperbolar Logistic

叠加模型预测该发电厂锅炉地基沉降的检验标准值。在表 2 可知, 与 Hyperbolar 模型、Logistic 模型相比较而言, Hyperbolar Logistic 叠加模型的误差平方和最小, 根的均方差最小, 相关系数与 1 最为接近, 表明 Hyperbolar Logistic 叠加模型的预测精度高。

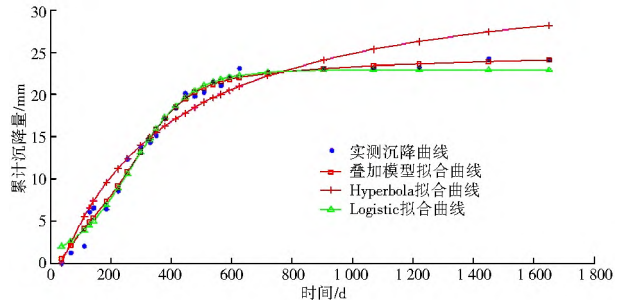


图 1 发电厂 1 锅炉的模型预测值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison between the predicted values and actual values of boiler at power plant 1

表 2 发电厂 1 锅炉各模型精度评价标准值

Tab. 2 Evaluation of model accuracy for boiler at Power Plant 1

模型类别	误差平方和 / mm <sup>2</sup>	相关系数	均方差 / mm
Hyperbolar 模型	69.56	0.975	1.739
Logistic 模型	21.04	0.992	0.978
Hyperbolar Logistic 叠加模型	15.24	0.994	0.873

## 2.2 发电厂 2 的实例分析

为证明上述结论的正确性, 根据另一发电厂(记为发电厂 2)的两个不同建筑物的监测资料进行沉降预测。该发电厂工程规划容量  $4 \times 600$  MW, 厂区场地地势从西向东呈陆地向海域的缓坡状, 地形较为平坦。本厂区场地原为海域, 经由围海造陆而成, 地层为第四系海相、海陆交互相、陆相、湖沼相沉积层。图 2、图 3 是 Hyperbolar 模型、Logistic 模型、Hyperbolar Logistic 叠加模型预测发电厂 2 的地基沉降量与实测沉降量的比较, 其中, 图 2 是该发电厂的锅炉某观测点实测数据, 其观测时间为 2004 年 11 月 7 日-2010 年 12 月 31 日, 共经历 2 245 d。图 3 为汽机基座的某观测点实测数据, 其观测任务从 2005 年 9 月 5 日开始, 截止到 2010 年 12 月 31 日, 对其进行 1 943 d 的沉降观测。二者均已最后一次观测数据作检验样本, 用其余数据做建模样本。由图 1-图 3 可知, Hyperbolar Logistic 叠加模型在相同地质, 不同地面荷载或不同地质, 不同地面荷载情况下, 对地基基础沉降预测结果比 Hyperbolar 模型、Logistic 模型的预测结果要好, 更能准确的预测发电厂的地基基础沉降。

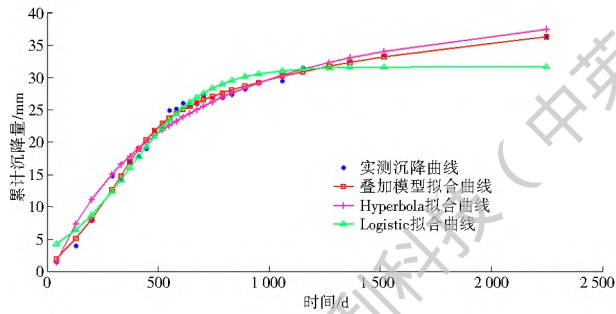


图2 发电厂2锅炉的预测值与实际值的比较

Fig. 2 Comparison between the predicted values and actual values of boiler at Power Plant 2

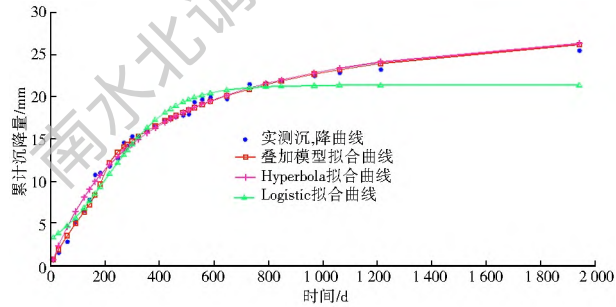


图3 发电厂2汽机基座的预测值与实际值的比较

Fig. 3 Comparison between the predicted values and actual values of turbine base at Power Plant 2

表3、表4是Hyperbolic模型、Logistic模型、Hyperbolic Logistic叠加模型预测发电厂2锅炉及汽机基座的检验标准值。表5为各模型最终预测沉降值与最终实际观测沉降值(即最后一次观测值)的比较。由表3、表4可知Hyperbolic Logistic叠加模型大大提高了预测精度,减小了系统误差。由表5可知,最终实测沉降值与各模型的预测值较接近。

表3 发电厂2锅炉的各模型精度评价标准值

Tab. 3 Evaluation of model accuracy for boiler at Power Plant 2

模型类别	误差平方和 / mm <sup>2</sup>	相关系数	均方差 / mm
Hyperbolic 模型	54.12	0.986	1.471
Logistic 模型	72.09	0.982	1.733
Hyperbolic Logistic 叠加模型	16.02	0.996	0.853

表4 发电厂2汽机基座的各模型精度评价标准值

Tab. 4 Evaluation of model accuracy for turbine base at Power Plant 2

地点	实测最终沉降量/mm	预测最终沉降量/mm	残差/mm
发电厂1锅炉	36.31	36.29	-0.02
发电厂2锅炉	24.07	24.04	-0.03
发电厂2汽机基座	25.86	26.24	0.38

表5 最终沉降量的预测值与实测值的比较

Tab. 5 Comparison between predicted values and actual values of final settlement

模型类别	误差平方和 / mm <sup>2</sup>	相关系数	均方差 / mm
Hyperbolic 模型	15.36	0.994	0.728
Logistic 模型	47.53	0.981	1.303
Hyperbolic Logistic 叠加模型	6.24	0.998	0.490

综上所述,相同地质,不同地面荷载或在不同地质,不同地面荷载情况下,Hyperbolic Logistic叠加模型的预测精度比Hyperbolic模型、Logistic模型的预测能力强、预测精度高,更适合预测发电厂地基基础的沉降。

### 3 结论

(1) Hyperbolic Logistic叠加模型建模简单,无需计算加权系数,同时克服单个模型预测沉降的不足,汇聚两种预测模型的优点,对地基基础沉降进行预测时,拥有显著的优越性。

(2) 实测数据分析表明:地质条件不同,地面荷载不同条件下的发电厂,Hyperbolic Logistic叠加模型预测地基基础沉降的误差平方和最小、均方差最小、相关系数与1最接近,说明叠加模型的预测精度高于单项预测模型的预测精度,其适应性好,对发电厂的地基基础沉降-时间曲线拟合结果可靠,能够预测发电厂的地基沉降量。

#### 参考文献(References):

[1] 高燕希,莫志兵,魏金胜.指数曲线法在软土地基沉降预测中的优化与应用[J].长沙交通学院学报,2011,27(2): F5. (GAO Yarr xi, MO Zhi bing, WEI Jir sheng. Optimization and application of exponential curve method in soft soil foundation settlement prediction[J]. Journal of Changsha Institute of Transport Science and Engineering, 2011, 27(2): F5. (in Chinese))

[2] 熊春宝,李法超.指数曲线模型预测基坑周边地面沉降[J].测绘与空间地理信息,2011,34(4): 46. (XIONG Chur bao, LI Fa chao. The exponential curve method model for predicting foundation settlement in the base pit vicinity[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2011, 34(4): 46. (in Chinese))

[3] 谭凯.沉降速率法在软基沉降分析中的应用[J].西部交通科技,2011(3): 7-10. (TAN Kai. The application of subsidence rate method in soft ground settlement analysis[J]. Western China Communications Science and Technology, 2011(3): 7-10. (in Chinese))

[4] 赵辉,李粮纲.软土地基沉降速率的分析研究及其应用[J].水文地质工程地质,2005(1): 45-47. (ZHAO Hui, LI Liang gang. Analysis and research of settlement velocity of soft soil

- foundation and its application[J]. Hydro geological engineering geology, 2005(1): 45-47. (in Chinese)
- [5] 方宝. 星野法在某软基段沉降预测中的应用[J]. 科技咨询导报, 2009, (17): 53-53, 55. (Fang Bao. Application of Hoshino Nori in the prediction of soft ground settlement[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2009, (17): 53-53, 55. (in Chinese))
- [6] 王志亮, 黄景忠, 李永池. 沉降预测中的Asaoka法应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032. (WANG Zhi liang, HUANG Jing zhong, LI Yong chi. Study on application of asaoka's method to settlement prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032. (in Chinese))
- [7] 程强, 杨丽萍, 孙文慧. 基于Asaoka法的软基沉降量预测研究与应用[J]. 海河水利, 2013(5): 54. (CHENG Qiang, YANG Li ping, SUN Wen hui. The prediction and application of the soft soil ground settlement based on asaoka method[J]. Haihe River Water Conservancy, 2013(5): 54. (in Chinese))
- [8] 刘吉福. 对三点法推算大面积堆载预压工程沉降的认识[J]. 水运工程, 2012(8): 155-159. (LIU Jifu. Views about three point method of settlement prediction for large area preloading[J]. Port and Waterway Engineering, 2012, (8): 155-159. (in Chinese))
- [9] 周全能, 王祥. 灰色理论在沉降预测中的应用[J]. 土工基础, 2002(4): 31-33. (ZHOU Quan neng, WANG Xiang. The use of the gray theory in the prediction of settlement[J]. Soil Engineering and Foundation, 2002(4): 31-33. (in Chinese))
- [10] 闫生存, 胡颖, 常晓林. 水布垭工程河床覆盖层沉降的灰色预测模型[J]. 长江科学院院报, 2006(2): 35-37. (YAN Sheng cun, HU Ying, CHANG Xiaolin. Forecast and analysis of riverbed overlays of shuibuya project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006(2): 35-37. (in Chinese))
- [11] 张慧梅, 李云鹏, 毛成. 人工神经网络在软土地基路基沉降预测中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002(4): 20-22. (HANG Hui mei, LI Yun peng, MAO Cheng. Settlement prediction of roadbed in soft ground by using artificial neural networks[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002(4): 20-22. (in Chinese))
- [12] 冯守中, 杨进良, 阎澍旺. 软土地基沉降预测的人工神经网络方法与应用[J]. 港工技术, 2004(1): 43-45. (FENG Shou zhong, YANG Jin liang, YAN Shu wang. Application of neural network in predicting settlement of soft soil foundation[J]. Port Engineering Technology, 2004(1): 43-45. (in Chinese))
- [13] 刘丽芳, 姜晴, 万文. 支持向量机在高速公路软基沉降预测中的应用[J]. 公路与汽运, 2008(3): 107-110. (LIU Li fang, JIANG Qing, WAN Wen. Application of support vector machine in highway soft foundation settlement prediction[J]. Highways and Automotive Applications, 2008(3): 107-110. (in Chinese))
- [14] 管志勇, 宋涛, 戚蓝, 等. 支持向量机在地基沉降预测中的应用[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(2): 91-94. (GUAN Zhi yong, SONG Tao, QI Lan, et al. An application of support vector machine in foundation settlement prediction[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2008, 27(2): 91-94. (in Chinese))
- [15] 孙纪明. 组合模型在沉降预测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(4): 202-204. (SUN Ji ming. Research on combination model application in settlement forecast[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2011, 34(4): 202-204. (in Chinese))
- [16] 丁建荣. 基于最优组合模型的路基沉降预测方法[J]. 土工基础, 2014(3): 100-102. (DING Jian rong. Embankment Settlement Prediction through an Optimization Model[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014(3): 100-102. (in Chinese))
- [17] 胡振南. 双曲线法在路基沉降预测中的应用研究[J]. 中南公路工程, 2011, (3): 145-148. (HU Zhen nan. Study of the Hyperbolic Method in Prediction of Roadbed Settlement[J]. Central South Highway Engineering, 2011, (3): 145-148. (in Chinese))
- [18] 何良德, 姜晔. 双曲型曲线模型在路基沉降预测中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 200-205. (HE Liang de, JIANG Ye. Application of hyperbolic curves to prediction of embankment settlements[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(2): 200-205. (in Chinese))
- [19] 朱志铎, 周礼红. 软土路基全过程沉降预测的Logistic模型应用研究[J]. 岩土工程学报, 2009(6): 965-969. (ZHU Zhi duo, ZHOU Li hong. Application of logistic model in settlement prediction during complete process of embankment construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(6): 965-969. (in Chinese))
- [20] 谭献良, 邓宗伟. Logistic模型在地基沉降预测中的应用[J]. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2010(2): 14-16. (TAN Xian liang, DENG Zong wei. Application of logistic model on the foundation settlement prediction[J]. Journal of Hunan City University: Natural Science, 2010(2): 14-16. (in Chinese))