

LNAV 广播星历的精度分析

王阿昊^{1,2}, 王解先¹, 陈俊平^{2,3}

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 本文介绍了 IGS 最新发布的 LNAV 广播星历的格式, 及其计算卫星位置和钟差的方法, 采用内维尔算法内插 IGS 精密星历获取参考值, 以均值误差和均方根误差作为精度指标, 从不同轨道面选取 6 颗卫星, 按精度分析策略进行计算。结果表明, LNAV 广播星历误差在 X、Y、Z 方向上为 1m 左右, 点位误差优于 1.8m, 钟差精度在 10ns 左右, 与现有广播星历基本一致。

关键词: LNAV 广播星历; 精密星历; 点位误差; 钟误差

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

Precision analysis of LNAV broadcast ephemeris

Wang Ahao^{1,2}, Wang Jiexian¹, Chen Junping^{2,3}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper introduces the format of the latest release of LNAV broadcast ephemeris by IGS, and the calculation method of satellite position and clock errors. The Neville interpolation algorithm for IGS precise ephemeris is used to obtain the reference value by using the mean error and root mean square error as the accuracy index. Six satellites are selected from different orbital planes, and take the accuracy analysis strategy to calculate the satellite position. The results show that LNAV broadcast ephemeris error in X, Y and Z directions is about 1m, point position error is less than 2m and clock bias is about 10ns. LNAV broadcast ephemeris is basically the same as the existing broadcast ephemeris.

Key words: LNAV broadcast ephemeris; precise ephemeris; point position error; clock bias

0 引言

在利用 GPS 系统进行定位时, 根据空间后方交会的原理, GPS 卫星必须作为空间已知点, 因此卫星位置的解算在整个 GPS 定位过程中极其重要, 其解算精度将直接影响最终的定位结果。2015 年前, IGS 等国际组织提供 4 种星历产品用于解算卫星坐标, 分别为快速星历 (IGR 星历)、超快速星历 (IGU 星历)、事后精密星历 (IGS 星历) 和广播星历 (NAV 星历), 前三种星历在精度方面均优于广播星历^[1], 但需要事后两周通过网络下载, 而广播星历可以直接从卫星信号中获取, 因此广泛应用于实时和非精密定位中。

文献 [1] 对 2009 年短期内 GPS 广播星历的精度进行统计分析, 其轨道误差优于 2m, 钟差精度在 10ns 左右。随着一些服役时间较长的卫星被逐

步更换, 卫星性能得到提高; 全球参考站数目的增加, 参考站坐标更为精确, 以及预报或推估卫星轨道的动力学模型的改进等原因, 目前广播星历整体的精度优于 1.5m, 钟差均值在 8ns 左右^[2], 较之前有一定程度的提高。

自 2015 年 1 月起, IGS 提供一种后缀名为 .X 的文件, 里面含有 LNAV 和 CNAV 两种新的星历产品。LNAV 广播星历包含 29 个参数, 从 G01 颗星的 02: 00: 00 开始, 每 2h 播发一组, 至次日 00: 00: 00, 接着是 33 参数的 CNAV 广播星历, 从 G01 颗星的 01: 30: 00 开始, 也是每 2h 播发一组, 至 23: 30: 00, 两种广播星历交替排列至 G32 颗星结束。本文

收稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-05-31

作者简介: 王阿昊 (1992 -), 男 (汉族), 甘肃平凉人, 硕士。

以精密星历为参考评估 LNAV 广播星历的精度，分别计算 X、Y、Z 分量、钟差及点位的差异。

1 精度分析策略

1.1 LNAV 广播星历计算卫星位置及钟差

LNAV 广播星历中与卫星位置及钟差计算有关的参数共 19 个（见表 1），其中前 3 个用于计算卫星钟差，后 16 个用于计算卫星在 WGS-84 协议坐标系下的三维坐标。

表 1 LNAV 广播星历参数
Table 1 LNAV broadcast ephemeris parameters

a_{f0}	卫星钟差常数项, sec	ω	近地点角距, rad
a_{f1}	卫星钟差漂移项, sec/sec	$\dot{\Omega}$	升交点赤经变化率 rad/sec
a_{f2}	卫星钟差漂移速率, sec/sec ²	$iDot$	轨道倾角变化率, rad/sec
\sqrt{A}	半长轴平方根, m ^{1/2}	C_{rc}	轨道半径的余弦调和改正项, m
Δn	平近点角的长期变化, rad/sec	C_{rs}	轨道半径的正弦调和改正项, m
t_{oe}	星历参考时刻 (星期中的秒), sec	C_{uc}	纬度幅角的余弦调和改正项, sec
M_0	参考时刻的平近点角, sec	C_{us}	纬度幅角的正弦调和改正项, sec
e	扁心率	C_{ic}	轨道倾角的余弦调和改正项, sec
Ω_0	参考时刻升交点赤经, rad	C_{is}	轨道倾角的正弦调和改正项, sec
i_0	参考时刻轨道倾角, rad		

任意时刻的卫星位置及钟差的计算流程（见表 2）实际上采用开普勒轨道根数加相应摄动改正值的星历外推法^[3]。

表 2 卫星位置及钟差算法

Table 2 The algorithm of satellite position and clock bias

计算公式	公式含义
$n = \sqrt{GM/A^3} + \Delta n$	计算卫星运动的平均角速度 n GM 为地球引力常数
$t_k = t - t_{oe}$	瞬时历元到参考历元的时间差 t_k
$M_k = M_0 + n \cdot t_k$	计算平近点角 M_k
$E_k = M_k + e \cdot \sin E_k$	迭代计算偏近点角 E_k
$\cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1 - e \cdot \cos E_k}$	计算真近点角 v_k
$\sin v_k = \frac{\sqrt{1 - e^2} \cdot \sin E_k}{1 - e \cdot \cos E_k}$	
$\phi_k = v_k + \omega$	计算纬度参数 ϕ_k
$\delta u_k = C_{us} \sin(2\phi_k) + C_{uc} \cos(2\phi_k)$	
$\delta r_k = C_{rs} \sin(2\phi_k) + C_{rc} \cos(2\phi_k)$	计算摄动改正项 δu_k δr_k δi_k
$\delta i_k = C_{is} \sin(2\phi_k) + C_{ic} \cos(2\phi_k)$	
$u_k = \phi_k + \delta u_k$	计算改正后的纬度参数 u_k
$r_k = A(1 - e \cos E_k) + \delta r_k$	计算改正后的向径 r_k
$i_k = i_0 + \delta i_k + iDot \cdot t_k$	计算改正后的轨道倾角 i_k
$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_0) t_k - \dot{\Omega}_0 t_{oe}$	计算改正后的升交点经度 Ω_k
$x = r_k \cos(u_k)$	计算卫星在轨道平面内的坐标 x y
$y = r_k \sin(u_k)$	
$X_k = x \cdot \cos(\Omega_k) - y \cdot \cos(i_k) \cdot \sin(\Omega_k)$	计算卫星在 WGS-84 坐标系中的坐标 X_k Y_k Z_k
$Y_k = x \cdot \sin(\Omega_k) + y \cdot \cos(i_k) \cdot \cos(\Omega_k)$	
$Z_k = y \cdot \sin(i_k)$	
$ds = a_{f0} + a_{f1} \cdot t_k + a_{f2} \cdot t_k^2$	计算卫星钟差 ds

1.2 内插精密星历获取参考值

IGS 提供的事后精密星历（IGS 星历）的轨道精度约为 2.5cm，钟差精度约为 0.075ns^[4]，时间间隔定为 15min，为了得到任意时刻卫星位置及钟差，一般采用数值内插法进行解算。其中获取卫星坐标的方法有拉格朗日内插法、切比雪夫多项式拟合法和内维尔算法，3 种算法的内插精度均可优于 1cm^[5]，其中内维尔算法是一种逐次线性内插法，计算量小，模型简单且不会出现龙格震荡现象，本文将采用该法对 IGS 精密星历进行内插，获取间隔为 30s 的卫星坐标参考值。

已知互异的插值节点 $(t_i, P(t_i))$ ， t_i 是插值节点的时间， $P(t_i)$ 是卫星在 X、Y、Z 方向上的坐标值，则：

$$\begin{matrix} t_0 & P_0 \\ t_1 & P_1 P_{01} \\ t_2 & P_2 P_{02} P_{012} \\ t_3 & P_3 P_{03} P_{013} P_{0123} \\ \vdots & \dots \quad \ddots \end{matrix}$$

其中，多项式的递推关系： $P_{i(i+1) \dots (i+m)} = \frac{(t - t_{i+m}) P_{i(i+1) \dots (i+m-1)} + (t_1 - t) P_{(i+1) \dots (i+m)}}{t_1 - t_{i+m}}$

这样逐次生成插值结果，计算一步，检验一次精度，如不满足精度要求，则继续增加节点，直到达到精度要求为止。

在卫星钟差方面，本文采用线性内插法对 IGS 精密星历进行计算，获取间隔为 30s 的卫星钟差参考值，该法简单且结果稳定，其内插精度优于 0.2ns^[6]，完全不影响钟差精度的评定。已知被插值点 $(t_i, C(t_i))$ ， t_i 是插值节点的时间， $C(t_i)$ 是卫星钟差，利用前一个节点 $(t_{i-1}, C(t_{i-1}))$ ，后一个节点 $(t_{i+1}, C(t_{i+1}))$ ，根据式 (1) 算出钟差：

$$C(t_i) = \frac{t_i - t_{i+1}}{t_{i-1} - t_{i+1}} \cdot C(t_{i-1}) + \frac{t_i - t_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \cdot C(t_{i+1}) \tag{1}$$

1.3 精度评定指标

在进行精度分析前需要说明，虽然 IGS 精密星历（ITRF 参考框架）与 LNAV 广播星历（WGS-84 坐标系）不属于同一参考框架，但两者间的差异不超过 2cm^[1]，因此可以忽略不计。

本文将 LNAV 广播星历的计算值与 IGS 精密星历内插出的参考值进行比较，两者的差值作为 LNAV 广播星历误差，分别计算卫星在 X、Y、Z 方向、钟差及点位误差 5 个方面的平均误差（AVGE）

和均方根误差 (RMSE)。

2 LNAV 广播星历精度分析

根据 2015-11-20 IGS 数据处理中心提供的 SATELLIT.I08 文件,目前 GPS 星座 6 个轨道面上的卫星数及卫星号见表 3。为了更全面、更具代表性地分析 LNAV 广播星历误差,依次在 6 个轨道面上选取 1 颗卫星,分别为 PRN24、PRN12、PRN08、PRN02、PRN22、PRN13。

本文采用 2015-08-19 的 LNAV 广播星历和 IGS 精密星历,年积日为 231, GPS 周为 1858。按照上述精度分析策略,解算出 6 颗卫星在 02: 00 ~ 03: 00、11: 00 ~ 12: 00、20: 00 ~ 21: 00 共 3 个

表 3 卫星分布情况表

Table 3 The distribution table of the satellite

轨道	PRN
01	07、24、31
02	12、16、25、26、28
03	06、08、09、17、19、27、29、30
04	01、02、04、11、21
05	03、05、10、18、20、22、32
06	13、14、15、23

时段,时间间隔为 30s 的 LNAV 广播星历误差在 WGS-84 坐标系下 X、Y、Z 方向上的分量及钟差。

由于篇幅所限,现以 PRN13 卫星为例,绘制出所选的 3 个时段内 LNAV 广播星历的误差曲线图(见图 1)。左图中,“-”表示 X 分量,“-.”表示 Y 分量,“- * ”表示 Z 分量;横轴表示历元

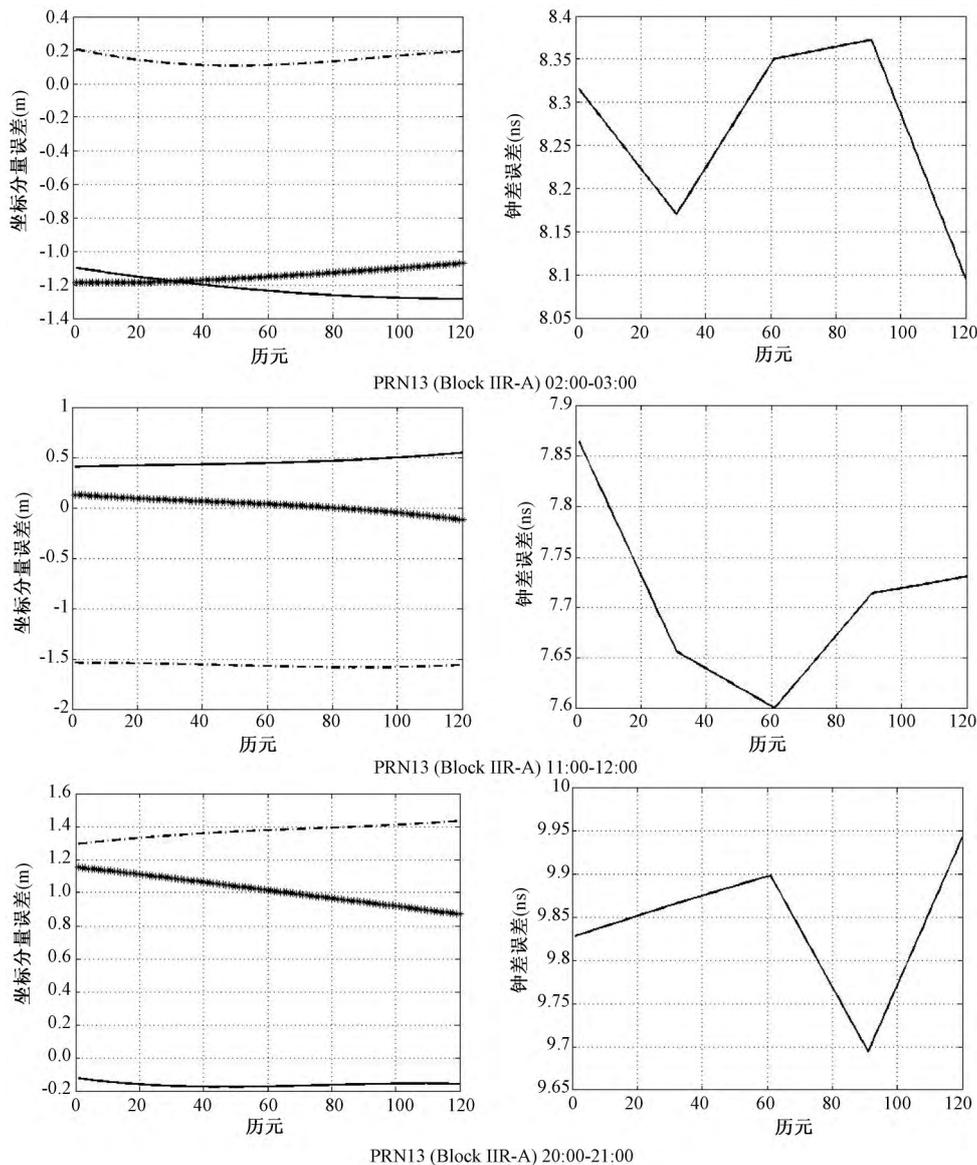


图 1 PRN13 卫星三个时段 LNAV 广播星历的误差曲线图

Fig. 1 Error curve of the LNAV broadcast ephemeris about PRN13 satellite in the three period

数, 纵轴表示坐标分量误差值, 单位 m; 右图中, 横轴表示历元数, 纵轴表示钟差误差值, 单位 ns。

图 1 表明, PRN13 卫星单天 3 个观测时段内, LNAV 广播星历的误差在 X、Y、Z 方向上的分量不超过 1.6m, 钟差误差不超过 10ns。

现统计分析 6 颗卫星 LNAV 广播星历误差在 X、Y、Z 方向上的均值误差 (AVGE) 及均方根误差 (RMSE), 绘制出各个分量的均值及均方根误差统计图 (见图 2), 横轴表示卫星号, 纵轴表示坐标分量误差值, 单位 m。

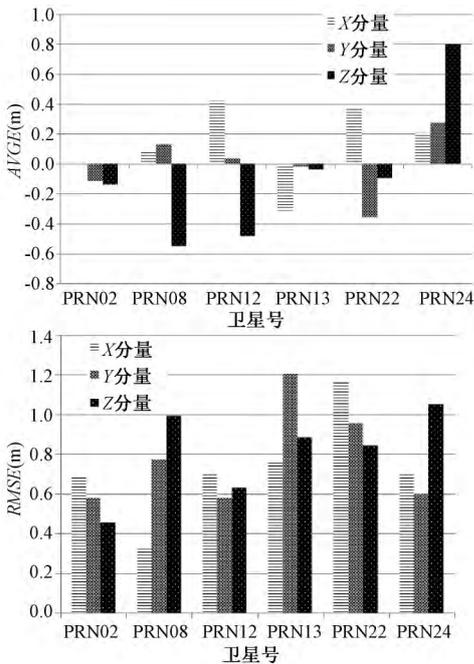


图 2 6 颗卫星 LNAV 广播星历误差在 X、Y、Z 上的均值及均方根误差统计图
Fig. 2 Mean error and root mean square error of the LNAV broadcast ephemeris about six satellites in the direction of X, Y and Z

统计分析表明, LNAV 广播星历在 X、Y、Z 方向上的均值误差不超过 1m, X、Y 方向比 Z 方向更稳定, 均值误差优于 0.5m。在 3 个分量中, 均方根误差最大不超过 1.2m, 最小为 0.3m 左右, 绝大多数在 1m 以内。

最后综合考虑 X、Y、Z 三个误差分量, 计算点位误差, 绘制 6 颗卫星 LNAV 广播星历的点位误差统计图 (见图 3), 横轴表示卫星号, 纵轴表示点位误差值, 单位 m。

由图 3 可知, LNAV 广播星历的点位误差精度在 1.8m 以内, 其中 PRN02 卫星的点位误差最小, 在 1m 左右, 误差最大的是 PRN22 卫星, 为 1.72m。

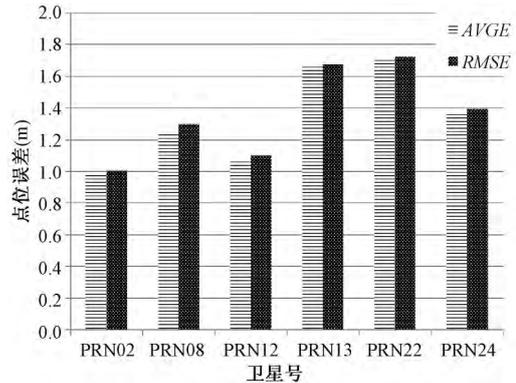


图 3 6 颗卫星 LNAV 广播星历的点位误差统计图
Fig. 3 Point position error of the LNAV broadcast ephemeris about six satellites

最后进行钟差精度分析, 同样计算 6 颗卫星 LNAV 广播星历的钟差均值 (AVGE) 及均方根误差 (RMSE), 并绘制统计图 (见图 4), 横轴表示卫星号, 纵轴表示钟差误差值, 单位 ns。

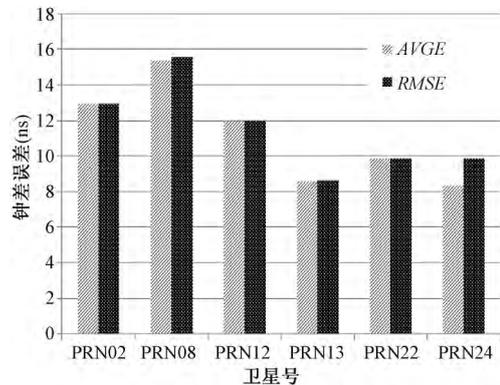


图 4 6 颗卫星 LNAV 广播星历钟差的均值及均方根误差统计图
Fig. 4 Mean error and root mean square error of the LNAV broadcast ephemeris about six satellites in the clock bias

钟差最大的是 PRN08 卫星, 达到 15.392ns, 最小的 PRN13 卫星, 在 8ns 左右, 一半卫星的钟差在 10ns 以内, 还有 2 颗卫星在 12ns 左右。从 SATELLIT. I08 文件得知, PRN08 卫星 (Block IIF) 起用于 2015-07-15, 距使用的星历数据时间仅一个月, 可能还不稳定。综合来看, LNAV 广播星历的钟差精度在 10ns 左右。

3 结论

本文介绍了 LNAV 广播星历计算卫星坐标及钟差的方法, 内插 IGS 精密星历获取参考值, 分析 LNAV 广播星历误差。LNAV 广播星历误差在 X、

Y 、 Z 分量上与卫星轨道面的分布关系不大,各分量的均值误差及均方根误差在1m以内,且 X 、 Y 分量较 Z 分量更加稳定,点位误差精度优于1.8m。LNAV广播星历的钟差与各颗卫星的健康状况及工作性能有关,刚起用的卫星精度较差,整体而言,LNAV广播星历的钟差精度在10ns左右。

参 考 文 献

- [1] 郭斐,张小红,李星星等. GPS系列卫星广播星历轨道和钟的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,(5): 589~592.
Guo Fei, Zhang Xiaohong, Li Xingxing et al. Precision analysis on orbit and clock of GPS satellites broadcast ephemeris [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, (5): 589~592. (in Chinese)
- [2] 王霞迎,秘金钟,张德成等. GPS广播星历位置、速度和钟差精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2014,(3): 165~168.
Wang Xiaying, Bei Jinzhong, Zhang Decheng et al. Analysis of precision of position velocity and clock of GPS satellite broadcast ephemeris [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014,

- (3): 165~168. (in Chinese)
- [3] 张耀文. GPS广播星历及其精度评估研究[D]. 西安: 长安大学,2007: 12~13.
Zhang Yaowen. Study on GPS broadcasting ephemeris and precision evaluation of GPS broadcasting ephemeris [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 12~13. (in Chinese)
- [4] 陈永就. GNSS广播星历的精度评定[J]. 测绘与空间地理信息,2015,(6): 186~191.
Chen Yongjiu. The precision of GNSS broadcast ephemeris [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2015, (6): 186~191. (in Chinese)
- [5] 邱蕾,廖远琴,花向红. 基于IGS精密星历的卫星坐标插值[J]. 测绘工程,2008,(8): 15~19.
Qiu Lei, Liao Yuanqin, Hua Xianghong. Interpolation methods for precision ephemeris based on IGS [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2008, (8): 15~19. (in Chinese)
- [6] 王俊,方书山. 精密卫星钟差内插的三种方法及精度分析[J]. 全球定位系统,2012,(4): 49~52.
Wang Jun, Fang Shushan. The three methods and the analysis of GPS precision satellite clock offset interpolation [J]. GNSS World of China, 2012, (4): 49~52. (in Chinese)

(上接第24页)

5倍,通电电极的加固效果明显。在阳极注入水泥砂浆的情况下,通电时间为4h的加固效果要好于通电时间为2h的加固效果。在阳极注入水泥砂浆的情况下,电流控制在1.0~1.5A范围内的加固效果要好于电流范围在1.5~2.5A的加固效果;若再加大电流,会加快电极的腐蚀,若减小电流,会使土体反应速率减慢。

(2) 对于现场试验,采用电渗加固锚索,锚索的极限抗拔力会增大1.4倍左右,而未作处理的锚索其极限抗拔力只能达到标准值的0.85倍左右。

参 考 文 献

- [1] M. Yu. Trushinskii. Electrochemical soil stabilization method [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1993, 30 (2): 61~65.
- [2] 王宁伟,刘根,王心哲等. 软土电化学加固的排水作用研究[J]. 工程勘察,2016,44(1): 26~30.
Wang Ningwei, Liu Gen, Wang Xinzhe et al. Study on drainage effect of electrochemical reinforcing for soft soil [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2016, 44 (1): 26

- ~30. (in Chinese)
- [3] 王宁伟,白小航等. 淤泥质粉质黏土电化学改性加固现场试验[J]. 工程勘察,2014,42(12): 14~18.
Wang Ningwei, Bai Xiaohang et al. Field test of electrochemical modification of soft silty clay [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2014, 42 (12): 14~18. (in Chinese)
- [4] 李瑛. 软黏土地基电化学固结试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文,2011.
Li Ying. Experimental and theoretical study on electrochemical consolidation of soft clay soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [5] 白小航. 软黏土电渗排水特性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学硕士学位论文,2015.
Bai Xiaohang. Soft clay of electroosmotic drainage characteristics research [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015. (in Chinese)
- [6] 韩舰辉,王宁伟等. 海相软黏土电化学改性固结试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,12(4): 9~13.
Han Jianhui, Wang Ningwei et al. Study on the electrochemical modified consolidation of marine soft clay [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 12 (4): 9~13. (in Chinese)