

# 空箱对某深厚软土地基水闸翼墙及桩基础位移的影响

彭渊<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1,2</sup>, 严其芳<sup>3</sup>, 王文双<sup>3</sup>

(1. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;  
3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 针对软土地区水闸边墩与翼墙间易产生过大变位, 导致止水失效并危及水闸运行安全的问题, 采用有限元方法建立温州某深厚软土地基上水闸整体模型, 土体采用 Drucker-Prager 本构模型并考虑土体蠕变法则, 研究变位产生的原因以及闸侧连接空箱对翼墙及桩基础位移的影响。结果表明, 采用连接空箱过渡水闸与堤防之间的地基, 改善了水闸桩基础的受力, 有效控制了翼墙的位移; 合理的空箱尺寸不仅可以有效抑制翼墙与闸室间变形缝的开展, 并且可以避免因空箱设置过大而造成的工程投资浪费。

**关键词:** 水闸; 连接空箱; 闸堤连接段; 软土地基; 三维有限元; 翼墙; 桩基础

**中图分类号:** TV66      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2015)03-0061-05

**Effect of the empty container on displacement of wings and pile foundation of the sluice in deep soft soil foundation**//PENG Yuan<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>, YAN Qifang<sup>3</sup>, WANG Wenshuang<sup>3</sup> (1. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Limited Company, Hangzhou 310020, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** In soft soil area, the large displacement usually occurs between the sluice pier and the wing, which results in seal failure and endangers the sluice's safe operation. Thus, in this paper, the whole sluice model was established with finite element method, and for the soil body, using the Drucker-Prager constitutive model considering soil body creep law. Thus, the reason of the displacement and the influence of connecting empty container in gate side on wings and pile foundation were explored. The results indicate that the ground sill linking empty container transition sluice and sea wall has improved the stress conditions of the pile foundation and effectively controlled displacement of the wing. Further, a reasonable empty container size can not only effectively control displacement, but also avoid project investment waste due to excessive size.

**Key words:** sluice; connecting empty container; the segment between sluice and embankment; soft soil foundation; three dimensional finite element method; wing; pile foundation

我国沿海地区软土地基分布广泛、压缩性较高<sup>[1]</sup>, 建于软土地基上的水闸数量众多。目前工程中往往仅重视水闸本身的地基处理, 对水闸与堤防之间连接段的地基处理重视不够, 从而引起各种安全隐患, 尤其是建于深厚软土地基上的水闸安全隐患更加严重, 如水闸基础产生不均匀沉降、翼墙倾斜失稳、翼墙与闸墩连接止水扯开失效等, 甚至危及整个水闸的运行安全, 后续的加固难度极大。目前水闸常见的地基处理方法有换填垫层法、振动水冲法、强夯法、水泥土搅拌法、布设沉井基础和桩基础等<sup>[2]</sup>, 然而对于水闸两侧闸堤连接段地基, 采用上述传统的地基处理方法并不能取得理想的效果。在工程设计、施工阶段对水闸闸堤连接段的地基采取

更有效、更合理的处理方案是避免产生类似安全隐患的根本。

空箱作为闸堤连接段地基的过渡结构, 在抑制水闸的不均匀沉降方面有较好的效果<sup>[3]</sup>, 目前正在逐步推广应用。根据地基特性, 在空箱中充水或填土来调整地基应力, 使其基底的平均荷载强度尽可能接近闸室基底的平均荷载强度, 可减少不均匀沉降。传统的水闸连接空箱往往建在土质条件较好的地基上<sup>[3-5]</sup>, 其目的主要是减小作用在水闸边墩上的土压力以及抑制水闸与堤防之间的不均匀沉降, 而对于建在不良地基上的水闸连接空箱所产生的翼墙、闸室和空箱三者之间的过大变位未加考虑, 特别是建立在淤泥质黏土等深厚软土地基上的水闸连接

作者简介: 彭渊(1980—), 男, 浙江江山人, 高级工程师, 主要从事水利工程咨询及设计工作。E-mail: 8162363@qq.com

空箱往往会发生倾斜等现象。目前有关空箱作为闸堤连接段的理论研究较少,没有现成的规范可供参考,而且空箱的有效尺寸也无法通过常规的理论计算确定。针对这种情况,笔者采用不同尺寸的空箱作为闸堤连接段,并在空箱底部设置钻孔灌注桩,利用专业剖分软件 Hypermesh<sup>[5]</sup> 建立水闸整体模型,结合大型非线性有限元软件 ABAQUS 定量分析水闸连接空箱对翼墙水平位移和闸底板钻孔灌注桩受力的影响,并初步提出空箱有效尺寸的确定方法。合理的空箱尺寸不仅可以有效抑制翼墙与闸室间变形缝的开展,并且可以避免因空箱设置过大而造成的投资浪费,为同类工程的设计和施工提供参考。

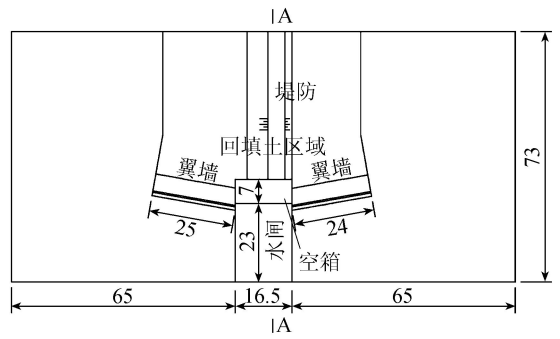
## 1 工程概况

浙江省温州市某深厚软土地基上修建了一座中型水闸,水闸为混凝土平底板胸墙式整体结构,长 16.5 m,单宽 5 m,共有 7 孔,总净宽 35 m。底槛高程为 -2.0 m,闸底板厚 100 cm,中墩厚 120 cm,交通桥面(堤顶)高程为 7.0 m,两岸堤防填土高度为 10 m。闸室和上下游翼墙基础布设直径为 80 cm 的钢筋混凝土灌注桩,闸底桩基共布置 10 排桩,每排布置 7 根桩,间距 2.45 m,总计 70 根桩,桩长 43 m。地基为深厚淤泥质软土地基,具有高含水量、低强度、高压缩性的软土特征,厚度取 2 倍桩长。基于以上数据建立该水闸工程的整体有限元模型,模型包括水闸、翼墙、混凝土灌注桩、空箱、地基土、回填土。作用在地基上的闸室基底荷载和堤防基底荷载通过闸室与堤防之间设置的连接空箱实现过渡,计算分析运行期地基沉降和水闸的位移情况,分析空箱对闸底板桩基、翼墙位移的改善作用,并设计出合理的空箱尺寸。水闸两侧所设置空箱长度与水闸长度相同,箱底布置 2 排钻孔灌注桩,其桩长和排间距与水闸桩基一致,见图 1。

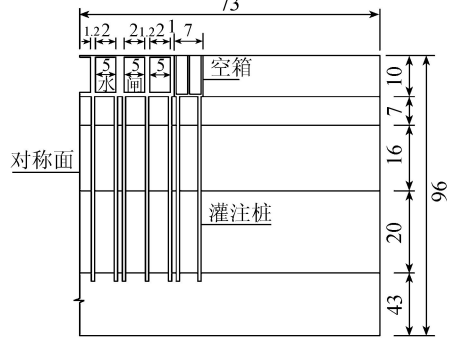
## 2 三维数值模型的构建

### 2.1 有限元模型

水闸整体的数值模拟具有极大的难度,不仅要模拟桩-土-上部结构的作用,还要考虑墙-土之间的作用,且土需考虑弹塑性,故目前对水闸整体的三维数值模拟研究甚少。为了探讨空箱岸堤处理的效果,借助专业剖分软件 Hypermesh 建立高质量单元网格的水闸整体三维数值模型,如图 2、图 3 所示。模型通过接口导入 ABAQUS,并在桩与土体、翼墙与土体之间设置接触对;接触对设置采用“硬接触”模式,避免了计算过程中的穿透现象,并采用罚函数进行计算。计算时选中“Allow separation after contact”



(a) 水闸空箱平面布置



(b) A-A 剖面

图 1 场地平面布置(单位:m)

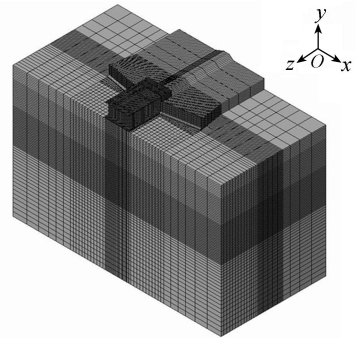


图 2 水闸整体有限元单元网格

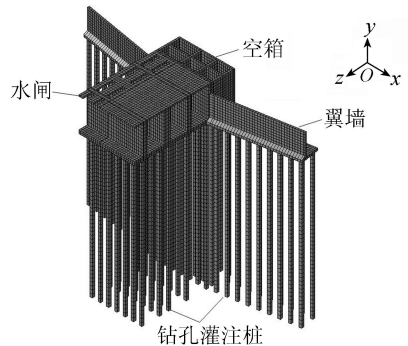


图 3 闸室、翼墙和空箱单元网格

项,即允许桩土之间的接触滑移。为了研究空箱的作用,并确定连接空箱的合理尺寸,空箱长度与水闸长度一致,均为 16.5 m,空箱宽度分别取 3 m、7 m、10 m,相应分别记作空箱 1、空箱 2、空箱 3。空箱底板下面设立钻孔灌注桩,空箱 1、空箱 2 均设立 2 排灌注桩,空箱 3 设立 3 排灌注桩,桩长均取 43 m,空

箱与闸室下部桩基的布置间距顺水流方向相同,空箱与土体、空箱底部灌注桩与土体之间设置接触对,不同尺寸的空箱单元网格见图4。

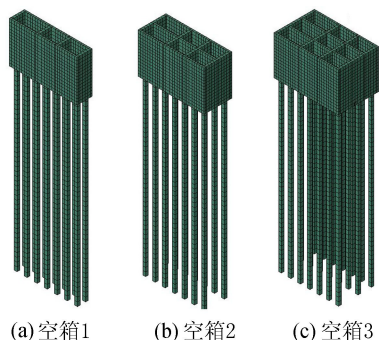


图4 不同尺寸的空箱单元网格

## 2.2 基本假定

a. 本文主要研究地基土层为深厚软土的不良地质情况,为节约计算成本,将地基土土层简化为1层均质的土层<sup>[6]</sup>。

b. 考虑到混凝土与土的弹性模量相差悬殊及混凝土结构受力特点,混凝土结构采用线弹性本构模型。

c. 假定土为理想的弹塑性材料,各向同性、均质,且桩的存在不影响土层的连续性和物理参数的取值<sup>[7]</sup>。

d. 为方便有限元建模及剖分,对结果影响不大的因素进行调整,如将闸墩的圆角改为直角,忽略门槽等细节构造。

## 2.3 单元类型与计算参数

有限元模型采用 C3D8R 单元进行划分。土体采用 Drucker-Prager 本构模型,并加入蠕变法则以考虑蠕变的影响<sup>[8-9]</sup>。Drucker-Prager 模型参数取值简单,且克服了 Mises 准则不能考虑静水压力对屈服与破坏影响的弱点。模型参数由常规三轴试验与三轴流变试验确定。混凝土密度为  $2\,500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $32.5\text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.2$ 。桩土、墙土之间设置接触面,接触面采用硬接触,接触面只能传递压力。计算参数见表1,表中  $K$  为线性 Drucker-Prager 模型中为使屈服面保持为凸面而设置的系数, $0.778 \leq K \leq 1.0$ ;  $A$ 、 $n$ 、 $m$  为扩展 Drucker-Prager 蠕变模型时间硬化准则的3个参数。

表1 土体有限元计算参数

土体	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$K$	$A/10^{-7}$	$n$	$m$
土层	12.45	5.06	1680	0.971	4	0.7	0
填土	9.20	25.00	1850				

## 2.4 施工过程的模拟

a. 通过在 ABAQUS 软件中的 keywords 里面添加“initial conditions”语句,实现初始地应力的施加,最终实现数量级为  $10^{-6}$  的初始沉降模拟,效果良好。

b. 利用 ABAQUS 生死单元功能<sup>[7]</sup>“杀死”桩位处土体,并利用生死单元功能激活水闸(有空箱的情况下同时激活空箱)及相应的接触对,进行建筑物的施工模拟计算。

c. 同样利用 ABAQUS 的生死单元功能,添加墙和墙后填土及墙-土接触对,进行墙后填土的施工模拟计算。

d. 增加 visco 分析步骤,采用 abaqus-explicit (显示求解器)进行时效性计算。

## 3 计算结果及分析

为了分析设置空箱后对翼墙与水闸的影响,分别考虑了无空箱和有空箱2种方案。为了研究不同尺寸的空箱对地基不均匀沉降的影响,对有空箱方案进行了3种不同空箱尺寸的计算分析。

### 3.1 无空箱时翼墙轴向位移

无空箱时,翼墙在运行期的轴向(水流方向)位移见图5。由图5可见,运行240d后,由于土体的蠕变及次固结作用,上下游翼墙均背离水闸方向产生了12cm的位移;240d后位移增长速度开始变缓,翼墙轴向位移逐步趋于稳定。分析其原因,在地基土层蠕变及次固结作用下,软土地基水平运动带动桩和翼墙的轴向偏移,导致翼墙与闸室之间的变形缝增大。

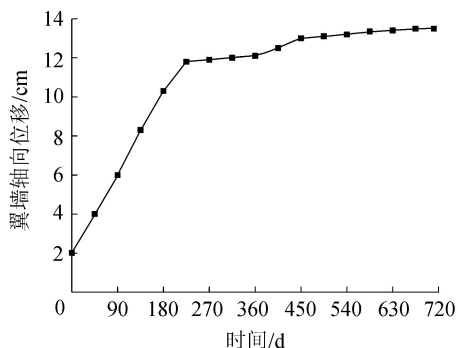


图5 无空箱时运行期翼墙轴向位移

### 3.2 空箱对轴向位移的影响

有空箱时,翼墙在运行期的轴向位移见图6。

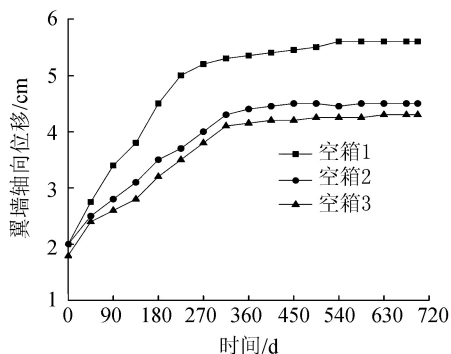


图6 有空箱时运行期翼墙轴向位移

由图 6 可见,随着时间的增长,空箱 1 翼墙的最终轴向位移为 5.5 cm 左右;空箱 2 和空箱 3 的计算结果比较接近,翼墙轴向位移控制在 4.0 cm 左右,有效抑制了轴向位移的发展。分析其原因,空箱的存在取代了边墩和翼墙附近堤防的填土,减小了地基的附加应力,土层因蠕变引起的水平位移大幅度减小,相应减小了翼墙的水平位移,故可有效控制闸室与翼墙之间的变位。3 种空箱翼墙的基底应力不均匀系数分别为 1.43、1.40 和 1.35,抗滑稳定系数分别为 1.57、1.85 和 1.90,满足应力及稳定要求。从经济角度综合考虑,本工程选用空箱 2 可起到良好地控制翼墙与水闸之间变形缝发展的效果。

分析可得出,软土地基闸堤间所设置连接空箱的宽度,对控制翼墙与闸室变形缝的开展有重要影响,空箱的设置宽度应与堤防高度  $H$  成正比。从计算结果来看,并考虑一定的裕度,空箱的设置宽度在  $0.8H \sim 1.0H$  之间比较合适,类似工程可根据堤防高度设置空箱的宽度。

### 3.3 空箱对闸基灌注桩水平位移的影响

水闸底板钻孔灌注桩共分 5 排 7 列,分别为 A~E 排、1~7 列,用桩体所在的排和列表示桩位,如桩 E4 表示第 E 排桩、第 4 列桩。

有无空箱 2 种情况下水闸底板钻孔灌注桩沿垂直水流方向的水平位移分别见图 7 和图 8。由图 7 可见,E 排桩桩身中上部发生了较明显的弯曲,位移

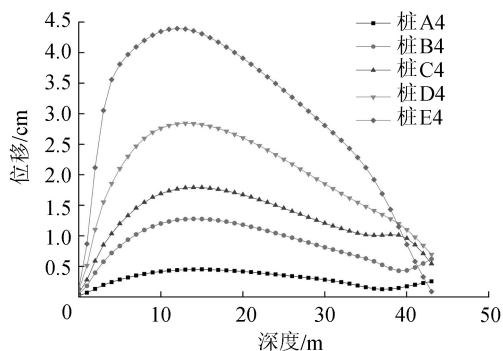


图 7 无空箱时桩身沿垂直水流方向的位移

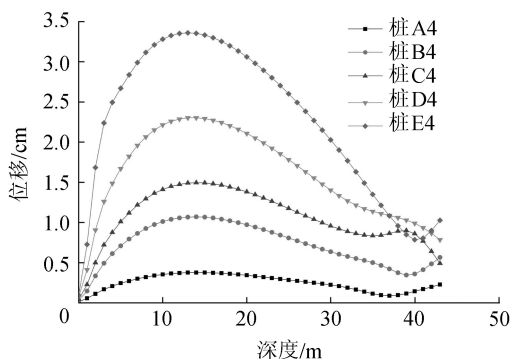


图 8 有空箱时桩身沿垂直水流方向的位移  
(空箱宽度为 7 m)

达 4.5 cm 左右,由外向里桩身弯曲程度依次减弱。说明在填土作用下,桩体受横向流动土体的作用发生弯曲,E 排桩为最外排桩,靠填土区最近,其受堆载影响最明显;靠里排的桩因为前排桩的遮拦作用<sup>[10-11]</sup>,受影响程度依次减弱。

对比图 7、图 8 可知,设置空箱后,桩体沿垂直水流方向的位移明显减小。分析其原因,由于空箱的存在,取代了空箱位置的高填土,减小了作用在地基上的堆载,同时,空箱底部设置的钻孔灌注桩提高了空箱地基的刚度,阻碍了土体的横向流动。因此,设置空箱后减小了两侧堤防高填土对闸室桩体变形的影响,改善了闸室、翼墙基础桩体的受力条件,减小了水闸与堤防之间的不均匀沉降。

从桩的水平位移来看,桩顶位移基本为零,主要原因是水闸底板受到两侧荷载的对称支撑作用,限制了闸室的位移。从桩的受力条件来看,由于顶部位移为零,顶部以下位移越大,桩受到的弯矩越大。因此设置空箱后使桩的受力条件得到了较大的改善。

## 4 结论

a. 采用空箱过渡水闸与堤防连接段地基,起到了保护闸室、改善闸室底板受力条件的作用,同时减小了高填土对闸室底板和翼墙桩体变形的影响,可大幅度改善桩基的受力条件,减小不均匀沉降和变位的发生。

b. 翼墙的轴向位移是由两侧堤防高填土使地基软土产生水平运动所造成,软土的水平运动导致翼墙基底桩的中上部产生较大的水平位移,从而引起翼墙的轴向偏移,导致翼墙与闸室之间的变形增大。

c. 软土地基闸堤间设置空箱可有效减小翼墙的位移。空箱的宽度对控制翼墙与闸室变形缝的开展有重要影响,合理的空箱尺寸不仅可以有效抑制翼墙与闸室间变形缝的开展,而且可以避免因空箱设置过大造成的投资浪费。空箱的设置宽度应与堤防高度  $H$  成正比,初步认为空箱宽度在  $0.8H \sim 1.0H$  之间比较合适。

### 参考文献:

[1] 缪林昌. 软土力学特性与工程实践[M]. 北京:科学出版社,2012:1-50.  
 [2] SL265—2001 水闸设计规范[S].  
 [3] 许正松. 水闸整体结构设计方法研究及空箱挡土墙的应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2007.  
 [4] 李传名,陈秀华. 临泉城西闸闸室段稳定设计分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,1998,21(3):121-125. (LI Chuanming, CHEN Xiuhua. Stability analysis in the design of Chengxi sluice in Linquan County [J].

- Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 1998, 21(3):121-125. (in Chinese))
- [ 5 ] 王钰栋, 金磊, 洪清泉, 等. Hyper Mesh & Hyperview 应用技巧与高级实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2012: 105-131.
- [ 6 ] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006:168-198.
- [ 7 ] 戚科骏, 宰金珉, 梅国雄. 考虑土体固结的单桩-土-承台非线性共同作用程序实现[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2004, 26(3):6-11. (QI Kejun, ZAI Jinmin, MEI Guoxiong. Program for the nonlinear interaction of single pile-soil-raft considering soil consolidation [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science, 2004, 26(3):6-11. (in Chinese))
- [ 8 ] 刘金龙, 栾茂田, 许成顺, 等. Drucker-Prager 准则参数特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 4009-4014. (LIU Jinlong, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Study on parametric characters of Drucker-Prager criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2):4009-4014. (in Chinese))
- [ 9 ] 郭海柱, 张庆贺, 郭健. 时间硬化与 Drucker-Prager 耦合蠕变模型的应用研究[J]. 结构工程, 2008, 24(3): 117-121. (GUO Haizhu, ZHANG Qinghe, GUO Jian. Application study on time hardening and drucker-prager yield criterion coupled creep model of soil [J]. Structural Engineering, 2008, 24(3):117-121. (in Chinese))
- [ 10 ] 韩爱民, 肖军华, 梅国雄. 横向流动土体作用下的群桩反应性状[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1464-1465. (HAN Aimin, XIAO Junhua, MEI Guoxiong. Behavior of pile groups subject to excavation-induced lateral soil movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12):1463-1467. (in Chinese))
- [ 11 ] 田美存, 徐永福. 荷载传递法在群桩分析中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1997, 25(1):62-67. (TIAN Meicun, XU Yongfu. Application of load transfer method to analysis of group piles [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1997, 25(1):62-67. (in Chinese))

(收稿日期:2014-03-21 编辑:骆超)

(上接第 4 页)

- [ 5 ] YANG Chenguang, TU Xuyan, CHEN Jie. Algorithm of marriage in honey bees optimization based on the wolf pack search [C]//Proceedings of IEEE Computer Society International Conference on Intelligent Pervasive Computing. Jeju Island: [s. n.], 2007:462-467.
- [ 6 ] LIU Changan, YAN Xiaohu, LIN Chunyang, et al. The wolf colony algorithm and its application [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(2):212-216.
- [ 7 ] TANG Rui, SIMON Fong, XIN Sheyang, et al. Wolf search algorithm with ephemeral memory [C]//Proceedings of IEEE Digital Information Management (ICDIM) Seventh International Conference. Macau: [s. n.], 2012:165-172.
- [ 8 ] 周强, 周永权. 一种基于领导者策略的狼群搜索算法 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9):2629-2632. (ZHOU Qiang, ZHOU Yongquan. Wolf colony search algorithm based on leader strategy [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9):2629-2632. (in Chinese))
- [ 9 ] LI Chienming, DU Yichun, WU Jianxing, et al. Synchronizing chaotification with support vector machine and wolf pack search algorithm for estimation of peripheral vascular occlusion in diabetes mellitus [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 9:45-55.
- [ 10 ] 董子敖. 水库群调度与规划的优化理论和应用[M]. 济南:山东科技出版社, 1989:113-134.
- [ 11 ] HARBOE R. Multi-objective decision making techniques for reservoir operation [J]. Water Resources Bulletin, 1992, 28(1):103-110.
- [ 12 ] 钟平安, 唐林. 水库优化调度遗传算法参数的灵敏性分析[J]. 水力发电, 2012, 36(11): 13-16. (ZHONG Pingan, TANG Lin. Synchronizing chaotification with support vector machine and wolf pack search algorithm for estimation of peripheral vascular occlusion in diabetes mellitus [J]. Water Power, 2012, 36(11): 13-16. (in Chinese))
- [ 13 ] 张双虎, 黄强, 吴洪寿, 等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 1-5. (ZHANG Shuanghu, HUANG Qiang, WU Hongtao, et al. A modified particle swarm optimizer for optimal operation of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric engineering, 2007, 26(1):1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2014-02-16 编辑:骆超)

