

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.034

基于遗传投影寻踪模型的泵站运行综合评价

周琪慧¹, 方国华¹, 吴学文¹, 刘芹¹, 孙洪滨², 王永年²

(1. 河海大学, 南京 210098; 2. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200)

摘要: 为更加科学合理地开展泵站优化运行综合评价, 采用主成分分析法对评价指标进行优选。在构建衡量泵站优化运行特征指标集的基础上, 借助遗传投影寻踪模型(GA-PP)将高维数据投影到低维子空间上, 寻求最佳投影方向, 对最佳投影方向与评价指标的线性投影进行计算得到投影指标值, 作为判断泵站优化运行优劣程度的依据并对其进行统一评价, 进一步提升泵站经济运行能力以及泵站系统联合优化调度综合水平。以淮安四站为例, 开展单机组日优化运行评价, 结果表明: GA-PP模型能在很大程度上避免传统评判中人为赋权的干扰, 得到的最优运行方案不仅运行成本低且更符合泵站日常运行需求, 评价结果更为准确客观。

关键词: 泵站优化运行; 投影寻踪; 遗传算法; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: TV 734 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)05-0985-05

Comprehensive assessment of pump station operation based on genetic projection pursuit model

ZHOU Qi-hui¹, FANG Guo-hua¹, WU Xue-wen¹, LIU Qin¹, SUN Hong-bin², WANG Yong-nian²

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Irrigation Canal Management Office, Huai'an 223200, China)

Abstract: In order to unfold the comprehensive assessment of pump operation optimization more scientifically and reasonably, the principal component analysis (PCA) was applied to the optimal selection of evaluation indexes. On the basis of constructing the characteristic index set of pump operation optimization, the high dimensional data were projected onto the low-dimensional space using the Genetic Projection Pursuit Model (GA-PP) to determine the optimal projection direction. The projection index value was obtained from the calculation of the optimal projection direction and linear projection of evaluation indexes, which can synthesize the virtues or defects degree of pump operation optimization and conduct a uniform evaluation, and further promote the economical operation capacity of pump station and comprehensive level of united optimal operation of pumping station system. A calculation example for the daily optimal operation of the No. 4 Huai'an pumping station was conducted. The results showed that the approach can avoid the artificial disturbance of traditional method in the weight value identification to the maximum extent and the evaluation results of projection pursuit not only have low cost but also are suitable for practical operation.

Key words: pump operation optimization; projection pursuit; genetic algorithms; principal component analysis; comprehensive assessment

泵站是南水北调等跨流域调水工程运转的关键环节, 其建设及运行在区域水资源调配和供水等方面发挥着巨大作用。但泵站在发挥效能的同时, 需消耗大量能量, 因此, 对大中型泵站的优化运行、科学调度就显得日益重要。近年来, 泵站优化运行的研究取得了不少进展, 但大多集中于研究泵站优化运行方式以及创建和求解优化模型等方面, 未见有对其优化运行综合能力进行科学的评价。

泵站优化运行评价就是根据所建立的方案评价指标集,

运用有效的方法, 从有限的泵站运行方案中选出相对最优方案并且进行定性定量、系统的分析, 从而客观判断优选方案对泵站优化运行的成效与影响过程。由于衡量泵站优化运行特征的指标涉及范围广、种类多, 仅仅依据耗电费用最小这一单一指标对不同的泵站优化运行方案进行对比分析, 其优选结果并不完全符合泵站实际运作的要求。因此, 从提升泵站优化运行综合能力的角度开展多指标、多方案泵站优化运行综合评价可为泵站管理运行提供科学的决策依据, 在泵站系

收稿日期: 2014-11-06 修回日期: 2015-08-10 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2104.026.htm>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2012041); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0256)

作者简介: 周琪慧(1991-), 女, 江苏人, 主要从事水利规划与水利经济方面的研究工作。E-mail: hhu.zhouqihui.2008@163.com

通讯作者: 方国华(1964-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度、水利经济、工程管理等方面的教学与科研工作。E-mail: hhufgh@126.com

统运行的理论与实践都具有重要的经济价值和现实意义。

传统的评价方法主要有模糊综合优选法、灰色综合优选法、人工神经网络优选、层次分析法等^[1], 它们已经在多种类型的评价中予以应用, 并取得了相应成果。然而这些方法用于评价的过程存在人为赋权的干扰, 同时泵站优化运行方案的优选过程还涉及评价指标众多、各指标的量纲不尽相同和各指标的权重较难确定等复杂问题, 具有高维、非线性、非正态的特点。投影寻踪(Projection Pursuit, 简称 PP) 选优决策方法^[1] 可有效地解决此类评价问题, 降低主观因素对选优结果的影响。因此, 本文尝试将投影寻踪法应用于对泵站优化运行的综合评价。由于该问题一般较复杂, 且传统的 PP 方法计算量大, 故本文在构建衡量泵站优化运行特征评价指标集的基础上, 采用遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA) 来优化多维投影方向, 将衡量泵站优化运行特征的多维评价指标投影到一维数据空间, 进而有效降维, 更加全面、合理地开展泵站优化运行的综合评价。

1 评价指标集的构建

1.1 指标初选

考虑到兼顾泵站正常运行的经济性、机组的维护周期长以及易操作性等方面的需求, 初步选取运行电费、叶片调节次数、机组开停机次数、机组运行时间、机组运行时的平均效率、机组运行消耗的总功率以及机组的总抽水量等 7 个影响因素作为泵站优化运行的评价指标。

1.2 指标筛选

影响泵站优化运行的指标涉及较多, 各种影响指标间的关系复杂, 如何快速有效地提炼出反应泵站运行状态的指标, 是进行泵站优化运行评价的一项基础工作。能否准确、高效地从众多影响指标中选择出最能反映优化运行特征的指标, 对整个评价指标集的建立和泵站优化运行都至关重要。

常用的指标筛选方法有层次分析法、灰色关联分析法、主成分分析法、聚类分析、德尔菲法等。其中, 主成分分析法^[2] 能够在保证原始数据信息损失最小的情况下, 以少数的综合变量取代原有的多维变量, 使数据结构大为简化, 并且客观地确定权重, 避免了主观随意性, 因而是泵站优化运行综合评价时指标选优的一种简单易行的有效方法。

在初步确定泵站优化运行评价指标的基础上, 借助 SPSS 统计软件对各影响指标开展主成分分析, 将多个指标标准化为少数几个综合指标, 筛选出一组新的、较少的、相互之间更能反映泵站优化运行特性的评价指标, 构建泵站优化运行的评价指标集。其具体步骤如下。

(1) 对影响泵站优化运行各指标的数值进行主成分分析, 开展指标数据的标准化处理。

(2) 利用 SPSS 软件求得其相关系数矩阵、特征值和主成分贡献率及累计贡献率。

(3) 根据入选累计贡献率得到对应入选特征值和主成分荷载矩阵, 确定主成分; 分析主成分荷载矩阵, 并据此筛选出最终参与评价的指标集。

2 遗传投影寻踪模型

投影寻踪(PP) 选优决策方法是由美国科学家 Kruscal

于 20 世纪 70 年代提出的一种用于分析和处理非线性、非正态高维观测数据的新型数理统计方法, 其基本想法是将高维数据通过组合投影到低维空间上, 对于投影得到的构形, 采用投影指标函数去衡量投影暴露某种结构的可能性大小, 寻找出使投影指标函数达到最优的投影值, 然后根据该投影值来分析高维数据的结构特征^[3-4]; 而遗传算法(GA) 由美国 Michigan 大学的 John Holland 教授于 20 世纪 60 年代提出, 它通过选择、遗传、变异等作用机制, 一代代不断改进, 缩小优秀个体选择的区间, 最后收敛到一个最适合环境的个体上, 从而求得问题的最佳解^[5-6]。遗传投影寻踪模型(简称 GA-PP) 是基于上述两种思想建立的聚类分析评价模型, 该评价模型可应用于水资源、生态、环境等领域, 其计算结果能通过观察投影图像得到分类, 直观方便。

2.1 GA-PP 建模过程

(1) 评价指标值的无量纲化处理。

设评价泵站优化运行的指标集为 $\{x(i, j) | i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p\}$, 其中 $x(i, j)$ 为第 i 个泵站优化运行方案第 j 个指标值; n, p 分别为所取泵站优化运行方案的个数和评价指标的数目。为消除各指标的量纲以及指标值变化范围对综合评价的影响, 对泵站各指标值进行无量纲化处理^[5]。

对于越大越优的指标:

$$x^*(i, j) = \frac{x(i, j) - \min x(j)}{\max x(j) - \min x(j)} \quad (1)$$

对于越小越优的指标:

$$x^*(i, j) = \frac{\max x(j) - x(i, j)}{\max x(j) - \min x(j)} \quad (2)$$

式中: $x^*(i, j)$ 为泵站优化运行指标无量纲化后所得到的序列; $\max x(j), \min x(j)$ 分别为泵站优化运行方案的第 j 个指标值的最大值和最小值。

(2) 构造投影指标函数。

投影寻踪法就是寻求一个最佳向量 α , 将单位长度向量作 $\alpha = (\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(p))$ 为投影方向, 把 p 维数据 $\{x = (i, j) | j=1, 2, \dots, p\}$ 综合为一维投影值。

$$z(i) = \sum_{j=1}^p \alpha(j) x(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

然后根据 $z(i)$ 的一维散点图进行分类。综合投影指标值时, 要求 $z(i)$ 投影值的散布特征应为: 局部投影点尽可能密集, 最好凝聚成若干个点团, 而在整体上投影点团之间尽可能散开。因此, 投影指标函数 $Q(\alpha)$ 可构造为

$$Q(\alpha) = S_z D_z \quad (4)$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差; D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度, 即

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) \cdot \mu(R - r_{ij}) \quad (6)$$

$$\text{其中, } r_{ij} | z(i) - z(j) |, \mu(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \\ 1 & t < 0 \end{cases}$$

式中: \bar{z} 为序列 $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的均值; R 为局部密度的窗口半径, 一般可取值为 $0.1 S_z$; r_{ij} 指距离; $\mu(t)$ 则是单位阶跃函数。

(3) 优化投影指标函数。

当给定泵站优化运行的评价指标集时,投影指标函数 $Q(a)$ 只随投影方向 a 的变化而变化。因此,可通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向,即

$$\begin{cases} \max Q(a) = S_1 D_2 \\ s. t. \sum_{j=1}^n a^2(j) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

求解该问题即可获得最佳的投影方向 a^* 。这是一个复杂的非线性优化问题,其具有高维全局寻优的特点,可以借助遗传算法(GA)来解决。

(4) 等级评价。

将求得的最佳投影方向 a^* 代入式(3)后,即得泵站优化运行各方案的投影值 $z^*(i)$, $z^*(i)$ 值越大对应的方案越优。对 $z^*(i)$ 值从大到小排序,最大的 $z^*(i)$ 值所对应的方案就是最优方案。根据 $z^*(i)$ 对应的值确定各待评方案的水平级别并对其进行综合评价^[7]。

2.2 模型求解

本文将 GA-PP 模型应用到泵站优化运行的综合评价上,求解最佳的投影方向,其求解基本流程见图 1^[5-6]。

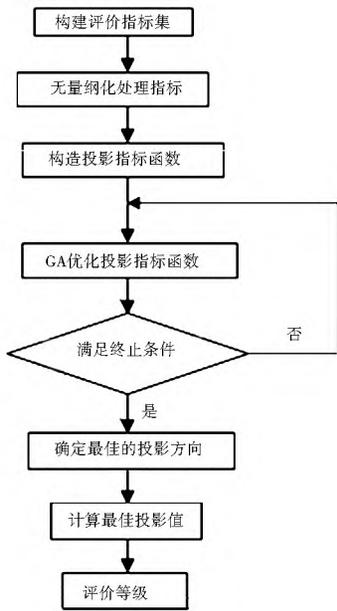


图 1 GA-PP 模型求解基本流程

Fig. 1 Flowchart of solving the GA-PP Model

3 实例分析

淮安四站位于江苏省淮安市洪泽湖下游白马湖地区,于 2009 年 7 月建成,与淮安一、二、三站共同组成南水北调东线工程京杭运河输水线的第二梯级泵站,兼有排除白马湖地区涝水的作用,截止 2012 年底,该站已抽水 7.31 亿 m^3 。淮安四站安装了 4 台套 2900ZLQ346-01 型立式轴流泵,机组额定转速 $n=150$ r/min,叶轮直径为 2900 mm。水泵叶片为液压全调节,设计叶片安放角 $\beta=0^\circ$,调节范围为 $[-4^\circ, 4^\circ]$,电动机额定功率 $N_0=2500$ kW,取电动机效率 $\eta_{mot}=0.94$,直联传动效率 $\eta_c=1$ 。

3.1 评价指标集的构建

《淮安水利枢纽泵闸联合优化调度研究》运用动态规划法对淮安四站单机组进行叶片全调节日优化运行分析计算,得到了运行电费较小的 5 种日优化运行方案,并对该方案的可行性与可靠性进行了验证^[8]。泵站各日优化运行方案及初选的评价指标见表 1。

按照主成分分析法的具体步骤,运用 SPSS 软件分别对表 1 中初选的 7 个评价指标进行计算^[9-10]。

表 1 泵站优化运行方案及评价指标

Tab. 1 Pump operation optimization scheme and evaluation index

方案	运行电费/万元	开停机次数	叶片调节数/次	运行时 间/h	平均效 率(%)	消耗功 率/kW	总抽水 量/ m^3
1	1.622 7	3	3	16	73.09	11 750	2230 080.48
2	1.693 1	2	3	18	74.67	11 971	2225 573.64
3	1.694 9	2	4	18	74.72	11 980	2223 921.24
4	1.614 8	3	3	16	73.05	11 748	2230 683.12
5	1.615 8	3	3	16	73.15	11 753	2229 055.20

注:本次运行费用参考 2012 年江苏省物价局规定销售电价标准

(1) 对表 1 数据标准化后计算各评价指标的相关系数矩阵(见表 2),以确定评价的主因子数。

表 2 相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix

指标	运行 电费	开停机 次数	叶片调 节次数	运行 时间	平均 效率	消耗 功率	总抽 水量
运行 电费	1.000	-0.997	0.623	0.997	0.997	0.997	-0.960
开停机 次数	-0.997	1.000	-0.612	-1.000	-0.999	-1.000	0.960
叶片调 节次数	0.623	-0.612	1.000	0.612	0.628	0.632	-0.744
运行 时间	0.997	-1.000	0.612	1.000	0.999	1.000	-0.960
平均 效率	0.997	-0.999	0.628	0.999	1.000	1.000	-0.971
消耗 功率	0.997	-1.000	0.632	1.000	1.000	1.000	-0.968
总抽 水量	-0.960	0.960	-0.744	-0.960	-0.971	-0.968	1.000

(2) 根据特征值方差累计贡献率确定选取主成分个数。按照特征值由大到小的顺序排列,各主成分的贡献率及累计贡献率见表 3。第一主成分方差贡献率为 91.338%,远远大于第二、三主成分的贡献率(8.159% 和 0.446%)。根据表 3,第 1 主成分的特征值为 6.394,大于 1,累计方差贡献率达到 91.338%,大于主成分法中规定的 85%,依据主成分的方差贡献率的多少来选择评价指标,当第一主成分的方差贡献率 $> 80\%$ 时,只采用第一主成分来进行综合评价即可;而当第一主成分的方差贡献率 $< 80\%$ 时,则需要按照贡献率的大小,依次将前几个主成分进行线性加权综合,使得方差贡献率的总和超过 80%,则认为它们基本包含了以上 7 个指标的所有信息。其中,第一个主成分对评价是最重要的且

影响最大。

表 3 特征值和主成分贡献率及累计贡献率

Tab. 3 Eigenvalue and contribution rate and accumulative contribution rate of principal component

主成分	特征值	特征值贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	6.394	91.338	91.338
2	0.571	8.159	99.497
3	0.031	0.446	99.943
4	0.004	0.057	100.000
5	1.163E-16	1.661E-15	100.000
6	1.220E-17	1.743E-16	100.000
7	-3.351E-16	-4.787E-15	100.000

(3) 计算得出主成分荷载矩阵, 见表 4。从主成分荷载大小来看, 与第一主成分密切相关的是消耗功率、平均效率、运行时间、运行费用以及叶片调节次数, 它们与第一主成分的相关系数绝对值都超过了 0.7。

表 4 主成分荷载矩阵

Tab. 4 principal component loading matrix

指标	主成分	
	1	
均效率	0.994	
行时间	0.991	
停机次数	-0.991	
行电费	0.991	
总抽水量	-0.985	
叶片调节次数	0.708	

综上所述, 泵站优化运行将选用与第一主成分密切相关的指标——机组运行的消耗功率、平均效率、运行时间、运行费用以及叶片调节次数作为评价指标, 构建泵站优化运行方案评价指标集, 该评价指标集共有 5 个方案、5 个评价指标。

3.2 模型应用

应用上述 GA-PP 评价模型进行计算, 首先将该评价方案指标集按式(1)、式(2)进行归一化处理(表 5), 依次代入式(3)至式(6), 即得投影指标函数, 然后采用 GA 优化由式(7)所确定的问题, 得最大投影指标函数值为 0.848 0, 最佳投影方向 $\alpha^* = (0.4147, 0.0002, 0.6825, 0.0015, 0.6019)$ 。把 α^* 代入式(3)后即得各方案的投影值 $z^*(i)$, 结果见表 6。以 $z^*(i)$ 的差异水平作为评价的依据, 对方案进行等级分类, 绘制方案级别投影值散点图^[7], 见图 2。

表 5 泵站优化运行方案指标归一化结果

Tab. 5 Normalized results of pump operation optimization scheme index

方案	运行电费	叶片调节次数	运行时间	平均效率	消耗功率
1	0.901 4	1.000 0	1.000 0	0.024 0	0.991 4
2	0.022 5	1.000 0	0.000 0	0.970 1	0.038 8
3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0
4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0
5	0.987 5	1.000 0	1.000 0	0.059 9	0.978 4

指标属性 越小越优 越小越优 越小越优 越大越优 越小越优

表 6 泵站优化运行方案的投影寻踪评价

Tab. 6 Projection pursuit assessment of pump operation optimization scheme

方案	运行电费 /万元	叶片调节次数/次	运行时间 /h	平均效率 (%)	消耗功率 /kW	投影值 $z^*(i)$
1	1.622 7	3	16	73.09	11 750	1.653 2
2	1.693 1	3	18	74.67	11 971	0.034 3
3	1.694 9	4	18	74.72	11 980	0.001 5
4	1.614 8	3	16	73.05	11 748	1.699 3
5	1.615 8	3	16	73.15	11 753	1.681 2

指标属性 越小越优 越小越优 越小越优 越大越优 越小越优 越大越优

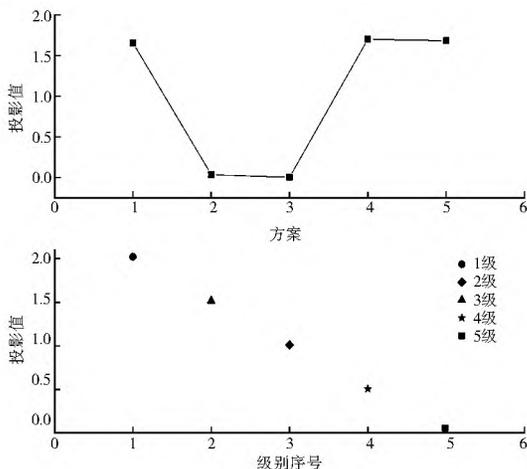


图 2 方案级别投影值散点图

Fig. 2 Scatter diagram of scheme level projection value

由表 6 及图 2 可以看出如下结果。

(1) 该方案集按投影值的大小(即泵站优化运行综合水平从高到低)排序依次为方案 4 > 方案 5 > 方案 1 > 方案 2 > 方案 3。

(2) 由图 2 可知各泵站方案优化运行水平^[14-15], 方案 1、方案 4、方案 5 都在 2.022 4 与 1.518 15 之间, 即处于 1 级与 2 级之间, 属于较高级水平, 其中方案 4 同级别中相对最高, 说明该方案的泵站运行已达到相当好的水平。此外, 由表 6 可知, 方案 1、方案 4 和方案 5 的投影值非常接近, 比较这 3 个方案, 方案 1、方案 4、方案 5 的叶片调节次数与运行时间均相同, 方案 5 平均效率相比最高; 方案 4 较方案 5 平均效率低了 0.1%, 但是运行电费少了 69 元, 且消耗的功率少了 5 kW; 方案 1 较方案 4 除平均效率略高外, 其他无明显优势。因此, 方案 4 相比其他方案, 其泵站优化运行能实现更好的性能。

(3) 根据最佳投影方向, 可进一步判断各评价指标对泵站优化运行的贡献大小^[14-15]。最佳投影方向各分量的大小实际上反映了各评价指标对泵站优化运行结果的影响程度, 值越大则对应的指标对泵站优化运行结果的影响程度就越大。最佳投影方向 α^* 表明, 泵站机组运行时间、消耗的功率对泵站优化运行的影响程度基本相近, 而运行电费其次。叶片调节次数也会给实际运行操作带来不便, 同时增加泵站维护成本, 在今后泵站优化运行过程中, 可以将上述指标作为

重点关注对象。

4 结语

(1) 投影寻踪(PP)能够将高维数据通过寻求最佳投影方向映射到低维子空间,从而形成综合评价指标集。在泵站优化运行多指标多方案综合择优评价中避免了模糊综合评价等方法专家赋权的人为干扰。

(2) 将遗传算法与投影寻踪模型相结合,并应用到泵站优化运行评价中,解决了高维数据全局寻优难题,减少了寻优工作量,使模型能够得以更为广泛的应用。

(3) GA-PP模型不仅可以得出各个方案的综合评判优劣排序,而且由优化投影方向反映出各个评价指标对各方案评判的重要程度,相比权重评分法等方法更为科学。

参考文献(References):

- [1] 方国华,黄显峰.多目标决策理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2011.(FANG Guo hua, HUANG Xian feng. Multi objective Decision Theory, Method and Application[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 鲁斐,李磊.主成分分析法在辽河水质评价中的应用[J].水利科技与经济,2006(10):660-662.(LU Fei, LI Lei. Principal component analysis of water quality evaluation in Liaohe River [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006(10): 660-662. (in Chinese))
- [3] 付强,付红,王立坤.基于加速遗传算法的投影寻踪模型在水质评价中的应用研究[J].地理科学,2003(2):236-239.(FU Qiang, FU Hong, WANG Lirun. Study on the PPE Model Based on RAGA to Evaluating the Water Quality[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003(2): 236-239. (in Chinese))
- [4] 金菊良,魏一鸣,丁晶.水质综合评价的投影寻踪模型[J].环境科学学报,2001,21(4):431-434.(JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of water quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 431-434. (in Chinese))
- [5] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005.(LEI Yingjie, ZHANG Shanyan, LI Xuwu, et al. MATLAB Genetic algorithm toolbox and application[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 陈广洲,解华明,鲁祥友. MATLAB遗传算法工具箱在非线性优化中的应用[M].计算机技术与发展,2008,18(3):246-248.(CHEN Guangzhou, XIE Huaming, LU Xiangyou. Nonlinear Optimization Based on Genetic Algorithm Toolbox of Matlab [M]. Computer Technology and Development, 2008, 18(3): 246-248. (in Chinese))
- [7] 周惠成,董四辉.基于投影寻踪的水质评价模型[J].水文,2005,25(4):14-17.(ZHOU Huicheng, DONG Sihui. A water quality assessment model based on projection pursuit technique [J]. Hydrology, 2005, 25(4): 14-17. (in Chinese))
- [8] 方国华,刘芹.淮安水利枢纽泵闸联合优化调度研究[R].河海大学,2015.(FANG Guo hua, LIU Qin. Research on the joint optimized operation of Hua'an an hydr junction pump and sluice [R]. Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [9] 刘德林,刘贤赵.主成分分析在河流水质综合评价中的应用[J].水土保持研究,2006,13(3):124-125.(LIU Delin, LIU Xianzhao. Application of principal component analysis to the comprehensive evaluation of water quality in river [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 124-125. (in Chinese))
- [10] 姚焕玫,黄仁涛,刘洋,等.主成分分析法在太湖水质富营养化评价中的应用[J].桂林工学院学报,2005,25(2):248-251.(YAO Huanmei, HUANG Rentao, LIU Yang, et al. Principal component analysis of water high eutrophication evaluation in Taihu Lake [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2005, 25(2): 248-251. (in Chinese))
- [11] 袁尧,刘超.基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J].农业机械学报,2013(3):38-44.(YUAN Yao, LIU Chao. Pump operation optimization and projection pursuit evaluation strategy based on ant colony optimization [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013(3): 38-44. (in Chinese))
- [12] 冯晓莉,仇宝云,王斐,等.南水北调东线高港泵站优化运行方案研究[J].水利学报,2010,41(4):412-418.(FENG Xiaoli, QIU Baoyun, WANG Fei, et al. Study on optimal operation schemes of Gaogang Pumping Station in Eastern Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 412-418. (in Chinese))
- [13] 冯晓莉,仇宝云,黄海田,等.南水北调东线一期工程源头泵站优化运行研究[J].水力发电学报,2008,27(4):48-53.(FENG Xiaoli, QIU Baoyun, HUANG Haitian, et al. Study on source pump station optimal operation of first stage Eastern Route of South to North Water Diversion Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 48-53. (in Chinese))
- [14] 程吉林,张礼华,张仁田,等.泵站叶片可调单机组日运行优化方法研究[J].水利学报,2010,41(4):499-504.(CHENG Jilin, ZHANG Lihua, ZHANG Rentian, et al. Study on optimal daily operation of single adjustable blade pump unit in pumping station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 499-504. (in Chinese))
- [15] 张礼华,程吉林,张仁田,等.江都四站站内多机组变角优化运行方式研究[J].扬州大学学报:自然科学版,2010,13(2):75-78.(ZHANG Lihua, CHENG Jilin, ZHANG Rentian, et al. Research on optimal operation mode for multi units with adjustable blade in Jiangdu No. 4 pumping station [J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2010, 13(2): 75-78. (in Chinese))