

广西电网水电经济运行评价和统计系统及应用

李允军¹ 吴剑峰² 熊 漪³

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003; 2. 广西电力调度控制中心, 广西 南宁 530023;
3. 北京师范大学经济与工商管理学院, 北京 100875)

摘要:依据 2011 年中国南方电网有限责任公司制定并颁布的《中国南方电网水电经济运行指标规范(试行)》,广西电网开发了水电经济运行评价和统计系统,该系统包括针对水电厂的 3 个评价指标、7 个统计指标和针对电网的 4 个评价指标、6 个统计指标。采用该系统对广西电网 2010 年水库调度工作进行了指标统计计算和分析,结果表明该系统可有效地对水电优化调度和经济运行工作业绩进行全面、客观评价,对改进水电运行调度和管理工作具有重要的现实意义。

关键词:广西电网;水电厂;经济运行指标;优化调度

中图分类号: TM73 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-7647(2012)03-0062-05

Economical operation assessment and statistical system of Guangxi Power Grid and its application//LI Yun-jun¹, WU Jian-feng², XIONG Yi³(1. NARI Group Corporation, Nanjing 210003, China; 2. Guangxi Dispatch & Control Centre, Nanning 530023, China; 3. School of Economics and Business Administration, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The hydropower economical operation assessment and statistical system has been developed by the Guangxi Power Grid according to the *Hydropower Economical Operation Index Criteria of China South Power Grid*. This system contains three evaluation indices and seven statistical indices for hydropower plants, as well as four evaluation indices and six statistical indices for power networks. In this study, the system was used for the statistical calculation and analysis of the indices for the reservoir operations of the Guangxi Power Grid in 2010. The results indicate that the system is effective in making a comprehensive and objective evaluation of the hydropower-optimized dispatch control and economical operation works, and is also of practical significance for the improvement of the hydropower operation and dispatching.

Key words: Guangxi Power Grid; hydropower plant; economic operational index; optimal dispatching

以往对水电经济运行考核大多只考核一个或几个指标,常用的有水能利用提高率、发电耗水率等,不够全面。2011 年中国南方电网有限责任公司制定并颁布了《中国南方电网水电经济运行指标规范(试行)》(以下简称《规范》),将责任主体划分为水电厂和电网调度机构,系统且详细地描述了水电厂运行的各个指标和参数^[1-2]。

根据中国南方电网有限责任公司对加强水库调度管理的要求,广西电网电力调度控制中心(以下简称中调)依据《规范》,结合广西电网内水电站的特点,开发了水电经济运行评价和统计系统,系统包括针对水电厂的 3 个评价指标、7 个统计指标和电网的 4 个评价指标、6 个统计指标;评价指标为进行统计并且用于考核评价的指标,统计指标为只统计但不进行考核评价的指标。

依据《规范》对电网和水电厂的水库调度工作进行评价,这对于促进水库调度管理水平的提高具有重要意义。本文在简要介绍《规范》的基础上,详细分析了水电厂和电网的评价指标和统计指标,利用水电经济运行评价和统计系统对广西电网 2010 年水库调度工作进行了统计分析,对广西电网改进水电运行调度和管理、促进节水增发电量、提高水电经济运行水平具有一定的参考价值。

1 《规范》简介

为客观评价水电优化调度和经济运行工作绩效,指导有关单位改进水电调度运行和管理工作,逐步提高南方电网水电经济运行水平,南方电网公司制定并实施《规范》。该《规范》遵循以下原则:

a. 导向性原则 符合国家电力体制改革和节能

减排政策导向,明确工作努力方向。

b. 先进性原则:客观反映南方电网水电经济调度与运行水平,向国内外先进水平看齐。

c. 可行性原则:结合南方电网的实际情况,技术可行,指标可达,促进共同提高。

《规范》将指标按责任主体划分为水电厂和电网调度机构两大类,统计及评价指标内容覆盖水电调度运行工作主要过程并包括最终绩效。水电厂指标侧重评价来水预测、洪水调度、水情测报等方面的工作,电网调度机构的指标侧重评价水电优化调度、水电吸纳等方面的工作。

2 经济运行指标

2.1 水电厂经济运行指标

2.1.1 来水预测综合准确率

来水预测准确率是表示在某一时段内,预测的平均入库流量与实际的平均入库流量相比较的准确程度。按预见期可分为年、月、周、日来水预测准确率。为综合反映整体的来水预测水平,将各种预见期来水预测准确率按不同的权重加权平均计算得到的准确率,定义为来水预测综合准确率。计算公式如下:

$$P = W_{\text{月}} P_{\text{月}} + W_{\text{周}} P_{\text{周}} + W_{\text{日}} P_{\text{日}} \quad (1)$$

式中: P 为来水预测综合准确率; $P_{\text{月}}$ 、 $P_{\text{周}}$ 、 $P_{\text{日}}$ 分别为水电厂的月、周、日来水预测准确率; $W_{\text{月}}$ 、 $W_{\text{周}}$ 、 $W_{\text{日}}$ 分别为水电厂的月、周、日来水预测准确率的权重。月、周、日来水预测准确率计算公式如下:

$$P_m = \left(1 - \frac{|Q_s - Q_y|}{|Q_s|} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_y 为统计时段内预测的平均入库流量; Q_s 为统计时段内实测的平均入库流量;下标 m 取月、周、日。

对梯级水电厂,需要分别预测平均入库流量 Q_y 和梯级区间来水 Q_{qj} ,计算月、周、日来水预测准确率时,为去除上游电站发电调整对其入库流量预报的影响,计算时对预测平均入库流量 Q_y 进行修正:

$$Q_y = Q_{\text{sy}} + Q_{\text{qj}} \quad (3)$$

式中: Q_{sy} 为上游相邻梯级水电厂在评价时段内流至本水电厂水库的出库流量; Q_{qj} 为预测的本水电厂与上游相邻梯级水电厂之间的流域区间流量。

2.1.2 水情数据合格率

水电厂的水情数据合格率指水电厂的水位、雨量、流量等水情数据传送的合格时间占评价总时间的百分比。按水情数据的时间属性分为实时数据合格率、小时数据合格率、日数据合格率和月数据合格率。

水电厂的水情数据合格率按月进行统计,采用

月内实时数据合格率、小时数据合格率、日数据合格率和月数据合格率4项的加权平均值,它们的权重分别为0.2、0.2、0.5、0.1。计算公式为

$$S = 0.2 S_{\text{实时}} + 0.2 S_{\text{小时}} + 0.5 S_{\text{日}} + 0.1 S_{\text{月}} \quad (4)$$

其中

$$S_{\text{实时}} = \frac{\sum_{i=1}^D S_{i, \text{实时}}}{D} \times 100\% \quad (5)$$

$$S_{\text{小时}} = \frac{\sum_{i=1}^D S_{i, \text{小时}}}{D} \times 100\% \quad (6)$$

$$S_{\text{日}} = \frac{d_{\text{日}}}{D} \times 100\% \quad (7)$$

式中: S 为水电厂的水情数据合格率; $S_{\text{实时}}$ 、 $S_{\text{小时}}$ 、 $S_{\text{日}}$ 、 $S_{\text{月}}$ 分别为水电厂的实时数据合格率、小时数据合格率、日数据合格率和月数据合格率,其中 $S_{\text{月}}$ 根据月数据是否合格直接取100%或0; $S_{i, \text{实时}}$ 为评价月内第 i 日水电厂的实时数据合格率,为第 i 日水电厂的全部测站的合格测站小时数除以水电厂的全部测站的总测站小时数(总测站数 $\times 24$); $S_{i, \text{小时}}$ 为评价月内第 i 日水电厂的小时数据合格率,为数据合格小时数除以24; $d_{\text{日}}$ 为评价月内日数据合格的天数; D 为评价月的总天数。

2.1.3 计划报表合格率

计划报表合格率指水电厂的日、周、月计划建议报表在报送及时性和内容正确性方面的合格程度。计算计划报表合格率时,日、周、月计划报表合格率分别按0.6、0.2、0.2的权重进行加权平均统计,即

$$Q = (0.6 q_{\text{日}} + 0.2 q_{\text{周}} + 0.2 q_{\text{月}}) \times 100\% \quad (8)$$

其中

$$q_{\text{日}} = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (9)$$

式中: Q 为计划报表合格率; $q_{\text{日}}$ 为日计划报表合格率; $q_{\text{周}}$ 为周计划报表合格率; $q_{\text{月}}$ 为月计划报表合格率; t 为月内合格日报数; T 为月内日报总数。 $q_{\text{周}}$ 、 $q_{\text{月}}$ 计算方法同 $q_{\text{日}}$ 。

2.1.4 统计指标

a. 调洪优化增发电量。反映水电厂优化洪水调度所取得的电量增发效益,包括预泄增发电量和动态控制增发电量2项增发效益。预泄增发电量是指水电厂在洪水到来前通过预报预泄腾出库容,减少后期弃水所增发的电量。动态控制增发电量是指水电厂在某场洪水过程中通过动态控制汛限水位或通过预报及时拦蓄洪尾等洪水优化利用措施,增加水库发电水量,提高发电水头所增发的电量^[3]。

b. 水能利用提高率。综合评价水电厂运行的节水增发成效的指标。日调节及日调节以下调节性水电厂以日为时段单位进行计算,考核电量按照

考核水位计算,年调节及年调节以上调节性能的水电厂以旬或月为时段单位计算,考核电量按照调度图进行计算,季调节及季调节以上调节性能水电厂汛期采用日调节及以下水电厂考核发电量计算方法,以日为单位时段进行计算,非汛期采用年及多年调节水电厂考核发电量计算方法,以旬为时段进行计算^[4-5]。

c. 调峰弃水损失电量。反映弃水对水电站损失电量的影响。

d. 弃水日发电负荷率。反映水电厂弃水日的发电负荷率情况。

e. 发电耗水率。统计时期内水电厂发出单位电能所消耗的发电水量^[6]。

f. 可用水量利用率。反映水电厂在一定时期内可发电水量的利用程度。

g. 装机利用小时数。表示装机容量利用率的一项指标。

2.2 电网经济运行指标

2.2.1 来水预测评价准确率

来水预测评价准确率表示电网调度机构对调度管理的水电厂进行来水预测的准确程度,用参与评价水电厂的来水预测准确率的平均值表示。计算公式为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{n} \quad (10)$$

式中: $\bar{P}$ 为来水预测评价准确率; P_k 为水电厂 k 的来水预测综合准确率,计算公式参见式(1); n 为参与评价水电厂数。

2.2.2 水情数据合格率

电网的水情数据合格率反映中调水库调度自动化系统的水情数据传送的合格程度。电网的水情数据合格率按月进行统计,采用月内实时数据合格率、小时数据合格率、日数据合格率和月数据合格率 4 项的加权平均值,它们的权重分别为 0.2、0.2、0.5、0.1。计算公式为

$$S' = 0.2S'_{\text{实时}} + 0.2S'_{\text{小时}} + 0.5S'_{\text{日}} + 0.1S'_{\text{月}} \quad (11)$$

$$\text{其中 } S'_{\text{实时}} = \frac{\sum_{i=1}^D S'_{i, \text{实时}}}{D} \times 100\% \quad (12)$$

$$S'_{\text{小时}} = \frac{\sum_{i=1}^D S'_{i, \text{小时}}}{D} \times 100\% \quad (13)$$

$$S'_{\text{日}} = \frac{\sum_{i=1}^D S'_{i, \text{日}}}{D} \times 100\% \quad (14)$$

$$S'_{\text{月}} = \frac{c_{\text{合格}}}{C} \times 100\% \quad (15)$$

式中: S' 为电网的水情数据合格率; $S'_{\text{实时}}$, $S'_{\text{小时}}$, $S'_{\text{日}}$, $S'_{\text{月}}$ 分别为电网的实时数据合格率、小时数据合格率、日数据合格率和月数据合格率; $S'_{i, \text{实时}}$ 为评价月内第 i 日中调水库调度自动化系统的实时数据合格率,为第 i 日中调水库调度自动化系统所调度管理的水电厂全部测站的实时数据合格的测站小时数除以当日全部测站的总测站小时数(总测站数 $\times 24$); $S'_{i, \text{小时}}$ 为评价月内第 i 日中调水库调度自动化系统中当日各水电厂小时数据合格率的平均值; $S'_{i, \text{日}}$ 为评价月内第 i 日中调水库调度自动化系统中当日各水电厂日数据合格率,为日数据合格的水电厂数除以系统中总水电厂数; D 为评价月的总天数; $c_{\text{合格}}$ 为中调水库调度自动化系统中月数据合格的水电厂数; C 为中调水库调度自动化系统中总的水电厂数。

2.2.3 计划报表合格率

算法同水电厂的算法,统计电网报送的计划报表的合格情况。

2.2.4 小水电发电量预测准确率^[7-8]

计算公式为

$$P_{\text{xsd}} = \left(1 - \frac{|E_y - E_s|}{E_y} \right) \times 100\% \quad (16)$$

式中: P_{xsd} 为小水电发电量预测准确率; E_y 为预测小水电发电量; E_s 为实际小水电发电量。

2.2.5 统计指标

电网经济运行的统计指标计有 6 项:电网水能利用提高率、电网调峰弃水损失电量、梯级发电耗水率、梯级可用水量利用率、梯级装机利用小时数、电网装机利用小时数,其中包含了 3 个梯级指标,需要针对不同的梯级进行计算。广西电网的水电站虽分布在不同的河流上,但仍属于一个流域,因此计算的时候可按整个电网计算。

3 经济运行评价统计结果

3.1 水电厂经济运行评价统计结果

广西电网管辖的 26 个水电厂基本上为日调节电站,只有岩滩属于季调节,百色属于不完全多年调节。总装机容量 655 万 kW,主要分布在南盘江、郁江、红水河、柳江和桂江上。广西电网水电经济运行评价和统计系统实现了对规范要求的所有指标的统计计算。

3.1.1 来水预测综合准确率

通过统计来水预测综合准确率,可评价水电厂在来水预测方面的专业技术水平和工作成效。2010

年广西电网水电厂的来水预测综合准确率统计结果见表 1 ,可见其中有 19 个水电厂的来水预测综合准确率达到了 80% 以上 ,拉浪和下桥的来水预测水平还需提高。

表 1 2010 年广西电网水电厂的来水预测综合准确率统计结果

来水预测综合准确率/%	水电厂
> 90	桂航 ,岩滩 ,京南 ,仙依滩 ,浮石 ,大化 ,乐滩 ,桥巩 ,百龙滩
80 ~ 90	山秀 ,西津 ,古顶 ,那吉 ,左江 ,平班 ,洛东 ,红花 ,长洲 ,大埔
70 ~ 80	金鸡滩 ,百色 ,金牛坪 ,叶茂 ,麻石
60 ~ 70	拉浪 ,下桥

3.1.2 水情数据合格率

通过统计水电厂向电网调度机构传送水情数据的正确性和及时性 ,可评价水电厂水情自动测报系统的运行维护及管理情况。

2010 年广西电网水电厂的水情数据合格率统计结果见表 2。对于广西电网没有实时数据的考核要求 ,因此将实时数据合格率的权重设为 0 ,小时数据合格率的权重设为 0.4 ,日数据合格率的权重仍为 0.5 ,月数据合格率的权重仍为 0.1 ,然后加权平均计算 ,得出水情数据合格率。从表 2 可见 21 个水电厂的水情数据合格率达到 90% 以上 ,山秀和桂航的稍差 ,但总的来水水情数据合格率是比较高。

表 2 2010 年广西电网水电厂的水情数据合格率统计结果

水情数据合格率/%	水电厂
> 90	下桥 ,百龙滩 ,红花 ,麻石 ,叶茂 ,那吉 ,洛东 ,拉浪 ,金牛坪 ,桥巩 ,仙依滩 ,古顶 ,金鸡滩 ,浮石 ,平班 ,百色 ,左江 ,京南 ,乐滩 ,岩滩 ,大化
80 ~ 90	长洲 ,大埔 ,西津
70 ~ 80	山秀 ,桂航

3.1.3 计划报表合格率

通过统计计划报表合格率 ,可评价水电厂的运行计划建议报表的报送情况及完成质量。2010 年广西电网水电厂的计划报表合格率统计结果见表 3。由表 3 可见 ,计划报表合格率下桥、平班和古顶水电厂达到了 90% 以上 ,60% 以下的水电厂也比较多 ,主要是由于系统运行期上报计划属于新增业务 ,

表 3 2010 年广西电网水电厂的计划报表合格率统计结果

许多水电厂可能尚不熟悉流程 ,造成出现迟报、误报的情况。

表 3 2010 年广西电网水电厂的计划报表合格率统计结果

计划报表合格率/%	水电厂
80 ~ 90	下桥 ,平班 ,古顶
70 ~ 80	桂航 ,红花 ,桥巩 ,左江 ,岩滩
60 ~ 70	浮石 ,拉浪 ,大化 ,西津 ,长洲 ,百龙滩 ,仙依滩 ,那吉
< 60	金牛坪 ,麻石 ,山秀 ,金鸡滩 ,大埔 ,京南 ,乐滩 ,叶茂 ,洛东 ,百色

3.1.4 典型水电厂评价指标统计结果

选取几个典型水电厂 ,将它们的评价指标统计计算结果集中列于表 4。在选取的几个典型水电厂中来水预测综合准确率和水情数据合格率都相对较好 ,计划报表合格率相对都稍差。

表 4 2010 年广西电网典型水电厂评价指标统计结果 %

水电厂	来水预测综合准确率	水情数据合格率	计划报表合格率
岩滩	> 90	> 90	70 ~ 80
大化	> 90	> 90	60 ~ 70
长洲	80 ~ 90	80 ~ 90	60 ~ 70
左江	80 ~ 90	> 90	70 ~ 80
山秀	80 ~ 90	70 ~ 80	< 60
西津	80 ~ 90	80 ~ 90	60 ~ 70
拉浪	60 ~ 70	> 90	60 ~ 70

对水电厂 7 项统计指标 ,选取几个典型水电厂 ,将它们统计计算结果列于表 5。

从表 5 计算结果可知 ,2010 年岩滩水电厂的几项统计指标值较优 ,如调洪优化增发电量多 ,水能利用提高率高 ,可用水量利用率高 ,在节水增发方面工作成效突出。长洲水电厂在弃水期的发电负荷率较低 ,调峰弃水损失电量多。

3.2 电网经济运行评价统计结果

对广西电网 2010 年 4 项评价指标和 5 项统计指标进行统计计算 ,结果如下 :来水预测评价准确率为 85.53% ,水情数据合格率为 77.33% ,计划报表合格率为 58.57% ,小水电发电量预测准确率为 95.00% ,电网水能利用提高率为 3.00% ,电网调峰弃水损失电量为 269 244 MW·h ,梯级发电耗水率为 20.9 m³/(kW·h) ,梯级可用水量利用率为 98.37% ,

表 5 2010 年广西电网典型水电厂统计指标计算结果

水电厂	调洪优化增发电量/(MW·h)	水能利用提高率/%	调峰弃水损失电量/(MW·h)	弃水日发电负荷率/%	发电耗水率/(m ³ ·(kW·h) ⁻¹)	可用水量利用率/%	装机利用小时数/h
岩滩	946887	14.53	6650	99.39	6.6	99.89	4990
大化	347445	7.38	7907	100	15.9	99.54	4275
长洲	19554	17.60	51377	68.87	36.0	97.27	4330
左江	22964	6.70	5965	96.12	27.2	97.83	4266
山秀	108680	1.42	4547	93.97	28.7	98.38	4079
西津	245690	3.30	6757	96.61	26.5	99.21	3942
拉浪	1893	0.50	2404	94.39	15.8	98.86	2887

电网装机利用小时数为 4033.3 h。从统计计算结果可见,广西电网评价指标中只有计划报表合格率稍差,其他几个指标相对较好,统计指标中水能利用提高率为 3.00%,其全网实发电量 2286.5 万 MW·h,考核电量 2211 万 MW·h,较好地反映了广西电网的 2010 年的调度水平,实现了节水增发电的目的,因为广西电网中电站的调节性能普遍为日调节,发生弃水造成电量损失的情况在所难免。

4 结 语

依据《规范》所开发的广西电网水电经济运行评价和统计系统,包括针对水电厂的 3 个评价指标、7 个统计指标和针对电网的 4 个评价指标、6 个统计指标。对广西电网水电厂 2010 年运行情况进行评价,统计结果表明,该评价和统计系统对全面、客观评价水电优化调度和经济运行工作业绩是有效的^[9]。在水电厂指标中通过对评价指标的计算,可按照计算结果对各个水电厂的运行管理水平进行评价,给水电厂一个定量的评级,其他统计指标的结果可为考核水电厂提供参考依据。当然指标的高低不仅仅和水库调度人员的调度工作成效有关,也和水电厂的固有属性有关,这有待进一步探讨。电网的各个指标则反映了整个电网的运行情况,可给电网的上级调度机构提供考核依据^[10]。

参考文献:

[1] 赵玉军.厂网分开后水电经济运行管理办法探索[J].甘肃电力技术,2006(1):2006(1)5-7.

[2] 郎倩.水电类企业中经济增加值考核思考[J].现代商贸工业,2010,2X(12):137-137.

[3] 袁世斌,常黎.多重动态规划法在柘林水电站安全及经济运行中的应用[J].水利水电科技进展,2004,24(5):48-51.

[4] 白小勇,冉本银,李广辉,等.黄河上游梯级水电站群节水增发电考核[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(1):25-28.

[5] 孙德锁,刘永前,史健,等.水电站节水增发电考核方法研究[J].中国电力教育:上,2007(增刊2):189-191.

[6] 燕爱玲,黄强,刘招,等.刘家峡水电厂空耗水量的计算及考核[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):10-13.

[7] 薛海平.对修订小水电上网力率考核标准的分析[J].陕西水利,2011(2):131-133.

[8] 邓华槟.有小水电上网线路的线损考核[J].农村电气化,2005(12):46-36.

[9] 宋继革.基于水利可持续发展的水利经济运行机制研究[J].水利经济,2007,25(3):67-68.

[10] 曹广晶,蔡治国.水电站经济运行考核评估理论方法及其改进的初步研究[J].中国三峡建设,2008(11):16-23.

(收稿日期 2011-09-13 编辑 熊水斌)

(上接第 55 页)

[2] 时卫民,郑颖人,唐伯明,等.土坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J].岩土工程学报,2004,26(3):313-317.

[3] LI Liang, CHU Xue-song. An improved particle swarm optimization algorithm with harmony strategy for the location of critical slip surface of slopes[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(2):357-364.

[4] LI Liang, YU Guang-ming, CHEN ZU-yu, et al. Discontinuous flying particle swarm optimization algorithm and its application to slope stability analysis[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(4):852-856.

[5] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅰ):理论基础[J].水利水电科技进展,2000,20(3):63-66.

[6] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅱ):数值模拟[J].水利水电科技进展,2000,20(4):65-68.

[7] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅲ):工程应用[J].水利水电科技进展,2000,20(6):64-67.

[8] 陈祖煜.土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003:372-373.

[9] XUE Jian-feng, GAVIN K. Simultaneous determination of critical slip surface and reliability index for slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133

(7):878-886.

[10] HONG H P, ROH G. Reliability evaluation of earth slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(12):1700-1705.

[11] CHING Jian-ye, PHOON K K, HU Yu-gang. Efficient evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(6):768-777.

[12] AU S K, CAO Z J, WANG Yu. Implementing advanced Monte Carlo simulation under spreadsheet environmen[J]. Structural Safety, 2010, 3X(5):281-292.

[13] 吴振君,王水林,汤华,等.边坡可靠度分析的一种新的优化求解方法[J].岩土力学,2010,31(3):713-718.

[14] 吴振君,王水林,葛修润.LHS方法在边坡可靠度分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(4):1047-1054.

[15] ROSENBLUETH E. Two-point estimates in probability[J]. Applied Mathematical Modelling, 1981, 5(10):329-335.

[16] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. Harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2):60-68.

[17] 李亮,于广明,褚雪松.边坡临界滑动场方法的优化算法实现[J].岩土工程学报,2010,3X(6):827-831

(收稿日期 2011-10-31 编辑 熊水斌)