

电阻式混凝土磨蚀传感器及其测量方法

戴晓兵

(中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,湖南长沙 410014)

摘要:结合一项国家实用新型专利介绍电阻式混凝土磨蚀传感器的工作原理,以及基于2芯线、3芯线和5芯线的电阻式混凝土磨蚀传感器的设计方案和测试方法。以E-24系列精度为5%的碳膜电阻为例,规定了传感器各个固定电阻的阻值,分析了电阻阻值误差和电阻变化量对磨蚀深度分级判断的影响,并用基于2芯线设计方案的传感器进行室内测试试验,结果表明电阻式混凝土磨蚀传感器适用于泄水建筑物混凝土表面的磨损和空蚀测量,可以用于实时监控建筑物的运行状态。

关键词:电阻式传感器;混凝土磨蚀传感器;并联电阻;测量方法;磨蚀深度

中图分类号:TP212.1;TV698.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)02-0078-05

Resistance sensor for concrete abrasion and its measuring method//DAI Xiaobing (*Hydrochina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China*)

Abstract: The working principle, design scheme and test method of the resistance sensor for concrete abrasion based on two-core wires, three-core wires and five-core wires were introduced, according to a national utility-model patent. Take the E-24 series of deposited-carbon resistor with accuracy of 5% for instance, its resistance value was set for every fixed resistor, effects of the resistance error and the varying quantity on the grade judgment of the abrasion depth were analyzed, and the indoor test of the sensor with two-core wires was performed. Test results show that the sensor is suitable for measuring the abrasion and the cavitation erosion on the concrete surface, and monitoring the real-time running state of the release works, hence it can be brought into the safety monitoring system for the dam.

Key words: resistance type sensor; sensor for concrete abrasion; parallel resistance; measuring method; abrasion depth

在水利水电工程中,泄水建筑物是必不可少的结构物之一。在高含沙水流或高速水流作用下,泄水建筑物的混凝土表面会产生磨损破坏或空蚀破坏。浅层的磨损或空蚀破坏可能不会对结构带来致命的危害,但随着磨损或空蚀的进一步加剧,可能造成水流的边界分离,形成恶劣的水流流态;或者产生结构缝的止水破坏、钢筋外露等各种不利于结构稳定的现象,危及泄水建筑物安全。为了及时掌握泄水建筑物混凝土表面的性状,尤其是洞式泄水建筑物、消力池等不易直接观测的混凝土部位,迫切需要能够测量和监控混凝土表面磨损或空蚀破坏程度的仪器,以实现实时监控的目的。

目前,我国仅有一种用于测量混凝土磨蚀深度的传感器^[1-3],这种传感器利用芯线的断通信号,分级测量混凝土磨蚀深度,对泄水建筑物的运行状态进行实时监控,在三板溪、向家坝、溪洛渡等多个工程中成功应用。但是,由于传感器使用的是芯线断

通信号,因而受到电缆芯线数量的限制。在工程实际应用中,当使用1根5芯电缆时,只能监测到传感器5种不同工作状态,存在测量精度不够或测量范围不足的缺陷。为此,笔者^[4]研制了一种电阻式混凝土磨蚀传感器,该传感器利用其内部并联电阻值的变化特性,通过测量芯线间电阻值的变化分级判断混凝土的磨蚀深度,不受电缆芯线数量的限制,传感器的测量精度和测量范围均得到大幅度提高。

1 电阻式混凝土磨蚀传感器的工作原理

电阻式混凝土磨蚀传感器由用绝缘材料制成的传感器本体A、本体内2根导线(导线E和导线F)以及1组连接导线E和导线F的引线组成,见图1(a)。为了提高测量精度和测量范围,可以增加传感器本体内的导线数量和引线数量,如在本体内设3根导线(导线D、导线E和导线F)和2组引线,引线分别连接导线E和导线F以及导线E和导线D,

见图1(b)。引线距传感器本体端面的距离各不相同,每根引线上均串联1个固定电阻,所有固定电阻并联连接。依照引线顺序,固定电阻依次为 $R_0、R_1、R_2、\cdots、R_{i-1}、R_i、\cdots、R_{n-1}、R_n$ 。

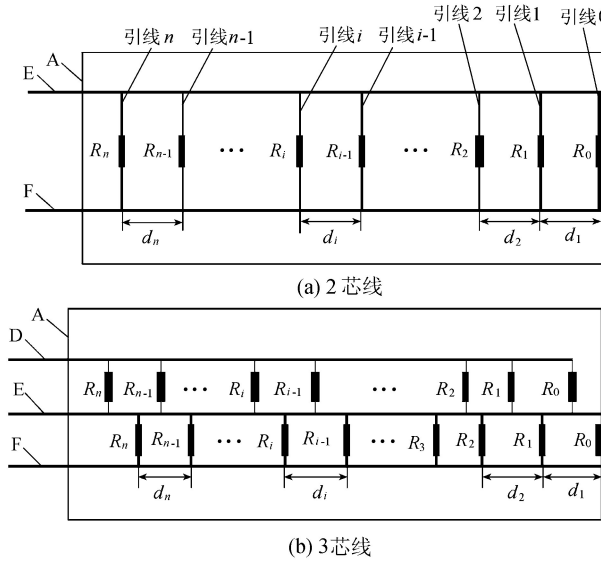


图1 电阻式混凝土磨蚀传感器的工作原理

初始状态时,传感器本体内导线之间的并联电阻 R_{i0} 按式(1)计算:

$$\frac{1}{R_{i0}} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_{i-1}} + \frac{1}{R_i} + \cdots + \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n} \quad (1)$$

当混凝土表面受到磨蚀破坏时,相应地传感器本体也从端面开始受到磨蚀破坏,随着破坏的深入发展,引线依次与导线断开,导线与导线之间的并联电阻值将依次发生改变。当引线0至引线 $i-1$ 均断开时,传感器本体内导线之间的并联电阻 R_{bi} 可按式(2)计算:

$$\frac{1}{R_{bi}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{i+1}} + \cdots + \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n} \quad (2)$$

实际监测时,首先测量初始状态下2根芯线之间的线间电阻 R_c ,再计算电缆的芯线电阻 $R_x、R_x$ 按式(3)计算:

$$R_x = R_c - R_{i0} \quad (3)$$

传感器本体受到磨蚀破坏后,测量2根芯线之间的线间电阻 R_c ,然后用式(4)计算并联电阻 R_b :

$$R_b = R_c - R_x \quad (4)$$

用并联电阻 R_b 与传感器本体内导线之间的并联电阻 R_{bi} 进行比较,就可以分级判断混凝土的磨蚀深度。

2 电阻式混凝土磨蚀传感器的设计方案

2.1 2芯线设计方案

采用2芯线设计方案的磨蚀传感器,可以在

1根4芯电缆上连接2个磨蚀传感器,实现电缆资源利用的最大化,从而大幅度降低监测成本。2芯线设计方案如图2所示,电阻参数如表1所示。导线E与导线F在传感器的端面位置直接连通,电阻 R_0 值为零,因此初始状态下2根芯线之间的线间电阻 R_c 即为芯线电阻 R_x 。为了方便磨蚀深度的分级判断,在引线依次被磨蚀断开时,传感器本体内并联电阻值需要有一定量的变化量,因此在各根引线(含传感器端面)上串联的固定电阻值依次为 $0\Omega、100\Omega、300\Omega、510\Omega、510\Omega、1\text{ k}\Omega、1\text{ k}\Omega、1\text{ k}\Omega、1.5\text{ k}\Omega、1.5\text{ k}\Omega、1.5\text{ k}\Omega$ 。传感器的引线数量、引线间距及测量深度范围可以按照监测的实际需要确定。根据文献[4-6],引线数量定为11根,各引线之间的间距均为10 mm。

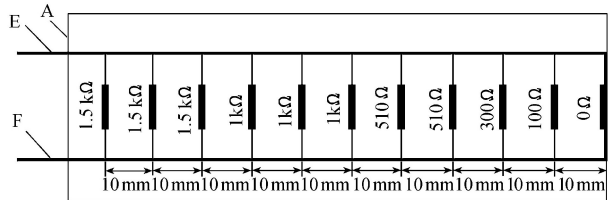


图2 2芯线电阻式混凝土磨蚀传感器设计方案

表1 2芯线电阻式混凝土磨蚀传感器设计参数

引线序号	电阻编号	距端面距离/mm	固定电阻 R_i/Ω	并联电阻 R_{bi}/Ω	电阻变化量/ Ω
1	R_0	0	0	0	0
2	R_1	10	100	45	45
3	R_2	20	300	82	37
4	R_3	30	510	112	30
5	R_4	40	510	144	32
6	R_5	50	1 000	200	56
7	R_6	60	1 000	250	50
8	R_7	70	1 000	333	83
9	R_8	80	1 500	500	167
10	R_9	90	1 500	750	250
11	R_{10}	100	1 500	1 500	750

2.2 3芯线设计方案

采用3芯线设计方案的磨蚀传感器是在2芯线设计方案的基础上增加1根导线,从而增加1组引线,以提高测量精度,并使导线间的电阻值互为校验。3芯线设计方案如图3所示,电阻参数如表2所示。传感器本体内有3根导线:导线D、导线E和

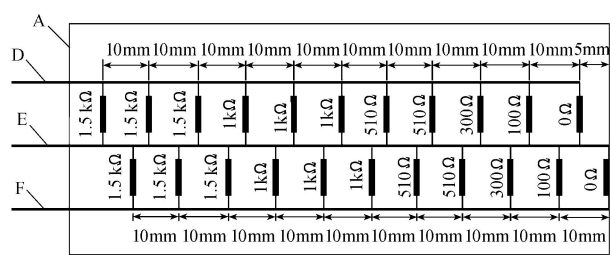


图3 3芯线电阻式混凝土磨蚀传感器设计方案

表 2 3 芯线电阻式混凝土磨蚀传感器设计参数

距端面 距离/ mm	固定电阻/ Ω		并联电阻/ Ω		
	导线 E 与 导线 F	导线 E 与 导线 D	导线 E 与 导线 F	导线 E 与 导线 D	导线 D 与 导线 F
0	0		0	0	0
5		0	45	0	45
10	100		45	45	90
15		100	82	45	126
20	300		82	82	162
25		300	112	82	192
30	510		112	112	222
35		510	144	112	254
40	510		144	144	286
45		510	200	144	343
50	1000		200	200	400
55		1000	250	200	450
60	1000		250	250	500
65		1000	333	250	583
70	1000		333	333	667
75		1000	500	333	833
80	1500		500	500	1000
85		1500	750	500	1250
90	1500		750	750	1500
95		1500	1500	750	2250
100	1500		1500	1500	3000
105		1500		1500	

导线 F;有 2 组引线,每组均为 11 根,分别连接导线 E 和导线 F 以及导线 E 和导线 D。导线 E 与导线 F 的第 1 根引线在传感器本体端面位置,导线 E 与导线 D 的第 1 根引线距离传感器本体端面 5 mm。在同一个引线组中,引线之间的距离为 10 mm。

2.3 5 芯线设计方案

采用 5 芯线设计方案的磨蚀传感器包括导线 E、导线 F 和 3 根校验线,传感器的 5 根芯线分别与 5 芯电缆的芯线对应连接。5 芯线设计方案如图 4 所示,其主要特征如下:5 芯电缆中的 2 根芯线分别与导线 E 及导线 F 连接,作为测量芯线使用,其工作原理及设计参数与 2 芯线设计方案完全相同。3 根校验线距传感器端面的距离分别为 20 mm、50 mm、100 mm,与混凝土表面磨蚀破坏程度(轻度、中度和重度)相对应,利用校验线的断通状态对磨蚀深度进行复核测量,同时还起到备用作用。

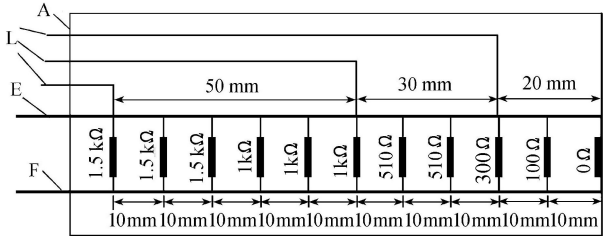


图 4 5 芯线电阻式混凝土磨蚀传感器设计方案

3 电阻式混凝土磨蚀传感器的测量方法

a. 2 芯线传感器。首先根据传感器本体内部的

固定电阻值,用式(2)计算并联电阻 R_{bi} ,并计算出电阻变化量。然后将传感器安装完成并将电缆引至观测站后,测量 2 根芯线之间的线间电阻 R_c 。由于混凝土表面未发生磨蚀,传感器处于初始状态,即第 1 根引线(传感器本体端面)处于连通状态,线间电阻 R_c 即为芯线电阻 R_x 。当第 1 根引线断开同时第 2 根引线处于连通状态时,测出 2 根芯线之间的线间电阻 R_c 为 $45 \Omega + R_x$,则并联电阻 R_b 为 45Ω ,芯线之间的电阻变化量为 45Ω 。结合表 1 可以判断出混凝土表面开始发生磨蚀,混凝土磨蚀深度在 0 ~ 10 mm 之间。当第 2 根引线断开同时第 3 根引线处于连通状态时,实测 2 根芯线之间的线间电阻 R_c 增大至 $82 \Omega + R_x$,则并联电阻 R_b 为 82Ω ,芯线之间的电阻变化量为 37Ω 。结合表 1 可以判断出混凝土磨蚀深度在 10 ~ 20 mm 之间。依此类推,通过测量 2 根芯线之间的线间电阻 R_c ,计算并联电阻 R_b ,并与传感器内部的并联电阻 R_{bi} 进行比较,同时结合线间电阻变化量可以分级判断出传感器本体被磨蚀的总长度,即混凝土磨蚀深度。

b. 3 芯线传感器。首先根据传感器本体内部的固定电阻值,用式(2)计算并联电阻 R_{bi} 。初始状态下,分别测量导线 E 与导线 F、导线 E 与导线 D 及导线 D 与导线 F 的芯线电阻 $R_{x_{ef}}$ 、 $R_{x_{ed}}$ 、 $R_{x_{df}}$ 。如实测导线 E 与导线 F 的线间电阻 R_c 为 $82 \Omega + R_{x_{ef}}$,且导线 E 与导线 D 的线间电阻 R_c 为 $45 \Omega + R_{x_{ed}}$,则导线 E 与导线 F 及导线 E 与导线 D 的并联电阻分别为 82Ω 、 45Ω 。结合表 2 可以判断出混凝土磨蚀深度在 10 ~ 15 mm 之间。用导线 D 与导线 F 间的线间电阻 R_c 进行校验,其值应为 $127 \Omega + R_{x_{df}}$ 。

c. 5 芯线传感器。5 芯线传感器的测量方法与 2 芯线传感器的测量方法相同,分别测量 2 根芯线之间的线间电阻 R_c ,并与计算得出的线间电阻 R_{ci} 进行比较。与此同时,通过测量校验线的断通信号,判断芯线的连通或断开状态,以此复核传感器的磨蚀深度。

4 标准电阻阻值误差的影响分析

电阻阻值按其精度分为两大系列,分别为 E-24 系列和 E-96 系列,E-24 系列精度为 5%,如碳膜电阻;E-96 系列为 1%,如金属膜电阻。现以 E-24 系列精度为 5% 的碳膜电阻为例,分析电阻阻值误差对磨蚀深度分级判断的影响,见表 3。由表 3 可见,标称电阻值下,传感器本体内并联电阻大于 45Ω ,分级电阻变化量在 30Ω 以上;负误差(-5%)电阻值下,传感器本体内并联电阻大于 43Ω ,分级电阻变化量在 29Ω 以上。由此可知,当引线与导线断开时,完全能够通

表3 标准电阻阻值误差对磨蚀深度分级判断的影响										
标称电阻			负误差(-5%)电阻			正误差(+5%)电阻			并联电阻 范围	分级电阻 最小差值
电阻值	并联电阻	电阻变化量	电阻值	并联电阻	电阻变化量	电阻值	并联电阻	电阻变化量		
100	45	45	95	43	43	105	47	47	43 ~ 47	43
300	82	37	285	78	35	315	86	39	78 ~ 86	30
510	112	30	485	106	28	536	118	32	106 ~ 118	21
510	144	32	485	136	30	536	151	33	136 ~ 151	19
1 000	200	56	950	190	54	1 050	210	59	190 ~ 210	39
1 000	250	50	950	238	48	1 050	263	53	238 ~ 263	28
1 000	333	83	950	317	79	1 050	350	87	317 ~ 350	54
1 500	500	167	1 425	475	158	1 575	525	175	475 ~ 525	125
1 500	750	250	1 425	713	238	1 575	788	263	713 ~ 788	188
1 500	1 500	750	1 425	1 425	712	1 575	1 575	787	1 425 ~ 1 575	638

过并联电阻和电阻变化量 2 个参数对混凝土磨蚀深度进行分级判断,不会因为电阻阻值的精度误差而产生误判。

5 电阻式混凝土磨蚀传感器的试验测试

用于室内试验测试的传感器采用 2 芯线设计方案,各引线之间的间距均为 10 mm,设计参数见表 1。传感器的外壳采用内径 26 mm、壁厚 3 mm、长 150 mm 的 PPR 管材,传感器本体采用 C₉₀40 砂浆材料,内部电路用印刷电路板和 E-24 系列碳膜电阻制成,见图 5。分别用 5 只传感器进行室内试验测试。试验时,将 1 号、2 号、3 号、4 号和 5 号传感器分别截去 0 mm、18 mm、41 mm、63 mm 和 95 mm,以模拟传感器磨蚀后导线的断开状态,同时在水中测量传感器的并联电阻,实测电阻值分别为 0 Ω、80 Ω、200 Ω、320 Ω 和 1 500 Ω(表 4)。根据 2 芯线设计参数和标准电阻阻值误差范围,可以判断传感器的磨蚀深度分别为 0 mm、10 ~ 20 mm、40 ~ 50 mm、50 ~ 60 mm 和 90 ~



图5 电阻式混凝土磨蚀传感器

表4 2 芯线电阻式磨蚀传感器磨蚀测试数据

传感器 编号	实测磨蚀 长度/mm	实测 电阻/Ω	电阻值误差 范围/Ω	判断磨蚀 深度/mm
1 号	0	0	0	0
2 号	18	80	78 ~ 86	10 ~ 20
3 号	41	200	190 ~ 210	40 ~ 50
4 号	63	320	317 ~ 350	50 ~ 60
5 号	95	1 550	1 425 ~ 1 575	90 ~ 100

100 mm,与实际截取的长度吻合,误差小于 10 mm。

传感器引线被磨蚀断开后,砂浆材料中断开的导线两端以点状置于水中,成为一组电极。根据欧姆定律,在水温及水质一定的情况下,水的电阻值大小与电极的垂直截面面积成反比,与电极之间的距离成正比。为了测试水体对检测回路的影响,采用 2 芯线设计方案进行试验,选用自来水和较混浊的雨水作为测试水体,用普通数字万用表分别测量 10 个 E-24 系列碳膜电阻阻值及并联电阻(表 5)。试验测试结果表明,由于传感器导线的垂直截面极小,点状电极距离较大,电极间水的电阻至少比传感器电阻大 2 个数量级,对传感器回路的并联电阻影响甚微,不同水质对并联电阻的大小几乎无影响。实测传感器回路的并联电阻均处在标称并联电阻误差范围内,不会产生误判。

表5 2 芯线电阻式磨蚀传感器水体影响测试数据

标称 电阻/Ω	计算并联 电阻/Ω	并联电阻 误差范围/Ω	实测 电阻/Ω	实测并联 电阻/Ω	判断磨蚀 深度/mm
0	0	0	0	0	0
100	44	43 ~ 47	98	45	0 ~ 10
300	81	78 ~ 86	303	82	10 ~ 20
500	111	106 ~ 118	505	112	20 ~ 30
500	143	136 ~ 151	504	143	30 ~ 40
1 000	199	190 ~ 210	1 005	199	40 ~ 50
1 000	248	238 ~ 263	1 000	250	50 ~ 60
1 000	330	317 ~ 350	998	329	60 ~ 70
1 500	493	475 ~ 525	1 480	491	70 ~ 80
1 500	739	713 ~ 788	1 469	736	80 ~ 90
1 500	1 488	1 425 ~ 1 575	1 488	1 486	90 ~ 100

6 结 语

水利水电工程泄水建筑物在高速含沙水流的环境下可能造成混凝土表面的磨损或空蚀破坏,危及水工结构物的安全,不可掉以轻心。本文介绍了电阻式混凝土磨蚀传感器的工作原理和 2 芯线、3 芯线和 5 芯线电阻设计方案及测试方法。以 E-24 系列精度为 5% 的碳膜电阻为例,规定了传感器各个

固定电阻的阻值,分析了电阻阻值误差和电阻变化量对磨蚀深度分级判断的影响,并用 2 芯线电阻式混凝土磨蚀传感器进行了室内测试试验。结果表明,电阻式混凝土磨蚀传感器的工作原理简单,测量方法简便,克服了对电缆芯线数量的依赖,可以极大地提高测量精度和测量范围,是一种新型可用于测量泄水建筑物混凝土表面磨蚀深度的传感器,可以用来实时监控建筑物的运行状态,值得推广,可以纳入大坝安全监测系统。

参考文献:

[1] 戴晓兵,李延农,刘路平,等. 一种用于测量磨蚀或空蚀深度的传感器及其测量方法:中国,ZL200710036138.7 [P]. 2012-09-05.
[2] 戴晓兵,李延农,刘路平,等. 混凝土磨蚀计及其测量方

法[C]//水利量测技术. 郑州:黄河水利出版社,2010: 121-124.
[3] 谢帆,戴晓兵. 混凝土磨蚀传感器在水电工程中的应用 [C]//水力学与水利信息学进展. 天津:天津大学出版社,2011:120-124.
[4] 戴晓兵. 电阻式混凝土磨蚀传感器:中国,ZL201020695809.8[P]. 2011-09-14.
[5] 戴晓兵,李延农. 混凝土表面磨蚀破坏划分标准初议 [C]//水力学与水利信息学进展. 西安:西安交通大学出版社,2009:485-487.
[6] 吴瑾,耿翠,李俊,等. 钢筋腐蚀监测传感器设计与工程应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(6):698-701. (WU Jin, GENG Jiang, LI Jun, et al. A sensor for monitoring corrosion of steel reinforcement and its application [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(6):698-701. (in Chinese))
(收稿日期:2012-05-24 编辑:骆超)

(上接第 8 页)

[5] BEVEN K, FREER J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology[J]. Journal of Hydrology, 2001, 249:11-29.
[6] 张勇传. 系统辨识及其在水电能源中的应用[M]. 武汉:湖北科技出版社,2008.
[7] LIU P, CAI X, GUO S. Deriving multiple near-optimal solutions to deterministic reservoir operation problems [J]. Water Resources Research, 2011, 47(8), W08506. doi:10.1029/2011WR010998.
[8] BYERS T H, WATERMAN M S. Determining all optimal and near-optimal solutions when solving shortest path problems by dynamic programming [J]. Operation Research, 1984, 32(6):1381-1384.
[9] EPPSTEIN D. Finding the k shortest paths [J]. SIAM Journal on Computing, 1998, 28(2):652-673.
[10] HERSHBERGER J, SURI S, BHOSLE A. On the difficulty of some shortest path problems[J]. ACM Transactions on Algorithms, 2007, 3(1):1-15.
[11] YOUNG G K. Finding reservoir operating rules [J]. Journal of Hydraulics Division, 1967, 93(6):297-321.
[12] KARAMOUM Z M, HOUCK M. Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization [J]. Water Resources Research, 1982, 18(5):1337-1344.
[13] KOUTSOYIANNIS D, ECONOMOU A. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems [J]. Water Resources Research, 2003, 39(6):1170-1186.
[14] 刘攀,郭生练,李玮,等. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4):78-83. (LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,

2006, 26(4):78-83. (in Chinese))
[15] VRUGT J A, GUPTA H V, BOUTEN W, et al. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertain assessment of hydrologic model parameters [J]. Water Resources Research, 2003, 39(8):1201-1218.
[16] REIS D S, STEDINGER J R. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313:97-116.
[17] 邢贞相,芮孝芳,崔海燕,等. 基于 AM-MCMC 算法的贝叶斯概率洪水预报模型[J]. 水利学报, 2007, 38(12):1500-1506. (XING Zhenxiang, RUI Xiaofang, CUI Haiyan, et al. Bayesian probabilistic flood forecasting model based on adaptive Metropolis MCMC algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12):1500-1506. (in Chinese))
(收稿日期:2012-06-05 编辑:周红梅)

