

文章编号:1000-582X(2009)10-1144-06

## 循环冷却水的复合式电磁灭菌阻垢系统

熊 兰, 蒋 颢, 杨子康, 席朝辉, 何 为

(重庆大学 输变电装备与系统安全及其新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:**针对微生物和水垢对火力发电厂循环冷却水系统造成的危害,提出将高压低频脉冲和高压低频脉冲相结合的复合式电磁水处理新方法。通过分析高压低频脉冲和高压低频脉冲在水中产生的电磁和生化效应,推证了进行灭菌和阻垢的可行性。根据灭菌阻垢所需的各种电磁参数对高压低频脉冲和高压低频脉冲信号发生装置进行设计,并通过电磁仿真方法辅助处理腔形状的设计和改造。利用复合式电磁水处理实验系统进行模拟实验。实验结果表明:该系统能输出峰值达到 7 kV 的高压低频脉冲信号和峰值达 100 V、频率在 500 kHz~2 MHz 之间可调的高压低频脉冲信号,且该系统对细菌的灭菌率达到 91%,同时对化学垢的阻垢率达到 71%。因此,该系统有望通过进一步研究达到工业水处理的标准。

**关键词:**生物粘泥;阻垢;工业水处理;循环冷却水系统

中图分类号:TM621.7

文献标志码:A

## Composite structure of sterilization and descaling system for circulating cooling water

XIONG Lan, JIANG Yang, YANG Zi-kang, XI Zhao-hui, HE Wei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** In order to resolve the hazard of biofouling and scale in circulating cooling water system of power stations, this paper takes the lead in combining high-voltage pulses and high-frequency pulses for sterilization and descaling process. It analyzes both electromagnetic effects and biochemical effects on sterilizing and descaling process caused by the high-voltage pulses and high-frequency pulses respectively. The pulse generator is designed according to the requirements of electromagnetic parameters for effective operation. The design and improvement of process chambers are assisted by electromagnetic field simulation technology. Experimental data prove that the system can output high-voltage pulse whose maximum peak value reaches 7 kV and high-frequency pulse whose maximum peak value reaches 100 V the frequency ranges from 500 kHz to 2 MHz. The rate of sterilization can be as high as 91%, and the rate of descaling reaches 71%. This system is expected to achieve the standards of industrial water treatment through further research.

**Key words:** biofouling; descaling; industrial water treatment; circulating cooling water system

收稿日期:2009-07-16

基金项目:重庆市科技攻关计划重点项目资助(CSTC2008AC7085)

作者简介:熊兰(1972-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事脉冲功率技术和电气设备在线检测技术等方面的研究,  
(E-mail)cqlxiong@yahoo.com.cn。

循环冷却水系统是火力发电厂发电设备进行换热所必不可少的设备,由于循环冷却水中含有大量的重碳酸盐,因此在管壁上往往会形成比较坚硬的碳酸盐水垢。同时,循环冷却水的温度和氧含量均适宜微生物的生长和繁殖,而微生物又会产生大量的生物粘泥并沉积在管壁上形成生物垢。水垢和生物垢都会妨碍循环冷却水系统的正常传热,导致燃料消耗增加,降低热交换设备的冷却效率<sup>[1]</sup>;如果长时间运行还可能导致管道的局部腐蚀、穿透或脆爆,对循环冷却水系统的安全运行造成很大的影响。

目前,针对循环冷却水系统中微生物和水垢的处理方法主要有化学法和物理法。化学法是指采用化学药剂对循环冷却水中的钙镁离子进行吸附以减少成垢离子浓度,以及采用杀生剂对微生物进行杀灭。由于化学药剂容易腐蚀管道,费用较高,并且容易造成环境污染,因此它的推广受到了一定的限制。物理法主要是指运用声、光、电、磁等技术及其相应设备来有目的地改变硬水中各种离子和分子的运动状况及微生物的生存环境,从而达到处理目的<sup>[2]</sup>。国内外相关研究表明,电磁脉冲水处理法是一种有效的物理水处理方法,其在杀菌灭藻、阻垢除垢等方面的效果非常明显,并以其环保、高效、节能的优点受到众多学者和工程技术人员的青睐。近年来,国内外关于电磁脉冲灭菌阻垢的机理研究也取得了一定的成绩,列举如下:

#### 1) 电磁脉冲的灭菌机理研究

目前,国内外关于电磁脉冲灭菌的机理很多<sup>[3]</sup>。其中,细胞膜电穿孔理论是比较成熟的理论之一。

细胞膜电穿孔理论认为媒质中的细胞可等效为简单的电路结构<sup>[4]</sup>(不考虑细胞的内在结构)。当脉冲电场作用时,细胞膜压控通道打开,允许部分离子通过这个通道。随着电场的增加,细胞的跨膜电压也相应增加,从而导致外膜的渗透性增加,形成细胞膜瞬时微孔<sup>[4]</sup>。当渗透性增加到一定程度时,细胞膜将产生不可逆破裂,使细胞内含物流失,胞内各生物酶活性亦受到影响,从而导致细胞死亡<sup>[4-5]</sup>。

#### 2) 电磁脉冲的阻垢机理研究

综观相关文献可知,现在学术界广泛认同的电磁脉冲对水垢作用的基本原理为<sup>[6-14]</sup>,在水中产生的交变电场力和磁场力改变了水的物理性质和复杂的分子结构;改变了离子和粒子的水合进程,从而降低阴、阳离子结合成粗大粒子的机率;使液体中产生电子激发,改变晶体的形成和生长速度。尽管电磁脉冲阻垢的作用机理还不够成熟,但其对水中的成垢离子或粒子产生的巨大影响是不容置疑的。

目前,国内外常用的电磁脉冲处理方法针对对象都比较单一,或者用于高频阻垢,或者用于对食物和饮用水的灭菌,很难同时对微生物和水垢进行有效的处理。为了克服目前电磁脉冲水处理技术的缺陷,有目的地针对循环冷却水中的微生物和水垢,本文首次提出将高压低频脉冲灭菌与高频低压脉冲阻垢相结合,利用各自在水中产生的不同的电磁和生化效应对微生物和水垢进行处理,并称其为复合式电磁水处理方法。经实验证实:复合式电磁脉冲能同时、有效地杀灭微生物和阻止水垢生成。

## 1 复合式电磁水处理装置的设计

为了对文中水处理方法的实际效果进行验证,课题组自行研制了一套复合式电磁水处理装置用于实验研究。该套装置主要由高压低频脉冲发生器、高频低压脉冲发生器、高压处理腔和高频处理腔组成。信号发生器用于产生高压脉冲信号和高频脉冲信号,这两种信号分别输出到高压处理腔和高频处理腔,通过电极作用于被处理的水中。

### 1.1 高压低频脉冲发生器

高压低频脉冲发生器主要由高压直流电源、脉冲发生电路、高压开关驱动电路以及高压开关组成,其原理框图如图 1 所示。输出的脉冲信号则通过电缆输送到处理腔中对媒质进行处理。

高压直流电源和高压脉冲产生电路是高压低频脉冲发生器的核心部分。高压直流电源首先由变压器将工频电升压至实验所要求的电压(数 kV)等级,再通过整流滤波电路把交流电变成稳定的高压直流电源。

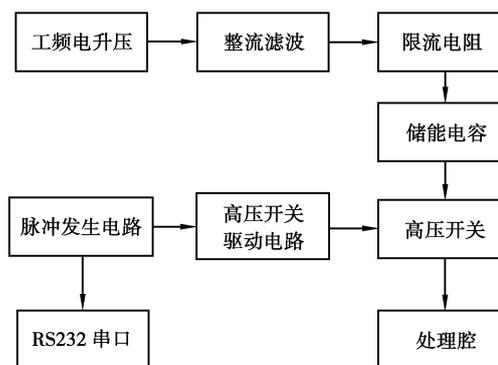


图 1 高压脉冲发生器主电路的原理框图

高压脉冲的产生则是利用高压开关来控制储能电容的充放电时间来实现,其电路原理如图 2 所示。在图 2 中, $V_1$  为高压直流电源, $S$  为高压开关,

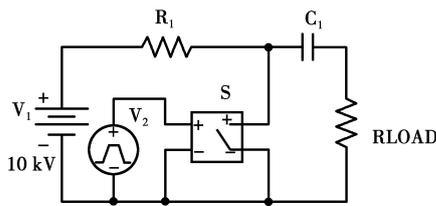


图 2 高压脉冲产生电路

$C_1$  为储能电容,  $R_{LOAD}$  代表被处理的媒质。当  $S$  断开时,  $V_1$  通过限流电阻  $R_1$  给  $C_1$  充电; 当  $S$  闭合时, 由于电容两端电压不能突变, 导致  $C_1$  通过  $S$  向  $R_{LOAD}$  放电, 从而实现高压脉冲放电。  $V_2$  为高压开关的驱动脉冲。

装置中的高压开关采用 1000/25 型氢闸流管, 其阳极正向峰值电压可达 25 kV, 阳极脉冲电流可达 1 000 A。目前, 该高压脉冲发生器能实现最大输出功率 10 kW, 最大输出电压 11 kV, 高压脉冲的输出频率被设定为 1、10 和 50 Hz 三种等级。

笔者利用 Tek 公司的 P6015 高压探头对高压脉冲波形进行了测试, 结果如图 3 所示。脉冲峰值达到了 7 kV, 而脉冲持续时间为  $2 \mu\text{s}$ 。由此可以看出高压脉冲的参数也满足设计要求。

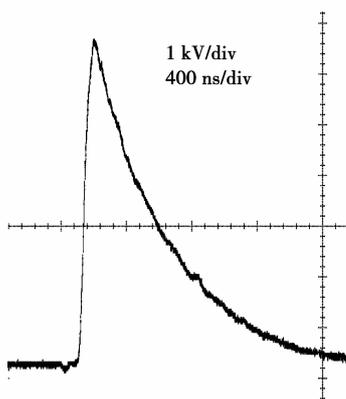


图 3 高压脉冲波形

## 1.2 高频低压脉冲发生器

在设计高频低压脉冲发生器时可将被处理媒质看成一个负载  $R_{LOAD}$ , 将其与电容、电感组成一个回路, 如图 4 所示。当开关  $S_1$  接通时, 电源通过电阻  $R$  为电感  $L$  充电; 开关  $S_1$  断开后, 电感  $L$  与电容  $C$  以及被处理媒质形成 RLC 振荡回路, 被处理媒质处于电压振荡状态。当开关  $S_1$  的开关频率越高时, 媒质中电压的振荡频率越高。这样, 在被处理媒质中产生高频电磁场, 从而达到阻垢实验的要求。

研制实际的高频低压脉冲电路主要包括电源的设计、高频开关的选择、分频电路的设计以及信号检

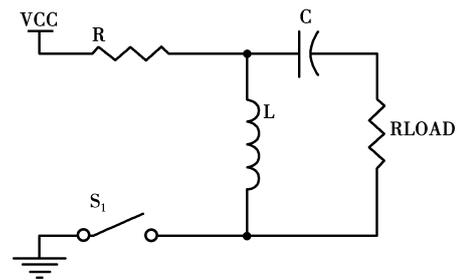


图 4 高频脉冲产生电路

测电路的设计。

1) 电源的设计: 高频低压脉冲发生器中需要用到 40、15 和 5 V 三种不同等级的电源信号, 其中对 40 和 15 V 的幅值准确度要求不高, 但功率要求较大。针对这种要求, 采用了一种比较简单的方法, 即利用一个副边为双绕组的工频变压器, 将 220 V 工频电压转换为相互隔离的电压信号。该高频信号发生电路的外接电源为 220 V 交流电, 220 V 交流电经过变压器向系统提供 40 V 的高频信号产生电路所需电源和 18 V 的芯片驱动电源。18 V 交流电通过整流桥后再分别经过两个集成三端稳压器(型号为 7815 和 7805), 生成 15 V 和 5 V 的直流电, 向其他芯片供电。

2) 高频开关的选择: 高频大功率 MOSFET 是开关元件的理想选择, 通过高频信号发生电路来控制其闭合与断开。具体来讲是由晶振产生 2 MHz 的方波信号, 经过分频电路将信号进行分频, 然后将这些方波信号通过由检测电路控制的模拟开关, 作为推挽式驱动电路的控制端来控制 MOSFET 的通断, 进而在 RLC 串联谐振电路中实现电感的充放电过程, 最终输出具有足够能量的高频脉冲信号。该高频信号发生器最大输出电压峰值可达 100 V, 输出频率为 500 kHz~2 MHz 可调。

3) 分频电路的设计: 分频电路是将晶振产生的频率信号进行分频, 使装置在工作时可以输出不同频率的信号。分频电路中最重要元件是双上升沿 D 触发器(74HC74, 有预置和清除端)。在本设计中其作用就是将晶振产生的电压信号经分频后转化为推挽式电路的驱动信号。也就是, 将 2 MHz 的晶振信号转换成为二分频和四分频的驱动信号。所以在本装置中, 信号输出频率为 2、1 MHz 和 500 kHz。

4) 信号检测电路的设计: 信号检测电路是高频低压发生器的大脑, 用于对环境参数进行实时检测, 并能根据分析的结果对输出脉冲参数进行调整, 其整体硬件结构框图如图 5。

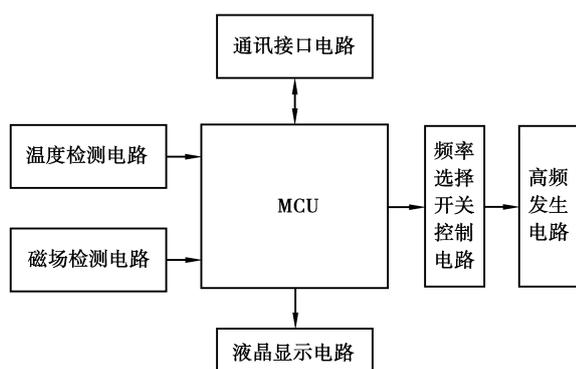


图 5 检测电路的硬件结构框图

结合高频信号发生器的性能要求,本系统选择 MicroChip 公司的 DSP30F6010 芯片,该芯片是内嵌 DSP 高速引擎,提高了 CPU 核的运算能力,它还含有 A/D、PWM、CAN 等多种外围模块,极大的简化了电路设计<sup>[15]</sup>。

为了取得精确的磁场检测数据,磁场大小检测采用的是磁场传感器 HMC1001,该传感器是 HONEYWELL 公司生产的单轴线性磁阻传感器芯片,量程为  $\pm 6$  Gs,在 5 V 供电条件下,测量精度可达 0.1 mGs,最高响应频率为 5 MHz,它能够测量交流和直流弱磁场,输出电压与其敏感方向上的磁感应强度成正比<sup>[16]</sup>。

温度传感器选用的是 DS18B20,是一种数字式的温度传感器,只需一个端口即可实现通信,测量温度范围在  $-55$   $^{\circ}\text{C}$  到  $+125$   $^{\circ}\text{C}$  之间,分辨率用户可以从 9 位到 12 位选择,内部有温度上、下限告警设置<sup>[17]</sup>。

系统中预留了 CAN 通信接口和 RS232 通信接口,以方便系统与其它设备以及上位机进行通讯。

输出频率选择电路是利用模拟开关在 DSP 的控制下接通相应的输出频率。电路中使用了 3 个模拟开关,分别对应的频率为 2、1 MHz 和 500 kHz。模拟开关选用的是 AD 公司的常开式模拟开关 ADG702,它的信号带宽可达 200 MHz。

### 1.3 高压脉冲处理腔设计

由于首先提出将高压脉冲杀菌技术应用于处理量大的循环水系统中,在国内外文献中没有相关的研究报道加以借鉴,所以我们针对循环水系统的特点提出了自己的设计思路,即保证脉冲陡度的情况下,通过增大电极间距离来满足大处理量的要求。虽然这样做可能会使单位时间内的微生物杀灭率降低,但是考虑循环处理水可多次经过处理腔,这样就

可保证在相对较长的时间内,对整个系统微生物杀灭率满足使用要求。

结合 XFDTD 电磁仿真软件对处理腔进行设计,最终设计的高压脉冲处理腔为圆柱形,腔体长 39 cm,半径为 12 cm。在处理腔顶端为脉冲输入电极,电极间距离为 12 cm,电极形状为板状,如图 6。

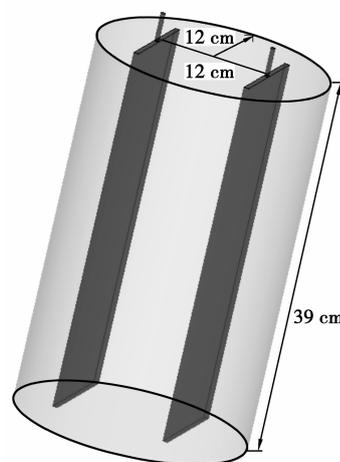


图 6 高压脉冲处理腔

### 1.4 高频脉冲处理腔设计

对高频处理腔的设计,借鉴了常见的高压静电水处理器处理腔的设计方式,同时应用电磁仿真软件对其进行优化,最后采用了图 7 的设计方案。

处理腔为圆柱形,内径为 12 cm,处理腔中阳极为置于腔体正中的金属棒(直径 8 mm,长度约 25 cm),而整个处理腔的内壁为阴极。有别于一般高压静电场水处理器使用绝缘材料将金属阳极与水体隔离,该处理腔的阳极和阴极直接与处理水相接触。

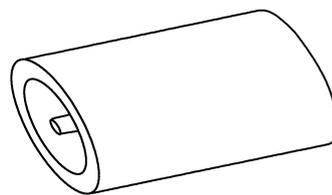


图 7 高频脉冲处理腔

## 2 实验设计

为了测试复合式水处理装置的效果,自行设计了一套循环水处理系统,图 8 为循环水处理系统示意图,图 9 为实物图。该循环水处理实验系统由两个储水容器,两个水泵和处理腔组成,两个储水容器的最大容量为 180 L。

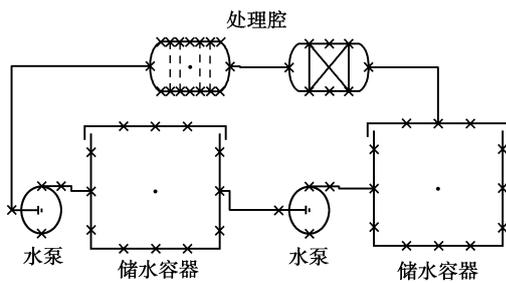


图 8 循环水处理实验系统示意图

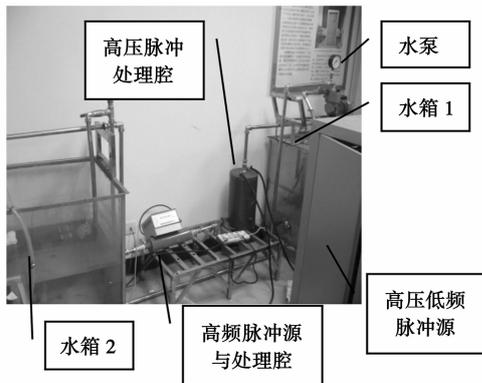


图 9 循环水处理实验系统

### 2.1 高压低频脉冲灭菌实验

高压低频脉冲灭菌实验是通过测量高压脉冲处理前后水中活细菌数目的多少,从而得到灭菌率来对处理效果进行衡量。

实验用水采集自校内一长满水草的湖中,首先对处理前的湖水取样,并通过活细胞计数法测定水中细菌总量。启动循环水处理系统,整个实验共进行 90 min,每隔 15 min 采样一次,通过活细胞计数法测定处理不同时间点水中细菌总数,通过对比处理前后的细菌总数得到不同时间点的灭菌率(细菌的计数在学校的微生物实验室进行)。经多次实验后得到的灭菌率曲线基本趋势如图 10 所示。

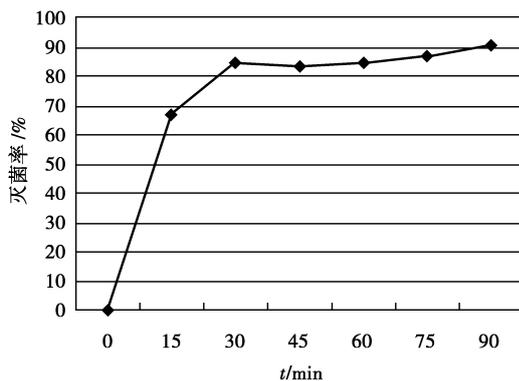


图 10 灭菌率曲线

从图 10 中可以看出,在经处理了 15 min 时,灭菌率已经达到 68%,90 min 后灭菌率已经达到 91%。实验表明该装置可以实现较好的灭菌效果。

### 2.2 高频低压脉冲阻垢实验

对于高频低压脉冲阻垢实验,通过对比处理和未处理水样中水垢的生成量及垢样结构来衡量系统的处理效果。

在水中加入一定量的碳酸氢钠和氯化钙来模拟高硬度的循环冷却水,并在储水容器中放置一根功率为 800 W 的加热棒以促进结垢过程。整个实验分为两个阶段进行,每个阶段的实验时间为 48 h。第一个阶段关闭高频低压脉冲处理设备;第二个阶段开启高频低压脉冲处理设备。整个实验过程中,循环系统一直处于工作状态,加热棒的金属部分放入水中,并一直处于加热状态。实验结束后,把附着在加热棒上的垢样刮下来称重。对比两个阶段后垢的重量,就可以得出阻垢实验的效果。实验得到的垢样如图 11 和图 12 所示。



图 11 未经处理,循环 48 h 后的垢样

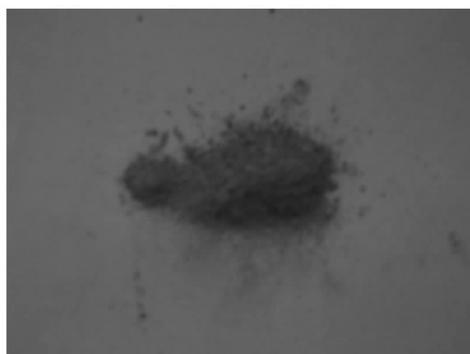


图 12 经过处理,48 h 后加热棒上结的垢

对比图 11 和图 12 可以看出,在高频低压脉冲设备关闭的情况下得到的垢样坚硬,重量为 1.7 g。在启动高频低压脉冲设备的情况下,得到的垢样显得非常松散,重量为 0.5 g,明显少于前者。可知,复合式处理设备对化学垢的阻垢率可达 71%,证明该

仪器可以对化学垢起到很好的处理效果。

### 3 结 论

实验结果表明,该系统输出的高压低频脉冲信号和高压低频脉冲信号满足灭菌阻垢的要求,能有效的杀灭细菌和阻止水垢的生成。由高压低频脉冲灭菌实验结果可知,经过 1.5 h 左右的高压脉冲处理即可基本全部杀灭水中的细菌,因此本系统的处理效率较高,消耗的电能较少。同时,由于采用循环处理方式,能更加有效地杀灭细菌。高频低压脉冲阻垢实验结果证实了高频电磁脉冲能有效地阻止水中成垢离子与碳酸根离子的结合,从而减少水垢的生成。实验得到的垢样除了重量上差别较大外,其分子结构也发生了较大的变化。这是因为电磁脉冲处理使得碳酸钙晶体获得足够的能量,从结构致密的方解石型碳酸钙晶体转化为结构松散的霏石型碳酸钙晶体。同时,本实验结果为下一步的机理分析奠定了一定的实验基础。

综上所述,利用高压低频脉冲和高压低频脉冲对循环水系统中微生物的生长和水垢的形成具有一定的抑制作用。不过,该技术在循环冷却水系统的应用还有待实验的进一步验证。

### 参考文献

- [1] 宋丽莎,曹长武,汪建军. 火力发电厂用水技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 王益. 高频电磁水处理及其控制技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [3] 吴岗,郑成,宁正祥. 高压脉冲电场灭菌机理. 食品科学,1998, 19(4):7-9.  
WU GANG, ZHENG CHENG, NING ZHENG-XIANG. The sterilizing mechanism of high-voltage pulse field[J]. Food science,1998,19(4):7-9.
- [4] AMR ABOU-GHAZALA, KARL H. SCHOENBACH. biofouling prevention with pulsed electric fields [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000,28 (1): 115-121.
- [5] PLIQUETT U, JOSHI R P, SRIDHARA V, et al. High electrical field effects on cell membranes [J]. Bioelectrochemistry, 2007, 70(2):275-282.
- [6] CHO Y I, LEE S H. Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers [J]. International Communication in Heat Mass Transfer,2005, 32(1):1-9.
- [7] EMIL CHIBOWSKI, LUCYNA HOLYSZ, ALEKSANDRA SZCZES', et al. Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 225 (1):63-73.
- [8] 员建,崔玉川,侯治. 电子水处理器控垢机理探讨[J]. 太原理工大学学报,1999,30(4): 385-387.
- YUAN JIAN-CUI YU-CUAN, HOU ZHI. Study on mechanics of scale control of electron water treatment device [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1999, 30(4):385-387.
- [9] 李鹰,郭虹. 电子水处理器处理循环冷却水的原理和应用[J]. 同济大学学报,2000,28(1): 70-72.  
LI YING, GUO HONG. Theory of the electronic water processor in the treating of recycling cooling water system and Its current application[J]. Journal of Tongji University, 2000,28(1):70-72.
- [10] 李言涛,薛永金. 水系统的磁化处理技术及其应用[J]. 工业水处理. 2007, 27(11):11-15.  
LI YAN-TAO, XUE YONG-JIN. Magnetic treatment and its applications to water system [J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27(11):11-15.
- [11] ESPINO-CORTES F, EL-HAG A H, ADEDAYO O, et al. Water processing by high intensity pulsed electric fields[R], Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon, 2006.
- [12] CHO Y I, KIM W T, CHO D J. Electro-flocculation mechanism of physical water treatment for the mitigation of mineral fouling in heat exchanges [J]. Experimental heat transfer,2007, 20(4):323-335.
- [13] LORAIN E. A, HUCHLER P E. Non-chemical water treatment systems: histories, principles and literature review [J]. Paper Technology, 2006 47(4):23-24
- [14] YOUNG I, CHO JOHN LANE, WONTAE KIM. Pulsed-power treatment for physical water treatment [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(7):861 - 871.
- [15] 刘明,胡立,黄声华. 基于 dsPIC 的转差频率矢量控制在电梯控制中的应用[J]. 电机与控制应用 2006,33(7): 47-50.  
LIU MING, HU LI, HUANG SHENG-HUA. Application of inverter in the elevator control based on dsPIC[J]. Electric Machines & Control Application, 2006, 33(7):47-50
- [16] 裴轶,虞南方,刘奇,等. 各向异性磁阻传感器的原理及其应用[J]. 仪表技术与传感器,2004(8):26-32  
PEI YI, YU NAN-FANG, LIU QI, et al. Theory and application of anisotropic magnetoresistive sensor [J]. Instrument Technique and Sensor,2004(8):26-32.
- [17] 沈二波,王爱民,杨红卫. 基于 DS18B20 的远程粮仓温控系统 微计算机信息[J]. 2008(28):211-213  
SHEN ER-BO, WANG AI-MIN, YANG HONG-WEI. Remote granary temperature control system based on DS18B20 microcomputer information, 2008(28):211-213.

(编辑 张小强)