

# 包米勒 PLC 在蛇形造波机设计中的关键技术研究

李木国, 於洪松, 刘于之

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 蛇形造波机是一种在海洋工程研究领域中, 用于模拟大范围海浪的阵列式实验设备; 为了进一步提高大范围海浪模拟的精度, 蛇形造波机同步控制性能的提高具有十分重要的意义; 针对包米勒 PLC 的运动控制技术进行研究, 提出了基于其具有多级主从式结构的蛇形造波机同步运动控制系统, 实现所有造波单元的严格同步控制; 针对上位机和各 PLC 间数据量大、传输速度慢的问题, 采用无损数据压缩和线性数据插值降低数据量, 并应用多线程以太网通讯方式提高数据传输速率; 另外由于该系统机械结构惯量大和总体负载大的特点, 存在启停过程中电机过流问题; 为此提出了一种基于余弦函数的拟合算法优化造波机启动和停止过程; 在各个性能指标的验证实验中, 该系统运行稳定, 数据传输速度快, 同步性能高, 完全满足大范围海浪模拟要求。

**关键词:** 蛇形造波机; 同步控制; 包米勒 PLC; 多级主从式结构

## Research on Key Technologies of Baumuller PLC in Design of Snake Type Wave Maker

Li Muguo, Yu Hongsong, Liu Yuzhi

(State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In the field of ocean engineering, the array type wave maker is often used to simulate large scale ocean waves in the lab for the performance test of the designed marine structures. The motion control technology of Baumuller PLC is studied for improving the synchronization control performance of the snake type wave maker, and a synchronous motion control solution with multistage master-slave structure is proposed to realize synchronous control of all wave unit strictly. For the problem of large amount of data and slow transmission speed between IPC and PLCs, a lossless data compression and a linear data interpolation technology are used to cut down the generated wave data size, and a multi-threaded Ethernet communication method is adopted to increase the data transmission speed. Moreover, for the large mechanical inertia and load of the system, overcurrent phenomenon of motors may happen during the its starting and stopping process. Therefore, a cosine fitting algorithm is proposed to optimize it. In experiments, the system went stably with high data transmission speed and precise synchronous performance, which can fully meet requirements of large scale ocean wave simulation.

**Keywords:** snake type wave maker; synchronous control; Baumuller PLC; multistage master-slave structure

## 0 引言

蛇形造波机是海洋工程研究领域中用于在实验室环境下模拟海上多向不规则波浪的阵列式实验设备。在大型海洋模拟中通常要实现多台伺服电机的同步运动控制, 同时要求各轴独立运行各自曲线。目前基于网络伺服运动控制技术开发的造波机系统已经成功实现了数十乃至上百台伺服电动设备的同步运行<sup>[1-4]</sup>。然而在现有网络化造波机系统中, 受单台运动控制器的最大控制轴数限制, 通常需要多台运动控制器来协同完成上百台造波单元的运动控制。虽然单台运动控制器控制下的伺服电机之间具有较好的同步性能, 但对于多控制器之间的同步问题尚未得到很好的解决, 从而限制了造波机精度的进一步提高。

EtherCAT 以其高速的通信速率、高度的实时性能、灵活的拓扑机制、精确的同步性能等特点, 在工业领域内得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。本文介绍了基于 EtherCAT 网络的具有多级主从式结构的造波机同步运动控制系统, 该系统实现了多控制器之

间伺服电机的严格同步控制。在此基础上指出了开发这种造波机系统存在的技术难点并提出了相应的解决方法。

## 1 造波机系统构成及工作过程

本文论述的基于 EtherCAT 网络的造波机同步运动控制系统由上位机、下位机簇、驱动器、伺服电机、传动机构、传感器和输入输出模块组成, 系统结构如图 1 所示。

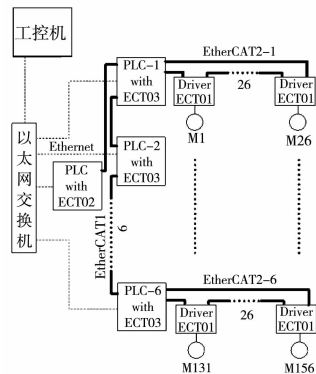


图 1 造波机同步控制系统

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-26。

**作者简介:** 李木国 (1953-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事网络运动控制和图像测量方向的研究。

於洪松 (1989-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事网络运动控制和网络数据采集方向的研究。

上位机是基于 MFC 开发的控制软件, 主要负责生成波浪数据、控制下位机簇、监控系统运行状态、采集并分析数据等工作。下位机运动控制器由 7 台德国包米勒公司的 controller

PLC02 运动控制器组成, 其中 1 台控制其余 6 台。为便于叙述下文将控制 6 台 PLC 的这一台称作主控 PLC, 其余称作从控 PLC。Controller PLC02 采用的是 32 位 RISC 架构处理器, 主频为 667 MHz, 1 000 行 STL 代码的运算速度典型值仅为 25 Ms<sup>[6]</sup>。主控 PLC 负责控制所有的从控 PLC, 每台从控 PLC 控制 26 台驱动器。6 台从控 PLC 在主控 PLC 的控制下, 同步执行上位机的控制命令以及实时运动数据的驱动控制任务。通过传动机构, 伺服电机的正反转运动转换为造波板的摇摆运动。从而设计的造波机系统实际上就是通过协同控制 156 台伺服电机的运动状态来产生设定的波浪运动的系统。

在 EtherCAT 网络组建中主控 PLC 搭配网络主站通信模块 ECT02, 控制 6 台从控 PLC 形成第一层网络: EtherCAT1。每台从控 PLC 搭配网络主站通信模块 ECT03, 控制 26 台驱动器搭配的网络从站通信模块 ECT01 形成第二层 6 个独立的网段: EtherCAT2-1~EtherCAT2-6, 如图 1 所示。为提高下位机系统的工作可靠性, 各从控 PLC 与其所带驱动器采用通信冗余设计, 即网段内部形成闭环通信网络。上位机与 7 台 PLC 之间的通信实时性要求不高, 通过以太网进行通信即可, 相互之间通过以太网交换机组成以太网局域网。

造波机的工作过程是造波前上位机通过以太网发送寻零命令给所有从控 PLC 完成寻零功能; 接着上位机运算生成每根轴的位移数据序列, 通过以太网通信传输至 6 台从控 PLC 中, 从控 PLC 分包存储数据; 开始造波后上位机程序开启子线程进行状态监控与波形采集。在主控 PLC 同步控制下, 所有从控 PLC 通过 EtherCAT 网络周期性地同步输出各轴对应的已储存在 PLC 中的位移数据序列。驱动器接收到数据后驱动电机进行精确定位, 完成造波运动。

## 2 多控制器的同步实现

下位机系统的硬件配置、网络配置、同步建立、程序开发、电机参数调试以及输入输出的管理都是在包米勒提供的一体化软件 ProMaster 中完成的。7 台 PLC 组建的控制网络和 6 个独立的驱动网络都是分别基于 EtherCAT 分布时钟同步机制完成各自网段的时钟同步。

单个 EtherCAT 主从网络的时钟同步是基于 IEEE1588 标准并采用不同于一般工业以太网的分布时钟机制来对系统内各设备进行时钟同步<sup>[7]</sup>, 从站设备根据系统时钟产生同步信号, 来中断控制或者触发数字量输入输出。系统时钟一般由网络中第一个具有分布时钟功能从站的本地时钟提供。从站中设有独立的硬件时钟源, 所有从站的本地时钟相对于系统参考时钟各有独立的偏移和漂移误差, 经过主站的同步算法修正后, 实现从站之间的精确时钟同步<sup>[8]</sup>, 同步时间偏差小于 100 纳秒, 甚至达到几十纳秒<sup>[7]</sup>。分布时钟的同步经过三步处理过程而实现: 1) 主站测量报文传输至各从站的延时时间; 2) 各从站与系统参考时钟之间的偏差补偿以调整各设备的本地时间; 3) 周期性的时钟漂移补偿<sup>[9]</sup>。

Controller PLC02 实现多级主从式结构控制网络的同步控制, 关键技术在于网络主站通信模块 ECT03 对于第一层与第二层网段中 PLC 控制器内部同步信号 Sync1 和 Sync2 的同步控制。图 2 是 PLC 和 ECT03 的同步机制框图。

造波机控制系统实现各轴同步的过程为:

1) 上电后主控 PLC 完成内部自检, 然后通知其搭配的 ECT02 模块启动 EtherCAT 总线机制。

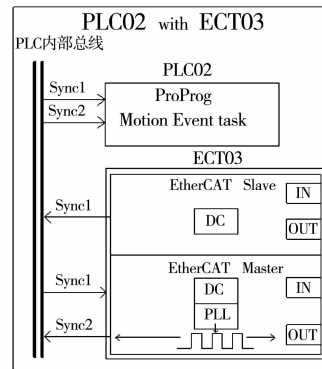


图 2 包米勒 PLC 内部多级主从同步机制图

2) ECT02 完成第一层网络的分布时钟初始化后完成所有 PLC 之间的通讯同步, 生成内部的同步信号 Sync1, 主控 PLC 接收到 Sync1 后触发其运动控制程序执行。

3) 第二层各网段上电后, 各从控 PLC 完成内部自检后通知其搭配的 ECT03 模块启动 EtherCAT 总线机制。

4) ECT03 完成分布时钟机制初始化后完成网段内所有驱动器的通讯同步, 生成系统内部的同步信号 Sync2, 从控 PLC 接收到 Sync2 后触发其运动控制程序执行。

5) 当各网段的 ECT03 模块捕捉到第一层网络 Sync1 信号后, 利用锁相环调整 Sync2 与 Sync1 信号相位达到精确同步。

运行期间整个下位机 EtherCAT 网络经过周期性调整, 主控 PLC 和各从控 PLC 完成了通讯之间的同步和驱动控制同步, 实现整个造波期间各轴电机的严格意义同步控制。

## 3 关键技术解决

### 3.1 以太网通信

在造波中为避免大量数据传送加重 PLC 的负担而影响其造波控制的实时性能, 需要在造波前将数据发给各 PLC。PLC 造波控制任务的周期为 1 ms, 模拟多向不规则波的时间越长数据量越大, 当要做吸收式造波则数据量更大。而 PLC 存储器资源有限, 其 TCP 通信的收发速度测试仅 122 k/s。针对波浪曲线变化的连续性特点, 在应用中上位机选择合适的控制间隔生成波浪数据并进行简单的无损数据压缩、下位机恢复数据并采用线性插值方法解决以太网通信中波浪数据量大、传输时间长的问题。

波浪数据为双整型, 上位机以 20 ms 间隔生成数据。以最大指标波高 1.4 m 周期 4 s 为例, 相邻数据差值均可以用整型数存储。只要存储数据的第一点然后分别存储各点与其前一点的差值, PLC 接收后经过加减即可还原数据, 数据的压缩比为 1:2。经过处理后, 在 65536 点多向不规则波造波中单台 PLC 需要接收 26 台电机的数据量仅为 6.5 M, 数据量是未经处理前的 1/40。为进一步缩短时间, 上位机以太网通信中开启多线程方法并行传输, 多次测试传输时间为 27 s。从控 PLC 以 1 ms 控制周期对接收间隔 20 ms 的波浪数据进行线性数据插值处理的流程如图 3 所示。

### 3.2 造波机的启停优化

造波电机的陡起陡停容易造成电机过流、机械损伤和波浪破碎等问题。工程中一般的解决方法是通过电子齿轮耦合实现电机转速的比例增减。蛇形造波机模拟多向不规则波是通过控制相邻造波推板的相位差来产生斜向传播的波浪, 不同电机的初始位置各不相同<sup>[10]</sup>。针对造波机在模拟多向不规则波时各

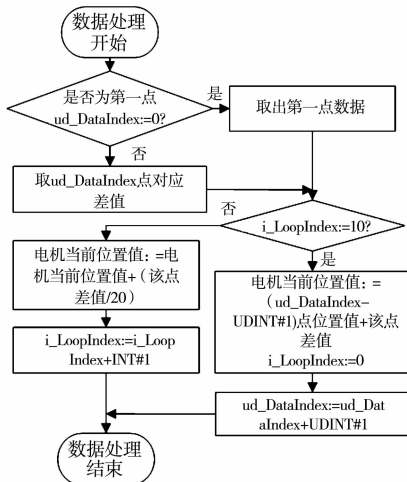


图3 PLC波浪数据处理流程

轴电机的随机启动位置难以通过电子齿轮方式处理，设计了一种余弦函数算法拟合的方式实现造波机的启动与停止过程优化。设生成的第  $j$  轴数据总点数为  $K$  的曲线可用下式表示：

$$P_1(j) = f(i, j) \quad (1)$$

其中： $i \in [0, K]$ ， $j \in [0, 155]$  且满足当  $i = N_0, N_1, N_2, \dots$  时式 (2) 成立：

$$f_i^{(1)}(i, j) = 0 \quad (2)$$

通过余弦函数算法优化后第  $j$  轴启动阶段的曲线函数为下式：

$$P_2(j) = \begin{cases} \frac{1}{6} f(N_0, j) \left[ 1 - \cos\left(\frac{k + w(T)}{N_0 + w(T)} \pi\right) \right] \\ \text{其中 } k \in [-w(T), N_0], \\ f(i, j) \frac{1}{2 + \cos\left[\frac{i - N_0}{d(T)} \pi\right]} \\ \text{其中 } i \in [N_0, N_0 + d(T)], f(i, j) \\ \text{其中 } i \in [N_0 + d(T), K] \end{cases} \quad (3)$$

其中： $w(T)$ ， $d(T)$  是根据波浪周期因子得到的一个常量。

当停止造波时，所有轴各自寻找下一个速度为零的点。找到速度为零点的轴停止给数，没有找到的轴正常给数。当所有轴完成速度为零点寻找后，按式 (4) 回到位移零点：

$$P_3(j) = f(N_{n(j)+1}, j) \left[ 1 + \cos\left(\frac{m + S(T)}{2S(T)} \pi\right) \right] \quad (4)$$

其中： $N_{n(j)+1}$  表示第  $j$  轴停止造波后下一个速度为零点序号， $S(T)$  是根据波浪周期因子得到的一个常量， $m \in [0, S(T)]$ 。如图 4 所示上图为某次多向不规则造波时抽取的从控 PLC1 第 8 轴理论位移曲线，下图为其经余弦函数算法优化后的启动过程采样曲线。经过  $w(T) + N_0 + d(T)$  点启动优化处理后开始正常造波，图 4 下图虚线左侧为启动优化处理段。

#### 4 实验结果与结论

Controller PLC02 执行系统分为 4 种任务：SYSTEM、DEFAULT、CYCLIC、EVENT<sup>[6]</sup>。下位机软件中，程序变量的初始化分配给 SYSTEM 任务，上电后只执行一次。然后电机的初始化、寻零、停止、温度检测、风机启停等功能以及上下位机以太网通信分配给 CYCLIC 任务以周期性执行。造波

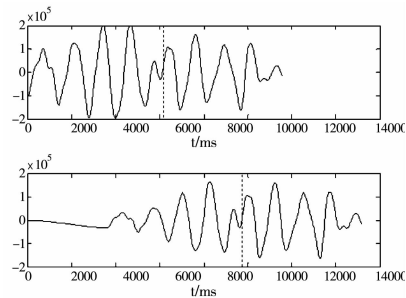


图4 电机理论位移曲线和缓起处理曲线

机的启停优化、波浪数据的实时修正及造波过程分配给 EVENT 任务做同步运动控制，由同步信号周期性触发。

在技术验证中，采用主控 PLC 控制从控 PLC1 和从控 PLC2。从控 PLC1 控制电机 1 和电机 2，从控 PLC2 控制电机 3 和电机 4，同步信号 Sync1 和 Sync2 周期均设为 2 ms。首先为验证两从控 PLC 各自 EVENT 任务的同步触发，在两者 EVENT 事件的程序中让外扩的 DO8000 数字量输出模块每周期交替输出高低电平。如图 5 所示，两者波形几乎在同一时刻点发生状态跳变。

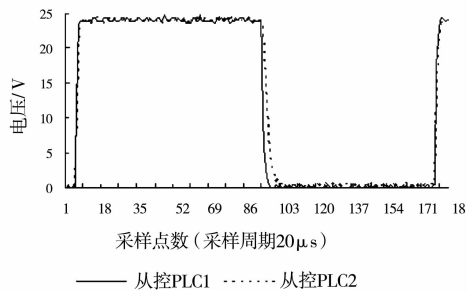


图5 从控 PLC 的运动控制程序触发图

其次为验证各台电机的实时同步效果，让 4 台电机同步执行同一正弦曲线定位。主控 PLC 在 EtherCAT 通信的每个周期内同时接收各驱动器上传的实时位置数据，采样 2 000 次。电机编码器的分辨率是 16 位，即每转一圈脉冲数为 65536。图 6 所示的是四台电机在同一时刻实际位置曲线，其中小图显示的是四台电机 5 点数据范围内的差异。多次采样的结果稳定，同步定位的效果得到了验证。

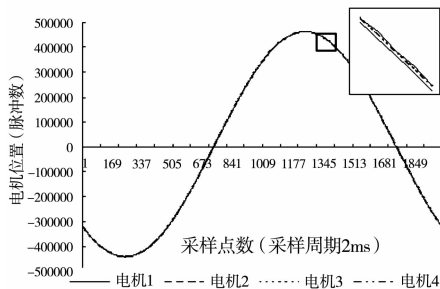


图6 电机实际位置曲线

任意抽取一段时间采样来自不同从控 PLC 控制下的电机 1 和电机 3 的同一时刻的位置误差。如图 7 所示，在 2 000 点采样数据中电机位置脉冲误差范围为  $(-10, 35)$ ，误差均值为 8。通过传动机构电机每转一圈造波板行程为 77 mm，实际脉冲误差换算成行程误差则为  $(-12 \mu\text{m}, 41 \mu\text{m})$ ，均值误差约为  $9.5 \mu\text{m}$ 。电机同步控制的精度完全满足实际造波的需要。

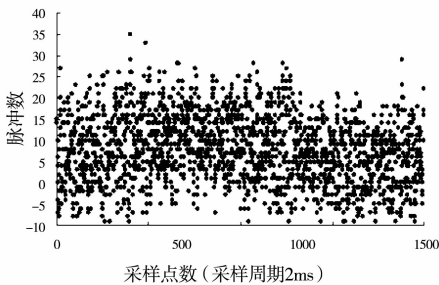


图 7 电机 1 与电机 3 的实时位置误差

通过以上实验验证得知, 采用包米勒 Controller PLC02 基于其 EtherCAT 通信模块设计的具有多级主从式结构的造波机同步运动控制系统在网络实时性、电机同步性、运行稳定性等方面完全满足造波机的应用, 且提高了造波机的同步控制精度。

## 5 结语

研究了基于包米勒 Controller PLC02 和其通信模块组成的基于 EtherCAT 网络的具有多级主从式结构的同步运动控制系统, 并对其在分布式 156 轴蛇形造波机应用中存在的问题提出了具体解决方案。通过大量的试验验证了这种多控制器同步运动控制系统设计在蛇形造波机应用中的可行性, 实现了系统各轴严格意义上的精确同步控制。为研制更大型的造波机系统提供了技术支持, 并且也为其它领域的大型复杂运动控制系统的

(上接第 2487 页)

从图 6 中可以看出, 动态采样算法可以很好的区分数据平滑段和波动段, 平滑段采用较小的采样频率, 当进入波动段时增加采样频率, 因此算法还原出的数据曲线与实际曲线基本一致。在常规采样 100 次的条件下, 动态采样降至 71 次, 数据减少近 30%, 很好的减少了系统的数据冗余和传输量。

## 4 结论

针对农业环境监测传感器网络应用中, 参数变化具有较强的周期性和内在耦合、关联性的特点, 构建了一种基于误差反向传播的多层前馈神经网络预测和阈值分析的传感器网络动态采样模型, 并以环境温度、空气相对湿度、土壤温度 3 个典型参数为实验对象, 构建了其基于 BP 神经网络的参数动态采样调度模型。

仿真实验结果表明, BP 神经网络模型预测值和实测值之间的均方根误差 RMSE 及绝对误差 AE 分别为 0.83 °C 和 0.54 °C。按照仿真实验得出的最佳阈值模型设定值, 相比于连续采样, 动态采样次数减少 30%, 模型应用效果较显著。由于受时间限制, 调度模型还仅局限于研究环境温度、空气相对湿度等对土壤温度的影响, 还未能综合考虑光照、光合有效辐射、土壤湿度等参数的相互影响。下一步, 将通过研究更多参数历史数据, 分析其内在相关性, 建立合适的预测方法, 从而建立更多参数的动态采样驱动模型。

## 参考文献:

- [1] 陈 丹, 郑增威, 李际军. 无线传感器网络研究综述 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (8): 701-704.
- [2] 李凤保, 李 凌. 无线传感器网络技术综述 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (8): 559-561.
- [3] 蒲荣富. 大规模无线传感器网络能效性分析 [J]. 电子测量与仪器

同步设计提供了参考。

## 参考文献:

- [1] Romijnders L N G. The Development of a New Segmented Deepwater Wave Generator [A]. Ocean Wave Measurement and Analysis (2001) [C]. ASCE, 2002: 1209-1217.
- [2] 李木国, 徐福荣. 基于 SynqNet 的多向不规则波造波机控制系统 [J]. 测控技术, 2007, 26 (10): 37-39.
- [3] 张 鹏, 魏仁哲. 基于 TRIO 运动控制器的 144 轴运动控制系统 [J]. 控制工程, 2009, 16 (s): 21-23.
- [4] 李木国, 陈永富, 王 静. 多控制器多轴同步技术用于造波机系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2985-2987.
- [5] Marin R, Joseph E, Stubbs, Dmitry D. EtherCAT Enabled Advanced Control Architecture [C]. San Francisco, CA: IEEE, 2010: 9-44.
- [6] Baumuller Nuremberg GmbH. Application Manual for b maXX controller PLC [Z]. 2007.
- [7] Prytz G., Skaalvik J. Redundant and synchronized EtherCAT network [C]. Trento, Italy: IEEE, 2010: 201-204.
- [8] 汪雅楠, 谭南林. EtherCAT 时钟同步的误差仿真分析 [J]. 自动化技术与应用, 2011, 30 (7): 22-26.
- [9] GmbH B. A. Hardware Data Sheet ET1100 - EtherCAT Slave Controller [Z]. 2008.
- [10] 李木国, 柳淑学, 张 群, 等. 蛇形多向不规则波造波机波浪产生方法及特性 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43 (3): 354-361.
- [11] 李木国, 柳淑学, 张 群, 等. 蛇形多向不规则波造波机波浪产生方法 [J]. 大连理工大学学报, 2007, 21 (6): 61-65.
- [12] 孙利民, 李建中, 陈 渝. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] Goldsmith A J, Wicker S B. Design challenges for energy-constrained Ad Hoc wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2002, 9 (4): 8-27.
- [14] 李建中, 石胜飞, 王朝坤. 基于感知数据概率模型的无线传感器网络采样和通信调度算法 [J]. 计算机应用, 2005, 25 (9): 1982-1985.
- [15] 李 珂, 贾惠波, 吴晓培, 等. 用于土壤湿度测量的传感器网络动态采样策略 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25 (4): 338-342.
- [16] Shuman, A. Nayyar, A. Mahajan, Y. Goykhman, et al. Measurement Scheduling for Soil Moisture Sensing: From Physical Models to Optimal Control, in Proceedings of the IEEE Special Issue on Sensor Networks and Applications [J]. 2010, 98 (11): 1918-1933.
- [17] 牛建军, 邓志东. 基于马尔可夫链的无线传感器网络分布式调度方法 [J]. 自动化学报, 2010, 36 (5): 685-695.
- [18] Hornik K M, Stinchcombe M, White H. Multilayer feed forward networks are universal approximators [J]. Neural Networks, 1989, 2 (2): 359-366.
- [19] 张绍秋, 胡跃明. 基于 BP 神经网络的税收预测模型 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (6): 55-58.
- [20] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机 [J]. 自动化学报, 2000, 26 (1): 32-43.
- [21] Conejo A J, Plazas M A, Espinola R, et al. Day-ahead electricity price forecasting using the wave let transform and ARIMA model [J]. IEEE Trans Power System, 2005, 20 (2): 1035-1042.
- [22] 王 军, 吕震中, 曹 荃. 基于神经网络的传感器故障诊断方法与应用 [J]. 自动化仪表, 2003, 24 (10): 21-24.
- [23] 毛颖科, 关志成, 王黎明. 基于 BP 人工神经网络的绝缘子泄漏电流预测 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (27): 7-12.