

# 基于 ModBus 协议的高精度光栅位移测量仪设计

杨 玲<sup>1</sup> 陈轩泽<sup>2</sup> 马青玉<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学 物理科学与技术学院 江苏 南京 210046)

(2. 南京师范大学 强化培养学院 江苏 南京 210046)

**[摘要]** 采用 STC89C51 单片机设计了基于 ModBus 协议的高精度光栅位移测量仪. 根据光栅位移传感器的原理, 设计光栅信号细分电路对光栅尺的输出信号精度进行提升, 并用单片机的外部中断进行运动方向判别和位移测量, 通过液晶显示结果; 为了和 AI 系列仪表兼容, 基于 ModBus 协议进行了 485 数据通讯设计. 用 LE 型光栅尺在泡生法蓝宝石生长系统的应用结果表明其测量精度提高了 4 倍, 具有较强的抗干扰能力, 可实现多仪表的工业应用, 具有传输距离远、传输速率快、稳定可靠的优点.

**[关键词]** 莫尔光栅尺 单片机 ModBus 协议 位移测量

**[中图分类号]** TH822 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012) 01-0070-06

## ModBus Protocol Based Design of High-Precision Grating Displacement Measurement Instrument

Yang Ling<sup>1</sup> ,Chen Xuanze<sup>2</sup> ,Ma Qingyu<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Technology , Nanjing Normal University , Nanjing 210046 , China)

(2. Honor School , Nanjing Normal University , Nanjing 210046 , China)

**Abstract:** A ModBus protocol based high precision grating displacement measurement instrument was designed by using STC89C51 microcontroller in this paper. According to the principles of grating displacement transducer , a fractionized circuit for the grating signals was designed to achieve grating pulse interruption and motion direction identification for the singlechip with improved measurement precision , and then the measured results are presented with a LCD display. To enhance the compatibility with the AI series measurement meters , a 485 interface was also designed for data communication with computer based on the ModBus protocol. The experimental displacement measurement for kypopoulos sapphire growth using a LE Moire grating ruler proved that the precision was enhanced for 4 times with good ability of anti-interference and suggested the industrial application with long transmission distance , high data transfer rate and good reliability.

**Key words:** moire grating ruler , singlechip , ModBus protocol , displacement measurement

数控机床是制造业不可缺少的设备, 其应用是实现制造业现代化的必然趋势. 为提高数控机床的加工精度, 有必要为其配备在线测量装置. 在高精度的数控机床上, 常常使用光栅作为位置检测装置的敏感元件. 光栅是一种定值式传感器, 测量精度取决于光栅刻线的准确性, 能够动态而高精度地测量直线位移, 还可以测量角位移, 是一种比较理想的测量工具<sup>[1-2]</sup>. 计量光栅以其精密的测量长度与角度位移的优点, 广泛地应用于数控加工、伺服跟踪制造业等领域. 早期增量式光栅尺输出的电信号是相差 90° 的正弦信号, 随着计量光栅技术的发展, 目前典型的信号为相差 90° 的 TTL 方波信号 A 和 B, 光栅尺输出信号为数字量, 数据不受温度、时间的影响, 抗干扰能力强. 光栅尺常用的细分技术是电子细分法, 这种细分法的缺点是光电元件安放比较困难, 细分度不高<sup>[3]</sup>. 在测量系统的数据传输技术中, RS232 串行通讯技术有着实现简便和系统集成费用低的特点; 而 RS485 使用两根线, 具有通讯距离远和传输速率高的优点, 所以在各个

收稿日期: 2011-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金(10974098)、江苏省科技厅自然科学基金(BK2009407)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20093207120003).

通讯联系人: 马青玉, 博士, 教授, 研究方向: 声学、电子技术和生物医学物理. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

行业得到广泛的应用.采用 ModBus 通讯,进行多台仪表的远程实时监测,实现计算机控制下的主从控制,可以完成数据的采集和存储以及检索等功能.

本文用 STC89C51 单片机设计了基于 ModBus 协议的高精度光栅位移测量仪.通过单片机及数字电路对光栅尺进行四倍频细分及辨向,单片机对倍频之后的脉冲进行计数测量,再利用 ModBus 协议和计算机进行 485 数据通信,实现和多种工业测量仪器的协同工作. LE 莫尔光栅尺在泡生法蓝宝石生长炉旋转提拉位移高精度测量中的成功应用,证明了本系统结构简单、测量精度高、工作稳定可靠,具有良好可扩展性.

## 1 光栅尺测量原理

### 1.1 莫尔条纹

光栅是由很多等节距的透光缝隙和不透光的刻线均匀相间排列构成的光器件.光栅尺由计量光栅构成.光栅尺的栅距  $W = a + d$ ,如图 1 所示  $a$  为刻线宽度  $d$  为缝隙宽度;主光栅与指示光栅都刻有均匀线纹,将两块光栅重叠在一起,并沿刻线方向成  $\theta$  角,这时由于遮光效应,两块光栅的刻线相交处形成亮带;远离交叉点的区域形成暗带,这种明暗相间的条纹称为莫尔条纹<sup>[3-5]</sup>.  $B$  为两条莫尔条纹之间的距离,其与栅距  $W$  及夹角  $\theta$  的关系为:

$$B = \frac{W}{2\sin(\theta/2)} \approx \frac{W}{\theta}. \quad (1)$$

因此通过测量莫尔条纹移动的距离可测出小于光栅栅距的微小位移量.

### 1.2 光电转换

光栅尺中除了主光栅及指示光栅外,还有光源、聚光镜和光电元件等.光源发出的光透过聚光镜后变成平行光照射光栅,光电元件再把透过光栅的光信号转换为电信号.如图 2 所示,当两块光栅相对移动时, $a$  位置两光栅的刻线重叠,透过的光最多,光强最大; $b$  位置光强逐渐减小; $c$  位置光被完全遮挡,光强为 0; $d$  位置光重新透过,光强又逐渐增大; $e$  位置两光栅的刻线再一次重叠,光强最大.输出信号  $u$  与光栅相对位移  $x$ 、光强的直流分量  $U_0$  及幅值为  $U_m$  的交流分量的关系可表示为:

$$u = U_0 + U_m \sin(2\pi x/W). \quad (2)$$

经过整形滤波,光栅尺输出 TTL 方波信号.为了便于分辨指示光栅的移动方向,接口电路的光电接收器分别产生 A 相和 B 相两路相位差  $90^\circ$  的脉冲波,如图 3 所示,可以通过两类信号相位超前和落后的关系来判别运动的方向.

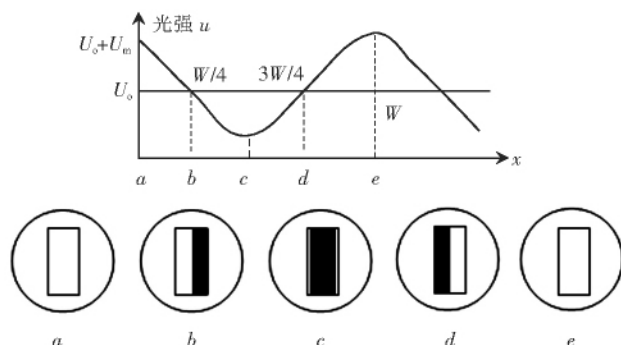


图 2 光栅位移与光强的关系

Fig.2 Relationship between grating displacement and light intensity

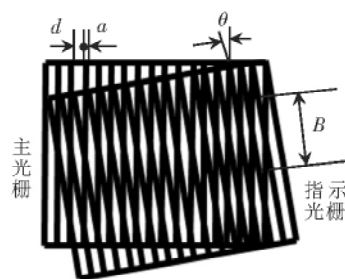


图 1 莫尔条纹示意图

Fig.1 Sketch map of Moire fringe

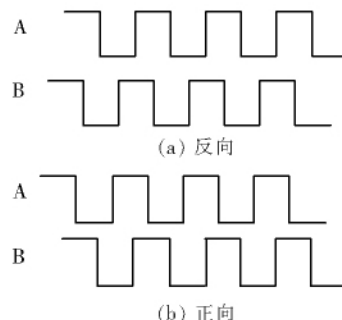


图 3 光栅尺输出的 A、B 两路相差  $90^\circ$  的信号

Fig.3 Output signals of lanes A and B with  $90^\circ$  phase difference

2 光栅位移测量系统设计

2.1 光栅位移测量系统

光栅位移测量系统框图如图 4 所示. 由于光栅尺的分辨率取决于输出的 A、B 信号, 经过信号的细分可以有效提高系统的测量精度, 因此本设计首先对光栅尺的输出信号进行细分, 然后通过单片机对细分后的脉冲进行计数<sup>[6]</sup>和位移测量, 再通过液晶显示位移值. 为了将电路和其他标准仪表一起通过 485 接口进行测量, 利用 MAX485 设计了 485 电平转换电路, 并通过 ModBus 协议进行数据传输. 系统在计算机的定时数据扫描模式下, 将接收到的脉冲数进行数据处理和位移量转化, 并在计算机上实时显示. 为了保证系统运行的连续性, 通过存储器对每次测量的数据进行记录, 当系统突然断电并重新上电工作后, 系统能够自动读取当前的位置, 为下一次测量提供准确的位移偏移量. 本设计中上位机采用 Visual Basic 语言进行串口通信<sup>[7]</sup>, 并通过界面实时显示当前位移量.

2.2 高精度光栅位移量的测量技术

本设计中选用 STC89C51 单片机作为测量中心, LE 直线型光栅尺作为位移测量传感器<sup>[8-9]</sup>. 由于使用的 LE 型光栅尺的栅距为 20  $\mu\text{m}$ , 如果对光栅信号直接进行测量计数, 那么计数的只能是莫尔条纹的整数倍, 位移测量精度只能达到 20  $\mu\text{m}$ , 因此, 要精度有所提高, 就必须对栅距进行细分. 传统使用的细分方法是电子细分技术, 这种细分法的缺点是光电元件安放比较困难, 细分数不高. 由于光栅输出信号 A、B 相差 90°, 在 0°、90°、180°、270° 4 个位置上有上升沿和下降沿, 可以利用信号的上升和下降沿来计量脉冲数, 同时利用 A、B 信号的相差来进行方向的判断, 这样信号的测量精度就可以提高 4 倍<sup>[10,11]</sup>. 本文采用数字电路设计对光栅信号进行四倍频, 细分之后的光栅尺的分辨率为 5  $\mu\text{m}$ .

细分判向电路如图 5 所示, 光栅尺输出两路相差 90°的信号 A、B 经过异或后得到四倍频的信号脉冲, 并以此脉冲信号作为 D 触发器的时钟脉冲. 由于 A、B 信号相差 90°, 因此将 B 信号经过触发器 D1 延迟四分之一周期后得到信号 B1 和 A 信号的相位差为 0°或者 180°. 如图 6 所示, 正向运动时 B1 信号与 A 信号正好反相; 反向运动时 B1 信号与 A 信号同相. 将 A、B1 信号进行异或, 正向运动时输出 1, 反向运动时输出 0. 因此可以利用  $A \oplus B1$  信号作为中断信号进行脉冲计数测量, 以  $A \oplus B1$  的输出电平来判断位移的方向, 实现光栅尺四倍精度正反方向的位移测量.

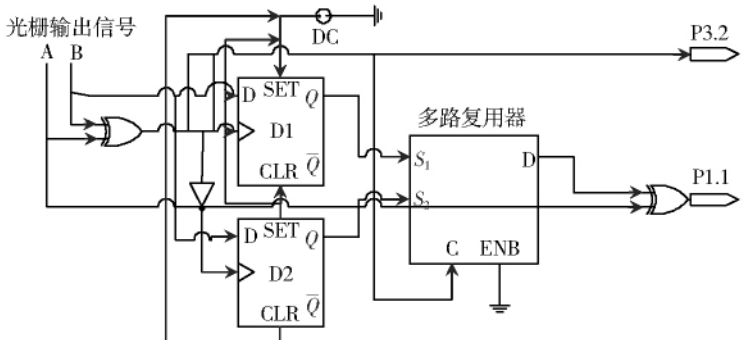


图 5 光栅尺细分判向电路

Fig.5 Circuit of fractionized grating measurement and direction judgment

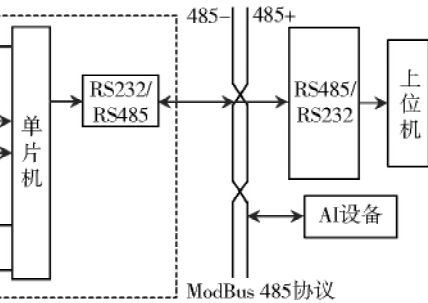


图 4 光栅位移测量仪的应用系统框图

Fig.4 Block diagram of the grating displacement measurement system

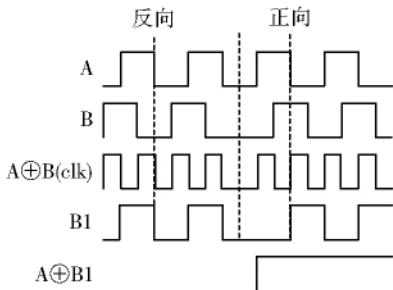


图 6 光栅尺细分波形分析

Fig.6 Waveform analysis of the fractionized grating measurement

2.3 ModBus 通信

ModBus 协议<sup>[12-13]</sup>是应用于电子控制器上的一种通用协议, 实现控制器相互之间、控制器和其他设备之间的通信, 因此不同厂商生产的控制设备可以连成工业网络, 实现集中监控和管理. 标准的 ModBus 是

使用 RS232 兼容串行接口,它定义了连接口的针脚、电缆、信号位、传输波特率和奇偶校验。ModBus 协议有固定的格式,其传输方式分为 ASCII 模式和 RTU 模式两种。本系统设计中采用 RTU 模式进行二进制数据的传输。由于 RS232 的传输距离较短,速度较慢,在仪表中使用 RS485 通讯接口,通讯距离长达 1 km 以上,只需两根线就能使多台仪表与计算机进行通讯。为使个人计算机能作上位机,可使用 RS232C/RS485 型通讯接口转换器,将计算机上的 RS232C 通讯口转为 RS485 通讯口。

本系统将光栅尺与 AI 系列的通用仪表并接,二者输出传输模式相同,数据包含 1 位起始位、8 位数据位、1 位停止位,无奇偶校验位。本系统的波特率选取为 9 600 bit/s,通信参数设定为:9 600,N,8,1,分别表示波特率、奇偶校验、数据位、停止位。ModBus 通信时,每个控制器必须知道从设备的地址、识别地址发来的命令再决定下一步动作。

PC 机发送数据读取命令格式: [仪器地址码 XXH] + [识别码 ASQ(“P”)] + [命令码 ASQ(“R”)] + [00H] + [00H] + [00H] + [CRC 校验的低 8 位] + [CRC 校验的高 8 位]。

光栅位移测量仪响应数据格式: [仪器地址码 XXH] + [识别码 ASQ(“P”)] + [命令码 ASQ(“R”)] + [返回的字节个数 XXH=4] + [数据 1] + [数据 2] + [数据 3] + [数据 4] + [CRC 校验的低 8 位] + [CRC 校验的高 8 位]。

ModBus 的数据校验方式采用循环冗余错误校验 CRC-16,其步骤如下:

- (1) 预置一个 16 位寄存器为 FFFFH;
- (2) 把第一个 8 位二进制数据与 CRC 低 8 位字节进行异或运算,结果放入 16 位寄存器;
- (3) 把这个 16 位寄存器向右移一位,用 0 填补最高位,检查移出位;
- (4) 若向右移出的数位是 0,则返回(3);若向右移出的数位是 1,则寄存器与多项式 1010000000000001 进行异或运算;
- (5) 重复(3)和(4),直至移出 8 位;
- (6) 重复(2)~(5),进行下一字节处理。所有字节处理完毕,得到的 16 位寄存器的高低字节进行交换,最后得到的 16 位寄存器内容即 CRC 码。

在一个 485 总线上可以挂接多个设备,可以通过仪表地址的不同来进行通讯设备的选择。每个仪表必须分配一个固定的地址,系统中不同仪表需要设定不同的地址号。如图 6 所示,本设计为了方便使用,在单片机的端口设置了 8 位高低电平拨码开关,通过拨码地址为本光栅位移测量仪设定地址,在如图 7 所示的调试系统中,开关地址设定为 09H。

本文采用 RS485 接口进行串行数据通信。光栅位移测量仪中的单片机作为下位机,将采集到的光栅位移的测量数据通过 ModBus 协议传输给上位机电脑。由于单片机输出的信号为 TTL 电平,使用 RS485 时需要将 TTL 电平转换成 485 的电平。硬件电路设计中采用 MAX485 将单片机串行接口输出的 TTL 电平转换为 485 的电平。

#### 2.4 软件流程

在系统的软件设计中,PC 上位机和光栅位移测量仪的程序流程如图 8(a)和(b)所示。光栅测量仪启动后,读取存储器中的当前位移量,然后准备进行位移测量。通过 INTO(高优先级)和串口中断分别来进行光栅位移的测量和计算机的数据交换。在位移测量中,当 INTO 接收到细分电路输出的脉冲下降沿,进入中断测量程序,先检测光栅的运动方向,根据方向确定位置移动的加减运算,并进行位移的存储和显示。在数据通讯中,PC 机先向光栅位移测量仪发送数据读取命令,并等待返回数据,延时 0.1 s 后如果接收不到数据则放弃返回;单片机串口中断接收到命令后,判断地址号和命令,如果满足位移数据通讯的条件,则按照数据格式向 PC 机返回测量位移数据;PC 机接收数据后进行位移换算运算,界面显示输出位移量。

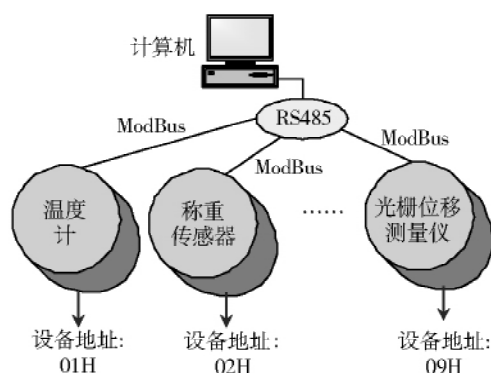


图 7 基于 485 接口的 ModBus 通讯示意图

Fig.7 Sketch map of 485 interface based ModBus communication system

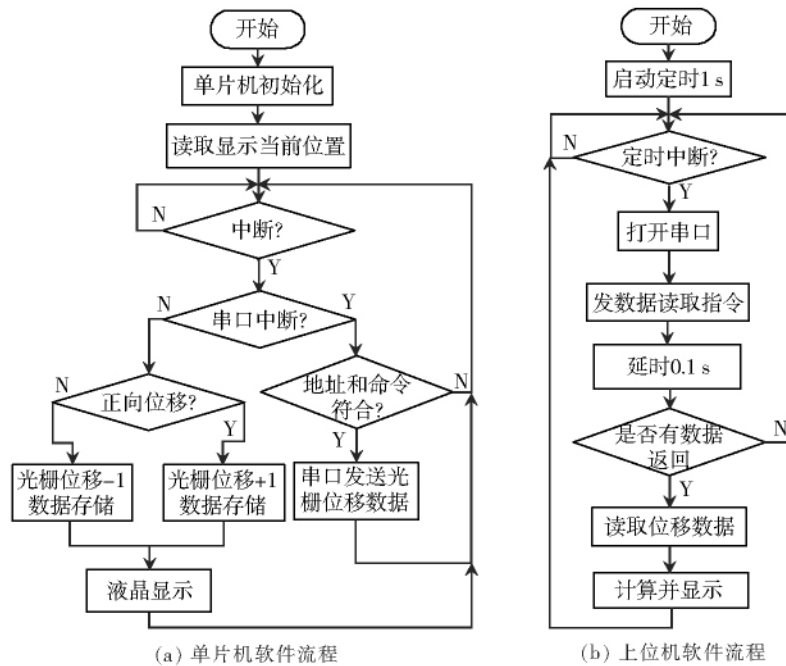


图 8 系统软件流程图

Fig.8 Software flow charts of the system

### 3 结语

本设计用 STC89C51 单片机设计了基于 ModBus 协议的高精度光栅位移测量仪。根据光栅位移传感器的原理,设计光栅信号细分电路,对光栅尺的输出信号精度进行提升,并设计了方向判别电路,用单片机的外部中断进行运动方向和光栅位移测量,通过液晶显示测量结果。为了和 AI 系列仪表兼容,只做了 RS232/RS485 转换电路,基于 ModBus 数据传输协议,通过 485 接口和计算机进行光栅位移测量结果的通讯。本光栅位移测量仪被安装到泡生法蓝宝石生长炉的旋转提拉检测系统中,对 LE-1-250 直线光栅尺的实验结果证明,本仪器可以将测量精度从 20  $\mu\text{m}$  提高到 5  $\mu\text{m}$ ,提高了生产过程中的提拉精度和蓝宝石的生产成品率;同时证明本仪器具有较强的抗干扰能力和良好的扩展性,可以实现多仪表的工业应用,具有传输距离远、传输速率快和性能稳定可靠的优点,有着良好的应用前景。

### [参考文献](References)

- [1] 绳红强,汪世益.基于 AT89S51 的数控机床光栅尺位移测量系统[J].机电工程技术,2006,35(6):3-6.  
Sheng Hongqiang, Wang Shiyi. The numerical control machine tools grating-ruler displacement measure system based on AT89S51[J]. Electrical Engineering, 2006, 35(6): 3-6. (in Chinese)
- [2] Cypress Semiconductor Corporation. EZ-USB FX2 Technical Reference Manual(Version 2.1) [R]. San Jose: Cypress Semiconductor Corporation, 2003.
- [3] 贾伯年.传感器技术[M].3版.南京:东南大学出版社,2007:229-231.  
Jia Bonian. Sensor Technology[M]. 3rd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2007: 229-231. (in Chinese)
- [4] 李殿魁.光栅计量技术[M].北京:中国计量出版社,1987.  
Li Diankui. Grating Measurement Technique[M]. Beijing: China Metrology Press, 1987. (in Chinese)
- [5] G A 伍尔沃特.数字式传感器[M].北京:国防工业出版社,1981.  
G A Wool Halter. Digital Sensor[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1981. (in Chinese)
- [6] 陈光东.单片机微型计算机原理及其 C 语言程序设计[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.  
Chen Guangdong. Single-Chip Micro-Computer Theory and C Language Programming[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 清源计算机工作室. Visual Basic 6.0 开发宝典[M].北京:机械工业出版社,1999.  
Qingyuan Computer Studio. Visual Basic 6.0 Collection Development[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999. (in Chinese)

Chinese)

- [8] 陈胜军,贾方. 机械精度的模糊可靠性分析[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(1): 8-11.  
Chen Shengjun, Jia Fang. Fuzzy reliability analysis of mechanical precision[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(1): 8-11. (in Chinese)
- [9] 赵新红,夏春燕,孙明宇. 基于 GPS 的高精度功角实时测量系统[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2007, 7(3): 13-16.  
Zhao Xinhong, Xia Chunyan, Sun Mingyu. High precision real time measuring system of power torque angle[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2007, 7(3): 13-16. (in Chinese)
- [10] Dong Xinyong, Liu Yunqi, Liu Zhiguo, et al. Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor[J]. Optics Communications, 2001, 192(3/6): 213-217.
- [11] Daniel Post. Developments in moire interferometry( for displacement measurement) [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 458-467.
- [12] Ryan Shayto, Brian Porter, Rodrigo Chandia, et al. Assessing the integrity of field devices in modbus networks[J]. International Federation for Information Processing, 2009, 290: 115-128.
- [13] Jesus Gonzalez, Mauricio Papa. Passive scanning in Modbus networks[J]. International Federation for Information Processing, 2007, 253: 175-187.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 51 页)

- [5] Boukas E.  $H_\infty$  control of discrete-time Markov jump systems with bounded transition probabilities[J]. Optimal Control Applications and Methods 2009, 30(5): 477-494.
- [6] Zhang L, Boukas E. Mode-dependent  $H_\infty$  filtering for discrete-time Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities[J]. Automatica 2009, 45(6): 1462-1467.
- [7] Gao J, Su H, Ji X, et al. Stability analysis for a class of neutral systems with mixed delays and sector-bounded nonlinearity[J]. Nonlinear Analysis: Real World Applications 2008, 9(5): 2350-2360.
- [8] Wei G, Wang Z, Shu H. Robust filtering with stochastic nonlinearities and multiple missing measurements[J]. Automatica, 2009, 45(3): 836-841.
- [9] Wang Z, Liu X. Exponential stabilization of a class of stochastic system with Markovian jump parameters and mode-dependent mixed time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control 2010, 55(7): 1656-1662.
- [10] Wang Z, Wang Y, Liu Y. Global synchronization for discrete-time stochastic complex networks with randomly occurred nonlinearities and mixed time delays[J]. IEEE Transactions on Neural Networks 2010, 21(1): 11-25.
- [11] Chen W H, Xu J X, Guan Z H. Guaranteed cost control for uncertain Markovian jump systems with mode-dependent time-delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control 2003, 48: 2270-2277.

[责任编辑: 严海琳]