

分布式控制系统在中性束注入实验中的应用

刘 胜, 汪永军, 宋士花

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 介绍了中科院等离子体所 HT-7 托卡马克装置上中性束注入 (NBI) 控制系统设计方案和实现方法。系统采用分级分布式结构, 由 PLC 时序控制单元、数据采集与处理单元、参数预设单元和真空与低温监控单元组成; 各单元采用网络通讯互联, 实现数据的传输和控制命令的执行。系统成功地应用于实验并获得理想的实验结果, 为中性束注入加热的稳态运行提供可靠保障。

关键词: 分布式控制; 网络通信; 托卡马克; 中性束注入

Application of Distributed Control System in Neutral Beam Injection Experiment

Liu Sheng, Wang Yongjun, Song Shihua

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The design and realization of control system of Neutral Beam Injection (NBI) for HT-7 tokamak are introduced. The system is multilevel and adopts distributed structure, consisting of PLC timing control unit, data acquisition and processing unit, parameter setting unit and monitoring unit of vacuum and low temperature; each unit is interconnected through internet to achieve data transfer and control command executing. The system has been applied successfully in experiment and get many ideal results, which also provides a guarantee for the reliable running of neutral beam injection.

Key words: distributed control system; network communication; tokamak; neutral beam injection

0 引言

中性束注入加热等离子体, 是提高托卡马克离子温度的一种有效方法^[1]。大功率中性束注入在核聚变研究装置的等离子体加热、磁约束改善、无感电流驱动及加料方面均占有重要地位, 国际上的托卡马克实验装置实验中, 它是最有效的加热手段。设计应用于国家超导托卡马克装置 HT-7 上的中性束注入的控制系统, 控制着整个系统的开始、结束, 电源的供给及其幅值和时序关系等, 还起着对系统的数据的采集和状态的实时监控。

1 中性束注入简介

HT-7 中性束注入系统的主体结构如图 1 所示, 它主要由离子源、中性化室、主真空室、偏转磁铁、漂移管道、真空系统、束能测量装置和各部分电源系统等组成。它是利用由离子源引出的一束高能离子, 进入中性化室与气体分子相互作用, 使其中的一部分转化为高能中性粒子束, 然后经漂移管道输送到 HT-7 装置对等离子体进行加热。

2 中性束注入实验对控制系统的要求

实验对控制系统的要求主要包括对各子系统的启动、离子源等离子体放电前的真空充气、电源系统的投入、放电过程中磁场位形的建立和等离子体电流产生与束引出等的控制。

(1) 目前, 世界上中性束注入装置都是脉冲运行的, 实验脉冲持续时间为几十毫秒至数秒; 脉冲间隔大约为 5~60 min,

脉冲期间和脉冲之外的运行方式是截然不同的。放电脉冲之外的连续过程是个非常慢的控制过程, 如真空和温度的监测。因此系统中快慢过程的控制需要有个很好的协调。

(2) 由于 HT-7 装置放电时有多个子系统同时投入, 高频电磁干扰非常严重, 严重时会使某个子系统误动作, 因此必须在软硬件上采取一系列有效的措施来解决电磁干扰问题。

(3) 良好的人机界面可对控制系统的运行状态提供必要的监视手段, 以便及时发现故障, 节约有效的实验运行时间和减少实验人员的劳动强度。

(4) 实验中控制系统应提供设备安全操作范围, 如为了满足物理实验的需要, 必须进行实时安全巡检和设立多级保护措施, 以尽可能避免损坏真空室部件、离子源等事件的发生。

3 系统总体构成

该控制系统采用分级分布式计算机控制^[2], 如图 2 所示。

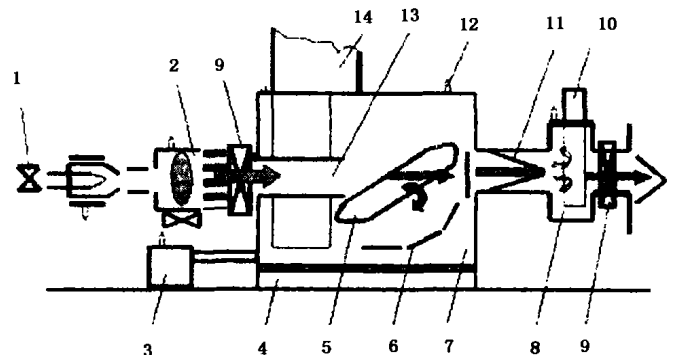


图 1 中性束注入系统结构图

收稿日期:2004-12-12; 修回日期:2005-01-07。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10305013)

作者简介:刘胜(1972-),男,安徽省桐城市人,工程师,主要从事核聚变装置控制系统的设计和实验研究。

1. 进气阀 2. 离子源 3. 预抽系统 4. 支撑架 5. 偏转磁铁 6. 离子收集板
7. 主真空室 8. 漂移室 9. 快速隔离阀 10. 2 万升低温泵
11. 量热计 12. 真空计 13. 中性化室 14. 40 万升低温泵

实验前由上位机发出信号，通过局域网，将用户设置的参数发送至下位机进行参数预设，实验准备就绪后，等待托卡马克触发信号（Start 信号），系统一旦被触发，下位机就按照内部工作流程运行，同时相关数据通过网络传到上位机，进行实时监控保护和绘制采集参数波形并作数据库备份。它包括 PLC 时

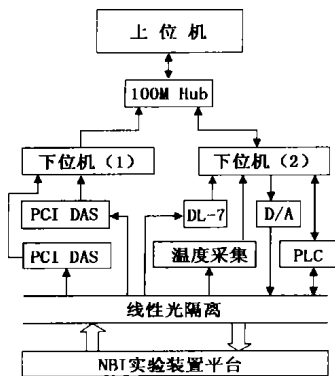


图 2 中性束注入控制系统硬件结构图

序逻辑控制单元，数据采集与处理单元，低温和真空压力监控单元以及网络通讯等。控制系统的设计主要是基于 WINDOWS 环境下通过 PC 机、研祥工控机（IPC）、PLC 及板卡硬件来实现多种运行模式下的过程控制，程序采用模块化结构。上位机设计是网络服务器端，下位机负责控制策略和控制功能的实现，计算机通过特定的设备与被控对象联系，实时接收控制对象的信息，经 CPU 处理后产生控制指令，实现对被控对象的控制。

3.1 PLC 时序控制单元

采用 CPM2A 型号继电器输入输出的 PLC，可外接 3 个扩展模块，内置 RS232C 端口简化了同串口设备的连接。CXP 程序^[3]是 OMRON 公司的 PLC 编程工具，该软件可在 Win2000 环境下运行，可对 CPM2A 型号的可编程序控制器进行编程与调试。根据控制的需要通过 CXP 软件开发梯形图应用程序，在编程工作模式下通过串口下载到 PLC，PLC 有内置的 EPROM 可以存贮用户程序。PLC 具有 HOSTLINK 模块，通过 RS232 串口直接与上位计算机相连，在上位机的监控界面实时监控 PLC 输入输出状态，操作人员可以从上位机通过网络对 PLC 运行参数进行修改。整个控制系统开关量以 PLC 为控制核心，实验现场与控制室之间通过隔离高压 60 kV 的光纤耦合隔离连接，并且控制室内的上位工控机及 PLC 供电也采用隔离电源，以与现场装置接地完全隔开，如图 3 所示。

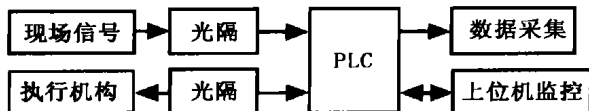


图 3 控制单元原理图

PLC 通过内置定时器定时完成控制流程，分别有 1 ms、10 ms、100 ms、1 s、10 s 不同档次的定时精度，定时器号从 000~256。根据实验精度要求，控制系统主要使用 10 ms 时钟脉冲。PLC 通电启动并使之处于运行工作模式，开始扫描输入点状态，当满足状态要求且 Start 信号位状态为 ON 时，开警报，并以这个时刻为零时刻，根据脉冲参数的设置依次控制

各部分动作。直到最后所有的开关为 OFF 状态，关警报。整个程序运行完毕，PLC 继续扫描，直到等待状态满足则将运行下一次主程序。对于中性注入器电源系统的过流过压等硬件保护信号，PLC 控制器提供了 4 个中断输入点，分别为 0003，0004，0005，0006。中断方式有两种，一种为立即中断，即当相应的中断输入点为 ON 时立即进入中断子程序；另一种为计数中断，即当相应的中断输入点为 ON 达到一定次数后进入子程序。条件满足则停止主程序运行，转而运行中断子程序。

3.2 数据采集与处理单元

选用 ADLINK 公司的 PCI9112 型数据采集卡，具有 12 位模拟量输入分辨率、最高 110 kHz 采样频率和通道自动扫描等特性。该采集卡提供单端输入和差分输入两种模式，单端输入模式可以同时满足 16 路模拟信号的测量，差分输入模式可以同时满足 8 路模拟信号的测量。在误差允许的范围内，为节约成本，本系统采用单端输入模式。经线性光隔离对被测信号进行取样，将电平值控制在 0~10 V 内。实验时，装置上的弧流、阳极电压、灯丝电流、气阀电压等信号经过 A/D 转换以数字量的形式将数据保存在本地计算机的硬盘上，同时把数据通过网络传送到主控计算机，硬件设计如图 4 所示。

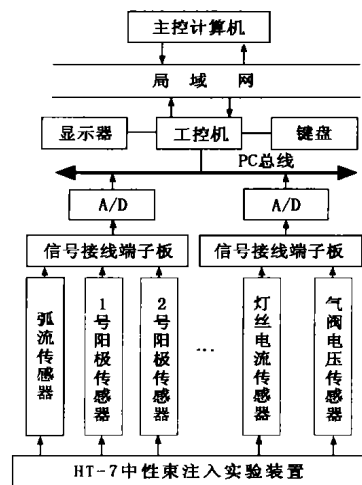


图 4 数据采集硬件结构图

在 Windows2000 平台上，用 VC++6.0 进行编程，为了满足长时间高速数据采集，系统采用了采集卡的双缓冲编程模式，双缓冲模式编程比单缓冲模式要复杂，单缓冲模式采集的时间取决于系统初始分配的缓冲区大小和机器可用内存的大小，双缓冲模式实际上是一个缓冲区被逻辑上分为相等的两部

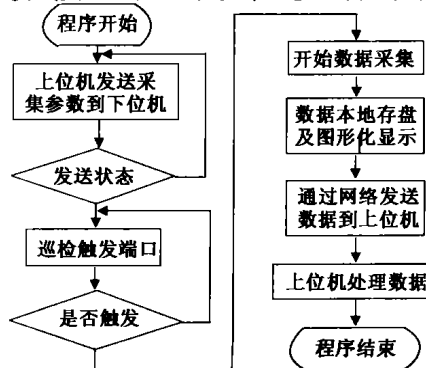


图 5 程序流程简图

分, 采集的数据以 DMA 方式先存储在第一部分, 第一部分满后, 再将数据存储在第二部分, 这时可以将第一部分的数据存入硬盘, 待第二部分满后, 系统将采集的数据再存入第一部分并覆盖原来的数据, 这样采用缓冲区循环利用的方式, 达到了长时间、高速数据采集。中性束注入装置数据采集系统 (PCIDAS) 的程序流程简图如图 5 所示。采集系统首先要进行采集参数初始化, 把用户在主控计算机上设置的采集时间、采集频率、采集信号名、单位、放大倍数、炮号等参数以文件的形式发送到现场的采集计算机上, 然后采集计算机巡检触发端口, 确定触发信号是否到来, 该触发信号由 PLC 来控制, 触发后开始数据采集。由于系统是多个采集卡同时工作, 所以采用多线程的编程方式, 多个采集卡并行工作, 满足多路信号的测量。采集完成后进行数据存盘, 再用 GT-7 画图软件 (中科院等离子体开发, 应用于等离子体物理实验) 将数据图形化, 然后发送数据到上位机, 上位机可以对数据进行处理和图形显示等一系列操作。

3.3 参数预设单元

参数预设采用阿尔泰公司的两块 BH5010 D/A 板卡, 每块有 8 路输出, 使用 ISA 总线结构, 两块 D/A 卡在工控机中是以板卡的基地址来区分的, 第一块设为 300H, 第二块设为 280H。D/A 卡接受用户的输入后, 先将用户输入值转换至 0-10 范围, 然后再进一步把值转换为二进制, 通过写 D/A 卡的每一个通道, 就达到了输出模拟量的效果了, 这样, 每块卡 8 个通道, 循环 8 次就可以完成, 而这一切动作可在瞬间完成。用户只需要在上位机 D/A 参数设置界面中, 输入实际的电压或电流值, 通过网络传送到下位机上, 下位机再将数值转换为 D/A 卡上的模拟电压值, 经线性光隔离输送到装置现场, 实现实验参量预设。

3.4 网络通讯模块

该模块有两部分, 包括服务器端和客户端, 采用的是 Internet TCP/IP 通信协议, 利用 VC++6.0 提供的 Socket 通信接口, 完成数据的采集和网络的传输^[4]。VC++ 提供的网络通信平台有 CAsyncSocket (异步套接字) 和 Csocket (同步套接字) 两个类。这里根据需要, 两个类均被使用, 同步套接字提供了侦听的功能, 一直等待, 直到有连接请求。异步套接字提供接收数据功能, 有数据立即接收, 没有也直接返回。服务器端提供侦听, 接收连接和发送、接收数据等服务, 客户端提供建立和服务器的连接, 发送和接收数据等服务。系统运行时, 首先让服务器端运行, 处于侦听状态, 等待客户端的连接, 最多可以同时连接 5 个客户端, 若客户端发出连接请求, 服务器端对连接请求进行判断, 符合要求, 则接受。这样客户端和服务端就建立了连接, 可以进行数据的发送和接收了。服务器端接收到数据以后, 对数据进行处理, 若是 A/D 卡采集的数据, 可以执行存盘操作, 若来自 PLC, 可以进行状态显示与处理等。该系统子网与外部局域网的连接由光纤发送和接收来实现, 采用隔离电源供电, 确保控制系统与外部接地完全隔离。

3.5 真空与低温监控单元

真空压力与低温温度监控集数据采集、状态监测与控制保护于一体, 属于慢过程连续控制, 如图 6 所示。一般情况下将各时刻的温度和真空数据经采集后存盘并显示, 为分析研究中性束注入真空系统提供了必需的资

料, 当真空压力不满足实验条件或异常, 监控单元就以开关量输出作为 PLC 输入巡检或中断保护, 及时停止实验并作出相应处理。

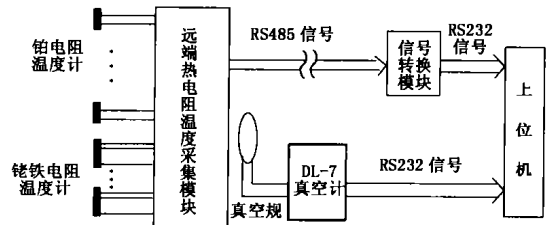


图 6 真空与低温数据采集结构图

在真空室内达到高真空的有效方法就是采用低温冷凝泵, 相对其他大容量的排气系统, 它具有几何尺寸小、理论抽速大的优势, 可以使除氦以外的气体冷凝成固态, 从而达到抽除气体和净化空间的目的。低温冷凝泵在氮人形挡板降温达到 77K, 氮冷屏工作达到 4.2 K 时, 对真空室内温度以及真空度变化过程的测量, 采用了多点数据的远距离采集与处理方法。低温泵冷板热电阻温度传感器采用三线恒流驱动方式的测量原理, 数据采集模块可以采集多达 16 路的热电阻信号, 这里选取 MAX132CNG A/D 转换芯片进行 18 位双积分模数转换, 可直接对 0~512 mV 的信号进行处理, 分辨率达 2μV/bit, 同时采用了光电隔离技术, 使模块的抗干扰能力进一步增强。数据采集模块的输出通过 RS485 接口和总线传输 (其传输距离可达 1200 m), 然后经 RS232 转接, 与其上位机进行实时通讯,

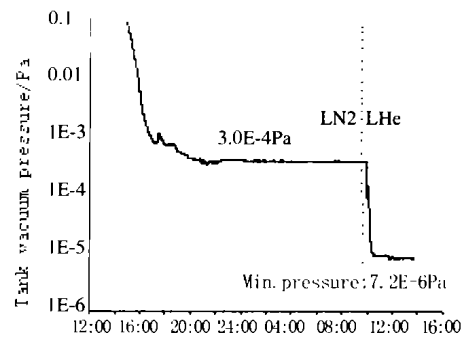


图 7 低温冷凝泵运行中真空度变化曲线图

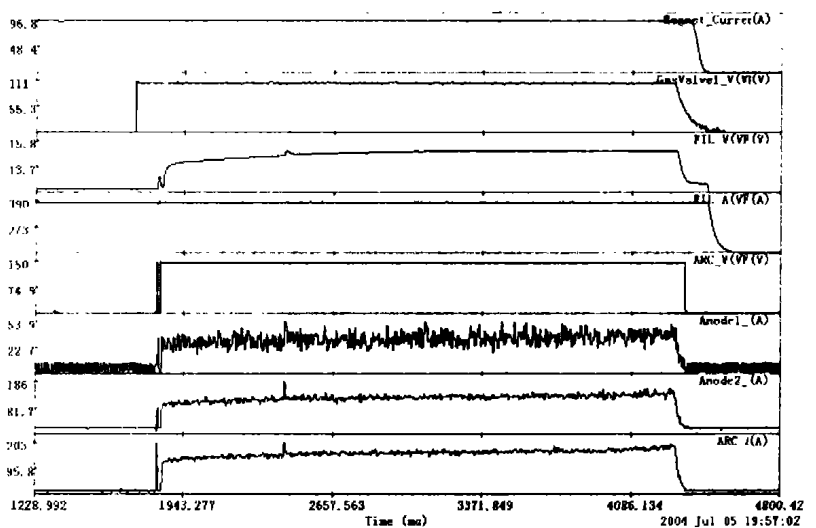


图 8 放电波形图

(下转第 451 页)

2.3 对参数及控制规则的混沌优化算法

本文根据控制系统的有关性能指标信息在规范化的参数域中 ($[-1, 1]$ 区间), 采用基于模拟退火策略的混沌优化算法对量化因子 K_{e1} 、 $K_{\alpha 1}$, 比例因子 K_{u1} , 控制规则修正因子 α 进行在线寻优, 使得系统对应某一状态获得最优参数值, 实现对预焙铝电解控制系统的有效控制。

混沌优化算法的基本步骤如下:

Step1: 模糊控制器中待确定参数数目为 4 个, 在 $(0, 1)$ 区间随机选取 6 个不同的初始值, 分别代入 Logistic 映射, 则可得 4 个混沌轨道变量;

Step2: 将 4 个混沌变量分别代入模糊控制器参数量化因子 K_{e1} 、 $K_{\alpha 1}$, 比例因子 K_{u1} 和控制规则修正因子 α 中, 根据式 (3) 计算相应的系统性能指标 J , 从 N 个系统性能指标中找到最小值, 其对应的模糊控制器参数值即为次优解;

$$\begin{cases} J = \min \left[\alpha \sum_{k=0}^l |e(k)| k / \max(|e(k)|) + b\sigma \right] \\ \text{约束条件:} \\ 0 < K_{e1} < 1, 0 < K_{\alpha 1} < 1, 0 < K_{u1} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中 σ 表示百分制的超调。对于这种目标函数, 当系统在阶跃输入时, 具有响应快、超调量小、选择性好等优点。

Step3: 将 4 个参数次优解分别代入式 (4) 和 (5), 产生 4 个新变量, 分别代入模糊控制器参数量化因子 K_{e1} 、 $K_{\alpha 1}$, 比例因子 K_{u1} 和控制规则修正因子 α 中, 并计算相应的系统性能指标 J ;

$$\hat{X}_{m,n}^* = X_m^* + z(t)X_n \quad (4)$$

$$m = 1, 2, 3, 4, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (4)$$

$$z(t+1) = (1-\gamma)z(t) \quad (5)$$

式中, X_m^* 为经过混沌粗搜索获得的参数次优解, X_n 为由 Logistic 映射得到的混沌变量且其吸引子域映射关于原点对称, γ ($0 < \gamma < 1$) 为时变参数 $z(t)$ 的衰减因子。

Step4: $i = i + 1$;

Step5: 根据式 (4) 计算 $z(t)$, 若 $z(t) \leq Q$ (搜索终止条件) 则转 Step6; 否则, 返回 Step3;

Step6: 找到系统性能指标的最小值, 其对应的模糊控制器参数值即为全局最优解。

3 控制效果

在某电解铝厂两台实验槽上采用上述基于混沌优化的模糊控制器进行电解质温度控制, 实验槽平均温度控制结果如图 3

(上接第 439 页)

从而实现计算机的数据采集与存储。对于真空度 DL-7 等真空计的测量也采取了类似的做法, 图 7 显示了中性化室在低温冷凝泵启动中的真空度变化过程。

4 实验结果

该控制系统自 2002-05 开始设计, 2003-10 完成了系统的工程联调并投入运行, 获得了稳定重复的离子源放电等离子体波形, 如图 8 所示。运用网络通讯技术, 采用分级分布式模式而完成的中性束注入控制系统设计, 它具有智能化、高精度、灵活可靠、界面友好及易于操作, 而且易于升级与扩容等

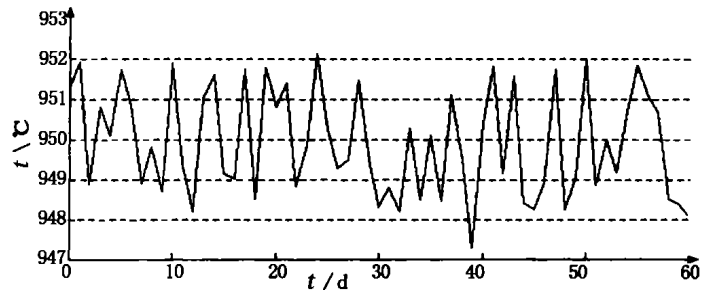


图 3 两台实验槽温度平均值示意图

所示。由图 3 可看出, 实验槽电解质温度平均值基本被控制在 $(950 \pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内, 温度波动较小, 控制精度达到了 0.21%, 控制效果令人满意。

4 结论

铝电解的生产过程, 既是一个复杂的物理化学过程, 又是多变量耦合、非线性时变过程。对于这种生产过程, 在无法得出精确数学模型的情况下, 采用智能模糊控制算法可以达到很好的控制效果。本文依据铝电解工业“四低一高”的最佳工艺条件的要求, 进行了基于 CAN 总线的预焙铝电解槽计算机控制系统总体方案的设计及基于混沌优化的电解质温度模糊控制器的研究。基于混沌优化的模糊控制器, 充分利用了混沌变量的遍历性及内在规律性, 既保证有较快的搜索速度, 又有很强的全局搜索能力。系统实际运行结果表明, 控制具有精度高、超调小、算法结构简单等特点, 为铝电解槽的全面稳定控制提供了一种有效的控制方案。

参考文献:

- [1] 殷恩生. 160kA 中心下料预焙铝电解槽生产工艺及管理 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2003.
- [2] 袁艳, 张泰山. 基于混沌优化的通用模糊控制器的研究与设计 [C]. 杭州: 第五届全球智能控制与自动化大会会议论文集, 2004. 6. 2523~2536.
- [3] 梁加山. 预焙铝电解槽智能模糊控制系统的研究与开发 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [4] 杨欣荣, 凌玉华. 软测量技术及其在铝电解槽温度测量中的应用 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2003, 34(5): 551-554.
- [5] 冯冬青, 谢宋和. 模糊智能控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [6] He S Z. Design of an on-line rule-adaptive fuzzy control system [A]. Proceeding of IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems [C]. San Diego, USA, 1992, 83-91.

特点, 满足了装置的物理实验。

参考文献:

- [1] 卢杰, 张集泉, 钟光武, 等. HL-1M 中性束注入期间离子温度的变化 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1999, 19(3): 189-192.
- [2] 刘胜. 中性束注入控制系统设计 [A]. 中国物理学会 2004 年秋季学术会议论文集 [C]. 太原: 山西大学, 2004.
- [3] OMRON. 可编程序控制器 CPM2A 编程手册 [Z]. 上海: 欧姆龙 (中国) 有限公司, 2002.
- [4] 方敏. 网络环境下的 C 编程技巧及实例 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.