

文章编号:1008-1542(2012)01-0056-05

## 智能变电站报文处理时延的不确定性研究

刘教民<sup>1,2</sup>, 赵建利<sup>2</sup>, 王震洲<sup>1</sup>, 孙 祎<sup>3</sup>

(1. 河北科技大学信息科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130; 3. 河北省电力研究院, 河北石家庄 050021)

**摘要:**基于 IEC 61850 标准, 采用多服务台串联排队理论建立变电站层主控单元(SMU)处理时延的数学模型, 研究由紧急情况下缓冲区出现排队现象引起的时延不确定性, 推导了缓冲区大小、丢包率和时延之间的解析表达式, 提出了满足丢包率和时延要求的缓冲区大小确定方法, 并通过实例进行了验证。克服了以往研究基于单 CPU 的 SMU 的局限性, 将含多 CPU 的 SMU 和 IED 作为整体考虑进行建模, 有效提高了 SMU 报文处理时延的确定性, 为 SMU 通信模块缓冲区的设计提供理论依据。

**关键词:**变电站层主控单元; 不确定时延; 缓冲区; 多服务台排队

中图分类号: TM73 文献标志码: A

## Uncertainty of delay caused by emergency of queuing up phenomenon in buffer of substation main unit

LIU Jiao-min<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-li<sup>2</sup>, WANG Zhen-zhou<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang Hebei 050021, China)

**Abstract:** Based on the standard of IEC61850, the paper constructed the mathematical model of SMU (Substation Main Unit) processing delay by using the multi-server queuing theory, researched into the uncertainty delay caused by the emergency of queuing up phenomenon in the buffer of SMU to derive the analytical expression between buffer size, packet loss rate and delay, and proposed the method verified by examples, which can determine the buffering area suitable for packet loss rate and delay. The research overcomes the limitation in the previous studies based on the SMU of single CPU and constructs the model by taking SMU of multi CPU and IEDs as a whole, which can improve the delay certainty effectively and provides theoretical evidence for the buffering sizes design of communication module of SMU.

**Key words:** substation main unit; uncertainty delay; buffer; multi-server queuing theory

随着基于以太网技术的数字化变电站系统逐步走向成熟, 遵循标准的不同厂家的智能电子设备 (IED, intelligent electronic device)<sup>[1]</sup> 都将接入变电站站控层以太网以实现真正意义上的信息共享, 变电站主控单元(SMU, substation main unit)与 IED 之间的报文传输也由传统的主/从“单主机模式”改为“多主机”事件驱动模式<sup>[2]</sup>, 提高了报文传输的实时性。然而在电网发生故障时, 会有多个 IED 同时向 SMU 发送大量报文, 引起报文在在单元缓冲处堆积甚至溢出, 从而产生不确定时延, 影响进一步的分析诊断和动作, 造成重大损失<sup>[3]</sup>。通过权衡丢包率、时延等性能指标合理设计 SMU 缓冲区大小将有效提高 SMU 报文处理时延的

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-11-18; 责任编辑: 李 穆

作者简介: 刘教民(1958-), 男, 河南西峡人, 教授, 博士, 主要从事智能控制方面的研究。

确定性。

报文的通信时延由网络传输时延和端节点处理时延构成,国内外基于 IEC 61850 标准对过程总线上 GOOSE 和 SAV 通信时延的理论分析与仿真较多<sup>[4-7]</sup>,对站控层报文的传输时延研究主要参照交换式工业以太网<sup>[8-10]</sup>,且以仿真分析为主。虽然文献<sup>[11]</sup>通过用排队论方法分析了站控层 SMU 对报文处理时延的不确定性,但其分析的报文没有优先级,且忽略了网络应用的多样性和复杂性等问题。

笔者基于 IEC 61850 标准,采用多服务台排队理论建立变电站层 SMU 报文处理时延的数学模型,研究由紧急情况下缓冲区出现排队现象引起的时延不确定性。将含多 CPU 的 SMU 和 IED 作为整体考虑进行建模,研究 SMU 缓冲区大小与丢包率、时延等性能指标间的解析关系和提高 SMU 报文处理时延确定性的方法,并通过与实际系统测试实验得到的结果进行对比分析。

## 1 多服务台排队理论

排队论<sup>[12]</sup>是运用概率论和数理统计解决排队问题的常用手段,合理的排队模型可以准确地描述服务系统的性能,为系统各项参数设置提供理论依据。1 个排队系统通常包含 3 个部分:到达过程、排队规则和服务方式,一般用 4 个符号组成形如 1/2/3/4 来表示。1 表示数据到达的间隔时间分布;2 表示服务时间分布;3 表示服务台的数目;4 表示系统的排队容量,如果省略 4 则表示容量无限。例如 M/M/r/N 排队系统指该系统中顾客的到达时间间隔服从泊松分布;服务时间服从指数分布;有 r 个服务台;队列的容量为 N。

在 M/M/r/N 排队系统中<sup>[13-14]</sup>,顾客的到达是强度为  $\lambda$  的 Poisson 过程,每个服务台的服务时间  $s_n$  相互独立,且都服从参数为  $\mu$  的指数分布。当系统中有 j 个顾客,如果  $j \leq r$  时,这 j 个顾客都在接受服务,在长度为 h 的时间间隔内有 1 个顾客服务结束的概率为  $j\mu h + o(h)$ ,有多于 1 个顾客服务结束的概率为  $o(h)$ ,没有顾客结束服务的概率为  $1 - j\mu h + o(h)$ 。如果  $j > r$ ,在长度为 h 的时间间隔内有 1 个顾客服务结束的概率为  $r\mu h + o(h)$ ,有多于 1 个顾客服务结束的概率为  $o(h)$ ,没有顾客结束服务的概率为  $1 - r\mu h + o(h)$ 。顾客到达时,有服务台空闲则立即接受服务,否则参加排队,且按照 FIFO 规则。用  $X(t) (t \geq 0)$  表示在时刻 t 系统中的顾客数,根据  $X(t)$  的 Q 矩阵求得一组平稳分布如下:

记为

$$\rho = \frac{\lambda}{r\mu}, \rho_1 = \frac{\lambda}{\mu}, \pi_0 = \left[ \sum_{j=0}^{r-1} \frac{\rho_1^j}{j!} + \frac{\rho_1^r}{r!} \frac{1 - \rho^{n-r+1}}{1 - \rho} \right]^{-1}, \text{也即系统处于稳态时闲置的概率。}$$

$$\pi_j = \frac{\rho_1^j}{j!} \pi_0, 1 \leq j \leq r,$$

$$\pi_j = \frac{r^r}{r!} \rho^j \pi_0, r < j \leq n。$$

由此算出下面几个系统稳态时的运行参量:

1) 系统中顾客(包括正在接受服务和排队等候)的平均数为

$$L_s = \rho_1 - \frac{\pi_0 \rho_1^{r+1} \rho^{n-r}}{r!} + \frac{\pi_0 \rho_1^r [1 - (n-r+1)\rho^{n-r} + (n-r)\rho^{n-r+1}]}{r!(1-\rho)^2}。$$

2) 顾客在系统中逗留时间(包括排队等候和接受服务)的平均值为

$$W_s = \sum_{j=0}^{n-1} E(\text{顾客在系统中逗留的时间,系统中有 } j \text{ 个顾客}) \frac{\pi_j}{1 - \pi_n} =$$

$$\frac{1}{\mu} \left[ 1 + \frac{\pi_0 \rho_1^r [1 - (n-r+1)\rho^{n-r} + (n-r)\rho^{n-r+1}]}{r! (1-\rho)^2 (1 - \pi_n)} \right]。$$

## 2 基于 MMAP 的变电站层传输时延分析

考虑到 SMU 与 IED 之间的报文传输对时延确定性的要求是软的,只是需要概率保证,允许一定程度的延迟和报文丢失。因而,在主控单元报文处理时延不确定性的研究中,引入排队理论是一种有效的方法。IED 通过网络访问 SMU 的过程可看作是一个排队系统,IED 为顾客,SMU 为服务机构。在变电站级网络中 IED 数量急剧增加,主控单元 SMU 的通信模块需要具有强大计算能力处理大量电网运行及事故信息,一种可行方案是采用多 CPU 来完成网络通信功能。

### 2.1 SMU 报文接收流程

SMU 报文处理过程分为以太网控制器 NIC 实现的外部硬件中断  $P_{NIC}$ 、软中断处理部分  $P_{ptl}$  以及 MMS 处理部分  $P_{APP}$ 。如图 1 所示, 报文到达 SMU 通信模块时, 首先进入其以太网控制器 NIC 的 FIFO 物理缓存队列  $Q_1$ , NIC 向 CPU 发硬中断告知报文已经到达, 在硬中断服务程序中  $P_{NIC}$  将 NIC 缓存队列队首数据去掉首部和尾部的控制信息、放入内核的接收缓存  $Q_2$ , 这个过程优先级最高, 一般不会被其他处理过程中断;  $P_{ptl}$  对  $Q_2$  中的报文按照 FIFO 原则根据 RTOS 中的 UDP/IP 协议栈要求, 利用软中断服务程序进行数据检验、解码、剥去控制信息等处理, 放入  $Q_3$ ; 最后  $P_{APP}$  根据 ASN.1 对  $Q_3$  中的报文按照 FIFO 原则进行解码并提供 MMS 服务。



图 1 SMU 报文接收流程

Fig.1 Procedure of receiving messages of SMU

### 2.2 SMU 报文接收的多服务台排队模型

在建立 SMU 报文接收的排队模型时, 需要考虑以下特点。

1) SMU 通信模块的各队列长度是有限的, 服务规则为 FIFO。

2) IED 向 SMU 传输的报文到达时间间隔相互独立, 单位时间内报文到达次数服从参数为  $\lambda$  的泊松分布, 有  $P(N = n) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!}, n = 0, 1, \dots; \lambda$  为报文到达率。

3) SMU 配置  $M$  个 CPU,  $P_{NIC}, P_{ptl}$  和  $P_{APP}$  共享  $M$  个 CPU 计算能力。每个 CPU 为报文提供的服务时间相互独立, 不失一般性, 假设服从指数分布:

$$f(x) = \begin{cases} \mu_i e^{-\mu_i x}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

参数  $\mu_i$  为第  $i$  个 CPU 的服务率。

根据以上特点和 SMU 报文处理过程, 建立图 2 所示的 SMU 报文处理的串联排队网络模型。

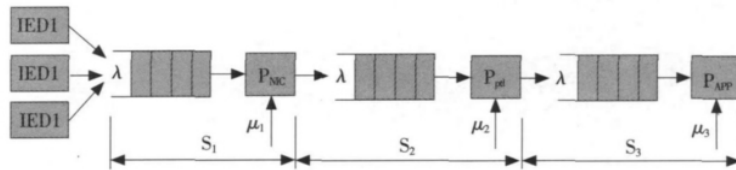


图 2 SMU 处理报文的串联排队网络模型

Fig.2 Series queuing network model of processing messages of SMU

该模型由 3 个服务子系统  $S_1, S_2, S_3$  组成, 分别对应  $P_{NIC}, P_{ptl}$  和  $P_{APP}$ 。假设  $S_1$  的服务率为  $\mu_1$ , 缓冲区大小为  $N_1$ ;  $S_2$  的服务率为  $\mu_2$ , 缓冲区大小为  $N_2$ ;  $S_3$  的服务率为  $\mu_3$ , 缓冲区大小为  $N_3$ 。假定每个子系统节点的输入都是参数为  $\lambda$  的泊松流, 且各缓冲区的长度相互独立。 $S_1$  的优先级最高,  $S_2$  和  $S_3$  的优先级相同,  $S_1$  可以无条件地抢占服务台,  $\mu_2$  和  $\mu_3$  都是在独占服务台情况下的服务率。图 2 中 3 个串联队列是相互独立的, 在重载情况下每个子系统都是一个  $M/M/r/N$  的排队系统, 可进行单独分析, 而 SMU 处理报文的总平均时延为 3 个串联队列平均时延之和。SMU 的可靠性为 3 个串联队列可靠性之积, 令  $\pi_{SMU}$  为由于 SMU 缓冲区溢出而引起的报文丢失率, 则 SMU 的可靠性可定义为  $1 - \pi_{SMU}$ 。

### 2.3 解析关系分析

$S_1$  可以无条件地抢占服务台, 所以它的处理不受  $S_2$  和  $S_3$  的影响。令  $\rho = \frac{\lambda}{r\mu_1}, \rho_1 = \frac{\lambda}{\mu_1}$ , 则  $S_1$  处于空闲状态的概率为

$$\pi_{01} = \left[ \sum_{j=0}^{r-1} \frac{\rho_1^j}{j!} + \frac{\rho_1^r}{r!} \frac{1 - \rho^{N_1 - r + 1}}{1 - \rho} \right]^{-1}, \tag{1}$$

而  $S_1$  忙的概率为  $\pi_{\text{busy}} = 1 - \pi_{01}$ 。

根据  $M/M/r/N$  排队理论,  $S_1$  在统计平稳状态下的概率  $\pi_k$  为

$$\pi_{k1} = \begin{cases} \frac{\rho_1^k}{k!} \pi_{01}, & 1 \leq k \leq r, \\ \frac{k^k}{k!} \rho^k \pi_{01}, & r < k \leq N_1. \end{cases} \tag{2}$$

一般情况下  $r$  远远小于  $N$ , 当  $S_1$  中已有  $N_1$  个报文时, 新到达的报文将被丢失。根据式(1)和式(2),  $S_1$  的报文丢失率为

$$\pi_{N_1 1} = \frac{N_1^{N_1}}{N_1!} \rho^{N_1} \pi_{01}. \tag{3}$$

报文在  $S_1$  中的平均逗留时间为

$$W_{S1} = \frac{1}{\mu_1} \left[ 1 + \frac{\pi_{01} \rho_1^r [1 - (N_1 - r + 1) \rho^{N_1 - r} + (N_1 - r) \rho^{N_1 - r + 1}]}{r r! (1 - \rho)^2 (1 - \pi_{N_1 1})} \right]. \tag{4}$$

$S_2$  和  $S_3$  的运行情况相似。在系统重载时, CPU 经常被  $S_1$  占用,  $S_2$  和  $S_3$  的实际服务率  $\mu_{2r}, \mu_{3r}$  要远小于  $\mu_2, \mu_3$ 。单位时间内,  $S_1$  对  $r$  个服务台的占用率为  $\pi_{\text{busy}}$ ,  $S_2$  和  $S_3$  的占用率为  $\pi_0$ , 假定其平分这一部分的占用率, 则  $S_2$  的实际服务强度为

$$\mu_{2r} = \frac{1}{2} \pi_{01} \mu_2 = \frac{1}{2} \left[ \sum_{j=0}^{r-1} \frac{\rho_1^j}{j!} + \frac{\rho_1^r}{r!} \frac{1 - \rho^{N_1 - r + 1}}{1 - \rho} \right]^{-1} \mu_2. \tag{5}$$

$S_2$  的闲置状态概率为

$$\pi_{02} = 1 - \frac{\lambda}{\mu_{2r}}. \tag{6}$$

令  $\rho_2 = \frac{\lambda}{r \mu_{2r}}, \rho_{2r} = \frac{\lambda}{\mu_{2r}}$ , 根据式(2),  $S_2$  的报文丢失率为

$$\pi_{N_2 2} = \frac{N_2^{N_2}}{N_2!} \rho_{2r}^{N_2} \pi_{02}. \tag{7}$$

报文在  $S_2$  中的平均逗留时间为

$$W_{S2} = \frac{1}{\mu_{2r}} \left[ 1 + \frac{\pi_{02} \rho_{2r}^r [1 - (N_2 - r + 1) \rho_2^{N_2 - r} + (N_2 - r) \rho_2^{N_2 - r + 1}]}{r r! (1 - \rho_2)^2 (1 - \pi_{N_2 2})} \right]. \tag{8}$$

同理, 可计算出  $S_3$  的相关参数。

由上述分析可知, SMU 的报文处理总时延  $W_{\text{SMU}}$  和报文丢失率  $\pi_{\text{SMU}}$  为

$$W_{\text{SMU}} = W_{S1} + W_{S2} + W_{S3}; \tag{9}$$

$$\pi_{\text{SMU}} = 1 - (1 - \pi_{N_1 1})(1 - \pi_{N_2 2})(1 - \pi_{N_3 3}). \tag{10}$$

下面给出求解 SMU 通信缓冲区大小的方法:

- 1) 根据智能变电站通信系统时延的确定性要求, 确定报文丢失率和各子系统的性能指标;
- 2) 根据具体配置环境报文传输特点, 确定报文到达率  $\lambda$ ;
- 3) 确定各子系统的相关参数, 如服务率  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  等;
- 4) 根据上述公式联立求解满足 SMU 通信模块性能要求的缓冲区大小  $N_1, N_2$  和  $N_3$ 。

### 2.4 报文到达率和 SMU 服务率的确定

本文侧重于研究系统重载时的各项性能指标。在智能变电站网络层, 突发报文通常采用 UDP/IP 协议传输。根据文献[15], 发生严重多重故障时报文到达率  $\lambda$  可表示为

$$\lambda = (8\% \times \text{测量值数目} + 3\% \times \text{状态量数目}) / s. \tag{11}$$

$\mu_i (i=1, 2, 3)$  受 CPU 处理能力的约束。设 CPU 处理能力为  $C_p$  (单位: 指令/s), 硬中断服务程序长度为  $L_H$ , 软中断协议处理程序长度为  $L_S$ , 应用层数据处理的程序长度为  $L_A$ , 则有如下不等式成立:

$$L_H \mu_1 + L_S \mu_2 + L_A \mu_3 < r C_p. \tag{12}$$

$\mu_i (i=1, 2, 3)$  值的选取应根据智能变电站系统配置及实际运行情况而定, 但需满足式(12)。

### 3 算例分析

下面以某 500 kV 智能变电站为例,在满足 SMU 通信性能要求下确定通信模块各缓冲区大小。该智能变电站站级网络共接入 60 台间隔屋测控装置(模拟量 2 400 点,开关量 6 000 点,保护动作事件 1 200 个),SMU 配置 4 个 CPU,各设备通过交换式以太网连接。求解过程如下。

1) 根据文献[16],500 kV 电压等级的智能变电站要求 SMU 通信模块的报文丢失率  $\pi_{SMU}$  小于 1%,根据式(10)解得各子系统报文丢失率的一组特解  $\pi_{N_1,1}=0.24\%$ , $\pi_{N_2,2}=0.46\%$ , $\pi_{N_3,3}=0.31\%$ 。

2) IEC 61850 中规定,突发报文的端到端传输时间应小于 100 ms,且 SMU 与 IED 的信息传输只要求概率保证的时延上界(只要求 95%的报文传输时间小于 100 ms),可假定报文的逗留时间小于 40 ms,由式(9)可得  $W_{S_1}=1.2$  ms, $W_{S_2}=16$  ms, $W_{S_3}=14$  ms。

3) 根据系统的各项配置得到实例中报文到达率  $\lambda=7\ 200\times 3\%+2\ 400\times 8\%=408$ 。

4) 根据式(12),计算出  $S_1$  的硬中断服务率  $\mu_1=1$  个报文/ms, $S_2$  的协议处理速率  $\mu_2=0.45$  个报文/ms, $S_3$  的应用处理速率  $\mu_3=0.65$  个报文/ms。

将有关参数代入式(3)、式(4)、式(7)和式(8),可得 SMU 通信模块的缓冲区大小  $N_1=10$ , $N_2=40$ , $N_3=30$ 。设 SMU 需要为 NIC 配置的物理缓存为  $Q_{NIC}$ ,为提供 UDP/IP 协议处理的 Socket 分配的接收缓存为  $Q_{ptl}$ ,为应用层 MMS 服务处理分配的缓存为  $Q_{APP}$ ,则有

$$Q_{NIC}=N_1\times L_{Ethernet}; \quad (13)$$

$$Q_{ptl}=N_2\times L_{UDP}; \quad (14)$$

$$Q_{APP}=N_3\times L_{Data}。 \quad (15)$$

式中: $L_{Ethernet}$  为以太网最长帧(1 518 B); $L_{UDP}$  为 UDP 报文最大长度(1 500 B); $L_{Data}$  为应用层数据包最大长度(1 436 B),计算得  $Q_{NIC}=15.2$  KB, $Q_{ptl}=60$  KB, $Q_{APP}=43.1$  KB。由于通信模块工作在全双工模式下,所以需同时设置接收缓冲区和发送缓冲区,所以应当选择内置 32 KB RAM 的 NIC,而 SMU 通信模块可选取 256 KB 的 RAM,由 RTOS 协议栈缓冲区和应用层 MMS 服务处理缓冲区共享。

笔者提出的理论计算是基于较理想状况,忽略了多处理机时进/线程调度中的时间损耗。

### 4 结 语

建立基于多服务台的串联排队网络模型、重点分析了智能变电站中主控单元接收报文的处理时延,这不仅拓展了智能变电站通信网络实时性能分析的研究内容,还为工程实践中 SMU 缓冲区的设计提供了重要理论依据。当然本文的研究也有一定的局限性,还是在单一类型报文条件下进行建模,而当前的应用要求核心处理单元提供混合负载访问的能力。下一步的工作将会结合复杂的网络应用,对具有不同优先级的多类报文等情况下的处理时延进行建模分析。

### 参考文献:

- [1] 韦宝泉,林知明.基于 ARM+DSP 的牵引变压器保护测控装置的设计[J].河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology),2010,31(3):219-221.
- [2] OZANSOY C R, ZAYEGH A, KALAM A. Communication for substation automation and integration[EB/OL]. [http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec02/FinalPapers/C\\_R\\_Ozansoy1.pdf](http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec02/FinalPapers/C_R_Ozansoy1.pdf).
- [3] 辛建波.基于以太网的变电站自动化系统时延不确定性研究[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [4] 段吉泉,段 斌.变电站 GOOSE 报文在 IED 中的实时处理[J].电力系统自动化(Automation of Electric Power System),2007,31(11):65-69.
- [5] 段建东,张保会.利用线路暂态行波功率方向的分布式母线保护[J].中国电机工程学报(Proceedings of CSEE),2004,24(6):7-12.
- [6] YALLA M, ADAMIAK M, APOSTOLOV A, et al. Application of peer-to-peer communication for protective relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,17(2):446-451.
- [7] SKEIE T, JOHANNESSEN S, BRUNNER C. Ethernet in substation automation[J]. IEEE Control Systems Magazine,2002,22(3):43-51.
- [8] GEORGES J P, DIVOUX T, RONDEAU E. Comparison of switched ethernet architectures models[A]. Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation[C]. Lisbon: Portugal,2003.375-382.

(下转第 78 页)

此外,由统计结果可知,按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)第 14.2.4 条确定岩土参数标准值的统计方法得到的复合地基承载力统计值很接近最小试验值。静载检测本身是通过小样本来推断总体,样本容量越小,可靠度越低。本实例样本容量较大,以统计方法得到的复合地基承载力统计值作为该复合地基承载力特征值是比较合适的。

#### 4 结 论

通过以上分析,可以得出如下结论。

1)可按式(1)初步估算复合地基承载力特征值,同时也要考虑当地经验,合理确定  $R_a, f_{sk}, \beta$ 。

2)通过对深圳某旋喷桩复合地基静载试验结果的统计特征进行分析,提出了在极差大于平均值 30% 的情况下,复合地基承载力特征值的取值可参照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)第 14.2 节(岩土参数的分析和选定)所推荐的方法进行统计计算。

3)用现场载荷试验确定复合地基承载力特征值时,试验与实际工程具有相同的桩土置换率是最理想的。但要做到这一点是很困难的,因此,可先采用标准的压板面积进行载荷试验,再按本文换算公式进行换算,进而得到相对合理的结果。

#### 参考文献:

- [1] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2003.
- [2] JGJ 79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 李 琴,张同贵. 粉喷桩复合地基承载力现场试验研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版)(Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)), 2006, 19(1): 76-78.
- [4] GB 50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [5] JGJ 106—2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [6] 马克生,梁仁旺,白晓红. 水泥搅拌桩复合地基承载力的试验确定[J]. 岩石力学与工程学报(Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering), 2004, 23(15): 2 652-2 654.

#### (上接第 60 页)

- [9] 张奇智,张 彬,张卫东. 基于网络演算计算交换式以太网中的最大时延[J]. 控制与决策(Control and Decision), 2005, 20(1): 117-120.
- [10] FALK H. Test methodologies, setup and result documentation for EPRI sponsored benchmark of ethernet for protection control[EB/OL]. <http://ftp.sisconet.com/epri/benchmrk/ethernet.zip>.
- [11] XIN Jian-bo, DUAN Xian-zhong. Study on method for determining the buffer size of communication module inside SMU on emergency [A]. IEEE-PES T&D 2003 Conference & Exhibition[C]. Dalian: [s. n.], 2005.
- [12] 史英英,李智慧,王建南. 具有灰色输入率的 M/M/1 排队系统[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(1): 8-10.
- [13] 刘建民. 多类顾客多服务台队列网络的高负荷极限量[J]. 数学的实践与认识(Mathematics in Practice and Theory), 2004, 34(1): 108-112.
- [14] SLEPTEHENKO A, HARTEN A van, HEIJDEN M van. An exact solution for the state probabilities of the Multi-Class, Multi-Server Queue with preemptive priorities[J]. Queueing Systems: Theory and Applications, 2005, 50(1): 81-107.
- [15] TR84. 0.02 Draft Technical Report. Network Based automation[R]. NC: Geneva, 2001.
- [16] PREISS O, WEGMANN A. Towards a composition model problem based on IEC 61850[J]. Journal of Systems and Software, 2003, 65(3): 227-236.