



## 仲裁网络结构的CPS通信模型 优化与性能分析

- ◆ 学生姓名：龚红仿
- ◆ 指导老师：李仁发教授
- ◆ 学科专业：计算机科学与技术
- ◆ 研究方向：嵌入式计算系统

2018年9月28日

# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• 研究背景与意义

二

• 研究现状及挑战

三

• 论文的主要工作

四

• 总结与展望

五

• 在读期间科研成果

六

• 致 谢



一

• **研究背景与意义**

二

• **研究现状及挑战**

三

• **论文的主要工作**

四

• **总结与展望**

五

• **在读期间科研成果**

六

• **致 谢**

# 一、研究背景与意义



1、信息物理系统(CPS)是集3C技术于一体的时空多维异构的混杂自治系统。

2、CPS动态行为必须通过有限的资源实现，如有限的通信带宽、有限的功率、有限的计算能力等等。

3、CPS中的控制动态与通信网络之间的集成研究问题常常归结为通信与控制协同设计。



# 一、研究背景与意义

## 研究背景

CPS特性：紧耦合性、热耗散与实时性、自适应性、异构性

背景 (1)

CPS关键技术：反馈控制与自适应控制、NCS和嵌入式控制系统

背景 (2)

CPS通信与控制集成方法——仲裁网络控制系统 (ANCS)方法

背景 (3)

# 一、研究背景与意义



## 背景 (3)

● **仲裁网络控制系统(ANCS)方法**应运而生，以强调所设计的控制系统中的网络调度(或仲裁)，其显著特征是共享通信介质的消息仲裁机制。由MIT的自适应控制实验室于2012年提出，设计了单信道ANCS，是通信与控制协同设计平台(图1.7)。我们称之为**仲裁网络结构**。

## 背景 (2)

● CPS中的反馈控制、自适应控制、共享通信网络的组件交互、资源受限的实时嵌入式控制系统等技术，存在稳定性与性能；自适应参数调节；网络诱导时延、抖动、丢包、同步；截止时间、功耗、升级、可靠性等问题，需要新的结构设计范型。

## 背景 (1)

● 尽管这些特性的解决方案已经存在，但是用一种可靠的理论基础将这些解决方案组合成CPS集成方法是一个挑战，包括网络协议、操作系统的兼容性、控制与实时计算系统的组合性能优化方法等。而且，控制器设计需要适应体系结构级的约束。

# 一、研究背景与意义

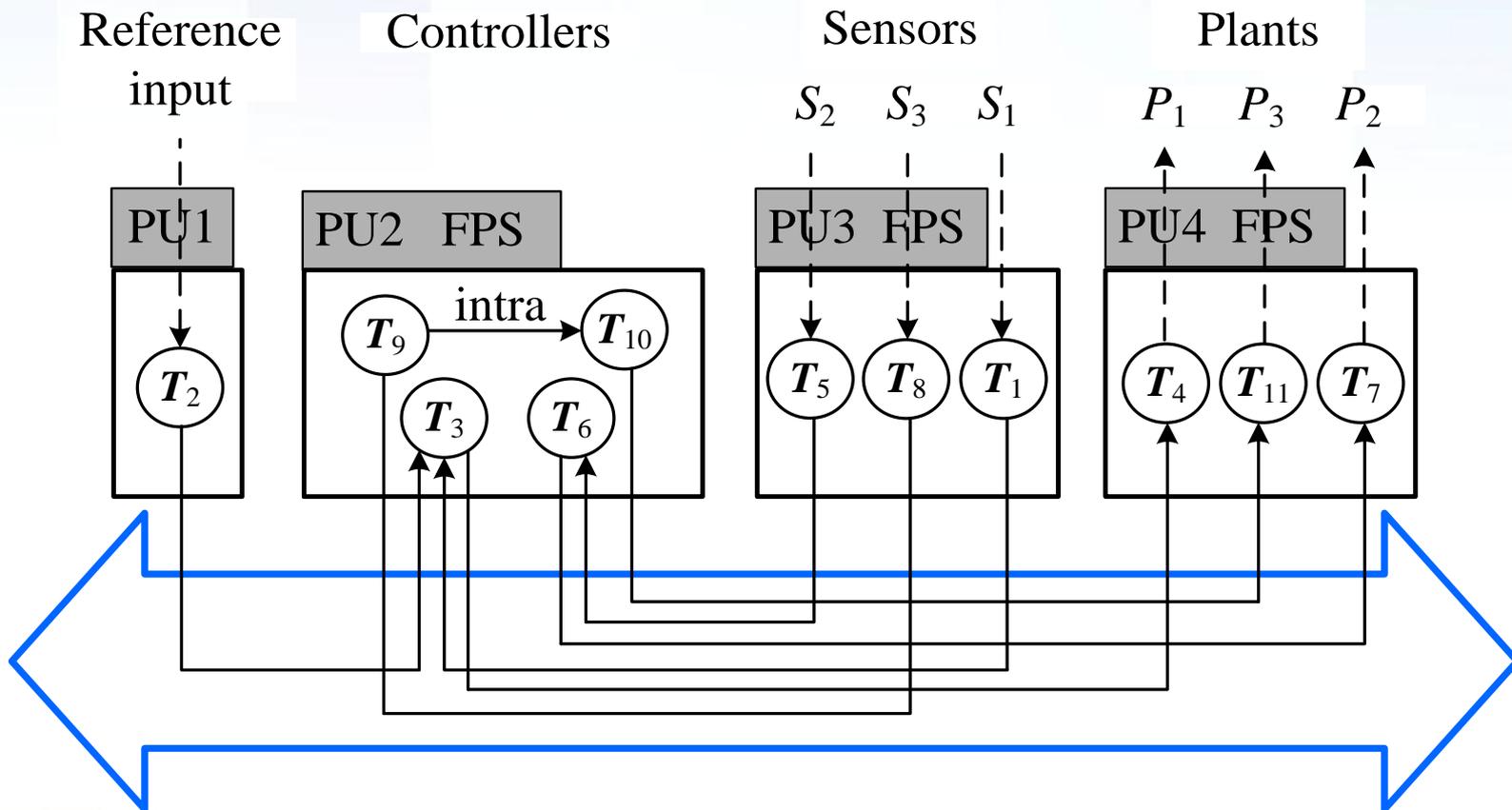


图1.7 具有三个分布式控制应用的系统体系结构<sup>[11]</sup>

# 一、研究背景与意义



汽车、列车、航空控制系统、工业自动化系统等常常是分布式嵌入式系统(DES), 有大量的处理单元(PU), 如传感器和执行器等, 并通过诸如CAN、LIN、FlexRay、以太网等进行通信。这种体系结构用于运行分布式控制应用(或通信模型), 常常受到多个控制质量(QoC)的约束[11]。这类CPS中内在的异构性和多样性使得系统非常复杂。给定这种CPS的分布式特性, 采用NCS的研究技术进行研究是很自然的。

# 一、研究背景与意义



●在**汽车体系结构中**，**网络设计问题**包括：**①映射控制任务到ECU；②确定ECU和总线的调度参数。**

●**控制器设计的总目标**是选择合适的**采样周期**和相关的**控制参数**，使得：**①控制功能是鲁棒的，且提供期望的性能；②在给定的资源约束下，所有的控制和其它任务与消息是可调度的。**

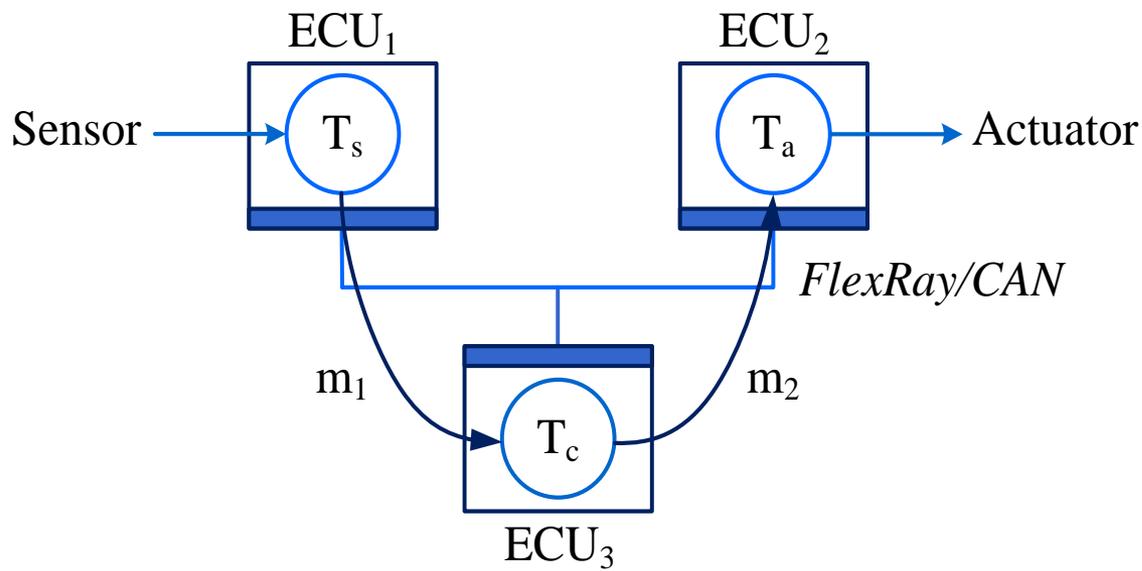


# 一、研究背景与意义

●网络与控制协同设计的问题包括依赖被控对象的网络参数选择、控制性能需求、控制器选择以及依赖于网络特征的控制器参数选择等。

●这种协同设计带来了新的挑战 and 机遇，既没有在NCS中研究，又不是嵌入式系统的研究范围。

●为了举例说明一个ANCS，我们考虑文献[11]中提出的典型的分布式嵌入式体系结构(如图1.6)。



(a) 任务分配

(b) 时延

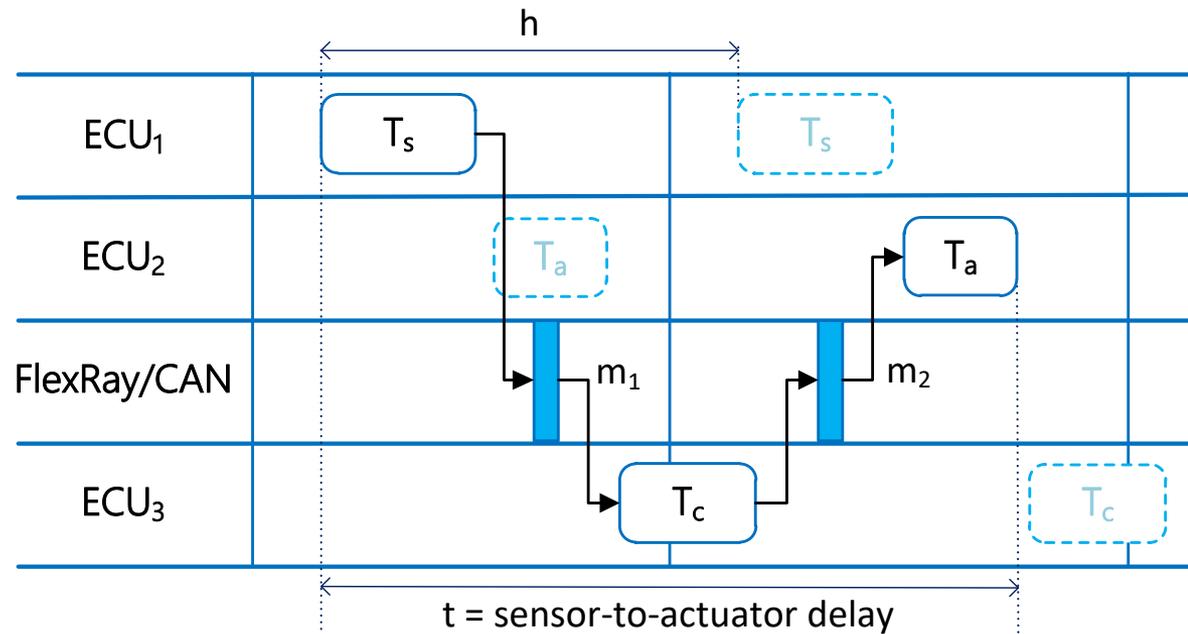


图1.6 一个典型的分布式嵌入式系统(DES)<sup>[11]</sup>



# 一、研究背景与意义

本文研究的问题：

1

● 改善系统性能、减少系统成本为目的的多控制器调度问题；

2

● 资源约束下的资源动态供应问题；

3

● 不确定端到端消息响应时间(MRT)问题。



# 一、研究背景与意义

## 本文研究意义:

协同设计是系统QoC与QoS的需要

协同设计是信息交互的实时性与准确性的需要

协同设计是系统集成学科发展的需要

协同设计是CPS应用领域不断增长的复杂性的需要

# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• **研究背景与意义**

二

• **研究现状及挑战**

三

• **论文的主要工作**

四

• **总结与展望**

五

• **在读期间科研成果**

六

• **致 谢**



## 二、研究现状及挑战

### 控制器调度

1

● 由TT协议产生的固定时延的控制器设计和总线优化调度合成问题[1,11,12, 22-25]

2

● 重新设计体系结构，以实现更好的控制性能 [1,11,12,74~93]

3

● 考虑ET控制系统的闭环性能和通信负载之间的折中，保证系统的稳定性[74, 85-92]

4

● 任务与通信组件的可调度问题[71, 73, 80]

◆ **问题：没有考虑ET协议下的控制器调度问题，以达到系统成本和性能之间的折中。**



## 二、研究现状及挑战

资源动态供应

1

● 资源优化供应[96-101]

2

● 成本感知的CPS资源供应 [35, 38, 102-107]

3

● 利用云平台、SDN的CPS资源供应[108-113]

4

● 考虑故障弹性(resilient)的CPS资源供应[114-118]

◆ **问题：没有考虑CPS中时间相关的弹性量化建模问题，也没有涉及到不同负载下系统成本和性能优化问题。**

## 二、研究现状及挑战



不确定时延

1

• 优先级和先进先出(FIFO)队列分析[47]

2

• 基于偏移的分析、可中止和不可中止的传输请求 [48, 49]

3

• ILP、概率模型[50-53]

4

• 基于DAG的启发式算法、实时演算[11], [18], [54,55]

◆ **问题：没有考虑消息生成与消息服务之间的关系；MRT的概率分布；每个消息的响应时间精确预测问题。**



## 二、研究现状及挑战

相关工作

1 控制与平台协同设计

2 资源竞争

3 时延问题

4 丢包问题

5 基于无源性的组合设计问题



## 二、研究现状及挑战

● **缺点：面向CPS设计，传统的设计流是将控制器设计及其实现解耦合，导致：①控制器与其实现平台间隙变大；②资源利用和控制性能的保守性设计。**

● **挑战一：控制设计挑战。依赖于：①较小的采样周期以改善控制性能；②较小的采样周期需要占用较高的计算和通信资源。**

● **挑战二：平台设计挑战。依赖于：①开发整个系统的调度方法；②体系结构设计空间探索方法和同步系统的调度方法的结合。**

# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• **研究背景与意义**

二

• 研究现状及挑战

三

• **论文的主要工作**

四

• 总结与展望

五

• 在读期间科研成果

六

• 致 谢

### 三、论文的主要工作



本文致力于研究仲裁网络结构中的CPS通信模型优化，关注CPS网络结构中通信与控制协同设计的建模问题，以改善系统性能、减少系统成本为目的，考虑控制器调度、资源动态供应以及不确定MRT的分析等问题。我们将排队论运用于系统建模与分析中，建立最优化模型，获得共享通信网络及控制器(ECU)的参数与系统性能指标。

# 三、论文的主要工作



本文创新点

1. 开发了一种新的双信道ANCS体系结构

2. 构建了一种 $N/(d, c)$ -M/M/c/K/SMWV排队系统

3. 提出了滞弹性定义及滞弹性量化计算模型

4. 构建了一种 $N/(d, c)$ -M/M/c/K/AMWV排队系统

5. 用连续时间M/PH/1排队系统建模ANCS, 计算每个消息响应时间的pdf和cdf闭式表达式

6. 提出了一种新的灰色预测模型(PTGM(1,1))



## (一) 控制器调度

- 随着CPS复杂性的持续增加，系统中的不均衡负载问题越来越凸显，甚至导致系统性能降低和能量损耗。为了改善系统性能，减少系统能耗，需要考虑体系结构级约束的新的控制设计范型。
- 在ANCS这一类特殊CPS中，基于分层建模理论和通信系统中的唤醒机制，设计了一种扁平半休眠多控制器(FSDMC)模型，以维护负载均衡，保持全局一致性。FlexRay支持ECU的总线驱动器(BD)的待机和休眠模式。
- 根据双信道的混合总线——星型拓扑结构(图2.4)，我们扩展文献[12]中提出的单信道ANCS系统为一种双信道ANCS。

# (一) 控制器调度——结构

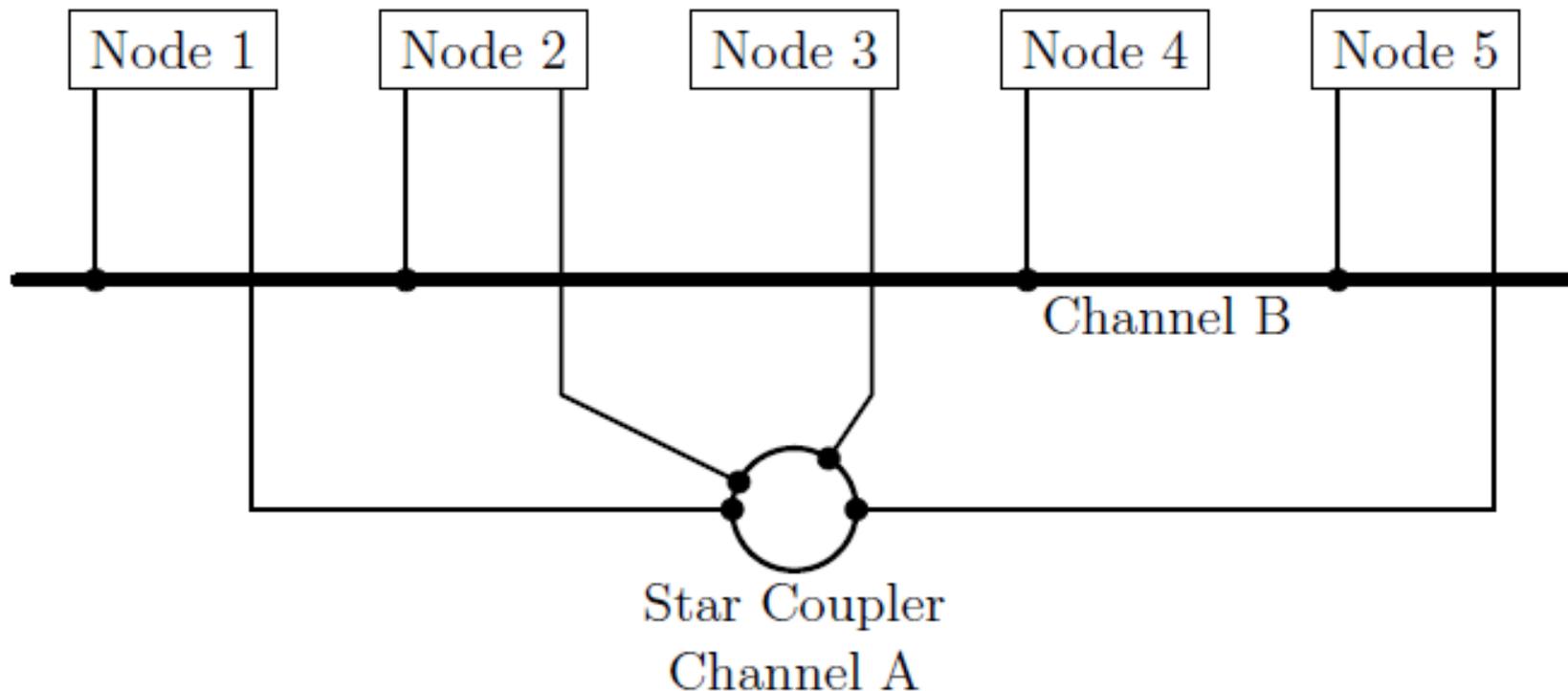


图2.4 双信道的总线—星型混合拓扑结构

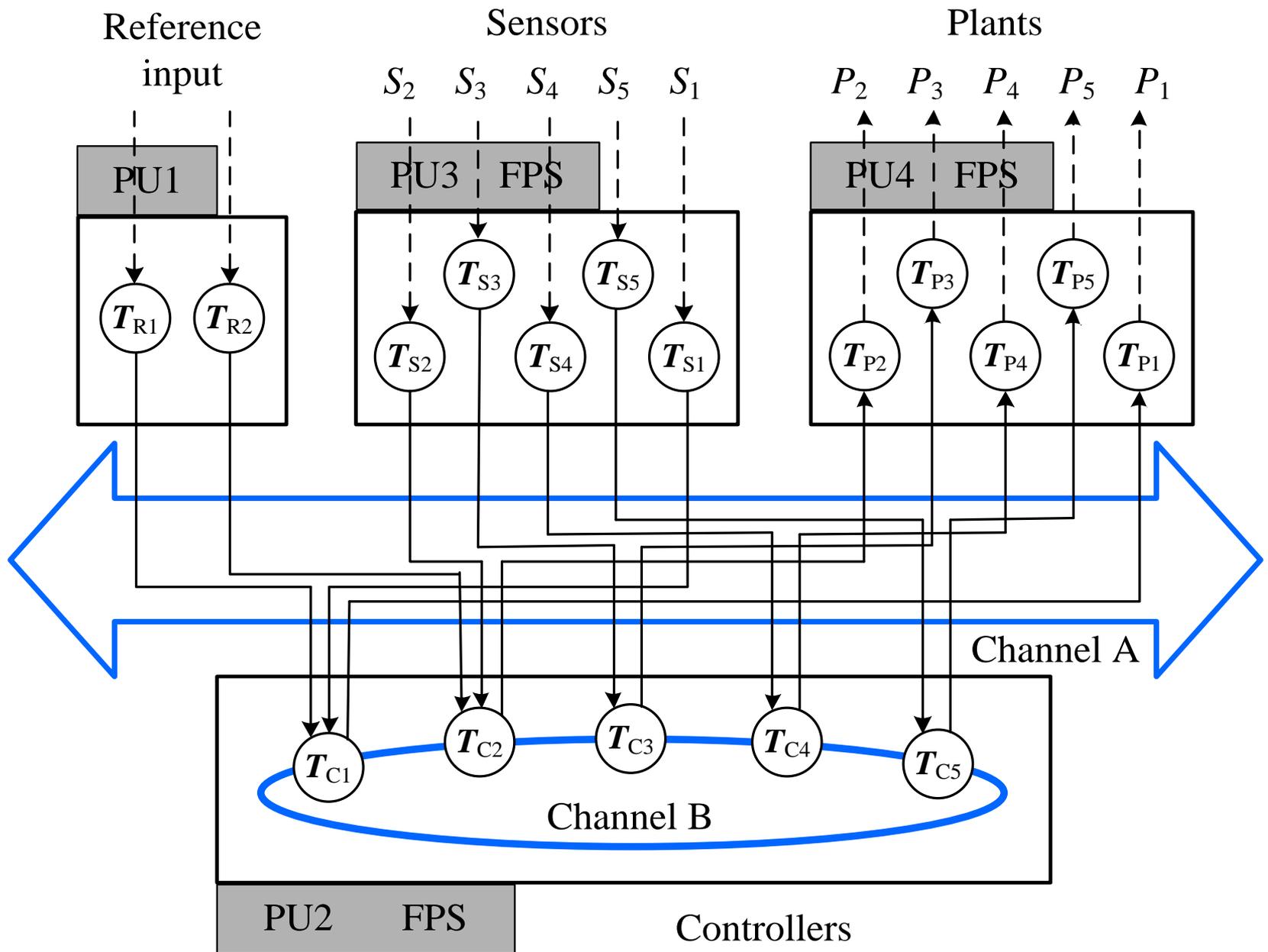


图3.1 含有5个分布式控制应用的系统体系结构

# (一) 控制器调度



为了在系统实现成本和系统性能之间取得良好的平衡，我们关注FSDMC中的控制器的调度问题。

- 应用排队论建模ANCS中的FSDMC模型，构建一种 $N/(d, c)-M/M/c/K/SMWV$ 队列，得到系统的各种性能指标。

- 建立一种多目标优化模型，最小化系统的非线性成本函数和标称时延函数，用最优停止策略和MOPSO算法求解该优化模型，动态配置系统。

# (一) 控制器调度——协议



- 总线协议：信道A服从ET协议的分层FTDMA/FP总线调度策略。信道B采用令牌策略。

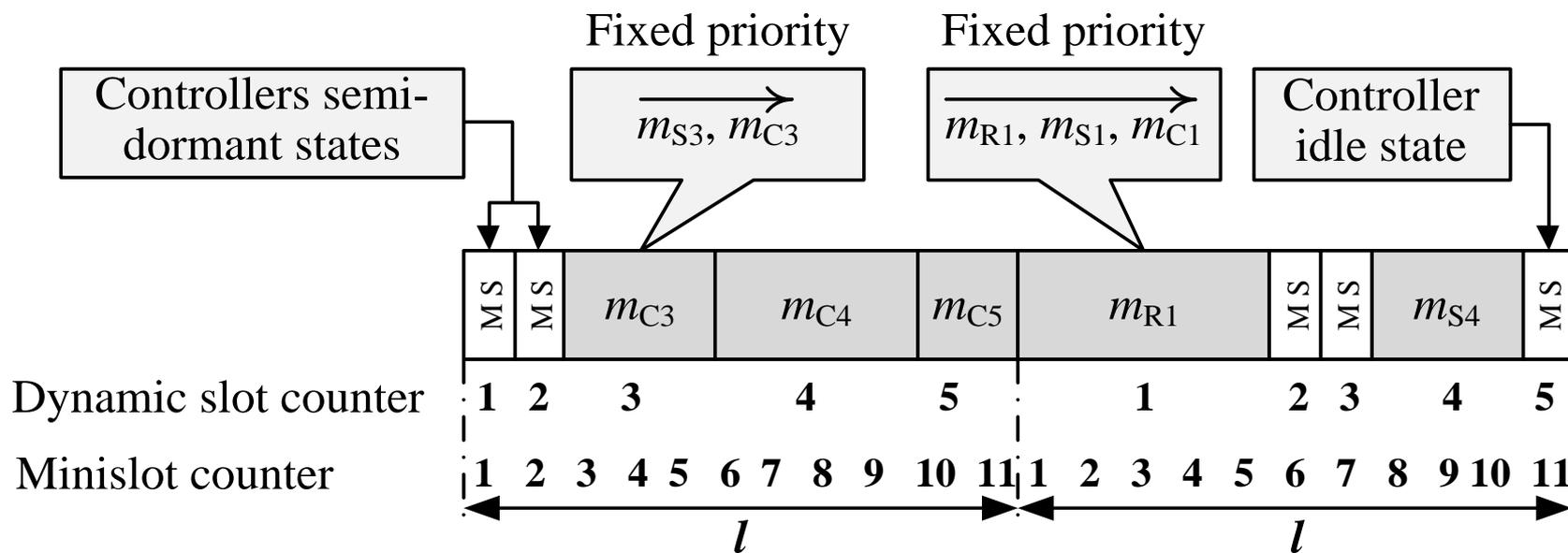


图3.4 通信信道A：分层FTDMA/FP调度器， $l$ 表示FTDMA周期长度

# (一) 控制器调度——排队模型



- 假设 $L_v(t)$ 表示在时间 $t$ 系统中的消息数，并且

$$J(t) = \begin{cases} 0, & c-d \text{ 个控制器处于工作状态,} \\ & \text{且 } d \text{ 个控制器处于半休眠状态,} \\ 1, & c \text{ 个控制器处于工作状态,} \end{cases}$$

- 那么  $\{L_v(t), J(t)\}$  是一个QBD过程，其状态空间为

$$\Omega = \{(k, 0) : 0 \leq k \leq c-d\} \cup \{(k, j) : c-d < k \leq K, j = 0, 1\}.$$

# (一) 控制器调度——排队模型

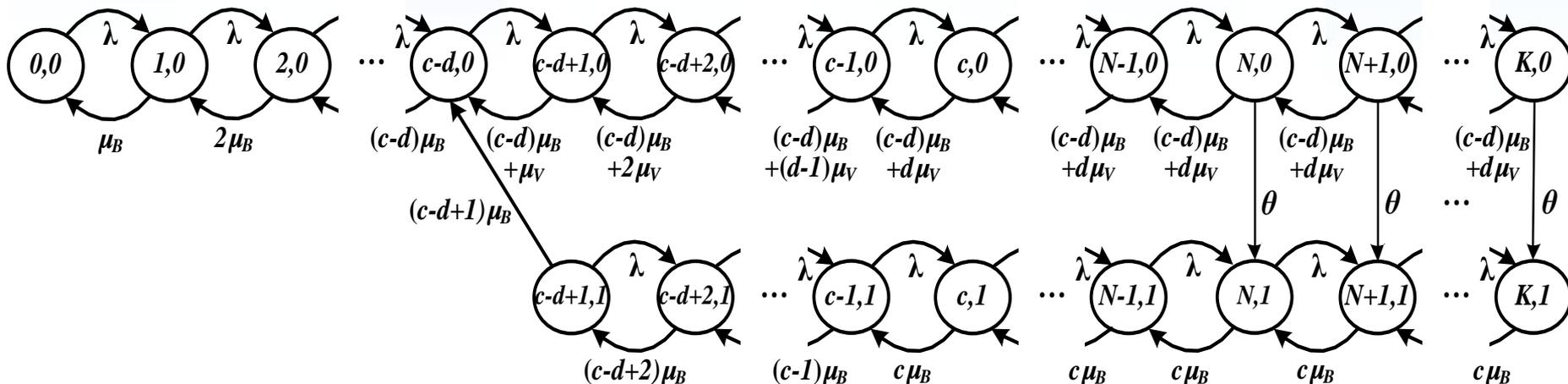


图3.5  $N/(d, c)-M/M/c/K/SMWV$ 排队系统的状态转移率图



# (一) 控制器调度——排队模型



**定理 3.1** 如果  $\rho = \lambda\delta_d^{-1} < 1$ ，矩阵方程  $R^2B + RA + C = 0$

有最小非负解  $R = \begin{pmatrix} r & \frac{\theta r}{\delta_d(1-r)} \\ 0 & \rho \end{pmatrix}$ ，其中  $r$  是下面二次方程的一个实根

$$\sigma_d z^2 - (\lambda + \sigma_d + \theta)z + \lambda = 0,$$

且  $r = \frac{1}{2\sigma_d}(\lambda + \sigma_d + \theta - \sqrt{\Delta})$ ，这里  $\Delta = (\lambda + \sigma_d + \theta)^2 - 4\lambda\sigma_d$ ，

$0 < r < 1$ ，并且  $r$  满足关系式  $\lambda + \theta + \sigma_d(1-r) = \sigma_d + \frac{\theta}{1-r} = \frac{\lambda}{r}$ 。

# (一) 控制器调度——排队模型



定理3.2 如果  $\rho < 1$ ，那么  $(L_v, J)$  的平稳概率分布为

$$\pi_{k,0} = \begin{cases} G \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda}{\mu_B} \right)^k, & 0 \leq k \leq c-d, \\ G \frac{1}{(c-d)!} \prod_{i=1}^{k-c+d} \frac{\lambda}{\sigma_i} - \frac{\theta r \pi_{c,0}}{\lambda(1-r)} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c} \\ \quad \times \sum_{i=1}^{k-c+d} \left( \prod_{j=i}^{k-c+d} \frac{\lambda}{\sigma_j} \right), & c-d+1 \leq k \leq c, \\ \pi_{c,0} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{k-c}, & c < k < N, \\ r \pi_{c,0} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c}, & k = N. \end{cases}$$

# (一) 控制器调度——排队模型



$$\pi_{k,1} = \begin{cases} \pi_{c,0} \frac{\theta r}{\lambda(1-r)} \sum_{i=1}^{k-c+d} \left( \prod_{j=i}^{k-c+d} \frac{\lambda}{\delta_j} \right) \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c}, & c-d+1 \leq k \leq c, \\ \pi_{c,1} \left( \frac{\lambda}{\delta_d} \right)^{k-c}, & c < k < N, \\ \pi_{c,1} \left( \frac{\lambda}{\delta_d} \right)^{N-c} + \pi_{c,0} \frac{\theta r}{\delta_d(1-r)} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c}, & k = N, \end{cases}$$

# (一) 控制器调度——排队模型



定理3.3 如果  $k \geq N$ ，那么  $(L_v, J)$  的平稳概率分布为

$$\pi_{k,0} = \begin{cases} \pi_{c,0} r^{k+1-N} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c}, & N \leq k < K, \\ \pi_{c,0} \frac{\lambda r^{K-N}}{\sigma_d + \theta} \left( \frac{\lambda}{\sigma_d} \right)^{N-1-c}, & k = K. \end{cases}$$

# (一) 控制器调度——排队模型



$$\pi_{k,1} = \begin{cases} \pi_{c,0} \frac{\theta r}{\delta_d (1-r)} \left(\frac{\lambda}{\sigma_d}\right)^{N-1-c} \left(\frac{\lambda}{\delta_d}\right)^{k-N} \left[ 1 + \sum_{j=1}^{k-N} \left(\frac{r\delta_d}{\lambda}\right)^j \right] \\ \quad + \pi_{c,1} \left(\frac{\lambda}{\delta_d}\right)^{k-c}, & N \leq k < K, \\ \pi_{c,0} \frac{r}{\delta_d} \left(\frac{\lambda}{\sigma_d}\right)^{N-1-c} \left[ \frac{\lambda r^{K-1-N}}{\sigma_d + \theta} + \frac{\theta}{1-r} \left(\frac{\lambda}{\delta_d}\right)^{K-N} \right. \\ \quad \left. \times \left( 1 + \sum_{j=1}^{K-1-N} \left(\frac{r\delta_d}{\lambda}\right)^j \right) \right] + \pi_{c,1} \left(\frac{\lambda}{\delta_d}\right)^{K-c}, & k = K. \end{cases}$$

# (一) 控制器调度——排队模型



- 该排队系统的各种性能度量如下：

$$E[L_s] = \sum_{i=0}^K i\pi_{i,0} + \sum_{i=c-d+1}^K i\pi_{i,1} \quad E[NB] = c - E[WW] - E[I]$$

$$E[L_q] = \sum_{i=c-d+1}^K (i - (c - d))\pi_{i,0} + \sum_{i=c+1}^K (i - c)\pi_{i,1}$$

$$E[I] = \sum_{i=0}^{c-d} (c - d - i)\pi_{i,0} + \sum_{i=c-d+1}^c (c - i)\pi_{i,1} \quad E[WW] = d \sum_{i=0}^K \pi_{i,0}$$

$$E[T] = \frac{E[L_s]}{\lambda(1 - P_{loss})} \quad P_{loss} = \pi_{K,0} + \pi_{K,1}$$

# (一) 控制器调度——优化



## ● 成本与性能函数如下：

$$F(d, N, K, \mu_B, \mu_V) = C_h E[L_s] + C_b E[NB] + C_v E[WW] + C_i E[I] + C_d E[T] + C_l P_{loss}$$

$$\tau_{nom} = E[T_q] = \frac{E[L_q]}{\lambda(1 - P_{loss})}$$

Minimize  $f = (F(d, N, K, \mu_B, \mu_V), \tau_{nom})$ ,

Subject to 
$$\begin{cases} 0 < d < c < N < K < K', \mu_V < \mu_B, \\ \mu'_B \leq \mu_B \leq \mu''_B, \mu'_V \leq \mu_V \leq \mu''_V, \\ E[NB] \leq c - d, \end{cases}$$

# (一) 控制器调度——优化



## ● 最优停止算法：定义收益函数

$$h_j(t) = \begin{cases} \omega_k(t) - \min \{ \omega_i(t), 1 \leq i \leq c \} = 0, & k = \arg \min_i \{ \omega_i(t) \}, \\ \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \omega_i(t) - (\omega_j(t) - \min \{ \omega_i(t), 1 \leq i \leq c \}), & \text{otherwise,} \end{cases}$$

- 定义所有控制应用中的最小分组消息数相应的状态k是一个吸收状态，且收益为0；
- 其它状态的收益值定义为所有控制应用的平均分组消息数与当前状态的分组消息数减去状态k的分组消息数之差。

# (一) 控制器调度——算法



算法 3.1 最优停止算法<sup>\*</sup>

输入： $\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_c(t)$ ，以及精度  $\varepsilon=10^{-7}$ <sup>\*</sup>

输出： $d^*$ <sup>\*</sup>

(1) 设  $S_1$  和  $S_2$  分别是继续和停止的状态集，且令  $S_1=S_2=\emptyset$ ，这里  $\emptyset$  表示空集；<sup>\*</sup>

(2) 令  $u_1(t) = [u_{11}(t), u_{12}(t), \dots, u_{1c}(t)]^T$  表示初始期望支付函数，且<sup>\*</sup>

$$u_{1j}(t) = \begin{cases} 0, & h_j(t) = 0, \\ \max \{h_i(t), 1 \leq i \leq c\}, & h_j(t) \neq 0, \end{cases}$$

其中  $1 \leq j \leq c$ ；<sup>\*</sup>

(3) 设  $u_i(t) = \max \{P u_{i-1}(t), H(t)\}$ ，其中期望支付函数  $u_i(t) = [u_{i1}(t), u_{i2}(t), \dots, u_{ic}(t)]^T$

$i = 2, 3, \dots$ ；<sup>\*</sup>

# (一) 控制器调度——算法



算法 3.2 FSDMC 调度算法<sup>4</sup>

输入： $\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_c(t)$ ，和  $\theta, c$ 。

输出：最优值  $\tilde{F}(\tilde{d}^*, \tilde{N}^*, \tilde{K}^*, \tilde{\mu}_B^*, \tilde{\mu}_V^*)$ ， $\tilde{\tau}_{nom}$  和  $\tilde{\Phi} = [\tilde{d}^*, \tilde{N}^*, \tilde{K}^*, \tilde{\mu}_B^*, \tilde{\mu}_V^*]$ 。

(1) 初始化决策变量的上、下界，即  $N(c < N < K)$ ， $K(N < K < K')$ ， $\mu_B(\mu'_B \leq \mu_B \leq \mu''_B)$ ，

和  $\mu_V(\mu'_V \leq \mu_V \leq \mu''_V)$ ；<sup>4</sup>

(2) 在时间间隔  $\Delta t$  内采样第  $i$  个控制应用中的第  $j$  次到达分组消息数  $\omega_{ij}(\Delta t)$ ，其中  $i = 1, 2, \dots, c$ 。假设采样次数是  $M$ ，其中  $M$  表示一个较大的正整数，例如  $M=10000$ ，则总到达率为

$$\lambda = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^c \frac{\omega_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}。$$

(3) 对于每一个  $j \in [1, M]$ ，调用算法 3.1，并分别统计半休眠控制器数  $d^*(d^* = 1, 2, \dots, c)$

的频度  $q(d^*)$ ；<sup>4</sup>

# (一) 控制器调度——实验



## 系统性能度量的灵敏度分析:

表3.1 在 $\lambda=5.0, \theta=0.05, d=4, c=10, N=20$ 情况下 $(\mu_B, \mu_V)$ 取不同值时系统性能度量

$(\mu_B, \mu_V)$	(2.5, 1.0)	(3.5, 1.0)	(4.5, 1.0)	(2.5, 0.5)	(2.5, 1.5)
$E[L_s]$	2.0617	1.4298	1.1113	2.0867	2.0450
$E[L_q]$	0.0372	0.0013	0.0002	0.0502	0.0287
$E[NB]$	2.0245	1.4285	1.1111	2.0366	2.0163
$E[WW]$	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
$E[I]$	3.9755	4.5715	4.8889	3.9634	3.9837

● 情况2和情况3的实验结果分别见表3.2和表3.3

# (一) 控制器调度——实验



## 成本与时延函数灵敏度分析:

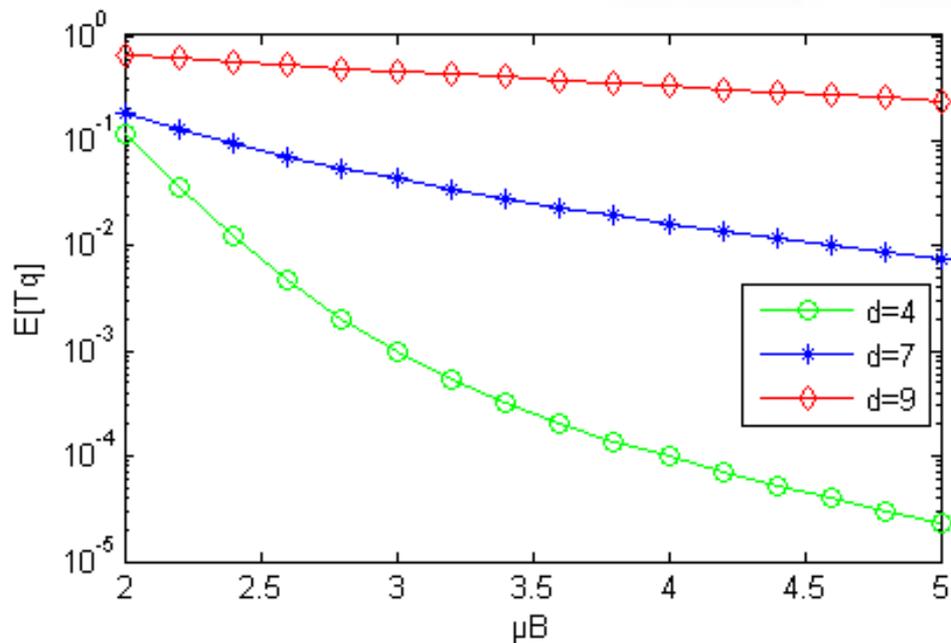
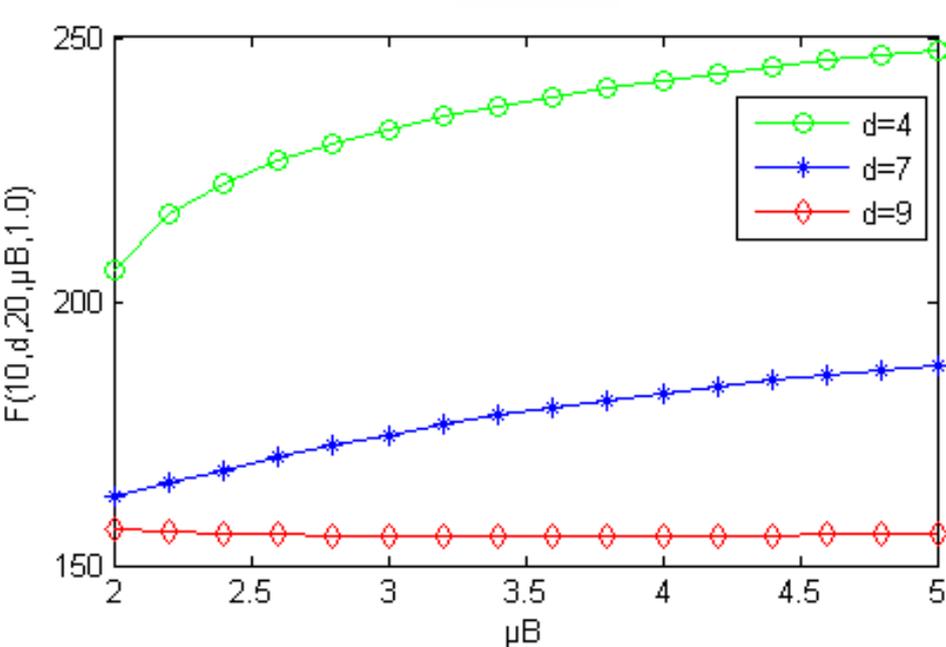


图3.6  $F(10, d, 20, \mu_B, 1.0)$ 和 $E[T_q]$ 分别对应 $\mu_B$ 和 $d$ 的变化图

● 其它情况类似，见论文第3.5.2节。

# (一) 控制器调度——实验



系统参数的最优值：

表3.9 分组消息到达的采样数据

Ctrl. App. ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sample Data(B/s)	628	[361]	841	665	473	667	[266]	[256]	446	[397]

- 表3.9中，通过调用算法3.1，在轻量级通信情况下，方括号中的数据表示相应的控制器将要进入休眠状态。因此，获得半休眠控制器数 $d = 4$ 。总到达率为

$$\lambda = \sum_{i=1}^c \omega_i(t) = 5000B = 5kB。$$

# (一) 控制器调度——实验

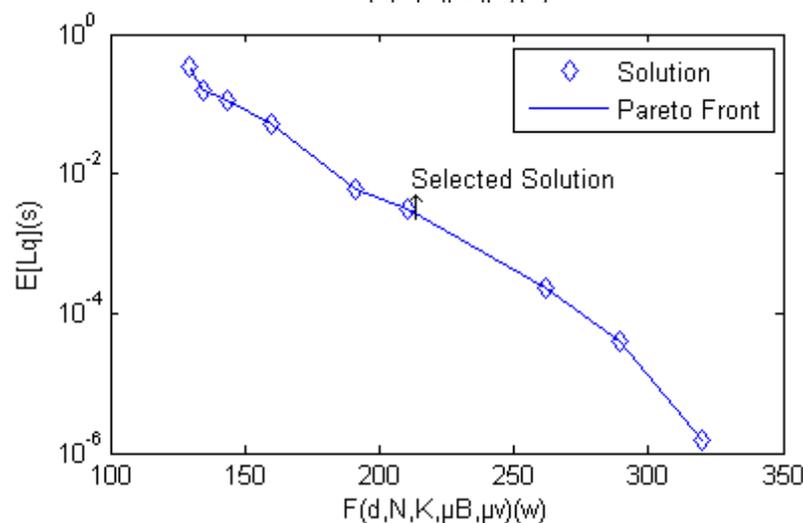
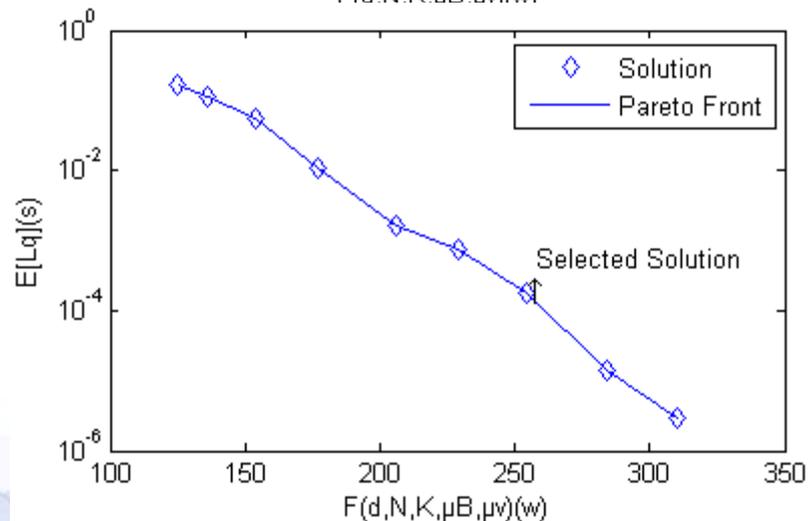
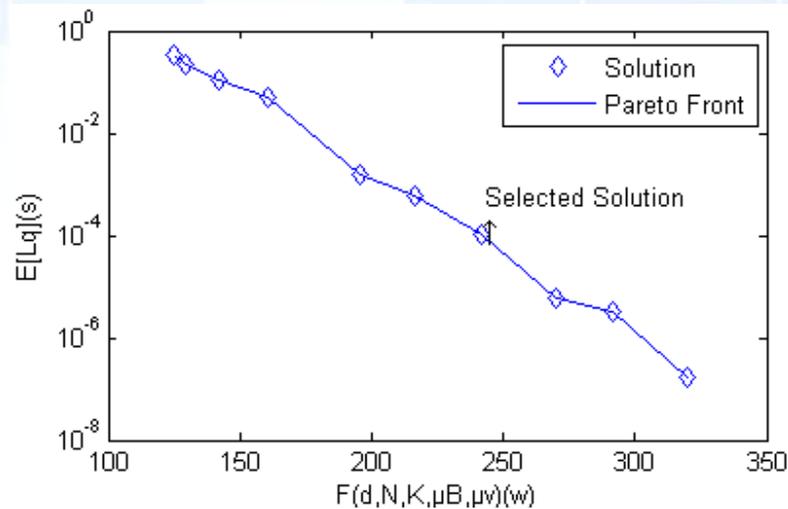
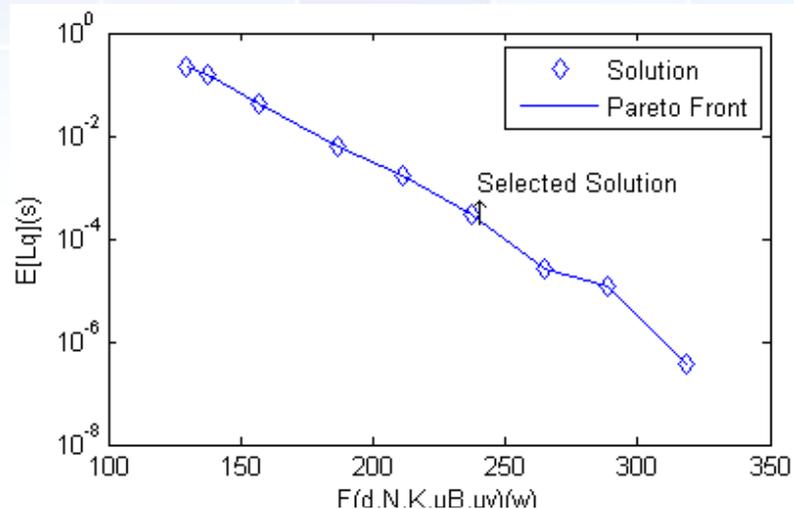


图3.11 四次调用MOPSO算法得到的Pareto前沿(a)~(d)

# (一) 控制器调度——实验



表3.11 Pareto最优解和相应的非支配向量

No.	d	N	K	$\mu_B$	$\mu_V$	F	$\tau_{nom}$
1	3	21	28	3.95	1.17	261.65	1.8834e-005
2	3	20	28	3.85	1.11	260.91	2.4267e-005
3	4	21	28	3.41	1.43	237.16	2.8473e-004
4	4	20	28	3.40	1.91	237.07	2.7046e-004
5	4	23	28	3.45	2.07	237.55	2.4130e-004
6	4	21	28	3.36	1.32	236.67	3.3089e-004
7	5	20	28	3.20	1.43	215.10	1.8553e-003
8	5	20	28	3.15	2.31	214.59	1.7335e-003
9	5	17	28	3.15	0.72	214.50	2.4159e-003
10	6	22	28	3.12	1.95	188.72	7.7024e-003
Average	4.3	20.5	28	3.404	1.542	—	—

## (二) 资源动态供应



1、在FSDMC模型中，存在需要解决的两个主要问题：资源过度供应和系统过载。

2、同步休假策略导致资源过度供应而招致不必要的成本浪费。

3、不可预期的物理环境变化产生不期望的负载高峰。

## (二) 资源动态供应



- 在弹性系统中，时间相关的弹性行为称为“滞弹性”，时间敏感的弹性系统称为滞弹性系统。
- 当前的维基百科物理上定义滞弹性表述为“一个滞弹性材料是粘弹性材料的特殊情况。粘弹性材料有粘性和弹性特征，因此，展现了时间相关的应变。滞弹性材料在移除负载后将完全恢复到其原始状态”。
- 当应用于计算时，滞弹性自然反射了DES系统中时间相关的资源供应的按需特性。我们称这一计算问题为“滞弹性计算”。

## (二) 资源动态供应



在FSDMC中，当外部应力(如分组消息请求数)作用于系统时，应变(如增加了资源利用率和平均任务响应时间)随时间非线性增加，即FSDMC平台变形。由于共享总线的资源约束，存在应力-应变滞后。这一滞后现象是弹性(elasticity)和滞弹性(anelasticity)系统的主要区别。

## (二) 资源动态供应



● **考虑系统自动缩放策略：控制器半休眠(资源水平缩放)和控制器服务强度的自适应变化(资源垂直缩放)，以保持CPR最优值不变。**

● **当系统负载增加时，系统成本增加，但系统性能降低，因此，应变(即CPR)随着应力(即到达率)的增加而发生变化。**

● **当平均到达率超过平均服务率时，控制器服务率自适应调整，保持系统在稳定状态下的CPR不变。**

## (二) 资源动态供应



根据资源供应和负载之间的匹配情况，FSDMC平台处于三种状态(下文中用“3-状态”表示)，即过度供应(over-provisioning)状态、正常状态(normal)和不足供应(under-provisioning)状态。

用3-状态Markov过程描述马尔可夫环境，构建随机环境下的三阶段(3-位相)M/M/1/K排队模型，获得随时间变化而随机改变的突发负载下的系统滞弹性量化模型，精确计算FSDMC平台的滞弹性值。

## (二) 资源动态供应——定义



### 定义1

一个滞弹性CPS系统是eCPS，其应变(如成本和性能)滞后于应力(如负载)。

### 定义2

在eCPS系统中，滞弹性计算如下：

$$Anelasticity = (AvgQL_{normal}, P_{normal})$$

### 备注

在随机环境的M/M/1/K队列中，条件队列长度密度常常运用于由Markov模型描述的时间相关的队列行为的研究中[192]。

## (二) 资源动态供应——定义



在  $N/(d, c)$ -M/M/c/K/AMWV 队列中，状态能分成三类：

- 当  $0 \leq k < c$  时，一个状态是过度供应状态；
- 当  $c \leq k < N$  时，一个状态是正常状态；
- 当  $N \leq k \leq K$  时，一个状态是不足供应状态。

3-状态之间的转移描述如下：

- $(k-1, i) \xrightarrow{\lambda_i} (k, i+1)$ ，当一个新的分组消息到达位相  $i$  时，转移发生；
- $(k, i+1) \xrightarrow{\mu_i} (k-1, i)$ ，当一个分组消息在位相  $i$  完成服务后，转移发生。

# (二) 资源动态供应——排队模型

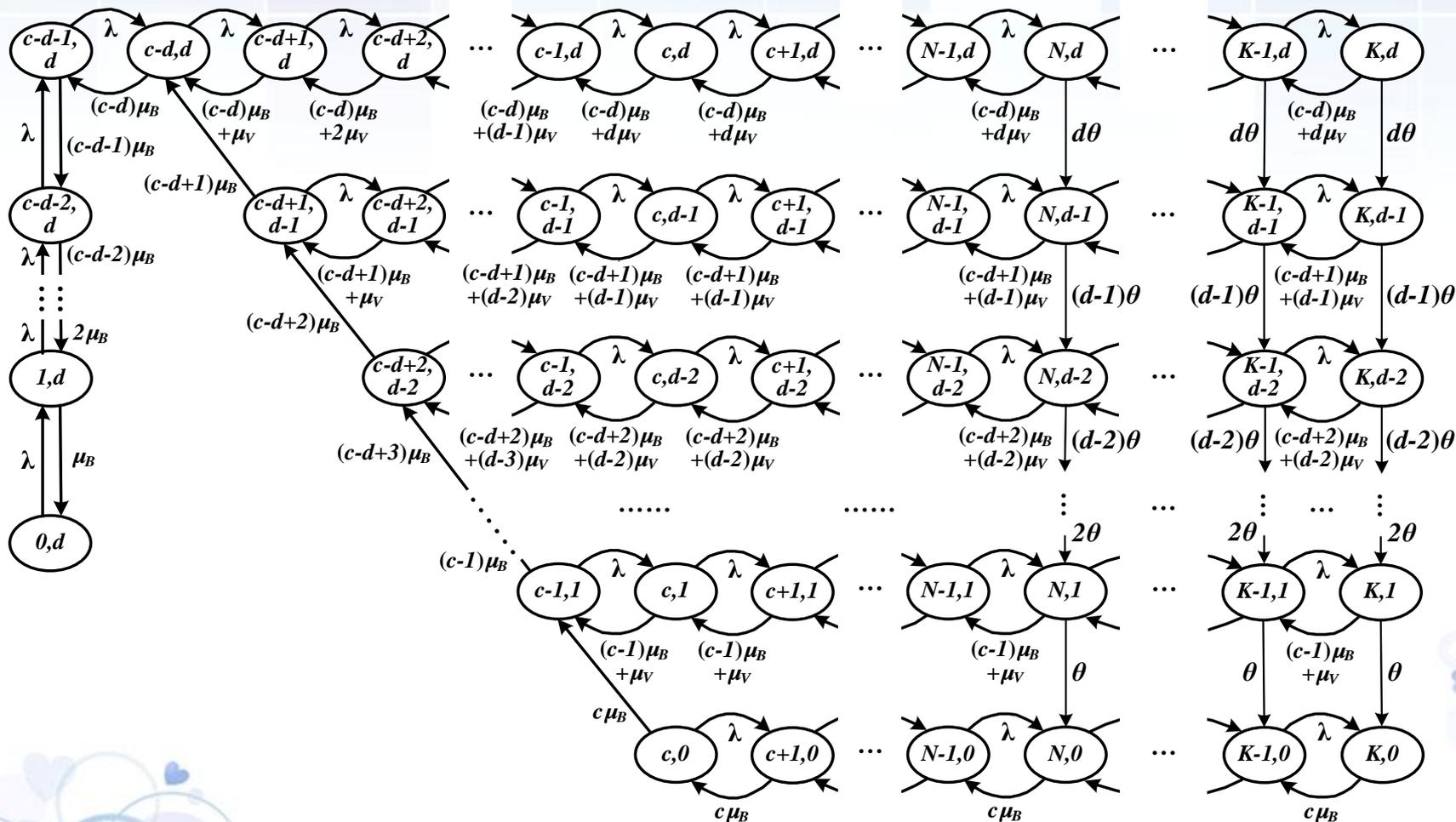


图4.1  $N/(d, c)-M/M/c/K/AMWV$ 排队系统的状态转移率图

## (二) 资源动态供应——排队模型



定理 4.1 如果  $\rho = \lambda\sigma_0^{-1} < 1$ ，那么矩阵方程  $R^2B + RA + C = 0$

有最小非负解  $R =$

$$\begin{pmatrix} r_d & r_{d,d-1} & r_{d,d-2} & \cdots & r_{d,1} & r_{d,0} \\ & r_{d-1} & r_{d-1,d-2} & \cdots & r_{d-1,1} & r_{d-1,0} \\ & & r_{d-2} & \cdots & r_{d-2,1} & r_{d-2,0} \\ & & & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & & & r_1 & r_{1,0} \\ & & & & & r_0 \end{pmatrix},$$

其中(i)对角元素  $r_k$  是下列二次方程的一个实根

$$\sigma_k z^2 - (\lambda + \sigma_k + k\theta)z + \lambda = 0, 0 \leq k \leq d,$$

$$\text{且 } r_k = \frac{1}{2\sigma_k} (\lambda + \sigma_k + k\theta - \sqrt{\Delta}),$$

## (二) 资源动态供应——排队模型



其中  $\Delta = (\lambda + \sigma_k + k\theta)^2 - 4\lambda\sigma_k$ ,  $0 < r_k < 1$ ,  $r_0 = \rho$ ,

并且  $r_k$  满足下面关系式  $\lambda + k\theta + \sigma_k(1 - r_k) = \sigma_k + \frac{k\theta}{1 - r_k} = \frac{\lambda}{r_k}$ ,

(ii) 非对角元素满足

$$r_{u,v} = \begin{cases} \frac{(v+1)\theta r_{u,v+1}}{[(\lambda + \sigma_v + v\theta) - \sigma_v(r_v + r_u)]}, & u = v + 1, \\ \frac{(v+1)\theta r_{u,v+1} + \sigma_v \sum_{g=v+1}^{u-1} r_{u,g} r_{g,v}}{[(\lambda + \sigma_v + v\theta) - \sigma_v(r_v + r_u)]}, & v + 1 < u \leq d, \end{cases}$$

其中  $u = d - i, v = d - j$ ,  $0 \leq i < d, i < j \leq d$ , 以及  $r_{k,k} = r_k, 0 \leq k \leq d$ .

## (二) 资源动态供应——排队模型



定理 4.2 如果  $\rho < 1$ ，那么  $(L_v, J)$  的平稳概率分布  $\pi_{k,j}$  是

$$\pi_{k,j} = \begin{cases} G \frac{\lambda^k}{\prod_{i=1}^k \delta_{i,0}}, & 0 \leq k \leq c-d, j = d, \\ \frac{\lambda^{k+j-c}}{\prod_{i=1}^{k+j-c} \delta_{c-j+i,i}} \pi_{c-j,j} + \sigma_j \left[ \pi_{N,j} - \pi_{c,j} \left( \frac{\lambda}{\sigma_j} \right)^{N-c} \right] \sum_{h=0}^{k+j-c-1} \frac{\lambda^h}{\prod_{i=k-h}^k \delta_{i,i+j-c}}, & c-d+1 \leq k \leq c, c-k+1 \leq j \leq d, \\ \frac{1}{\delta_{k,0}} \sum_{i=c-k+1}^d \sigma_i \left[ \pi_{c,i} \left( \frac{\lambda}{\sigma_i} \right)^{N-c} - \pi_{N,i} \right], & c-d+1 \leq k < c, j = c-k, \\ \pi_{c,j} \left( \frac{\lambda}{\sigma_j} \right)^{k-c}, & c < k < N, 1 \leq j \leq d, \\ \pi_{c,0} \frac{1-\rho^{k-c+1}}{1-\rho}, & c < k < N, j = 0, \end{cases}$$

## (二) 资源动态供应——排队模型



定理 4.3 如果  $k > N$ ，那么  $(L_v, J)$  的平稳概率分布为：

$$\pi_{k,d} = \pi_{N,d} r_d^{k-N}, \quad N < k < K, \quad j = d,$$

$$\varphi_k^{(d)} = \pi_{N,d} \sum_{i=1}^{k-N} r_d^{i-1} \eta H^{k-N-i} + \varphi_N^{(d)} H^{k-N}, \quad N < k < K, \quad 0 \leq j \leq d-1,$$

$$\pi_{K,d} = \frac{\lambda r_d^{K-1-N}}{\sigma_d + d\theta} \pi_{N,d}, \quad k = K, \quad j = d,$$

$$\pi_{K,j} = \lambda \sum_{h=j}^{d-1} \left[ \frac{1}{(h+1)\theta} \prod_{i=j}^h \frac{(i+1)\theta}{\sigma_i + i\theta} \pi_{K-1,h} \right] + \frac{\lambda r_d^{K-1-N}}{(d+1)\theta} \prod_{i=j}^d \frac{(i+1)\theta}{\sigma_i + i\theta} \pi_{N,d},$$

$$k = K, \quad 0 \leq j \leq d-1,$$

其中  $\varphi_k^{(d)} = (\pi_{k,d-1}, \pi_{k,d-2}, \dots, \pi_{k,1}, \pi_{k,0})_{1 \times d}$ ,  $R = \begin{pmatrix} r_d & \eta \\ 0 & H \end{pmatrix}$ ,

且  $\eta = (r_{d,d-1}, r_{d,d-2}, \dots, r_{d,1}, r_{d,0})$ .

## (二) 资源动态供应——排队模型



- 该排队系统的各种性能度量如下：

$$E[L_s] = \sum_{i=0}^{c-d-1} i\pi_{i,d} + \sum_{j=0}^d \sum_{i=c-j}^K i\pi_{i,j}$$

$$E[NB] = c - E[ WV ] - E[ I ]$$

$$E[L_q] = \sum_{j=0}^d \sum_{i=c-j+1}^K (i - c + j)\pi_{i,j}$$

$$E[ I ] = \sum_{i=0}^{c-d} (c - d - i)\pi_{i,d}$$

$$E[ WV ] = d \sum_{i=0}^{c-d-1} \pi_{i,d} + \sum_{j=1}^d \sum_{i=c-j}^K j\pi_{i,j}$$

$$E[T_q] = \frac{E[L_q]}{\lambda(1 - P_{loss})}$$

$$P_{loss} = \sum_{j=0}^d \pi_{K,j}$$

## (二) 资源动态供应——优化



### ● 成本性能率(CPR)函数如下:

$$Cost(d, N, K, \mu_B, \mu_V, \lambda, \theta) = C_h E[L_s] + C_b E[NB] + C_v E[WW] + C_i E[I] + C_d E[L_q] + C_l P_{loss}$$

$$P = \frac{1}{E[T]} \quad CPR = \frac{F}{P} = Cost * E[T]$$

$$\begin{aligned} & \min \quad CPR(d, N, K, \mu_B, \mu_V, \lambda, \theta), \\ & \text{s. t.} \quad \begin{cases} 0 < d < c < N < K < K', \mu_V < \mu_B, \\ \mu'_B \leq \mu_B \leq \mu''_B, \mu'_V \leq \mu_V \leq \mu''_V, \\ \lambda' \leq \lambda \leq \lambda'', \theta' \leq \theta \leq \theta'', \\ E[NB] \leq c - d, \end{cases} \end{aligned}$$

## (二) 资源动态供应——优化



●我们用PSO算法求解最优化模型，得到系统CPR的最小值为 $CPR_0 = 53.1134$ ，且

$$d = 4, N = 20, K = 42, \mu_B = 3.4, \mu_V = 1.5, \lambda = 16.9337, \theta = 6.6058$$

●系统性能度量灵敏度分析与CPR灵敏度分析同第3.5节。

## (二) 资源动态供应——滞弹性



●马尔可夫环境由具有生成器  $\bar{Q}$  的3-状态、不可约马尔可夫更新过程描述。

$$\bar{Q} = \begin{pmatrix} -\mu_1 & \mu_1 & 0 \\ \mu_2 & -2\mu_2 & \mu_2 \\ 0 & \mu_3 & -\mu_3 \end{pmatrix}$$

其中  $\mu_i = E[NB_i]\mu_B + E[WW_i]\mu_V$

## (二) 资源动态供应——滞弹性



- 经过标准构建，M/M/1/K队列可以由具有生成元  $\tilde{Q}$  的QBD过程进行研究，即

$$\tilde{Q} = \begin{pmatrix} \bar{Q} - \Delta(\lambda) & \Delta(\lambda) & & & & \\ \Delta(\mu) & \bar{Q} - \Delta(\lambda + \mu) & \Delta(\lambda) & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & \Delta(\mu) & \bar{Q} - \Delta(\lambda + \mu) & \Delta(\lambda) & \\ & & & \Delta(\mu) & \bar{Q} - \Delta(\mu) & \end{pmatrix}$$

- 矩阵  $\tilde{R}$  是下面矩阵二次方程的最小非负解

$$\tilde{R}^2 \Delta(\mu) + \tilde{R} [\bar{Q} - \Delta(\lambda + \mu)] + \Delta(\lambda) = 0$$

其中  $\tilde{R}$  用快速Newton-Shamanskii迭代算法求解。

## (二) 资源动态供应——滞弹性



定理 4.4 如果  $\tilde{\rho} = \tilde{\pi}\tilde{\lambda}(\tilde{\pi}\tilde{\mu})^{-1} < 1$ ，那么  $x_k$  的平稳概率分布为

$$x_k = \begin{cases} \tilde{G}\tilde{\pi}(I - \tilde{R})\tilde{R}^k, & 0 \leq k < K, \\ \tilde{G}\tilde{\pi}(I - \tilde{R})\tilde{R}^{K-1}\Delta(\lambda)[\Delta(\mu) - \bar{Q}]^{-1}, & k = K, \end{cases}$$

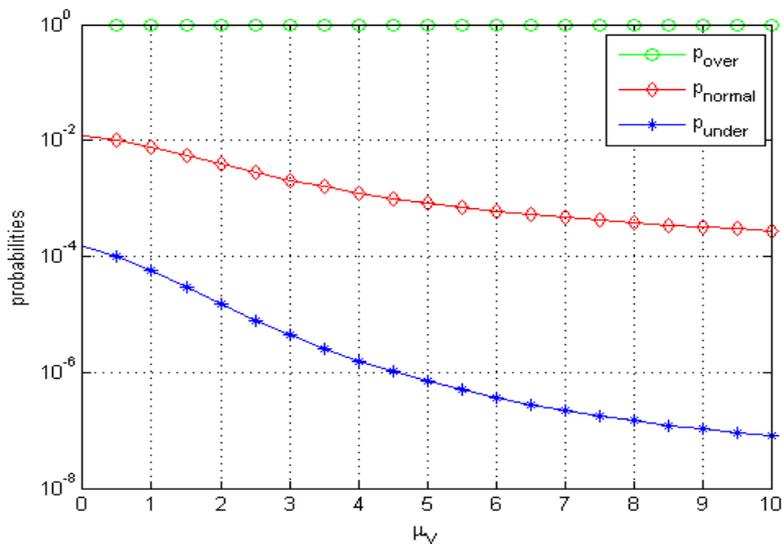
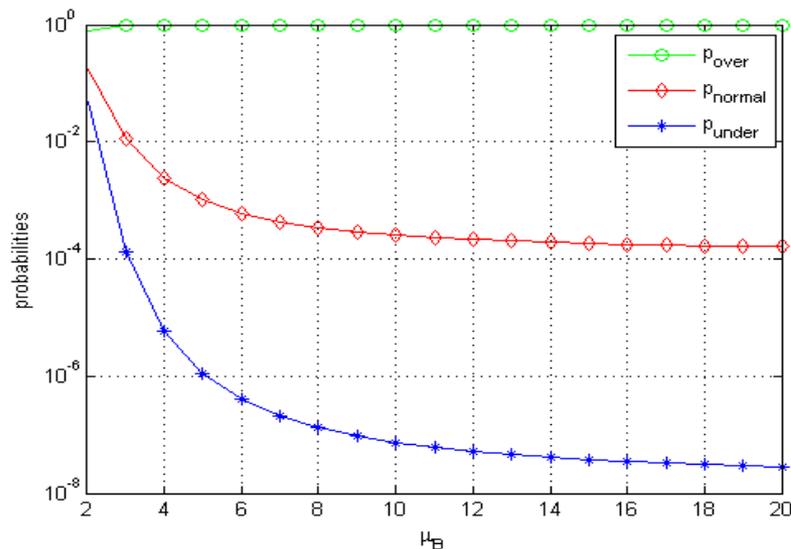
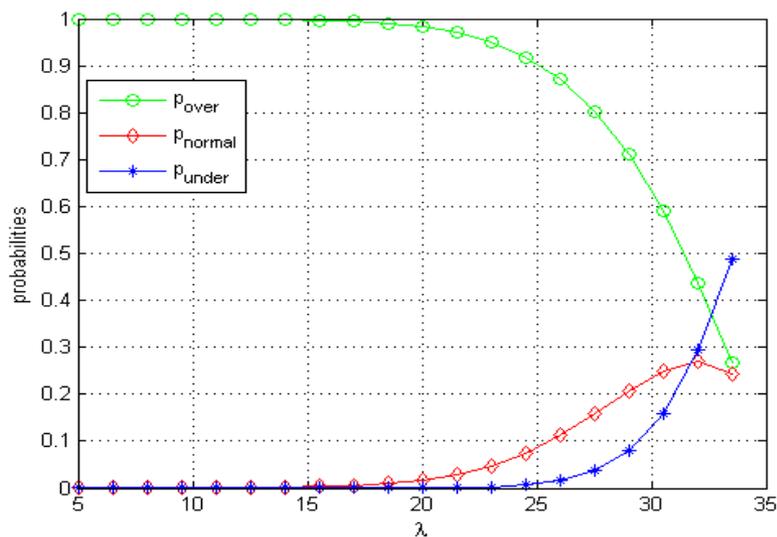
其中  $\tilde{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)^T$ ， $\tilde{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)^T$ ，且

$$\tilde{G} = [\tilde{\pi}(I - \tilde{R}^K)e + \tilde{\pi}(I - \tilde{R})\tilde{R}^{K-1}\Delta(\lambda)(\Delta(\mu) - \bar{Q})^{-1}e]^{-1}.$$

● 系统在3-状态下的概率分别表示为：

$$P_{over} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=0}^{c-1} x_{i,j}, \quad P_{normal} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=c}^{N-1} x_{i,j}, \quad P_{under} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=N}^K x_{i,j}.$$

# (二) 资源动态供应——实验



●  $P_{over}$ ,  $P_{normal}$  和  $P_{under}$  随  
参数变化的曲线图

## (二) 资源动态供应——自适应



● 当  $\rho \geq 1$  时，系统自适应调节控制器忙期服务率  $\mu_B$ 。

算法 4.1 基于 PSO 的最优 CPR 不变自适应调节算法

输入：系统平均到达率  $\lambda$ ，以及精度  $\varepsilon=10^{-7}$ 。

输出：正常忙期控制器平均服务率  $\mu_B$ 。

(1) 初始化上界  $high$  和下界  $low$ , 且  $low < high$ ;

(2) 初始化 CPR, 即  $CPR = CPR_0$ ;

(3) WHILE TRUE

(4) FOR 每个粒子  $i$  DO

(5)  $x_i \leftarrow low + rand() \times (high - low)$ ;

(6)  $v_i \leftarrow low + rand() \times (high - low)$ ;

(7) 用式(4.55)评估粒子  $i$ , 令  $pBest_i = x_i$ ;

(8) ENDFOR

(9)  $gBest \leftarrow \min\{pBest_i\}$ ;

## (二) 资源动态供应——实验

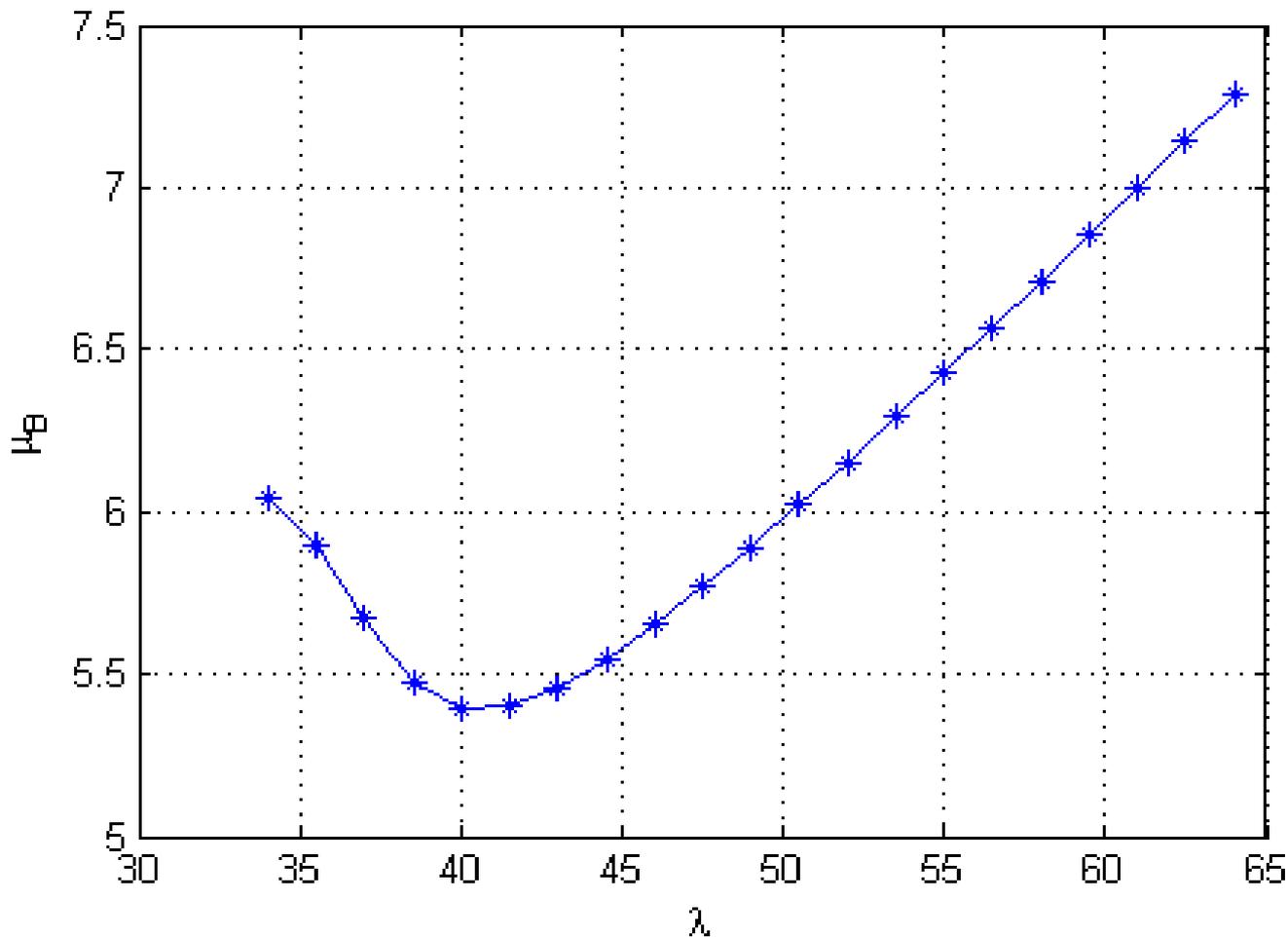


图4.13 参数 $\mu_B$ 与 $\lambda$ 自适应关系曲线图

## (二) 资源动态供应——实验



- 在随机环境下的M/M/1/K排队模型中，条件队列长度密度函数  $q_k(j)$  表示如下：

$$q_k(j) = P\{L = k | J = j\} = \frac{x_{k,j}}{\tilde{\pi}_j}, \quad 0 \leq k \leq K, 1 \leq j \leq 3$$

- 系统在稳定条件下的滞弹性值为：

$$Anelasticity = (1.4172, 5.4617e-03)$$

- 考虑六个队列A、B、C、D、E和F，分析高峰期行为如表4.5和表4.6。其到达率向量分别为：

$$\vec{\lambda}_A = (73, 1, 1), \vec{\lambda}_B = (37, 37, 1), \vec{\lambda}_C = (25, 25, 25)$$

$$\vec{\lambda}_D = (118, 1, 1), \vec{\lambda}_E = (60, 59, 1), \vec{\lambda}_F = (40, 40, 40)$$

## (二) 资源动态供应——实验

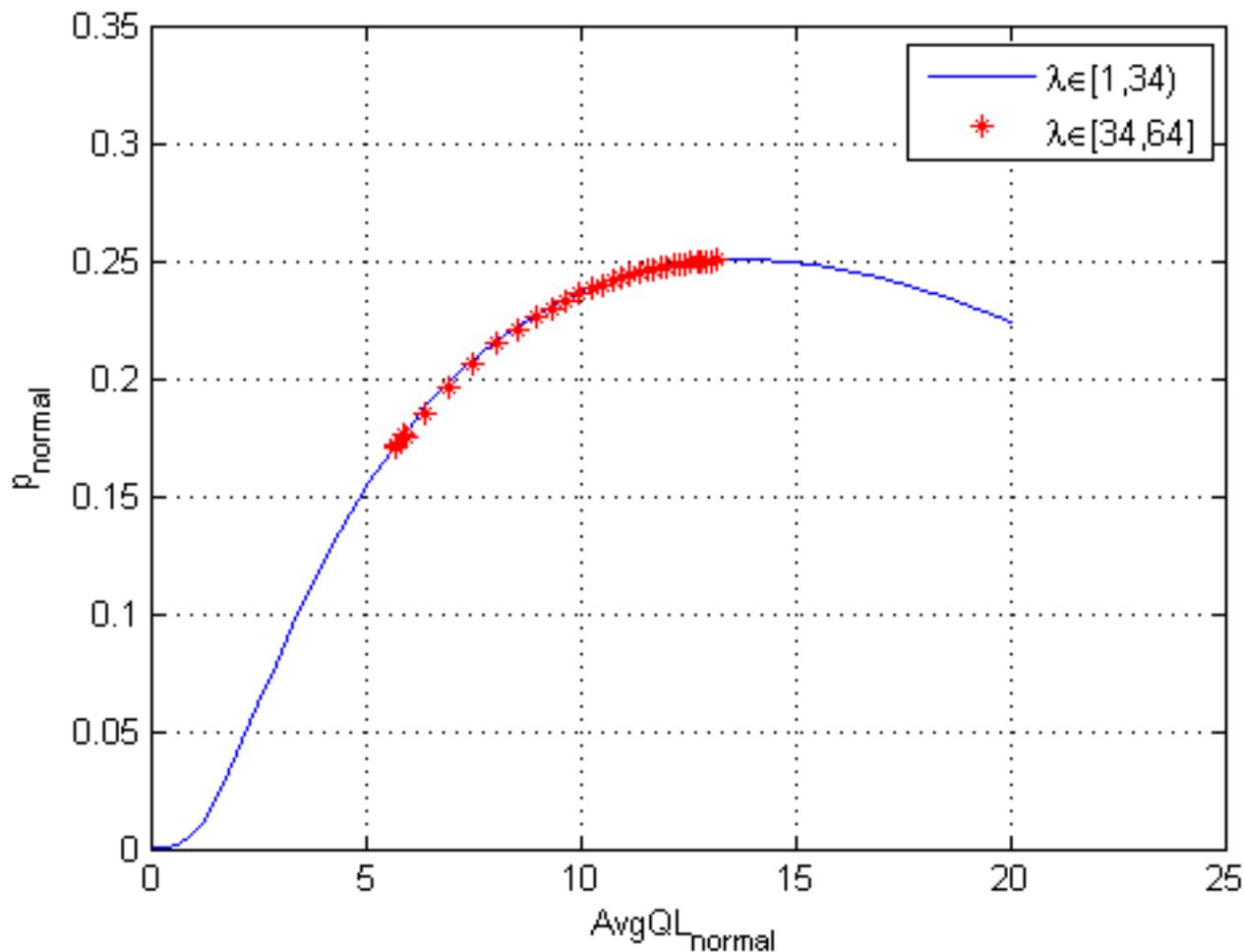


图4.17 当 $\lambda \in [1, 34) \cup [34, 64]$ 时系统在正常状态下 $\text{AvgQL}_{\text{normal}}$ 和 $\rho_{\text{normal}}$ 关系曲线

## (二) 资源动态供应——实验



表4.4 两个排队模型的成本函数 $F$ 与标称时延函数 $\tau_{\text{nom}}$ 的比较结果

Cost/Perform.	$N/(d,c)$ - $M/M/c/K/AMWV$	$N/(d,c)$ - $M/M/c/K/SMWV$
$F$	234.74mW	237.07mW
$\tau_{\text{nom}}$	2.3560e-04s	2.9259e-04s

### (三) 不确定时延



随着汽车电子系统复杂性的不断增加，在高级控制模型及其实际实现之间的间隙不可避免地变宽。产生这种间隙的主要问题是从传感器到执行器之间的端到端的时延。

控制系统在平台上的实际时延随时间而变化，通常是随机的，并且小于最坏情况下的延迟。因此，在最坏情况假设下设计平台常常浪费许多资源。

# (三) 不确定时延

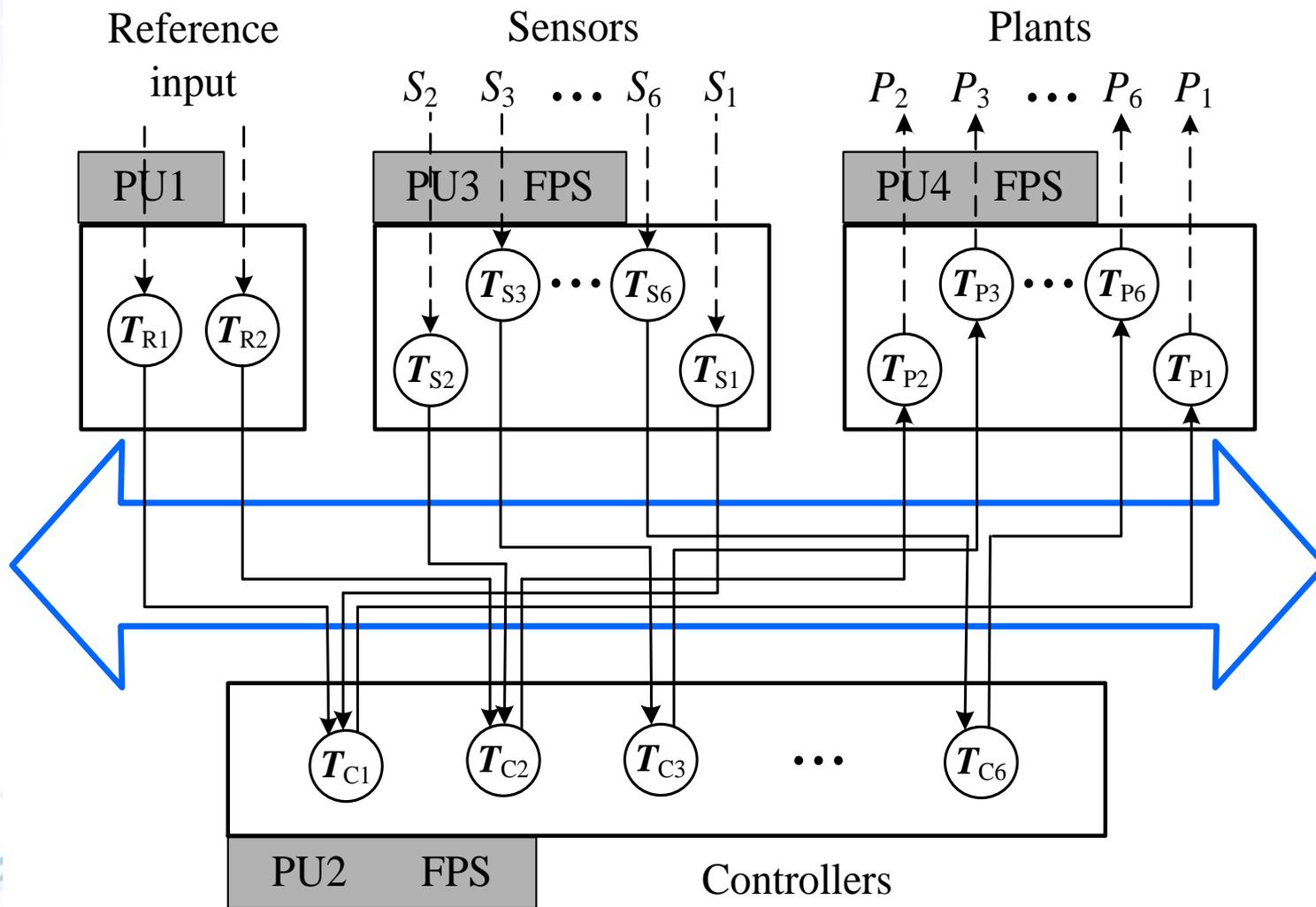


图5.1 具有六个控制应用的系统体系结构

### (三) 不确定时延



在ANCS中，由传感器生成的消息由前向总线、控制器、后向总线相继处理，最后进入执行器。在某个时刻，多个消息可能会同时到达共享总线。因此，ANCS可以被抽象为多队列多服务台串并联混合排队系统。控制应用程序的动态过程符合M/PH/1队列的动态行为。

# (三) 不确定时延——排队模型

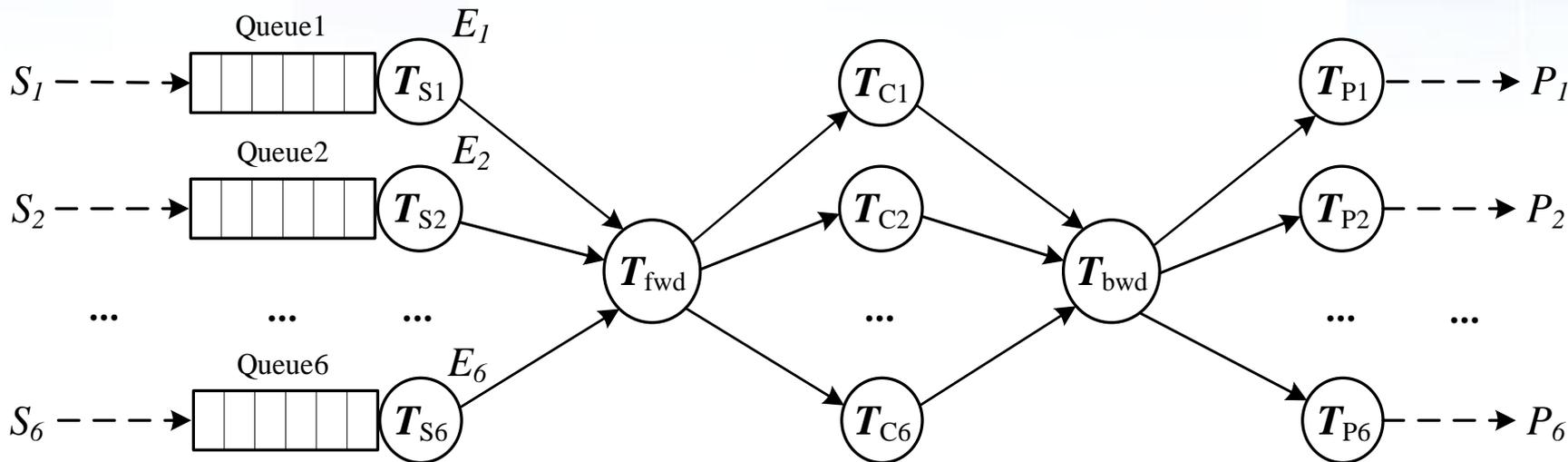


图5.3 平台体系结构的多队列多服务台串并联混合排队系统

### (三) 不确定时延



- 在汽车电子系统中，消息的延迟通常是随机的。如果消息没有超过截止时间，则使用标称控制器；如果消息超过了截止时间，则消息被中止。
- 通常假设消息被丢弃并且使用先前的输入，即利用零阶保持算法，因为控制器可用的信息明显延迟。这种技术可能会使系统不稳定。
- 在设计控制律之前预测当前的延迟是通过控制律来补偿当前延迟的一种可行的方式。

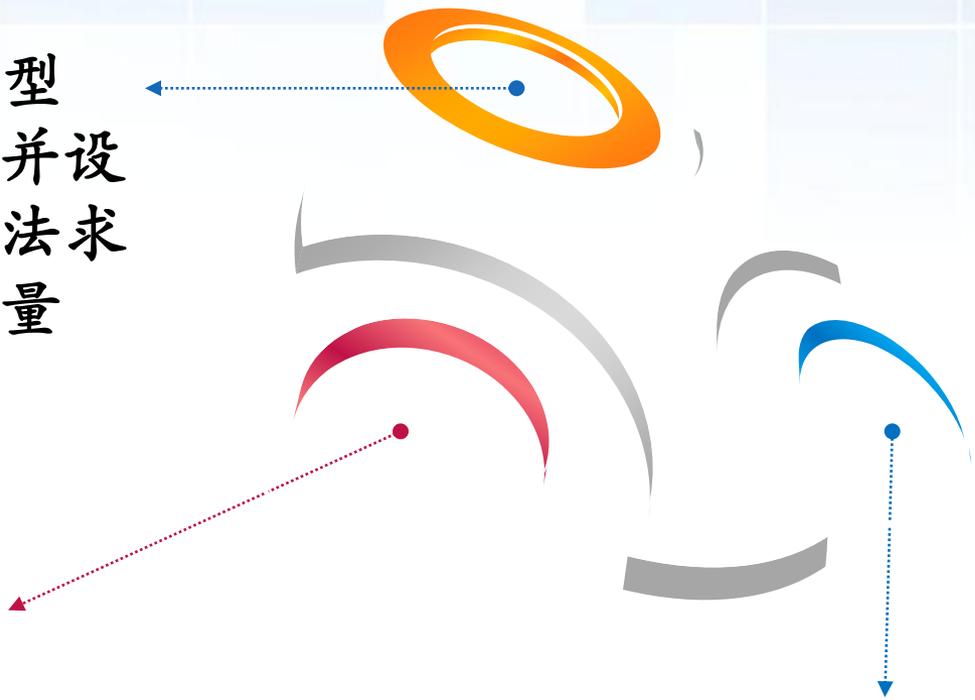
### (三) 不确定时延



(1)提出了一个约束优化模型来最小化系统成本函数，并设计了一种最优最小时隙算法求解优化模型，得到决策变量minislot的最优值。

(2)使用具有随机大小批量到达的连续时间M/PH/1排队系统建模ANCS的每个控制应用为QBD过程，以分析MRT，并获得MRT的pdf和cdf。

(3)使用灰色系统理论预测ANCS中的延迟，提出了一种新的灰色模型(1,1)，命名为两参数概率变换的GM(1,1)(PTGM(1,1))，以精确预测每个消息的响应时间。



# (三) 不确定时延——协议

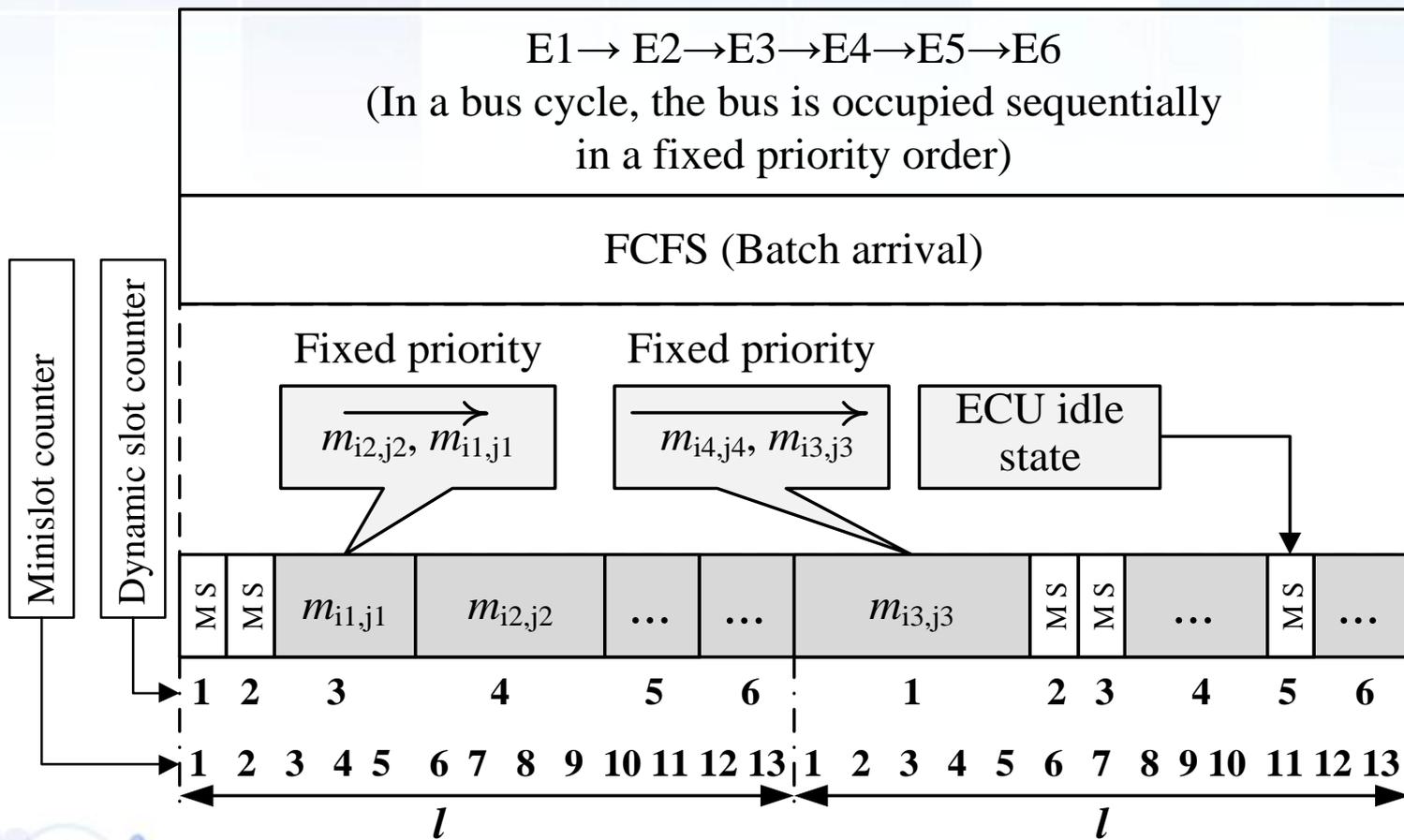


图5.2 通信总线：多层次FTDMA/FP调度器， $l$ 表示FTDMA周期长度

### (三) 不确定时延——排队模型



- 在M/PH/1队列中，服务率和服务时间的拉普拉斯-斯蒂尔切斯变换(LST)分别为：

$$\mu^{-1} = -\beta S^{-1} e \quad f^*(s) = \beta(sI - S)^{-1} S^0$$

- 分别将前向总线和后向总线抽象为前向节点 $T_{\text{fwd}}$ 和后向节点 $T_{\text{bwd}}$ 。因此，该平台体系结构被抽象为如图5.3所示的多队列多服务台串并联混合排队系统。消息依据具有速率 $\lambda_i (\lambda_i > 0)$ 的泊松过程到达。

### (三) 不确定时延——排队模型



- M/PH/1排队系统是一个QBD过程，其状态空间为

$$\Omega = \{0\} \cup \{(i, j) : i \geq 1, 1 \leq j \leq n\}$$

- 用状态字典顺序，QBD过程无穷小生成器表示为如下Block-Jacobi矩阵：

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda & \lambda\beta & & & & \\ S^0 & -\lambda I + S & \lambda I & & & \\ & S^0\beta & -\lambda I + S & \lambda I & & \\ & & S^0\beta & -\lambda I + S & \ddots & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

### (三) 不确定时延——排队模型



- 矩阵二次方程

$$R^2 S^0 \beta + R(-\lambda I + S) + \lambda I = 0$$

的最小非负解为  $R = \lambda(\lambda I - \lambda e\beta - S)^{-1}$

- 每个控制应用中的顾客平均数为

$$E[L] = (1 - \rho)\beta R(I - R)^{-2} e$$

● 表5.1 汽车  
CAN系统  
的一个实  
例

Msg	ECU	$T_i$	$\varepsilon_i$	$P_i$	Msg	ECU	$T_i$	$\varepsilon_i$	$P_i$	Msg	ECU	$T_i$	$\varepsilon_i$	$P_i$
$m_1$	$E_2$	10	0.27	1	$m_{24}$	$E_3$	25	0.23	24	$m_{47}$	$E_2$	50	0.19	47
$m_2$	$E_2$	10	0.27	2	$m_{25}$	$E_3$	25	0.25	25	$m_{48}$	$E_4$	100	0.27	48
$m_3$	$E_3$	5	0.19	3	$m_{26}$	$E_2$	20	0.27	26	$m_{49}$	$E_3$	100	0.27	49
$m_4$	$E_3$	10	0.25	4	$m_{27}$	$E_5$	25	0.27	27	$m_{50}$	$E_1$	100	0.27	50
$m_5$	$E_1$	10	0.19	5	$m_{28}$	$E_2$	20	0.27	28	$m_{51}$	$E_3$	100	0.13	51
$m_6$	$E_6$	10	0.27	6	$m_{29}$	$E_1$	25	0.17	29	$m_{52}$	$E_3$	100	0.27	52
$m_7$	$E_1$	100	0.27	7	$m_{30}$	$E_2$	10	0.21	30	$m_{53}$	$E_1$	100	0.19	53
$m_8$	$E_1$	100	0.15	8	$m_{31}$	$E_2$	20	0.27	31	$m_{54}$	$E_3$	100	0.13	54
$m_9$	$E_1$	100	0.17	9	$m_{32}$	$E_4$	10	0.27	32	$m_{55}$	$E_3$	100	0.13	55
$m_{10}$	$E_5$	25	0.27	10	$m_{33}$	$E_3$	10	0.27	33	$m_{56}$	$E_5$	100	0.27	56
$m_{11}$	$E_1$	100	0.15	11	$m_{34}$	$E_3$	10	0.27	34	$m_{57}$	$E_3$	100	0.25	57
$m_{12}$	$E_1$	20	0.19	12	$m_{35}$	$E_1$	25	0.25	35	$m_{58}$	$E_3$	100	0.13	58
$m_{13}$	$E_2$	100	0.19	13	$m_{36}$	$E_6$	25	0.23	36	$m_{59}$	$E_3$	100	0.13	59
$m_{14}$	$E_1$	100	0.19	14	$m_{37}$	$E_4$	50	0.27	37	$m_{60}$	$E_4$	100	0.17	60
$m_{15}$	$E_5$	100	0.27	15	$m_{38}$	$E_4$	50	0.27	38	$m_{61}$	$E_1$	100	0.27	61
$m_{16}$	$E_1$	10	0.23	16	$m_{39}$	$E_5$	50	0.27	39	$m_{62}$	$E_1$	100	0.13	62
$m_{17}$	$E_2$	100	0.25	17	$m_{40}$	$E_3$	50	0.21	40	$m_{63}$	$E_3$	100	0.19	63
$m_{18}$	$E_2$	100	0.27	18	$m_{41}$	$E_4$	50	0.27	41	$m_{64}$	$E_1$	100	0.27	64
$m_{19}$	$E_2$	50	0.25	19	$m_{42}$	$E_6$	50	0.27	42	$m_{65}$	$E_1$	100	0.13	65
$m_{20}$	$E_3$	10	0.27	20	$m_{43}$	$E_2$	50	0.27	43	$m_{66}$	$E_1$	100	0.13	66
$m_{21}$	$E_6$	10	0.27	21	$m_{44}$	$E_5$	100	0.27	44	$m_{67}$	$E_2$	50	0.27	67
$m_{22}$	$E_6$	25	0.27	22	$m_{45}$	$E_2$	25	0.15	45	$m_{68}$	$E_1$	100	0.13	68
$m_{23}$	$E_3$	25	0.23	23	$m_{46}$	$E_2$	50	0.19	46	$m_{69}$	$E_4$	100	0.27	69

# (三) 不确定时延——排队模型

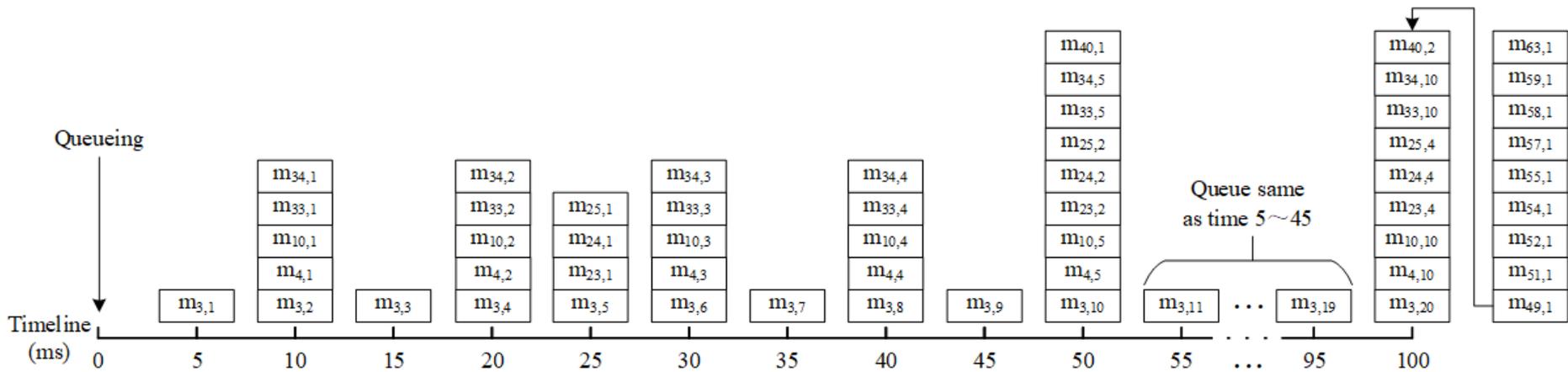


图5.4 在一个超周期内第3个控制应用的消息队列

### (三) 不确定时延——总线配置



- 我们建立约束优化模型如下：

Min:

$$F(\tau) = \sum_{i=1}^c \frac{\lambda_i}{\lambda} (C_h E[L_i] + C_d E[\omega_i]) = \sum_{i=1}^c \frac{\lambda_i}{\lambda} \left( C_h + \frac{1}{\lambda_i} C_d \right) E[L_i],$$

subject to:

$$\begin{cases} \gcd\{\varepsilon_i, 1 \leq i \leq \sigma\} < \tau \leq \frac{H}{\xi c}, \\ \sum_{i=1}^{\delta} \varepsilon_i + \sum_{j=1}^c \tau \left( \left\lfloor \frac{H}{\lfloor H/(\xi\tau) \rfloor \tau} \right\rfloor - \xi_j \right) < H, \\ \xi = \max\{\xi_i, 1 \leq i \leq c\}, \\ \sigma = \sum_{i=1}^c \zeta_i, \quad \delta = \sum_{i=1}^c \xi_i, \end{cases}$$

### (三) 不确定时延——总线配置



- 对于任意控制应用，服务时间  $t(t \geq 0)$  的PH分布的pdf表示为：

$$f(t) = \beta \exp(St)S^0$$

其中

$$S = \begin{pmatrix} -x_1 & x_1 & & & \\ & -x_2 & x_2 & & \\ & & -x_3 & x_3 & \\ & & & -x_4 & \\ & & & & \ddots \end{pmatrix}$$

- 我们用最大似然估计法估计参数S。

## (三) 不确定时延——总线配置



### 算法 5.1 基于 DFP 方法的参数估计算法

输入:  $t_{k,j}$  .

输出:  $\bar{x}$  .

- (1) 初始化向量  $\bar{x}_1$  以及精度  $\varepsilon = 10^{-6}$  ;
- (2) 令  $H_1 = I$ ,  $k=1$ ; 用式(5.6)计算梯度  $\bar{g}_1 = \nabla \psi(\bar{x}_1)$  ;
- (3) WHILE  $\|\nabla \psi(\bar{x}_k)\| > \varepsilon$  DO
- (4)  $\bar{d}_k = -H_k \bar{g}_k$  ;
- (5) 从  $\bar{x}_k$  出发沿着方向  $\bar{d}_k$  进行线搜索, 求步长  $\theta_k$  ,

## (三) 不确定时延——总线配置



### 算法 5.2 最优 minislot 算法

输入：表 5.1 中的 ECU,  $T_i$ ,  $\varepsilon_i$ , 和  $P_i$ , 以及控制应用数  $c$ .

输出： $\tau_{\min}$ ,  $F(\tau_{\min})$ .

- (1) 计算第  $i(i=1,2,\dots,c)$  个控制应用的消息 ID 数, 得到消息 ID 集合  $MsgID_i$ , 令  $\zeta_i = \|MsgID_i\|$ ;
- (2) 计算  $\gcd\{\varepsilon_i, 1 \leq i \leq \sigma\}$  和超周期  $H = \text{lcm}\{T_i, 1 \leq i \leq \sigma\}$ , 其中  $\sigma = \sum_{i=1}^c \zeta_i$ ,  $\text{lcm}$  表示最小公倍数;
- (3) 计算  $\xi_i = \sum_{j \in MsgID_i} \varphi_{ij}$ ,  $\varphi_{ij} = \frac{H}{T_j}$ , 以及  $\xi = \max\{\xi_i\}, 1 \leq i \leq c$ ;
- (4) 计算总线环长度  $\ell = \frac{H}{\xi}$ ;
- (5) 计算每个控制应用的到达率  $\lambda_i, i=1,2,\dots,c$ ;

### (三) 不确定时延——总线配置



- 我们实现算法得到最优化模型的最优解为：

$$\tau_{\min} = 0.01ms, \quad F(\tau_{\min}) = 0.2868w$$

- 同时获得每一个总线环的长度 $L$ 和minislot数 $MSNo$ ，分别为1.2ms和120个minislot。
- 在实验结果中，我们发现当  $x_1 = x_2 = x_3 = x_4$  时服务时间的PH密度函数的最大似然函数值最大。

### (三) 不确定时延——总线配置

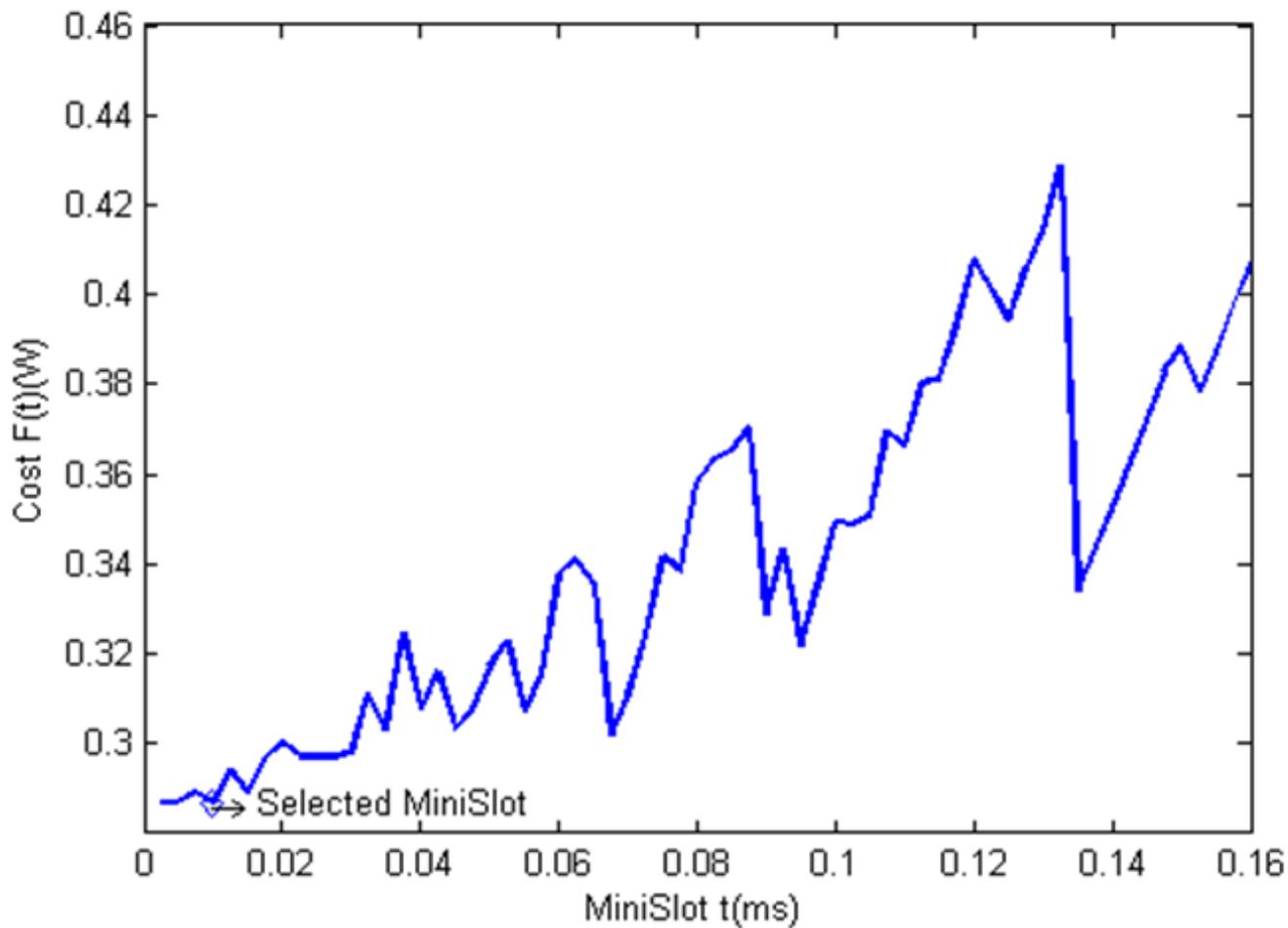


图5.5 最小时隙与系统成本的关系

### (三) 不确定时延——总线配置

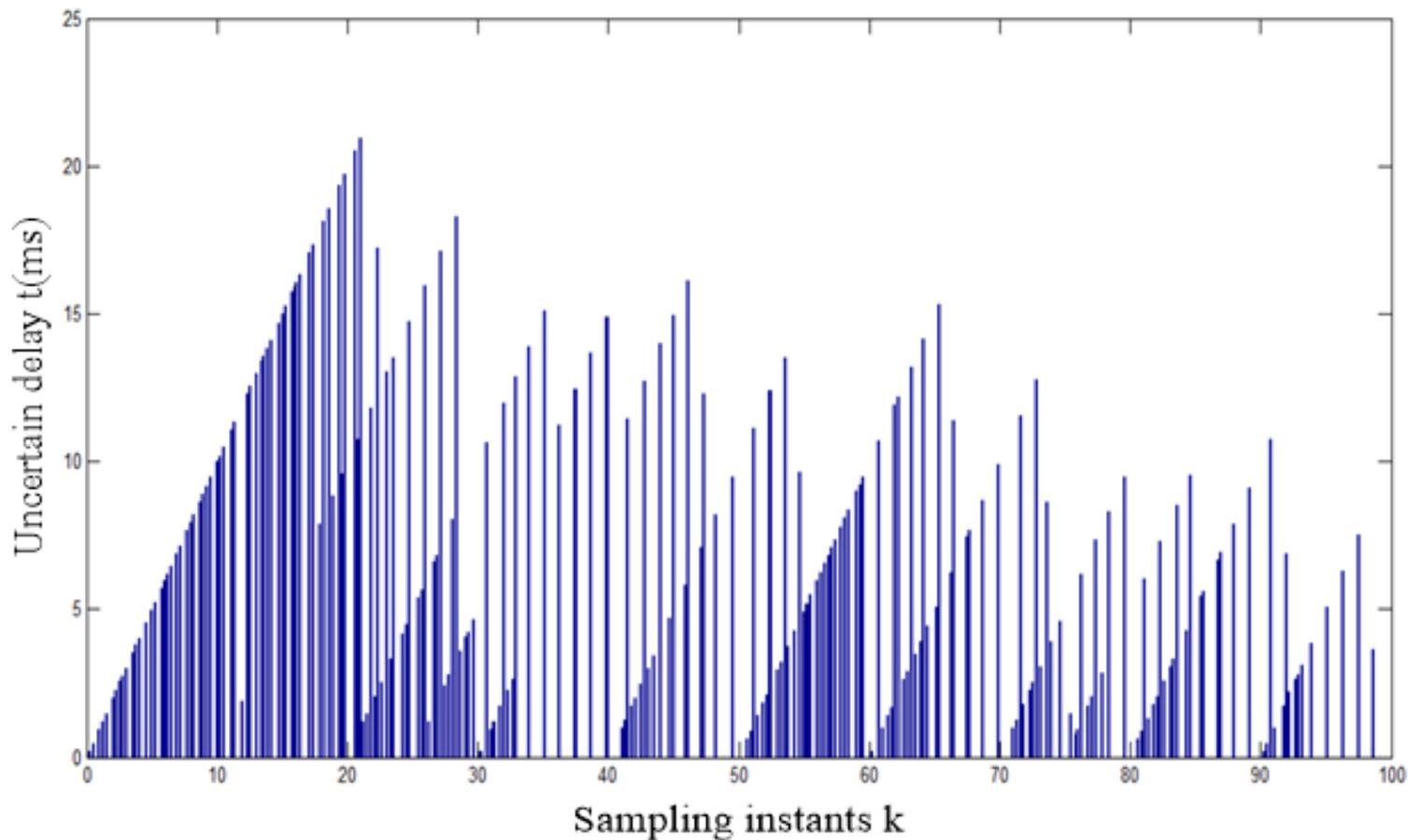


图5.6 参考系统中的不确定时延

### (三) 不确定时延——pdf



定理 1. 每个控制应用的 MRT 的 cdf 的 LSTs 表示为

$$W^*(s) = (1 - \rho) \beta \sum_{k=0}^{\infty} \lambda^k [(sI - S)^{-1} e \beta]^k (sI - S)^{-1} S^0,$$

其中  $\text{Re } s \geq 0$ 。

### (三) 不确定时延——pdf



定理 5.2 每个控制应用的 MRT 的 cdf 由下式计算:

$$W(t) = (1 - \rho)\beta \int_0^t \Phi(u) \exp(-uS) du \cdot \exp(tS)S^0,$$

其中  $t \geq 0$ , 且

$$\Phi(t) = -V^0 S - V^0 \exp[t(-V^0)^{-1}] \lambda e \beta,$$

以及

$$V^0 = -(\lambda e \beta + S)^{-1}.$$

### (三) 不确定时延——pdf



定理 5.3 每个控制应用的 MRT 的 cdf 和 *pdf* 分别表示为

$$W(t) = 1 + \beta(S^{-1} - tI - \mu^{-1}tS)\exp(tS)S^0 \\ + \frac{1}{\lambda}(\beta - \rho\beta + \mu^{-1}\beta S)[\exp(t\lambda) - 1]\exp(tS)S^0,$$

以及

$$p(t) = (1 - \rho)\beta \exp[t(\lambda I + S)]S^0 \\ + \left[ \frac{1}{\lambda} \exp(t\lambda) - \frac{1}{\lambda} - t \right] (\beta + \mu^{-1}\beta S) \exp(tS)SS^0,$$

其中  $t \geq 0$ .

# (三) 不确定时延——pdf



ID	$\lambda_i$	$\mu_i$	$x_i$	$\kappa_i$	ID	$\lambda_i$	$\mu_i$	$x_i$	$\kappa_i$	ID	$\lambda_i$	$\mu_i$	$x_i$	$\kappa_i$
1	0.10	0.61	1.5316	11.6	24	0.04	0.17	0.4155	39.9	47	0.02	0.11	0.2832	54.0
2	0.10	0.44	1.1087	16.2	25	0.04	0.15	0.3866	43.1	48	0.01	0.21	0.5315	26.8
3	0.20	0.32	0.7895	27.5	26	0.05	0.30	0.7464	22.3	49	0.01	0.11	0.2727	51.6
4	0.10	0.24	0.6070	31.1	27	0.04	0.33	0.8175	19.9	50	0.01	0.10	0.2588	54.4
5	0.10	0.49	1.2126	14.7	28	0.05	0.25	0.6337	26.5	51	0.01	0.10	0.2514	56.0
6	0.10	0.36	0.9062	20.0	29	0.04	0.29	0.7295	22.3	52	0.01	0.09	0.2326	60.5
7	0.01	0.81	2.0187	7.5	30	0.10	0.30	0.7596	24.3	53	0.01	0.10	0.2391	58.8
8	0.01	0.47	1.1706	12.6	31	0.05	0.20	0.5042	33.7	54	0.01	0.09	0.2163	65.1
9	0.01	0.32	0.7973	18.2	32	0.10	0.97	2.4194	7.3	55	0.01	0.08	0.2037	69.1
10	0.04	0.51	1.2708	12.8	33	0.10	0.21	0.5199	37.2	56	0.01	0.13	0.3295	42.8
11	0.01	0.24	0.6114	23.4	34	0.10	0.20	0.4905	39.8	57	0.01	0.08	0.1882	74.9
12	0.05	0.37	0.9363	17.7	35	0.04	0.24	0.6087	26.8	58	0.01	0.07	0.1801	78.3
13	0.01	0.44	1.0906	13.5	36	0.04	0.18	0.4470	37.0	59	0.01	0.07	0.1709	82.5
14	0.01	0.17	0.4157	34.1	37	0.02	0.49	1.2331	12.5	60	0.01	0.18	0.4463	31.8
15	0.01	0.34	0.8456	17.2	38	0.02	0.35	0.8700	17.5	61	0.01	0.09	0.2204	63.8
16	0.10	0.33	0.8173	22.4	39	0.02	0.20	0.4881	31.0	62	0.01	0.08	0.2073	67.9
17	0.01	0.30	0.7488	19.3	40	0.02	0.11	0.2790	54.8	63	0.01	0.07	0.1629	86.7
18	0.01	0.23	0.5807	24.6	41	0.02	0.26	0.6594	23.0	64	0.01	0.08	0.1931	72.9
19	0.02	0.25	0.6333	23.9	42	0.02	0.10	0.2569	59.7	65	0.01	0.07	0.1835	76.8
20	0.10	0.23	0.5658	33.7	43	0.02	0.15	0.3645	41.7	66	0.01	0.07	0.1739	81.1
21	0.10	0.31	0.7719	23.8	44	0.01	0.17	0.4301	33.0	67	0.02	0.10	0.2612	58.7
22	0.04	0.20	0.4899	33.6	45	0.04	0.21	0.5162	31.8	68	0.01	0.07	0.1654	85.3
23	0.04	0.18	0.4558	36.2	46	0.02	0.12	0.3045	50.1	69	0.01	0.15	0.3766	37.5

- 表5.3 第i个消息相应参数 $x_i$ 的估计值及其WCRT

# (三) 不确定时延——pdf

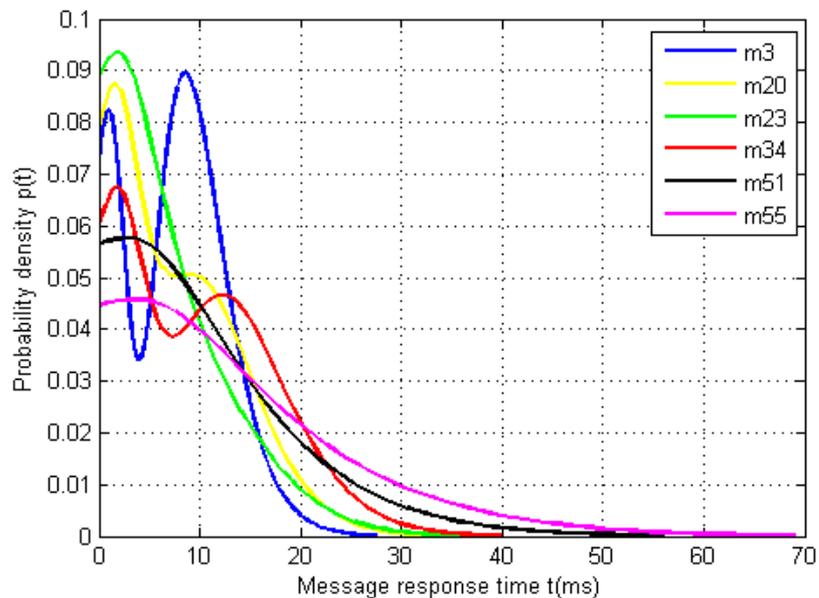
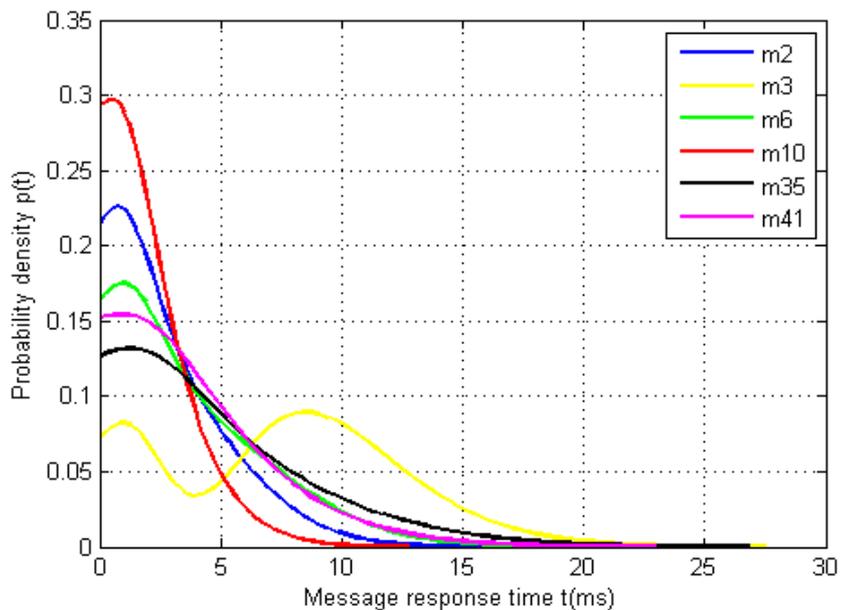


图5.7~图5.8 部分消息的响应时间的pdf曲线图

### (三) 不确定时延——pdf



ID	RMSE	$R^2$	K-S	ID	RMSE	$R^2$	K-S	ID	RMSE	$R^2$	K-S
1	0.0013	0.99998	0.005	24	0.0032	0.99986	0.008	47	0.0016	0.99996	0.006
2	0.0024	0.99992	0.006	25	0.0025	0.99992	0.006	48	0.0041	0.99977	0.010
3	0.0024	0.99995	0.007	26	0.0014	0.99997	0.004	49	0.0036	0.99982	0.010
4	0.0029	0.99990	0.008	27	0.0032	0.99986	0.009	50	0.0029	0.99989	0.008
5	0.0022	0.99993	0.008	28	0.0016	0.99997	0.005	51	0.0022	0.99994	0.007
6	0.0036	0.99982	0.009	29	0.0034	0.99984	0.009	52	0.0025	0.99992	0.009
7	0.0019	0.99995	0.006	30	0.0068	0.99939	0.017	53	0.0028	0.99989	0.009
8	0.0030	0.99988	0.007	31	0.0030	0.99988	0.010	54	0.0025	0.99992	0.007
9	0.0025	0.99991	0.008	32	0.0027	0.99989	0.009	55	0.0015	0.99997	0.005
10	0.0016	0.99997	0.005	33	0.0028	0.99991	0.008	56	0.0025	0.99991	0.009
11	0.0019	0.99995	0.007	34	0.0040	0.99983	0.013	57	0.0026	0.99991	0.010
12	0.0027	0.99989	0.008	35	0.0040	0.99977	0.012	58	0.0038	0.99981	0.012
13	0.0024	0.99992	0.006	36	0.0020	0.99994	0.006	59	0.0031	0.99988	0.009
14	0.0034	0.99984	0.010	37	0.0011	0.99998	0.004	60	0.0036	0.99983	0.009
15	0.0021	0.99994	0.007	38	0.0028	0.99989	0.008	61	0.0015	0.99997	0.006
16	0.0031	0.99987	0.008	39	0.0019	0.99995	0.005	62	0.0019	0.99995	0.004
17	0.0026	0.99991	0.008	40	0.0041	0.99978	0.009	63	0.0026	0.99991	0.007
18	0.0011	0.99998	0.004	41	0.0024	0.99992	0.006	64	0.0019	0.99995	0.006
19	0.0022	0.99993	0.008	42	0.0038	0.99981	0.014	65	0.0020	0.99994	0.006
20	0.0030	0.99989	0.010	43	0.0026	0.99991	0.010	66	0.0016	0.99996	0.006
21	0.0023	0.99993	0.009	44	0.0029	0.99988	0.009	67	0.0021	0.99994	0.007
22	0.0019	0.99995	0.006	45	0.0027	0.99990	0.007	68	0.0032	0.99987	0.009
23	0.0017	0.99996	0.005	46	0.0028	0.99990	0.007	69	0.0017	0.99996	0.006

- 表5.4 ANCS中的消息拟合分布统计分析表
- 最大RMSE是0.0068， $R^2$ 最小值是0.99939，以及K-S最大值是0.017。
- 与文献[27]中的表2比较，对于早期估计，我们的结果更精确。

### (三) 不确定时延——预测



灰色系统理论是一个处理具有数据较少和信息不完全特征的不确定性问题的理论。由于时延不确定性，传统GM(1, 1)不能直接运用于ANCS系统中。

假定系统中的背景值用两个参数  $\alpha$  和  $\gamma$  计算，其中它们的和不总是等于1，即

$$z^{(1)}(k) = \alpha x^{(1)}(k) + \gamma x^{(1)}(k-1),$$

### (三) 不确定时延——预测



定理5.4 GM(1, 1)的一阶微分方程为  $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$  ,  
能变换为

$$x^{(0)}(k) = \left[ \frac{b - (\alpha + \gamma)ax^{(0)}(1)}{1 + \alpha a} \right] \left( \frac{1 - \gamma a}{1 + \alpha a} \right)^{k-2},$$

其中  $a$  和  $b$  分别是发展系数和灰色输入,  $k = 2, 3, \dots, n$  .

### (三) 不确定时延——预测



- 在PTGM(1, 1)中，序列 $\hat{X}^{(0)}$ 的预测值由下式定义：

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \left[ \frac{b - \omega(\alpha + \gamma)ax^{(0)}(1)}{1 + \alpha a} \right] \left( \frac{1 - \omega \min\{\alpha, \gamma\}a}{1 + \alpha a} \right)^{k-2},$$

其中

$$\omega = \begin{cases} 1 - W(x^{(0)}(k-1)), & P\{W(x^{(0)}(j)) < 0.5\} > 0.5, \\ W(x^{(0)}(k-1)), & \text{Otherwise,} \end{cases}$$

### (三) 不确定时延——预测



- 我们使用平均绝对百分误差(MAPE)来构建适应度函数为：

$$MAPE(\alpha, \gamma) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \times 100\%$$

- 根均方百分比误差(RMSPE)是最常用的精确度量：

$$RMSPE(\alpha, \gamma) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \left[ \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right]^2} \times 100\%$$

## (三) 不确定时延——预测



算法 5.3 两参数 PTGM(1,1)的优化算法

输入: 每个消息响应时间的初始序列  $X^{(0)}$ .

输出:  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $MAPE(\alpha, \gamma)$ , 以及  $RMSPE(\alpha, \gamma)$ .

(1) 由式(2.9)计算 AGO 序列;

(2) 由式(5.37)计算背景值  $Z^{(1)}$  关于符号变量  $\alpha$  和  $\gamma$  的符号表达式;

(3) 由最小二乘方计算参数  $a$  和  $b$ , 即  $\hat{U} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ , 其中

$$Y = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix};$$

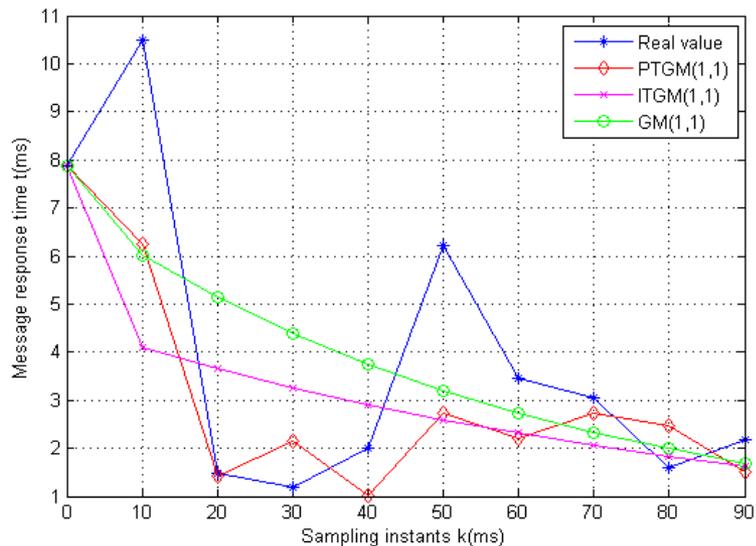
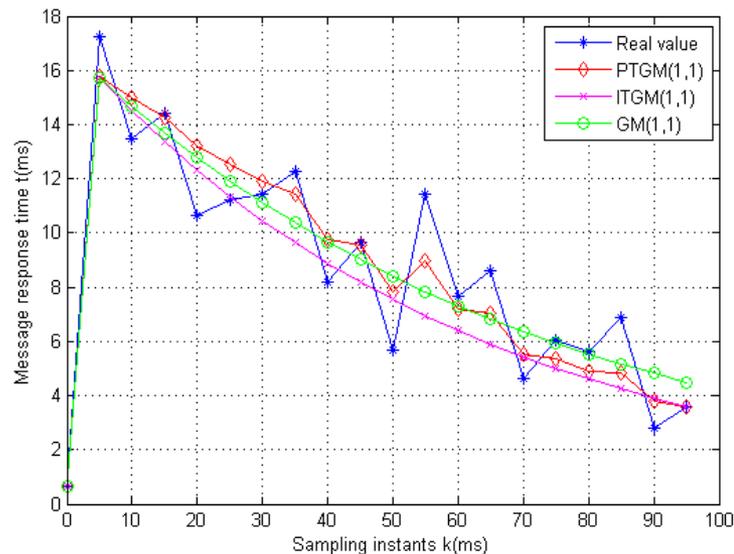
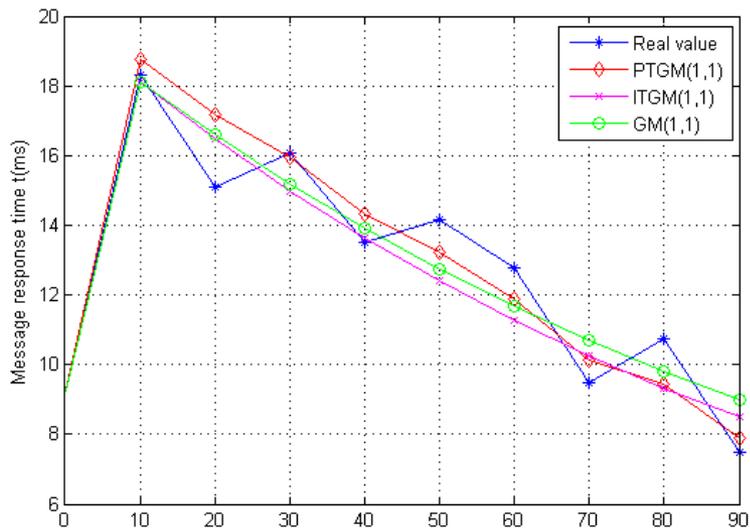
# (三) 不确定时延——预测



ID	PTGM (1, 1)				ITGM (1, 1)			GM (1, 1)	
	$\alpha$	$\beta$	MAPE	RMSPE	$\alpha$	MAPE	RMSPE	MAPE	RMSPE
1	0.9110	0.0579	10.7793	11.6546	0.5557	11.2592	12.0446	10.9111	16.6843
2	0.6005	-0.2031	18.7455	21.9080	1.3279	19.2495	22.5744	20.5430	23.8058
3	0.4605	0.2319	14.7597	18.3841	0.5845	18.1305	21.8840	18.8721	25.9465
4	0.7146	-0.1339	10.6770	13.5263	0.5323	11.2842	14.4131	12.5637	15.5185
5	0.3588	0.3763	15.5991	24.4904	0.5058	16.4415	20.7637	16.2007	27.2693
6	0.2061	0.8660	40.0277	45.6045	1.5866	65.4939	83.9672	87.0142	127.279
10	0.5806	0.3986	3.7043	4.7236	0.4912	24.5622	29.2825	25.0412	28.2737
12	-0.2580	1.2511	25.8821	27.1803	0.5079	25.2914	30.0797	26.1496	29.7466
16	-2.9678	3.9124	27.3957	36.6965	0.5261	41.6109	47.5201	40.7243	47.7868
20	0.7768	-0.1137	9.2270	11.3267	0.5300	9.7522	11.7460	10.2999	12.3121
21	0.1671	0.6845	34.4147	46.1168	2.0491	42.8135	53.2240	59.4914	82.3315
22	0.5492	0.4508	38.7443	48.7817	0.9450	51.3058	63.9753	108.632	142.062
23	0.5362	0.4014	0.4337	0.5274	0.4959	1.3591	1.5318	1.5590	1.5920
24	0.0384	0.9382	0.3169	0.4530	0.4987	0.4010	0.4486	0.5234	0.5479
25	0.5179	0.4818	0.0186	0.0293	0.5001	0.0209	0.0231	0.2742	0.2866
26	-1.0914	3.2596	20.1295	24.1307	0.4798	23.6006	27.9809	23.7720	28.4443
27	0.0699	0.9066	12.1753	15.1631	0.7937	34.3377	38.4766	34.5011	42.1164
28	-0.8172	2.7321	18.0720	21.2076	0.4860	19.9415	24.1121	20.0489	24.3637
29	0.4922	-0.0591	18.8756	22.1001	0.7958	21.8774	27.7722	41.5503	52.2167
30	0.5489	0.0943	25.7931	45.6623	0.6217	27.0471	47.0546	31.3708	50.4620
31	-0.3446	1.8946	12.9282	15.2651	0.4947	13.3163	16.5628	13.3755	16.5916
32	0.3004	0.6815	20.9190	22.7608	0.0287	21.1864	23.3555	21.4853	24.9075
33	0.4942	0.1605	7.3898	8.3553	0.5410	9.1657	10.6462	9.5682	11.5760
34	0.5168	0.1702	6.8103	7.8237	0.5381	8.5217	9.6392	8.8311	10.2358
35	1.0923	-0.2910	14.3668	16.9134	0.6387	14.4420	16.7770	18.5735	20.2554
36	0.4770	0.2860	37.3835	44.1359	0.6605	78.0861	107.221	79.3627	101.474
45	0.4836	0.0186	29.9192	34.3351	0.6603	34.5990	40.6272	38.6430	46.0276

- 表5.5 不同的GMs(1, 1)的最优参数值和性能度量

# (三) 不确定时延——预测



● 消息  $m_{34}$ ,  $m_3$ ,  $m_6$  的实际值和预测值比较

# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• **研究背景与意义**

二

• 研究现状及挑战

三

• 论文的主要工作

四

• **总结与展望**

五

• 在读期间科研成果

六

• 致 谢



## 四、总结与展望——总结

本文考虑ANCS中的网络通信与控制协同设计中的若干问题，研究了以改善系统性能、减少系统成本为目的三方面问题：

- 控制器调度；
- 资源约束下的资源动态供应；
- 不确定端到端的MRT分析。



## 四、总结与展望——总结

1

设计了一种新的双信道ANCS体系结构，通过构建排队系统，允许FSDMC模型中的部分空闲控制器进入半休眠状态，以改善系统性能、减少系统成本。

2

构建了一种新的 $N/(d, c)-M/M/c/K/SMWV$ 排队系统。建立一种多目标优化模型，设计最优停止算法和FSDMC调度算法获得参数值，配置双信道ANCS。

3

提出了滞弹性系统中的滞弹性计算模型和计算方法。用随机环境下的3-状态 $M/M/1/K$ 排队系统建模FSDMC模型，精确计算滞弹性值。影响



## 四、总结与展望——总结

4

构建了一种新的 $N/(d, c)-M/M/c/K/AMWV$ 排队系统。构建最优化模型，获得系统参数最优值。提出了一种最优CPR不变自适应算法，动态调整控制器服务率。

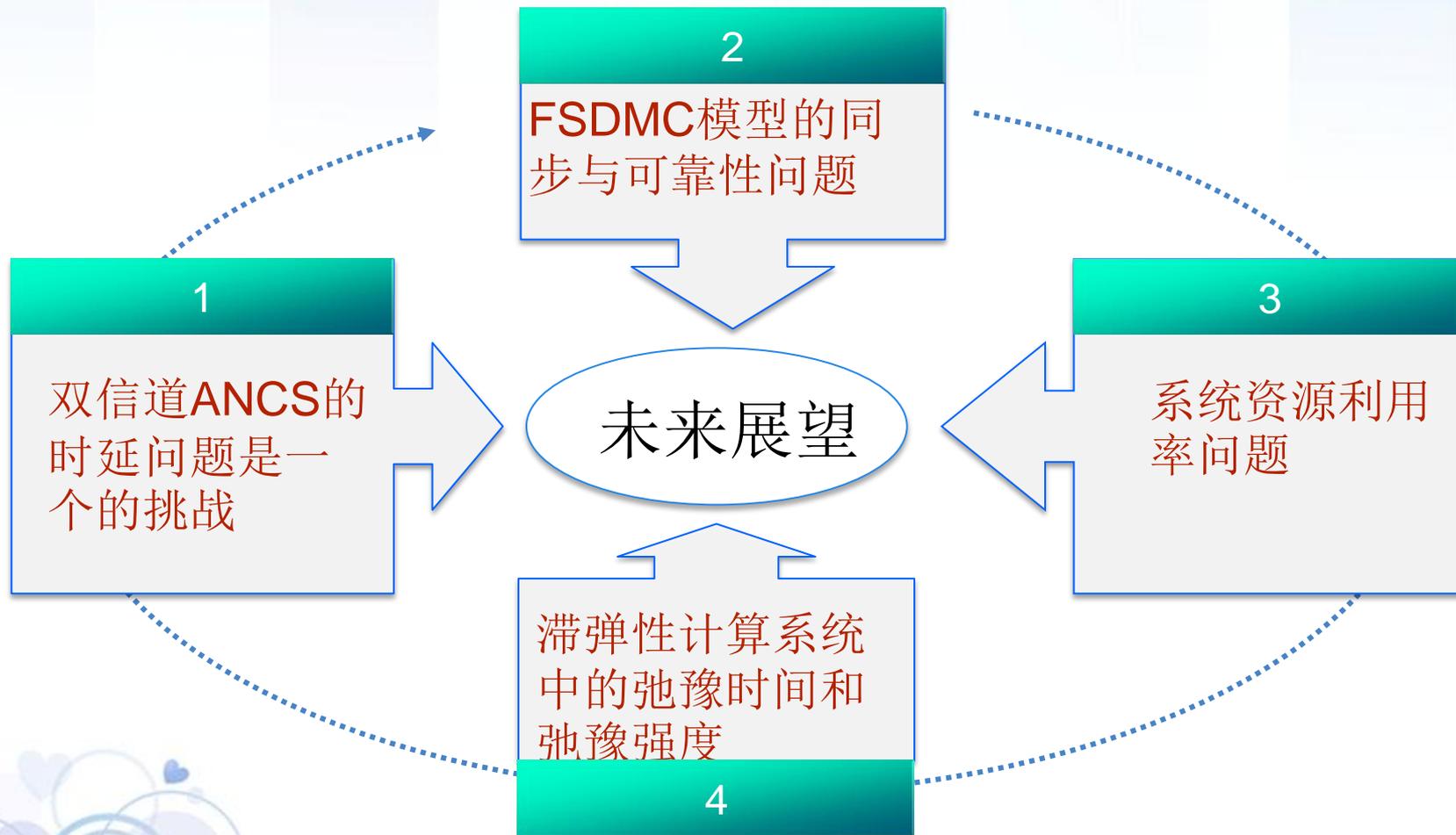
5

考虑单信道ANCS中不确定MRT分析，用具有随机大小的批量到达的连续时间 $M/PH/1$ 排队系统建模ANCS，生成每个消息相应的pdf和cdf闭式表达式。

6

提出了一种新的PTGM(1,1)模型，预测消息的响应时间。设计了一种基于DFP方法的PTGM(1,1)两参数优化算法，最小化MAPE，获得两个参数的最优值。

# 四、总结与展望——展望



# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• **研究背景与意义**

二

• 研究现状及挑战

三

• 论文的主要工作

四

• 总结与展望

五

• **在读期间科研成果**

六

• 致 谢

## 五、在读期间科研成果



- **Hongfang Gong**, Renfa Li, Jiyao An, Weiwei Chen, and Keqin Li. Scheduling algorithms of flat semidormant multicontrollers for a cyber-physical system. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2017, 13(4): 1665-1680 (SCI一区TOP期刊)
- **Hongfang Gong**, Renfa Li, Jiyao An, Yang Bai, and Keqin Li. Quantitative Modeling and Analytical Calculation of Anelasticity for a Cyber-Physical System. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, in press, 2018 (SCI三区, IF=5.131)
- **Hongfang Gong**, Renfa Li, Yang Bai, Jiyao An, and Keqin Li. Message Response Time Analysis for Automotive Cyber-Physical Systems with Uncertain Delay: An M/PH/1 Queue Approach. **Performance Evaluation**, 2018, 125: 21-47 (SCI三区, CCF B类)

# 汇报内容



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

一

• **研究背景与意义**

二

• **研究现状及挑战**

三

• **论文的主要工作**

四

• **总结与展望**

五

• **在读期间科研成果**

六

• **致 谢**



湖南大學  
HUNAN UNIVERSITY



嶽麓書院

谢谢各位专家!