

# 分布式测量系统服务窗口动态调度方法研究

罗小川<sup>1</sup> 刘兴刚<sup>1</sup> 李丹程<sup>2</sup> 曲蓉霞<sup>1</sup>

**摘要** 在网络制造环境下, 动态时间性能是测量系统的重要指标. 针对基于 CORBA (Common object request broker architecture) 和尺寸测量接口标准 (Dimensional measurement interface standard, DMIS) 的分布式测量系统 (Distributed measurement system, DMS), 根据多用户非抢占优先排队网络静态性能模型, 提出基于无穷小摄动分析的样本轨道划分方法, 建立测量系统服务窗口的动态调度算法, 实现测量系统的时间性能调优. 通过在一个制造工厂中应用实验, 证明了此方法的有效性.

**关键词** 窗口调度, 样本轨道, 性能评价, 摄动分析, 分布式测量系统  
**中图分类号** TP302.7

## Dynamic Scheduling Algorithm of Service Windows in a Distributed Measurement System

LUO Xiao-Chuan<sup>1</sup> LIU Xing-Gang<sup>1</sup> LI Dan-Cheng<sup>2</sup> QU Rong-Xia<sup>1</sup>

**Abstract** Dynamic time performance is one of the key factors for distributed measurement system (DMS) in networked manufacturing environments. Based on the no-preemptive priority queuing network model and infinitesimal perturbation analysis theory, the partition schemes of sample paths are proposed. Then a new dynamic scheduling algorithm is presented to optimize the dynamic time performance of DMS based on CORBA and dimensional measurement interface standard (DMIS). Industrial application experiments in a factory demonstrate the effectiveness of the new algorithm.

**Key words** Window scheduling, sample path, performance estimation, infinitesimal perturbation analysis, distributed measurement system (DMS)

网络技术和计算机技术的发展为信息的获取和处理提供了有力支持, 网络化制造的理念日渐深入<sup>[1]</sup>. 传统测量系统依托网络向着网络化、分布式的方向发展, 成为分布式测量系统 (Distributed measurement system, DMS)<sup>[2-3]</sup>. 先后出现了各种分布式测量系统框架模型, 如 CLIENT/SERVER 模型, 虚拟仪器总线框架模型等<sup>[4-5]</sup>. 分布式测量系统开始作为一个复杂系统对象受到广泛关注. 罗小川等<sup>[6]</sup> 采用多用户非抢占优先排队网络模型对 DMS 的状态空间进行了描述, 给出了 DMS 的静态时间性能评估指标和方法, 为 DMS 的设计、管理和优化提供了定量分析方法. 网络化制造的复杂多变造成分布式测量系统运行性能的变化, 尤其是时间性

能的大幅波动, 将影响系统的稳定性和可靠性. 然而如何在线调度优化 DMS 的时间性能, 至今仍然是 DMS 有待解决的关键问题. 摄动分析 (Perturbation analysis, PA) 方法直接在线观察系统事件, 不需要考虑排队系统参数识别问题, 避免了排队网络分析方法中要求的苛刻限制条件, 非常适合于在线性能评价<sup>[7]</sup>, 但是需要解决所观察样本事件的划分问题. 本文以基于 CORBA (Common object request broker architecture) 和尺寸测量接口标准 (Dimensional measurement interface standard, DMIS) 的分布式测量系统为对象, 提出了基于样本轨道的无穷小摄动分析 (Infinitesimal perturbation analysis, IPA) 性能评价方法, 建立了分布式测量系统服务窗口的动态时间性能优化调度算法. 在一个工厂实例中进行的实验应用, 证明了此算法的有效性.

### 1 分布式测量系统框架模型<sup>[6]</sup>

基于 CORBA 和 DMIS 分布式测量系统由能够协同完成测量工作的一群测量系统组件及其相互约定的通讯协议组成 (如图 1 所示). 该系统可分为三部分: 框架系统, 测量设备组件和外部应用组件. 框架系统包括 DMIS 对象服务 (DMIS service, DMIS), DMIS 语句解析器 (DMIS translator, DMIST), 测量数据管理 (Data management,

收稿日期 2007-01-09 收修改稿日期 2007-07-16  
Received January 9, 2007; in revised form July 16, 2007  
国家自然科学基金 (70721001, 60604025), 教育部留学回国人员科研启动基金, 东北大学博士后科研基金资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (70721001, 60604025), the Scientific Research Foundation of State Education Ministry for the Returned Overseas Chinese Scholars, and Postdoctoral Research Foundation of Northeastern University  
1. 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004 2. 东北大学软件学院 沈阳 110004  
1. Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004 2. Software College, Northeastern University, Shenyang 110004  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00690

DATAM), 事件通知管理器 (Event management, EVENTM) 和数学算法模块 (Math computation module, MATH); 测量设备组件包括 DMEs (Dimensional measuring equipments) 和其他仪器设备; 外部应用组件包括 CAD/CAM 系统, 制造过程监控系统 (Monitor), 管理信息系统 (MIS), 统计报告系统 (Statistic) 以及遗留系统 (Legacy) 等. 外部应用组件通过 ORB (Object request broker) 请求框架系统提供测量服务; 框架系统分析处理测量请求, 建立测量程序, 读取数据, 调用数学算法, 通过 DMSs 驱动仪器设备完成测量, 再把结果返回给外部应用组件.

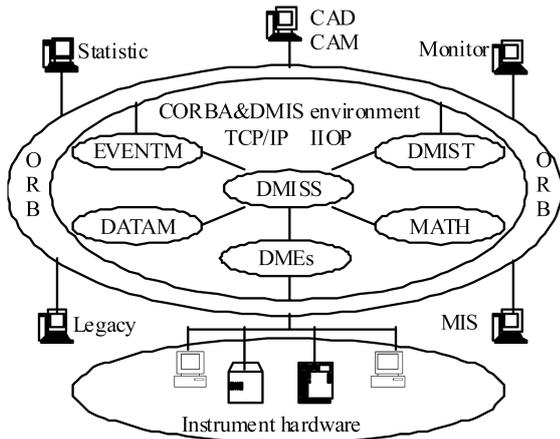


图 1 分布式测量系统框架模型  
Fig. 1 Framework system of distributed measuring system

测量系统的工作流程复杂, 状态空间维数多, 系统性能受到多方面因素的影响. 基于 CORBA 和 DMIS 的分布式测量系统的运行状态可由多用户非抢占优先排队网络来表述 (如图 2 所示), 即将要求测量系统服务的各类请求进行分类排队, 高优先级的请求系统优先处理. 图 2 中  $r_{ij}$  ( $i, j \in N$ ) 为服务站  $i$  向服务站  $j$  输出用户请求的路由系数, 由系统工艺过程和具体的工作环境决定 (具体内容参见文献 [6]).

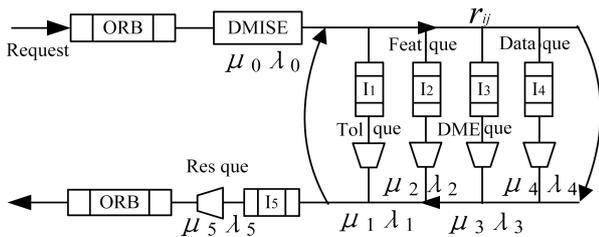


图 2 测量系统排队网络模型  
Fig. 2 Queuing network model of distributed measuring system

进入测量系统的用户有四类: 公差测量请求用户, 特征测量请求用户, DME 操作请求用户和数据处理请求用户. 相应地, 系统有四个服务台: Tolerance queue (Tol que), Feature queue (Feat que), DMSs queue (DME que), Data queue (Data que) 来对相应请求进行服务. 此外, 还有两个服务台: DMISE Queue (DMISE), Result Queue (Res Que) 分别具有接受、分配用户请求和返回用户请求服务结果的功能. 目前多用户非抢占优先排队网络模型还没有成熟有效的解法. 由于系统用户的单向变换性 (即高优先级用户可以转化为低优先级用户, 反之, 则不能), 可以采用隔离方法来分别研究各个服务台的性能, 最后获得系统静态性能指标.

定义 1. 设排队网络系统有  $K$  类用户 ( $K \in \mathbf{N}^+$ ), 第  $k'$  类用户有  $l_{k'}$  ( $k' \in K$ ) 个, 并有  $N$  个服务站 ( $N \in \mathbf{N}^+$ ). 对于服务站  $i$ , 有  $C_i$  个窗口和  $I_i$  个排队位置, 每个窗口的服务率为  $\mu_i$ , 外界用户请求的到达速率为:  $\lambda_{0i}$ ,  $i \in \mathbf{N}$ , 表示由系统外部进入系统第  $i$  个服务站的速率. 则系统的状态空间  $\Omega$  可定义为  $\Omega = \{X | X_{i,k,r}, \forall (k \in K \wedge r \in (C_i + I_i) \wedge i \in \mathbf{N})\}$ , 故测量系统的某一时刻处于状态空间  $\Omega$  某状态的概率由  $P$  给出

$$P = [P_1, P_2, P_3, P_4]^T \tag{1}$$

其中,  $P_i = [P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^{k'}, \dots, P_i^{K_i-1}, P_i^{K_i}]$ ,  $i \in \mathbf{N}$ ,  $K_i$  为服务站  $i$  可以服务的用户种类. 最后可得 DMS 静态性能指标 (具体内容参见文献 [6]).

然而排队网络方法只能处理系统的稳态过程, 建模的合理性与结论的正确性都以系统达到稳定状态为前提条件, 难以满足分布式测量系统动态性能管理与优化的要求.

## 2 DMS 动态时间性能管理

DMS 系统由空间位置分散的设备和用户组成, 这些设备和用户通过网络实现测量信息通讯. 由于 DMS 系统工作环境的动态多变性, 系统需要根据环境的变化在线调整系统运行参数, 保证系统可靠、有效地运行, 这对于保持大规模动态系统操作的有效性意义重大. DMS 系统状态的随机变化使性能评价函数难以用解析表达式精确定义, 往往只能通过仿真或试验的方法来实现. IPA 方法利用系统运行时数据完成系统性能的在线评价, 解决了性能评价函数的问题. 在此基础上, 系统服务台自主适应动态环境, 将相应的参数和状态由 CORBA 事件送到本地和系统状态监控组件. 状态监控组件利用 CORBA 事件的信息计算服务台当前的性能数据, 优化服务台新的运行参数, 再由管理配置组件根据状态监控组件提供的数据将服务站设置为新参数. 状态监控

组件可以与管理配置组件运行在同一计算机上,也可以在不同计算机上. 状态监控和管理配置分为本地和系统两级. 这样,测量系统内建立起以状态监控和配置管理组件为基础的系统动态时间性能管理体系(如图3所示).

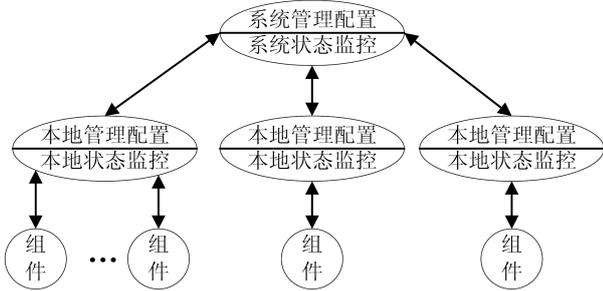


图3 系统动态时间性能管理体系

Fig.3 Hierarchy of the dynamic performance management

动态时间性能是测量系统最重要的指标,其评价方法是DMS系统实现时间性能动态管理的基础.根据Burke原理,在排队系统中系统性能的最优是各个服务站相应性能最优的积累<sup>[8]</sup>.因此可以将图2排队网络系统动态性能的描述简化为每个系统服务台的动态性能描述.

### 2.1 系统假设

对分布式测量系统排队模型中的任一服务台引入如下假设:

- 1) 顾客到达系统的时间间隔构成随机变量序列,且这些变量相互独立同分布;
- 2) 服务台对第 $n$ 个顾客的服务时间构成随机变量序列 $\{S(n, j, \theta_i)\}$ ,且这些变量为相互独立同分布,分布函数为 $F_j(x, \theta_i)$ .其中, $S(n, j, \theta_i) = x$ ,且 $\theta_i \in (\alpha_i, \beta_i)$ 为在一定的系统性能下所允许的系统参数,是系统的摄动参数;
- 3) 对 $j = 1, 2, \dots, N$ ,随机变量 $S(n, j, \theta_i)$ 为 $\theta_i \in (\alpha_i, \beta_i)$ 几乎处处可导函数;
- 4) 对任意 $\theta_i \in (\alpha_i, \beta_i)$ ,分布函数 $F_j(x, \theta_i)$ 为 $x$ 的连续函数;
- 5) 假设系统不定常的空闲.

从工业应用的角度看,上述假设不会构成对系统的苛刻限制.假设1)和2)是未经推导的经验结论,是摄动分析实现的基础.当随机变量 $S(n, j, \theta_i)$ 为参数 $\theta_i \in (\alpha_i, \beta_i)$ 的指数分布(这个假设对制造系统一般性成立)时,假设3)和4)就可以满足.当系统用户到达率小于所有服务台的服务率时,假设5)必定成立.

### 2.2 $T_i$ 的灵敏度函数

对服务台 $i$ (如无特殊说明, $i$ 均指服务台 $i$ ),定

义多用户非抢占优先排队模型 $Q_i$ (参见文献[6]),且具有不同种类的用户 $k = 1, 2, 3, \dots, K_i$ ,目标是研究用户通过服务台 $i$ 的时间 $T_i$ 对达率 $\lambda_{ji}$ ( $i, j \in N$ )(即从服务台 $j$ 到服务台 $i$ 的用户到达率)的变化率,为系统性能的动态调度管理提供依据.由于 $\lambda_{ji}$ 是基于时间的统计量,无法描述系统动态的变化,因此,在采用IPA方法时将 $\lambda_{ji}$ 的摄动转变为用户到达间隔时间 $\theta_i = 1/\lambda_i$ 的摄动进行研究,其中 $\lambda_i = \lambda_{0,i} + \sum_{j=i}^{j=N} \lambda_{ji}$ .

令 $X_j$ 为第 $j$ 个用户获得的实际服务时间, $A_j$ 为第 $j$ 个进入系统的用户到达时刻, $\theta_j$ 为第 $j$ 个用户与第 $j+1$ 个用户的到达间隔时间,即

$$\theta_j = A_{j+1} - A_j \quad (2)$$

那么,由系统假设有 $\{X_j\}$ 和 $\{\theta_j\}$ 是独立同分布的两个随机变量序列, $X_j$ 和 $\theta_j$ 的概率分布是绝对连续的,且 $E(X_j) < E(\theta_j)$ .对于特定的一段观察时间内用户到达和服务过程 $\xi$ , $\xi \in \Omega$ ( $\Omega$ 为样本空间),可得在该观察时间的 $\{X_j(\xi)\}$ 和 $\{\theta_j(\xi)\}$ 序列.

根据 $Q_i$ 的定义,在DMS中CORBA服务功能组件可以看作一个个M/M/C/K排队服务系统,而来自应用组件的请求就是服务系统的用户,它的时间花费 $T_i$ 可以定义为

$$T_i = W_i + S_i \quad (3)$$

式中, $W_i$ 为用户等待时间,是用户进入服务台排队开始到该用户排到队列第一所经历的时间; $S_i$ 为用户获得服务的时间,是用户进入服务窗口开始获得服务到该用户服务完成离开队列所经历的时间.

DMS系统关于用户通过时间的指标定义为 $T_i \in [T_{i,\min}, T_{i,\max}]$ .其中, $T_{i,\max}$ 由系统设计目标决定, $T_{i,\min}$ 由系统服务台资源空闲程度决定.对应的用户到达间隔时间也存在允许区间 $[\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i]$ . $\underline{\theta}_i$ 就是在当前工作参数下允许的最小到达时间间隔.利用文献[6]平衡状态方程的结论, $\underline{\theta}_i$ 可以由 $T_{i,\max}$ 求得.只有几乎所有的 $\theta_i > \underline{\theta}_i$ 才能保证系统运行的实际用户通过时间不会超出范围,即 $T_i < T_{i,\max}$ .否则就需要调整系统的工作参数,使 $\theta_i > \underline{\theta}_i$ .另一方面,由文献[6]系统动态平衡状态下的用户通过时间方程,可以得到与 $T_{i,\min}$ 对应的最大时间间隔 $\bar{\theta}_i$ .一旦DMS系统得以实施, $\bar{\theta}_i$ 就被固定下来,不再进行动态调整.因此后面只讨论关于 $\underline{\theta}_i$ 的情况.

用户到达间隔时间必有如下的关系

$$\theta_i = \frac{1}{\lambda_i} > \underline{\theta}_i \quad (4)$$

根据式(3),定义动态时间性能测度函数为

$$T_i(\underline{\theta}_i, \xi) = E(W_i(\underline{\theta}_i, \xi)) + E(S_i(\underline{\theta}_i, \xi)) \quad (5)$$

**定理 1**<sup>[9]</sup>. 若  $T_i(\underline{\theta}_i, \xi)$  各项为分段线性连续的, 则  $T_i^m(\underline{\theta}_i, \xi)$  也分段线性连续.

由定理 1 可得到用户  $j$  通过时间  $T_i^j$  在  $\underline{\theta}_i \rightarrow \underline{\theta}_i + \Delta\underline{\theta}_i$  时的变化为

$$\Delta T_j = \begin{cases} [Sb_j(\underline{\theta}_i, \xi) + (\alpha - 1)l_j(\underline{\theta}_i, \xi)]\Delta\underline{\theta}_i, & j > C_i \\ 0, & j \leq C_i \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $l_j(\underline{\theta}_i, \xi)$  为用户的编号  $j$  在样本区间里面的序号;  $Sb_j(\underline{\theta}_i, \xi)$  为用户  $j$  所属的样本区间段的第一个用户的编号.

当  $\Delta\underline{\theta}_i$  足够小时, 用户平均通过时间  $T_i^m$  也是线性的, 因此  $T_i^m$  对  $\underline{\theta}_i$  的灵敏度为

$$\frac{\partial T_i^m}{\partial \underline{\theta}_i} = \begin{cases} \frac{1}{L-C_i} \sum_{j=C_i}^L [(\alpha - 1)l_j(\underline{\theta}_i, \xi) + Sb_j(\underline{\theta}_i, \xi)], & j > C_i \\ 0, & j \leq C_i \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 在  $j \leq C_i$  的情况下,  $T_i^m$  对  $\underline{\theta}_i$  的变化不产生变化. 以后如无特殊说明, 讨论的是  $j > C_i$  的情况.

### 3 系统样本轨道划分

定理 1 中的样本轨道  $\xi$  是在线性连续的前提下得到的, 即系统的参数没有发生改变的情况下才成立. 当系统参数发生变化时, 需要重新建立新的样本轨道区间. 因此系统观察得到的样本信息被划分为多个分段的样本轨道区间.

#### 3.1 样本分段区间的确定方法

系统服务台的状态由等待队长、服务窗口中的用户、最新用户到达时间、最新用户离去时间、最新用户获得服务时间等内容构成. 对于一个随机 Markov 过程, 根据马氏无后效特性, 可以建立性能参数分段线性连续区间的确定方法.

首先, 设这些分段区间的两个标志点为系统分段状态更新点. 它具有两个基本特征: 1) 系统服务台为空, 没有用户在系统中存在; 2) 从最近一次用户离开系统开始, 已经过了至少  $\underline{\theta}_i$  时间.

**定义 2.** 称具有如下状态的系统状态点为更新点:

- 1) 服务台缓冲区等待用户数为 0;
- 2) 服务台窗口只有一个用户在接受服务;
- 3) 服务台忙期开始时间为 0;
- 4) 上次用户到达时间为 0.

假设系统初始化为空, 并开始从 0 计时, 则第 1 个用户到达时刻的状态点必为更新点, 令  $L(\underline{\theta}_i) \geq 1$  为下一更新点出现前通过服务台的用户数目.

**定义 3.** 用户服务时间和用户到达间隔为  $\sigma$ -域的非降随机序列, 即

$$\mathcal{F}_i = \sigma(X_1(\xi), \theta_1(\xi), X_2(\xi), \theta_2(\xi), \dots, X_j(\xi), \theta_j(\xi))$$

又令  $L_k(\underline{\theta}_i) \geq 1$  为第  $k-1$  与第  $k$  个更新点间通过服务台的用户数, 称第  $k-1$  与第  $k$  个更新点间的状态点形成第  $k$  个状态分段区间. 那么, 整个观察期间共有  $N$  个区间, 总的用户数目为

$$L_N(\underline{\theta}_i) = \sum_{k=1}^N L_k(\underline{\theta}_i), \quad N \geq 1$$

对不同的  $N$  和  $\underline{\theta}_i$ ,  $L_N(\underline{\theta}_i)$  是关于序列  $\mathcal{F}_i$  的停留时间.

**定理 2.** 对任意的采样路径  $\xi$ , 存在一个随机序列  $\{N_n\}$ , 使

$$L_N(\underline{\theta}_{i,\min}) = L_{N_n}(\underline{\theta}_i)$$

也就是  $L_N(\underline{\theta}_{i,\min})$  是  $L_N(\underline{\theta}_i)$  的子序列, 更新点划分与  $\underline{\theta}_i$  的取值无关.

**证明.** 对任意随机变量序列

$$X_1(\xi), \theta_1(\xi), X_2(\xi), \theta_2(\xi), \dots, X_j(\xi), \theta_j(\xi)$$

设每个进入服务台的用户为  $j$ , 此时系统允许的最小到达间隔为  $\underline{\theta}_i$ , 记为  $j(\underline{\theta}_i)$ , 则参数为  $\underline{\theta}_i$  的用户  $j$  到达时间必早于参数为  $\underline{\theta}_{i,\min}$  的用户  $j$ , 有

$$A[j(\underline{\theta}_i)] \leq A[j(\underline{\theta}_{i,\min})]$$

同理, 用户  $j$  的离开时间有

$$D[j(\underline{\theta}_i)] \leq D[j(\underline{\theta}_{i,\min})]$$

设参数为  $\underline{\theta}_{i,\min}$  的服务台达到某一个更新点时的时刻为  $t$ , 则  $t - \underline{\theta}_{i,\min}$  时间前为最后一个用户的离开时间, 而在  $[t - \underline{\theta}_{i,\min}, t]$  内没有用户进入服务台. 考虑参数为  $\underline{\theta}_i$  的服务台路径样本, 在  $t$  时刻, 服务台必为空, 因为其用户的离开时间均早于参数为  $\underline{\theta}_{i,\min}$  的服务台. 因而, 在  $t$  时刻, 参数为  $\underline{\theta}_i$  的服务台必经历该更新点状态.

所以,  $\underline{\theta}_{i,\min}$  与  $\underline{\theta}_i$  得到的更新点划分是一致的, 也就是更新点划分与  $\underline{\theta}_i$  无关.  $\square$

由定理 2 可知, 当  $\theta_i \geq \underline{\theta}_{i,\min}$  时, 不需要重新建立新的样本轨道, 否则需要重新建立新的样本轨道. 一般地, 可设  $\underline{\theta}_{i,\min} = \underline{\theta}_i$ .

#### 3.2 $C_i$ 参数计算方法

从 IPA 方法得到的灵敏度为估计系统时间性能变化提供了保证, 通过灵敏度的变化就可以得到在新的条件下系统所能达到的时间性能指标.

对于每一段观察样本, 允许  $\theta_i \in [\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i]$ , 仍可保证  $T_i \in [T_{\min}, T_{\max}]$ . 当存在  $\theta_i \notin [\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i]$  时, 则必须使  $C_i \rightarrow \hat{C}_i$ , 确保系统重新回到  $T_i \in [T_{\min}, T_{\max}]$ . 通过计算  $dT_i/d\theta_i$  的灵敏度得到在新的工作条件  $\theta_i$  下系统新的时间性能  $\hat{T}_i$ , 比较  $\hat{T}_i$  是否在区间  $[T_{\min}, T_{\max}]$  内. 如果在区间  $[T_{\min}, T_{\max}]$  内, 则继续运行, 否则调整  $C_i$  使  $\hat{T}_i \in [T_{\min}, T_{\max}]$ . 通过折半查找的递推寻优算法可以给出  $C_i$  的建议值  $\hat{C}_i$ . 然后, 再次进行  $dT_i/d\theta_i$  的仿真计算, 确定出  $d\hat{T}_i/d\theta_i$  后, 由  $d\hat{T}_i/d\theta_i$  值再次进行  $\hat{T}_i$  的计算, 判断其是否在区间  $[T_{\min}, T_{\max}]$  内. 如此反复, 直到使  $\hat{T}_i \in [T_{\min}, T_{\max}]$  为止. 此时得到的  $\hat{C}_i$  就是系统在新的条件下应该设置的新参数.

由于时间性能动态管理是对瞬时状态的响应, 因此要求能够快速得到新的参数值  $\hat{C}_i$ , 只要新的  $\hat{C}_i$  能使  $\hat{T}_i \in [T_{\min}, T_{\max}]$  即可, 而并不要求新的  $\hat{C}_i$  使  $\hat{T}_i$  为全局最优值. 所以选择以时间性能变化误差作为判定参数  $\hat{C}_i$  是否满足要求的判据上, 用户可以根据自己的需要选定不同的误差值, 得到不同程度的优化性能. 采用折半查找方法计算  $\hat{C}_i$  的递推寻优算法可表示为

$$C_i = \begin{cases} C_i + \frac{C_{i,\max} - \hat{C}_i}{2}, & \hat{T}_i - T_i > \delta \\ \hat{C}_i, & -\delta \leq \hat{T}_i - T_i \leq \delta \\ C_i + \frac{\hat{C}_i - C_i}{2}, & \hat{T}_i - T_i < -\delta \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\delta$  为系统允许的无穷小变化量,  $\delta = \beta(T_{i,\max} - T_{i,\min})$ ,  $\beta \leq 0.5$ , 为一个系数;  $\hat{T}_i$  为关于  $\hat{C}_i$  的新的时间性能值, 由 IPA 方法得到的  $dT_i/d\theta_i$  计算获得;  $C_{i,\max}$  为系统允许的最大服务窗口数, 由系统资源决定, 且  $1 \leq \hat{C}_i \leq C_{i,\max}$ .

由式 (8) 寻找  $C_i$  的最优值要经过几次仿真计算, 每次仿真都根据上一次仿真新产生的  $C_i$  来进行, 直到关于  $C_i$  的仿真结果落在系统允许的范围内, 即保证:  $d\hat{T}_i/d\theta_i - dT_i/d\theta_i < \delta$ .

在动态调度过程中增加系统服务窗口  $C_i$  后, 可能会出现状态更新点条件不满足的情况. 为了获得新的状态更新点, 可以暂时阻塞系统, 当系统内原有用户都离开后, 重新开始系统服务. 这样的处理不会影响系统的稳定性和时间性能的动态调度.

### 3.3 $C_i$ 参数配置算法流程

系统在进入新的采样区间后就进行一次系统性能评价计算, 系统参数动态配置在每次性能评价完成之后进行. 系统动态时间性能的配置流程如下 (见图 4):

- 1) 系统初始化, 将所有变量赋初始值.
- 2) 在线实时系统状态跟踪, 包括  $\lambda_i$  的变动识别, 实时对系统的状态数据划分分段区间等. 如果出现  $\lambda_i$  的大变动, 或系统状态进入另一个分段区间, 或者系统管理员指令要求, 都要进行动态性能评价.
- 3) 根据系统当前的性能数据, 判断是否需要在线参数调整. 如果需要调整, 转到 4), 否则, 转到 2).
- 4) 计算系统新的参数值, 这里指  $C_i$ , 根据新的  $C_i$  用 IPA 仿真计算新的系统性能数据. 如果系统性能在最佳工作状态点的附近, 且不大于预先设定的值  $\delta$ , 则将这个  $C_i$  设定为系统新的参数; 否则, 重新计算新的  $C_i$  值.
- 5) 在新的系统性能参数下重新跟踪系统的状态变化.

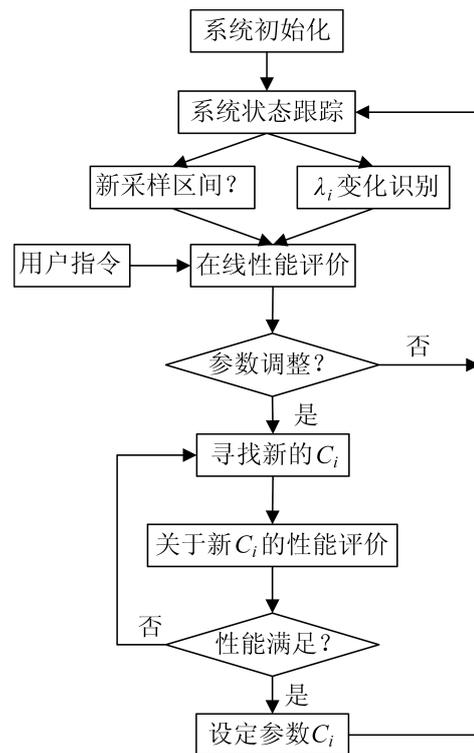


图 4 时间性能动态参数配置算法流程  
Fig. 4 Algorithm process of time-performance dynamic configuration

## 4 系统实验

以航天总公司某厂的分布式测量系统 (见下页图 5) 为背景进行实验, 验证 DMS 动态时间性能、动态调度算法的作用和有效性. 服务器上运行测量系统的框架服务组件, 系统内有两台设备和两个应用终端. 本文实验系统处于独立运行状态, 因此在实验过程中, 部分数据由手工进行输入和设置.

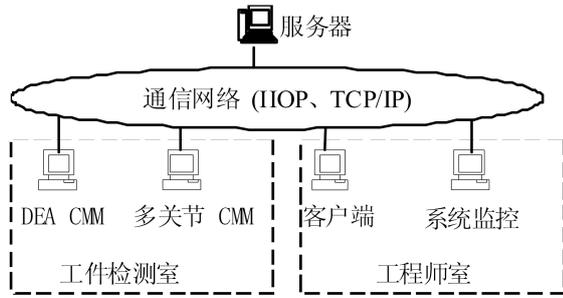


图5 分布式测量系统的原型系统

Fig.5 Prototype system of distributed measuring system

以图2中服务站  $I_3$  为对象, 进行服务站  $I_3$  的动态时间性能评价和配置. 服务站  $I_3$  的基本参数如表1, 这些参数是通过统计方法对工厂车间的工作情况进行采样获得的.

表1 系统服务站模型的参数数据

Table 1 Model parameters of the service station

站号 $i$	$\lambda$ (个/s)	$\mu_i$ (个/s)	$C_i$ (个)	$I_i$ (个)	$\alpha$
3	7	5	3	4	10

根据文献 [6] 对 DMS 排队网络模型描述可知, 服务站用户到达时间间隔服从指数分布, 对应于服务站 3 参数的到达时间间隔  $\theta$  如图6所示.

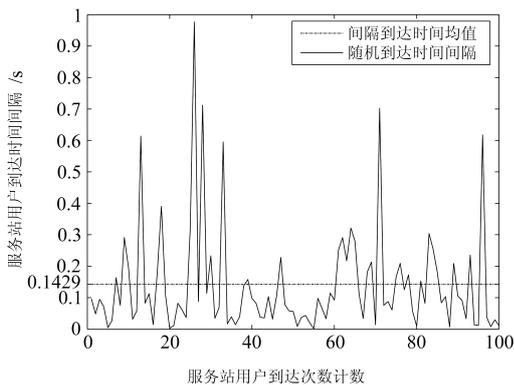


图6  $\lambda = 7$  的用户到达时间间隔的随机分布

Fig.6 Stochastic distribution of interval arriving time when  $\lambda = 7$

因为动态性能表征的是性能变化, 因此实验中用曲线而不是数据表来表示实验结果. 从图7可以看到在没有进行动态性能评价和配置的情况下, 系统的用户通过时间表现为随机无序状态, 甚至超过了允许范围. 采用系统动态时间调度算法后(图8), 用户通过时间变化趋于平稳, 随着到达用户数目的变化而出现上升和下降, 但总是在预期的范围内变

化, 其主要原因是 DMS 系统通过变化服务窗口数量来调整服务台的用户停留时间, 从而保证用户在服务台的时间是在允许的范围内. 在某些尖峰位置, 用户通过时间有所减少, 就是经过配置后, 服务窗口增加的结果.

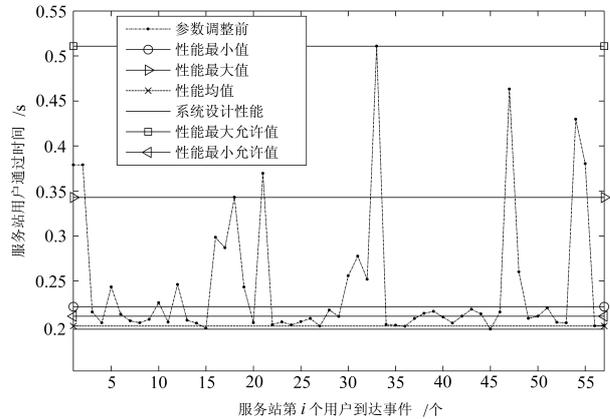


图7 系统服务站在参数配置前时间性能指标的变化

Fig.7 Time-performance curve without parameter configuration

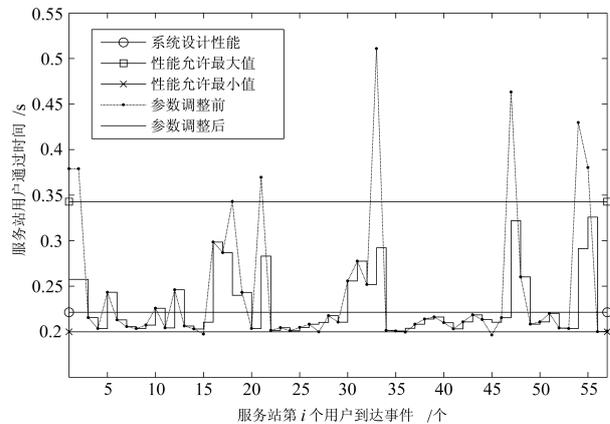


图8 实施动态时间性能配置前后对比

Fig.8 Contrast of time performance curve with respect to configuration

### 5 结论

由于网络化制造面对复杂多变的市场, 导致面向网络化制造的分布式测量系统在运行过程中的动态性, 因此需要对系统时间性能进行动态调度. 本文提出了基于无穷小摄动方法的动态时间性能优化调度方法, 为动态调整服务站窗口数  $C_i$ , 保证系统运行时间性能提供了依据, 是实现系统适应多变制造环境的基础. 通过对一个实际系统的应用实验, 验证了基于 IPA 动态时间性能调度算法的有效性.

## References

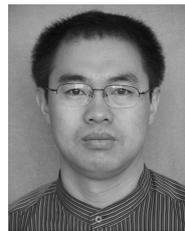
- 1 Xu Yun, Xiao Tian-Yuan, Liang Ce. Integration of networked manufacturing platforms and manufacturing grid. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, **12**(11): 1838–1847  
(徐云, 肖田元, 梁策. 网络化制造平台集成及制造网格研究. 计算机集成制造系统, 2006, **12**(11): 1838–1847)
- 2 Shi Wei-Xing, Zhang Jin-Xiang, Xie Yu-Qiang. Implementation of distributed network measurement system in WAN. *Computer Engineering*, 2005, **31**(2): 128–129  
(石卫星, 张金祥, 谢余强. 分布式网络测量系统集成策略的实现. 计算机工程, 2005, **31**(2): 128–129)
- 3 Luo Xiao-Chuan, Che Ren-Sheng, Cui Chang-Cai. Distributed network measuring system — new oriented advanced manufacturing measurement system. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(1): 1–7  
(罗小川, 车仁生, 崔长彩. 分布式网络化测量系统 — 面向先进制造的新一代测量系统. 光学精密工程, 2002, **10**(1): 1–7)
- 4 Rawnsley D J, Hummels D M, Segee B E. A virtual instrument bus using network programming. In: Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa, Canada: IEEE, 1997. 694–697
- 5 Benatazo L, Bertocco M, Ferraris F, Ferrero A, Offelli C, Parvis M. A web-based distributed virtual educational laboratory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(2): 349–356
- 6 Luo Xiao-Chuan, Ye Dong, Che Ren-Sheng, Huang Qing-Cheng. Researches on the description of status space in distributed measurement system. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, **35**(2): 188–194  
(罗小川, 叶东, 车仁生, 黄庆成. 分布式测量系统状态空间描述方法研究. 哈尔滨工业大学学报, 2003, **35**(2): 188–194)
- 7 Cao X R. A unified approach to Markov decision problems and performance sensitivity analysis. *Automatica*, 2000, **36**(5): 771–774
- 8 Burke P J. The output of a queueing system. *Operations Research*, 1956, **4**(6): 699–704
- 9 Luo Xiao-Chuan, Liu Xiao, Wang Cheng-En. Dynamic time performance measure for distributed measurement system. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, **13**(3): 614–620  
(罗小川, 刘晓, 王成恩. 分布式测量系统动态时间性能测度方法. 计算机集成制造系统, 2007, **13**(3): 614–620)



罗小川 博士, 副教授. 主要研究方向为复杂系统优化. 本文通信作者.

E-mail: luoxch@mail.neu.edu.cn

(**LUO Xiao-Chuan** Associate professor at Northeastern University. He received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology. His main research interest is optimization of complex systems. Corresponding author of this paper.)



刘兴刚 博士, 讲师. 主要研究方向为系统建模与仿真.

E-mail: liuxinggang@ise.neu.edu.cn

(**LIU Xing-Gang** Lecturer at Northeastern University. He received his Ph.D. degree from Northeastern University. His research interest covers system modeling and simulation.)



李丹程 硕士, 副教授. 主要研究方向为软件架构, 嵌入式系统应用.

E-mail: ldc@mail.neu.edu.cn

(**LI Dan-Cheng** Associate professor at Northeastern University. Her research interest covers software architecture and embedded software system.)



曲蓉霞 硕士, 副教授. 主要研究方向为制造执行系统.

E-mail: qurongxia@ise.neu.edu.cn

(**QU Rong-Xia** Associate professor at Northeastern University. Her main research interest is manufacturing executive system.)