

基于实时服务质量的测控网络实时消息分析研究^{*}

易 勇^{1,2} 陈建孝³ 胡学海¹

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)¹ (成都大学计算机科学与技术系 成都 610106)²
(韩山师范学院数学与信息技术学院 广东潮州 521041)³

摘 要 根据分布式测控网络系统实时通信的特点及实时性的内在要求,提出了实时服务质量的观念及指标体系,建立了抽象的实时服务质量数学函数,并用实时服务质量具体指标对实时消息进行约束。实时服务质量对测控网络实例的实时分析表明:实时服务质量观念及指标体系对分布式测控网络这一类实时系统的分析与实现具有指导意义。

关键词 实时服务质量,实时消息,约束条件

Research on the Test and Control Network of Quality of Real-time Service Based on Real-time Message

YI Yong^{1,2} CHENG Jian-Xiao³ Hu Xue-Hai¹

(Department of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)¹

(Department of Computer Science and Technology, Chengdu University, Chengdu 610106)²

(College of Mathematics and Information Technology, HanShan Teachers College, ChaoZhou 521041)³

Abstract According to the feature and inherence request of distributed test and control network system real-time communication, the idea of quality of real-time service (QoRS) and index systems was suggested. An abstract math function of QoRS was erected and the real-time message was constrained with the QoRS concrete index. The analysis of instance by the QoRS indicates: the idea of QoRS and index systems could direct the analysis and implement of distributed test and control network.

Keywords QoRS, Real-time message, Constraint condition

1 引言

分布式测控网络的实时性是系统时间确定性和可预测性的根本保证,作为直接支持底层信息通信的测控网络,实时是最根本的、最重要的要求。然而在这方面的研究工作还远远不够,传统的计算机通信网络的分析方法不能满足实时应用的需求。传统的分析方法中,对于系统的实时性等性能指标,往往是从网络通信的共性出发来考虑网络通信服务质量(Quality of Service 简称 QoS),而 QoS 的量化指标粒度过于粗糙并且没有针对具体的实时测控网络应用特点。因此,在分析测控网络这类分布式关键实时网络中一直缺乏合适的 QoS 指标体系,限制了对其进一步的研究。

鉴于实时性对分布式测控网络的重要性,本文提出实时服务质量的观念及指标体系,通过对实时服务质量的分析研究,阐述实时服务质量在测控网络分析中的应用。在实时服务质量的分析研究方面,目前国内外的有关文献还鲜见报道,只是针对实时服务质量的多样性,Shin 等提出统计实时通道,但是统计实时是假使超出截止期的信息是均匀分布的,在度量方法中无法保证精细粒度的实时性能指标^[1],可以描述硬实时和非实时,在一定程度上满足应用对象 QoS 多样性的要求^[2],但是,在实时服务质量语义、分析方法和实现等方面还缺乏完整的系统方法。

论文首先分析了测控网络实时通信的特点;接着针对实时测控网络系统的内涵,提出实时服务质量的观念及指标体

系,进一步把实时服务质量抽象成实时服务质量函数;在此基础上针对实时测控网络的具体应用实例提出实时服务质量对实时消息的约束及其实时性能分析应用。

2 测控网络实时通信特点

实时测控网络属于分布式实时系统,整个系统由若干个处理节点和连接各节点的互连网络组成。系统的运行由各节点上处理的任务实例和网络中传递的消息实例组成,各测控任务可在不同处理节点上运行,任务之间的消息通信则通过互连网络进行,任两个节点间的消息通信不需要经过其它交换设备或路由设备,其典型结构如图 1 所示。



图 1 分布式测控系统的典型结构模型

系统传递的消息,可分为节点内消息和节点间消息两种。节点内消息指消息的发送任务和接收任务在同一节点内运行的消息,此时消息传递的开销就是系统调用的执行时间,由于这些系统调用的执行时间已经算入相应任务的响应时间,因此在实时消息的时间分析中这部分时间应不计算在内;节点间消息是指消息的发送者和接收者在不同节点上运行的消

^{*}四川省教育厅基金资助项目,编号:2003A203;四川省成都市科技局基金资助项目。易 勇 副教授,研究方向为计算机网络与通信,分布式测控网络实时通信。陈建孝 讲师,研究方向为程序设计语言。胡学海 博士生,研究方向为测控系统。

息,消息作为通信的主要实体,这在实时测控网络的实时分析中占主要地位。

对于测控网络的实时通信来说,通信链路是主要资源,消息(常称报文)则是竞争这个资源的基本单元,对通信链路使用权的合理分配调度决定了对各节点所提出的通信请求响应的快慢,也就是决定了整个系统的实时性。为了对通信进行控制和管理,避免发生通信的碰撞和冲突,采用了存取控制方式来管理通信。存取控制又称访问控制,所控制的就是各节点访问测控网络的时机。因此存取控制方法就是通信子系统使用权分配调度算法的核心,它与通信子系统的实时性有着密切关系。

对于 Ethernet 而言,一般认为,网络资源利用率高,特别是信道利用率高的存取控制方法就是比较好的方法。分布式测控实时系统则不同,对实时性要求比较高,因此,对 Ethernet 的存取控制方法我们必须进行实时性的改造使其适用于分布式测控系统。

3 实时服务质量

计算机网络从诞生开始,就一直存在提高系统服务性能和服务质量的问题。因此,对 QoS 的研究实际上由来已久。目前,QoS 问题已成为国际上网络界研究最重要、最富有魅力

的研究领域之一。对于 QoS,RFC2386^[3]描述为:QoS 是网络在传输数据流时要求满足的一系列服务请求,具体可以量化为带宽、延迟、延迟抖动、丢失率、吞吐率等性能指标。此处的服务具体是指数据包经过若干网络节点所接受的传输服务,强调的是端到端或网络边界到边界的整体性。QoS 反映了网络各要素在保证信息传输和满足服务要求方面的能力。但是测控网络在实际应用中有其自身的内在特点,相比传统的计算机网络存在着许多差异,如对于实时性就存在着硬实时和软实时之分^[4],对于测控网络中测控任务和通信消息实例就存在着优先级和重要性、紧急程度等问题。因此,有必要定义实时服务质量的概念。

定义 1(实时服务质量, Quality of Real-time Service, QoRS) 是指分布式实时系统中各节点之间消息传递以及各节点与传递消息的分布式实时网络之间关于消息传递的质量约定。QoRS 控制的目标是为分布式实时系统的应用提供服务区分的性能保证,保证系统内所有任务和消息都能得到及时响应。

QoRS 相对于传统的 QoS 在其时间要求上有更加严格的限制,有其自身的特点,常见的的时间属性 QoRS 指标体系见表 1。

表 1 分布式实时系统 QoRS 指标体系

参数	含义
周期 C(Cycle)	实时系统中通信分为周期通信和非周期通信,周期通信有固定的到达时间间隔,即周期;非周期通信的到达时间不确定。
时限 D(Deadline)	硬实时系统要求通信实例必须在规定的时间内产生正确的输出,否则将产生不可接受的后果。每个通信实例的最迟可接受输出时间被称为该实例的时限
松弛时间 L(Laxity)	通信实例在满足时限的前提下,从就绪开始,能够在就绪队列中停留的最大时间被称为松弛时间。
抖动 J(Jitter)	通信实例从就绪到实际进入就绪队列的时间间隔。
最坏情况执行时间 WCET (Worse-Case Execute Time)	实时通信运行一次所需的最长时间。
利用率 U(Utilization Rate)	有效时间与可服务时间之比。利用率描述了实时通信中占用资源的比率。系统中所有实时通信的资源利用率之和为系统资源利用率。
传输时间 T(Frame time)	消息流传输的时间,也即发送一帧的持续时间。
重要性 I(Important)	实时系统中通信实例 τ_i 的重要性是指在其时限 D 到达之前完成该实例的价值。通常价值越大,重要性也越高,反之则越低。

通常,根据分布式实时系统中应用实例的性质,系统有两种类型:硬实时(Hard Real-time)和软实时(Soft Real-time)。硬实时系统指通信实例在指定的时限内必须完成,否则整个系统的效益立即降为零,甚至引起灾难性的后果;软实时系统指通信实例在指定的时限内只要响应的超出确定时限范围的频率低于某一阈值,则不影响系统的正确性,只是系统的效益可能成线性下降,直至为零。因此有如下分布式实时系统的属性定义。

定义 2 设分布式实时系统的通信实例 E(Example)的属性为 $A(E)$,则:

$$A(E) = \begin{cases} 1 & \text{若 } E \text{ 为硬实时} \\ 0 & \text{若 } E \text{ 为软实时} \end{cases} \quad (1)$$

作为分布式实时系统,其 QoRS 指标应该分布在一个区间范围,即 $(QoRS_{best}, QoRS_{worst})$ 模型,实时性能指标的粒度越精细, QoRS 区间的离散程度就越大。从定义 2 可见对于硬、软实时系统这是两个极端,显然对于分布式实时系统的实时服务质量可抽象成数学模型,根据通信实例的性质应是一个分布函数。对于硬实时,其重要性始终高于软实时,因此,硬

实系统通信实例的 QoRS(E)值是唯一的,而软实时系统的值存在不同的逻辑版本(即服务等级数)。

定义 3 设分布式实时系统通信实例 E 的实时服务质量函数为 $QoRS(E)$,不失一般性, $QoRS(E)$ 可定义为:

$$QoRS(E) \begin{cases} =1 & A(E) = 1 \\ >1 & A(E) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)在测控网络工程实际中有具体应用,比如:测控网络中常用的令牌总线网络用帧控制域对通信数据按优先级进行 0, 2, 4 和 6 级分类,强实时通信数据取 6 级优先级最高,软实时通信数据优先级为 0, 2 和 4 多个等级。

4 实时服务质量对实时消息的约束

4.1 实时消息模型

建立某一种模型,是对事物特征的抽象、概括和描述,也直接关系到对事物进行处理的质量。分布式实时系统任务之间是通过消息进行通信的,传递需进一步处理的信息,在这里消息是实时网络通信的基本单位,在实时分析中占主导地位。因此,考虑到测控网络实时控制的特点以及非周期通信通过

最小到达时间间隔的确定可以转化为周期通信来处理^[5]的特点,因此,这里只讨论周期性实时通信。实时消息模型可表示为:

定义 4 实时通信中的周期性消息流用如下多元组实时消息模型表示:

$$CM=(L, T, C, S, D, I, U, V)$$

显然对于实时通信中的某个周期性消息流 k 可表示为:

$$CM_k=(L_k, T_k, C_k, S_k, D_k, I_k, U_k, V_k)$$

其中:

CM (Cycle Message):表示周期性消息;

L (Length):表示周期性消息流(帧)长度,决定了消息流传输的时间。它包括网络协议规定的前导字节、地址域、信息域和校验域等消息帧全部内容;

T (Frame time):表示消息流传输的时间,也即发送一帧的持续时间,其值为: $L/\text{信道容量}$ 。

C (Cycle):表示通信周期,即消息实例产生的周期;

S (Start Time):表示发出通信请求的时刻,即消息实例产生的时刻;

D (Deadline):表示消息时限,即消息实例从产生至到达目的节点所能允许的最大限度, $D \geq 0$,它表示事件的紧迫程度;

I (Important):事件的重要性。它直接反映了消息时限错过后所产生后果的严重程度。硬实时的紧迫性始终高于软实时。

$$I \begin{cases} \geq I_s & A(E)=1 \\ < I_s & A(E)=0 \end{cases} \quad (3)$$

这里 I_s 为系统的重要性阈值,并且 $I_s \geq 0$;

U (Utilization Rate):表示有效时间与可服务时间之比,即实时通信中占用资源的比率。系统中所有实时通信的资源利用率之和为系统资源利用率。

对于实时系统周期通信,对于有 N 个周期任务(消息)实例的给定系统,系统资源利用率为: $U_s = \sum_{i=1}^N WCET_i / C_i$;实时系统非周期通信,如果非周期任务的平均到达率为 λ_i ,则非周期任务的系统资源利用率 $U_A = \sum_{i=1}^N \lambda_i * WCET_i$ 。

V (Value):表示实时系统任务或消息的价值,也称为关键度,它表示任务或消息在截止期之前完成,系统所能获得的效益。通常,价值越大,关键度也越高,反之则越低。

$\forall E$,当 $A(E)=1$,有:

$$V \begin{cases} > 0 & \text{当 } S+T \leq D \\ = 0 & \text{当 } S+T > D \end{cases} \quad (4)$$

$\forall E$,当 $A(E)=0$,有: $V=(val(E)_1, \dots, val(E)_n)$;并且有: $I_{s1} \geq I_{s2} \rightarrow val(E)_1 \geq val(E)_2$

4.2 QoRS 对实时消息的约束

从分布式测控系统的资源来看,整个系统的实时性应该从测控消息、节点、通信系统三级进行考虑:一项测控消息的实时性得到满足是指其响应或完成的时间小于规定的时限;一个节点的实时性合乎要求是指该节点提出的所有测控通信任务在指定的时限内都能获得响应;整个通信系统的实时性符合要求是指分布在通信系统上的每一个节点的每一项任务的实时性均得到保证,包括紧急任务的实时性也必须满足。要保证整个分布式测控系统的实时性则测控消息、节点、通信系统三者必须满足下列三个 QoRS 约束条件:

(1) $t_{point} - S \leq D$, t_{point} 表示消息传送过程中的某一时刻。

该条件说明消息从产生到最终到达目的地不会超过其时限。

强实时的紧急任务应该优先服务,对于实时性要求比较高的节点,应当使它取得通信权的机会比其它节点多一些。因此采用静态的方式赋予某些节点较高的优先权,采用动态的方式赋予某些测控任务以比较高的优先权,则将使紧急任务及重要节点的实时性得到满足。

(2) $T_{max} \leq C$, T_{max} 表示进行通信的节点获得总线控制的最大时间间隔。也就是每个节点每次通信的时间应当限定,若超过此值,无论本次通信任务是否完成,均应立即释放通信权。这一时间约束条件可以防止某一节点长期占有通信网络系统而导致其它各节点实时性恶化。

(3) $t_{control} \geq T$, $t_{control}$ 表示一次总线控制时间。该条件说明通信系统上的每一个节点获得总线控制权后应有充分的时间发送完所有的消息,应都有机会取得通信权,以防止个别节点因长时间得不到通信权而使其实时性太差甚至丧失实时性。只要有一个节点出现这种情况,整个通信系统的实时性就算没有达到要求。这一固定时间周期的长短是一个通信系统实时性好坏的衡量标准。

这三个 QoRS 约束条件可以用于实际工程中分布式测控网络的分析与设计。

如,用这三个 QoRS 约束条件去衡量分布式测控网络中常用的存取控制方式,将会发现有些存取控制协议(如 ALOHA、CSMA、CSMA/CD 等)一条约束条件也不满足,有些存取控制方式(如时间片、轮询、请求选择等)满足部分约束条件,有些(如令牌总线、令牌环等)则满足全部约束条件。这是因为,令牌环及令牌总线都是使用令牌进行存取控制。令牌在物理环或逻辑环上从一节点传到下一节点依次流动,只要令牌不丢失,任何一节点都不会被遗漏,这就保证了每个节点都有个基本的实时性;令牌环及令牌总线限制了每个节点持有令牌的时间,时间一到必须释放令牌。这将可以防止某个节点长期占有通信子系统,也相当于为令牌循环周期规定了最大值,因而保证了每个节点具有一定的实时性;令牌环与令牌总线都采用了存取优先级控制,给紧急测控任务以高优先级,使它得到优先服务,快速送到目的节点,这就保证了紧急测控任务具有高实时性。

4.3 QoRS 对测控网络实时分析实例

用 QoRS 来分析常见的基于 CSMA 协议的分布式测控网络系统,假设系统包含 N 个节点,且 N 个节点通过信道竞争获得总线使用权,不失一般性,对系统作以下基本假设:

(1)单信道假设:所有节点均通过网络这一个单信道通信,再无其它的通信渠道;

(2)优先性假设:在测控网络系统中,周期性通信优先于任何其它通信;

(3)公平性假设:具有周期性通信要求的节点,在其它节点获得两次总线控制之前,该节点至少有一次发送消息的机会。

设测控网络系统中一个节点 $NODE_i$ ($i \leq N$) 的周期性消息流 CM_k 的时限为 D_k ;在没有其它节点竞争的情况下,节点 $NODE_i$ 获得总线控制权并发送消息的最大时间间隔为 T_{max} 。为了保证整个测控网络系统的实时性,不失一般性,考虑一种极端的情况:当节点 $NODE_i$ 有消息要发送时,其余 $N-1$ 个节点正好也有消息要发送,且都具有高优先权,这种情况下,源节点 $NODE_i$ 从提出消息发送到目的节点收到消息的最大时间间隔为 $N \times T_{max}$ 。为了满足节点 $NODE_i$ 的实时

性要求,用 QoRS 指标 D_k 约束,使得节点 $NODE_i$ 的周期性消息流 CM_k 的实时性得以保证的充分必要条件为:

$$N \times T_{\max} \leq D_k \quad (5)$$

整个测控网络系统周期性通信的实时性得以保证的充分条件为:

$$N \times T_{\max} \leq D_{\min} \quad (6)$$

(6)式中 $D_{\min} = \{D_i, i = 1, 2, \dots, k; k \in N\}$ 并且 D_{\min} 为最小值),根据(6)式可以进一步确定整个测控网络系统中的最大节点数 N_{\max} ,即:

$$N_{\max} = D_{\min} / T_{\max} \quad (7)$$

从(5)~(7)式可以看出:用 QoRS 来分析测控网络实时系统时,可以分析现有的系统的实时性,评价其是否满足系统的实时性要求;这种分析方法也可以用于测控网络实时系统的设计中,通过系统的实时性要求来选择通信网络及协议,通信速率和系统的节点数。

结论 本文提出的实时服务质量概念及指标体系对分布式测控网络这一类实时系统的分析与实现具有指导意义,

建立的实时服务质量函数 QoRS(E)的数学模型是对实际工程应用中实时系统的服务质量的高度概括和抽象。通过对 QoRS 的分析研究,阐述了 QoRS 在测控网络分析中的实际应用。今后的研究工作是进一步研究 QoRS 指标体系的细节问题,用于分析研究实时系统中的实时消息调度,以研究解决实时系统的关键技术。

参考文献

- 1 Chou C C, Shin K G. Statistical Real-Time Channels on Multi-access Bus Networks. IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, 1997,7(8): 769~780
- 2 Bernat G, Burns A. Weakly Hard Real-Time Systems. IEEE Transaction on Computer, 2001, 50(4): 308~33
- 3 Crawley E, Nair R, Rajagopalan B, Sandick H. A framework for QoS-based routing in the internet. IETF RFC2386, August 1998
- 4 Krishna C M, Shin K G. Real-time Systems. McGraw-Hill Companies, Inc. 1997
- 5 Bernat G, Burns A. New Results on Fixed Priority Aperiodic Servers. Procs. of IEEE Real-Time Systems Symposium, 1999, 68~78

(上接第 30 页)

($m=40$)、Landmark 模型和随机模型构造叠加网,每个叠加网的主机数和边数相同。图 2 和 3 是物理网分别是 ER 和 BA 模型的叠加网平均物理距离比较。为简化实验,叠加网中两逻辑邻接主机距离以两主机间物理网的连接跳数代表。

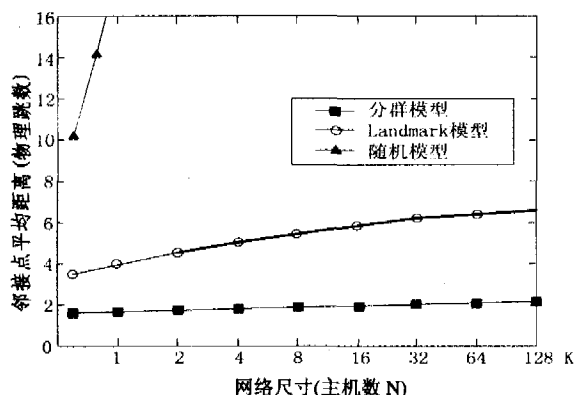


图 3 物理网络为 BA 拓扑模型

由仿真结果可以看出,无论在 BA 或 ER 物理网拓扑下,随机模型的平均物理距离都大大高于分群模型和 Landmark 模型,而分群模型的平均物理距离大约为 Landmark 模型的 30%~50%。可见,分群模型赢得更短的平均物理距离,降低了网络开销。

结论 本文研究了如何自组织一个良好的叠加网,以赢得高效性和实用性。提出了一种分群自组织层状叠加网模型,模型的形成过程以节点间 RTT 作为成群的距离标准,以逼近物理网结构、减小叠加网通信开销。动态的群生成、合并、分裂与消亡使该模型能很好地适应网络变化。模型本质上采用了分层、分布技术,结构上高效且易管理。本文从理论上分析得出该模型比随机模型的通信效率高出近 $d \log_m N$ 倍。通过在以 BA 和 ER 模型物理网基础上的仿真实验结果表明,在相同物理网前提下,该模型的通信负荷只有 Landmark 模型的 30%~50%。

许多基于广域网的大规模网络应用服务,如流媒体服务、

应用层多播服务、分布式搜索及定位等,都可以基于此模型构建相应叠加网,以提高网络效率。针对不同应用网络,可设计不同物理距离函数,并非单纯以 RTT 作为距离度量尺度。

参考文献

- 1 Waldovgel M, Rinaldi R. Efficient Topology-Aware Overlay Network [C]. ACM HotNets 2002, SIGCOMM/CCR, 2003
- 2 Ratnasamy S, Handley M, Karp R, et al. Topologically-aware overlay construction and server selection [C]. INFOCOM 2002, Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. In: Proceedings, IEEE, Volume 3, 23-27, 2002. 1190~1199
- 3 Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A Scalable Content-Addressable Network [C]. In: Proceedings of SIGCOMM, 2001. 161~172
- 4 Xu Zhichen, Tang Chunqiang, Zhang Zheng. Building topology-aware overlays using global soft-state [C]. Distributed Computing Systems, 2003. In: Proceedings 23rd International Conference on, 2003. 500~508
- 5 Zhang Xin-Yan, Zhang Qian, Zhang Zhen-sheng, et al. A constion of locality-aware overlay network; mOverlay and its performance Selected Areas in Communications [J]. IEEE Journal on, 2004, 22 (1): 18~28
- 6 BRITe. [Online]. Available; <http://www.cs.bu.edu/brite/>
- 7 Barabasi A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509~512
- 8 Erdos P, Renyi A. On random graphs [M]. I Publ Math, 1959, 6: 290~297
- 9 Christensen E, Curbera F, Meredith G, et al. Web services description language (WSDL) 1.1. W3C (World Wide Web Consortium) [Online]. Cambridge, MA, 2001 <http://www.w3.org/TR/wsdl>
- 10 Béla B. Random graphs. London-New York: Academic Press Inc, 1985
- 11 Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small world" networks [J]. Nature, 1998, 393: 440~442