

离散事件动态系统理论在通信网络中的应用

郑应平 范 中

(中国科学院自动化研究所, 北京 100080)

摘要 通信网络是一个典型的离散事件系统。离散事件动态系统(DED S)理论综合并提出了许多对离散事件系统建模及性能评估等的方法,为解决通信网络中的一些关键问题提供了有力的工具。本文综述了近年来DED S理论在通信网络建模、分析、优化以及网络管理等方面的应用进展情况,并提出了一些自己的看法。

关键词 离散事件动态系统(DED S)理论, 通信网络

Applications of DED S Theory in Telecommunication Networks

Zheng Yingping Fan Zhong

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Telecommunication system is a typical discrete event dynamic system (DED S). The theory of DED S has combined and proposed a lot of methods of modeling and performance evaluation for solving several key problems in telecommunication network. In this paper, the recent applications of DED S in telecommunication modeling, analysis, optimization and network management are surveyed, and some new ideas are proposed.

Keywords discrete event dynamic system (DED S) theory; telecommunication networks

1 引言

80年代,随着信息处理技术、计算机技术、机器人技术等的发展完善和广泛应用,在通信、制造、交通管理、军事指挥等领域内相继出现了一批反映技术发展方向的人造系统,例如通信和计算机网络、计算机集成制造(CM)、C³I系统等。由于这类人造系统不同于用微分方程描述的连续系统,也不同于用差分方程描述的离散系统(数字系统),以往的理论体系已再难以进行全面的分析了,基于对这类系统行为和性能研究的需要,推动了离散事件动态系统(DED S)理论的形成和发展。概括而言,DED S是指一些相互作用的离散事件所构成的,并由离散事件触发而引起状态迁移的一类人造的动态系统,它是一类新的系统理论,反映了各种人造系统运行的内部规律^[1,2]。

DED S理论还处在蓬勃发展之中,它主要研究的是离散系统的建模、分析以及随机优化等问题。DED S理论目前公认的理论框架包括三种不同层次的模型:统计性能层次模型、时间层次模型和逻辑层次模型等。其中,统计性能层次模型通常也被称为随机DED S,其大部分可纳入排队网络模型,从而可用马氏链、广义半马氏过程(GSP)等数学框架来处理。理论上通常只在马氏过程或者具有乘积形式解时才有可行的处理方法,应用上则发展了许多近似计算方法,以及象扰动分析这样基于仿真和分析的优化方法。另外,逻辑层次模

本文于1997年3月10日收到

国家自然科学基金项目资助(批准号:69635030)

型中的 PETRI 网及其各种扩张的理论具有很强的描述能力,能够很好地描述系统中的并行机制。这些理论工具已经在通信网络、生产系统、计算机系统品质评估等方面广泛应用,在对这类离散系统的建模、分析以及随机优化和控制的研究工作中发挥了很大的作用。以通信网络为例,通信网络的排队网络模型,能够很好地描述通信网络的系统结构和它内部的各种复杂关系,并能对其随机因素等加以考虑,人们可以通过这种模型定性、定量地分析和确定系统的各项性能指标;另一方面,仿真分析法作为模型分析和优化的重要工具,近几年也得到了很大的发展,其中,扰动分析和并行仿真作为通信网络分析的新方法,已逐步引起了人们的重视。随着通信工业的进步,网络也在向着综合化、高速化、智能化、个人化的方向发展,网络能够提供的服务种类越来越多,业务量越来越大,而为了保证数据传输的可靠性和安全性,通信协议变得越来越复杂。Petri 网作为分析通信系统的一种合适的工具,它的活性和安全性常常被用来作为判断通信协议正确性的准则。此外,DEDS 理论的发展还为通信系统的研究提供了一些新的工具。例如,DEDS 的动态对策理论,为建立通信网络中用户个体和群体行为的对策模型,设计导致群体理性行为的诱导(incentive)机制,并通过对网络的宏观调控,使通信系统能够高效运转提供了一条新的途径。

下面对 DEDS 理论在通信网络研究中应用的情况作一简要的综述,并提出一些自己的看法。

2 流量和拥塞控制问题的建模与分析

随着社会的发展,人们对通信服务种类的要求越来越多,除了一般的电话、传真、数据业务外,还有高清晰度电视(HDTV)、电视会议、高速率数据、多媒体的业务,此外,还有电子邮件、录音邮件等等。因此,现有的那些仅能提供话音和数据业务的单纯的电话网或数据网已不再能方便地满足现在用户的需要。为了给用户提供更好、更全面的通信服务,现代通信技术发展的趋势是,基于一种公共的网络,将现有各种类型的网络联合起来。由于通信服务的种类繁多,信息量大,因此,这种公共网络必须具备高速、宽带、综合业务等性能。目前一般认为,这种未来的公共网络就是基于光纤通信的宽带综合业务数字网(B-ISDN)。B-ISDN 的实现模式是异步转移模式(ATM, A synchronous Transfer Mode)。

ATM 是一种综合了电路交换与分组交换各自优点的新的信息转移模式。它将各种不同的业务都划分成固定长度的所谓信元(cell)来进行交换。这样,交换结点采用单一的结构就能够为各种业务提供服务,从而可以大量节省设备和操作管理上的花费。ATM 采用随机时分复用方式,具有灵活性好,适应性很强的优点,它的每一个信道都能够以任意的比特率进行传输,且在同一个呼叫期间,还可以根据需要动态地改变传输速率,而真正地实现“按需分配带宽”(bandwidth on demand)的要求。因此,ATM 的概念一经出现,立即受到特别的重视,世界各国在 ATM 研究方面投入的人力和物力在通信发展史上是前所未有的。但发展中的 ATM 仍有着许多问题亟待解决^[3],网络的流量和拥塞控制(flow and congestion control)就是其中最关键的问题之一。

流量和拥塞控制指的是 ATM 网络中通信流的管理问题。由于 ATM 中信元到达的随机性和突发性,网络中通信流量的波动相当大。贝尔实验室的统计数据表明,ATM 网络中信元的峰值到达率往往是平均到达率的 3~4 倍^[4]。为了保证业务的服务质量(QoS, Quality of Service)要求(如信元传输时延和信元丢失率等),网络不得不以业务的峰值速率为它们分配带宽,因此系统的利用率很低。此外,带有 FIFO 输入缓冲器的 ATM 交换机队首信元阻塞情况的发生,也使得系统的吞吐量受到极大限制^[5]。因此,已成为能否平衡网络中的通信流量,控制拥塞现象的发生,已成为能否有效增加网络利用率、提高业务服务质量的关键。

ATM 网络中的拥塞主要有两种类型:突发性业务拥塞和队首拥塞。

1) 突发性业务拥塞。当瞬时业务量超过了网络传输带宽的能力时,无法及时得到发送的信元在缓冲器中堆积或丢失,造成突发性业务拥塞。ATM 可以提供面向连接和无连接等服务类型。一方面,当用户以面向连接的方式收发信息时(例如电话、HDTV 等),在建立虚拟信道连接的过程中,网络和用户有一个协商和再协商的过程,即网络根据用户提出的要求,为用户选定一条路由,并为其分配一定的带宽,用户发送的业务量一般是不应该超出此带宽限制的。但是,由于很难准确估计用户业务特性或其他人为原因,往往造成实际业务与协商业务特性不符,突发性很强的业务尤其容易导致瞬时带宽要求远远超出协商值的情况;另一方面,

无连接服务(如电子邮件或其他零星的数据业务等)业务的信元不必经过网络的连接过程,可以随时进入网络发送,这种服务方式为用户提供了很大的方便,提高了网络的利用率,但由于这种业务流出现的随机性很大,有可能导致网络中的瞬时流量超出其传输能力而造成网络拥塞。

2) 队首拥塞。这种情况发生在 ATM 交换结点处。在带有 FIFO 输入缓冲器的 ATM 交换机的输入端,当多于一个端口的队首信元的地址是同一个输出端口(例如图 1 所示的情况)时,由于在每个时隙只有一个队首信元能被发送到某个输出端口,而其余竞争失败的队首信元不得不仍滞留在原缓冲队列中,因此,即使后续信元是发往其他空闲输出端口的,也会被阻塞在该队列中,暂时无法得到发送。队首拥塞的情况严重地降低了交换机的使用效率。文献[6]中的研究表明,当输入线很多时,这种交换机系统的吞吐量被限制在大约 58~58% 的极限以内。

由于 ATM 信元到达的突发性和随机性,因此交换机在负荷不“满”的时候,也有可能发生拥塞,网络资源的利用率受到了极大地限制;另一方面,系统在拥塞时被迫丢弃大量的信元或造成大的时延,也严重地降低了网络传送业务的服务质量。因此,各国的研究人员提出了多种控制算法来避免网络中拥塞现象的发生。其中,针对 ATM 交换机提出的拥塞控制算法中,比较著名的就有漏桶法和窗口法等。下面就简单地介绍一下这两种算法。

1) 漏桶法。漏桶法的模型如图 2 所示。它由令牌(token)生成器和令牌池组成。工作机理是:令牌发生器按一定的速率生成令牌,并储存在令牌池中,令牌池为有限容量,当其满时,新生成的令牌将被丢弃。到达的信元直到从令牌池中取得一个空闲的令牌后,方能进入网络。缓冲器为有限容量,当缓冲器满,后续到达的信元将被丢掉。令牌生成的速率是根据在虚拟信道建立时网络与用户协商确定的业务服务质量要求所设定的,因此一旦用户违约,令牌池将会枯竭,用户发送过多的部分将会被丢失。这种方法能够较有效地控制进入网络的业务流量,预防突发性业务拥塞现象的发生,而且容易实现。所以当漏桶法在 PARIS 试验网中首次提出后,立即得到了大家的重视。国际电信联盟(ITU)也将其作为一种实现网络流量监管算法的例子引述在其建议书中^[8]。

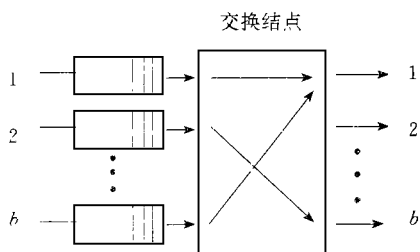


图 1 队首拥塞示意图

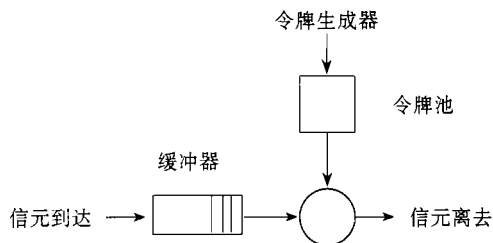


图 2 漏桶算法模型

但是漏桶法也存在着一些缺点,即它严格地限制了用户发送的业务量,不允许用户使用网络的剩余容量,不能很好地发挥 ATM 带宽分配的灵活性。近年来,人们提出了许多改进方案,其中研究得比较多的是自适应(adaptive)令牌生成法,即根据网络当前的状态来调整令牌生成的速率^[9],但这种改进算法的实现复杂度较高。此外,这种算法不能很好地保证网络中业务的服务质量,Liu 的分析结果表明^[11],当令牌生成的速率和/或令牌池的容量增加时,信元的传输时延和信元的丢失率都会大幅度地增加,因此,这种算法至今仍在进一步的研究。

2) 窗口法。窗口法提供了一种缓解 ATM 交换机队首拥塞的途径^[13]。它的工作机理是在交换结构的输入排队缓冲器中设定一窗口值 w ,当每个时隙(time slot)开始时,各个缓冲队列的队首信元先进入交换机选择输出口,若发生竞争,则竞争失败的队首信元返回原队列,该队列中的第二个信元再去选择,重复以上过程,直到找到了一个可以发送的信元为止。在每个时隙开始的时候,这个过程最多可以反复进行 w 次,也就是窗口值的大小。当 $w = 1$ 时,这就是一个简单的 FIFO 输入排队模型。研究表明^[6],当 $w = 8$ 时,交换结构的最大吞吐量可以达到 88%。但是,由于这种算法要求交换结构的速率是网络传输速率的 w 倍,因此在

高速的 A TM 网络中的应用受到了限制。而且随着 w 的增加, 交换结构的实现复杂度也将大大地提高。

以上两种算法, 分别在不同的拥塞机理下可以获得比较有效的控制效果。但是, 它们除了前面所提到的一些不足之处以外, 还存在着一个共同的缺陷, 也就是不能很好地保证宽带网中业务的服务质量。宽带综合业务数字网(B-ISDN)中业务源的种类繁多, 不同类型业务的服务质量要求往往差别很大, 若仅仅提供单一的服务标准, 那么这种服务质量对某些类型的业务来说会显得过于浪费, 而对另外一些类型的业务则有可能无法满足其更为严格的要求。由于这两种算法都没有充分考虑这一特点, 只能单独划一, 对网络中的服务质量要求相当不同的业务源不加区分, 因此无法为网络中的各类业务分配其所需的服务质量。

为了获得更为便捷有效的拥塞控制方法, 国内外至今仍在进行着大量的研究, 特别值得注意的是, 近几年来, 有不少自动控制理论, 特别是离散事件动态系统(DED S)方面的专家转向这一领域, 并得到许多新的模型和研究结果(参见文献[11, 12]等)。

针对以上问题, 我们引入优先级, 综合漏桶法和窗口法的优点, 提出了一种新的交换结构模型——优先队列控制(PQC)模型^[15], 计算结果表明, 不同类型业务的服务质量分别可以得到较好的满足, 而且这种结构的实现复杂度也较低。

3 仿真分析法的应用

所谓仿真, 就是用计算机对已建立的数学模型分别在不同条件与情况加以测试与计算, 以便比较多种方案, 从中选择最优的或次优的方案, 作出决策, 以使系统能够投入运行。它是真实过程或系统在整个时间内运行的模仿。

DEDS 统计性能层次模型的传统分析方法是排队论。这方面已取得了相当丰富的研究成果, 但排队论的局限性是必须满足一定的假设条件之后, 理论才会有效。另一方面, 由于通信网络中固有的随机性, 且 A TM 信元的到达过程具有非常复杂的分布特性, 纯粹以数学的方法, 很难甚至不可能得到问题的求解。因此, 仿真分析法也就成了分析通信网络性能的一种重要的方法。

3.1 扰动分析法(PA)

仿真是研究 DEDS 的一种常用的方法, 但构造和确认仿真模型需要消耗大量的时间, 且仿真模型通常需要大量的运行, 需要较高昂的机时代价。特别是在系统优化时, 仿真法的计算工作量则更是极为庞大。1979 年, 美国哈佛大学何毓琦教授提出了一种在系统优化过程中计算性能指标对参数求导的新的分析方法, 即扰动分析法(PA, Perturbation Analysis)。PA 法只要进行一次仿真, 然后在标称样本路径上构造扰动路径, 再计算扰动后的性能指标, 求出梯度信息。它兼容了仿真分析法和理论分析法的长处, 同时避免了单纯用仿真法时的大量计算和用理论分析法研究复杂系统时所遇到的困难^[22-24]。

DEDS 杂志在 1995 年 No. 2-3 的仿真专集中, 进一步强调了“基于仿真”和“基于分析”这两种不同途径相结合的观点。对于若干复杂的问题, 也可以把“能推导”的部分尽量推导出来, 得到一种形式模型。这种模型虽仍难以数学求解, 但对它进行仿真要比原始问题简单得多。

对于象通信网络这样的复杂系统, 每次仿真所要求的机时量是相当多的。我们认为, 运用仿真与分析相结合的方法, 能够较大幅度地减少机时耗费, 加速优化过程, 不失为对通信系统进行研究的一条更为有效的途径。

3.2 并行仿真法

模拟象 A TM 网络这样的高速通信网络, 所需要的机时量是相当大的。例如, 某些类型业务的信元丢失率要求在 10^{-9} 数量级, 换句话说, 就是在传输 10^9 个信元才有可能丢失一个, 即在 15M bit/s 连接的 A TM 网络中, 每 45 分钟才有可能发生一次信元丢失。要模拟类似信元丢失这样的稀有事件, 计算机所要运行的时间可想而知是相当长的。因此, Fujimoto 等人^[24]运用并行机来加速离散事件的仿真, 并提出了空间并行(Space-parallel)和时间并行(Time-parallel)仿真方法(如图 3 所示)。

4 PETRI 网建模

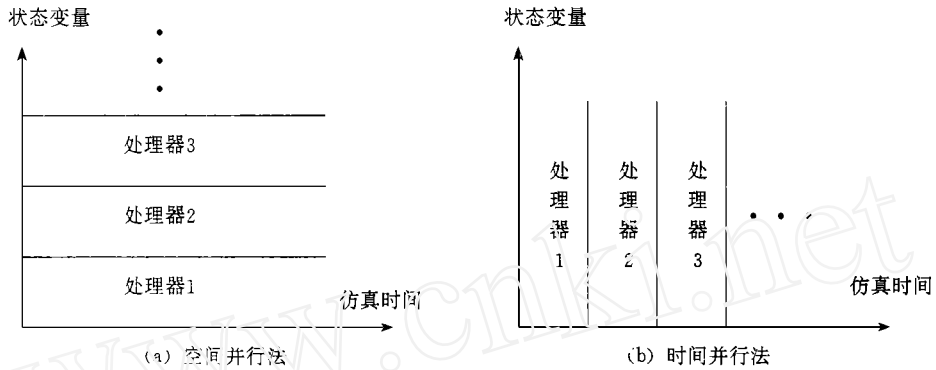


图3 并行的仿真的两种方法

1962年,德国学者C. A. Petri提出了一种用令牌(Token)流动来描述系统动态过程的网络,并立即在理论和应用方面引起了重视,30多年来一直发展不衰,这就是现在得到广泛应用的Petri网。Petri网是一种基于数学和图形的建模工具。由于其通用性和可操作性,它几乎可以应用于一切可用图形(例如:流程图)表示的系统。Petri网的应用领域有计算机和通信网络,自动控制和制造系统等,主要用于评估这些系统的一些定性的性能指标。Petri网具有很大的潜力,作为两种主要逻辑层次模型之一,它比另一种模型有限自动机/形式语言能够更好地描述系统内部的逻辑关系,特别适用于描述并行和异步发生的事件,并可避免求解全部状态的繁重计算工作。

Petri网很早就被应用于通信协议的研究,它的活性和安全性常常被用来作为判断通信协议正确性的准则。图4就是用Petri网对一个简单的通信协议的描述^[25]。

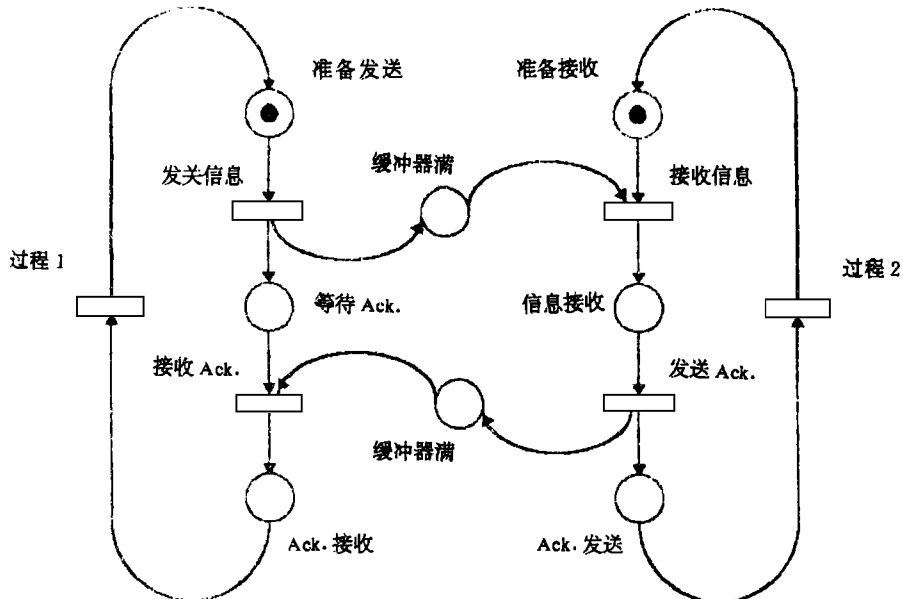


图4 一个简单的通信协议Petri网模型

随着通信工业的进步,网络正朝着综合化、高速化、智能化、个人化的方向发展。网络为用户提供的服务种类越来越多,为了保证数据传输的可靠性和安全性,通信协议也变得越来越复杂。由于通信网络中业务的

并发性、异步性、分布性、并行性、不确定性和/或随机性,一般的理论工具已很难展开分析,而 Petri 网作为设计或研究这样一类复杂的信息处理系统的有力工具,在通信协议的建模和分析中发挥了相当重要的作用。

5 动态对策理论的应用

动态对策的基本问题就是当多个决策人(机构)同时对一动态系统施加作用并互相影响时,他们按一定的理性目标所采取的行动策略的研究。通信网络是一种排队网络或更一般的离散事件动态系统(DED S),对它起作用的有系统设计/管理者和众多的用户,他们的行为势必影响系统的性能指标。这是个非常现实又具有挑战性的问题,近年已吸引了不少通信领域和系统控制方面的人们合力研究。

自70年代Naor等人就开始研究通信网络中的流量控制问题,特别是用接纳策略(admission policy)来限制用户来流以防止拥塞。从系统设计者或“社会”的角度,目标是使系统的综合品质最高,例如可表现为总服务用户数多而在系统的总停留时间短。但对每个用户,则主要只关心其自身得到的服务价值和在系统停留时间的期望值。有趣的是,由于平均等待时间与网络中用户数有关,这两种观点得到的最优策略阈值是不同的,社会优化通常导致较低的阈值而个体优化阈值则较高。这和交通系统中繁忙的路口情况相似。这一现象已经有许多文章加以揭示和分析(参看文献[26, 27]等)。

更深入的工作从DED S的动态对策出发^[26-30], Altman等采用Nash非合作平衡解概念,导出一种根据系统拥挤程度的实时信息而采取的动态阈值型策略。他们给出了一些具体的计算方法,以及通过动态学习迭代求解的办法等。顺便指出他们的模型也适于描述在要求计算时间服务时,用户决定是进入大型主机(Main Frame)还是只用专用小型机器的问题,其结果也是相似的。这说明了这类问题及研究方法具有较普遍的意义,但他们考虑的解概念基本上都是Nash的。目标因素也比较简单,实际上只关心停留时间最短的因素。这些解只考虑用户的决策,而且假定所有决策人都是对称的。

一般说来,大型DED S需要分散决策,而涉及与人类社会密切相关的制造、计算机、通信等问题时,这些决策单元具有各自的目标函数和私有信息,处在不同的管理层次(管理者和用户)构成多级主从对策问题。如前面介绍,这方面的研究刚刚开始起步,还有许多重要问题有待解决。例如在前面描述的计算或通信服务网络中,个体最优导致社会效益的下降,是一类典型的“社会悖论”问题。系统政策制定者和设计、管理人员希望已有设施能最有效地为社会服务,就应当用信息、价格等手段进行宏观调控使各用户的个体目标与社会全局目标相一致,这就是“激励(incentive)控制”(鼓励对策)问题。

通信网络作为国民经济、社会发展和国防建设的神经系统,支撑着现代社会的高效运转,它的出现也深刻地改变了社会。在通信网络这类复杂系统中,人的因素起着相当重要的作用,人的行为直接影响系统的效率,因此对通信网络的控制也可以归结为对人的行为控制。动态对策研究的基本目标在于人的决策行为描述和规范化,是研究通信网络的一种合适的工具。

6 总结

DED S理论经过十几年的发展,已经逐渐形成了一套较为全面的理论框架,广泛结合各类应用问题,充分发挥现有方法在解决实际问题的能力,是目前DED S理论研究工作的主流。

通信系统作为一典型的离散事件系统,可以充分借助蓬勃发展中的DED S理论的建模、分析以及随机优化和控制等工具,对其中一些关键性的问题进行研究和探讨。本文仅对DED S理论在通信网络建模与优化方面的应用作了初步的综述,并提出了一些自己的看法。

首先,排队网络理论在通信网络的建模与分析中担当了重要的角色,而仿真分析法则作为研究这类复杂系统的另一种有效的工具得到了人们越来越多的重视。另外,很早就被应用于通信协议研究的Petri网,作为设计或研究通信协议的有力工具在其建模和分析中发挥了相当重要的作用。此外,通信系统作为一类复杂的人-机系统,动态对策理论可以被用来分析用户的群体行为,通过系统设计和策略进行宏观调控,导致用户的合作行为和网络的最佳运行,从全局的意义上来说提高网络的综合性能,这在系统设计、运行管理中有重要的意义。

参考文献

- 1 郑应平. 离散事件系统理论研究和应用进展. 控制与决策, 1996, 11(2~ 3)
- 2 Cassandras C G. Discrete event systems modelling and performance analysis. IRW N Publishers, Boston 1993
- 3 Decina M. Open issues regarding the universal applications of ATM for multiplexing and switching in the B-ISDN, IEEE ICC' 91, 1991
- 4 Oie Y, et al. Survey of the performance of nonblocking switches with FIFO input buffers. IEEE ICC'90, 1990
- 5 Ren Z X, Meditch J S. A two-layer congestion control protocol for broadband ISDN. IEEE NFOCOM '92, 1992
- 6 Tobagi F A. Fast packet switch architectures for broadband integrated services digital networks. Proc of the IEEE, 1990, 78(1)
- 7 ITU-T. Recommendation I 121. Broadband aspects of ISDN, Melbourne, 1988
- 8 ITU-T. Recommendation I 371. Traffic control and congestion control in B-ISDN, Geneva, 1993
- 9 Cidon I, et al. An approach to integrated high-speed private networks. Int J Digital and Analog Cable Systems, 1988(2)
- 10 Cidon I, Guerin R & Khamisy A. On protective buffer policies. IEEE/ACM Trans on Networking, 1994, 2(3)
- 11 Liu Z, Tow sley D. Burst reduction properties of rate-control throttles: downstream queue behavior. IEEE/ACM Trans on Networking, 1995, 3(1)
- 12 Cao X R, Tow sley D. A performance model for ATM switches with general packet length distributions. IEEE/ACM Trans on Networking, 1995, 3(3)
- 13 Hluchy M G & Karol M J. Queueing in high-performance packet switching. IEEE JSAC, 1988, 6(9)
- 14 Karol M J, Hluchy M G & Morgan S P. Input versus output queueing on a space-division packet switch. IEEE Trans on Communications 1987, COM -35(12)
- 15 Fan Z & Zheng Y P. Performance evaluation for a kind of ATM model. Proc of 2nd ASCC. Seoul Korea, 1997
- 16 Huang C C & Leon-Garcia A. Separation principle of dynamic transmission and queueing priorities for real-and nonreal-time traffic in ATM multiplexers. IEEE/ACM Trans on Networking, 1994, 2(6)
- 17 Tassiulas L, Hung Y C & Panwar S S. Optimal buffer control during congestion in an ATM network node. IEEE/ACM Trans on Networks, 1994, 2(4)
- 18 Rathgeb E P. Modeling and performance comparison of policing mechanisms for ATM networking. IEEE JSAC, 1991, 9(3)
- 19 Murate M, et al. Analysis of a discrete-time single-server queue with bursty inputs for traffic control in ATM networking. IEEE JSAC 1990, 8(3)
- 20 Wu G L, Mark J W. Computational methods for performance evaluation of an ATM multiplexer supporting bursty traffic. IEEE ICC'93, 1993
- 21 Banks J, Carson J. Discrete-event system simulation, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1984

(下转第 109 页)

为对称与非对称系统的定性分析和定量分析提供有效依据。

参考文献

- 1 Kuehn P J. Multiqueue System with Nonexhaustive Cyclic Service Bell, Syst Tech J. , 1979, 58(3): 671~ 688
- 2 Ferguson M J, Aminezah Y J. Exact Results for Nosymmetric Token Ring System. IEEE, Trans Commun, 1985, COM 33(3): 223~ 231
- 3 逯昭义. 环形 LAN 多令牌存取方式的排队模型. 通信学报, 1991, 2(5): 16~ 20
- 4 Wang Sing The Probabilities CPB System. Appl. Math. Modelling, 1993, 17(2): 98~ 104
- 5 王思明. 一类多站循环服务系统的分析与建模. 系统工程学报, 1994, 9(2): 20~ 27
- 6 王思明, 马自立, 张忠辅. 多队列循环服务系统——全服务与门限服务方式的分析与建模. 运筹与管理, 1994, 3(4): 1~ 7
- 7 王思明, 马自立. 多队列循环移动服务系统的数学模型与分析. 系统工程学报, 1990, 5(2): 23~ 32
- 8 徐光辉. 随机服务系统. 北京: 科学出版社, 1984
- 9 邓永录. 运筹学中的随机模型. 广州: 中山大学出版社, 1996
- 10 官建成. 随机服务过程及其在管理中的应用. 北京航空航天大学出版社, 1994
- 11 潘启敬等. 计算机网络. 北京: 中国铁道出版社, 1986

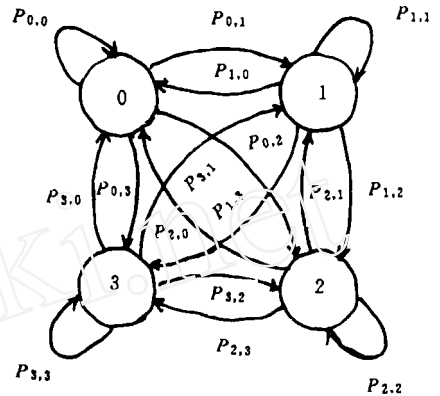


图 8 状态转移图

(上接第 26 页)

- 22 Ho Y C, et al A new approach to the analysis of discrete event dynamic systems Automatica, 1983, 19(2)
- 23 Ho Y C. Performance evaluation and perturbation analysis of discrete event dynamic systems IEEE Trans on Automatic Control, 1987, AC-32(7)
- 24 Fujimoto R M, et al Parallel simulation of statistical multiplexers. J. of DEDS, 1995
- 25 Murata T. Petri nets Properties, analysis and applications Proc of the IEEE, 1989, 77(4)
- 26 Stidham S Jr. Optimal control of admission to a queueing system. IEEE Trans on Automatic Control, 1985, AC-30(8)
- 27 Altman E, Shinkin N. Individually optimal dynamic routing in a processor sharing system. Stochastic game analysis Report No. 849, Electrical Engineering, Technion, Israel, 1992
- 28 Xu S H, Shantikumar J G. Optimal expulsion control——a dual approach to admission control of an ordered entry system, Operations Research, 1993(6)
- 29 Hsiao M T, Lazar A A. Optimal decentralized flow control of Markovian queueing networks with multiple controllers Performance Evaluation, 1991(13)
- 30 Shinkin N, Shwartz A. Guaranteed performance regions in Markovian system with competing decision makers IEEE Trans On Automatic Control, 1993, 38(1)