**第二章 网络演算理论**

从1991年被提出的网络演算，在过去的二十几年得到的迅速发展，本章节中将回顾网络演算的发展历程以及相关理论知识。

**2.1 网络演算的发展简述**

传统的排队论一度作为建模的分析方法，但在对网络分析时需要获取较为精确的流量和服务模型，对于当今日益复杂的网络体系和多样的业务特性来说，要想获得精确的流量和服务模型是比较困难。而网络演算是另一种可以用于网络性能分析的理论，最早于上世纪九十年代由Cruz在论文中提出。。。。。

两种分析方法的主要区别在于，传统的排队论一般是获得稳态状态下的平均分析结果，且对到达流或者服务有着特定的限定分布，而网络演算关注的是用累积的数据到达流量和累积的服务量以获得性能边界，且并不需要限定到达流或者服务的分布。通过使用该理论模型，可以很容易得到网络的时延边界、需要的缓存大小还有吞吐量等性能参数。

**2.2 基本性质**

由于服务保证

在网络演算中有一些约定俗成的规定，比如当只有在数据发分组的最后一个比特到达网络中单个节点时才认为该数据分组被接收，同理，只有在数据分组的最后一比特来开该节点才认为是数据分组离开此节点。

网络演算是用于计算机网络性能分析的理论工具之一。网络性能分析理论的研究模型主要有两个——数据流量模型和节点服务模型。数据流量模型描述了数据流的到达特性，节点服务模型描述了网络中中各节点系统为数据流提供服务能力的大小。以确定网络演算为例时，这两个模型分别对应了确定网络演算中的两个核心概念：到达曲线和服务曲线。为了更好地分析网络性能，到达曲线和服务曲线必须具备以下五个基本性能：

（P．1）网络性能保障：当数据流量模型和节点服务模型确定后，数据流穿过单个节点获得的服务保障（比如队列积压和时延）可随之推导得到。

（P. 2）输出流的特性：数据流传输通过节点后的输出流的流量模型可以用和输入流同一类型的流量模型表示。

（P．3）串联特性：多个节点串联后的系统为数据流提供服务对应的服务模型可以用与单个节点为数据流提供服务的服务模型同一模型的服务模型来描述。

（P．4）余留服务：当多个流同时贯穿某个节点竞争该节点的服务时，节点为多条流中的某条流提供的服务能力与该节点提供给总数据流的服务能力是同一类型的。

（P．5）聚合特性：多条流聚合而成的总数据流可以用与单条数据流同一类型的数据流量模型里来描述。

根据现有文献对排队论和网络演算研究的分析，我们发现虽然排队论中对于很多类型的流量模型都具有1和5的性质，却普遍缺乏3和4方面的性质，并且2性质只有在流量满足泊松过程时才会成立，因此对于现代网络中更多样化的流量，使用排队论很难推导出输出流的流量模型。据此可见，排队论存在一些劣势，相反，正处于快速发展的网络演算同时具备了以上5个基本性质，在性能分析方面体现了自己的优势。

加个节点服务模型图

**2.3 最小加代数运算理论**

网络演算是一种基于最小加代数的性能分析工具，最小加代数与传统的数学代数既有关联又有区别。我们常用的代数结构是基于最常见的传统代数结构的，此代数结构在实数集合中定义了加法和乘法两种基础运算。最小加代数结构研究的也是实数集合上的运算，但是在该域内研究的是取下确界的二元运算以及最小加卷积运算，其中运算定义为，表示取集合的下确界，即最小加代数结构表示为，定义为比任意实数都大的数。我们可以简单地理解成，在最小加代数中，充当了传统代数结构中“加法”的角色，而充当了“乘法”的角色。我们将传统代数结构与最小加代数结构的对应关系以表格形式列出，如下表。

表 传统代数和最小加代数中的运算对应关系

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 运算 | 传统代数 | 最小加代数 |
| 加法 |  |  |
| 减法 |  |  |
| 乘法 |  |  |
| 除法 |  |  |
| 最小值 |  |  |
| 最大值 |  |  |

定义2.1（广义递增函数） 如果对于一个函数下式成立



则F表示为所有非负广义递增函数的集合。

定义2.2（广义递减函数） 反之，如果对于函数满足



那么称为非负广义递减函数的集合。

定义（水平偏差） 考虑两个函数和，它们之间的最大水平距离定义为



定义（垂直距离） 考虑两个函数和，它们之间的最大垂直距离定义为



定义（最小加卷积） 对于,两个函数和的最小加卷积定义为



**2.4 确定和随机网络演算**

网络演算经过几十年的迅速发展，现已演变为确定网络演算和随机演算两个分支。随机网络演算在确定网络演算的基础上引入了概率运算，目的是为了综合考虑到实际网络中数据流量的自相似性、随机突发性以及网络系统中信道衰落等因素，允许网络以一定的概率违背性能边界，保障整个服务系统的随机服务质量，从而避免确定网络演算过于保守而无法充分利用资源的问题[1, 2]。

**2.4.1 确定网络演算**

在一个节点为数据流提供传输服务的模型系统里，我们用表示数据流的到达过程，即数据流在时刻内累积到达的数据量；系统为数据流提供的服务能力由服务过程描述，表示直至时刻系统为数据流提供的累积服务量；经由节点处理传输后的离开数据流由来表示，即到时刻为止，离开节点的累积数据流。这三个物理量都是广义递增函数，即对于任何的，总有,,。我们假设这些过程是定义在上的左连续函数，并且时的值都为0。在网络演算中，有了这三个物理量就可以很自然地得到我们所需的性能值，结合图n来看，其中数据流在某节点上的流量积压可以用和之间的垂直距离来表示，即流量积压；同时传输时延可以用和之间的水平距离表示，即，其中是求集合下确界的运算。

画一个直观图

通过以上介绍，我们发现、(与和有关)的确定关系到网络的性能参数结果的确定，而在实际网络分析过程中，其实他们的具体准确函数值时难以得到的，因此网络演算中引入了到达曲线和服务曲线这两个关键概念分别描述和。下面将首先介绍DNC中的到达曲线和服务曲线来说明前面的两个概念。

**定义（到达曲线）** 存在到达数据流，当满足时存在不为0的非负不减函数，使得，此时称拥有到达曲线。

**定义（服务曲线）**设数据流经由节点服务后的离开过程为，若存在非负不减函数对于所有的都满足，此时称节点为数据流提供的服务曲线为。

通过以上两个定义很容易理解到，描述的是实际数据流的上界，但服务曲线的理解却不是那么容易，这里说明一下，的结果表示的是数据流经过一个服务能力为的线性服务系统后产生的输出流。这样定义2就能解释为实际数据流的离开过程是不会少于这个线性服务系统提供服务后的输出流的，这也代表了描述的是一个系统能够提供服务能力的下界。

有了到达曲线和服务曲线的含义后，我们可以重新理解流量积压和传输时延，即不会大于和两条曲线之间的最大垂直距离，不会大于和两条曲线之间的最大水平距离。

下面将回归到网络性能分析的五条基本性质，按顺序罗列出与之对应的五条定理。

**定理1（性能上界分析定理）**设数据流经过某个节点获得服务，其中数据流拥有到达曲线，节点能够提供的服务曲线为，则在此节点处流量积压满足，

其中表示和两条曲线之间的最大垂直距离。

传输时延满足

,

其中表示和之间的最大水平距离。

**定理2（输出定理）**

**定理3(串联等效定理)**设数据流依次经由H个网络节点获得服务，H个节点提供的服务曲线分别为,,…,,则该串联系统可看成一个整体为数据流提供的服务曲线满足。

**定理4(余留服务定理)** 假设两个数据流和同时竞争获得某个网络节点提供的服务，该网络节点提供总的服务曲线为，此时已知对应到达曲线为,则对应的离开过程满足

，其中。

**定理5（聚合流定理）**设数据流由多个子数据流，，…，聚合而成，即。若子数据流的到达曲线为,则聚合流的到达曲线为，即对所有的，都存在。

同样地，在随机网络演算中也有与五条基本性质相对应的五条基本定理，只是它们的表现形式不如确定网络演算中那样简单明了。后面会给出具体定理。

**2.4.2 随机网络演算**

确定网络演算使用了基于确定边界的系统性能评价方法,而随机网络演算中用概率边界替代了确定网络演算的确定边界。确定服务保证可以用数学形式表达为:P{数据流的所有分组均满足要求的QoS指标}= 1;而随机服务保证可以类似地表达为:P{数据流的部分分组不满足要求的QoS指标}≤ ε,其中ε表示分组不满足所要求的QoS指标的最大允许概率。不难发现,确定服务保证是随机服务保证在ε = 0条件下的一个特例。

随机到达曲线和随机服务曲线是随机网络演算中的两个核心概念。



**定义（t.a.c随机到达曲线）** 假设对于一个数据流，存在和使得对于所有的和满足



则称该流具有t.a.c随机到达曲线，其中为到达数据流的流量上界函数，为到达曲线的概率上界函数，记为。

在DNC中，到达曲线明确了到达数据流的严格上界，到达数据流无论如何都不会超过该上界，而在SNC中，该到达曲线上界值是可以被超越的，但是发生该情况的概率是受限的，即存在一个概率上界。类似地，DNC的服务曲线表示服务系统能够提供的服务能力的严格下界，在SNC中该服务曲线下界可以被违反，即数据流的离开过程有可能会小于系统承诺的最小离开过程，同样，出现该情况的概率也是受限的，具体表现形式如以下定义。

**定义（随机服务曲线）** 用表示时间内业务离开系统的输出累积量，用表示时间内业务离开系统的输出累积量，如果对所有的，均有



则称系统提供边界函数为的随机服务曲线，记为，运算符代表了最小加卷积，即。

**随机网络演算的七个定理见P72博士论文**

**2.5 本章小结**

**References:**

[1]. Fidler, M. An End-to-End Probabilistic Network Calculus with Moment Generating Functions. in IEEE International Workshop on Quality of Service. 2006.

[2]. Ciucu, F. and J. Schmitt. Perspectives on network calculus: no free lunch, but still good value. in ACM SIGCOMM 2012 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. 2012.