

计 算 机 通 信 网 的 设 计 与 分 析

【美】 米沙·施瓦茨 编著

赵辰 杨再同 译

Computer Communication Network Design and Analysis

by Mischa Schwarz

1977

内 容 提 要

本书着重于叙述计算机通信网的通信网部分。以目前世界上规模较大的四个计算机通信网为例作了有关网的总体介绍。对于计算机网的容量分配、缓冲器配置、路由选择和流量控制等总体设计问题都进行了定量分析,并提供了一些实用的算法和设计曲线。叙述中通过简单的例题引出一般的计算步骤,力求避免较高深的数学推导,因而本书虽然是一本大学教科书,但也适合计算机和电信专业的技术人员参考阅读。

计算机通信网的设计与分析

〔美〕 米沙·施瓦茨 编著

赵 辰 杨再同 译

责任编辑: 林秉方

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32

1984年12月第一版

印张: 13 8/32 页数: 212

1984年12月河北第一次印刷

字数: 351 千字

印数: 1—10,500 册

统一书号: 15045·总2906—有5372

定价: 2.55 元

目 录

第一章	简史及引言.....	(1)
第二章	一些计算机通信网的例子.....	(14)
第三章	计算机通信网的容量分配.....	(67)
第四章	分散网的容量分配.....	(82)
第五章	集中网: 延时-费用的折衷	(98)
第六章	排队论原理.....	(118)
第七章	在存储和转发网内的集中和缓冲.....	(157)
第八章	集中: 有限容量缓冲器, 动态缓冲, 字块存储...	(179)
第九章	集中网的设计: 多点连接.....	(198)
第十章	计算机通信网的设计算法.....	(221)
第十一章	路由选择和流量控制.....	(241)
第十二章	计算机通信网内的轮询技术.....	(301)
第十三章	随机连接技术.....	(329)
第十四章	线路控制规程.....	(368)
	附录: 点对点数据通信基础.....	(389)
	参考文献.....	(397)
	英汉名词对照表.....	(407)

第一章 简史及引言

目前已经运转或正在兴建的数据网具有各种类型，其中有大规模的计算机网（例如，ARPA网，法国的Cyclades网），以及已建立的、或是由英国邮电总局提议的多用途数据网，TRANS-CANADA电话系统，DATRAN*，和ATT网。此外还有航空公司订票网、医疗数据网、银行数据网、教学网、协作通信网、问询服务网等等，它们名目繁多且发展迅速。

本书尽可能定量地说明其中大多数通信网所广泛采用的网的设计的各方面问题，其中包括的一些问题是：信息如何进入网内，如何把来自相邻地理区域内的多个终端的信息加以混合，以及如何将信息流导向多个远端的总体问题。这是一个崭新的领域，如何掌握许多网的设计问题及其解决方法正处在开始研究的阶段，所以我们将设法详细地提出一些设计问题，而且只是概略地说明处理这些问题的各种方法。我们在阐述某些现有的通信网时将尽可能地做到这一点。

现有的、或正在研制的计算机通信网具有两种类型（有些研制中的网也可能是这两种类型的混合）：

1. **线路交换型。**类似于电话（语声）网。在进行传输信息之前先建立呼叫和信息路由。一旦建立起完整的电路或路由后，就为传输信息作好了准备。在评定这类通信网的性能时，呼叫建立时间起着关键作用。DATRAN网就是线路交换数据网的一个突出的例子。

*由于经济上的原因，DATRAN网已于1976年8月停止营业。但它的线路交换技术的应用则是新型的。本书列出的几篇文献提供了对这一技术的有价值的见解。

2. **信息交换或包交换型。**信息（或是以完整的一份信息形式，或是以一些较短的信息包形式）逐条链路地通过通信网，在某些结点上或许还要排队等待。设置在信息集中和分散点上的小计算机（一般是小型计算机，但目前微型计算机日渐增多）为进入网内的必需编码的信息进行编码，进行信息组合和缓冲，把信息分发到下一目的地，等等。这些计算机有不同的名称，或是称为**可编程序集中器**、或是叫做**远端集中器**。这些通信网引入了缓冲延时或排队延时，因而在它们的设计中延迟时间和响应时间起着关键作用。

本书基本上以信息交换网为主，因而使用“**计算机通信网**”这一名词。只有采用可编程序集中器才能提供所需的灵活性和满足容量的扩充和改变。读者可对照本章所论述的信息交换网或包交换网参考关于 DATRAN 网的一系列文献*（其中有几篇文献参见第二章第一节结尾处的足注。）

计算机通信网又经常划分为两类。一类是面向终端的通信网，用来传输各种类型的低速数据。另一类是最近发展起来的计算机网，比用其它任何方法更能发挥计算机的能力，更有效地分配计算机负载，以及提供了分享计算机资源的手段。在下一章详细阐述的 ARPA 网就是现有这一类的最大的一个网。在美、法、加拿大、英国以及欧洲还有一些已投产或正在兴建的较小的计算机网。现有的大多数网都是面向终端的一类。有些例子将在本章稍后部分讨论。

在大多数情况下对于这两类通信网的设计原理是相同的。然而由于通信网用于处理混合数据的情况日渐增多，传输速率可从电传机的10字符/秒变化到计算机打印的50千比特/秒(kbps)，被传输的信息可能很短，（例如通常在许多问询系统内的问询信息，）或是很长（例如，包括传送文件在内的数据传输；其中也可能包括语

* DATRAN网文献专集，*Proc. IEEE National Telecommunications Conference*, New Orleans, Dec. 1975.

声数据)。设计能够处理各种不同的传输速率、信息长度和信息到达率的通信网，是一个很有意义的领域。信息的统计资料的范围如此宽广，这一点正是数据网和到处可见的基本上传输语声信息的电话网之间的基本差别。在电话网内，平均信息长度为三分钟，进入网内的信息频带宽度限制在4kHz以下。

对数据速率、信息长度、以及信息到达率的广泛范围加以研究以后就能引导出将信息交换和线路交换能力兼容的综合网的概念。例如，如果被传输的信息很长，那末在适当的途径上传输，其费用会较节省些，这就是线路交换的情况。只有当信息相当短且又不经常出现时才值得使用信息交换设备，这时由各个不同的用户来的信息联合起来分摊传输费用。近代的时分交换和时分多路复用技术允许这两种运输方式在同一系统内协同工作。^{*}

本书将讨论哪些专门的设计问题呢？我们已经提及了整体的和局部的两类设计问题。所谓整体的问题包括涉及整个网的设计（从最佳或降低费用的意义而言），它们是：

1. **网的结构设计。**如果给定了各个终端和另一些信息源的地理位置，以及预测到的它们的业务量特征，那末集中和交换点（网的结点）应如何配置？它们应如何连接？网的结构应采用哪种形式（星形、树形、环形、网格形、等等）？需要多少条链路（中继

^{*} 例如，可参阅，N. Shimasaki和T. Kohashi, "A Compatible Multiplexing Technique for Anisochronous and Isochronous Digital Data Traffic," *Data Networks: Analysis and Design, Third Data Communications Symposium*, St. Petersburg, Fla., Nov. 1973, 59-67页。

K. Kummerle, "Multiplexor Performance for Integrated Line and Packet Switched Traffic," *Proc. 1974 International Conference on Computer Communications*,

Stockholm, Sweden, M. J. Fischer和T. C. Harris, "A Model for Evaluating the Performance of an Integrated circuit- and Packet-Switched Multiplex Structure,"

IEEE Trans. on Communications, COM-24, no. 2, Feb. 1976, 195-202.

线或是各结点之间的连接)？

2. **线路容量的分配。**在整个网内应采用多大容量(以数据容量比特/秒(bps)为单位)的中继线？

3. **选择路由的步骤。**如何比较各种不同的路由算法？是采用本地路由控制、还是集中路由控制？需要隔多长时间修改一次路由信息和/或路由控制？如何修改？那些是决定路由的重要参量？

4. **流量控制步骤。**如何能保证业务流均匀地贯穿网内？如何防止瓶颈和死锁？如何防止任一用户、数据源或结点被网所锁住？

用来回答上述这些问题的性能准则是：

1. 规定响应时间，一般是从概率的意义上规定的(即是，95%的时间内小于1秒，)对网的平均值、对任何一条链路的平均值，从任何一点到中央计算机(CPU)或处理机的最大值，等等。

2. 规定费用，或是规定在给定费用下的最小响应时间，或是在给定的响应时间下的最低费用设计。

3. 最大的或规定的可靠度。

各种网的结构图形例示于图1-1。

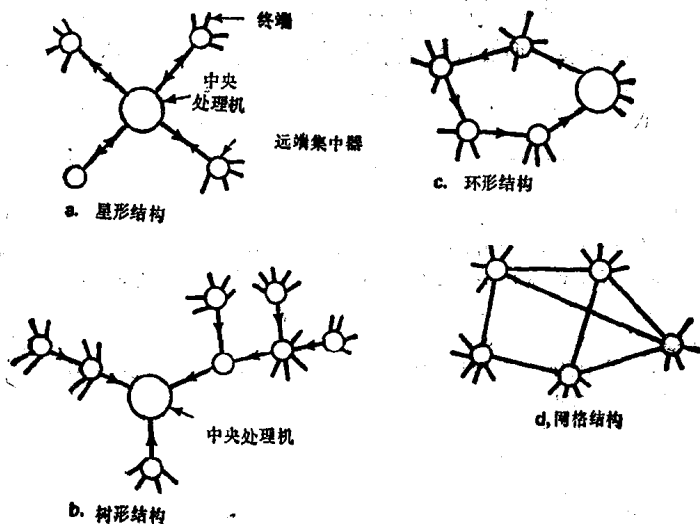


图 1-1 各种网的结构图形

以下是属于局部的一些问题：采用哪种集中或组合(多路复用)方案？有多少个信息源，是什么类型的、能否合理地组合在一个集中点上？多路复用方案应是同步的还是异步的？什么是它们的折衷方案？各种不同的连接方案（例如比较一下轮询技术和随机连接技术）是如何实现的？为了保证预先规定的响应时间和/或规定的缓冲器溢出概率，需要多大的缓冲器容量，以及采用那一些缓冲器存取方案？

在回答这些和与它们相关的一些问题时，我们应该先规定出信息长度和业务量统计，并制定出集中、存储、和向前转发操作的简单模型。

作为文内述及的许多问题的一个简单例子，我们假定美国东部七个城市中每个城市的终端都连接到设置在华盛顿(哥伦比亚特区)的中央计算机系统内*。为简单起见，我们假定只有入界业务（用户到计算机），（因而在这一不完整的例题内就排除了各个终端之间的通信）。每个终端均有一部电传机以10字符/秒或80bps的额定速率发送八单位字符码。假定每部电传机都是主动的，平均每30秒钟发送一份信息，并假定平均信息长度为15字符（120比特）。这七个城市和每个城市接入中央计算机的电传机终端的数目开列于下：

- | | |
|---------|-------|
| 1. 芝加哥 | 10个终端 |
| 2. 底特律 | 9个终端 |
| 3. 夏洛特 | 4个终端 |
| 4. 迈阿密 | 6个终端 |
| 5. 新奥尔良 | 6个终端 |
| 6. 纽约 | 12个终端 |

* 本例取自：D. R. Doll, "Efficient Allocation of Resources in Centralized Computer-Communication Network Design," University of Michigan, Systems Engineering Laboratory, Nov. 1969.

7. 塔拉哈西

4 个终端

图1-2为其示意图。

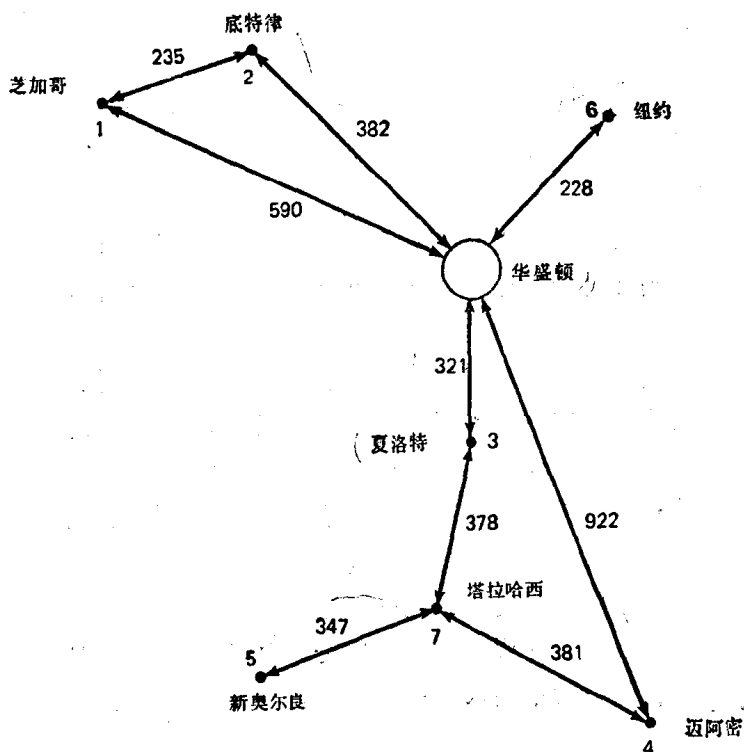


图 1-2 例：与华盛顿连接的各城市（图上数字为英里数）

每一城市内的各个终端又是如何连接、集中或多路复用的呢？显然从每个终端各自都用线路连到中央计算机毕竟是大浪费了。因而我们就面临着本地多路复用的问题。其中一种方法是可以采用多路复用集中器，这些集中器的操作方式既可以是时分复用(TDM)，也可以是频分复用(FDM)。这些基本上是同步设备。这种方法比采用可编程序集中器的方法便宜（尤其是在这一虚拟的例题内，网内只有很少几个终端的情况），但从统计上来说，效率是低的。

作为一个例子，假设采用时分复用方式，在同一组内的每一终端（例如芝加哥的10个终端）安排在一个适当的时隙内，即使没有

信息时也是如此。10部电传机，每部以10字符/秒(80bps)的速率发送，则当采用时分多路复用时至少需要一条800bps的线路。

现在假定采用异步多路复用或统计多路复用。这10部电传机首先被合并在一个缓冲器内，现在以同步速率取出“输出”。由于每部电传机平均每30秒钟产生一份信息，则在同一组内的10部电传机平均每3秒钟提供一份信息。假定平均信息长度为120比特(15个字符)，则输入缓冲器的平均速率为40bps。因而输出必需至少要有这样的容量才能避免在缓冲器内信息无限止地集结起来。这种异步方法采用缓冲使信息流得以均衡，从典型信息的猝发性质上得到了好处。

采用小型计算机或微型计算机的可编程序集中器能够立即编制程序以提供统计多路复用。它们的存储能力提供必需的缓冲功能，可以用来执行有限数量的处理、内务操作、定址、信息格式变换等工作。它们的这些灵活性能使各种不同的输入终端接入网内；接入网内的输入终端的数目可以马上改变，还能采用不同的扫描方式（扫描或轮询技术包括中枢轮询、点名轮询、嵌套轮询，以及其它方式）等等。看来可编程序集中器的应用正在迅速扩展，我们在本书内对这些设备将有所偏重。

应该看到我们为了以上的计算目的应用了平均统计，而在多路复用系统或集中系统的实际设计中还需要更详细的资料 and 业务量统计。缓冲器的容量和它对信息阻塞概率的影响，以及由于缓冲所引起的信息延时，这些都是与上述的统计数据有关的。一种简单的模型就是假定信息到达率是泊松分布的，而信息长度是指数分布的。实验数据表明在有些情况下泊松到达率的模型是正确的，但是几何分布的信息长度（与信息长度的离散性相一致）可能是更为合适的模型。^{*}（对于长的信息长度，指数分布和几何分布基本上是相同

^{*} 例如可参阅 E. Fuchs, P. E. Jackson, "Estimates of Distributions of Random Variables for Certain Computer-Communication Traffic Models," *Communications of the ACM*, 13, no. 12, Dec, 1970, 752-57.

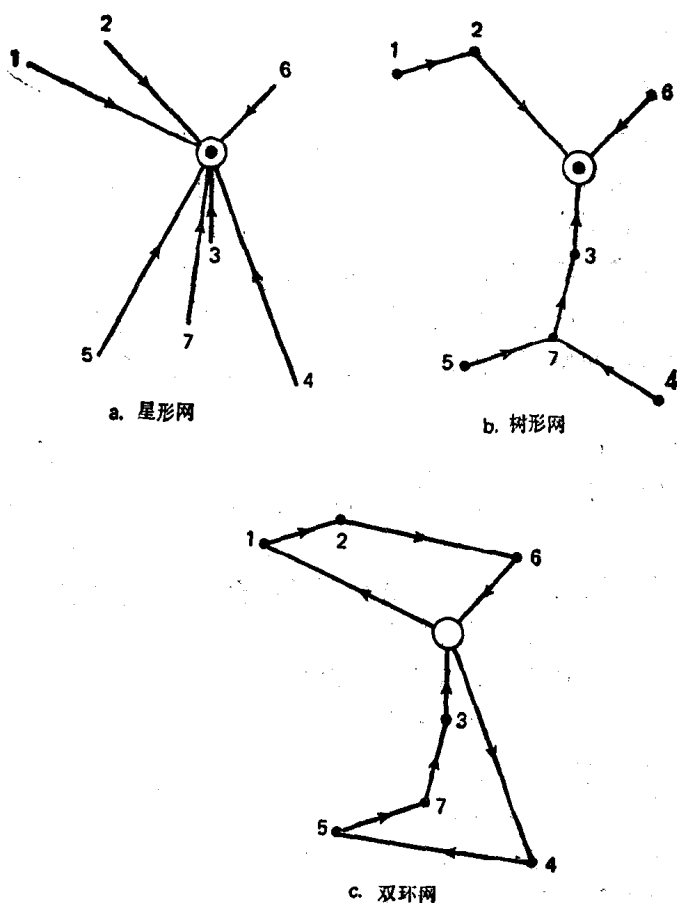


图 1-3 图1—2的例子内的三种不同的网的结构

的)。有些分析假定了另一些统计形式。稍后我们要对其中某些方法进行比较，我们的重点是放在缓冲器设计上以保证规定的阻塞概率，尤其是要检查一下所假定的信息统计对设计结果有何影响。

现在我们就可以应用上述的集中方案把重点转移到网的整体设计上来了。在上述的具体例子内（图1.2），若要为每一城市与华盛顿城内的中央计算机之间提供必要的连接，那末该网应如何组织呢？采用图1-3a所示的星形结构？采用图1-3b所示的树形网？还是

采用图1-3c的双环形网呢？所有这三种结构，还有许多其它的结构在现有的计算机通信网中都有应用。

网的结构是否适当取决于对于网的性能标准的选择。譬如说，在下一章我们要简单介绍的计算中，在规定的容许最大延时下，从通信费用最低的意义上来说，图1-3b的树形结构就是这三种结构中最好的一种。（作为一种粗略的近似，这里假定每部集中器的费用是相同的，与它所连接的输入线路的数目无关。这样，这一费用就是连接各个城市的中继线的费用，当然这与所假设的费用指标有关）。我们将要详细讨论的另一个性能标准是：在固定费用下的最小平均延时。

一个与网的结构形式有关的问题是（虽然往往是单独加以考虑的）：在网的每条链路上应如何适当分配传送数据的容量。或者说，在每条链路上要求传送容量为多少bps？这取决于所采取的某个具体的性能准则，也就是在（固定）费用下的最小平均信息延时，还有网内每一结点上假定由于延时所产生的信息统计和缓冲器分配。在复杂的网内，缓冲器的配置，网的结构，容量的分配，所有这些设计问题都是互相关连的（即使象图1—3上那样简单的例子也是如此）。本书的一个基本目的是试图研究出一种系统的网设计方法：哪些设计问题是可以分别处理的？如何能把网的各个组成部份尽可能简单地加以模型化，从而可以立即得到对网的分析和网的性能的符合实际的近似。

最后，必需考虑的一个整体问题就是可靠性问题。在链路（或结点）发生故障期间，如何保持该通信网的可通过性？我们将要看到在现有的各个网有时是用提供可替代的中继线（或链路）来做到这一点的。在图1—3的星形网或树形网内尤其是如此。在环形结构的网内，一般总有可能利用双工功能把业务流从有故障的链路上掉转方向直接送入中央计算机。在图1-1d所示的网格形或分散网结构中，可以采用改变路由方案来避开有故障的链路。除了指出分散网结构经常采取双连通度（或多连通度）的概念来保证链路发生故障

期间具有改变路由的功能外，本书不打算详细阐明可靠性的问题。所谓“双连通度”，简单地讲就是网内的每一结点至少必需与另外两个结点相连接。下一章要讨论的ARPA网就是根据双连通度这一可靠性的约束条件来设计的。在集中网内传输途径经常是双份的，以确保在链路发生故障期间有备用的传输途径。下一章将介绍的“GE信息服务网”提供了这种双份功能。介绍读者参阅一篇定量讨论数据网的可靠性的极好的指导性文章*。

在下一章内我们将要详细讨论现有的四个计算机通信网的运转情况。前面已经提及的ARPA网把分布在美国本土上的许多大型计算机中心互连起来，并且通过卫星链路与夏威夷和欧洲连通。它是分散网（网格形）结构，从规定的最小平均延时下费用最低的意义上来讲它是最佳化的。GE通信网的网形结构则更为集中化，具备更大的处理能力，它可与美国、加拿大、欧洲、澳大利亚，以及日本的任何地方接通。Tymshare公司的TYMNET是一个分散型、面向终端的计算机通信网，它为位于美国和欧洲等地的用户提供了数据处理和数据传输两种功能。SITA是世界范围的航空公司订票网，它能使位于世界各地的航空公司营业处的终端与它们的专用的航空公司计算机接通。所有这四个网都采用包交换或信息交换。除了说明各个网的结构不同之外，我们还要讨论所有这四个网所采用的信息进入网内的过程、信息格式的形成、以及路由选择和差错控制规程，并且指出上述所有的设计问题的各种不同的可能解决方法。这就为本章已经提出的各种设计问题提供了更为具体的内容。这样的阐述也提供了以下各章所引用的设计方法的要点以及一些应用例子。

第三章到第五章的内容是计算机通信的设计问题的基本导论，

* R. S. Wilkov, "Analysis and Design of Reliable Computer Networks," IEEE Trans. on Communication, COM-20, no. 3, Part II, June 1972, 660-78.

着重于最简单的设计问题：即是如何为组成这一网的各条链路选择所要求的线路容量或传输能力（单位为bps）。在建立和解决这一设计问题的过程中，我们会立即遇到以下的三个问题：如何制订集中器的数学模型、信息的输入统计问题，以及采用什么性能准则。我们首先讨论几种容量分配的分析方法，这些方法提供了如何在网内延时最小的条件下适当选择容量的初步解答。然后我们再来讨论针对集中网设计的算法。如果所选择的一些容量都是目前能实现的，则这一算法提供了更符合实际情况的合适的链路容量分配。本章介绍的集中网设计问题（图1-2）的大部分讨论只是提供了探讨上述这些设计方法的一个例子。我们也介绍了一个简单的分散网。然而，对于分散网的设计只是一个初步介绍而已。

第三章到第五章所介绍的数学模型着重于网的集中器的缓冲和排队特性上。这几章所进行的设计分析是以排队分析中得出的一些简单结论作为依据的。由于排队论原理对于理解计算机通信网的延时性能极为重要，我们将在第六章中拿出一些时间来介绍排队论基础，这就使得本书尽可能地成为一本完整的书。我们首先讨论M/M/1排队分析，假定信息到达是泊松分布的、信息长度是指数分布的。然后再分析M/G/1排队的延时特性，M/G/1排队适用于不满足指数长度分布的信息。我们也收集了一些优先级排队的资料，因为在许多通信网内优先级信息传输占有一定的分量。对于SITA网的信息特征的计算只是作为一个例子而已。

引入排队论之后，我们在第七和第八章内重点放在更详细地讨论集中器的设计问题。在这两章中对于时间响应分析、满足规定的阻塞概率标准的缓冲器容量指标，以及统计多路复用的概念都进行了讨论。在涉及同步速率下传输信息包或字块的叙述中引入了比M/M/1和M/G/1排队更为接近实际的模型。这些模型是几何分布的信息长度以及有限容量缓冲器，存储的是数据单位（譬如说，字符或字节）而不是M/M/1排队的信息存储。

在第九和第十章内，我们回到总的或整体的网的设计领域。重

点放在网的结构设计上。第九章内我们讨论为提供各终端或各集中器的最低费用连接而研究出来的一些算法，其中假定信息所到达的目的地只有一个。在终端的情况下这一算法为多个终端接入一部集中器提供了最好的多支或多点连接方式。在集中器的情况下这种算法指出了集中网内各集中器之间的最低费用连接方式。我们在第十章内首先讨论把集中器和终端接入网内时，应如何适当选择这些集中器和终端的问题，然后讨论分散网的网的结构设计。在这两章内曾经多次指出网的结构设计虽然主要在于最低费用的设计，但是极为复杂，如果将所要求的各个性能准则都结合进去的话，就很难得到最佳设计，因而网的设计必需反复进行，例如，先确定集中器的最好的配置方案和连接方式，然后估算最好的信息路由途径、然后确定每一集中器上的各个终端的最低费用连接，然后再重复这一设计。因为网的规模很大（很复杂），所以在集中器和终端的连接问题上一般采用试凑算法（由于一些附带的问题，目前还没有最佳算法）。

第十一章继续讨论网的整体设计，比较了各种路由方案，分析了一些减轻网内拥塞的简单技术。所讨论的路由方案既有判定方案，也有随机方案；既有集中方案也有本地方案，既有固定技术也有适应技术。路由选择的最小延时算法和最短途径算法也包括进去了。所介绍的拥塞或流量控制技术中包括终端对终端控制机构以及本地控制机构的简单模型。

在第十二和十三章内我们返回来讨论信息进入网内的问题。在第十二章讨论了轮询原理，并以IBM的航空乘客订票系统(PARS)作为例子。在第十三章叙述了由夏威夷大学的Aloha系统所推广的某些随机连接技术。我们举出几个简单的例子，用来比较轮询和随机连接，用来讨论延时和网的吞吐量之间的可能的折衷办法。

在第十四章中阐述线路控制的基本问题，为在任何网内为在相邻结点之间建立必需的连接，建立同步、保持传输信息的统一性、维持差错控制，以及为处理其它一些可预见的偶发事件所采取的各

种步骤。讨论了为实现上述各种步骤而制订的各种规程和代码，既有面向字符的，也有面向字位（透明）的。例如，我们叙述了ISO=ANSI规程以及相应的ASCII码、BSC（二进制同步码），以及SDLC-HLDC类的规程。

对比较缺乏近代点对点数据通信设备的知识的那些读者，我们在附录内归纳了一些叙述性的材料，这会有助于他们更易于理解全书所使用的专业名词。

第二章 一些计算机通信网的例子

我们在这一章归纳了四种现有的信息交换（或包交换）网的运转特性。所有这些网内都互连着多个大型计算机系统（叫做主机）以及各种类型的数据终端，为位于网内任何一处的信息源和目的地之间提供了迅速而可靠地传输数据信息所要求的传输能力。和本书的其余部分一样，我们在这里也只是着重于说明干线通信网。在所有情况下它们都是由通信链路互连着的小的计算机—通信处理机组成的。这些处理机是分布在各地的。与这些处理机连接的数据终端和主计算机只是附带地说明一下。

挑出来讨论的这四个计算机通信网，它们的用途和适用范围是不同的。ARPA网主要用来互连各个大的计算机系统；TYMNET和GE网是商业用的分时制网；SITA网是一种全球的航空订票网，也能处理各种类型的航空电传信息。然而，它们都是用小计算机作为网的基本的信息存储和交换部件，在这一点上它们是相似的。这些小计算机有各式各样的名称：通信处理机、可编程序集中器、信息集中器等等，对每一种网的讨论中会清楚地看出，它们典型地执行了各种不同的任务。它们接收从与其连接的各数据终端或计算机系统送来的信息，把信息字符重新编码，使之成为整个网内所采用的标准信息格式（如果输入设备用的是其它格式的话），而当这些信息需要等待传输时，就把它存放在缓冲器内。这就是在第一章内已经扼要提及的信息的组合、集中、或多路复用阶段^{*}。已经进入

^{*} 在Proc. IEEE, 60, no. 11, Nov. 1972. (计算机通信专集)上有三篇有用的文章探讨了信息集中这一课题的一般领域，这就是D. R. Doll, "Multiple-xing and Concentration," pp. 1313-21; C. B. Newport, and J. Ryzlak, "Communication Processors," pp. 1321-32, 以及D. L. Mills, "Communication Software," pp. 1333-41. 在IEEE Trans. on Communication, COM-20, June 1972, part II的专集上还有几篇文章。