

通信网理论基础

第四章 网内业务分析

第三节 提高网络效率的一些措施

北京邮电大学 信息与通信工程学院

授课教师: 武穆清

电子信箱: wumuqing@bupt.edu.cn

本章内容

- 4.1 排队论基础
- 4.2 通信网的业务模型与分析
- 4.3 提高网络效率的一些措施
- 4.4 多址接入系统

4.3 提高网络效率的一些措施

4.3.1. 大群化效应

— 普遍而言

= 社会服务资源在一定范围内的统一利用总是要优于分散经营的

≡ 全利用度设施要优于部分利用度设施

= 通信网中的各种公共资源，如信道，也有类似的规律，即：在同样的质量指标下

≡ 信道的统一分配与分散利用相比

≡ 能够传送更多的业务量

= 这种规律就是大群化效应

– 以M/M/m(n)排队系统来说明

= 通信网中许多实际系统都可用M/M/m(n)模型近似

= 对于即时拒绝的M/M/m(m)系统:

$$\begin{aligned} \equiv \text{呼损:} \quad p_c &= \frac{a^m / m!}{\sum_{r=0}^m \frac{a^r}{r!}} & \equiv \text{系统效率:} \quad \eta &= \frac{a(1 - p_c)}{m} \end{aligned}$$

△ 其中: $a = \frac{\lambda}{\mu}$, 即业务量强度

△ m 是窗口数, 或信道数

≡ a, m, p_c 三者之间的数量关系

$\begin{matrix} a \\ \backslash \\ m \end{matrix}$	1	10	100
1	0.5	0.91	0.99
3	0.0625	0.75	0.97
10	10^{-7}	0.215	0.90
30	~ 0	1.7×10^{-7}	0.70
100	~ 0	~ 0	0.076

≡ 呼损是建网时的重要指标

≡ 若要求 $p_c \leq 0.1$, 则

△ a=1爱尔兰 (Erlang) 时, 需m=3, $\eta=31\%$

△ a=10爱尔兰 (Erlang) 时, 需m=13, $\eta=70.5\%$

△ a=100爱尔兰 (Erlang) 时, 需m=96, $\eta=94\%$

≡ 可见, 业务量越大, 所需的信道数也越多 (以保证呼损指标), 系统效率也越高

△ 业务量与所需信道数不是线性关系

△ 从系统效率的变化已可以感受到大群化效应

= 定量计算，看出大群化效应

≡ 以 $a=10$ 爱尔兰为例，仍然要求 $p_c \leq 0.1$

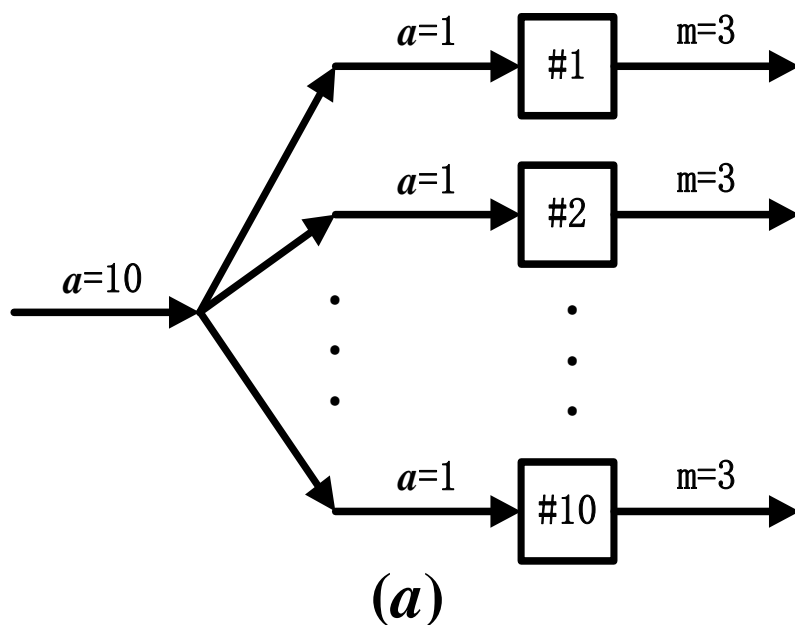
≡ 有两种方法可实现此系统，如图：

≡ 图 a 是分散的线路系统

△ 即需要用 10 个 M/M/3 即时拒绝系统来承载 $a=10$ 爱尔兰的业务量强度

△ 可保证用户呼损不大于 0.1

△ 信道利用率为 31%



≡ 图 b 是集成的线路系统

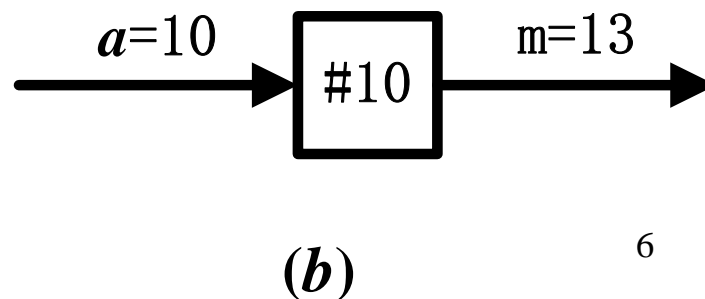
△ 即用一个 M/M/13 即时拒绝系统来承载 $a=10$ 爱尔兰的业务量强度

△ 就可保证用户呼损不大于 0.1

△ 信道利用率为 70.5%

△ 且较图 a 节省了 17 条信道

≡ 业务量越大，这种大群化效应越明显



— 以时延指标来说明大群化效应

＝在信息转接网（分组交换网）中，也有大群化效应

＝假设网络转接节点的存储容量足够大

≡使节点成为不拒绝的排队系统

≡用M/M/1排队模型来模拟

≡此时，系统的主要质量指标是时延或系统时间

＝对于M/M/1系统

≡系统时间：
$$\bar{s} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1-\rho}$$

≡信道效率： $\eta = \rho$

≡当 ρ 一定时， μ 越大，时延越小

$\Delta \mu = \frac{c}{b}$ （要等一包数据逐比特全部移出系统）

Δc 是以比特/秒为单位的信道容量

Δb 是每个信道包的平均比特数

= 要把 n 个到达率为 λ 的业务集中到一个大容量的线路中去

≡ 若保持业务量强度或效率不变 $\eta = \rho = \frac{\lambda}{\mu}$

△ 则信道容量 c 须增加到 n 倍

△ 即：使 λ 和 μ 都增加到 n 倍，从而使 ρ 不变

△ 在这种情况下，时延可减小至 $1/n$

$$\bar{s} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1-\rho}$$

≡ 若保持系统时间 \bar{s} 不变（时延不变）

△ 则信道容量 c 就不用增加到 n 倍

= 例：

≡ 10 个分别排队的业务

△ 各自的 $\rho = \eta = 0.5$

△ $\bar{s} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1-\rho} = \frac{2}{\mu}$

≡ 集中在一起时，若保持系统时间 \overline{S} 不变（即时延不变）

△ 总到达率 $\lambda' = 10\lambda$

△ 设集中后的服务率为 μ'

△ 则：

$$\overline{S} = \frac{1}{\mu'(1-\rho')} = \frac{1}{\mu' - \lambda'} = \frac{2}{\mu}$$

$$\mu' = \frac{\mu}{2} + \lambda' = \mu\left(\frac{1}{2} + 10\rho\right) = 5.5\mu$$

≡ 可见，集中后

△ 线路容量只要增加到5.5倍，就可使时延不变

△ 集中后的效率为：

$$\eta' = \rho' = \frac{\lambda'}{\mu'} = 1.8\rho = 0.91$$

— 结论

≡ 不论是**即时拒绝**的**电路转接**系统，
还是**不拒绝**的**信息转接**系统

≡ 采用集中器使尽量多的业务量集中，都是有益的

≡ 但也要考虑到

≡ 集中器和大群路本身也会出故障

△ 群路越大，故障的影响也越大

△ 使网络的可靠性下降

≡ 使用集中器会增加费用

△ 集中器本身有费用

△ 用户到集中器的线路也有费用

△ 一般地说，比较分散的用户勉强集中也不一定合理

≡ 组建通信网时

≡ 应在兼顾**业务量**、**呼损**、**时延**、**可靠性**、**经济性**、**发展性**
等因素的情况下

≡ **尽量利用大群化效应**

4.3.2. 延迟效应

— 在传统的电话系统中

- = 采用即时拒绝系统
- = 等待时间为零
- = 但是有呼损

— 在数据通信系统中

- = 采用不拒绝系统
- = 呼损为零
- = 但是有一定的平均等待时间

— 若采用延时拒绝系统

- = 由于延时的存在
- = 可提高系统效率,
- = 降低呼损

— 延时、呼损和效率之间的关系

≡ 仍以M/M/m(n)为例来讨论

≡ 设截止队长为 $n=m+1$

△ 即只允许一个顾客等待，再来顾客就拒绝

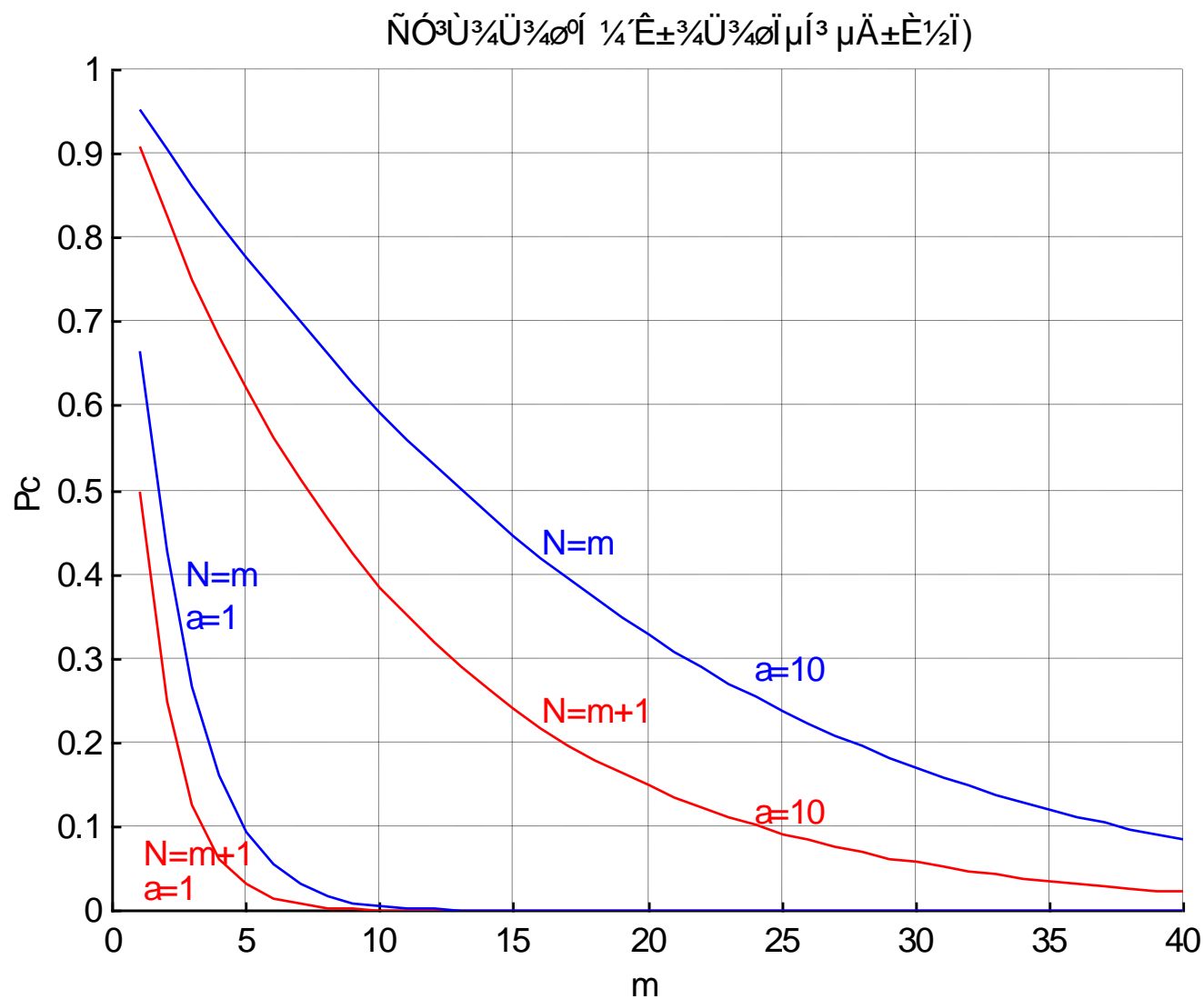
≡ 单窗口业务量强度: $a = \frac{\lambda}{\mu}$

≡ 系统的业务量强度: $\rho = \frac{\lambda}{m\mu} = \frac{a}{m}$

≡ 无顾客的概率: $p_0 = \left[\frac{a^{m+1}}{m!m} + \sum_{r=0}^m \frac{a^r}{r!} \right]^{-1}$

≡ 呼损: $p_c = p_{m+1} = \frac{a^m}{m!} \cdot \frac{a}{m} p_0 = \frac{m^m}{m!} \cdot \rho^{m+1} p_0$

≡ 延迟拒绝和即时拒绝系统的比较



≡ 呼损的数值分析(另见上页曲线)

$m \backslash a$	1	10
1	0.33	0.9
2	0.09	0.79
3	0.02	0.71
10	10^{-3}	0.18
12	~ 0	0.09

≡ 只要容许一个呼叫等待

△ 呼损就明显下降

△ 所付出的代价是有的顾客须等待 $\frac{1}{m\mu}$ 的时间

△ 当 m 较大时, 这是很短的

≡ 若容许两个顾客等待

△ 呼损还将下降

△ 当然等待时间也会响应增加

≡ 若只要保证呼损

△ 以 $a=1$ 爱尔兰为例

△ 则 **延迟拒绝** ($n=m+1$) 比 **即时拒绝** 可少用一条信道

△ 效率从 31% 提高到 45.6%

≡ 这就是 **延迟效应**

= 对于非实时性业务

- ≡ 由于允许一定的时延
- ≡ 又若存储容量足够大
- ≡ 则采用**延迟拒绝**，甚至**不拒绝**系统是非常有利的
- ≡ 采用**即时拒绝**方式则不合理
- ≡ 实际的信息转接系统，应该是延迟拒绝系统

△ 因为存储器容量就是有限的

= 对于实时业务

- ≡ 也可采用呼叫信令的排队等待方式
- ≡ 这样就可取得降低呼损的效果
- ≡ 此时需要共路信令系统的支持

— 结论

= 利用延迟效应

- ≡ 可提高网络资源的利用率
- ≡ 可降低呼损
- ≡ 可取得较好的综合指标

= 延时效应也是建网时应考虑的因素之一

4.3.3. 综合效应

— 综合

≡ 综合是指不同性质的业务综合在一条线路上传输

≡ 例如：把数字的和模拟的、宽带的和窄带的、
实时的和非实时的、高速的和低速的
等各种业务综合在一起传输和交换

≡ 综合以后

≡ 可以利用大容量信道以发挥大群化效应

≡ 还有可能进一步提高信道利用率，降低呼损

— 宽带与窄带信号的综合

= 设一条线路能容纳 m 路窄带信号

= 也能容纳 s 路宽带信号

≡ 一路宽带信号要占用 n 路窄带信道

≡ 并假设 $m=s \times n$ ，即线路恰好容纳 s 路宽带信号，不多不少

≡ 窄带业务的到达率为 λ_1 ，服务率为 μ_1 ，业务量强度 $\rho_1 = \lambda_1 / \mu_1$

≡ 宽带业务的到达率为 λ_2 ，服务率为 μ_2 ，业务量强度 $\rho_2 = \lambda_2 / \mu_2$

= 采用即时拒绝方式的M/M/m模型

≡ 选 (r_1, r_2) 为系统的状态矢量

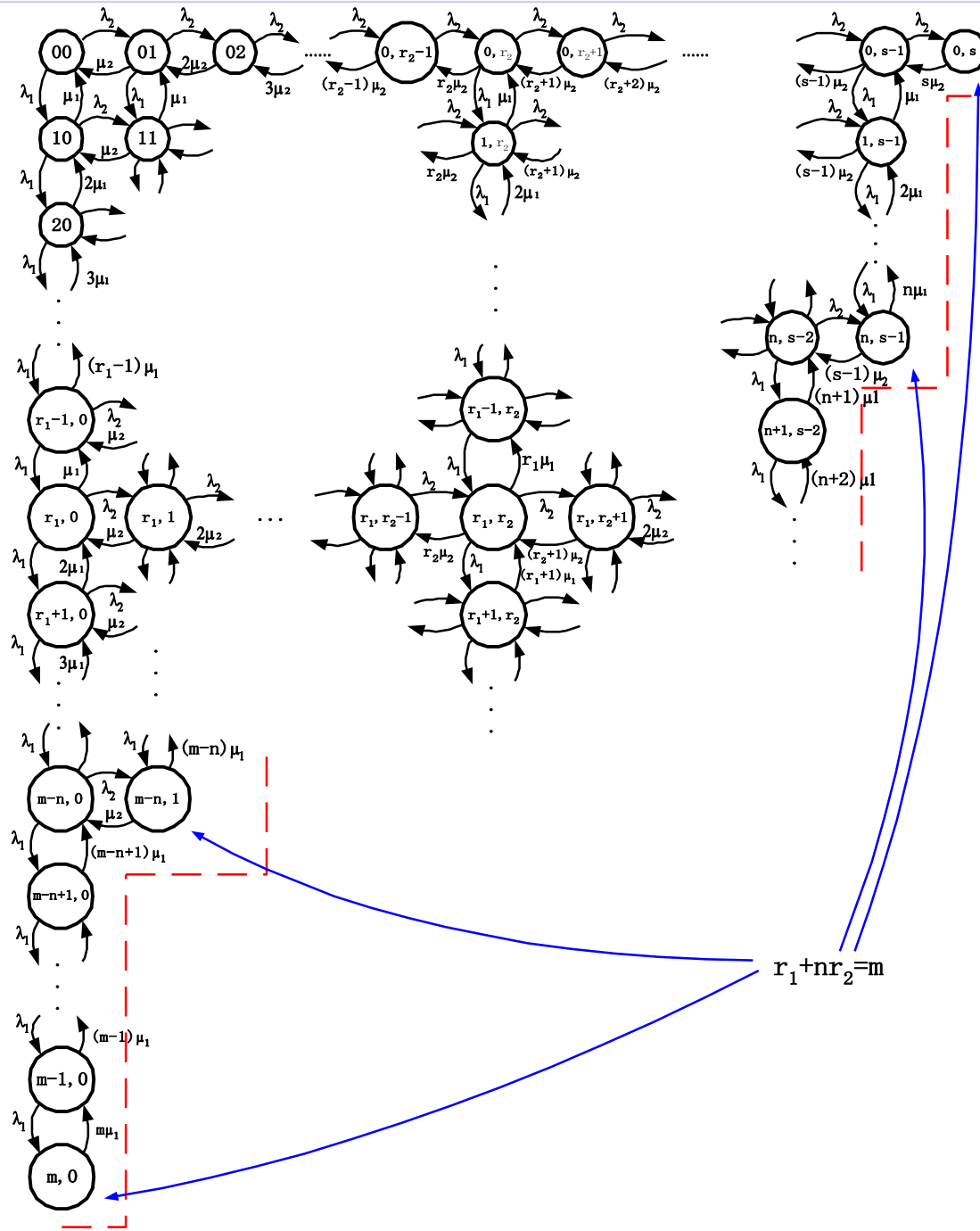
Δr_1 : 系统中窄带业务数

Δr_2 : 系统中宽带业务数

Δ 限制条件: $0 \leq r_1 \leq m$, $0 \leq r_2 \leq s$

Δ 窄带业务数 = $r_1 + nr_2 \leq m$

Δ (其中: nr_2 是等效窄带业务数)

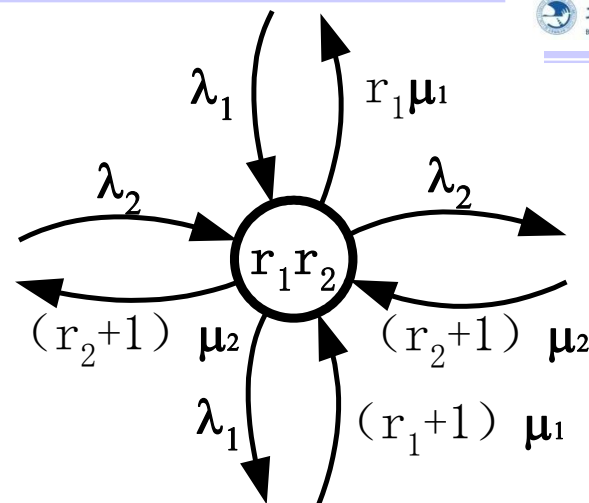


≡ 系统状态转移图

≡ 状态方程

$$\Delta \quad 0 \leq \gamma_1 + nr_2 \leq m - n$$

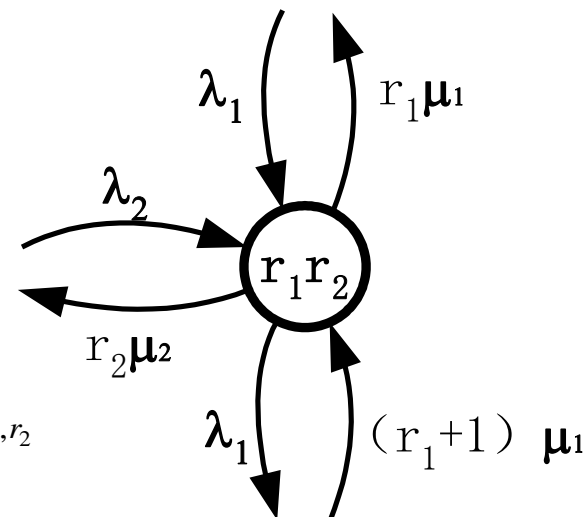
即中间状态



$$(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2) p_{r_1 r_2} = \lambda_1 p_{r_1-1, r_2} + \lambda_2 p_{r_1, r_2-1} + \mu_1 (r_1 + 1) p_{r_1+1, r_2} + \mu_2 (r_2 + 1) p_{r_1, r_2+1}$$

$$m - n \leq \gamma_1 + nr_2 \leq m$$

即边缘状态



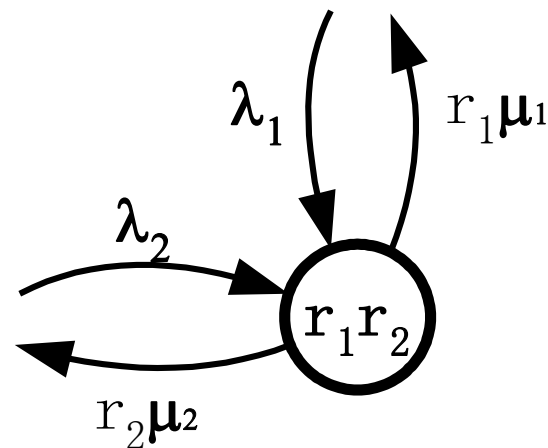
$$(\lambda_1 + \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2) p_{r_1 r_2} = \lambda_1 p_{r_1-1, r_2} + \lambda_2 p_{r_1, r_2-1} + \mu_1 (r_1 + 1) p_{r_1+1, r_2}$$

≡ 状态方程

$$\Delta \quad \gamma_1 + nr_2 = m$$

即角状态

$$(\mu_1 r_1 + \mu_2 r_2) p_{r_1 r_2} = \lambda_1 p_{r_1-1, r_2} + \lambda_2 p_{r_1, r_2-1}$$



≡ 归一化条件:

$$\sum_{r_2}^s \sum_{r_1}^{m-nr_2} p_{r_1 r_2} = 1$$

△ 注：凡出现负下标的概率p，我们规定其为零

≡ 求解方程组

△ 通解:

$$p_{r_1 r_2} = p_{00} \cdot \frac{a_1 \cdot r_1}{r_1!} \cdot \frac{a_2 \cdot r_2}{r_2!}$$

△ 其中:

$$p_{00} = \frac{1}{\sum_{r_2}^s \sum_{r_1}^{m-nr_2} \frac{a_1 \cdot r_1}{r_1!} \cdot \frac{a_2 \cdot r_2}{r_2!}}$$

$$a_1 = \lambda_1 / \mu_1 \quad a_2 = \lambda_2 / \mu_2$$

= 分析

≡ 窄带信号的呼损条件是：m条信道都占满

△ 即：角状态 $\gamma_1 + nr_2 = m$

△ 呼损为：

$$p_{C_1} = \sum_{r_1 + nr_2 = m} p_{r_1 r_2} = \sum_{r_2=0}^s p_{m - nr_2, r_2}$$

≡ 宽带信号的呼损条件是：空闲的信道数（按窄带信道）不足n条

△ 即：边缘状态 $\gamma_1 + nr_2 > m - n$

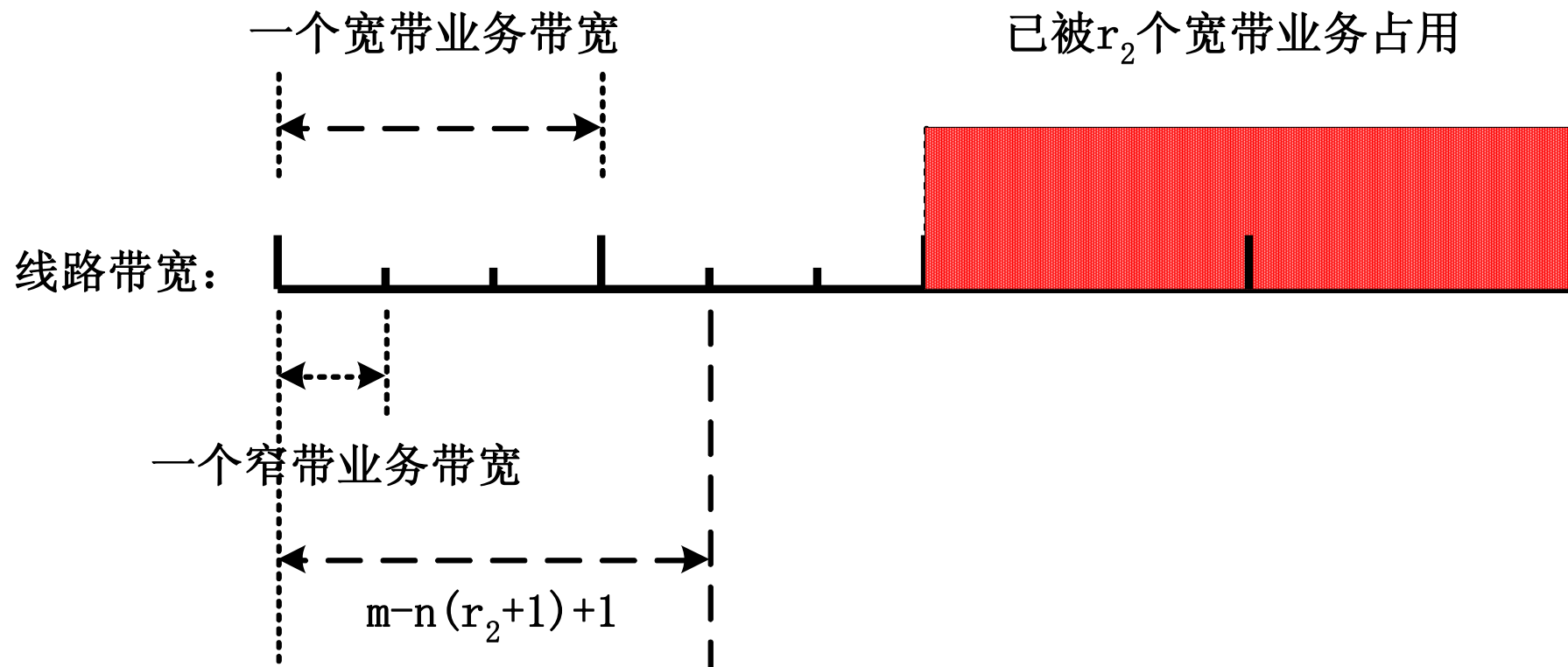
△ 呼损为：

$$p_{C_2} = p_{0s} + \sum_{r_2}^{s-1} \sum_{r=m-n(r_2+1)+1}^{m-nr_2} p_{r_1 r_2}$$

△ p_{0s} ：整条线路全部被宽带业务所占满的概率

△ $m - n(r_2 + 1) + 1$ ：当线路中已有 r_2 ($0 \leq r_2 \leq s-1$) 个宽带业务时，要阻止宽带业务再进入，则须有个以上的窄带业务占据线路

△ 宽带信号的呼损条件的图解



≡ 信道利用率为:

$$\eta = \frac{1}{m} [a_1(1 - p_{c1}) + na_2(1 - p_{c2})]$$

4.3.4. 迂回效应

— 最短径与可用径

＝ 最短径：通常作为站间业务传输的主路由

＝ 可用径：通常作为迂回路由

— 迂回路由主要承载

＝ 当主路由发生故障时，主路由上的业务量

＝ 当主路由满负荷时，主路由上溢出的业务量

— 迂回路由的作用

＝ 采用迂回路由可以减小主路由中业务的呼损

≡ 当迂回路由中原来已有业务流时，这些业务流的呼损会增加

≡ 但全网总指标会有所提高

≡ 这就是迂回效应

— 例

= 有四个交换站

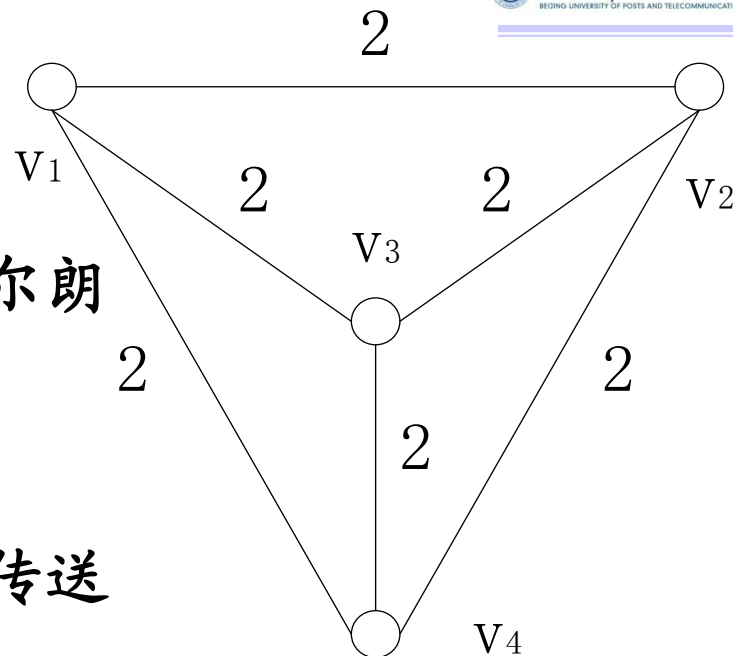
≡ 站间的业务量强度均为 $a = 1$ 爱尔兰

≡ 各边均为有两个信道的线路

= 当无迂回路由时

≡ 即：各站间业务均经直达电路传送

≡ 则所有呼叫的呼损均为：



$$p_{co} = \frac{a^m / m!}{\sum_{r=0}^m \frac{a^r}{r!}} = \frac{a^2 / 2!}{\frac{a^0}{0!} + \frac{a^1}{1!} + \frac{a^2}{2!}} = \frac{\frac{1}{2}}{1 + 1 + \frac{1}{2}} = 0.2$$

= 各站间设置一条迂回路由

≡ 按如下路由表设置迂回路由

12 → 142

23 → 243

34 → 324

21 → 231

32 → 312

43 → 413

14 → 134

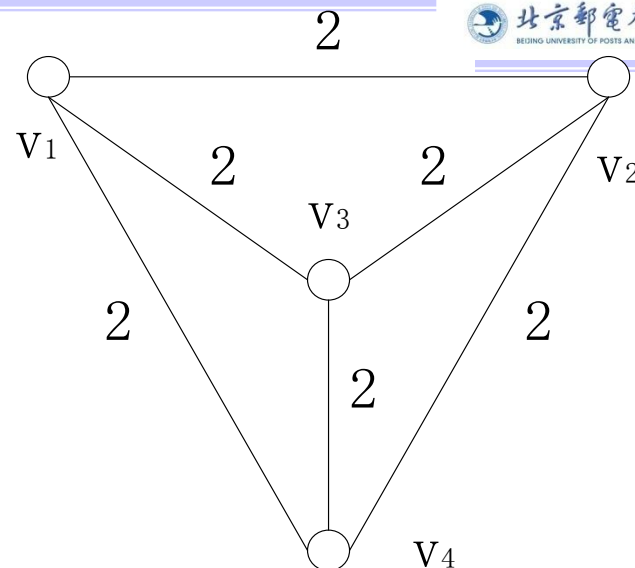
13 → 123

24 → 214

41 → 421

31 → 341

42 → 432



△ 可见：当12间信道占满时，就由4端转接； ∴，依此类推

≡ 由对称性可知：各边的阻塞概率都是一样的

△ 用B表示这一阻塞概率

≡ 从路由表可以看出

△ 1、3间和3、2间的溢出业务都要经过边12

△ 而这些业务实际通过边12的将各为 $aB(1-B)^2$ 爱尔朗

△ 其中： $a=1$ 爱尔朗

- B 为3、2间发生拥塞，
(1-B)²为3、1间和1、2间均未拥塞的概率；
- 或 B 为1、3间发生拥塞，
(1-B)²为1、2间和2、3间均未拥塞的概率

△ 而1、2间的直通业务实际能通过边12的为 $a(1-B)$ 爱尔兰

△ 所以，边12上实际通过的业务量强度为：

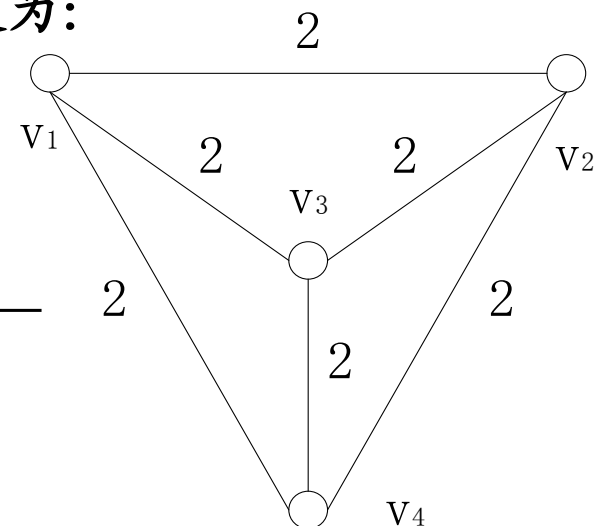
$$\bullet a(1-B) + 2aB(1-B)^2 = a(1-B)[1+2B(1-B)] \text{ 爱尔兰}$$

△ 这相当于：到达边12上的总业务量强度为：

$$\bullet a[1+2B(1-B)] \text{ 爱尔兰}$$

△ 其它边的情况也是如此

≡ 由爱尔兰阻塞率公式：
$$p_c = \frac{a^m / m!}{\sum_{r=0}^m \frac{a^r}{r!}}$$



△ 当窗口数 $m=2$ 、 $a=1$ 时，阻塞率应为：

$$B = \frac{\frac{1}{2!} [1 + 2B(1-B)]^2}{1 + [1 + 2B(1-B)] + \frac{1}{2!} [1 + 2B(1-B)]^2}$$

△ 解为： $B = 0.28$

≡ 站间业务经过迂回后仍被阻塞的概率

△ 即有迂回时的呼损为: $p_{c1} = B[1 - (1 - B)^2] = 0.11$

△ 其中: B是直达路由被阻塞的概率

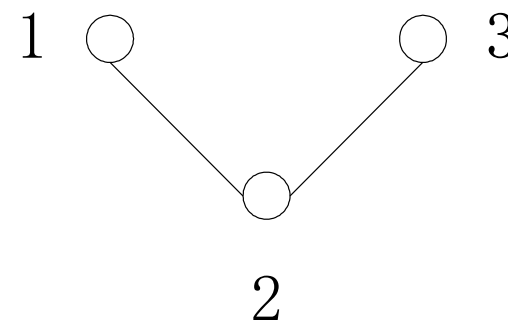
△ $1 - (1 - B)^2$ 是迂回路由被阻塞的概率

- 其中: $(1 - B)^2$ 是迂回路由的两段均不阻塞的概率
- 即均空闲的概率

△ 又: $1 - (1 - B)^2$

$$= 2B - B^2$$

$$= B^2 + B(1 - B) + B(1 - B)$$



概率 \		边 23	
		阻塞	空闲
边 12	阻塞	B^2	$B(1 - B)$
	空闲	$B(1 - B)$	$(1 - B)^2$

≡ 可以看出，与无迂回时的呼损 p_{c0} 相比

△ 有一条迂回路径时的呼损降低了近一半

△ 即：不增加网络资源或信道容量，仅靠迂回效应可降低呼损

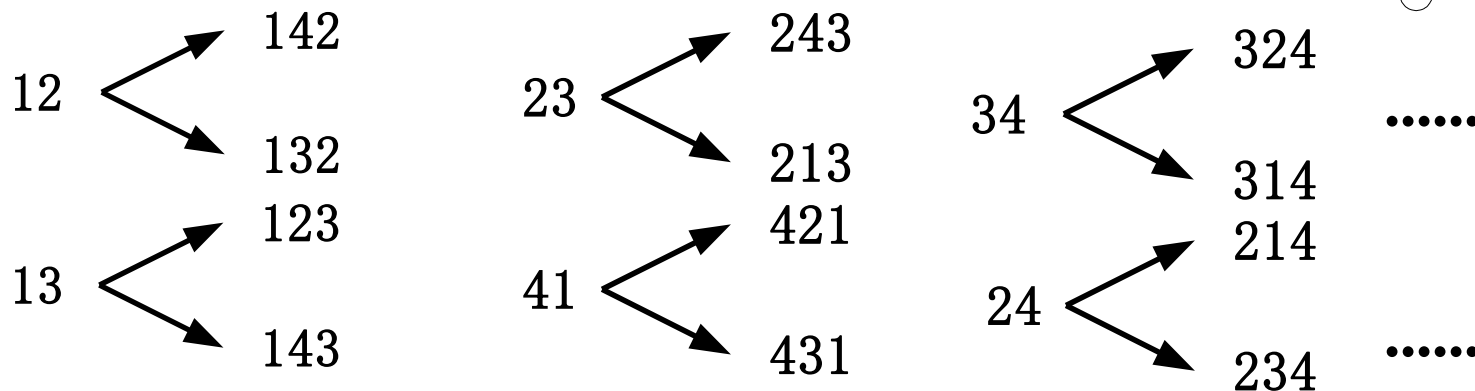
△ 反之：若保持呼损不变，则利用迂回效应可减少配置网络资源

△ 总之，提高了网络的利用率

= 各站间设置两条或两条以上的迂回路由

≡ 这样可以进一步降低呼损

≡ 如：按下列路由表作二次迂回



△ 用同样的方法可算得：边的阻塞率 $B = 0.3$

△ 而各站间的呼损为： $p_{c2} = 0.078$

≡ 注： 以上的计算中，假定了溢出的呼叫也是泊松流

△ 这样才能与原有的业务量强度相加，并运用爱尔朗阻塞公式

△ 但是这个假定并不正确，书上有证明，大家自己阅读

△ 思路： 求出溢出业务量的均值和方差

- 若二者不等，则此流量肯定不是泊松流

△ 结论表明：

- 当溢出量较小时，可近似为泊松流

(本节结束)