

$m : n$ 策略下的 MPLS 网络故障恢复性能评估¹

谭贤四 马娅婕 陈京文 何建华 杨宗凯

(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘要: 该文针对 MPLS 网络的 $m : n$ 故障恢复策略, 定义了故障恢复性能评估参量, 提出了一种带宽约束下的快速故障恢复机制, 给出了分析模型, 并对局部、部分路径及全路径保护时的网络故障恢复性能进行了分析比较. 给出的分析模型同样适于 $1+1$, $1:1$, $1:n$ 结构下 MPLS 网络的故障恢复性能分析.

关键词: MPLS, 性能评估, 故障恢复, $m : n$ 结构

中图分类号: TN919.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0889-07

Performance Evaluation on Fault Restoration in MPLS Networks with $m : n$ Architecture

Tan Xian-si Ma Ya-jie Chen Jing-wen He Jian-hua Yang Zong-kai

(Dept. Electron. and Info., Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In this paper, an efficient and fast fault restoration mechanism based on $m : n$ architecture with bandwidth constraints is proposed while three evaluating parameters are selected and formulated. The comparison of restoration performance, which is based on different protection range such as local restoration, partial path restoration and path restoration, is given. Also the proposed analytical algorithm can be applied to evaluate the restoration performance of MPLS networks when based on $1+1$, $1:1$ or $1 : n$ architecture.

Key words MPLS, Performance evaluation, Fault restoration, $m : n$ architecture

1 引言

MPLS(MultiProtocol Label Switching) 因其具有一系列优良的特性而被认为是下一代网络的关键技术, 基于 MPLS 的故障恢复机制是该技术应用的一个研究热点. 利用 MPLS 技术实现故障恢复的基本思想是, 在流量正常流经的工作路径之外建立基于某一模式的故障恢复路径, 当工作路径发生故障时, 其上的流量将根据某一策略被导往恢复路径. 根据恢复路径的建立时间, MPLS 的故障恢复可分为重路由与保护交换两种模式^[1]. 重路由模式虽然简单且扩充性好, 但其本质上比保护交换模式要慢得多, 因此不利于保证被保护流量的实时性及其 QoS 要求. 保护交换模式下的故障恢复路径基于故障设定、路由策略等因素预先建立. 从网络资源利用角度考虑, 其恢复路径的建立可遵循 4 种结构, 即 $1+1$, $1:1$, $1:n$ 及 $m:n$. 其中 $1+1$ 主要应用于需要严格 QoS 及实时性保证业务, 后 3 种主要针对具有一定 QoS 要求的高优先级业务^[2,3]. $m:n$ 即 n 条工作路径共享 m 条恢复路径结构, 是一种尚未得到深入研究的故障恢复策略. 本文针对该策略, 基于保护交换模式下的恢复路径预先建立但资源未予预留条件, 定义了相关性能评估参量, 提出了一种带宽约束下的恢复机制及其改进机制, 给出了一种同样适于 $1+1$, $1:1$, $1:n$ 结构下故障恢复性能的分析模型, 同时对局部、部分路径及全路径保护时的网络故障恢复性能进行了比较.

¹ 2002-12-23 收到, 2003-04-28 改回

国家自然科学基金(编号 60202005)及澳大利亚研究院基金(编号 LX0240468)资助课题

2 故障恢复性能的数学描述

2.1 故障恢复的一种处理机制

首先说明 3 点。一是本文仅就 $m:n$ 结构下故障通知信息分发、路径资源请求两个阶段进行讨论，并以带宽来表示流量的 QoS 要求。二是故障检测由故障点上游标签交换路由器 (LSR) 完成，故障通知信息将沿工作路径反向分发至路径交换路由器 (PSL, Path Switching LSR)。三是把 $m:n$ 结构下故障发生行为分为两类，即 i 个故障通知信息同时到达 PSL 及非同时到达情况。因同时到达情况能全面反映网络基于 $m:n$ 结构时对故障的恢复能力，本文将仅就该情况开展讨论。

记 $F = \{f_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ 为一 $m:n$ 结构中的恢复路径集， H_i 为 f_i 的跳数，并设 $H_1 \leq H_2 \leq \dots \leq H_M$ ，其中 M 为恢复路径数目； $E = \{e_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 为其工作路径集， L_i 为 e_i 的跳数，并设 $L_1 \leq L_2 \leq \dots \leq L_N$ ，其中 N 为工作路径数目，则提出的 one-by-one 故障恢复处理机制包含下述几个步骤。

(1) 发生的 i 个故障的故障通知 (NT, Notification) 信息到达 PSL, PSL 根据其相应工作路径的带宽从小至大排序，选择前 $\min(i, M, N)$ 个并编号为 $j, j = 1, 2, \dots, \min(i, M, N), 1 \leq i \leq N$ 。其中 $\min()$ 为求最小值函数。

(2) PSL 发送携带第 j 号带宽要求的资源请求 (RR, Resource Request) 包从 $M - k_{j-1}$ 条恢复路径中选择跳数最小的一条开始进行资源预留。 $M - k_{j-1}$ 是第 $j-1$ 号带宽的恢复路径完成 RR 后 F 中剩余的恢复路径数。被选定的恢复路径上的每一跳 LSR 比较其剩余资源与 RR 包携带的带宽要求，若满足请求，则该 LSR 更改剩余资源值并转发此包至下一跳。若该包成功到达该恢复路径在 MPLS 域 / 网络的边缘标签交换路由器 (LER), LER 将返回 PSL 一个资源请求成功 (RRNT, Resource Request Notification) 包，PSL 收到此包后将把原工作路径上的流量转发到所选定的恢复路径上，并开始第 (3) 步。若资源不能满足需求，则该 LSR 发送资源释放 (RL, Resource released) 包反向至 PSL，该包经过的所有 LSR 将释放已预订资源，并更改其剩余资源值。PSL 接收到该包后，将对 F 中剩余的恢复路径跳数次小的恢复路径重新进行 RR 尝试，直到 $M - k_{j-1}$ 条候选路径全部尝试完毕。在为最大带宽需求的故障路径选择恢复路径时， $j = 1, M - k_{j-1} = M$ 。

(3) PSL 标记已被占用的恢复路径，更新候选恢复路径集，发送携带第 $j+1$ 号带宽需求的 RR 包，重复进行第 (2) 步，直至完成所有 i 个故障对恢复路径选取的 RR 尝试。

2.2 故障恢复性能的度量选择及其数学描述

定义 3 个变量来度量网络的平均故障恢复性能，即平均故障恢复概率 P_{av} ，平均故障恢复时间 $E(T_R)$ 及平均故障恢复收益因子 γ 。这里将以一种统一的形式对路径交换下的局部、路径段、全路径保护 3 种情况进行描述和分析。

2.2.1 平均故障恢复概率 P_{av} 假设 $m:n$ 结构中的恢复路径与工作路径链路上相互分离。记 q_{ij} 为第 i 条恢复路径上第 j 个 LSR 对 RR 包的拒绝概率，并假设所有 LSR 在拒绝行为上相互独立； q_0^i 为发生 i 个故障的先验概率， q_{ij}^h 为发生 i 个故障恢复共 j 个时恢复第 h 个的先验概率， q^{ij} 为发生 i 个故障恢复共 j 个的先验概率，并设任意 j 有 $\sum q_{ij}^h = 1$ ，任意 i 有 $\sum q^{ij} = 1, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, j \leq i, h \leq j$ 。定义变量 P_i 为发生故障时尝试第 i 条恢复路径的恢复概率， P_{ij}^j 为发生 i 个故障时恢复共 j 个的概率， P_0^i 为发生 i 个故障时的平均故障恢复概率， $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, N, j \leq i$ 。变量 α_{ij}^k 表示在 i 个故障中恢复了 j 个故障后 f_k 的状态，若 $\alpha_{ij}^k = 0, f_k$ 未被使用，反之 $\alpha_{ij}^k = 1, i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, i-1; k = 1, \dots, M$ ，该变量满足： $\alpha_{11}^k = 0$ ，对任意 i 和 $j, \alpha_{i0}^k = 0, \alpha_{ij}^0 = 1, \sum \alpha_{ij}^k \leq 1$ 。

在一个 $m:n$ 结构中, 故障发生数目 i 可从 1 到 N 个. 当发生共 i 个故障时, 因 F 中的候选恢复路径不一定能满足 i 个故障工作路径上流量的带宽要求, 因此实际恢复的数目将从 0 到 i 个. RR 包在第 k 条恢复路径上成功实现资源预留的概率如式 (1). 当发生 i 个故障时, 则可推导得到网络能够恢复其中 j 个故障的概率如式 (2), P_0^i 如式 (3), 该结构的 P_{av} 如式 (4). 当某一网络完全基于 $m:n$ 结构进行故障恢复时, 式 (4) 即该网络的 P_{av} . 式 (4) 适用于交换模式不同保护策略下的网络恢复性能分析, 其区别仅在于恢复路径跳数差异, 即 H_i 的不同, 其值将影响 P_k 大小.

$$P_k = \prod_{j=1}^{N_k} (1 - q_{kj}), \quad k = 1, \dots, M \tag{1}$$

$$P_{ij}^j = \sum_{h=1}^j q_{ij}^h \left\{ 1 - \prod_{l=1}^M [1 - (1 - \alpha_{i,(h-i)}^l) P_l] \right\}, \quad j \leq i \tag{2}$$

$$P_0^i = \sum_{k=1}^i q^{ik} P_{ik}^k = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k q^{ik} q_{ik}^j \left\{ 1 - \prod_{l=1}^M [1 - (1 - \alpha_{i,(j-1)}^l) P_l] \right\}, \quad 1 \leq i \leq N \tag{3}$$

$$P_{av} = \sum_{i=1}^N q_0^i P_0^i = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k q_0^i q^{ik} q_{ik}^j \left\{ 1 - \prod_{l=1}^M [1 - (1 - \alpha_{i,(j-1)}^l) P_l] \right\} \tag{4}$$

若在上述假设基础上再设各先验概率相等, 结构内所有恢复路径的跳数相等且为 H , 即 $q_{ij} = q, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, H; q_0^i = 1/N, q^{ij} = 1/i, i = 1, \dots, N$, 则式 (4) 可改写为式 (5), 其中式 (1) 中 $P_i = P = (1 - q)^H, i = 1, 2, \dots, M$.

$$P_{av} = \sum_{i=1}^N q_0^i P_0^i = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^{\min(k,M)} \frac{1 - (1 - P)^{M+1-j}}{N \cdot i \cdot k}, & N \geq M \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \frac{1 - (1 - P)^{M+1-j}}{N \cdot i \cdot k}, & N < M \end{cases} \tag{5}$$

2.2.2 平均故障恢复时间 $E(T_R)$ 假设 $N \geq M$ 时发生的 N 个或 $N < M$ 时的所有 N 个故障都能找到满足其带宽要求的恢复路径. 根据假设及定义, 则对任意 $i, 1 \leq i \leq \min(M, N), \alpha_{ij}^k$ 将满足 $\sum \alpha_{N,i}^k = 1, 1 \leq k \leq M$. 假设不同 LSR 对 NT, RR, RL 及 RRNT 包的平均处理时间 $t_{NT}, t_{RR}, t_{RL}, t_{RRNT}$ 分别相同; 第 i 条工作路径上不同 LSR 发生故障的概率 p_i^j 相等, 各工作路径跳数相等, 即 $L_i = L, \forall i, \forall j$. 记 δ 为保护范围因子, $\delta = 0$ 表示局部恢复, 否则 $\delta = 1$; ξ 为恢复策略因子, $\xi = 1$ 表示 1+1 模式, 否则 $\xi = 0$, 其中 δ, ξ 不会同时为 0^[4-6]. 相对于 1+1, 1:1, 1:n, $m:n$ 结构下诸如激活恢复路径等所需时间和记为 t_0 . 定义 P_m^i 为第 $m-1$ 条故障路径完成恢复路径选取后, 第 m 条故障工作路径的恢复路径恰好是剩余恢复路径集中第 i 条路径的概率, 若恢复路径的选择等概, 即 $P_m^i = 1/(M+1-m)$, 则对于任意 $m, 1 \leq m \leq \min(M, N)$, 有 $\sum P_m^i = 1, 1 \leq i \leq M+1-m$. 定义变量 $E(T_{NT})$ 为 NT 包转发至 PSL 的平均时延; $E_j(T_{RL})$ 为 RR 包在第 j 条恢复路径某一 LSR 被拒后, 该 LSR 沿原路径反向发送 RL 包至 PSL 所历经两段处理过程的平均时延和; $E_m(T_{RRNT})$ 为第 m 条故障工作路径完成恢复路径选取后, 该恢复路径 LER 反向传送 RRNT 包至 PSL 的平均时延; $E_m(T_{RR-RL})$ 为成功选择第 m 条故障工作路径的恢复路径引入的平均时延, 则 $E(T_{NT}), E_j(T_{RL}), E_m(T_{RRNT})$

及 $E_m(T_{RR-RL})$ 分别如式 (6)~(8). 若不计信息的链路传输时延, 则 MPLS 网络 / 域的 $E(T_R)$ 如式 (9). 若假设 $H_i = H, q_{ij} = q, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, H$, 则可简化式 (9) 如式 (10), 其中 $E_j(T_{RL})$ 因 H_j 恒定, 其值将不随路径的不同而改变, 并简记为 $E(T_{RL})$.

$$E(T_{NT}) = t_{NT} \sum_{i=1}^L i/L, \quad E_j(T_{RL}) = \sum_{k=1}^{H_j} k(t_{RR} + t_{RL}) q_{jk} \prod_{i=1}^{k-1} (1 - q_{ji}) \quad (6)$$

$$E_m(T_{RRNT}) = \sum_{k=1}^M \alpha_{N,m}^k H_k t_{RRNT} \quad (7)$$

$$E_m(T_{RR-RL}) = \frac{1}{M+1-m} \left\{ \sum_{i=1}^M \left(1 - \sum_{k=0}^{m-1} \alpha_{N,k}^i \right) H_i t_{RR} + \sum_{i=1}^{M+1-m} \sum_{j=0}^{i-1} \left(1 - \sum_{k=0}^{m-1} \alpha_{N,k}^j \right) E_j(T_{RL}) \right\} \quad (8)$$

$$E(T_R) = \delta E(T_{NT}) + (1 - \xi) t_0 + \frac{1 - \xi}{\min(M, N)} \sum_{m=1}^{\min(M, N)} [E_m(T_{RRNT}) + E_m(T_{RR-RL})] \quad (9)$$

$$E(T_R) = \delta t_{NT} \sum_{i=1}^L i/L + (1 - \xi) \left\{ t_0 + H t_{RRNT} + \frac{1}{\min(M, N)} \times \sum_{m=1}^{\min(M, N)} \frac{1}{M+1-m} \sum_{i=1}^{M+1-m} (i-1) E(T_{RL}) \right\} \quad (10)$$

2.2.3 平均故障恢复收益因子 γ 定义平均故障恢复资源消耗比为故障恢复使用的资源总和与实际被恢复的工作流量总和之比, 记为 η , 如式 (11), 定义变量 β_i 为 e_i 故障恢复因子, 若 e_i 故障被恢复, 则 $\beta_i = 1$, 否则为 0; C_{fi} 为 f_i 作为恢复路径时的某链路被恢复流量占用的资源值; C_{ei} 为 e_i 上工作流量带宽, 则定义 γ 如式 (12). 式 (12) 隐含着, 当采用 1+1 策略时, 其收益为 0.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{\min(M, N)} \sum_{j=1}^M \alpha_{N,i}^j H_i C_{fi}}{\sum_{i=1}^N \beta_i L_i C_{ei}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \lg \frac{P_{av}}{\eta E(T_R) / E(T_{NT})} \\ &= \lg P_{av} - \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^{\min(M, N)} \sum_{j=1}^M \alpha_{N,i}^j H_i C_{fi}}{\sum_{i=1}^N \beta_i L_i C_{ei}} \right] - \lg [E(T_R) / E(T_{NT})] \quad (12) \end{aligned}$$

2.3 故障恢复的一种快速处理方法

从式 (10) 可知, $E(T_R)$ 主要包含两个部分, 即 NT 包反向转发及恢复路径选取引入的平均时延. 对于前者, 减小的方法可采用 RNT^[7]. 对于后者, 可以看出, 第 1, 2, 3 项缩减余地不大, 因此, 提高故障恢复速度的有效途径是减小第 4 项. 基于改进 one-by-one 方法, 一种快速恢复机制的基本思想是: 在一个 MPLS 网络 / 域中设置资源集中管理器 (Centralized Resource Manager, CRM), 由网络入口 LER 担当, 其基本任务是动态地维护 $m:n$ 结构中工作路径集

的流量信息及恢复路径集所经历 LSR 的资源信息。该方法仍包含 3 个步骤, 其中第 1, 3 步与 one-by-one 机制的类似, 区别仅在于 PSL 对工作路径将根据其带宽需求从大至小排序并编号, 其第 2 步为: PSL 根据 CRM 给出的资源管理信息, 在 $M_0 - k_{j-1}$ 条可用恢复路径中选择跳数最小的一条进行资源预留, 同时通知 CRM 修改其资源剩余值。RR 包沿此恢复路径转发至出口 LER, 该 LER 返回 PSL 一个 RRNT 包, 一旦收到该包, PSL 将把工作路径的流量转发至所选定的恢复路径上, 并进行第 3 步。其中 $M_0 - k_{j-1}$ 是第 $j-1$ 号带宽的恢复路径完成资源预留后剩余恢复路径集中的可用路径数。当确定最大带宽需求的故障路径之恢复路径时, $j=1, M_0 - k_{j-1} = M_0 \leq M, M_0$ 是 F 中满足带宽要求的恢复路径数目。

基于 2.2.2 节中对求取 $E(T_R)$ 的假设, 可知 $E_m(T_{RRNT}) = H_m t_{RRNT}, E_m(T_{RR-RL}) = H_m t_{RR}$, 则式 (10) 可简化为式 (13)。

$$\begin{aligned} E(T_R) &= \delta E(T_{NT}) + (1 - \xi)t_0 + \frac{1 - \xi}{\min(M, N)} \sum_{m=1}^{\min(M, N)} H_m (t_{RRNT} + t_{RR}) \\ &= \delta \cdot t_{NT} \sum_{i=1}^L i/L + (1 + \xi)(t_0 + H t_{RRNT} + H t_{RR}) \end{aligned} \quad (13)$$

3 仿真和结果分析

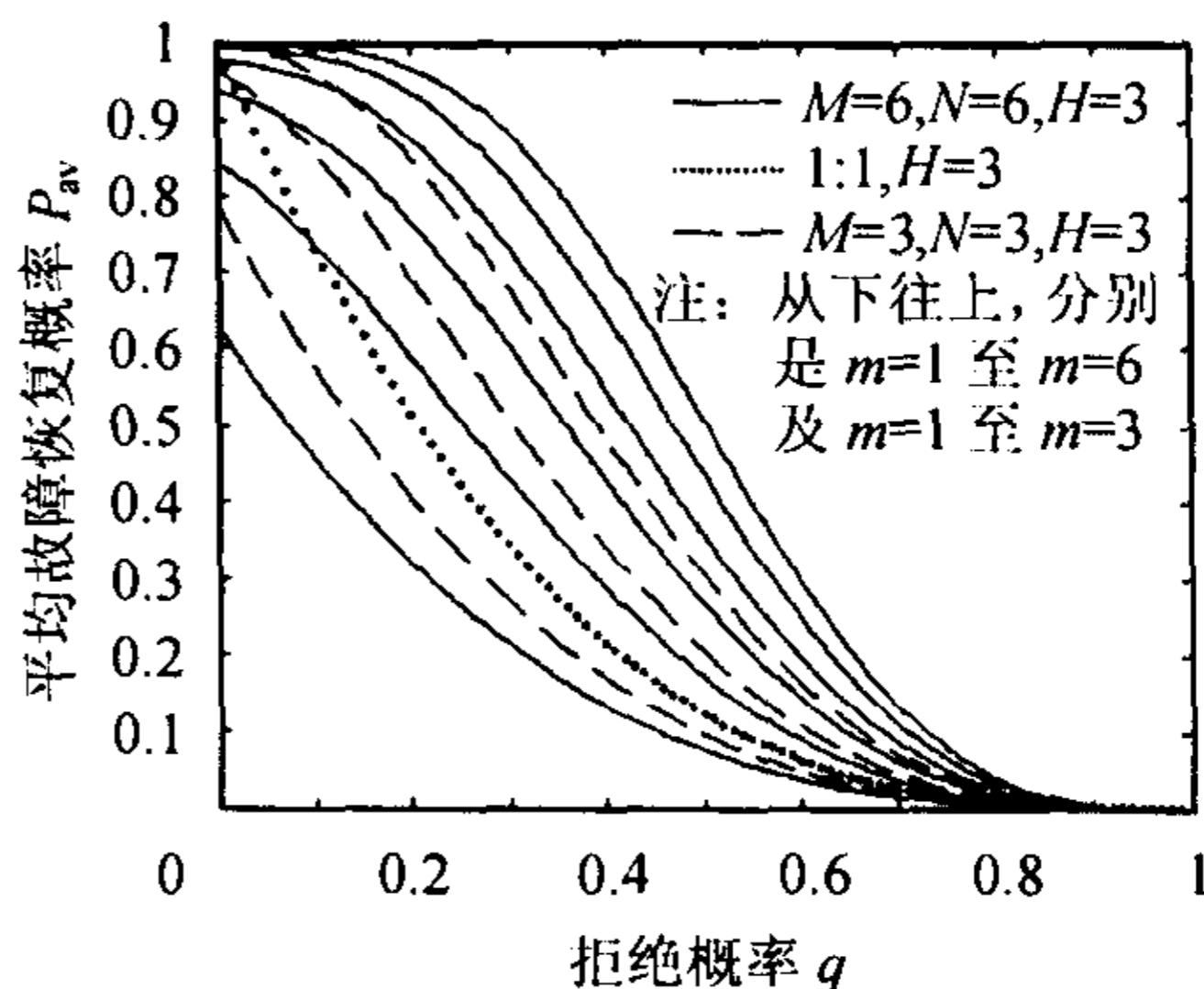
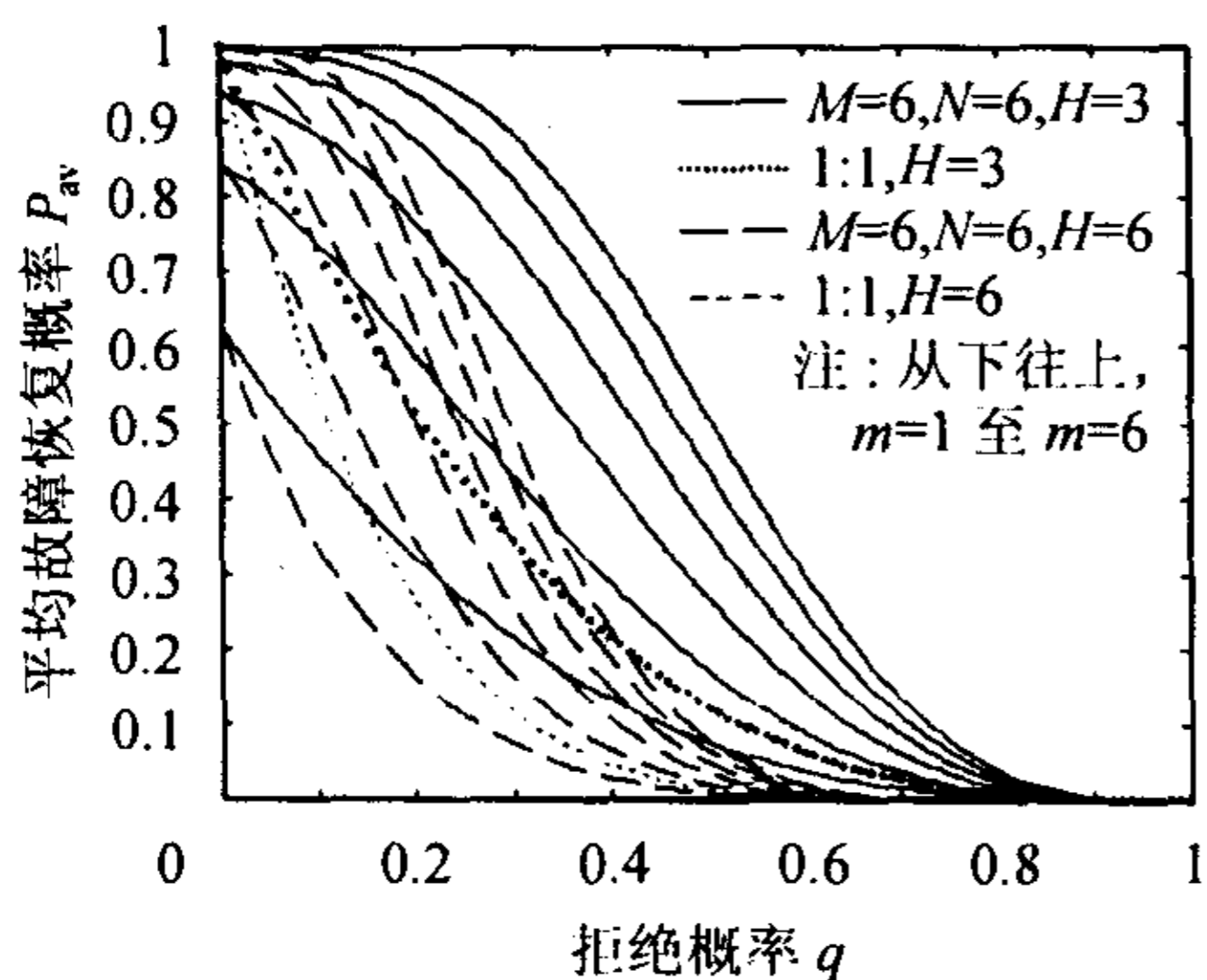
式 (4), (9), (12) 及式 (13) 是分析不同结构、不同恢复范围下网络平均故障恢复性能的一种普适模型。基于现阶段路由器实现技术, t_{NT}, t_{RR}, t_{RL} 及 t_{RRNT} 可满足 $t_{NT} \leq t_{RRNT} < t_{RL} < t_{RR}$, 为简化分析, 令 $t_{NT} = t_{RRNT} = T_0, t_{RL} = 2T_0, t_{RR} = 3T_0$, 并令 $t_0 = 0$, 则基于 $m:n$ 策略的 $P_{av}, E(T_R), \gamma$ 与 q, H 及故障恢复策略的关系如图 1 所示。

图 1(a), 1(b) 示意了 P_{av} 与 q, H 及恢复策略的关系。可以看出, 从恢复概率上, (1) 1:1 优于 1:n; (2) $m:n$ 结构下的 P_{av} 只在一定的 $m:n, q$ 及 H 下才优于 1:1 模式; (3) P_{av} 对 H 值比对 $m:n$ 比值的变化更加敏感。

图 1(c), 1(d) 示意了 $E(T_R)$ 与 q, H 恢复策略及保护范围的关系。可以看出, 在 one-by-one 机制下, (1) 当 $m, n > 1$ 时, $m:n$ 策略的恢复速度慢于 1:1 模式, 1+1 最快; (2) $E(T_R)$ 值对 H 值的变化比对 $m:n$ 值的变化更加敏感; (3) 在相同结构下, 局部恢复快于部分 / 全路径恢复。当采用 2.3 节提出的快速恢复机制时, 平均故障恢复速度得到了很大提高, 如图 1(e) 所示, 此时, 恢复速度仅取决于 NT 及 RR 包的传递时延。如图 1(f) 所示, 即使基于 one-by-one 机制, $m:n$ 结构下的恢复收益也大于采用 1:1 策略的收益, 而当进一步采取改进的恢复机制时, 整体优越性更为明显。

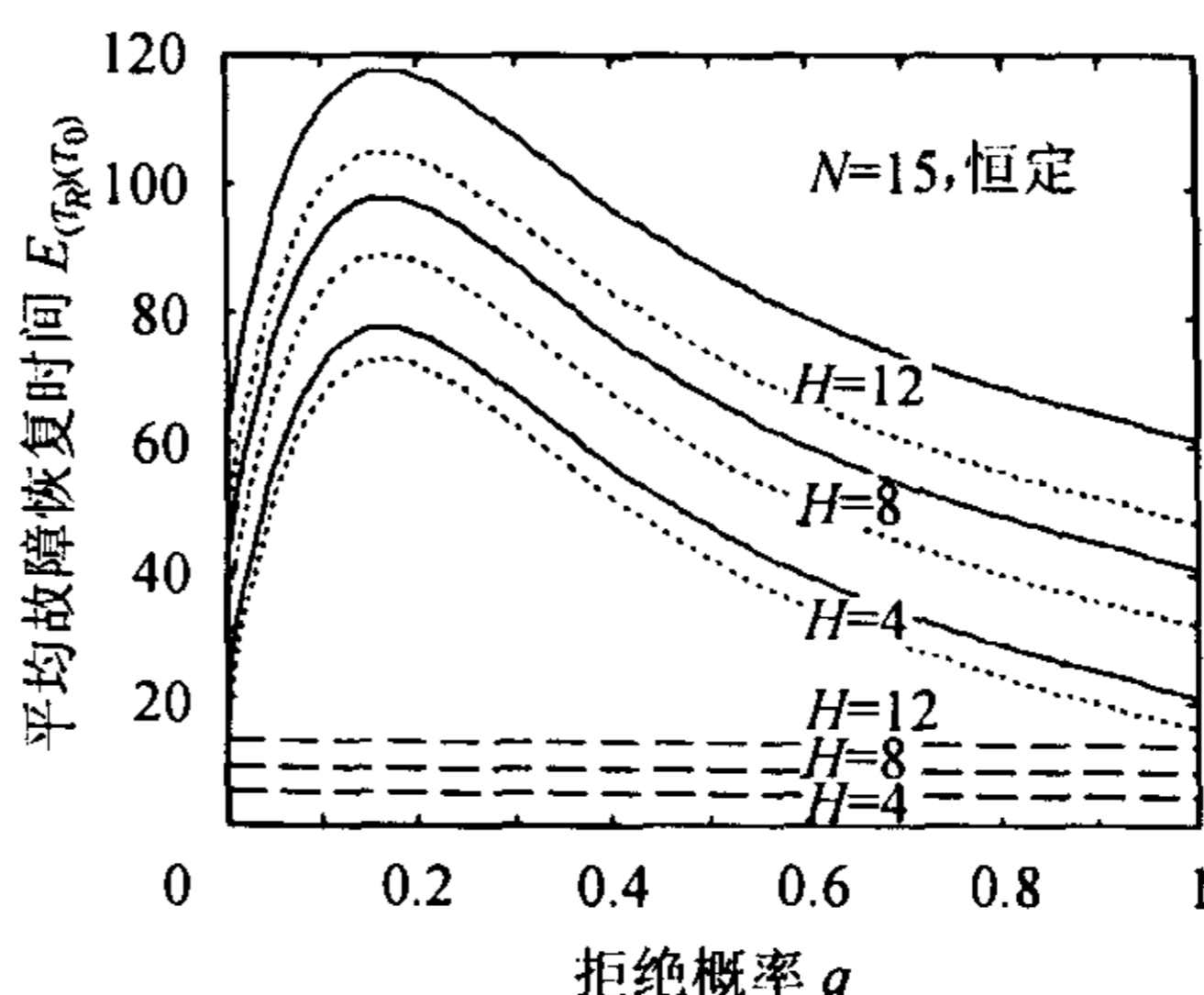
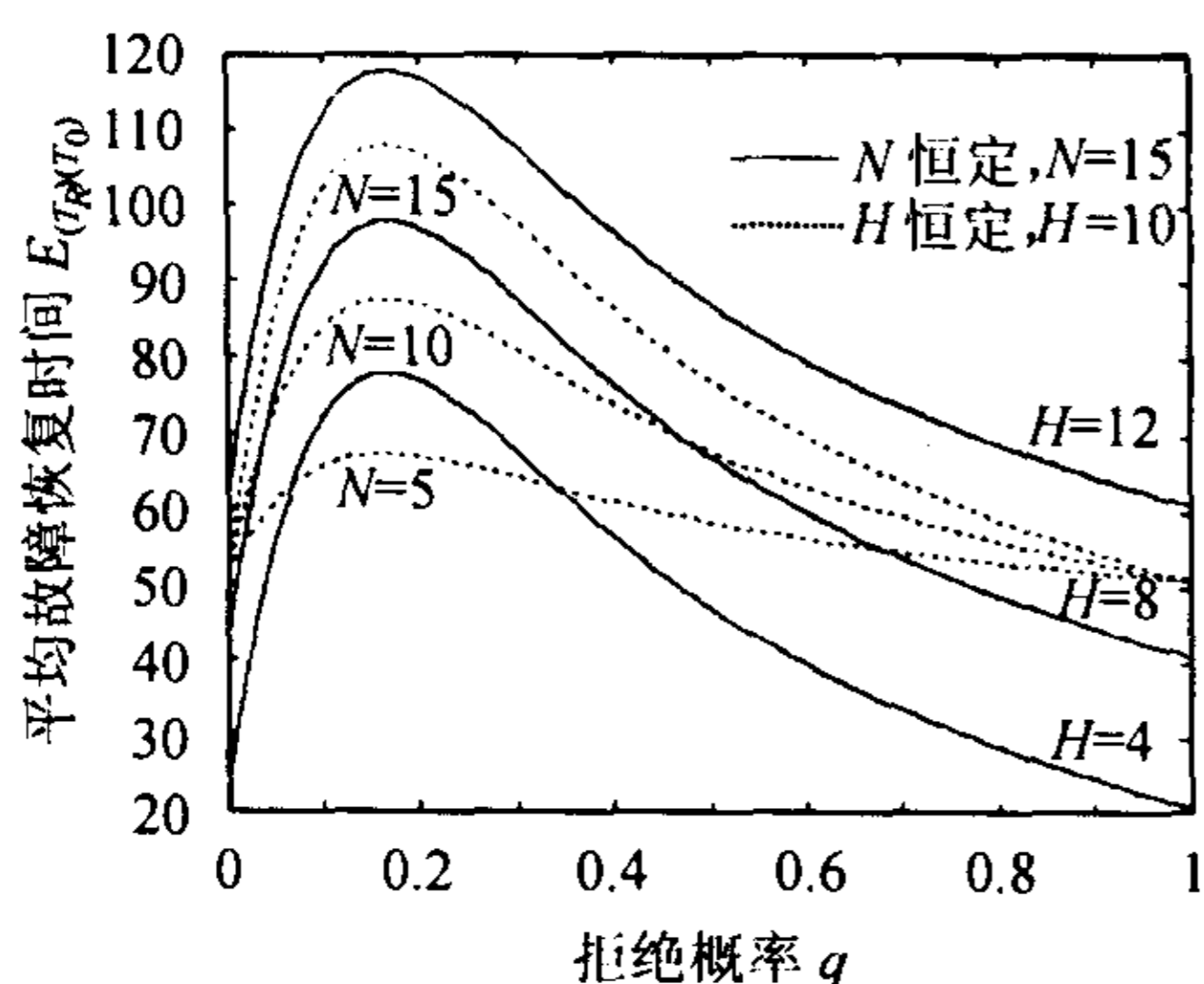
4 结论

本文对 $m:n$ 结构下 MPLS 网络的故障恢复性能进行了研究, 定义了故障恢复性能评估参量, 在提出了 one-by-one 带宽约束下的故障处理机制基础上, 提出了一种快速故障恢复机制, 给出了可适用于不同故障恢复策略、不同故障保护范围模式下的 MPLS 网络的故障恢复性能分析模型。分析表明, 在故障恢复路径预先建立、资源未予预留情况下, 利用快速故障恢复机制, 采用 $m:n$ 结构的恢复方法, 将有利于提高网络故障的整体恢复性能。



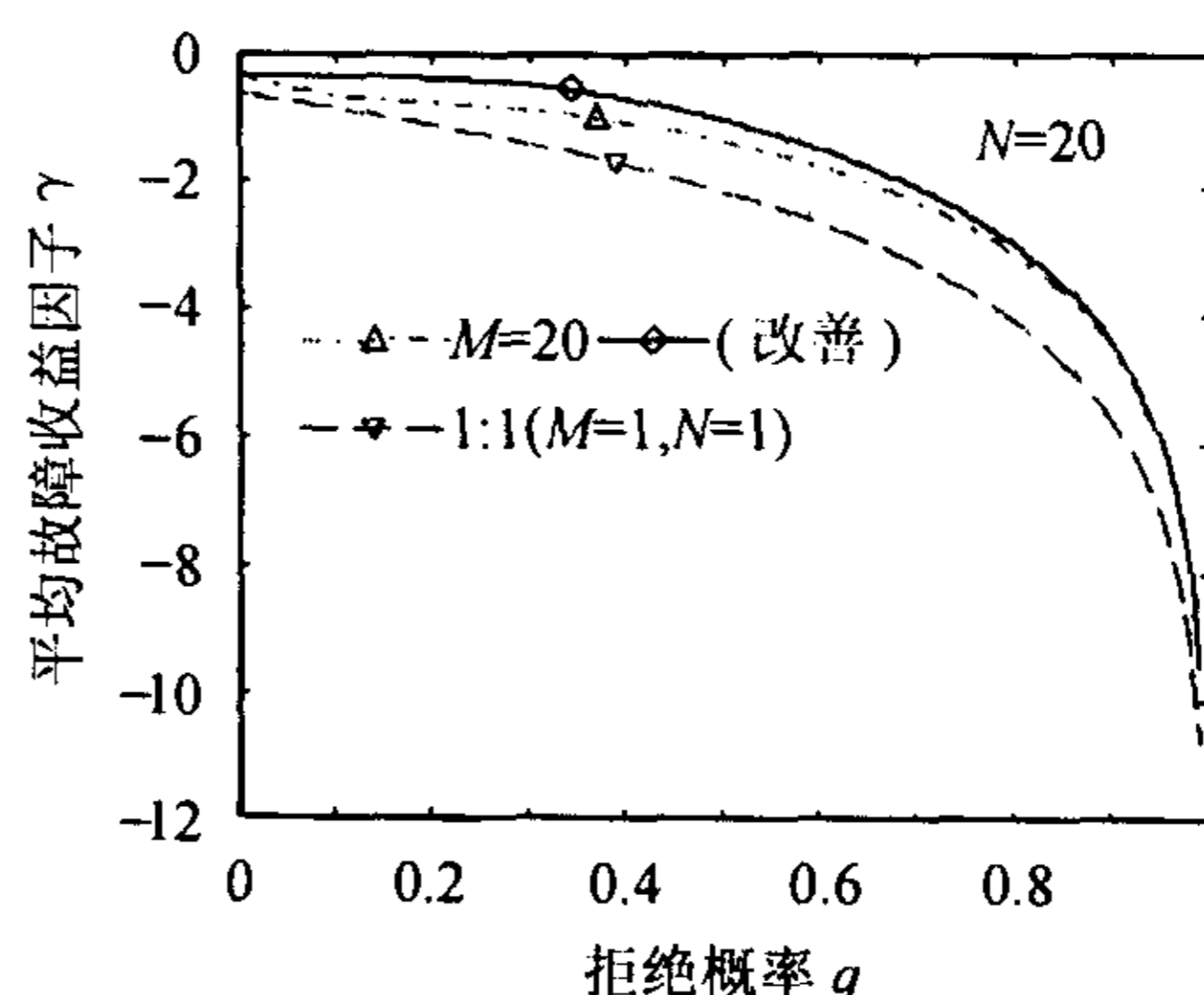
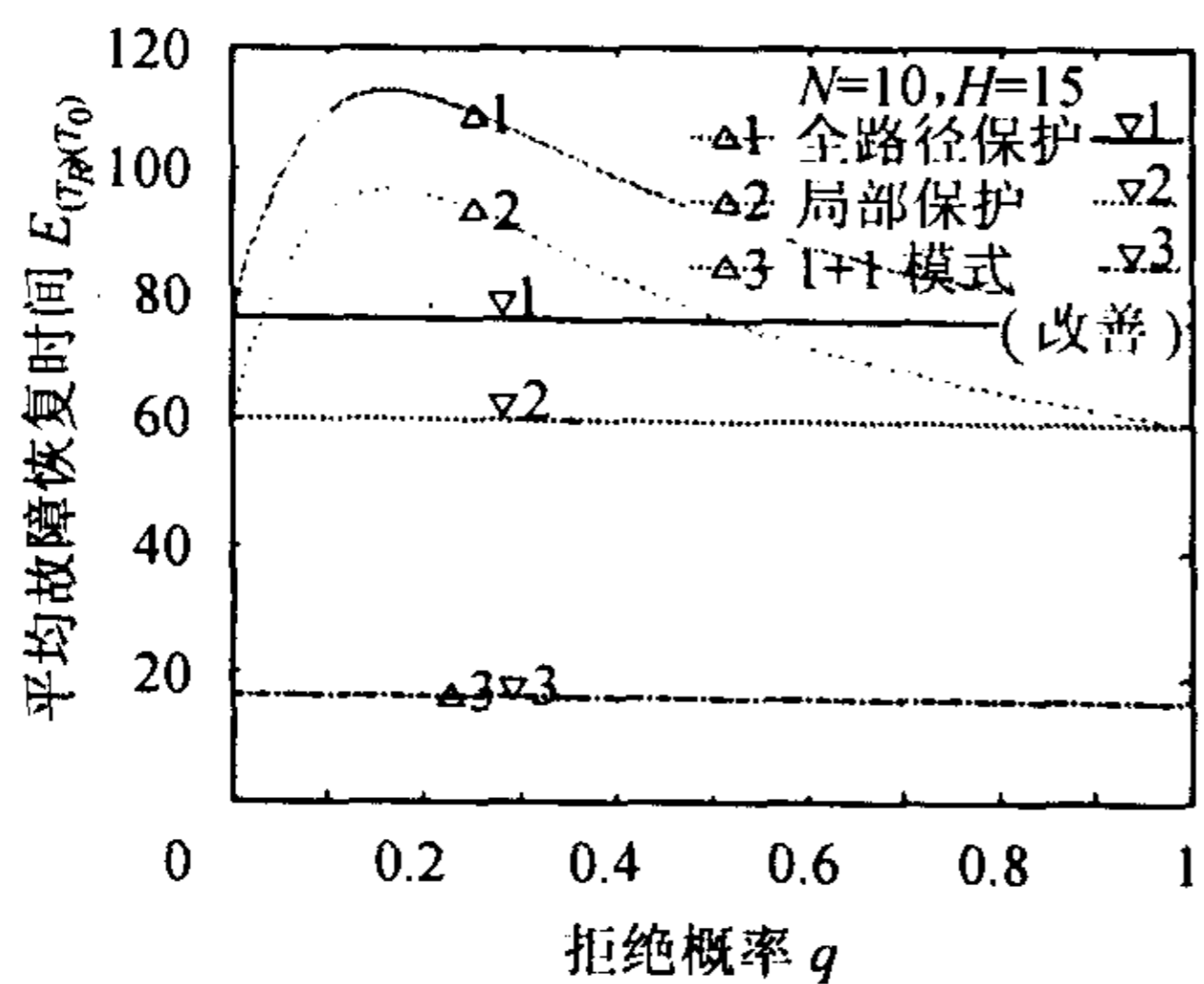
(a) 相同路径数目、不同路径跳数时的 $P_{av} \sim q$

(b) 相同跳数、路径数目不同时的 $P_{av} \sim q$



(c) 部分 / 全路径模式下 $E(T_R) \sim q$

(d) 1+1、局部、部分 / 全路径下模式 $E(T_R)$ 比较



(e) 1+1、局部、部分 / 全路径模式 $E(T_R)$ 改善

(f) 部分 / 全路径模式下 $\gamma \sim q$

图1 基于 $m:n$ 策略的平均故障恢复性能 P_{av} 、 $E(T_R)$ 、 γ 与 q 的关系示意

参 考 文 献

[1] Hundessa L, Pascual J D. Fast rerouting mechanism for a protected switched path. Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (I3CN'01), Scottsdale, Arizona (USA), October 2001: 527-530.

[2] Rosen E, Viswanathan A, Callon R. Multiprotocol label switching architecture, RFC 3031, January 2001.

- [3] Chen M, Oh T H. Reliable services in MPLS. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(12): 58-62.
- [4] Owens K, Sharma V, Oommen M. Network survivability considerations for traffic engineered IP networks. internet-Draft, Work in Progress, May 2002. <http://www.ietf.org/ietf/lid-abstracts.txt>, 2002.10.
- [5] Sharma V, Crane B, Makam S, Owens K, Huang C, Hellstrand F, Weil J, Andersson L, Jamoussi B, Cain B, Civanlar S, Chiu A. Framework for MPLS-based recovery. Internet-Draft, Work in Progress, May 2002. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-rap-rsvp-authsession-05.txt>, 2002.10.
- [6] Pan P(Editor), Gan D H, Swallow G, Vasseru J, Cooper D, Atlas A, Jork M. Fast reroute extensions to RSVP-TE for LSP tunnels. Internet-Draft, Work in Progress, January 2002. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-rsop-lsp-fastreroute-02.txt>, 2002.10.
- [7] Changcheng Huang, Ken Owens, Srinivas Makam. Building reliable MPLS networks using a path protection mechanism. *IEEE Communication Magazine*, 2002, 40(3): 156-162.

谭贤四: 男, 1967年生, 副教授, 博士生, 主要研究方向为现代网络理论及其应用、雷达信号及其处理。
马娅婕: 女, 1974年生, 讲师, 博士生, 研究方向为计算机网络及其高速交换技术。
陈京文: 男, 1969年生, 讲师, 博士生, 研究方向为智能天线、计算机网络。
何建华: 男, 1976年生, 副教授, 主要研究方向为无线网络、无线多媒体传输等。
杨宗凯: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代信息网络理论及其应用、现代数字信号处理技术。