

一个双重优化的 IP-DiffServ 定量 QoS 管理实现机制*

张晋豫, 孟洛明, 邱雪松

(北京邮电大学 程控交换技术与通讯网国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 提出了 IP-DiffServ 定量 QoS 实现机制, 它通过在网络层实施业务量工程实现了业务类选择路由的优化, 通过在业务层实施业务计划实现了用户业务选择业务类的优化。它不但可以在 DiffServ 机制下给用户业务应用提供定量 QoS 保证, 而且可以提高网络资源的使用效率以及提高用户业务和选择路由的性能价格比。实验结果很好地证明了该机制的优点。

关键词: IP-DiffServ; 业务量工程; 业务计划; 定量 QoS 管理

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3695(2005)01-0215-04

A Double-Optimal Quantitative QoS Management Implementation Mechanism in IP-DiffServ

ZHANG Jin-yu, MENG Luo-ming, QIU Xie-song

(National Laboratory of Switching Technology & Telecommunication Networks, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper addresses an implementation mechanism of quantitative QoS management. In network layer, it optimizes the selected router of service class, in service layer, it optimizes selected service class of user service. Not only can it assure quantitative QoS for user service in DiffServ, but also it can improve using efficiency of network resource, makes user service and selected router provide well performance with less cost. Experimental results better verify it's metrics.

Key words: IP-DiffServ; Traffic Engineer; Service Plan; Quantitative QoS Management

在存在动态业务量的 IP-DiffServ 环境中, 通过实施业务量工程^[1~4], 可引导业务量在不同的路由之间均衡分布; 通过实施业务计划^[5~7], 可引导业务量在不同的业务类之间均衡分布。它们都可使网络资源得到充分利用和使网络服务质量得到较大提高, 从而可作为解决当前 IP 网络资源匮乏问题和 QoS 保证能力不高问题的方法。DiffServ 机制目前在 IP 网络中得到了广泛的支持, 但 DiffServ 不能提供定量的 QoS 保证, 因此, 不能用于传输实时的多媒体应用。通过实施优化的业务量工程和优化的业务计划, 可以在 DiffServ 机制下使 IP 网络提供定量的 QoS 保证。

TEQUILA 提出了一个在 DiffServ 框架下通过实施业务计划和业务量工程使 IP 网络提供定量 QoS 保证的管理机制^[6,7]。它通过实施业务量工程, 实现了对网络资源和路由的动态管理。通过 SLS (Service Level Specification) 管理, 实现了对业务的动态管理。但它也存在如下缺点: 它在实施业务量工程时只考虑了负荷因素, 缺乏对价格和性能因素的考虑; 业务量工程和 SLS 管理关系松弛, 没有把资源优化和业务优化有机结合起来。

1 双重优化的 IP 网络定量 QoS 管理机制

在存在动态业务量的 IP 网络环境中, 要想在 DS 的一对

输入、输出端点之间为一个用户的业务应用提供边到边定量 QoS 保证, 需要对 DS 域的业务量进行管理。在 DiffServ 机制下, 每一个业务都有一个业务类, 在路由器和 DS 域中, 可以通过控制业务类的最大负荷来控制它的服务质量^[9,10], 级别越高的业务类应该具有比较低的最大负荷。对业务类最大负荷的控制可以在业务层和网络层进行。在业务层, 用户业务或业务应用的业务类通过实施业务计划来定义, 因此可用它来引导业务量在不同的业务类之间有序分布; 在网络层, DS 域的一对输入、输出端点之间的一个业务类的路由通过实施业务量工程来定义, 因此可用它来引导业务量在不同的路由之间有序分配。

在市场环境下, ISP (Internet Service Provider) 竞争能力的高低取决于对用户吸引力的高低。用户在选择业务时, 都要参照自己的需求和支付能力对每一个业务的优化度进行评估, 并按照优化度评估值来作抉择, 用户的每一个选择相对于自己的评估标准来说都是最优的。因此, 如果业务计划给用户的业务或业务应用定义的业务类和业务量工程给每一个业务类定义的路由能够被用户评估为最优, ISP 的业务才容易被用户选中, 它才能吸引更多的用户。因此, 应根据用户在市场上的行为来设计业务计划和业务量工程。

1.1 优化的业务量工程实现机制

本机制主要通过业务量工程为 DS 域的一对输入、输出端点之间的一个业务类定义一条路由。为了使它能够被用户评估为最优, 本机制基于用户的评估标准来定义路由关于业务类

的优化度评估公式, 并选择优化度评估值最大的路由作为业务类选择的路由。用户主要基于路由边界参数对路由进行评估。

路由边界参数: 每一个路由器都有一个最大的处理能力, 它由具有的最大资源决定, 在 DiffServ 中一般把这些资源平均的或不平均分配给一个业务类, 对应一个 PHB(Per Hop Behaviour)、队列机制如加权公平排序 WFQ(Weight Fair Queuing)、基于类的排序 CBQ(Class Based Queuing) 以及低时延排序 LLQ(Lower Latency Queuing) 等用于为不同业务类指配资源。在 DiffServ 框架下, 当资源紧缺时, 高优先级别的业务类都可以占用低优先级别类的资源。为了防止低优先级别类如 BE(Best Effort) 的资源枯竭, 一般要为每一个业务类定义一个最大的资源, 通常用最大带宽和最大队列长度表示。在路由器中, 当一个业务类的负荷为零时, 它的时延抖动和包丢失率接近零; 而当它的负荷为 1 时, 它的时延很大() 和包丢失率也很大(接近 1); 而且随着负荷增加, 时延和包丢失率加速增加。因此路由器业务类的时延抖动和包丢失率可用下面的式(1)~式(2)表示:

$$d(p) = \log\left(\frac{1}{1-d}\right), \quad d > 0, 0 < d < 1 \quad (1)$$

$$l(p) = \frac{1}{1-l}, \quad l > 0, 0 < l < 1 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, d , l 和 p 分别表示时延、包丢失率和负荷, d , l , p 为调整常数。

在 DS 域的一对输入、输出端点之间定义多条路由, 每一条路由都连接两个边缘路由器和几个核心路由器, 每一条路由都支持多个业务类。可以为每条路由定义一个 VPN^[10-13]。为 DS 域的每一个业务类定义一个最大负荷, 第 j 个业务类的最大负荷为 P_{max}^j 。下面给出一条路由的业务类负荷定义。

定义: 一条路由的一个业务类的负荷等于该路由包含的所有路由器关于该业务类的负荷中的最大值。

假设一对输入、输出端点 (n_1, n_2) 之间的第 i 条路由包含 M 个路由器, 如果它们的第 j 个类都没有达到最大负荷时, 在不考虑链路的传输时延和链路包丢失率的情况下, 该路由的第 j 个业务类有一个时延和包丢失率边界值:

$$d_{n_1 n_2}^{ij} = \frac{1}{1 - \frac{d_j}{m_{max}}}, \quad d_j > 0, 0 < \frac{d_j}{m_{max}} < 1 \quad (3)$$

$$l_{n_1 n_2}^{ij} = \frac{l_j}{1 - \frac{l_j}{m_{max}}}, \quad l_j > 0, 0 < \frac{l_j}{m_{max}} < 1 \quad (4)$$

这样, 当控制 DS 域的一条路由关于某一个业务类的负荷在最大负荷以内时, 该路由就可为选用该业务类的用户的业务流提供定量的 QoS 保证。

一对输入、输出端点 (n_1, n_2) 之间第 i 条路由的第 j 个业务类包含如下的边界值集合:

$$\{d_{n_1 n_2}^{ij}, l_{n_1 n_2}^{ij}, j_{max}\} \quad (5)$$

路由关于业务类的优化度评估值公式: 用户通常从性能、价格和负荷三方面来评估一个路由。由于在 DiffServ 框架下, 一个路由关于某一个业务类的负荷只有小于该类的最大负荷时才能提供定量的 QoS 保证, 当一个路由关于该业务类的负荷大于最大负荷时, 不论它的性能如何, 用户都不会选用它。因此用户对它的优化度评估值为 0; 当一个路由关于该业务类的负荷为 0 时, 用户对它的评估主要看它的性能和价格, 因此它的优化度评估值应等于用户对它的性能和价格的优化度评估值, 本机制把它称为路由关于该业务类的性能价格比评估

值。随着一个路由关于该业务类负荷的增加, 用户对它的兴趣加速降低, 因此它的优化度加速降低。路由关于业务类的优化度评估值可以用式(6)表示:

$$O_{n_1 n_2}^{ij} = [1 - (\frac{a_{n_1 n_2}^{ij}}{j_{max}})] v_{n_1 n_2}^{ij}, \quad > 1 \quad (6)$$

其中 $O_{n_1 n_2}^{ij}$ 表示第 i 条路由关于第 j 个业务类的优化度评估值, $v_{n_1 n_2}^{ij}$ 表示性能价格比, $a_{n_1 n_2}^{ij}$ 为实际负荷, j_{max} 为调节常数。

路由关于业务类的性能价格比评估值: 用户在市场上评估路由时, 通常要给它一个评估价格, 并用它与实际标价的差来评估该路由的性能价格比: 差小于 0, 用户认为物不及值, 就不会选择它; 等于 0, 用户认为物有所值; 大于 0, 用户就认为物超所值, 就非常乐意选择它。因此, $v_{n_1 n_2}^{ij}$ 可以用这个差来表示。假设在最理想的情况下, 也就是没有时延和包丢失率的情况下, 单位时间使用单位带宽用户愿意付的价格为 k_w ; 假设在单位时间使用单位带宽时, 在包丢失率(时延)不变的情况下, 时延(包丢失率)每增加一个单位, 用户感觉应该从 k_w 中扣除 k_d (k_l), 由于用户对时延和包丢失率降低的兴趣线性增加^[9, 14], 则用户对路由关于业务类的价格评估值为

$$k_w - k_d d_{n_1 n_2}^{ij} - k_l l_{n_1 n_2}^{ij} \quad (7)$$

因此, $v_{n_1 n_2}^{ij} = k_w - k_d d_{n_1 n_2}^{ij} - k_l l_{n_1 n_2}^{ij} - P_u^j$ 其中 P_u^j 是 ISP 为第 j 个业务类定义的实际价格, 也就是标价, 其他参数参考式(5)。

基于最大优化度原则的业务类选路: 算出 DS 域一对输入、输出之间的所有路由关于一个业务类的优化度评估值, 选择其中最大的对应的路由作为该业务类的选择路由。由于由式(6)表示的优化度评估值基于用户的评估标准, 因此, 它一定能被用户评为最优。假设该路由的该业务类的时延和包丢失率边界值为 $D_{n_1 n_2}^{ij}$ 和 $L_{n_1 n_2}^{ij}$, 则它的边界值集合为

$$\{D_{n_1 n_2}^{ij}, L_{n_1 n_2}^{ij}, j_{max}\} \quad (8)$$

1.2 优化的业务计划

本机制主要通过实施业务计划为用户的业务或业务应用定义一个业务类, 同样为了使选择能够被用户评估为最优, 本机制也基于用户的评估标准来定义一个业务类关于用户需求 and 预算的优化度评估值公式, 并基于最大优化度评估值原则来作抉择。

用户业务 QoS 需求和预算: 用户业务的 QoS 需求通常在 SLA(Service Level Agreement) 中规定, 包括时延边界值(d_{max})、包丢失率边界值(l_{max})和吞吐量(最小带宽 w_{min} 和理想带宽 w_{varr})。用户的业务一般都有一个预算, 本机制定义用户的业务预算用单位时间内(秒)传输单位数据(Mbyte)用户愿意付的最大价格(b)表示。用户业务的 QoS 需求和预算可以用式(9)表示:

$$\{w_{min}, w_{varr}, d_{max}, l_{max}, b\} \quad (9)$$

业务类关于用户业务需求和预算的优化度评估值: 用户通常从性能、价格和负荷三方面来评估一个业务类。用户对负荷的评估与第 1.1 节一样, 因此业务类关于用户业务需求和预算的优化度评估值公式与式(6)类似, 表示为

$$O_{n_1 n_2}^j = [1 - (\frac{a_{n_1 n_2}^j}{j_{max}})] v_{n_1 n_2}^j, \quad > 1 \quad (10)$$

其中 $O_{n_1 n_2}^j$ 为用户参照自己业务的 QoS 需求和预算对第 j 个业

务类作出的优化度评估值, $v_{n_1 n_2}^j$ 表示性能价格比, $a_{n_1 n_2}^j$ 为实际负荷, 参考式(6)。

业务类关于用户业务需求和预算的性能价格比评估值: 用户都在预算范围内作抉择, 当一个业务类的标价超过预算时, 无论该业务类的性能和负荷如何优越, 用户都不选择它, 它的优化度评估值应为 0, 性能价格比评估值也为 0; 当一个业务类的标价为 0 时, 用户只从它的负荷和性能两个方面来评估, 它的性能价格比优化度评估值应该等于性能优化度评估值; 随着一个业务类的标价的增加, 用户对它的兴趣加速降低, 因此, 优化度评估值应加速降低, 性能价格比评估值也应该加速降低。

当一个业务类的时延边界值(包丢失率边界值)大于用户业务 QoS 需求对时延(包丢失率)要求时, 不管包丢失率边界值(时延边界值)、价格和负荷如何, 用户都不会选择它, 因此, 它的优化度评估值为 0, 性能价格比评估值为 0, 性能优化度评估值也为 0; 当时延边界值(包丢失率边界值)为 0 时, 用户只考虑包丢失率边界值(时延边界值)、价格以及负荷因素, 因此, 性能优化度评估值应等于包丢失率(时延)优化度评估值; 随着时延边界值(包丢失率边界值)的增加, 用户对它的兴趣加速降低, 因此, 性能优化评估值也加速降低。

根据以上的用户评估行为, 可以定义性能价格比的评估公式为

$$v_{n_1 n_2}^j = [1 - (\frac{k_c p_u^j}{b})] [1 - (\frac{D_{n_1 n_2}^j}{d_{max}^j})] [1 - (\frac{L_{n_1 n_2}^j}{l_{max}^j})] \quad (11)$$

其中, p_u^j 是实际标价, k_c^j 是调整参数, 它是根据用户级别定义的折扣比例, 对国内用户不大于 1, 用户级别越高, 折扣越多, b 和 d_{max}^j 是调整常数, 其他参数参考式(8)~式(9)。

最优化原则: 算出 DS 域一对输入、输出之间的所有业务类相对于用户业务 QoS 需求和价格的优化度评估值, 选择优化度最大的业务类作为用户业务的选择。由于由式(10)表示的优化度评估值公式基于用户的评估标准, 因此, 它一定能被用户评为最优。

2 定量 QoS 管理的实施过程

在网络开始运行的时候, 对 DS 域实施一次优化的业务量工程, 给每一对输入、输出端点之间的每一个业务类定义一条最优化的路由, 这时每一条路由的每一个业务类的负荷都为 0。

在用户和 ISP 进行 SLA 协商的时候, 对用户业务实施一次业务计划, 给它定义一个优化的业务类, 它是一个基础的业务类, 在 SLA 的整个生命周期都起作用, 这时该业务类的负荷为该输入、输出端接收的所有属于该业务类的用户的 SLA 的负荷之和。

网络在实时运行的时候, 在边缘路由器或终端监测每一对输入、输出端点之间的每一个业务类的路由时延 $d_{n_1 n_2}^j$ 和包丢失率 $l_{n_1 n_2}^j$, 当它们达到由式(8)定义的边界值 $D_{n_1 n_2}^j$ 和 $L_{n_1 n_2}^j$ 时, 说明该路由关于该业务类的实际负荷 $a_{n_1 n_2}^j$ 达到了该业务类的最大值 P_{max}^j , 接着计算一下输入边缘路由器 n_1 的该业务类的使用率 $a_{n_1}^j$, 它是该边缘路由器的该业务类的最大带宽 $Max_bw_{n_1}^j$ 和实际使用带宽的商, 存在两种情况:

(1) 如果 $a_{n_1}^j < \frac{j}{max}$, 则说明是中间路由器的该业务类达到

了该类最大负荷, 此时启动业务量工程, 给该输入、输出端的该类定义一条其他的在当时是最优化的路由, 它关于该业务类的负荷小于最大负荷, 因此, 可继续接收业务应用。

(2) 当 $a_{n_1}^j = \frac{j}{max}$, 说明边缘路由器关于该业务类的负荷达到了该类最大负荷, 该输入、输出端已经不能接收新的属于该业务类的用户的业务应用, 此时启动业务计划过程, 给后续到达该输入端的属于该业务类的用户的业务应用定义一个新的在当时是最优化的业务类。

3 实验结果及讨论

以一个 DS 域为背景, 对本机制和 TEQUILA 的机制进行了比较。实验中假设每一个 DS 域有 13 个业务类: 一个 EF 和 12 个 AF(AF11 ~ AF43)。假定一对输入、输出端点之间共有 13 条路由, 每一条路由包含一个核心路由器, 如图 1 所示, 只考虑一对输入、输出端点之间业务的传输。

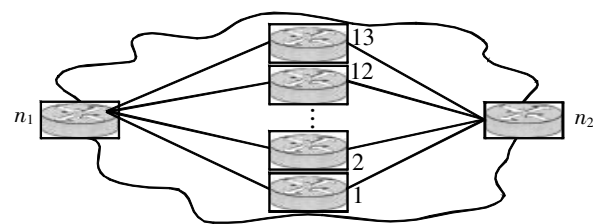


图 1 仿真网络拓扑

仿真业务: 在 1(Mbyte) ~ 20(Mbyte) 之间随机产生一个整数作为用户业务 QoS 需求的最小带宽, 最小带宽加 2 为 QoS 需求的理想带宽; 在 1(Ms) ~ 13(Ms) 之间随机产生一个整数作为 QoS 要求时延; 1 ~ 6(万分之一) 之间随机产生一个整数作为 QoS 的包丢失率。

仿真参数: $\alpha = 18$, $\beta = 1/28$, $\gamma = 0.57$, $\delta = 2$, $d = l = 1$, $\epsilon = 1$, $\zeta = 2$, $\eta = 2$, $b = 1.1$ 元, $\theta_{max} = 0.4$, $\rho_j = \frac{j}{max} \exp(-j)$, $\sigma_{n_1 n_2}^j = i \times 0.5 + \log(\frac{1}{1 - \frac{d_j}{max}})$, $\tau_{n_1 n_2}^j = i \times 0.001 + l$, $x \in [1, 13]$, $\rho_x \rho_j$: $Max_bw_x^j = Max_bw_{n_2}^j = 800$ Mbyte, ρ_j : $Max_bw_{n_1}^j = Max_bw_{n_2}^j = 10400$ Mbyte, $k_w = 0.247$ 元/(Mbyte), $k_d = 0.00854$ 元/(Mbyte * 毫秒), $k_l = 42.7$ 元/(Mbyte * 单位丢包率), $k^j = 1$, $p_u^j = 0.2 / \frac{j}{max}$ 。

对于 TEQUILA, 只以负载作为优化的条件, 路由关于业务类的优化度评估值公式和业务类关于用户业务需求和预算的评估值公式用式(12)表示:

$$O_{n_1 n_2}^j = [1 - (\frac{a_{n_1 n_2}^j}{j_{max}})] \quad (12)$$

表 1 表示了对相同的业务进行了处理后, 接收的用户业务总数和总的用户业务性能价格比评估值之间的关系。

表 1 本文机制和 TEQUILA 的用户业务性能价格比比较

接收个数	38	109	206	332	418	509	3201
系统总性价							
本文机制	18.35	50.89	93.20	143.26	174.64	208.92	639.38
TEQUILA	12.44	36.11	60.97	100.04	123.41	147.54	513.72

表 1 表明: 接收相同的业务数, 本机制接收用户业务的总性能价格比要优于 TEQUILA, 而且随业务数增加, 差距加速增长。

表 2 表示在实施了相同次数的业务量工程后, 实施的业务量工程的次数(TE 次数)和总的选中路由的性能比评估值之间的关系。

表 2 本文机制和 TEQUILA 的选中路由的性能价格比比较

系统	TE 次数						
	2	3	4	5	6	7	8
本文机制	4.255	6.325	8.370	10.376	12.343	14.276	16.171
TEQUILA	4.243	6.300	8.314	10.286	12.215	14.101	15.945

表 2 表明: 实施了相同次数的业务量工程, 本机制为业务类选中的路由的总的性能价格比要优于 TEQUILA, 而且随业务数增加, 差距加速增长。

4 结论

本文提出了一个双重优化的 IP-DiffServ 定量 QoS 实现机制, 它通过实施业务量工程, 在 DS 域的一对输入、输出端点之间为不同的业务类定义一条最优化的路由, 由于优化度评估值中包含了负荷因素, 因此可以实现负载均衡; 由于优化度中包含了性能价格比元素, 因此可以使选择的路由更合理。它通过实施业务计划为每一个用户的业务或业务应用定义一个优化度最高的业务类, 同样, 由于业务类中包含了负荷因素, 因此不但可以实现对用户业务的定量 QoS 保证, 而且可以引导业务量在不同的业务类之间有序分布; 由于优化度评估值中包含了性能价格比元素, 因此可以使用户业务或业务应用具有较高的性能价格比。两个优化机制相辅相成, 实现了资源和业务量分布的高度一致, 这不但可以使 DS 域接纳更多的用户业务, 而且有利于网络稳定。

实验结果很好地验证了本系统的优点。

参考文献:

- [1] O Awduche, A Elwalid, I Widjaja, *et al.* Overview and Principles of Internet Traffic Engineer[S]. RFC 3272, 2002.
- [2] P Aukia, *et al.* RATES: A Server for MPLS Traffic Engineer[J]. IEEE Network Magazine, 2000, 14(2): 34-41.
- [3] A Feldman, *et al.* NetScope: Traffic Engineering for IP Network [J]. IEEE Network Magazine, 2000, 14(2): 11-19.
- [4] B Fortz, *et al.* Traffic Engineering with Traditional IP Routing Protocols[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(10): 118-124.
- [5] Gunter, *et al.* An Architecture for Managing QoS-enabled VPN over

Internet[C]. IEEE Local Computer Networks, Lowell, MA, USA, 1999. 122-131.

- [6] D Goderis, S Van den Bosch, *et al.* A Service-Centric IP Quality of Service Architecture for Next Generation Networks[C]. IEEE Network Operations and Management Symposium, NOMS 2002, 2002 IEEE/IF-IP, 2002. 139-154.
- [7] P Trimintzios, *et al.* A Management and Control Architecture for Providing IP Differentiated Services in MPLS-based Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(5): 80-88.
- [8] Nichols K, *et al.* Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers[S]. RFC 2474, 1998.
- [9] Xin Wang, Henning Schulzrinne. Pricing Network Resources for Adaptive Applications in a Differentiated Services Network[C]. INFO-COM 2001, Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Proceedings IEEE, 2001, (2): 943-952.
- [10] C Corcoubetis, V Siris. Managing and Pricing Service Level Agreements for Differentiated Services[C]. IWQoS '99, London, U. K., GMD Report 95, 1999.
- [11] Palmieri. VPN Scalability over High Performance Backbones Evaluating MPLS VPN Against Traditional Approaches[C]. Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication, 2003, (2): 975-981.
- [12] G Heron. A Architecture for L2VPNs[Z]. IETF Draft: draft-ietf-ppvpn-l2vpn-00.txt, 2001.
- [13] E Rson, *et al.* BGP/MPLS VPNS[S]. RFC 2547, 1999.
- [14] J Janssen, D D Vleeschauer, G H Petit. Delay and Distortion Bounds for Packetized Voice Calls of Traditonal PSTN Quality[C]. Proceedings of 1st IP Telephony Workshop (IP Tel2000), Berlin, Germany, GMD Report 95, 2000. 105-110.

作者简介:

张晋豫(1967-), 男, 洛阳人, 博士, 主要研究方向为网络管理和通信软件; 孟洛明(1955-), 男, 洛阳人, 长江学者, 国家标准委员会主任, ITU-T SG4 主要领导, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为网络管理和通信软件; 邱雪松(1973-), 男, 江西人, ITU-TSG4 技术专家, 副教授, 博士, 主要研究方向为网络管理和通信软件。

(上接第 139 页) 于神舟 AVIDM 企业级协同产品研发管理系统、神舟 OA 办公自动化系统和神舟 PDM 产品数据管理系统等。

今后的工作主要包括达到 SQL-92 标准的完备级和 SQL-99 标准, 以及把 SQL 语句嵌入 C++ 语言等。

参考文献:

- [1] J Date. An Introduction to Database Systems(7th Edition) [M]. USA: Addison Wesley, 2000.
- [2] American National Standards Institute. ANSI X3. 135-1992 (R1998). American National Standard for Information Systems-Database Language-SQL[S]. 1992. 411-443.
- [3] American National Standards Institute. ISO/IEC 9075:1999(E) Information Technology-Database languages-SQL[EB/OL]. http://developer.mimer.com/documentation/Mimer_SQL_Reference_Manual/Intro_SQL_Std5.html, 1999.
- [4] The PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 7.3.2 Programmer's Guide [M]. USA: iUniverse.com, 2000. 75-86.

[5] Bruce Monjian. PostgreSQL, Introduction and Concepts [M]. U S A: Addison-Wesley, 2003.

- [6] A D Birrell, *et al.* Implementing Remote Procedure Calls [J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1984, 2(1): 39-59.
- [7] 李赣生, 王为民. 编译程序原理与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 26-162.
- [8] Structured Query Language (SQL) Test Suite [EB/OL]. http://www.itl.nist.gov/div897/ctg/sql_fom.htm, 1992.
- [9] Judith Bowman, Sandra Emerson, Marcy Damovsky. Using Structured Query Language [M]. USA: Addison-Wesley, 1996.

作者简介:

黄晓燕(1979-), 女, 浙江建德人, 硕士研究生, 主要研究方向为数据库管理系统、嵌入式系统; 杨子江(1975-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 博士, 主要研究方向为实时系统、嵌入式操作系统等; 董金祥(1945-), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工程数据库、计算机辅助设计、人工智能、嵌入式系统。