

## 基于不同树策略的多播路由算法

方红雨<sup>1</sup>, 崔逊学<sup>2</sup>, 刘 蓁<sup>2</sup>

(1. 安徽大学 电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039; 2. 解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)  
(hy966969@163.com)

**摘 要:**提出选择不同的树路由作为多播通信方案,以获得较低的综合代价保证网络负载均衡。由于多播路由的最优选择问题在多项式时间内难以求解,提出一种使用遗传算法的路由算法来同时优化不同的服务质量指标,计算产生出几种路由树。模拟结果和分析表明这种基于不同树策略的路由算法具有较好的性能效果。

**关键词:**多播通信;服务质量;路由;遗传算法

**中图分类号:** TP393.07 **文献标识码:** A

## Multicast routing algorithm based on the strategy of different trees

FANG Hong-yu<sup>1</sup>, CUI Xun-xue<sup>2</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei Anhui 230039, China;  
2. Artillery Academy of PLA, Hefei Anhui 230031, China)

**Abstract:** When multiple tree routes were selected as multicast communication solution, lower overall cost could be obtained to ensure network load balance. As the determination of such optimal multicast routes was computationally intractable in polynomial time, a multicast routing algorithm based on genetic algorithm was proposed to simultaneously optimize different parameters, in which multiple multicast tree route solutions were generated. The simulation and analysis results show the routing algorithm based on the strategy of multiple trees has better performance than general multicast routing algorithm.

**Key words:** multicast communication; QoS( Quality of Service); routing; genetic algorithms

## 0 引言

多播是将相同信息同时从源点传送到一组目的点的通信方式,与单播和广播方式的不同之处在于仅有一份多播信息从源点传输到目的节点,仅在分支处复制消息。多播路由常采用树型结构,单个服务质量优化的路由选择问题可在多项式时间内解决,但对于两个或两个以上的独立加性路径约束问题,在多项式时间内找到可行的多播树已证明为不可能<sup>[1]</sup>。

本文选择多棵不同的树路由(简称为多树)作为多播通信方案,以获得较低的综合代价来保证网络业务量负载的均衡。由于多播路由的最优选择问题是 NP 完备问题,我们使用遗传算法的路由算法来同时优化不同的服务质量指标,以形成多棵多播树路由解。

## 1 相关工作

多播路由问题在网络通信界一直是一个重要的研究课题<sup>[2]</sup>。多播应用通常需要严格的服务质量保证,它分成链路条件(如带宽)、路径条件(如端到端时延和路径代价)以及路由树条件(如抖动)。已有文献提出使用遗传算法来解决此类问题<sup>[3~6]</sup>。这些方法一般可解决斯坦利树问题,但大多数路由算法使用的是基于单个服务质量指标的多播树优化方案,得到的是一棵树路由。我们将多播路由的选择过程模型化为一个多指标优化问题,使用遗传算法进行求解。基于多

目标优化的遗传算法<sup>[7]</sup>运用 Pareto 优胜关系来处理多个相互冲突的待优化指标。

以前 Ahuja 等人提出一种列产生方法来形成多棵路由树<sup>[8]</sup>,该方法针对每个多播业务添加一棵新的树路由。Park 等人提出一种基于路由树梯度的多树路由方法<sup>[9]</sup>。但以上两种方法只考虑以业务量作为优化目标,没有涉及其他的参数,没有考虑服务质量问题。多播的另一类似通信方式是组播,它要求组内的每个成员均可广播信息至其他成员,成员节点既是目的点又能充当源点,有人提出多斯坦利树算法来形成各个成员节点的路由树<sup>[10]</sup>。虽然多斯坦利树算法形成的是多棵树路由,但对于每个成员节点来说仍然只有一棵树路由,因此本文的多树策略思想与其不同。

## 2 多树路由与优化模型

### 2.1 多树路由问题

使用多棵树路由可有效利用网络资源。假设多播业务量可拆分成几棵多播树发送,则多播业务可选择多个树路由。图 1 和图 2 示例了使用多树路由的特点。图 1 为 10 个单位的多播业务量从源点 1 发送到目的节点组 {8, 9, 10}。在只考虑网络上链路花费的代价时,设链路代价为  $f(x) = x^2$ ,  $x$  为链路上所传送的业务量之和,则图 1(a)中整个链路代价为 500,各个端到端代价为 300。但如果使用两棵树路由(如图 1(b)),10 个单位的业务量在每棵树上被分成 5,则整个链路代价减少为 300,各个端到端代价减至 75。

收稿日期:2005-09-12 基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(050420212)

作者简介:方红雨(1968-),女,安徽绩溪人,高级工程师,硕士研究生,主要研究方向:VoIP、WLAN、计算机网络服务质量和接纳控制;崔逊学(1969-),男,安徽桐城人,副教授,博士,主要研究方向:无线网络、互联网络服务质量、计算机网络优化;刘蓁(1978-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:信息管理、计算机网络、无线传感器网络。

图2为同时存在两个业务的多播情况,一个多播业务为从源点1到目的点 $\{8, 9, 10\}$ ,简记为 $(1, \{8, 9, 10\})$ ;另一个多播业务为 $(11, \{2, 4\})$ 。设各多播业务量均为10个单位,且任意链路的代价函数为 $f(x) = x^2$ ,则图2(a)中的单棵树的整个链路代价为1000。图2(b)中的业务量被分流到两棵树,每个棵树发送的业务量为5,使得整个链路代价减少至725。

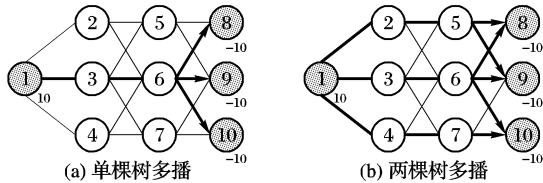


图1 单业务的多播路由示例

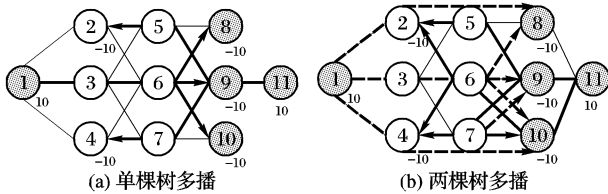


图2 两业务的多播路由示例

## 2.2 优化模型

通常多指标优化由 $n$ 个决策变量、 $k$ 个目标函数和 $m$ 个约束条件组成,目标函数、约束条件与决策变量之间为函数关系<sup>[11]</sup>。其数学模型如下:

$$\text{Maximize. } y = f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } e(\mathbf{x}) = (e_1(\mathbf{x}), e_2(\mathbf{x}), \dots, e_m(\mathbf{x})) \leq 0$$

其中 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X, \mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y$ 。

$\mathbf{x}$ 表示决策向量, $\mathbf{y}$ 表示目标向量, $X$ 为决策向量 $\mathbf{x}$ 形成的决策空间, $Y$ 为目标向量 $\mathbf{y}$ 形成的目标空间,约束条件 $e(\mathbf{x}) \leq 0$ 确定决策向量的可行取值范围。

传统的优化方法如基于梯度或基于单纯形方法难以扩展应用到多指标优化的情况。其他的多目标方法如加权法和约束法,虽能提供一定的求解能力,但对 Pareto 最优前端的形状很敏感,不能处理前端的凹部,或所需的与应用背景相关的启发式知识不能获得。遗传算法作为一种多目标优化方法,其优点在于可处理大规模的搜索空间、在单轮优化期间产生多个均衡解。

多播路由服务质量参数通常包括时延、抖动、带宽、代价和包丢失率等。如果考虑所有的约束参数,则路由计算问题会变得太复杂。由于所有的实时通信对时延都很敏感,带宽是发送数据的基本条件,抖动则影响不同目的点之间多播的效果,因此这里考虑上述的三种参数,选取时延、抖动和链路利用率方差作为优化的子指标,而忽略其他参数。对于需要考虑的场合,可将相关参数作为目标函数的约束限制条件,在遗传算法的个体产生过程中作限制性处理。

假设网络为有向图 $G(N, E)$ , $N$ 为网络节点集, $E$ 为网络中的链路集。对于链路 $L$ ,假定存在时延 $D(L)$ ,多播树路由的时延为树上所有链路的时延之和。抖动是不同的多播目的点之间的时延差值的绝对值。对于目的节点 $i, j, D(i), D(j)$ 为它们的时延。设 $C(L)$ 为链路 $L$ 的可用带宽, $B(L)$ 为多播树的不同链路上分配的带宽,则链路 $L$ 的带宽利用率为:

$$U_L = \frac{B(L)}{C(L)} \quad (2)$$

对于多播树 $T$ ,设 $h(T)$ 为 $T$ 中所有跳数之和,则平均带宽

利用率( $\bar{U}$ )如下:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{L \in T} U_L}{h(T)} \quad (3)$$

取链路利用率方差( $\delta^2$ )作为优化目标之一:

$$\delta^2 = \sum_{L \in T} (U_L - \bar{U})^2 \quad (4)$$

根据上述讨论,多播路由优化模型定义如下:

$$\text{Minimize. } \mathbf{F} = \left( \sum_{L \in T} D(L), \max \{ |D(i) - D(j)| \}, \delta^2 \right), \quad i, j \in T \quad (5)$$

式(5)表示向量 $\mathbf{F}$ 取极小化,使得 $\mathbf{F}$ 中各项均同时取极小。模型优化结果为一组均衡解,当考虑所有子目标的性能时,这些所谓的均衡解性能彼此不相上下,没有一个解的所有指标性能完全优于其他解。使用遗传算法的目的就在于寻找多个解作为多播路由方案。

## 3 多播路由算法设计

遗传算法基于人工进化理论解决优化问题,使用的基本操作是复制、交叉和变异。基于多树策略的多播路由算法的程序如下:

BEGIN

// 输入网络拓扑,  $P$  = 群体规模,  $\text{gen}$  = 代数,  $\text{maxgen}$  = 总代数  
for  $i = 1$  to  $P$  do

{ for each  $d \in D$  do

//  $D$  = 目的点集,  $d$  = 目的点,  $s$  = 源点,  $I$  为个体

Randomly select a route from  $s$  to  $d$  to be the

$j$ th destination path of individual  $I$

}

for  $\text{gen} = 1$  to  $\text{maxgen}$  do

{ Calculate the values of three objective functions separately for each individual:  $F_1, F_2, F_3$ ;

Calculate the Pareto rank of each individual

with their values of  $F_1, F_2, F_3$ ;

Calculate the density of each individual with the sum of similar individuals;

Assign fitness to individuals;

Perform crossover and mutation operations;

Obtain the new set of strings to produce new population;

$\text{gen} = \text{gen} + 1$ ;

}

Find the Pareto optimal solutions from the last generation

//  $M$  = Pareto 最优解数目,  $PS$  = Pareto 最优解集

Input the number of multitree by user

//  $MT$  = 多树数目,  $MTS$  = 多树路由集

Randomly select a solution from  $PS$  and move it to  $MTS$

if  $MT > 1$  do

{ for  $i = 1$  to  $MT$  do

{ Calculate the Hamming distance between each solution in  $PS$  and  $MTS$ ;

Move the solution with minimum distance value to  $MTS$ ;

}

}

// end if

for  $i = 1$  to  $MT$  do

$T = \text{decode}(I \in MTS)$

// 对于个体  $I \in MTS$ , 由  $I$  构造多播树  $T$

END

### 3.1 染色体表示

对于源点和一组确定的目的节点,使用深度优先搜索产生从源点到各目的点的一组可能的路径集,形成多播树的初始

集。产生的多播树被映射成字符串,包含由源点到所有目的节点各路径的节点序列。这里使用-1来标记从源到某目的点路径的终结。图3为图1(a)中多播树的字符串表示示例。

1	3	6	8	-1	1	3	6	9	-1	1	3	6	10	-1
---	---	---	---	----	---	---	---	---	----	---	---	---	----	----

图3 图1(a)中多播树的字符串表示

这种染色体的表示方法代表了多播路由的一个候选方案,它保证从源点到任意目的节点之间存在一条路径。但这种染色体并不必然地表示一棵树,因为其中包含多余的边需要被修剪。我们根据最佳分支算法的原理<sup>[12]</sup>,使用最小有向支撑树方法将这种染色体解码成一棵多播树。

### 3.2 适应度函数

个体适应度代表了多播树的性能。在对个体进行 Pareto 等级排序之前,分别计算已定义的目标函数值。本文使用 Fonseca 和 Fleming 提出的 Pareto 排序方案<sup>[13]</sup>,将个体的排序等级与该个体在群体中受控的个体数目相关联,且群体中非劣解的等级取为1。若第 $t$ 代的个体 $x_i$ 的所有子目标值在群体中劣于 $p_i^{(t)}$ 个个体,则该个体的目前等级为:

$$\text{rank}(x_i, t) = 1 + p_i^{(t)} \quad (6)$$

根据作者曾提出的基于熵原理的多样性保持策略<sup>[14]</sup>,计算个体 $i$ 在群体中的浓度 $C_i$ 。个体的适应度为其等级与浓度的综合结果:

$$\text{fitness}(i) = \text{rank}(i) * \exp(K * C(i)) \quad (7)$$

其中 $K$ 为正的调节系数,可取1.0。

### 3.3 遗传操作算子

交叉和变异方式与通常的方式类似,交叉概率取0.75,变异概率取0.05。但遗传操作并不能在任意基因位上进行,否则会出现致死染色体,因为这里的基因位仅表示网络节点。我们将交叉点和变异点仅选择在已有路径的起始处,即源点对应的基因位。交叉和变异点均采用随机化方法选定。

### 3.4 多树路由的产生

遗传过程结束时产生的非劣解集代表了多指标搜索的结果,最后是如何根据用户要求从非劣解集选出规定数目的树路由。如果只需要一棵树路由,则从非劣解集随机选出一个非劣解方案。否则,执行多树策略,即先计算剩余的非劣解个体与已有的多树路由集之间的海明距离,将距离最小的个体移至多树集,重复该过程直至达到规定的树数。这种做法保证所选择的树路由之间的相似程度尽可能最小,反映在网络上表现为所选的多播路由树之间拥有的共同链路最少。

## 4 性能分析

模拟实验对多播路由算法的性能进行验证,并对多树策略的使用进行分析,性能度量指标是综合链路代价。链路代价实验针对两种典型的网络拓扑,分别见图4(a)~(b)。假设链路均为双向、带宽容量为[90, 110] Mbps之间均匀分布的随机整数,链路时延(包括节点时延)均为0.5ms。

通常链路代价函数分为二次型、分式型和指数型,如表1所示。这些代价函数的定义代表了一些常用的网络应用环境。例如,电信网络常采用分式型函数来表示传输的时延。表中 $\text{rand}(0, 1)$ 表示[0,1]之间产生的随机数,是代价函数中的系数; $x_i$ 为第 $i$ 条链路上所有多播业务量流经此链路的总量之和。

源点和目的节点均随机选定。当多播组规模为5时,单业务多播实验环境如表2所示;表3为同时存在多个多播业务、多播的组规模取不同值的实验场景。对于不同序号的实验结

果列于表4,它表示在不同树数下的综合链路代价以及比较的结果。当从最优解集中随机取一棵树路由作为单棵树路由时,网络的整个链路代价之和记为 $F(1)$ ;当根据多树方法使用 $t$ 条路由由树时链路代价之和记为 $F(t)$ 。由表4看出当 $t=2, 3, 4$ 时, $F(t)/F(1)$ 值明显减少,整个链路代价的性能得到较大改善。因此使用我们的算法将一棵多播树拆分成多棵树来进行信息传输,结果可使相关代价有所降低。

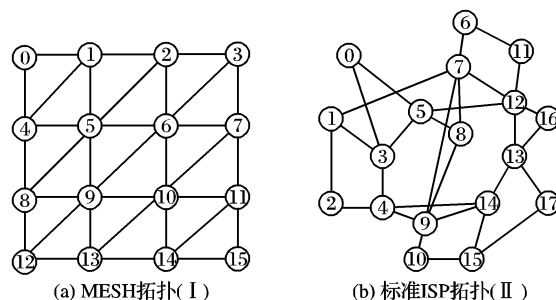


图4 两种典型的网络拓扑

表1 链路代价函数

函数类型	函数	系数
二次型	$a_i x_i^2 + b_i x_i (x_i \geq 0)$	$a_i = 1 + \text{rand}(0, 1),$ $b_i = 1 + \text{rand}(0, 1)$
分式型	$x_i / (c_i - x_i) (0 \leq x_i \leq c_i)$	$c_i = 10 + \text{rand}(0, 1)$
指数型	$\exp(x_i / c_i) - 1 (x_i \geq 0)$	$c_i = 1 + \text{rand}(0, 1)$

表2 单业务多播实验场景

序号	源点	目的节点	业务量	网络类型	链路代价函数
S1	2	3, 4, 6, 12, 15	10	I	二次型
S2	9	1, 2, 6, 11, 14	8	I	分式型
S3	9	2, 3, 4, 7, 14	6	II	指数型

表3 多业务多播实验场景

序号	同时多播 业务数	目的节点 总数	业务量	网络类型	链路代价函数
M1	2	3, 5	12, 8	I	二次型
M2	3	3, 4, 5	2, 2, 4	I	分式型
M3	3	3, 4, 5	12, 8, 6	II	指数型

表4 综合链路代价与比较

序 号	综合链路代价: $F(t)$				$F(t)/F(1)$			
	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$
S1	2066.5	1759.7	1672.9	1535.9	1.00	0.8515	0.8095	0.7432
S2	180.0	143.6	37.8	18.2	1.00	0.7977	0.2100	0.1011
S3	589.5	507.9	482.9	261.3	1.00	0.8615	0.8191	0.4432
M1	3276.0	3120.0	3017.6	2804.5	1.00	0.9523	0.9211	0.8560
M2	9.1	7.8	6.7	6.5	1.00	0.8571	0.7326	0.7142
M3	34238.9	7426.9	6246.5	5360.2	1.00	0.2169	0.1824	0.1565

### 参考文献:

- [1] WANG Z, CROWCROFT J. Quality of service for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [2] STRIEGEL A, MANIMARAN G. A survey of QoS multicasting issues[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6): 82-87.
- [3] BANERJEE N, DAS SK. Fast determination of QoS-based multicast routes in wireless networks using genetic algorithms[A]. Proceedings of International Conference for Communication[C], 2001. 2588-2592.

news/2005/, 收集了主节点路由器 NEWS 从 2005 年 6 月 6 日到 8 月 28 日, 共 12 周的每天网络的每小时访问流量, 得到  $24 \times 84 = 2016$  个数据, 从而形成了一个网络流量时间序列  $\{s(t), t = 1, 2, \dots, 2016\}$ , 以每个星期作为  $1d$ 。由前 10 周流量共  $24 \times 70 = 1680$  个数据建立 WNN 模型, 后 2 周数据预测检验。针对上面的流量时间序列, 取尺度数  $L = 3$ 。用 Mallat 算法对流量时间序列进行分解, 得小波分解的系数序列为  $\{D_1(k), D_2(k), D_3(k), A_3(k)\}$ , 如图 1 所示。

取 WNN 模型中的隐层节点数为 4, 输入为  $X = [D_1(k), D_2(k), D_3(k), A_3(k)]$ , 输出为  $Y = [s(k+T)]$ , 则 WNN 网络为 4-4-1 结构。预测期分别取  $T$  为  $1d, 2d, 3d$ , 目的是为了验证该模型对  $1d, 2d, 3d$  的预测效果。采用附加动量 BP 算法确定网络权值。本文小波系数分解和 WNN 训练的实现工具均为 Matlab 6.5。

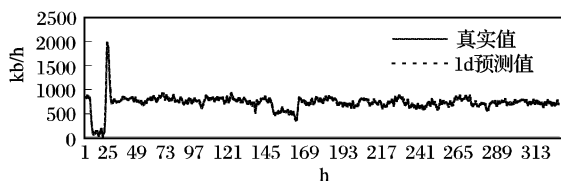


图2 预测期为 1d 的网络流量观测结果

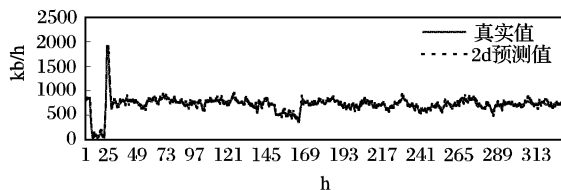


图3 预测期为 2d 的网络流量观测结果

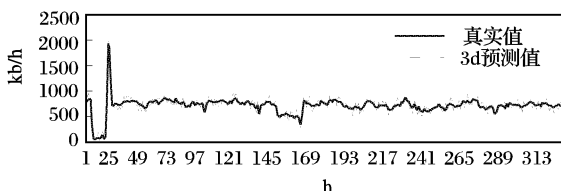


图4 预测期为 3d 的网络流量观测结果

先对 WNN 模型进行训练, 对于上述不同的三个预测期, 经过 3000 步的训练后都取得良好效果, 然后分别将  $Y = [s(k+1d)]$ ,  $Y = [s(k+2d)]$  和  $Y = [s(k+3d)]$  作为相应的神

经网络的输入, 所对应的输出序列即为未来预测期网络流量的时间序列。图 2 ~ 图 4 列出了 WNN 模型预测期为  $1d, 2d$  和  $3d$  的网络流量预测效果。

图 2 ~ 图 4 说明, 对于不同的预测期, WNN 模型的预测效果都比较理想, 特别是预测期为  $1d$  和  $2d$  的时候, 当预测期延长到了  $3d$ , 预测精度也还是比较高的。

同时本文也采用了传统的 ARMA 模型对网络流量进行了预测, 得到在  $1d, 2d$  和  $3d$  的预测期的平均相对误差分别为 17.9%, 31.7% 和 42.3%, 而同样的预测期, WNN 模型预测的平均相对误差分别是 9.32%, 14.7% 和 20.1%, 这也能够说明 WNN 模型要比传统的预测方法的精度要高。说明了小波网络模型紧紧抓住了网络流量多尺度特征及其各频率成分的发展趋势和对原流量时间序列的作用机制, 在一定程度上克服了传统模型当观测期延长时预测精度差的缺点。可见, WNN 能很好地预测网络日流量发展趋势。WNN 模型建模思路清晰, 实现过程简单, 效果理想, 具有很强的实用性。

#### 参考文献:

- [1] FELDMANN A, GILBERT AC, WILLINGER W, *et al.* Looking behind and beyond self-similarity: Scaling phenomena in measured WAN traffic [A]. Proceedings of 35th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing [C], 1997. 269 - 280.
- [2] LELAND WE, TAQQU MS, WILLINGER W, *et al.* On the self-similar nature of ethernet traffic [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1994, 2(1): 1 - 15.
- [3] WILLINGER W, TAQQU MS, SHERMAN R, *et al.* Self-Similarity Through High-Variability: Statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level [A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM'95 [C], 1995.
- [4] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析·应用算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] HOMIK KM, STINCHCOME M, WHITE H. Multilayer feedforward network universal approximators [J]. Neural Network, 1989, 2(2): 259 - 366.
- [6] 焦李成. 神经网络系统理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [7] 丛爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998.

(上接第 521 页)

- [4] 刘芳, 杨海潮. 参数可调的克隆多播路由算法 [J]. 软件学报, 2005, 16(1): 145 - 150.
- [5] 陈年生, 李腊元, 董武世. 基于混合遗传算法的 QoS 多播路由算法 [J]. 计算机应用, 2005, 25(7): 1485 - 1488.
- [6] FEI X, LUO J, WU J, *et al.* QoS routing based on genetic algorithm [J]. Computer Communications, 1999, 22 (15/16): 1394 - 1399.
- [7] Van VELDHUIZEN DA, LAMONT GB. Multiobjective evolutionary algorithm: analyzing the state-of-the-art [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 125 - 147.
- [8] AHUJA RK, MAGNANTI TL, ORLIN JB. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications [M]. Prentice-Hall, 1993.
- [9] PARK K, SHIN YS, LEE HC. Multicast routing by multiple tree routes [A]. MARSAN MA, BIACO A, ed. QoS-IP 2001, LNCS 1989 [C], 2001. 285 - 297.
- [10] JIA X, WANG L. A group multicast routing algorithm by using multiple minimum Steiner trees [J]. Computer Communications, 1997, 20(9): 750 - 758.
- [11] STEUER RE. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application [M]. New York: Wiley, 1986.
- [12] TARJAN RE. Finding optimum branchings [J]. Networks, 1977, 7(1): 25 - 35.
- [13] FONSECA CM, FLEMING PJ. Genetic algorithm for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms [C]. San Mateo, California, 1993. 416 - 423.
- [14] 崔逊学, 李森, 方廷健. 基于免疫原理的多目标进化算法群体多样性研究 [J]. 模式识别与人工智能, 2001, 14(3): 291 - 296.