

面向分布式交互应用的全部到全部路由问题研究

李永陆 伟

(盐城师范学院 信息工程学院 江苏 盐城 224002)

摘要: 针对分布式交互应用(DIA)中的一类全部到全部路由问题进行研究,源根树和单棵共享树是DIA中全部到全部路由的两种极端方法。源根树为每一个需要发送数据的DIA节点都以它为根构造一棵数据分发树,该方法费用开销太大;而所有需要发送数据的DIA节点都基于单棵共享树进行数据分发树,又会造成流量集中,DIA延时无法保障。因此,需要对这两种方法进行权衡,提出基于多共享树研究DIA中的全部到全部路由问题(DARP)。为了确定多共享树的数目和根节点位置,构造了DARP的多目标优化模型,该模型在满足DIA的延时约束的前提下,最小化DIA数据分发总延时和DIA数据分发总代价;同时,针对DARP的多目标优化模型提出了求解DARP问题的禁忌遗传算法(DARP-TGA),并通过模拟仿真验证了该算法的有效性。

关键词: 分布式交互应用;全部到全部路由;多共享树;禁忌遗传算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2018)12-0091-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2018.12.020

Research on All-to-all Routing Problem for Distributed Interactive Application

LI Yong LU Wei

(School of Information Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: Aiming at the all-to-all routing problem in distributed interactive application (DIA), source rooted tree and single shared tree are two extreme approaches in DIA. In source rooted tree, each DIA node that needs to send data constructs a data distribution tree rooted itself, which costs too much. But in single shared tree, all the DIA nodes that need to send data are based on single shared tree, which will cause traffic concentration and DIA delay can't be guaranteed. Therefore, we need to trade off those two approaches, and propose to study the all-to-all routing problem in DIA (DARP) based on multiple shared trees. In order to determine the number and roots of multiple shared trees, we construct a multi-objective optimization model of DARP, which minimizes the total delay and the total cost under the premise of satisfying the delay constraint of DIA. At the same time, a tabu-genetic algorithm for DARP problem (DARP-TGA) is proposed for DARP multi-objective optimization model, and the effectiveness of DARP-TGA is verified by simulation.

Key words: distributed interactive application; all-to-all routing; multiple shared trees; tabu-genetic algorithm

1 概述

随着计算机网络的飞速发展,各种计算机应用不再局限于单机的或独立的系统,而是通过网络进行连接,以分布式的形式开展各种应用。地理上分散的多个终端用户节点能够在一个共享的统一的网络虚拟环境中通过分布式交互和协作完成特定任务。这类应用被称为分布式交互应用(distributed interactive application, DIA),是近年来的研究热点^[1-4]。目前分布交互应用主要体现在分布式虚拟环境、分布式交互仿真、协同设计与制造、军事仿真系统、网络在线游戏、视频会

议等方面。路由问题是DIA中的基础和关键问题之一。地理上分散的DIA节点通过计算机网络进行相连,为了实现DIA中各节点间的状态一致性和协同交互,DIA中各节点之间要进行大量的数据通信。这些交互数据不仅要求传输时延小,而且到达各节点时,必须是完整的和正确的。DIA对信息传输的基本要求可归纳为:实时性、高带宽、可靠性等^[5]。

DIA中信息数据路由需求可分为一到多(single-to-many)、多到多(many-to-many)、全部到全部(all-to-all)^[6-9]。其中,many-to-many可以看成是多个

收稿日期: 2017-12-28

修回日期: 2018-05-04

网络出版时间: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(61603326);盐城师范学院自然科学基金项目(14YCKL016)

作者简介: 李永(1978-),男,副教授,博士,研究方向为计算机网络体系结构、分布式计算。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180629.1700.018.html>

single-to-many 的简单叠加;而在 all-to-all 中,每个 DIA 节点都发送信息数据到所有其他的节点。在 DIA 的全部到全部路由中,每一个节点既是发送者,又是接收者;尤其是具有延时约束的全部到全部的分布式交互应用对底层网络数据通信的要求苛刻。目前关于 DIA 全部到全部路由问题的研究大致可分为四类。一是采用组播有源树的路由方式,针对每一个需要发送数据的节点都以它为根构造一棵数据分发树,这样的数据分发方式延时性能较好,但费用开销大,尤其是当大量的节点参与 DIA 应用时,导致网络设施无法支撑 DIA 应用。二是采用单棵共享树的路由方式,该方式会造成流量集中,DIA 延时无法保障。三是采用 P2P 的路由方式,该方式无法保障 DIA 应用的延时需求,因为 P2P 的拓扑不是针对 DIA 的特点来构造的,存在拓扑不匹配问题。四是采用多共享树的路由方式,采用多棵共享树来分发 DIA 的数据,多共享树有多个核节点,DIA 成员可根据自己的位置,与核节点的时延等条件选择任一个核节点来发送数据。目前针对多共享树的研究已有一些进展,OCBT 协议^[10]构建和维护了一个基于多个组播核节点的组播树,其中每一个核节点又是相应组播子树的根节点,通过分层的核节点方式帮助组播成员加入和维护组播树,其缺点是在没有全局的网络拓扑时,很难给出核节点的分层位置。鉴于单棵共享树的缺点,Zappala 等^[11]提出 IP 组播的多共享树方案(multiple-core tree, MCT),MCT 同时使用少量的多棵组共享树来转发数据,共享树的根互不相同,并实验验证了在 IP 组播中使用多共享树取代单共享树的方案是可行的。Tan 等^[12]提出了适用于全部到全部数据分发的多共享树协议(multiple shared trees protocol, MSTP),但由于该协议是在保证多共享树代价最小的条件下来改善延时,实时性无法得到保证,并不适用于 DIA 这种对延时要求高的应用。

综上,研究大规模 DIA 全部到全部路由时既要考虑实时性、带宽和可靠性,更要考虑路由的可扩展性。因此,文中基于多共享树来研究 DIA 的全部到全部路由问题(DIA all-to-all routing problem, DARP),构造 DARP 的多目标优化模型,该模型在满足 DIA 延时约束的前提下,最小化 DIA 数据分发总延时和 DIA 数据分发总代价;同时,针对 DARP 的多目标优化模型提出求解 DARP 问题的禁忌遗传算法(DARP_TGA)。

2 DIA 全部到全部路由问题模型

DARP 多共享树的构造主要包括两个方面:一是多共享树的数目和根节点位置;二是成员节点与共享树的隶属关系,即成员节点是仅属于某一棵共享树,还是属于所有的共享树。在 senders-to-all^[11]方案中,每

个成员节点只能属于多共享树中的一棵,在数据发送时,发送数据的节点要向多共享树的所有核节点都发送一份同样的数据,才能完成把数据发送给其他所有成员。对于 members-to-all 方案,任一成员节点都位于所有的共享树上,有发送数据需求的节点任选一棵共享树作为自己的数据分发树,就能将数据发送给其他所有的成员节点。在 senders-to-all 中,多共享树核的数目的多少是一个系统级参数,而在进行数据发送时又要求所有节点具有相同的数据转发能力,这与 DIA 的实际环境不符,尤其当多共享树数目大时,要求所有成员节点都能满足这种数据发送和转发的出度要求是不可能的。因此,senders-to-all 方案并不适用于 DIA 的全部到全部路由,故 DIA 的多共享树路由问题采用 members-to-all 方案,该方案可以避免流量汇聚、提高数据分发的性能。

假设 $G = (V, E)$ 表示 DIA 网络, V, E 分别是 DIA 网络中的节点集合和链路集合,任一条链路 $(u, v) \in E$ 有两个权重函数:代价 $\text{Cost}(u, v)$ 和延时 $\text{Delay}(u, v)$;由于每一棵共享树都有一个核节点,该共享树就是以其核节点为根的树,核节点的数目即多共享树的数目。假设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 表示多共享树的候选核中心, K 为候选核中心的数目,也代表候选多共享树的数目;每个核中心 $c_j \in C$ 管理以自己为核节点的共享树 $T(c_j)$, $T(c_j)$ 也可看作是以 c_j 为根覆盖所有 DIA 节点的一棵共享树。

定义 1: 共享树 $T(c_j)$ 的总延时: 从树根 c_j 沿 $T(c_j)$ 中的链路到所有目的 DIA 节点的延时之和,记为 $\text{Delay}_{\text{total}}(T(c_j))$, 即:

$$\text{Delay}_{\text{total}}(T(c_j)) = \sum_{e \in T(c_j)} \text{Delay}(e) \quad (1)$$

定义 2: 共享树 $T(c_j)$ 的总代价: 从树根 c_j 沿 $T(c_j)$ 中的链路到所有目的 DIA 节点的代价之和,记为 $\text{Cost}_{\text{total}}(T(c_j))$, 即:

$$\text{Cost}_{\text{total}}(T(c_j)) = \sum_{e \in T(c_j)} \text{Cost}(e) \quad (2)$$

定义 3: 共享树 $T(c_j)$ 的最大延迟: 从树根 c_j 沿 $T(c_j)$ 中的链路到所有目的 DIA 节点的最大延迟,记为 $\text{Delay}_{\text{tree}}(T(c_j))$, 即:

$$\text{Delay}_{\text{tree}}(T(c_j)) = \max_{v \in V} \sum_{e \in P(c_j, v)} \text{Delay}(e) \quad (3)$$

定义 4: 节点 v_i 选择以 c_j 为核心的共享树作为自己的数据分发树,则节点 v_i 的最大数据分发延迟为 $d(v_i, c_j)$, 即:

$$d(v_i, c_j) = \text{Delay}(v_i, c_j) + \text{Delay}_{\text{tree}}(T(c_j)) \quad (4)$$

定义 5: 节点 v_i 与多共享树核节点 c_j 之间的标志函数为:

$$x(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{节点 } v_i \text{ 选择以 } c_j \text{ 为核节点的共享树作为自己的数据分发树} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(5)

定义 6: 节点 v_i 选择以 c_j 为核心的共享树作为自己的数据分发树, 则节点 v_i 的总数据分发延时为 $D(v_i, c_j)$, 即:

$$D(v_i, c_j) = \text{Delay}(v_i, c_j) + \text{Delay}_{\text{total}}(T(c_j)) \quad (6)$$

则多共享树总的延时为:

$$D_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (D(v_i, c_j) \times x(i, j)) \quad n \text{ 为 DIA 节点总数 } K \in [1, n] \quad (7)$$

定义 7: 节点 v_i 选择以 c_j 为核心的共享树作为自己的数据分发树, 则节点 v_i 的总数据分发代价为 $C(v_i, c_j)$, 即:

$$C(v_i, c_j) = \text{Cost}(v_i, c_j) + \text{Cost}_{\text{total}}(T(c_j)) \quad (8)$$

则多共享树总的代价为:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (C(v_i, c_j) \times x(i, j)) \quad n \text{ 为 DIA 节点总数 } K \in [1, n] \quad (9)$$

优化目标:

(1) 最小化 DIA 数据分发总延时。

$$\min D_{\text{total}} = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (D(v_i, c_j) \times x(i, j)) \right) \quad (10)$$

(2) 最小化 DIA 数据分发总代价。

$$\min C_{\text{total}} = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (C(v_i, c_j) \times x(i, j)) \right) \quad (11)$$

则基于多共享树的 DIA 的全部到全部路由问题的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min D_{\text{total}} & \quad (a) \\ \min C_{\text{total}} & \quad (b) \\ \text{s. t} & \\ d(v_i, c_j) & \leq \Delta \quad (c) \\ \text{Deg}(v_i) & \leq \text{Deg}_{\max}(v_i) \quad (d) \\ \sum_{j=1}^K x(i, j) & = 1 \quad (e) \\ \sum_{i=1}^n x(i, j) & \geq 1 \quad (f) \\ i & \in [1, n] \quad j \in [1, K] \quad (g) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 (a)、(b) 为优化目标, 分别表示最小化 DIA 数据分发总延时和 DIA 数据分发总代价; (c) 表示数据分发延时要小于 DIA 的延时约束; (d) 表示节点的度约束; (e) 表示每个节点只能选择一个共享树作为自己的数据分发树; (f) 表示每个共享树至少被一个节点选作自己的数据分发树; (g) 表示 i 、 j 、 K 的取值范围。基于多共享树的 DARP 模型是一个多目标优化问题。

3 求解 DARP 的禁忌遗传算法 DARP_TGA

3.1 禁忌遗传算法 TGA

禁忌搜索 (tabu search, TS) 由 Glover^[13] 于 1986 年提出, 其核心思想是: 针对局部邻域搜索易陷入局部最优的不足, TS 借助禁忌表记录已得到的局部最优解或求解过程, 在下一次迭代搜索时, 避开禁忌表中的局部最优解, 从而算法跳出局部最优解。TS 最显著的特点是其在搜索最优解的过程中可以接受劣解、收敛速度快、局部搜索能力强; 其缺点是搜索性能过于依赖对邻域结构和初始解, 全局寻优能力不足^[14-16]。因此, TS 搜索算法需要其他算法给出一个较好的初始解, 并改善其全局搜索能力。遗传算法 GA 是基于群体的搜索算法, 其全局寻优能力强, 但局部搜索能力差、易早熟。因此, 这里融合两者, 将禁忌搜索算法引入到遗传算法, 以遗传算法为主进行全局搜索, 再从种群的每个个体开始用禁忌搜索算法进行局部搜索^[14, 17], 并提出基于禁忌遗传算法 TSGA 来求解式 12。

3.2 DARP 问题的禁忌遗传算法 DARP_TGA

DARP_TGA 算法的基本结构如图 1 所示。

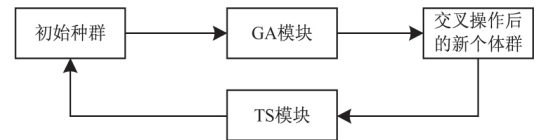


图 1 算法 DARP_TGA 的基本结构

禁忌遗传算法具有禁忌和遗传算法的优点, 能够避免“早熟”现象的发生以及减少 TS 算法的调用次数, 从而加快收敛速度。在 DARP_TGA 中, 遗传算法 GA 的全局搜索能力强, 作为主算法, 把禁忌搜索算法 TS 嵌入到 GA 中。

在每一次遗传算法的迭代中, 都包含一次或多次完整的 TS, GA 早熟的原因主要是由变异操作造成, 因此在 DARP_TGA 中, 用禁忌搜索算法 TS 代替变异操作。

(1) 染色体编码。在 DARP_TGA 算法中, 编码方式为二进制编码, 染色体 x_i 的长度为 n , 即 $x_i = (x_{i0}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 。基因 $x_{ij} \in [0, 1]$ 表示对应的节点 $v_j \in V$ 是否为多共享树的核节点, 如果 v_j 为多共享树的核节点, 则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。设种群规模为 M , 每个个体的向量空间为 n 维。对于第 t 代的种群可表示为 $X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)\}$ 。

(2) 适应度的计算。根据优化目标 D_{total} 和 C_{total} 来构造染色体的适应度函数:

$$f(x_i(t)) = \frac{1}{\alpha D_{\text{total}}(x_i(t)) + \beta C_{\text{total}}(x_i(t))} \quad (13)$$

其中, α 、 β 为调节参数, 通过 α 、 β 可调节优化目标中 D_{total} 、 C_{total} 的比重。

(3) 选择算子。

选择即从当前种群中选择适应值高的个体以生成交配池的过程。这里采用正比选择策略,即每个个体被选中的概率为该个体的适应值和种群中所有个体的适应值总和的比值。种群规模为 M ,则个体 x_i 的被选择概率 $p_s(x_i)$ 为:

$$p_s(x_i) = f(x_i) / \sum_{j=1}^M f(x_j) \quad (14)$$

(4) 交叉算子。

这里采用算术交叉算子。假设第 t 代两个被选中交叉的个体为 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$,则按下式进行交叉操作。

$$\begin{cases} x_i' = \delta x_i + (1 - \delta) x_j \\ x_j' = (1 - \delta) x_i + \delta x_j \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\delta \in (0, 1)$ 为随机数。交叉后得到的子代个体若优于父代,则进入下一代;否则,按交叉概率 p_c 进入下一代。

(5) 禁忌搜索: 对每个交叉后的个体进行禁忌搜索。对于第 t 代种群的个体 $x_i(t)$ 在禁忌搜索时,保存上一代传递下来的禁忌表和最优解。在搜索完成后,更新禁忌表、当前个体和最优解。TS 在实现过程中,特赦准则: 若在一次邻域搜索作用于当前解后,存在一个比以前所有搜索到的个体都要好的解,则满足了特赦准则,打破禁忌,将此个体直接遗传到下一代 $x_i(t+1)$ 中;若当前的子代比以前所有个体适应度差,同时禁忌表中又不存在该个体,则将 $x_i(t)$ 中最好的个体替代下一代 $x_i(t+1)$ 适应度最差的个体遗传到下一代。

(6) 算法终止条件: 采用最大迭代次数 T_{\max} 和适应度值变化程度相结合的方法。给定适当小的数 $\varepsilon > 0$, 设 $f(x_i(t))$ 为第 t 个个体适应度的最大值,对于在连续的 T 代内,有 $|f(x_{i+1}(t)) - f(x_i(t))| < \varepsilon$ 或达到最大迭代系数 T_{\max} ,则终止 TGA 算法,输出结果。

4 实验结果与分析

为了验证 DARP_TGA 算法的有效性,以及分析基于多共享树的全部到全部路由的性能,设计实验环境。利用 Waxman 生成实验中的随机网络拓扑图,节点数目为 500,平均节点的度为 4,链路的可用带宽满足 $[10, 100]$ 上的均匀分布,链路延时服从 $[1, 10]$ 的均匀分布,单位为 ms; 链路的费用符合 $[10, 30]$ 的均匀分布,表示链路的代价。DIA 组成员节点在 500 个节点中随机产生。实验中利用延时度量和代价度量进行性能评价。这里延时度量为所有 DIA 成员节点的 $d(v_i, c_j)$ 平均值与节点基于最短路径树 SPT 将数据发送到其他节点所需延时的比值,其中 $d(v_i, c_j)$ 表示发送数据的 DIA 成员节点 v_i 通过 DARP_TGA 算法确定的多共享树将数据发送到其他 DIA 成员节点的最大延时。

代价度量为所有 DIA 节点的 $C(v_i, c_j)$ 平均值与节点基于最短路径树 SPT 将数据发送到其他节点所需代价的比值,其中 $C(v_i, c_j)$ 表示 DIA 成员节点 v_i 通过 DARP_TGA 算法确定的多共享树将数据发送到其他 DIA 成员节点的数据分发代价。

4.1 DARP_TGA 算法的有效性

在实验中,DIA 组成员节点在上面创建的包含 500 个节点的实验环境中随机产生,这里 DIA 组成员节点规模为 60,DARP_TGA 算法的参数设置如下:最大进化代数 100;初始种群规模 $N=5$;禁忌表长度 10;交叉概率 0.9;变异概率 0.05。取实验运行 20 次的平均值作为最后的实验结果,并对比 DARP_TGA 与标准遗传算法 SGA 的实验结果,如图 2 和图 3 所示。

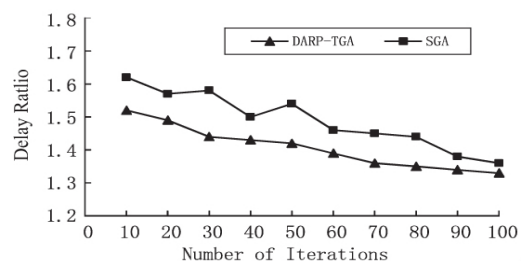


图2 延时比率与进化代数的关系

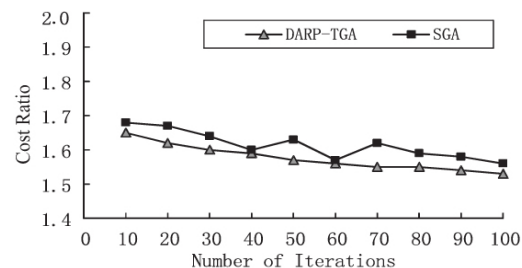


图3 代价比率与进化代数的关系

DARP_TGA 算法的优劣可通过算法的收敛速度以及多共享树数目及其根节点的位置是否最优来体现;而多共享树数目及其根节点的位置是否最优可通过上面介绍的延时度量和代价度量来衡量。从图 2 和图 3 可得出,DARP_TGA 和 SGA 都随进化代数的增加逐渐收敛,DARP_TGA 在 70 代左右基本达到最优解,而且比 SGA 更快地趋于稳定,即收敛速度快。同时,DARP_TGA 求得的多共享树在总延时和代价也明显优于 SGA。其根源在于 DARP_TGA 算法中采用了禁忌操作,不但使得收敛速度更快,而且可以避免 SGA 的早熟。因此,DARP_TGA 求解基于多共享树来研究 DIA 的全部到全部路由问题 DARP 是有效的。

4.2 基于多共享树的 DIA 全部到全部路由性能分析

分析基于多共享树的全部到全部路由算法的性能,即在 DIA 组节点数一定情况下的多共享树数目及其根节点位置对 DIA 数据分发延时和代价的影响。这里 DIA 组成员节点规模为 60。仍旧利用上面介绍的延时度量和代价度量进行性能评价,即利用与最短

路径树 SPT 的比率来评价基于多共享树的 DIA 全部到全部路由的性能。这里需要对式 12 作一些改进,去掉其中的约束条件(c),并把约束条件(g)修改为 $K \in [1, 10]$, $i \in [1, n]$, $j \in [1, K]$;即考查共享树数目从 1 变化到 10, DIA 数据分发延时比率和代价比率变化情况,实验结果如图 4 和图 5 所示。

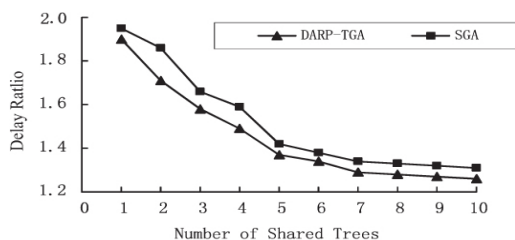


图4 延时比率与共享树数目之间的关系

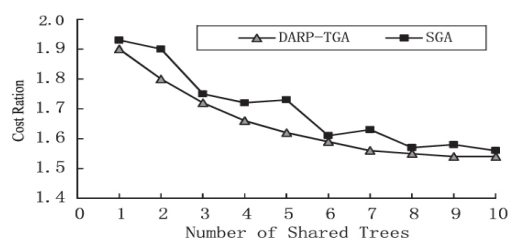


图5 代价比率与共享树数目之间的关系

从图 4 和图 5 可以看出,当共享树的数目增加时,延时和代价都大大减少。这是因为当共享树数目多时, DIA 成员节点将有更大的机会选择靠近它的共享树核节点作为自己的数据分发树,该共享树更接近该 DIA 节点的 SPT 树。但是随着共享树数目的不断增大,延时和代价减少趋势变平缓,实验中的 DIA 组大小为 60 个节点,大约需要 6、7 棵共享树即可,即 DIA 组需要的共享树的数目大约是其组规模的 10%,即可获得相当好的延时比率和代价。综上,只需少量的共享树就可使 DIA 的实时性能接近基于 SPT 的源根树,同时,多共享树并不会带来过多的代价增加。因此,多共享树适用于 DIA 中的全部到全部路由,文中提出的求解基于多共享树的全部到全部路由问题 DARP 的禁忌遗传算法 DARP_TGA 是可行的。

5 结束语

由于 DIA 的全部到全部路由具实时性、高带宽等特点,为每一个需要发送数据的 DIA 节点都以它为根构造一棵数据分发树,费用开销太大,而所有需要发送数据的 DIA 节点都基于单棵共享树进行数据分发树,又会造成流量集中, DIA 延时无法保障。因此,采用多棵共享树来分发 DIA 数据,构造了基于多共享树的 DIA 全部到全部路由问题模型 DARP,并提出了求解 DARP 问题的禁忌遗传算法 DARP_TGA,通过模拟仿真验证了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] 郑晶晶,张晶,武继刚.分布式交互应用中服务器放置问题的启发式算法[J].计算机科学,2015,42(7):95-98.
- [2] ZHANG Lu, TANG Xueyan, HE Bingsheng. Analysis of minimum interaction time for continuous distributed interactive computing [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2017, 28(2): 401-415.
- [3] 刘冬,赵跃龙.实时在线交互应用的体系结构与状态一致性[J].计算机工程与科学,2014,36(3):381-387.
- [4] ZHENG Hanying, TANG Xueyan. Analysis of server provisioning for distributed interactive applications [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(10): 2752-2766.
- [5] 李春洪,叶保留,顾铁成,等.适用于大规模分布式交互仿真的应用层组播研究[J].系统仿真学报,2004,16(6):1271-1274.
- [6] 刘焕淋,岁蒙,邓朗.基于多核点共享树的多源光组播路由方法[J].光子学报,2014,43(2):81-85.
- [7] 张谓,吴慧中.感知驱动的 VST 多源应用层多播问题研究[J].通信学报,2007,28(11):103-110.
- [8] 徐云,鄢冰峰,陈国良.全部到全部组播的核管理机制及其算法研究[J].计算机研究与发展,2008,45(6):923-929.
- [9] 张琨,王珩,刘凤玉.一种时延约束的多共享组播树构造算法[J].南京理工大学学报:自然科学版,2006,30(2):127-131.
- [10] SHIELDS C, ACEVEZ G L. The ordered core based tree protocol [C]//Proceeding of INFOCOM 1997. Kobe, Japan: IEEE, 1997: 884-891.
- [11] ZAPPALA D, FABBRI A, LO V. An evaluation of shared multicast trees with multiple cores [J]. Telecommunication Systems, 2002, 19(3): 461-479.
- [12] TAN Suwei, WATERS G, CRAWFORD J. A multiple shared trees approach for application layer multicasting [C]//IEEE international conference on communications. Paris, France: IEEE, 2004: 1456-1460.
- [13] KORSVIK J E, FAGERHOLT K, LAPORTE G. A tabu search heuristic for ship routing and scheduling [J]. Journal of the Operational Research Society, 2010, 61(4): 594-603.
- [14] 贾兆红,唐俊,卢冰原.基于禁忌遗传算法的权重发现技术[J].计算机技术与发展,2006,16(11):26-27.
- [15] MAK K L, SUN D. A new hybrid genetic algorithm and tabu search method for yard cranes scheduling with inter-crane interference [C]//Proceedings of the world congress on engineering. [s. l.]: [s. n.], 2009: 526-531.
- [16] YOUSSEF H, SAIT S M, ADICHE H. Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14(2): 167-181.
- [17] 单冬红,杨照峰,吕海莲.禁忌遗传算法整定的网络拥塞控制研究[J].计算机仿真,2012,29(10):147-150.