Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 3 Article 52

1-2-2019

A Method of Finding the Shortest Path of Dynamic Networks

Lunwen Wang
1.Electronic Countermeasure Institute of National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
;

Zhang Ling
2.Department of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China;

Abstract

Abstract: We analyze the research status of finding the shortest path of dynamic networks, analyze the complexity of getting the shortest path, study the relationship between the structure of the dynamic networks and finding the shortest path of the dynamic networks. *It is proved that dynamic networks defined by velocity automatically meet weak FIFO's condition. The networks whose passing function of any side is not decreasing function equals dynamic networks which use velocity. The sufficient condition of directly using Dijkstra algorithm to get the shortest path is that the networks must meet weak FIFO's condition*. How to build a dynamic network which can automatically meet FIFO's condition or meet FIFO's equivalent condition is studied, and an algorithm of getting the shortest path of the dynamic networks is given. An example is given to explain the validity of our methods.

Keywords

dynamic networks, the shortest path, first in first out, weak FIFO

第 30 卷第 3 期 系统仿真学报© Vol. 30 No. 3
2018 年 3 月 Journal of System Simulation Mar., 2018

动态网络最短程求解技术研究

王伦文[1]，张铃[2]
(1. 国防科技大学电子对抗学院，合肥 230037；2. 安徽大学计算机学院，合肥 230039)

摘要：分析了动态网络最短程求解的研究现状，研究了动态网络的结构与求解最短程之间的关系。*定义了以速度建模的动态网络，证明其满足弱 FIFO(First In First Out)条件；证明了满足弱 FIFO 的充分必要条件是网络的任一条边的通过函数均是非降函数，通过函数均是非降函数的网络等价于用速度定义的动态网络；证明了动态网络可直接利用 Dijkstra 算法求解最短程的充分条件*；研究了怎样建立满足弱 FIFO 条件或等价条件的动态网络，给出了基于弱 FIFO 动态网络求解最短程的算法，并通过一个典型的例子说明上述方法的有效性.

关键词：动态网络；最短程；先进先出；弱 FIFO
中图分类号：TP18 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2018) 03-1189-06
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803052

A Method of Finding the Shortest Path of Dynamic Networks

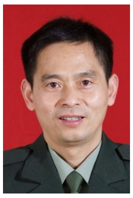
Wang Lunwen[1], *Zhang Ling*[2]
(1. Electronic Countermeasure Institute of National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. Department of Computer Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: We analyze the research status of finding the shortest path of dynamic networks, analyze the complexity of getting the shortest path, study the relationship between the structure of the dynamic networks and finding the shortest path of the dynamic networks. *It is proved that dynamic networks defined by velocity automatically meet weak FIFO's condition. The networks whose passing function of any side is not decreasing function equals dynamic networks which use velocity. The sufficient condition of directly using Dijkstra algorithm to get the shortest path is that the networks must meet weak FIFO's condition*. How to build a dynamic network which can automatically meet FIFO's condition or meet FIFO's equivalent condition is studied, and an algorithm of getting the shortest path of the dynamic networks is given. An example is given to explain the validity of our methods.

Keywords: dynamic networks; the shortest path; first in first out; weak FIFO

引言

网络最短程是指网络中节点对之间最短的路径，是网络分析中最基本的问题之一[1]。最短程分析技术已经在最短程问题在网络拓扑稳定的静态网络中已经得到了较好地解决[2]，不过，近年来随着互联计算机网络通信、智能交通系统、地理信息系统、路径规划等众多领域得到广泛研究[3-6]。网、城市交通网、快递业务网和物流业务网的快速发展，网络拓扑呈现动态化、复杂化，使用原来的方法求解节点对之间的最短程将面临系统负载大和时效性差等难题。故对动态网络环境下求最短程技



收稿日期：2016-03-02 修回日期：2016-07-24;
基金项目：国家自然科学基金(61273302);
作者简介：王伦文(1966-)，男，安徽怀宁，博士，教授，博导，研究方向为数据挖掘和智能信息处理；张铃(1937-)，男，福建福清，本科，教授，博导，研究方向为机器学习。

第 30 卷第 3 期　　系统仿真学报　　Vol. 30 No. 3
2018 年 3 月　　Journal of System Simulation　　Mar., 2018

术成为亟待解决的问题。

研究动态网络中的求最短程问题，最早是 Dreyfus[7]将在静态网络的求最短程算法稍加改造，给出一个求解算法，并认为此法对动态网络也是适用的。可是，后来 Kaufman 等[8]指出文献[7]中所给的方法并不适合所有的情况，他给出一个反例，说明该方法不适合的情况。近年来许多学者对动态网络最短程求解仍进行了广泛的研究，比如：文献[9]针对时变网络提出启发式算法解决节点对的最短路径问题；文献[10]提出基于动态编程的框架和计算时效性的混合路由选择策略，解决网络局部中断时最短程求解问题；文献[11]在权重和拓扑变化的网络中，研究两种方法发现超图中节点对的最短程；文献[12]基于生物启发技术，从"协议与网络的自主适配"研究路由机制的智慧性；文献[13]基于脉冲耦合神经网络使用带宽剩余率指标控制神经元的阈值，调节神经元的点火时间顺序，寻找动态变化网络中节点的最短路径；文献[14]引入图论对卫星网络拓扑演化图建模，应用 Dijkstra 算法计算卫星网络中信息从任意源卫星节点到任意目的卫星节点的最优路径；文献[15]研究了多层建筑物应急疏散问题，以疏散时间最小化为目标，利用动态网络流来计算最短路径，但由于路径容量受限因素太多，设计的模型效率受限。

如果要用 Dijkstra 算法求解最短程问题，首先要对网络进行验证，看看所研究的动态网络是否满足 FIFO 条件。在验证网络是否满足 FIFO 条件时，时间连续情况比时间离散情况要复杂，其难度也许比求解最短程问题还更大。

下面简单分析一下验证 FIFO 条件是否满足的复杂性。设动态网络的节点数为 n，边数为 m，时间的离散个数为 t，则在此动态网络上验证 FIFO 条件满足与否的复杂性至少是 $O(mt^2)$，因为对每条边和每个时间对$(t_1,t_2,t_1<t_2)$，都要验证 FIFO 条件是否成立，故其复杂性至少是 $O(mt^2)$。若时间不是离散的，其复杂性就更大了。

要在动态网络上顺利地利用 Dijkstra 算法进行求解最短程，最好能给出一个方法，以此方法建立的动态网络，能自动地满足 FIFO 条件，这样就给求解动态最短程提供一个非常方便的条件。本文将讨论动态网络的结构，研究如何建立动态网络能自动满足 FIFO 条件或其等价条件，以便能直接利用 Dijkstra 算法求解最短程。

1　满足弱 FIFO 条件的动态网络的建立

不妨以交通网络为例进行讨论，可以设车速不变，而网络的边的长度是时间的函数，来建立动态网络。也可以以网络中边的长度不变，而通过边上的车速随时间变化来建立动态网络模型。我们觉得第二种方法更直观也更切合实际。本文就是在此基础上，建立动态网络模型，并在其上讨论求解最短程的算法。在讨论之前，先将 FIFO 条件弱化，定义弱 FIFO 条件。

定义 1：若动态网络的一条边 (v_1,v_2)，任给时刻 $t_1<t_2$，设在 $t_1(t_2)$ 从 v_1 出发在 $t_3(t_4)$ 到达 v_2 点，则 $t_3\leqslant t_4$，称该边满足弱 FIFO 条件，若网络的每条边均满足弱 FIFO 条件，则称该网络满足弱 FIFO 条件。

下面讨论交通网络利用变车速来建立的动态网络模型，并证明所得的模型满足弱 FIFO 条件。

定义 2：给定一动态交通网络 $G(V,E,f_e(x,t))$，其中 $f_e(x,t)$，$x\in e$ 表示边 e 上 x 处在 t 时刻的车速，其值由 (x,t) 唯一确定的，且是 (x,t) 的连续函数。则称该网络为以速度建模的动态(交通)网络。

则有下面定理成立。

定理 1：以速度建立的动态网络 $G(V,E,f_e(x,t))$，满足弱 FIFO 条件。

证明：用反证明法，设弱 FIFO 条件不满足，于是存在边 e，时刻 $t_1<t_2$，存在一个车辆甲，在 t_1 时刻进入边 e，在 t_3 时刻从 e 的另一端点出，和车辆乙在 t_2 时刻时刻进入边 e，在 $t_4(t_4<t_3)$ 时刻从 e 的另一端点出。于是存在 $x_0\in e$ 点，甲、乙两车相遇，设相遇时的时刻为 t_0，这时两车的速度均为

$f_e(x_0,t_0)$ (由于速度是由 (x,t) 唯一确定)。之后两车以同一速度前进，故同时从 e 的另一端出去，这与 $t_4<t_3$ 矛盾。定理得证。

动态网络模型，也可以以下面的形式给出。

定义 3：给定网络 $G(V,E)$，对任一边 e 和给定时刻 t_1，存在唯一的时刻 t_2，满足：设车辆在 t_1 时刻进入边 e，则在 t_2 时刻从 e 的另一端出去，记 $t_2=T_e(t_1)$。且 $T_e(t)$ 是 t 的函数，称 $T_e(t)$ 为边 e 的通过函数。

每条边均有一通过函数 $T_e(t)$。这样建立的动态网络称为以通过函数建模的动态网络。

命题 1：以速度建模的动态网络，则其任一边的通过函数 $T_e(t)$ 是 t 的非降函数。

证：反证，设存在边 e 和 $t_1<t_2$，而 $T_e(t_1)>T_e(t_2)$。故存在 $t^*\leqslant T^*(t_2)$。

因为 $\int_{t_1}^{t^*} f_e(x,t)\mathrm{d}t=\int_{t_2}^{t^*} f_e(x,t)\mathrm{d}t$，所以

$$\int_{t_1}^{T(t_2)} f_e(x,t)\mathrm{d}t=\int_{t_1}^{t^*} f_e(x,t)+\int_{t^*}^{T(t_2)} f_e(x,t)\mathrm{d}t=$$

$$\int_{t_2}^{t^*} f_e(x,t)\mathrm{d}t+\int_{t^*}^{T(t_2)} f_e(x,t)\mathrm{d}t=\int_{t_2}^{T(t_2)} f_e(x,t)\mathrm{d}t,$$

得 $T_e(t_1)=T_e(t_2)$，与 $T_e(t_1)>T_e(t_2)$ 相矛盾。证毕。

命题 2：若一动态网络，对其任一边所定义的通过函数均是非降函数，则动态网络满足弱 FIFO 条件。

证明略。

命题 3：满足弱 FIFO 条件的网络，其任一边的通过函数必是非降函数。

证：反证，不然，设存在一条边的通过函数不是非降函数，即存在 $t_1<t_2$，$T(t_1)>T(t_2)$，即网络存在先进($t_1<t_2$)，后出($T(t_1)>T(t_2)$)，矛盾。

上面我们讨论了一个满足弱 FIFO 条件的网络，可以用具有非降通过函数来描述。下面我们将证明，具有非降通过函数网络也可以用速度网络来建模，即两者是等价的。

定理 2：具有非降通过函数网络，等价于速度建模的动态网络，但这种对应不是一一的。

证：设给定一个具有非降通过函数网络 $G(V,E,T_e(t))$，任取一条边 e，及其对应的通过函数 $T_e(t)$，下面证明可在 e 上定义一速度 $v(t)$，利用这个速度计算的通过函数恰好是 $T_e(t)$。

为证明简单起见，不妨设时间是离散的，将时间分为 k 个段，设为 $t=1,2,\cdots,n,\cdots,k$，其对应的通过函数为：$T_e(i)=k_i, i=1,\cdots,n, k_i<k_j, i<j$，再设 e 的长度为 l，设在各个段上的速度为常数，记为 $v(i), i=1,\cdots n,\cdots$

其中由通过函数是非降的条件，得 $k_i\leqslant k_j, i<j$，按通过函数的定义有：

$$\left.\begin{array}{l} v(1)+\ldots+v(k_1)=l \\ v(2)+\ldots+v(k_2)=l \\ \ldots\ldots \\ v(n-1)+\ldots+v(k_{n-1})=l \\ v(n)+\ldots+v(k_n)=l \end{array}\right\} \tag{1}$$

方程(1)中有 $k_n(>n)$ 个变量，只有 n 个等式，故其解不是唯一的。

令 $k_n-n-1=s$，我们可以取

$$v_{n+1}=v_{n+2}=\ldots=v_{k_{n-1}}\ldots=v_{k_n}=l/s \tag{2}$$

代入方程(1)，求出其一个解，并证明此解 $v(i)\geqslant 0$, $i=1,2,\cdots,k_n$。

将(2)式代入 $v(n)+\cdots+v(k_n)=l$，得 $v(n)=l/s\geqslant 0$。

用归纳法，设 $v(i)\geqslant 0$，$i>k$，下证 $v(k)>0$。

由 $v(k+1)+\cdots+v(k_{k+1})=l$，得

$v(k+1)+\ldots+v(k_k)\le v(k+1)+\ldots+v(k_{k+1})=l$，

$v(k)+v(k+1)+\ldots+v(k_k)=l$，

$v(k)=l-v(k+1)-\ldots-v(k_k)\ge 0$

由归纳法得：

$v(1),v(2),\cdots,v(n),\cdots,v(k_n)\geqslant 0$。证毕。

易得用求到的速度 $v(1)$, $v(2)$,⋯, $v(n)$,..., $v(k_n)$ 求边 e 上的通过函数，得其解为 $T_e(t)$。换句话说，一个具有非降通过函数的网络等价于一个用速度建模的网络。

综合以上的叙述，我们有下面定理成立。

定理 3：下面的条件是等价的：

第 30 卷第 3 期 系统仿真学报 Vol. 30 No. 3
2018 年 3 月 Journal of System Simulation Mar., 2018

(1) 动态网络可用速度进行建模；

(2) 动态网络 G 满足弱 FIFO 条件；

(3) 动态网络的每条边的通过函数是非降函数。

证：由定理 1 得 1)→2)；

由命题 3 得 2)→3)；

由定理 2 得 3)→1)。

注：以上三个条件，在计算时用通过函数描述网络是最方便的。而用速度的网络验证其满足弱 FIFO 条件最方便。

下一节我们将证明满足弱 FIFO 网络可直接用 Dijkstra 算法求解最短程问题，也就是说速度建模的动态网络可以直接用 Dijkstra 算法求解最短程问题。

2 满足弱FIFO动态网络上求最短程的算法

2.1 求最短程算法

上面我们分析了动态网络的结构，给出 3 种等价的结构(指以速度建模的动态网络、以函数建模的动态网络及满足弱 FIFO 条件网络)，下面我们将证明在上述的动态网络中可以直接用 Dijkstra 算法求最短程问题。对应的算法可描述如下：

Dijkstra 算法(只要将原先的算法中距离改成通过的时间即可)如下：

给定动态网络 G，起点 p_1 和终点 q 和时刻 t_0，求 t_0 时刻由 p_1 到 q 的最短程(通过的时间最短)。

(1) 给顶点 v_1，标 P 标号 $d(v_1)=t_0$，给顶点 $v_j, j=2,\cdots$，标 T 标号 $d(v_j)$=t_{1j}；其中 (v_1,v_j) 是 G 中的边，t_{1j} 是 t_0 从 v_1 点进 t_{1j} 从 v_j 点出的时间。

(2) 在所有 T 有标号的顶点中取最小值，如 $d(v_{j0})=t_{1j_0}$，则把 v_{j0} 的 T 标号改为 P 标号，并重新计算具有 T 标号的其它各顶点的 T 标号，选顶点 v_j 的 T 标号 $d(v_j)$ 与 $d(v_j)+t_{j_0 j}$ 较小者为 v_j 的 T 标号，即设 $P=\{v_j \,|v_j具有P标号\}$，$T=T/P$ 。

若 $d(v_k)=\min\limits_{v_j\in T}\{d(v_j)\}$，则 $d(v_k)$ 改记为顶点 v_k 的 P 标号，于是 $v_k\in P$，把 $T/\{v_k\}$ 中的顶点的 T 标号修改为：

$\min\{d(v_j),d(v_k)+t_{kj}\}$，其中 t_{kj} 为由 $d(v_k)$ 从 v_k 到 v_j 的时间。

(3) 重复上步骤(2)，直到 $q\in P$，这时 $d(q)$，就是从 p_1 到 q 的最短时间。

注：从算法可以看出若动态网络是以通过函数给出时，则算法中除增加计算：“t_{1j} 是 t_0 从 v_1 点进 t_{1j} 从 v_j 点出的时间”外，没有增加新的计算量，故其时效性与一般的 Dijkstra 算法相当。

定理 4：若动态网络满足弱 FIFO 条件，则可以直接用 Dijkstra 算法，求最短程(时间最短)。

证：给定时刻 t_0 和起始点 p,q，按算法对顶点进行 P,T 标号，下证当节点 $v\in P$ 时，则 $d(v)$ 是由 p 到 v 的最短时间。

用归纳法证明之，对 p 结论显然成立，现设 $v\in P$，则 v 向前沿边 (v,u) 传播到 u 点，并标上 T 标号 $d(u)$，那么，由 p 到达 v，再由 v 沿 (v,u) 到达 u 的时刻 $d'(u)\geqslant d(u)$，因为，不管由 p 沿什么路径到达 v 的时刻 $d'(v)\geqslant d(v)$ (归纳假设)，又因为网络满足弱FIFO条件。于是由 p 到达 v，再由 v 沿 (v,u) 到达 u 的时刻 $d'(u)\geqslant d(u)$ 。

其次证，当 $u\in P$ 标号集时，$d(u)$ 是由 p 到达 u 的最短时间，不然，存在另一条路径 $l=(p=v_0, v_1,v_2,\cdots,v_k=u)$，沿此路径到达 u 的时刻 $d'(u)< d(u)$，设此时 l 上最后一个已标号的节点为 v_i，若 $v_i\in T$，则由网络满足弱 FIFO 条件得沿此路径到达 u 的时刻 $d'(u)>d(v_i)\geqslant d(u)$，矛盾，故最后标号的节点必属于 P 标号集，故有 $d(u)\leqslant d(v_i)\leqslant d'(u)$，矛盾。故 $d'(u)\geqslant d(u)$ 。

最后由归纳法得。当 $q\in P$ 标号集时，$d(q)$ 是由 p 到 q 的最短时间。证毕。

2.2 例 1

下面举一个例子说明求解的方法。图 1 给定网络与通过函数 $T_1(t)$=t^2+2，$T_2(t)$=t^2+1，$T_3(t)=2t+1$，$T_4(t)=t+2$，$T_5(t)=T_6(t)=t+3$，$T_7(t)=t^2+1$，$T_8(t)=4t+2$，求 $t_0=0$ 和 1，由 a 点到点 f 的最短

时间路径。

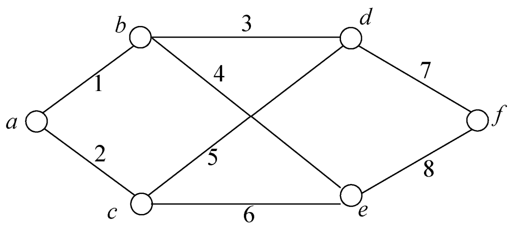


图 1　例 1 对应的动态网络
Fig. 1　Dynamic networks of Example1

解：先检查网络是否满足弱 FIFO 条件，对各 $T(t)$ 求导数得：

$T_1'(t)=2t, T_2'(t)=2t, T'_3(t)=2, T_4'(t)=1, T_5'(t)=T_6'(t)=1, T_7'(t)=2t$，$T_8'(t)=4$ 得导数均为正，故各通过函数都是增函数，由命题 1 得该网络满足弱 FIFO 条件，故可用 Dijkstra 算法，求其最短程，求解结果如下：。

当 $t_0=0$ 时，最后得最短程 $a\to c\to d\to f$ (图 2 中所示)。当 $t_0=1$ 时，最短程 $a\to c\to e\to f$ 或 $a\to b\to e\to f$ (图 3 中所示)。

(3) 动态网络的每条边的通过函数是非降函数

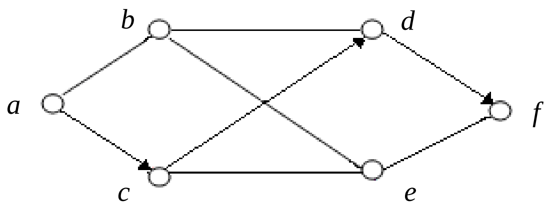


图 2　t_0=0 时最短程对应网络
Fig. 2　The networks of the shortest path when t_0=0

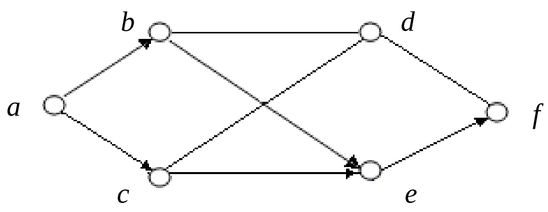


图 3　t_0=1 时最短程对应网络
Fig. 3　The networks of the shortest path when t_0=1

这说明，在动态网络中最短程一般不是一成不变的，随时间变化同一起点和终点的最短程是可以变化的。

这例子也说明，利用边的通过函数来描述动态网络比用其他模型在求最短程时更方便。因为按定理 3 的结论(3)动态网络的每条边的通过函数是非降函数时，网络就满足弱 FIFO 条件。故当动态网络以边函数表示时，只要证明各边函数的导数是非负的即可。

3　结论

本文在 Dijkstra 算法基础上，定义了弱 FIFO 条件，以此为基础讨论了动态网络上求最短程的问题，主要研究求解最短程与网络结构的关系，通过证明得到下面的三种网络等价的结论：(1) 所有通过函数是非降函数的动态网络；(2) 用速度建模的动态网络；(3) 满足弱 FIFO 条件的动态网络。本文还证明了满足 FIFO 条件的动态网络可直接用 Dijkstra 算法求解最短程。

由于交通网络对应的动态网络很容易用速度来定义，根据本文的结论这样定义的交通动态网络能自动满足弱 FIFO 条件，因此可以直接利用 Dijkstra 算法求解最短程问题。故本文的结论对动态交通网络的分析有一定意义。

参考文献：

[1] Gianlorenzo D'Angelo, Mattia D'Emidio, Daniele Frigioni. A Loop-free Shortest-path Routing Algorithm for Dynamic Networks [J]. Theoretical Computer Science (S0304-39), 2014(516): 1-19

[2] Yi-zhou Chen, Shi-fei Shen, Tao Chen, et al. Path Optimization Study for Vehicles Evacuation Based on Dijkstra Algorithm [J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2014(71): 159-165.

[3] Jinha Kim, Wook-Shin Han, Jinoh Oh, et al. Processing Time-dependent Shortest Path Queries without Pre-computed Speed Information on Road Networks [J]. Information Sciences (S0020-0255), 2014 (255): 135-154.

[4] Andrei Lissovoi, Carsten Witt. Runtime Analysis of Ant Colony Optimization on Dynamic Shortest Path Problems [J]. Theoretical Computer Science (S0304-3975), 2015(561): 1605-1612.

[5] Guisong Liu, Zhao Qiu, Hong Qun, et al. Computing k

Shortest Paths Using Modified Pulse-coupled Neuralnetwork [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2015 (149): 1162-1176.

[6] Justin Yates, Sujeevraja Sanjeevi. A Length-based Multiple-resource Formulation for Shortest Path Network Interdiction Problems in the Transportation Sector [J]. International Journal of critical infrastructure protection(S1874-5482), 2013, 6(2):107-119.

[7] Dreyfus S E. An Appraisal of Some Shortest Path Algorithms [J]. Operations Research(S1109-2858), 1969, 17(3): 395-412.

[8] Kaufman D E, Smith R L. Fastest Path in Time-dependent Networks for Intelligent Vehicle-highway Systems Application [J]. IVHS Journal (S1547-2442), 1993, 11(1): 1-11.

[9] Liang Wen, Bülent Catay, Richard Eglese. Finding a Minimum Cost Path between a Pair of Nodes in a Time-varying Road Network with a Congestion Charge [J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2014 (236): 915-923.

[10] Derya Sever, Nico Dellaert, Tom van Woensel, et al. Dynamic shortest path problems: Hybrid Routing Policies Considering Network Disruptions [J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2013, 40(12): 2852-2863.

[11] Jianhang Gao, Qing Zhao. Dynamic Shortest Path Algorithms for Hypergraphs [C/OL]//IEEE ACM Transactions on Networking, 2015. http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

[12] 张明川. 生物启发的智慧路由机制与协议研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
Mingchuan Zhang. Research on Bio-inspried Smart Routing Mechanism and Protocols[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.

[13] 郑皓天. 基于带宽剩余率的脉冲耦合神经网络最短路径搜索[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
Zheng Haotian. The search of the shortest path based on the pulse coupled neural network [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.

[14] 王宇鹏. 基于分时隙通信的卫星网络路由算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
Wang Yupeng. Routing Algorithm Research of Satellite Network Based on Timeslot Communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.

[15] 杨建芳, 高岩, 王宏杰. 多层建筑物应急疏散模型和算法[J]. 系统仿真学报, 2014, 16(2): 267-273.
Yang Jianfang, Gao Yan, Wang Hongjie. Multi-storied Building Emergency Evacuation Model and Algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2014, 16(2): 267-273.

(上接第 1188 页)

[18] Mishra S, Mondal S, Saha S. Improved solution to the non-domination level update problem[J]. Applied Soft Computing(S1568-4946), 2015, 8(1): 1-18.

[19] Wang H, Zhang Q, Jiao L. Regularity model for noisy multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics(S1083-4419), 2015, 8(99): 1-13.

[20] Tang S, Cai Z, Zheng J. A Fast method of constructing the non-dominated set: Arena's Principle[C]// The 4th International Conference on Natural Computation, Jinan, 2008: 391-395.

[21] Mcclymont K, Keedwell E. Deductive sort and climbing sort: new methods for non-dominated sorting[J]. Evolutionary Computation(S1063-6560), 2012, 20(1): 1-26.

[22] Bandyopadhyay S, Bhattacharya R. Solving multi-objective parallel machine scheduling problem by a modified NSGA-II[J]. Applied Mathematical Modelling (S0307-904X), 2013, 37(10): 6718-6729.

[23] 张红菊, 乐美龙. 基于多目标粒子群算法的泊位-岸桥分配研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 59-64.
Zhang H J, Le L M. Research on container berth-quay crane allocation based on multi-objective PSO[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(2): 59-64.

[24] 杨春霞, 王诺. 基于多目标遗传算法的集装箱码头的泊位岸桥分配问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1720-1722.
Yang C X, Wang N. Berth-quay crane allocation in container terminal based on multi-objective genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1720-1722.

[25] Zitzler E. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications[D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss3/52
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803052