

文章编号: 1001-0920(2013)07-0997-05

带有费用折扣的多任务第4方物流路径优化问题

黄敏, 崔妍, 林婉婷, 任亮

(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 针对第4方物流路径问题的特点, 并考虑实际运输过程中的费用折扣因素, 提出了基于多任务并对费用给出一定折扣的第4方物流路径问题的数学模型. 针对第4方物流选择路径过程需同时选择第3方物流供应商的特点, 采用蚁群算法和动态调整选择策略的改进蚁群算法分别对其进行求解. 实例结果表明, 所提出的算法对解决此类问题是行之有效的.

关键词: 第4方物流; 费用折扣; 路径优化; 蚁群算法; 改进蚁群算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Multi-task fourth party logistics routing problem with cost discount

HUANG Min, CUI Yan, LIN Wan-ting, REN Liang

(a. College of Information Science and Engineering, b. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: CUI Yan, E-mail: slccyy@163.com)

Abstract: From the viewpoint of the fourth party logistics routing problem(4PLRP) and the cost discount factor in the transportation, a multi-task 4PLRP with cost discount is modeled. Considering the 4PLRP's chosen process coincided with the third party logistics' selection, an ant colony algorithm and an ant colony algorithm with dynamic transition probability are respectively used to solve the problem. Experimental results show the effectiveness of the proposed algorithms.

Key words: fourth party logistics(4PL); cost discount; routing problem; ant colony algorithm; improved ant colony algorithm

0 引言

20世纪90年代,许多企业为了集中优势于自己的核心业务,逐渐将其管理的部分或全部物流外包给专业的物流公司.然而,对于许多综合性企业而言,由于生产的产品总类多、产地分散,需求商遍布世界各地,往往需要与几个物流公司同时合作才能完成一项任务,因此企业对物流公司供应链的整合能力要求越来越高.正是在这种情况下,提出了以供应链集成、第3方物流(3PL)供应商与信息产业提供商的选择为核心任务的第4方物流(4PL)这一概念^[1].

在4PL中,路径优化是关键问题之一.第4方物流路径问题(4PLRP)是基本路径问题与代理商选择问题的综合.3PL供应商选择问题是4PLRP中的重要组成部分,也是4PL与3PL优化过程中的一个巨大的

区别所在.因此,4PLRP中3PL供应商的选择优化不仅仅停留在对3PL供应商的整体评价上,它还应与路径的选择结合在一起进行考虑.

近年来,国内外学者对4PLRP进行了研究.陈建清等^[2]在考虑物流能力和供应商评价的基础上,利用多维有向图模型研究了4PL的工作原理.Chen等^[3]对4PLRP中的指派问题进行了分析,建立了该问题的模糊目标模型.姚建明^[4]从系统量化角度对4PL模式下的供应链整合决策问题进行了分析,搭建了4PL模式下供应链资源整合的基本运作框架.Cui等^[5]基于多重图建立了带有模糊处理时间的4PLRP的机会约束规划模型,并为其设计了嵌入K-短路算法的遗传算法.王勇等^[6]在综合考虑代理商选择和线路优化基础上,建立了基于图状结构的面向4PL的多代理人作业

收稿日期: 2012-07-06; 修回日期: 2012-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71071028, 70931001, 71021061, 61070162); 国家杰出青年科学基金项目(61225012); 高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域课题(20120042130003); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20110042110024, 20100042110025); 工信部物联网发展专项资金项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N110204003, N120104001).

作者简介: 黄敏(1968—),女,教授,博士生导师,从事物流优化及供应链等研究; 崔妍(1982—),女,博士生,从事物流优化及智能优化算法的研究.

整合优化模型,并提出了两层邻域搜索算法进行求解.以上研究为 4PLRP 的研究奠定了坚实的基础,但上述文献针对的均是单任务的情况,在现实生活中,一直存在将多种商品(比如食品和玻璃器皿)从某一总的集散地发往同一零售商的情形(供需地相同,但由于运输的商品对运输时间、条件等的要求不同而不能看作同一任务发货).对 3PL 而言,是否有能力接受多个运输任务是 4PL 需要决策的问题.另外,为了增强竞争能力,运输商常常对多种货物运输给予一定的费用折扣.本文正是在考虑上述两点的基础上,提出了带有费用折扣的多任务 4PLRP(M-4PLRPC).针对该问题,在考虑路径选择的同时仍需考虑 3PL 供应商选择的特点,采用蚁群算法和动态调整选择策略的改进蚁群算法对模型进行求解.

1 问题描述

假设现有几类对运输条件(运输时间、运输工具和安全保障等)要求不同的货物需要从供应点 V_s 运到需求点 V_t .途中可能经过供应链中的仓库、加工工厂、组装工厂或销售点,这些节点具有费用和时间属性.任意两点之间有多个 3PL 供应商有能力承担运输任务,但他们运输的费用、时间、承载能力和信誉不同.对于这样的问题,可以采用多重图 G 表示.其中 $p_{ik} = \frac{\tau_{ik}^\alpha \cdot \eta_{ik}^\beta \cdot \delta_{ik}}{\sum_{k \in \text{allowed}_i} \tau_{ik}^\alpha \cdot \eta_{ik}^\beta \cdot \delta_{ik}}$ ($|V| = n$) 是结点的集合, $\delta_{ik} = \frac{m \cdot g}{m \cdot g + \gamma \cdot Q_{ik} \cdot \eta_{ik} / \max \eta}$ 是边的集合.假设 3PL 供应商在运载能力允许的情况下可以承担多个任务,而且不同的 3PL 供应商可以根据自身的能力对相同数目的任务给出不同的折扣.

下面对模型参数进行定义:

γ_{ij} 表示 i, j 两点间边的数量; e_{ijk} 表示点 i 到点 j 第 k 个 3PL 供应商(第 k 条边, $k = 1, 2, \dots, r_{ij}$); C_{ijkl} , T_{ijkl} , P_{ijk} , A_{ijk} 分别代表点 i 与点 j 之间的第 k 个 3PL 供应商承担运输任务 l 时所需要的运输费用、时间、可以提供的运载能力和信誉指标; C'_{jl} , T'_{jl} 分别表示任务 l 经过结点 i 时产生的费用以及所停留的时间.考虑到点表示仓库或者城市,相对于运输工具,一般具有较大的能力和信誉指标,这里假设点的承载能力和信誉指标满足所有用户要求,即只考虑费用和时间两个属性.

定义决策变量如下:

$$y_{ijk}^l = \begin{cases} 1, & \text{运输任务 } l \text{ 时, } e_{ijk} \text{ 负责运输任务;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$v_i^l = \begin{cases} 1, & \text{运输任务 } l \text{ 时, } i \text{ 承担转运任务;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

折扣函数定义为

$$\beta_{ijk} = \max \left(1 - \mu \left[\sum_{l=1}^m y_{ijkl} - 1 \right]^+, \beta^* \right). \quad (1)$$

其中: μ 为折扣因子, β^* 为最低折扣.折扣含义为 3PL 供应商在满足其最低折扣(百分比)的基础上,根据自身承担任务的数量给出相应的折扣优惠策略,当折扣值低于最低折扣(百分比)时,按照最低折扣计算.

从函数的定义易知,这样定义的函数能够很好地表示现实中运输商根据所承担的任务数量提供优惠且承担任务越多优惠程度越大的情况.同时,函数的定义相对简单,易于进行算法设计和程序处理.

建立的数学模型如下:

$$\min \left[\sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} C_{ijkl} \beta_{ijk} y_{ijk}^l + \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n C'_{jl} v_j^l \right]. \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} T_{ijkl} y_{ijk}^l + \sum_{j=1}^n T'_{jl} v_j^l \leq T_l, \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^m E_l y_{ijk}^l \leq P_{ijk}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, r_{ij}; \quad (4)$$

$$F_l y_{ijk}^l \leq A_{ijk}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, r_{ij}, \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} y_{ijk}^l = v_j^l, \quad j = 2, 3, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} y_{ijk}^l = v_i^l, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad l = 1, 2, \dots, m; \quad (7)$$

$$y_{ijk}^l, v_i^l = 0 \text{ or } 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, r_{ij}, \quad l = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

其中:式(2)为目标函数,表示总的运输成本;式(3)表示运输任务所需的时间不大于客户要求的时间 T_l ;式(4)表示选择的 3PL 供应商的能力不小于承担的任务要求的能力 E_l 之和;式(5)表明选择的 3PL 供应商的信誉指标不低于客户对相应边要求的信誉能力 F_l ;式(6)和(7)表示选择的点是从起点到终点的通路;式(8)表示 y_{ijk}^l 和 v_i^l 为模型的 0-1 决策变量.

2 算法设计

下面分别介绍用于求解上述问题的蚁群算法(ACO),具有动态调整选择策略的改进蚁群算法(DACO)以及用于测试的枚举算法.

2.1 蚁群算法

蚁群算法是由意大利学者 Dorigo 等于 20 世纪 90 年代初期通过模拟自然界中蚂蚁群体寻径的行为而提出的一种基于种群的启发式仿生进化算法^[7]. 由于它具有较强的鲁棒性、优良的分式计算机制、易于与其他方法结合等优点, 在过去的 10 余年中该算法已成为国际智能计算领域关注的热点和前沿课题, 并被广泛应用于各个领域^[8-11].

2.1.1 编码机制

与其他基于种群算法一样, ACO 首先需要对解进行编码, 然后按照算法实现步骤进行计算. 本文设计了双列变长编码机制的编码方式, 每个解包含两个部分, 分别对应路径中的节点和边. $path_l(l=1, 2, \dots, m)$ 表示当需要运输任务 l 时途经的节点集, 即 $path_l = \{v_o^l | 0 = 1, 2, \dots, O\}$. 每个节点 v_o^l 具有费用和时间属性, 其中 v_o^l 表示当需要运输任务 l 时经过的第 o 个节点. $PL_l(l=1, 2, \dots, m)$ 表示当需要运输任务 l 时使用的 3PL 供应商(边)的集合, 即 $PL_l = \{e_{o(o+1)k_o}^l | o = 1, 2, \dots, O-1\}$. 每条边 $e_{o(o+1)k_o}^l$ 也具有费用、时间、承载能力和信誉指标 4 个属性, 其中 $e_{o(o+1)k_o}^l$ 表示当需要由点 o 运输到点 $o+1$ 运输任务 l 时, 由两者之间的 3PL 供应商 $k_o(k_o$ 表示路径上选择的第 o 个 3PL 供应商)负责该段运输任务.

双列变长的编码结构构成了本算法的个体. 显然, 点的随机组合不一定构成一条从起点到终点的通路, 即可能存在不可行解. 为了避免不可行解, 在初始化解过程中本文利用图的邻接矩阵表示图中点和边的关系, 具体过程如下.

2.1.2 可行解的构造

可行解是在多重图 G 中生成的. 设 $D = (d_{ij})_{n \times n}$ 为 G 的邻接矩阵, 当需要运输任务 $l(l=1, 2, \dots, m)$ 时, 从始点 v_1^l 出发计算在点 v_1^l 处理完成后的时间, 求出所有满足能力和信誉指标要求的边的个数, 按照转移策略(见 2.1.4)选取一个作为通往第 2 节点的边. 将该边的终点作为第 2 个节点 v_2^l , 通往节点 v_2^l 的边作为 $e_{v_1^l v_2^l k_1}^l$. 令

$$P_{ijk} := P_{ijk} - E_{lv_1^l v_2^l f_{v_1^l v_2^l}}, D := D - D(:, d_{v_1^l v_2^l}).$$

重复此过程, 直到选择的点 $v_o^l(o=2, 3, \dots, O)$ 为终点. 重复此过程 m 次, 生成一个初始个体. 计算 m 条路径的总费用及各条路径使用的时间.

2.1.3 评价函数

评价函数一般是根据目标函数和约束条件制定的. 本文将时间约束作为一个罚函数加入到目标函数中, 其形式为

$$\sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} C_{ijkl} \beta_{ijk} y_{ijk}^l + \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n C'_{jl} v_j^l + \beta \cdot \max \left(0, T_l - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} T_{ijkl} y_{ijk}^l - \sum_{j=1}^n T'_{jl} v_j^l \right). \quad (9)$$

其中: β 为惩罚系数, $\beta \geq 1$, 它的取值由具体问题而定.

2.1.4 转移策略

在 M-4PLRPC 中, 蚂蚁在进行节点选择时需确定它的可行点集. 设循环代数为 N_G , $\tau_{ijk}^l(N_G)$ 表示第 $N_G(N_G = 1, 2, \dots, N_G)$ 代个体需要运输任务 l 时点 i 到点 j 第 k 个 3PL 供应商对应的信息素启发信息, $\eta_{ijk}^l(N_G)$ 表示第 N_G 代需运输任务 l 时点 i 到点 j 第 k 个 3PL 供应商对应的路径启发信息(取边费用的倒数). $\tau_{ijk}^l(N_G + 1) = \rho \tau_{ijk}^l(N_G) + \Delta \tau_{ijk}^l(N_G)$, $\tau_{ijk}^l(1)$ 表示运输任务 l 时点 i 到点 j 符合条件的边总数的倒数.

$$\Delta \tau_{ijk}^l(N_G) = \begin{cases} \frac{Q}{Q'}, & y_{ijk}^l = l; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

其中

$$Q' = \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} C_{ijkl} \beta_{ijk} y_{ijk}^l + \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^n C'_{jl} v_j^l, \forall l \in \{1, 2, \dots, m\},$$

ρ 为信息素挥发系数, Q 为常量. 于是, 第 N_G 代个体运输任务 l 时, 点 i 与点 j 之间第 k 个 3PL 供应商的转移概率为

$$p_{ijk}^l(N_G) = \frac{[\tau_{ijk}^l(N_G)]^{\gamma_1} [\eta_{ijk}^l(N_G)]^{\gamma_2}}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} [\tau_{ijk}^l(N_G)]^{\gamma_1} [\eta_{ijk}^l(N_G)]^{\gamma_2}}. \quad (10)$$

其中: $l=1, 2, \dots, m$; γ_1 表示控制信息素浓度的系数; γ_2 表示路径的相对重要程度的系数.

2.2 动态调整选择策略的改进蚁群算法

由于本文在构造解的过程中利用了随机选择策略, 使得蚁群算法进化速度较慢, 容易出现停滞现象. 针对这一问题, 本文在确定性选择和随机选择相结合的基础上, 通过调整搜索过程中的动态转移概率构建了更利于全局搜索的选择策略^[7].

改进后的选择策略为

$$p_{ijk}^l(N_G) = \frac{\tau_{ijk}^{\alpha} \eta_{ijk}^{\beta} \gamma_{ijk}^l}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ij}} \tau_{ijk}^{\alpha} \eta_{ijk}^{\beta} \gamma_{ijk}^l}, \quad (11)$$

$$\gamma_{ijk}^l = \frac{M \cdot N_G}{M \cdot N_G + \delta \cdot Q q_{ijk}^l \eta_{ijk}^l / \max\{\eta_{ijk}^l\}}. \quad (12)$$

其中: M 为蚂蚁个数, $\max\{\eta_{ijk}^l\}$ 代表启发函数 η_{ijk}^l 的最大值, δ 表示选择策略调节系数, $Q q_{ijk}^l$ 为从第 1

次迭代开始, 目前经过此路段累计的蚂蚁总数. γ_{ijk}^l 同时考虑了参数 η_{ijk}^l 和 Qq_{ijk}^l , 当迭代前期趋向次优解时, 虽然次优解上的信息素不断增强、蚂蚁个数 Qq_{ijk}^l 不断增大, 但 η_{ijk}^l 值不断减小. 这样, 在选择路径时可以抑制信息素过度剧增而导致过早收敛, 有利于算法的全局搜索.

2.3 枚举算法

枚举算法也称穷举法. 该算法的基本思想是将满足问题约束的所有解一一枚举出来, 通过对比找到最优的一个解.

枚举算法的特点在于遍历所有解空间, 所以一定能找到该问题的最优解, 但也因此导致枚举算法存在着极大的局限性. 尤其当问题规模很大时, 该算法所耗费的时间极多, 以致在实际使用中不能承受, 这样也就决定了该算法不能被广泛地应用于现实问题. 考虑到带有费用折扣的多任务 4PL 路径问题的特点, 其计算步骤如下.

Step 1: 分别产生到不同任务且满足信誉要求的各个路径;

Step 2: $i = 0$;

Step 3: 按评价函数对各组路径进行排序, 从每组中选取 $10i$ 个个体进行任意组合, 选出组合中能力符合要求的个体按评价函数进行排列, 评价函数最小者记为当前最优解 $Best_i$;

Step 4: 如果 $i == 1, i := i + 1$, 则转 Step 3, 否则

转 Step 5;

Step 5: 如果 $Best_{i-1} == Best_i$, 则视 $Best_i$ 为最优解, 否则 $i := i + 1$, 转 Step 3.

3 实例分析

某第 4 方物流公司承接了某一地区的供应链物流业务, 需要执行多项从供应链结点 V_s 到供应链结点 V_t 的任务, 这些供应链结点可能是组成这个供应链的城市、加工中心和仓库等, 边表示 3PL 供应商. 问题规模为 7 个结点、33 条边、3 个任务. 任务 1 中边的能力需求为 9, 信誉度要求为 4, 时间约束为 108; 任务 2 中边的能力需求为 6, 信誉度要求为 5, 时间约束为 100; 任务 3 中边的能力需求为 4, 信誉度要求为 4, 时间约束为 95.

在算法研究中, 可以对如下参数进行测试分析: 种群大小 N_P 、迭代次数 N_G 、信息素残留系数 ρ 、初始信息素浓度 c 、信息素更新公式中的常数(信息强度) Q 、信息素启发信息控制参数(信息素启发式因子) α 、路径启发信息控制参数(路径启发式因子) β . 本文为了便于比较结果的优劣, 选择了 4 个参数最好解 BS、最差解 WS、平均值 Mean、时间 time(单位 s) 和标准偏差 S 对结果进行评价.

经过测试, 可以得到两个算法的一组较好参数组合. 假设折扣因子 μ 取值为 0.3, 最低折扣 β^* 取值为 0.5. 用 A 表示选择的算法名称, “-”表示算法中不存在此参数, 所得结果如表 1 所示.

表 1 ACO、DACO 与枚举算法对 4PLRP 的结果

N	A	N_P	N_G	δ	c	ρ	Q	α	β	BS	WS	Mean	time	S
7	枚举	-	-	-	-	-	-	-	-	198.4	198.4	198.4	2191	0
7	GA	100	30	-	-	-	-	-	-	198.4	209.1	201.2	< 1	1.7
7	ACO	100	30	-	0.3	0.9	2	9	3	198.4	207.7	199.5	< 1	1.1
7	DACO	100	30	30	0.3	0.9	2	9	3	198.4	199.8	198.9	< 1	0.6
15	枚举	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	GA	200	50	-	-	-	-	-	-	290.7	335.9	306.4	< 1	12.0
15	ACO	200	50	-	0.3	0.9	2	9	3	290.7	332.6	305.0	< 1	10.5
15	DACO	200	50	30	0.3	0.9	2	9	3	290.7	326.0	300.8	< 1	7.3
30	枚举	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	GA	300	75	-	-	-	-	-	-	569.3	658.6	602.5	31	21
30	ACO	300	75	-	0.9	0.95	1	9	10	563.5	650.1	595.0	28	15.0
30	DACO	300	75	30	0.9	0.95	1	9	10	545.85	624.2	590.9	34	10.6

对于 3 种不同规模问题(见表 1, “-”表示在枚举算法中不存在或不能在有限时间内得到的参数), 将 DACO 得到的结果与枚举算法、遗传算法(GA)和 ACO 得到的结果进行对比. 对于枚举算法, 7 节点问题大约有 4.7×10^{10} 组可能解的组合, 计算精确解时间大约为 2191 s, 并且这一结果与使用 GA、ACO 和 DACO 计算得到的结果一致. 对于更多节点的算例, 如 15 节点, 枚举算法不能在有效时间内得到最优解, 而其他 3 种算法却能够得到, 但是, 显而易见的是

ACO 和 DACO 计算得到的结果优于 GA 计算得到的结果. 对于 30 个节点的问题, GA 和 ACO 不再能得到与 DACO 相同的最好解, 而且从均值和标准偏差上看, DACO 均好于 GA 和 ACO. 对于 ACO, 算法易陷入局部最优解, 产生停滞现象. 针对这一问题, 引入动态调整信息素的策略对 ACO 加以改进. 从表 1 中数据可以看出, 此算法与 ACO 相比, 均值和标准偏差均得到了提高, 并且随着结点数目的增多, DACO 优势增大. 通过动态调整信息素, 可以扩大最优解的搜索范

围,跳出局部最优解,提高算法的全局搜索能力,从而增加得到最优解的几率。

4 结 论

本文通过对考虑费用折扣因素的多任务第4方物流路径问题的研究,建立了数学模型,使用蚁群算法(ACO)和动态调整选择策略的改进蚁群算法(DACO)对3个实例进行了求解。从对比分析结果可以看出,DACO算法在求解质量上有一定的提高。

参考文献(References)

- [1] Gattorna J. Strategic supply chain alignment: Best practice in supply chain management[M]. 6th ed. London: Gower Publishing Company, 1998: 42-60.
- [2] 陈建清, 刘文煌, 李秀. 第四方物流中决策支持及物流方案的优化[J]. 计算机工程, 2004, 30(5): 150-153. (Chen J Q, Liu W H, Li X. Decision supporting system of the fourth party logistics and its optimization method of logistics solution[J]. Computer Engineering, 2004, 30(5): 150-153.)
- [3] Chen K H, Su C T. Activity assigning of fourth party logistics by particle swarm optimization-based preemptive fuzzy integer goal programming[J]. Expert System with Application, 2010, 37(5): 3630-3637.
- [4] 姚建明. 4PL模式下供应链资源整合的收益与风险决策[J]. 系统管理学报, 2011, 20(2): 180-187. (Yao J M. Benefit and risk decision of supply chain resources integration under 4PL[J]. J of Systems and Management, 2011, 20(2): 180-187.)
- [5] Cui Y, Huang M, Wang X W, et al. A chance-constrained programming of fourth-party logistics routing problem with fuzzy duration time[C]. IEEE Congress on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong, 2009: 360-364.
- [6] 王勇, 吴志勇, 陈修素, 等. 面向第4方物流的多代理人作业整合优化算法[J]. 管理科学学报, 2009, 12(2): 105-116. (Wang Y, Wu Z Y, Chen X S, et al. Optimization algorithm for multi-agent job integration for fourth party oriented logistics[J]. J of Management Sciences in China, 2009, 12(2): 105-116.)
- [7] Dorigo M, Caro G D. The ant colony optimization meta-heuristic: New ideas in optimization[M]. London: McGraw-Hill, 1999: 1-55.
- [8] Yu B, Yang Z Z, Yao B Z. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem[J]. European J of Operational Research, 2009, 196(1): 171-176.
- [9] 王沛栋, 唐功友, 李扬. 带容量约束车辆路由问题的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1633-1638. (Wang P D, Tang G Y, Li Y. Improved ant colony algorithm for capacitated vehicle routing problems[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1633-1638.)
- [10] 王兴伟, 郭磊, 秦培玉, 等. SON中基于蚂蚁网络的QoS单播路由机制[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2329-2335. (Wang X W, Guo L, Qin P Y, et al. Antnet based Qos unicast routing scheme in SON[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2329-2335.)
- [11] Zhao D M, Luo L, Zhang K. An improved ant colony optimization for the communication network routing problem[J]. Mathematical and Computer Modeling, 2010, 52(11): 1976-1981.

(上接第996页)

- [9] 史静平, 章卫国, 李广文, 等. 一种基于多极裁剪的广义逆控制分配算法[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 65-74. (Shi J P, Zhang W G, Li G W, et al. A generalized inverse control allocation algorithm based on multiple direction tailor[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(9): 65-74.)
- [10] Bordignon K A. Constrained control allocation for systems with redundant control effectors[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [11] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M]. Chichester, UK: John Willy & Sons, 2002: 145-183.
- [12] 彭春华, 孙惠娟, 郭剑峰. 求解PMU多目标优化配置问题的非劣排序微分进化算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1075-1080. (Peng C H, Sun H J, Guo J F. Non-dominated sorting differential evolution algorithm for multi-objective optimal PMU placement[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(10): 1075-1080.)
- [13] Forssell L, Nilsson U. ADMIRE the aero-data model in a research environment version 4.0, model description[R]. Sweden: Swedish Defence Agency, 2005: 1-34.