

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ МУРАВЬИНЫЕ АЛГОРИТМЫ И ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ

Ю.А. Скобцов (Санкт-Петербург), О.В. Ченгарь (Севастополь)

С повышением уровня автоматизации промышленных предприятий возрастает необходимость во все более мощных системах краткосрочного планирования производства, особенно внутрицехового планирования для составления детального расписания загрузки технологического оборудования в реальной производственной обстановке. Использование классических методов, которые явно или неявно предполагают различные упрощения при постановке задачи планирования на практике часто затруднено. Эффективным средством для решения подобных задач является использование «био-инспирированных» алгоритмов, которые позволяют получать субоптимальные решения проблем реальных производственных ситуаций за малое время [1] (на основе эвристик, «подсмотренных» у природы). Метод муравьиных колоний (МК) является ярким представителем этого направления [2], т.к. основан на использовании моделирования поведения колонии муравьев, как популяции потенциальных решений рассматриваемой проблемы и адаптирован для решения задач комбинаторной оптимизации, одной из которых является задача планирования загрузки технологического оборудования гибких производственных систем (ГПС). Поскольку реальные задачи, как правило, требуют учета нескольких критериев, особый интерес представляют многокритериальные муравьиные алгоритмы.

### Производственное расписание

Задача построения расписания работы ГПС заключается в том, чтобы для производственного участка с заданным технологическим маршрутом составить порядок обработки деталей с учетом ограничения реальных производственных ситуаций за короткое время. Предложено модель такого процесса представлять в виде графа, построение которого эквивалентно определению чисел  $t_{ij}$  – моментов начала технологической операции  $O_{ij}$ . Тогда совокупность чисел  $\{t_{ij}\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ), удовлетворяющая производственным условиям, называется расписанием работы ГПС, или его графовой моделью  $G(i)$  [3,4].

Кроме соответствующего представления в виде графа процесса загрузки технологического оборудования в ГПС для адаптации муравьиных алгоритмов (МА) к решению поставленной задачи, необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. разработать схему кодирования потенциального решения;
2. определить правила коррекции концентрации искусственного феромона;
3. разработать эвристики для выбора дуги при поиске пути в графе;
4. определить эвристики поведения муравья при построении решения в виде вероятностей перехода;
5. определить средства проверки выполнимости потенциального решения с учетом ограничений задачи;
6. проверить адекватности модели;
7. определить рациональные значения параметров МА.

## Объектно-ориентированная модель

Предложена графоаналитическая модель организационно-технологического процесса загрузки ГПС производственного участка механообработки с целью дальнейшего применения муравьиных алгоритмов для оптимизации оперативно-календарного планирования. Разработанная графоаналитическая модель предусматривает распределение оборудования по технологическим операциям согласно плану выпуска деталей, а также позволяет варьировать его количество, в зависимости от его исправности и плановых профилактических работ.

На основе предложенной графоаналитической модели построена объектная модель процесса загрузки оборудования, которая представляет систему взаимодействующих классов её типовых компонентов и описывает структуру классов, составляющих систему производственного процесса, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими классами [3,4].

### Направленный муравьиный алгоритм

Впервые предложен «направленный» муравьиный алгоритм для оптимизации расписания производственного участка, для которого: 1) разработана схемы представления потенциального решения; 2) определены правила коррекции концентрации искусственного феромона, которые определяют положительную обратную связь; 3) разработана эвристика для определения предпочтительности дуги при поиске пути в графе; 4) определено правило «направленно-пропорционального» правила перехода в следующую вершину графа; 5) выбраны «глобальные правила» для расчёта концентрации феромона, способствующие направленному поиску; 6) разработаны средства проверки выполнимости потенциального решения с учетом ограничений задачи; 7) выполнена проверка адекватности предложенной модели.

Преимуществом данного алгоритма является то, что данный метод не требует построения структурной модели непосредственно самого производственного участка, и допускает простые модификации, которые позволяют достаточно эффективно решать оптимизационные задачи подобного класса. Эта модификация отличается от аналогов следующими особенностями:

1) Предложен метод вычисления вероятностей перехода искусственного муравья по вершинам графоаналитической модели, основанный на анализе текущей производственной ситуации; вероятность перехода  $k$ -того муравья в вершину  $O_{ij}$  определяется соотношением

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^1 [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & O_{ij} \in N_{ij}^k \\ P_{ij,k}(t) = 0, & O_{ij} \notin N_{ij}^k \end{cases}$$

где  $\alpha$  – коэффициент значимости концентрации феромона;  $\beta$  – коэффициент значимости эвристической информации;  $\tau_{ij}$  – концентрация феромона на дуге графа;  $\eta_{ij}$  – эвристическая информация;  $N_{ij}^k$  – перечень вершин графа  $O_{ij}$ , доступных для  $k$ -того муравья.

2) Предпочтительность выбора вершины графа задается «направленно-пропорциональным» правилом перехода между вершинами, которое основывается на эвристической информации. Она определяется, как отношение времени выполнения технологической операции  $To_{ij}$  к запланированному времени изготовления детали  $Ts_j$ , которое в свою очередь корректируется после выполнения каждой технологической операции над партией деталей  $\eta_{ij} = \frac{\Phi_j}{\Phi_i}$ . Избранная эвристика выбрана не случайно,

так как, даже не используя особенности муравьиного алгоритма, для технологического

оборудования предпочтительней не та вершина, в которой оно раньше освободится после выполнения очередной производственной операции, а тот узел, на котором партия деталей скорее закончит обработку. Это существенно расширяет круг поиска и позволяет быстрее найти субоптимальное решение.

3) Для расчёта концентрации искусственного феромона при переходе муравья на следующий узел графа используются «глобальные» правила, способствующие направленному поиску. Данные правила заставляют муравья двигаться в сторону найденных «худших» решений с целью их «улучшения». Эта стратегия стимулирует эксплуатацию пространства поиска и применяется после того, как решение построено, т.е. после прохождения всеми муравьями своего пути. В этом случае концентрацию феромона разрешается менять только «худшим» (в глобальном смысле) муравьям, построившим неоптимальный путь. Тогда для каждой дуги графа концентрация феромона определяется в соответствии со следующим

правилом:  $\tau_j(t+1) = \tau_j(t) + \Delta\tau_j(t)$   $\Delta\tau_j(t) = \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_j^k(t)$ . При этом количество феромона, которое откладывает искусственный муравей, определяется в зависимости от заданного критерия оптимальности и вычисляется по одному из следующих правил:

для задачи максимизации среднего коэффициента загрузки оборудования:  $\Delta\delta_j^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T\delta_j^k}$ ,

для задачи минимизации времени переналадок оборудования:  $\Delta\delta_j^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T\delta_j^k}$ ,

где  $Tn_{ij}$  – время наладки ГПМ для выполнения операции  $O_{ij}$

для задачи минимизации длительности цикла изготовления деталей:  $\Delta\delta_j^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T\delta_j^k + \Phi_j^k}$ ,

где  $To_{ij}$  – времени выполнения технологической операции  $O_{ij}$

4) Популяция искусственных муравьёв всегда однозначно определена массивом  $K(1)$  (где  $l \in [1; n_k]$ ) и соответствует составу технологического оборудования, задействованного в производстве (включая ГПМ и транспортные единицы). Таким образом, решается вопрос о количестве муравьёв  $n_k$  в каждой популяции. Причём транспорт рассматривается в виде «элитного муравья», для которого нет запрещённых вершин (tabu list) и который имеет приоритет перед другими муравьями при переходе от вершины к вершине.

5) Для всех муравьёв предопределяется множество доступных для посещения вершин, который формируется в соответствии с технологическим процессом и принадлежностью искусственных агентов к определённому типу оборудования («элитный» муравей). Причём для всех муравьёв, кроме «элитного» определён список запрещённых вершин (tabu list).

Эффективность муравьиного алгоритма зависит от некоторых управляющих параметров:  $n_k$  – количество искусственных муравьёв;  $n_{it}$  – максимальное число итераций,  $\tau_0$  – начальная концентрация феромона,  $\alpha$  – интенсификация феромона,  $\beta$  – интенсификация эвристики.

Для проведения экспериментальных исследований и апробации разработанных методов и моделей при планировании загрузки технологического оборудования в качестве объекта выбран организационно-технологический процесс технологического участка механообработки деталей, типа тел вращения.

## Парето-оптимизация производственного расписания

Для поставленной задачи оптимального планирования загрузки технологического оборудования производственного участка одновременно по нескольким критериям эффективности разработан метод Парето-оптимизации, который основан на «направленном» муравьином алгоритме [5].

Здесь для каждого критерия  $f_k(x)$  определяется свой вес  $w_k$ . Скалярное значение новой целевой функции вычисляется путем суммирования взвешенных значений  $q$  критериев оптимальности. Для параллельного поиска кратных решений веса не фиксируются, что дает возможность «направленному» муравьиному алгоритму расширить фронт по всем направлениям.

В предложенном алгоритме на каждой итерации по заданному критерию формируется множество решений на основе «направленного» муравьиного алгоритма. Далее для потенциальных решений определяются максимальная и минимальная экстремальные точки в пространстве заданных критериев.

В итоге получаем гиперплоскость, которая определяется двумя экстремальными точками, и содержит все текущие решения. Эти экстремальные точки обновляются на каждой итерации. При этом адаптивный вес  $k$ -ого критерия определяется соотношением.

$$w_k = \frac{1}{z_k^{\max} - z_k^{\min}}, \quad k = 1, 2, \dots, q$$

Для каждого критерия устанавливаются средневзвешенные весовые коэффициенты значимости, которые нормируются внутри группы.

$$w_k^{\text{норм}} = \frac{w_k}{\sum_{i=1}^q w_i}, \quad k = 1, 2, \dots, q$$

Тогда на каждой итерации взвешенная целевая функция определяется согласно следующему выражению.

$$z(x) = \sum_{k=1}^q w_k^{\text{норм}} (f_k(x) - z_k^{\min})$$

Таким образом, этот метод позволяет корректировать веса целевой функции и направлять поиск решений в нужном направлении.

## Экспериментальные исследования

В ходе экспериментов исследовались многокритериальные задачи с применением «направленного» муравьиного алгоритма с адаптивными весами. Анализ результатов проводился в сравнении с решениями, полученными при решении однокритериальных задач. Исследованы следующие варианты выбора критериев оптимальности:

1. максимизация среднего коэффициента загрузки технологического оборудования;
2. минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности цикла изготовления деталей;
3. минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимизации времени переналадок оборудования;

4. минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности изготовления деталей и времени переналадок оборудования.

В результате проведенных экспериментов установлено, что с увеличением количества критериев растёт число итераций необходимых для достаточно точного описания границы Парето, что влечёт за собой увеличение времени функционирования алгоритма и снижение результативности полученных решений. Наилучшим вариантом для данной задачи является оптимизация одновременно по двум критериям.

### Заключение

В рамках модели АТК разработаны объектные модели типовых компонентов автоматизированного технологического комплекса: гибкий производственный модуль, автоматизированный склад, автоматизированный транспорт, система управления. Для каждого типа объектов определены их основные свойства и методы. Построена обобщенная модель автоматизированного технологического комплекса механообработки. Для оптимизации функционирования АТК совместно с модифицированным направленным муравьиным алгоритмом использована объектная модель, вычисляющая фитнес-функцию, формируя оптимальные расписания работы оборудования АТК в реальном времени для следующих основных критериев эффективности: минимизация длительности производственного цикла; максимизация среднего коэффициента загрузки технологического оборудования. В результате проведенных экспериментов на тестовых примерах установлено, что с увеличением количества критериев растёт число итераций необходимых для достаточно точного описания границы Парето, что влечёт увеличение времени функционирования алгоритма и снижение результативности полученных решений. Наилучшим вариантом для задачи является оптимизация одновременно по двум критериям.

В результате проведенных компьютерных экспериментов установлено, что эффективность направленного муравьиного алгоритма растет при увеличении размерности задачи и для наилучших результатов его функционирования, коэффициенты алгоритма  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\eta$  необходимо экспериментально подбирать для каждой задачи.

### Литература

1. Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Эволюционные вычисления: учебное пособие.- М.:Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ» 2015. 331с.
2. Dorigo M., "Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization," Reader for CEU Summer University Course "Complex System", Budapest, Central European University, 2001, P. 1–3.
3. Скобцов Ю.А., Секирин А.И., Землянская С.Ю., Ченгарь О.В., Скобцов В.Ю. Объектно-ориентированное моделирование и эволюционные алгоритмы // Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование» (ИММОД-2015) // Т.2.-М.:ИПУ РАН,2015. С.338–343.
4. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В. Объектно-ориентированное моделирование и муравьиные алгоритмы // Труды Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование - 2016 (КОМОД-2016)». СПб: СПбПУ. 2016. С.215–224.
5. Скобцов Ю.А., Ченгарь О.В., Скаковская А.Н. Многокритериальная оптимизация с адаптивными весами производственного расписания // Труды XXX - Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-30». Том.11. СПб.; СПбГТИ(ТУ). С.212–220.