Модели прогноза загрузки транспортных сетей

1. Основные принципы моделирования загрузки

Транспортные потоки складываются из отдельных передвижений, совершаемых участниками движения, или пользователями транспортной сети. В общем случае, говоря о передвижениях, мы включаем в это понятие не только поездки различными видами транспорта, но и пешие передвижения. Основными факторами, определяющими количество совершаемых передвижений и их распределение по транспортной сети города, являются:

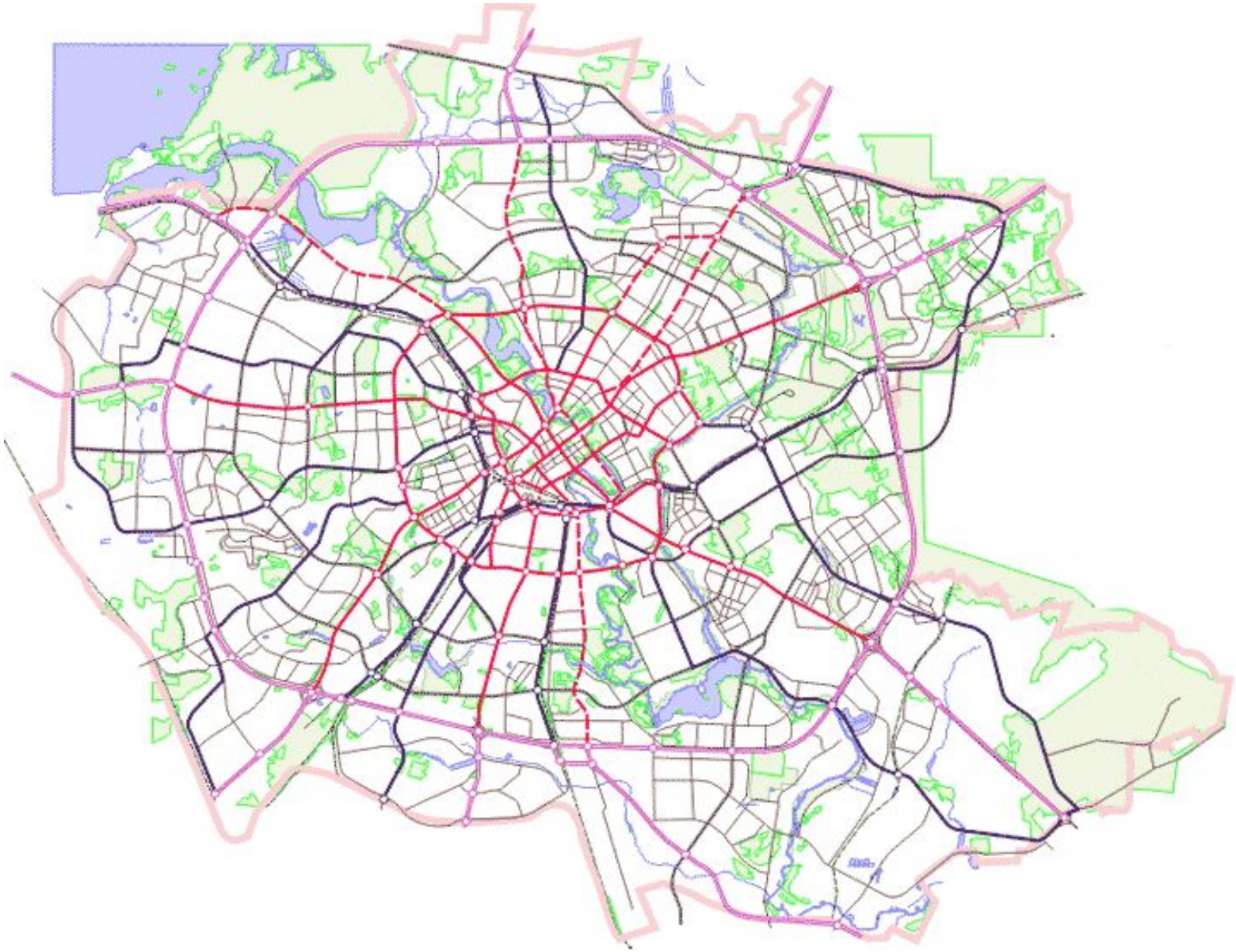
- Потокообразующие факторы, т.е. размещение объектов, порождающих передвижения, таких как места проживания, места приложения труда, культурно-бытового обслуживания и др.
- Характеристики транспортной сети, такие как количество и качество улиц и дорог, параметры организации движения, маршруты и провозные способности общественного транспорта и др.
- Поведенческие факторы, такие как мобильность населения, предпочтения при выборе способов и маршрутов передвижений и др.

Основные принципы моделирования загрузки

Для построения математических моделей необходимо формальное описание указанных факторов. Основа такого описания — транспортный граф, узлы которого соответствуют перекресткам и станциям внеуличного транспорта, дуги — сегментам улиц и линий внеуличного транспорта. В число дуг также включаются дуги, изображающие пересадки с уличного на внеуличный транспорт. Отдельной составляющей транспортного графа является маршрутный граф общественного транспорта. Узлами маршрутного графа являются остановочные пункты, дугами — сегменты маршрутов между остановочными пунктами. С обычными узлами графа узлы-остановки соединены дугами-посадками и дугами-высадками.

Для описания распределения потокообразующих объектов необходимо разделить город на некоторое количество условных районов прибытия и отправления (ПО). Каждый район ПО включается в граф как узел, соединенный с обычными узлами графа специальными дугами-связями. Общий объем передвижений из одного района ПО в другой (независимо от конкретных путей передвижения) называется *межрайонной корреспонденцией.*

Пример транспортного графа



Основные принципы моделирования загрузки

Основой для моделирования поведения пользователей является математическая формулировка критерия, на основании которого пользователь оценивает альтернативные пути и способы передвижения. Данный критерий принято называть *обобщенной ценой пути*. Увеличение обобщенной цены снижает привлекательность пути. Обобщенная цена пути складывается из обобщенных цен входящих в него дуг. Кроме того, в цену пути может добавляться цена переходов с дуги на дугу, например цена поворота при движении по улично-дорожной сети (УДС) или цена посадки при переходе с дуги-пересадки на дугу, соответствующую поездке.

Обобщенная цена определяется как взвешенная сумма слагаемых, выражающих влияние факторов различной природы на оценку пути. В общем случае она может включать в себя следующие слагаемые:

- время передвижения, которое вычисляется на основе заданной функции зависимости скорости движения от загрузки дуги. Используются различные функции скорости для дорог с разными физическими характеристиками и условиями регулировки движения;

Основные принципы моделирования загрузки

- дополнительные задержки на различных элементах транспортной сети (время парковки, время ожидания и др.);
- денежные затраты (платные магистрали, плата за въезд в определенные зоны города и др.);
- условные штрафные добавки времени, используемые для моделирования различных особенностей транспортной сети и мер по управлению транспортом.

Как показывают обследования, время — основной фактор, определяющий цену пути. Другие факторы являются корректирующими и количественно выражаются в условных минутах, добавляемых к времени передвижения. Поэтому путь между двумя точками сети, имеющий минимальную обобщенную цену среди всех возможных путей, часто для простоты называют *кратчайшим* путем.

Основные принципы моделирования загрузки

Важнейшей и фундаментальной особенностью формирования загрузки транспортной сети является то, что выбор способов и путей передвижения пользователями сети влияет на тот же выбор, осуществляемый другими пользователями. Математически это взаимное влияние описывается функциями зависимости цены дуги от суммарного потока по этой дуге. Данное обстоятельство создает обратную связь в процессе формирования загрузки: выбор путей, формирующих загрузку, основан на сопоставлении цен различных путей, в то время как цены сами определяются сложившейся загрузкой. Транспортные потоки, реально наблюдающиеся в сети, представляют собой некоторое *равновесное состояние* этого процесса. Для поиска этого равновесного состояния применяются итеративные алгоритмы, описанные ниже.

В задаче моделирования транспортных потоков в сети крупного города традиционно выделяют четыре основных этапа:

- оценка общих объемов прибытия и отправления из каждого района города (Trip generation);

Основные принципы моделирования загрузки

- расщепление по способам передвижений, таким как пешие передвижения, передвижения с использованием общественного транспорта, передвижения на личном автомобиле и др. (Modal split);

- определение матриц корреспонденций, определяющих объем передвижений между каждой парой расчетных районов города (Trip distribution);

- распределение корреспонденций по транспортной сети, т.е. определение всех путей, выбираемых участниками движения, и определение количества передвижений по каждому пути (Trip assignment).

Разделение задачи моделирования на эти четыре этапа является условным, так как все этапы взаимосвязаны и не могут, вообще говоря, быть решены как отдельные задачи в силу отмеченных выше обратных связей. Так, большинство моделей расчета корреспонденций используют в качестве важного фактора обобщенные цены межрайонных передвижений. Аналогично, расщепление передвижений по видам (например, между частным и общественным транспортом) зависит от соотношения цен при использовании этих видов транспорта. Следовательно, расчет корреспонденций и их расщепление может быть выполнено корректно, если уже известна итоговая загрузка сети. Все это приводит к необходимости решать задачу последовательными приближениями, повторяя все шаги в итеративном режиме.

2. Модели расчета корреспонденций

Количественной характеристикой структуры передвижений по сети служит *матрица корреспонденций*, элементами которой являются объемы передвижений (автомобилей или пассажиров в час) между каждой парой условных районов ПО. Все многообразие передвижений, совершаемое в сети, может быть разбито на разные группы передвижений по следующим критериям:

- по различию в целях передвижений;
- по различию в выборе способов передвижения;
- по различию в предпочтениях при выборе путей передвижения.

Среди групп передвижений с различными целями наиболее важными и многочисленными являются

- передвижения от мест жительства к местам приложения труда и обратно (так называемые трудовые корреспонденции);

Модели расчета корреспонденций

- передвижения от мест жительства к местам культурно-бытового обслуживания и обратно;
- передвижения, совершаемые между местами приложений труда (деловые поездки);
- передвижения, совершаемые между объектами культурно-бытового обслуживания.

Для каждой группы передвижений рассчитывается своя матрица межрайонных корреспонденций. Входной информацией к модели расчета корреспонденций являются общие объемы прибытия и отправления в каждом районе ПО. Оценка объема прибытий и отправлений по разным группам связана с пространственным размещением потокопорождающих объектов и *подвижностью населения*, т.е. средним количеством поездок, совершаемых с теми или иными целями. Эта оценка строится на основе имеющихся демографических и социально-экономических данных и результатов обследований и в основном предшествует собственно математическому моделированию.

Под различными способами передвижений понимают, например, передвижение пешком, с использованием общественного транспорта или личного автомобиля. С точки зрения методики расчета смысл деления на способы передвижения следующий: избранный способ передвижения не меняется на этапе распределения корреспонденций по сети. Процедура выбора пользователем пути передвижения разбивается тем самым на два этапа: выбор способа передвижения (*модальный выбор*) и выбор конкретного пути (путей) передвижения, осуществляемый на основе некоторого критерия оценки путей (*критериальный выбор*). Модальный выбор реализуется на стадии расчета корреспонденций, критериальный выбор реализуется на стадии распределения корреспонденций по сети.

Деление участников движения на группы по предпочтению приводит к понятию класса пользователей транспортной сети. В общем случае пользователей транспортной сети относят к разным классам, если они используют разные критерии оценки путей. В понятие «разные критерии» в данном случае включается также тот факт, что разные классы пользователей могут использовать для движения разные элементы транспортной сети. Вот некоторые примеры различных классов пользователей:

- В сети, содержащей платные участки дорог, или платный въезд в определенные районы, или платные и бесплатные парковки в различных районах люди разного достатка и социального статуса будут предпочитать разные пути.

- Пользователи сети общественного транспорта могут различаться по предпочтениям. Например, предпочитающие комфортное движение с минимальным количеством пересадок и пеших проходов или предпочитающие минимизировать время достижения цели.

Для моделирования комплексной загрузки сети с учетом всех факторов такого рода все пользователи разделяются на классы, для каждого класса рассчитывается отдельная матрица корреспонденций и производится распределение корреспонденций по сети. При этом для каждого класса используется свой критерий оптимальности путей.

К числу наиболее распространенных моделей расчета корреспонденций относятся гравитационные модели, энтропийные модели, модели конкурирующих возможностей и некоторые другие.