1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

Оптимизация профиля железнодорожного колеса

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

12 Оптимизация профиля железнодорожного колеса

Компании ОАО "РЖД" принадлежит порядка 20 тыс. локомотивов и более 600 тыс. грузовых и пассажирских вагонов. Уменьшение износа железнодорожных колес и рельсового полотна на проценты может дать огромный экономический эффект, а повышение устойчивости вагона в процессе движения позволит повысить безопасность и увеличить среднюю скорость движения. Смысл оптимизации очевиден, но при чем тут высокопроизводительные вычисления?

АВТОРЫ:

В.П. Гергель — проф., докт. тех. наук, декан факультета ВМК ННГУ, Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, *e-mail: gergel@unn.ru*
К.А. Баркалов — канд. физ.-мат. наук, Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, *e-mail: barkalov@fup.unn.ru*
А.В. Сысоев — Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

Инженер — человек, способный взять теорию и приделать к ней колеса.
Леонард Луис Левинсон

Что может быть проще колеса, изобретенного столь давно, что никто сейчас не знает достоверно, когда именно? Что здесь оптимизировать, тем более с использованием суперкомпьютеров? Попробуем разобраться.

Факт №1: современные скоростные поезда развивают скорость свыше пятисот километров в час в максимуме и от двухсот в среднем. Факт №2: протяженность железных дорог в России — чуть менее 100 тысяч километров, в Европе — более 200 тыс. километров. Факт №3: компании ОАО «РЖД» принадлежит порядка 20 тыс. локомотивов и более 600 тыс. грузовых и пассажирских вагонов.

Нетрудно видеть, что уменьшение износа колес и рельсового полотна на проценты может дать огромный экономический эффект, а повышение, например, устойчивости вагона в процессе движения позволит повысить безопасность и/или увеличить среднюю скорость движения. Итак, смысл оптимизации очевиден, но нужны ли здесь высокопроизводительные вычисления?

Содержательная постановка задачи

В процессе движения центр колесной пары вследствие конической формы колеса совершает синусоидальные колебания относительно линии, проходящей в середине рельсового полотна (рис. 1). Кинематические свойства контакта колеса с рельсом: радиус вращения, угол контакта, угол наклона колесной пары и другие — меняются при поперечном смещении колесной пары относительно рельса и определяются поперечной позицией колесной пары и профилями колеса и рельса.

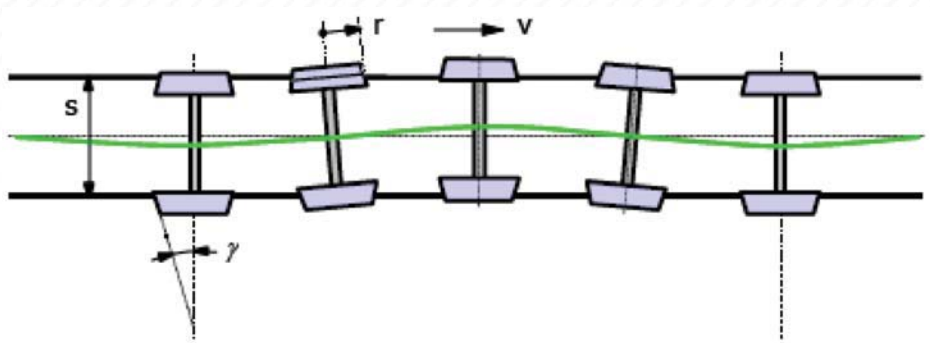

Рис. 1.
Траектория движения колесной пары

Радиус вращения колеса в контактной точке может различаться для правого и левого колес, поскольку колесная пара смещается по рельсу (радиусы r_1и r_2 соответственно на рис. 2).

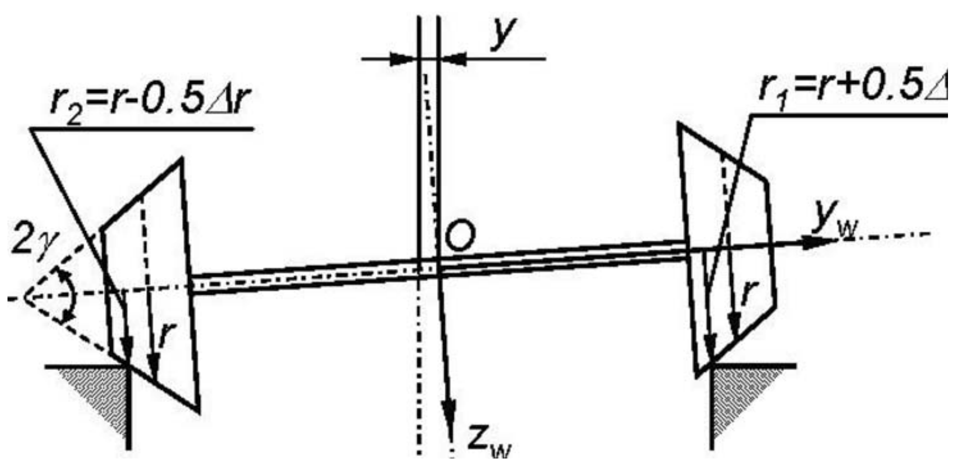

Рис. 2.
Смещение колесной пары в перпендикулярном разрезе

Когда колесная пара находится в центральной позиции, радиусы вращения совпадают, т.е. $r_1= r_2=r$. Отличие между радиусами вращения левого и правого колес может быть определено как функция бокового смещения колесной пары по отношению к ее центральной позиции $\Delta r(x)=r_1(x) — r_2(x)$.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

Математическая модель

Профиль колеса описывается с помощью B-сплайна, построенного на основе множества точек на кромке, основании кромки и поверхности качения колеса (рис. 3). Положение этих точек определяет профиль колеса. Положение точек наверху кромки и конической части профиля фиксируется, так как эти части колесного профиля не участвуют в контакте с рельсом (это, в частности, позволяет уменьшить трудоемкость задачи оптимизации, уменьшая размерность пространства поиска).

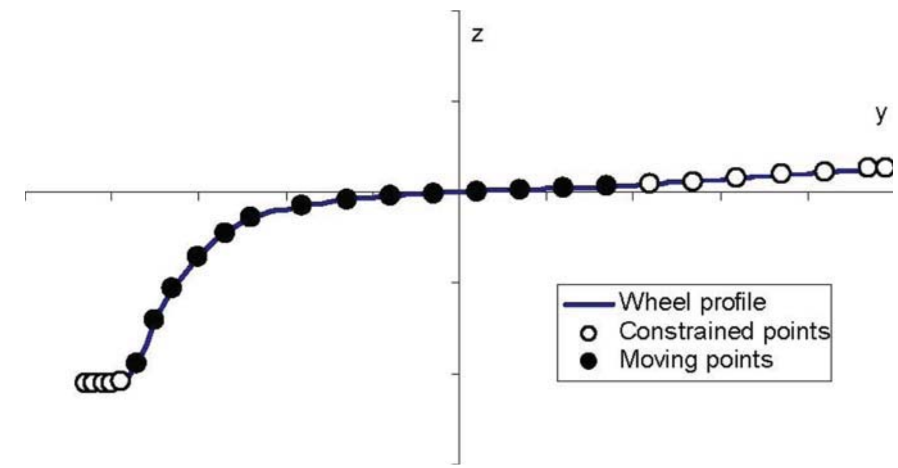

Рис. 3.
Модель профиля колеса в области контакта с рельсом

В качестве компонент вектора y параметров задачи оптимизации выбраны ординаты z_i подвижных точек сплайна, т.е. $y=[z_1,...z_n]$, при этом абсциссы данных точек фиксированы. В описываемой задаче число подвижных точек, а, следовательно, и число переменных N = 11, границы изменения параметров [−1, 1]; минимизируется разность радиусов вращения $\Delta r(x)$, а ограничения вводятся из соображений устойчивости (например, одно из ограничений наложено на максимальный угол наклона колесной пары). Таким образом, возникает задача оптимизации с числом параметров N = 11, числом ограничений m = 6; целевая функция и функции ограничений — многоэкстремальные.

Ограничения аналитической формы не имеют и заданы функционально (в виде вычислительных процедур в пакете MATLAB). Вычисление значений входящих в задачу функций для одного набора значений параметров занимает более десяти секунд на современном процессоре (Intel Xeon 3 ГГц).

Оценка вычислительной сложности задачи

Итак, задача сформулирована, попробуем оценить, какие временны́е ресурсы нужны для ее решения в зависимости от выбранного метода.

Если оптимум искать, используя полный перебор на сетке выбранной точности, получим следующее. Взяв десять вариантов значения каждого из параметров (напомним, всего параметров 11), получим 10^{11} вычислений, что дает порядка 10^{12} секунд, то есть 3 года непрерывного счета на суперкомпьютере с 10 тыс. процессоров. Таким образом, сложность задачи такова, что высокопроизводительные вычисления не только являются необходимыми, но и должны в обязательном порядке дополняться эффективными численными методами решения для получения результата в обозримых временных рамках.

Результаты

Описанная задача решалась авторами с помощью параллельного индексного метода с множественной разверткой [1,2] на кластере из 4 компьютеров в технологическом университете г. Делфта. Покоординатная точность решения — 2^{-10}, то есть 1024 точки по каждому параметру.

Была получена оценка оптимума $\varphi^*=2{,}7676$. Время получения данной оценки — 27 часов, при этом значение функционалов задачи было посчитано 4297 + 4415 + 4236 + 4266 = 17214 раз.

Расчеты, проведенные специалистами Технического университета г. Делфта для колеса оптимизированного профиля, показали, что его ресурс возрос до 120 тыс. км пробега (более чем в пять раз по сравнению с колесом оригинального профиля), а максимально допустимая скорость – с 40 до 60 м/сек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strongin R.G., Sergeyev Ya.D.* Global optimization with non-convex constraints. Sequential and parallel algorithms. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.

2. *Городецкий С.Ю., Гришагин В.А.* Нелинейное программирование и многоэкстремальная оптимизация: Учебное пособие. Н.Новгород: Изд. Нижегород. ун-та, 2007.