

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ 42

А.А.Жоленц, И.Я.Протопопов

"ОРТИ" - ОПТИМИЗИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА
РАСЧЁТА КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ
И СОГЛАСОВАННЫХ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ
ПРОМЕЖУТКОВ УСКОРИТЕЛЕЙ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ПРЕПРИНТ 80 - 212



"ОРТІ" — ОПТИМИЗИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА КАНАЛОВ
ТРАНСПОРТИРОВКИ И СОГЛАСОВАННЫХ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ПРО-
МЕЖУТКОВ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.А.Жолениц, И.Я.Протопопов

Институт ядерной физики СО АН СССР, г.Новосибирск

I. Введение

При проектировании новых ускорителей заряженных частиц обычно приходится решать ряд однотипных задач, связанных с выбором параметров магнитной структуры. Это, например, задача о согласовании аксептанса канала и ускорителя, если речь идет о канале транспортировки заряженных частиц, или задача о согласовании параметров пучка на концах длинных прямолинейных промежутков ускорителей. Особенно сложны задачи такого рода оказываются для накопительных колец. Здесь число условий, которые необходимо учитывать при выборе магнитной структуры прямолинейных промежутков, заметно возрастает. Дополнительные трудности появляются при организации мест встречи пучков с малой β -функцией, получении необходимых значений параметров пучка в местах расположения нестандартного для обычных ускорителей оборудования (*wiggler*-магнитов в электрон-позитронных накопителях, участков охлаждения в антипротонных накопителях), ограничении максимальных значений β -функций, получении определенного набега бетатронной фазы на промежутке и выполнении других специальных требований. Отметим, что в каждом конкретном случае, по-видимому, имеется свой специфический набор различных условий.

За последнее время в разных физических лабораториях была создана серия вычислительных программ (см., например, /1-3/), в значительной степени облегчающих решение описанных выше задач. В 1973 г. для сравнительно узких целей проектирования экспериментального промежутка накопителя ВЭП-4 /4/ нами в ИЯФ СО АН СССР также была написана соответствующая программа для ЭВМ

ОДРА — программа ОРТИ. В процессе совершенствования этой программы, связанном в основном с улучшением диалога оператор-ЭВМ, повышением наглядности представления результатов счета и надежности системы хранения информации, программа приобрела относительную универсальность и нашла широкое применение при разработке различных установок ИЯФ СО АН СССР.

В окончательной редакции программы ОРТИ авторы стремились сделать ее максимально доступной широкому кругу физиков, занимающихся проектированием каналов транспортировки заряженных частиц, магнитных структур ускорителей и накопителей. Цель настоящей работы поэтому главным образом заключается в ознакомлении потенциальных потребителей ОРТИ с методами расчета, примененными в программе, и ее рабочими директивами.

2. Методы расчета

Здесь мы рассмотрим наиболее часто используемый вариант программы, предназначенный для расчета магнитных структур без skew-квадрупольных и продольных полей с равновесной траекторией частиц, лежащей в одной плоскости. Кроме него имеется еще два варианта программы ОРТИ. В первом — есть возможность включать в расчет skew-квадрупольные линзы и соленоиды; во втором, написанном Ю.И.Эйделеманом, — рассчитывать магнитные структуры с пространственными равновесными траекториями частиц.

Математически задачу проектирования магнитной структуры можно сформулировать как задачу поиска минимума некоторой функции цели $Q = \sum_{i=1}^n q_i$. Переменная q_i представляет из себя нормированный на весовой множитель ρ_i квадрат отклонения параметра y_i (см. подробнее ниже) от его проектного значения y_{i0} : $q_i = (y_i - y_{i0})^2 / \rho_i$. В свою очередь y_i является сложной функцией элементов искомой магнитной структуры (градиентов линз, длин свободных от магнитных полей промежутков): $y_i = y_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Здесь x_j — обобщенное обозначение неизвестного элемента магнитной структуры.

В настоящее время известно много различных методов поиска экстремума многопараметрических функций [5]. В программе ОРТИ использовано два из них — метод случайного поиска и метод наискратчайшего спуска.

2.1. Метод случайного поиска

В данном методе минимизируется функция цели, включающая в себя в общем случае следующие параметры: а) горизонтальная и вертикальная амплитудные функции β_x, β_z и их производные α_x, α_z , дисперсионная функция Ψ_x и ее производная Ψ_x' , набег горизонтальной и вертикальной бетатронной фазы φ_x, φ_z в конце магнитной структуры; б) $\beta_x, \beta_z, \alpha_x, \alpha_z, \Psi_x, \Psi_x', \varphi_x, \varphi_z$ — в некоторой, предварительно указанной, промежуточной точке; в) апертурные ограничения. Параметры: а) введены в функцию цели для решения задачи согласования аксептанса канала и ускорителя или параметров пучка на концах длинных прямолинейных промежутков ускорителей; б) — для получения специальных характеристик пучка в каком-либо месте магнитной структуры; в) — для устранения в окончательном решении нереально больших значений апертур. Использование одновременно всех параметров в функции цели необязательно. Любые параметры могут быть исключены заданием большого весового множителя либо, что в программе эквивалентно, заданием $\rho_i = 0$.

Обозначим Q_n — значение функции цели на n -ом шаге, а \vec{X}_n — набор значений градиентов линз и длин свободных от магнитных полей промежутков, при которых получено данное Q_n : $\vec{X}_n^T = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)_n$, T — знак транспонирования. Алгоритм расчета основан на учете четырех последних шагов и случайного выбора очередной добавки. При этом новый вектор \vec{X}_{n+1} получается по следующей формуле:

$$\vec{X}_{n+1} = \vec{\varepsilon} \sqrt{Q_n} + (\vec{X}_n - \vec{X}_{n-3}) \frac{Q_{n-1} - Q_n}{Q_{n-3} - Q_n} \alpha_1 + (\vec{X}_{n-1} - \vec{X}_{n-3}) \frac{Q_{n-2} - Q_{n-1}}{Q_{n-3} - Q_n} \alpha_2 + (\vec{X}_{n-2} - \vec{X}_{n-3}) \frac{Q_{n-3} - Q_{n-2}}{Q_{n-3} - Q_n} \alpha_3 + \vec{X}_{n-3}$$

Здесь $\vec{\varepsilon}^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$ — набор чисел, взятых из нормального распределения с дисперсией σ_ε , $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — константы, определяющие степень доверия к правильности выбора направления поиска минимума на $n, n-1, n-2$ шаге. В программе ОРТИ $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1/2, \alpha_3 = 1/3$. Дробные множители перед $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ учитывают вклад соответствующего шага в уменьшение функции цели.

После очередного шага проводится следующая процедура пере-присвоения:

$$\begin{aligned} \vec{X}_{n-3} &= \vec{X}_{n-2}, & Q_{n-3} &= Q_{n-2} \\ \vec{X}_{n-2} &= \vec{X}_{n-1}, & Q_{n-2} &= Q_{n-1} \\ \vec{X}_{n-1} &= \vec{X}_n, & Q_{n-1} &= Q_n \end{aligned}$$

Если данный шаг привел к уменьшению Q , то проводится также переприсвоение $\vec{X}_n = \vec{X}_{n+1}, Q_n = Q_{n+1}$. В противном случае этого не делается. Таким образом, с каждым неудачным шагом происходит постепенное забывание направления, выбранного на $n-2, n-1, n$ шаге и, наоборот, автоматически запоминается направление каждого удачного шага. Критерием окончания счета служит уменьшение Q до величины $\epsilon \rho \xi$, либо превышения числа неудачных попыток числа N_{max} .

2.2. Метод наискратчайшего спуска /6/.

Метод наискратчайшего спуска предназначен для проектирования магнитных структур с определенной транспортной матрицей T . В отсутствие связи бетатронных колебаний матрица T имеет шесть независимых элементов $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ — по три по каждой координате. В общем случае каждый элемент a_i представляет из себя сложную функцию элементов магнитной структуры $a_i = a_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$. Если исходные значения всех a_i близки к заданным (проектным) величинам a_{i0} , то необходимые изменения вектора \vec{X} для достижения конечного результата находятся решением системы линеаризованных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_1}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial a_1}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial a_1}{\partial x_m} dx_m &= a_{10} - a_1 & (I) \\ \frac{\partial a_2}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial a_2}{\partial x_m} dx_m &= a_{20} - a_2 \\ \vdots & \\ \frac{\partial a_6}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial a_6}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial a_6}{\partial x_m} dx_m &= a_{60} - a_6 \end{aligned}$$

Здесь dx_1, dx_2, \dots, dx_m искомые изменения вектора \vec{X} .

Как правило, однако, начальные значения Q_i не бывают столь близки к проектным Q_{i0} чтобы удалось сразу же получить окончательный результат. Поэтому обычно применяются итерации. При этом на каждом шаге составляется и решается система уравнений, аналогичная (1), с правыми частями, равными $b_i = (a_{i0} - a_i) \tau / \sqrt{Q}$. Здесь $Q = \sum_{i=1}^6 (a_{i0} - a_i)^2 / \rho_i$, а τ — некоторое число. После каждого удачного шага, приводящего к уменьшению Q , τ увеличивается (в программе в $\sqrt{2}$ раза), а после неудачного шага — τ уменьшается (в программе в 2 раза). Критерием окончания итераций служит уменьшение Q до величины $\epsilon \rho \xi$, либо уменьшение τ меньше некоторого τ_{min} .

В случае, когда число неизвестных элементов магнитной структуры $m \neq 6$, решение системы (I) находится по методу наименьших квадратов. С помощью векторов $d\vec{X}^T = (dx_1, dx_2, \dots, dx_m)$, $\vec{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ и матрицы коэффициентов M :

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial x_1} & \frac{\partial a_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial a_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial a_2}{\partial x_1} & \frac{\partial a_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial a_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial a_6}{\partial x_1} & \frac{\partial a_6}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial a_6}{\partial x_m} \end{pmatrix}$$

ответ записывается в виде:

$$d\vec{X} = (M^T M)^{-1} M^T \vec{b}$$

3. Программные директивы

Функционально программа ОРТИ разбита на две отдельные программы. Программу-редактор и программу счета. Программа-редактор позволяет задавать исходную магнитную структуру, вносить исправления и делать распечатки структуры. Здесь же каждому элементу присваиваются признаки, по которым в дальнейшем выясняется, участвует ли данный элемент в оптимизации магнитной структуры. Все выше перечисленные действия осуществляются путем обращения к одной из директив:

IN - задание исходной магнитной структуры и признаков оптимизации

AL - исправление магнитной структуры

LI - распечатка магнитной структуры

Имеется возможность объединить ряд однотипных линз в функциональную группу так, что в дальнейшем в процессе оптимизации изменения градиентов в линзах будут происходить одинаковым образом у всех элементов данной группы. Таких групп может быть организовано несколько. Для этих целей служат директивы:

CG - создание функциональной группы

AG - исправление функциональной группы

LG - распечатка имеющихся функциональных групп.

Программа счета включает в себя ряд служебных директив: и директивы счета.

Служебными директивами являются директивы:

WR - запоминание рассчитанного варианта магнитной структуры для длительного хранения

RD - считывание запомненного варианта

SERV - задание чисел EPS , N_{max} , σ_{ξ}

DATA - задание значений $\beta_x, \beta_z, \alpha_x, \alpha_z, \psi_x, \psi_x'$ на входе магнитной структуры, задание желаемых значений $\beta_x, \beta_z, \alpha_x, \alpha_z, \psi_x, \psi_x', \psi_x, \psi_z$ в конце магнитной структуры и в некоторой промежуточной точке, задание весовых множителей ρ_i и апертурных ограничений.

RED - вызов программы-редактора магнитной структуры

CRDY - вывод графиков β_x, β_z функций на цветной графический дисплей

CRIP - вывод графиков β_x, β_z, ψ_x функций на бумагу с помощью устройства печати DZM-180 для документирования.

Специальной сервисной программой можно также делать копии рисунков с экрана графического дисплея на бумагу.

DIG - вывод $\beta_x, \beta_z, \alpha_x, \alpha_z, \psi_x, \psi_x', \psi_x, \psi_z$ в виде цифр.

Оптимизация и расчет магнитной структуры происходит при обращении к одной из следующих директив счета:

RUN - счет по методу случайного поиска

RUN - счет по методу наискратчайшего спуска.

Во время выполнения директивы RUN имеется возможность существенно не прерывая счет производить вывод текущего значения, Q , графиков β_x, β_z функций, значений величин $\beta_x, \beta_z, \alpha_x, \alpha_z, \psi_x, \psi_x', \psi_x, \psi_z$ на выходе магнитной структуры и их процентные отклонения от требуемых значений, уменьшать или увеличивать дисперсию σ_{ξ} . Для этого оператору необходимо послать в машину специальное сообщение (внешнее прерывание).

Внутри каждой директивы, если это требуется, введены пояснения, облегчающие работу с данными директивами.

Заключение

Опыт работы с программой OPTI показал высокую эффективность ее использования при проектировании и расчете сложных магнитных структур с большим числом дополнительных требований и ограничений. Несомненным достоинством программы является ее относительная гибкость, позволяющая сочетать чисто "машинный" счет с действиями оператора, основанными на логике здравого смысла. Время, необходимое для получения конечного результата, во многом зависит от навыка работы с программой и опыта оператора по проектированию магнитных структур. Обычно достаточно удовлетворительный результат удается получить довольно быстро (несколько часов работы), а нахождение окончательного варианта, как правило, требует нескольких дней активной работы.

Л и т е р а т у р а :

1. K.L. Brown et al., "Transport, A computer program for designing charged particle beam transport systems", CERN 80-04, (1980).
2. A.A. Garzen, A.S. Kenny, "SYNCH, A computer system for synchrotron design and orbit analysis" (unpublished).
3. E. Keil et al., "AGS - the ISR computer program for synchrotron design, orbit analysis and insertion matching", CERN 75-13 (1975).
4. А.А.Жоленц, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, стр.270, М., Наука, 1977.
5. Н.Н.Моисеев и др. Методы оптимизации, М., Наука, 1978.
6. Н.А.Мезенцев, Дипломная работа НГУ. 1970 г.

Работа поступила - 25 ноября 1980 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 2.XII-1980г. МН 13573
Усл. 0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 212.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР