

文章编号: 1007-4627(2002)04-0403-04

加速器自动调束系统的研究

张 峡, 王义芳, 黄新民

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 描述了加速器自动调束系统的设计方法, 介绍了加速器调束工作的现状和实现自动调束的意义, 阐述了基于遗传算法进行加速器自动调束的原理和加速器自动调束系统的设计方法, 给出了计算机仿真实验结果, 并指出了自动调束研究的发展方向.

关键词: 自动调束; 加速器控制; 遗传算法

中图分类号: O571.5 **文献标识码:** A

1 引言

加速器调束工作是加速器运行过程中非常重要的一个环节. 目前的调束还处于人工调节阶段, 首先根据束流光学进行理论计算, 然后为各偏转、聚焦、加速元件预置理论计算所得的参数值, 但实际情况与理论计算之间往往存在一定差异. 这时就需要人工调节, 在人工调节的过程中, 很多是依靠经验, 致使调束困难, 耗费大量的时间.

自动调束是指不需要值班人员的干预, 应用控制理论和计算机技术实现调束过程的自动进行. 实现自动调束可以提高调束效率, 减少加速器的无效运转时间, 使得加速器的利用更加充分, 为更多的实验研究提供条件.

2 自动调束原理

2.1 选择遗传算法实现自动调束

在对自动调束的研究过程中, 首先尝试的方法是应用自动控制理论实现闭环控制. 但研究发现, 在加速器调束工作中应用这种方法存在较大难度, 其主要原因有以下 3 点: (1) 加速器系统是一个由数百台设备组成的庞大而复杂的多输入多输出系统, 其物理模型非常复杂; (2) 加速器系统中的许多设备是非线性的, 不易于应用控制理论建模; (3) 由于束流诊断设备的限制, 其输出量的解空间中只有极小的一部分是可观测的, 这为进行闭环控制的建模又增加了一层困难. 故应用自动控制理论进行自

动调束不易实现. 对调束过程分析后可以发现, 加速器调束的任务是对加速器中的各个偏转、聚焦及加速元件的参数进行调节, 找到一组合适的参数使得束流满足传输效率的要求, 它实际上是一个参数搜索寻优的过程. 而遗传算法作为一种用来解决高度复杂问题的优化算法, 其鲁棒性和黑箱性使得它可以顺利应用于加速器自动调束.

2.2 遗传算法的原理^[1]

遗传算法是基于自然选择和基因遗传学原理而设计的搜索算法. 它将“适者生存”这一基本的达尔文进化理论引入串结构, 并且在串之间进行有组织但又随机的信息交换. 伴随着算法的运行, 优良的品质被逐渐保留并加以组合, 从而不断地产生出更佳的个体, 不断地逼近并最终达到最优解.

遗传算法与其它寻优算法比较, 其优点在于鲁棒性比较好. 遗传算法有以下特点:

(1) 遗传算法是对参数的编码进行操作, 而不是对参数本身.

(2) 遗传算法是从许多初始点开始并行操作, 而不是从一个点开始. 因而可以有效地防止搜索过程收敛于局部最优解, 而且有较大的可能求得全局最优解.

(3) 遗传算法通过目标函数来计算适配值, 评价每个个体的优劣, 而不需要其它的推导和附属信息, 从而对问题的依赖性较小.

(4) 遗传算法使用概率的转变规则, 而不是确

收稿日期: 2002 - 03 - 15; 修改日期: 2002 - 06 - 27

作者简介: 张 峡(1976-), 男(汉族), 山西太原人, 博士研究生, 从事加速器控制研究.

定性的规则；其在解空间内不是盲目的或完全随机测试，而是一种启发式搜索，其搜索效率往往优于其它方法。

(5) 遗传算法对于待寻优的函数无限制，既不要求函数连续，更不要求可导；既可是数学解析式所表达的显函数，又可是映射矩阵甚至是神经网络等隐函数，因而应用范围较广。

遗传算法的工作原理如下：首先将待寻优的参数编码为一个二进制串，这个串就是“基因”，它要包含所有待寻优参数的信息，每个串就是一个个体。首先随机产生 n 个个体作为初始种群；然后开始进行遗传算法的操作，对种群中的 n 个个体分别计算适配值，再根据适配值的大小对各个体进行复制、交叉、变异等操作，得到下一代种群。如此循环下去，种群中最好的适配值会越来越高，相应个体也就逐渐逼近，最后达到最优解。

计算适配值可以看成是遗传算法与实际优化问题之间的一个接口。遗传算法评价一个解的好坏，不是取决于它的解的结构，而是取决于相应于该解的适配值。适配值的计算可能很简单，也可能很复杂，它完全取决于实际问题本身。

复制操作是个体串按照它们的适配值所对应的概率进行复制的过程。在复制过程中，适配值低的串将有较大概率被淘汰，从而使种群平均适配值提高。

交叉操作是将复制产生的个体随机两两匹配，再进行交叉繁殖的过程。交叉过程是串之间有组织的而又是随机的信息交换，它可使现有的个体交换其优良遗传信息，交叉繁殖出更加优秀的个体。

变异操作是以很小的概率随机地改变一个或几个串位的值。变异相对于复制和交叉而言，处于相对次要的地位，其目的是为了防止丢失一些有用的遗传因子，可保持种群中个体的多样性。

可以发现，根据遗传算法寻优，其每一步的操作都是非常简单的，而且对问题的依赖性很小。

3 加速器自动调束的设计方法

加速器的人工调束工作是一个区间一个区间按顺序进行的，自动调束也应是这样。由于不同的区间中包含的元件个数与种类不同，所以对于不同的区间应用遗传算法时所选择的各种参数也是不同的。为便于阐述，我们选择一段设备较少的区间，

即从 HIRFL 前束运线的 2# 法拉第筒到 3# 法拉第筒间的区间。在这段区间中，包含 1 台偏转磁铁和 4 台四极透镜，相对比较简单。在其它区间上，设计的方法是相似的，只是在参数的选择上需作一些改变。

3.1 待寻优参数的确定

在这段区间的调束过程中，待寻优的参数就是各磁铁、透镜的电源的电流值，共 5 个。

3.2 适配值的选定

在这段区间上，我们采用传输效率作为适配值，由 3# 法拉第筒测得的束流强度除以 2# 法拉第筒测得的束流强度而得出。而 2# 法拉第筒处的流强在此区间的调束过程中，可认为是保持不变的。则对于每一个个体来说，其相应的适配值完全取决于按此个体设置电源电流后，3# 法拉第筒测得的流强大小。

3.3 调束寻优过程阶段的划分

在加速器中，电源电流的精度要求为 0.01 A，而变化范围通常是 0—400 A。这样每个电流参数都将对应 16 或 17 bit 的二进制串，5 台电源的串拼接起来，形成的基因字长将达到 80 bit 左右。基因的字长越长，种群中的个体数 n 也就要求越大，遗传算法的计算就越复杂，所需要的运算次数也越多。可以说，80 bit 的基因长度带来的巨大计算量是不可接受的。

另外，若采用这种长基因编码方式，在其对应的庞大的解空间中，绝大部分解所对应的适配值都为 0，即利用该参数组合无法在 3# 法拉第筒处得到束流。这时，遗传算法的进化将非常缓慢。

鉴于以上两个原因，我们不能直接利用遗传算法来求解。根据调束工作的经验可知，人工调束时常常分两步进行，先用粗调找到束流，再用微调使束流品质得到优化。借鉴这种思想，整个调束寻优过程也可划分为两个阶段。第一个阶段是寻束阶段，第二阶段是寻优阶段。对这两个阶段分别选用不同的参数运行遗传算法，可以在总体上减少运算次数，提高寻优速度。

3.4 寻束阶段的参数选择

寻束阶段相当于人工调束中的粗调。参数的范围即各电源的电流变化范围，而把精度要求降为 1

A, 这样基因的字长可缩短至一半左右, 计算的复杂性大大降低, 运算次数也大大减少. 同时, 在此阶段, 由于大量解对应的适配值均为 0, 进化较慢, 故在参数选择时需注意保护优秀个体的同时, 增大变异概率, 使尽快找到束流的可能性更大.

具体参数选择如下: 基因字长为 43 bit, 其中每台电源的电流根据其变化范围不同, 分别对应 9 bit 或 8 bit. 初始种群大小设为 100, 交叉概率取 0.8, 变异概率取 0.05. 另设定附加规则如下: 每一代中最优秀的 3 个个体直接进入下一代, 不参加复制、交叉与变异; 每一代最差的 3 个个体直接淘汰, 由随机产生的新个体代替. 另外, 结束遗传算法的条件是最优个体的适配值大于 0.3, 即其对应传输效率在 30% 以上.

3.5 寻优阶段的参数选择

在寻优阶段, 电源电流的精度要求恢复为 0.01 A, 但电流的变化范围改为寻束阶段得到的粗调最优参数 ± 10 A 的范围内.

具体参数选择如下: 基因字长为 55 bit, 每台电源都是 20 A 的变化范围, 0.01 A 的精度要求, 故每台电源对应 11 bit 的二进制串; 初始种群大小也设为 100, 交叉概率取 0.8, 但变异概率减小, 取 0.01. 运行中也遵守保护优秀个体, 淘汰最差个体的附加规则. 此阶段结束遗传算法的条件是最优个体的适配值大于 0.9, 即要求传输效率达到 90% 以上.

4 系统的软件设计

在加速器自动调束过程中既需要操作各台偏转、聚焦元件, 又需要对法拉第筒、多丝等束诊元件进行测量. 但在加速器控制系统中, 控制元件和束诊元件分别位于不同的 CAMAC 串环上, 对这些元件的操作分散在多台不同的计算机上. 所以, 加速器自动调束系统必须建立在网络的基础之上.

整个加速器自动调束系统的软件包括两部分: 自动调束软件和设备服务器软件. 系统的结构图如图 1 所示. 系统中所有软件都是利用 VC++^[2] 编写的.

自动调束软件负责遗传算法的运行, 并提供人机界面. 在其进行遗传算法操作时, 需通过局域网访问设备服务器以获得设备访问服务.

设备服务器软件^[3] 负责为局域网上的客户提供设备访问服务. 它接收自动调束软件发出的设备操作命令, 通过 CAMAC 串行总线对实际的设备进行操作, 并将最终结果返回给自动调束软件.

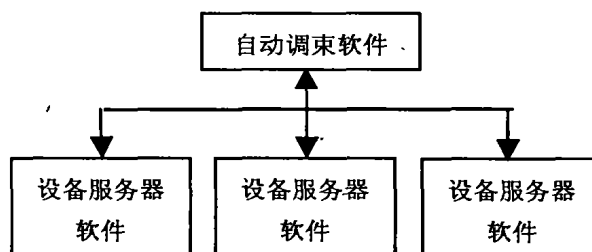


图 1 系统结构图

5 计算机仿真实验结果

本系统尚未经过在线调试, 为了更好地检验这种方法的可行性与性能, 我们进行了计算机仿真实验. 在实验过程中, 通过一个函数去计算适配值, 该函数形式如下:

$$y = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - a_i)(a_i + 10 - x_i)}{125}, & \text{当 } \bigcap_{i=1}^5 x_i \in [a_i, a_i + 10] \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 a_i 是 5 个随机产生的 1—150 之间的任意浮点数, 精确至小数点后两位, x_i 是测试点. 考察这个函数, 会发现它与实际情况有许多类似之处, 如在解空间中大部分解对应的适配值为 0, 只在很小的一部分解空间其输出不为 0, 相当于可以被法拉第筒测出, 且可知其有最优解, 最优解对应的适配值为 1. 与仿真要求十分相符.

经过实验, 得到如下结果: 在寻束阶段运行了 14 代后找到适配值大于 0.3 的个体, 在寻优阶段运行 18 代后找到了适配值大于 0.9 的个体. 这相当于总共需要 3 200 次计算适配值的计算量.

据此, 可对实际情况进行分析. 在实际调束环境中, 每进行一个个体的适配值计算, 实际上意味着要对 5 台电源进行写电流操作, 并对法拉第筒进行一次读电流操作. 这样, 每处理一个个体平均需耗时近 1 s, 若按 1 s 计, 则整个寻优过程需 3 200 s 左右, 即近 1 h. 在这里, 软件的运行计算时间均可

忽略, 时间主要用在了设备操作上, 如电源设备的调压器是通过机械传动, 一圈一圈地转动, 来改变电源电流, 这大大限制了自动调束的性能.

6 结束语

加速器自动调束系统的实现与应用将是加速器调束工作的一大进步, 但目前其性能还没有达到令人满意的程度. 今后的研究应从两个方面努力去改善其性能. 一是对遗传算法进行改进, 以求更快地收敛于最优解; 二是改造硬件设备, 一方面保证其可靠性, 另一方面使其对操作命令的响应时间缩短, 即可大幅度缩短寻优所需时间. 如果将现有磁铁电源都改造为开关电源, 则自动调束的性能将得到极大改善.

参 考 文 献:

- [1] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997, 345—372.
 [2] David J, Kruglinski, Scot Wingo, *et al.* Programming Visual C++ 6.0 技术内幕(第五版)(修订版)[M]. 北京: 希望出版

社, 1999, 15—1 021.
 [3] 张 峡. 基于 Winsock 的多线程 CAMAC 通信服务器软件的设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 22(3): 257.

在研究中需注意的一个问题是在优化其性能的同时, 必须充分考虑被控部件在实际应用过程中所存在的时滞问题, 例如磁场是逐渐变化的, 不可能阶跃式的变化. 这样才不会破坏系统的稳定性.
 另外, 现有设计中只使用了传输效率做适配值, 这存在一定的局限性. 由于束流的包络形状对束流品质也有较大影响, 故在今后的研究中应将传输效率与包络形状综合考虑. 具体地说, 要根据束流光学定出每一台多丝处的标准束流包络图; 在调束时, 从多丝获得实际束流包络图, 与标准束流包络图比较得到二者的相似度; 然后用相似度和传输效率加权平均得到适配值. 这样利用遗传算法寻优后可以得到品质更佳的束流.

Design of an Automatic Beam Tuning System of Accelerator

ZHANG Xia, WANG Yi-fang, HUANG Xin-min

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The principle of automatic beam tuning of accelerator based on genetic algorithms(GA) is expounded. Designing method of the automatic beam tuning system is introduced. Computer simulation results are presented, and the research direction of automatic beam tuning is discussed.

Key words: automatic beam turning; accelerator control; genetic algorithm