文章编号： 1007-4627(2014) 04-0482-07

超导直线加速器腔体 β_g 选取问题的研究

李 伟[1, 2]，王志军[1]，何 源[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 超导直线加速器腔体几何 β 选取是否合适，直接影响到所需要的腔体类型 (腔型) 和腔体的总量，进而影响加速器的造价。采用线性近似的物理模型，并结合粒子群优化算法，开发出一套用来选择腔体几何 β 的程序。将之运用到中国加速器驱动次临界系统 (C-ADS) 质子直线加速器的设计中，得出一组最合适的 β_g 和对应的物理设计方案。与现有的设计方案相比，新的设计方案的腔型个数少一个，而腔体总数基本不变，具有一定优势，同时也验证了本模型及优化算法的正确性。

关键词： 直线加速器；C-ADS；超导腔；β_g；粒子群优化算法

中图分类号： O572.21$^+$1　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.482

1 引言

使用超导腔加速带电粒子束越来越重要，尤其是加速连续强流质子束或重离子束。理论上，在直线加速器中，随着加速粒子速度的增加，加速腔的尺寸应当随之变化[1]。但是研发和制造大量尺寸不同的超导腔并不现实，因为超导腔的研发和制造成本都很高。为了降低成本，通常将加速器分成若干段，每一段使用相同的加速腔[1]，而且在物理设计时应当尽量减少分段数 (即需要使用的腔体类型数) 和腔体总个数。

腔体的几何 β (β_g) 是联系腔体几何参数 (不同几何尺寸视为不同类型) 和加速器动力学的桥梁，在多间隙加速腔中一般通过如下公式定义 β_g[2]：$L = \beta_g\lambda/2$，其中 L 为间隙中心到间隙中心的距离，λ 是高频电磁波的波长。当选用的腔体类型(腔型)过少或 β_g 不合适时，可能出现粒子的 β 同腔体的 β_g 相差较大的情况，此时渡越时间因子 ($T_{\rm eff}$)[2] 很低，腔体的加速效率降低，故会增加腔体总的使用量，进而增大了制造成本；当选用的腔体的种数较多时，又会增大研发成本。因而腔体的 β_g 选取问题是超导直线加速器物理设计时必须考虑的最基本、最关键的问题之一。

目前，凭借经验进行估计是解决这一问题的主要手段，而往往得不到最优的方案，要么多使用了一种腔型，要么多使用了几个或十几个腔体。因此在进行超导腔 β_g 的选取时，采用科学的、合理的办法来进行优化计算，寻找一组最合适的 β_g 并得到一套粗略的设计方案对详细的物理设计和项目预算有至关重要的意义。

中国加速器驱动次临界系统 (C-ADS) 项目的加速器[3] 是由两个平行的注入器和一段主加速器构成的，需要将从离子源引出的质子从 0.035 MeV 加速到 1.5 GeV。目前注入器有两个方案，方案 I 采用频率 325 MHz 的 RFQ 和工作在同样频率的超导 Spoke 段组成，方案 II 工作在半频模式，由频率 162.5 MHz 的 RFQ 和相同频率的 HWR 腔体组成。质子束首先经注入器方案 I 中的 RFQ 加速到 3.2 MeV 或经注入器方案 II 中的 RFQ 加速到 2.1 MeV，然后再经各自超导段加速到注入能量，最后经主加速器加速到最终能量。期间需要使用多种不同 β_g 的腔型，每种腔型需要大量的超导腔，这些腔型的 β_g 和腔体的使用个数都是待求量，然而它们彼此又没有明显的联系。因此，这类问题是一个在多维空间中寻求最优解的问题。另外还需要使用匹配段用来匹配束流，但不影响

收稿日期： 2013-12-11；　**修改日期：** 2014-02-20
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11079001)
作者简介： 李伟(1986–)，男(土家族)，湖南古丈人，在读硕士，粒子物理及原子核物理；E-mail：liwei@impcas.ac.cn。

http://www.npr.ac.cn

腔体 β_g 选取问题，所以暂时不考虑它们。

粒子群优化算法[4] 是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法，适合处理多变量、多目标和复杂约束条件的问题。算法认为优化问题的潜在解是优化空间中的一只鸟，称之为“粒子”或种子。首先根据优化变量生成解空间，并将每个种子进行初始化；然后计算出每个种子的目标值，比较出当前的最优解；接着所有种子朝最优解运动并产生新的目标值和最优解，因此将使用此算法来解决以上问题。

2　模型与假设

从本质上，腔体 β_g 选取问题是对加速器进行粗略地设计，并给出一套腔型个数和腔体总数最少的设计方案，方案中不需要给出具体的设计参数，只需要回答 4 个问题：(1) 选用了哪些腔型 (频率或间隙数不同视为不同的腔型)；(2) 每种腔型的 β_g 是多少；(3) 每种腔型需要多少个腔体；(4) 粒子经过每种腔型后的能量 (腔型变换能量或分段能量) 是多少。

选择哪些腔型这个问题牵涉到频率的选择，这将使问题变得更复杂，而在具体项目中，由于加速能量范围和起始频率基本固定，导致可以选用的腔型组合并不多，于是可将问题简化为：在所给腔型组合的条件下，每种腔型的 β_g 和分段能量分别取多少时能够使腔体使用总量最少。然后横向比较各种可能的腔型组合，得到一套所用的腔型个数和腔体总数最少的设计方案，问题得以解决。

那么，在给定腔型组合后，如何确定每种腔型的 β_g 和分段能量使得腔体总数最少呢？要解决这个问题，关键在于建立腔体总数跟每种腔型的 β_g 和分段能量之间的函数，然后求出函数极小值即可。那么必须分析粒子在每个腔体中的能量增益：

$$\Delta W = qV_0T_{\rm eff}\cos\phi_{\rm s}\ , \tag{1}$$

其中：q 为带电量；V_0 是腔体的积分电压；$T_{\rm eff}$ 是渡越时间因子；ϕ_s 是同步相位。

首先对 V_0 进行分析，从以下 3 个方面考虑。(1) 对于一个腔体来说，腔体的积分电压、V_0、最大积分电压 $V_{0\max}$、峰值电场 $Epeak$ 和最大峰值电场 $Epeak_{\max}$ 存在以下关系：

$$\kappa = \frac{V_0}{V_{0\max}} = \frac{Epeak}{Epeak_{\max}} < 1\ , \tag{2}$$

其中 κ 是对应的比例系数，用它来表示实际使用参数较为方便。(2) 对于批量生产出的同一类型且 β_g 相同的两个腔体，可以忽略个体差异，认为其参数完全相同。(3) 对于同一腔型但 β_g 不同的两个腔体的电磁参数基本不相同，在研究腔体 β_g 选取问题时，我们往往需要使用同种腔型几乎所有 β_g 对应的腔体的电磁参数，而将它们一一计算出来是不可能的，只能计算其中某些腔体的电磁参数，为此提出合理的假设：对于同种类型不同 β_g 的两个腔体，如果它们的 β_g 相差不大，认为其最大峰值电场 $Epeak_{\max}$、最大峰值磁场 $Bpeak_{\max}$ 和最大电场分布 $\boldsymbol{E}_{\max}$ 不变。于是根据 $V_{0\max} = \int \boldsymbol{E}_{\max}{\rm d}\boldsymbol{z}$ 可以得到 $V_{0\max}$ 同 β_g 呈线性关系。使用公式表述为

$$\frac{Epeak_{\max\rm new}}{Epeak_{\max\rm old}} = \frac{Bpeak_{\max\rm new}}{Bpeak_{\max\rm old}} = 1\ , \tag{3}$$

$$\frac{V_{0\max\rm new}}{V_{0\max\rm old}} = \frac{\beta_{\rm g new}}{\beta_{\rm g old}}\ , \tag{4}$$

下标 old 表示已经计算出的腔体，new 表示未计算的腔体，这说明当使用 CST 建模计算某一类型的任意一个腔体的电磁参数，将之作为这种腔型的基准腔体，然后根据上式可以得出这种腔型在任意 β_g 下的腔体的电磁参数 $V_{0\max}$ 和 $Epeak_{\max}$，当已知比例系数 κ 后,就可以根据式 (2) 得到 V_0。

此线性模型是解决这一问题的关键所在，为了说明其正确性，对轮辐型腔 (Spoke) 和锥体型半波长谐振腔 (HWR_T) 分别进行了计算，结果如图 1 所示。

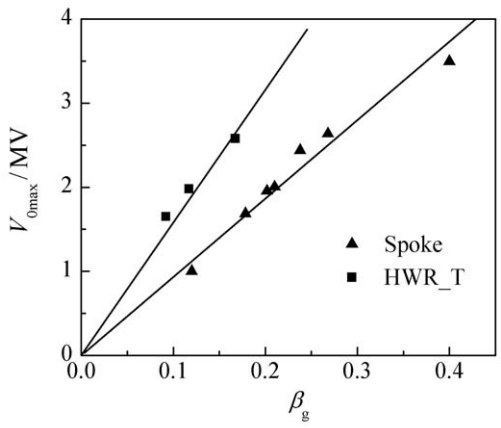

图 1　轮辐型腔 (2 间隙，325 MHz) 和半波长谐振腔 (2 间隙，162.5 MHz) 的 $V_{0\max}$ 与 β_g 的关系

http://www.npr.ac.cn

不难发现它们确实具有线性关系，但又不严格满足。尽管如此，仍然可以先作出这样的假设，然后使用算法加以弥补。

其次对 T_{eff} 进行分析，由于主要使用的超导腔是多间隙的轮辐型腔、锥体型半波长谐振腔、挤压型半波长谐振腔和椭球腔，这些腔体都属于多间隙 π 模结构的腔体，这种结构的常用理论公式[2]如下：设 N 是腔体间隙数，当 N 为奇数时，

$$T_{\mathrm{eff_c}}(N,\beta,\beta_{\mathrm{g}})=\begin{cases}\left(\dfrac{\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}\right)^2\cos\left(\dfrac{\pi N}{\dfrac{2\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}}\right)\dfrac{(-1)^{\frac{N-1}{2}}}{N\left[\left(\dfrac{\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}\right)^2-1\right]} & ,\ \text{if } \beta\neq\beta_{\mathrm{g}}\\ \dfrac{\pi}{4} & ,\ \text{if } \beta=\beta_{\mathrm{g}}\end{cases} \tag{5}$$

当 N 为偶数时，

$$T_{\mathrm{eff_s}}(N,\beta,\beta_{\mathrm{g}})=\begin{cases}\left(\dfrac{\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}\right)^2\sin\left(\dfrac{\pi N}{\dfrac{2\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}}\right)\dfrac{(-1)^{\frac{N+2}{2}}}{N\left[\left(\dfrac{\beta}{\beta_{\mathrm{g}}}\right)^2-1\right]} & ,\ \text{if } \beta\neq\beta_{\mathrm{g}}\\ \dfrac{\pi}{4} & ,\ \text{if } \beta=\beta_{\mathrm{g}}\end{cases} \tag{6}$$

它表征了腔体对粒子加速的效率，与腔体 β_{g} 和粒子速度 β 有关，同 V_0 和 ϕ_{s} 无关。然而此公式仅仅是理论公式，同实际模拟值并不一定相等，有时相差较大，如图 2 所示。

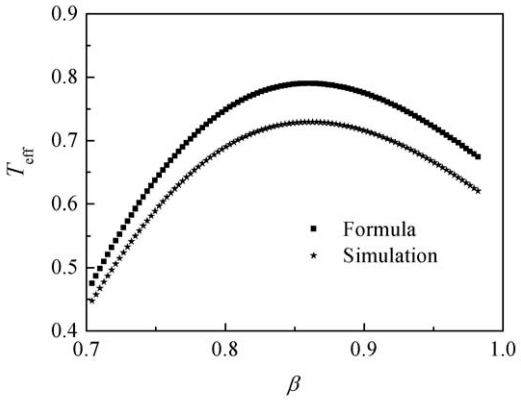

图 2 使用公式和模拟计算得出的 T_{eff} 比较 ($\beta_{\mathrm{g}}=0.82$ 的五间隙椭球腔)

能够看出它们的误差较大，因此不能直接使用此公式，必须对公式作一定的修正。修正方法为：找到腔体的 T_{eff} 模拟值的最大值，同时计算公式 (5) 和 (6) 对应的最大值，得到二者的比例系数，将之作为这种腔型的 T_{eff} 修正值，在公式的基础上乘以这个系数即能得到其真实的 T_{eff}。修正的结果如 3 所示。

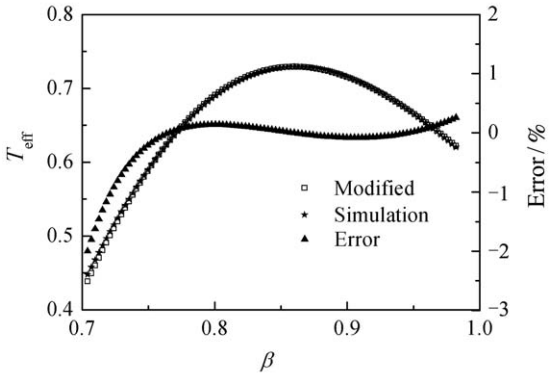

图 3 修正后的 T_{eff} 和模拟计算值的比较及其误差 ($\beta_{\mathrm{g}}=0.82$ 的五间隙椭球腔)

可以看出当 β 在 $\beta_{\mathrm{g}}(0.82)$ 附近，其误差较小，偏离 β_{g} 越大误差越大，上图中的最大误差不超过2%，而平均误差几乎为0。而对于同种腔型不同的 β_{g} 的腔体，需要作出假设：在同种腔型下，β_{g} 相差较小的所有腔体的比例系数相等。于是当给出基准腔体的比例系数后，就可以使用以上公式和此比例系数得到每个腔体的实际 T_{eff}。尽管这个假设并不十分合理，然而与上一个假设一样，也通过算法加以弥补。

于是可以得出：对同种腔型，当已知粒子速度 β，ϕ_{s}、比例系数 κ 以及参考腔体的电磁参数，能量增益仅仅是腔体 β_{g} 的函数。在给定腔型组合的前提下 (假设使用了 M 种腔型)，当已经给定所有腔体的 ϕ_{s} 和 κ 后，腔体的使用总数 F 就变为每种腔的 β_{g} 和分段能量 W 的函数，即

$$F=F\left(\beta_{\mathrm{g}_1},\beta_{\mathrm{g}_2}...\beta_{\mathrm{g}_{\mathrm{M}}},W_1,W_2...W_M\right)\ , \tag{7}$$

其中 W_M 是要加速到的最终能量，是一个常数。如此，该问题就转换到了 $2M-1$ 维空间中寻求最优解的问题。

最后我们发现一个问题：给出所有腔体的 κ 和粒子的 ϕ_{s} 并不现实。由于具体参数值是在具体的设计阶段才能给出的，此阶段只需要得到粗略的设计方案，于是可以利用它们的平均值来代替每个腔体的具

http://www.npr.ac.cn

体值 (每种腔型取各自的平均值)，这样问题同样得到解决。

综上所述，我们使用了两个假设：(1) 对于同种类型不同 β_g 的两个腔体，如果它们的 β_g 相差不大，认为其 $Epeak_{max}$，$Bpeak_{max}$ 和 E_{max} 不变，V_{0max} 与 β_g 呈线性关系；(2) 对于同种类型不同 β_g 的两个腔体，如果它们的 β_g 相差不大，认为它们真实的 T_{eff} 和公式计算的 T_{eff} 的比例系数相等。同时对每种腔型使用平均 κ 和平均 ϕ_s 来代替这种腔型中各个腔体的 κ 和 ϕ_s。这样，整个问题就完全转化为多维空间中寻找最优解的问题，可以交给优化算法去完成。然而前面已经指出，以上两条假设同实际情况会有一定的出入，由此带来的误差将由算法来弥补，这一过程和具体实现步骤将在下面介绍。

3　算法及实现步骤

有了以上物理模型和假设，利用粒子群优化算法来具体实现。首先需要明确算法中的各个量：

(1) 每种腔型的 β_g 和分段能量作为优化变量；

(2) 将腔体的 T_{eff} 设为限制条件，以保证较高的利用率；

(3) 每种腔型分配一个权重 (一般为 1)，用来解决多条相同的注入器的问题 (如C-ADS 项目的注入器有 2 条，此段的权重为 2)；

(4) 腔体总的使用个数 (各段腔体个数乘以权重后求和) 作为优化目标。

然后利用粒子群优化算法，在给定腔型组合的情况下，优化每种腔型的 β_g 和分段能量使得腔体总数最少。具体实现步骤如下：

(1) 在所给的腔型中选出一组 β_g 来计算其电磁参数，将这组腔体作为基准腔体；

(2) 设置每种腔型的平均 κ 和平均 ϕ_s (根据相宽和设计经验)；

(3) 给出每种腔型的 β_g 和分段能量的取值范围，并初始化解空间；

(4) 在解空间中随机生成大量种子；

(5) 计算每个种子的目标值；

(6) 比较所有的目标值，得到最优目标值及其对应的种子值；

(7) 所有种子朝这个最优种子移动，相当于更新了种子的参数；

(8) 重复步骤 5～7，直到所有种子收敛成一个值，即为全局最优解；

(9) 分析最终得出的全局最优解的 β_g，如果同基准腔体的 β_g 相差较大，则需计算这个新的 β_g 对应的腔体的电磁参数，以及 T_{eff} 的比例系数。然后将之作为新的基准，重复步骤 2～8，直到得到的全局最优解的 β_g 与基准腔体的 β_g 相差不大时结束。

通过以上计算就能够得到在此种腔型组合下的最优解，最后还需计算各种可能的组合方式下的最优解，通过横向比较，得到一套腔型个数和腔体总数都最少的设计方案。

4　项目验证

将以上方法应用于 C-ADS 项目中(注入器采用注入器 II)，来验证其可行性。以下计算过程是根据实际情况进行的。

首先，计算挤压型半波长谐振腔 (HWR_S)、锥体型半波长谐振腔 (HWR_T)、轮辐型超导腔 (Spoke) 以及椭球腔的电磁参数，如表 1 所列。

表 1　初始基准腔型参数*

编号	类型	β_g	间隙	频率/MHz	$Epeak_{max}$/(MV/m)	V_{0max}/MV
1	HWR_S	0.085	2	162.5	25	0.94
2	HWR_T	0.092	2	162.5	32	1.65
3	Spoke	0.178	2	325	32	1.69
4	Spoke	0.344	3	325	32	4.7
5	椭球腔	0.820	5	650	35.8	21.43

* 椭球腔 ($\beta_g = 0.82$) 的电磁参数是来自高能所的优化结果。

其次，分析比较它们的加速梯度可知：在半波长谐振腔中，锥体型的比挤压型的腔的加速梯度大，由于其频率为 162.5 MHz，波长较长，在低能时也可以用很高的加速电压[3]。故依次选择使用 HWR_T、双间隙轮辐腔、三间隙轮辐腔和五间隙椭球腔腔这 4 种腔型作为基准腔体经行优化计算。另外由于需要 2 次

http://www.npr.ac.cn

变频，在每次变频后的腔体的平均相位的绝对值适当大一些和平均 κ 适当小一些 (根据经验)， 以满足设计的需要，然后设置各个参数并进行计算，参数范围及初步计算结果如表 2 所列。

表 2　初始基准腔型参数*

编号	类型	β_g范围	最优β_g	平均κ	平均ϕ_s	T_{eff}限制	权重因子	分段能量范围/(MeV/u)	最优分段能量*/(MeV/u)	使用数量
2	HWR_T	0.07～0.15	0.098	0.875	−30	0.4	2	10～25	15.3	14
3	Spoke	0.15～0.4	0.264	0.625	−25	0.4	1	50～100	67	49
4	Spoke	0.3～0.6	0.485	0.72	−18	0.4	1	200～400	300	72
5	椭球腔	0.6～0.9	0.78	0.78	−15	0.4	1	1 500～1 500	1 500	120

* 第一种腔 (2号腔) 对应注入器，其余腔型 (3，4，5号腔) 对应主加速器 (以下均如此)；对于 C-ADS 主加速器，需考虑到能量补偿问题[3]，因此 κ 只能用到 0.77 左右，而注入器可用到 1；其平均值比此可用最大值更小 (需要考虑到周期相移、聚散焦、变频、匹配等问题)；符号*表示通过优化计算得到的值。

从表 2 可以看出，计算得到的 3，4 号腔的 β_g 同基准腔体的 β_g 相差较大，于是根据上述步骤 (9)，需要计算新的 β_g 对应的腔型的电磁参数，通过 CST 建模计算得到两个新的腔型的电磁参数，见表 3 所列。然后将新的腔型作为基准腔型，再次重复上述计算步骤 (5～7)，直到得到的最优 β_g 同基准腔型的 β_g 相差较小时结束。最后得到最优的设计方案，如表 4 所列。

表 3　新的基准腔型参数

编号	β_g	类型	间隙	频率/MHz	$Epeak_{max}$/(MV/m)	V_{0max}/MV
6	0.268	Spoke	2	325	32	2.565
7	0.485	Spoke	3	325	32	6.226

表 4　最优设计方案

类型	频率/MHz	间隙数	$Epeak_{max}$/(MV/m)	V_{0max}/MV	最优β_g	平均κ	平均ϕ_s	T_{eff}限制	权重因子	最优分段能量/(MeV/u)	使用数量
HWR_T	162.5	2	32	1.78	0.1	0.875	−30	0.4	2	15	14
Spoke	325	2	32	2.6	0.27	0.625	−25	0.4	1	65	46
Spoke	325	3	32	6.3	0.48	0.72	−18	0.4	1	290	73
椭球腔	650	5	35.8	20	0.77	0.78	−15	0.4	1	1 500	123

5　误差分析与比较

首先进行误差分析，从基本假设和算法中可以看出，由于通过多次迭代计算，最终方案中使用的腔型的 β_g 同基准腔型的 β_g 相等，即消除了部分物理假设带来的误差，剩余误差只有以下 2 个方面的来源：

(1) 使用平均 κ 和平均 ϕ_s 分别代替每个腔体实际的 κ 和 ϕ_s，因而存在一定误差 (误差的主要来源)；

(2) T_{eff} 是根据公式 (5) 和 (6) 和基准腔型的比例系数得到的，同实际值还是存在一定误差，图 3 已经给出此种误差的最大值不超过 2%。

为了说明新的设计方案的优势，与现有的设计方案[5]进行比较。现有的设计方案是采用按方案一进行的，即由频率为 325 MHz 的 RFQ 腔将质子加速到 3.2 MeV，然后由超导段加速到 1.5 GeV，方案如表 5 所列。

表 5　现有的设计方案*

类型	频率/MHz	间隙数	$Epeak_{max}$/(MV/m)	V_{0max}/MV	β_g	平均κ	平均ϕ_s	最优分段能量/(MeV/u)	使用数量
Spoke	325	2	32.50		0.12			10.00	12
Spoke	325	2	31.14	1.93	0.21	0.625	-33	42.87	38
Spoke	325	2	32.06	3.43	0.40	0.77	-25	176.30	63
椭球腔	650	5	37.72	14.00	0.63	0.66	-20	369.70	42
椭球腔	650	5	35.80	21.4	0.82	0.80	-12	1 502.00	100

* 平均 κ 和平均 ϕ_s 是根据文献[5]中图 17 和图 18 估计得到的。

http://www.npr.ac.cn

分析两套设计方案，有以下几个异同点：

(1) 腔体总用量、平均同步相位和平均 κ 基本相同，说明新的设计方案合理可行；

(2) 腔型数量不同，新的设计方案少用一种腔型，具有一定优势；

(3) 频率和腔体类型不同，新方案中低能段采用较低频率，导致可以使用具有较高加速梯度的腔型，同时也导致需要多一次跳频，加大了束流匹配的难度；

(4) 初始能量不同，新方案的初始能量低 1.1 MeV；

(5) 注入器的引出能量(主加速器的注入能量)不同，新方案的高 5 MeV。

通过以上比较和分析，可以看出新的设计方案是合理的、可行的且具有一定优势，证明了用此方法来寻找腔体最优 β_g 是可行的。

6　结论与展望

采用线性近似的物理模型并结合粒子群优化算法，完美地得到一个用来选择腔体最佳 β_g 的优化计算程序，应用到 C-ADS 项目中得出一套物理设计方案，同现有的设计方案相比，新的设计方案少用了一种腔型，而腔体总用量并没有增多，因此它具有一定优势，同时也验证了物理模型和计算方法的正确性。

此优化计算方法具有通用性，在处理多个工程项目时可以发挥更大的优势，即它能够很快地找到一组最佳的 β_g，使多个项目使用最少的腔型个数和腔体总数。

从以上的物理分析和计算过程不难发现，优化计算方法还可以在以下方面改进：

(1) 将腔体总的使用个数作为优化目标较为简单，可以考虑将之转换为具体的制造成本，使总成本最少；

(2) 在对 ϕ_s 和 κ 处理时，目前主要凭借经验来估算其平均值，假如能够将设计思想融入其中，得出每个腔体的详细设计值，这样得到的设计方案具有更大的意义。

(3) 这种计算方法仍然需要迭代多次，每次都需要优化计算参考腔体的电磁参数，而得到这些参数需要大量的时间。如果建立腔体积分电压和腔体 T_{eff} 的模拟参数数据库或实测数据库，那么将大大缩短计算时间，提高计算精度。

参考文献：

[1] YU Qingchang. Chinese Journal of Comp Utational Physics, 2003, **20**(4): 331. (in Chinese)
(郁庆长. 计算物理. 2003, **20**(4): 331.)

[2] OSTROUMOV P N. New Journal of Physics, 2006, **8**(281): 17.

[3] TANG Jingyu, LI Zhihui. Conceptual Physics Design on the C-ADS Accelerators, IHEP-CADS-Report,2012-01E:1-139 .

[4] YANG Wei, LI Qiqiang. China Engineering Science. 2004, **6**(5): 87. (in Chinese)
(杨维, 李岐强. 中国工程科学. 2004, **6**(5): 87.)

[5] LI Zhihui, Peng Cheng. Phys Rev ST Accel Beams, 2013, **16**(080101): 1.

http://www.npr.ac.cn

Study of How to Choose the β_g of Cavity in Superconducting Linac

LI Wei[1, 2, 1)], WANG Zhijun[1], HE Yuan[1]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The β_g of cavity in superconducting linac will determine how many cavities and cavity-types will be used in a project, and then it will affect to the total costs. In this paper, to get the most suitable β_g of cavity, a linear approximation model has been proposed and a code has been developed combined with the algorithm of the particle swarm optimization(PSO). Then it was been examined in the project of China Accelerator Driven sub-critical System(C-ADS). Finally it was passed and got a set of the most suitable β_g and the corresponding physical design. The new design has certain advantages over the existing design for the number of cavity type has been reduced while the total number of cavities was not increased.

Key words: linac; C-ADS; superconducting cavity; β_g; PSO

Received date: 11 Dec. 2013; **Revised date:** 20 Feb. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11079001)

1) E-mail: liwei@impcas.ac.cn.

http://www.npr.ac.cn