

# X 波段 2 MeV 行波电子直线加速管的物理设计

李国华, 陈怀璧, 郑曙昕, 黄文会

(清华大学 工程物理系 加速器实验室, 北京 100084)

**摘要:**在模拟计算程序 LINE-ACC/PC 基础上, 结合单一搜索方法和非线性最小二乘算法编程, 实现一个 X 波段 2 MeV 行波加速管的物理设计。应用此方法可以有效缩短加速管的优化设计时间。文章给出的优化计算可应用于一类常相速周期结构的加速管设计。文章同时给出了纵向粒子动力学、盘荷波导的几何尺寸及加速管的工作特性等方面的计算结果。

**关键词:**行波电子直线加速管; 设计及优化; 粒子动力学; 盘荷波导

中图分类号: TL53; TL501.5; O224 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2006)04-0470-05

## Physical Design of X-Band 2 MeV Traveling Wave Electron Linac Accelerator Tube

LI Guo-hua, CHEN Huai-bi, ZHENG Shu-xin, HUANG Wen-hui

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A computer program is rewritten based on LINE-ACC/PC and combined simplex searching method and nonlinear least-squares algorithms in order to accomplish physical design of an X-band 2 MeV traveling wave (TW) electron linac accelerator tube. The time of designing accelerator tube can effectively be shortened. The optimization displayed in the paper can be applied to design of accelerator tubes with constant-phase velocity period structure. Calculations of longitudinal particle dynamics, structure parameters and working character also are carried out and demonstrated.

**Key words:** traveling wave electron linac accelerator tube; design and optimization; particle dynamics; disk waveguide

用于 X 射线照相的便携式直线加速器设计不同于科学研究用直线加速器设计, 其中, 最重要的区别是, 前者要求尽量缩小尺寸、降低加速管的质量和复杂度, 对电子的俘获率、能谱分布和发射度的要求则是次要问题。降低加速管

的输入功率可减少电源、冷却系统, 最主要是减少射频功率源的质量和体积。X 波段加速管的分流阻抗比 S 波段的高, 在相同电场加速梯度条件下, 它要求的功率源的峰值功率将降低, 因此, X 波段是小型加速器的理想工作频率<sup>[1]</sup>。

随着计算机技术的发展,利用计算机模拟进行加速管的结构尺寸的优化和动力学计算被人们广泛采用,但对加速管设计过程中的自动优化问题的讨论却还比较少。由此,对本实验室原有模拟计算程序 LINE-ACC/PC<sup>[2]</sup>进行适当修改,通过引入单一搜索方法和非线性最小二乘算法,实现加速管尺寸及粒子动力学模拟设计。本工作对 X 波段 2 MeV 行波加速管进行腔型优化和粒子动力学模拟设计。

## 1 物理设计流程原理

一般情况下,常相速周期结构的粒子俘获效率较低<sup>[3]</sup>,变相速结构可使粒子的俘获效率升高至近 90%<sup>[4]</sup>。为简化加速管的加工流程、降低加速管调谐工作的复杂程度并降低电子枪的注入电压,这里仅讨论低能医用加速器中应用的一类常相速周期结构的加速管的物理设计过程。

对本实验室原有计算加速管加速腔的几何尺寸及粒子动力学模拟程序 LINE-ACC/PC 进行改编,使其更适于行波常相速周期结构的计算。针对原程序在计算模片孔径  $a$  和加速腔内径  $b$  中存在的收敛区间较小的问题,引入了基于非线性最小二乘算法的信赖域算法<sup>[5]</sup>,扩大了计算的收敛域,以确保即使在计算  $a$ 、 $b$  的初值  $a_0$  和  $b_0$  选取偏离精确值较大的条件下(约 40%左右)也可得到很好收敛解(原来允许的偏差仅约为 28%)。其次,在加速管的几何结构设计中引入了无约束条件下的单一搜索方法<sup>[6]</sup>,以便在加速管的微波输入功率  $P_{in}$ 、电子枪的注入电压  $V_{inj}$  和束流强度  $I$  固定条件下,通过对加速管初始空间结构的关键参数(第  $i$  个常相速周期单元的相速度  $\beta_{pi}$ 、起始位置  $L_i$  和初始电场强度  $E_i$ )进行进一步优化,使得加速管在满足一定的色散特性要求条件下具有较高的束流功率。

在加速管参数选择中, $a/\lambda$ (膜片孔径与工作波长之比)十分重要,它是影响加速管色散程度的主要参量。减小  $a/\lambda$  可增加行波电场幅值,有利于单位距离内电子获得更大能量。减小  $a/\lambda$ ,加速管的色散将随之增大,微波频率对加速管相速度的影响也随之增大,这将导致电子相对于波产生严重的滑相,频率稳定度下降;

而且,在  $a/\lambda$  减小的同时,加速管的衰减系数增加。从以加速器工作的稳定性为主要因素考虑,选择  $a/\lambda \approx 0.1$ 。

加速管初始空间结构的关键参数的选取仍需要手工设置。其中,设置的核心是为同步粒子寻找合理的加速结构(该结构不是加速管的最优结构,进一步的优化过程可由程序完成)。

LINE-ACC/PC 程序最终可以在加速管的注入功率、电子枪的注入电压和束流强度基本固定、满足一定色散特性要求条件下实现较大的辐射剂量率或较大束流功率。图 1 示出该程序的计算调试流程简图。图 1 中的  $d_i$  为加速器单腔的腔长。

## 2 X 波段 2 MeV 行波加速管设计

### 2.1 电场和相速度的分布

综合考虑了加速能量和俘获效率后<sup>[7]</sup>,决

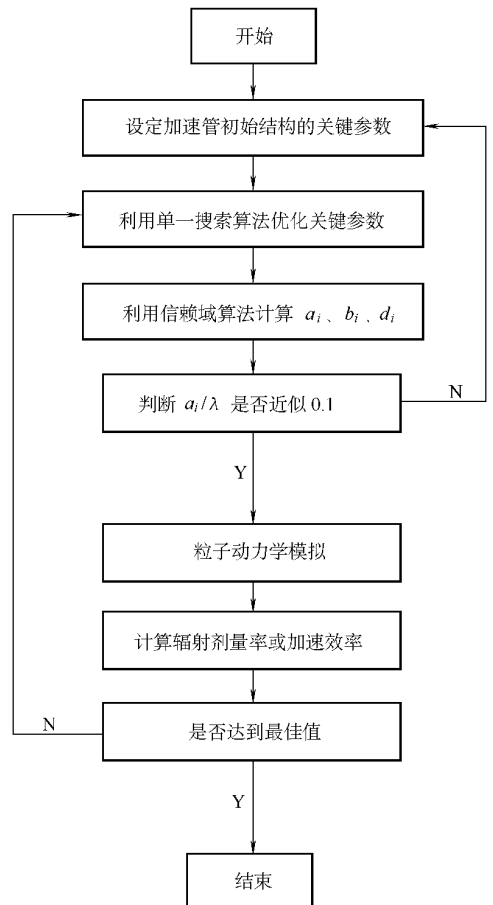


图 1 加速管关键参数优化流程简图

Fig. 1 Optimizing process of pivotal parameters

定采用4周期常相速周期结构。暂设定功率源输入加速管功率为0.25 MW,电子枪注入电压为40 kV,束流强度为70 mA。利用修改的

LINE-ACC/PC程序在经过优化计算后得到加速管中电场 $E_z$ 、相速度 $\beta_p$ 沿 $z$ 轴的分布(图2)及功率 $P$ 沿 $z$ 轴的分布(图3)。

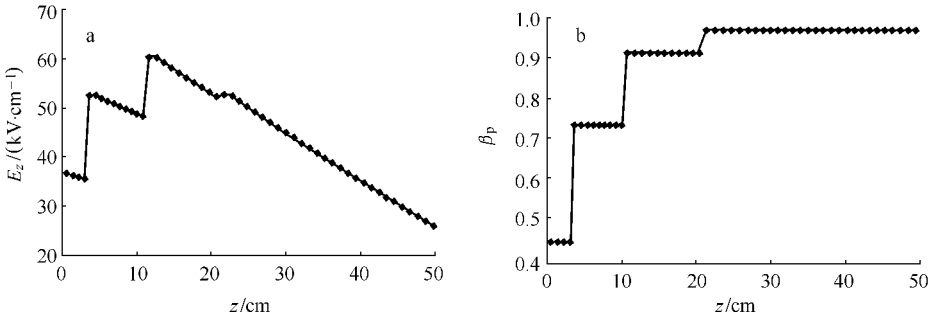


图2 加速管中优化的电场 $E_z$ (a)和相速度 $\beta_p$ (b)沿 $z$ 轴的分布

Fig. 2 Distributions of optimized electric field strength  $E_z$  (a) and phase velocity  $\beta_p$  (b) along  $z$   
 $P_0 = 0.25 \text{ MW}, I = 70 \text{ mA}$

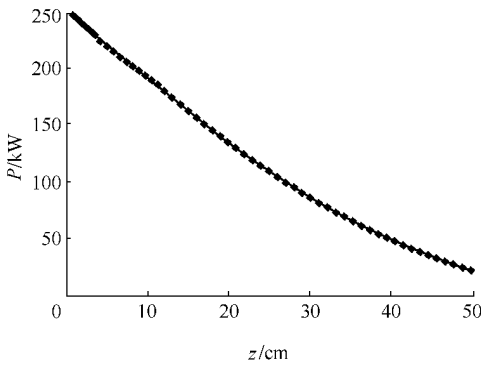


图3 加速管中功率沿 $z$ 轴的分布

Fig. 3 Distribution of power along  $z$   
 $P_0 = 0.25 \text{ MW}, I = 70 \text{ mA}$

## 2.2 加速腔几何尺寸

依据优化的电场和功率数据,在模片厚度 $t=0.15 \text{ cm}$ <sup>[8]</sup>条件下,计算各常相速段加速腔的主要几何尺寸 $a$ 、 $b$ 和加速腔的各周期单元长度 $d$ <sup>[9]</sup>。计算结果列于表1。

表1 Superfish<sup>[9]</sup>模拟计算得到的加速腔尺寸

Table 1 Dimension of cavities calculated by Superfish<sup>[9]</sup>

常相速段	$a/\text{cm}$	$b/\text{cm}$	$d/\text{cm}$	$t/\text{cm}$	加速腔数目
1	0.385 8	1.279 1	0.471 8	0.15	7
2	0.376 1	1.226 2	0.787 4	0.15	10
3	0.345 5	1.205 7	0.981 6	0.15	10
4	0.340 7	1.202 2	1.042 5	0.15	29

## 2.3 加速管粒子动力学模拟

程序计算出的纵向动力学电子俘获效率约为58%,同步粒子的加速管出口能量为2.16 MeV。电子能谱分布示于图4。

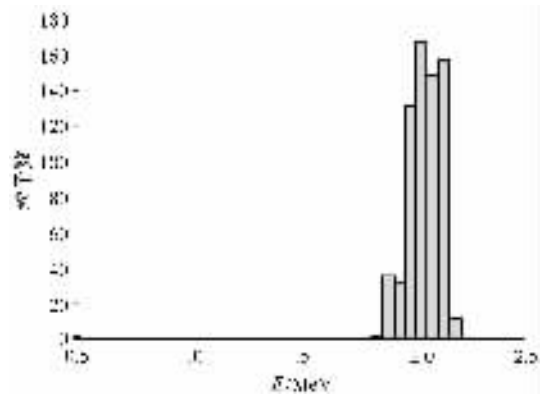


图4 考虑空间电荷作用加速管出口的电子能谱

Fig. 4 Electron energy spectrum

$P_0 = 0.25 \text{ MW}, I = 70 \text{ mA}$

## 3 设计方案主要参数

X波段2 MeV行波加速管的主要模拟计算结果列于表2。

模拟计算得到的核心加速结构可将电子加速到2.16 MeV,对应的输出流强为70 mA,加速管工作效率 $\eta$ 约为60%。由文献[10]可知,电子加速能量为2.16 MeV时,对应的加速器

表 2 X波段 2 MeV 行波加速管设计方案主要参数

Table 2 Critical parameters of X-band 2 MeV TW accelerator

主要参数	设计参数值
加管总长(cm)	51.2
加速结构	常相速周期
工作模式	$2\pi/3$
注入电压(kV)	40
总加速腔数目	56
频率(MHz)	9 300
加速能量(MeV)	2.16
脉冲流强(mA)	70
峰值功率(MW)	0.25
分流阻抗(MΩ/m)	106
品质因数 Q	7 590
电子俘获率	58%

最大发射率约为  $0.56 \text{ cGy} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{A}^{-1}$ 。当电子枪产生电子束的占空因子为  $1/1\ 000$  时,平均流强为  $70 \mu\text{A}$ ,因此,加速管正前方 1 m 处产生的最大发射率约为  $39.14 \text{ cGy} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

#### 4 工作特性分析

微波频率、微波功率、束流负载对加速器的电子束能量、能谱、俘获系数的影响的计算机计算结果分别示于图 5、6、7。

#### 5 小结

将两种算法结合对加速管几何尺寸实现了优化设计。利用多变量的单一搜索方法进行加速结构优化和用非线性最小二乘算法进行加速腔尺寸优化。计算结果表明,这种自动优化方

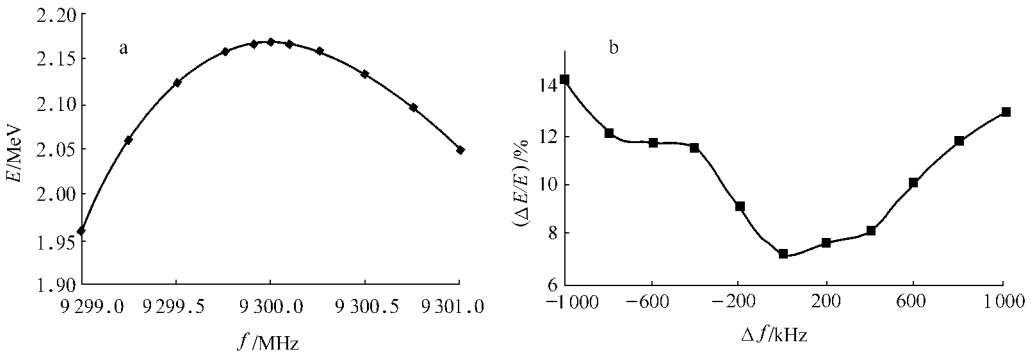


图 5 电子能量(a)和电子出口能谱宽度(b)随微波频率的变化

Fig. 5 Energy(a) and energy spectrum width(b) of outlet vs. frequency

$P_0 = 0.25 \text{ MW}, I = 70 \text{ mA}$

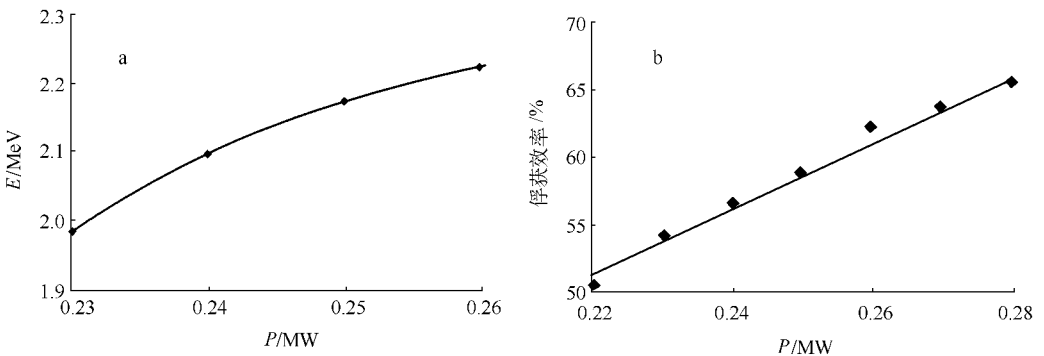


图 6 加速管入口功率对电子能量(a)和电子俘获效率(b)的影响

Fig. 6 Energy(a) and capture efficiency(b) vs. input RF power

$f_0 = 9\ 300 \text{ MHz}, I = 70 \text{ mA}$

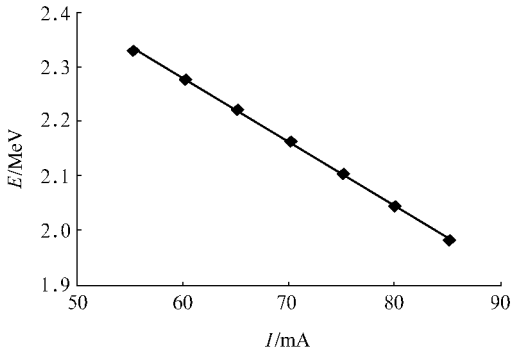


图7 束流负载曲线

Fig.7 Curve of beam loading

$P_0=0.25$  MW,  $f_0=9\ 300$  MHz

法是可行的。由于此方法是在给定的关键参数条件下进行的无约束尺寸优化模拟设计,因此,要求在尺寸优化之初,首先给定关键参数的初值,故这是1种手工半自动尺寸优化方法。

感谢林郁正教授给予的理论设计方面的指导。

#### 参考文献:

- [1] MILLER R H, DERUYTER H, FOWKES W R, et al. RF Phase focusing in portable X-band, linear accelerator[J]. IEEE Trans, 1985, NS-32;3 231-3 234.
- [2] 吴莹英,李泉凤,汪富生. 大型集装箱检测系统用加速器中的 LINE-ACC/PC 程序[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(S1):26-28.  
WU Yingying, LI Quanfeng, WANG Fusheng. LINE-ACC/PC analysis of the accelerators for large customs container inspection systems[J]. Tsinghua Univ(Sci & Technol), 2002, 42(S1): 26-28(in Chinese).
- [3] BROWN L E, GALLAGHER W J. Low voltage injection into the electron linear accelerator[J]. IEEE Trans, 1971, NS-18:522-524.
- [4] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京:科学出版社,1986:89.
- [5] COLEMAN T F, LI Y. An interior, trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. SIAM Journal on Optimization, 1996 (6):418-445.
- [6] LAGARIAS J C, REEDS J A, WRIGHT M H, et al. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions[J]. SIAM Journal of Optimization, 1998,(9):112-147.
- [7] JIN K, PEI Y J, JIANG D M, et al. X-band traveling wave accelerator structure R&D[C]// Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago, USA: [s. n.], 2001: 4 089-4 091.
- [8] 尹厚东,裴元吉. X波段盘荷波导加速结构的模拟计算与实验测试[J]. 原子能科学技术, 2000, 34(6):507-514.  
YIN Houdong, PEI Yuanji. Numerical calculation and experimental investigation on X-band disk-loaded waveguide accelerating structure [J]. At Energy Sci Technol, 2000, 34(6):507-514(in Chinese).
- [9] JAMES H, BILLEN, LLOYD M. Young Los Alamos National Laboratory poisson superfish codes, version 6[R]. USA:Los Alamos National Laboratory, 2002.
- [10] NCRP. Radiation protection design guidelines for 0.1~100 MeV particle accelerator facilities; Report No 51[R]. USA:National Council on Radiation Protection and Measurements, 1977.