

电子回旋加速器粒子稳定加速的模拟计算

胡玉民¹, 刘 华¹, 林幸笋¹, 王海鹏²

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. BiNL, Physics Department, Bldg 901A, USA)

摘要:用 MAFIA 程序计算了电子回旋加速器加速腔上加速孔、阴极孔、辅助孔(第 加速型)对加速场分布的影响。计算结果表明:进行粒子动力学模拟计算时,忽略这种影响是合理的。另用对电子加速到最终能量跟踪计算的方法,同时以能散度为依据,计算电子稳定加速的参数范围,并给出 S 波段电子回旋加速器工作参数的计算结果。计算用 C 语言编制的程序在微机上进行。

关键词:电子回旋加速器; 加速型; 加速腔; 跟踪模拟计算

中图分类号: TL54⁺² **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)06-0493-06

电子回旋加速器(本文指圆形电子回旋加速器, Circular Microtron)作为一种低能电子加速器有其独特的优点,如束流能散小、能量准确度好且调节范围大、功率源小、造价低等^[1],自 60 年代以来,在 高能同步加速器注入器、自由电子激光、工业探伤、剂量学和医疗等许多领域被采用。目前,仍受到人们普遍重视^[2~6]。本工作从不同角度对电子回旋加速器粒子稳定加速的特性进行模拟计算。

1 阴极孔、加速孔对加速腔场分布影响的计算

电子回旋加速器一般采用工作于 TM_{010} 型的圆柱形加速腔(图 1),有两种电子注入加速方式(图 2)。电子加速的动力学计算是在忽略加速腔上加速孔、阴极孔和辅助孔对腔内场分布影响的假设下进行的。为了检验假设的合理性,用 MAFIA 程序对此进行计算,考虑粒子在 $x-y$ 平面中的加速运动,不计开孔影响的场分布为:

$$E_y = E J_0(kx) \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$H_z = E J_1(kx) \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中: $k = 2\pi/\lambda = 2.405/a$; $J_0(kx)$ 、 $J_1(kx)$ 为零阶和一阶贝塞尔函数。计算是以我国 25 MeV 电子回旋加速器^[7]的加速腔参数为例进行的。其中,水平方向两条长加速缝尺寸对第 加速型为 20 mm × 8 mm,第 加速型分别为 14 mm × 8 mm、18 mm × 8 mm,阴极孔直径两者均为 5 mm,第 加速型腔上的辅助孔尺寸为 11 mm × 8 mm。图 3 是两种腔内场分布的计算结果。计算结果表明:忽略这些孔对场分布的假设作为一级近似是合理的,已建造的电子回旋加速器

收稿日期:1999-08-02; 修回日期:1999-11-25

作者简介:胡玉民(1933—),男,江苏武进人,教授,加速器物理与技术专业

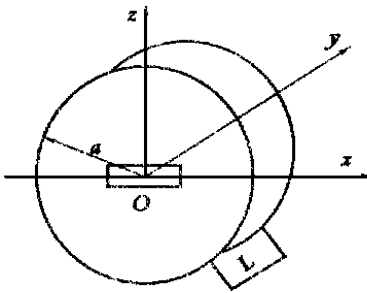


图1 圆柱形加速腔
Fig. 1 Cylindrical cavity

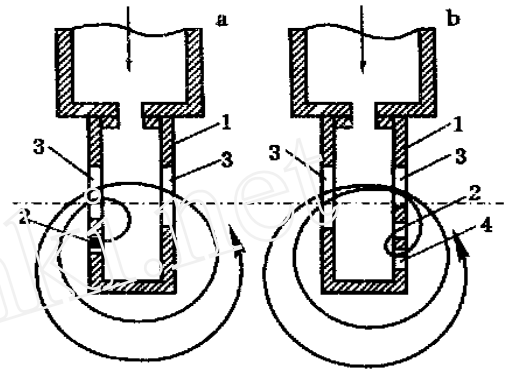


图2 加速腔和电子注入方式

Fig. 2 Cavity and electron injection mode
1—加速腔;2—发射体;3—加速孔;
4—辅助孔所处磁场为均匀磁场
a—第 加速型;b—第 加速型

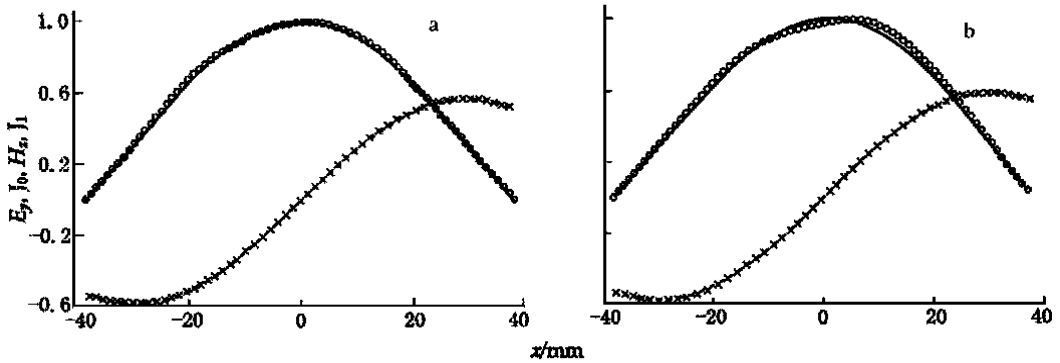


图3 加速腔内电磁场分布的 MAFIA 模拟计算

Fig. 3 The electromagnetic field simulated by MAFIA program
— $E_y(x)$; 实线 — $J_0(kx)$; × — $H_z(x)$; 虚线 - — $J_1(kx)$
纵坐标为对幅值的归一化值
a—第 加速型;b—第 加速型

能很好地运行也证明了这种假设的合理性。

2 粒子运动方程及模拟计算简述

电子在中心平面 ($z = 0$) 上被加速,受加速腔中高频电磁场和垂直于轨道平面的均匀直流磁场 H 作用,运动方程^[1,7]为:

$$\frac{d}{d} \frac{V_x}{\sqrt{1 - \beta^2}} = V_Y J_1(X) \sin - V_Y \quad (3)$$

$$\frac{d}{d} \frac{V_Y}{\sqrt{1 - \beta^2}} = V_X + J_0(X) \cos \phi - V_X J_1(X) \sin \phi \quad (4)$$

式中:长度和时间均为无量纲量,其中, $X = (2/\lambda) x$, $Y = (2/\lambda) y$, 相位 $\phi = \omega t - \omega_0 t = 2\pi f t - 2\pi f_0 t$ (为高频场频率); $V_X = dX/dt$, $V_Y = dY/dt$; $\lambda = H/H_0$, $H_0 = 2\pi m_0 c^2/e$ (为高频场波长, e 为电子电荷, m_0 为电子质量, c 为光速); $H = E/H$, E 为加速腔中高频场的幅值; $\beta^2 = V_X^2 + V_Y^2$ 。初始条件为:

第 加速型 $\phi = 0, X = X_0, Y_0 = 0, dX/dt = 0, dY/dt = 0$;

第 加速型 $\phi = 0, X = X_0, Y_0 = l$ (无量纲腔高), $dX/dt = 0, dY/dt = 0$ 。

为便于计算,将式(3)、(4)化成一阶常微分方程形式。计算用 C 语言编写的 CMDP 程序分腔内、腔外两部分进行。腔内用龙格-库塔法数值积分,腔外的运动用电子在均匀磁场中作圆运动的公式来计算。根据自动稳相理论,电子回旋加速器中粒子平衡相位 ϕ_s 为 20° ,而电子能否稳定加速与参数 X_0 、 ϕ_0 、 l 、 λ 有关,为了寻找能稳定加速的运动参数范围,需要进行大量的计算。文献[1]使用不等式 $(\phi_n - 0.25)^2 + 0.84(\phi_n - 0.25) - \phi_n + 0.48 - \phi_n^2 > 0.04$ 作为判断稳定的边界。其中, ϕ_n 是第 n 圈电子穿过加速腔的平均相位 $\bar{\phi}_n$ 和 高频场最近一个峰值相位之差, $\bar{\phi}_n = \phi_n - [1 + (n+2)(n-1)]$; $\phi_n = 2(G_n - G_{n,s})/\lambda$; G_n 、 $G_{n,s}$ 是相对电子静止能量 U_0 的非谐振电子和谐振电子的能量, $G_{n,s} = (n+1)^{-1}$ [1]。而且,一般只判断前 5~10 圈,这样,可大大减少计算量。在本工作中,用跟踪计算到电子最终能量并以设定的能散度 G_E (动能) 为依据来判断稳定加速的参数范围, $G_E = [(n+1)^{-1} - G_n]/[(n+1)^{-1} - 1]$ 。作为例子,计算中的最终能量为 22 MeV,能散度为 0.5%。对上述一组参数在可能大的范围内按一定步长的组合进行计算,必要时可绘出轨迹以更直观的方式判断是否稳定加速(电子回旋加速器轨道间距是等于 $\lambda/2$ 的定值)。如此确定稳定加速的动力学参数较直观、可靠。

3 计算结果及讨论

3.1 粒子稳定加速的动力学参数范围

根据运动方程,在加速场频率一定时,粒子稳定加速与电子发射位置 X_0 、高频场参数 λ 、磁场参数 H 、电子注入时 RF 场相位 ϕ_0 和加速腔高 l 有关,其中,受高频击穿场强的限制,此值在 10 cm 波段约为 600 kV/cm,这样,根据文献[1,7]的计算,对于第 1、2 加速型分别为 1.0、0.8;而腔高又受条件 $2 \sin(l/2) \cos \phi_s = 1$ 约束[1,7],电子稳定加速的讨论就限制在 λ 、 X_0 、 ϕ_0 3 个参数中。不同相位下阴极的发射效率不同;在 ϕ_0 固定时,由于电子稳定加速的相位范围不大,这样,与 ϕ_0 对应的稳定工作参数的组数总和就决定了加速器的流强。图 4 是波长为 10 cm 的电子回旋加速器能稳定加速的工作参数总和与 ϕ_0 的关系曲线。计算时, X_0 对第 1 加速型从 1.00 到 1.30,步长为 0.03;对第 2 加速型从 0.05 到 0.30,步长为 0.01。 ϕ_0 从 -180° 到 0° ,步长对第 1 加速型为 0.2° ;对第 2 加速型为 1° 。

从图 4 曲线可得到 S 波段第 1、2 加速型工作参数 ϕ_0 的范围。对第 1 加速型,在 $\phi_0 = 1.02$ 处出现一峰值,这时流强比其他 ϕ_0 下的都高,但加速器尺寸会大些;另外,对于第 2 加速型能稳定加速的 ϕ_0 范围较大,这样,可在同一轨道上较大范围地调节引出电子的能量,调节率可达 2 倍。对第 2 加速型,在 $\phi_0 = 1.99$ 处也出现一个峰值,此值比第 1 加速型的高,这样,对同样能量的加速器,第 2 加速型可比第 1 型做得小些。

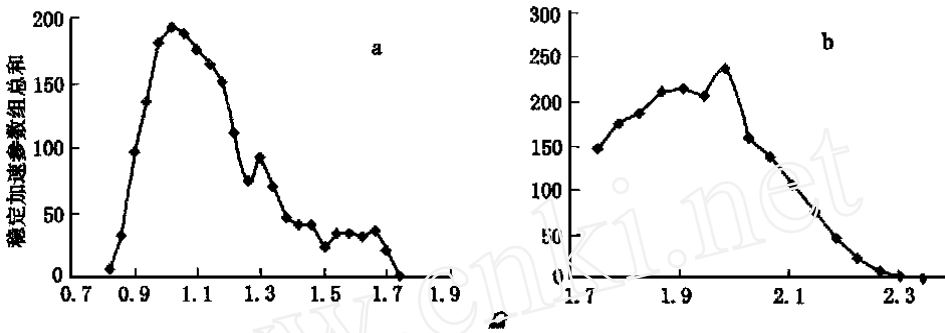


图4 稳定加速参数组总和与 的关系曲线

Fig. 4 A plot of the sum of stable accelerating parameters against

a——第 加速型;b——第 加速型

3.2 22 MeV、10 cm 波段电子回旋加速器的动力学特性

按表1工作参数进行计算,结果(图5)表明:第 加速型的稳定加速相位宽度 不大,只有 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$,俘获系数 K 约为 $1/50$;第 加速型的 较大,为 $9^{\circ} \sim 11^{\circ}$,俘获系数 K 可达 $1/18$ 。不同的 X_0 对应的稳定工作相位区互相错开,这使得第 加速型在 10° 范围内、第 加速型在 20° 范围内都有稳定加速的电子,其效果是拓宽了能稳定加速的初始相位宽度。

表1 22 MeV、10 cm 波段电子回旋加速器动力学特性计算参数表

Table 1 The dynamic parameters for a 22 MeV, 10 cm band microtron

方式	腔厚 L/cm	腔直径 $2a/cm$	加速圈数 n	最终能量 E_K/MeV	能散度/ $\%$	X_0	
1.0	1.786	7.66	1.694 3	25	22	0.5	1.18 ~ 1.28
0.8	2.316	7.66	1.835 5	23	22	0.5	0.15 ~ 0.33

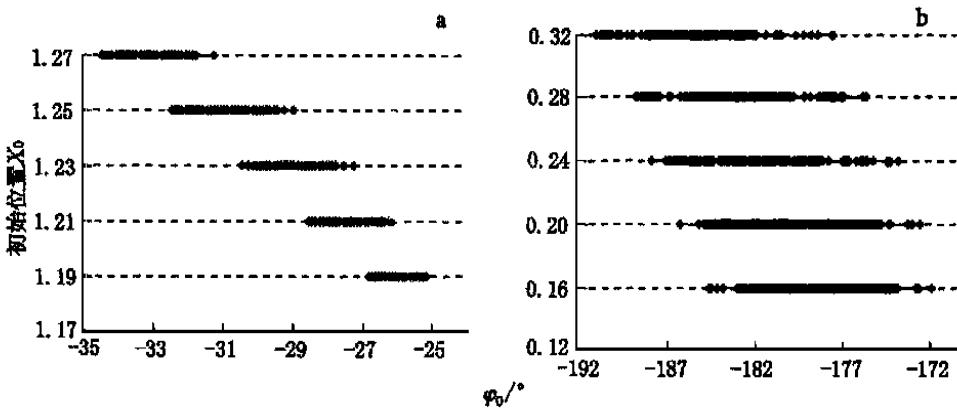


图5 22 MeV、10 cm 波段电子回旋加速器稳定的参数区分布

Fig. 5 Distribution of stable injecting phase of 22 MeV S band microtron

a——第 加速型;b——第 加速型

CMDP 程序给出电子在腔内运动的轨迹,由此可以确定电子穿过加速腔的位置。考虑电子的全部稳定工作点,就可以确定加速腔、加速孔和辅助孔(第 加速型)在轨道平面上的位置和尺寸(图 6)。实际设计中考虑到其它因素的影响,应将孔开得稍大一些。CMDP 程序还可给出 22 MeV 电子束流在引出点的特性,即束流径向尺寸 D 和径向发散角 θ 。对第 加速型, $D = 3.2 \text{ mm}$, $\theta = 0.86^\circ$;对第 加速型, $D = 4.8 \text{ mm}$, $\theta = 2.0^\circ$ 。

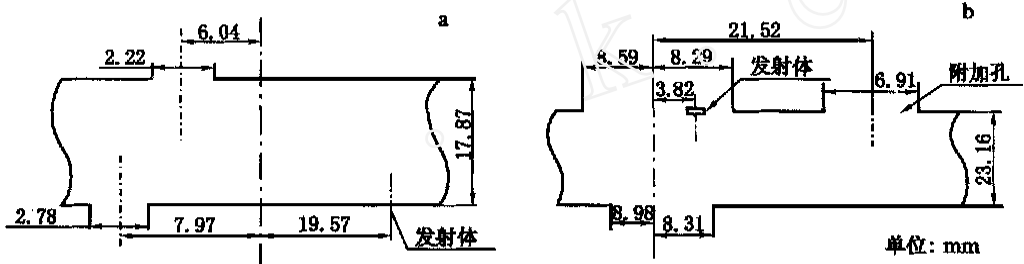


图 6 加速腔上加速孔和辅助孔的位置和尺寸

Fig. 6 Position and dimension of the accelerating and the supplementary apertures

a——第 加速型;b——第 加速型

电子在加速腔中由于相位和能量振荡而稳定加速。计算结果表明:第 加速型电子的相位振荡的跨度大,稳定性差,22 圈以后开始失步,26 圈后可能不会再稳定加速;第 加速型电子相位在 7° 的较小范围内振荡,非谐振电子与谐振电子总能量之差 U_n 始终保持小于 $0.03 U_0$ ($U_0 = 0.511 \text{ MeV}$),从而可以继续加速到更高的能量。

4 结束语

1) 本工作的计算结果表明:在电子回旋加速器粒子动力学计算中,忽略加速腔上的加速缝、阴极孔和辅助孔对加速腔内场分布影响的假设,作为一级近似是合理的。

2) 本工作跟踪计算到最终能量,并以设定的能散度为稳定加速的判据,其物理过程较为直观,计算结果与文献[1,7]报道结果相符。

3) 计算结果表明:对两种加速型能稳定加速的初始相位范围是不同的;对同一类加速型,从发射体不同位置发出的电子,其稳定加速的初始相位所处的高频场相位区域也不尽相同。

4) 给出了 22 MeV 电子回旋加速器的详细的模拟计算结果,包括稳定加速的初始相位分布、轨道平面中的加速孔和辅助孔的尺寸,以及输出的电子束流性质等。

5) 计算中未考虑加速腔和波导的耦合孔,估计这比加速缝带来的影响更小。

参考文献:

- [1] Kapitza SP, Melekhin VN. The Microtron[M]. London: Harwood, 1978. 36~52.
- [2] Hu Y, Zhu X, Qian X, et al. A 25 MeV Microtron for the Establishment of Absorbed Dose Standard[J]. Nucl Instrum Methods, 1985, B10/11: 934~936.
- [3] Messina G, Bizzarri U, Gubileo G, et al. The Activity on Accelerators at the ENEA Frascati: Status and Perspectives[A]. Tazzari S. Proceedings of the European Particle Accelerator Conference [C]. Singapore: World Scientific, 1988. 1477~1479.

- [4] Soni HC, Bemalkhedkar MM, Hannurkar PR, et al. Design and Development of Microtron at CAT[J]. *Indian J Phys*, 1991, 65A(6): 455 ~ 470.
- [5] Kapitza SP, Tsipenyuk YuM. Trends in Electron Accelerator Applications[J]. *Nucl Instrum Methods*, 1998, B139: 1 ~ 11.
- [6] Katsoya S, Atsuko T, Katsuhiro K, et al. A Compact High-current Microtron[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1997, 44(4): 1 673 ~ 1 676.
- [7] 朱惜安. 剂量标准用电子回旋加速器粒子动力学计算[A]. 粒子加速器及其应用[C]. 重庆: 科技文献出版社重庆分社, 1980. 109 ~ 115.

Simulation of the Stable Acceleration of the Electrons in Microtron

HU Yu-min¹, LIU Hua¹, LIN Xing-sun¹, WANG Hai-peng²

(1. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *BNL, Physics Department, Bldg 901A, USA*)

Abstract: The influence on the accelerating electromagnetic field caused by the accelerating apertures, cathode hole and supplementary aperture (the second acceleration type), is studied by using the MAFIA program. The calculation indicates that ignoring this influence is reasonable for simulating the electron motion. A C language program is compiled for the simulation, which follows the electron track of the whole motion and take the energy spread as criterion of the stable acceleration, so as to determine the range of parameters of microtron. A group of detailed result of S band microtron is also given.

Key words: microtron; accelerating type; accelerating cavity; computer simulation