

# 超灵敏小型回旋加速器质谱计 非理想因素影响的研究

卢相顺

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 研究了SMCAMS中存在的电与磁的非理想因素、三角波加速电压线性度、加速电极位置误差和磁场低次谐波等影响,为解决实际工程中公差的确提供了计算依据。

**关键词** 非理想因素, 公差, 谐波

**中图分类号** TL 542

## 1 磁场一、二、三次谐波影响的研究

在小回旋加速器中,由于磁铁材料、加工工艺和安装等因素无法做到完全理想,实际的磁铁是不完善的,表现为磁场沿幅向分布不均匀、磁场的对数梯度沿幅向分布不均匀或磁中心面的畸变等。不完善的磁场对粒子产生各阶频率的扰动,相当于在粒子线性振荡的方程中增加了强迫项,使粒子作强迫振荡。当强迫振荡的频率和粒子自由振荡的频率相等或满足一定的关系时,就会发生共振,这时对粒子行为的影响就很严重。一般说来,磁场沿幅向分布的不均匀将造成粒子的径向整数共振及轨道中心的进动,而轴向磁中心面的偏离将造成轴向整数共振。

### 1.1 一次谐波对粒子运动的影响

为了分析粒子在一次谐波作用下的运动情况,我们人为地强加一定的一次谐波。假设在幅角 $\theta_1$ 存在一以半径 $R_1$ 为中心,幅值为 $A_1$ ,半高宽度为 $W_1$ 的一次谐波,该一次谐波沿半径的分布情况假设为

$$H_1(R) = A_1 \cdot \exp[-(R-R_1)^2 / (0.6 \cdot W_1)^2] \quad (1)$$

式中,系数用0.6为的是使一次谐波的幅度(即 $H_1(R)$ )沿半径的变化慢一些,使它沿半径的分布不同于高斯分布。从(1)式可见, $W_1$ 越大,一次谐波的作用范围也越大,如当 $W_1=100$ 时,一次谐波沿半径几乎是等值分布。

该一次谐波对位于极坐标 $(R, \theta)$ 上的粒子,产生的附加平均场为

$$\Delta B(R, \theta) = H_1(R) \cdot \cos(\theta - \theta_1) \quad (2)$$

这部分平均场只有在粒子进入一次谐波存在区域时才有作用。

**1.1.1 一次谐波的幅角分布对粒子运动的影响**<sup>[1]</sup> 取 $R_1=35\text{cm}$ 、 $W_1=100$ 、 $A_1=2 \times 10^{-4}\text{T}$ 时,不同幅角 $\theta_1$ 的一次谐波,主要考虑粒子在引出偏转板入口处(约100圈左右)时的运动

情况。考虑到在磁场峰谷边界处的一次谐波对粒子运动的影响将较大，取  $\theta_1=22.5^\circ \cdot N$  ( $N=0, 1, 2 \dots 15$ )，计算结果如表 1 所示。表 1 中列出了粒子运动过程中的轨道中心平均相干性振荡振幅 ( $\Delta A$ )，引出方位角 ( $90^\circ$  方位角) 的相位振荡平均偏移量 ( $\Delta \psi$ )，引出圈间距 ( $\Delta S$ ) 以及相对于没有一次谐波时引出圈 (第 100 圈)、引出方位角 (即  $90^\circ$  方位角) 的半径差 ( $\Delta R$ ) 和能散 ( $\Delta E/E$ )。由表 1 可见，对粒子  $\Delta S$ 、 $\Delta R$ 、 $\Delta E/E$ 、 $\Delta A$  和  $\Delta \psi$  的影响都在  $225^\circ - 247.5^\circ$  幅角范围内比较大，说明此时粒子的轨道中心进动很厉害，受一次谐波的影响很大。所以我们确定  $247.5^\circ$  幅角的一次谐波对粒子的影响最大。我们同时还计算了  $A_1=3 \times 10^{-4}T$  和  $1 \times 10^{-4}T$  下的粒子运动情况，其规律类似于  $2 \times 10^{-4}T$  下的计算结果，但幅值越高，影响也越严重，轨道中心的进动也越厉害。如粒子在  $A_1=3 \times 10^{-4}T$  的一次谐波作用下，在第 100 圈时最大的半径差可以达到 1cm，这是不能允许的。一次谐波对  $90^\circ$  方位角的粒子轨道中心的进动情况如图 1 所示，而  $90^\circ$  方位角的相位振荡情况如图 2 所示。

表 1 一次谐波的幅角分布对粒子运动的影响  
Table 1 Influence of the 1st magnetic harmonic part along the azimuthal distribution on the movement of a particle

	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°
$\Delta A/cm$	0.25	0.22	0.35	0.36	0.33	0.38	0.25	0.33	0.39	0.43	0.46	0.44	0.41	0.37	0.35	0.32
$\Delta \psi / (^\circ)$	-4.8	-5.0	-4.0	-4.5	-1.6	0	3	5.4	6.5	8.0	8.0	6.8	5.5	3.5	1.0	-2.0
$\Delta S/mm$	6.4	6.5	6.5	6.6	6.5	6.1	5.4	4.7	4.3	4.1	4.2	4.3	4.6	5.0	5.5	6.0
$\Delta R/mm$	-1.76	-3.9	-5.4	-6.7	-6.0	-4.4	-2.2	-0.15	2.01	4.1	5.9	6.85	6.56	5.24	3.2	0.6
$(\Delta E/E)/\%$	-2.32	-3.26	-2.55	-2.4	0.16	1.86	4.04	5.04	6.99	7.73	8.6	7.34	6.04	3.87	2.04	-0.8

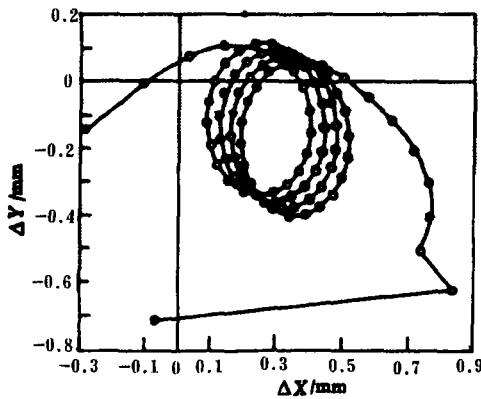


图 1 一次谐波作用下粒子  $90^\circ$  方位角的轨道中心进动相图

Fig.1 The orbit-center movement of a particle with the existing of the 1st magnetic harmonic at  $90^\circ$  azimuthal

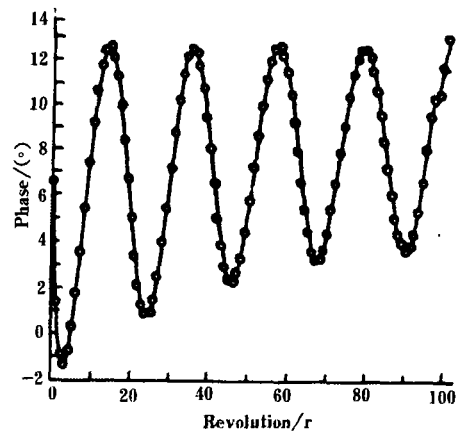


图 2 一次谐波作用下粒子  $90^\circ$  方位角的相位振荡  
Fig.2 The phase vibration at  $90^\circ$  azimuthal with the existing of the 1st magnetic harmonic

1.1.2 一次谐波的径向分布对粒子运动的影响 限定  $N_1 < 100$ ，改变  $R_1$ ，使其分别作用在小半径、中间半径和大半径，取  $A_1=2 \times 10^{-4}T$ ， $\theta_1=247.5^\circ$ ，计算结果如表 2 所示。从表 2 可见，大半径处的一次谐波对粒子的引出半径差影响较大，小半径处的一次谐波对粒

子的引出能散影响较大,中间半径处的一次谐波相对来说影响较小。同时,影响范围  $W_1$  减小,对粒子的影响也减小。

表 2 一次谐波的径向分布对粒子运动的影响

Table 2 Influence of the 1st magnetic harmonic part along the radial distribution on the movement of a particle

	$R_1/cm$								
	25			35			45		
$W_1/cm$	20	10	5	20	10	5	20	10	5
$\Delta S/mm$	6.3	6.3	6.2	6.3	5.7	5.7	6.2	6.3	6.2
$\Delta R/mm$	1.25	1.06	0.96	-0.8	0.11	-0.1	-4.1	-2.9	-1.4
$(\Delta E/E)/\%$	10.2	7.47	4.95	5.51	1.49	0.21	4.10	2.80	1.45

1.1.3 一次谐波对束团的影响 发射度为  $65mm \cdot mrad$ 、特征长度为  $600mm$  的束团相椭圆边界上的 8 个粒子(以 A, B, ...H, 分别代表处在相椭圆上  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , ... $315^\circ$  的粒子)在一次谐波作用下,与相椭圆中心粒子相比较如表 3 所示。D 粒子受到的影响最大,但由于 D 粒子第 100 圈时半径和能量均没有达到引出条件,再加速一圈后,  $\Delta R$  和  $\Delta E/E$  分别变为  $1.1mm$  和  $0.84\%$ , 都达到引出条件,而能够被引出。所以,实际上受一次谐波影响最大的粒子是 E 粒子。

表 3 一次谐波对束团的影响

Table 3 Influence of the 1st magnetic harmonic part on a beam

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
$\Delta S/mm$	5.86	5.82	5.86	5.00	4.40	4.85	5.60	5.90
$\Delta R/mm$	0.38	1.03	-1.63	-4.14	-1.87	0.44	-1.00	-1.48
$(\Delta E/E)/\%$	13.80	14.39	-4.28	-23.0	-18.56	-9.55	-8.99	-0.69

\* $R_1=35cm$ ,  $W_1=100$ ,  $A_1=2 \times 10^{-4}T$ ,  $\theta_1=247.5^\circ$ ,  $W_1=5cm$

表 4 一次谐波的幅值与半高宽度的关系

Table 4 Relationship between the amplitude ( $A_1$ ) of 1st magnetic harmonic and its half-height width ( $W_1$ )

$A_1 / \times 10^{-4}T$	2	1.5	3
$W_1/cm$	5	10	3
$\Delta S/cm$	5.82	5.81	5.60
$\Delta R/cm$	1.03	-1.10	0.45
$(\Delta E/E)/\%$	14.39	14.55	12.92

1.1.4 允许的一次谐波的幅值与半高宽度的关系 如表 4 所示,一次谐波的半高宽度决定了它的作用范围( $W_1$ ),作用范围越大允许的幅值就越低,作用范围越小允许的幅值就可以大一些。

1.1.5 一次谐波对本底粒子运动的影响

$^{14}C$  分析中最主要的本底粒子是  $^{13}CH$ , 其质量比  $^{14}C$  大  $1/1800$  倍。从注入系统注入到加

速器的束流中存在着不同初始相位的  $^{13}CH$ , 最严重的是处于  $-90^\circ$  的  $^{13}CH$ , 它要相移  $180^\circ$  才能进入减速区。如果存在的一次谐波取幅值  $2 \times 10^{-4}T$ , 幅角为  $247.5^\circ$ , 幅值中心半径为  $35cm$ , 影响范围为  $5cm$ , 并假设  $^{13}CH$  粒子的初始相位是  $-70^\circ$  (初始相位为  $-90^\circ$  的粒子不被加速, 处于  $-90^\circ$  —  $-70^\circ$  的粒子能量增益太小), 计算本底粒子在以上一次谐波作用下的运动情况。结果表明, 本底粒子运行了大约 57 — 65 圈以后就开始减速, 达到的最大半径为  $36$  —  $37cm$ , 100 圈以后,  $^{13}CH$  粒子的半径减小到  $28$  —  $30cm$ , 因而一定大小的一次谐波的存在并不影响本底粒子的清除。实际上, 在我们的小回旋加速器中, 粒子的回旋周

期为  $T=(2 \pi m)/(q \cdot B)$ ，则  $\Delta T/T=\Delta m/m$ ，质量相差  $\Delta m$  的粒子每圈的相移为

$$\Delta \psi = 16 \cdot 2 \pi \cdot \Delta m / m \tag{3}$$

对于  $^{13}\text{CH}$  而言， $\Delta m/m=1/1800$ ，故  $\Delta \psi=3.2^\circ / \text{圈}$ 。因  $^{13}\text{CH}$  的初始相位为  $-70^\circ$ ，要移到减速区需要相移  $160^\circ$ ，故需要大约 50 圈。又由于 I 形加速电极造成的相位发散有  $10^\circ$  左右，即相当于附加了 8-9 圈，故需要加速近 60 圈左右后才进入减速区，这与我们的计算结果 57—65 圈较符合。故一定大小和影响范围的一次谐波的存在不影响本底粒子的清除。

### 1.2 二次谐波对粒子运动的影响<sup>[1]</sup>

类似于一次谐波，我们强加二次谐波

$$H_2(R) = A_2 \cdot \exp [-(R-R_2)^2 / (0.6 \cdot W_2)^2] \tag{4}$$

假设其幅角为  $\theta_2$ ，则它产生的附加磁场为

$$\Delta B(R, \theta) = H_2(R) \cdot \cos [2 \cdot (\theta - \theta_2)] \tag{5}$$

附加磁场幅向梯度为

$$\alpha B / \alpha \theta = -2 \cdot H_2(R) \cdot \sin [2 \cdot (\theta - \theta_2)] \tag{6}$$

表 5 为二次谐波的幅角分布对粒子运动的影响；表 6 为二次谐波对束团的影响。由表 5、表 6 可见， $112^\circ$ （或  $292^\circ$ ）幅角的二次谐波对粒子的影响最大。而在这一幅角的二次谐波作用下，一个束团相椭圆边界上 8 个粒子中 E 粒子受到的作用最大。

表 5 二次谐波的幅角分布对粒子运动的影响

Table 5 Influence of the 2nd magnetic harmonic part along the azimuthal distribution on the movement of a particle

	$\theta_2$							
	$0^\circ$	$11.25^\circ$	$22.5^\circ$	$33.75^\circ$	$45^\circ$	$56.25^\circ$	$67.5^\circ$	$78.75^\circ$
$\Delta R/\text{cm}$	-0.09	-0.07	-0.03	-0.03	-0.03	-0.026	-0.029	-0.083
$(\Delta E/E)/\%$	2.46	3.08	3.28	2.78	1.92	0.68	-0.45	-1.56
	$\theta_2$							
	$90^\circ$	$101.25^\circ$	$112.5^\circ$	$123.75^\circ$	$135^\circ$	$146.25^\circ$	$157.5^\circ$	$168.75^\circ$
$\Delta R/\text{cm}$	0.145	0.183	-0.212	0.186	0.109	0.02	-0.024	-0.072
$(\Delta E/E)/\%$	-2.37	-2.89	-2.79	-2.42	-1.70	-0.80	0.50	1.01

$A_2=1 \times 10^{-3}\text{T}$ ,  $R_2=35\text{cm}$ ,  $W_2=100$

表 6 二次谐波对束团的影响

Table 6 Influence of the 2nd magnetic harmonic part on a beam

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
$\Delta R$	0.09	0.63	0.66	0.61	0.70	0.06	-0.68	-0.63
$(\Delta E/E)/\%$	9.09	10.44	5.87	-1.6	-6.9	-7.72	-6.16	3.04

$A_2=1 \times 10^{-3}\text{T}$ ,  $W_2=100$ ,  $R_2=35\text{cm}$ ,  $\theta_2=112.5^\circ$

E 粒子在  $A_2=1.5 \times 10^{-3}\text{T}$ ,  $R_2=35\text{cm}$ ,  $W_2=100$ ,  $\theta_2=112^\circ$  的二次谐波下，计算它的接受相宽，以第 100 圈时引出方位角的半径差和能散不超过 3mm 和 20% 作为标准，结果表明，此时束流的接受相宽为  $-20^\circ - +15^\circ$ ，与理想三角波下没有二次谐波作用时的接受相宽  $-25^\circ - +10^\circ$  相比，相位区域有所移动，但并不减小接受相宽，因而，小回旋加速器可以允许的二次谐波至少在  $1.5 \times 10^{-3}\text{T}$  以上。

### 1.3 三次谐波对粒子运动的影响

同样, 三次谐波

$$H_3(R) = A_3 \cdot \exp [-(R-R_3)^2 / (0.6 \cdot W_3)^2] \quad (7)$$

产生的附加磁场和磁场梯度分别为

$$\Delta B(R, \theta) = H_3(R) \cdot \cos [3(\theta - \theta_3)] \quad (8)$$

$$\partial B / \partial \theta = -3 \cdot H_3(R) \cdot \sin [3(\theta - \theta_3)] \quad (9)$$

当幅角 ( $\theta_3$ ) 处在  $97^\circ$  (或  $217^\circ$ 、 $337^\circ$ ) 时, 对粒子的影响最大(表 7), 而束团中 B 粒子最受影响(见表 8 所示), 其能够允许的最大幅值为  $1 \times 10^{-3}T$ 。

表 7 三次谐波的幅角分布对粒子运动的影响

Table 7 Influence of the 3rd magnetic harmonic part along the azimuthal distribution on the movement of a particle

		$\theta_3$															
		0°	7.5°	15°	22.5°	30°	37.5°	45°	52.5°	60°	67.5°	75°	82.5°	90°	97.5°	105°	112.5°
$\Delta R/cm$		1.25	0.81	-2.78	-5.53	-8.13	-8.35	-6.17	-3.55	-1.17	1.36	4.28	6.76	8.11	8.08	6.54	3.91
$(\Delta E/E)/\%$		6.57	4.88	4.34	2.60	-0.35	-2.21	-1.67	-0.70	0.37	2.15	4.70	6.65	8.30	10.07	10.6	9.00

$A_3=2 \times 10^{-3}T, R_3=35cm, W_3=100$

表 8 三次谐波对束团的影响

Table 8 Influence of the 3rd magnetic harmonic part on a beam

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
$\Delta R/cm$	0.35	0.33	-0.19	-0.27	0.21	0.12	-0.24	-0.20
$(\Delta E/E)/\%$	9.00	11.32	7.50	0.55	-6.12	-8.92	-5.60	1.62

$A_3=1 \times 10^{-3}T, R_3=35cm, W_3=100, \theta_3=97^\circ$

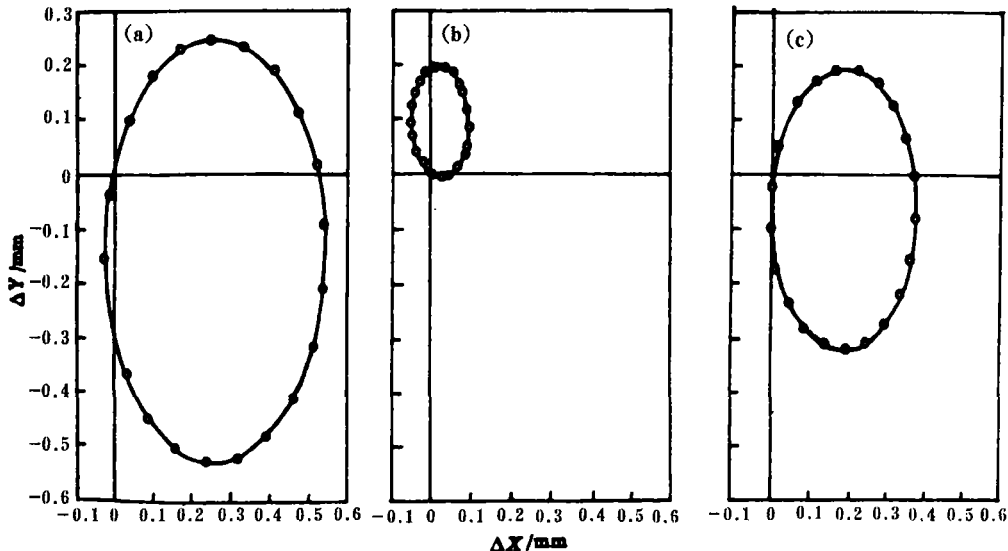


图 3 不加电场时粒子分别在一、二、三次谐波作用下  $90^\circ$  方位角的轨道中心进动相图

(a) 一次谐波, (b) 二次谐波, (c) 三次谐波

Fig. 3 The orbit-center movement of a particle at  $90^\circ$  azimuthal without accelerating electric field (a) With the 1st harmonic ( $A_1=2 \times 10^{-4}T, \theta_1=247.5^\circ, R_1=35cm, W_1=100$ ), (b) With the 2nd harmonic ( $A_2=1 \times 10^{-3}T, \theta_2=117.5^\circ, R_2=35cm, W_2=100$ ), (c) With the 3rd harmonic ( $A_3=1 \times 10^{-3}T, \theta_3=97^\circ, R_3=35cm, W_3=100$ )

从理论上讲，三次谐波对粒子运动的影响似乎应该比二次谐波小，但我们的计算结果却相反。开始时我们以为是D盒电场与磁场的三次谐波发生了某种共振，因而在不加电场的情况下，分别计算了一、二、三次谐波对粒子运动的影响，如图3和图4所示。从两图可以看出，在不存在电场的情况下，粒子的轨道中心进动和相位振动在三次谐波作用下确比二次谐波作用下要大，表明三次谐波对粒子的影响确实要比二次谐波大，故所允许的幅值要比二次谐波小。

根据上面的计算，小回旋加速器所能允许的一、二、三次谐波幅值分别为  $2 \times 10^{-4}$ 、 $1.5 \times 10^{-3}$ 、 $1 \times 10^{-3}$ T，而实际测得的一、二、三次谐波幅值分别为  $2.85 \times 10^{-4}$ 、 $2.50 \times 10^{-4}$ 、 $3.25 \times 10^{-4}$ T，因此，二、三次谐波可以不垫补，而一次谐波必须垫补。

## 2 若干电参数影响的研究

由于我们研制的小回旋加速器采用高次倍频的三角波加速电压<sup>[2]</sup>，一般低次倍频回旋加速器中可以忽略和不曾出现的问题在这里却必须给予认真考虑，使它具有不同于一般回旋加速器的判断准则。有关电参数(三角波电压的线性度、D盒安装公差等)在这一新的条件下，将被重新认识和考虑。

### 2.1 三角波电压的线性度要求

#### 2.1.1 理想三角波电压下的粒子接受相宽

$$V = V_p (\tau / \tau_a) \quad | \tau | \leq \tau_a$$

$$V = -V_p (\tau - 2\tau_a) / \tau_a \quad \tau_a \leq \tau \leq 2\pi - \tau_a$$

式中， $\tau_a = \pi / 2$ 。假定加速器加速的束流即为注入偏转板所允许注入的那部分束流，其发射度  $\epsilon_x = 40 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ，特征长度  $X = 200 \text{ mm}$ ，能散  $\Delta E = \pm 0.2\%$ 。束流从离子源出来，经注入系统注入到加速器内时是连续的，但一团束团中，处于发射相图上不同位置的粒子(即  $x$ 、 $p_x$  不同)所能允许接受的高频相位和高频相宽均是不一样的，它们可以处于整个加速相区内的不同相位段上。我们计算处在相椭圆边界上的8个粒子(以A、B、...H表示，分别代表处在相椭圆上  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、... $315^\circ$  的粒子)的接受相宽。每个粒子(如A粒子)选取不同的初始相位，把它们在第100圈处的引出能量、引出半径和出射角与中心粒子(即  $x=0$ 、 $p_x=0$  的粒子)的相应量作比较，限定它们间的能散与半径差分别小于2‰和3mm。如果某粒子在某段相位范围内满足以上条件，那么该段相位范围就称为该粒子的可接受的相位，或称为可接受

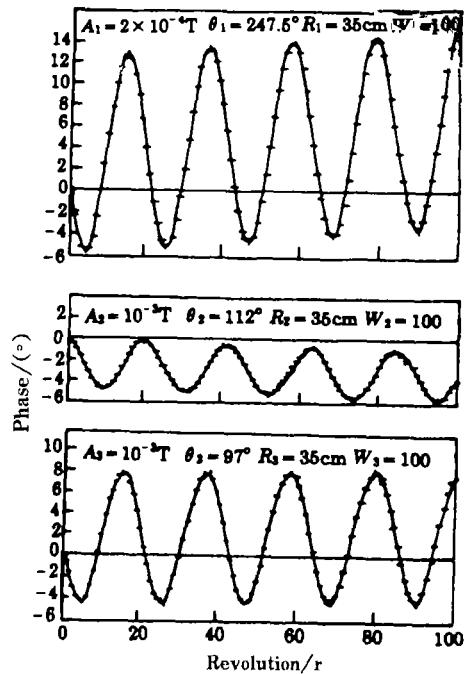


图4 不加电场时粒子分别在一、二、三次谐波作用下  $90^\circ$  方位角的相位振荡

Fig.4 The phase vibration of a particle at  $90^\circ$  azimuthal without accelerating electric field (a) With the 1st harmonic, (b) With the 2nd harmonic, (c) With the 3rd harmonic

由表 9 所示, 虽然可接受相宽都是  $35^\circ$ , 但所处的相位区间是不同的。表 9 中  $(\Delta E/E)_{\max}$  分别表示 8 个不同粒子, 初始相位处在各自的可接受相宽范围内, 运动至第 100 圈时和中心粒子相比的最大能散(%).  $(\Delta R)_{\max}$  则表示相应的半径差(mm)。

表 9 理想三角波电压下的粒子接受相宽

Table 9 The acceptable phase-width of a particle with the existing of ideal triangular-wave voltage

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
相宽 Phase-width/ $(^\circ)$	-15, 20	-25, 10	-35, 0	-35, 0	-25, 10	-10, 25	-5, 30	-5, 35
$(\Delta E/E)_{\max}/\%$	4.46	6.33	-5.76	-13.76	-15.07	-13.67	-16.20	-7.38
$B(\Delta R)_{\max}/\text{mm}$	-1.36	-2.21	-2.42	-2.76	-1.7	-1.71	-2.46	-2.26

2.1.2 实际研制的三角波电压下的粒子接受相宽 实际三角波电压的数据由研制者提供, 我们采用插值法得到整条三角波电压的数据, 结果如表 10 所示。总的可接受相宽为  $15^\circ$  左右, 比理想三角波电压减少一半以上。

表 10 实际研制的三角波电压下的粒子接受相宽

Table 10 The acceptable phase-width of a particle with the existing of actual triangular-wave voltage

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
相宽 Phase-width/ $(^\circ)$	5, -20	-10, 5	-20, -5	-20, -5	-5, 10	10, 25	15, 30	15, 30
$(\Delta E/E)_{\max}/\%$	3.16	5.91	6.36	-12.23	-13.17	-14.40	-19.35	-8.77
$(\Delta R)_{\max}/\text{mm}$	-2.77	-1.18	-2.32	-3.21	-2.10	-2.74	-3.35	-2.59

2.1.3 正弦波电压下的粒子接受相宽 束团在正弦波电压作用下, 如果  $\epsilon_x=40\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,  $X=200\text{mm}$ , 那么, 几乎没有引出束流。故把  $\epsilon_x$  减少到  $4\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , 结果如表 11 所示, 接受相宽大约为  $8^\circ$  左右。

表 11 正弦波电压下的粒子接受相宽

Table 11 The acceptable phase-width of a particle with the existing of sine-wave voltage

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
相宽 Phase-width/ $(^\circ)$	-3, 5	-7, 1	-10, 2	-9, 1	-6, 2	-1, 7	1, 9	1, 9
$(\Delta E/E)_{\max}/\%$	-9.59	-7.50	-10.41	-12.52	-13.82	-13.40	-13.51	-9.88
$(\Delta R)_{\max}/\text{mm}$	-2.77	-2.47	-3.11	-2.65	-2.98	-3.10	-2.81	-3.21

由此可以看出, 束团在理想三角波电压作用下的接受相宽比正弦波电压作用下约大 5 倍 (即  $35/8$ ), 并且发射度要大 10 倍 (即  $40/4$ ), 所以, 理想三角波电压下束团的接受度比正弦波电压下约大 50 倍。而实际三角波电压由于存在一定的非线性, 接受度比理想三角波电压减少了一半以上, 因而比正弦波电压下只增加了约 25 倍<sup>[2]</sup>。但三角波电压的采用还是大大地增加了粒子的接受度, 对于提高束流强度、减少能散具有十分重要的意义。

如果限定粒子在实际研制的三角波电压作用下的可接受相宽不能小于理想三角波电压下可接受相宽的一半, 那么目前达到的实际三角波电压的非线性度应定为研制的三角波电压的最大允许的非线性度。

## 2.2 T形电极径向位置的选择

如文献 [3] 中所指出的, 为了得到必要的引出圈间距, 在与注入偏转板成  $180^\circ$  方位角处放置了“1”形 D 电极, 它的缺点是引起束团初始相位分散, 以至不得不在注入偏转板同方位角处放置“T”形 D 电极, 利用 T 形电极头部电场区的相聚作用来补偿 I 对

称 D 电极结构既提供了必要的注入圈间距, 又没有严重的相位发散现象。

T 形电极的径向位置相对于目前放置的位置移进 ( $\Delta R_d$  用“-”表示) 或移出 ( $\Delta R_d$  用“+”表示, 或不标出正负), 将改变中心粒子在初始极限相位 ( $T = T_0 \pm 30^\circ$ ) 下运行至第 10 圈时的相位 ( $T_1$  或  $T_2$ )。因为只有在 T 形电极的头部电场区粒子才发生相位聚合, 粒子进入楔形电极以后将没有明显的相聚效应, 并且粒子穿越 T 形电极的头部大概需要 10 圈。这里, 注入方位角为  $104^\circ$ , 观察的方位角为  $90^\circ$ , 结果如表 12 所示。

表 12 T 形电极径向位置引起的相位聚散效应

Table 12 The phase convergence and divergence effects with the radial movement of T-shaped electrode

$\Delta R_d/\text{mm}$	-6.0	-4.0	-2.0	0	2.0	4.0	6.0
$T_1(T_0+30)/(^{\circ})$	41.6	38.9	36.8	33.8	31.5	28.8	25.9
$T_2(T_0-30)/(^{\circ})$	-51.2	-45.4	-44.5	-44.0	-44.0	-43.9	-43.9

从表 12 可以看出, T 形电极向外半径移动时, 粒子相位分散逐渐减少, 对  $T = T_0 + 30^\circ$  的粒子, 甚至出现相位会聚, 说明 T 形电极的相聚作用逐渐加强; 当 T 形电极向内半径移动时, 相位发散比较严重 (尤其是对  $T = T_0 - 30^\circ$  的粒子), 说明 T 形电极的相聚作用逐渐减弱, 正如文献 [3] 中所分析的, T 形电极头部电场区对负初相位粒子的相聚作用比较小。相聚或相散都不是我们所希望的, 粒子经过不对称电极头部以后相位不变是最好的。如果 T 形电极向外移动 2—4mm, 相位分散程度可以达到较小。假如 T 形电极向外移动 3mm 时, 初始相位为  $T = T_0 + 30^\circ$  的中心粒子经不对称电极头部后相位可基本保持不变, 而初始相位为  $T = T_0 - 30^\circ$  的中心粒子经不对称电极头部后相位分散达  $14^\circ$ , 这时初始相位为  $T = T_0$  的中心粒子经 100 圈加速后引出圈间距仍有 5.4mm, 这与  $T = T_0$  的中心粒子在 T 形电极没有移动 (现设计位置) 时第 100 圈时引出圈间距 5.8mm 相差不是很大, 并不影响束流的引出, 所以 T 形电极从现在的位置向外移出 3mm 是比较合理的。

### 2.3 D 盒安装公差要求

D 盒在实际安装时不可能完全处在我们所要求的位置, 这就对 D 盒的安装有公差要求。

由于我们的小回旋加速器的  $\nu_z$  处于 0.6—0.8 之间, 聚焦力足够大, 故轴向公差较松, 可假定 D 盒已安装在加速器的几何中心面上, 只考虑 D 盒在中心平面上的安装问题。

D 盒由 T 形和 I 形电极组成, 两电极是独立的, 在整个中心平面上相对于对称中心可以独立地平移和旋转, 即分别有三个自由度, 如果用  $x_1$ 、 $y_1$  表示 T 形电极相对于对称中心的平移, 用  $\alpha_1$  表示其相对于原坐标轴的旋转 (当然,  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $\alpha_1$  均是一个小量), 那么, T 形电极在中心平面上的任何位置均可以用  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $\alpha_1$  来描述。同样地, 用  $x_2$ 、 $y_2$ 、 $\alpha_2$  来表示 I 形电极在中心平面上的位置。

由于粒子在加速器内的运动是很复杂的, D 盒的公差要求无法根据定性的分析而得出, 公式的推导也比较困难, 并且得到的结果也不一定很精确, 因而我们仍采用数值计算的办法进行计算, 主要分以下 5 个步骤。

(1) 单独改变 I 形或 T 形电极的某个参数, 分别考虑其对粒子运动的影响。结果表明, D 盒安装时径向的偏差 ( $x_1$  或  $x_2$ ) 对粒子的影响最大, 角度偏差 (即坐标轴的旋转  $\alpha_1$  或  $\alpha_2$ ) 对粒子的影响次之, 幅向的偏差 ( $y_1$  或  $y_2$ ) 影响最小, 并且 T 形电极的安装偏差对粒子的影响总体上要比 I 形电极大。



(2) T形或I形电极的径向偏差( $x_1$ 或 $x_2$ )和幅向偏差( $y_1$ 或 $y_2$ )结合在一起时,对粒子的影响有可能加强也有可能减弱,因而必须计算在哪种组合方式下对粒子的影响最大。即相当于T形电极的 $x_1$ 、 $y_1$ 或I形电极的 $x_2$ 、 $y_2$ 分别处在以对称中心为原点的坐标系的四个象限内时,究竟处在哪一个象限内时对粒子的影响最大。我们在计算时T形和I形电极分开考虑,以在以上的一定的电极公差下(即 $x_1$ 、 $y_1$ 或 $x_2$ 、 $y_2$ 的不同组合)粒子运行至第100圈时跟中心粒子的能散和半径差作为衡量标准,计算结果如表13所示。

表13 T(I)形电极的径向、幅向偏差对粒子的影响

Table 13 Influence of installation deviation of T shaped (or I shaped) electrode along radial (or longitudinal) direction on a particle

电极 Electrode	T形电极平移偏差( $x_1, y_1$ ) Deviation of "T" shaped electrode with ( $x_1, y_1$ )/mm				I形电极平移偏差( $x_2, y_2$ ) Deviation of "I" shaped electrode with ( $x_2, y_2$ )/mm			
	(2, 2)	(2, -2)	(-2, 2)	(-2, -2)	(2, 2)	(2, -2)	(-2, 2)	(-2, -2)
坐标 Coordinate	(2, 2)	(2, -2)	(-2, 2)	(-2, -2)	(2, 2)	(2, -2)	(-2, 2)	(-2, -2)
( $\Delta E/E$ )100/%	-9.66	-12.17	7.64	5.40	0.44	-11.15	-1.65	-10.22
( $\Delta R$ )100/mm	-2.69	-3.42	1.36	0.56	-0.52	-3.87	1.05	-0.56

从表13可以看出,不管是I形电极还是T形电极,当 $x>0$ 、 $y<0$ 时(即T形或I形电极偏移到第4象限),对粒子的影响最大。这意味着T形(或I形)电极径向向外半径偏、幅向向粒子的回旋方向偏时,对粒子的影响最大。而且,I形电极的安装偏差对粒子的影响总体上比T形电极要小。在径向和幅向偏差对粒子影响最大的组合方式下(即T形或I形电极径向向外偏、幅向向粒子的回旋方向偏),我们计算了T形(或I形)电极两种可能的角度偏差对粒子运动的影响。结果表明,T形(或I形)电极在以上径向和幅向偏移的基础上,当电极再顺着粒子回旋的方向偏移一定的角度时,对粒子的影响最大。因此,T形(或I形)电极在径向向外偏,幅向向粒子的回旋方向偏,并顺着粒子的回旋方向偏移一定的角度时,对粒子的影响最大。

(3)在以上所确定的T形或I形电极位于对粒子影响最大的D盒偏差下(即T形和I形电极都径向向外偏1mm,幅向向粒子回旋方向偏1mm并偏转 $0.5^\circ$ ),计算一束团( $\epsilon_x=40\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , $X=200\text{mm}$ )相椭圆边界上的8个粒子在以上D盒公差下的影响情况。结果如表14所示,F粒子受到的影响最大。

(4)计算F粒子在以上D盒公差下的接受相宽,结果表明,此时F粒子的接受相宽仍有 $35^\circ$ 左右,说明以上的D盒公差对束团的影响不是很大。把D盒公差增大到以上D盒公差的2倍,重新计算F粒子的接受相宽,结果F粒子接受相宽减少到 $25^\circ$ ,如果以 $25^\circ$ 作为束流的极限相宽,那么此时的D盒公差就作为最大可允许的D盒安装公差。

表14 D盒公差对束团的影响

Table 14 Influence of location deviation of dee structure on a beam ( $\epsilon_x=40\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , $X=200\text{mm}$ )

$x, p_x$	A	B	C	D	E	F	G	H
( $\Delta R$ )100/mm	-1.04	-1.04	-1.51	-2.17	-2.27	-2.87	-2.30	-1.81
( $\Delta E/E$ )100/( $^\circ$ )	4.86	4.47	0.72	-9.57	-14.96	-16.21	-9.63	-1.88

(5) 根据以上的计算和分析, 我们最后得到的D盒安装公差为: 径向偏差不超过2mm, 幅向偏差不超过2mm, 角度安装偏差不超过1°。

### 参 考 文 献

- 1 CHEN Maobai, LI Deming, GUO Wenzhao, *et al.* Nucl Instr Meth, 1989, **A278**:409
- 2 卢相顺. 超灵敏小型回旋加速器质谱计中非理想因素的研究. 硕士论文, 1992  
LU Xiangshun. Thesis For Master. 1992
- 3 CHEN Maobai, LI Deming, XU Senlin, *et al.* Nucl Instr Meth, 1990, **A29**:47

## Study of non-ideal factors in SMCAMS

LU Xiangshun

(Shanghai Institute of Nuclear Reasearch, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

### Abstract

The influence of several and magnetic electric parameters of the mini-cyclotron have been studied, including the 1st, 2nd, 3rd harmonics of the magnetic field, the linearity of triangular wave voltage, the installing requirement of dee electrode, etc. It has been proved that the result of this study is very useful to the SMCAMS engineering project in determining the allowance during commissioning.

**Key words** Ni-cyclotron, Triangular-wave, Sine-wave, Electric field, Electrode, Z1Dee-electrode

CLC TL 542