

# 利用测磁结果求得等时垫补线圈的效率函数

A. 代乐

(Ganil, B. P. 5027, 14021 Caen Cedex, France)

龙 敖

(中国科学院近代物理研究所)

## 摘 要

为了避免分离扇迴旋加速器磁场等时化过程中出现的非线性现象所引起的不方便,我们已利用测磁结果求得了 GANIL 研究所 SSC2 等时垫补线圈的效率函数。

## 一、问题的提出

BOBO 程序<sup>[1]</sup>是建立在线性理论的基础上的,即假设垫补线圈所产生的磁场  $\Delta B$  与垫补线圈中通过的电流  $I$  成线性关系。但实际上,两者并不遵守严格的线性关系。这个非线性现象可能主要是起源于磁饱和及磁极上导磁率非均匀分布。因此,为得到建立理想等时场的精确的各垫补线圈电流值,我们不得不反复进行磁场测量之后用 BOBO 程序计算电流值这个过程。要建立精确度为  $10^{-4}$  的等时场,这种迭代过程往往达三次之多。显然,如果我们找到了能修正非线性因素的垫补线圈效率函数,就能从测得的某一非等时场直接得到建立等时场所需的垫补线圈电流值,而不再仰仗多次迭代。

上面这个问题可以用另一种方式表述。我们的目的是要实现等时场  $B_{iso}$ 。首先,我们测量全部垫补线圈不通电流时的磁场  $B_{mes}$ , 于是得到曲线

$$\Delta B_{d\acute{e}part}(R_{max}) = B_{iso}(R_{max}) - B_{mes}(R_{max}).$$

这里,  $R_{max}$  为扇形磁极面的对称轴,以机器零点为坐标原点;  $\Delta B_{d\acute{e}part}(R_{max})$  为垫补线圈应建立的沿  $R_{max}$  轴的磁场。然后用 BOBO 程序按照关系式

$$\Delta B_{d\acute{e}part}(R_{max}) = \sum_L T(R_{max}, L) I_{d\acute{e}part}(L)$$

计算  $L$  对垫补线圈中的初始电流值  $I_{d\acute{e}part}(L)$ 。这里,  $T(R_{max}, L)$  是矩阵元,表示在第  $L$  对线圈中通过单位电流时沿  $R_{max}$  轴各点的磁场贡献。但由于非线性的缘故,按  $I_{d\acute{e}part}(L)$  值建立的磁场同  $\Delta B_{d\acute{e}part}(R_{max})$  从而同等时场仍存在差别。还须测量这个磁场差,并计算此磁场差所对应的电流值,加到  $I_{d\acute{e}part}(L)$  上。通常,这个“测量-计算”过程重复三次后,相对的磁场差方可减小到  $10^{-4}$ 。  $I_{d\acute{e}part}(L)$  经过多次修正后就得到垫补线圈的最后精

确电流值, 记为  $I_{arrivé}(L)$ 。通过类似的关系式

$$\Delta B_{arrivé}(R_{max}) = \sum_L T(R_{max}, L) I_{arrivé}(L),$$

我们可得到与  $I_{arrivé}(L)$  相对应的磁场  $\Delta B_{arrivé}(R_{max})$ 。

如果  $\Delta B_{départ}$  与  $\Delta B_{arrivé}$  之间存在着一定关系, 我们应找到它。一旦找到了这个关系, 无需多次的“测量-计算”过程就能简捷地实现等时化。我们把反映这种关系的函数称为垫补线圈的效率函数。效率函数的求得对调束过程中的实时自动等时化是有意义的。

## 二、计算方法

设效率函数为可分离变量函数:

$$E(R_{max}, B_{max}) = \frac{1}{f(R_{max})} \cdot S(B_{max}).$$

这里,  $B_{max}$  是扇轴  $R_{max}$  上某定点 (如令  $R_{max} = 2m$ ) 的磁场值;  $S(B_{max})$  表示磁饱和, 很容易根据磁化曲线  $B(I)$  得到;  $\frac{1}{f(R_{max})}$  表示磁极上导磁率的非均匀性, 这是我们要寻求的主要东西。函数  $f(R_{max})$  可由下式得到

$$f(R_{max}) = \frac{\Delta B_{arrivé}(R_{max}) + C}{\Delta B_{départ}(R_{max})},$$

这里,  $C$  是常数

$$C = \Delta B_{départ}(R_{max})|_{R_{max}=2m} - \Delta B_{arrivé}(R_{max})|_{R_{max}=2m}.$$

上面得到的函数  $f(R_{max})$  依赖于常数  $C$ 。在下面的第二种方法中, 函数  $f(R_{max})$  不直接依赖于常数  $C$ 。

令

$$G_{départ}(R_{max}) = \frac{\partial \Delta B_{départ}(R_{max})}{\partial R_{max}};$$

$$G_{arrivé}(R_{max}) = \frac{\partial \Delta B_{arrivé}(R_{max})}{\partial R_{max}};$$

$$g(R_{max}) = \frac{G_{arrivé}(R_{max})}{G_{départ}(R_{max})}.$$

于是

$$f(R_{max}) = g(R_{max}) - \frac{\partial f(R_{max})}{\partial R_{max}} \cdot \frac{\Delta B_{départ}(R_{max})}{G_{départ}(R_{max})}.$$

尽管第二种方法的标准误差 ( $\approx \pm 0.25$ ) 大于第一种方法的 ( $\approx \pm 0.07$ ), 且  $\partial f(R_{max})/\partial R_{max}$  是根据第一种方法得到的, 但第二种方法可以起验证第一种方法的作用。

最后, 在 UNIVAC 计算机上用考虑到效率函数的 BOBO 程序进行验证性计算, 以便对效率函数进行微调。

## 三、结 果

从法国 GANIL 加速器 CSS2 上的测磁结果<sup>[2]</sup>出发,我们求得了效率函数  $f(R_{\max})$ , 示于图 1 (由第一种方法得到) 和图 2 (由第二种方法得到).

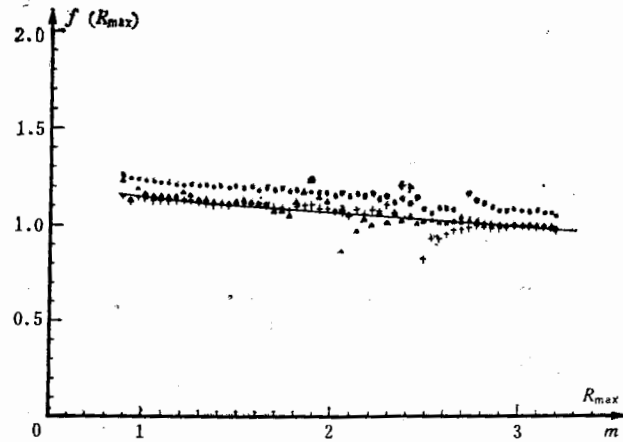


图 1

- $C^{6+}$ ,  $f_{rev} = 6.68\text{MHz}$ ,  $B_{max} = 16\text{kG}$
- +  $Ar^{6+}$ ,  $f_{rev} = 1.6\text{MHz}$ ,  $B_{max} = 12\text{kG}$
- ▲  $Ar^{11+}$ ,  $f_{rev} = 1.6\text{MHz}$ ,  $B_{max} = 6.6\text{kG}$

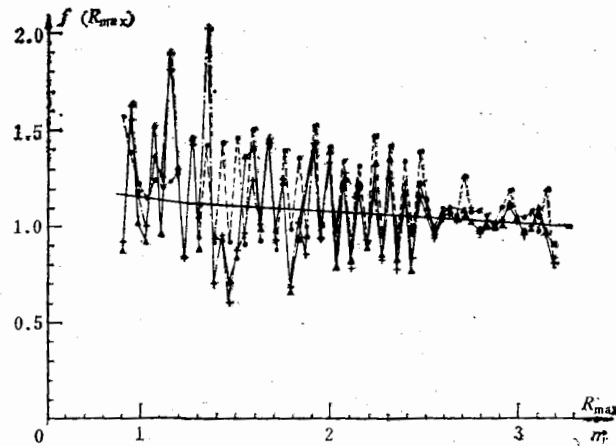


图 2

- $C^{6+}$ , +  $Ar^{6+}$ , ▲  $Ar^{11+}$

表 1

$B_{\max}(\text{kG})$	6.6	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5
$S(B_{\max})$	1.000	1.000	0.999	0.997	0.979	0.941	0.922	0.888	0.863

根据 CSS2 上测得的磁化曲线  $B(I)$ , 得到了函数  $S(B_{\max})$ , 列于表 1.

#### 四、结 论

根据图 1 和表 1, 近似地得到了 CSS2 的效率函数  $E(R_{\max}, B_{\max}) = \frac{1}{f(R_{\max})}$ .

表 2

$R_{\max}(m)$	$1/f(R_{\max})$	$R_{\max}(m)$	$1/f(R_{\max})$	$R_{\max}(m)$	$1/f(R_{\max})$
.800	.8467	1.650	.9062	2.500	.9503
.850	.8512	1.700	.9087	2.550	.9531
.900	.8558	1.750	.9112	2.600	.9558
.950	.8604	1.800	.9137	2.650	.9586
1.000	.8651	1.850	.9162	2.700	.9614
1.050	.8698	1.900	.9188	2.750	.9642
1.100	.8745	1.950	.9213	2.800	.9670
1.150	.8793	2.000	.9239	2.850	.9698
1.200	.8842	2.050	.9265	2.900	.9726
1.250	.8868	2.100	.9290	2.950	.9755
1.300	.8892	2.150	.9317	3.000	.9784
1.350	.8916	2.200	.9343	3.050	.9813
1.400	.8940	2.250	.9369	3.100	.9842
1.450	.8964	2.300	.9396	3.150	.9871
1.500	.8988	2.350	.9422	3.200	.9901
1.550	.9013	2.400	.9449	3.250	.9930
1.600	.9037	2.450	.9476	3.300	.9960

表 3 电流  $I$  的单位: A

$L$	$C^{6+}, f_{rev} = 6.68\text{MHz}, B_{\max} = 16\text{kG}$		$Ar^{11+}, f_{rev} = 1.6\text{MHz}, B_{\max} \approx 12\text{kG}$		$Ar^{11+}, f_{rev} = 1.6\text{MHz}, B_{\max} \approx 6.6\text{kG}$	
	$I_{arrivée}(L)$	$I_{arrivée}^*(L)$	$I_{arrivée}(L)$	$I_{arrivée}^*(L)$	$I_{arrivée}(L)$	$I_{arrivée}^*(L)$
1	-113.15	-114.00	-81.41	-79.98	-48.35	-47.60
2	-74.21	-74.46	-21.26	-19.60	-14.35	-14.67
3	-80.22	-81.89	-8.61	-5.32	-6.32	-4.74
4	-97.58	-99.73	21.99	21.85	10.55	9.18
5	-95.61	-94.38	52.43	54.57	28.21	29.07
6	-107.55	-107.41	74.58	73.73	39.08	39.18
7	-124.61	-120.33	87.35	91.04	48.16	48.79
8	-99.51	-100.88	70.79	70.86	39.00	38.39
9	-114.53	-114.57	85.07	85.37	47.00	47.37
10	$-62.24 \times 2$	-126.47	$53.52 \times 2$	106.03	$29.345 \times 2$	58.30
11	$-63.05 \times 2$	-123.40	$54.15 \times 2$	108.53	$29.37 \times 2$	58.69
12	$-49.19 \times 2$	-100.44	$81.56 \times 2$	168.14	$46.645 \times 2$	93.84
13	2532.97		-693.96		-90.95	

$S(B_{\max})$ . 其中

$$f(R_{\max}) = \begin{cases} 1.281 - 0.1250R_{\max} & 0.89\text{m} \leq R_{\max} \leq 1.21\text{m} \\ 1.203 - 0.0603R_{\max} & 1.21\text{m} \leq R_{\max} \leq 3.19\text{m} \end{cases}$$

函数  $1/f(R_{\max})$  的数值列于表 2.

为了检验,我们在 UNIVAC 计算机上用 BOBO 程序进行了计算. 当给定  $\Delta B_{\text{départ}}(R_{\max})$  和  $E(R_{\max}, B_{\max})$  时,可得到电流值  $I_{\text{arrivé}}^e(L)$ . 计算结果见表 3.

由表 3 可以看出,对三种情况 ( $\text{C}^{6+}$ ,  $\text{Ar}^{6+}$  和  $\text{Ar}^{11+}$ ),  $I_{\text{arrivé}}^e(L)$  值与原有多次迭代法得到的  $I_{\text{drivé}}(L)$  值基本上一致. 这就是说, CSS2 的效率函数已经找到.

附注: 1982 年 11 月 GANIL 总调束过程中,在自动等时化实时程序 ISOGRO 中采用了这里的效率函数. 使用结果表明达到了预期效果: 无须多次的迭代,使用实时程序 ISOGRO 一次就能将被加速粒子  $\text{Ar}^{16+}$  的相移降低到  $\pm 1^\circ$  左右.

### 参 考 文 献

- [1] D. Bibet, A. Dael, BOBO programme pour le calcul des trim-coils, GANIL 77N/078/AI/19.  
 [2] Groupe Aimants, Mesures magnetique CSS2-Resume des mesures d'isochronisme, GANIL 80N/096/AI/11.

## EXPLOIT OF THE RESULTS OF MAGNETIC FIELD MEASURED—RESEARCH FOR THE EFFICIENCY FUNCTION OF TRIM COILS IN SSC

A. DAEL

(Ganil, B. P. 5027, 14021 Caen Cedex, France)

LONG AO

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

In order to avoid the inconvenient resulting from the non-linear phenomenon in realization of isochrone magnetic field, the efficiency function of trim coils in SSC2 at GANIL is obtained by means of exploiting the results of magnetic field measured.