

一种可调的新型永磁迴路*

郎 良 江 钧 基

(中国科学院电子学研究所, 北京)

摘要 本文设计了一种可调的叠式钐钴永磁迴路。用三层径向磁化的钐钴磁体和软铁类磁导材料,借助于计算机,设计了沿轴向长 270mm, 磁场强度 1.2 kGs, 波动 $\pm 0.7\%$ 的均匀磁场,为高功率微波管的永磁聚焦系统提供了一种优良的永磁迴路。

关键词 电子光学;永磁聚焦系统;永磁迴路;钐钴磁钢

1. 引言

在大功率微波器件中,为了维持电子注顺利通过漂移空间,过去普遍采用长螺线管或电磁透镜组成的均匀场磁聚焦。由于这类磁聚焦需要大功率直流电源,体积大,笨重,可靠性差,限制了大功率器件的应用和发展。随着新型磁性材料的出现,磁体的磁能积从 0.2—1 MOeGs 的碳素钢发展到 5—13 MOeGs 的铝镍钴磁钢,而后来出现的钐钴磁钢,其磁能积可高达 30 MOeGs 以上。钐钴永磁体以其优良的永磁性能,使微波管聚焦系统的重量大大降低,所以具有广泛的应用前景^[1-4]。本文发展了用钐钴磁钢的径向磁化环构成的均匀场。并为沿轴有较长均匀场的聚焦区和磁场值高但较短的均匀场聚焦系统,设计了一种可调的叠式钐钴永磁迴路。采用两层或三层径向磁化环和软铁类磁导材料组成的磁回路能使均匀场区中部磁场不下跌或使特定区域磁场的峰值增高。

2. 新型磁迴路

(1) 一层径向磁化迴路 径向磁化回路已经用在中、小功率速调管中。图 1 示出了这种磁路及其沿系统轴上的磁场分布。在磁环用钐钴磁钢代替铁氧体之后,磁迴路的磁场分布不变,而系统轴上对应各点的磁场强度却提高了 $\beta = P'_{m0}/P_{m0} = 2.6$ 倍。 P'_{m0} 和 P_{m0} 分别是钐钴磁钢的和铁氧体的磁极化强度,它等于磁场 $H = 0$ 时的磁化强度,即剩磁 B_r 。图 1 中的磁环的间距增加后,中间磁场将下降。为了弥补中间磁场的下降,在磁环间放两个软铁环如图 2 所示。从图 2 的曲线 B 可看出,磁场分布的均匀性改善了。如使用数个软铁环则可使磁场更加均匀^[5]。

(2) 两层径向磁化回路 可调的径向磁化均匀磁场迴路是把磁环分放在两层,并用软铁圆筒把内、外层串联起来,外层相对于内层易于移动,易于更换。内磁环控制所需要的聚焦磁场值,外磁环可补偿中间磁场的下降。软铁筒被永久磁铁和迴路的漏磁场磁化至不饱和状态,它有一定的磁势位,能引导磁力线,改善磁场分布,同时把对聚焦场无用

* 1986 年 12 月 28 日收到,1987 年 12 月 25 日修改定稿。

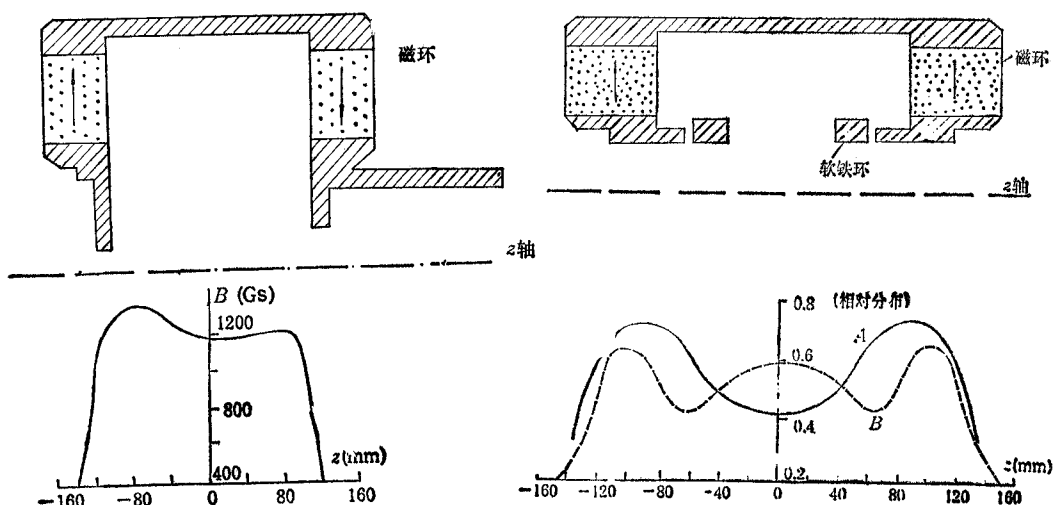


图1 径向磁化的磁回路及其轴上的磁场分布

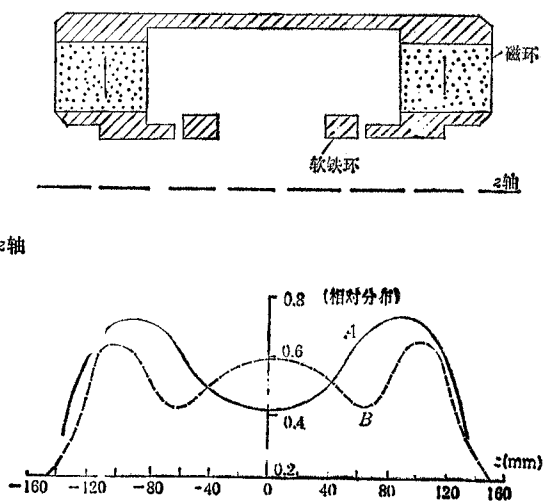


图2 用软铁环改善磁场分布

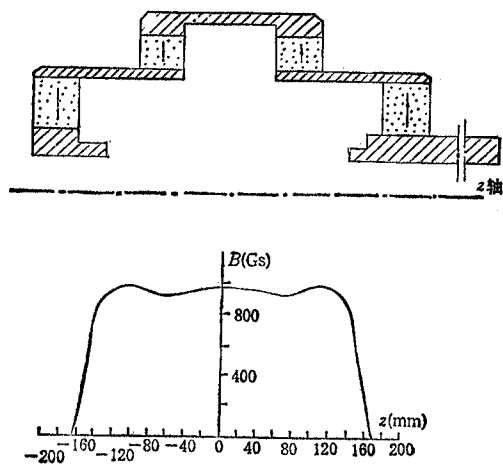


图3 可调的磁回路和沿系统轴的磁场分布

的反向磁场平移到工作区之外。图3给出了磁回路的结构和磁场分布。从图可见,磁场在沿轴向长250mm的范围内均匀场值为950Gs,波动为 $\pm 4.5\%$,需用钕钴磁钢大约25kg。另外,随着外磁环的增大,还能达到很高的均匀磁场数值。例如在3—4cm的空气隙中可获得7kGs以上的均匀磁场,大约需用钕钴磁钢40kg。从以上二例可见,不论对轴向的长均匀磁场聚焦还是对较短的强均匀磁场聚焦的情况,采用这样的磁回路,能简便地调整磁场分布和均匀区的位置。变换内磁环和软铁筒的极靴孔径,可以调整过渡区、阴极区和收集极区的磁场,使微波管工作状态最佳。也为毫米波大功率器件的轻型永磁聚焦包装提供了可能。

(3) 三层径向磁化回路 可调的两层叠式径向磁化永磁回路可进一步发展成如图4的三层径向磁化回路。我们借助CAD,设计了沿轴向长270mm,均匀磁场值为1160

Gs, 波动小于 $\pm 2\%$ 的磁场。若再用两只软铁环改善轴上的磁场分布均匀度, 则可使磁场强度达 1200Gs, 而波动只有 $\pm 0.7\%$ 。本设计约需用钕钴磁钢 40kg。

(4) 补偿磁体对磁场分布的影响 在径向磁化迴路中, 若将补偿磁体分别放在软铁筒的内、外, 则对应的磁场分布如图 5 所示。其中影线表示软铁筒。曲线 A 是只有两段屏蔽软铁筒无补偿磁体, B 是筒内有补偿磁体, C 是筒外有补偿磁体的结果。

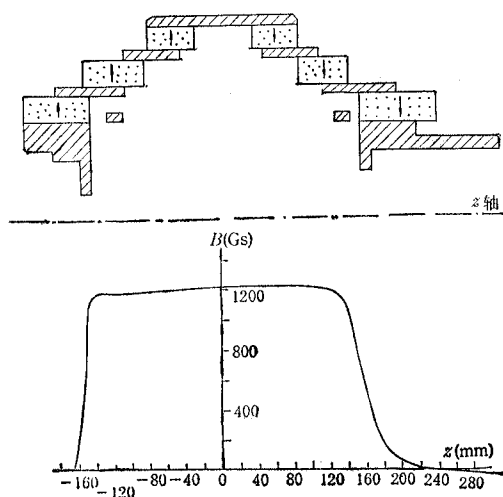


图 4 三层径向磁化永磁迴路结构及其轴上的磁场分布

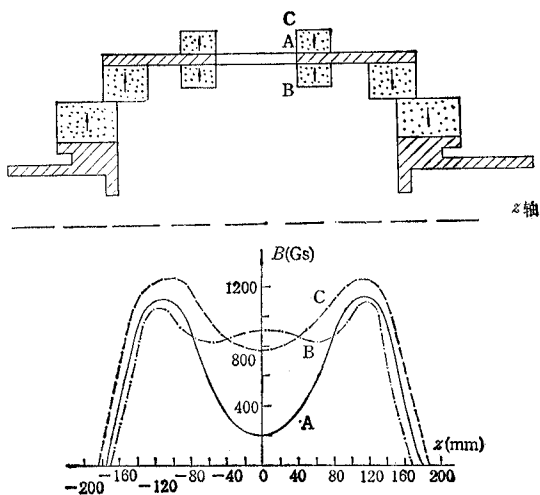


图 5 补偿磁体在软铁筒内、外时的比较

计算表明: 无补偿磁体时, 无论软铁筒是两段还是一个整体, 磁路中部的磁场数值都只有峰值的 $1/5$ 。对于情况 B, 补偿磁体被并联在软铁筒内, 中部的磁场得到了补偿, 而且磁体小, 屏蔽好。缺点是随磁体个数增加之后, 各磁体间互相干扰, 反向磁场会抵消有用的磁场, 而降低磁体的效能。引人注目的是反峰磁场值有时可高达有用磁场的 60% 。怎样利用或克服反峰磁场的影响尚在研究中。在情况 C 中, 补偿磁体在软铁筒之外, 它的大小和位置可以调整, 容易改变磁场的均匀性 (参见图 3)。磁场可调对改善微波管的聚焦以及提高收集极区的磁场以减少高频场的散焦是很有用的。这种结构的反峰磁场也较小, 约是主磁场值的 30% 。利用软铁筒还能把反峰磁场移出工作区。顺便指出: 在各种磁路里, 软铁常被用作磁导材料。在软铁中的通量密度超过 20000 磁力线/cm² 后, 磁通量再增加, 则磁路的磁阻剧增。这种现象称为“磁饱和”。由于磁饱和是非线性效应, 这时, 磁导率 μ 是 B 或 H 的函数, 需要反复修正求解。实用中, 以增加软铁的厚度来防止磁饱和。

(5) 各种磁回路的比较 永磁迴路按照磁体的磁化方向 (图、表中以箭头表示) 可以是轴向磁化型、径向磁化型和混合型。部分磁迴路汇于表 1。编号 5 是一个轴向磁化筒型聚焦系统的例子。图 6 绘出了它的磁场分布图, 从图可见, 磁体中间的场值下降约 $1/2$ 。若要弥补中部的场值, 则可使磁体中部逐渐增厚, 即其横截面呈内锥或外锥 (腰鼓形) 型的形状。美国斯坦福的线性加速器中就曾使用 AlNiCo VIII 腰鼓形的永磁聚焦系统, 它在 18 英寸长度上提供 1kGs 的均匀场, 磁铁重量约 363kg。而本文的系统能在 11

英寸长度上提供 1.2kGs,或在 1.5 英寸长度上提供 7kGs 的均匀磁场,而只需用钐钴磁钢约 40kg。从编号 5 和 3 的对比可见: 本文设计的磁回路由于利用了钐钴磁钢的高磁能积,在扩大均匀区的长度、减少磁场的波动和降低磁聚焦系统的重量等方向都显现出优越性。这些优越性正是当前航天技术和能源工程中用的微波器件所要求的。

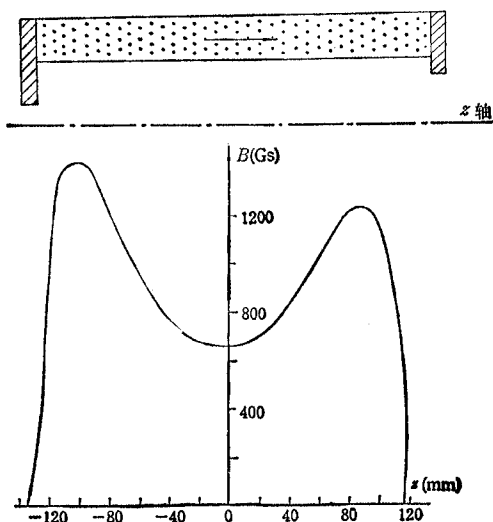


图 6 轴向磁化筒形聚焦系统的磁场分布

表 1 各种磁回路

编号	磁化方向 *	磁场平均值 (Gs)	均匀区范围 (mm)	磁场波动 (%)	钐钴磁钢**重量 (kg)
1 (图 1)	↑	1300	170	±7	44.5
2 (图 2)	↑	3600	180	±17	62
3 (图 3)	↑	950	250	±4.5	25
4 (图 4)	↑	1200	270	±0.7	40
5 (图 6)	→	982	190	±32.86	21.6

* ↑表示磁体径向磁化, →表示磁体横向磁化

** 计算中钐钴磁钢的磁能积是 16MOeGs

3. 结语

本文成功地设计了一种可调的径向磁化永磁回路,根据同比定律,它可以按比例放大或缩小,应用于任何均匀磁场系统。

参 考 文 献

- [1] E. L. Lein, Advance in Klystron Amplifier, 16(1973), 33—39.
- [2] AD-A012405, 1975, 6.
- [3] A. Staprans, E. W. McCune, J. A. Ruetz, PIEEE 61(1973), 299—330.
- [4] D. D. Hayes, S. V. Logan, Microwave Journal 16(1973), 4, 37—44.
- [5] 郎良,忻宝碌,改善高功率速调管磁聚焦的均匀性,中国科学院电子学研究所内部资料,1963年。

A NEW TYPE OF ADJUSTABLE PERMANENT MAGNETIC CIRCUIT

Lang Liang, Jiang Junji

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT An adjustable permanent magnetic circuit that is staked by three layers of samarium-cobalt permanent magnets magnetized in radial direction and magnetic conductive material such as iron, is developed. By means of CAD, a uniform magnetic field distribution having flux density of 1.2 kGs on the axis and a fluctuation of $\pm 0.7\%$ within the axial length of 270 mm is achieved. It is a good magnetic circuit for permanent magnetic focusing system of high power microwave tubes.

KEY WORDS Electronic optics; Permanent magnetic focusing system; Adjustable permanent magnetic circuit; Samarium-cobal permanent magnet