

30MeV 医用回旋加速器束流输运线上 旋转扫描磁铁的研制

贾先禄¹⁾ 张天爵 吕银龙 艾长军 储诚节 管锋平 邢建升

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 加速器引出束流分布一般都是高斯分布,而在束流应用中需要更多的是均匀分布的束流.目前国内研究已经实现了束流的均匀分布,但事实上这些束流的均匀度不够理想.因此,重点介绍了能够使束流实现高均匀分布的旋转扫描磁铁的研制过程,在理论推敲和实践检测的基础上充分证实:通过旋转扫描磁铁的作用,束流可以在目标靶上完全实现高均匀分布.这项技术在国内实属首创,其性能已经达到国际同类磁铁的先进水平.

关键词 旋转扫描磁铁 加速器 束流

1 引言

1994年,中国原子能科学研究院研制建成我国第1台医用强流回旋加速器CYCIAE-30及配套放射性同位素生产线^[1-3].目前,为满足中国原子能科学研究院对该加速器的配套放射性同位素生产线升级改造的需要,计划新增加束流均匀度为90%的气体靶以生产新品种的放射性同位素.为了实现质子在气体靶上的高度均匀分布,我们对有可能实现此目标的磁铁进行了深入调研,结果发现:只有在某种电源的作用下,磁铁内部形成一个强度均匀且方向随时间旋转变化的磁场时才能够实现高达90%的束流均匀度.基于对磁铁以上特性的分析,我们将该磁铁命名为“旋转扫描磁铁^[4]”.

在本文中详细介绍了研制旋转扫描磁铁实现束流高均匀度的全过程,其中包括:旋转扫描磁铁的物理设计、结构分析、磁场验证以及该磁铁理论在其他加速器上的更广泛应用.

2 旋转扫描磁铁的物理设计

2.1 设计原理

国外研究者通常选择两个磁元件作为旋转扫描磁

铁,与之相对应的是两个交流电源,这两个交流电源之间相位相差 90° ,但是通过实验表明两相相位电源是通过其他元件转换而成,这就增加了加工成本.基于以上因素,我们选择使用一个磁元件,对应该磁元件的电源是三相交流电源,这就降低了设计难度及加工成本.在该电源的作用下,旋转扫描磁铁内部可以形成一个强度均匀、方向随时间旋转变化的磁场,穿越旋转扫描磁铁的束流会受到一个垂直于运动方向的磁场力,在这种磁场力的作用下束流会随着磁场方向的旋转而旋转.由于束流本身是高斯分布,旋转后的束流叠加形成一个中间均匀分布的大半径束流,再通过准直器去掉周围的非均匀束流,便可以得到高度均匀分布的束流.束流旋转形成高度均匀分布的过程如图1所示.

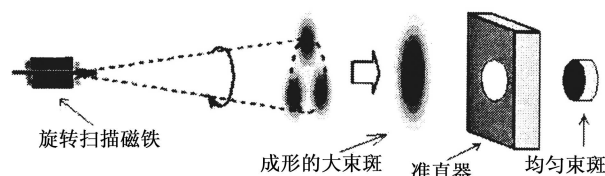


图1 束流旋转形成高度均匀分布过程

2.2 设计要求和模型构建

30MeV强流回旋加速器新增束流输运线对束流

2006-07-06 收稿

1) E-mail: jiaxl@iris.ciae.ac.cn

要求是: 直径不大于 $\phi 7\text{mm}$, 束流均匀度为90%, 取高斯分布方差为7mm. 根据这些要求, 设定旋转扫描磁铁的具体参数列于表1.

表1 旋转扫描磁铁参数

参数	指标
束流质子能量	30MeV
磁铁有效长度	300.0mm
磁铁到靶点长度	1090.0mm
束流偏移量	3.7mm
磁场强度要求	$133.0 \times 10^{-4}\text{T}$
每个线圈匝数	120
交流电源频率	50Hz
磁铁内孔直径	78.0mm
磁铁外孔直径	130.0mm

依据所设定的参数来计算旋转扫描磁铁的磁场. 由于旋转扫描磁铁是对称结构, 因此我们用有限元软件ANSYS做二维剖分计算, 并采用了四面形的单元类型. 取任一时刻、任一径向方向进行磁场数值计算, 结果表明在磁铁中心区40mm范围内磁场的均匀度为 $\pm 6.9 \times 10^{-3}$, 这表明磁场呈均匀分布状态, 如图2某一时刻旋转扫描磁铁中的磁力线分布所示, 计算结果符合我们的设计要求.

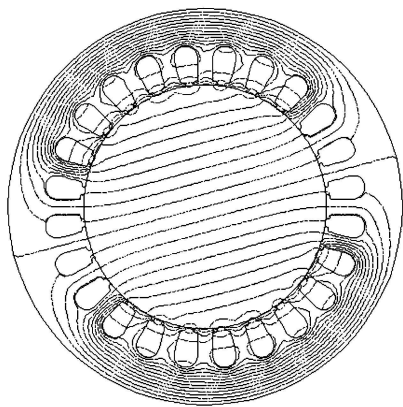


图2 旋转扫描磁铁中某一时刻的磁力线分布

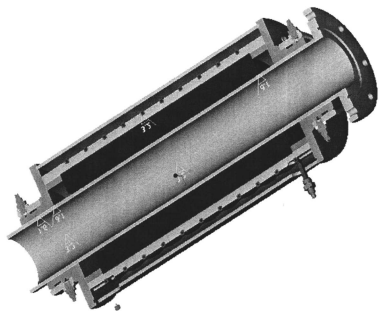


图3 旋转扫描磁铁结构模型

在结构设计中, 还应充分考虑漏磁的因素和磁铁的有效空间, 因此建模时根据磁通密度设计了适当厚

度的磁轭, 全面调整了磁极的结构与形状, 同时还设计了不同相位交流线圈的空间布置, 由此建立的旋转扫描磁铁结构模型如图3所示.

2.3 磁铁的加工

为了实现旋转扫描磁铁的高均匀分布, 在磁铁加工的过程中要对以下几个方面做出恰当的选择: 磁极的结构, 磁铁的材料, 导线及绕制方式.

在磁极结构的选择方面我们必须要把握的原则是, 最大限度地减小磁铁产生的涡流, 同时提高磁场强度的均匀性. 因此, 我们在选择磁极结构的时候采用片状结构来减小涡流及其产生的热量. 同时还尽量增大了管道内侧磁极面的面积以便提高磁场强度的均匀度.

在磁铁的材料选择上我们用20号钢作为生产旋转扫描磁铁的主要材料, 这是因为与其他材料相比, 20号钢的导磁性能和机械强度更优越, 加工难度低, 更重要的是比较常见、价格便宜, 还能达到我们的设计要求.

由于内水冷导线具有良好的散热性, 因此我们首先考虑使用内水冷导线绕制线圈, 但这种导线都比较粗, 而旋转扫描磁铁的24个线圈区空间有限, 要想在有限的空间内完成绕制, 难度很大. 因此我们从磁极片状结构的角度出发, 选择了直径为1.4mm的漆包线, 虽然它的散热性不及内水冷导线, 但是由于磁极本身是片状结构, 减小了涡流热量. 在这种情况下, 加上外部水冷, 完全能够满足旋转扫描磁铁散热, 同时还可以在有限的空间内实现线圈的绕制.

对于旋转扫描磁铁的绕线方式, 我们选择了二极24槽双层叠绕组1路接线法, 如图4所示. 这种绕线方式保证了电源产生单一两极的磁场, 同时在三相交流电的作用下还可以保证磁场的均匀性和旋转性, 达到我们的设计指标.

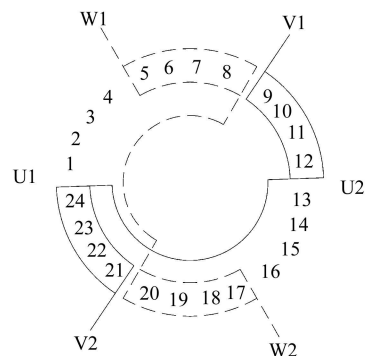


图4 二极24槽双层叠绕组1路接线图

根据以上的设计思路, 最终我们完成了旋转扫描

磁铁的加工. 图5是30MeV束流输运线上旋转扫描磁铁的实物图.

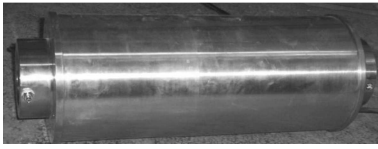


图5 30MeV束流输运线上旋转扫描磁铁实物

3 磁场测量

旋转扫描磁铁加工完毕, 为了验证理论计算的准确性, 我们选择了两种方法测量旋转扫描磁铁的磁场.

3.1 磁场值的初步测量

磁场测量的常用工具是特斯拉计, 但是由于旋转扫描磁铁的磁场方向快速旋转变化的, 特斯拉计无法直接测量旋转扫描磁铁中的磁场值. 为了能够使用特斯拉计测量旋转扫描磁铁的磁场, 我们可以通过间接方法测量磁场值: 在任一时刻, 三相交流电的大小都是固定的, 分别计算出某一时刻三相交流电的大小, 再用直流电代替每相交流电, 测量该时刻的磁场值, 进而实现对旋转扫描磁铁的检测.

由于三相交流电中每两相交流电之间的相位差值为 120° , 为了测量方便, 我们选取每相电流分别为 0° , 120° 和 240° 时刻的电流大小做实验. 此时, 0° 相位的交流电大小为零, 120° 和 240° 相位的交流电大小相等. 因此我们在任意两条导线上接通大小相等的直流电源, 直流电的大小与此时刻 120° 或 240° 的交流电大小相等. 这种情况下所形成的磁场方向不会变化, 可以用特斯拉计进行测量.

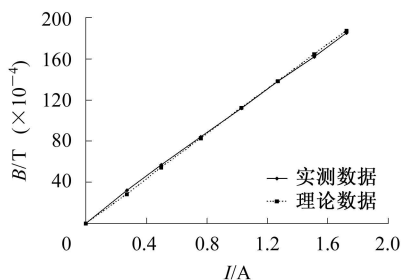


图6 旋转扫描磁铁测量结果和理论结果比较

选择旋转扫描磁铁的中心点作为磁场测量点, 测量的结果与理论计算结果相比较, 如图6所示. 从图中可以看出, 理论计算值和实际测量值之间误差小于 $2.2 \times 10^{-4} \text{T}$, 精度约为1%. 用这种方法测量, 特斯拉计

的安置方向是关键. 由于特斯拉计是手动安置的, 方向和安置点都会有偏差, 这样的测量误差比较大. 这里我们通过另外一种方法更精确地测量出该旋转扫描磁铁的磁场数值.

3.2 进一步测量磁场

由于旋转扫描磁铁的磁场方向时刻都在变化, 因此无法直接准确地测量磁场数值, 所以我们在这个环节中采用了一种特殊的测量方法. 在一个长度为35cm、宽度为4cm、厚度为1.8cm的木条上绕线圈, 选择直径为0.68mm的漆包线绕制, 一共绕制21匝. 将绕有线圈的木条深入到旋转扫描磁铁中, 旋转扫描磁铁磁场方向的变化导致了线圈磁通量的变化, 磁通量的变化会使线圈上产生感应电动势, 通过测量该感应电动势, 就可以推断出旋转扫描磁铁中磁场的变化, 同时还可以验证旋转扫描磁铁理论设计的正确性.

如表2所示, 不同的输入电流和输入电压产生不同的磁场值. 根据理论计算的磁场数据得到测磁线圈中每一时刻的磁通量, 其具体数值为 $\phi = NSB \sin(\omega t)$, 根据公式 $\varepsilon = d\phi/dt$. 可以计算出测磁线圈上的感应电动势, 该感应电动势为

$$\varepsilon = NSB\omega \cos(\omega t) = NSB \cdot 2\pi f \cos(\omega t).$$

结合以上公式, 利用理论计算的磁场数值可以计算出感应电动势幅值大小, 该电动势的幅值与万用表得到的幅值比较, 从表2的比较结果可以看出, 理论计算电动势与测量的电压之间的相对误差小于0.4%, 证明了该磁场数值计算的正确性.

为了说明旋转扫描磁铁中磁场方向的旋转性, 我们绕制了3个大小相同、匝数相等的感应线圈, 这3个线圈呈等边三角形放置在旋转扫描磁铁中, 通过示波器可以测出3个线圈的感应电动势变化. 如图7示波器上感应电压的波形所示, 可以看出3个电动势之间相位相差 120° , 该实验数据与理论数据完全吻合, 这就可以推断出旋转扫描磁铁中磁场方向的旋转性.

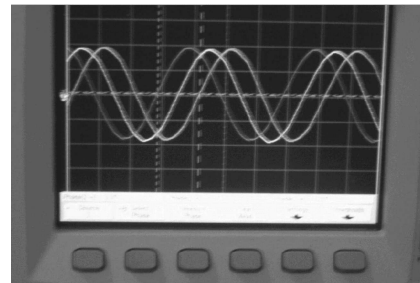


图7 示波器上的感应电压波形

表2 旋转扫描磁铁的测磁结果

电流有效值 I/A	输入电压 U/V	万用表输出电压 V	万用表幅值电压 V	线圈区域的平均磁场 $B/T(\times 10^{-2})$	理论计算求解电动势(幅值)	相对偏差(%)
0.2	13.7	0.13	0.183848	0.198	0.183126	0.39398
0.4	26.2	0.26	0.367696	0.397	0.366253	0.39398
0.6	39.1	0.39	0.551543	0.595	0.549379	0.39398
0.8	52.3	0.52	0.735391	0.793	0.732505	0.39399
1.0	65.3	0.65	0.919239	0.991	0.915630	0.39410
1.2	78.3	0.78	1.103087	1.19	1.098758	0.39397
1.4	91.1	0.91	1.286934	1.39	1.281884	0.39401
1.6	104.0	1.04	1.470782	1.59	1.465010	0.39399
1.7	110.4	1.10	1.555635	1.69	1.556571	0.06011

4 结论

本文介绍了国内首次研制成功的旋转扫描磁铁设计、加工、检测的全过程, 并通过磁场测量结果与理论设计结果的比较证明了设计的正确性和该磁铁的可

行性. 该磁铁将用于30MeV医用回旋加速器新建的 ^{123}I 束流输运线上, 也将用于该加速器原有固体靶束流输运线上, 以实现同位素生产靶上的束流高均匀度. 该旋转扫描磁铁也可用于100MeV回旋加速器的质子输运线上, 以满足某些对束流均匀度有特殊要求的实验.

参考文献(References)

- 1 SUN Zu-Xun, ZHANG Xing-Zhi, FAN Ming-Wu et al. Nuclear Science and Engineering, 1997, **17**(2): 157—165 (in Chinese)
(孙祖训, 张立志, 樊明武等. 核科学与工程, 1997, **17**(2): 157—165)
- 2 FAN Ming-Wu, ZHANG Tian-Jue. Initial Operation of CIAE Medically Used Cyclotron. Proceeding of the 1997 Particle Accelerator Conference. Vancouver: IEEE, 1997, 3834—3836
- 3 ZHANG Tian-Jue, CHEN Yong, FAN Ming-Wu. Beam Transport Line of CIAE Medical Cyclotron and Its Magnetic Elements Design Studies. Proceeding of the 1993 Particle Accelerator Conference. Vancouver: IEEE, 1993, 306—308
- 4 CHU W T. Wobbler Facility for Biomedical Experiments at the Bevalac. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, **NS-32**(5): 3321—3323

Wobbling Magnet Design for Beam Line of CYCIAE-30 Medical Cyclotron

JIA Xian-Lu¹⁾ ZHANG Tian-Jue LÜ Yin-Long AI Chang-Jun CHU Cheng-Jie
GUAN Feng-Ping XING Jian-Sheng
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The beam extracted from cyclotron is of Gaussian distribution, but in many applications the uniformly distributed beam is needed. There are some methods to achieve uniform beam, but the uniformity is less than expected. This paper introduces the process of the wobbling magnet design which can get the high uniform beam. On the base of the design theory and the measurement to the wobbling magnet, we can confirm that there has high uniform beam on the target under the wobbling magnet effect. It is the first time to design and manufacture the wobbling magnet by ourselves in our country, and the measurement results show that the magnetic field in the wobbling magnet are satisfied the requirement of the storage wobbling magnet.

Key words wobbling magnet, accelerator, beam

Received 6 July 2006

1) E-mail: jiaxl@iris.ciae.ac.cn