

永磁式核磁共振成像仪(MRI)磁系的研究

张雪峰^{1,2}, 马 强^{1,2*}, 刘艳丽^{1,2}, 徐丽琴³, 张久兴⁴

- (1. 内蒙古科技大学 数理与生物工程学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古科技大学 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室: 省部共建国家重点实验室培养基地, 内蒙古 包头 014010;
3. 广州大学 物理与电子工程学院, 广东 广州 510006;
4. 北京工业大学 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 研究内容为研制一种可以在气隙中获得较大范围的均匀高磁场区的永磁磁系。磁系由一系列扇形钕铁硼磁体组成, 这些磁体的磁化方向沿圆周方向等角度渐变, 形成两个磁极, 磁场方向垂直于轴向。圆筒形磁系在沿轴方向加以分层, 调节层数及每层厚度以获得均匀磁场。利用“磁荷”概念及磁库仑定律计算磁场。

关键词: 钕铁硼; 核磁共振; 磁系; 磁场

中图分类号: O441.2

文献标识码: A

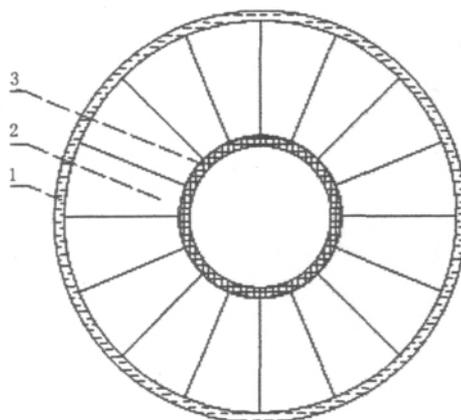
文章编号: 1004-0277(2012)02-0045-05

医用磁共振成像(MRI)系统是现代临床诊断中的先进医学影像设备, 由于其对人体无害、软组织分辨率高等突出的优点, 在临床上得到广泛应用^[1]。MRI系统的性能与其所用磁系的场强有着直接的关系, 场强越高, 性能也越高。磁场强度的大小对MRI设备图像的影响是: 在信噪比方面, 磁场强度越高, 信号强度越大, 信噪比越高(但不是线性关系); 另外磁场强度高, 扫描时间短。目前医用磁共振成像(MRI)系统磁系所达到的高场, 都是通过超导磁体来实现的, 但超导磁体MRI需要液氦来提供线圈的工作环境, 所以超导磁体MRI的销售价格和运行成本都相对较高^[2]。永磁低场强MRI的销售和运行成本相对较低, 近年来发展迅速^[3], 目前已经成为国内临床常规诊断的主流机型, 但永磁MRI的发展受制于其场强, 长期以来一直被认为是低档MRI。MRI系统要求永磁磁系工作区磁场具有很高的均匀性。目前永磁MRI的磁体采用开放平板式设计, 此种磁路不能达到很高的磁场^[4]。

1 磁系的设计

1.1 磁系的形状及结构

磁系的形状及结构见图1、图2。图1为磁系切面图。图2为磁系分层图。



1 区为铁轭; 2 区为磁体; 3 区为无磁钢

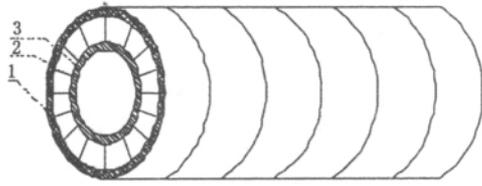
图1 磁系切面图

Fig. 1 Cross-section of magnetic system

* 收稿日期: 2010-12-10

基金项目: 内蒙古自治区工业重点项目(20071703); 内蒙古工业重大攻关项目(01311005); 内蒙古科技创新引导奖励资金

作者简介: 张雪峰(1964-), 内蒙古托克托人, 博士, 教授, 研究方向: 磁性材料。



1 区为铁腭; 2 区为磁体; 3 区为无磁钢

图 2 磁系分层图

Fig. 2 Layered magnetic system

2 磁场的计算

本磁系采用钕铁硼材料, 该材料特点是退磁曲线方形度很好, 即在工作点的很大范围内 ($H \leq H_k$) 磁化强度 M 都接近于 M_r , 即 $M \approx M_r$ 。因此, 在工作点的很大范围内可以近似地认为 $M \approx M_r$ 。由此, 磁体的体磁荷可以忽略不计, 而只考虑面磁荷, 而且面磁荷的分布极近似于均匀^[5]。这便于利用磁库仑定律计算具有规则几何形状的磁体在对称轴上的磁场^[6]。

2.1 磁系内表面磁荷在轴线上一点的磁场

磁系内表面如图 3 所示。

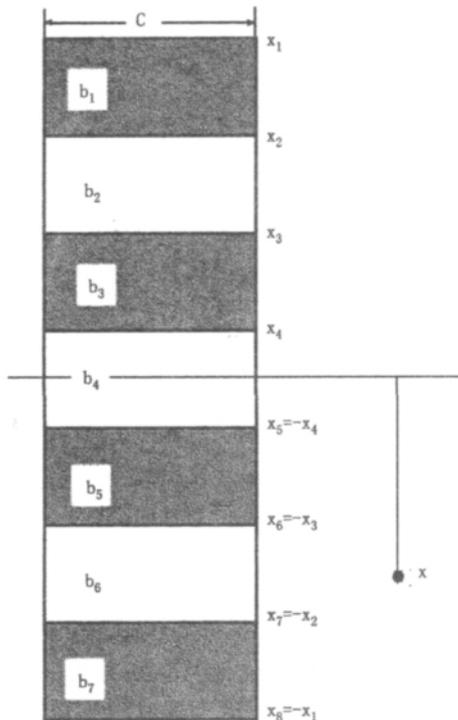


图 3 磁系内表面

Fig. 3 The inside surface of magnetic system

其中 C 为磁系的内圆周长, L 为磁系的长度, x 为轴线上坐标长度

$$\ln\left(1 + \frac{C}{L}\right)^2 = D, \frac{x+x_i}{L} = M,$$

$$\frac{x-x_i}{L} = N, \frac{x+x_{i+1}}{L} = P, \frac{x-x_{i+1}}{L} = Q$$

b_i 在 x 处的磁场

$$H_{//} = \sigma K$$

$$K = \ln \frac{(\sqrt{D+P^2}+P)(\sqrt{1+M^2}+M)}{(\sqrt{D+M^2}+M)(\sqrt{1+P^2}+P)}$$

$$\frac{(\sqrt{D+N^2}+N)(\sqrt{1+Q^2}+Q)}{(\sqrt{D+Q^2}+Q)(\sqrt{1+N^2}+N)}$$

2.2 磁系切面磁荷在轴线上一点的磁场

图 4 所示为磁体的切面。

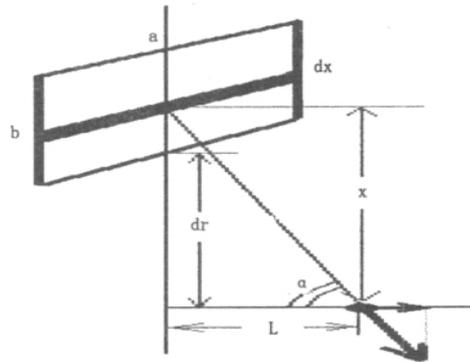


图 4 磁体的切面

Fig. 4 Cross-section of the magnets

$$H_{\perp} = \sigma \cdot J$$

$$J = 2 \left(\tan^{-1} \frac{\frac{a(b+d)}{L^2}}{\sqrt{4\left(\frac{b+d}{L}\right)^2 + 4 + \left(\frac{a}{L}\right)^2}} - \tan^{-1} \frac{\frac{ad}{L^2}}{\sqrt{4\left(\frac{d}{L}\right)^2 + 4 + \left(\frac{a}{L}\right)^2}} \right)$$

2.3 磁系中磁荷的计算

图 5 为磁荷分布图。由于图 4 的磁化方向, 可以将圆周上的面磁核分成四部分, 每部分磁体的面磁如 1 2 3 4 a b c d 分别将其计算。

$$\sigma_1 = M, \sigma_2 = M \cos 45^\circ = 0.707M, \sigma_3 = M \cos 45^\circ = 0.707M, \sigma_4 = M \cos 90^\circ = 0$$

$$\sigma_a = 2M \sin 11.25^\circ = 0.39M$$

$$\sigma_b = M \sin 11.25^\circ + M \sin 56.25^\circ = 1.027M$$

$$\sigma_c = M \sin 56.25^\circ - M \sin 33.75^\circ = 0.276M$$

$$\sigma_d = M \sin 78.75^\circ - M \sin 33.75^\circ = 0.425M$$

2.4 工作区磁场

1 2 3 4 类型面磁荷在中心点的磁场:

$$H_1 = 4(J\sigma_1 \cos 11.25^\circ + J\sigma_2 \cos 33.75^\circ + J\sigma_3 \cos 56.25^\circ + J\sigma_4 \cos 78.75^\circ) = 4\pi M \frac{1.962}{\pi} J$$

a b c d 类型面磁荷在中心点的磁场:

$$H_2 = 2K\sigma_a + 4K\sigma_b \cos 22.5^\circ + 4K\sigma_c \cos 45^\circ + 4K\sigma_d \cos 67.5^\circ = 4\pi M \frac{1.501}{\pi} K$$

总磁场为

$$K = \ln \frac{(\sqrt{D+P^2}+P)(\sqrt{1+M^2}+M)}{(\sqrt{D+M^2}+M)(\sqrt{1+P^2}+P)}$$

$$\frac{(\sqrt{D+N^2}+N)(\sqrt{1+Q^2}+Q)}{(\sqrt{D+Q^2}+Q)(\sqrt{1+N^2}+N)}$$

$$J = 2 \left(\tan^{-1} \frac{tM}{\sqrt{4M^2+s}} - \tan^{-1} \frac{tN}{\sqrt{4N^2+s}} + \tan^{-1} \frac{tP}{\sqrt{4P^2+s}} - \tan^{-1} \frac{tQ}{\sqrt{4Q^2+s}} \right)$$

$$R = \frac{1.962J + 1.501K}{\pi}$$

$$H = H_1 + H_2 = 4\pi MR$$

上式中的 H 即为磁系中轴线上某点的磁场, 利用软件可计算磁系工作区 (磁系中心以 $2r$ 为高的圆

筒形空间) 内轴线的各点磁场。

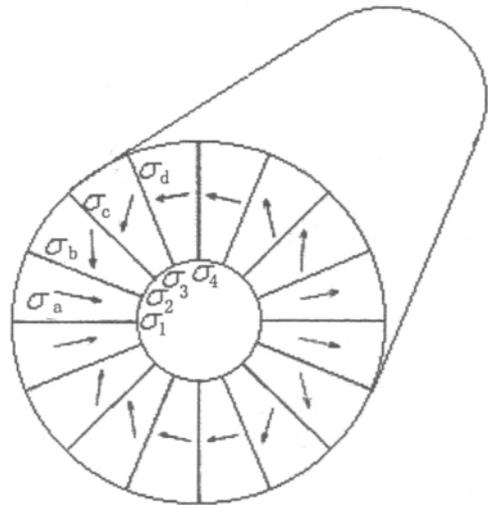


图 5 磁荷分布图

Fig. 5 The distribution of magnetic charge

2.5 计算方法的验证

经过小型磁系组装实验, 组装的磁系与本设计相同, 但在轴线上没有分层。磁系同一截面各点的磁场与该截面在轴线上的点一致, 且每个截面上的磁场基本均匀。轴线以外的各点测量磁场, 图 6 为实验磁系的磁场。可以证明用本设计方法可以得到目标均匀磁场。

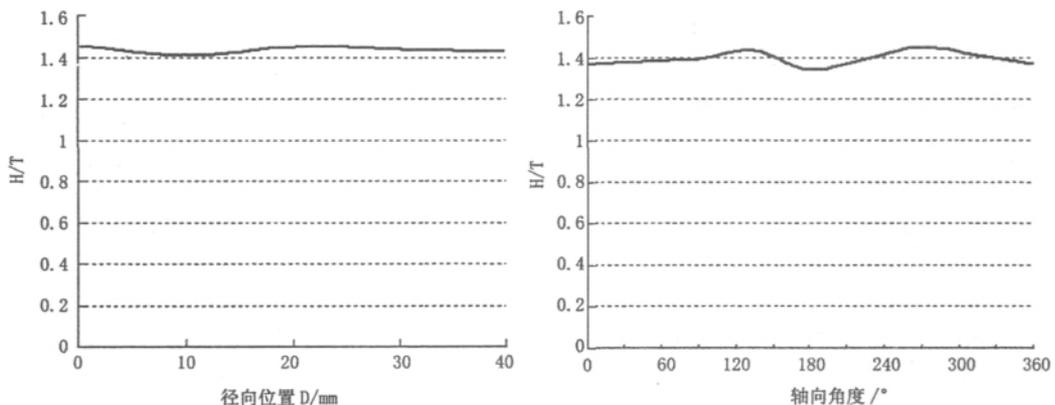


图 6 实验磁系的磁场

Fig. 6 Magnetic field of magnetic system for experiment

3 磁系参数的优化

3.1 提高磁系磁场的方法

磁体的磁化方向总是沿圆周方向等角度渐变, 当磁系切面的磁体块数发生改变后, 磁化方向也随

之改变, 引起磁场大小的改变。把磁体的块数调整为 12 块、16 块和 20 块分别计算, 磁场计算结果如下:

3.1.1 12 块磁体

$$\sigma_1 = M, \sigma_2 = M \cos 45^\circ = 0.707M,$$

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= M\cos 90^\circ = 0 \\ \sigma_a &= 2M\sin 15^\circ = 0.5176M \\ \sigma_b &= M\sin 15^\circ + M\sin 60^\circ = 1.1248M \\ \sigma_c &= M\sin 75^\circ - M\sin 30^\circ = 0.4659M \\ 1\ 2\ 3\ \text{类型面磁荷在中心点的磁场:} \\ H_1 &= 3(J\sigma_1\cos 15^\circ + J\sigma_2\cos 45^\circ + J\sigma_3\cos 75^\circ) = \\ &= 4\pi M \frac{1.4487J}{\pi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a\ b\ c\ \text{类型面磁荷在中心点的磁场:} \\ H_2 &= 2K\sigma_a + 3K\sigma_b\cos 30^\circ + 3K\sigma_c\cos 60^\circ \\ &= 4\pi M \frac{1.164K}{\pi} \\ H &= H_1 + H_2 = 4\pi MR \\ R &= \frac{1.4487J + 1.164K}{\pi} \end{aligned}$$

将各个参数带入 磁场计算结果如图 7。

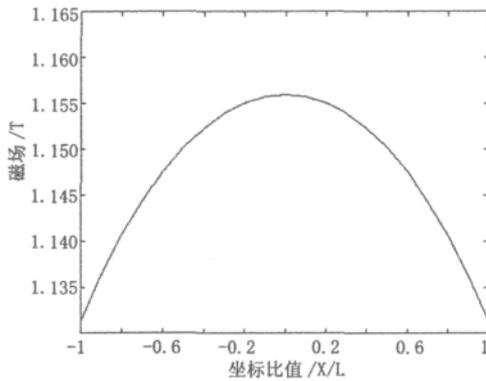


图 7 工作区磁场
Fig. 7 Magnetic field of work area

3.1.2 16 块磁体

计算过程如 2.4 节所示 磁场计算结果如图 8。

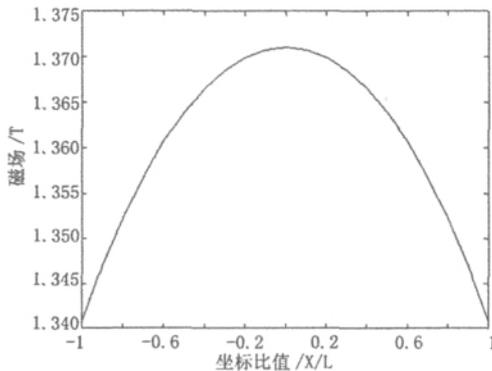


图 8 工作区磁场
Fig. 8 Magnetic field of work area

3.1.3 20 块磁体

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= M \quad \sigma_2 = M\cos 30^\circ = 0.866M \quad \sigma_3 = M\cos 30^\circ = \\ &= 0.866M \quad \sigma_4 = M\cos 30^\circ = 0.866M \\ \sigma_5 &= M\cos 90^\circ = 0 \\ \sigma_a &= 2M\sin 9^\circ = 0.313M \\ \sigma_b &= M\sin 9^\circ + M\sin 39^\circ = 0.785M \\ \sigma_c &= M\sin 39^\circ - M\sin 21^\circ = 0.271M \\ \sigma_d &= M\sin 39^\circ - M\sin 21^\circ = 0.271M \\ \sigma_e &= M\sin 81^\circ - M\sin 21^\circ = 0.629M \end{aligned}$$

1 2 3 4 5 类型面磁荷在中心点的磁场

$$\begin{aligned} H_1 &= 5(J\sigma_1\cos 9^\circ + J\sigma_2\cos 27^\circ + J\sigma_3\cos 45^\circ + \\ &J\sigma_4\cos 63^\circ + J\sigma_5\cos 81^\circ) = 4\pi M \frac{3.453J}{\pi} \end{aligned}$$

a b c d e 类型面磁荷在中心点的磁场:

$$\begin{aligned} H_2 &= 2K\sigma_a + 5K\sigma_b\cos 18^\circ + 5K\sigma_c\cos 36^\circ + \\ &5K\sigma_d\cos 54^\circ + 5K\sigma_e\cos 72^\circ = 4\pi M \frac{1.80575K}{\pi} \\ R &= \frac{3.453J + 1.80575K}{\pi} \end{aligned}$$

$$H = H_1 + H_2 = 4\pi MR$$

将各个参数带入 ,计算磁场如图 9。

结果表明随着磁系横截面磁体块数的增加 ,磁
场是不断增大的。

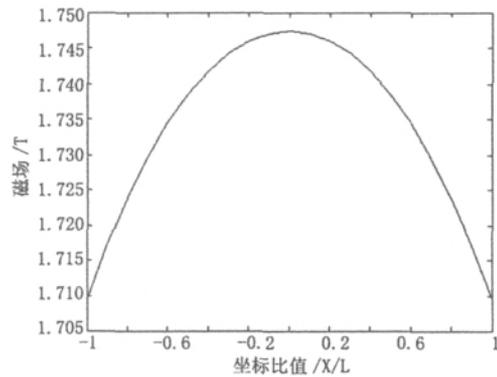


图 9 工作区磁场
Fig. 9 Magnetic field of work area

3.2 提高磁系均匀性的方法

医用核磁共振的磁系要求工作区具有很高的均匀性 本磁系的磁场方向为径向 不容易安装补偿线圈 本磁系采用的方法是将磁系在轴的方向分层 ,每层采用不同的性能的钕铁硼材料 ,利用分层调节磁体的性能来使磁系的磁场均匀。

根据上述磁场计算公式 ,设定中间层的宽度并
带入 ,计算中间层在该点的磁场

第 i 层在该点的磁场

$$\frac{x + x_i}{L} = M, \frac{x - x_i}{L} = N,$$

$$\frac{x + x_{i+1}}{L} = P, \frac{x - x_{i+1}}{L} = Q$$

$$K_i = \ln \frac{(\sqrt{D + P^2} + P)(\sqrt{1 + M^2} + M)}{(\sqrt{D + M^2} + M)(\sqrt{1 + P^2} + P)} \cdot \frac{(\sqrt{D + N^2} + N)(\sqrt{1 + Q^2} + Q)}{(\sqrt{D + Q^2} + Q)(\sqrt{1 + N^2} + N)}$$

$$J_i = 2 \left(\tan^{-1} \frac{tM}{\sqrt{4M^2 + s}} - \tan^{-1} \frac{tN}{\sqrt{4N^2 + s}} + \tan^{-1} \frac{tP}{\sqrt{4P^2 + s}} - \tan^{-1} \frac{tQ}{\sqrt{4Q^2 + s}} \right)$$

$$R_i = \frac{1.962J_i + 1.501K_i}{\pi}$$

$$H = H_1 + H_2 = 4\pi MR_i$$

$$H = 4\pi M_1 R_1 + 4\pi M_2 R_2 + \dots + 4\pi M_i R_i$$

将每层磁体的不同 M 带入上式, 即求出最后的 H 。磁体的性能为中间低两边高, 并且呈梯度排列时, 磁系可以达到很好的均匀度。经过上述磁场计算和计算机程序的调试, 我们将磁系的长度设计为 $1.6m$, 这样的长度相对于超导磁体也是非常短的, 这样病人在入内的时候就不会产生恐惧。磁系在轴线上分成 5 层, 从左至右依次称为 1 ~ 5 层, 第 3 层 (中间层) 的长度为 $40cm$ 、磁体的 M 值为 $1.15T$, 第 2 层、4 层厚度为 $20cm$ 、磁体的 M 值为 $1.22T$, 第 1 层、4 层长度为 $20cm$ 、磁体的 M 值为 $1.45T$ 。这样在半径为 $40cm$ 、高为 $40cm$ 的圆筒形空间内可产生均匀的磁场, 结果如图 10。

4 结论

本研究在上述圆筒形磁系沿轴方向加以分层,

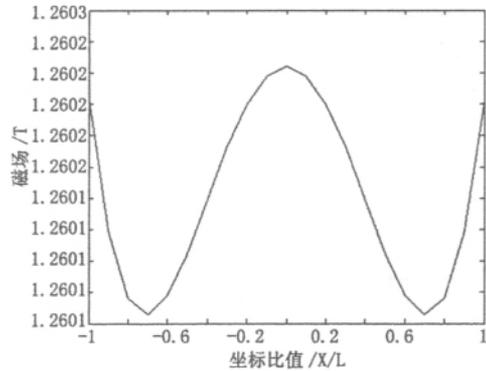


图 10 调节后工作区磁场分布

Fig. 10 Magnetic field of work area after adjustment

调节层数、每层厚度及每层的磁性可以获得均匀磁场, 即突破现有永磁 MRI 最高磁场 $0.7T$ 得到均匀高磁场来代替超导 MRI。其次本研究设计的磁系较短, 长度仅为 1.6 米, 大大减少病人幽闭恐惧且能满足功能检查的需要。磁场可达到的范围为 $0.2 \sim 1.5$ 特斯拉, 磁场均匀性小于 100×10^{-6} 。

参考文献:

- [1] 陆杨乔, 冯玉水, 张启欣. 医用核磁共振成像仪磁场的测定[J]. 中国公共卫生学报, 1993, 12(4): 203-204.
- [2] 史泰华, 许澍均, 陆裕清. 医用核磁共振成像仪磁体装置设计[J]. 应用科学学报, 1993, 11(3): 265-270.
- [3] 史泰华. 核磁共振成像仪磁体装置的温度相关性研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 547-550.
- [4] 朱妍, 谢德馨, 张艳丽, 等. 一种薄片型磁场全开放核磁共振成像仪主磁体的优化设计[J]. 北京生物医学工程, 2006, 25(2): 126-129.
- [5] 史泰华, 许澍均, 沈晓明. 核磁共振成像仪磁体系统的均匀度研究[J]. 上海科技大学学报, 1992, 15(4): 43-47.
- [6] 张雪峰, 徐来自, 等. 医用核磁共振成像仪永磁磁系[P]. 中国专利: 201010211886.16, 2011-4-20.

Research on the Magnetic System of Permanent Magnet MRI

ZHANG Xue-feng^{1,2}, MA Qiang^{1,2}, LIU Yan-li^{1,2}, XU Li-qin³, ZHANG Jiu-xing⁴

- (1. Mathematics, Physics and Biological Engineering school, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory for Utilization of Bayanobo Multi-Metallic Resources: Elected State Key Laboratory, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
3. Physics and Electronics Engineering Faculty, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
4. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The content of research is developing a magnetic system with a uniform and high magnetic field in the air gap. It consisted of a series of sector Nd-Fe-B. Magnetization direction of the magnets changes along the circumference forming two poles perpendicular to the axis. The magnetic system is layered along the axis with a homogeneous field obtained by adjusting number and thickness of the layers. Calculation of magnetic field is based on the concept of magnetic charge and magnetic Coulomb law.

Key words: Nd - Fe - B; MRI; magnetic system; magnetic field

《稀土》杂志征订启事

《稀土》杂志是中国稀土学会会刊,是一份以反映我国稀土提取和应用科学为特点的科技刊物。《稀土》杂志的宗旨是宣传、推进稀土资源综合利用,反映稀土科研现代水平,沟通科研与生产的联系,为发展我国的稀土事业服务。《稀土》杂志内容新颖、广泛、实用性强,涉及稀土地质、选矿、提取、化学、物理、生物等学科的研究,交流稀土应用于钢铁、机械、有色金属、电子、化工、玻璃、陶瓷、轻工、农业、医药等领域最新发展及超导、激光、永磁、荧光及其他新材料等高技术方面的应用。《稀土》杂志荣获第二届国家期刊奖百种重点期刊、北方优秀期刊奖、2002年华北地区十佳期刊,并多次获内蒙古优秀期刊奖。

《稀土》杂志报请内蒙古工商行政管理局批准,已于1988年开办广告业务,承办画页广告、文字广告和商品信息广告。愿为沟通产销、技术转让、调节余缺等牵线搭桥,竭诚服务。有欲登广告者请与本部联系。

《稀土》杂志为双月刊,由包头市邮电局发行,在全国各地邮局订阅。《稀土》杂志代号16-37。每月定价10元,全年定价60元。如有漏订或补订者,可直接向编辑部办理订购手续。

银行汇款:

开户行:包头市工商银行昆区办事处

开户名称:全国稀土信息网

银行账号:0603 0120 0902 645 023

《稀土》编辑部电话及传真:0472-5179380 E-mail:xtbjb@brire.com

中国稀土学会

《稀土》编辑部