

差值感应法测量电视偏转线圈 的空间磁场*

张 邦 英

(华中工学院 激光研究所)

提 要

本文扼要地介绍了测量磁场的各种电测方法并作了比较。详细论述了测量偏转线圈磁场的原理及方法。提出了三探针的测场机构及切实可行的测量装置。测出了电视偏转线圈的磁场参数曲线 $H_0(z)$ 、 $H_2(z)$ 及 $H_4(z)$ 。

一、引 言

在现代科学技术领域中,经常遇到磁场问题,磁场有强有弱,用途很多,因此必须依据不同的测量对象及测量要求,采用不同的测量方法。文献[1]报道,磁场电测法有:载流法、滤波探针法、差探针法、角探针法、脉冲高度法和霍尔效应法等等。

在彩色电视机的偏转线圈中,磁场较弱,其最大磁感应强度约为 $10\text{Gs}^{[2]}$ 。因此,地球磁场的影响以及其他对被测系统的干扰,必须予以考虑。测量电视偏转线圈的磁场有两种最可取的方法,即小感应线圈法和霍尔效应法。霍尔探针虽然体积可做得较小,但终究是体平均效应。而 Herzog 小线圈则可测得磁场范围内某一“点”处的磁场值。

用小感应线圈作为探针,测量的是与磁通的变化率成正比的感应电压。这种小探测线圈可以是在稳定磁场中的一根旋转探针,或是在交变场中的一根固定磁针。根据我们的实际情况,选用了后一种方法,因为这种方法的测量步骤是最简单的,而且是可靠的。由于采用的是稳定的交变场,并且是在屏蔽室内进行测量,因此免除了地磁效应以及其他对被测系统的干扰。如果测量操作得当,坐标定位机构准确,小线圈制作精密,就可使测量误差很小。角探针法和差值感应法都属于小感应线圈法。角探针法要求测量空间很多点的磁场数据,使测量工作很繁重,而且对坐标定位机构的要求也苛刻。差值感应测场法的测量工作量较轻,但计算工作量则较大。然而由于计算机的广泛应用这些计算已是易于解决的问题,所以我们采用后一种方法。

二、测量原理

为了描述一对偏转线圈的场,我们采用如图1所示的直角坐标系统。 z 轴与电子束

* 1981年8月12日收到。

管的管轴以及未偏转的电子束的方向相一致, x 轴是水平的, y 轴是垂直的. 图 1 所示情况是水平偏转线圈示意图. 磁场 H 各分量表示式为^[3]:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= 2H_2xy + 4H_4x^3y - \left(4H_4 + \frac{1}{3}H_2''\right)xy^3 + \dots\dots, \\ H_y &= H_0 - \left(H_2 + \frac{1}{2}H_2'\right)y^2 + H_2x^2 + \left(H_4 + \frac{1}{6}H_2'' + \frac{1}{24}H_2''''\right)y^4 \\ &\quad - \left(6H_4 + \frac{1}{2}H_2'\right)x^2y^2 + H_4x^4 + \dots\dots\dots, \\ H_z &= H_0'y + H_2x^2y - \left(\frac{1}{3}H_2 + \frac{1}{6}H_2''\right)y^3 + \dots\dots\dots, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中场参数 H_0 、 H_2 、 H_4 等等, 是相互无关的 z 的函数. 它们的表示式为^[2]:

$$\left. \begin{aligned} H_0 &= (H_y)_{x=y=0}, \\ H_2 &= \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} \right)_{x=y=0}, \\ H_4 &= \frac{1}{4!} \left(\frac{\partial^4 H_y}{\partial x^4} \right)_{x=y=0}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式 (1) 可见, H_0 是沿轴线 z 的场强分量, 而 H_2 和 H_4 则表示在 x 方向场强变化的情况, 显然, 它们都是 z 的函数. 当 x 和 y 值不太大时, 如果知道 H_0 、 H_2 、 H_4 和相应的导数数值, 即可用式 (1) 的前几项相当精确地描述磁场分布的规律. 而对小偏转角来说, 即在近轴范围内, 包含 H_4 各项的作用可忽略不计.

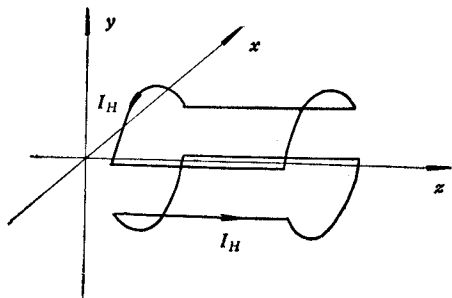


图 1 一对水平偏转部件的示意图
Fig. 1 Schematic representation of the horizontal deflection unit

虽然在理论上可以算出某些理想情况的场参数 H_0 、 H_2 、 H_4 , 但由于现代电视偏转线圈的绕组分布相当复杂, 又要考虑实际上存在的各种象差和畸变, 因此, 仍需借助于磁场测量的方法测出这些场参数, 以利于理论计

算和设计.

由式 (1) 可知, 在 $y = 0$ 处, H 各参量变为:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= 0, \\ H_y &= H_0 + H_2x^2 + H_4x^4 + \dots\dots\dots, \\ H_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这意味着, 只要在 $x-z$ 平面上, 对每个 z 值在三个不同的 x 点测量 H_y , 就足以确定 H_0 、 H_2 和 H_4 .

因为 H_0 、 H_2 和 H_4 都是 z 的函数, 在计算时会涉及到对 z 的许多导数, 因此, 对测量精度的要求是很高的. 实践证明, 只有在 x 和 y 较小的情况下, 才能把 H_4 的影响忽略掉. 例如, 在 $x = 5\text{mm}$ 处, $H_2x^2/H_0 \leq 0.025$, 而 $H_4x^4/H_0 \leq 0.006$. 所以, 在实际处理问题时, 将有“三级近似”和“五级近似”两种情况.

三、测量装置

测量装置的方框图如图 2 所示. 各部分的基本功能是: 信号源和功率放大器是用于提供偏转线圈定频恒幅的工作电流的, 使在偏转线圈周围产生稳定的交变场. 放大器和同步检波器的基本作用是放大“小感应线圈——探头”在偏转线圈的交变场中产生的感应电势, 并将它转换为直流电压. 工作于 4kHz 的陶瓷滤波器, 被安置在两个放大器之间, 用来消除第一个放大器的输出噪声和在此以前感生的 50Hz 交流分量.

进行测量时, 在偏转线圈的水平绕组或垂直绕组中通以 4kHz、0.8A 的交变电流, 使处于偏转线圈磁场中某一点的小感应探测线圈(或探针)中产生某一相应的感应输出电压. 将这个输出电压经放大器放大后, 连同经过整形后的 4kHz 同步信号一起送入同步检波器. 经平滑滤波后, 即可从数字电压表读出具有一定精度要求的电压值. 最后, 根据一定的数学模型, 将测得的数据输入计算机进行理论计算.

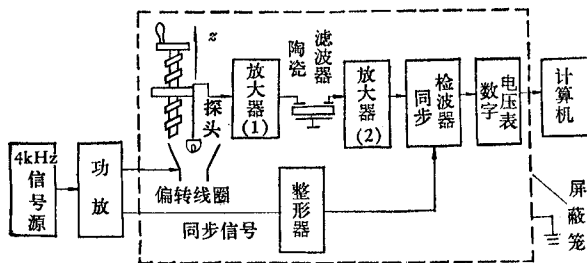


图 2 测量装置方框图

Fig. 2 Block diagram of the measuring equipment

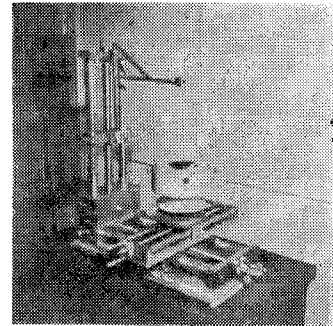


图 3 用于测量电视偏转线圈空间磁场分布的坐标定位系统

Fig. 3 Coordinate positioning-system for measuring space field-distribution of TV deflection yoke

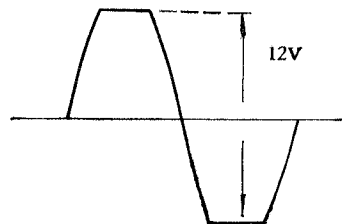


图 4 功放末前级输入信号波形

Fig. 4 The input waveform of the penultimate stage of the power-amplifier

为了能测出偏转线圈空间各点的磁场分布, 所用的三度空间机械坐标定位系统, 如图

3 所示. 该装置的机械要求是: 保证偏转线圈可前后左右精确定位; 移动探针的机构的动作精确而且可重复. 这台装置的基本数据是: 有效行程 $xyz = 400 \times 400 \times 500\text{mm}$; 若以坐标中间为原点, 丝杆顶端的最大摆动量 $\leq \pm 2$ 丝.

我们选用 XD1 型信号发生器作信号源: 采用频率为 4kHz、幅值为 3V 的信号. “功放”是用扩音机改制成的, 放大 4kHz 的信号, 提供偏转线圈足够的功率, 以产生稳定的空间场分布. 在功放中采取了下列稳幅措施:

(1) 对功放末前级的 4kHz 信号先进行削波限幅, (如图 4 所示)用以排除 XD1 信号源输出幅度波动及市电波动的影响, 然后在功放级采用强负反馈校正波形, 把输出还原为正弦波.

(2) 末级功放的栅偏压由末前级的电源回路中的电阻压降供给. 这样, 末前级和末级的增益互相抑制, 提高了输出稳定性, 并省去了一个负偏压电源.

(3) 功放电源 (300V, 500V) 均采用稳压电源. 由于采取了这些措施, 可使数字电压表稳定地读取满五位数字 (0.0000 量程档).

为了保证能稳定地线性放来自探头的感应电压, 我们采用了具有深负反馈的运算放大器. 开环增益大于 10^4 倍, 闭环增益为 10 倍, 信号

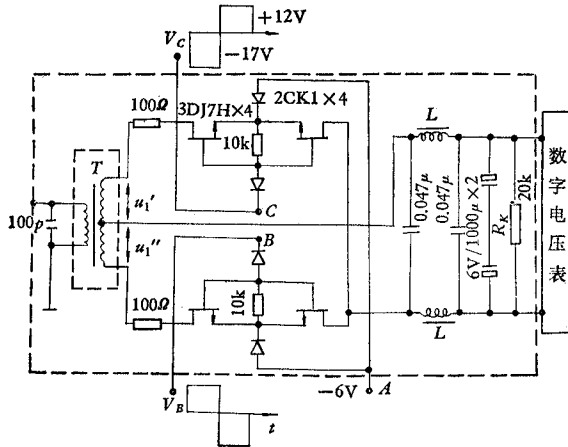


图 5 同步检波器电路

Fig. 5 The circuit diagram of the synchronous detector

经两个放大器, 总增益为 $10 \times 10 = 100$ 倍. 直流运算放大器具有结构简单、增益稳定、线性好等特点. 我们用来放大 4kHz 的交流信号, 输入、输出端均采用电容耦合, 因此“零漂”不是严重问题.

同步检波器类似于一般解调电路, 是相敏检波的工作状态. 检波输出幅度正比于输入信号, 被检波的信号与同步信号常处在正向同步或反相同步两个状态. 正向同步时输出为正; 反相同步时输出为负; 相位差为 90° 、 270° 时输出为零, 同样具有相敏效果和抑制高次谐波的能力.

差值感应测场法是以两个探针在磁场中产生的感应电势之差为依据的. 二者之差有时为正有时为负, 因此必须采用同步检波电路.

我们采用的同步检波器如图 5 所示. 可简单地看作“同步整流器”的工作形式. 场效应管开关在同步信号的驱动下交替工作 B、C 两点接互为反相的同步驱动信号. V_B 、 V_C 自功放的输出变压器的抽头取出, 并经整形. 这样, 就保证了同步信号与偏转线圈上的交变电流相位的一致性. 另外, 由于场效应管开关用两只管子对接, 因此同步驱动信号不会串入信号回路, 不影响检波输出电压. 当输入信号为零时, 检波输出恒为零, 所以无需采取调零措施. 因检波负载 R_K 阻值远远大于场效应管的导通电阻, 所以, 双臂正负检波的对称性和线性均好.

四、测量方法

实际测量时, 将探针安装在 z 坐标上, 而将被测的偏转线圈固定在 xy 坐标上 (见图 3)。把探针定向在偏转线圈的磁力线的方向之后, 就可沿偏转线圈的机械轴线测量场参数 H_0 的相对值。这时由于 x 和 y 都是零, 且 H_0 的值较大, 所以由微小的不对称性产生的在机械和电气轴线之间的某些偏离误差, 一般可忽略不计。

依据小偏转角理论^[2], 在二维对称磁偏转场中, 当对角线偏转角小于 50° 时, 场参数 H_x 的影响非常小, 因此, 在三级近似情况下(近轴范围), 由式 (3) 得知

$$H_z \doteq \frac{1}{x^2} (H_y - H_0). \quad (4)$$

所以, 对于某一给定 x 的位置, 可用与测量 H_0 相似的方法, 测量 H_z 沿 z 方向的分布。为了克服在 x 很小时测量 H_y 与 H_0 这两个场强之差的困难, 往往采用两个完全相同的探测线圈来进行测量。其中一个放在被测场的 z 轴线上, 另一个并排放着, 但在 x 方向上离开前一个 5mm。当这两个探针反极性 (即非同名端) 连接时, 给出的信号即是这两点之间场强之差的量度, 可直接用于计算 H_z 。因此这两个探测小线圈构成了“差探针”, 两探针之间的距离始终保持不变。实际上, 这两个探针是不可能完全相同的, 因此测量往往如下进行。

假定把探针 P 和 Q 放在图 6(a) 所示的位置上, 探针 P 对磁场轴线的误差假定为 Δx_0 , 这两个探针之间的距离为 d_1 , 并且 P 和 Q 之间灵敏度差异为 ΔS , 在测出电位差 $e_Q - e_P$ 之后, 把这两个探针向左移一距离 d_1 , 并再次测出电位差(图 6(b)), 用两次测量的平均值 e_M 来决定 H_z 。因此, 在图 6(a) 中,

$$e_{P_1} = (H_0 + H_z \Delta x_0^2) S, \quad e_{Q_1} = [H_0 + H_z (d_1 + \Delta x_0)^2] (S + \Delta S),$$

因而,
$$e_1 = e_{Q_1} - e_{P_1}.$$

在图 6(b) 中, 同样可得到

$$e_{P_2} = [H_0 + H_z (d_1 - \Delta x_0)^2] S, \quad e_{Q_2} = (H_0 + H_z \Delta x_0^2) (S + \Delta S),$$

因而,
$$e_2 = e_{Q_2} - e_{P_2}.$$

平均得到

$$e_{M_2} = \frac{e_1 - e_2}{2} = H_z d_1^2 S \left(1 + \frac{\Delta S}{2S} + \frac{\Delta x_0}{S d_1} \cdot \Delta S \right), \quad (5)$$

其中, S 是探针 P 的灵敏度, ΔS 一般在 0.05—0.1% 之间; 许多实验表明, Δx_0 很少超过 0.5mm; 因此, 这些误差可忽略不计。而 $\Delta x_0 / S d_1 \ll 1$, $\Delta S / 2S \ll 1$, 所以由式 (5) 知,

$$H_z \doteq \frac{e_{M_2}}{d_1^2 S}. \quad (6)$$

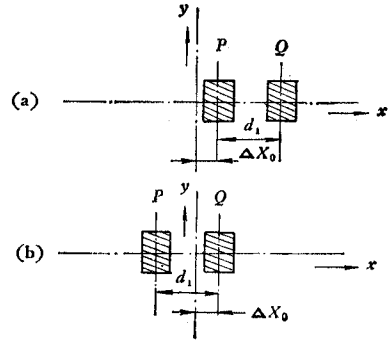


图 6 测量磁场梯度的探针位置
Fig. 6 Probe positions for measuring the field gradient

因为对已经制成的探针小线圈而言, S 和 d_1 均为定值. 所以, e_{M_2} 为 H_2 的量度. 我们可借此测出场参数 H_0 、 H_2 的相对值, 用来衡量该点场强的强弱.

当对角线偏转角大于 50° 时, 必须考虑 H_4 的影响. 为此, 由式 (3) 得知,

$$H_y - H_0 = H_2x^2 + H_4x^4 + \dots \dots \dots$$

因此, 当 $x = d_1$ 时,

$$H_{y_2} - H_0 = e_{M_2}/S \doteq H_2d_1^2 + H_4d_1^4, \quad (7)$$

当 $x = d_2 = Pd_1$ 时,

$$H_{y_4} - H_0 = e_{M_4}/S \doteq H_2d_2^2 + H_4d_2^4. \quad (8)$$

将式 (7)、(8) 联立解得:

$$H_2 = \frac{1}{S} \frac{P^4 e_{M_2} - e_{M_4}}{P^2 d_1^2 (P^2 - 1)}, \quad (9)$$

$$H_4 = \frac{1}{S} \frac{e_{M_4} - P^2 e_{M_2}}{P^2 d_1^4 (P^2 - 1)}, \quad (10)$$

式中, $P = d_2/d_1$. 为方便起见, 我们选 $P = 2$. 由式 (5) 知, 只要分别测出两次测量的平均值 e_{M_2} 及 e_{M_4} , 即可求出 H_2 及 H_4 .

文献 [2] 报道, 当考虑五级近似的 H_4 参数之后, 小角度理论可以定量地适用到对角线偏转角 80° 左右, 因此对一般偏转 90° 管的计算, 尚可基本信赖^[4].

五、点线圈及三探针机构

为了准确地测出偏转线圈空间某点的场强, 要求探针的分辨力好, 因此希望探针线圈的截面积 A 小 (见图 7); 而为了获得足够大的感应信号, 则希望探针线圈有较高的灵敏度, 即单位磁感应强度的电势要大; 所以要求高分辨力和要求高灵敏度是相互矛盾的. 为了解决这个矛盾, 我们采用了圆柱形点线圈结构, 如图 7 所示. 图中 D_1 是线圈内径, D_2 是线圈外径, L 是线圈高度. 根据文献 [5] 测得的小线圈平均磁通密度 B_{av} 与该线圈中点的 B_0 相等, 把磁场在线圈中心展开为台劳级数, 然后求级数各项对线圈产生的磁通链 Φ , 找出圆柱形点线圈应满足的尺寸关系为:

$$\frac{L}{D_2} = \sqrt{\frac{9}{20} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 \right] / \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \right]}. \quad (11)$$

在选定内径 D_1 和外径 D_2 之后, 由式 (11) 即可求出 L . 同样, 选定 D_1 和 L , 即可由式 (11) 求出 D_2 . 这样, 按式 (11) 的几何尺寸关系计算出的线圈就是“点线圈”. 用这样的线圈作“探针”, 所测得的场强, 即代表被测空间某一几何点处的场强值. 这种点线圈既有高灵敏度, 又有高分辨力, 它能准确地给出它中心的磁感应强度.

在实践中, 我们采用的点线圈尺寸是: 内外径比为 0.6, 最佳高度与外径比为 0.72; 用线径为 $25\mu\text{m}$ 的漆包线绕制小线圈, 当绕到外径为 4mm 时, 匝数 N 约为 2000 匝; 因而, 基本上满足了点场测试条件. 这种点线圈经上海计量局鉴定的结果是: 线圈常数 $NA = 145.7$ 匝·厘米². 由于探针线圈的灵敏度 S 与 NA 成正比, 表明它的灵敏度是足够高的.

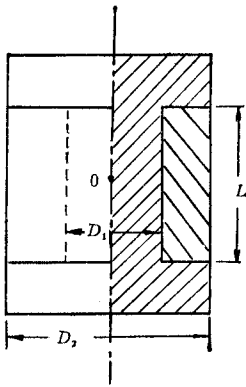


图7 点线圈示意图

Fig. 7 Schematic representation of the point coil

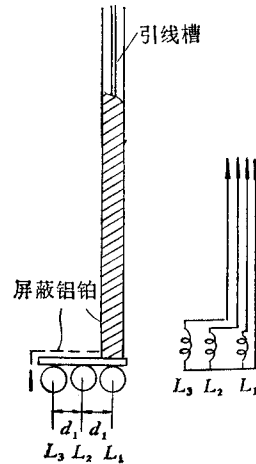


图8 三探针及其接线示意图

Fig. 8 The three-probes and the wiring diagram

许多实验证明^[6], D_1 愈小, 它对 L/D_2 的影响也愈小, 原因是场的非均匀性高次项可以忽略^[5]. 由式 (11) 可见, 当选取 $D_1/D_2 = 0.6$ 时, 将使 $L/D_2 \approx 0.72$, 因此, 既满足了点场最佳条件, 又适当避免了小线圈内径 D_1 太小, 不易机械加工的困难.

我们采用的三探针的结构如图 8 所示. 图中 $d_1 \approx 5\text{mm}$, L_1, L_2, L_3 代表 3 只小线圈. 用在均匀场中测同一点感应电势值来鉴别的办法, 将 3 只点线圈的灵敏度的差别控制在 0.1—0.5% 以下. 用万能工具显微镜测得的 3 只点线圈的实际中心距是 5.021 mm 及 5.001 mm. 这 3 只点线圈与有机玻璃棒的垂直度相差 $15'$ ($1/4^\circ$). 小线圈 L_1 与有机玻璃棒轴线的重合程度相差 0.023mm.

六、测量结果

利用前面介绍的测量装置及测量方法, 下面我们以 H 参数为例, 介绍一下对 19" 环绕线圈的测量结果.

利用图 8 所示的探针机构, 假设 3 只点线圈的灵敏度相同, 测出点线圈 L_1 沿偏转线圈的机械轴线的感应电势分布 $e_0(z)$, 亦即相当于 $H_0(z)$; 再测出点线圈 L_1 与 L_2 的差值电势平均值 $e_{M_2}(z)$ 及 L_1 与 L_3 的差值电势平均值 $e_{M_4}(z)$ (见式 (5)). 由式 (9) 与式 (10) 可算得 $H_2(z)$ 与 $H_4(z)$. 连同 $H_0(z)$ 一起, 画出的曲线如图 9 所示.

同理, 将整个系统旋转 90° 后, 即可测得帧偏转线圈的场参数 $V_0(z)$ 、 $V_2(z)$ 及 $V_4(z)$.

由图 9 可见, $H_0(z)$ 、 $H_2(z)$ 及 $H_4(z)$ 曲线的形状与文献 [2] 中的相似. 这证明了我们所采用的实验装置及实验方法是基本可信的. 尽管造成误差的因素很多, 但由于我们采取了上述种种措施, 使这些误差大大地减小了.

由式 (1) 可知, 要想得出 H_x 、 H_y 、 H_z 的表示式, 除了必须知道 H_0 、 H_2 和 H_4 以外, 还

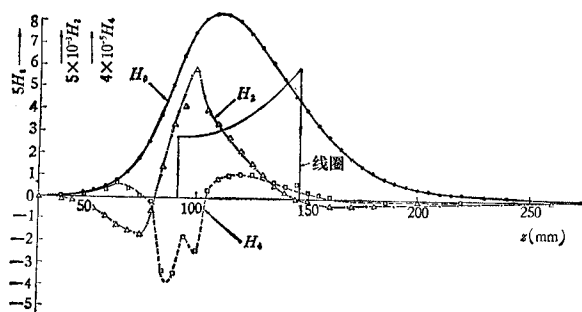


图9 P19-898 偏转线圈的磁场参数曲线

Fig. 9 The field-parameter curves of P19-898 deflection yoke

须由图9求出导数 H_0' 、 H_0'' 、 H_0''' 、 H_0'''' 及 H_2' 、 H_2'' 等, 它们都是 z 的函数. 求出后将它们一并代入式(1), 才可能求出整个 H 磁场的空间分布表示式: $\vec{H} = \vec{i}H_x + \vec{j}H_y + \vec{k}H_z$. 然后才能根据电子在电磁场中运动的规律, 进而求出电子束在偏转场中运动的轨迹^[7-9].

在工作期间, 得到何其生、樊文泉、龚志伟、方飞等同志的多方面的支持和帮助, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] G. Trenkler, Messent-prüfen (Bonn), 8(1972), 705.
- [2] J. Kaashoek, Philips Res. Rept. Suppl., 23(1968), 1.
- [3] R. Vonk, Philips Tech. Rev., 32(1971), 61.
- [4] J. Kaashoek, Mullard Tech. Commun. (GB), 13(1974), 15.
- [5] I. Rezanka, Czech, J. Phys. B, 13(1963), 545.
- [6] R. F. K. Herzog, Rev. Sci. Instr., 24(1953), 1000.
- [7] J. Haantjes and G. J. Lubben, Philips Res. Rept., 12(1957), 46.
- [8] Y. Yokota, IEEE Trans. on CE, CE-25(1979), 91.
- [9] R. A. Bloomsburgh, Sixth Electron beam Symposium, April 28, 1964.

THE MEASUREMENT OF SPACE MAGNETIC FIELD OF TV DEFLECTION YOKE USING A DIFFERENCE INDUCTION METHOD

Zhang Bangying

(Laser Institute, Huazhong Institute of Technology)

In this paper some methods for measuring magnetic fields are described concisely and a comparison between these methods is made. The general theory and experimental method for measuring the TV deflecting magnetic field are given in detail. A practical measuring set up is presented. The curves of the magnetic field parameters $H_0(z)$, $H_2(z)$ and $H_4(z)$ are shown.