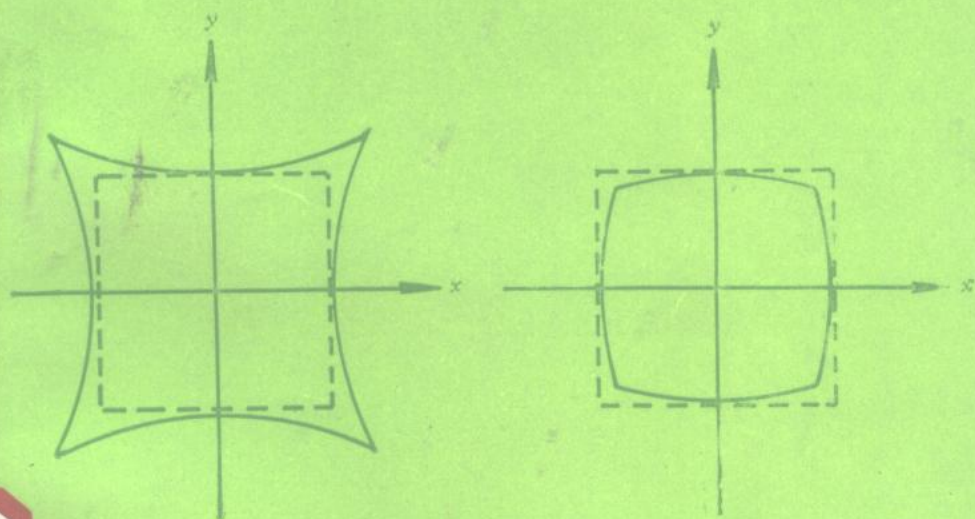


磁偏转线圈设计理论基础

丁守谦 著



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目 (CIP) 数据

磁偏转线圈设计理论基础/丁守谦著. —北京: 国防工业出版社, 1993

ISBN 7-118-01185-1

I. 磁…

I. 丁…

Ⅱ. ①偏转线圈: 磁性-设计 ②磁性: 偏转线圈-设计

Ⅳ. TM552

磁偏转线圈设计理论基础

丁守谦 著

责任编辑: 马征宇

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 毫米

32 开本

印张 6

150 千字

1994 年 5 月第 1 版

1994 年 5 月第 1 次印刷

印数: 0 001—1500 册

ISBN 7-118-01185-1/TN · 187

定价: 7.65 元

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书

承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

序

1985 年及 1988 年机电部通信广播总局及偏转线圈行业协会曾先后委托我校开办过两期偏转线圈设计学习班,由我主讲,这本书就是由我当时所编写的讲义经过改写、扩充而成。学员大都是搞偏转系统的工程技术人员,也有厂长及总工程师等参加,他们有很丰富的经验,但急需在设计理论方面有进一步的提高,因此该讲义的目的在于深入浅出地介绍有关显像管偏转线圈的设计理论以及根据这些理论对黑白及彩色显像管的偏转线圈进行设计的方法。

本书的第一章重点介绍了自会聚彩色显像管及其偏转线圈的发展历史。第二章以有界均匀场作为近似模型介绍有关偏转畸变、散焦等基本概念。第三章介绍偏转线圈磁场的分布,表示场基本特征的场参数的理论计算及测量。第四章介绍偏转像差理论,较详尽地叙述了偏转像差与场参数的关系及光栅图形的关系。第五章介绍黑白显像管及监视器偏转线圈的设计原理。第六章介绍自会聚彩色显像管及其偏转线圈,还着重介绍了偏转线圈在总管设计中所处的重要地位以及密不可分的关系,对新的热点高清晰度电视(HDTV)中的彩色显像管及高清晰度监视器及计算机终端显示器的偏转线圈的设计,也尽可能地作了专门的介绍。

由于偏转场的计算及偏转像差的理论是统一的,因此该书也将适用于摄像管、雷达显示管、电子离子束曝光机、扫描电子显微镜等的偏转系统的设计。根据作者的“电磁偏转系统的统一设计理论”,一旦电偏转的场参数确定后,各像差系数的处理方法及与光栅图的对应关系同磁偏转系统是一致的,故这些原理也适用于电偏转系统的设计。

近年来科学技术发展十分迅速,偏转系统根据不同的设计要求也随时在改变,作者掌握资料有限,加上国内外尚无这方面的专著可资借鉴,书中不少是作者发表过及未发表过的工作,因此如有不足、不妥甚至错误之处尚祈指正。

我的研究生盛夏、肖三良、陈金岳先生以及李凌云小姐将该书稿全部输入到计算机中,便于修改和订正,并协助整理该书,周立伟教授、童林凤教授等对本书的出版作了热心的推荐,特此表示感谢。还应特别感谢电子工业部和偏转线圈行业协会、国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的有关同志,由于他们的鼓励和帮助,该书方能顺利出版。

作 者

1993 年 3 月于南开大学

内 容 简 介

近几年,电子工业部通信广播总局偏转线圈行业协会开办了几期偏转线圈设计学习班,由丁守谦教授主讲,颇受欢迎。本书即由作者在该讲稿的基础上改写而成。本书共分六章:一、绪论;二、电子在有界均匀偏转磁场中的运动;三、偏转线圈的磁场分布;四、偏转像差理论;五、黑白显像管及单色监视器偏转线圈设计原理;六、自会聚彩色显像管及计算机终端显示管偏转线圈设计原理。其中还重点介绍了作者本人发明的测量偏转磁场的新方法及高清晰度电视(HDTV)的有关问题。全书行文精练,开门见山,结合实际,重点突出,针对读者急需解决的偏转线圈设计中的难题,介绍了近年来国内外专家包括作者本人在该领域取得的最新科研成果和工作经验。

本书可供电子光学领域有关科研人员、从事电视整机及偏转线圈设计和生产的工程技术人员和高等学校教师、研究生阅读参考。

目 录

第一章 绪论	1
第二章 电子在有界均匀偏转磁场中的运动	7
§ 2.1 引言	7
§ 2.2 有界均匀磁场的正弦关系式及偏转中心前移公式	8
§ 2.3 偏转散焦	10
§ 2.4 交点轨迹的曲率半径	11
§ 2.5 非线性失真	12
§ 2.6 偏转灵敏度	13
§ 2.7 极限管颈	13
§ 2.8 电子在有界均匀磁场中的运动	14
第三章 偏转线圈的磁场分布	20
§ 3.1 引言	20
§ 3.2 偏转线圈的结构类型	21
3.2.1 鞍环 (ST) 型	21
3.2.2 鞍鞍 (SS) 型	22
3.2.3 环环 (TT) 型	22
§ 3.3 偏转磁场场参数的引入及其物理意义	22
§ 3.4 偏转磁场场参数的理论计算	24
3.4.1 任意直流导线在空间所产生的磁场	24
3.4.2 子午绕线偏转磁场场参数的计算	28
3.4.3 单根平行导线场参数的计算	31
3.4.4 圆弧部分场参数的计算	33
3.4.5 等径马鞍型线圈场参数的计算	36
3.4.6 开口状马鞍型线圈场参数的计算	36
3.4.7 电流导线具有某种分布时场参数的计算	37
3.4.8 $\cos^m \theta$ 型分布的场参数及归一化傅里叶谐波系数	41
3.4.9 有磁环存在时场参数的计算	42
3.4.10 非子午绕线偏转磁场场参数的计算	49

§ 3.5 场参数的测量及双线圈回归法偏转磁场测量仪	52
3.5.1 双线圈回归法测试原理	53
3.5.2 测试步骤与框图	55
3.5.3 由测量数据计算场参数 H_0 、 H_2 、 H_4	57
3.5.4 计算举例	57
§ 3.6 磁位测量及求空间磁场的方法	59
3.6.1 偏转场的傅里叶展开式	59
3.6.2 磁位傅里叶谐波系数的测定	60
3.6.3 空间场求解	61
3.6.4 场参数与谐波系数的关系	62
第四章 偏转像差理论	65
§ 4.1 引言	65
§ 4.2 理想高斯偏转	65
§ 4.3 三级偏转像差及像差系数	68
§ 4.4 三级偏转像差系数与光栅图的关系	71
4.4.1 畸变	71
4.4.2 场曲和像散	72
4.4.3 彗差	77
§ 4.5 常枕桶形场的偏转像差系数	81
§ 4.6 五级偏转像差	85
第五章 黑白显像管及单色监视器偏转线圈设计原理	89
§ 5.1 引言	89
§ 5.2 球面屏对畸变和像散的校正量	89
§ 5.3 偏转磁场的等效均匀场处理	91
§ 5.4 暗角余量的确定	94
§ 5.5 对固定偏转角所需安匝数的近似计算	96
§ 5.6 偏转线圈电感的近似计算	98
§ 5.7 偏转功率及偏转功率指数	100
5.7.1 行偏转线圈	101
5.7.2 帧偏转线圈	101
§ 5.8 光栅畸变的磁棒及磁片校正法	102
§ 5.9 单色监视器偏转线圈的设计考虑及校正	103

第六章 自会聚彩色显像管及计算机终端显示管

偏转线圈设计原理	107
§ 6.1 引言	107
§ 6.2 自会聚彩色显像管及自会聚偏转线圈发展的历史背景	107
§ 6.3 自会聚原理, 一字型排列枪及单枪三束彩色显像管	111
§ 6.4 自会聚彩色显像管及偏转线圈的结构形式	113
§ 6.5 自会聚偏转线圈设计原理	123
§ 6.6 权函数及自会聚偏转场的总体设计	134
§ 6.7 非子午绕线及冷轧硅钢臂对东西向枕形畸变的校正	136
§ 6.8 梯勒玛效应及其校正	137
§ 6.9 由高级像差所产生的会聚误差及光栅畸变	140
§ 6.10 偏转线圈的调整及场形修正	143
§ 6.11 偏转线圈与彩色显像管及整机设计的关系	146
§ 6.12 高清晰度电视及计算机终端显示用彩色显像管 和偏转线圈	152
6.12.1 高清晰度电视及高清晰度显示	152
6.12.2 高分辨率枪	154
6.12.3 各种消像散枪	157
6.12.4 阴极	165
6.12.5 高清晰度偏转线圈的设计考虑	166
§ 6.13 超高清晰度彩色监视器及数字会聚校正系统	171
参考文献	175

第一章 绪 论

各类电子束显示器件如黑白或单色显像管、摄像管、雷达显示管、扫描电子显微镜等，都是借助偏转线圈使一个电子束在荧光屏上作全屏面扫描，根据接收信号的强弱来调制该电子束的束流强弱，从而得出相应的画面。对彩色显像管或彩色监视器而言，则采用三个电子束，由偏转线圈使其作全屏面扫描，根据三束电子分别接受的红、绿、蓝三种信号的强弱，从而得出彩色画面。

要得到一幅无畸变且清晰的优良图像或是彩色逼真的画面，主要取决于两个要素：一个是由电子枪所发出的电子束经电透镜或磁透镜聚焦后，电子束本身应足够细，这样打在屏上的光点才会足够小，且应有足够的能量（包括束流及加速电压两个方面）才能得到足够的亮度；另一要素，则决定于偏转系统设计的好坏，因经偏转扫描后，电子束本身散焦，使光点变粗，同时使光栅发生畸变。如果是彩色显像管，它的三个电子束起初是会聚在一起，穿过荫罩孔（或缝）后，分别打在相应的荧光粉点（或粉条）上，但经偏转后，每个电子束除将发生上述的散焦及畸变外，还不再会聚在荫罩孔上，因而不能准确地打到相应的粉点（或粉条）上，致使色纯及清晰度均受到破坏。这种由于偏转而引起的图像失真，我们统称为偏转像差，它将随着偏转角增大而增大。故要使边缘部分的图像质量和中心部分一致，主要决定于偏转系统的好坏。

近年来，日本、西欧及美国等，已先后研制成一种高清晰度彩色电视（HDTV）系统，它可以与电影相媲美，屏面的宽高比由原来的 4:3 改为 16:9，扫描行数提高一倍左右（日本的为 1125 行，每秒 60 帧画面；西欧的为 1250 行，每秒 50 帧）。这样图像的分色点更多，将增加 4~5 倍，光点将更细，从而对电子枪及偏转系统提出更严格的要求，希望偏转系统的偏转像差越小越好。

一般对电视用显像管包括高清晰度彩管边缘部分的清晰度的要求可适当地降低,因电视观众的注意力主要集中在中心部分。但自 70 年代开始,随着微型计算机的兴起,作为其终端显示器的高清晰度显示管,则希望全屏面的清晰度处处一致,这样才能满足对文字和图形的要求。这对偏转线圈提出更为苛刻的要求,扫描行数还将增多,扫描频率由原有的 15.625kHz,最高已增至 128kHz。这将对偏转系统的设计又提出新的问题。

此外,随着大规模及超大规模集成电路的发展,在制作光刻模板或直接在硅芯片上进行掩膜光刻时,因受到光波波长的限制,采用光线光学的方法已无能为力,于是转用电子束甚至用离子束来曝光,因它们的波长可比光波低几个数量级。目前对形成一个亚微米量级的电子束斑已无原则性的困难,但由于偏转系统方面的许多问题一时难以解决,致使扫描一般只能达到 $2 \times 2\text{mm}^2$ 或 $4 \times 4\text{mm}^2$ 以内,而要想达到 $50 \times 50\text{mm}^2$ 或以上的大面积集成电路块,无一例外地都是利用高精密机械微动台,并用激光定位。这样每曝光完 $2 \times 2\text{mm}^2$ 面积后,用上述激光定位台,移动该大面积硅片到下一个 $2 \times 2\text{mm}^2$ 面积的位置再曝光,反复多次,直至曝光完整个面积为止。这不仅降低了生产效率,且靠机械运动一般难以准确,进行电学连接也很困难,该工作台还十分昂贵,每台高达数十万美元。如果能设计出高性能的偏转系统,使扫描面积达 $50 \times 50\text{mm}^2$ 或更高,而边缘的线宽也能达到亚微米量级,并使畸变也很小,这就可以不需要价格昂贵的激光定位台,而直接得到集成度很高、面积很大的大规模集成电路板,而且效率将大为提高。这无疑是一个十分有诱惑力的课题,目前国内外都在积极进行这方面的工作。

其他如雷达显示管、扫描电子显微镜、高清晰度摄像管等,要提高它们的性能,均需有良好的电磁偏转系统。所有这些均要求对偏转像差的理论及场分布的知识有深刻的了解。

对偏转像差的研究至今已有 50 余年的历史,它比电子光学的诞生约晚 10 年。电子显微镜的发明人之一诺尔 (M. Knoll) 就是

最早的研究者之一，而在这一方面的牢固理论基础则由电子光学的奠基人布什 (H. Bush)、格拉塞 (W. Glaser)、谢尔赤 (O. Scherzer) 建立，以后通过不同的途径建立了所谓的三级偏转像差理论。这些代表人物中，还有温特 (Wendt) 和赫特 (Hutter) 等，并有大量试验证明该理论的正确性。

相对地说偏转系统的研究略慢于电磁透镜的研究，因后者属于旋转轴对称系统，对称轴上磁场的分布及其微商就可以用来表示旁轴区的成像性质。但对于偏转系统，由于它不具有旋转轴对称性，因此研究起来比较复杂，但仔细考察其场分布，发现仍有一个对称平面及一个反对称平面存在，因此近轴区的性质也可用不多的几个函数表示。不过除需要知道中心轴上的场分布及各级微商的分布外，尚需知道沿垂直于中心轴的方向的场的变化率，这些分布函数就是所谓“场参数”，由它及相应的微商可表示轴附近的性质。由于问题复杂，故其理论的发展晚于旋转轴对称电子光学系统。

50 年代初，由于受彩色显像管的发明的影响，荷兰飞利浦公司的汉杰斯及卢本 (Haantjes and Lubben) 仔细地研究了线圈的几何形状和场参数的关系，并得出了由单根平行导线构成的偏转磁场的场参数 H_0 、 H_2 的解析表达式，在该文中还研究了 H_0 、 H_2 与三级像差系数的关系以及消除各种像差的途径，为自会聚彩色显像管的诞生奠定了理论基础。

1968 年卡索克 (J. Kaashoek) 的长篇论文在偏转像差理论方面作了系统的总结。他首先对单根导线形成的喇叭状马鞍型线圈运用毕奥-沙伐定律直接用数值积分法给出求场参数 H_0 、 H_2 、 H_4 的公式，并对圆弧部分的场参数给出了解析表达式，还首次给出了在自由入射条件下（即入射处无磁场）求算全部三级像差及五级畸变和像散像差系数的公式，并首次提出了用试验测定场参数的方法。

自 1980 年开始，我们导出了入射处及出射处均有磁场存在时的磁偏转三级偏转像差系数及五级像差系数的公式^[7,11]，不但使

公式更普遍,而且通过一些数学处理使公式显得比以前更紧凑、简洁。我们还建立了扫描波形与三级及五级偏转像差的定量关系^[14],接着还导出了具有简单几何结构的线圈的场参数 H_0 、 H_2 、 H_4 的解析表达式。而且当导线是连续分布时,通过傅里叶谐波分析,求得各次谐波的傅里叶谐波系数后可以很容易地转换为导线具有连续分布时求场参数的公式^[2],并针对具有 $\cos^m \theta$ 型分布的马鞍型线圈找出了幂次 m 与各级像差系数的对应关系,从而得出消像散条件,以及使畸变及像差为零时的值^[12,13]。新近又已解决了在有磁环及导磁片同时存在的情况下求算空间场及场参数的方法^[44],绕线分布可以是子午的也可以是非子午的。采用傅里叶谐波分析方法,可利用单根导线的分布求场参数的公式中方便地过渡到具有连续分布求场参数的公式。

对较复杂的线圈,或者既复杂又有磁环存在的线圈,我们研制了“双线圈回归法偏转磁场测量仪及其软件”^[6,64],可直接用测量方法得出较准确的场参数 H_0 、 H_2 、 H_4 的数值,并通过微型计算机可计算出高斯轨迹及斜率、16个三级偏转像差系数及相应的像差几何参量、针对水平一列式枪的全部五级偏转像差及相应的像差几何参量和权函数等。

在国内尚有何国柱对大偏转角系统的研究^[17],西门纪业及李钰等对复合场系统的研究^[18,41],周立伟等建立了较完整的曲轴电子光学^[42],这些均可用来解决大偏转角问题。童林凤等研究了超大偏转角问题^[43],沈庆垓等^[19,20]在有磁环情况下偏转场的计算,朱协卿^[21]对用于电子束曝光机中磁偏转系统的研究,此外尚有不少很有价值的研究工作不能一一列举。

1986年荷兰奥赛伦(A. Osseyran)^[26]的长篇文章论述了有关偏转系统的设计方法,也可以从所附参考文献中查阅到在1986年以前所发表过的有关论文。这以后又有许多作者针对高清晰度电视用彩色显像管及其偏转线圈和高清晰度监视器及其偏转线圈发表了一些研究工作,这在相应的章节中将提到。

所有这些都大大丰富了磁偏转系统的研究内容,并提高了设

计具有良好性能的偏转系统的能力。

本文的目的在于深入浅出地介绍有关偏转系统设计的理论基础及如何根据这些理论对黑白显像管及自会聚彩色显像管的偏转系统进行设计的方法。为便于理解,先用均匀场的初步近似模型介绍有关偏转畸变、散焦、偏转中心前移、偏转灵敏度、极限管颈等基本概念,并采用初等数学导出有关的一些公式,接着介绍偏转线圈内磁场的真实分布状况以及如何用场参数 $H_0(z)$ 、 $H_2(z)$ 、 $H_4(z)$ 来表示空间场的性质,解释这些场参数的物理意义、理论计算方法及实验测量方法。

当空间磁场确定了之后,根据电磁折射率及费马最短光程原理或直接从洛伦兹力的关系及牛顿运动方程,即可以确定电子轨迹。可以证明当偏转量不大时,具有最理想的偏转性质,此称高斯偏转。当偏转量逐渐增大时,实际的偏转与理想的高斯偏转的偏差叫作“偏转像差”。在偏转角不太大的情况下,可利用三级偏转像差来描绘,包括畸变,场曲和像散、彗差等,它们使图像发生畸变,并使清晰度降低,色纯受到破坏。既然空间偏转磁场可用场参数来表征,于是就可以建立场参数与偏转像差之间的直接关系,利用 $H_0(z)$ 、 $H_2(z)$ 即可表示它们与三级偏转像差的关系,利用 $H_0(z)$ 、 $H_2(z)$ 、 $H_4(z)$ 即可表示它们与五级偏转像差的关系。前者可精确地用于 70° 偏转,并可定性地预言 90° 偏转的一些性质,后者可定量地用于 90° 偏转,并可定性地预言 110° 偏转的一些性质。自会聚彩色显像管及其偏转线圈的发明,就是直接利用这些理论的结果。

场参数与像差系数的关系式是相当复杂的,尤其是五级像差。因此这里重点考虑三级偏转像差。根据三级偏转像差系数的公式,阐明了自会聚彩色显像管的设计原理,以及根据需要,如何使某些像差系数为零或趋于最小的方法,以提高图像质量。为便于掌握,还介绍了当场参数 H_0 、 H_2 均为常数的理想情况下偏转像差系数的表示式,这时均已变成十分简单的公式。对五级偏转像差也作了些扼要的介绍。文中还介绍了将偏转场作钟形场近似处理

的方法，因它也能和均匀场一样，可以给出具有解析表达式的高斯轨迹、高斯斜率及确定偏转中心的公式。这些对以后确定黑白及彩色显像管的暗角余量、偏转中心、偏转前移量的位置以及在自会聚彩色显像管中如何确定校正透镜及曝光光源的位置时有用。

在最后两章中就是用上述一些基本理论对黑白及彩色显像管偏转线圈的设计进行了考虑，在第五章的黑白偏转线圈设计中所遇到的一些问题例如暗角余量的确定，所需要匝数的近似计算，电感量、偏转功率、偏转功率指数的近似计算，光栅畸变的局部校正等，对彩色显像管偏转线圈同样是适用的。第六章则对自会聚彩色偏转线圈的设计所遇到的一些特殊要求如自会聚对场分布的要求，彗差的校正，非子午绕线及冷轧硅钢臂对东西向枕形畸变的校正，梯勒玛（Trilemma）现象的解释及校正，海鸥型畸变、绿束下垂、B形或S形失会聚的成因及校正，二、四、六极场对三束原始位置的校正及相对位置的调整均作了定性及定量的说明，还讨论了偏转线圈设计在自会聚彩色显像管主体设计思想中所处的地位，以及它与电子枪设计和校正透镜设计的一些关系。在清晰彩管中介绍如何用像散枪来校正自会聚场所产生的光点像散，从而提高清晰度。

以上虽然是以显像管的磁偏转系统作为重点来介绍，但这样一些基本理论，特别是场参数及偏转像差的理论对其他一些磁偏转系统如摄像管、雷达显示管、电子（或离子）束曝光机、扫描电子显微镜的磁偏转系统均有用，故有其普遍意义。

还可以通过作者的“电磁偏转系统的统一设计理论”^[45]将电偏转的场参数求出，其像差系数的种类及其与光栅图的关系就完全一样了。限于篇幅，这里不能一一介绍。