

高等学校交流讲义

自动远动电器

第二分册

磁性元件

清华大学电磁自动装置教研组编



中国工业出版社

高等学校交流讲义



自动远动电器

第二分册

磁性元件

清华大学电磁自动装置教研组编

中国工业出版社

全书共分十章，主要叙述磁放大器的工作原理、分类、结构、应用及设计方法。

本书可作为高等学校电机与电器专业电器专门化〔磁性元件〕课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

此书是由清华大学电磁自动装置教研组编写的。

自动远动电器

第二分册

磁性元件

清华大学电磁自动装置教研组编

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $11 \frac{1}{4}$ ·字数247,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数00,001—43,537·定价(10-6)1.35元

统一书号: 15165·630(—机—118)

目次

前言	5	第七节	多級磁放大器的过渡过程	63
緒論	7	第八节	实验方法测定磁放大器的过渡过程 時間	65
一 磁性元件的种类	7	第九节	提高磁放大器动作速度(减少時間 常数)的基本方法	66
二 磁性元件的应用及在我国的发展	7	附录		63
三 磁性元件发展中的某些問題	8	第五章	磁放大器的鉄磁材料与結構	69
第一章 磁放大器的理論基础	10	第一节	磁性元件中所应用的鉄磁材料	69
第一节 磁放大器及飽和电抗器的基本工作 原理	10	第二节	影响磁放大器鉄芯材料性能的因素	72
第二节 理想磁放大器的分析	14	第三节	磁放大器鉄芯冲片及影响鉄性能結 构因素	78
第三节 理想磁放大器的特性与参数	19	第四节	磁放大器的鉄芯結構与繞組布置	82
第四节 实际磁放大器特性	22	第六章	磁放大器的設計与計算	85
第五节 图解分析法决定磁放大器的特性	24	第一节	概述	85
第二章 有反饋的磁放大器	27	第二节	用图解分析法决定单拍磁放大器鉄 芯的最小体积	90
第一节 概述	27	第三节	飽和电抗器及无反饋磁放大器的工 程近似設計方法	94
第二节 具有外反饋的磁放大器	27	第四节	有反饋磁放大器設計的主要問題	99
第三节 具有內反饋的磁放大器	30	第五节	环形磁放大器鉄芯几何尺寸的 确定	102
第四节 有反饋磁放大器特性的位移	31	第六节	有反饋的环形磁放大器的工程近似 計算方法(經驗法設計)	106
第五节 反饋系数的改变及調节	33	第七节	相似法設計磁放大器	111
第六节 半导体整流器对磁放大器特性的 影响	34	第八节	双拍磁放大器鉄芯体积确定	115
第七节 反饋迴路中电感值对磁放大器特性 的影响	37	第七章	无触点磁继电器	118
第八节 有反饋磁放大器特性的穩定問題	38	第一节	磁继电器的工作原理	118
第三章 双拍磁放大器	40	第二节	无触点磁继电器的应用	120
第一节 概述	40	第三节	磁继电器的主要特性参数	122
第二节 具有交流输出的双拍磁放大器	40	第四节	磁继电器的过渡过程時間	125
第三节 有直流(整流)输出的双拍磁放大器	42	第五节	負載为触点电器电磁繞圈时磁继电 器設計的主要問題	127
第四节 提高双拍磁放大器零点穩定性的基 本方法	46	第八章	快速磁放大器	131
第五节 双拍磁放大器特性的調整	48	第一节	概述	131
第六节 双拍磁放大器的应用举例	49	第二节	用交流訊号控制的理想半波快速磁 放大器的工作原理	134
第四章 磁放大器的过渡过程	51	第三节	負載为純电阻时的单拍理想快速磁 放大器穩定工作过程分析	137
第一节 概述	51	第四节	单拍理想快速磁放大器的特性及参 数計算	141
第二节 无反饋磁放大器的時間常数	52			
第三节 有反饋磁放大器的時間常数	55			
第四节 有几个控制繞組及有短路綫圈时的 磁放大器時間常数	56			
第五节 磁放大器輸出为电阻負載及电感性 負載的过渡过程方程式	59			
第六节 磁放大器过渡过程時間計算	61			

第五节	实际的快速半波磁放大器.....	144	延时元件.....	163
第六节	可逆的(双拍)快速磁放大器线路...	146	第五节	无触点逻辑元件发展的一些问题...
第七节	快速磁放大器的设计计算.....	148	第十章	单拍磁放大器的试验与调整...
第九章	磁性无触点逻辑元件	157	附录一	TVM系列环形磁放大器.....
第一节	概述.....	157	附录二	我国目前工业生产的磁放大器
第二节	用快速磁放大器组成的“和”元件		技术数据	173
	与“或”元件.....	158	附录三	几种合金材料的交直流同时磁
第三节	用快速磁放大器组成的[否]元件...	161	化曲线族	173
第四节	用快速磁放大器组成的记忆元件与		参考文献.....	180

前 言

本书是根据 1959 年为本校电机与电器专业电器专门化学生开设的磁性元件课程的试用讲义改写的。1961 年 4 月电机与电器专业教材评选会议，确定采用并改写这本讲义作为电机与电器专业，电器专门化自动远动电器课程的第二部分（磁性元件）的交流讲义。

改写的时候根据本校在教学实践和生产实践中所得到的一些经验，并参考了三年来国内外在本门课程的科学技术方面所取得的成就，在若干章节上作了相应的补充和修改。

对于电器专门化学生来说，学习本课程时，应当掌握的主要问题是磁性元件的基本理论和物理过程，各种磁性元件的线路及其应用，磁性元件的结构和设计方法，磁性元件中某些专门问题（如过渡过程的特点及其计算研究方法，磁性元件工作特性的稳定性问题，提高磁性元件灵敏度的方法等）作进一步深入的了解等等。

因此根据这些要求，本书分为十章编写。前四章叙述磁放大器的基本理论，主要线路，静态和动态特性及参数。这一部分目前在有的学校中放在电器的理论与计算基础一课程内讲授，但本书在某些问题上作了进一步分析和讨论，某些部分较电器学中的内容更为详细和深入。在电器学中已经学过基本理论部分的学生，可以利用这部分材料作为学习本课程时复习、巩固的材料，并补充和提高对某些基本问题的认识。

第五、第六章主要叙述磁放大器的制造和设计方法，其中一部分材料利用过去大跃进的三年中在磁放大器和饱和电抗器的生产和研究工作中的总结和成就。有些设计问题和计算方法则对磁继电器和快速磁放大器说是共同的。

考虑到磁继电器和磁放大器虽然原理、线路与结构相同，但是特性和应用却有很大差别，在某些问题（如磁继电器的过渡过程）上有其特殊性，因此将磁继电器的基本工作原理及静态特性和动态特性等问题单独列入第七章进行系统的叙述。一般情况下，磁继电器的设计方法与磁放大器有类似之处，在本章设计方法一节中，主要讨论特殊负载下工作的磁继电器的设计方法。

第八章、第九章是快速磁放大器及应用它所组成的无触点逻辑元件，除了叙述快速磁放大器的原理、特性和线路以外，并补充了快速磁放大器的设计方法。由于快速磁放大器仅仅是在内反馈磁放大器线路上发展的，因此在本章中，企图从一般内反馈磁放大器工作原理及其惯性较大的原因，来分析快速磁放大器快速性的特点和原因。

第十章根据我们在生产中的调整经验，以环形内反馈磁放大器为例，简要地叙述了使用单拍磁放大器时的试验与调整方法。某些问题也可以作为磁放大器生产过程中的检查试验方法。

为了帮助读者进一步了解具体磁放大器的特性与技术数据，在书末附有苏联及我国生产的环形磁放大器系列产品特性及数据，并附有几种合金材料（环形铁芯）的交直流同时磁化曲线图，以供设计计算时参考。

在许多问题上，例如带有电感性负载直流输出的磁放大器设计问题，高灵敏度磁放大器的设计问题，以及某些磁性元件的物理本质（基本概念）问题等等，由于缺乏生产实践和教学实践的经验，在本书中没有叙述或讨论得不很深入，我们希望广大的读者，能对这些

問題進行討論和研究，以期在以後再版時，能夠補充本書在這方面的不足。

此外，自動運動電器中所包括的磁性元件的種類是很多的，目前在工業中應用得比較廣泛的是根據同時有直流與交流激磁作用原理所構成的磁性元件。其中最基本的是磁放大器、飽和電抗器及磁繼電器等。我校1959年以前，這部分內容主要在電器理論基礎課（電器學）內講授，並在自動電壓調節器一課內，結合磁放大器電壓調節器，講授磁放大器設計方法。考慮到磁放大器實踐及理論的發展已有可能和必要形成一門獨立的課程，而過去分散在各課中的講授方式及講授內容已不能滿足本專門化學生的學習要求，因此，自1959年起，我們試行開設獨立的「磁性元件」課程，在於使本專門化學生通過本課程的學習，掌握磁放大器的基本原理及工程計算方法。至於利用與這種元件相似的原理所製成的其它設備，如磁調製器、磁變頻器及直流量測設備以及利用磁放大器所組成的各種成套控制與調節裝置（如各種自動調節器、電壓穩定器等），則不包括在本課程內，磁放大器在某些技術領域中的應用（如用飽和電抗器和磁放大器的調速系統，用磁放大器組成的勵磁調節系統及頻率調節器等）則放在相應的課程中講授。

顯然，作為自動運動電器課程的一部分——「磁性元件」，僅包括以磁放大器為主的內容是不夠的，也就是本課程的內容、範圍、體系等尚未定型，從發展需要看，應如何補充和提高尚待大家研究和討論。例如運動裝置及計算裝置用磁性元件，利用鐵磁共振原理或磁致伸縮原理的磁性元件是否應當列入本課程，以及是否要補充磁調製器、磁變頻器等元件的理論與設計問題等等，希望大家本着百花齊放，百家爭鳴的方針，充分廣泛地發表意見。

此外，本書也還有不足之處。改寫本書時，主要根據的講義是講課提綱性質，敘述比較簡略，而補充增加的部分有些還缺乏教學實踐的經驗。因此希望各校在試用本書後，將教學效果和教學實踐的經驗，以及與本課程教學方法有關的問題能告訴我們，以便今後補充修改，我們誠懇地希望廣大讀者對本書缺點提出批評和意見，寄交清華大學電磁自動裝置教研組。

緒 論

磁的非綫性現象大約在九十年前即已發現。利用磁的非綫性，从廿世紀初叶起，人們創制出各种元件和綫路，使工程技术和科学理論在一个新的領域内得到蓬勃发展。

自动和远动技术的发展，需要大量堅固可靠、性能优良、而且能滿足系統工作要求的各种自动化元件，如量測元件、发送器、遙控遙測裝置元件、放大元件、执行元件、邏輯控制元件及計算裝置元件等等。其中应用最多的除了有触点电器以外，还有电子管离子管元件、微电机、半导体元件和磁性元件等。

现在磁性元件在自动調节、自动控制与自动檢查等系統中已經成为重要的技术工具，而且应用愈来愈广泛。磁性元件与半导体元件的結合，成为自动化技术中最有发展前途的元件之一，因为磁性元件和半导体元件都是寿命长而且堅固的元件，可以有較大的过载，可以在振动和冲击条件下工作，无須經常的維護等。因此与有触点电器、电子管或电机元件等并行发展成为自动系統中主要元件之一。

一、磁性元件的种类

作为新技术之一的磁性元件包括的范围是較广的，这里有飽和电抗器、磁放大器、无触点磁继电器、磁触发器、无触点行程开关、无触点磁性邏輯元件、利用电容与非綫性电感产生鉄磁共振現象的鉄磁穩压器、数字计算机及无触点远动裝置中应用的各种磁元件（如磁头、磁鼓、磁薄膜等記憶裝置、磁芯計数器、磁芯分配器等），以及其它各种利用电磁的非綫性現象构成的各种元件（如磁倍頻器、磁調制器、脉冲变压器及量測直流高压大电流的量測裝置等）。

本书主要叙述利用鉄芯中同时有直流与交流激磁的各种物理現象所构成的磁性元件，如飽和电抗器、磁放大器、磁继电器及磁性邏輯元件等等。这些都是最基本的磁性元件，目前在工业中应用最广泛并逐漸成为主要的自动控制裝置和設備。

二、磁性元件的应用及在我国的发展

在生产过程自动化中，应用磁性元件組成的电磁自动裝置是最广泛最普遍的一种，它在自动技术装备中占有重要地位。

飽和电抗器是电磁自动裝置中最簡單、发展和应用最早的一种功率元件，它是調节系統中的执行元件，可以用来調节和控制大功率設備和綫路。我国早在解放初期即已应用飽和电抗器来調节午台灯光，其后随着工业的发展，飽和电抗器在我国工业中的应用愈来愈广泛。最近三年以来已經制成了应用飽和电抗器的各种控制和調节綫路，如大功率飽和电抗器式穩压裝置，控制异步机用的三相飽和电抗器調速裝置，用飽和电抗器作为电热設備的自动調温裝置及汞弧整流器栅极控制用移相裝置等。

磁放大器（电流、电压和功率放大器）作为放大元件在自动調节、自动控制和随动系統中得到較广泛的应用。它可以完成各种不同的职能，例如将各种发送器輸出的微弱訊号預先放大，将直流訊号变成低頻訊号以便利用电子管放大器和半导体放大器进一步放大，将来自各处的不同訊号（最多可达10~20个訊号）进行綜合和比較、控制随动系統和执

行机构等等。

磁放大器在我国工业中的应用和发展也已取得了重大的成就。例如在第一个五年计划期间,已经开始研究和试制应用磁放大器的同步发电机自动励磁调节装置和电力系统自动频率调节装置,对我国电站建设起了很大作用。最近正进一步研究和制造应用磁放大器的快速自动调节励磁装置。在冶金企业中早已应用了以磁放大器调速的成套自动装置。在机械制造工业中磁放大器的应用有了进一步的发展。1958年以后我国成批生产了环形、Π形等功率自1.5瓦到1000瓦的三种系列磁放大器,对我国工业中进一步研究和推广磁放大器的应用有重大的作用。

有交直流激磁的磁性元件,在一定条件下输出量是跳跃变化的,这时元件的输入-输出关系具有继电器特性。采用不同的线路方案可以得到自动控制用无触点电压继电器、时间继电器、极化继电器。应用磁性无触点继电器作为电力系统保护用元件在我国也已研究成功。

值得注意的是,过去认为磁放大器的主要弱点即动作时惯性较大的问题已经在很大程度上得到解决。实际上现在已经能够做到过渡过程为几毫秒的快速动作磁放大器。1951年以后出现了一种放大系数较低快速半波磁放大器线路,它的动作时间只有0.5~1个电源周期,而且动作时间几乎是固定的,不受其它条件的影响。应用这种线路作为随动系统中可逆调速装置的放大元件和直接控制汞弧整流器的栅极回路在苏联已经试验成功。我国在这些方面的研究也正在开展,并取得了一定成绩。

利用磁放大器或磁继电器的特性,并与半导体整流器结合,可以做成各种按一定程序要求动作的无触点磁性逻辑元件。国内外对于这种元件的研究都给予很大的重视。三年来我国各地先后试制成功各种磁性无触点逻辑元件,并开始应用到工业控制系统中去,使自动控制系统向少触点化方向发展,并使整个系统工作更为可靠。

三、磁性元件发展中的某些问题

由于磁性元件在自动、远动装置及新技术领域中占有重要地位,磁性元件的科学技术现在正在继续蓬勃发展。磁性元件本身正在迅速改进,它的应用范围也在不断扩大。

近年来国内外都非常重视磁性元件研究工作的发展,其中包括磁性元件工作时所发生的物理过程和工作的理论基础,磁性元件的动态、静态特性和设计计算方法,以及应用磁性元件的线路和系统的计算方法等。应当指出,磁放大器和电子管放大器及晶体管放大器的性能是相互补充的,因此在线路中不同性质的放大器联合应用可以得到更满意的结果。

磁性元件的发展在很大程度上决定于磁性材料和半导体整流器的发展。材料性能的改进和材料制造工业发展的重大成就在很大程度上促使磁性元件的特性得到改善,并扩大了它的应用范围。应当注意到工艺和结构方面的改进可以更好地更充分地利用材料磁性能。越是灵敏的磁性元件在材料和工艺方面的要求也越高。因此研究和制造磁性元件特别是灵敏度极高、快速动作的磁性元件,应当对高导磁的铁磁合金(具有矩形磁滞回线的磁性材料)及其制造和处理工艺、对半导体整流器的特性(硒、锗、硅)给予特别的重视和注意。

应当指出,磁性元件性能的改进与提高和应用磁性元件的电磁自动装置和系统的设计、研究是在生产过程自动化中推广应用和发展磁性元件的二个重要方面。自动控制系统

的結構組成和設計對磁性元件的工作特性有很大的影響，反過來磁性元件的發展可以大大促進自動控制系統的革新。只有掌握了磁性元件的靜態與動態特性（輸出功率、控制或放大特性、靈敏度、動作快速性等）才能正確合理地根據功率大小、能源、可靠性和準確度等要求來比較和選擇磁性元件以組成系統，才能更全面、更深入地分析系統的靜態與動態特性，才能了解影響系統工作可靠性、穩定性以及系統設計經濟性的各種可能因素以及改進系統性能的必要措施。

另外一方面，磁性元件的設計必須根據系統要求來進行。必須從滿足系統工作要求出發來確定元件設計的原始參數。在一般情況下可以從磁性元件的系列產品中進行選擇，但是在許多情況下，需要根據不同系統要求，對磁性元件設計進行不同的方案比較，而且在元件設計具體方法上也常常因系統而異。例如一種負載性質的磁性元件設計方法常常不適用於另一種負載性質的磁性元件。因此磁性元件的設計、研究和改進不應當也不能夠脫離系統孤立地進行。

此外磁性元件的標準化和系列化仍然是磁性元件發展方面的重要工作。沒有系列產品，則使元件設計工作及生產準備工作繁雜、重複，磁性元件難於推廣，產品質量也不能改進和提高。因此在一般情況下沒有必要針對每個具體條件來計算和製造特殊的磁性元件。在進行系列產品的設計和製造時，常常需要從經濟觀點出發求得得到最佳參數或最佳幾何尺寸的条件，使磁性元件的體積最小、重量最輕或成本最低等。但是即使這樣，設計典型和標準的系列產品仍然要從系統工作要求出發，使得尽可能滿足最廣泛的系統要求。而且只有在系統中應用得愈廣泛，元件系列化工作才能進行得更完善。

磁性元件系列化的工作內容是多方面的，其中包括鐵芯沖片和模具的標準化和系列化，環形鐵芯幾何尺寸關係的標準化和系列化，磁放大器和飽和電抗器的標準化和系列化等等。目前國外在制訂磁性元件系列產品方面已做了許多工作，我國在這方面的工作也已開始。

第一章 磁放大器的理論基础

第一节 磁放大器及飽和电抗器的基本工作原理

磁放大器的工作特点是鉄芯中有两个不同頻率的磁場在同时作用。其中一个随着电源頻率变化而变化，另一个則随控制訊号的頻率变化而变化（大多数情况下控制訊号頻率为零，即訊号为直流）。

因此研究磁放大器内部的物理过程实质上就是要研究在同时有两种不同頻率的磁場作用下（或一般情况下，同时有直流及交流激磁磁場作用下）鉄磁材料内所发生的物理过程。

現在研究一个鉄芯在沒有直流磁感应分量和具有直流磁感应分量时其磁場强度的改变。如图 1-1，鉄芯上有两个繞組，一为交流繞阻，由交流电源电压 $u_{\sim}$ 供电，另一为控制繞組，由直流輸入訊号 u_y 供电。

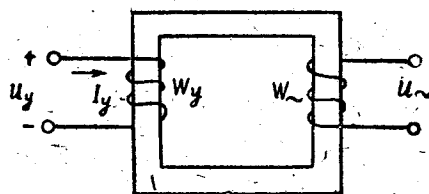


图 1-1

为了分析简单起见作以下几个假定：

1. 忽略綫圈内电阻压降，并认为鉄芯中交流磁通是正弦的；
2. 不考虑磁性材料的磁滞效应；
3. 鉄芯中沒有漏磁；
4. 忽略鉄芯中的損失。

图 1-2 中表示出鉄芯磁化曲綫 MON 和磁感应变化曲綫。图中 a 为曲綫 $B = B_m \sin \omega t$ (当

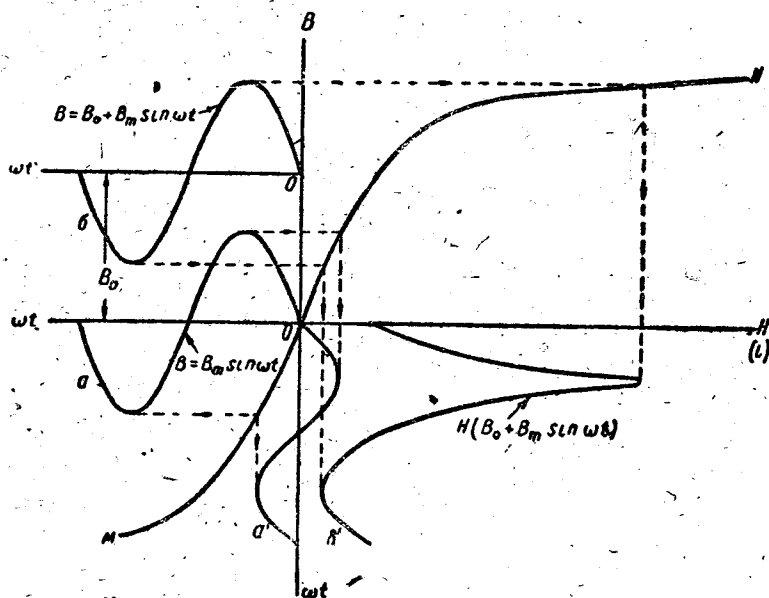


图 1-2

$I_p = 0$, 即沒有直流磁感应分量情况下的交流磁感应变化曲线), 图中 6 为曲线 $B = B_0 + B_m \sin \omega t$ (当有直流讯号后, 具有直流磁感应分量 B_0 情况下铁芯中的磁感应变化曲线)。相应的磁场强度变化曲线 a' 及 b' 可从磁化曲线上求得。

从图 1-2 中可看出, 当有直流磁感应分量 B_0 时, 则磁场交流分量增加, 因而交流回路中电流增加, 这个现象就是磁放大器的物理基础。

若直流磁感应 $B_0 = 0$ (或激磁磁场 $H_p = 0$) 时, 交流磁场 H_m 的幅值 (亦即交流电流幅值) 显见与导磁率 μ 有关, 如 μ 越高, 即磁化曲线越陡, 则电流愈小。

由于磁化曲线的非线性, 即使线圈上所加电压为正弦, 线圈内电流也不按正弦规律改变。为了计算方便, 这个电流常用等值正弦电流有效值 I_s 表示, 而等值正弦磁场强度幅值 H_{sm} 为:

$$H_{sm} = \frac{W\sqrt{2} I_s}{l} \text{ (安/厘米)} \quad (1-1)$$

式中 l 为铁芯平均磁路长度 (厘米), W 为线圈匝数。

线圈的等值电感阻抗为:

$$\omega L_s = \frac{u}{I_s} \text{ (欧)} \quad (1-2)$$

$$u = 4.44 W S B_m \cdot 10^{-8} \text{ (伏)}; \quad (1-3)$$

而式中 S 为铁芯截面积 (厘米²);

B_m 为铁芯内磁感应幅值 (高斯);

f 为电源频率。

于是交流线圈的等值电感为:

$$L_s = \frac{W^2 S}{l \cdot 10^8} \cdot \frac{B_m}{H_{sm}} = \frac{W^2 S}{l \cdot 10^8} \mu_s \quad (1-4)$$

式中 μ_s 为有效导磁率, 高斯·厘米/安。

在有直流激磁磁场 H_0 作用时, 铁芯导磁率 μ_s 减小, 亦即等值电感 L_s 减小。

图 1-3 表示 342 硅钢片 (厚 0.35 毫米) 在有直流磁场 H_0 时的导磁率特性 $\mu_s = f(B_m, H_0)$ 。

(电源电压为正弦, $f = 50$ 赫, 铁芯为 III25 型三柱冲片叠成)。

由此可见, 当直流激磁磁场作用时, 铁芯导磁率 μ 发生变化, 直流激磁磁场 H_0 越大, 则 μ_s 越小。如图 1-4 所示 $\mu_s = f(H_0)$, 曲线对称于纵轴, 因无论 H_0 为正或负, 只要 H_0 越大, 总使铁芯更趋于饱和, 故 μ_s 减小。交流绕组电感 L 与 μ 成正比, 故若直流激磁磁场 H_0 越大, 则交流绕组感抗越小, 如图 1-5 所示为 $L = f(H_0)$ 。

在铁磁饱和原理的基础上, 利用改变直流激磁来控制交流绕组的感抗, 从而改变交流回路的参数, 这种元件称为磁控扼流圈或磁控饱和电抗器。

当交流绕组感抗随直流磁场 H_0 增大而减小时, 交流回路内电流增大。因此在铁磁饱和原理基础上, 用一个较小的直流电流的改变即可控制交流绕组内较大电流的改变, 起了一个放大器的作用, 这种元件称为磁放大器。磁放大器中负载阻抗与交流绕组串联, 输入量 (一个小的讯号电压、电流或功率) 作用在直流控制绕组上, 则负载阻抗上即可得到较大的输出电压、电流或功率, 因此磁放大器可以分别做成电压、电流或功率放大器。

必须注意, 磁放大器工作的本质只是一个输入讯号加在控制绕组上, 通过铁芯导磁率

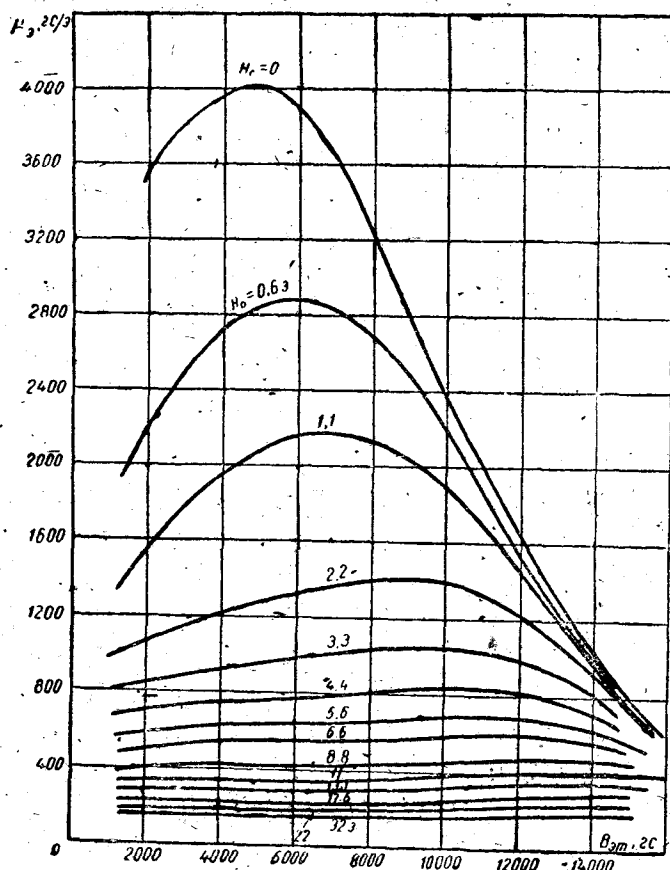


图 1-3

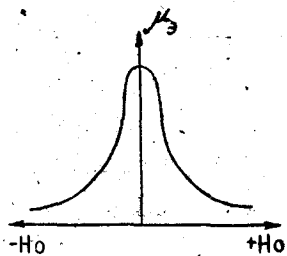


图 1-4

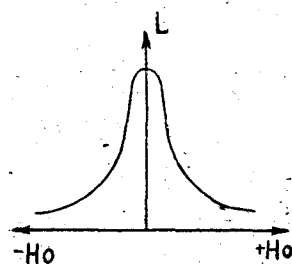


图 1-5

的改变从而改变交流迴路的参量，而并不是在能量上将訊号放大。磁放大器负载工作时所需的能量直接由交流电源供给，也即磁放大器实质上是一个磁控制器。磁放大器的输出——输入特性即 $I_{\sim} = f(I_y)$ 如图 1-6 所示， $I_{\sim}$ 表示交流迴路中的电流， I_y 表示控制迴路中的电流。

实际磁放大器中常应用两个铁芯（环形或矩形的）组成，如图 1-7。因若只用一个铁芯，则在控制绕组中感应交流电势，而使输入讯号发生畸变，因而不能准确地反映输入讯号。同时由于有感应电势，将使 $I_y = 0$ 时， $I_{\sim}$ 增加，一般说来这对工作不利。因此为了避

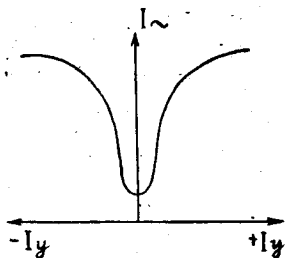


图 1-6

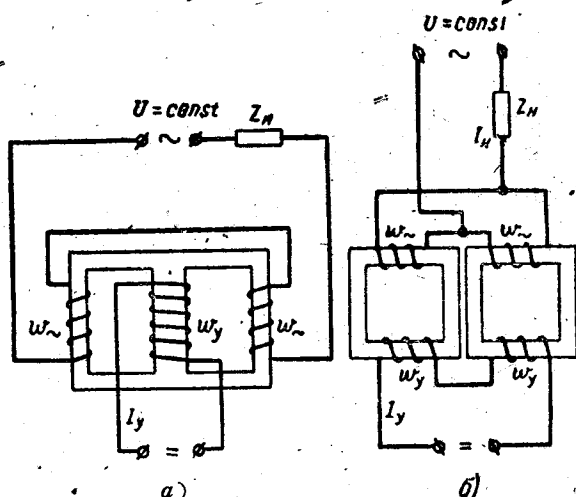


图1-7 具有两个铁芯的单拍磁放大器典型线路:

a—交流绕组串联交流输出; b—交流绕组并联交流输出。

免在控制绕组中产生感应电势, 实际磁放大器常由两个铁芯组成, 且其绕组的接法应使在控制绕组中避免产生 (或减少) 感应电势。

在交流绕组串联的线路中 (图1-7 a), 为避免在控制绕组中产生感应电势, 把两控制绕组串联反接。但在这种线路中, 交流电势的奇次谐波在控制绕组中是互相抵消了, 但交流电势的偶次谐波却并未抵消, 因此在控制绕组内仍然有偶次谐波的感应电势产生, 如果偶次谐波电流在控制绕组内得以流通, 则它的作用相当于增强了直流激磁磁场。如在控制回路中串联较大的电阻, 则可抑制偶次谐波感应电流的流通。因此在分析和研究这种线路的磁放大器时, 必须考虑控制绕组内偶次谐波的作用。

在交流绕组并联的线路中 (图1-7 b), 则控制绕组内无论奇次谐波或偶次谐波的感应电势均不会产生, 因此直流控制绕组不必串联反接。

现在分析一下交流绕组并联的磁放大器的作用原理。

若铁芯中已有直流磁通 Φ_0 , 交流磁通为 $\Phi_{\sim}$, 由于 Φ_0 与 $\Phi_{\sim}$ 在一铁芯中为同向, 而在另一铁芯中为反向, 因此铁芯 I、II 中的合成磁通便不相等,

令 Φ_I, Φ_{II} 为铁芯 I、II 中的合成磁通, 则:

$$\Phi_I = \Phi_0 - \Phi_{\sim}; \quad (1-5)$$

$$\Phi_{II} = \Phi_0 + \Phi_{\sim}. \quad (1-6)$$

直流控制线圈感应出的交流电压

$$u_{y\sim} = w_y \left(\frac{d\Phi_I}{dt} - \frac{d\Phi_{II}}{dt} \right). \quad (1-7)$$

由于交流线圈并联的原因, 二个铁芯中流过的交流磁通的大小与波形都一致, 因此直流控制线圈两端感应出的交流电压应为零, 但是交流线圈并联的结果, 增加了磁放大器的惯性, 因此实际上交流线圈串联的线路应用较多。

磁放大器也可以用一个三柱铁芯组成, 图 1-8 a 及 1-8 b 分别表示交流绕组并联及串联线路。

这时直流控制绕组放在中间柱上, 交流绕组则布置在旁边两柱上, 磁通的直流分量由

中柱分向两侧流通，而交流磁通则不流入中间柱，因此在直流控制绕组内不会感应基波电势，但是在三柱磁放大器中由于中间柱没有交流磁通，铁芯材料的磁滞作用有较大影响。

1-9 表示三柱磁放大器与两个二柱铁芯的磁放大器特性比较，在二柱铁芯中讯号增加与减少时特性基本重合（特性A），而在三柱铁芯中由于磁滞作用，讯号增加或减少对特性是不同的（特性B）。

图1-8中的磁放大器输出均为交流，要得到直流输出的磁放大器，则应经过整流器整流。

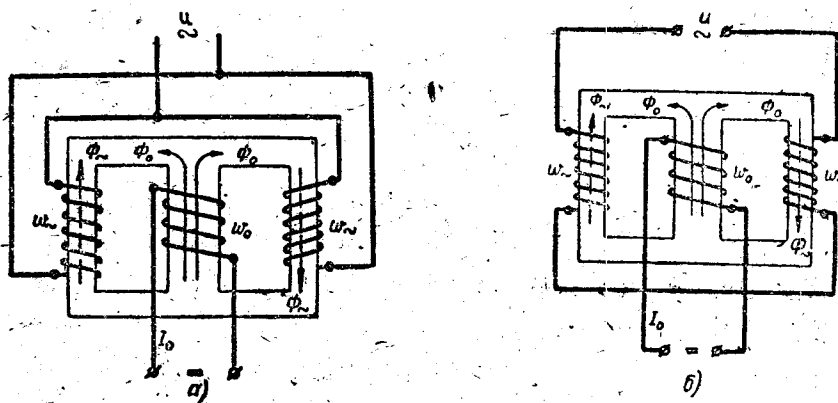


图1-8 三柱铁芯的磁放大器：

a—并联交流绕组；b—串联交流绕组。

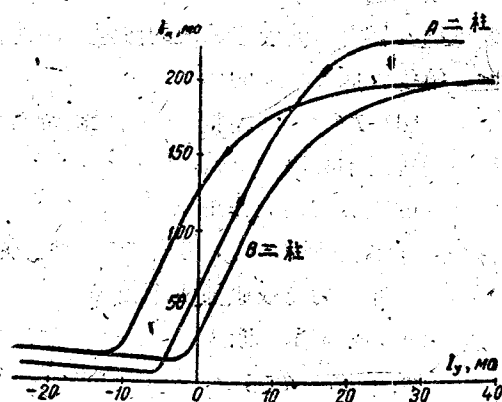


图1-9 铁芯材料为坡莫合金具有正反馈的磁放大器的特性。

第二节 理想磁放大器的分析

为了进一步研究磁放大器的物理过程，常将磁放大器理想化以后来进行分析，通过这些分析可以进一步掌握磁放大器各种参数的相互关系及其特性。

所谓理想磁放大器是指磁放大器的铁芯具有理想的磁化曲线（如图1-10a），而整流器也是理想的（图1-10b为另一种理想磁特性，假设 $B < B_s$ 时， $\mu = \mu_1$ ）。

理想磁化曲线是指当铁芯中磁通密度小于饱和磁通密度 B_s 时，所需要的磁场强度 H 很小，趋近于0，导磁系数 $\mu = \infty$ 。而当磁通密度等于 B_s 时，导磁系数为0，许多铁镍合金

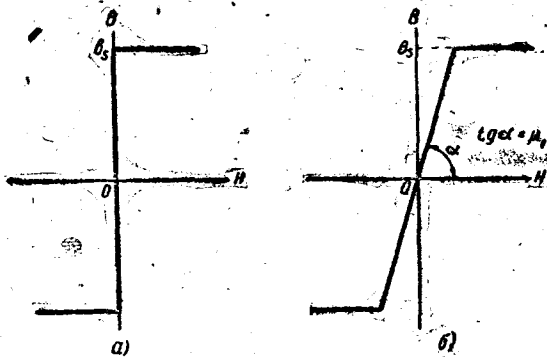


图 1-10

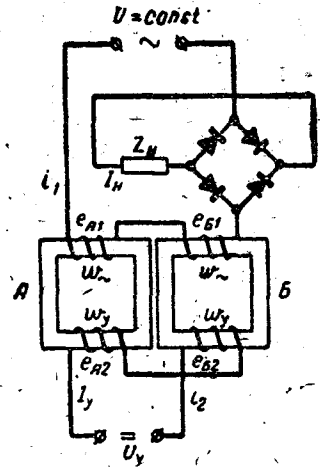


图 1-11

的基本磁化曲线比较接近于理想情况。

理想整流器即指整流器反向电阻为无穷大，正向电阻为常数。

为了使分析简单起见，作了以下几个假定：

1. 直流控制迴路的总电阻 $r_p = 0$ ，并忽略控制迴路内的感应电势；
2. 交流电源电压的波形是正弦的， $u_{\sim} = U_m \sin \omega t$ ，而且 $U_m \leq 2\omega W_{\sim} S B_s \cdot 10^{-8}$ ；
3. 铁芯没有漏磁，并忽略铁芯损耗。

分析时所采用的磁放大器线路如图1-11， R 包括 R_H ，整流器电阻 R_B 及交流绕组电阻 $R_{\sim}$ 。

W_y 内感应电势

$$e_2 = e_{A2} + e_{B2} = -W_y S \cdot 10^{-8} \left(\frac{dB_A}{dt} - \frac{dB_B}{dt} \right) = 0 \quad (1-8)$$

积分后得：

$$B_A = B_B + 2B_0 \quad (1-9)$$

没有直流讯号时 $B_A = B_B = -B_m \cos \omega t$ ，

$$B_m = \frac{U_m \cdot 10^8}{2\omega W_{\sim} S} \leq B_s \quad (1-10)$$

有直流讯号时，在铁芯 A 中产生正磁场，铁芯 B 中产生负磁场。

由于交流电压及交流磁通是周期性交变变化的，因此我们只要研究一个周期 $(0 \sim 2\pi)$ 间的变化情况即可。

我们可以把一个周期分成四个阶段来研究：

- ① 铁芯 A 、 B 均未饱和， $0 < \omega t < \alpha_1$ ；
- ② 铁芯 A 饱和，铁芯 B 未饱和， $\alpha_1 < \omega t < \pi$ ；
- ③ 铁芯 A 、 B 均未饱和， $-\pi < \omega t < \pi + \alpha_1$ ；
- ④ 铁芯 B 饱和，铁芯 A 未饱和， $\pi + \alpha_1 < \omega t < 2\pi$ 。

当 $\omega t = \alpha_1$ 时，铁芯 A 内磁通密度 B_A 到达饱和值 B_s ， α_1 称为饱和角（见图1-12）。

这四个阶段又可归纳为两种情况：① 两个铁芯均未饱和，② 一个铁芯饱和，另一个铁芯未饱和。现在分别讨论这两种情况：

1) 两个铁芯均未饱和

根据理想磁化曲线(图1-10)可知, 当 $B < B_s$ 时, $H = 0$ 。因此可以认为在这种情况下负载电流为 0, 交流电压全部加在交流线圈两端, 负载两端的电压 u_R 为 0。

2) 一个铁芯饱和, 另一个铁芯未饱和

$\omega t = \alpha_1$ 时, 若铁芯 A 已经饱和而铁芯 B 还未饱和, 则 $B_A = B_s = \text{常数}$, 磁通不发生变化, 铁芯 A 交流绕组两端的感应电势为 0。若交流绕组的电阻 $R_{\sim} = 0$, 则不管负载电流多大, 铁芯 A 交流绕组的电压降为 0。

同时铁芯 B 中, 磁通也保持常数 $B_B = B_A - 2B_0 = B_s - 2B_0$, 故交流绕组电压降也为 0, 全部电源电压加在电阻上, α_1 称为饱和角。

磁放大器电路及磁路基本方程可用以下公式表示:

$$B_A = B_{\sim} + B_0; \quad (1-11)$$

$$B_B = B_{\sim} - B_0; \quad (1-12)$$

$$H_A = \frac{i_{\sim} W_{\sim} + i_y W_y}{l}; \quad (1-13)$$

$$H_B = \frac{i_{\sim} W_{\sim} - i_y W_y}{l}。 \quad (1-14)$$

交流回路方程式:

$$u_{\sim} = i_{\sim} R_{\sim} + \left(\frac{dB_A}{dt} + \frac{dB_B}{dt} \right) W_{\sim} S \times 10^{-8}。 \quad (1-15)$$

直流回路方程式: 交流分量相等得

$$\left(\frac{dB_A}{dt} - \frac{dB_B}{dt} \right) W_y S \times 10^{-8} = 0,$$

即

$$\frac{dB_A}{dt} = \frac{dB_B}{dt}。 \quad (1-16)$$

直流分量相等得

$$u_y = I_y R_y。 \quad (1-17)$$

由 (1-13), (1-14) 解之可得:

$$i_{\sim} = \frac{l}{2W_{\sim}} (H_A + H_B); \quad (1-18)$$

$$i_y = \frac{l}{2W_y} (H_A - H_B)。 \quad (1-19)$$

将 (1-18), (1-16) 代入 (1-15) 则得

$$u_{\sim} = \frac{l R_{\sim}}{2W_{\sim}} (H_A + H_B) + 2W_{\sim} S \frac{dB_B}{dt} \times 10^{-8}。 \quad (1-20)$$

现在的任务在于求出 B_A 、 B_B 、 $i_{\sim}$ 、 i_y 、 u_H 等对时间的变化率, 则可求得各参数间的关系。

现在把一个周波分成四个阶段来分析:

1) 第一阶段: 铁芯 A 、 B 均未饱和即 $|B_A| < B_s$, $|B_B| < B_s$ 。此段时间取 $0 < \omega t < \alpha_1$ (α_1 待定)。

根据所假定的理想磁化曲线, 此时 $H_A = 0$; $H_B = 0$ 。

即得

$$i_{\sim} = 0; \quad (1-21)$$

$$i_y = 0。 \quad (1-22)$$