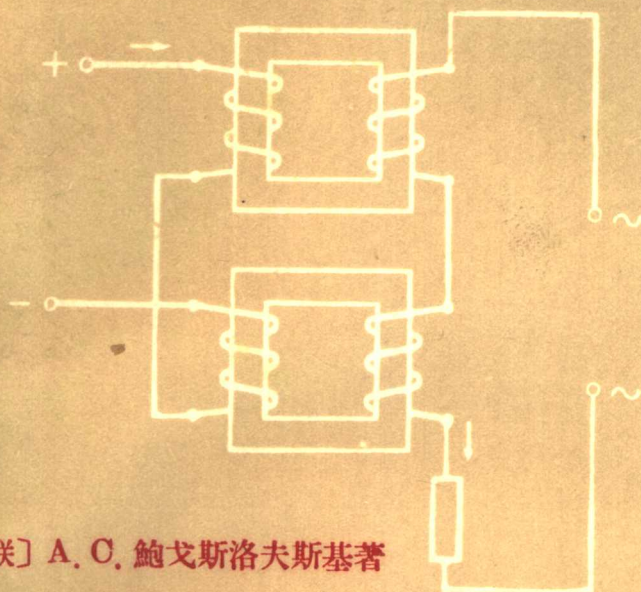




[苏联] A. C. 鮑戈斯洛夫斯基著

磁 放 大 器

磁 放 大 器

〔苏联〕A. C. 鮑戈斯洛夫斯基著

阮 玉 譯



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

这本小册子以通俗的形式闡述了磁放大器的
工作原理，并介紹了磁放大器的一些最常用綫路及其
典型的应用实例。

本书对运用自动装置的技术人員可作为自学参
考书，有助于其掌握磁放大器的工作原理和装置結
构，从而正确地使用它；也可供对自动装置感兴趣的
讀者参考。

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

【苏联】А. С. Богословский

ВОЕНИЗДАТ 1962

★
磁 放 大 器

阮 玉 譯

★
国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

第一二零一工厂印装

内部发行

★
787×1092 $1/32$ 印張 2 $11/16$ 56 千字

1965 年 8 月第一版 1965 年 8 月第一次印刷 印数：0,001—7,700册

統一书号：15034·946 定价：（科六）0.35元

目 录

序言	5
第一章 磁放大器的基本概念	7
§ 1. 磁放大器的作用原理、基本特性和参数	7
§ 2. 最简单的磁放大器线路工作的分析	15
§ 3. 控制回路的工作状态	22
§ 4. 磁放大器的动态特性	25
第二章 磁放大器的线路	26
§ 5. 单拍磁放大器	29
§ 6. 双拍磁放大器	35
§ 7. 具有直流输出的磁放大器	41
§ 8. 具有反馈的磁放大器	44
§ 9. 具有反馈的差动磁放大器	55
§ 10. 多级磁放大器	61
§ 11. 三相磁放大器	64
第三章 磁放大器的结构	67
§ 12. 铁磁材料	67
§ 13. 铁心	71
§ 14. 绕组	74
第四章 磁放大器的应用	78
§ 15. 控制电动机	78
§ 16. 调节发电机的激磁	81
§ 17. 船舶自动控制系统中的磁放大器	84
参考文献	86

序 言

随着科学技术的进步以及国民經济各工业部門的飞速发展，要求在生产过程中大規模地实现自动化，以減輕人們的劳动，加速生产过程。在軍事上，自动化也具有重大的意义，因为它可以提高武器的战斗力和减少維護人員，所以对武器的自动化問題也应給予足够的注意。

在自动化的任务中，通常包含着一些能量受另一些能量控制的問題，这个問題可借助于在自动装置中称为函数变换器的專門装置来解决。当被控能量的功率大于控制功率时，函数变换器就称为放大器。放大器是按能量的形式来分类的，例如，可分为机械放大器、热放大器和电气放大器。

在自动装置中，电气放大器得到了最广泛的应用，它用来借助电流或电压控制电能接受器的功率。控制电压通常称为控制信号，它加在放大器的輸入端，放大器的輸出端和負載相联。由于放大器的輸出功率（接受器功率）大于輸入功率（控制信号功率），所以为了使放大器工作就必须有輔助能源。电气放大器的任务是准确地按控制信号的变化調节由电源供給負載的能量。

电气放大器按作用原理可分为电子（电子管和半导体）放大器、磁放大器和电机放大机。本书所研究的是磁放大器，它較其他类型的电气放大器具有如下的优点：在强烈振动和冲击下工作可靠、寿命长、維護非常簡單。

結構簡單，沒有活動部分和滑動觸頭，因而沒有容易磨損的零件，所以完全不需要對磁放大器進行維護；又因為在允許運行的時間內，它的特性高度穩定，若干年內維護人員幾乎不必進行任何校驗，所以使用磁放大器是非常經濟和有效的。

磁放大器的優越性還在於它能獲得高的放大系數，既可放大弱電流，也可放大低電壓。而且，它還能非常簡單地解決自動裝置中的一個重要任務：幾個控制信號的相加。

磁放大器的缺點是具有慣性，在這方面不及電子放大器。

第一章

磁放大器的基本概念

§ 1 磁放大器的作用原理、基本特性和参数

磁放大器的作用原理是基于在直流磁化时，具有铁心的电抗线圈的电感发生变化。

这一原理可用最简单的磁放大器线路（图 1 a）来说明。放大器由负载 z 与带铁心的电抗线圈 L 串联而成，并接到交流电源上。假定电源电压的有效值 U_n 不变，那末在交流回路中的电流 I 由这两个元件的阻抗决定，所以改变线圈的阻抗，就可以使负载电流变化，像普通的可调变阻器一样（图 1 b）。

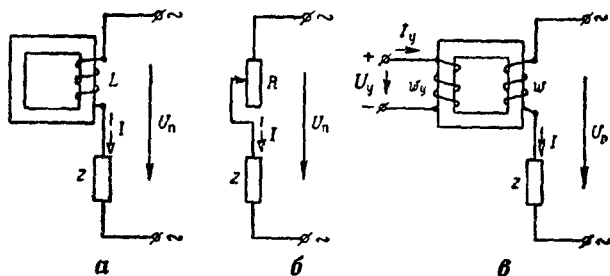


图 1 磁放大器作用原理的图解线路。

当使用变阻器时，为了改变它的阻抗，必须使滑块作机械位移。而当应用带铁心的电抗线圈时，完全可用电的方法

使它的阻抗发生变化。为此，在鉄心上除基本繞組 w 外（图 1 σ ），还应放置第二个繞組 w_y ，并通以直流电流 I_y 使鉄心磁化。

鋼的導磁率受电流 I_y 亦即磁化程度的影响，所以綫圈电感和它的交流感抗也受电流 I_y 的影响。磁化电流愈大，綫圈感抗愈小，因而負載电流愈大；相反，当磁化电流减小时，綫圈感抗增大，从而使負載上的交流电流减小。当沒有磁化电流时，負載电流达到最小值。这样一来，直流磁化电流的任何改变，就会引起負載上交流电流的相应变化。因此磁放大器的作用原理也就是利用一个电路里的电流控制另一个电路的电流，从而控制其功率。

在所研究的綫路中，直流磁化电流 I_y 称为控制电流，控制电流流过的回路称为控制回路，繞組 w_y 称为控制繞組。而加在放大器控制回路上的电压 U_y 称为控制信号或輸入信号。磁放大器的被控回路称为工作回路，而交流电流 I 与繞組 w 称为放大器的工作电流和工作繞組。

图 1 σ 所示的最简单的綫路，沒有得到广泛的应用，因为它在运行上具有一个严重的缺点：当电抗綫圈的工作繞組中流过交流电流时，在控制繞組中将感应交变电势。这种具有两个繞組的电抗綫圈，其工作就好像一个变压器。在控制回路中交流电流的出現，就会使上述的綫圈感抗与磁化电流的关系发生畸变，从而破坏磁放大器的工作。为了避免这一点，通常用两个相同的电抗綫圈 L_1 和 L_2 串联（图 2 a ）来代替一个电抗綫圈。它們的控制繞組反向串联，以使工作电流在其中所感应的电势方向相反，互相抵消。在这种情况下，电抗綫圈的工作就不同于变压器了。

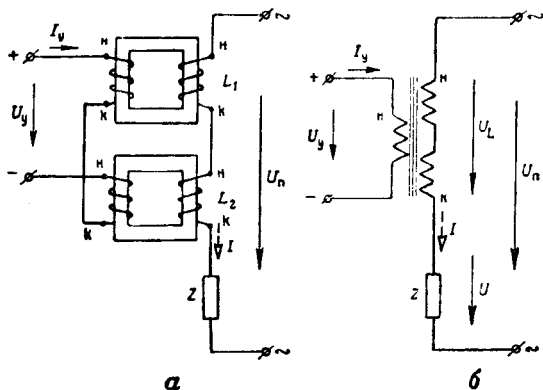


图2 最简单的磁放大器线路。

这一对电抗线圈就称为饱和扼流圈，或称控制器。它的工作回路与一个电抗线圈一样，可用上述工作原理来解释。这里不用顾虑在控制器中铁心磁化方向相反，即一个铁心向一边磁化（对于工作绕组），而第二个铁心向另一边磁化的问题。因为线圈电感的减少取决于直流电流对铁心的磁化程度，而与它的方向无关。

当绘制较复杂的磁放大器线路时，控制器可简化，即用一个控制绕组代替两个反向串联的控制绕组（图2b）。

控制特性 电气放大器的基本任务是用一个电路的工作状态控制另一个电路的工作状态。所以磁放大器最重要的特性，是在电源电压 U_n 和负载阻抗不变的条件下，工作电流 I 与控制电流 I_y 的关系。这个关系称为控制特性，如图3所示。图中横座标表示不同的控制电流值，纵座标表示工作电流值。

图3所示的三条特性中，最合适的是线性特性（图中实

綫)。具有这种綫性特性的磁放大器，在任何一个控制电流下，都能严格地保持控制电流增量与工作电流增量之间的比例关系。

在非綫性特性中（图中虚綫），由于特性曲綫的弯曲，就破坏了控制电流增量与工作电流增量之间的比例关系，这将給放大器的使用带来不便。因此設計时常力图获得綫性的控制特性，或使磁放大器工作在特性接近于綫性的段上。

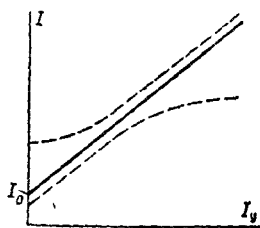


图3 磁放大器的控制特性。

初始电流 最简单的磁放大器綫路的特征是具有初始电流 I_0 （图3），即沒有控制信号时的負載电流。初始电流有一确定的值，它由沒有直流磁化时綫圈的感抗决定。要使初始电流为零是不可能的，因为綫圈电感不可能为无限大。这样，我們所研究的磁放大器綫路，只能在最小值 I_0 到某个最大值 I_K 的确定范围内实现对工作电流的控制。以及称 I_K 为极限工作电流值。因为最简单的磁放大器綫路工作电流不可能为零，所以只有采用較复杂的綫路。

控制倍数 极限工作电流 I_K 与初始电流 I_0 的比值，称为磁放大器的控制倍数，或称倍数系数：

$$n = \frac{I_K}{I_0} \quad (1)$$

例如，若磁放大器的工作电流在 0.1 安到 1 安范围内变化，則这个放大器的控制倍数 $n = 10$ 。

效率 在个别情况下，主要是对功率磁放大器，人們感兴趣的是它的效率，也就是負載功率 P 与电源供給放大器的

功率 P_{H} 的比值:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{H}}} \quad (2)$$

磁放大器的特点是有較高的效率, 在功率裝置中, 可達到 90~95%。

灵敏度界限 磁放大器的灵敏度, 或者更准确地說, 磁放大器的灵敏度界限, 也是磁放大器的基本特性之一。它由能引起放大器工作电流有規律变化的最小控制信号功率所决定。

实际上, 在不同的外界条件, 如周圍环境溫度、外部磁場等的作用下, 放大器特性的不稳定性, 即放大器的不稳定性, 对灵敏度界限有很大的影响。由于外界条件的变化, 引起了放大器工作状态的某些改变, 特别是工作电流的改变。此外, 当电源电压或頻率偏离額定值时, 也会使工作电流发生变化。所有这些使得工作电流的微弱变化, 不能正确地反映輸入信号, 因为这些变化可能是外部原因所引起的。显然, 在上述这些情况下, 为了保証磁放大器正常工作, 必須有足够大的輸入信号, 这个信号所引起的工作电流的改变, 要显著地超过由于不稳定現象所引起的偏差。这个信号就决定了放大器的灵敏度界限。

适当地設計磁放大器, 就可得到很低的灵敏度界限, 例如, 可达 10^{-16} 瓦。

放大系数 在磁放大器一系列的重要指标中, 最有代表性的是功率放大系数:

$$k = \frac{P}{P_y}, \quad (3)$$

式中 P —— 輸出功率；

P_y —— 控制功率。

放大器的放大系数不是常数，当放大器的工作状态改变时，放大系数多半也变化。因此在提到某一放大系数的大小时，必須指出放大器相应的工作状态。在特殊情况下，我們对放大器特性的初始部分，亦即在弱控制信号作用下的放大系数感到兴趣。可是在大多数情况下，放大系数是在最大磁化状态下来确定的。这时，控制功率和輸出功率均达到最大值，这个值在放大器的說明书中指出。

在最大磁化时，放大器的輸出功率 P_k ，亦即在放大器极限工作状态时負載所获得的功率，可用下式表示：

$$P_k = U_k I_k \approx U_n I_k, \quad (4)$$

因为在最大磁化状态时，控制器工作繞組的感抗很小，負載电压 U_k 几乎等于电源电压 U_n 。当沒有磁化时，即在初始状态，負載电压較小，电源电压几乎全部加在控制器上。在这种情况下，如果忽略工作繞組的电阻，則可写成：

$$U_n \approx U_{L0} = I_0 x_{L0}, \quad (5)$$

式中 U_{L0} 和 x_{L0} —— 在初始状态时，控制器上的电压和工作繞組的感抗。

公式(5)中的初始电流 I_0 ，可用最大值 I_k 除以控制倍数 n 代入，則电源电压等于

$$U_n \approx I_k \frac{x_{L0}}{n}. \quad (6)$$

把所得的 U_n 值代入公式(4)得：

$$P_k \approx U_n I_k \approx I_k^2 \frac{x_{L0}}{n}.$$

放大器最終状态的控制功率 $P_{y.k}$, 可由下式决定:

$$P_{y.k} = I_{y.k}^2 R_y, \quad (7)$$

式中 R_y ——放大器控制繞組的直流电阻。

那末, 在最終状态下, 放大器的功率放大系数, 可用下式决定:

$$k = \frac{P_k}{P_{y.k}} \approx \frac{I_k^2}{I_{y.k}^2} \cdot \frac{x_{L0}}{R_y} \cdot \frac{1}{n}. \quad (8)$$

为了明显地看出此式的意义, 我們假定控制器工作繞組的匝数 w 和控制繞組的匝数 w_y 相等。在这种情况下公式 (8) 就可以簡化, 因为在最終状态时, 工作繞組与控制繞組的磁动势 (安匝) 近似相等, 所以电流的比值 $I_k/I_{y.k}$ 等于 1。

这样, 工作繞組和控制繞組匝数相等的磁放大器的放大系数为:

$$k = \frac{P_k}{P_{y.k}} \approx \frac{x_{L0}}{R_y} \cdot \frac{1}{n}, \quad (9)$$

亦即在本例中, 当控制倍数 n 确定后, 放大系数就由繞組感抗的初始值与其直流电阻的比来决定。又因为鉄心綫圈的交流感抗, 一般远大于它本身的直流电阻, 因此, 要获得被控功率与控制功率之比值大于 1, 并不困难。

用直流电流使鉄心磁化时, 在控制回路中的能量就只需克服直流磁化繞組不大的直流电阻, 而通过工作繞組較大的感抗来实现对交流工作回路的能量的控制, 其結果就产生了功率放大的作用。

由放大系数的表示式 (9), 可以得出几个重要的結論。

第一, 很明显, 为了获得高的放大系数, 应采用优质鉄磁材料, 即具有高导磁率的合金制成的鉄心, 因为它可使控

制器在初始状态时的感抗 x_{L0} 获得較大的数值。

第二，当电感 L 給定后，綫圈感抗等于

$$x_L = \omega L \approx 2\pi fL, \quad (10)$$

由上式可以看出，功率放大系数与放大器工作回路电源的频率成正比。換句話說，为了获得高的放大系数，在其他条件相同的情况下，应该采用高于 50 赫芝（工业频率）的频率。例如，有的放大器工作频率为 400、500、1000 赫芝，有时甚至更高。

最后，为了提高放大系数，必须尽可能地减小放大器控制繞組的电阻 R_y 。采用較粗的导綫作控制繞組，可以达到这个要求；它的截面积要比从允許溫升角度选取的变压器繞組的导綫截面积大許多倍。

这里必須說明，通过减小控制回路的电阻来提高放大系数的可能性不仅受到装置结构的限制（增大了放大器的体积），而且降低电阻 R_y 会恶化放大器的另一个重要的特性——它的快作用。

除了功率放大系数外，磁放大器还常以电流放大系数 k_i 和电压放大系数 k_u 来表示。

$$k_i = \frac{I}{I_y}; \quad (11)$$

$$k_u = \frac{U}{U_y}, \quad (12)$$

式中 I —— 工作电流；

I_y —— 控制电流；

U —— 負載电压；

U_y —— 放大器控制回路电压。

电流放大系数是表示负载电流比控制电流大多少倍。电压放大系数是从放大的观点，将负载电压与放大器的输入电压进行比较，来说明装置的特征。

必须指出，虽然电流放大系数和电压放大系数都是磁放大器重要的运行特性，但是它们单独不能作为评价磁放大器结构品质的标准，因为在其他条件不变的情况下，改变放大器绕组的匝数，就很容易改变这些系数。

§2 最简单的磁放大器线路工作的分析

为了较清楚地理解磁放大器的工作和运行条件对控制特性的影响，必须注意，当某些量，如控制电流、电源电压和负载阻抗变化时，在线路中所发生的全部过程。

对磁放大器工作的分析，是基于控制器特性。控制器特性是一组曲线族（图4）。它是表示在不同的控制电流时，控制器工作绕组两端的电压 U_L 与工作电流 I 的关系。但是，对每一条曲线，控制电流 I_y 为常数。

曲线0表示没有控制电流（没有磁化）时，在控制器工作绕组上的电压 U_L 和电流 I

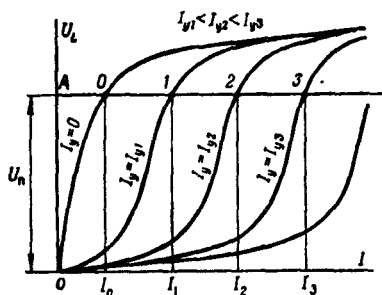


图4 控制器特性。

之间的关系。因此，这条特性就和一般的带有铁心的电抗绕组的伏-安特性的形状一样。这条曲线的特征是：当曲线陡峭上升之后，在中间有一个弯曲部分，然后就变成一条倾斜度

很小的直綫。众所周知，这个弯曲是由于鉄心的磁饱和現象所引起的。从这里开始，当磁化电流（在我們所研究的情况下是工作电流 I ）有相当大的增加时，鉄心中的磁通却增加不多，因而在工作繞組上的电压也增加得很少。

如果控制器鉄心經過直流附加磁化，則它的特性曲綫形状（曲綫 1、2 和 3）将作相应的改变。当工作电流从零开始增加时，控制器上的电压 U_L 最初上升較慢；然后，在一个比較小的範圍內，工作电流的改变使得电压 U_L 迅速上升；最后，当工作电流再繼續增加时，电压 U_L 又緩慢的上升，直至与起始特性 0 重合。同时控制电流（直流磁化电流）愈大，特性的陡峭上升部分离开纵軸愈远，而且，当磁化电流增加时，特性陡峭上升段的斜率没有什么变化。

順便指出，在特性的陡峭段，工作繞組的磁动势 $I\omega$ 和控制繞組磁动势 $I_y\omega_y$ 近似相等，即 $I\omega \approx I_y\omega_y$ 。

控制电流的影响 若已知放大器的电源电压 U_n ，則可利用控制器特性确定在各种不同的控制电流下的工作电流。

当接受器短接时，在放大器的任何个工作状态下，控制器电压 U_L 均为一个常数，并且等于綫路的供电电压 U_n 。工作电流的确定可以这样进行：在纵軸上取一段等于电源电压 U_n （图 4），由这段的終点（图 4 中 A 点）作一条水平綫，与控制器特性交于点 0、1、2 和 3，通过这些交点作垂綫，垂直于横軸，我們就可求得在不同的控制电流 $I_y = 0, I_y = I_{y1}, I_y = I_{y2}, \dots$ 下相应的工作电流 $I_0, I_1, I_2, \dots$ 。在必要时，就可列出工作电流 I 和控制电流 I_y 的关系 $I = f(I_y)$ 。

在正常工作的条件下，亦即有負載时，磁放大器工作电流的确定是比較复杂的，因为控制器上的电压 U_L 不是常数，