

磁放大器设计

[苏联] Н. П. 华西里耶娃等著

上海科学技术出版社

73.45573
235

磁放大器設計

H. П. 华西里耶娃
[苏联] O. A. 謝迪赫 原著
M. A. 巴亚尔欽柯夫

第一机械工业部电器科学研究院
自动化研究室 譯

310478/11

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书介绍功率放大器的设计。计算时的原始数据是负载的最大功率、负载阻抗、放大器的功率放大因数及在负载中的电流变化倍数。设计是在给定功率下，并考虑到绕组的允许温升而按最小尺寸、最小重量及放大器的最低造价而进行的。

在本书中还研究了放大器的结构及制造工艺。

当用本书作为放大器的设计参考资料时，并不要通晓放大器深奥的理论知识。因为，本书的各项假定，均是根据近代磁放大器理论作出的。

本书可供从事工业自动化的工程技术人员参考之用，也可作为大专学校自动化及电气传动专业的参考教材。

磁 放 大 器 設 計

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

原 著 者 [苏联] Н. П. Восильева
О. А. Седых
М. А. Боярченко

原出版者 Госэнергоиздат. 1959 年版

譯 者 第一机械工业部电器科学研究院
自动化研究室

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

上海洪兴印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张9 字数235,000

1961年12月第1版 1961年12月第1次印刷

印数1—12,000

统一书号：15119·1642

定 价：(十四) 1.50 元

譯 序

磁放大器是自动控制、自动調節系統中的一種新型元件。隨着我國國民經濟各部門自動化程度的提高，磁放大器的應用範圍日益擴大。由於磁放大器的應用面很廣，因而對它的要求也是各式各樣的。實際工作中也需要有一本指導磁放大器設計的參考書。因此，我們進行了本書的譯校工作，以供有關人員工作中參考。由於時間限制，文中有關數據未能作全面的計算驗證，請在參考使用本書時多加注意。

譯者

序

功率磁放大器是属于最有发展前途的自动装置元件之一，因为它具有高度的可靠性，寿命长、效率高、放大系数相当大、有防爆性，同时，在相当大的加速度和振动的情况下亦能可靠地工作。尽管近来开始广泛地应用半导体放大器，但与半导体放大器一样，磁放大器仍将获得广泛的应用，因为在某些方面磁放大器具有较好的特性，例如：易与任何低阻抗发送器和接收机相匹配，能较好的放大直流讯号和频率很低的讯号，有较小的分布参数，而且实际上其输出功率的大小也是无限制的。

尽管磁放大器的应用范围在日益增长，但至目前为止，尚未系统地阐述有关其设计方面的问题。本书著者试图填补功率磁放大器设计方面的这种欠缺——即使只是局部的填补也好。

本书的理论部分主要是在华西里耶娃和谢迪赫合作的基础上写成的。

本书各部分的著者，第一至第六章以及第九章第一节是华西里耶娃，第八章及第十一章是华西里耶娃和谢迪赫，第九章第二节是华西里耶娃和巴亚尔钦科夫，第七章是谢迪赫，第十章及第二篇是巴亚尔钦科夫。

伊·勃·聶格涅維茨基和勃·伊·菲里波維奇审阅了本书手稿，并提出了宝贵的意见，著者表示谢意。

著者明白，本书不可避免地会存在一些缺点，因此热情地欢迎读者提出批评，来函请寄：莫斯科水闸河岸街（Шлюзовая Наб.）10号国立动力出版社。

著者

目 录

序

緒論	1
采用的符号和略語	4

第一篇 磁放大器的設計原理

第 一 章 磁放大器的輸入-輸出特性及其主要的計算参数	8
第 二 章 功率磁放大器的铁心体积及其磁状态	14
2-1 概論	14
2-2 单拍(不可逆的)磁放大器的輸出功率、铁心体积及其磁状态	15
2-3 双拍(可逆的)磁放大器的輸出功率、铁心体积及其磁状态	25
第 三 章 磁放大器的最佳工作磁状态及铁心最小比容曲綫	64
3-1 磁放大器铁心的最小比容曲綫	64
3-2 磁放大器铁心比容曲綫的分析表示式	81
第 四 章 磁放大器的铁心体积和放大因数	92
4-1 概論	92
4-2 无反饋的单拍直流磁放大器	94
4-3 带反饋的单拍直流磁放大器	99
4-4 无反饋的双拍直流磁放大器	103
4-5 带反饋的双拍直流磁放大器	109
4-6 交流控制的磁放大器	108
第 五 章 按发热条件决定的磁場强度极限值与铁心体积	110
5-1 磁場强度的极限值、电流密度与铁心体积	111
5-2 电流密度与温升間的关系	116

〔2〕目 录

5-3 磁場强度极限值、溫升与铁心体积	118
第 六 章 磁放大器的銅体积	119
第 七 章 决定铁心的最佳几何关系	122
7-1 铁心磁性能与其内外徑比值的关系	122
7-2 高灵敏度磁放大器铁心最有利的几何关系	123
7-3 按磁放大器重量最輕(尺寸最小、造价最低)的条件并 保证給定放大因数的铁心几何关系	126
7-4 大功率磁放大器最佳的铁心尺寸几何关系	134
第 八 章 給定电源电压时計算磁放大器	138
第 九 章 磁放大器的快速作用,多級磁放大器的計算特点	148
9-1 具有反饋的磁放大器多級联接时对快速作用的影响	148
9-2 多級磁放大器計算的特点	156
第 十 章 計算磁放大器綫路中整流器的基本原則	163
第十一章 磁放大器的設計程序	167
11-1 緒言	167
11-2 选定铁心冲片的磁放大器的計算	170
11-3 具有最佳铁心结构的磁放大器的計算	193

第二篇 磁性材料、整流器、磁放大器 铁心结构及制造工艺

第十二章 磁性材料	203
12-1 同时磁化曲綫族的实验測定法	203
12-2 应用电子示波器測量动磁滞环綫	210
12-3 用机械整流器測定动态磁滞环綫	223
12-4 用半导体二极管及磁轉換开关測定动态磁滞环綫	225
12-5 苏联磁性材料的基本参数	227
第十三章 磁放大器的铁心结构	238
13-1 环形铁心	238
13-2 III形及II形铁心	242
13-3 M形铁心	244

13-4 O形及C形铁心	245
第十四章 磁放大器扼流圈的制造工艺	246
14-1 带料的剪切	247
14-2 去除条料上的毛刺及油污	249
14-3 铁心的絕緣及卷制	252
14-4 铁心的最終热处理(退火)	259
14-5 剖开式带状卷制铁心(C形)的制造工艺	263
14-6 铁心的檢查及配对	265
14-7 磁放大器繞組的繞制	266
14-8 在磁放大器中所采用的整流器的主要类型	270
文献	276

緒 論

設計功率磁放大器，目的在於選擇其結構型式以及根據原始數據確定尺寸大小與所有元件的參數。

通常，原始數據包括：最大負載功率、負載阻抗與磁放大器的功率放大系數；對於不可逆的（單拍式）磁放大器而言，還有負載電流變化倍數。

根據上述原始數據設計磁放大器，有各種不同的方法。本書中所敘述的設計方法，可用以求得最小重量或最小外形尺寸、最低造價的磁放大器。由磁放大器電路及材料特性計算所得的關係式是這種設計方法的基础。

目前，無論用直流訊號或用交流訊號控制的各式各樣的磁放大器電路，都得到廣泛的應用，欲以一種分析方法來作為現有各類型磁放大器的設計基础是很困難的。本書所介紹的設計方法的基础，是根據兩種廣泛應用的簡化的磁放大器理論導出的結論。

應用的第一種理論是線性磁放大器理論，磁放大器作為一個可控制的線性電感來進行研究。這種理論假定磁放大器鐵心材料的導磁率，在電源電壓變化的整個週期內都是一個常數。在這種情況下，實際的非正弦波形的磁感應強度和交流磁場強度，都以某種等效的正弦波形來代替，包括磁放大器電路在內的電路的計算，亦完全可用計算正弦電壓和電流的數學儀器來進行，亦即是採用所謂符號法來計算。在線性磁放大器理論基础上，可以比較簡單地求出具有交流輸出和直流輸出的足夠複雜的可逆電路的計算關係式。

應用的第二種理論，也就是通常所謂的理想磁放大器的理論，磁放大器也被當作一個電感來研究。其電感值，在電源電壓半個週波的一部分時間內是非常大的，而在同一半個週波的另一部分時間內又是非常小的。

这样的概念, 对于高导磁率合金铁心的磁放大器的实际工作情况是非常接近的。因此, 对于一系列带有純电阻負載的磁放大器綫路, 可以应用初等数学得出較简单的計算关系式。当分析帶內反饋的磁放大器綫路及快速磁放大器綫路时, 这种概念較第一种更加明显。

这两种理論都能保证足够的工程計算准确度。但是, 正象实际計算证明, 应用理想磁放大器的理論計算所得的铁心尺寸要偏大一些。

在設計磁放大器时, 铁心材料的磁性是按材料的磁化特性曲綫来考虑的, 亦即是按交直流同时磁化的特性曲綫族来考虑。

众所周知, 在計算铁心体积时, 磁感应强度及磁場强度可以采用有效值、平均值或者基波值, 取决于磁放大器負載的特性及其連接方式。但是, 由于計算是按磁放大器的两种极限工作状态(无附加磁化的状态及最大附加磁化的状态)进行的, 磁感应强度及磁場强度的波形接近于正弦, 因此, 在所有的情况下都可以利用材料的同一特性曲綫族, 例如用测量电流和电压平均值的仪表测量繪制的曲綫, 这样計算, 可获得足够的工程計算准确度。

按照計算結果制造的磁放大器的参数与原始計算参数的重合准确度, 主要取决于磁放大器铁心材料的实际磁化特性与計算时所用磁化特性的接近程度。在这些磁化特性相重合的情况下, 經過一系列計算的证明, 对于不带反饋的磁放大器的所有参数, 应用綫性磁放大器理論計算所得之誤差不超过 10%。对于带反饋的磁放大器, 計算的放大系数誤差可能大大的超过这个数值, 但其余参数的誤差通常也不超过 10%, 而且与所用的同时磁化曲綫的特性无关, 亦即与铁心材料的牌号无关。

当采用按理想磁放大器的理論导出的計算关系式来进行計算时, 制造磁放大器铁心的磁性材料特性曲綫与矩形的理想磁化特性曲綫差別愈大, 磁放大器参数的誤差也就愈大。因此, 只有在設計高导磁率合金铁心的磁放大器时, 采用这种計算关系式进行計算才有意义。

分析了磁放大器的工作原理，以及根据长期的磁放大器設計和計算經驗，证明設計中的主要問題是确定磁放大器的铁心体积及其最佳的磁性状态和最合理的結構，这些問題在設計的过程中应该获得正确的解决。

現有的磁放大器設計方法是多种多样的，仅就最近几年来看，国内(苏联)文献中就有大量的关于磁放大器設計的著作。

然而，分析这些著作可以看出，尽管它們都有着一系列重大的优点，但是沒有一篇著作是全部包括上述三个設計問題的。在本书中，我們试图同时研究最广泛应用的功率磁放大器的主要設計問題。

磁放大器輸出功率，主要决定于铁心体积、铁心材料的磁性能及綫圈的容許溫升。为了使各量相互联系起来，书中采用了下述方法：经过参数变换及采用一系列的簡化假設，使铁心比容(单位容量的铁心体积)、放大因数以及发热条件通过附加磁化磁場强度用关系式表示出来。从所得的关系式中消去磁場强度值之后，我們可以得到磁放大器輸出功率与其铁心比容、綫圈容許溫升以及放大因数之間的关系式，亦即得到磁放大器的未知参数与給定的参数之間的关系式。

同时，书中指出，对于大多数現有的磁放大器綫路而言，其铁心比容和磁場强度間的关系式跟不可逆(单拍式)磁放大器綫路的同一种关系式不同的地方，仅是相差一个常系数而已。因此在計算时，我們推荐采用这种按单拍磁放大器綫路作出的铁心比容曲綫。当計算其余綫路的磁放大器时，仅需推导出这个常系数的表示式就可以了，这种方法大大簡化了且也統一了各种磁放大器的設計方法。

对于所有各类型的磁放大器，其铁心最佳几何尺寸决定于下述条件：即在給定的功率下同时考虑到綫圈的容許溫升求得尺寸最小、重量最輕或者造价最低的磁放大器。对于直流磁放大器，在給定的功率下，获得必需的放大因数以及尺寸最小、重量最輕或者造价最低的放大器。

采用的符号和略語

ампл. зн. — 幅值

д. зн. — 有效值

ср. зн. — 平均值

мгн. зн. — 瞬时值

$U_{\sim}$ — 綫路的电源电压(伏), 有效值

$U_{\sim cp}$ — 綫路的电源电压(伏), 平均值

$u_{\sim}$ — 綫路的电源电压(伏), 瞬时值

U_k — 最大附加磁化磁場强度时, 扼流圈上的电压(伏), 有效值

$U_{k. cp}$ — 同上, 平均值

u_k — 同上, 瞬时值

U_0 — 无附加磁化磁場强度时, 扼流圈上的电压(伏), 有效值

$U_{0 cp}$ — 同上, 平均值

u_0 — 同上, 瞬时值

U_n — 負載上的电压(伏), 有效值

$U_{n. cp}$ — 同上, 平均值

u_n — 同上, 瞬时值

I_{ycp} — 控制电流(安), 平均值

I_k — 最大附加磁化磁場强度时, 扼流圈綫圈中流过的电流(安), 有效值

$I_{k. cp}$ — 同上, 平均值

i_k — 同上, 瞬时值

I_0 — 无附加磁化磁場强度时, 扼流圈綫圈中流过的电流(安), 有效值

$I_{0 cp}$ — 同上, 平均值

i_0 — 同上, 瞬时值

$\kappa = \frac{I_k}{I_0}$ — 扼流圈綫圈中电流的变化倍数

B_m — 磁感应强度(高斯), 幅值

Φ_m — 磁通(麦克斯偉), 幅值

- B_{ms} ——飽和磁感應強度(高斯),幅值
- Φ_{ms} ——飽和磁通(麥克斯偉),幅值
- B_{mk} ——最大附加磁化磁場強度時,鐵心中的磁感應強度(高斯),幅值
- Φ_{mk} ——最大附加磁化磁場強度時,鐵心中的磁通(麥克斯偉),幅值
- B_{m0} ——無附加磁化磁場強度時,鐵心中的磁感應強度(高斯),幅值
- Φ_{m0} ——無附加磁化磁場強度時,鐵心中的磁通(麥克斯偉),幅值
- H_{π} ——直流磁化磁場強度(安/厘米)
- H_y ——最大訊號時的控制磁場強度(安/厘米)
- H_{oc} ——反饋磁場強度(安/厘米)
- H_m ——交流磁場強度(安/厘米),幅值
- H_{mk} ——最大附加磁化磁場強度時的交流磁場強度(安/厘米),幅值
- H_{m0} ——無附加磁化磁場強度時的交流磁場強度(安/厘米),幅值
- $k = \frac{H_{mk}}{H_{m0}}$ ——扼流圈鐵心中磁場強度的變化倍數
- P_H ——磁放大器的最大負載功率
- P_y ——最大控制功率
- P ——磁放大器最大輸出功率,包括負載功率及繞組與整流器中損耗的功率
- P_{po} ——工作繞組中損耗的功率
- w_p ——每個扼流圈工作繞組的匝數
- w_y ——控制繞組匝數
- w_{oc} ——反饋繞組匝數
- $w_{c.n}$ ——位移繞組匝數
- k_{oc} ——反饋系數
- k_i ——電流放大因數
- k_{ae} ——安-匝放大因數
- k'_p ——無反饋的磁放大器功率放大因數
- k_p ——有反饋的磁放大器功率放大因數
- k_u ——電壓放大因數

[6] 采用的符号和略語

- k_f ——波形因数
 $k_{s.m}$ ——銅的填充系数(即繞組填充系数)
 k_{sc} ——鋼的填充系数(即鉄心填充系数)
 r_n ——負載純电阻分量
 r_d ——整流器电阻
 r_p ——工作繞組电阻
 r_y ——控制繞組电阻
 r ——总輸出电阻,即負載电阻、工作繞組电阻和整流器电阻之总和
 X_n ——負載电抗分量
 z_n ——負載阻抗
 z ——总輸出阻抗,即包括負載阻抗、工作繞組阻抗及整流器阻抗
 l_{sep} ——控制繞組、工作繞組、位移繞組和反饋繞組的平均匝长(厘米)
 l_{oy} ——控制繞組匝长(厘米)
 l_{op} ——工作繞組匝长(厘米)
 S_{np} ——導綫截面积(厘米²)
 S_d ——窗口截面积(厘米²)
 S_p ——工作繞組截面积(厘米²)
 S_{oy} ——控制繞組截面积(厘米²)
 l_c ——鉄心磁路长度(厘米)
 a ——III形鉄心中心柱的寬度(厘米)
 c ——III形鉄心窗口寬度(厘米)
 b ——III形鉄心窗口高度(厘米)
 h ——III形鉄心的疊片厚度或者环形鉄心的高度(厘米)
 d_s ——磁性材料帶的厚度(厘米)
 d_n ——磁性材料冲片的厚度(厘米)
 d_{np} ——導綫直徑(厘米)
 d ——环形鉄心內徑(厘米)
 d_n ——环形鉄心中未利用的窗口(即未繞綫圈的部分)直徑(厘米)
 V_c ——鉄心体积(厘米³)

V ——計入冲片絕緣在內的铁心体积的整个尺寸大小或外形尺寸大小

v ——单拍磁放大器綫路的铁心比容(厘米³/伏安)

V_{π} ——磁放大器銅的体积(厘米³)

D ——环形铁心外徑(厘米)

ρ ——銅的比电阻(欧姆·厘米)

λ_c ——铁心磁力綫的相对长度

λ_s ——控制繞組的相对匝长

σ_0 ——铁心窗口的相对面积

δ_{oxA} ——相对的冷却表面

η ——負載功率与全部計算輸出功率的比值

θ ——发热溫度(°C)

n ——环形铁心外徑与內徑之比值 D/d

ν ——环形铁心高度与內徑之比值 $\nu = h/d$ 或者是 III 形铁心的堆叠厚度与铁心外形体积的立方根之比值

γ_{π} ——銅的比重(克/厘米³)

γ_c ——鋼的比重(克/厘米³)

γ ——III 形铁心窗口寬度与铁心外形体积立方根之比值

δ ——环形铁心內徑与铁心外形体积立方根之比值, 或者是 III 形铁心的窗口高度与铁心外形体积之比值

α ——III 形铁心中心柱寬度与铁心外形体积立方根之比值

p ——公共繞組所包圍的铁心个数

第一篇

磁放大器的設計原理

第一章 磁放大器的輸入-輸出特性 及其主要的計算參數

功率磁放大器的基本特性曲綫，就是它的輸入量與輸出量之間的关系曲綫，這一特性曲綫多半是用磁放大器的負載電流與控制電流之間的关系來表示的。但有時也用負載電壓與控制電壓的关系，或者用負載功率與輸入功率之間的关系來表示。

對於帶綫性負載的、用直流控制的一般（非快速的）磁放大器綫路，第一和第二類特性曲綫實際上僅是座標中比例尺的差別。

對於快速磁放大器和用交流控制的磁放大器而言，輸出電流與輸入電流的关系同輸出電壓與輸入電壓的关系，兩者相比具有很大的差別。這類磁放大器的特性都用電壓間的关系來表示。

一般用輸出電壓與輸入電壓的关系來表示任何一種帶非綫性負載的磁放大器的特性，非綫性負載大大影響輸入-輸出特性曲綫的形狀。

本書不打算闡述各類型磁放大器特性曲綫的研究和分析方法，因為這個任務已經由姆·阿·羅津勃拉特^[1]、格·夫·斯托姆^[2]以及其他一些作者^[3~5]完成了。

本書研究能夠滿足給定特性曲綫要求的磁放大器的設計方

法,在某种程度上,这种特性是与设计有关的。

设计磁放大器时,磁放大器的输入-输出特性曲线通常是部分的或者全部给定的,即特性曲线上总有几个点是已知的,例如,最大的负载电流 I_n 、在此电流值时的放大系数以及空载电流。此时,若要求特性曲线在上述两电流值之间是线性的,那么这一特性曲线就完全决定了。若不要求它是线性的,那么特性曲线也就部分的给出了。在后一种情况下,对磁放大器所提要求不如前者严格。

现在让我们来研究一下几种典型的磁放大器线路及其特性曲线,以便使之与磁放大器基本计算参数联系起来。

最简单的磁放大器是通常称为饱和电抗器的不带反馈的单拍磁放大器。最广泛应用的单拍磁放大器线路如图 1-1 所示。

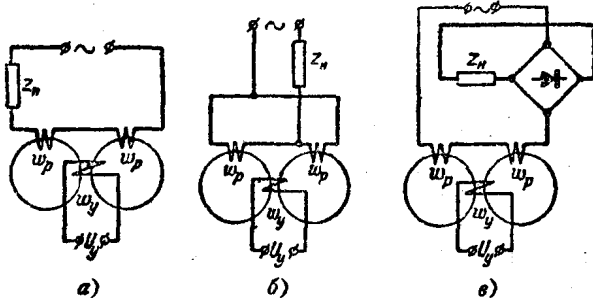


图 1-1 无反馈的单拍磁放大器线路

a—工作绕组串联,交流输出; b—工作绕组并联,交流输出;

c—工作绕组串联,直流输出。

这些线路的特点是负载与铁心上的绕组串联,但有时也会遇到负载与铁心上的绕组并联的单拍磁放大器,这种放大器线路见图 1-2。

众所周知,负载与电源电压相串联的单拍磁放大器的工作原理如下:在控制磁场的作用下,磁放大器绕组

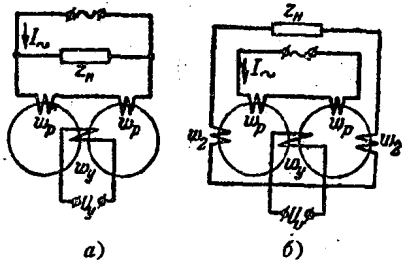


图 1-2 负载并联的无反馈单拍磁放大器

a—扼流式线路; b—变压器式线路。