

$$V_{os} \approx (V_{sp} - 1) \frac{t_f}{T} \quad (10.2b)$$

式中, $t_f + t_b = t_h$, 即

$$t_f = t_h - t_b \quad (10.3)$$

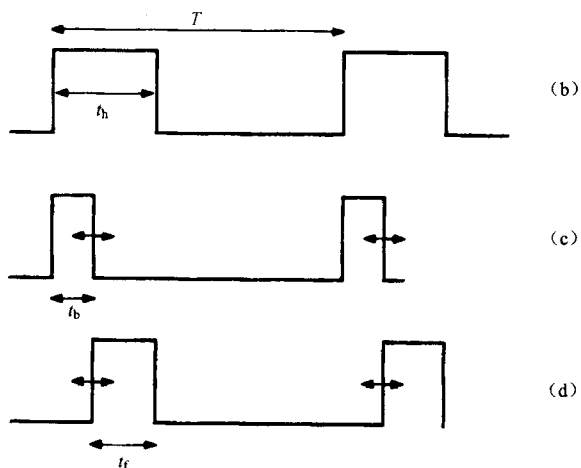
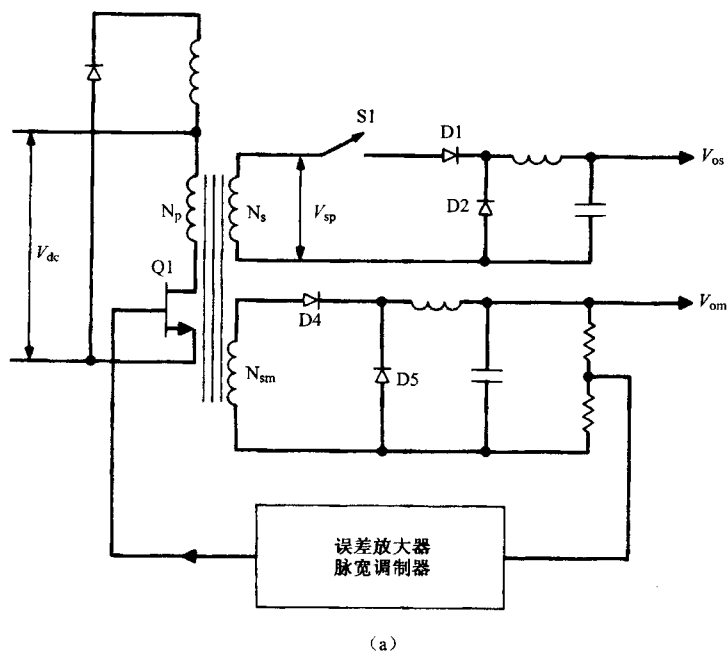


图 10.1 使用开关 S1 对辅输出进行脉宽调制。如果 S1 的开关时间可以通过一个独立的反馈来调节, 而与 Q1 的导通和关断无关, 则辅输出可以独立于主输出进行调节

由式 (10.2), 可以通过控制 t_f 来使辅输出电压保持恒定。实际上是通过控制开关 S1 的关断时间 t_b 来达到这个目的的。

因此在式 (10.2a) 中, 输入电压 V_{dc} 升高, 辅输出的次级峰值电压 $V_{sp} = (V_{dc} - V_{Q1})(N_s/N_p)$ 也升高, 通过增加 t_b 来降低 t_f 使输出电压稳定。

开关 S1 就是一个磁放大器，是在具有方形磁滞回线的环形磁心上绕制线圈而成的，其工作原理将在下面介绍。

10.3.1 用作快速开关的方形磁滞回线磁心

图 10.2 所示是一个典型的方形磁滞回线磁心（Toshiba MB 非晶磁心材料）的磁滞回线曲线图。在磁放大器中使用的其他方形磁滞回线磁心材料将在后面讨论。

磁滞回线的斜率（ $\mu = dB/dH$ ）就是磁心的磁导率。绕制在磁心上的线圈的阻抗与磁导率 μ 成正比，因此在磁滞回线的垂直段，它的磁导率和阻抗都非常大。这等效为开关在断开的

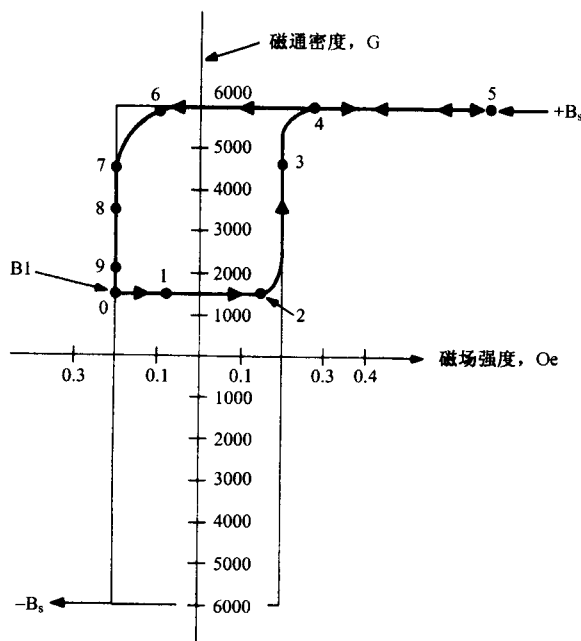


图 10.2 Toshiba MB 非晶磁心材料，100kHz 下的磁滞回线。在磁放大器工作过程中，磁心沿着路径 01234567890 磁化。从 1 点到 4 点过程中磁心位于磁滞回线斜率很大的位置，此时磁心的阻抗很大。在 4 点位置，磁心饱和阻抗为零。在 Q1 关断之前（图 10.1）磁心复位到 B1 位置，从 B1 沿着磁滞回线到 +Bs 的时间就是开关关断时间。B1 的位置越低，阻隔时间或开关导通时间越长。B1 的复位是由 Q2 流向磁放大器的反向电流控制的（图 10.3）。这个电流由误差放大器控制

当磁心处于饱和状态即工作于磁滞回线水平部分（4 点以后）时，这个部分的磁滞回线的斜率 dB/dH 即磁导率接近于零，磁心的阻抗很小，磁放大器相当于有相同匝数的空心线圈，此时磁放大器相当于单刀开关工作在闭合状态。

使用这种磁心绕制就构成了图 10.1 中的开关 S1。图 10.3 给出了利用误差放大器和辅助电路构成的磁放大器开关控制电路。

一个开关周期内（图 10.4 中的 t_0 到 t_3 段），磁心经过了一个所谓的最小磁滞回线环路，即如图 10.2 中的路径 01234567890。控制磁放大器开关的关断时间 t_b 和导通时间 t_f 的方法如下。假设在一个周期开始的时刻 t_0 ，磁心被复位到图 10.2 中的 B1 位置。当 Q1 导通时电压 $V_{sp} \approx (V_{dc} - 1)N_{ss}/N_p$ 加在辅绕组的次级。

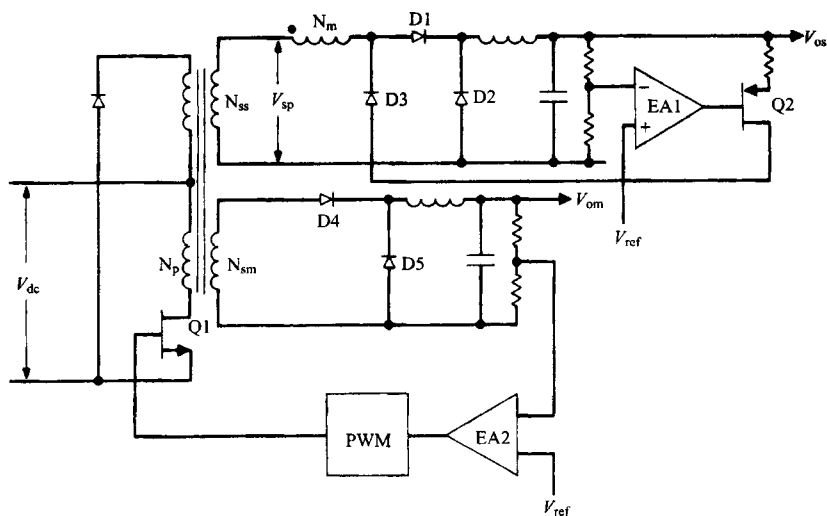


图 10.3 使用磁放大器调节的辅输出。图 10.1 中的开关 S1 被磁放大器代替。磁放大器在没有饱和时，磁滞回线斜率很大，其阻抗很大。保持高阻抗的时间受到 Q1 关断时间内反向加于磁放大器的复位电流的控制。磁放大器简单的说就是由线圈绕制在方形磁滞回线的磁心上

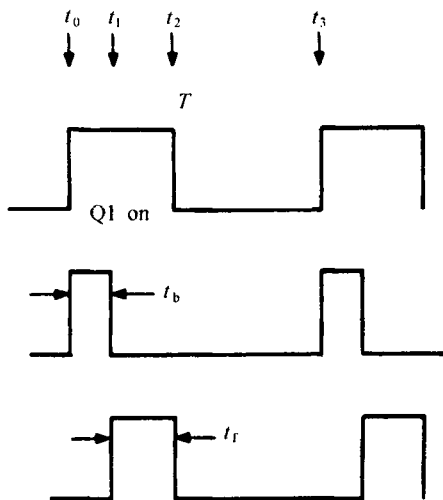


图 10.4 图 10.3 所示电路中的开关管导通关断时序图

t_0 之前 D2 是导通的，并且阴极电压比地低一个二极管压降。在 t_0 时刻，电压 $(V_{sp} + 1)$ 加在磁放大器及串联的 D1 上，使磁心趋于饱和点（图 10.2 中的 4 点）。

在磁心到达饱和点之前，只有很小的“漏电流”流过磁放大器和 D1。这个漏电流比续流二极管 D2 的电流小很多，因此 D2 导通，其阴极电压仍比地低一个二极管压降。同时电压 V_{sp} 被阻断，不会加到输出电感 L_s 上。

二极管 D1 流过磁放大器的漏电流。相对于 D2 的电流来说，D1 的电流很小。设 D1 和 D2 的正向压降均为 1V，则加在磁放大器上的电压为 V_{sp} ，磁放大器的右端电压等于地电位。此时磁放大器处于阻断状态，持续时间为 t_b 。 t_b 就是磁放大器沿着磁滞回线从 B1 到 +B_s 的时间。

一旦磁心进入饱和状态(4点位置),磁放大器的阻抗就可以忽略,电流经磁放大器流入负载。在Q1导通时间内,D2的阳极电压等于 V_{sp} 减去二极管导通压降。

从磁放大器开始饱和到Q1关断时刻的时间为 t_f 。LC输出滤波器上承受一个值为 $(V_{sp} - V_{D1})$ 的电压,其占空比为 t_f/T ,则平均输出电压为 $(V_{sp} - V_{D1})t_f/T$ 。

由上述可知,可以通过调节 t_f 来实现输出电压的调整,实际使用中可以通过控制 t_b 来控制输出电压。

10.3.2 磁放大器中的关断和导通时间

关断时间 t_b 可由法拉第定律计算得到

$$\begin{aligned} V_{sp} &= N_m A_c \frac{dB}{dT} 10^{-8} \\ &= N_m A_c \frac{(B_s - B1)}{t_b} 10^{-8} \\ t_b &= N_m A_c \frac{(B_s - B1)}{V_{sp}} 10^{-8} \end{aligned} \quad (10.4)$$

式中, N_m 为磁放大器的线圈匝数; A_c 为磁放大器的磁心面积,单位为 cm^2 ; B_s 为饱和磁通密度,单位为G; $B1$ 为起始磁通密度,单位为G; V_{sp} 为辅输出绕组峰值电压,单位为V; t_b 为关断时间,单位为S(图10.4)。

从式(10.2b)可得 $V_{os} = (V_{sp} - 1)t_f/T$,从式(10.3)可得 $t_f = t_h - t_b$ 。

如果 V_{sp} 升高, V_{os} 可以通过减少导通时间 t_f (式(10.3))保持恒定。从式(10.2)可知,减少 t_f 可以通过增加 t_b 来实现。从式(10.4)可知,增加 t_b 可以通过将B1复位到磁滞回线更低位置来实现。同样,如果由于某种原因使 V_{os} 减小,则必须通过减小 t_b 来增加 t_f ,这可以通过提高初始磁通密度B1实现,这样磁心到达饱和的时间 t_b 会更短。

10.3.3 磁放大器磁心复位及稳压

到目前为止,只讨论了磁心从初始磁通密度B1到达饱和的暂态过程,在 t_f 时间内,磁放大器的阻抗为零且向输出LC滤波器供电。

从Q1关断到下一次导通之前这个时间段内,磁心必须被复位到B1位置,这是为在下一个开关周期内能关断做准备。如果在导通时间结束后没有反向电流流入磁放大器将其复位,则磁放大器磁心将保持在 $+B_s$ 位置。

磁心通过一种电流复位技术将磁通密度复位到B1位置,在实际应用中,磁心被复位到需要的磁通密度是通过电压复位或电流复位实现的。在电压复位技术里,磁心是通过一个反压伏秒值来复位的(由法拉第定律, $dB = E dt/NA_c$)。在有些电路中,使用电流复位会更简单。

一般通过图10.3中的电压误差放大器、二极管D3和压控电流源Q2来使磁心复位到B1,同时实现在网压和负载变化时的稳压。磁心被复位到B1位置,因此有一个关断时间 t_b ,改变导通时间 t_f 可以调节输出电压。

电流复位是通过在Q1关断后给磁放大器加一个反向直流电流实现的。

Q1导通后,D3承受反压关断,Q2关断。Q1关断, N_{ss} 的上端为负,电流通过Q2的集电极加到磁放大器的异名端。电流是通过误差放大器来控制的,误差放大器使采样电压与给

定电压一致。

如果输出电压上升, 则 t_f 必须减小, 即 t_b 必须上升。因此, 如果输出电压上升, 误差放大器的输出就会下降, Q2 的集电极电流增大, 复位电流增加。这将使初始磁通密度 B_1 更低, 由式 (10.4) 可知, t_b 会增加使 t_f 减小, 输出电压也会降低到正常值。

同样, V_{os} 的减小引起误差放大器输出电压的增加, 同时减小了磁复位电流。当 B_1 升高, t_b 减小, t_f 增加, V_{os} 也上升到了正常值。

所有这些过程都发生在几个开关周期之内, 执行时间的长短完全由误差放大器的带宽决定。

负反馈环路的稳定性在这里不讨论, 请参考 C.Jamerson 及 C.Mullett 的著作。

10.3.4 利用磁放大器关断辅输出

迄今为止, 磁放大器只是用来调节辅输出电压。它通过控制初始磁通密度 B_1 来控制输出。 B_1 越低, 关断时间 t_b 越长, 即导通时间 t_f 越短, 直流输出电压越低。

通过将初始磁通密度从 $+B_1$ 变到 $-B_s$, 磁放大器可以完全关断直流输出电压。由式 (10.4) 可知 $t_b = N_m A_c (2B_s) 10^{-8} / V_{sp}$, 选择合适的 A_c 和绕组匝数 N_m 可以使关断时间 t_b 比 Q1 的最大导通时间还要长 (实现了磁放大器彻底关断直流输出电压)。

可通过不同的方法使 Q2 的电流足够大来将磁通密度 B_1 降低到 $-B_s$ 。因此需要将误差放大器的输出端强制为低阻抗和低电压源。也可将误差放大器参考电压 V_{ref} 直接接地, 并在参考电压源与误差放大器的参考电压输入端接入隔离电阻以免参考电压源过载。

需要注意, 如果磁放大器仅仅是用作调节器 (一般情况下都这样使用), 如图 10.2 所示, 则磁心磁滞曲线只包围很小的面积, 仅仅是整个磁滞回线面积的一小部分。这个面积和初始磁通密度 B_1 有关, 而 B_1 是由最大和最小输出电压和负载电流决定的。

磁放大器作为调节器使用时, 磁心磁滞曲线包围的面积一般是磁滞回线面积的四分之一左右。由于磁心损耗与磁心磁滞曲线包围的面积成比例, 这种情况下磁放大器的损耗和温升都比较小。

然而, 当磁放大器被用来完全关断辅输出时, 它的磁心磁滞曲线覆盖了从 $+B_s$ 到 $-B_s$ 的大部分面积, 这将产生较高的磁心损耗和温升, 损耗和温升可以通过制造厂商提供的磁心损耗曲线来计算。

同时请注意图 10.3, 误差放大器和 Q2 的电源就是辅输出本身, 如果设计成完全关断辅输出, 那误差放大器和 Q2 就需要其他电源供电, 比如另一个辅输出。

10.3.5 方形磁滞回线磁心特性和几种常用磁心

多年来, 只有一种磁心材料满足磁放大器磁心材料的特性, 可以用来制造高频磁放大器。

这种材料是一种含有 79% 镍、17% 铁、4% 钼的合金。很多磁心厂商都有此类产品。Magnetics 和 Pennsylvania 是美国著名的磁心供应商, 可以提供各种规格的磁心, 适合做磁放大器的磁心型号是 Square Permalloy 80。其他公司的同类产品有 4-79 Molypermalloy、Square Mu 79、Square Permalloy 和 Hy Ra 80。

Magnetics 公司提供的 Square Permalloy 80 磁心分为 0.5 mil、1.0 mil、2.0 mil、4.0 mil、6.0 mil 和 14.0 mil 几种厚度。这种材料是可导电的, 涡流损耗是损耗的主要部分, 为了减小损耗, 频率越高使用的磁心厚度越小。

一般来说, 1mil 的厚度适合使用的最高频率为 50kHz, 0.5mil 的厚度适合使用的频率为 50~100kHz。超过 100kHz 就要使用非晶磁心, 以得到更低的磁心损耗。

一个高效率、高频率的磁放大器需要具有以下两个特性, 即接近完全方形的磁心磁滞曲线和达到峰值磁密时有较低的损耗。0.5mil 的磁心要比 1mil 的磁心贵很多。如果磁放大器仅用于后级调节, 则磁滞曲线仅为磁滞回线的一小部分。1mil 厚度的磁心也可以用在频率高于 50kHz 的场合。

方形磁滞回线是使磁心在饱和情况下阻抗极低的必要条件。如果磁滞回线不够方正, 它的磁导率(饱和时候的 dB/dH , 如图 10.2 所示)不是接近于零, 则需要考虑其阻抗, 而且其阻抗会比同匝数空心电感大很多。

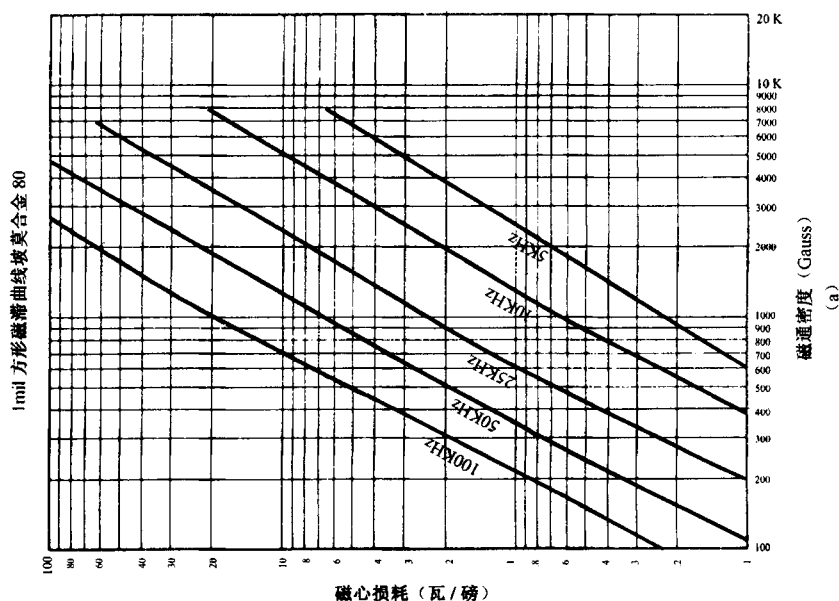
因此, 在图 10.3 中, 磁放大器的输出电压会比 V_{sp} 略小, 且磁放大器上的压降是由次级电流决定的。如果磁滞回线不是方形的, 就要考虑从高阻抗到低阻抗的转换时间, 这限制了其在高频条件下的使用。

图 10.5 (a) 和图 10.5 (b) 是 1mil 和 0.5mil 方形磁滞曲线材料以峰值磁密和工作频率为参数的磁心损耗曲线(损耗单位为瓦特每匝)。曲线中的磁通密度是磁通密度峰-峰值的一半。Magnetics 公司没有给出每个磁心的重量, 不过可以通过磁心面积、等效磁路长度和材料密度 (8.75g/cm^3) 计算得到。

磁放大器外部温升可通过如图 7.4 (a) 和图 7.4 (c) 所示的热阻和磁心损耗来估计。磁心和外表面的温差在 15°C 左右是比较合理的。

Square Permalloy 材料的最高工作居里温度为 460°C , 那么磁心工作时温升可以相当高。限制磁心损耗的因素为绕线耐温等级或磁放大器的效率。

大约 4 年前, 磁放大器的研究重新引起大家的兴趣, 一种新型的磁性材料出现了。这种材料不是晶体状态的, 而是非晶的, 且拥有更低的磁心损耗同时在高频时的磁滞曲线比 Square Permalloy 材料更趋近于方形。虽然 0.5mil 的 Square Permalloy 材料可以工作在频率为 100kHz 的情况下, 但如果需要更高的工作频率, 则使用新材料效果会更好。



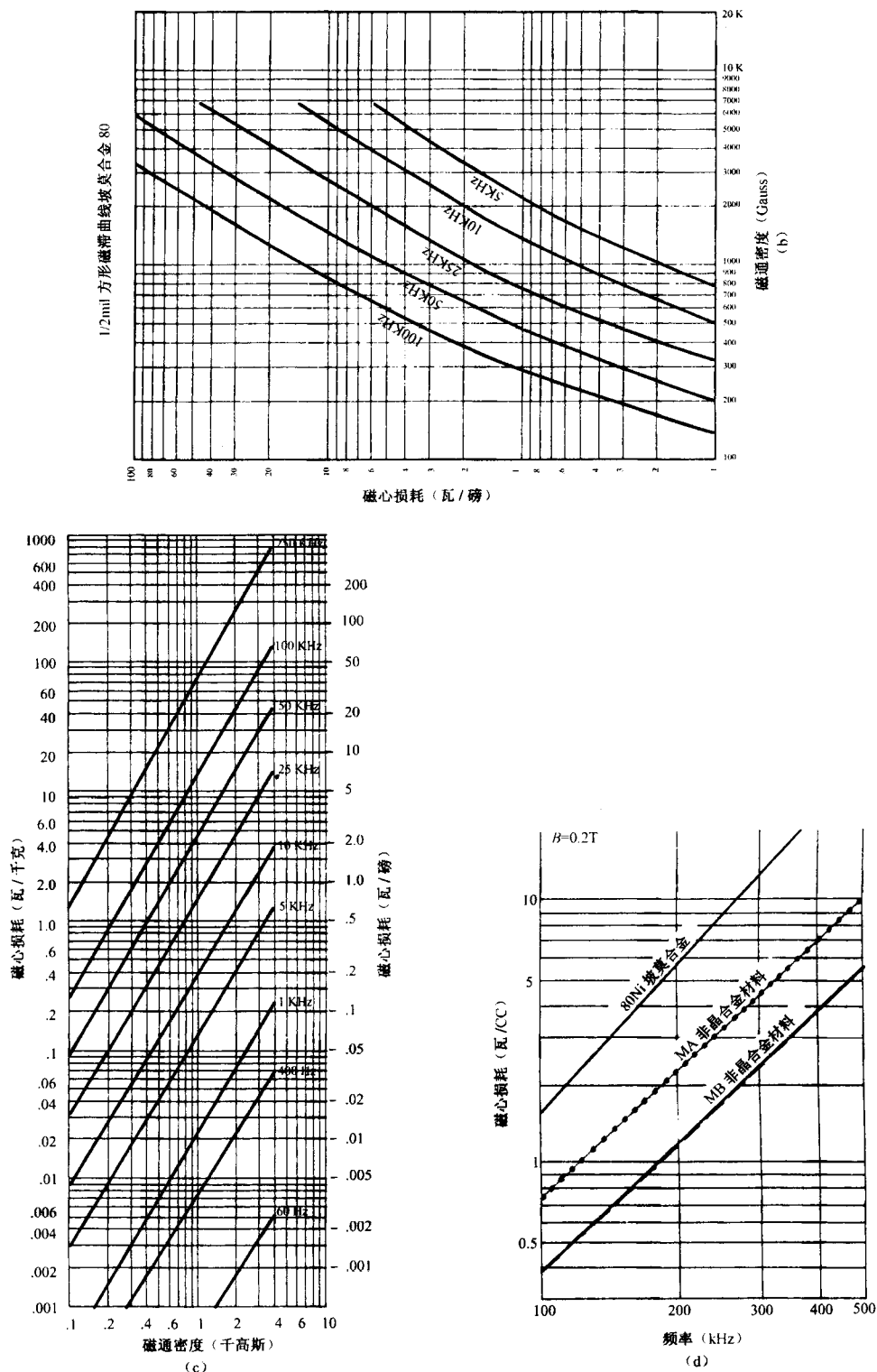


图 10.5 (a) 1mil Square Permalloy 材料的磁心损耗曲线。(由 Magnetics 公司提供) (b) 0.5mil Square Permalloy 的磁心损耗曲线。(由 Magnetics 公司提供) (c) 非晶材料 Metglas 2714A 的磁心损耗曲线。(由 Magnetics 公司提供) (d) Toshiba 公司的磁放大器材料的磁心损耗曲线。(watts/LB=56.8×watts/CC)。(由 Magnetics 公司提供)

新泽西州 Parsippany 市的 Allied Signal 公司和 Toshiba Corporation (美国的代理是纽约的 Mitsui 公司) 可以提供这种非晶材料。

Allied 的产品名称是 Metglas 2714A。Toshiba 有磁放大器 (MA) 材料和 MB 非晶磁性材料两种材料。MB 材料和 Metglas 2714A 材料在磁心损耗、矫顽力、磁滞回线的方形程度等特性方面很相似。磁放大器材料的特性处于 0.5mil 的 Square Permalloy 材料和 MB 材料之间。Magnetics 公司使用 Metglas 2714A 材料制造标准磁放大器的磁心。

图 10.5 (c) 所示是 Metglas 2714A 材料在不同频率、不同磁通密度下的磁心损耗曲线。图 10.5 (d) 给出了 Toshiba 公司的磁放大器材料、MB 材料和 0.5mil 的 Square Permalloy 材料在最大磁通密度为 2000G 时随着频率变化的磁心损耗曲线。注意图中的损耗单位是瓦特每立方厘米, 磁放大器和 MB 材料密度为 8.0g/cm^3 , 因此瓦特每磅的损耗即为 56.8 乘以瓦特每立方厘米的损耗。

Toshiba 公司的磁放大器材料、MB 材料和 0.5mil 的 Square Permalloy 材料工作在 100kHz 下的磁滞曲线如图 10.6 (a) 所示。图 10.6 (c) 所示为 Metglas 2417A、0.5mil 和 1mil 的 Permalloy 在 100kHz 下的磁滞曲线。

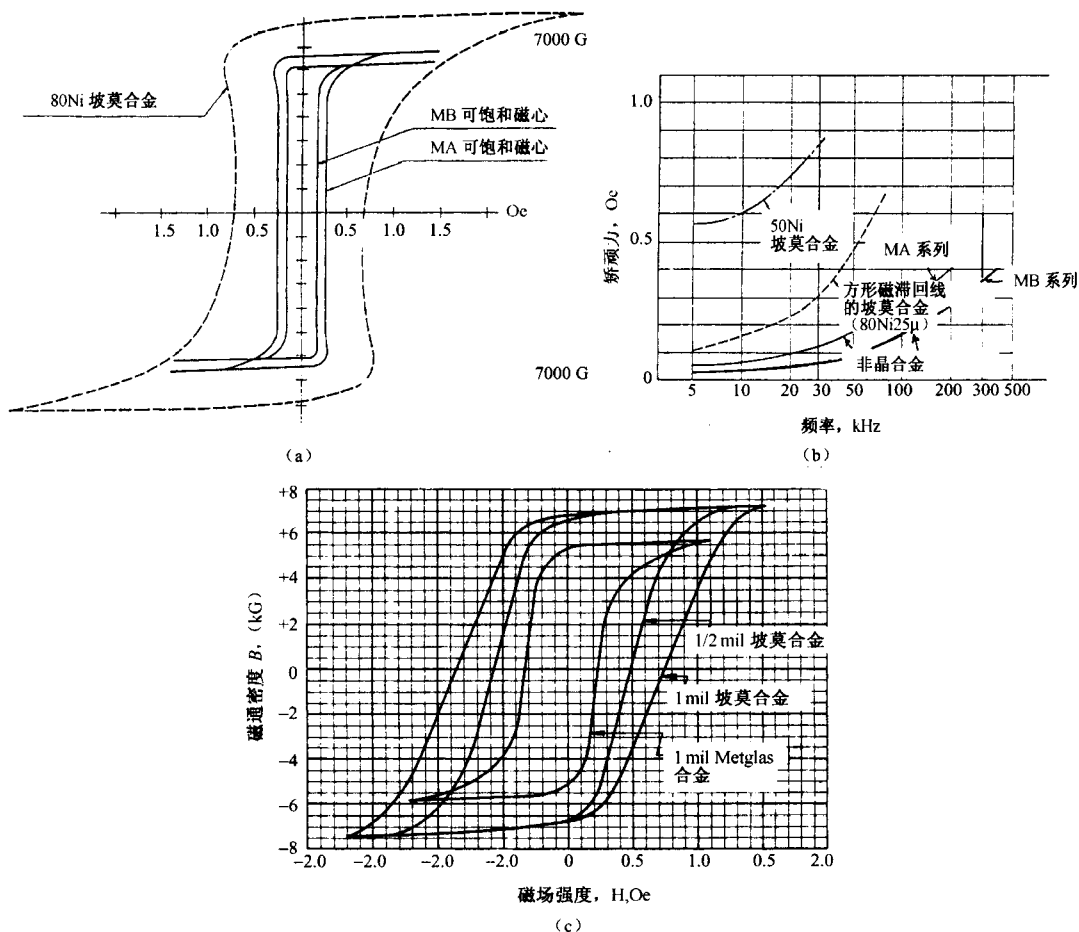


图 10.6 (a) 100kHz 时的磁滞曲线。(由 Toshiba 公司提供); (b) 矫顽力-频率曲线。(由 Toshiba 公司提供); (c) 1mil 和 0.5mil 的 Square Permalloy 材料及 Metglas 2714A 材料 100kHz 时的磁滞曲线(由 Magnetics 公司提供)

随着频率的增加,磁滞曲线上会出现一个特征:矫顽力随着频率的增加而增加,饱和磁密保持不变。损耗与磁滞曲线包围的面积成正比,这也解释了损耗随着频率的升高而增加的原因。Toshiba 公司的磁放大器、MB 材料和 Square Permalloy 材料的矫顽力随着频率变化的曲线如图 10.6 (b) 所示。

Toshiba 公司标准尺寸的磁放大器和 MB 磁心产品参数如图 10.7 (a) 和图 10.7 (b) 所示。Magnetics 公司的 Metglas 2417A 磁心产品参数如图 10.8(a)所示,Allied Signal 公司的 Metglas 2417A 磁心产品参数如图 10.8 (b) 所示。

型号	标准磁心尺寸 (mm)			成品尺寸 (mm)			有效截面积 (mm ²)	等效磁路长度 (mm)	峰值磁密 $2\phi_1 (\times 10^{-4} \text{WB})$	绝缘材料
	外径	内径	高度	外径	内径	高度				
MA 26×16×4.5W	26	16	4.5	29.5 max.	13.0 min.	8.0 max.	16.9	66.0	1800	Resin casing
" 22×14×4.5W	22	14	4.5	25.5 "	11.0 "	8.0 "	13.5	56.5	1440	"
" 18×12×4.5X	18	12	4.5	20.5 "	10.2 "	8.0 "	10.1	47.1	1080	Epoxy resin coating
" 14×8×4.5X	14	8	4.5	16.3 "	6.3 "	7.5 "	10.1	34.6	1080	"
" 10×6×4.5X	10	6	4.5	12.3 "	4.4 "	7.5 "	6.75	25.1	720	"
" 8×6×4.5X	8	6	4.5	10.0 "	4.4 "	7.5 "	3.38	22.0	360	"
" 7×6×4.5X	7	6	4.5	9.0 "	4.4 "	7.5 "	1.69	20.4	180	"

(a)

型号	标准磁心尺寸 (mm)			成品尺寸 (mm)			有效截面积 (mm ²)	等效磁路长度 (mm)	峰值磁密 $2\phi_1 (\times 10^{-4} \text{WB})$	绝缘材料
	外径	内径	高度	外径	内径	高度				
MB 21×14×4.5	21	14	4.5	24.0 max.	12.0 min.	8.5 max.	11.8	55.0	1105	Epoxy resin coating
" 18×12×4.5	18	12	4.5	20.5 "	10.2 "	8.0 "	10.1	47.1	935	"
" 15×10×4.5	15	10	4.5	17.5 "	8.3 "	7.5 "	8.44	39.3	790	"
" 12×8×4.5	12	8	4.5	14.3 "	6.3 "	7.5 "	6.75	31.4	629	"
" 10×7×4.5	10	7	4.5	12.3 "	5.4 "	7.5 "	5.06	26.7	476	"
" 9×7×4.5	9	7	4.5	11.0 "	5.4 "	7.5 "	3.38	25.1	315	"
" 8×7×4.5	8	7	4.5	10.0 "	5.4 "	7.5 "	1.69	23.6	158	"
" 15×10×3W	15	10	3.0	17.0 "	8.0 "	5.0 "	5.63	39.3	526	Resin casing
" 12×8×3W	12	8	3.0	14.0 "	6.0 "	5.0 "	4.5	31.4	420	"

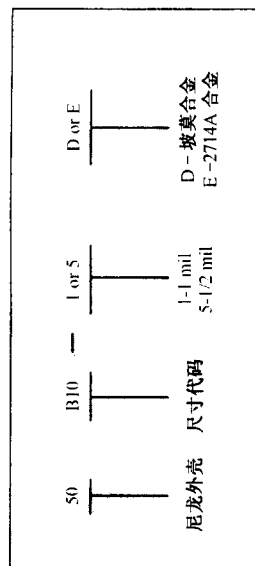
(b)

图 10.7 (a) 磁放大器用 MA 非晶磁心。(由 Toshiba 公司提供); (b) 磁放大器用 MB 非晶磁心 (由 Toshiba 公司提供)

器件型号	尺寸						磁心损耗 (W) @50kHz 2000 gauss (Max.)	ml cm	Ac cm ²	Wa cr m	磁心重量	Wa Ac cr m cm ² ($\times 10^{-6}$)
	内径		外径		高							
	磁心	外壳	磁心	外壳	磁心	外壳						
50B10-5D	.650	.580	.900	.970	.125	.200	.118	6.18	.051	348 000	2.7	.0177
50B10-1D	.650	.580	.900	.970	.125	.200	.22	6.18	.076	348 000	4.0	.0264
50B10-1E	.650	.580	.900	.970	.125	.200	.092	6.18	.076	348 000	3.5	.0264
50B11-5E	.500	.430	.625	.695	.125	.200	.044	4.49	.025	194 000	1.0	.0048
50B11-1D	.500	.430	.625	.695	.125	.200	.083	4.49	.038	194 000	1.5	.0074
50B11-1E	.500	.430	.625	.695	.125	.200	.034	4.49	.038	194 000	1.3	.0074
50B12-5D	.375	.305	.500	.570	.125	.200	.035	3.49	.025	99 000	8	.0025
50B12-1D	.375	.305	.500	.570	.125	.200	.066	3.49	.038	99 000	1.2	.0038
50B12-1E	.375	.305	.500	.570	.125	.200	.027	3.49	.038	99 000	1.04	.0038
50B45-5D	.500	.430	.750	.820	.250	.325	.194	4.99	.101	194 000	4.4	.0143
50B45-1D	.500	.430	.750	.820	.250	.325	.363	4.99	.151	194 000	6.6	.0214
50B45-1E	.500	.430	.750	.820	.250	.325	.149	4.99	.151	194 000	5.7	.0214
50B66-5D	.500	.430	.750	.820	.125	.200	.097	4.99	.050	194 000	2.2	.0071
50B66-1D	.500	.430	.750	.820	.125	.200	.182	4.99	.076	194 000	3.3	.0108
50B66-1E	.500	.430	.750	.820	.125	.200	.075	4.99	.076	194 000	2.9	.0108

*其他规格参考厂商资料

器件型号代码



材料特性

	2714A 合金	1/2mil 坡莫合金	1mil 坡莫合金
Bm (gauss min.)	5000	7000	7000
Br/Bm (min.)**	.9	.83	.80
H _i (oersted max.)**	.025	.045	.040
Core loss (w/lb max @50kHz, 2000gauss)	12	20	25

**测量条件: 400Hz CCFR 测试

(a)