

磁脉冲压缩器的优化设计

陈科文 丘军林

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

摘要: 结构体积和能量传输效率是设计磁脉冲压缩器时应考虑的主要因素。据此, 本文对两种优化设计方案进行了分析和比较, 并发现, 当各级压缩比均为2时, 磁心的总体积和总损耗均接近最小值。

关键词: 磁脉冲压缩器 磁心体积 磁心损耗

Optimum design of magnetic pulse compressors

Chen Kewen, Qiu Junlin

(Institute of Laser, HUST)

Abstract: The structure volume and energy transfer efficiency are the main design considerations of magnetic pulse compressors (MPC). Based on them, the analyses and comparisons of two optimal designs are given in this paper. It is also found that both of the total volume and loss of magnetic cores are nearly minimized for a given overall compression ratio by coupling a sufficient number of stages, each with a compression ratio of 2.

Key words: magnetic pulse compressor (MPC) magnetic core volume magnetic core loss

一 引 言

为了解决在高重复率 TEA CO₂ 和准分子激光器中开关元件的工作可靠性和使用寿命的问题, 人们采用了磁脉冲压缩技术^[1,2]。磁脉冲压缩器的特征参数为压缩比和传输的能量, 由负载和开关的要求决定。当给定这两个参数以后, 设计磁脉冲压缩器时应考虑的主要因素是: 结构体积和能量传输效率。体积小, 意味着磁脉冲压缩器重量轻、结构紧凑、费用少; 能量传输效率越高, 负载获得的能量越多, 压缩器耗能越少, 故对磁心冷却的要求也越低。因此, 优化设

- 3 Ineichen B, Liegeois C, Meyruetis P. Appl Opt 1982;(21):2209
- 4 Kryukov V V. Sov J Opt Tech 1991;58(3):131~133
- 5 Akaev A A, Kutanov A A, Abdrisaev B D *et al.* Soviet J Q E, 1992;22(8):730~734
- 6 Kutanov A A, Abdrisaev B D. Opt Spectrosc 1991;71(5):495~497
- 7 史密斯 H M. 全息记录材料. 北京: 科学出版社, 1984:218

- 8 罗振坤, 许澍翔, 谢忠明 *et al.* 应用激光, 1995;15(4):163~166, 148
- 9 罗振坤, 许澍翔, 谢忠明 *et al.* 激光技术, 1994;18(1):46~49
- 10 罗振坤, 许澍翔, 谢忠明 *et al.* 影像技术, 1995;(1):7~11

* * *
作者简介: 罗振坤, 男, 1954年出生。副研究员。从事激光技术、激光全息和光信息处理应用研究。



计的主要原则是:在满足脉冲压缩要求的前提下,使磁脉冲压缩器的体积尽可能小,能量传输效率尽可能高。本文针对这两方面对磁脉冲压缩器的设计进行了分析和讨论。

所考虑的磁脉冲压缩器为典型的 n 级 Melville 线路^[3](如图 1 所示),图中 SI_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为可饱和电感(即磁开关)。为了得到较完全的电荷转移,通常各级电容器取相同的容量。该磁脉冲压缩器的工作原理众所周知,下面不再赘述。为了分析的简化,忽略线路的寄生参数;先考虑无损耗的情形,再单独考虑磁脉冲压缩器的损耗;并假设可饱和电感只有两个状态:未饱和及饱和,其未饱和电感值为无穷大。

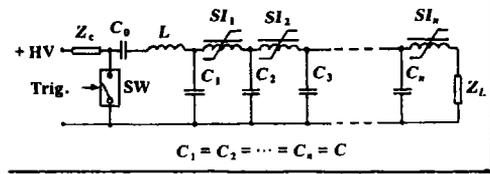


Fig. 1 Magnetic pulse compressor

二、理论分析

磁脉冲压缩器的总压缩比定义为:

$$G = (\tau_0)/(\tau_n) = g_1 \cdot g_2 \cdots g_n \quad (1a)$$

式中, $g_i = \tau_{i-1}/\tau_i$, 为第 i 级的压缩比 ($i=1, 2, \dots, n$), τ_i 为通过 SI_i ($i=0$ 时, 为 L) 的电流脉宽(即 C_{i+1} 的充电时间)。如果 C_i 谐振充电至最大电压时 SI_i 才饱和, 则 τ_{i-1} 为 SI_i 的饱和时间 $t_{i, \text{sat}}$ (即: $\tau_{i-1} = t_{i, \text{sat}}$)。所以各级压缩比也可以表示为:

$$g_i = \frac{t_{i, \text{sat}}}{t_{i+1, \text{sat}}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (1b)$$

而 $g_n = t_{n, \text{sat}}/\tau_n$ 。

忽略损耗, 并假设各级磁心的饱和磁导率 μ_{sat} 和磁感应强度的变化量 ΔB 均相等, 则 SI_i 的磁心体积可表示为^[4]:

$$V_{ci} = \frac{\pi^2 \cdot \mu_{\text{sat}} \cdot E_p}{S_f \cdot 4(\Delta B)^2} \cdot g_i^2 = K_v \cdot g_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $K_v = \frac{\pi^2 \cdot \mu_{\text{sat}} \cdot E_p}{S_f \cdot 4(\Delta B)^2}$; E_p 为压缩器传输的脉冲能量, S_f 为磁心的叠片系数。

(2)式表明:磁心的体积与传输的能量成正比, 与磁感应强度变化量的平方成反比, 与压缩比的平方成正比。对于每个压缩级, E_p 和 ΔB 可认为是常量, 而压缩比 g_i 在一定范围内可任意选择。

磁脉冲压缩器的能量损耗包括三个方面:可饱和电感的磁心损耗, 储能电容器的介电损耗以及导线绕组的欧姆损耗, 其中以磁心损耗为主。磁心损耗又包括磁滞损耗和涡流损耗, 又以涡流损耗为主, 下面的分析中只考虑涡流损耗。在磁脉冲压缩器中, 磁感应强度的变化率: $dB/dt \propto (1 - \cos \omega t)$, ω 为各级间电容充放电的角频率。根据饱和波理论^[5], 可用下式估算每半周磁化过程的涡流损耗:

$$E_{ei} = 1.77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \mu_{\text{sat}} \cdot d^2 \cdot g_i^2 \cdot E_p}{64 \cdot \rho \cdot B_s \cdot S_f} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t_i} \quad (3a)$$

式中, d 和 ρ 分别为磁性材料的厚度和电阻率, B_s 为饱和磁感应强度, Δt_i 为磁化时间 ($\Delta t_i \approx t_{i, \text{sat}}$)。根据(2)式, 上式可改写成:

$$E_{ei} = K_E \cdot \frac{V_{ci}}{t_{i, \text{sat}}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3b)$$

式中, $K_E = 1.77 \cdot \frac{d^2 (\Delta B)^3}{8\rho (2B_s)}$ 。可见,磁心的涡流损耗与其体积成正比,与饱和时间成反比。这一点与实验结果^[6]基本上一致。

1. 按最小体积进行优化设计

因为磁脉冲压缩器的费用和能耗随磁心的体积增大而增大,所以我们希望磁心体积越小越好。根据(1a)和(2)式,磁心的总体积为:

$$V_{ct} = K_v \cdot \left[g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_{n-1}^2 + \frac{G^2}{(g_1 g_2 \dots g_{n-1})^2} \right] = f(g_1, g_2, \dots, g_{n-1}, n) \quad (4)$$

可见, V_{ct} 为 g_1, g_2, \dots, g_{n-1} 和 n 的函数。可以证明,对于任意的压缩级数 n ,当满足: $g_1 = g_2 = \dots = g_{n-1} = g_n$ 时, V_{ct} 为最小值。对于给定的总压缩比 G , V_{ct} 为最小值时所对应的最佳级数为:

$$n_{v(optm)} = 2 \cdot \ln G \quad (5)$$

此时, $g_1 = g_2 = \dots = g_n = \sqrt{e}$, 与文献[7],[8]的结论相同。

2. 按最小损耗进行优化设计

磁心的能耗降低了脉冲压缩器的效率,并引起其本身发热,特别是在高重复率下工作时,必须采取有效的冷却措施,否则将导致系统性能下降,故设计脉冲压缩器时,应尽可能减小损耗。

根据(1b),(2),(3b)式,可得磁心的总损耗为:

$$E_{ct} = K \cdot \frac{g_1^2 + g_1 g_2^2 + \dots + g_1 g_2 \dots g_{n-1} g_n^2}{i_{1, sat}} \quad (6)$$

式中, $K = K_v \cdot K_E$ 。

对于给定的总压缩比 G ,当选取各级压缩比为:

$$g_i = 2^{\left[\frac{1-n \cdot (2^{n-1})}{(2^n-1)} \right]} \cdot G^{(2^{n-1})/(2^n-1)} \quad (7)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)时, n 级脉冲压缩器的磁心总损耗为最小值。如果取压缩级数为:

$$n_{E(optm)} = \ln G / \ln 2 \quad (8)$$

则 $g_1 = g_2 = \dots = g_n = 2$ 。下式表明:当各级压缩比均为 2 时,对于 $n_{E(optm)}$ 级脉冲压缩器,磁心的总体积和总损耗均为最小值。

三、两种优化设计的比较

1. 给定总压缩比为: $G = 64$, 对于不同的压缩级数,两种优化设计结果的比较(如图 2, 图 3 所示)。

当压缩级数较少时,两种优化设计结果的偏差较大,磁心的总体积和总损耗也比较大。增大级数,磁心的体积和损耗迅速减小,两种优化设计的结果接近。当级数为: $n = n_{E(optm)} = 6$ 时,两种设计的结果相同,并且相对于级数

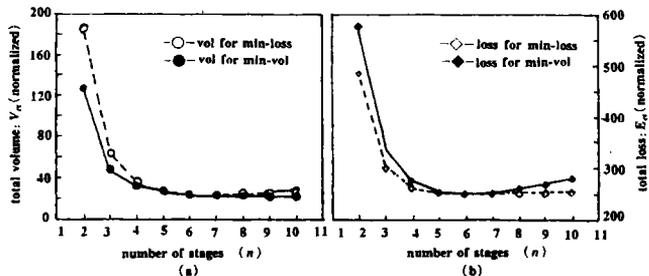


Fig.2 The total volume (a) or loss (b) (normalized) of cores as a function of the number of stages (n) for a magnetic pulse compressor with the overall compression ratio (G) being 64

为: $n = n_{v(optm)} = 8$ 的情况来说,磁心的损耗减小约 4%, 体积增大约 6%。当级数偏离 $n_{E(optm)}$ 时,磁心的损耗和/或体积有增大趋势。据此,我们认为:如果只考虑磁心的体积和损耗,选取每级压缩比为 2 左右(前级稍大于该值,后级稍小于该值,下面将述及)二者均接近最小值。这对于总压缩比较大和重复率较高的磁脉冲压缩器的设计非常重要,因为这时磁心的费用和冷却是所要考虑的主要因素。

同时也注意到,当要求磁脉冲压缩器具有较大的总压缩比时,若选取每级压缩比为 2(或 \sqrt{e}),结果优化设计所对应的最佳压缩级数 $n_{E(optm)}$ [或 $n_{v(optm)}$] 比较大。对于磁心的费用或冷却是唯一考虑的因素时,这种设计选择比较适宜。但是,实际上往往还要考虑其它部件(如电容器)的体积和费用以及其它损耗。因为电容器的数目与压缩级数成正比;而由图 3 可见,在很宽的范围内,级数的增加并不会导致磁心的总体积显著减小,所以应根据具体情况,适当地减少压缩级数,结果电容器的数目显著减小,而磁心的总体积和损耗都有所增加。基于这些考虑,磁脉冲压缩器通常取 3~4 级。在上面的例子中,相对于级数为 $n_{E(optm)}$ 的情况,若采用 4 级压缩,磁心的总体积和损耗分别增加 55% 和 35% 左右;而采用 3 级压缩,二者分别增加 1.7 倍和 1 倍左右(如图 3 所示)。

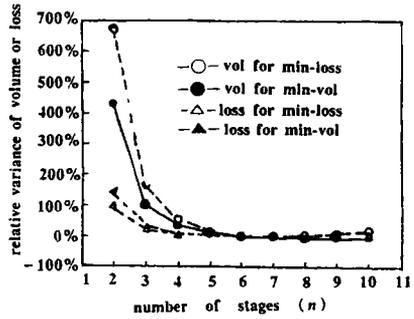


Fig.3 The relative variance of total volume or loss of cores for various number of stages (n) to that for optimal stage number [$n_{(optm)}$] with the overall compression ratio being 64 [$G = 64$, $n_{(optm)} = 6$]

2. 对于级数一定的磁脉冲压缩器,当总压缩比 G 取不同的值时,两种优化设计结果的比较。

下面针对通常采用的四级磁脉冲压缩器来进行比较和讨论。总压缩比 G 分别取: 5, 7.389, 16, 39, 81, 150 等不同的值。如果按最小体积设计,各级压缩比均相等,对应不同的 G 值分别取: 1.5, \sqrt{e} , 2, 2.5, 3, 3.5 等。不同的 G 值反映了压缩级数偏离 $n_{E(optm)}$ [或 $n_{v(optm)}$] 的程度,以上各值表明,所取压缩级数 ($n = 4$) 分别 $> n_{v(optm)}$, $= n_{v(optm)}$, $= n_{E(optm)}$, $< n_{E(optm)}$, $< n_{E(optm)}$, $< n_{E(optm)}$ 等。

磁心的总体积和总损耗分别如图 4a, b 所示。图中也画出了两种优化设计的相对偏差曲线。当 $G = 16$ 时, $n_{E(optm)} = 4$, 恰好为磁脉冲压缩器的级数,所以两种优

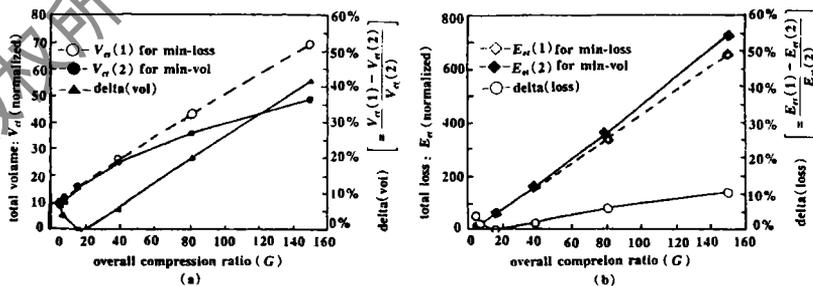


Fig.4 The total volume (a) or loss (b) of cores as a function of overall compression ratio (G) for a four-stage magnetic pulse compressor

化设计的结果相同。随着总压缩比增加,磁心的体积和损耗都增大,两种设计结果的偏差也增大。例如:当 $G = 150$ 时,相对于按最小体积设计来说,按最小损耗设计时磁心的总体积增加了约 42%,而总损耗减小了约 10.5%。

下面再从压缩比,磁心的体积和损耗在各压缩级上的分布情况进行比较。因为按最小磁心体积设计时,各级压缩比均相等,故其压缩比的分布图没有画出。按最小磁心损耗设计时,

各级压缩比的大小如图 5 所示。可以看出,对于较大的总压缩比 G , 其在各级的分布是:前一级的压缩比大于后一级的压缩比。相对于按最小体积设计来说,最后一级的压缩比减小了。

各级磁心体积的比较如图 6 所示。按最小损耗设计,当 G 值较大时前级磁心的体积明显大于后级的;但当 $G < 16$, 即 $n_{E(optm)} < 4$ 时,后级的体积反而大于前级的。而按最小体积设计,对于不同的 G 值,各级磁心的体积总是相等的。由(2)式可知,体积是按压缩比平方的规律变化的。以上分析表明,压缩级数偏离 $n_{E(optm)}$ 愈远,按最小损耗设计的磁脉冲压缩器,各级的压缩比和磁心体积相差愈大,而按最小体积设计,各级的这两个参数相等。

各级磁心损耗的比较如图 7 所示。随着总压缩比增大,各级磁心的损耗也增大,并且后一级的损耗大于前一级的,这是因为后级磁心的饱和时间比较短的原因。比较两种优化设计结果发现,按最小体积设计,损耗分布的不均匀性比较大。对于较大的总压缩比 G , 即压缩级数 ($n = 4$) 偏离 $n_{E(optm)}$ 较远,这种不均匀性更严重。当系统在高重复率下工作时,最后一级磁心发热将非常厉害,必须采取更有效的冷却措施。而按最小损耗设计,最后一级磁心的损耗减小了,例如,当 $G = 150$ 时,损耗减小了约 34%;并且损耗在各级磁心的分布更加均匀。

需要指出:以上损耗是按饱和和波理论计算的,即认为涡流损耗与磁感应强度的变化率 dB/dt 成正比,或者说,与饱和时间成反比,所以即使按最小损耗设计,最后一级的损耗也比第一级的要大得多。但是,实验表明^[9,10]:当磁心采用非晶合金材料时,由于动态磁化过程中畴壁结构变化的特殊性,只是对于较高的磁感应强度变化率或较短的饱和时间,按饱和和波理论计算的损耗值才比较接近实际测量的损耗值;若饱和时间较长,则前者小于后者。这说明:磁脉冲压缩器中前级的实际损耗比计算结果大,当按最小损耗设计时,实际损耗的分布比理论计算结果更加均匀。为了进一步提高损耗分布的均匀性,以避免高重复率工作时最后一级磁心过热,可在原基础上稍微减小后级的压缩比,增大前级的压缩比。当然,磁心的总体积会增大。

以上分析表明,因考虑到其它部件的体积和费用而选取压缩级数小于 $n_{E(optm)}$ 。若级数偏离 $n_{E(optm)}$ 越远,则按最小体积设计时后级损耗所占比例越大,发热越严重,冷却越困难;但按

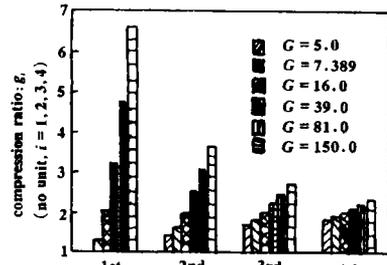


Fig. 5 The compression ratio of each stage for various overall compression ratio (G) and four compression stages ($n = 4$) for min-loss design

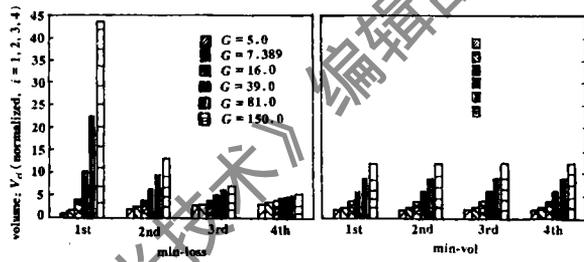


Fig. 6 The volume (normalized) of magnetic cores in each stage for various overall compression ratios (G) and four compression stages ($n = 4$)

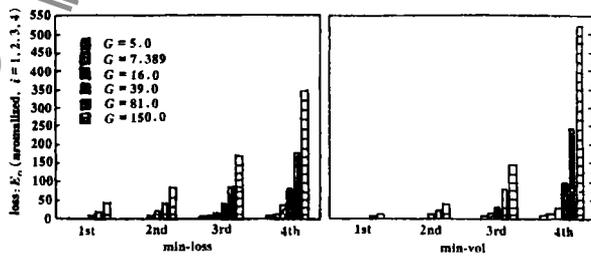


Fig. 7 The loss (normalized) of magnetic cores in each stage for various overall compression ratios (G) and four compression stages ($n = 4$)

最小损耗设计时,相对于前者来说,损耗分布更加均匀,有利于系统高重复率工作。

四、结 论

磁脉冲压缩器的两种优化设计方案各有其优缺点。对于较少的压缩级数,因磁心体积和损耗的减小相互矛盾,最优的设计方案应该是介于二者之间,由具体情况决定。通过增加级数,磁心总体积和损耗都减小了,两种优化设计的结果比较接近。若选取每级压缩比为2左右,磁心的总体积和总损耗均接近最小值。这对于总压缩比为较大和重复率较多的磁脉冲压缩器的设计很重要,并且相对于每级压缩比为 \sqrt{e} 的情况^[7,8],前者的压缩级数少因而更可取。当考虑到其它部件(如电容器)的体积和费用及其它损耗时,应减少压缩级数,磁心的体积和损耗有所增加;相对于按最小磁心体积设计来说,按最小磁心损耗设计时磁心的总体积要大些,但损耗要小些,并且损耗在各压缩级的分布更加均匀,有利于系统在高重复率下工作。

参 考 文 献

- 1 Sylvan A, Spiers G D, Johnstone A, *et al.* Rev Sci Instrum, 1990;61(7):1821
- 2 Hidekazu Hatanaka, Minoru Obara. Meas Sci Technol, 1991;(2):42
- 3 Melville W S. The use of saturable reactors as discharge devices for pulse generators. Proc IEE, Part 3(Ratio and Communication), London, England, 1951;98(53):185
- 4 Birx D L, Lauer E J, Reginato I L *et al.* Basic principles governing the design of magnetic switches. Lawrence Livermore Laboratory Report, UCID-18831, Livermore, California, U S A, 1980
- 5 Smith C H, Barberi L. Dynamic magnetization of metallic glasses. Digest of Technical Papers: The Fifth IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, Virginia, June 10-12, 1985:664
- 6 Tanaka H, Obara M. Efficiency characterization of repetition-rated magnetic modulators for pumping TEA CO₂ lasers and KrF excimer lasers. The Sixth IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, Virginia, 1987:719
- 7 Mathias, R A, Williams E M. Economic design of saturating reactor magnetic pulsers. Trans Amer Inst Electr Eng, Part I(Communications and Electronics), New York, 1955;74(18):169
- 8 Bredenkamp G L, Swart P H. A theoretical basis for the optimization of electromagnetic pulse compressors using saturable ferromagnetic cores. Proc 18th IEEE Power Modulator Symposium, Hilton Head, SC, U S A, June 1988:90
- 9 Smith C H. Magnetic losses in metallic glasses under pulsed excitation, IEEE Trans on Nuclear Science, NS-30, Part II, 1983;(4):2918
- 10 Smith C H, Nathasingh D, Liebermann H H. Thickness dependence of magnetic losses in amorphous FeBSiC ribbon under step dB/dt magnetization, IEEE Trans on Magnetics, MAG-20, 1984;(5):1320

* 作者简介:陈科文,男,1970年出生。硕士研究生。现从事二氧化碳激光器的研究工作。

收稿日期:1994-12-20

