

文章编号: 2095-4980(2019)05-0840-05

螺线管结构参数对脉冲磁场的影响

张广帅, 宋志敏, 孙 钧, 吴 平, 滕 雁, 曹亦兵, 范志强

(西北核技术研究所 高功率微波技术重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 研究了线圈间距、匝数、个数以及不锈钢套筒对脉冲磁体产生磁场的影响规律。在储能电容和电压不变的前提下, 研究表明: 增加线圈间距会导致磁感应强度降低, 磁力线包络增大, 但总电流达到峰值时刻减小; 增加线圈匝数, 峰值电流明显减小, 会降低磁感应强度, 但有利于抑制磁力线包络; 增加并联线圈个数, 有利于产生较长的均匀区, 但是在供能一定的条件下, 磁场强度有所降低, 同时总电流达到峰值时刻减小。总体来看, 在一定均匀区长度的设计要求下, 减少单个线圈匝数, 增加并联线圈个数, 能够得到磁感应强度更大、均匀性更好的磁场, 但要考虑线圈承载电流的能力。另外, 不对称的阴阳极金属结构会导致磁场不对称分布, 且磁感应强度达到峰值时刻要晚于总电流达到峰值的时刻。

关键词: 高功率微波; 螺线管脉冲磁体; 均匀磁场

中图分类号: O532

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0840

Effect of solenoid pulsed magnet parameters on magnetic field

ZHANG Guangshuai, SONG Zhimin, SUN Jun, WU ping, TENG Yan, CAO Yibing, FAN Zhiqiang

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: The effect of structural parameters of solenoid pulsed magnet on magnetic field is studied, including the number of turns, the number of coils, the distance between multi-coils and stainless steel cylinder. Under the condition that the capacitor storing energy and the voltage which supplies power are both constant, the amplitude of magnetic flux density is reduced and the fluctuation of magnetic field lines is increased contrarily when increasing the distance between multi-coils, but the total current reaches its peak earlier. Increasing the number of turns in each coil can obviously reduce the peak of total current and thus the amplitude of magnetic flux density. However, it is beneficial for reducing the fluctuation of magnetic field lines. With the increasing of coils number, the length of uniform magnetic field region becomes longer, the amplitude of magnetic flux density is reduced with constant supplied energy, and the total current reaches its peak earlier. On the whole, when the length of uniform magnetic field region is constant, decreasing the number of turns and increasing the number of coils are both effective ways to obtain a stronger magnetic flux density and better uniformity. But it is limited by the capacity of the coils to carry current. In addition, the stainless steel cylinder causes the distribution of magnetic field to be asymmetrical, and the amplitude of magnetic flux density reaches its peak later than the total current does.

Keywords: High Power Microwave(HPM); solenoid pulse magnet; uniform magnetic field

高功率微波(HPM)源通常需要外加引导磁场来约束产生 HPM 的强流相对论电子束^[1-5]。超导磁体、永磁体和脉冲磁体是产生引导磁场的 3 种主要手段。超导磁体可产生稳恒磁场, 适合重频运行, 输入电功率较低, 但技术复杂, 且需要外加冷却装置^[6-7]; 永磁体能产生较长均匀区的磁场分布^[8], 且不需要外部供能, 但磁场大小和位型分布固定, 不能随应用场景灵活调节; 尽管螺线管磁体需要由电容器对励磁线圈放电产生脉冲磁场, 但具有磁场大小和位型分布方便调节、成本较低、操作和维护容易等优势^[9-14], 已广泛用于 HPM 实验系统中。基于此, 本文主要研究线圈匝数以及线圈的间距对磁场强度和磁场分布的影响规律, 分析阴阳极金属结构对脉冲磁场产生的影响。

收稿日期: 2018-03-03; 修回日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401367)

1 螺线管磁体模型

实际 HPM 源系统中的脉冲磁体通常由多个线圈并联构成, 且每个线圈是由多个半径相同和半径不同的小线圈串联绕制而成(见图 1)。各线圈以 HPM 产生器件的外筒作为内部衬套支撑结构, 线圈之间利用一定厚度的高分子挡板进行绝缘隔离。此外, 在脉冲磁体的左侧还存在脉冲功率驱动源等金属结构。本文主要基于真实的脉冲磁体工作环境建立物理模型, 以期获得更加接近真实的研究结果。所采用的结构参数和物理参数如下: 驱动脉冲磁体的电容器总电容 $C_m=7.2 \text{ mF}$, 充电电压 $U_c=1 \text{ kV}$ 。脉冲磁体内半径 $R_{mi}=45 \text{ mm}$ 、外半径 $R_{mo}=85 \text{ mm}$, 绕制线圈的导线直径 $D_{wire}=2 \text{ mm}$, 每个线圈的轴向长度 $L_m=48 \text{ mm}$, 线圈间距为 d , 每个线圈匝为:

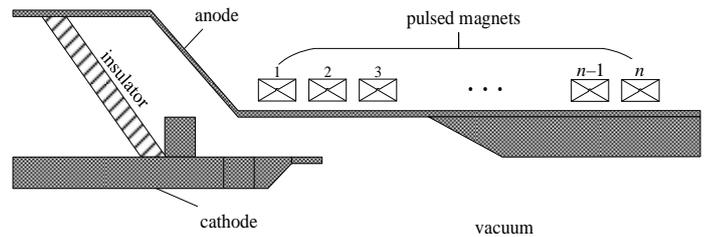


Fig.1 Schematic of the HPM source
图 1 高功率微波源系统剖面结构示意图

$$N = F \frac{(R_{mo} - R_{mi}) \times L_m}{\pi(D_{wire} / 2)^2} \tag{1}$$

式中 F 为填充系数, 取值在 0~1 之间, 本文取 $F=0.6$ 。对计算的匝数 N 向下取整。

2 数值模拟

2.1 线圈的间距和匝数对磁场的影响

首先, 不考虑图 1 中的金属阴阳极结构, 只对脉冲磁体进行建模仿真, 构建 9 个线圈, 通过调整脉冲磁体外半径 R_{mo} 来改变线圈匝数, 模拟结果如图 2 和图 3 所示。

图 2(a)给出了不同匝数条件下磁感应强度随线圈间距的变化规律, 磁感应强度取自相应条件下的总电流峰值时刻。可以看出, 磁感应强度随着线圈间距的增加而减小。这是因为间距的增加导致均匀区变长, 而供能是一定的, 因此产生的磁场强度下降。另外, 减小匝数能够提高磁感应强度幅值。这是因为在电压一定的条件下, 串联线圈匝数(电感)的减少会导致总电流峰值增大, 且峰值电流增加量超过线圈匝数减小量, 总的安匝数 NI 变大, 因此磁感应强度随之增加^[15]。

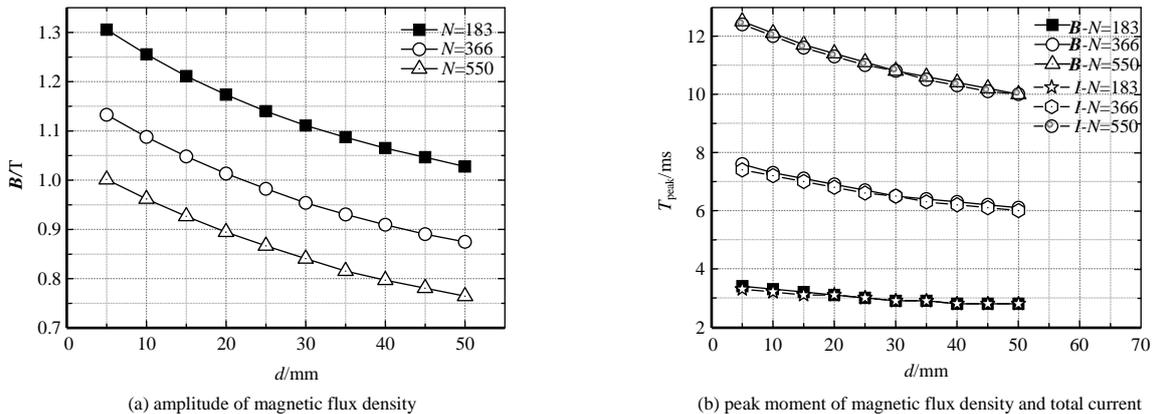


Fig.2 Magnetic flux density and its peak moment under different distances between multi-coil and turns
图 2 磁感应强度及峰值时刻随线圈间距和匝数变化

图 2(b)给出了均匀区内磁感应强度达到峰值时刻和总电流达到峰值时刻的比较, 可以看出, 增加线圈间距或减少线圈匝数, 都有利于减小总电流到达峰值所需要的时间。这是由于间距的增加和匝数减小会导致螺线管总电感减小, 使 RLC 电路的时间常数减小, 因此总电流达到峰值时刻提前。另一方面可以看出, 总电流达到峰值时刻和均匀区磁感应强度达到峰值时刻基本一致, 这是因为均匀区一定时, 总电流最大, 脉冲磁体储存磁能最大, 因此磁场最强。

图 3 给出了通过阴极刀口的磁力线包络随线圈间距和匝数的变化规律, 磁力线包络由均匀区内磁力线径向最大位置和最小位置的差确定。可以看出, 磁力线包络随线圈间距增加而增大。这是因为线圈中心位置为磁感应强度极大值, 磁力线最密; 而线圈之间的中心位置为磁感应强度极小值, 磁力线最稀疏, 从而使得磁力线产生径向包络。当线圈间距增大时, 磁感应强度极值点间差值趋于明显, 导致包络变大。进一步研究发现, 增加线圈匝数

可以抑制磁力线包络，特别是当线圈间距较大时，抑制效果更为明显。

2.2 并联线圈个数对磁场的影响

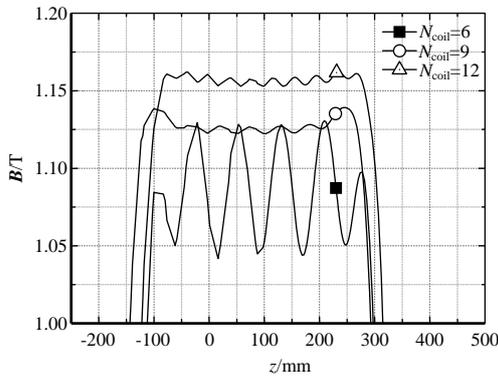
不考虑图 1 中的金属阴阳极结构，线圈间距 $d=5\text{ mm}$ ，每个线圈内包含 366 匝小线圈，针对不同的并联线圈个数进行模拟计算。

表 1 给出了磁感应强度、峰值电流以及到达峰值电流的时刻随并联线圈个数的变化情况。可以看出，在线圈匝数和间距一定的条件下，随着并联线圈个数的增加，磁感应强度不断减小。原因同样是间距的增加导致均匀区变长，而供能是一定的，导致产生的磁场强度下降；此外，总峰值电流随线圈个数的增加而增大，而达到峰值的时刻减小，这是由于并联线圈越多，总电感越小，电路的时间常数越小。时间常数的减小可减少螺线管单个放电周期的能量损耗，有利于提高脉冲磁体的重频运行能力。

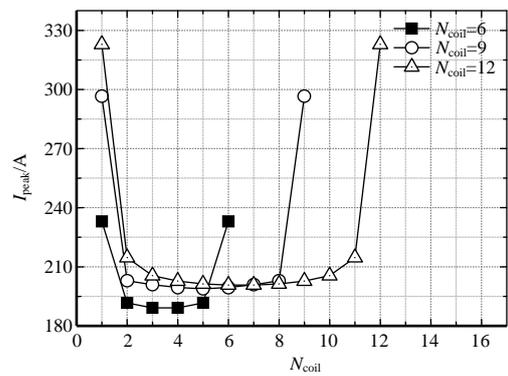
2.3 特定均匀区长度的磁场设计

基于以上研究规律，设计了磁场均匀区长度为 350 mm 的螺线管磁体，其中线圈总匝数固定为 2 196 匝。总目标是在电容储能不变的情况下，尽可能提高磁感应强度和减小磁场包络。前文的研究已经表明，每个线圈匝数越少，并联线圈越多，螺线管总峰值电流越大。因此，当总匝数一定时，总的安匝数 NI 增加，可提高磁场强度。同时，在均匀区长度一定的条件下，随着并联线圈增加，线圈间距减小，因此可提高磁场的均匀度。

图 4(a)为不同结构的螺线管脉冲磁体产生的对称磁场分布，与上述研究结果一致，在小线圈总匝数和均匀区长度固定的条件下，并联线圈越多，磁场越强，均匀度越好。但对比发现，磁场强度涨幅并不十分明显，结合每个线圈内部的电流分布发现(图 4(b))，随着并联线圈个数的增加，处在均匀区的线圈(不包括两端的线圈)内部电流有所增加，但增加的幅度不大，因此磁场强度增加有限。



(a) space distribution of magnetic flux density



(b) distribution of the current in each multi-coil

Fig.4 Optimization of magnetic field under the fixed total number of turns and uniform length

图 4 总匝数和均匀区长度固定条件下磁场优化设计

表 2 为不同脉冲磁体结构的性能参数，可以看出， $N_{coil}=12$ 时，除了磁场强度和均匀性的优势外，总电感和总电流到达峰值时刻也最小。可以类推，将线圈分成更多的线圈并联，可进一步提高性能。但代价是电路的总电流和每个线圈内部的电流都有增加，设计磁场时需要考虑每个线圈能承受的最大电流。

2.4 阴阳极金属结构对磁场的影响

考虑图 1 中的阴阳极金属结构。采用 9 个线圈并联，每个线圈内包含 366 匝小线圈。使有无阴阳极金属结构成为单一变量，进而研究其影响。

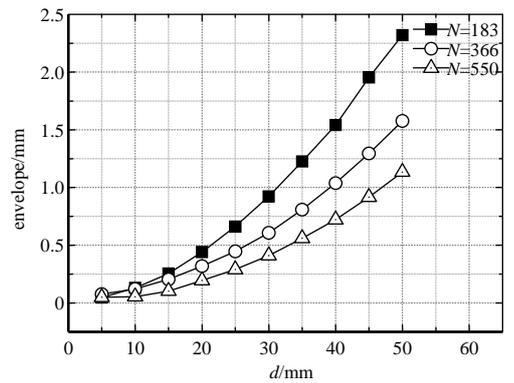


Fig.3 Envelope of magnetic field lines under different distances between multi-coil and turns

图 3 磁力线包络随线圈间距和匝数变化

表 1 并联线圈个数变化影响

Table1 Effect of number of parallel coils on the magnetic field

N_{coil}	B/T	T_{I-peak}/ms	I_{peak}/A
3	1.71	11.5	1 227
6	1.34	8.8	1 995
9	1.13	7.6	2 693

表 2 不同脉冲磁体结构的性能参数

Table2 Performance parameters of different pulsed magnets

N_{coil}	T_{I-peak}/ms	I_{peak}/A	inductance/mH
6	7.7	1 227	3.64
9	5.0	1 995	1.48
12	3.8	2 693	0.86

表3给出了阴阳极金属结构对磁感应强度和峰值电流的影响规律,表中 I_{peak} 代表峰值电流, B_{peak} 代表峰值磁感应强度,Vc(Vacuum)代表阴阳极结构用真空填充,SS(Stainless Steel)代表阴阳极结构为不锈钢材料。可以看出,引入阴阳极金属结构,导致峰值电流减小,均匀区磁场变弱。这是因为从集总参数的角度看,增加阴阳极金属结构等效于增加整个脉冲磁体系统的电感,导致峰值电流减小,磁场变弱。此外,表3还给出了阴阳极金属结构对总电流和磁感应强度达到峰值时刻的影响,在不考虑阴阳极金属结构时,总电流和磁感应强度达到峰值时刻基本一致。加入阴阳极金属结构后,总电流达到峰值时刻稍有增加,并不明显;但磁感应强度到达峰值时刻明显延迟。因此,可以考虑高功率微波器件不工作在总电流达到峰值的时刻,而是工作在稍后的均匀区磁场达到最强的时刻。

图5给出了带阴阳极金属结构的磁场位型分布,阴极刀口位于245 mm的位置。很明显,磁场位型在轴向上不再呈对称分布。这是因为阴阳极金属结构在时变电磁场中会产生感应时变电流,进而产生反向感应磁场,削弱螺线管产生的磁场。在阳极筒较厚的均匀区部分,这种削弱效果更为明显。此外,总电流达到峰值的时刻是7.6 ms,此时的磁感应强度并不是最大,且均匀性也不是最好。总体上看,磁感应强度先增大后减小,但均匀区部分的磁场和阴极侧第2个线圈内部附近(在 $z=200$ mm附近)的磁场变化不同步,阴极侧第2个线圈内部附近的磁场在8.5 ms之后开始下降,而均匀区部分的磁场在9 ms之后才开始下降,此时是均匀区磁场最强的时刻,也是整个磁场均匀性最好的时刻。

3 结论

本文研究线圈的间距、匝数、个数以及阴阳极金属结构对脉冲磁体产生磁场的影响规律。在储能电容和电压不变的前提下,研究表明:增加线圈间距会导致磁感应强度降低,磁力线包络增大,但总电流和磁感应强度达到峰值的时刻都会提前;增加线圈匝数,峰值电流明显减小,会降低磁感应强度,同时由于电感增加导致时间常数增加,且螺线管脉冲磁体的重量会增加,但有利于抑制磁力线包络;并联线圈个数的增加,总电感减小,时间常数减小,有利于产生较长的均匀区,但在供能一定的条件下,磁场强度有所降低。总体来看,在一定均匀区长度的设计要求下,减少线圈匝数,增加并联线圈个数,可得到磁感应强度更大、均匀性更好的磁场,但要考虑线圈承载电流的能力。另外,阴阳极金属结构会导致磁场出现不对称分布、磁感应强度达到峰值时刻要晚于总电流达到峰值的时刻,因此需要结合实际结构来进行螺线管磁体的优化设计。本文研究结果可以为相关领域的螺线管磁体优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] CHEN Changhua, LIU Guozhi, HUANG Wenhua, et al. A repetitive X-band relativistic backward-wave oscillator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(3):1108-1111.
- [2] GRISHIM D M, GUBANOV V P, KOROVIN S D, et al. High-power subnanosecond 38 GHz microwave pulses generated at a repetition rate of up to 3.5 kHz[J]. Technical Physics Letters, 2002, 28(19):24-31.
- [3] ZHANG Jun, ZHONG Huihuang, JIN Zhenxing, et al. Studies on efficient operation of an X-band oversized slow-wave HPM generator in low magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(8):1552-1557.
- [4] CHEN Zaigao. Research on effect of emission uniformity on X-band relativistic backward wave oscillator using conformal PIC code[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(7):073115.
- [5] WU Ping, SUN Jun, CHEN Changhua. Lifetime of metallic explosive emission cathodes and microscopic explanations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8):2279-2285.
- [6] LIU Liyuan, ZHU Yunpeng, WANG Hongwei, et al. Research progress of superconducting magnet system cooled by solid nitrogen[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2015, 37(6):481-488.
- [7] ZHANG Haifeng, LIU Bentian, ZHANG Huabiao, et al. Development of low temperature superconducting magnet for 140 GHz Cyclotron oscillators[J]. Vacuum Electronics, 2017(2):55-58.

表3 有无阴阳极金属结构的结果对比

Table 3 Comparison of results of metal structure with or without cathode and anode

	B_{peak}/T	I_{peak}/A	$T_{B\text{-peak}}/\text{ms}$	$T_{I\text{-peak}}/\text{ms}$
Vc	1.144	1 335	7.5	7.4
SS	0.917	1 205	9.0	7.6

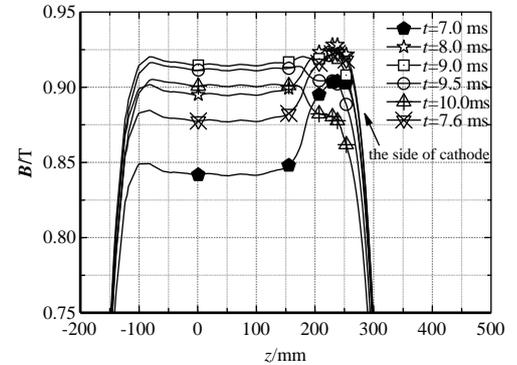


Fig.5 Space distribution of magnetic field

图5 磁场空间分布

- [8] LI Wei,ZHANG Jun,LI Zhiqiang,et al. A portable high power microwave source with permanent magnets[J]. Physics of Plasmas, 2016,23(6):063109.
- [9] 刘国治,邱爱慈,苏建仓,等. 1.5 特斯拉脉冲磁场装置的研制[J]. 强激光与粒子束, 1992,4(1):41-46. (LIU Guozhi,QIU Aici,SU Jiancang,et al. Development of 1.5 T pulsed magnetic field device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1992, 4(1):41-46.)
- [10] 吴撼宇,孙铁平,蒯斌,等. 对称脉冲强磁场发生器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2008,20(4):692-696. (WU Hanyu,SUN Tieping,KUAN Bin,et al. Development of symmetrical pulsed high magnetic field generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008,20(4):692-696.)
- [11] SWENSON C A,GAVRILIN A V,JAMES R S. 80 T magnet operational performance and design implications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008,18(2):604-607.
- [12] 杨晓亮,罗光耀,黄华,等. 基于超级电容储能方式的秒级磁场[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,15(6): 1004-1008. (YANG Xiaoliang,LUO Guangyao,HUANG Hua,et al. Design of second-level magnetic field based on storage supercapacitor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,15(6):1004-1008.)
- [13] VANACKEN J,LI L,ROSSEEL K,et al. Pulsed magnet design software[J]. Physica B:Condensed Matter, 2001,294(4): 674-678.
- [14] HERLACH F,PENG T,VANACKEN J. Elements of pulsed magnet design[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2006(51):599-602.
- [15] 电子管设计手册编辑委员会. 微波电子管磁路设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1984. (Editorial Board of Electron Tube Design Handbook. Microwave electron tube magnetic circuit design handbook[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1984.)

作者简介:



张广帅(1993-), 男, 吉林省榆树市人, 硕士, 主要研究方向为高功率微波技术.email: zhangguangshuai@nint.ac.cn.

宋志敏(1970-), 男, 河南省许昌市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波源及相关领域理论和实验研究.

孙 钧(1978-), 男, 山东省安丘市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波技术及强流电子束物理.

滕 雁(1982-), 男, 陕西省宝鸡市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波器件.

范志强(1993-), 男, 吉林省白山市人, 博士, 主要研究方向为高功率微波技术.

吴 平(1988-), 男, 湖南省益阳市人, 博士, 主要研究方向为高功率微波技术.

曹亦兵(1983-), 男, 湖南省益阳市人, 博士, 主要研究方向为高功率微波源及相关领域理论和实验研究.