

脉冲强流源干扰场的估算 及抑制方法研究

王春奎 郑 融

(中国科学院力学所)

摘要 本文介绍了用激光引爆炸药过程中, 测量炸药在靶内引起的应力波历史时, 激光器的冲击大电流在周围空间引起强烈的电磁干扰。文章中估算了周围空间的场强, 说明了编织网电缆线、缝隙、孔洞, 对电磁场的泄漏, 需要采用全封闭型的屏蔽, 才能较好地抑制干扰, 获得比较理想的屏蔽效果。

关键词 应力波, 冲击大电流, 电磁干扰, 屏蔽。

1 引言

目前不少高电压大电流的脉冲设备, 如脉冲强流电子束、电子束控制激光器等, 还处于实验室的运行阶段, 所以防辐射、防干扰的措施远远不足。在这些设备上, 往往还要测试很多自身参数, 以及作为各种特殊研究工具, 将它们投入一些研究测试工作中。以脉冲形式运行的高电压、大电流设备, 免不了要产生强烈的电磁干扰, 必须排除, 否则将得不到理想的结果, 甚至会使测量结果不可信。我们以电子束控制的激光器为工具, 进行研究工作, 该设备放电引起的干扰一直妨碍测量工作。我们对该问题进行了初步分析、研究, 估算了干扰场强, 并采取了一些防干扰的措施, 使干扰问题得到了初步解决。

2 场强估算

我们要处理的是电子束控制的脉冲 CO_2 激光器放电引起的干扰。它是一个高电压大电流放电情况下的电磁干扰问题。应对其场的性质及量级有个估计, 以便采取对症措施。尽管从理论上由麦克斯韦的电磁场方程可以解出, 但是, 对实际情况进行求解, 却十分繁杂。在不失本质的情况下, 我们对放电回路及传播介质等, 都做了一定的简化。

电子束激光器电源是由两个独立的回路构成的。运行时, 两回路各自的储能电容相继放电, 使激光器输出激光脉冲。两次放电都对测量产生干扰。因为它们是两个不相关独立回路, 形式上又完全类似。我们只讨论一个回路的情况。回路参数为: 放电峰值电流约 12000A, 电

1990年7月7日收到。

压 50000V, 回路电阻 4Ω , 电感 $1\mu\text{H}$, 储能电容 $4\mu\text{f}$.

下面对放电引起的电磁场进行估算。假设电子束激光器的放电电源回路是由一个矩形回路构成的, 矩形的边长为 $a=0.4\text{m}$, $b=0.3\text{m}$ 。在数学处理中, 忽略电容等所占的体积, 设为空间的一个点, 并忽略导线的截面积, 认为导线中的电流为线电流, 它沿逆时针方向流动, 它形成电磁场在均匀且各向同性的介质中传播。还假设该矩形的 a 边与 x 轴平行, b 边与 y 轴平行。矩形四个顶点座标为 (x_0, y_0) , (x_0, y_0+b) , (x_0+a, y_0+b) , (x_0+a, y_0) , 如图 1 所示。设被测点在该坐标系的 z 轴上, 即过原点 o 垂直于图 1 所在纸面的直线上。故我们只要能求出 z 轴上的场分布, 也就知道各被测点上的干扰场强性质及量级了。

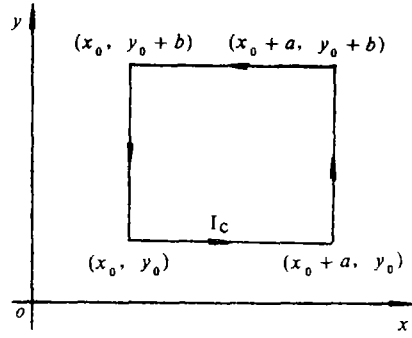


图 1 放电回路座标

根据电动态位波动方程的解^[2], 便可得 z 轴上矢量滞后位、矢量滞后磁位。通过矢量磁位作适当的运算, 可得到 z 轴上各点的磁场强度。

根据电动态位波动方程的解^[2], 便可得 z 轴上矢量滞后位、矢量滞后磁位。通过矢量磁位作适当的运算, 可得到 z 轴上各点的磁场强度。

$$\begin{aligned} \vec{H} = & \frac{A}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial F_4}{\partial z} - \frac{\partial F_3}{\partial z} \right) T_1 + \left(\frac{\partial G_3}{\partial z} - \frac{\partial G_4}{\partial z} \right) T_2 \right] \vec{i} \\ & + \frac{A}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial F_1}{\partial z} - \frac{\partial F_2}{\partial z} \right) T_1 + \left(\frac{\partial G_2}{\partial z} - \frac{\partial G_1}{\partial z} \right) T_2 \right] \vec{j} \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$F_1 = \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_1)^{-\frac{1}{2}} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B-D}{v} \right)^n}{n!} \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_1)^{\frac{n-1}{2}} dx$$

$$G_1 = \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_1)^{-\frac{1}{2}} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B+D}{v} \right)^n}{n!} \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_1)^{\frac{n-1}{2}} dx$$

$$F_2 = \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_2)^{-\frac{1}{2}} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B-D}{v} \right)^n}{n!} \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_2)^{\frac{n-1}{2}} dx$$

$$G_2 = \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_2)^{-\frac{1}{2}} dx + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B+D}{v} \right)^n}{n!} \int_{x_0}^{x_0+a} (x^2 + d^2_2)^{\frac{n-1}{2}} dx$$

$$F_3 = \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_3)^{-\frac{1}{2}} dy + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B-D}{v} \right)^n}{n!} \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_3)^{\frac{n-1}{2}} dy$$

$$G_3 = \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_3)^{-\frac{1}{2}} dy + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B+D}{v} \right)^n}{n!} \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_3)^{\frac{n-1}{2}} dy$$

$$F_4 = \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_4)^{-\frac{1}{2}} dy + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B-D}{y}\right)^n}{n!} \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_4)^{\frac{n-1}{2}} dy$$

$$G_4 = \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_4)^{-\frac{1}{2}} dy + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{B+D}{y}\right)^n}{n!} \int_{y_0}^{y_0+b} (y^2 + d^2_4)^{\frac{n-1}{2}} dy$$

$$T_1 = e^{-(B-D)t}, \quad T_2 = e^{-(B+D)t}$$

$$A = V_0 / \sqrt{R^2 - 4L/C_0}, \quad B = R/2L, \quad D = \sqrt{(R/2L)^2 - 1/LC_0}$$

$$d^2_1 = y^2_0 + z^2, \quad d^2_2 = (y_2 + b)^2 + z^2, \quad d^2_3 = (x_0 + a)^2 + z^2, \quad d^2_4 = x^2_0 + z^2.$$

再根据麦克斯韦第一方程, 导出载有电流密度 I 的导体以外的自由空间的电场, 可得到 z 轴上各点的电场强度为

$$\begin{aligned} \vec{E} = & \frac{A}{4\pi\epsilon} \left[\frac{T_1}{B-D} \left(\frac{\partial^2 F_2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 F_1}{\partial z^2} \right) + \frac{T_2}{B+D} \left(\frac{\partial^2 G_1}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 G_2}{\partial z^2} \right) \right] \vec{i} \\ & + \frac{A}{4\pi\epsilon} \left[\frac{T_1}{B-D} \left(\frac{\partial^2 F_3}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 F_4}{\partial z^2} \right) + \frac{T_2}{B+D} \left(\frac{\partial^2 G_4}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 G_3}{\partial z^2} \right) \right] \vec{j} \end{aligned} \quad (2)$$

z 轴上的电场和磁场矢量解析表达式已如 (1) 和 (2) 式所示。从防干扰的角度, 电场和磁场的变化量是我们关注的, 因为变化的电场和磁场才引起感应信号, 即干扰信号。为此, 用图解法给出几个主要参数的变化引起的电、磁场的变化。由 (1) 和 (2) 式计算的结果画在图 2 和图 3 上。

3 全封闭屏蔽法

由图 2 和图 3 可以看到, 场强随着距放电回路距离的增加, 衰减非常快。计算表明, 从 2.5m 到 25m 间距增加了一个量级, 场强却衰减了四到五个量级。因此, 远离放电区是减少干扰的一个好办法。

计算表明, 在我们的测试点上, 辐射电场达到 10^4V/m 的量级, 磁场达到 0.1A/m 的量级。若测量布线看作辐射电磁场中的接收天线, 其有效高度设为 1mm , 则接收的感应电压达到 $V = E_h \approx 10 \text{V}$, 完全可以与被测信号抗衡。实际上, 在采用简单屏蔽措施后, 干扰信号也把有用信号湮没了, 见图 4。除了强电场外, 还存在强的磁场干扰。采用屏蔽电场的办法对磁场进行屏蔽, 常常不能奏效。因为磁场比电场更难屏蔽, 对电场有效的办法, 不一定适于磁场, 但对磁场有效的办法, 一般对电场也同时有效。从这一点出发, 我们集中解决磁屏蔽问题, 屏蔽效果决定于缝隙和孔洞引起的漏泄, 而不是材料本身的屏蔽效果^[1]。通常的同轴屏蔽线, 多为编织网作的屏蔽体, 而非无缝无孔的, 与无缝屏蔽体相比效果差。文献[1]认为, 它们可以差 $5 \sim 30 \text{db}$ 。在强的电磁干扰场中, 它的屏蔽效果, 就不可能让人满意。正如我们的实践证明的, 干扰时强时弱, 总是存在。为此, 彻底改装测量布线, 把测量线全部密封在无缝的金属管路内, 导线的出入口严格包裹。不能有一点缝隙, 一般情况下, 不允许进行装卸。我们用两线的快速 A/D 变换器, 作对比测量。一线用光子牵引探测器, 测量激光的光波形, 取信号的

峰值。另一线光子牵引探测器与一线的光子牵引探测器一样布线，但不接收光信号，只接收干扰信号，作对比用。取扰动信号最大值，现抄录两组测量结果如下：

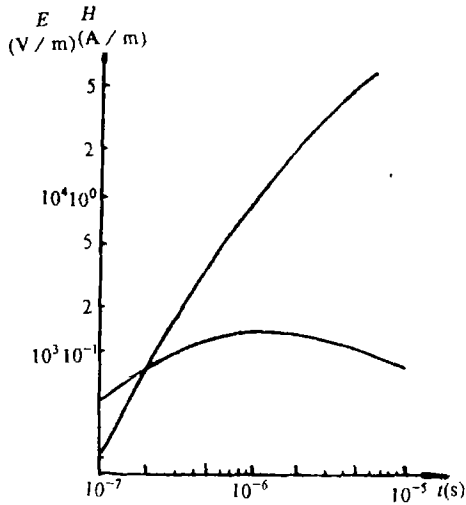


图 2 在 5 米远处场强随时间的变化

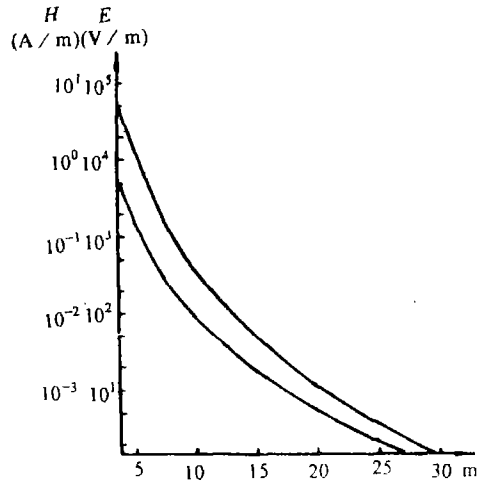


图 3 场强随距离的变化

$$\begin{cases} \frac{88}{128} \times 2V = 1.38V (\text{光信号峰值}) \\ \frac{2}{128} \times 1V = 15.6mV (\text{干扰信号峰值}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{80}{128} \times 2V = 1.25V (\text{光信号峰值}) \\ \frac{5}{128} \times 200mV = 7.8mV (\text{干扰信号峰值}) \end{cases}$$

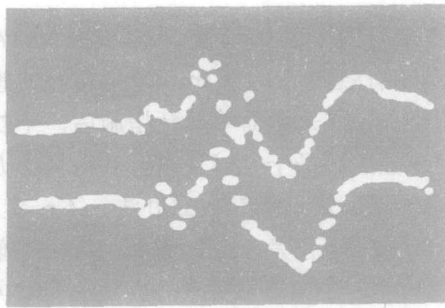


图 4 仅作一般屏蔽的对比测试结果

干扰信号掩盖了有用信号。上线是含有激光光波形的信号与干扰信号叠加的信号波形。下线是只含干扰信号的对比测试结果。

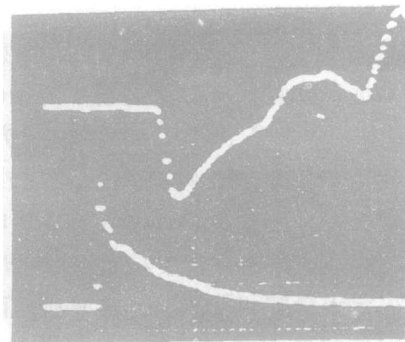


图 5 改善屏蔽后的测量结果

上线是应力波形，下线是激光光波形。

此结果与简单屏蔽的结果对比,说明信噪比提高了 40db。图 5 是改善屏蔽后的测量结果。上线波形是利用埋入式的压阻传感器,测量的激光引爆敏感炸药 P_bN_b 时,在试件内产生的应力波的历史。下线是激光光波形。与图 4 中的光波形相比,显然干扰被抑制到了理想的程度。

4 自适应相关噪声抵消法

我们曾利用相关噪声总均方电压等于各噪声的均方电压之和的关系

$$V_{\text{总}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + 2r_{12}V_1V_2 + 2r_{13}V_1V_3 + 2r_{23}V_2V_3} \quad (3)$$

使完全相关的两个噪声相互抵消。设 V_1 为被测信号, V_2, V_3 是干扰信号。 V_1 与 V_2, V_3 是不相关的,所以 r_{12} 和 r_{13} 均为零。而 V_2 和 V_3 是相关的,并且我们可以使相关系数 $r_{23} = -1$,同时控制 V_1 和 V_2 的振幅相同,则噪声电压得到完全抵消,达到排除噪声的目的。具体作法是,除测量系统外,增加一个完全相同的参考测量输入系统,使它只接收干扰信号,不接收被测信号。仔细布线,使两个测量系统完全相同,则它们在完全相同的条件下,接收同一干扰源辐射来的干扰信号,它们接收的干扰信号 V_2 和 V_3 是完全相关的。在干扰信号相叠加之前,使参考测量输入的干扰信号倒相 180° ,则 $r_{23} = -1$,并且幅度相等。叠加之后,恰好相互抵消,提高了信噪比。图 4 是利用该原理测试的原始结果。图 6 是利用此法处理得到的光波形,它与图 5 相比,干扰排除的尚不够理想。其原因之一是所用 A/D 的两个采样通道是交替型式工作的,而不是两线同时采样的,这对快过程必然不会理想。另外布线等不可能完全相同,也是引起结果不够理想的原因。

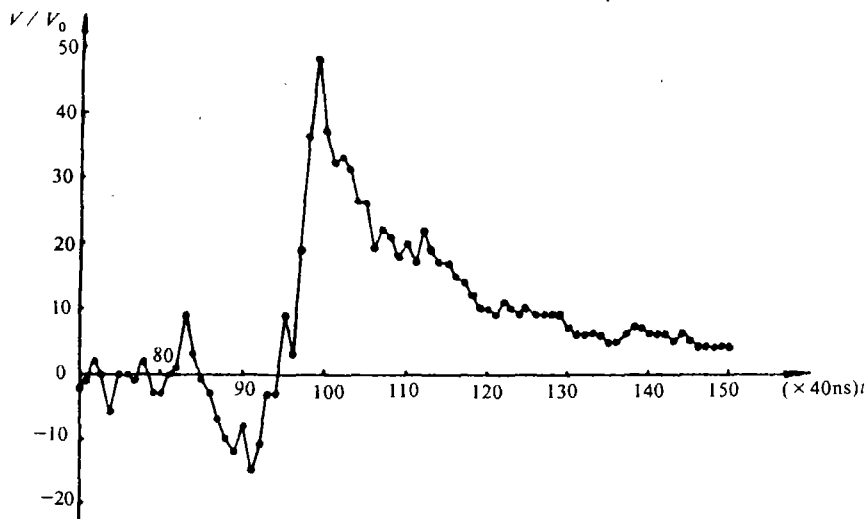


图 6 自适应相关噪声抵消法测量光波形

参加本工作的还有吴嵩毓、刘小苹、陈维波、张维明、韩庆生等同志。作者感谢段祝平教授对该工作的关心和指导。

参 考 文 献

- [1] W.O.亨利著, 电子系统噪声抑制技术, 人民铁道出版社, 1978年。
[2] E.C.约敦著, 电磁波与辐射系统, 人民邮电出版社, 1959.6.

Evaluation of the Interference Field of the Pulsed Intense Current Source and Investigation of Method for Interference Reduction

Wang Chunkui Zheng Rong

(Institute of Mechanics, Academic Sinica)

Abstract When we ignite the explosive by pulsed laser to measure the explosive originated stress-time history in the target, an intense electromegnetic interference of the pulsed high current is introduced in the surrounding space. In this paper, the field strength in the environmental space is evaluated, and the leakage of electromagnetic field through the braid of cables, the seams and holes is explained. Only if we use it with solid conductor shield, the leakage can be so minimized that more effective shielding is obtained.

Key words stress history, pulsed high current, electromagnetic interference.