

# 炸药爆轰产物导电性 对电磁速度计记录的影响

黄正平 蒋君平 丁 傲

赵衡阳 梁云明

本文介绍了炸药爆轰产物导电性对电磁速度计记录的三种影响：(1) 导电产物对敏感元件的旁路作用；(2) 产物中环电流所产生的附加磁场的干扰作用。文中所提出的测量产物计和金属箔制成的敏感元件的零负载电流和动态电导的方法，以及测量附加磁场的方案，简单易行，并将有助于电磁法量测精度的提高。

## 一、概 述

1960年左右，Zaitsev 等人最早把电磁速度计应用于爆轰研究。后来 Dremin 等人进一步发展了这种技术。1970年 Jacobs<sup>[1]</sup> 的文章中详细地探讨了在爆轰量测中影响电磁速度计记录精度的诸因素，如入射波阵面的倾斜与弯曲，敏感元件的反应时间，系统上升时间和产物导电性等。他们认为若爆轰产物的电导率小于  $10\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  时，粒子速度计的测试误差不大于 2%。1981年 Erickson 等人<sup>[2]</sup> 把向后引出 U 形敏感元件改进为片状的径向引出的 U 形敏感元件以适应多速度计的测量需要。为防止各敏感元件之间相互串扰，他们采用阳极氧化技术；他们还用激光干涉仪测量了粒子速度敏感元件的力学响应时间。

1970年 Young<sup>[3]</sup> 最先提出了“电磁应力传感器的理论”。十年后 Huang 等人<sup>[4]</sup> 发展了他的理论。这种量计实质上是一种电磁冲量传感器。爆炸产物导电性对它的影响类似于对粒子速度计的影响。

另外，Fritz 等人<sup>[5]</sup> 还推出了一种轴对称磁探头量测技术。这种技术的唯一优点是取消体积远大于试样的磁场装置。这种技术使用较厚的敏感元件，它的力学响应较慢，精度就很难提高了。

当电磁传感器敏感元件直接埋入炸药中使用时，测试系统的精度除了受到电子部件的频响、敏感元件的厚度与材料等影响外，还受到产物导电性的影响。人们对于敏感元件材料与厚度的影响研究较多，不论采用数值计算、或采用近似计算，或采用实验观测所得到的敏感元件的力学响应时间是相当一致的。但是，对于产物导电性影响的定量研究则不够充分。本文试图对此问题作一些探讨

## 二、研究产物导电性影响的一种方法

Hayes<sup>(6)</sup>和王圣平<sup>(7)</sup>等人研究产物导电性的方法都采用带有供电电源的RC网络直接测到产物——电极系统的电阻变化史,然后根据电极的形状和爆炸产物的容器因子推算产物的电导率。但是,已知这样的一些信息是不能直接用来推算产物导电性对电磁速度计或冲量计记录的影响。

爆炸产物在恒磁场中作膨胀运动时,正在朝向四面八方运动的每个导电的产物微元在正交于磁场方向上所产生的微电动势矢量,将形成无数闭合的环形回路:产物中将出现无数环形电流(简称环电流)。环电流的一个作用是旁路作用,另一个作用是附加磁场的作用。为了描述产物导电性对电磁速度计的旁路作用影响,本文将提出二个新的概念:

“速度计的动态电导”和“速度计的零负载电流”。当速度计的敏感元件埋入被测炸药中测量粒子速度时,除了有金属箔敏感元件AC(见图1)运动并切割磁力线产生感生电动势外,每个导电的产物微元也都将切割磁力线产生感生电动势。因此可以把产物的导电性对速度计敏感元件的旁路作用等效为一群具有一定电导一定电动势的并联支路之间的相互作用。图1示意地画出了此线性网络的等效电路——具有环流形式的等效电路。但图中没有画出无关的环流回路。

我们定义某一支路的零负载电流为

$$i_j = g_j \varepsilon_j, \quad (j=1, 2, 3, \dots, N-1, N) \quad (1)$$

式中  $g_j$  和  $i_j$  分别为并接于引线 AB 和 CD 的支路电导和支路电动势。对于金属箔敏感元件,则满足关系式:

$$i_0 = g_0 \varepsilon_0 \quad (2)$$

式中  $i_0$ 、 $g_0$  和  $\varepsilon_0$  分别为它的零负载电流,动态电导和电动势。若定义电动势方向向上为正,则  $j$  为偶数时,  $\varepsilon_j$  为正;  $j$  为奇数时,  $\varepsilon_j$  指向负。若令负载的电导为  $G$ , 则利用基尔霍夫定律求出通过负载  $G$  的总电流  $I$  为

$$I = G \sum_{j=0}^N \varepsilon_j g_j / \left( G + \sum_{j=0}^N g_j \right) \quad (3)$$

若负载  $G$  两端的电压为  $U$ , 则

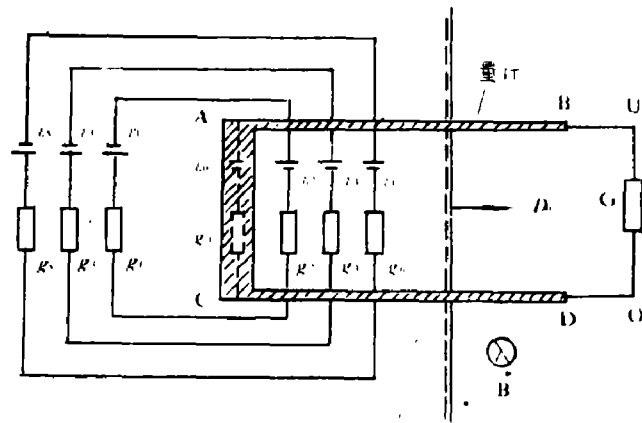


图1 具有环流形式的等效电路  
敏感部分 AC 为 10 mm,  
金属箔宽 1.6 mm,  
厚 0.02 mm。

$$I = U G \quad (4)$$

又令相对于引线 AB 与 CD 的产物零负载电流为

$$I^* = \sum_{j=1}^N i_j = \sum_{j=1}^N \varepsilon_j g_j \quad (5)$$

及相对于引线 AB 与 CD 的产物电导为

$$G^* = \sum_{j=1}^N g_j \quad (6)$$

根据 (2)~(6) 式, 可以推导得到电磁速度传感器输出特性关系式

$$I + U (g_0 + G^*) = i_0 + I^* \quad (7)$$

上式中  $I (=UG)$  和  $U$  可以实测得到。如果设法求出  $(g_0, i_0)$  及  $(G^*, I^*)$  值, 则可以推算出实测电动势  $\varepsilon_0$  的修正系数  $\eta$ 。于是,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= U(1 + \eta) \\ \eta &= \frac{U(G + G^*) - I^*}{U g_0} \approx \frac{U G^* - I^*}{U g_0} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

上式中所有的参数都是时间的函数。如果观测时间很短, 有时把他们看成常数或为时间的线性函数。上式中的近似关系, 是根据  $G \ll G^*$  作出的。因为负载电阻或负载电缆特性阻抗为  $50\Omega$ , 所以  $G = 2 \times 10^{-2} \Omega^{-1}$ 。产物的  $G^*$  一般在  $1 \Omega^{-1}$  左右。上式中敏感元件电导  $g_0$  不仅是由材料性质和几何形状来决定的, 而且是热力学状态的函数。如果我们从实验取得  $U$ 、 $G^*$ 、 $I^*$  和  $g_0$  四个参量的值 (时间函数值), 则修正函数  $\eta = \eta(t)$  可求。

### 三、 $G^*$ 和 $I^*$ 的实验量测

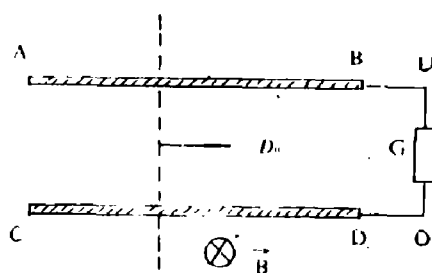
图 2 表明了测量  $G^*$  和  $I^*$  的原理。爆轰波没有达到 AC 之前, A、C 两极之间是断路的; 爆轰波达到 AC 之后, 爆炸产物使 A 与 B 两极接通, 并输出电压信号  $U$ 。在这种情况下,  $i_0 = 0$ ,  $g_0 = 0$ 。因此 (7) 式可以简化为

$$I + U G^* - I^* = 0 \quad (9)$$

上式表明, 在某一确定的时刻, 伏安特性曲线为直线。因此只要改变负载的电导  $G$ , 测出一系列的  $(U, I)$  值, 再利用线性回归方法就可求出相应的  $G^*$  和  $I^*$  值。

图 2 与图 1 相比, 敏感元件是爆炸产物。因此定义这种量计为“产物计”。

我们采用  $20 \mu\text{m}$  厚的铜箔作产物计, 做了不少于 50 发的实验, 取得了一些初步结果。其中一些实验结果及处理结果在表 1、和图 3 中给出。



AB 和 CD 由宽 1.6mm 厚 0.02mm 铜箔制成;  
AB 和 CD 的间距为 10mm

图 2 测量  $G^*$  和  $I^*$  的原理图

表1 产物计伏安关系

$t(\mu\text{s})$	0.065				0.78			
$I(\text{A})$	0.286	0.156	0.0764	0.0375	0.1690	0.0982	0.0510	0.0254
$U(\text{V})$	0.4711 $\pm 0.0688$	0.5504 $\pm 0.028$	0.5886 $\pm 0.0451$	0.6279 $\pm 0.013$	0.5915 $\pm 0.0688$	0.6295 $\pm 0.028$	0.6672 $\pm 0.0451$	0.6779 $\pm 0.013$
处理结果	$I^* = 0.4790 (\text{A}), G^* = 0.7269 (\Omega^{-1})$ , 相关系数 $\gamma = -0.9936$ 。				$I^* = 1.094 (\text{A}), G^* = 1.575 (\Omega^{-1})$ , 相关系数 $\gamma = 0.9878$ 。			

若把实验结果处理为二个时间函数  $G^* = G^*(t)$  及  $I^* = I^*(t)$ , 也是容易的, 但本文不再细述了。

#### 四、 $g_0$ 的实验量测

当获得产物的  $G^*$  和  $I^*$  之后, 采用实际使用的金属箔制成的速度计敏感元件作类似于测量产物计伏安特性的实验。在这种情况下  $g_0 \neq 0$ ,  $i_0 \neq 0$ ,  $G^*$  和  $I^*$  已知, 因此利用 (7) 式不难求出敏感元件的动态电导  $g_0$  值 (它也是时间的函数)。

求动态电导  $g_0$  的实验方法和数据处理技术完全类似于前述的产物计实验。同样改变负载的电导  $G$ , 作出相应的伏安曲线, 用最小二乘法计算曲线的斜率 ( $g_0 + G^*$ ) 和截距 ( $i_0 + I^*$ )。从此斜率值中减去  $G^*$  值, 则动态电导可得。为了要获得可靠的  $g_0$  值, 负载电导  $G$  值应尽量减小;  $G$  与  $g_0$  之间只能相差 1~2 个数量级。表 2 中给出了  $g_0$  和  $\eta$  的实测结果。由于测试系统精度不够高, 表 2 中  $g_0$  值的误差较大, 约 20~40%。

表3 产物导电性影响实测结果

参数 时间	$U(\text{V})$	$G^*(\Omega^{-1})$	$I^*(\text{A})$	$g_0(\Omega^{-1})$	$\eta$
0.065 $\mu\text{s}$	1	0.7269	0.4790	28	0.0096
0.78 $\mu\text{s}$	1	1.575	1.094	23	0.022

#### 五、导电产物中环电流产生的附加磁场的影响

在产物导电性的影响中除了存在  $G^*$  和  $I^*$  的旁路影响, 还存在产物中环电流所产生的附加磁场的影响。

我们可以利用磁流体力学基本方程组可以导出通过每个微元的电流密度  $\sigma$  为

$$\sigma = (Bu_c - E)G_c \quad (10)$$

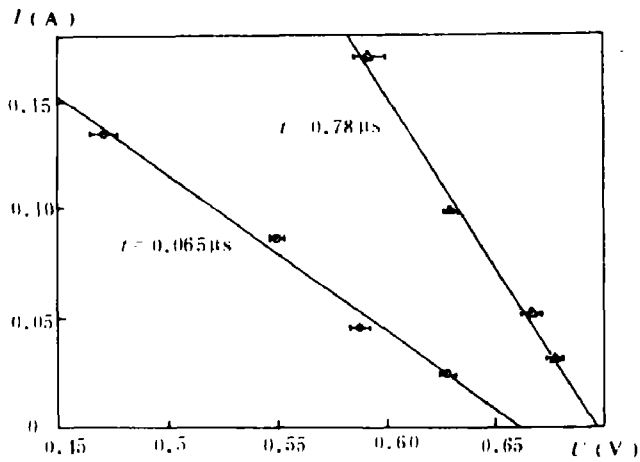


图3 产物计的伏安特性曲线

上式是在平面一维流动条件下获得的, 且产物的粒子速度  $\vec{u}$ , 正交于磁感应强度  $\vec{B}$ ; 式中  $G_e$  是产物微元的电导率。

在爆轰波阵面附近的产物中, 若磁感应强度  $B = 0.1$  特斯拉; 产物粒子速度  $u = 2000$  m/s; 电场强度  $E \approx 100$  V/m (由产物计实验值估计); 产物电导  $G_e \approx 10^2 \sim 10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 则电流密度  $\sigma \approx 0.01 \sim 0.1$  A/mm<sup>2</sup>; 通过对称轴的截面上在  $40\text{mm} \times 20\text{mm}$  范围内, 可能有  $8 \sim 80$  A 的环电流。但此环电流值与磁场的激励线圈安匝数 (约  $3 \times 10^4$  安匝) 相比还是很小。在爆轰波阵面附近的炸药中, 产物环流所引起的附加磁场最大值可以利用普通物理中长直线附近磁场强度公式来计算, 即

$$B^* = \frac{\mu_0 \sigma h}{2\pi} \quad (11)$$

式中  $h$  为试件的特征尺寸 (取  $40 \sim 50$  mm);  $\mu_0$  为产物的导磁系数。若继续利用上面参数作估算  $B^* \approx 1.28 \times (10^{-4} \sim 10^{-3})$  特斯拉, 它与原磁场强度  $B$  值相比, 最多增加 1% 左右。

另外, 根据安培环路定律又可推测产物中的磁场强度。随着不断远离波阵面深入产物之中, 磁环路所包围的电流越来越小, 因此附加磁场的强度越来越小。显然, 对于附加磁场的影响的精确测量还有待于进一步工作。

## 六、讨 论

1. 当利用电磁速度计或电磁冲量计对爆轰过程作高精度量测时必须考虑导电产物的旁路作用和附加磁场的干挠作用。然后通过实验来确定产物导电性的影响, 并作出它的定量修正。鉴于产物导电性影响取决于敏感元件与被测炸药试件的物理与化学性质、力学性质、结构与形状等, 因此很难获得具有普适性的修正函数。所以本文中所给出的结果仅适用于我们所具有的特定的实验条件。

2. 测量产物计和速度计的零负载电流和动态电导, 可以修正导电产物对传感器敏感元件引线的旁路作用。修正之后电磁计量测精度可以大大提高, 实现小于等于 2% 的量测误差是比较容易, 而对旁路作用的修正因子  $\eta$  的精度要求不高,  $\eta$  的误差在 20~50% 都是允许的。因为这对速度计来说是误差的误差。

3. 产物中环电流所形成的附加磁场的干扰作用也是可以修正的。附加磁感应强度  $\Delta B$  为

$$\Delta B = \frac{1}{S} \int_{-\infty}^0 \varepsilon(t) dt \quad (12)$$

上式中的  $\varepsilon(t)$  为爆轰波达到敏感元件之前的速度计记录; 上式中已假设爆轰波达到敏感元件时  $t = 0$ ;  $S$  为速度计所包围的面积。如果  $S$  由一小长方形确定, 则波阵面方向上的长度要尽量小。只有这样才能保证波阵面前方附加磁感应强度  $\Delta B$  的量测精度。

4. 当采用铝箔来制作速度计的敏感元件时, 似乎可以利用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘来防止导电产物的旁路作用。可惜爆轰波信号不是直流信号, 所以采用所谓的“绝缘方法”往往是无效的。这是因为很薄的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  绝缘层正好作为产物与引线之间的电介质, 可以形成  $10 \sim 1000$  pF 的电容量  $C$  (随时间增加而增大); 它与负载电阻抗组合的时间常数大约  $1 \sim 100$  ns; 而冯·诺曼峰的前沿是纳秒级, 化学反应区的时域宽度为  $10 \sim 100$  ns。所以电容  $C$  相对于化学峰旁路信号起“耦合作用”。台劳波的旁路信号衰减时间常数一般较大, 因此电容  $C$  起“微分作用”。

在完成此项研究中曾得到经福谦、章冠人、王圣平、曹思勤、楼仁海、陈先明和徐复等人的帮助和指导。在实验方面要特别感谢爆炸技术实验室全体工作人员的合作。

### 参 考 文 献

- [1] Jacobs, S. J., Edwards, D. J., *AD* 712081, (1970), 323.
- [2] Erickson, L. M. et al., *7 th Inte. Symp. Detonation*, (1981), 787.
- [3] Young, C., Fowles, R., Swift, R. P., *Proc. 17th Sagamore Army Reseach Metersials Conf., Shock Wave and the Mechanical Properties of Solids*, eds. Rurke, J. J., Weiss, V., Syr Univ. Press, (1971), 203 - 223.
- [4] Huang, Z. P., Zhang, H. P., *Shock Waves in Condensed Matter*, (1983), 233 - 236.
- [5] Fritz, J. N., Morgan, J. A., *Rev. Sci. Instrum.*, **44**, (2) (1973), 215 - 221.
- [6] Hayes, B., *10 th Symp. Combustion* (1964), 869.
- [7] 王圣平, 陈丕琪, *爆炸与冲击*, **3** (1) (1983), 76.

## INFLUENCE ON THE REGISTRAION OF ELECTROMAGNETIC VELOCITY GAUGE BY THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF DETONATION PRODUCTS

Huang Zhengping    Jiang Junping    Ding Jing

Zhao Hengyang    Liang Yunming

### Abstract

In this paper, two kinds of influences on the registration of electromagnetic velocity gauge by the electrical conductivity of detonation products are described: (1) the by-pass effect of the conductive products on the sensitive element; (2) disturb effect of the additional magnetic field produced by the circular current in the products. The authors suggest a kind of product measuring meter and a sensitive element for measurement of the loading current or dynamic conductivity as well as a method for measuring the additional magnetic field. These methods are simple, easy to do and helpful to improve the measuring precision of the electromagnetic method.