

电雷管同步性高速摄影研究

陶从良

(中国工程物理研究院化工材料研究所)

摘要 应用高速扫描摄影拍摄了表征电雷管特性的随机变量,如作用时间,得到电雷管同时起爆爆炸同步性(极差),研究了雷管母体标准差与样本极差间的函数关系。在已知母体雷管标准差的情况下,可以确定由 n 个雷管组成的样本的极差不超过某一指标的概率,或在样本的极差不超过某一指标概率的条件下,可以确定母体的标准差。这在科研生产和使用中具有重要的应用价值。本方法的测量误差小于或等于 $0.03\mu\text{s}$ 。

关键词 高速摄影 电雷管 同步性

1 雷管同时起爆的高速扫描摄影

在电雷管(下简称雷管)的研制和使用过程中,常测定其特征量:击穿电压、起爆电流、作用时间等。对型号和批号一定的雷管而言,这些特征量的数值都是具有某种分布的随机变量,并有一确定的范围。雷管爆炸同步性是以 n 个雷管的作用时间的最大值与最小值之差,即“极差”来表示的。可见样本极差和母体标准差都是随机变量分散性的一种度量。

利用高速扫描摄影拍摄 n 个雷管同时起爆爆炸扫描图象,可得作用时间的特征量。在给定起爆条件下,同时起爆的高速扫描摄影装置和线路示于图 1。

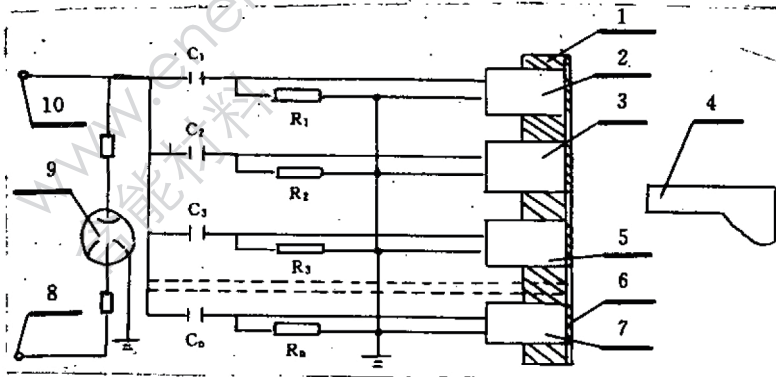


图 1 试验装置和线路图

1—雷管固定板; 2,3,5,7—雷管; 4—高速扫描相机;
6—硝酸钡粉末; 8—触发信号; 9—触发管; 10—直流高压源。

Fig. 1 Experimental device and circuit

1—Board for fixing detonator, 2,3,5,7—Detonator, 4—High speed streak camera,
6—Ba(NO₃)₂ powders, 8—Trigger signal, 9—Trigger tube, 10—D.C. high voltage power.

图中: $C_1=C_2=C_3=\dots=C_n$, $R_1=R_2=R_3=\dots=R_n$ 。高压系由直流高压源给出, 触发信号由相机控制台提供。 n 个雷管排成一垂直或水平序列。雷管底部涂一均匀薄层, 粒度为 80~100 目的硝酸钡粉末。同时引入一火花电极作测量基准。相机转速 $n=6 \times 10^4 \text{ r/min}$, 狭缝宽度 $b=0.03 \text{ mm}$ 。图 2 为 $n=36$ 个雷管同时起爆爆炸扫描图象。求得极差 $\Delta t=0.09 \mu\text{s}$, 标准差 $\sigma=0.027 \mu\text{s}$ 。



图 2 雷管爆炸扫描图象

Fig. 2 Streak record of detonator explosion

2 雷管同步性研究

对于型号一定的雷管, 其同步性指标规定为某一定值。但在雷管验收和复检试验中, 试验结果有超出这一定值的情况。造成同步性超差的原因可能是雷管本身工艺重复性欠佳和测试失误。当测试无误时, 只能是雷管本身的原因造成同步性超差。按技术指标规定, 该批雷管为不合格品。至于该批雷管是真不合格? 还是误判造成的? 这就需要对随机变量极差问题进行研究, 特别是在同时起爆雷管样本容量(n)日渐减少或母体标准差不变的情况下, 以求分析和判断规定的同步性指标的合理性。因此, 研究了雷管母体标准差与样本极差间的函数关系。

设有型号一定的某一批 N 个雷管(母体), 从母体中随机取出 $n(n < N)$ 个样本作同时起爆试验, 得到其特征量(如作用时间)的 n 个数据。由此可得到母体标准差与样本极差间的函数关系。

在多年的实践中, 测得雷管的作用时间 t 服从正态分布(t, σ_t), 其概率密度分布可由正态分布函数来表示^[1]:

$$W(t) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_t)\exp\{- (t - \bar{t})^2/2\sigma_t^2\} \quad (1)$$

式中: \bar{t} ——平均值; σ_t ——标准差。

由于雷管作用时间的差只考虑其绝对值 $|\Delta t|$, 则其概率密度分布为

$$W(|\Delta t|) = (2/\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta t})\exp\{- |\Delta t|^2/2\sigma_{\Delta t}^2\} \quad (2)$$

$$(0 < |\Delta t| < \infty)$$

式中: $\sigma_{\Delta t} = \sqrt{2}\sigma_t$

$|\Delta t|$ 的平均值:

$$M(|\Delta t|) = \int_0^{\infty} |\Delta t| W(|\Delta t|) d(|\Delta t|)$$

$$= (\sqrt{2}/\sqrt{\pi})\sigma_{\Delta t} = 0.797\sigma_{\Delta t} \quad (3)$$

$|\Delta t|$ 的方差:

$$D(|\Delta t|) = \sigma_{|\Delta t|}^2 = \int_0^{\infty} |\Delta t|^2 W(|\Delta t|) d(|\Delta t|) - M^2(|\Delta t|) \\ = (1 - 2/\pi)\sigma_{\Delta}^2 = 0.364\sigma_{\Delta}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{|\Delta t|} = 0.603\sigma_{\Delta} \quad (5)$$

求 n 个雷管的极差分布, 实为求 $N\left[N = \binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}\right]$ 个随机变量 $|\Delta t|_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的极大值分布^[2]。若极大值以 R 表示, 则 $|\Delta t|$ 的 N 个取值均小于等于 R 的概率为:

$$P\{|\Delta t|_i \leq R\} = \left[\int_0^{\infty} W(|\Delta t|) d(|\Delta t|) \right]^N \quad (6)$$

而 R 的分布密度函数为

$$W_N(R) = dP/dR = NW(R) \left[\int_0^{\infty} W(|\Delta t|) d(|\Delta t|) \right]^{N-1} \\ = n(n-1) / \sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta} \exp(-R^2/2\sigma_{\Delta}^2) [2\Phi(R/\sigma_{\Delta})]^{N-1} \quad (7)$$

式中, $\varphi(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_0^x e^{-z^2/2} dz, (0 \leq R < +\infty)$

极差的平均值:

$$M(R) = \int_0^{\infty} RW_N(R) dR \quad (8)$$

极差的方差:

$$D(R) = \int_0^{\infty} [R - M(R)]^2 W_N(R) dR \quad (9)$$

极差分布的中位数 R_m :

$$P\{|\Delta t|_i \leq R_m\} = 0.50 = [2\Phi(R_m/\sigma_{\Delta}) - 1]^{N-1}$$

$$\Phi(R_m/\sigma_{\Delta}) = \varphi(R_m/\sigma_{\Delta}) + \Phi(0)$$

$$\varphi(R_m/\sigma_{\Delta}) = \frac{1}{2} (0.5)^{\frac{2}{n(n-1)}}$$

$$\Phi(R_m/\sigma_{\Delta}) = \frac{1}{2} (0.5)^{\frac{2}{n(n-1)}} + 0.50 \quad (10)$$

同样可以求出在一定置信概率下的置信区间(R_L, R_U)的极差。若令置信概率为 γ , 则置信区间的上、下限应满足下式:

$$\Phi(R_U/\sigma_{\Delta}) = \frac{1}{2} \left[\frac{1+\gamma}{2} \right]^{\frac{2}{n(n-1)}} + 0.50 \quad (11)$$

$$\Phi(R_L/\sigma_{\Delta}) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\gamma}{2} \right]^{\frac{2}{n(n-1)}} + 0.50 \quad (12)$$

正态样本极差的平均值(M_R)、中位数(R_m)、方差(D_R)和 γ 分别为 0.90、0.95 和 0.99 的置信区间列于表 1。

表1 样本极差的平均值、中位数、方差和置信区间

Table 1 The values and confidence intervals of normal sample range

N	$M_R \times \sigma_M$	$D_R \times \sigma_M$	$R_n \times \sigma_M$	$\gamma(1)=0.90$		$\gamma(2)=0.95$		$\gamma(3)=0.99$	
				$R_L \times \sigma_M$	$R_u \times \sigma_M$	$R_L \times \sigma_M$	$R_u \times \sigma_M$	$R_L \times \sigma_M$	$R_u \times \sigma_M$
2	0.7976	0.603	0.675	0.065	1.961	0.035	2.245	0.005	2.805
3	1.334	0.585	1.265	0.479	2.388	0.375	2.635	0.215	3.143
4	1.654	0.544	1.605	0.855	2.635	0.742	2.864	0.547	3.342
5	1.88	0.512	1.831	1.129	2.799	1.119	3.021	0.825	3.481
6	2.051	0.488	2.052	1.335	2.928	1.231	3.142	1.043	3.585
7	2.185	0.47	2.142	1.505	3.042	1.405	3.235	1.214	3.678
8	2.296	0.455	2.251	1.635	3.118	1.542	3.318	1.367	3.748
9	2.39	0.443	2.345	1.661	3.189	1.658	3.385	1.489	3.807
10	2.471	0.432	2.425	1.748	3.257	1.761	3.449	1.598	3.863
11	2.542	0.423	2.495	1.936	3.314	1.848	3.508	1.687	3.912
12	2.606	0.416	2.565	2.012	3.363	1.928	3.554	1.768	3.955
13	2.662	0.409	2.621	2.078	3.405	1.992	3.595	1.847	3.998
14	2.714	0.403	2.672	2.141	3.446	2.059	3.638	1.907	4.028
15	2.761	0.398	2.715	2.192	3.489	2.115	3.678	1.966	4.068
16	2.804	0.393	2.763	2.248	3.528	2.165	3.709	2.024	4.095
17	2.845	0.389	2.805	2.297	3.555	2.218	3.738	2.076	4.134
18	2.881	0.385	2.841	2.328	3.588	2.261	3.765	2.119	4.159
19	2.916	0.382	2.882	2.379	3.612	2.305	3.795	2.167	4.162
20	2.949	0.378	2.908	2.415	3.645	2.342	3.819	2.214	4.208
21	2.98	0.375	2.938	2.455	3.679	2.378	3.848	2.248	4.224
22	3.008	0.372	2.968	2.485	3.699	2.408	3.868	2.279	4.245
23	3.036	0.369	2.995	2.518	3.719	2.445	3.892	2.312	4.264
24	3.061	0.367	3.024	2.548	3.739	2.473	3.915	2.344	4.285
25	3.086	0.365	3.045	2.579	3.759	2.508	3.935	2.376	4.317
26	3.108	0.362	3.072	2.604	3.779	2.535	3.953	2.405	4.317
27	3.131	0.36	3.095	2.632	3.799	2.563	3.969	2.434	4.345
28	3.152	0.358	3.118	2.658	3.819	2.584	3.992	2.458	4.345
29	3.172	0.356	3.138	2.683	3.839	2.611	4.004	2.486	4.374
30	3.191	0.354	3.159	2.705	3.855	2.634	4.024	2.508	4.374
31	3.21	0.353	3.175	2.728	3.869	2.659	4.035	2.533	4.415
32	3.227	0.351	3.198	2.748	3.888	2.678	4.049	2.556	4.415
33	3.245	0.349	3.213	2.767	3.899	2.699	4.068	2.571	4.415
34	3.261	0.348	3.234	2.788	3.917	2.718	4.079	2.598	4.465
35	3.277	0.346	3.245	2.805	3.929	2.736	4.098	2.617	4.465
36	3.292	0.345	3.265	2.813	3.938	2.755	4.108	2.638	4.465
37	3.307	0.344	3.279	2.843	3.951	2.775	4.119	2.659	4.465
38	3.322	0.343	3.292	2.858	3.969	2.794	4.138	2.676	4.465
39	3.338	0.341	3.309	2.878	3.975	2.809	4.144	2.691	4.523
40	3.353	0.34	3.324	2.898	3.999	2.828	4.159	2.718	4.523
41	3.367	0.339	3.338	2.908	4.007	2.842	4.171	2.726	4.523
42	3.38	0.337	3.354	2.923	4.018	2.858	4.171	2.744	4.523
43	3.394	0.336	3.364	2.937	4.028	2.873	4.189	2.756	4.523
44	3.407	0.335	3.378	2.952	4.037	2.886	4.206	2.771	4.523
45	3.419	0.333	3.389	2.966	4.046	2.901	4.206	2.783	4.523
46	3.431	0.332	3.403	2.979	4.056	2.914	4.224	2.801	4.614
47	3.443	0.331	3.413	2.993	4.065	2.928	4.224	2.816	4.614
48	3.456	0.329	3.427	3.008	4.075	2.943	4.244	2.828	4.614

在雷管爆炸同步性验收和复检试验中,若求 n 个雷管的同步性不大于某一技术指标,应给定一合理的工程能力指数 C_p ,且满足下式:

$$C_p = \frac{\Delta t - M(R)}{R_s - M(R)} \quad (13)$$

一般 $C_p \geq 1.33$,若取 $C_p \geq 2$ 时,则不难算出雷管特性的标准差。

例如:某雷管特性服从正态分布,要求 36 个雷管的极差(在 $\gamma=0.95$ 时不大于 $0.30 \mu\text{s}$)。为在生产中达到这一指标,问该雷管的标准差应不超过多少?

解:查表 1,得置信概率 $\gamma=0.95$, $n=36$ 的极差上限 $R_s=4.108\sigma_s=5.808\sigma_s$,取工程指数 $C_p \geq 2$,有下式:

$$2 \leq \frac{0.3 - M(R)}{R_s - M(R)} = \frac{0.3 - 4.616\sigma_s}{5.808\sigma_s - 4.616\sigma_s}$$

$$\sigma_s \leq 0.043\mu\text{s}$$

即该雷管的标准差不应超过 $0.043\mu\text{s}$ 。计算结果与大量试验数据相符,这就提供了在已知雷管母体标准差、样本容量为 n 时,其极差(同步性)的合理性。

3 测量误差

在雷管爆炸同步性测量过程中,从起爆装置、试验线路、雷管、雷管安装精度、实验参数、到测量仪器精度等,每个环节都可能引入误差,包含系统误差和随机误差。试验结果表明,引入雷管爆炸同步性测量误差的诸多因素^[3]中,主要有下列几项:

3.1 高速扫描相机的时间分辨率为 t_p

高速扫描相机的理论时间分辨率为:

$$t_p = 2.7 \times 10^{-5} / B n_r \cos\theta \quad (14)$$

式中: θ ——反射镜的工作角; B ——反射镜有效宽度,mm; n_r ——反射镜转速,r/min。 $\theta = 22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 。取 $\theta=45^\circ$; $B=40\text{mm}$; $n_r=6 \times 10^4 \text{r/min}$ 。代入(14)式计算得:

$$t_p = 1 \times 10^{-9} \text{s}$$

由于胶片的影响, t_p 要下降,扫描相机的实际时间分辨率 t_p 为:

$$t_p = 1 \times 10^{-9} \text{s}$$

3.2 转速误差

扫描相机的扫描速度为:

$$V_p = 4\pi R n_r \quad (15)$$

式中: R 为相机的扫描半径,mm。

由(15)式得扫描速度的相对误差为:

$$\Delta V_p / V_p = \Delta R / R + \Delta n_r / n_r \quad (16)$$

式中: $\Delta R / R$ ——扫描半径的相对误差; $\Delta n_r / n_r$ ——反射镜转速的相对误差。

由计算得:

$$\Delta V_p / V_p = 0.18\%$$

若雷管爆炸同步性测量时波前差为 $0.50\mu\text{s}$,则该项引入的时间误差 Δt_1 为:

$$\Delta t_1 = \Delta V_p / V_p \times 0.50 = 9 \times 10^{-4} \mu\text{s}$$

3.3 成象质量

雷管爆炸同步性是沿雷管在胶片上扫描图象波前沿测量的,其清晰度是决定该项误差的主要影响因素,而清晰度主要取决于发光层的特点及雷管安装精度,实测该项引入的时间误差 Δt_2 为:

$$\Delta t_2 = 0.025 \mu\text{s}$$

3.4 测量仪器精度及判读误差

此项误差主要同测量仪器精度与测量者判读有关。计算和实测表明,其引入的时间误差 Δt_3 为:

$$\Delta t_3 = 0.006 \mu\text{s}$$

雷管爆炸同步性测量的标准差为:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \sqrt{t_p^2 + (\Delta t_1)^2 + (\Delta t_2)^2 + (\Delta t_3)^2} \\ &= 0.027 \approx 0.03 \mu\text{s} \end{aligned}$$

即本方法的测量误差小于或等于 $0.03 \mu\text{s}$ 。

4 结 论

雷管同步性是衡量其结构和工艺一致性的一项综合性指标。应用高速扫描摄影,精确地测量了雷管的作用时间,若这些作用时间服从正态分布,则可应用雷管母体标准差与样本极差的函数关系进行计算,所得结果与实验结果相符,从而为判断极差(同步性)指标的合理性提供了可行的方法。

本文表 1 为文尚刚同志计算,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 张世箕. 测量误差及数据处理. 北京:科学出版社, 1987.
- 2 彭定之. 关于随机变量极差的研究. 电子技术参考, 1987.
- 3 陶从良. 平面多点爆轰过程的光学实验研究. 第三届全国高速摄影与光子学会议论文集. 北京:科学出版社, 1987.

HIGH SPEED PHOTOGRAPHY STUDY ON INITIATION SYNCHRONISM OF ELECTRICAL DETONATORS

Tao Congliang

(Institute of Chemical Materials, CAEP)

ABSTRACT High speed photography was used to determine the random variables of

electrical detonator properties such as action time, and their synchronism was characterized with the initiation time difference (ITD) obtained therefrom. Studying the functional relation between the batch detonators' initiation synchronism standard deviation (ISSD) and the samples' ITD shows, when the ISSD of the batch detonators is given, the ITD of samples consisting of n detonators will not exceed the stipulated probability. On the contrary, if the samples' ITD does not exceed the stipulated probability, the ISSD of batch detonator can be found out, and the measuring error is less or equal to $0.03 \mu\text{s}$. This method is valuable for both research and application of electrical detonators.

KEY WORDS high speed photography, electrical detonator, initiation synchronism.