

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0088-03

创伤弹道用激光靶中小钢珠过靶信号有效带宽的分析

赵冬娥, 张记龙

(华北工学院仪器科学与动态测试国家教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 利用时域函数和卷积两种方法,分析了创伤弹道用激光靶中小钢珠过靶信号的时域波形及频谱,并根据最大误差准则获得信号有效带宽,为光电探测系统的设计提供了理论依据。

关键词 激光靶; 时域函数; 频谱分析; 有效带宽

中图分类号 TH745 文献标识码 A

Effective Bandwidth Analysis of a Small Steel-Bead Flying Through Screen in Wound Ballistic Laser Screen

ZHAO Dong-e, ZHANG Ji-long

(The Key Laboratory of the State Education Ministry on Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North China Institute of Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract By adopting time-domain function and convolutions method, the time-domain and frequency-domain waveform of a small steel-bead when it flying through a laser screen are analyzed in wound ballistic field. And based on the maximal error rule, effective bandwidth is obtained. It provides a theoretical basis for photoelectric detection system.

Key words laser screen; time-domain function; frequency-spectrum analysis; effective bandwidth

1 引言

创伤弹道学及军事医学领域中,为研究枪弹对人体的创伤程度(与枪弹穿过人体前后的动能差值有关),常采用激光光幕靶^[1,2]对高速飞行的小钢珠穿过试验对象前后的速度进行测量。由于小钢珠体积很小,直径不超过3 mm,飞行速度高,可达1500 m/s以上,分析小钢珠穿越激光光幕靶过靶信号的有效带宽,为系统频率响应的合理设计提供理论依据,避免造成信号中高频成分的丢失及失真;它直接影响着激光光幕靶中光电探测器、光电放大器以及主放大器单元电路元器件的选择。因此,在系统设计中占有重要的地位。

2 建立时域函数,分析其频谱

小钢珠的过靶信号指的是半径为 r 的小钢珠以速度 v 穿过厚度为 a 的光幕时,小钢珠的挡光量 ϕ 与时间 t 的关系。假设小钢珠垂直于光幕飞行,光幕光强沿钢珠运动方向分布均匀,则小钢珠在飞行过程中某时刻的挡光量与该时刻小钢珠的挡光面积 s 成正比,因此,小钢珠的过靶信号波形

可以通过分析建立其挡光面积 S 与时间 t 之间的函数关系来获得。

利用球体的对称性,可建立如图1所示的直角坐标系。根据小钢珠与激光光幕的相对运动,为建立方程方便,设小钢珠位置固定,激光光幕以速度 v 运动穿过小钢珠的截面。小钢珠的圆方程为

$$(x-r)^2+y^2=r^2 \Rightarrow y=\pm\sqrt{2rx-x^2}$$

设厚度为 a 的光幕以速度 v 从原点沿 x 轴正向运动(如图1(a)所示),经时间 t 后运行的距离为 vt ,则穿越过程可分为三个阶段来分析。

当 $0 \leq vt \leq a$ 即 $0 \leq t \leq a/v$ 时(如图1(b)所示)挡光面积

$$s=2 \int_0^{vt} \sqrt{2rx-x^2} dx=(vt-r)\sqrt{r^2-(vt-r)^2} + r^2 \arcsin[(vt-r)/r] - r^2 \arcsin(-1)$$

同理可求得当 $a < vt \leq 2r$ 即 $a/v < t \leq 2r/v$ 时(如图1(c)所示)和 $2r < vt \leq 2r+a$ 即 $2r/v < t \leq (2r+a)/v$ 时(如图1(d)所示)的挡光面积。

用分段函数描述挡光面积 s 与时间 t 的关系如下:

作者简介: 赵冬娥(1970-),女,山西人,讲师,博士生。主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail:gxx@ncit.edu.cn

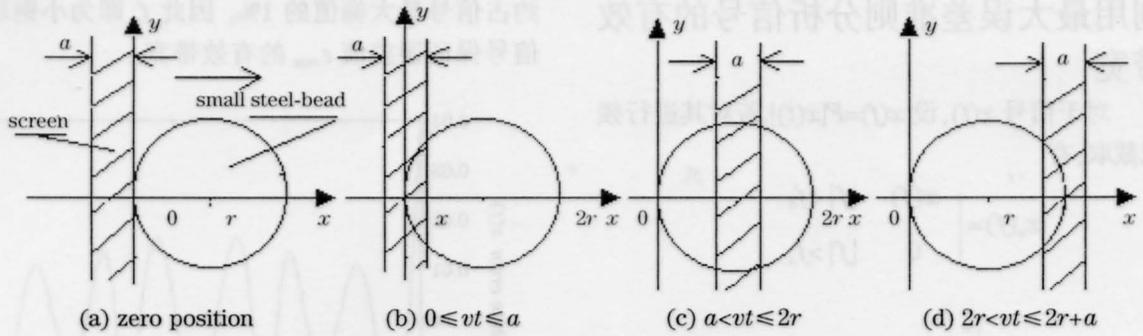


图1 小钢珠过靶信号分析过程

Fig.1 Analytic process of a small steel-bead flying through the screen

$$s(t) = \begin{cases} (vt-r)\sqrt{r^2-(vt-r)^2} + r^2\arcsin\frac{vt-r}{r} - r^2\arcsin(-1) & (0 \leq t \leq a/v) \\ (vt-r)\sqrt{r^2-(vt-r)^2} + r^2\arcsin\frac{vt-r}{r} - (vt-a-r)\sqrt{r^2-(vt-a-r)^2} - r^2\arcsin\frac{vt-a-r}{r} & (\frac{a}{v} < t \leq \frac{2r}{v}) \\ r^2\arcsin(1) - (vt-a-r)\sqrt{r^2-(vt-a-r)^2} - r^2\arcsin\frac{vt-a-r}{r} & (\frac{2r}{v} < t \leq \frac{2r+a}{v}) \end{cases}$$

利用 MATLAB 语言对 $S(t)$ 函数编程, 取 $a=1.5 \text{ mm}$, $v=1500 \text{ m/s}$, $r=1.5 \text{ mm}$, 可获得小钢珠过靶的时域波形 $S(t)$, 如图 2 所示, 及频谱波形如

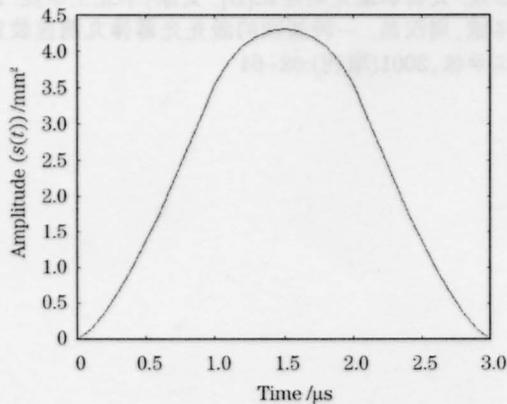


图2 小钢珠过靶信号的时域波形

Fig.2 Time waveform of a small steel-bead flying through screen

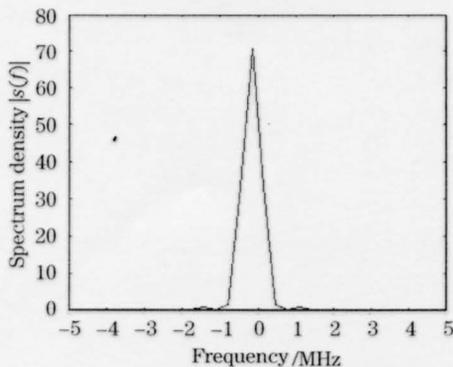


图3 小钢珠过靶信号的频谱波形

Fig.3 Frequency spectrum of a small steel-bead flying through screen

图 3 所示。

需要说明的是上述分析过程是基于小钢珠在穿越光幕过程中光幕光强分布均匀, 严格说来, 光幕光强呈高斯分布, 为分析方便, 在此作了简化处理。

3 卷积分析法

上面分析小钢珠过靶信号中挡光面积 s 从结果上看相当于将一宽度为 a , 幅度为 r 的矩形窗对半径为 r 的半圆作卷积(由于圆具有对称性, 只取上半个圆, 卷积结果乘 2 即可)。即将

$$f_1(x) = rx \in [0, a]$$

与

$$f_2(x) = \sqrt{2rx-x^2} \quad x \in [0, 2r]$$

作卷积后乘以 2, 得

$$s(x) = 2f_1(x) * f_2(x) \quad (1)$$

其中自变量 x 与小钢珠的飞行速度 v 与时间 t 的关系为 $x=vt$, 这样将 $s(x)$ 的波形压缩 v 倍即可得到小钢珠穿过光幕的过靶信号波形图 $s(t)$ 。

根据时域卷积定理, 由 (1) 式可方便地求得 $F[S(x)]$, 假设用 $F[\]$ 表示对函数取傅里叶变换, 又由傅里叶变换的尺度变换特性, 若 $F[f(t)]=F(\omega)$, 则 $F[f(at)]=[F(\omega/a)]/|a|$ (a 为非零的常数), 即信号在时域中压缩 ($a>1$) 等效于在频域中扩展, 反之, 信号在时域中扩展 ($a<1$) 则等效于在频域中压缩。在本系统的分析中, 需将 $F[s(x)]$ 的频率分量扩展 v 倍, 各频率分量的幅值减小 v 倍, 即可获得小钢珠过靶信号 $s(t)$ 的频谱 $s(f)$ 。

4 利用最大误差准则分析信号的有效带宽

对于信号 $x(t)$, 设 $x(f)=F[x(t)]$, 若对其进行频域截取, 有

$$x_a(f) = \begin{cases} x(f) & |f| \leq f_a \\ 0 & |f| > f_a \end{cases}$$

令

$$x_a(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(f) \exp(j2\pi ft) df$$

于是可得误差函数

$$\varepsilon(t) = x_a(t) - x(t)$$

由 $\varepsilon(t)$, 按照一定的误差准则可以得到一个误差函数值 ε 。信号 $x(t)$ 的有效带宽即定为使 ε 等于或小于指定误差值的最小的 f_a 。

按照最大误差准则求信号 $x(t)$ 的有效带宽就是确定一个最小的 f_a , 使

$$|x_a(t) - x(t)|_{\max} \leq \varepsilon_{\max}$$

式中, ε_{\max} 为给定的最大允许误差。根据该准则, 编写 MATLAB 程序, 当选择 $f_a=1.66$ MHz 时, 可获得误差曲线如图 4 所示, 由图 4 和图 2 可知, 此时 ε_{\max}

约占信号最大幅值的 1%。因此 f_a 即为小钢珠过靶信号保证误差值 ε_{\max} 的有效带宽。

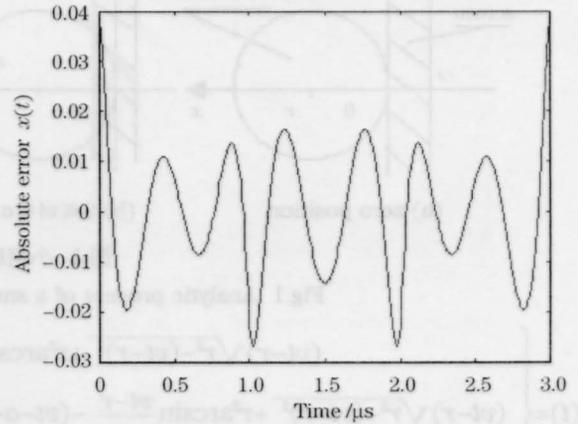


图 4 $f_a=1.66$ MHz 有效带宽近似误差波形
Fig.4 Approximate error waveform of effective bandwidth at $f_a=1.66$ MHz

参考文献

1 赵冬娥. 大面积激光测速靶[D]. 太原: 华北工学院, 2000
2 赵冬娥, 周汉昌. 一种新颖的激光光幕弹丸测速装置[J]. 兵工学报, 2001(增刊): 62~64

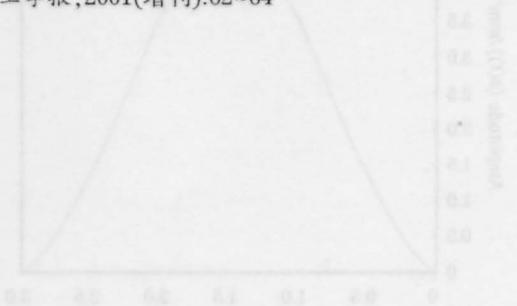


Fig.5 Time spectrum of a small steel ball flying through screen



Fig.6 Frequency spectrum of a small steel ball flying through screen