

引用格式:黄宗弈,舒勤,刘施然.基于EMD算法和小波变换的6分量天平数据处理[J].电光与控制,2019,26(5):81-85. HUANG Z Y, SHU Q, LIU S R. The six-component balance data processing based on EMD algorithm and wavelet transform[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5): 81-85.

基于EMD算法和小波变换的6分量天平数据处理

黄宗弈¹, 舒勤¹, 刘施然²

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对在风洞试验中,6分量天平采集到的数据如何消除干扰的问题,提出了一种结合EMD算法和小波变换的处理方法。从天平的设计角度来考虑数据中可能含有的干扰成分,指出干扰成分与数据的时频关系,在理论上说明该方法的合理性。通过仿真试验还原数据,并与传统的消除干扰算法做误差对比,验证该方法相比于传统方法有着更好的准确性。最后对真实6分量天平数据进行处理,进一步证明该方法的实际可行性。

关键词: 风洞; 6分量天平; EMD算法; 小波变换

中图分类号: V211.74 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.016

The Six-Component Balance Data Processing Based on EMD Algorithm and Wavelet Transform

HUANG Zong-yi¹, SHU Qin¹, LIU Shi-ran²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Hypervelocity Aerodynamic Institute of China, Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem of how to eliminate the interference of the data collected by the six-component balance in the wind tunnel test, a processing method combining EMD algorithm with wavelet transform is proposed. Considering the interference components that may be contained in the data from the perspective of the design of the balance, the time-frequency relationship between the interference components and the data is given, and the rationality of the method is theoretically explained. The data is restored by simulation test, and the error is compared with that of the traditional interference elimination algorithm. It is verified that the method has higher accuracy. Finally, the real six-component balance data is processed to further prove the practical feasibility of the method.

Key words: wind tunnel; six-component balance; EMD algorithm; wavelet transform

0 引言

在航空、航天和武器研制领域,常需要对高速飞行物体如飞机、火箭、航天器和炮弹等在风洞中做空气动力学试验。将飞行器模型静止安装好以后,根据实际需要以高速、超音速甚至是数十倍音速的速度让气流从风洞中流过,以模拟飞行器的高速飞行状态^[1]。在试验过程中,以特殊的测试装置测得飞行物体所受的载荷和变形及其他一些重要参数,风洞天平就是这样一种能够测量风洞中作用在模型上的空气动力和力矩的设备。为了适应航空、航天等领域越来越高的精度

要求,天平也由最初的分量变成3分量,一直发展到现在的6分量测力天平^[2]。国外在6分量天平研制方面起步较早,有着较为完善的理论基础,国内最近几年在该领域的研究也在快速发展。作用在飞行器模型上的气动载荷测量的精确度不仅取决于天平本身的精确度,如何消除6分量测得数据中的干扰也是关键。

目前常用的处理6分量天平数据干扰的算法为傅里叶变换,能较好地消除固频与噪声干扰,缺点是消除固频干扰时不可避免地会消除固频分量附近的原信号成分,而且也不能消除信号频谱与噪声频谱重叠的部分。因此,本文提出了一种基于EMD算法和小波变换的6分量天平数据处理方法,是一种可以有效克服傅里叶算法缺点,更近似地还原出实际数据并通过试验仿真来验证结果的算法理论。

收稿日期:2018-06-19

修回日期:2019-03-13

作者简介:黄宗弈(1993—),男,土家族,四川成都人,硕士生,研究方向为现代信号处理。

1 6 分量天平简介

1.1 6 分量天平结构

6 分量天平主要由固定框、浮动框和相互关联的多个高精度 6 分量传感器组成。其中,6 分量传感器是一种能够测得 X, Y, Z 轴各方向的力或力矩分量的测力元件,根据测得的分力或力矩便能够合成作用在待测物体上的广义力或者广义力矩。按测力原理的不同,6 分量测力元件又分为压电式、电容式、电感式和应变式等。本文试验中采用的为压电式测力元件。

6 分量压电天平内部由石英晶片组成,其简易结构如图 1 所示,采用 6 组压电传感器,利用材料的压电效应原理来测量作用在模型上的气动力,并通过不同晶片的组合完成 6 维力测量^[2],具有很好的大量程载荷静态精确性和动态测量能力。

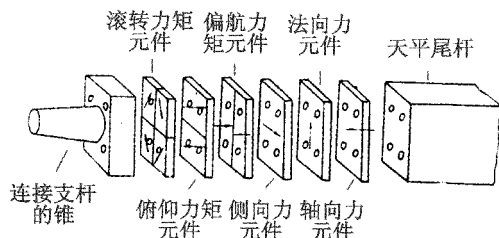


图 1 6 分量压电天平模型

Fig. 1 The model of six-component piezoelectric balance

在天平尾杆上还安装有加速度计,它的作用是捕捉惯性力特征,补偿惯性力^[3]。由于冲击载荷的作用,惯性力干扰由支杆和模型低阶振动产生,系统瞬间会产生振动,并引起气动载荷的过冲振荡。若没有加速度计对系统产生的加速度进行补偿,则会造成风洞试验中的短时动态冲击力测量产生较大误差。

1.2 6 分量天平在风洞试验中的作用

6 分量天平通过 4 根高强度螺栓紧固在支杆上,支杆的另一端连接着待测模型。模型要完全暴露在空气流场中,不能有其他部件产生的扰流。流场稳定时,待测模型所受的气动载荷通过支杆传递到测力天平上,能将空气动力和力矩沿 3 个互相垂直的坐标轴系分解并进行精确测量,实现对飞行器轴向、侧向和法向 3 个方向上力和力矩的直接测量^[3],如图 2 所示。

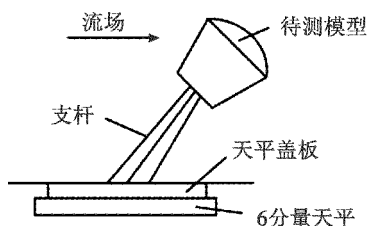


图 2 风洞试验测力示意图

Fig. 2 Force measurement in wind tunnel test

风洞天平中测量的 6 分量即为试件可能受到的轴向力(沿 Z 轴负向)、法向力(沿 Y 轴正向)、侧向力(沿 X 轴正向)、滚转力矩(绕 Z 轴负向)、偏航力矩(绕 Y 轴正向)以及俯仰力矩(绕 X 轴负向)。

1.3 6 分量天平数据干扰分析

针对 6 分量天平数据误差的问题,国内外学者提出了各种原理,主要干扰来源为:

1) 从系统本身考虑,由于测量的灵敏度与系统刚度即材料抵抗变形的能力相关,为提高灵敏度,导致刚度降低,使得信号中来自系统的固有频率干扰成分增加^[4-5];

2) 在信号的前几毫秒内,振动十分复杂,没有规律可循,这部分信号为结构受迫振动,即天平在风洞中外力作用下进行的振动,加速度计可以用来补偿信号中的受迫振动干扰成分^[6];

3) 来自外部的噪声对信号的干扰。

综上,每个分量测得信号成分包括主分量输出、固有频率干扰信号、受迫振动干扰信号以及噪声干扰,而关键在于处理固有频率干扰与噪声干扰^[7]。

2 数据处理算理论

时频分析是提取非平稳信号特征的一种有效方法^[8],将 EMD 算法和小波变换算法的优点结合起来,应用于 6 分量数据处理,处理流程简单,通过仿真结果验证该方法的有效性和准确性。

2.1 EMD 算法基本原理

EMD 算法具有不需要任何先验知识,直接把信号分解成多个本征模态函数的特点,能分析并找出具有所需频率的函数^[9]。

EMD 算法假设对于任何信号都是由若干有限的本征模态函数 IMF 组成的。待分解信号经 EMD 算法分解后得到多个频率从高到底的本征模态函数 IMF。不过需要说明的是,并不是说第 n 分量的频率总是比第 $n+1$ 分量的频率高,而是指在某个局部范围内,第 n 分量的频率值大于第 $n+1$ 分量的频率值,这一点很好地印证了 EMD 算法局部性强的特点。

2.2 小波变换基本原理

小波变换的主要特点是通过变换能够充分突出问题某些方面的特征,对时间(空间)频率的局部化分析,通过伸缩平移运算对信号(函数)逐步进行多尺度细化,最终达到高频时间细分,低频频率细分,能自动适应时频信号分析的要求,从而可聚焦到信号的任意细节^[10]。

对信号进行小波变换以后,信号将在不同尺度下进行多分辨率的分解,并将交织在一起的各种不同频率组成的混合信号分解成不同频段的子信号,因而对信号具有按频带处理的能力。小波分解与重构的方法

将含有噪声的信号在某一尺度下分解到不同的频带内,然后再将噪声包含的频带置零(或直接提取有用信号所在的频带)进行小波重构,从而达到去噪目的^[11]。小波方法去噪作为一种新的时频分析方法,在信号处理领域已经得到了越来越广泛的应用。

2.3 6 分量数据消除干扰方法

1) 去除信号中的固有振动成分。

以法向力 N 为例,将 6 分量天平试验中与法向力 N 有关的加速度计信号 a_{ni} 提取出来,并对其进行傅里叶变换,得到相应的频谱,根据图示找到幅度最高的值,即固有振动频率成分。对法向力 N 进行 EMD 分解,将其分解成十几个分量,分别对这些分量进行频谱分析,并找到包含固有频率成分的分量,将该分量剔除,然后合并剩余分量。合并后的信号 N_s 即为消除了固有频率成分的法向力 N 。

2) 补平信号来自加速度计的受迫振动成分。

对加速度计信号 a_{ni} 进行 EMD 分解,将其分解成十几个分量,分别对这些分量进行频谱分析,并找到包含固有频率成分的分量,将该分量剔除,然后合并剩余分量,合并后信号 a_{ni_s} 即为加速度计 a_{ni} 受迫振动成分^[12]。

a_{ni_s} 和 N_s 之间的关系可以认为是黑箱,分析它们的特征如振动频率、相位等,若频率、相位相同,则可以用 a_{ni_s} 乘以一个数 k 与 N_s 相加减(相位相同相减,相位不同相加),考虑二范数值 m ,即

$$m = \| N_s - k \times a_{ni_s} \|^2 \quad (1)$$

不断改变 k 的大小,直到 m 取得最小值,然后将 N_s 信号减去 k 倍的 a_{ni_s} 信号,使得试验信号中的受迫振动成分补平^[13]。

3) 消除信号中的噪声。

将去除了固有频率成分和补平了受迫振动成分的法向力 N 提取出来,进行小波变换,将其分解成多层分量,并得到信号的噪声阈值。试验中选用的的小波分解的层数为 4 层,每一层又分别包含近似分量和细节分量 2 个分量。近似分量表征了信号的部分波形,细节分量表征了部分噪声波形^[11]。将 4 层中所有的细节分量小于噪声阈值的部分置零,然后合并 4 层分量得到信号 N_0 ,达到消除法向力 N 中噪声的目的。

3 试验模拟仿真

为验证本文方法的正确性和有效性,利用 Matlab 软件搭建一个天平 6 分量数据处理仿真模型。天平 6 分量的输入一般为凹状波形,设得初始的输入信号,模拟实际情况,对该信号添加固频干扰和噪声干扰,见图 3。

对干扰后的波形进行 EMD 分解,共分解为 10 个分量,试验中在分量 4、分量 5 中存在固频成分,将其置零,

合并剩余分量,可得消除固频干扰的信号,如图 4 所示。

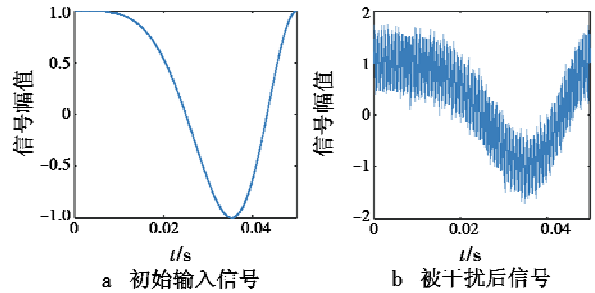


图 3 初始输入信号和被干扰后信号

Fig. 3 Initial input signal and the interfered signal

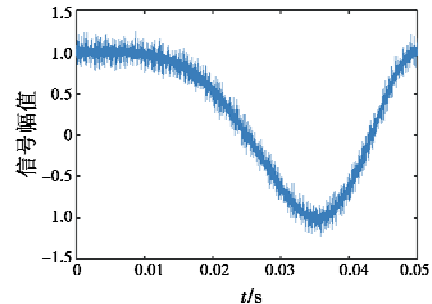


图 4 EMD 去固频干扰后的信号波形

Fig. 4 The signal waveform after EMD removing fixed-frequency interference

对该信号再使用小波阈值去噪,得到还原信号如图 5 所示。

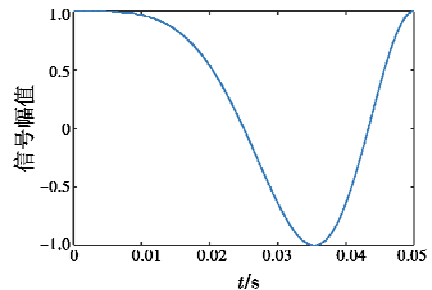


图 5 小波阈值去噪后的信号波形

Fig. 5 Wavelet threshold denoised signal waveform

还原信号与初始信号的相对误差为 0.0040。如果调换小波阈值去噪和 EMD 分解的顺序,则小波处理时由于还有固频的干扰,会影响到噪声阈值的取值,此时的还原信号与初始信号的相对误差为 0.0815。使用傅里叶变换处理来进行对比,此时的还原信号与初始信号的相对误差为 0.0103,大于 EMD 和小波处理后的相对误差,验证了本文所提方法的可行性。

4 试验 6 分量数据处理

以法向力 N 作为试验处理对象。试验天平测得的法向力 N 以及与其相关的纵向加速度计信号 a_{ni} 的波形如图 6 所示。

对 a_{ni} 进行频谱分析,如图 7 所示,得到固有振动

频率为 1.77 Hz。

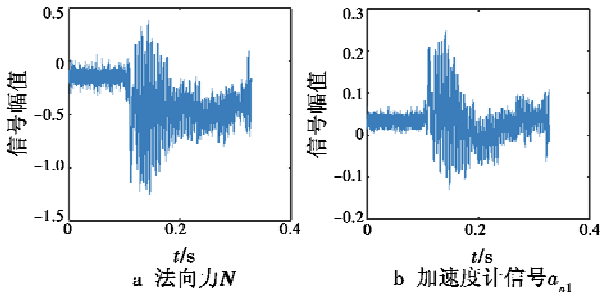


图6 法向力 N 和加速度计信号 a_{n1}

Fig.6 Normal force N and accelerometer signal a_{n1}

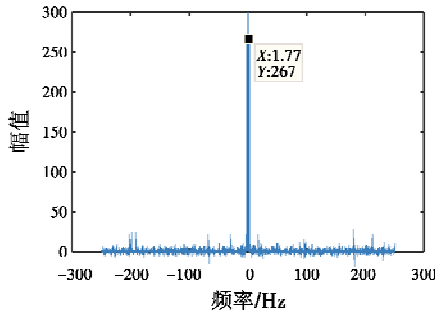


图7 加速度计信号 a_{n1} 的频谱图

Fig.7 The spectrum diagram of the accelerometer signal a_{n1}

对法向力 N 进行 EMD 分解,如图 8 所示,在分量 6 中存在 1.77 Hz 固有振动频率。

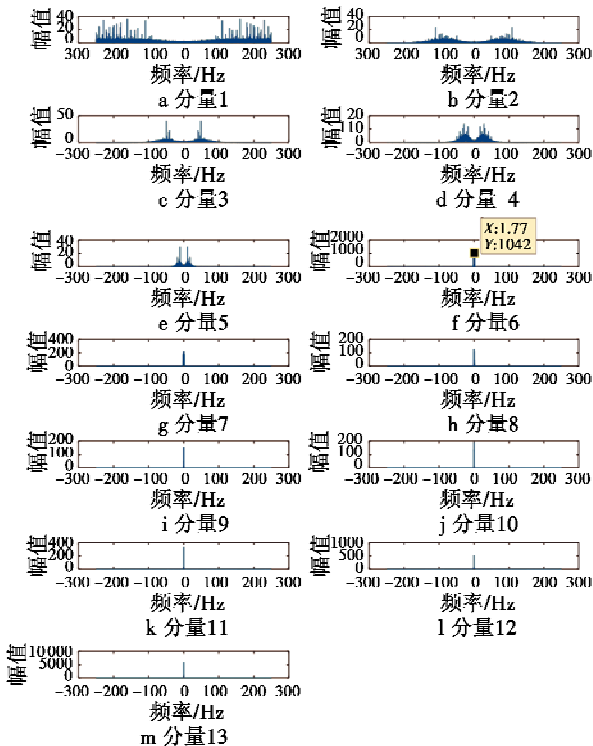


图8 法向力 N 经 EMD 分解成 13 个分量的频谱

Fig.8 Normal force N is decomposed into 13 components by EMD

从法向力 N 中去掉分量 6 后,得到不含固有振动

成分的 N_s 。同样,对 a_{n1} 信号进行 EMD 分解,并去掉其中的固有振动成分,得到 a_{n1} 信号中的受迫振动信号 a_{n1s} 。为了补平法向力 N 中的受迫振动频率信号,需要找到 k 值使得式(1)的值最小^[14]。试验中测得当 k 约等于 -6.5 时,其值最小。

处理完法向力 N 中的固有频率和受迫频率后,对信号进行去噪处理,采用小波分解法,每层的近似分量和细节分量如图 9 所示。

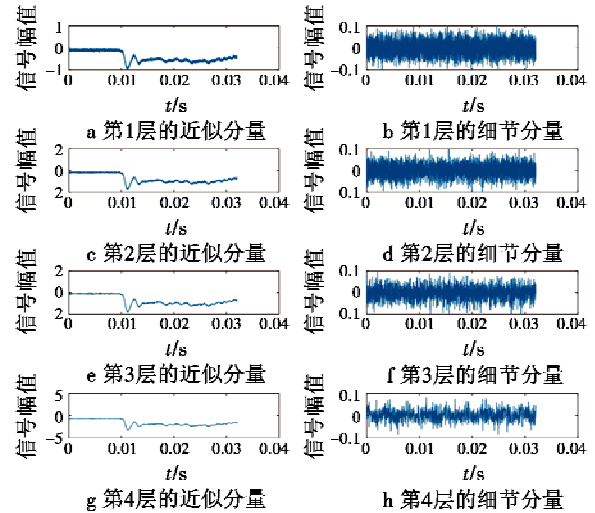


图9 法向力 N 的小波分解图示

Fig.9 The wavelet decomposition of normal force N

令每层细节分量小于计算所得阈值的部分为 0, 进行去噪处理,再合并每层信号,得到还原波形 N_0 如图 10 所示。

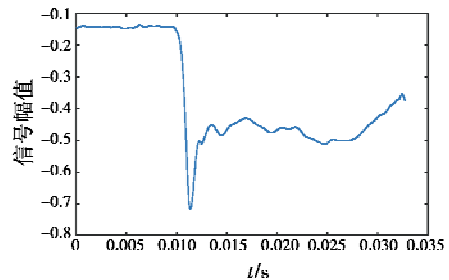


图10 还原波形 N_0

Fig.10 The restored waveform N_0

5 结论

6 分量天平数据处理的关键在于消除来自系统的固有频率干扰和受迫振动干扰以及分量数据中的噪声^[15]。本文从 EMD 分解法能将信号分解成多个本征模态函数的特点入手,对分量分析,找到并去除系统固有频率干扰,对加速度计分析补平受迫振动干扰。通过小波变换弥补了 EMD 本身存在的模态混叠和抗噪声性差的缺点,对剩余信号做去噪处理。通过与传统的傅里叶变换处理相比较,实现数据更精确的还原。

本文方法原理简单,所需分析数据量少,计算耗时较短,可靠性高,抗噪性较强,仿真表明该方法是6分量天平数据处理的一种有效可行的方法。

参考文献

- [1] 贾振元,李映君,张军,等. 并联式轴用压电六维力/力矩传感器[J]. 机械工程学报,2010,46(11):62-68.
- [2] 杨耀栋,王复,郭大华. 在高超声速脉冲风洞中使用的六分量天平测力系统和10°尖锥模型的气动力测量[J]. 气动实验与测量控制,1988(1):60-64.
- [3] JOSHI D, VADASSERY P, LU F K. Acceleration compensation for force measurements in hypersonic shock tunnel [C]//The 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum & Aerospace Exposition, 2013. doi:10.2514/6.2013-1020.
- [4] 罗亚军,吕治国,刘曦,等. 一种压电天平传感器的 ANSYS 仿真与分析[C]//中国空气动力学学会测控专业委员会六届四次空气动力学测控技术交流会,2013:1542.
- [5] 张晓辉,王玉惠,秦暄,等. 高超声速飞行器机翼的颤振损伤特性分析[J]. 电光与控制,2018,25(7):68-72.
- [6] BEAUSSIER J. A six-component balance[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1968, AES-4(2):210-217.
- [7] 毕志献. 炮风洞中浮框式六分量应变天平的设计 [C]//全国激波与激波管学术会议,2004:271-274.
- [8] 钟佑明. 希尔伯特—黄变换局瞬信号分析理论的研究 [D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [9] 马增强,李亚超,刘政. 基于变分模态分解和 Teager 能量算子的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2016,35(13):134-139.
- [10] 曾番,黄文龙,夏伟鹏,等. 小波包特征能量算子与多核函数组合 KPCA 的声目标识别[J]. 电光与控制, 2017,24(4):5-7.
- [11] 王川川,曾勇虎,赵明洋,等. 基于小波降噪和盲源分离算法的信号分离方法研究[J]. 电光与控制,2017, 24(7):7-11.
- [12] MARINEAU E C. Force measurements in hypervelocity flows with an acceleration compensated piezoelectric balance [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2011, 48(4):697-700.
- [13] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2002.
- [14] MARINEAU E, MACLEAN M, MUNDY E, et al. Force measurements in hypervelocity flows with an acceleration compensated strain gage balance [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2015, 49(3):474-482.
- [15] 贾振元,高翼飞,任宗金,等. 六维力压电天平研制与静态性能测试研究[J]. 大连理工大学学报, 2014(1):43-48.

(上接第31页)

参考文献

- [1] 李巧丽. 基于能力的装备需求论证结构化方法研究 [D]. 石家庄:装甲兵工程学院,2008.
- [2] 陈建荣. 面向装备论证的能力需求生成理论与方法研究[D]. 石家庄:装甲兵工程学院,2010.
- [3] 许俊飞,邢昌风,吴玲. 基于解析规则的舰艇区域防空作战能力需求生成[J]. 北京航空航天大学学报, 2016,42(1):193-200.
- [4] ZHAO Q S, CHANG L L, ZENG P, et al. Problem frame analysis of weapon system of systems requirement [J]. Procedia Engineering, 2011(15):1466-1470.
- [5] FAN Y P, GUO Q S, ZHAO K. Capabilities-based requirement demonstration method for weapon system-of-systems [C]//International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014:206-210.
- [6] 郭正新,江晶. 一种不同距离的雷达检测概率计算模型[J]. 空军雷达学院学报,2003,17(4):7-9.
- [7] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 3版. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [8] 董志荣. 论作战系统中时间与精度关系[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术,2000(1):1-12.
- [9] 朱莉,齐欢,代建民. 基于 Petri 网的作战系统时间与精度分析[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(2):234-236.
- [10] 邢昌风,李敏勇,吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [11] 邱志明,曹渊,郭勇. 舰炮武器对岛礁上集群目标射击效力指标算法研究[J]. 兵工学报,2016,37(1):37-41.
- [12] 元爱辉. 弹炮结合武器系统毁伤效能分析[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [13] ZHAI X J, LUO W. Numerical simulation research of interior ballistics character for non-lethal strike weapon system [J]. Procedia Engineering, 2012(31):308-314.