

振动与冲击在引信技术中的应用展望*

张 合

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室 南京, 210094)

摘要 主要探讨了弹药引信系统在勤务处理、发射过程、弹道飞行以及硬目标侵彻中所遇到的各种振动与冲击问题。首先,阐述了振动问题,包括有引信在运输、弹道飞行过程中所受到的振动载荷及为解决全弹道供电问题,将飞行过程中的气流振动能量转化为电能三个方面;其次,介绍了冲击问题,涵盖勤务处理过程中的意外跌落、发射过程中的后坐力、侵彻过程中的惯性过载及将冲击过载转换为引信用电能这四个方面;然后,介绍了为保证引信在振动与冲击环境中的可靠性所采取的措施,既保证引信系统在恶劣的强冲击环境中不会产生结构损伤,又保证系统不会产生误动作,提前解除保险造成危害;最后,详细阐述了为满足引信控制起爆电路和全弹道供电的需求,对引信使用过程中遇到的振动与冲击的能量的收集措施,并对引信振动与冲击问题的发展进行了展望。

关键词 引信; 振动; 冲击; 惯性力

中图分类号 TJ43; TH3

引 言

随着军事变革和战争形态的改变,战场信息化、网络化与智能化的水平不断提高,武器装备正朝着远射程、高机动、高精度、信息化、多能与高毁伤方向发展,而光电子、计算机、信息处理、原材料与元器件、新型探测与识别等技术的巨大进步也推动了各类武器系统的发展与进步。作为武器系统中起毁伤作用的弹药,其关键核心部件——引信,其功能不仅在利用环境信息保障武器系统的全寿命安全,还要保证利用目标信息依据预定策略或实时指令控制弹药起爆,实现最大的毁伤效能。未来的智能引信除利用战场信息(环境信息、目标信息和指挥控制信息)以外,还应具有实现自动感知、自主分析判断和决策的能力^[1-4]。

无论是已装备的机械引信、机电引信、近炸引信,还是正在发展的灵巧引信,从制造、运输到发射、弹道飞行以及与目标相互作用整个生命周期内,都将会经历复杂的物理环境,诸如高低温、潮湿、盐雾、振动、电磁波与强冲击的作用。其中最为典型的力学环境就是运输振动与发射冲击。力学环境对于引信的影响涉及到引信的安全性与作用可靠性,主要表现为对安全系统结构强度和机构运动的影响。因此掌握引信整个生命周期所承受的振动与冲击环境

力,可以为研发、生产及使用提供技术支撑。笔者针对引信系统中遇到的振动与冲击问题进行了梳理,归纳与分析目前引信经历振动与冲击过程中遇到的若干问题。

1 振 动

1.1 勤务处理

引信经历的勤务处理环境指的是从生产出厂到使用发射之前的一系列环境,其振动环境指的是运输、搬运过程中受到的振动。任何交通工具都会因为路面的不平整不可避免的存在着振动与颠簸。1982年国际标准组织在《路面不平度表示方法草案》中规定了路面不平度的功率谱拟合公式

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left[\frac{n}{n_0} \right]^\omega \quad (1)$$

其中: $G_q(n_0)$ 为路面功率谱密度; n 为空间频率,指的是每米长度中包含的波长个数; n_0 为参考空间频率($n_0=0.1/\text{m}$); $G_q(n_0)$ 为参考空间 n_0 下路面功率谱密度; ω 为频率指数,其决定了路面谱的频率结构。

一般而言,勤务处理运输过程中的振动一般不会太强烈,尤其是导弹等战斗部件的振动更为微弱。表

* 国家自然科学基金资助项目(51675280, 51709140)
收稿日期:2018-12-30;修回日期:2019-01-17

1 列出了部分车辆在满载情况下的振动情况^[1]。其中运输振动的频率范围为 2~100 Hz, 车辆运输过程中的惯性加速度一般只有 3~4 g, 最大值不超过 20 g。由于加速或者减速引起运动方向上的加速度更小, 一般小于 1 g, 即使包装箱在卡车内部不固定, 所产生的惯性加速度不超过 300 g^[3,5]。

振动作为一种重复性的加载过程, 极易引发零部件的疲劳损坏, 甚至可能会导致引信的提前解除保险。目前, 针对传统引信的防护通过限制振动幅值来实现, 一般的振动过程不会导致保险件对隔爆件的完全解脱; 针对机电式或者全电子式安全系统, 可通过相关传感器的设计来屏蔽机械信号; 且对于只能在发射过程激活的引信而言, 其安全系统在运输中处于“休眠”状态, 这些措施均保证了安全系统不会对运输过程中的振动信号产生误响应, 产生误动作^[6]。

表 1 各种车辆在满载运行中的振动

Tab. 1 Vibration of various vehicles under full load

车辆类型	上下振动		左右振动		前后振动	
	a/g	f/Hz	a/g	f/Hz	a/g	f/Hz
铁路	1	4~80	1.2	2	0.5	5~10
大卡车	2	2~50	1.3	8~50	0.5	8~50
小型汽车	0.8	2~20	0.5	2~20	0.3	2~20
三轮汽车	1.6	3~20	1.1	3~20	1	3~20

1.2 弹道振动

与勤务处理的振动环境相比, 弹道飞行中的振动环境更加危险, 这是因为弹道飞行过程中的引信已经“激活”——解除保险, 因此弹道振动极易引发引信机构误动作并导致弹道早炸。弹道振动冲击环境主要由气动扰流引起, 此外还可能由于发动机排气噪音、内部设备工作以及噪声所引起的振动。如某型号空空导弹在自由飞行时的振动谱型的示意图如图 1 所示^[7], 在两个频段内 (20 Hz~ f_1 , f_2 ~2 000 Hz) 双倍频条件下振动的增大和衰减均为 3 dB, 即频率每增加 1 倍, 振动幅值增大/衰减 3 dB, 表示为 3 dB/oct。航空火箭弹以及空空导弹均存在着由于弹道振动所引发的弹道早炸的问题^[6,8-9]。

此外, 除了需要对气流扰动所引起的弹道振动加以防范以防止早炸, 许多研究人员也对气流扰动所引起的振动加以利用。随着引信向小型化、灵巧化与智能化方向发展, 也对引信提出了全弹道完成安全控制、姿态监测与控制、目标探测与识别等要求, 这也对引信电源提出了全弹道供电的要求, 其中

一种解决问题的思路是将弹丸飞行中迎面气流能量转换成振动, 并通过压电发电机或者电磁发电机转换为电能^[10-11]。美国 AD-7416961 报告中论述了射流发电机及环音谐振器的工作原理^[12], 其结构如图 2 所示。

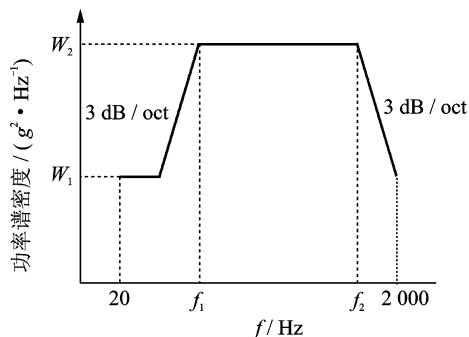


图 1 自由飞行时的振动图谱

Fig. 1 Free flying vibration spectrum

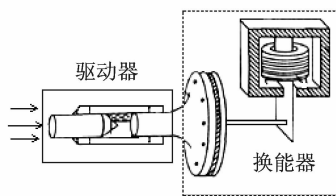


图 2 射流发电机示意图

Fig. 2 Jet generator schematic

磁电式射流发电机放置在弹丸的头部, 弹丸头部开有气孔, 当弹丸飞行时, 高速气流通过弹丸头部进入环形喷嘴, 冲击谐振腔的尖劈产生一种音频扰动, 并触发腔体内部的空气进入谐振状态, 空气的脉动再驱动夹在腔体末端的金属膜片, 膜片的振动通过连杆引起磁电转换器磁阻的交替变化, 便在感应线圈中产生交变电流且输出的电压频率很稳定。国内众多研究人员在磁电式射流发电机的基础上, 利用压电换能器代替磁电换能器, 构成了气流致声压电发电机方案, 实现了体积小型化, 提高了可靠性, 如图 3 所示^[13-17]。

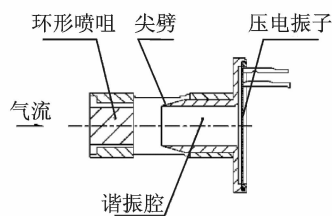


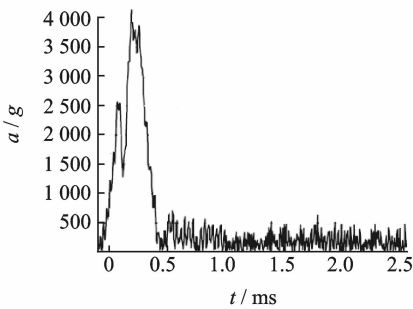
图 3 气流致声压电发电机

Fig. 3 Air-driven resonance piezoelectric generator

2 冲击

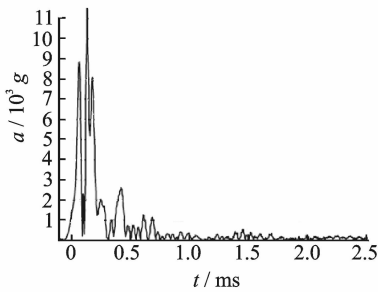
2.1 勤务处理

勤务处理过程中的意外跌落、磕碰和撞击,均会使得引信受到冲击力的作用,冲击的波形、大小和作用时间与包装方式、弹丸质量、结构尺寸、跌落高度及地面性质有关。图 4 为在 3 m 落高条件下分别作用在水泥面和钢板的加速度曲线^[18]。从图中可以发现,不同材料面对于冲击加速度的影响非常大。实际上,如当弹丸落下土地时,最大加速度幅值有几百个 g ,但是作用时间长达十几毫秒;当弹丸落向钢板时所产生的加速度可达近 20 000 g ,持续时间只有 300 多微秒。前人针对跌落冲击方面的研究进行了大量的理论分析与实验研究^[19-20]。



(a) 3 m 高度落下水泥地面

(a) Falling height of 3 m on the concrete floor



(b) 3米高度落下钢板

(b) Falling height of 3 m on the steel plate

图 4 弹丸下落受到的冲击加速度

Fig. 4 Impact acceleration of the projectile while falling

2.2 空投所产生的冲击

引信零件在空投过程中所产生的惯性力主要包含有开伞时所产生的冲击惯性力和着陆时所产生的惯性力。其中开伞时的冲击力与飞机速度、空投高度、空投重量及开伞时间等因素有关;而着陆时所产生的冲击力则与着陆速度、空投引信的包装及地面性质等因素有关^[5]。表 2 给出了某次实验过程中空

投所产生空投惯性力的实验值。

表 2 空投冲击力的实验值

Tab. 2 Experimental value of airdrop inertial force g

测试条件	实验次数	最大值	最小值	平均值
开伞时	14	0.996	0.653	0.896
着陆时	32	25.800	3.700	7.240

2.3 装填引信零件时受到的冲击力

在装填弹药的过程中,弹药在输弹机的推动下,以每秒几米甚至十几米的速度向膛运动,当弹带与膛线起始部相碰或药筒底部与炮尾相碰时,弹药的运动突然停止,使得引信受到可达 100 g 以上冲击力的作用。此外,往膛输送弹丸时不正确的操作可能使引信头部与炮尾相撞,输弹机构的某些故障也可能使引信受到磕碰,从而使得引信产生变形或者松动。以海双 30 火炮为例,手动输弹时产生的冲击力达到了 120 g ;而采用输弹机供弹时,所产生的冲击力甚至可达到 217.7 g 。此外,引信零部件在输弹过程中还会受到侧向冲击的作用,这是因为弹丸轴线与膛膛轴线不会完全重合,在装弹的过程中,弹丸只能被迫与膛线对正,引发侧向冲击。这个力很大,可能使得引信零件松动或变形,如防潮帽破裂、钟表或药盘引信的装定分划移位等。

2.4 发射后坐冲击力

在发射过程中,引信会受到后坐冲击力的作用。一般而言,后坐冲击力与膛内压力呈正比关系,即后坐冲击力与膛内压力具有相同的特征。基于能量平衡方程,得到火炮内弹道基本方程^[21]为

$$SP_t(l_\psi + l) = F_{hy}\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi m v^2 \quad (2)$$

其中: $l_\psi = l_0[1 - \frac{\Delta}{\delta}(1 - \psi) - \alpha_{hy}\Delta\psi]$; S 为膛膛横截面积; P_t 为膛内压力; l 为弹丸在膛内的运动距离; l_ψ 为药室自由容积缩径比; F_{hy} 为火药力; ψ 为火药燃烧百分数; $\theta = K - 1$, K 为比热比; φ 为弹丸质量虚拟系数; m 为弹丸质量; v 为运动速度; Δ 为火药装填密度; δ 为火药密度; α_{hy} 为火药气体余容。

将上述方程求解即可获得内膛压力的变化趋势,如图 5 所示。下面着重分析膛内发射与后效期这两个时期。弹丸在膛内运动可以分为 3 个时期:前期、第 1 时期和第 2 时期。前期是指弹丸从装填完毕至其即将运动这一时间区间。当压力达到 P_B ,药筒内装药开始着火并燃烧,不断释放产生的气体。由于相对运动较小,这一阶段的膛内压力不断增加

直至 P_0 , 并将其作为下一阶段的起始压力。进入第1时期后, 弹丸开始加速运动, 药室容积相对增大, 火药与空气接触面增大使其燃烧更加剧烈, 压力曲线上升, 当气体做功对压力上升的动力和压力下降的影响达到动态平衡时, 压力达到最大膛压 P_m , 对应的后坐惯性力也达到最大值。随着弹丸速度的不断增加, 弹尾空间迅速增大, 此时因火药燃烧增加的气体压力小于因体积增大而损失的气体压力, 膛内压力开始下降。当剩余火药燃烧殆尽时, 膛内压力也随之降至 P_k , 结束第1时期。虽然火药已经燃烧完毕, 但由于还有大量内能未做功, 弹丸依然会加速前进, 且膛内压力不断下降。当弹丸刚出炮口时, 压力降为 P_g , 随后进入后效期。当弹丸飞离炮口瞬间, 膛内高速气流也随之喷出, 继续推动弹丸加速前进, 因此弹丸最大速度不是出现在飞离炮口瞬间, 而是在飞离炮口之后 $0.9 \sim 10 \text{ ms}$ [22]。

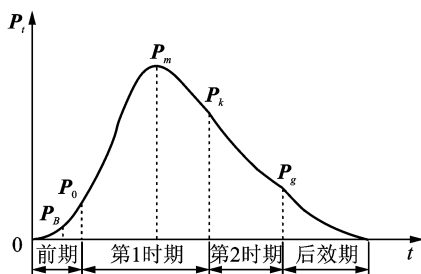


图5 膛内发射压力-时间曲线

Fig. 5 Launching pressure-time curve

一般榴弹炮的后坐加速度可达 $10\,000 \sim 25\,000 g$, 部分舰炮榴弹的后坐加速度达 $50\,000 g$, 其中, 小口径榴弹的后坐加速度甚至能够达到 $70\,000 g$, 且发射后坐力的持续时间一般可到几十毫秒 [22]。表3给出了典型的发射后坐加速度量值。

表3 典型的冲击环境

Tab. 3 Typical impact environment

名称	导弹引信	火箭弹引信	炮弹引信
后坐加速度/ g	25~50	100~1 000	10 000~70 000

发射后坐力往往可利用作为引信解除保险的环境力之一。因此, 引信安全系统设计关键之一就是其既能在勤务处理的意外跌落环境中不会解除保险, 又能准确地识别发射环境并解除保险。冲击力的主要参数为冲击加速度峰值和持续时间。一般而言, 在引信设计过程中, 模拟勤务处理意外跌落载荷的峰值较大, 脉宽相对较小; 发射后坐冲击力脉宽较长, 如图6所示。图中横坐标为时间, 纵坐标为加速

度, A_1, A_2 分别表示勤务意外跌落与正常发射环境下加速度曲线的最大值。对于机电或者全电子式引信安全系统而言, 可通过“阈值+时间窗”算法, 即同时比较加速度信号的幅值与持续时间以区分勤务处理信号意外跌落和发射环境 [23-24]。很多机械安全系统也可以识别勤务处理意外跌落环境与冲击发射环境, 如微机电系统 (micro electro mechanical systems, 简称 MEMS) 机械开关 [25-28]。

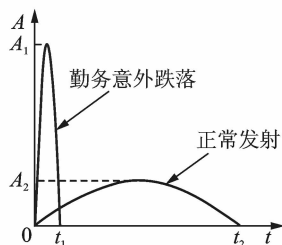


图6 两种典型加速度曲线示意图

Fig. 6 Two typical acceleration curve diagrams

除了利用发射时的后坐力解保之外, 还有部分物理电源利用发射时的后坐力提供的能量发电。如美军的 M-762 机电时间引信的后坐发电机及利用发射时的后坐力进行发电, 1999 年 Oberlin 提出了利用弹丸发射时后坐力作用在多层压电叠堆上来发电并用于给引信低功耗处理电路和起爆电路供电。李映平等 [29] 利用压电叠堆实现弹药发射时后坐冲击力的收集与转换, 针对发射条件下冲击能量的收集与转换, 提出了利用压电叠堆实现能量转换, 实验结果表明该引信电源满足电子引信的供电需求。但是无论哪种电磁发电还是压电发电, 利用发射时的后坐力发电, 得到的电势也是脉冲电压, 适合引信电路工作时间短的弹种。为了延长作用在换能器载荷的时间, 黎辉等 [30] 设计了一种引信自维持压电电源, 如图7所示, 其能够将外部冲击载荷转换为自维持激励源, 延长作用于压电换能器上载荷的持续时间, 实现压电电源的持续供电。陈永超等 [31] 以弹簧-质量块和压电换能器为主要部件设计了一种引信发电装置, 可将弹药发射时的冲击能量转换为持续的电能输出, 测试结果表明, 其发电时间能够达到 2.499 s 。

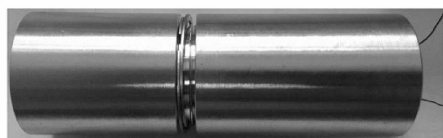


图7 引信自维持压电电源

Fig. 7 Fuze self-sustaining piezoelectric power supply

2.5 目标侵彻冲击

当弹丸侵彻目标时,引信同样会受到冲击载荷的作用。该冲击力取决于载体着速、撞击姿态、目标的介质特性等参数,很难进行精确确定,只能根据经验甚至半经验公式进行计算。一般而言,弹丸在侵彻过程中受到的阻力可根据庞赛来-萨布斯基公式进行计算

$$F_z = C \frac{\pi D_x^2}{4} (a_1 + c v_x^2) \quad (3)$$

其中: C 为弹形系数; D_x 为弹丸进入目标类的最大直径; v_x 为弹丸碰击目标时的速度; a_1 为碰击目标时的静态阻力系数; c 为动态阻力系数。

根据式(3)可知,弹丸在侵彻目标时,其过载一般可达到30 000~60 000 g,对于小直径战斗部而言,其承受的过载可达到30 000~200 000 g,持续时间达到2~20 ms。这对引信的零部件和引线的设计、安装和连接都提出了苛刻要求,引信中的电子元器件或者组装部件,往往采用环氧树脂或者有机硅进行灌封处理,以提升其抗冲击能力^[32]。但是仅仅通过灌封处理并不足以使引信电路抵抗侵彻过程中产生的高冲击过载。这是因为在高冲击过程中,外壳因承受屈服应力等原因会发生形变或者断裂,进而引起灌封材料的挤压、拉伸和剪切,使得电路灌封体出现裂纹或断裂,最终导致电路板或者芯片中结构薄弱部位因应力集中而产生断裂短路或者断路,进而使得整个控制系统产生故障甚至失效。因此,引信中的电路器件除了需要进行灌封处理之外,往往还与诸如泡沫铝等缓冲措施相结合。许多科研工作者针对弹载控制系统的抗冲击分析与设计展开了大量的研究工作,其在高达190 000 g的条件下仍能正常工作^[33-37]。此外,许多科研工作者还对许多其他的弹载器件进行缓冲隔震处理^[38-39]。

3 结束语

随着智能弹药与巡飞弹药的出现,引信正朝着探测、识别、通讯和决策等智能化方向发展,这也对引信抗振动与冲击能力提出了更高的要求。一方面既要防止振动与冲击对引信造成的结构上的损伤,对引信的结构抗冲击设计提出要求,也需要缓冲隔震结构具有更高的缓冲能力;另一方面需要尽可能将振动与冲击的能量转化加以利用,以满足智能引信的供电与环境识别的需求,只有如此,才能在未

来的军事斗争中保证引信更安全与更可靠,赢得战争胜利。

参 考 文 献

- [1] 杨绍卿. 武器装备的新宠——智能弹药[J]. 科技导报, 2012, 30(16): 3-3.
Yang Shaoqin. The new favorite of weapon equipments—intelligent munitions[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(16): 3-3. (in Chinese)
- [2] 赛特. 冰山的一角——中国智能弹药发展现状[J]. 坦克装甲车辆, 2016, 12(23): 39-43.
Sai Te. The tips of the iceberg—the development status of China's intelligent munitions[J]. Tank & Armoured Vehicle, 2016, 12(23): 39-43. (in Chinese)
- [3] 张合,李豪杰. 引信机构学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014:4-12.
- [4] 邹金龙. 智能弹药中智能引信的作用[J]. 制导与引信, 2012, 33(4): 1-8.
Zhou Jinlong. The effect of intelligent fuze in intelligent munitions[J]. Guidance & Fuze, 2012, 33(4): 1-8. (in Chinese)
- [5] 《引信设计手册》编写组. 引信设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1978:17-18.
- [6] 李豪杰. 引信环境分析、测试与迫弹引信安全系统设计研究[D]. 南京:南京理工大学, 2006.
- [7] 孙慧,刘勇涛. 空空导弹引信触发开关地面振动响应对比分析[J]. 航空兵器, 2016, 3(3): 62-65.
Sun Hui, Liu Yongtao. Comparison and analysis for ground vibration response of fuze impact switch on air-to-air missiles[J]. Aero Weaponry, 2016, 3(3): 62-65. (in Chinese)
- [8] 张武凤,王雨时,张宏,等. 惯性触发开关动态特性与引信弹道炸分析[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(3): 35-40.
Zhang Wufeng, Wang Yushi, Zhang Hong, et al. Analysis of inertial impact switch dynamic characteristics and fuze ballistic explosive[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(3): 35-40. (in Chinese)
- [9] 朴哲镐,刘戈,韩玉,等. 尾翼弹与近炸引信弹道匹配性及可靠性增长设计[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(2): 63-66.
Piao Zhegao, Liu Ge, Han Yu, et al. Ballistic matching and reliability growth design of fin-stability projectile and proximity fuze[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(2): 63-66. (in Chinese)

- [10] 陈永超,高敏,俞卫博. 压电发电技术发展及其在引信中的应用探索[J]. 电源技术, 2015, 39(3): 640-643.
Chen Yongchao, Gao Min, Yu Weibu. Piezoelectric power generation technology and application in fuze [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(3): 640-643. (in Chinese)
- [11] 徐伟,王昊,陆静,等. 引信用 MEMS 气流谐振压电发电机[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(1): 9-13.
Xu Wei, Wang Jiong, Lu Jing, et al. MEMS air-driven fluidic resonance piezoelectric generator for fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(1): 9-13. (in Chinese)
- [12] 邹华杰. 小型振动压电发电机气流致声激励技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [13] 李映平. 引信压电发电机原理及试验研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
- [14] 雷军命. 引信气流谐振压电发电机[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 23-26.
Lei Junming. An Air-driven Fluidic resonance piezoelectric generator for fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(1): 23-26. (in Chinese)
- [15] Zou Huajie, Chen Hejuan, Zhu Xiaoguang. Piezoelectric energy harvesting from vibrations induced by jet-resonator system[J]. Mechatronics, 2015, 26: 29-35.
- [16] 邹华杰,陈荷娟,梁医,等. 引信振动压电发电机气流致声激励特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 610-618.
Zou Huajie, Chen Hejuan, Liang Yi, et al. Study of drive characterization of fuze vibration piezoelectric generator based on airflow-induced sound[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 610-618. (in Chinese)
- [17] 雷军命,李新文,朱雅鹏,等. 限幅振荡的引信气流谐振压电发电机[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(3): 21-25.
Lei Junming, Li Xinwen, Zhu Yapeng, et al. Limited amplitude oscillation based fuze air-driven fluidic resonance piezoelectric generator[J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(3): 21-25. (in Chinese)
- [18] 韩学平,芮筱亭,洪俊,等. 引信惯性部件坠落动力学试验分析及数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 1990-1993.
Han Xueping, Rui Xiaoting, Hong Jun, et al. Analysis and numerical simulation of fuse inertia components falling dynamics [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8): 1990-1993. (in Chinese)
- [19] 陆静,程翔,鞠敏,等. 坠落冲击环境下引信保险系统的可靠性仿真[J]. 南京理工大学学报, 2001, 25(4): 369-372.
Lu Jing, Cheng Xiang, Ju Min, et al. Reliability simulation of fuze safety and arming system under drop-down shock environment [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001, 25(4): 369-372. (in Chinese)
- [20] 张学伦. 战斗部跌落安全性试验方法的述评[J]. 兵器装备工程学报, 2018,39(7):16-19.
Zhang Xuelun. Review of test methods for warhead drop safety [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018,39(7):16-19. (in Chinese)
- [21] 周织建. 非硅高 g 值微机械加速度开关设计基础研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [22] 王雨时. 引信设计用内弹道和中间弹道特性分析[J]. 探测与控制学报, 2007, 29(4): 1-5.
Wang Yushi. Analysis of interior ballistic and intermediate ballistic characteristic for fuze designing [J]. Journal of Detection & Control, 2007, 29(4): 1-5. (in Chinese)
- [23] 张兆鑫. 迫弹引信环境信息智能处理及控制电路设计[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [24] 吴雷. 引信安全逻辑控制电路设计和算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- [25] 步超. 微机械加速度闭锁开关设计与可靠性研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.
- [26] Zhou Zhijian, Nie Weirong, Xi Zhanwen, et al. A high-electrical-reliability MEMS inertial switch based on latching mechanism and debounce circuit [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(7): 1918-1925.
- [27] Nie Weirong, Zhou Zhijian, Xi Zhanwen, et al. A novel dual-threshold MEMS acceleration latching switch [C] // 2017 IEEE International Symposium on. [S. l.]: IEEE, 2017: 54-57.
- [28] 胡鹏程,多学武,张文广,等. 某型号引信后坐保险机构设计及试验研究[J]. 中国军转民, 2017(10): 70-72.
Hu Pengcheng, Duo Xuewu, Zhang Wenguang, et al. Design and experimental study of a model of fuze safety mechanism [J]. Defense Industry Conversion in China, 2017(10): 70-72. (in Chinese)
- [29] 李映平,赖百坛,黄学功. 引信用多层压电电源的能量分析[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(5): 92-94.
Li Yingping, Lai Baitan, Huang Xuegong. The energy analysis of multilayer piezoelectric power supply [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003, 23(5): 92-94. (in Chinese)
- [30] 黎晖,高敏. 基于压电陶瓷的引信物理电源的建模与

- 设计[J]. 功能材料, 2011, 42(S2): 292-294.
- Li Hui, Gao Min. Model building and design of fuze physical power supply based on piezoelectric ceramic [J]. Function Materials, 2011, 42(S2): 292-294. (in Chinese)
- [31] 陈永超, 高敏, 俞卫博, 等. 基于钹式压电阵列的引信发电装置[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(4): 62-66.
- Luo Yongchao, Gao Min, Yu Weibu, et al. Fuze piezoelectric generator based on cymbal array structure [J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(4): 62-66. (in Chinese)
- [32] 罗刚. 电子器件灌封材料的现状及发展趋势[J]. 实验科学与技术, 2010, 8(3): 20-22.
- Luo Gang. Present situation and development trend of potting materials using in electron device[J]. Experiment Science and Technology, 2010, 8(3): 20-22. (in Chinese)
- [33] 孙韬, 马喜宏, 李长龙, 等. 弹体侵彻夯土靶加速度测试记录仪的研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(2): 211-215.
- Sun Tao, Ma Xilong, Li Changlong, et al. Study on missile acceleration test recorder for penetrating earth target[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2012, 33(2): 211-215. (in Chinese)
- [34] 马喜宏, 李长龙, 孙韬, 等. 弹载加速度记录仪抗冲击防护结构设计[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 64-67.
- Ma Xilong, Li Changlong, Sun Tao, et al. Anti-impact protective protective structure design for a missile accelerometer recorder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(3): 64-67. (in Chinese)
- [35] 靳书云, 靳鸿, 张艳兵, 等. 弹载加速度数据记录仪抗高冲击设计[J]. 传感技术学报, 2014, 27(4): 463-466.
- Jin Shuyun, Jin Hong, Zhang Yanbing, et al. Anti-impact design for missile accelerometer recorder [J]. Chinese Journal of Sensor and Actuator, 2014, 27(4): 463-466. (in Chinese)
- [36] 姬永强, 李映辉, 聂飞. 弹载数据存储模块抗高过载防护技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(18): 104-106.
- Ji Yongqiang, Li Yinghui, Nie Fei. Protection technology for onboard data storage module against high overload [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(18): 104-106. (in Chinese)
- [37] 陈宏亮, 马少杰, 张锦明. 弹载高冲击三维加速度存储测试仪[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(2): 41-45.
- Chen Hongliang, Ma Shaojie, Zhang Jinming. High impact three-dimensional acceleration storage tester [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(2): 41-45. (in Chinese)
- [38] 钱立志. 弹载任务设备抗高过载方法研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1017-1020.
- Qian Lizhi. Study of projectile-loaded equipment against high overload [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8): 1017-1020. (in Chinese)
- [39] 甘霖, 张合, 张祥金, 等. 非线性发射过载对激光引信光学接收系统的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2364-2369.
- Gan Lin, Zhang He, Zhang Xiangjin, et al. Effect of on nonlinear emission overload laser fuze optical receiving system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2364-2369. (in Chinese)



第一作者简介: 张合, 男, 1957年8月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为灵巧化和智能化引信技术。现任智能弹药国防重点学科实验室副主任、科技委引信专家组组长、海军装备部军械保障部预研专家组委员及南京理工大学机械电子工程学科学科带头人。主持并完成重大科技专项、装备型号、国家自然科学基金、总装预研及江苏省攀登学者重点基金等多项高水平课题, 获国家科学技术进步二等奖2项(排名第1)、省部级科技发明与进步二等奖以上6项(排名第1), 授权国家发明专利61项、软件著作权6项, 以第1作者出版专著4部, 发表论文200余篇。

E-mail: hezhangz@njust.edu.cn

