

球形万向惯性开关设计的关键变量分析

谢明赫, 秦栋泽*

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 深入探究万向惯性开关的动力学特性。**方法** 推导相关数学模型, 根据模型结构和运动状态计算出开关的匀加速度灵敏度, 在此灵敏度的基础上施加过载, 观察关键部件的尺寸公差以及弹簧的预压力设置对运动状态的影响, 采用 MATLAB 和 ADAMS 等 2 种软件对比仿真。**结果** 对运动结果起决定性作用的关键变量为大小弹簧的预压力。针对关键零件的公差带来的影响, 由仿真和理论计算可知, 轴向施加过载时, 大弹簧、小弹簧的影响百分比分别为 53.09% 和 18.32%, 小球+杆、小球的影响百分比分别为 10.39% 和 1.98%。弹簧的尺寸公差影响约为接电结构尺寸公差影响的 5.11~9.25 倍; 垂直轴向施加过载时, 大弹簧的影响百分比为 0.81%, 小球+杆为 3.49%, 倍数关系为 4.31 倍, 但影响百分比均较小。**结论** 大弹簧的公差影响最大, 其次为小弹簧的公差, 然后是球的尺寸公差, 最后是杆的尺寸公差。依据模型结构, 推导出球形万向惯性开关关键变量的普遍规律, 支撑内部接电结构的部件所产生力学效应的影响效果最大, 其次为接电结构的尺寸大小。

关键词: 引信; 球形万向惯性开关; 关键变量; 预压力; 公差; 动力学

中图分类号: TJ630.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)08-0039-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.006

Analysis of the Key Variables in the Design of Spherical Universal Inertial Switches

XIE Minghe¹, QIN Dongze^{1*}

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to deeply explore the dynamics of the universal inertial switches. The relevant mathematical model was deduced and the uniform acceleration sensitivity of the switch was calculated according to the model structure and the motion state. On the basis of the sensitivity, the overload was applied to observe the dimensional tolerance of key components and the effect of the prepressure setting of the spring on the motion state and the comparison simulation method of MATLAB and ADAMS was used. The key variable decisive for the outcome of the motion was the prepressure of the large and small springs. In view of the effect of the tolerance of key parts, according to the simulation and theoretical calculation, when the axial overload was applied, the effect percentage of large spring and small spring was 53.09% and 18.32%, respectively, and the effect percentage of small ball + rod and small ball was 10.39% and 1.98%, respectively. The effect of the size tolerance of the spring was about 5.11-9.25 times the effect of the size tolerance of the electrical structure. When the vertical axial overload was applied, the effect percentage of the large spring was 0.81% and that of the ball + rod was 3.49%, and the multiple relationship was 4.31 times, but the impact percentage was small. The tolerance of the large spring has the most effect, followed by the

收稿日期: 2024-05-31; 修订日期: 2024-07-08

Received: 2024-05-31; Revised: 2024-07-08

引文格式: 谢明赫, 秦栋泽. 球形万向惯性开关设计的关键变量分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 39-48.

XIE Minghe, QIN Dongze. Analysis of the Key Variables in the Design of Spherical Universal Inertial Switches[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 39-48.

*通信作者 (Corresponding author)

small spring, then the size tolerance of the ball, and finally the size tolerance of the rod. According to the model structure, the general rule of the key variables of the spherical universal inertial switch was deduced. The mechanical effect of the components supporting the internal electrical structure affects the most, followed by the size of the electrical structure.

KEY WORDS: fuze; spherical universal inertia switch; key variables; prepressure; tolerance; dynamics

引信惯性开关、碰击开关、光纤接触探测器等是引信发火控制系统的接触探测装置的其中一类,作用于引信电源及其后续供给电路之间,其中一项功能是控制电路的工作状态。在勤务处理和运动过程中,为防止早炸处于断开状态,在撞击目标的过程中,开关闭合,使其接通正常工作,这样既可以提高引信后续电路工作的安全性,又能保证电路被可靠的接通^[1]。近年来,相关文献对惯性开关动态特性、闭合阈值、结构设计等进行了研究。王利等^[2]介绍了一种新型机械式惯性加速度开关,并通过理论计算,得出了此开关部分设计参数的选取原则及方法。赵剑等^[3]利用V形梁结构的双稳态跳转特性,设计了一种具有显著阈值特性的双稳态惯性开关。房春虎等^[4]针对惯性触发开关灵敏度与弹道安全性矛盾,设计出适用于非旋转弹药或低旋弹药带加重柱的惯性触发开关。针对MEMS引信惯性开关的可靠性和安全性,近年来也有较多学者对其结构以及关键参数进行了优化设计^[5-10]。周小淞等^[11]针对引信中的普通开关无法可靠闭合自锁接通电路的问题,设计了一种机械式惯性加速度开关,利用炮弹发射时的过载使其闭合并且自锁,使电路有效、可靠地接通。张武凤等^[12]对惯性开关的动态特性与弹道安全性进行了分析,对惯性触发开关的接电过载阈值进行了仿真。宁晓斌等^[13]为满足无线电引信钝感度要求,设计出悬臂梁式单向高过载闭合的开关。李龙星等^[14]设计了一种可以利用炮弹的旋转加速度过载使其解除保险,后效期结束后闭合自锁的机械式惯性加速度开关。曹苏雅拉图等^[15]针对传统擦地炸开关结构复杂、作用率不高的问题,提出了机电触发引信高可靠性擦地炸接电开关。许马会等^[16]设计了一种可实现闭锁功能的微机械惯性接电开关,该接电开关能够保证在满足预设的条件时迅速闭合,闭合时间短,闭合过程稳定且能实现自锁,确保电源接通之后在复杂的弹道环境中,能够始终处于被接通状态,为引信电源系统提供技术支持。黄戈等^[17]针对引信对极薄弱目标发火的适应性,提出了基于低过载惯性开关的极薄弱目标发火作用方法,同时对弹道安全性进行了设计。王大奎等^[18]针对引信小型化、高安全需求,设计了一种具有低发火电压的引信用固态安全开关。任超等^[19]提出了一种具有高抗侧向过载能力的MEMS惯性开关,开关中引用了阿基米德螺旋线式弹簧结构,其结构简单,且对垂直方向上的加速度冲击较敏感。黄巍^[20]针对引信电源系统对供电控制与安全性的要求以及引信零部件的小型化、灵巧化要

求,设计了一种应用于中大口径非旋转弹引信电源系统的微惯性接电开关。

上述研究面向的对象与本质不同,结构不同,作用原理也有一定差异,并且未见有将万向惯性开关关键部件尺寸公差作为关键变量进行分析的相关报道。针对此问题,本文对万向惯性开关设计的关键变量进行了分析。

1 惯性开关的结构

1.1 开关的组成

以某球形万向惯性开关为例,惯性开关的核心部分是一个沿轴向和垂直于轴向2个方向的单自由度近似线性的振动系统,其结构如图1所示。该开关的结构有接触座1、接触套2、杆3、弹簧4和7、隔板5、下半球套6、球8、螺母9、上半球套10、外壳11等,其中隔板5和外壳11为非导电材料保证绝缘。

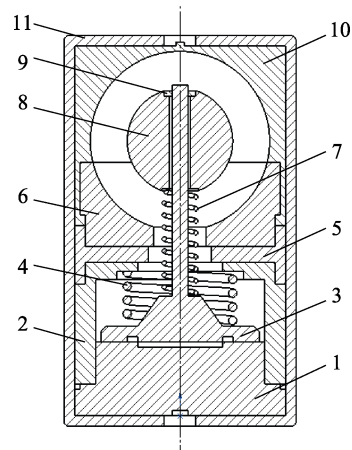


图1 惯性开关结构

Fig.1 Structural diagram of the inertial switch

1.2 开关的工作原理

振动系统由大弹簧、小弹簧、杆、球和螺母等组成。当开关受到轴向加速度作用时,向下,球可压缩小弹簧运动,向上,杆、球一起可压缩大弹簧运动;受侧向加速度时,球与杆可在内部发生转动,同时倾斜压缩大弹簧。这样球和惯性系统、接触座等为一极,球套为另一极,两极间由绝缘隔板和塑料外壳保证绝缘。在正常条件下,由大弹簧、小弹簧使惯性系统保持在平衡位置,开关处于断开状态。在鱼雷航行过程中,当受到离心加速度和冲击、振动过载作用时,在

超过惯性开关灵敏度的冲击作用下, 弹簧的预压力和刚度保证开关不可能接通, 而在弹体撞击球与球套相接触时实现闭合, 从而接通发火回路。

1.3 数学模型

仿真之前, 需要确定开关的灵敏度, 通过比较过载和灵敏度的大小关系, 可估计出开关内部构件的运动状态变化情况。

当加速度方向沿 y 轴正向 (向上) 时, 惯性力将使球、杆、小弹簧和螺母向上爬行, 压缩大弹簧, 且有:

$$Ma = f_0 + KX \quad (1)$$

$$a = (f_0 + KX) / M \quad (2)$$

式中: M 为惯性系统质量, kg; f_0 为大弹簧的初始张力, N; K 为大弹簧刚度, N/m。

当加速度沿 y 轴负向时, 杆受接触座支持不能下移, 爬行力使球沿杆向下, 压缩小弹簧。其数学模型同式 (1)、(2), 此时 M 为小球的质量, f_0 为小弹簧的初始张力, K 为小弹簧刚度。当敏感装置轴线与水平面垂直时, 爬行力作用于惯性系统质量重心, 对杆底支撑面产生力矩, 使系统绕杆底盘 O 点转动, 如图 2 所示。

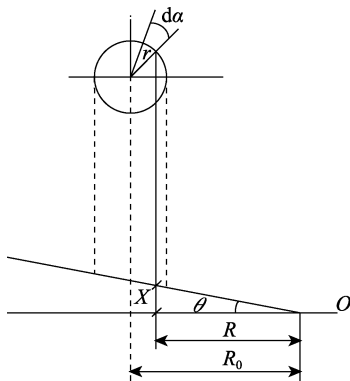


图 2 弹簧刚度转换图一

Fig.2 Spring stiffness conversion diagram I

在稳加速度条件下有:

$$Ma Y_c = KX_0 R_0 + K_t \theta \quad (3)$$

式中: Y_c 为惯性系统质量重心, m; R_0 为杆底盘半径, m; K_t 为大弹簧的抗摆刚度, N·m/rad; X_0 为大弹簧的初始压缩位移, m。

当圆柱螺旋弹簧受倾斜压缩时, K_t 随着 θ 的改变而改变, 如图 3 所示。因此, 作用力矩与倾斜角 θ 不是线性关系。

取弹簧上微单元 ds , 则:

$$ds = r \cdot dr \quad (4)$$

$$dk = ds \cdot k / 2\pi r = (r da / 2\pi r) k = (dr / 2\pi) k \quad (5)$$

单元弹簧力:

$$df = dk \cdot X \quad (6)$$

$$X = R \cdot \tan \theta \quad (7)$$

因此有:

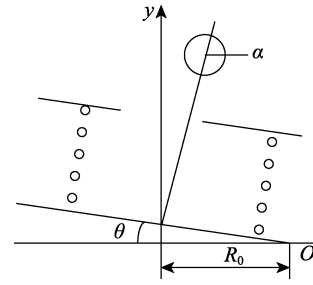


图 3 弹簧刚度转换图二

Fig.3 Spring stiffness conversion diagram II

$$df = (da / 2\pi) K \cdot R \cdot \tan \theta \quad (8)$$

df 对 O 点的力矩为:

$$dT = df \cdot R = K \cdot R^2 \cdot (\tan \theta / 2\pi) \cdot d\alpha \quad (9)$$

而:

$$R = R_0 - r \cos \alpha \quad (10)$$

因此:

$$dT = K (R_0 - r \cos \alpha)^2 (\tan \theta / 2\pi) \cdot d\alpha \quad (11)$$

$$T = \int_0^{2\pi} dT = 2K (\tan \theta / 2\pi) \int_0^{\pi} (R_0 - r \cos \alpha)^2 \cdot d\alpha \quad (12)$$

$$= K \cdot \tan \theta \left[R_0^2 + (r^2 / 2) \right]$$

又因为:

$$T = K_t \cdot \theta \quad (13)$$

所以:

$$K_t \cdot \theta = K \cdot (\tan \theta / \theta) \left[R_0^2 + (r^2 / 2) \right] \quad (14)$$

根据式 (3) 和 (14) 即可求出该情况下灵敏度^[21]。

由于只观察关键构件之间的影响大小关系, 所以各构件同比缩小放大不会对结果产生影响, 上述灵敏度计算所用部分参数与开关初始结构假设参数见表 1。匀加速度灵敏度计算结果见表 2。

表 1 参数列表

Tab.1 List of parameters

| 参数名称 | 参数值 |
|------------------------------|----------|
| 球的质量/kg | 0.075 0 |
| 杆的质量/kg | 0.055 7 |
| 螺母质量/kg | 0.000 4 |
| 小弹簧线径/mm | 1.080 0 |
| 小弹簧平均螺旋直径/mm | 8.170 0 |
| 小弹簧刚度/(N·m ⁻¹) | 1 000 |
| 惯性系统质量重心/mm | 32.410 0 |
| 大弹簧压缩刚度/(N·m ⁻¹) | 1 500 |
| 大弹簧线径/mm | 2.160 0 |
| 大弹簧平均螺旋直径/mm | 27.000 0 |
| 杆底盘半径/mm | 20.250 0 |
| 重力加速度/(N·kg ⁻¹) | 9.800 0 |
| 小弹簧的预压力/N | 20.000 0 |
| 大弹簧的初始压缩位移/mm | 71.683 4 |
| 惯性系统向上的极限位移/mm | 8.550 0 |
| 球向下的极限位移/mm | 10.240 0 |
| 惯性系统的极限倾斜角度/(°) | 6.840 0 |

表 2 匀加速度灵敏度
Tab.2 Uniform acceleration and sensitivity

| 加速度方向 | 加速度值/g | |
|--------------------------|---------|-------------|
| | 不动作 | 动作 |
| 触发敏感装置轴线与水平面垂直 | 0~52.29 | 52.29~69.57 |
| 触发敏感装置轴线与水平面平行 (y轴正向) | 0~83.69 | 83.69~90.34 |
| 触发敏感装置轴线与水平面平行 (y轴负向) | 0~27.21 | 27.21~36.63 |

2 研究方法

根据开关的工作原理，球形万向惯性开关在轴向和侧向存在不同的工作情况，其关键变量也存在差异。在分析关键变量时，通过仿真深入探究关键部件尺寸公差的重要性，并根据所得数据通过理论计算可得各关键部件的公差影响百分比。分析流程如图 4 所示。

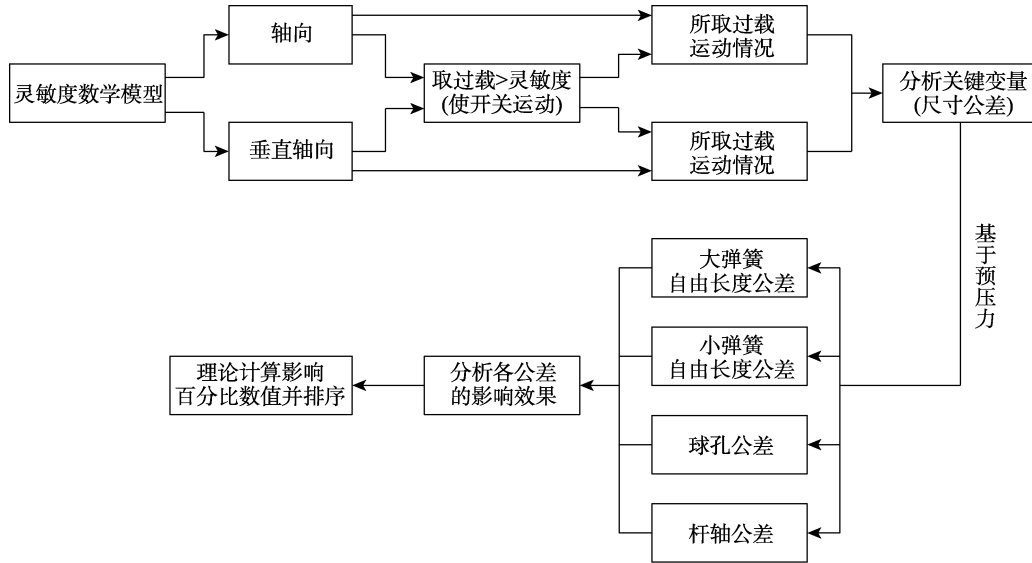


图 4 研究流程

Fig.4 Flow block diagram of the study

在将弹簧安装在开关内部时，由于是静态压缩，所以只需考虑自由长度公差即可，且这样可以更加精准地预测弹簧在装配时的行为。研究引信开关关键部件的尺寸公差时，无需考虑装配公差，因为重点在于确保部件自身的制造质量和设计要求的一致性，以保证其功能性。

3 选取过载值及仿真

3.1 仿真实论基础

惯性开关的典型结构是“弹簧-质量-阻尼系统”，工作原理如图 5 所示^[22]。

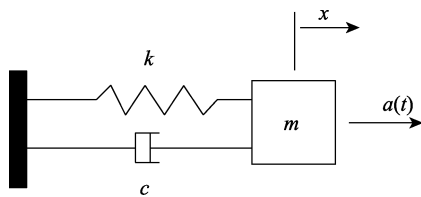


图 5 惯性开关“弹簧-质量-阻尼”系统的工作原理

Fig.5 Working principle of inertial switch "spring mass-damping system"

当惯性激励 $a(t)$ 施加在开关的轴向时，在惯性激励的作用下，系统的力学平衡方程可表示为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = a(t) \tag{15}$$

式中： x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为主动惯性构件的位移、速度和加速度； m 为质量； c 和 k 分别为弹簧的阻尼系数和刚度。由于施加匀加速度过载，所以 $a(t)$ 设置为表 2 中的恒定值。

当惯性激励垂直于轴向时，系统的力学平衡方程需变化为：

$$J\ddot{\theta} + C_1\dot{\theta} + K_1\theta + KX_0R_0 = T(t) \tag{16}$$

式中： J 为系统转动惯量； C_1 为系统阻尼系数； θ 为惯性系统的角位移； $T(t)$ 为干扰力矩。 $T(t)$ 中匀加速度过载值不变，惯性系统质量重心随运动改变。

为观察内部构件的运动状态变化和可能出现的情况改变，选取过载于动作加速度值区间，在仿真时间内全程施加于动作构件。

3.2 不存在公差时的仿真分析

加速度方向沿 y 轴负向（向下）时，匀加速度过载取值 $36.00g$ 。将计算所得参数和取值代入 MATLAB 进行仿真，得到小球沿杆滑动的位移曲线如图 6 所示。

加速度方向沿 y 轴正向（向上）时，为观察改变关键变量对系统动作的影响，匀加速度过载取值 $89.89g$ ，代入 MATLAB 进行仿真，得到杆沿轴向的位移曲线如图 7 所示。

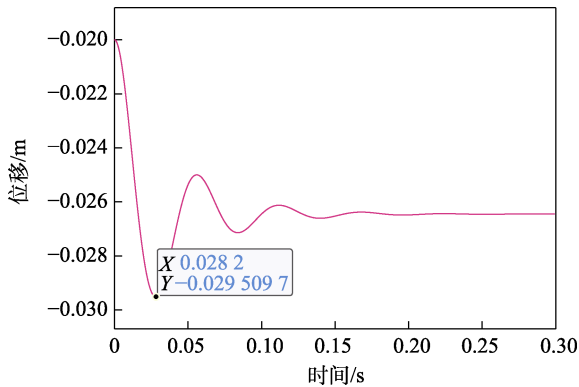


图 6 小球沿杆滑动位移
Fig.6 Ball sliding along the rod

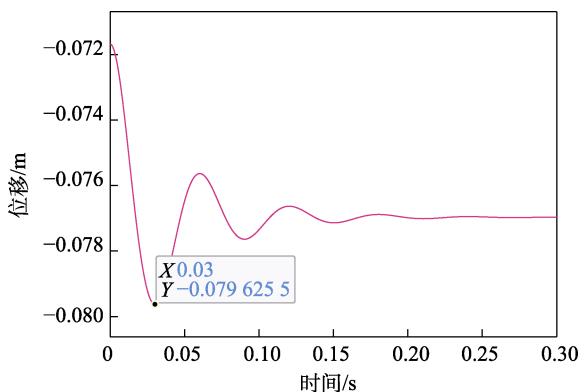


图 7 杆的轴向位移
Fig.7 Axial displacement of the rod

加速度方向与水平面垂直时, 匀加速度过载取值为 $68.41g$ 。结合式 (14) 和式 (16), 通过 MATLAB 仿真, 由于系统存在零初始条件, 所以选取 5° 开始进行仿真, 得到惯性系统的倾斜角度如图 8 所示。

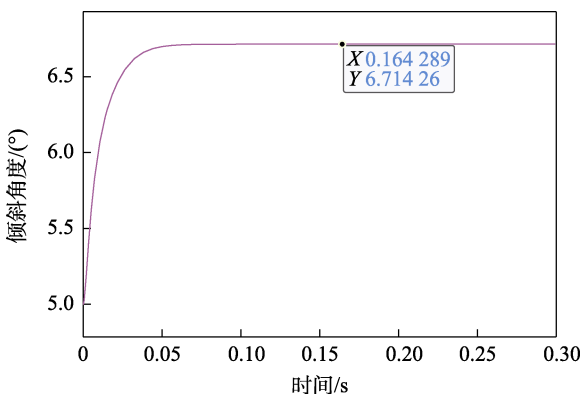


图 8 惯性系统的倾斜角度
Fig.8 Tilt angle of the inertial system

为验证数值仿真结果的准确性, 利用三维建模软件, 按照开关初始结构假设参数构建三维实体模型。为了进行仿真实验, 在 3 种情况下将模型进行合理简化。以零件之间的位置配合为主, 导入 ADAMS 仿真软件, 设置模型密度, 并添加相应约束、接触等, 考虑到球、杆、底座与球套间的距离, 其在软件中的模型如图 9 所示。

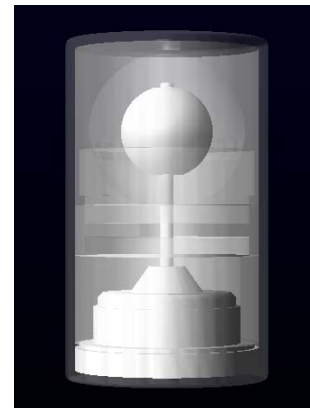
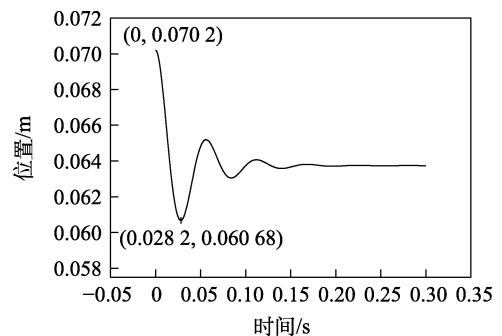
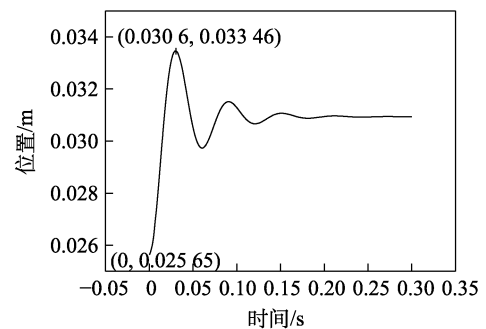


图 9 模型
Fig.9 Model

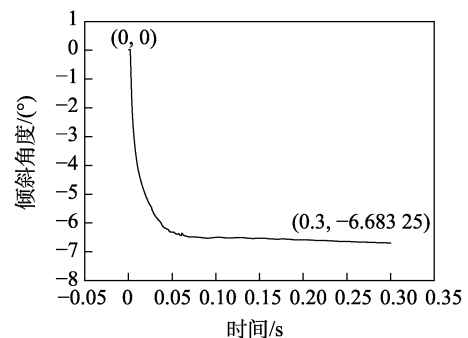
设置实体模型初始条件, 分别在相应方向上施加加速度过载, 得到小球沿杆滑动的位移曲线、杆沿轴向的位移曲线、惯性系统的倾斜角度, 如图 10 所示。



a 小球沿杆滑动位移



b 杆的轴向位移



c 惯性系统的倾斜角度

图 10 ADAMS 仿真结果
Fig.10 Simulation results of the ADAMS: a) ball sliding along the rod; b) axial displacement of the rod; c) tilt angle of the inertial system

若仿真时间延长,得到的结果只是稳定的时间延长,不会影响幅值;若仿真时间缩短,可能不会达到幅值,开关更趋于稳定。依据初始条件进行仿真,相

对应的结果列于表3。以小球、杆的轴向位移最大值、杆的倾斜角度最大值是否达到表1的极限值为判据,达到即为接触,否则为接近。

表3 弹簧预压力下各方向所用过载所得数据
Tab.3 Data obtained from overload used in all directions under spring prepressure

| 加速度 过载方向 | 仿真环境 | 小弹簧 预压力/N | 大弹簧 预压力/N | 小球轴向 位移最大值/mm | 杆轴向 位移最大值/mm | 杆的倾斜角度 最大值/° | 球/杆与球套是 否接触或接近 |
|-------------|--------|--------------|--------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 向下 | MATLAB | 20 | — | 9.51 | — | — | 接近 |
| | ADAMS | 20 | — | 9.52 | — | — | 接近 |
| 向上 | MATLAB | 20 | 107.53 | — | 7.94 | — | 接近 |
| | ADAMS | 20 | 107.53 | — | 7.81 | — | 接近 |
| 垂直 | MATLAB | 20 | 107.53 | — | — | 6.714 26 | 接近 |
| | ADAMS | 20 | 107.53 | — | — | -6.683 25 | 接近 |

观察图6~8,图10~12及表3可知,全程施加过载的情况下,在0.15s之前已经达到稳定状态,且幅值满足要求,即使施加时间再长也只是稳定状态延长。若施加时间不足0.3s,即可能不会达到幅值。

对比2种仿真软件得到的数据结果,发现2种软件所展现的球与杆的运动状态接近一致。倾斜角度的正负表示方向,由于是万向惯性开关,所以关注角度的大小即可。微小的误差可能由于软件的计算方式或者接触的设置有关。以加速度向下为例,小球压缩弹簧,弹簧对杆的力增大,使得杆会轻微穿透接触座,位置发生微小变化。接触碰撞函数的理论计算公式如下。

$$F_{\text{contact}} = k \cdot \delta^e + \text{STEP}(\delta, 0, 0, \delta_{\text{max}}, c_{\text{max}}) \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (17)$$

式中: F_{contact} 为接触力; k 为接触刚度; δ 为穿透深度; e 为力指数; δ_{max} 为最大穿透深度; c_{max} 为达到最大穿透深度时的最大阻尼值。穿透深度和穿透速度的计算是由ADAMS的几何引擎自动完成的。

仿真接触变形量及穿透深度相比构件的相对运动位移较小,可以推断出构件的运动变化主要受其尺寸公差的影响。2种仿真结果合理可信。

3.3 加速度向下时的关键变量公差影响分析及仿真

以小弹簧提供20N的预压力为前提,考虑到在制造过程中存在自由长度公差是不可避免的,通过查阅资料^[23]可知,小弹簧的自由长度公差数值为±1.27mm,取+1.27mm,可用预压力侧面反映自由长度公差带来的影响。存在公差时,小弹簧预压力为21.27N,过载取值为36.00g。通过MATLAB仿真,得到球沿杆的位移曲线如图11所示。若小球存在公差,一般情况下,球孔的公差等级为H10,取极限偏差,即生产过程中,球孔的上公差达到120μm时,直径为5.69mm,可通过小球质量侧面反映公差带来

的影响,通过MATLAB仿真,得到球的轴向位移曲线如图12所示。

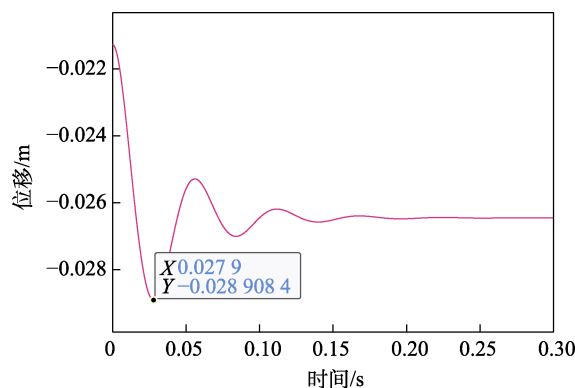


图11 1.27mm公差下小球位移
Fig.11 Small spherical displacement at the 1.27mm tolerance

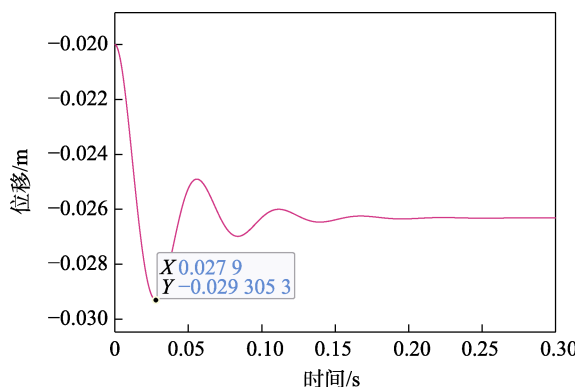
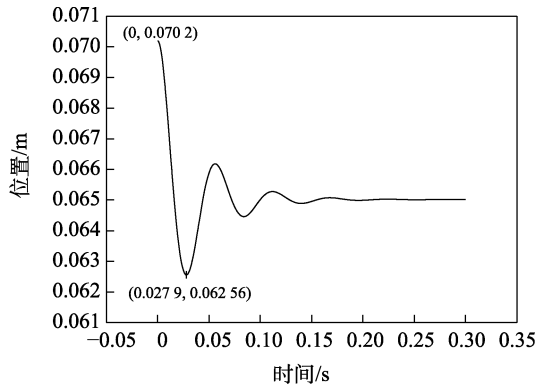
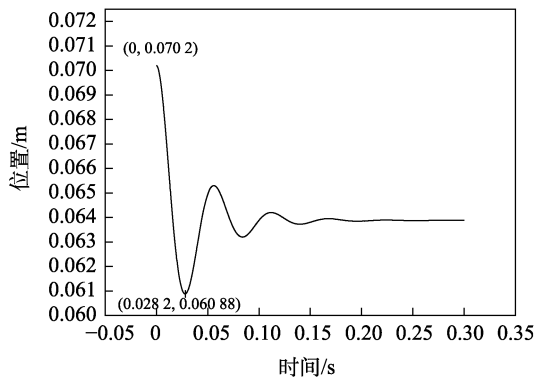


图12 H10公差等级下的小球位移
Fig.12 Small spherical displacement at the H10 tolerance grade

采用ADAMS软件进行验证,将得数据制成折线图,如图13所示。虽然2种软件所得的结果数据存在微小误差,但在合理范围内,仿真结果合理可靠,见表4。



a 1.27 mm 公差下小球位移



b H10公差等级下的小球位移

图 13 ADAMS 仿真结果

Fig.13 Simulation results of the ADAMS: a) 1.27 mm tolerance; b) H10 tolerance grade

表 4 加速度向下时采用关键变量公差所测数据

Tab.4 Measured data of key variable tolerance adopted when the acceleration is downward

| 仿真环境 | 加速度方向 | 小弹簧公差/mm | 小球公差 | 小球轴向位移最大值/mm | 球与球套是否接触或接近 |
|--------|-------|----------|------|--------------|-------------|
| MATALB | 向下 | +1.27 | — | 7.638 4 | 接近 |
| ADAMS | 向下 | +1.27 | — | 7.640 0 | 接近 |
| MATLAB | 向下 | — | H10 | 9.305 3 | 接近 |
| ADAMS | 向下 | — | H10 | 9.320 0 | 接近 |

3.4 加速度向上时的关键变量公差影响分析及仿真

由于大弹簧提供了 107.53 N 的预压力, 通过查阅资料^[23]可知, 大弹簧的自由长度公差数值为 ± 3.048 mm, 取 +3.048 mm, 通过 MATLAB 仿真, 得到杆的轴向位移变化曲线如图 14 所示。若杆存在公差, 一般情况下, 杆轴的公差等级为 h10, 取极限偏差, 即生产过程中, 杆轴的下公差达到 120 μ m 时, 直径为 3.85 mm, 同时球孔公差等级取 H10。通过 MATLAB 仿真, 得到杆的位移曲线如图 15 所示。ADAMS 仿真所得结果如图 16 所示。根据所得图像与数据制成表格, 如表 5 所示。

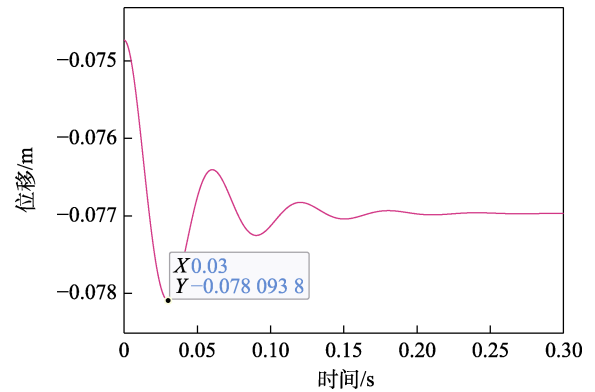


图 14 3.048 mm 公差下杆的位移

Fig.14 Displacement of the rod under the 3.048 mm tolerance

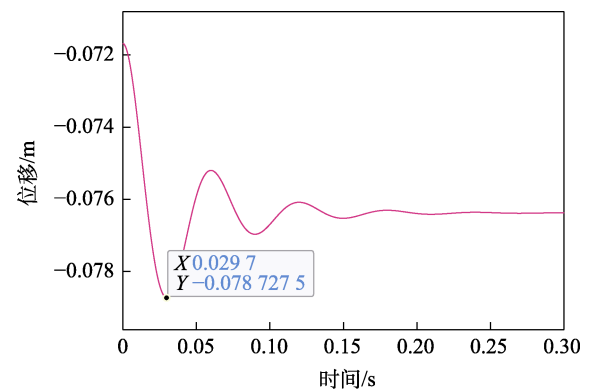
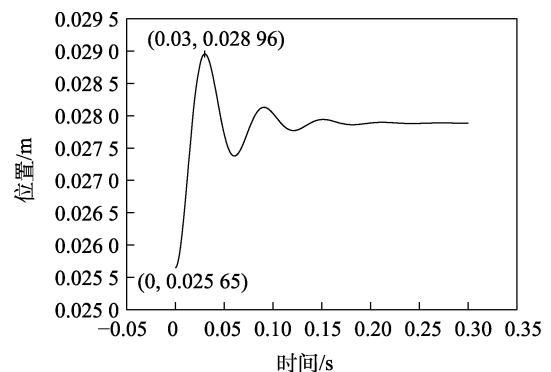
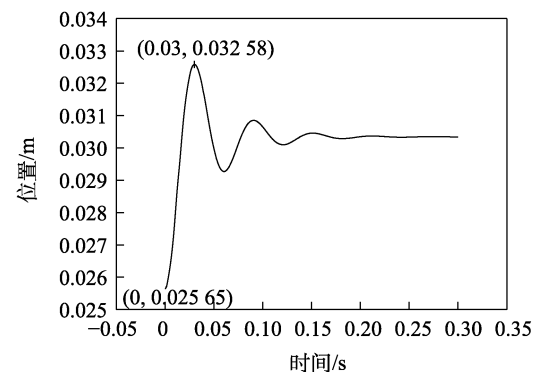


图 15 H10/h10 公差下杆的位移

Fig.15 Displacement of the rod under the H10/h10 tolerance



a 3.048 mm 公差下杆的位移



b H10/h10 公差下杆的位移

图 16 ADAMS 仿真结果

Fig.16 Simulation results of the ADAMS: a) 3.048 mm tolerance; b) H10/h10 tolerance

表5 加速度向上时采用关键变量公差所测数据
Tab.5 Measured data of the key variable tolerance adopted when the acceleration is upward

| 仿真环境 | 加速度方向 | 大弹簧公差/mm | 杆轴公差 | 球孔公差 | 杆的轴向位移最大值/mm | 杆与球套是否接触或接近 |
|--------|-------|----------|------|------|--------------|-------------|
| MATLAB | 向上 | +3.048 | — | — | 3.362 4 | 接近 |
| ADAMS | 向上 | +3.048 | — | — | 3.310 0 | 接近 |
| MATLAB | 向上 | — | h10 | H10 | 7.044 1 | 接近 |
| ADAMS | 向上 | — | h10 | H10 | 6.930 0 | 接近 |

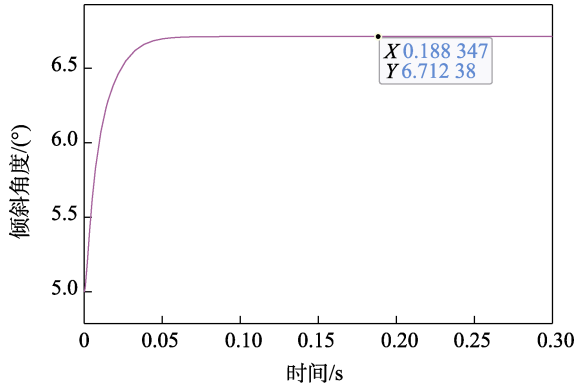


图17 3.048 mm公差下的倾斜角度
Fig.17 Tilt angle under 3.048 mm tolerance

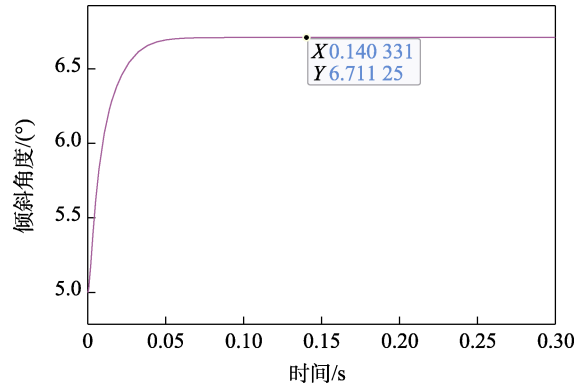
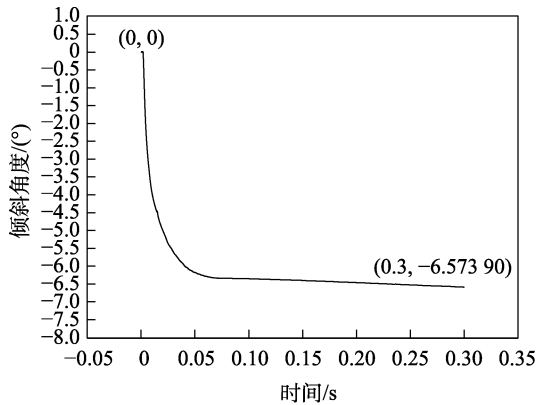
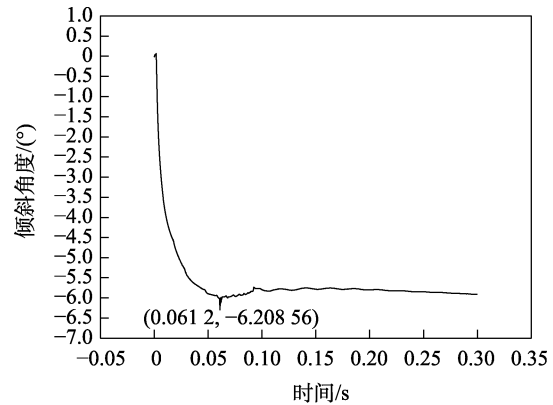


图18 H10/h10公差下杆的倾斜角度
Fig.18 Tilt angle of the rod at the H10/h10 tolerance



a 3.048 mm公差下杆的倾斜角度



b H10/h10公差下杆的倾斜角度

图19 ADAMS 仿真结果

Fig.19 Simulation results of the ADAMS: a) 3.048 mm tolerance; b) H10/h10 tolerance

表6 加速度与水平面垂直时采用关键变量公差所测数据

Tab.6 Measured data of the key variable tolerance adopted when the acceleration is perpendicular to the horizontal plane

| 仿真环境 | 加速度方向 | 大弹簧公差/mm | 杆轴公差 | 球孔公差 | 惯性系统的倾斜角度/(°) | 杆与球套是否接触或接近 |
|--------|-------|----------|------|------|---------------|-------------|
| MATLAB | 垂直水平面 | +3.048 | — | — | 6.712 38 | 接近 |
| ADAMS | 垂直水平面 | +3.048 | — | — | - 6.573 90 | 接近 |
| MATLAB | 垂直水平面 | — | h10 | H10 | 6.711 25 | 接近 |
| ADAMS | 垂直水平面 | — | h10 | H10 | - 6.208 56 | 接近 |

3.6 影响百分比计算

综合2种软件所测数据,可通过理论计算的方式对比关键变量公差对开关内部接电结构运动的影响。

3.5 加速度与水平面垂直时的关键变量公差影响分析及仿真

由轴向施加过载和理论计算可知,大弹簧公差取值+3.048 mm,球和杆分别取H10和h10的公差等级。当大弹簧和球杆存在公差时,得到的杆的倾斜角度曲线,如图17、18所示。采用ADAMS软件进行三维动力学仿真,得到相应曲线如图19所示。根据所得图像与数据制成表格,如表6所示。

$$C_1 = \frac{(H' - H_1) + (H'' - H_2)}{2 \times L} \tag{18}$$

$$C_2 = \frac{(H' - H_3) + (H'' - H_4)}{2 \times L} \tag{19}$$

$$C_3 = \frac{(X' - X_1) + (X'' - X_2)}{2 \times S} \quad (20)$$

$$C_4 = \frac{(X' - X_3) + (X'' - X_4)}{2 \times S} \quad (21)$$

$$C_5 = \frac{(\alpha' - \alpha_1) + |(\alpha'' - \alpha_2)|}{2 \times \beta} \quad (22)$$

$$C_6 = \frac{(\alpha' - \alpha_3) + |(\alpha'' - \alpha_4)|}{2 \times \beta} \quad (23)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为影响百分比数值; H' 、 H'' 为 MATLAB、ADAMS 中不存在公差时球沿杆的滑动位移; H_1 、 H_2 为 MATLAB、ADAMS 中小弹簧存在公差时球沿杆的滑动位移; H_3 、 H_4 为 MATLAB、ADAMS 中小球存在公差时球沿杆的滑动位移; L 为球沿杆最大滑动位移; X' 、 X'' -MATLAB、ADAMS 中不存在公差时杆的轴向滑动位移; X_1 、 X_2 -MATLAB、ADAMS 中大弹簧存在公差时杆的轴向滑动位移; X_3 、 X_4 -MATLAB、ADAMS 中球、杆存在公差时杆的轴向滑动位移; S 为杆的最大滑动位移; α' 、 α'' 为 MATLAB、ADAMS 中不存在公差时杆的倾斜角度; α_1 、 α_2 为 MATLAB、ADAMS 中大弹簧存在公差时杆的倾斜角度; α_3 、 α_4 为 MATLAB、ADAMS 中球与杆存在公差时杆的倾斜角度; β 为杆的最大倾斜角度。

代入数据计算, 结果见表 7。

表 7 各关键变量的影响百分比
Tab.7 Effect percentage of each key variable

| 加速度过载方向 | 关键变量 | 影响百分比/% |
|---------|------|---------|
| 向下 | 小弹簧 | 18.32 |
| | 小球 | 1.98 |
| 向上 | 大弹簧 | 53.09 |
| | 小球+杆 | 10.39 |
| 垂直水平面 | 大弹簧 | 0.81 |
| | 小球+杆 | 3.49 |

分析以上 3 个方向的关键变量及其影响百分比, 得出结论, 在受到轴向加速度过载时, 小球和杆的公差的影响相较于大小弹簧的公差的影响小得多。当过载垂直于水平面时, 小球和杆的公差影响大于大弹簧, 但是影响均较小。综合数值分析, 大弹簧的公差影响最大, 其次为小弹簧的公差, 然后是球的尺寸公差, 最后是杆的尺寸公差。

4 结论

若要保证引信开关在运动过程中受到超过其灵敏度的过载时仍能保持其稳定性, 其内部的关键变量必须控制在合理的范围内, 关键变量分别为大小弹簧的自由高度公差, 球和杆的尺寸公差。球和杆的尺寸公差与弹簧的自由高度公差均会对引信开关在运动

过程中产生影响。针对关键零件的公差带来的影响, 由理论计算所得的影响数值百分比可知, 轴向施加过载时, 大弹簧、小弹簧的影响百分比分别为 53.09% 和 18.32%, 小球+杆、小球的影响百分比分别为 10.39% 和 1.98%。弹簧的尺寸公差影响约为接电结构尺寸公差影响的 5.11~9.25 倍, 垂直轴向施加过载时, 大弹簧的影响百分比为 0.81%, 小球+杆为 3.49%, 倍数关系为 4.31 倍, 且影响百分比均较小。

通过仿真分析及所得数值得出结论, 大弹簧的公差影响最大, 其次为小弹簧的公差, 然后是球的尺寸公差, 最后是杆的尺寸公差。依据模型结构, 可推导出球形万向惯性开关关键变量的普遍规律, 支撑内部接电结构的部件所产生力学效应影响效果最大, 其次为接电结构的尺寸大小。通过对关键变量的重要性分析和承载关键变量的关键部件的尺寸进行规范化的设计, 可提高球形惯性开关结构的设计精度, 同时可解决引信开关在受到冲击过载时因内部关键部件的变化发生运动规律改变的实际问题。

参考文献:

- [1] 连云飞, 王利. 引信惯性加速度开关的设计[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(3): 154-157.
LIAN Y F, WANG L. Design of Inertial Acceleration Switch for Fuze[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(3): 154-157.
- [2] 王利, 周百令. 一种新型机械式加速度惯性开关[J]. 火炮发射与控制学报, 2005, 26(2): 40-43.
WANG L, ZHOU B L. A New Inertial Acceleration Switch of Mechanical Pattern[J]. Journal of Gun Launch&Control, 2005, 26(2): 40-43.
- [3] 赵剑, 贾建援, 王洪喜, 等. 一种 V 形梁结构的双稳态惯性开关[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1157-1162.
ZHAO J, JIA J Y, WANG H X, et al. Bistable Inertial Switch with V-Shaped Beam Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1157-1162.
- [4] 房春虎, 贾瑾, 陈智锋, 等. 带加重柱的轴向安装惯性触发开关[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(4): 15-19.
FANG C H, JIA J, CHEN Z F, et al. Axial Mounted Inertial Impact Switch with Weight Column[J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(4): 15-19.
- [5] 李晓杰, 牛兰杰, 翟蓉, 等. 基于质量块翻转的 MEMS 万向惯性开关[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6): 26-30.
LI X J, NIU L J, ZHAI R, et al. MEMS Omni-Directional Inertial Switch with the Slant of Mass[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(6): 26-30.
- [6] 席占稳, 张平, 聂伟荣. 圆形质量块/柔性电极 MEMS 万向触发开关[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(2): 10-14.
XI Z W, ZHANG P, NIE W R. MEMS Omnidirectional Trigger Switch with Flexible Electrodes and round

- Mass[J]. *Journal of Detection & Control*, 2013, 35(2): 10-14.
- [7] ZHOU Z J, NIE W R, XI Z W, et al. Design Technique of MEMS Switches Used in the Fuze[J]. *Micronano-electronic Technology*, 2013, 50(4): 229-235.
- [8] 刘双杰. 引信用 MEMS 惯性开关技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- LIU S J. Research on MEMS Inertial Switch Technology for Fuse[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [9] 范晨阳, 刘剑霏, 田中旺. 基于动电极翻转的 MEMS 万向惯性开关[J]. *探测与控制学报*, 2019, 41(3): 76-80.
- FAN C Y, LIU J F, TIAN Z W. MEMS Omnidirectional Inertial Switch Based on Moving Electrode Overturning[J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(3): 76-80.
- [10] 杨晓臣. 新型阈值可调 MEMS 惯性开关的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- YANG X C. Research on a New MEMS Inertial Switch with Adjustable Threshold[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [11] 周小淞, 张亚, 连云飞. 机械式惯性开关设计[J]. *机械研究与应用*, 2015, 28(6): 95-97.
- ZHOU X S, ZHANG Y, LIAN Y F. Design of Mechanical Inertial Switch[J]. *Mechanical Research & Application*, 2015, 28(6): 95-97.
- [12] 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 W F, WANG Y S, ZHANG H, et al. Analysis of Inertial Impact Switch Dynamic Characteristics and Fuze Ballistic Explosion[J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(3): 35-40.
- [13] 宁晓斌, 司昕璐, 石彩玲, 等. 引信用悬臂梁式单向高过载闭合惯性开关[J]. *探测与控制学报*, 2016, 38(4): 24-26.
- NING X B, SI X L, SHI C L, et al. Cantilever Beam Based Uni-Direction High-Overload Closing Inertia Switch [J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(4): 24-26.
- [14] 李龙星, 李波, 连云飞. 机械式惯性加速度开关的设计[J]. *河北农机*, 2016(3): 46.
- LI L X, LI B, LIAN Y F. Design of Mechanical Inertial Acceleration Switch[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2016(3): 46.
- [15] 曹苏雅拉图, 王雨时, 宝图雅, 等. 机电触发引信高可靠性擦地炸接电开关[J]. *探测与控制学报*, 2016, 38(5): 27-30.
- CAO S, WANG Y S, BAO T Y, et al. A High Reliability Graze Burst Switch of Electromechanical Contact Fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(5): 27-30.
- [16] 许马会, 刘凤丽, 郭航. 惯性闭锁开关的结构设计与分析[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(11): 36-39.
- XU M H, LIU F L, GUO H. Structural Design and Analysis of Inertia Lockout Switch[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(11): 36-39.
- [17] 黄戈, 姚宝珍, 冉雪磊. 引信对极薄弱目标发起的作用方法[J]. *探测与控制学报*, 2019, 41(4): 36-41.
- HUANG G, YAO B Z, RAN X L. The Ignition Method of Fuze Impacting on Extremely Weak Target[J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(4): 36-41.
- [18] 王大奎, 娄文忠, 冯恒振, 等. 一种引信用固态安全开关设计及模拟分析[J]. *测试技术学报*, 2021, 35(2): 134-138.
- WANG D K, LOU W Z, FENG H Z, et al. Design and Simulation Analysis of a Solid-State Safety Switch[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2021, 35(2): 134-138.
- [19] 任超, 武强, 付博, 等. 一种具有高抗侧向过载的垂直敏感弹载 MEMS 惯性开关[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(5): 23-30.
- REN C, WU Q, FU B, et al. A Vertical Sensitive Missile-Borne MEMS Inertial Switch with High Shock-Resistibility to Lateral Overload[J]. *Unmanned Systems Technology*, 2021, 4(5): 23-30.
- [20] 黄巍. 微惯性接电开关设计与关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- HUANG W. Research on Design and Key Technology of Micro Inertial Switch[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [21] 沈哲. 鱼雷战斗部与引信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 168-173.
- SHEN Z. Technology on Torpedo Warhead and Fuze[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 168-173.
- [22] 倪庆乐, 王雨时, 严东坡, 等. 引信簧片抱球万向惯性触发电开关动态特性[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(3): 30-35.
- NI Q L, WANG Y S, YAN D P, et al. Dynamic Characteristics of Fuze Spring Holding Ball Inertia Electric and Percussion Universal Switch[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(3): 30-35.
- [23] WAHL A M. 机械弹簧[M]. 谭惠民译. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- WAHL A M. Mechanical Springs[M]. TAN H M Translate. Beijing: National Defense Industry Press, 1981.