

抗高过载微机械陀螺仪研究综述

曹慧亮,张英杰,寇志伟,石云波,唐 军,刘 俊

(中北大学电子测试技术国防科技重点实验室,山西太原 030051)

摘要:惯性制导系统在制导炮弹中有着极其重要的作用,其中,微机械陀螺仪作为惯性制导系统的核心器件,其抗高过载能力直接制约着惯性制导系统在抗高过载环境中的应用。首先,对炮射膛内高过载环境进行了建模和量化,概括了微机械陀螺结构的高过载失效机理。其次,结合国内外相关机构公开发表的研究成果,从微机械陀螺仪的抗高过载特性的角度出发,介绍了不同测控方式、不同结构形式、不同结构材料、不同工作原理的微机械陀螺仪的抗冲击能力。最后,对相关报道和论文进行了总结和归纳,提出应从驱动-检测方式、合理的吸能释能结构配置、工作原理、新型结构材料、多级系统缓冲等方面设计和改进高过载微机械陀螺结构,以提高陀螺的抗高过载能力。

关键词:传感器技术;高过载;微机械陀螺;梳齿电容;四波腹振动;硅材料

中图分类号:TP212 文献标志码:A

Research overview of anti-high overload MEMS gyroscope

CAO Huiliang, ZHANG Yingjie, KOU Zhiwei, SHI Yunbo, TANG Jun, LIU Jun

(Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: Inertial guidance system plays a very important role in guided artillery. Micro electro mechanical system (MEMS) gyroscope, as the core component of inertial guidance system, has high resistance to overload and restricts the application of inertial guidance system in high overload environment directly. First of all, the high overload environment in the gun chamber is modeled and quantified, and the mechanism of high overload failure of the MEMS gyro structure is summarized. Secondly, based on the previous public research results from different institutes at home and abroad, the anti-high overload MEMS gyroscopes with different monitoring methods, different structural forms, different structural materials and different working principles are introduced from the perspective of anti-overload characteristics of MEMS gyroscopes impact resistance. Finally, the related reports and papers are summarized, and it is pointed out that the anti-high overload MEMS gyroscope should be designed from the aspects of drive-detection mode, reasonable structure of energy-absorbing and energy-dissipating structure, working principle, new structural material and multi-level system buffer methods to improve the anti-high overload ability.

Keywords: sensor technology; high overload; MEMS gyroscope; comb capacitance; four antinodes vibration; silicon material

收稿日期:2018-01-17;修回日期:2018-03-08;责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51727808,51705477);山西省留学人员科技活动择优资助项目;山西省回国留学人员科研资助项目(2016-083);中北大学电子测试技术重点实验室开放基金(ZDSYSJ2015004);毁伤技术重点学科实验室开放基金(DXMBJJ2017-15)

第一作者简介:曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要从事微机械系统方面的研究。

E-mail:caohuiliang1986@126.com

曹慧亮,张英杰,寇志伟,等.抗高过载微机械陀螺仪研究综述[J].河北科技大学学报,2018,39(4):289-298.

CAO Huiliang, ZHANG Yingjie, KOU Zhiwei, et al. Research overview of anti-high overload MEMS gyroscope[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2018, 39(4): 289-298.

目前,常规武器(如火炮,坦克炮)和新型动能武器(如电磁轨道炮)弹药发射后的角速度信息测量是一个公认的难题。究其原因主要是角速度传感器很难经受高过载环境的冲击,高过载过程对传感器的破坏作用主要有两条途径:一是惯性力的直接冲击,二是高过载产生的应力波对结构的破坏。弹药在发射过程中,炮弹要经历巨大的过载作用以加速到预期的发射初速度,该过载过程的幅度峰值可达20 000g以上(g 为重力加速度,下同),作用时间在数十毫秒以内。例如,155 mm榴弹炮在发射过程中产生的最大过载脉冲幅度为20 000g,持续时间5 ms^[1];电磁炮发射过程炮弹所受最大过载幅度为40 000g以上,炮口初速度可达到7马赫^[2-3]。通过在炮弹中增加惯性制导模块的方法可为弹道修正提供基准,有效提高弹药的命中精度^[4]。因此,很多发达国家已经开展了常规弹药的制导升级工作,并为新型动能武器弹药研制相关的惯性制导模块^[2],其中,美国高级研究计划局(DARPA)更是把抗高过载陀螺仪作为关键器件之一列在了 μ PNT计划中^[5]。

随着微机械加工工艺和测控技术的不断成熟,微机械(MEMS)陀螺仪的精度不断提高,同时凭借其体积小、质量轻、成本低、可批量生产、可靠性高等特点,各国都将其作为制导炮弹中角速率传感器的首选^[6-9]。但目前微机械陀螺在高过载环境中存在两大问题:一是高过载过程不易存活,即陀螺在过载作用后失效;二是高过载后陀螺性能严重退化,即过载前后陀螺相关参数和性能(零偏值、标度因数、稳定性等)很难保持一致。本文从高过载微机械陀螺仪角度出发,针对目前公开发表的抗过载微机械陀螺仪方面的研究报道,从结构失效机理、结构形式、测控方法、工作原理、结构材料等方面进行归纳和总结,进一步凝练出微机械陀螺仪抗高过载设计方面的方法,为其早日应用提供支持。

1 微机械陀螺仪抗高过载原理

1.1 高过载环境冲击原理

多数火炮在发射过程中产生的膛内过载特性曲线如图1所示(只显示主要趋势,忽略过载幅度波动的噪声信号)^[1]。该过程主要由3个峰值点(2个正方向,1个负方向)组成,其中,某型号火炮发射过程膛内最大峰值约为20 000g,作用时间小于20 ms。

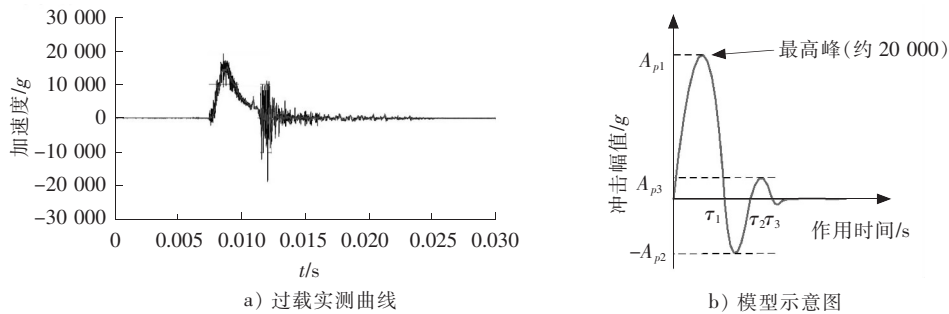


图1 火炮发射过程

Fig.1 Artillery firing process

上述过载过程可近似为3个简单过载脉冲(可由半周正弦脉冲表示)的叠加,则图1中3个主要的过载峰的表达式为^[10]

$$a(t) = \begin{cases} A_{p1} \sin \omega_{a1} t, & 0 \leq t < \tau_1; \\ -A_{p2} \sin \omega_{a2} t, & \tau_1 \leq t < \tau_2; \\ A_{p3} \sin \omega_{a3} t, & \tau_2 \leq t < \tau_3; \\ 0, & \tau_3 \leq t. \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_{p1}, A_{p2}, A_{p3} 为过载幅值; τ_1, τ_2, τ_3 为过载截止时间; $\omega_{a1} = \pi/\tau_1, \omega_{a2} = \pi/\tau_2, \omega_{a3} = \pi/\tau_3$ 。式(1)即为高过载环境产生的惯性力,对过载幅值的计算过程如下。

以火炮弹丸为研究对象,则根据动力学第二定律有:

$$m_D \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d_D^2}{4} \frac{p_{ty}}{\phi} \quad (2)$$

式中: m_D 为弹丸质量; dv/dt 为弹丸轴向运动加速度; d_D 为弹丸直径; p_{ty} 为弹后膛内火药气体平均压力,即膛压; ϕ 为虚拟系数, $\phi > 1$ 。根据式(2)进一步可得到硅微陀螺结构所承受的过载加速度峰值:

$$A_p = \frac{\pi d_D^2 p_{ty \max}}{4 \phi m_D g} \quad (3)$$

式中 $p_{ty \max}$ 为弹丸所受膛压的峰值。当火炮型号、弹丸、药筒装药量确定后, d_D , $p_{ty \max}$, ϕ , m_D 也随之确定,将相关数据代入式(1)便可得到较准确的炮射过程膛内过载模型和峰值。在过载峰值确定后需要进一步研究其对硅微陀螺结构的影响。比如经过分析和计算后,某型号火炮膛内过载最大峰值约为 20 000g,则对于该峰值的脉冲表达式为

$$a_1(t) = 1.96 \times 10^5 \sin \frac{\pi t}{0.02}, \quad 0 \leq t \leq 0.02 \quad (4)$$

通常情况下,微机械陀螺结构在不同过载载荷作用下的响应类型有 3 类,这 3 类响应是按照过载作用后的时间顺序排列的,如图 2 所示。其中,弹性波响应作用时间为 $0 < \tau \leq \tau_A$, $\tau_A = L/P_{tw}$, L 为过载载荷作用点距离陀螺结构最远自由面的长度, P_{tw} 为弹性波传播速度。振动响应作用的时间为 $\tau_A < \tau \leq T$, T 为陀螺结构的振动周期。准静态响应作用时间为 $T < \tau$ 。

由于要经历如此高的过载过程,陀螺仪等惯性器件结构的形状、材料和振动特性等特性必会发生较大的变化^[11-12],需要对高过载环境下微机械陀螺仪结构的失效情况进行分析。

1.2 高过载状态条件下陀螺结构失效机理

在高过载条件下微机械陀螺失效机理分析方面,芬兰阿尔托大学对敏感结构、结构封装等方面进行了研究,结果显示^[13],使结构完全失效(器件失去工作能力,表现为器件未存活)的原因来自多方面,如:结构-基底键合层破裂引起的失效、结构层结构断裂引起的失效等,而陀螺仪结构的功能性失效(器件保持一定工作能力但各项参数均会变化,表现为器件性能退化)主要由于梳齿等检测机构的掉落和结构的部分损坏。进一步的分析如下。

1.2.1 完全失效

陀螺结构完全损坏以至于完全失去工作能力,输出信号与角速率无关,产生原因大致有以下 3 种^[14]。

1) 断裂或破碎:过载产生的应力超过材料的屈服强度极限,且这种状态不可逆,此外,结构在交变应力的作用下也会产生疲劳断裂,这两种现象均会出现在过载作用过程中,且往往出现在比较关键的位置,如梁与锚点连接部分等^[15-17]。

2) 吸合与黏附:在高过载过程中,陀螺结构摆动幅度很大,使梁“贴”在驱动电极上导致器件完全失效。黏附失效是指微机构在应用过程中彼此之间的表面吸附力大于机构的弹性恢复力时,两个微机构将会黏合在一起^[18]。

3) 应力与分层:微结构在加工过程中大都采用了分层键合的方法,但各层间材料在高温退火等加工过程产生的残余应力不同、温度系数不匹配,在过载施加时会导致层间脱落、断裂等现象导致结构失效。

1.2.2 部分失效

结构未完全损坏,输出信号虽然发生变化但仍能反映角(速)度信息,导致过载前后陀螺输出信号差异,产生原因大致有以下几种。

1) 检测机构受损:过载对结构的检测机构产生损伤,例如,对于电容检测的结构,过载导致检测电容两极板碰撞以致极板破损,则检测信号变化。

2) 部分支撑机构受损:过载施加时,壁与底连接部分局部发生断裂,但梁依然与振动质量块紧密连接,使得陀螺依然可以工作,只是改变了模态的固有频率等参数,这种情况直接影响陀螺的机械灵敏度等参数。此外结构断裂产生的碎屑和残骸也会对结构的正常工作产生较大危害。

3) 梁裂缝:在过载过程中,由于应力无法释放而导致梁产生裂缝,影响结构质量或者产生应力变形。

通过分析上述失效机理,进一步对相关失效机理进行量化分析以建立陀螺结构仿真边界条件(如对于断

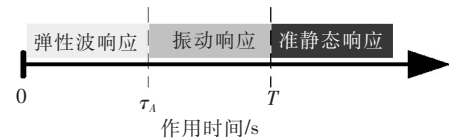


图 2 过载响应类型及作用时间顺序示意图

Fig.2 Overload response type and the role time sequence diagram

裂,应力仿真时应设置结构参数使结构最大应力小于屈服强度等),可以更好地优化参数,提高陀螺结构的抗过载性能。

2 国内外抗高过载微机械陀螺结构研究现状

在研制应用于高过载环境的微机械陀螺仪方面,国内外多个公司和科研院所均提出了相关方案。意法半导体和美国 InvenSense 公司都提供了抗过载 10 000g 的产品^[19-20],其中采用的结构形式并未见报道。在线振动硅微机械陀螺仪抗过载报道方面,美国 Honeywell 公司研制的陀螺结构如图 3 所示,该结构目前可抗 20 000g 过载^[21-22],过载后陀螺仪的零偏稳定性参数从过载前的 18°/h 恶化到了过载后的 180°/h(性能退化近 10 倍);法国 THALES 公司研制的微机械陀螺仪如图 4 所示,其陀螺在 20 000g 过载作用后存活,但多项参数均明显恶化^[23],如零偏稳定性退化了 587%,标度因数稳定性退化了 218%。过载测试是针对陀螺整机,其外部结构也起到了一定的缓冲作用。

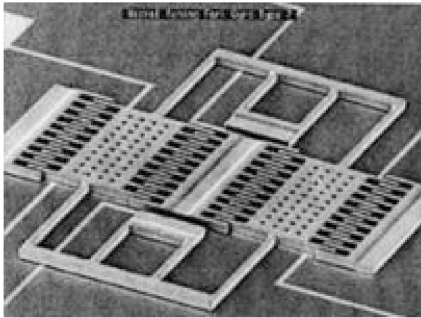


图 3 Honeywell 研制的陀螺结构

Fig.3 Gyro structure developed by Honeywell

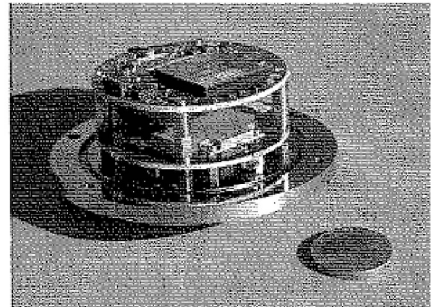


图 4 THALES 公司的微机械陀螺仪

Fig.4 THALES company's micro-mechanical gyro

美国陆军研究实验室过载测试的陀螺在 10 000g 的过载作用后,标度因数由 12.239 mV/(°)·s 变化至 12.177 mV/(°)·s,零偏值由 2.414 V 变化至 2.400 V^[24];土耳其中东科技大学研制的线振动硅微陀螺结构采用了一种新型的折叠梁结构,在有限元软件中仿真显示其可抗 10 000g 过载作用,如图 5 所示^[25],但并未检索到其高过载的实验结果;美国加州大学伯克利分校提出了一种采用碳化硅材料的线性谐振结构^[26],通过空气炮实验设备对该结构进行了 64 000g 的冲击过载实验,谐振频率在冲击实验前后并无太大变化,证明了碳化硅材料良好的抗高过载特性,结构如图 6 所示;美国伍斯特理工学院对音叉式微机械陀螺结构(见图 7)进行了高过载测试^[27],结果显示结构能够承受 10 000g 的加速度冲击,表面形态没有明显损伤,但并未对陀螺测试数据进行报道;美国加州大学尔湾分校提出了多质量块的陀螺结构形式^[28-29],在较小冲击幅值下能保持较好的参数一致性,其结构如图 8 所示;意大利米兰理工大学提出了一款压阻检测形式的硅基三轴微机械陀螺仪,在 3 400g 冲击作用下,其标度因数变化了 0.8%^[30]。

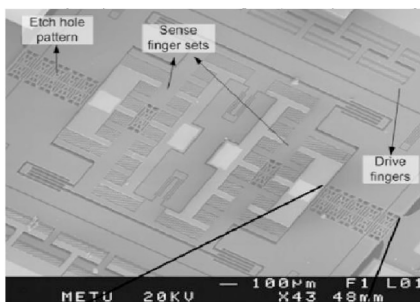


图 5 中东科技大学研制的陀螺结构

Fig.5 Gyro structure developed by METU

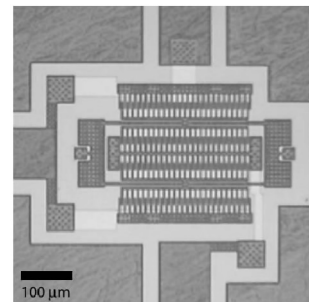


图 6 加州大学伯克利分校提出的碳化硅谐振结构

Fig.6 SiC resonant structure developed by UCB

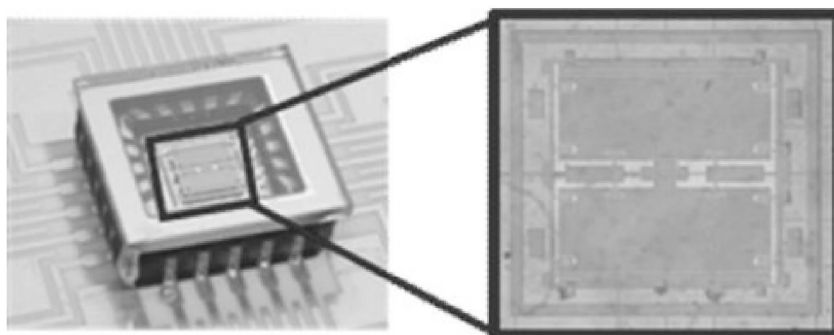


图 7 伍斯特理工学院测试的音叉式陀螺结构

Fig.7 Turning fork gyro structure tested by WPI

上海微系统所在线振动结构的基础上添加了质量块的静电力限位机构以提高结构的抗冲击特性,通过对裸芯片进行的冲击实验表明,陀螺仪沿 X 轴的抗冲击性为 15 000g, Y 轴为 14 000g, Z 轴为 11 000g,陀螺结构如图 9 所示^[31];东南大学对所研制的双质量陀螺结构进行抗过载分析,其结构如图 10 所示^[32],可有效抑制 500g 过载作用,但未报道在高过载环境下的测试。

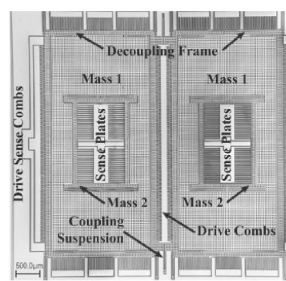


图 8 加州大学尔湾分校提出的多质量块陀螺结构

Fig.8 Multi-mass gyro structure developed by UCI

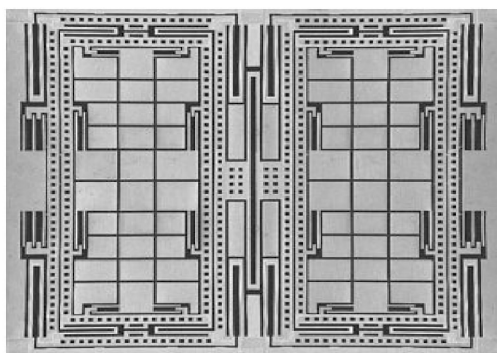


图 9 上海微系统所提出的陀螺结构

Fig.9 Gyro structure from SIMIT

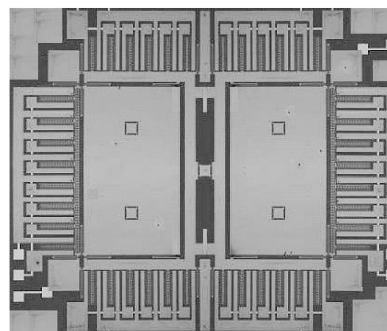


图 10 东南大学研制的双质量陀螺结构

Fig.10 Dual-mass gyro structure developed by SEU

北京信息科技大学和北京邮电大学提出了一种“三明治”结构形式的无驱动微机械陀螺仪以达到抗高过载特性^[33-35],北京信息科技大学设计的陀螺结构照片如图 11 所示,该结构形式不需要使结构谐振,而是在角速度输入时被动检测电极的变化;上海交通大学提出了一种双轴的抗高过载压阻形式的陀螺结构(如图 12 所示)^[36],在仿真过程中陀螺两个轴的标度因数分别为 4.53 mV/((°)·s)和 0.93 mV/((°)·s),由于结构本身是一个整体且无较大幅值的运动,因此其理论上具有较好的抗冲击能力;重庆邮电大学提出了一种谐振梁陀螺^[37],其样机及测试图如图 13 所示,并对该结构进行了 11 000g 的冲击测试。



图 11 北京信息科技大学设计的陀螺结构照片

Fig.11 Gyro structure photo developed by BISTU

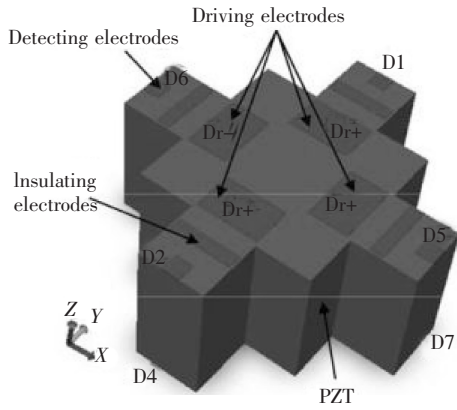


图 12 上海交通大学研制的陀螺结构
Fig.12 Gyro structure developed by SJTU

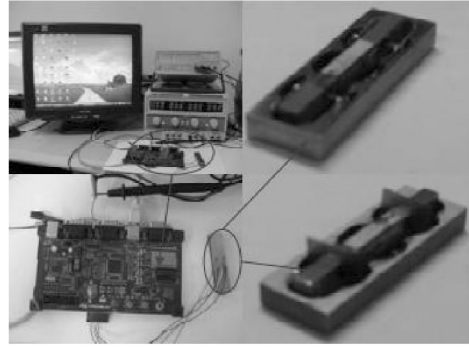


图 13 重庆邮电大学设计的陀螺结构照片
Fig.13 Photo of gyro structure developed by CQUPT

中电 26 所在应力集中的部位设计圆弧开槽结构如图 14 所示,用以释放应力。通过综合优化后,石英微机械陀螺的抗高冲击能力可达到 $10\,000g$,并保持了较好的性能^[38]。航天长征火箭技术有限公司通过在封装结构中增加多级缓冲机构以减缓高 g 值对传感器的破坏,仿真结果显示该陀螺可以承受 3 个方向 $5\,000g$ 的加速度冲击^[39]。

在基于四波腹型模态工作原理陀螺高过载测试和仿真方面,英国 BAE 公司研制了硅微环形陀螺 SiVSG,该陀螺利用四波腹型模态,并采用了电磁驱动检测方式,可承受至少 $20\,000g$ 的炮弹发射过载,但过载前后陀螺仪的零偏稳定性和标度因数稳定性分别从 $85^\circ/h$ 和 0.69% 恶化至 $110^\circ/h$ 和 0.91% (性能退化近 30%),如图 15 所示^[1,40];韩国亚洲大学(Ajou University)提出了一款用于战术级的电容驱动和检测式陀螺结构,如图 16 所示,该结构采用了圆片级真空封装,在过载峰值为 $15\,900g$ 持续时间 1.2 ms 的空气炮作用下,其标度因数稳定性和零偏稳定性分别由过载前的 0.027% 和 $0.76^\circ/h$ 变为过载后的 0.049% 和 $0.83^\circ/h$,性能有所退化(零偏稳定性性能退化 9% ,标度因数性能退化 80%)^[41]。

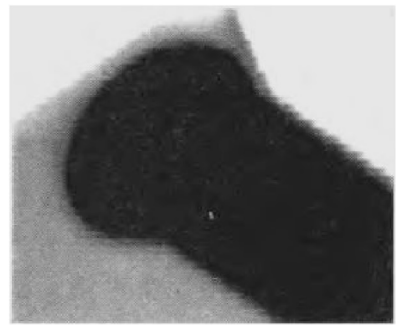


图 14 中电 26 所设计的圆弧开槽
Fig.14 Slotted arc developed by SIPAT

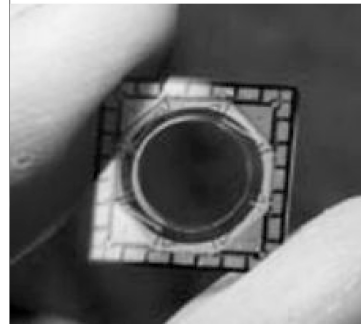
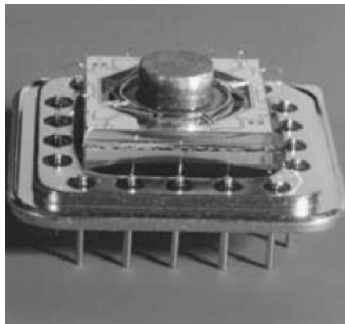


图 15 BAE 公司的环形振动陀螺样机
Fig.15 BAE's ring-shaped vibrating gyroscope

中科院电子所提出了电磁驱动和检测式陀螺结构,如图 17 所示,经有限元软件仿真该结构可抗 $10\,000g$ 过载,但并未报道相关的过载试验数据^[42-43]。中北大学也提出了一种内部呈“S”形梁支撑形式的环形陀螺结构(见图 18),仿真结果显示结构自身可承受 $1\,000g$ 的过载^[44-46];同济大学对环形陀螺进行了抗过载结构优化,在 $11\,000g$ 过载峰值输入的情况下,优化后的环形结构最大应力值为 421.8 MPa ,小于硅材料的许用应力,证明了

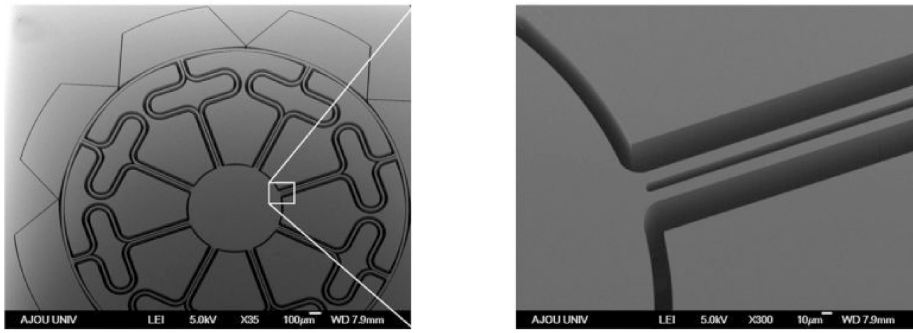


图 16 韩国亚洲大学提出的电容驱动和检测式陀螺结构

Fig.16 Capacitance driving and detecting gyros proposed by Ajou University

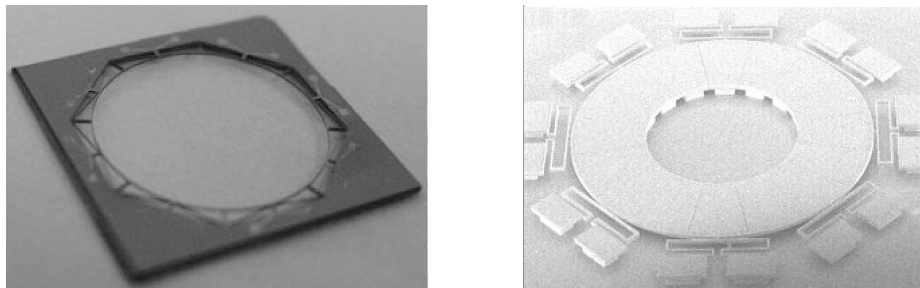


图 17 中科院电子所提出的电磁驱动和检测式陀螺结构

Fig.17 Electromagnetical driven and test gyro structure proposed by the IECAS

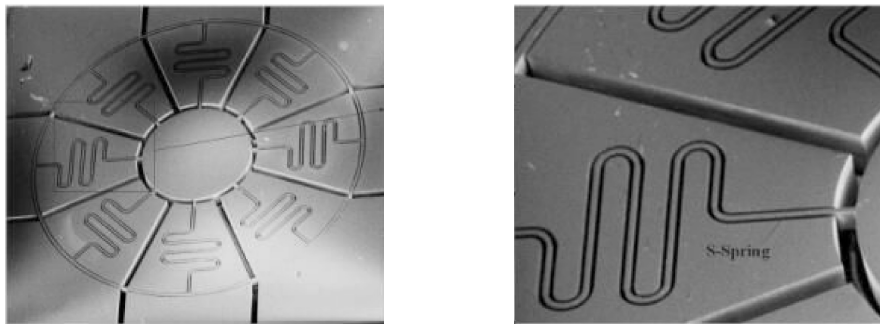


图 18 中北大学设计的环形陀螺结构

Fig.18 Ring gyro structure designed by NUC

环形结构形式具有较好的抗冲击能力^[47];北京理工大学提出的金属锥形陀螺(见图 19)在 10 000g 以上的高过载环境中驱动和检测模态谐振频率变化 0.2%,说明该结构具有较好的抗高过载能力^[48-50]。

中北大学提出了一种高灵敏度且抗高过载的微机械磁阻陀螺(如图 20 所示)^[51],采用电磁驱动和磁阻检测的方式,通过仿真证明了该结构驱动方向可承受 100 000g 过载冲击,检测方向可承受 70 000g 过载冲击,结构的灵敏度为 53 nm/((°)·s)。



图 19 北京理工大学提出的金属锥形陀螺

Fig.19 Metal bell shaped gyroscope developed by BIT

3 总结与展望

从面向制导炮弹的应用背景出发,通过对膛内过载环境的量化分析,提出了弹载惯性制导系统中高过载微机械陀螺高过载能力的需求,并在此基础上,对微机械陀螺仪的失效机制进行了归纳和分析。结合国内外

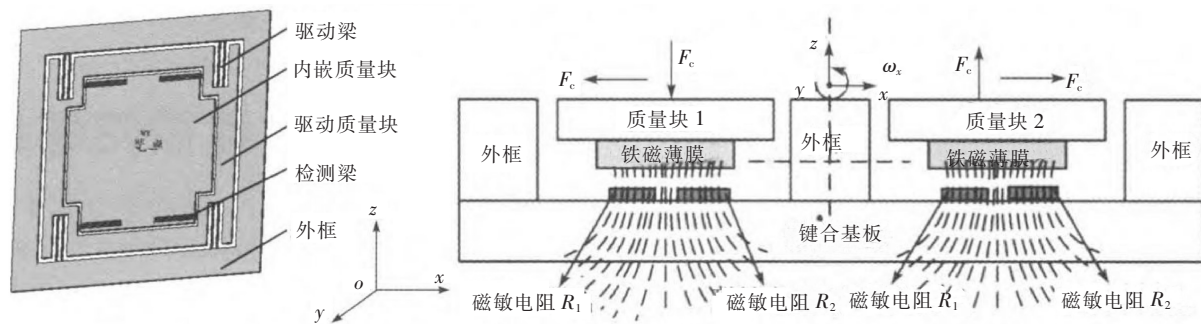


图 20 中北大学提出的微机械磁阻陀螺

Fig.20 Micro magnetic reluctance gyroscope structure developed by NUC

相关机构在抗高过载微机械陀螺方面的研究,总结归纳了不同测控原理、不同工作方式、不同结构形式的微机械陀螺仪的抗冲击能力。但目前并未出现任何在高过载(炮击)环境前后微机械陀螺参数未发生变化的报道,说明抗高过载微机械陀螺仪方面的研究工作还需要进一步深入开展,本文认为提高微机械陀螺仪抗高过载特性可从以下 5 个方面进行改进。

1)采用其他驱动-检测方式代替梳齿电容方式 梳齿电容在过载时容易发生断裂和结构吸合以致陀螺结构失效,可采用电磁、磁阻效应等检测原理替代梳齿电容检测方式^[1,51]。

2)采用四波腹振型模态等工作方式代替线振动工作方式 实验数据表明,四波腹振型模态工作方式在高过载状态下性能退化现象优于线振动工作方式的陀螺结构^[1,41,48],尤其是在其全角工作模式下,通过四波腹相位信息反映输入角度^[52],相位信息对冲击造成的线位移几乎不敏感。

3)采用合理的吸能和释能机构 在现有结构中增加合理的吸能和释能机构以吸收和释放由于高过载产生的应力和能量以保护结构^[31,38]。

4)采用碳化硅等新材料代替硅材料 充分利用碳化硅等新型抗高过载性能好的材料替代硅材料,达到提升高过载特性的目的^[26]。

5)采用多级抗过载防护技术提高陀螺整体抗过载能力 可在 MIMU 外壳、陀螺外壳、陀螺结构外壳、陀螺结构基底等多个环节进行抗过载处理,分级吸收冲击应力波,最终提高陀螺整机抗过载能力^[39,53]。

随着新原理和新材料的不断成熟和应用,高过载环境将不再成为微机械陀螺的禁区,如何能够降低成本和体积、提高产量和标定效率、与 MIMU 集成将是抗高过载微机械陀螺在下一阶段中亟待解决的问题。

参考文献/References:

- [1] HABIBI S, COOPER S J, STAUFFER J M, et al. Gun hard inertial measurement unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor[C]//Position Location and Navigation Symposium. [S.l.]:[s.n.], 2008:232-237.
- [2] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2014, 40(4):1052-1064.
LI Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064.
- [3] 马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6):1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5.
- [4] SHKEL A M. Precision navigation and timing enabled by microtechnology: Are we there yet? [C]//Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting. Honolulu:[s.n.], 2013:1049-1053.
- [5] LUTWAK R. Micro-technology for positioning, navigation, and timing towards PNT everywhere and always[C]//1st IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems.[S.l.]:IEEE, 2014:1-4.
- [6] 王寿荣, 黄丽斌, 杨波. 微惯性仪表与微系统[M]. 北京:兵器工业出版社, 2011.
- [7] 曹慧亮. 硅微机械陀螺仪静电补偿与控制技术研究和实验[D]. 南京:东南大学, 2014.
CAO Huiliang. Research and Experiment on the Technology of Electrostatic Compensation and Control of Silicon Micro-machined Gyroscope[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [8] 王寿荣. 微惯性仪表技术研究现状与进展[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(1):6-12.
WANG Shourong. Current status and prospect of research on micro inertial instrument technology[J]. Machine Building & Automation,

- 2011, 40(1):6-12.
- [9] 王巍, 何胜. MEMS 惯性仪表技术发展趋势[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(3):23-28.
WANG Wei, HE Sheng. Development of MEMS inertial instrument technology[J]. Missiles & Space Vehicles, 2009(3):23-28.
- [10] 殷勇. 双质量硅微陀螺仪设计理论及方法研究[D]. 南京:东南大学, 2010.
YIN Yong. Research on Design Theory and Methods of Dual-mass Micromachined Silicon Gyroscope [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [11] 倪素环, 杨雪. 冲击振动单边单质量破碎系统的非线性动力学分析[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(5):469-473.
NI Suhuan, YANG Xue. Nonlinear dynamic analysis of single-sided & single-mass crushing system under impact and vibration[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(5):469-473.
- [12] 陈春敏, 林兰天, 曹晚霞, 等. 基于特定材料的冲击弹性波传播规律探析[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(1):73-79.
CHEN Chunmin, LIN Lantian, CAO Wanxia, et al. Propagation law of impact elastic wave based on specific materials[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(1):73-79.
- [13] LI J, BROAS M, MAKONEN J, et al. Shock impact reliability and failure analysis of a three-axis MEMS gyroscope[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(2):347-355.
- [14] 李孝涛. 微倾斜悬臂梁在振动冲击载荷下的可靠性分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
LI Xiaotao. Analysis of Reliability of the Slanted Micro-Cantilever Subjected to the Shock and Vibration Environment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [15] ZHANG Pan, HE Chunhua, ZHANG Jimeng, et al. Investigation of reliability of MEMS gyroscopes under different shock conditions [C]//IEEE 10th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. [S.l.]:IEEE, 2015:441-444.
- [16] 陈斌, 张延庆. 广义协调 COONS 曲面厚薄板通用单元振动分析[J]. 河北工业科技, 2016, 33(3):224-229.
CHEN Bin, ZHANG Yanqin. Vibration analysis of generalized conforming and COONS surface thick/thin plate element[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2016, 33(3):224-229.
- [17] 司朝伟, 韩国威, 宁瑾, 等. 高性能音叉结构 MEMS 陀螺的抗冲击设计[J]. 微纳电子技术, 2015, 51(5):302-307.
SI Chaowei, HAN Guowei, NING Jin, et al. Shock resistance design of a high-performance MEMS tuning-fork gyroscope[J]. Micronano-electronic Technology, 2015, 51(5):302-307.
- [18] 万蔡辛, 董景新, 刘云峰. 大载后冲击后静电力反馈微加速度计吸合研究[C]//中国航空学会飞行器控制与操纵第十二次学术交流会暨陀螺与惯导第三次学术交流会. [S.l.]:[s.n.], 2007:239-243.
- [19] ST Microelectronics. LSM9DS1 INEMO inertial Module Product Datasheet[EB/OL]. <http://www.st.com>, 2018-01-17.
- [20] Invensense. MPU-9255 Product Specification[EB/OL]. <http://www.invensense.com>, 2018-01-17.
- [21] KARNICK D, BALLAS G, KOLAND L, et al. Honeywell gun-hard inertial measurement unit(IMU) development[C]//IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium. [S.l.]:[s.n.], 2004:49-55.
- [22] KARNICK D, TROSKE T, KOLAND L, et al. Honeywell gun-hard inertial measurement unit(IMU) development[C]//Proceedings of the Institute of Navigation, National Technical Meeting[S.l.]:[s.n.], 2007: 718-724.
- [23] CHAUMET B, LEVERRIER B, ROUGEOT C, et al. A new silicon tuning fork gyroscope for aerospace applications[C]//Syposium Gyro Technology. Karlsruhe:[s.n.], 2009:1.1-1.13.
- [24] BROWN T G. Harsh military environments and microelectromechanical(MEMS) devices[C]//Proceedings of IEEE Sensors. [S.l.]:[s.n.], 2003: 753-760.
- [25] AZGIN K, TEMIZ Y, AKIN T. A novel in-operation high g-survivable MEMS gyroscope[C]//IEEE Sensors Conference. [S.l.]:[s.n.], 2007:111-114.
- [26] MYERS D R, CHENG K B, JAMSHIDI B, et al. Silicon carbide resonant tuning fork for microsensing applications in high-temperature and high G-shock environments[J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2009, 8(2): 021116.
- [27] PRYPUTNIEWICZ R J. Survivability of MEMS packages at high-G loads[J]. International Journal of Optomechatronics, 2014, 8(4): 391-399.
- [28] TRUSOV A A, SCHOFIELD A R, SHKEL A M. Micromachined tuning fork gyroscopes with ultra-high sensitivity and shock rejection [P]. US: 8322213 B2, 2010-12-16.
- [29] SCHOFIELD A R, TRUSOV A A, SHKEL A M. Multi-degree of freedom tuning fork gyroscope demonstrating shock rejection[C]//Sensors. [S.l.]:IEEE, 1930:120-123.
- [30] DELLEA S, GIACCI F, REY P, et al. Reliability of gyroscopes based on piezoresistive nano-gauges against shock and free-drop tests [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS). [S.l.]:[s.n.], 2016: 255-258.
- [31] ZHOU Jian, JIANG Tao, JIAO Jiwei, et al. Design and fabrication of a micromachined gyroscope with high shock resistance[J]. Microsyst Technol, 2014, 20: 137-144.
- [32] NI Yunfang, LI Hongsheng, HUANG Libin, et al. Shock analysis on dual-mass silicon micro-gyroscope[J]. Advanced Materials Research, 2011, 338: 401-405.
- [33] MAO Xu, MING Liang, LIU Yu, et al. A kind of shock resistance method on silicon micro-machined gyroscope[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition. [S.l.]:[s.n.], 2006:101-105.

- [34] 严庆文. 多功能微机械陀螺及其应用[D].北京:北京邮电大学, 2014.
YAN Qingwen. Multi-functional Micro-machined Gyroscope and Its Application[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [35] 刘宇. 无驱动结构微机械陀螺仪设计与制作关键技术研究[D].北京:北京邮电大学, 2014.
LIU Yu. Key Technology of Design and Manufacture for Non-driven Silicon Micromechanical Gyroscope[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [36] LYU Yipeng, WU Xiaosheng, ZHANG Weiping, et al. Optimization and analysis of novel piezoelectric solid micro-gyroscope with high resistance to shock[J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(4):571-584.
- [37] LIU Yu, LU Yongle, DU Xiaopeng, et al. Analysis of high shocking resistance of an improved node-plane supporting vibration beam gyroscope[J]. *International Journal of Digital Content Technology & Its Applications*, 2012, 6(9):319-328.
- [38] 林日乐, 李文蕴, 赵建华, 等. 石英微机械陀螺抗高冲击能力的优化研究[J]. *压电与声光*, 2013, 35(1):56-58.
LIN Rile, LI Wenyun, ZHAO Jianhua, et al. Optimization research on anti high shock ability of quartz MEMS gyroscope[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, 35(1):56-58.
- [39] 陈艳, 孟丽娜. 石英微机械陀螺封装抗高 g 值过载有限元分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(sup):50-52.
CHEN Yan, MENG Lina. Finite element analysis of quartz MEMS gyroscope encapsulation in high g shock[J]. *Instrument Technique & Sensor*, 2009(sup):50-52.
- [40] SHEARD K, SCAYSBROOK I, COX D. MEMS sensor and integrated navigation technology for precision guidance[C]//Position Location and Navigation Symposium. [S.l.]:[s.n.], 2008:1145-1151.
- [41] YOON S, PARK U, RHIM J, et al. Tactical grade MEMS vibrating ring gyroscope with high shock reliability[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 142: 22-29.
- [42] CHEN Deyong, ZHANG Ming, WANG Junbo. The design and analysis of a robust micromachined vibrating ring gyroscope[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.[S.l.]:[s.n.], 2008: 71590D-1-71590D-9.
- [43] CHEN Deyong, ZHANG Ming, WANG Junbo. An electrostatically actuated micromachined vibrating ring gyroscope with highly symmetric support beams[C]//IEEE Sensors Conference. [S.l.]:[s.n.], 2010:860-863.
- [44] KOU Zhiwei, CAO Huiliang, SHI Yunbo, et al. Structure design and simulation of MEMS vibrating ring gyroscope[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2016, 7(1):78-83.
- [45] KOU Zhiwei, LIU Jun, CAO Huiliang, et al. A novel MEMS S-springs vibrating ring gyroscope with atmosphere package[J]. *Aip Advances*, 2017, 7(12):125301.
- [46] 寇志伟, 曹慧亮, 刘俊, 等. MEMS 环形振动陀螺结构设计与仿真分析[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(7):479-484.
KOU Zhiwei, CAO Huiliang, LIU Jun, et al. Structure design and simulation analysis of a MEMS ring vibration gyroscope[J]. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2017, 54(7):479-484.
- [47] 姜涛, 孙林. 环形微机械陀螺抗冲击性能的稳健性模型与优化[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(4):793-799.
JIANG Tao, SUN Lin. Robust model and optimization of anti-impact performance for MEMS ring gyroscope[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(4):793-799.
- [48] 刘洪. 抗高过载锥形振子式角速率陀螺关键技术研究[D].北京:北京理工大学, 2015.
LIU Hong. Research on Key Technologies of Anti-High Impact Conical Resonator Angular Rate Gyroscope [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.
- [49] LIU Hong, SU Zhong, LIU Ning, et al. Research on the resonator of bell vibratory gyro under axial impact[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference.[S.l.]:[s.n.], 2014:598-601.
- [50] LIU Hong, SU Zhong, LIU Ning. Research on the conical resonator of a bell vibratory gyro under axial impact[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2014, 4(16):2054-2061.
- [51] 褚伟航, 李孟委, 王宾, 等. 抗过载微陀螺结构的高灵敏度设计与仿真[J]. *压电与声光*, 2016, 38(5):833-836.
CHU Weihang, LI Mengwei, WANG Bin, et al. High-sensitivity design and simulation of a high overload MEMS gyroscope structure[J]. *Piezoelectronics and Acoustooptics*, 2016, 38(5):833-836.
- [52] 高胜利. 半球谐振陀螺的分析与设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
GAO Shengli. Analysis and Design of Hemispherical Resonant Gyroscope[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2008.
- [53] 汪守利, 刘海涛, 滕纲, 等. MEMS 惯组抗高 g 值冲击设计方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(3):404-408.
WANG Shouli, LIU Haitao, TENG Gang, et al. Design method of MEMS IMU in high- g shock[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(3):404-408.