

现代引信技术丛书



Fundamental of MEMS Elements Design for Fuze

引信MEMS微弹性 元件设计基础

隋丽 牛少华 石庚辰 代俊 ◎ 著

- 各类微弹簧结构形态设计
- 各类微闭锁机构设计方法
- 微弹性元件仿真优化技术
- 微弹性元件性能检测方法



国防工业出版社
National Defense Industry Press

引信 MEMS 微弹性 元件设计基础

隋 丽 牛少华 石庚辰 代 俊 著

国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书从基本理论出发,对主要微弹性元件(微弹簧、微闭锁机构等)的设计计算方法做了比较系统的分析和推导,以期使设计人员对其有比较全面系统的了解,从而达到正确和灵活运用这些方法的目的。书中对一些特殊结构的微弹簧设计计算方法进行了研究和完善,如压缩型微弹簧、变刚度微弹簧等。此外,本书还对微弹性元件的试验方法进行了介绍。

本书读者对象为引信专业高年级本科生、研究生以及从事引信 MEMS 器件设计的工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

引信 MEMS 微弹性元件设计基础/隋丽等著. —北京:国防工业出版社, 2016.3

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-07812-1

I. ①引… II. ①隋… III. ①引信—弹性元件—设计

IV. ①TJ430.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 113885 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 17 字数 347 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

《现代引信技术丛书》

编委会

名誉主任 马宝华

执行主任 范宁军 娄文忠

编委会委员 (按姓氏拼音排序)

陈慧敏 邓宏彬 冯 跃 何光林 李世中

李晓峰 牛兰杰 申 强 宋荣昌 隋 丽

王军波 吴炎烜 熊永家 杨 喆 张 亚

丛书策划 王京涛

秘 书 吴炎烜 冯 晨

审委会

主 任 朵英贤

副 主 任 黄 峥 秦光泉 谭惠民 游 宁

审委会委员 (按姓氏拼音排序)

蔡瑞娇 陈科山 崔占忠 冯顺山 傅调平

高春清 韩子鹏 胡景林 李长福 李世义

刘明杰 刘小虎 牛少华 齐杏林 施坤林

石 坚 石庚辰 宋遁志 徐立文 徐立新

伊福廷 袁 正 张菁华 邹金龙

引信是利用目标、环境或指令信息，在预定的条件下解除保险，并在有利的时机或位置上起爆或引燃弹药战斗部装药的控制系统（或装置）。弹药是武器系统的核心部分，是完成既定战斗任务的最终手段。引信作为弹药战斗部对目标产生毁伤作用或终点效应的控制系统（或装置），始终处于武器弹药战场终端对抗的最前沿。大量实战案例表明：性能完善、质量可靠的引信能保证弹药战斗部对目标实施有效毁伤，发挥武器弹药作战效能“倍增器”的作用；性能不完善的引信则会导致弹药在勤务处理时、发射过程中或发射平台附近过早炸，遇到目标时发生早炸、迟炸或瞎火，不仅贻误战机，还可能对己方和友邻造成严重危害。

从严格的学科分类意义上讲，“引信技术”并不是一个具有相对独立的知识体系的学科或专业，而是一个跨学科、专业的工程应用综合技术领域。因此，现代引信及其系统是一类涉及多学科、专业知识的军事工程科技产品。纵观历史，为了获取战争对抗中的优势，人们总是将自己的智慧和最新科技成果优先应用于武器装备的研制和发展。引信也不例外，现代引信技术的发展一方面受到武器弹药战场对抗的需求牵引，另一方面受到当代科学技术进步的发展推动。

近30年来，随着人类社会进入以信息科技为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆-制导一体化、微小型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“现代引信技术丛书”共12册，较系统和客观地反映了近30年来现代引信技术部分领域的理论研究和技術发展的现状、水平及趋势。丛书包括：《激光引信技术》《中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术》《引信安全系统分析与设计》《引信环境及其应用》《引信可靠性技术》《高动态微系统与MEMS引信技术》《现代引信装配工程》《引信弹道修正技术》《高价值弹药引信小子样可靠性评估与验收》《弹目姿轨复合交会精准起爆控制》《侵彻弹药引信技

术》《引信 MEMS 微弹性元件设计基础》。

这套丛书是以北京理工大学教师为主，联合中北大学及相关科研单位的教师 and 研究人员集体撰写的。这套丛书的特色可以概括为：内容厚今薄古；取材内外兼收；突出设计思想；强调普适方法；注重科技创新；适应发展需求。这套丛书已列为 2015 年度国家出版基金项目，既可作为从事兵器科学与技术，特别是从事弹药工程和引信技术的科技工程专业技术人员和管理人员的使用工具，也可作为高等学校相关学科专业师生的教学参考。

这套丛书的出版，对进一步推动我国现代引信技术的发展，进而促进武器弹药技术的进步具有重要意义。值此丛书付梓之际，衷心祝贺“现代引信技术丛书”的出版面世。

宋云贤

2016 年 1 月

MEMS 相关理论和技术的出现,使得传统机电系统逐步走向微型化。微梁、微弹簧、微型闭锁机构等微弹性元件作为微机电系统的重要组成部分,在微机电系统中发挥着重要的作用。微弹性元件在引信中应用十分广泛,引信 MEMS 安全系统中的弹性元件可以实现能量和力的传递,是保证引信安全与解除保险装置平时安全与发射后可靠作用的重要零件。微弹性元件的力学性能对引信中其他器件能否按照设计要求正确发挥作用起着至关重要的作用。引信 MEMS 安全系统中的微弹性元件多采用平面设计,其结构形式和尺寸参数与宏观零部件差异较大,目前大部分微弹性元件都没有相应成熟的设计理论,在器件的设计及优化中缺乏理论上的支持。因此开展微弹性元件的研究具有非常重要的意义。

作者于 2000 年开始接触引信 MEMS 器件的设计、优化与测试方法研究,本书是在作者及作者所在课题组大量科学实践基础上写成的。本书内容为微弹簧、微闭锁机构等微弹性元件的结构设计、优化及检测研究。

本书读者对象为有关专业高年级本科生、研究生和从事引信设计的工程技术人员,宗旨是帮助读者利用 ANSYS、MATLAB 等工程软件对微弹性元件进行设计、仿真及优化,所以本书着力讲述微弹性元件设计的基本原理、方法和步骤,而对所涉及的数学问题只是从应用的角度进行必要的介绍。

全书共分为 9 章,第 1 章介绍了引信 MEMS 安全系统的组成及工作原理,并将以此为应用背景的微弹性元件分为三类:微梁、微弹簧和微闭锁机构;第 2 章采用能量法及单位载荷法对 L 形微弹簧和 S 形微弹簧的刚度公式进行推导,并分析了微弹簧的结构形状对刚度系数的影响;第 3 章给出了 L 形及 S 形微弹簧的变异性设计方法,通过改变微弹簧部分组成要素的形态,实现改善弹簧某些性能的目的;第 4 章利用增加“接触对”的思想,提出了基于 MEMS 加工工艺的微弹簧变刚度的实现方法,对变刚度微弹簧在引信 MEMS 安全系统中的应用进行了探讨;第 5 章针对压缩微弹簧发生的失稳问题,利用仿真方法对微弹簧进行了特征值屈曲分析,研究了结构参数、边界条件和结构形态对微弹簧稳定性的影响;第 6 章利用二次开发技术,实现了 S 形微弹簧的参数化建模及有限元仿真功能,在此基础上完成了微弹簧的优化设计;第 7 章对初始

定位闭锁机构和终止定位闭锁机构进行了力学分析，利用仿真方法对引信 MEMS 后坐保险机构的终止定位闭锁机构进行了动力学仿真研究；第 8、9 章为微弹性元件的试验研究，包括几何尺寸测量、材料参数测量及微弹簧的疲劳特性检测。

感谢娄文忠教授、王俊高级工程师和李国中博士在本书撰写过程中的通力合作。王文豪、王祺、张婧、刘国华、王彭颖恺、邝应龙、耿剑和赵瑞在完成硕士论文期间，以及张菁华、李华、郑立兵、孙韶春和曾涛在完成博士论文期间参与了本书部分编撰工作，在此对他们的帮助表示感谢。

感谢石庚辰教授对整个写作过程的支持和指导。

感谢国防工业出版社张冬晔编辑对本书写作的支持与帮助。

在本书的写作过程中，参考了许多文献资料，在此向有关作者一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中会有不少缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2015 年 12 月

第1章 绪论	1
1.1 引信 MEMS 安全系统简介	1
1.1.1 引信安全系统的定义及组成	2
1.1.2 引信 MEMS 安全系统的组成	3
1.1.3 引信 MEMS 安全系统的研究现状	5
1.1.4 引信 MEMS 安全系统的特点	7
1.2 引信微弹性元件的分类	8
1.2.1 微弹性梁	9
1.2.2 微弹簧	11
1.2.3 微闭锁机构	15
1.3 本章小结	19
第2章 微弹簧变形特性基础研究	20
2.1 常规弹簧的性能指标	20
2.1.1 弹簧的特性线和刚度	21
2.1.2 弹簧的变形能	22
2.1.3 弹簧的自振频率	22
2.2 引信中传统弹簧与微弹簧的区别	23
2.2.1 使用方法不同	24
2.2.2 固定方式不同	27
2.2.3 弹簧的性能参数不同	28
2.3 微弹簧的工作模式及结构形态	29
2.3.1 微弹簧在轴向的拉伸(压缩)变形	29
2.3.2 微弹簧的径向变形	30
2.3.3 微弹簧的法向变形	31
2.4 基于能量法的微弹簧刚度公式推导	31
2.4.1 能量法概述	32

2.4.2	不同工作模式下 L 形微弹簧的刚度系数	33
2.4.3	不同工作模式下 S 形微弹簧的刚度系数	39
2.5	基于单位载荷法的微弹簧刚度公式推导	42
2.5.1	L 形微弹簧的刚度系数推导	42
2.5.2	S 形微弹簧的刚度系数推导	47
2.6	微弹簧结构形状与刚度系数的关系	50
2.6.1	基本结构展开长度相同	51
2.6.2	基本结构整体宽度相同	55
2.7	本章小结	58
第 3 章	微弹簧的结构变异性设计	59
3.1	变截面微弹簧设计与分析	59
3.1.1	等强度梁的设计方法	60
3.1.2	变截面 L 形微弹簧的设计与分析	62
3.1.3	变截面 S 形微弹簧的设计与分析	66
3.2	非规则微弹簧设计及分析	67
3.2.1	非规则 L 形微弹簧的设计与分析	68
3.2.2	非规则 S 形微弹簧的设计与分析	72
3.3	本章小结	74
第 4 章	变刚度微弹簧的设计	75
4.1	螺旋弹簧变刚度实现方法	75
4.1.1	不等节距螺旋弹簧	76
4.1.2	圆锥形螺旋弹簧	76
4.1.3	变中径螺旋弹簧	77
4.1.4	圆锥涡卷螺旋弹簧	77
4.1.5	组合式变刚度螺旋弹簧	78
4.1.6	螺旋弹簧变刚度的实现方法	78
4.2	变刚度微弹簧的设计思路	79
4.3	变刚度微弹簧的设计与性能分析	81
4.3.1	带有接触对的变刚度微弹簧设计与分析	81
4.3.2	改进的变刚度微弹簧设计与分析	84
4.3.3	串联结构的变刚度微弹簧设计与分析	87
4.3.4	变刚度微弹簧特性曲线的三种形式	94

4.4 变刚度微弹簧在引信后坐保险机构中的应用探讨..... 94

4.4.1 后坐保险与平时安全的矛盾问题 94

4.4.2 变刚度微弹簧在后坐保险机构中的应用思路 97

4.4.3 变刚度微弹簧在火箭弹引信后坐保险机构中的应用
 举例 99

4.5 本章小结 105

第5章 压缩微弹簧的稳定性分析 107

5.1 结构的稳定性 107

5.1.1 稳定性研究概述 107

5.1.2 结构稳定性的基本概念 108

5.1.3 稳定问题的类型 110

5.1.4 失稳判断准则 113

5.2 压缩微弹簧的轴向临界失稳变形公式 114

5.3 基于有限元的微弹簧稳定性分析方法 117

5.3.1 仿真思路 117

5.3.2 仿真过程 117

5.3.3 微弹簧屈曲的基本形式 120

5.4 结构尺寸对失稳力的影响 121

5.4.1 厚度对失稳力的影响 121

5.4.2 弹簧节数对失稳力的影响 124

5.4.3 横梁宽度对失稳力的影响 125

5.4.4 线宽对失稳力的影响 126

5.4.5 内弯半径对失稳力的影响 127

5.5 其他因素对微弹簧稳定性的影响 129

5.5.1 边界条件对微弹簧稳定性的影响 129

5.5.2 结构形态对微弹簧稳定性的影响 131

5.6 本章小结 133

第6章 微弹簧的优化设计 134

6.1 微弹簧优化设计的过程 134

6.1.1 设计变量 135

6.1.2 约束条件 136

6.1.3 目标函数 137

6.1.4	结构优化设计的数学模型	137
6.1.5	微弹簧优化数学模型的形成	138
6.2	微弹簧的参数化建模	139
6.2.1	UG 二次开发技术	140
6.2.2	UG 参数化设计模块的开发方法	141
6.2.3	UG 参数化设计模块的开发思路	142
6.2.4	参数化设计模块的工作流程	142
6.2.5	基于 UG 的三维参数化特征建模	143
6.2.6	参数化驱动的实现	146
6.3	微弹簧的参数化有限元分析	147
6.3.1	ANSYS 参数化设计语言	148
6.3.2	有限元自动分析模块开发思路与方法	149
6.3.3	有限元自动分析模块的工作流程	149
6.3.4	生成输入文件 (UpdateInputFile. exe)	151
6.3.5	ANSYS 特征值屈曲分析 (ModelAnalysis. exe)	152
6.3.6	结果读取 (ReadResult. exe)	152
6.3.7	参数化有限元自动分析模块特点	152
6.4	参数化建模与仿真系统的集成	153
6.4.1	MATLAB 简介	154
6.4.2	集成过程	155
6.4.3	参数化建模与仿真系统运行实例	156
6.5	微弹簧结构稳定性的优化设计	157
6.5.1	问题分析	157
6.5.2	数学模型的建立	158
6.5.3	基于 MATLAB 的优化设计	159
6.5.4	优化结果	162
6.6	本章小结	162
第 7 章	微闭锁机构的设计方法	163
7.1	微闭锁机构的动作原理及典型结构	163
7.1.1	MEMS 微闭锁的动作原理	163
7.1.2	初始定位闭锁机构	165
7.1.3	终止定位闭锁机构	166

7.2	初始定位闭锁机构设计	168
7.2.1	竖直力作用下变截面悬臂梁的挠度计算公式	169
7.2.2	水平力作用下变截面悬臂梁的挠度计算公式	171
7.2.3	总拔出力	173
7.2.4	强度分析	173
7.3	终止定位闭锁机构设计	174
7.3.1	模式Ⅰ终止定位闭锁机构分析	174
7.3.2	模式Ⅱ终止定位闭锁机构分析	177
7.3.3	模式Ⅲ终止定位闭锁机构分析	179
7.3.4	三种模式终止定位闭锁机构的分析与比较	183
7.4	终止定位闭锁机构的动力学仿真	183
7.4.1	后坐保险机构的结构及尺寸	183
7.4.2	后坐保险机构的有限元模型	185
7.4.3	基于模式Ⅱ-1闭锁机构的后坐保险机构仿真结果	187
7.4.4	基于模式Ⅲ闭锁机构的后坐保险机构仿真结果	190
7.5	本章小结	197
第8章	微弹性元件试验方法	198
8.1	微弹性元件的几何尺寸检测	198
8.2	微弹性元件材料力学性能检测	203
8.2.1	MEMS材料力学性能检测的必要性	203
8.2.2	MEMS材料力学性能检测方法	205
8.3	微拉伸法测量材料力学性能	207
8.3.1	试验装置与试验原理	207
8.3.2	微拉伸试样的结构设计	210
8.3.3	试验结果及分析	214
8.4	压痕法测量材料力学性能	217
8.4.1	试验装置及试验原理	217
8.4.2	试验结果及分析	219
8.4.3	拉伸法与压痕法的比较	224
8.5	本章小结	225
第9章	微弹簧的疲劳特性检测	226
9.1	弹簧疲劳特性研究的理论基础	226

9.1.1	变应力的类型和特性	227
9.1.2	疲劳曲线	228
9.1.3	影响弹簧疲劳强度的因素	229
9.1.4	微弹簧疲劳失效概述	230
9.2	微弹簧疲劳试验方案	231
9.2.1	试验装置	231
9.2.2	试验输入	232
9.3	试验结果及分析	232
9.3.1	S 形微弹簧疲劳试验结果	232
9.3.2	W 形微弹簧疲劳试验结果	234
9.3.3	长城形微弹簧疲劳试验结果	235
9.3.4	试验结果分析	236
9.3.5	微弹簧的疲劳断裂位置分析	237
9.4	本章小结	238
附录		239
附录 1	UpdateGeoModel 程序	239
附录 2	apdl_refresh 程序	246
附录 3	ansys_start 程序	249
附录 4	ReadResult 程序	250
附录 5	ObjFunc 函数	252
附录 6	ModifyInputFile 函数	253
附录 7	ReadOutput 函数	254
附录 8	OptModel 函数	254
附录 9	ObjCon 函数	255
参考文献		256

第1章 绪 论

微机电系统 (Microelectro Mechanical System, MEMS), 又称微机械 (Micromachine) 和微系统 (Microsystems), 是指由微机械加工技术制作的包括微机械传感器、微机械执行器、微机械器件等微机械基本部分以及微能源和由集成电路加工技术制作的高性能电子集成线路组成的微机电器件、装置和系统。

MEMS 技术作为现代机械和电子技术发展中的一门新兴的综合性技术, 其应用领域遍布各行各业。使用 MEMS 技术可在微米尺度上构建系统, 能够整合机械和电气系统, 批量制造零部件。使用 MEMS 技术生产的微系统及微器件具有体积小、成本低、可靠性高等特点。

结构的微型化对国防领域武器装备, 尤其是对弹药的起爆控制装置——引信的发展起着巨大的推动作用, 为引信的发展提供了更多的空间, 使引信在有限的空间范围内能够“腾出”更大的空间来容纳传感器以及一些其他部件, 从而使引信朝着微型化、灵巧化、智能化方向发展。先进的引信技术对武器威力的提高起到“倍增器”的作用。因此, 微机电系统技术在引信中的应用受到世界各国的高度重视。

MEMS 技术在引信中一个重要的应用是 MEMS 安全系统, 本章介绍引信 MEMS 安全系统组成、工作原理及研究现状, 并分类介绍了三类微弹性元件: 微梁、微弹簧和微闭锁机构。

1.1 引信 MEMS 安全系统简介

目前在引信系统中可以采用 MEMS 技术设计的功能模块有: ①微型传感器, 为引信提供感知物理信息的手段; ②微型安全系统, 为引信提供安全可靠保障; ③微型电源, 为引信提供能量的源泉; ④微传火序列, 为引信提供能量的可靠传递。

1.1.1 引信安全系统的定义及组成

引信安全系统是引信中的重要组成部分，是引信满足安全性要求的重要保障。GJB 373A—97《引信安全性设计准则》中对引信安全系统的定义为：用来防止引信在感受到预定的发射环境并完成延期解除保险之前解除保险（启动）和作用的各种装置（如环境敏感装置、发射动作敏感装置、指令动作装置、可动关键件或逻辑网络，以及传火序列的隔火件或传爆序列的隔爆件）的组合。GJB 102A—98《引信术语符号》中对引信安全系统的定义基本一致：引信系统内，用来保证安全并防止引信在运输、储存、装卸、安装和发射直至延期解除保险结束之前的各种环境下解除保险和爆炸的各种装置的组合。

根据上述引信安全系统的定义，可以看出引信安全系统是若干装置的组合，而这若干装置根据其在引信中的安全性要求不同作用于引信的不同部位或者不同的引信子系统中。所以，引信安全系统不同于引信的其他子系统，引信安全系统与引信中的其他子系统之间也不能简单地进行模块化并列划分，而是结构上相互交错，逻辑上相互作用。引信安全系统在引信中作用于其他的子系统，同时也可能接受其他子系统的作用，以实现引信的整体安全性。因此一般来说，现代引信安全系统的结构不是独立的，组成也不是唯一的，对引信的作用方式往往是多种多样的。

基于以上讨论，可以认为引信安全系统是由多个安全开关构成的，而每个安全开关的组成一般应该包括敏感器、识别与逻辑判断器、安全控制执行器。引信安全系统可以由图 1-1 表示。

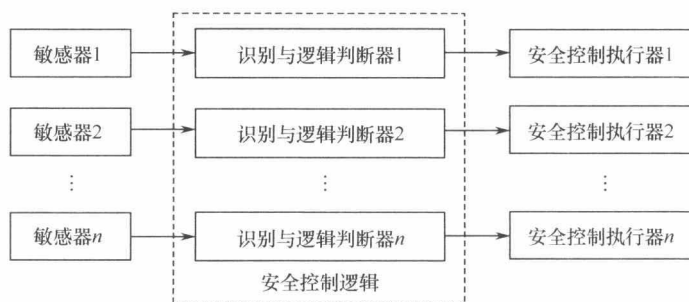


图 1-1 引信安全系统组成框图

这里的敏感器一般指对引信环境或引信自身状态的判断，也包括对武器、弹药系统或者人为的参与，即对弹药的状态、武器系统的状态等的判断，或者发射前的操作过程等。引信安全系统中的多个安全开关之间可以相互独立，也可以是相互关联的，如发火控制系统的安全开关与隔爆机构的安全开关在中大

口径榴弹引信中一般是相互独立的（如榴-5引信），又如隔爆机构的双环境力冗余保险机构对应的安全执行器是一致的（隔爆件）。而对于安全控制逻辑，多个安全开关之间一般也有相互约束关系，如引信设计中的时序保险等。

1.1.2 引信 MEMS 安全系统的组成

引信 MEMS 安全系统就是利用 MEMS 加工技术制造的满足引信要求的微型安全系统。

MEMS 技术的应用，给引信技术在观念和设计原理上带来了巨大变化。引信 MEMS 安全系统采用 MEMS 器件及机构代替传统机电装置，可实现多体制探测、多作用方式相结合，从根本上改善了引信的安全与起爆性能。MEMS 安全系统比常规安全与解除保险装置小得多，因此可以使战斗部装药量增加，较大地提高弹药杀伤力。MEMS 技术的引入，不仅仅使引信在尺寸及重量上大为减少，可以实现引信的小型化和微型化，同时设计人员可以充分利用 MEMS 技术的特点及优势，使引信在多功能化和产品性能方面大大提高，进而使武器系统在整个效能上得以提高，引信环境信息的安全逻辑设计也呈多样化趋势。

MEMS 技术在引信中的应用源于加速度传感器，根据引信安全性设计准则要求，结合 MEMS 传感器和 MEMS 机构在引信中的发展，可构建出引信 MEMS 安全系统的总体功能原理框架，如图 1-2 所示，主要有传感器阵列、多芯片组件、微火工品及微电源组成。

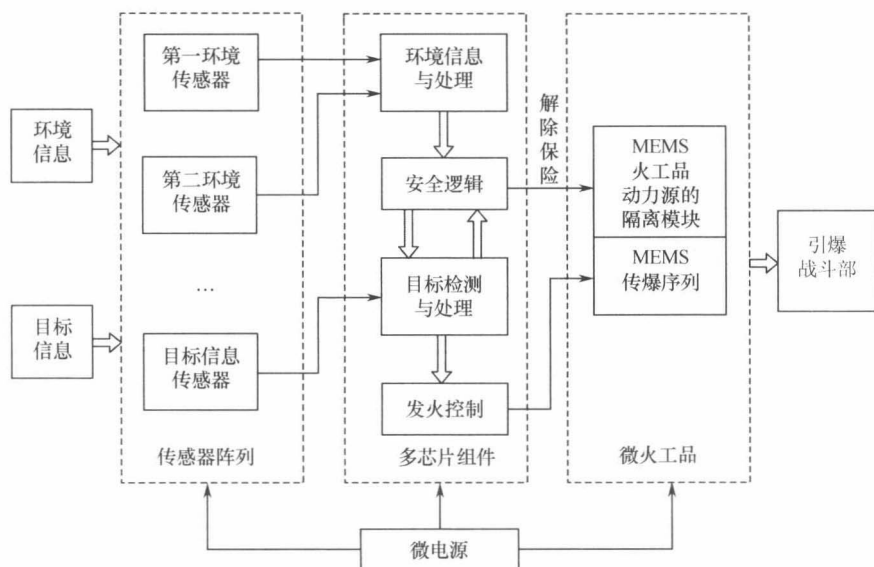


图 1-2 引信 MEMS 安全系统总功能图