



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代引信技术丛书

High Dynamic Microsystems and MEMS Fuze Technology

高动态微系统与MEMS 引信技术(上)

娄文忠 冯跃 牛兰杰 王亚斌 李建华 严楠 © 等编著

● 剖析前沿微系统技术

● 构建智能集成新理论

● 形成动态微系统体系

● 创新微引信新型应用



国防工业出版社

National Defense Industry Press

高动态微系统与 MEMS 引信技术（上）

娄文忠 冯跃 牛兰杰 王亚斌 李建华 严楠 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书分上、下两册：上册重点介绍微系统技术基础、互连技术、封装集成技术等，以高动态微系统技术及其典型应用为主线，构建高动态微系统的理论体系，研究其设计方法和规律，介绍典型高动态微系统的主要工艺、检测及集成应用方法；下册以典型高动态微系统——MEMS 引信为例，重点介绍 MEMS 引信总体技术、MEMS 安全系统、含能微器件及其系统、引信射频 MEMS 技术、引信用微惯性器件、引信专用芯片、MEMS 引信用固态控制器相关知识，针对高动态微系统的发展趋势列举了大量具体研究成果并进行相应的理论分析，为高动态微系统的论证分析、设计、加工及应用提供参考。

本书以介绍高动态微系统的基础知识及应用方法为主，可作为高等学校信息类、控制类、新材料及能源类相关专业，特别是智能系统、武器系统、微纳工程、物联网、航空航天等军民融合相关专业师生的参考书，也可供从事智能系统、光电系统、导航与控制系统、引信与弹药领域的技术人员和管理人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高动态微系统与 MEMS 引信技术：全 2 册/娄文忠等编著. —北京：国防工业出版社，2016.4

(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10831-6

I. ①高… II. ①娄… III. ①微电子技术—引信 IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 116988 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 22 $\frac{3}{4}$ 字数 471 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 219.00 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 宋遵志 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。

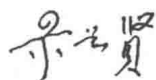
近 30 年来，随着人类社会进入以信息科技为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆—制导一体化、微小型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“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。



2016 年 1 月

新技术不仅推动现代工业的变革,还能在财富创造中起重要作用,以智能手机、物联网、汽车、大数据和智能制造为代表的新技术集成了多学科先进技术和技术革新,以微电子和微系统技术为基础的信息系统是驱动新型工业技术前进的引擎,推动许多传统产业(如钢铁、汽车、火车和纺织等)的生产过程更加自动化和智能化,信息系统的集成度越来越高,体积越来越小,速度越来越快,功能越来越强大,技术和成本优势已在智能系统上得以实现,借助微系统技术正促进类似概念在机械系统中实现。微系统技术是以微电子技术、微光电技术和微机电系统技术为基础,通过系统构架和算法技术,由微传感器、微机构或微执行器、微控制器、各种接口以及微能源等构成的一体化软、硬件多功能集成系统。微系统借助微/纳米级三维结构和设备,集传感、计算、能源和驱动控制为一体,彻底解决了电子智能和感官世界之间的联系问题。本书从历史发展的视角论述以微系统为代表的新兴技术给21世纪带来的巨大影响。高动态微系统是微系统在复杂、高过载环境下的特殊应用,具有成本低、体积小、质量小、可靠性高、可集成等特点,能够实现复杂的系统功能,适于批量生产。美国正在积极拓展高动态微系统技术前沿,发起新一轮军事革新,在美国国防先进技术研究项目局(DARPA)专门成立的微系统技术办公室(MTO)最新计划中,将典型高动态微系统——MEMS引信列为四项前沿技术的首项,以达到降低引信成本及体积的目标。

摩尔定律技术路线竞争残酷,投资量级是10亿美元,产品只有计算和存储芯片。微系统技术是基于超越摩尔(More than Moore)定律,在半导体技术的基础上,在成熟的工艺生产线上研发非数字、多元化微加工技术与产品,系统级构建信息链、信号处理和算法设计等。

本书介绍微系统技术在航空航天与军事领域、物联网领域、机器人领域、可穿戴设备领域、智能制造领域等的实际应用,研究高动态微系统的内涵和设计规律,特别是典型高动态微系统——MEMS引信在需求配置、设计规律、工艺与制造方法、检测与集成技术等方面的应用规律及案例。

编写这上、下两册书的目的是既保证技术体系完整,又要适应当今技术变革和科技创新的迫切需求。本书内容注重实际应用,可为相关知识领域的本科

生、研究生、工程师和科技专家提供技术参考。

编写本书的另一个目的是在微纳米技术与智能弹药及引信技术间搭建桥梁,促进高新技术在特种装备领域的应用与推广。随着纳米技术、可延展电子技术、石墨烯技术、碳纳米管技术、柔性电子技术不断涌现,新工艺与新方法不断应用,已初步形成了高动态微系统的技术体系。

北京理工大学娄文忠教授负责第1章、第3章和第4章的编写,中国兵器工业集团第二一二研究所牛兰杰研究员和北京理工大学冯跃博士负责第2章的编写,北京理工大学王亚斌副教授和王大奎博士负责第5章的编写,冯跃博士和王辅辅博士研究生负责第6章、第9章的编写,冯跃博士还编写了第7章,北京理工大学严楠教授及所在学科组的朱艳丽老师、鲍丙亮博士、南京理工大学朱朋博士负责第10章的编写,北京理工大学机电学院李建华博士负责第11章、第12章部分内容的编写,北京大学微纳电子研究院张威博士、苏卫国博士负责第12章部分内容的编写,北京理工大学娄文忠教授和航天科工集团第二十五研究所赵越博士、博士研究生刘鹏、王辅辅、丁旭冉负责第8章、第13章、第14章的编写。北京理工大学智能微系统研究室的宋荣昌博士、李建华博士、冯跃博士及赵越博士,博士研究生刘鹏、王辅辅、丁旭冉、王大奎,硕士研究生王真、郭云龙、刘传钦、顾新伟、刘芳怡、王瑛、吕永佳等的研究成果对本书编写提供了很大帮助,娄文忠、冯跃分别对全书进行了审核,博士研究生刘鹏和王辅辅对全书进行了编排和整理。

中国兵器工业集团第二一〇研究所郭美芳研究员、柏席峰高级工程师,中国科学院半导体研究所杨晋玲研究员,中国兵器工业集团第二一二研究所马岸英研究员、孙发鱼研究员,重庆长安工业(集团)有限责任公司秦光泉研究员、黄江研究员、张明荣高级工程师、徐承刚高级工程师,国营第三〇四厂潘海研究员等为本书提供了大量宝贵的资料。

本书的出版得到国防工业出版社、北京理工大学、北京大学、南京理工大学、中国兵器工业集团第二一〇研究所、第二一二研究所、第二一三研究所、国营第三〇四厂、重庆长安工业(集团)有限责任公司、中国科学院半导体研究所、中国科学院微电子研究所等单位的大力支持。

中国兵器工业集团第二一二研究所牛兰杰研究员、邹金龙研究员,原总装备部炮兵防空兵装备技术研究所王军波高级工程师,北京理工大学徐立新教授、牛少华博士,华中科技大学刘小虎教授等在百忙之中为本书审稿,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2015年10月

第1章 微系统技术基础	1
1.1 微系统的定义和超越摩尔定律	1
1.1.1 微系统的定义	1
1.1.2 微系统的功能及意义	2
1.1.3 超越摩尔定律	4
1.1.4 微系统的主要特点	6
1.2 微系统发展的迫切性	7
1.2.1 发展微系统的迫切性和意义	7
1.2.2 不断增长的市场需求	8
1.2.3 微系统的发展历程	8
1.3 关键推动技术	9
1.3.1 微系统设计思想	10
1.3.2 异质集成技术	10
1.3.3 先进功能材料技术	15
1.3.4 仿真验证及可靠性测试技术	19
1.4 微系统制造典型工艺——硅基工艺	19
1.4.1 硅基表面加工和体加工技术概述	21
1.4.2 光刻	22
1.4.3 薄膜沉积	22
1.4.4 掺杂	24
1.4.5 刻蚀	25
1.4.6 SOI + DRIE 技术在微系统中的应用	28
1.5 微系统制造典型工艺——非硅基工艺	31
1.5.1 非硅微加工技术及其特点	31
1.5.2 非硅基 MEMS 技术中的 LIGA 工艺	31
1.5.3 在军事上最具前景的 UV - LIGA 技术	38
1.6 小结	41
参考文献	41

第2章 高动态微系统	44
2.1 高动态微系统内涵	44
2.1.1 高动态环境下的微系统	44
2.1.2 尺寸效应下高动态微系统的挑战	45
2.1.3 高动态微系统的优势	45
2.2 高动态微系统的工作环境及特点	46
2.3 高动态微系统设计及关键功能器件	48
2.3.1 高动态微系统设计思想	48
2.3.2 高动态环境下微传感器技术	49
2.3.3 高动态环境下执行器技术	60
2.3.4 高动态环境下微电源技术	66
2.3.5 高动态微系统精确时钟控制技术	77
2.4 高动态微系统关键集成技术	81
2.4.1 高动态微系统双向流程集成技术	81
2.4.2 高动态微系统加固技术	82
2.4.3 高动态微系统可靠性及抗干扰技术	83
2.5 高动态微系统发展现状及趋势	83
2.5.1 航空航天高动态微系统	83
2.5.2 高动态微系统在兵器中的应用	85
2.5.3 微型多功能作战平台	87
2.6 小结	90
参考文献	90
第3章 微系统互连技术	93
3.1 引线键合技术	94
3.1.1 引线键合技术概述	94
3.1.2 引线键合形式	99
3.1.3 引线键合质量评估和失效分析	101
3.2 导电聚合物键合技术	110
3.2.1 导电聚合物键合简介	110
3.2.2 导电黏结剂综述	110
3.2.3 聚合物键合工艺	114
3.2.4 聚合物键合质量控制	124
3.3 倒装芯片及多芯片组件技术	127
3.3.1 倒装芯片技术概述	127
3.3.2 倒装芯片加工技术	128
3.3.3 多芯片组件技术	131

3.4	芯片尺寸封装与焊球阵列封装技术	135
3.4.1	芯片尺寸封装概述	135
3.4.2	芯片尺寸封装技术	136
3.4.3	焊球阵列封装技术	139
3.5	小结	143
	参考文献	144
第4章	微系统封装集成技术	145
4.1	微系统封装集成概述	145
4.2	微系统封装集成的关键技术	149
4.2.1	界面技术	149
4.2.2	精度和可靠性	150
4.2.3	组装可靠性与可测试性	152
4.2.4	高质量密封技术	153
4.3	微系统封装的三个等级及集成设计	155
4.3.1	芯片级封装	155
4.3.2	器件级封装	156
4.3.3	系统级封装	158
4.3.4	关键的后工艺——内部环境控制	163
4.4	高动态微系统封装集成基本过程	164
4.4.1	表面微加工	164
4.4.2	封装的选择	165
4.4.3	芯片连接	165
4.4.4	电连接和密封	167
4.4.5	封装区域的清洁	167
4.4.6	模块化高动态微系统封装集成	167
4.4.7	特殊问题	169
4.5	典型微传感器封装集成	170
4.5.1	微压力传感器	170
4.5.2	加速度计	173
4.5.3	流量传感器	174
4.5.4	化学传感器	177
4.5.5	光学传感器	178
4.5.6	磁传感器	180
4.5.7	微流体器件	181
4.6	MEMS 与 IC 的集成	182
4.6.1	IC 与微系统集成	182

4.6.2 纳米系统集成典型案例	186
4.7 微系统封装测试标准	191
4.8 小结	192
参考文献	192
第5章 高动态微系统的力学防护技术	193
5.1 高动态微系统力学防护的必要性	193
5.2 高动态环境下多谐振荡电路的输出响应	198
5.2.1 多谐振荡电路	199
5.2.2 模拟试验平台的搭建	203
5.2.3 试验过程及数据采集	205
5.3 高动态微系统的防护理论及防护方法	209
5.3.1 典型硬目标的侵彻理论	210
5.3.2 应力波效应	214
5.3.3 微系统失效的主要原因	215
5.3.4 钻地弹侵彻问题的研究方法	216
5.4 高动态微系统的防护措施	218
5.4.1 从内部提高引信抗高过载的主要途径	219
5.4.2 应用 MEMS 技术提高引信抗高过载能力	220
5.4.3 提高引信抗高过载性能的缓冲措施	221
5.5 缓冲材料的防护效果	223
5.5.1 材料的缓冲机理	223
5.5.2 工程常选用的缓冲材料	224
5.5.3 侵彻模型建立和材料模型	225
5.5.4 缓冲材料的效果数值模拟及对比分析	231
5.6 防护结构的防护效果	234
5.6.1 防护结构设计	234
5.6.2 防护材料的选择	236
5.6.3 侵彻过程中不同防护结构的仿真分析	239
参考文献	247
第6章 高动态微系统的可靠性及失效机理	251
6.1 高动态微系统可靠性及失效机理研究的必要性	251
6.2 高动态微系统可靠性分析研究	252
6.2.1 微系统典型失效模式与机理	252
6.2.2 仿真方法研究	258
6.2.3 可靠度计算方法	259
6.3 微系统安保装置多场耦合仿真	267

6.3.1	离心力和后坐力耦合仿真	268
6.3.2	后坐力、离心力和温度耦合仿真	270
6.3.3	不同离心力作用影响	271
6.3.4	尺寸作用影响	276
6.4	微系统固态开关多场耦合仿真	279
6.4.1	COB 封装方式仿真	279
6.4.2	倒装焊封装方式仿真	284
参考文献		290
第7章 传感器、执行器和供电一体化集成微系统		293
7.1	驻极体机制	293
7.1.1	驻极体的物理原理	294
7.1.2	驻极体的分类及电学特性	295
7.2	驻极体的极化技术	298
7.2.1	电晕极化技术	298
7.2.2	紫外线极化技术	299
7.2.3	软 X 射线极化技术	300
7.3	驻极体在高度集成微系统的应用	301
7.3.1	驻极体微传感器	302
7.3.2	驻极体微执行器	305
7.3.3	驻极体微能源器	308
7.4	压电驻极体机制	315
7.4.1	压电驻极体的压电性	316
7.4.2	压电驻极体的基本理论	317
7.5	压电驻极体制备技术	319
7.5.1	压电驻极体的工业制备及局限性	319
7.5.2	压电驻极体的 MEMS 工艺制备	321
7.6	压电驻极体极化技术	323
7.6.1	介质阻挡放电极化及局限性	323
7.6.2	软 X 射线极化技术	324
7.7	压电驻极体在高度集成微系统的应用	326
7.7.1	压电驻极体微传感器	326
7.7.2	压电驻极体微能源器	333
7.8	传感器 - 执行器 - 自供电高度集成微系统展望	339
参考文献		340

第1章 微系统技术基础

1.1 微系统的定义和超越摩尔定律

1.1.1 微系统的定义

随着微/纳米科学与技术的发展,以微米级或纳米级主要特征尺寸为特点的微系统已成为人们认识微观领域和改造微环境的一项高新技术,是当今技术创新发展的主导方向。微系统是以微电子技术、微纳机电系统(Micro/Nano Electro-Mechanical Systems, MEMS/NEMS)技术、微光机电系统(Micro Optical Electro-Mechanical Systems, MOEMS)技术等为基础,通过系统构架技术和算法软件技术,将微传感器、微机构或微执行器与微控制器、各种接口、微电源及外围模块选择性集成在一起的智能系统。微系统可承担传统大尺寸系统不能完成的任务,可把独立微器件,如微传感器或微执行器直接嵌入大尺寸系统中,提高系统可靠性、减小尺寸、降低成本,实现系统自动化和智能化的要求。

微系统的基本组成如图1-1所示。微系统含有从外界接收各类信号的微传感器及数据接口、对采集信号处理的内部接口单元以及对信息进行处理的低功耗处理器或存储器。从外部接收的多种能量通过能量采集器件进行转换,并以专门电源存储单元进行存储和管理;执行机械动作或以其他方式输出,或将数据发送至下一级处理单元,或通过无线射频模块进行数据传递。微系统各个模块都大量使用具有明显特性的功能材料和适用的封装形式,来实现整体的小型化。微系统既可独立使用,也可作为单元嵌入大系统中,实现系统间物质流、信息流和能量流的交互;针对特定应用,设计人员可以根据实际需求进行专门灵活的裁剪,以符合真正需要。因此,微系统是以执行特定功能为目的,

综合微电子系统、微机械系统、微光学系统、微流体系统、嵌入式系统、射频/无线系统等的-体化软硬件多功能集成系统。

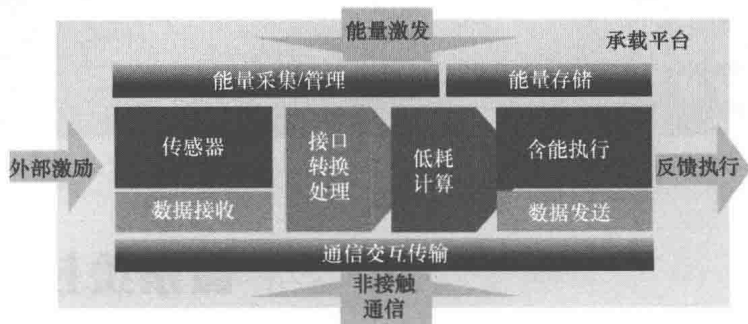


图 1-1 微系统的基本组成

1.1.2 微系统的功能及意义

微系统作为微观尺度智能系统，兼具传感、执行、控制、组网和自供电等功能，可拥有多类接口或人机界面。微系统不仅是重量和尺寸的描述，最主要的是其高密度功能集成，可以独立工作。这些功能和特点主要以应用微纳尺寸器件为前提来实现，系统的多功能应用特点是在此基础上，以软硬件结合的智能系统集成（Smart Systems Integration，SSI）方法实现。通过系统设计方法，微系统往往具有典型的应用功能，如对人体和外部环境的感知与执行功能、内部的运算功能及同类系统间的互联功能。

智能手机是典型的微系统应用，集成了先进微纳核心功能器件，如微纳传感器、通信及局域网天线模块、能量采集模块、光电成像执行器等（图 1-2），其中广泛应用先进功能材料，并通过嵌入式操作系统及应用软件，对采集所得及交互数据进行有效运算，以微观不可见的技术手段实现使用者实时需求。通过软件的开发拓展智能手机的功能，紧密加深人机交互等应用。

微型传感器不但能够独立进行物理、化学和生物信号的感知，而且能满足多参量、智能自主及局域互联组网的感知需求，以实现对所处环境的监测，无论是对生命体还是专门应用中的观测对象，都能实现有效的远程感知。所集成的执行器不但能进行无线非接触执行操作，带有安全保障的动作控制，实现准确定位，而且能够对液体和气体进行释放操作。电源管理可实现电能、热能和机械能的能源生成、采集和存储。例如，在多节点环境监测和识别应用中，传感器和执行器要实现对空气、水质和土壤的污染采集、监测、处理及灾害预测，身份识别后达到避免相互干扰、自动操纵、人机交互和群体协调，这样才能进一步为控制端提供支持。



图 1-2 智能手机中的典型微系统应用

作为快速发展的专用信息系统，微系统的接口功能需要满足热学、电学和力学信号在各种界面下的交互，尤其是实现可植入应用，并在苛刻环境下可以承受压力、温度、振动和辐射等条件对接口的干扰。同时，作为独立工作的电子设备，其通信功能不但能够实现低功耗和高可靠，而且能够满足即插即用接入物联网这样的功能，以满足动态组网需求。

采集信号的处理、识别及信息管理的功能，是实现智能化应用的核心。要求能够实现模式识别、数字身份描述、数据融合、机器学习、闭环控制的改进、动态和自适应的数据处理及进一步的环境识别判断。信息库或大数据的管理不但实现其容量的扩充和分类管理，而且需要保证参考数据调用的可操作性。例如，活体组织中健康状态与病灶的识别，工业排放控制和灾害预防，自动导航、数据融合的气象预测和自适应飞行器技术等。

微系统的功能智能化程度与关键功能的密度等级相关，即利用高密度集成所反映的功能多样性体现系统优势。同时，利用多学科交叉的设计原理，融合传感器、执行器和通信等关键模块对环境各类有用信息提取与分析，通过学习做出相应反应；利用小型化和高能效性，自主节点数量按需扩充；具备自组网通信能力，与其他设备互联，增强整体系统的“作用效果”。

因此，微系统在消费类电子、汽车、军事、工业等领域中普及应用意义重大，在航空航天、医疗保健、生物、物联网、环境保护、通信等领域有着广泛的应用潜力。特别是现代微电子与纳米技术的迅速发展，更加促进了微系统的

进步与发展，愈发显示出其巨大的应用潜力和对国民经济与军事技术的推动作用，是当今世界发达国家广泛重视的关键未来技术之一。

1.1.3 超越摩尔定律

在过去 70 多年的发展过程中，半导体行业一直遵循着摩尔定律：当价格不变时，集成电路可容纳的晶体管数目每隔 18 ~ 24 个月便会增加 1 倍，性能也将提升 1 倍，如图 1-3 所示。摩尔定律预测了集成电路技术和信息产业的发展规律。

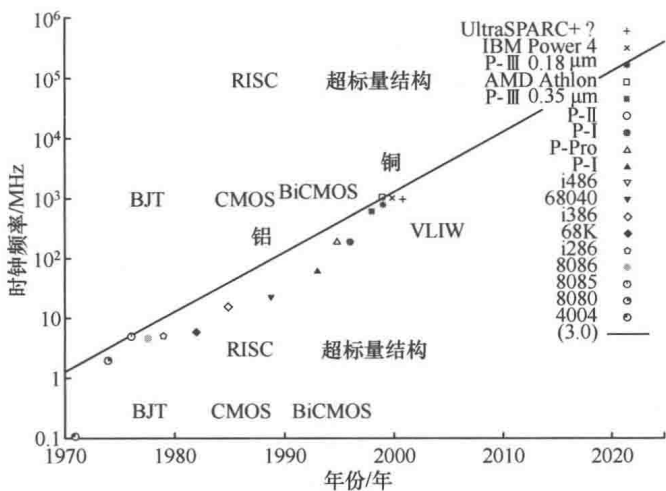


图 1-3 摩尔定律

集成电路的集成度和性能一直按照摩尔定律在不断地提高，作为带动半导体产业整体前进的技术原动力，专用集成电路（Application Specific Integrated Circuits, ASIC）技术不断进步，微观尺寸理论和工艺的探索使 CMOS 晶体管生产的集成度继续增加，工艺成本也随之迅速增加。由于量子力学基本原理的客观存在，其特征线宽逐渐达到物理极限，量子尺寸的极限会使现在所依托的理论不再适用，继续缩小尺寸对性能改进已经不再明显。研究人员也认为，特征尺寸缩小到一定程度后，器件生产的效费比难以提高，CMOS 晶体管的尺寸缩小终将遇到物理极限。研究人员一方面在积极寻找新的替代器件和电路结构，另一方面将目光投入到整个系统的尺寸缩小和性能提高。

在突破摩尔定律理论瓶颈的尝试过程中，国际半导体技术发展蓝图（ITRS）于 2007 提出“超越摩尔定律”（More than Moore, MtM）的概念。超越摩尔定律强调以功能牵引的异质模块在集成设计的方法下，不但实现新型微纳核心单元的系统架构，同时也在跨越微观与相对宏观的尺度下实现一体