



“十二五”国家重点图书出版规划项目

MECHANICAL ENVIRONMENT RESISTANCE DESIGN THEORY OF
AEROSPACE ELECTROMAGNETIC RELAY AND ITS APPLICATION

航天继电器耐力学环境设计理论与应用

● 任万滨 翟国富 主编



哈尔滨工业大学出版
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目

MECHANICAL ENVIRONMENT RESISTANCE DESIGN THEORY OF
AEROSPACE ELECTROMAGNETIC RELAY AND ITS APPLICATION

航天继电器耐力学环境设计理论与应用

● 任万滨 翟国富 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书共分7章:第1章为绪论,介绍航天型号对继电器耐力学环境指标的要求等;第2章介绍典型弹性体的振动理论、计算方法和有关图表;第3~4章分别介绍继电器接触系统和衔铁系统的振动力学建模理论,以及在正弦振动、冲击、恒加速度、随机振动条件下的响应特性分析方法;第5章介绍继电器的非线性振动理论;第6章介绍继电器力学环境条件下的仿真技术;第7章介绍继电器力学环境试验技术。

本书可供高等学校电气工程、自动化等专业的研究生学习参考,也可供从事电子设备、机电组件、电器元件结构设计、环境试验与可靠性分析等有关科研人员和技术人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航天继电器耐力学环境设计理论与应用/任万滨,翟国富著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5603-4951-0

I. ①航… II. ①任…②翟… III. ①航空继电器—研究
IV. ①V442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 228618 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 李长波

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.5 字数 345 千字

版 次 2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4951-0

定 价 49.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

航天继电器是航天型号、航空型号和武器装备系统中广泛应用的不可或缺的关键元器件。随着我国航天、航空领域空间技术的迅猛发展,对所选用的航天继电器的寿命、可靠性、一致性以及环境适应性等均提出了严格的要求。其中的航天继电器耐力学环境可靠性,即特指其在规定的力学环境(振动、冲击、恒加速度)下可靠工作的能力。目前,我国航天继电器产品的耐力学环境指标与国外同类产品还存在一定差距,相关的专门设计技术及理论基础还不完善。本书的出版旨在能够使设计者更好地掌握航天继电器的耐力学环境设计技术,更加高效地解决现有继电器产品的相关技术难题,从而实现我国航天继电器耐力学环境能力的提升。本书是在国家自然科学基金项目(编号:50777010, 51007010)、国家 863 项目(编号:2009AA04Z110)、民用航天项目、国防基础科研项目等共同资助下,协同我国航天继电器专业生产制造企业——桂林航天电子有限公司(国营 165 厂)合作所取得的研究成果。

以往航天继电器的耐力学环境设计工作只停留在局部零件层面上,对于激振量在继电器中的传递放大过程及零部件间的相互影响只有大概的定性估计。本书通过建立继电器中包括簧片组、衔铁、轭铁、推动器于一体的柔性多体系统动力学数学模型,依次完成其固有模态分析、正弦强迫振动分析、冲击振动分析及随机振动分析过程,以理论分析与实验相结合的方法确定其位移响应及影响因素,从而给出继电器发生失效的合理判据与所对应的激励条件。研究中所涉及的包括刚体、柔性体耦合的动力学建模和分析以及单边约束条件下双梁结构的动力学分析内容均属非线性力学的学科前沿问题,上述问题的解决对于其他结构动力学问题也具有参考价值。本书的研究思路是包括电磁继电器在内的开关电器设计领域的进一步开拓和创新,此研究的深入开展也势必吸引和启发更多的学者自主开发新结构的电磁继电器,而不仅仅是停留在对国外跟踪性重复研究上,因此具有重要的学术意义。

全书内容共分 7 章。第 1 章为绪论,介绍航天型号对继电器耐力学环境指标的要求,力学环境下继电器的失效机理,以及耐力学环境设计技术的发展现状;第 2 章作为基础知识,介绍典型弹性体的振动理论、计算方法和有关图表;第 3~4 章分别介绍继电器接触系统和衔铁系统的振动力学建模理论方法,并介绍了在正弦振动、冲击、恒加速度、随机振动条件下的响应特性分析方法;第 5 章介绍继电器的非线性振动理论;第 6 章介绍继电器力学环境条件下的有限元仿真技术;第 7 章介绍继电器力学环境试验技术。

本书由哈尔滨工业大学任万滨、翟国富共同撰写,参加撰写的还有梁慧敏、叶雪荣、杨文英、周学、徐乐等。书中的部分内容出自自己毕业的博士研究生陈英华和硕士毕业生康云志的学位论文,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 10 月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航天型号对继电器耐力学环境指标的要求	1
1.2 力学环境下航天继电器的失效机理	3
1.3 航天继电器耐力学环境设计技术的现状及发展	5
1.3.1 结构振动特性分析技术	5
1.3.2 结构冲击特性分析技术	6
1.3.3 结构优化设计技术	7
第 2 章 振动力学理论基础	9
2.1 力学模型与基本元件	9
2.1.1 离散型振动系统的力学模型	9
2.1.2 离散系统的基本元件	10
2.1.3 机械阻抗与导纳的概念	18
2.2 单自由度系统	20
2.2.1 无阻尼自由振动	21
2.2.2 有阻尼自由振动	22
2.2.3 固有频率	29
2.2.4 受迫振动	37
2.3 多自由度系统	44
2.3.1 方程的建立	44
2.3.2 固有频率与主振型	49
2.3.3 主坐标和正则坐标	56
2.3.4 计算固有频率和振型的近似方法	58
2.3.5 系统的响应	63
2.4 工程中的非线性振动	67
2.5 非线性振动系统的分类	72
2.6 非线性振动的物理特性	73
2.6.1 非线性系统固有频率与振幅的关系	73
2.6.2 受迫振动的跳跃与滞后	74
2.6.3 受迫振动的次谐波响应与超谐波响应	74
2.6.4 多个简谐激励力作用下的组合频率响应	75

2.6.5	叠加原理对非线性系统不适用	75
2.6.6	频率俘获现象	76
2.7	求解非线性振动问题的常用方法	77
第3章	航天继电器接触系统耐力学环境的设计理论	78
3.1	接触系统结构特征分析	78
3.2	接触区域的受力分析	81
3.3	两自由度系统理论模型	83
3.3.1	数学模型的建立与强迫振动分析	83
3.3.2	工程应用	90
3.4	无限自由度系统理论模型	91
3.4.1	数学模型的建立	91
3.4.2	折线段簧片的模态分析	94
3.4.3	变截面簧片的模态分析	98
3.4.4	带有触点的簧片模态分析	106
3.4.5	触簧系统的振动响应	108
3.4.6	振动极限加速度的分析方法	113
3.5	随机振动条件下的运动特性	120
3.5.1	接触系统 Fokker—Planck 方程	123
3.5.2	有限差分法	124
3.5.3	应用实例分析	126
3.6	冲击条件下的运动特性	129
3.6.1	接触系统有限元模型	129
3.6.2	子空间迭代法	131
3.6.3	Newmark β 直接积分法	132
3.6.4	应用实例分析	133
第4章	航天继电器衔铁系统耐力学环境的设计理论	139
4.1	电磁系统结构特征分析	139
4.2	恒加速度条件下的运动特性	144
4.2.1	平衡衔铁式继电器	146
4.2.2	极化继电器	149
4.3	正弦振动条件下的运动特性	152
4.3.1	运动方程	152
4.3.2	计算实例及实验验证	153
4.4	随机振动条件下的运动特性	156
4.4.1	运动方程	157
4.4.2	Fokker—Planck 方程	158

4.4.3	Monte Carlo 数值实验	159
4.4.4	结果分析	161
第 5 章	航天继电器的非线性振动理论	169
5.1	单自由度系统非线性振动	169
5.1.1	数学模型的建立	169
5.1.2	无阻尼自由振动的定性分析	170
5.1.3	强迫振动分析	173
5.2	两自由度系统非线性振动	175
5.2.1	多尺度法	175
5.2.2	强迫振动	178
5.3	无限自由度系统非线性振动	184
5.3.1	无阻尼自由振动特性分析	186
5.3.2	强迫振动分析	189
5.3.3	实例分析	190
第 6 章	航天继电器耐力学环境特性的有限元仿真分析技术	193
6.1	有限元建模技术	193
6.1.1	可分合接触特征的等效处理	194
6.1.2	点焊和钎焊工艺的等效处理	196
6.2	模态分析技术	197
6.3	扫频振动特性分析技术	201
6.4	随机振动特性分析技术	202
6.5	冲击特性分析技术	205
6.6	优化分析技术	208
6.6.1	MSC. Patran/Nastran 软件的二次开发	208
6.6.2	序列二次规划算法	210
6.6.3	实例分析	210
第 7 章	航天继电器力学环境试验技术	215
7.1	力学环境试验系统设计	215
7.2	力学环境试验条件算法	218
7.2.1	高频振动试验条件算法	218
7.2.2	冲击试验条件算法	219
7.2.3	随机振动试验条件算法	221
7.3	力学环境试验方法	224
7.3.1	高频振动试验方法	224
7.3.2	冲击试验方法	226

7.3.3	随机振动试验方法	227
7.4	力学环境试验系统的虚拟仪器技术	228
7.4.1	串口通信设计	230
7.4.2	PCI 驱动设计	230
7.4.3	信号分析模块的应用	231
参考文献		233
名词索引		237

第 1 章 概 论

1.1 航天型号对继电器耐力学环境指标的要求

电磁继电器是一种自动运动电器。由于具有控制电流通过线圈产生电磁吸力,驱动磁路的可动部分实现机械触点开闭的特点,因此被广泛地应用于生产过程自动化、电力系统保护以及各类自动、远动、遥控、遥测和通信等自动化装置中。航天用继电器是防护形式最佳的一种电磁继电器,由于其能耐受恶劣环境条件和严酷力学条件,因而应用范围最广,需求量最大。其中航天用继电器由于其转换深度高、多路同步切换、输入输出比大、抗干扰能力强等一系列固体器件不能替代的优点,因此长期以来一直是用于导弹、运载火箭、人造卫星、宇宙飞船、航天飞机及其配套地面测控设备中包括电源分系统、供配电分系统、各控制分系统中不可缺少的关键元器件。其技术水平代表了继电器的最高水平。

密封结构的航天继电器不同于一般封闭式电磁继电器,该类继电器的力学环境指标是指其能可靠工作的力学环境条件(主要包括正弦振动、随机振动、冲击、离心及恒加速度等),是有可靠性指标的电磁继电器的重要性能参数之一。目前我国航天继电器的耐力学环境指标普遍停留在Ⅲ,Ⅳ类力学环境,少部分能够满足Ⅴ类力学环境的要求(详细指标参见表 1.1)。这不仅影响了航天继电器的可靠性,同时也使其在特殊场合的应用受到极大限制。随着武器型号的不断改型,使用环境已突破传统大气层,航行速度达到十多马赫,从而对航天继电器耐力学环境指标提出了更高的要求。过去国内设计者通过追踪仿效与经验设计等手段使其可以达到可靠应用的水平,但随着系统对元器件可靠性指标要求的不断提高,航天继电器耐力学环境能力不足的问题则逐渐彰显。

表 1.1 继电器使用环境条件等级(摘自《电子设备用密封电磁继电器系列型谱》)

序号	等级		I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
	项目						
1	正弦振动	Hz	10~500	10~2 000			10~3 000
		m/s ²	100	150		200	300
2	冲击	m/s ²	300	500	750		1 000
3	恒加速度	m/s ²	200	500	750		1 000

我国国防武器装备系统以及航天系统的需求加剧极大地促进了继电器技术的发展。随着神舟系列飞船等航天型号的成功发射,三十多年来我国的空间技术取得了长足的进步,这期间航天继电器自行研制出近百个品种,不仅满足了已有各类航天型号的需要,而

且已经具备针对各类型号的特殊需要进行单独设计的能力。同时也应该看到,一方面在研装备和现役装备对继电器的需求量几十倍乃至上百倍激增;另一方面美国等西方国家进一步加大了对我国高端控制继电器、新型特种继电器的封锁、禁运力度。由此可见,航天继电器面临的发展形势将日趋严峻。

在未来的几十年中,我国的空间技术发展将更加迅猛,现已陆续启动北斗二代导航系统、嫦娥探月工程和载人飞船二期工程。总装备部与国防科工局均已为航天继电器行业制定了“数字化、集成化、高可靠、宇航级”的十二字发展方向。为提高我国军用电机组件的可靠性,继续并更好地完成我国宇航型号配套工程保驾护航的任务,做到宇航型号任务的“万无一失”,针对目前我国航天继电器质量存在的技术难题,对关键性问题进行立项攻关已是当务之急。同时通过研究高可靠的宇航级航天继电器产品,可以带动民用继电器技术的发展,提高我国继电器的整体可靠性水平,为整个国民经济的发展贡献一份力量。

航天继电器“高可靠、宇航级”目标的实现,与提高产品耐环境能力是密切相关的。按照 GJB/Z. 299B—98 对环境的分类方法,可涵盖陆、海、空、天共 17 类环境。在航天工程中环境大体上可分为三类,即自然环境、诱发环境及核环境,又可分为受控环境、正常环境和严酷环境。对于在汽车、坦克、飞机、导弹和人造卫星等上使用的继电器要经受强烈的振动、冲击和离心加速度。例如,由于飞机发动机等振动源和气动力而产生的振动,其频率一般为 10~400 Hz,振动加速度为 4g~6g(g 为重力加速度)。在宇宙飞船和火箭等飞行器中,振动频率会更高,可达 2 000~3 000 Hz,加速度会更大,可达 30g。飞机在着陆、制动、射击和突然变速等情况下都会对继电器产生冲击作用,冲击的次数一般为 40~100 次/分,冲击加速度为 4g~50g,在火箭等飞行器中加速度可达 100g~300g。飞机在做机动飞行和特技飞行时,所产生的离心加速度可达 15g,其他类型的飞行器离心加速度还要高。恒加速度一般分为 10g,25 g,50 g,100g 几级。

其中,随机振动是系统受到时间、空间不确定或者随机变化激励下的运动形式。早期的机械随机振动研究主要是针对喷气飞机与火箭进行的,其振源主要来自推进器噪声、大气湍流、附面层压力波动等。航天和国防科技发展至今,系统和设备在应用环境中所受到的随机振动的等级也不断地提高,形式也愈加复杂,MIL—STD—810F 对航天和国防应用中的随机振动采样数据进行了归纳,其频域的特征及强度见表 1.2。

表 1.2 一般应用环境中随机振动特征

应用场合	最大功率谱密度/($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	频率范围/Hz	加速度均方根/ g
战斗车辆	0.550 8	5~500	3.85
喷气飞机	0.03	20~2 000	5.01
直升机	0.02	20~2 000	4.52
船舰	0.001	1~100	0.1

我国航天继电器标准中《有可靠性指标的电磁继电器总规范》(GJB 65B—99)和《有可靠性指标的功率型电磁继电器总规范》(GJB 2888—97)已规定正弦振动试验过程中闭

合触点的断开时间不得大于 $10\ \mu\text{s}$, 断开触点的闭合时间或桥接不得大于 $1\ \mu\text{s}$ 。这样, 旨在提高产品可靠性指标的可靠性设计如仅着眼于功能设计阶段是远远不够的, 必须在确定产品方案的过程中就考虑到环境条件, 按照环境条件进行必要的防护措施设计, 才能使产品的固有可靠性得到提高, 从而使整个航空、航天系统的可靠性得到提高。

耐力学环境防护设计是可靠性设计的基本组成部分, 是提高航天继电器质量的重要手段。耐力学环境防护设计过去一直没有得到广泛的重视, 只是通过出厂前一般的环境试验进行检验, 原因在于用户对产品耐力学环境能力的要求不高, 因此产品的可靠性设计中就相应的缺少了环境防护设计的环节。随着武器型号的不断改型, 使用环境已突破传统大气层, 航行速度达到十多马赫, 从而对航天继电器力学环境抗振动指标提出了更高的要求。将环境防护设计真正列入产品的可靠性设计流程中, 从根本上提高航天继电器的耐力学环境防护能力已是当务之急。

我军武器装备成系列、成建制, 形成作战能力和保障能力的积极准备促进了开关电器的发展。同时, 开关电器的不断发展又不断促进国防武器装备系统的构成体制、技术性能、可靠性与维修性的发展。世界上技术发达国家很早就重视国防系统、航天系统与开关电器元件这种相互关系, 投入大量资金、人力物力, 进行研究并付诸于工程。而我国国防武器装备系统研制单位普遍不了解世界和我国的开关电器元件发展新动向, 开关电器元件研制单位和厂家也不太了解国防武器装备系统对开关电器元件的需求。这就需要在其间架设一座桥梁, 需要大力开展“元器件工程”的研究与开发, 以提高国防武器装备系统与开关元器件的技术性能和应用可靠性。

1.2 力学环境下航天继电器的失效机理

力学因素也称机械因素, 主要包括振动、冲击、摇摆、恒加速度、爆炸、地震、噪声振动等各种机械力的作用。国内所生产的继电器与国外同类产品相比在抗振性能上存在一定差距, 其指标不高且性能不稳定, 导致批生产例行试验中振动淘汰率过高, 严重地影响了产品的出厂合格率。因此, 提高继电器的抗振性能已被列为航天继电器产品设计人员的重点攻关项目。

航天继电器经受的振动大多都不是简单的正弦振动, 但业已表明, 采用高频正弦振动同样能有效地确定对结构和性能有影响的模态, 并为抗振性设计提供方向。高频正弦振动试验是人为制造产生的诱发环境中最典型的一类, 用来模拟考核继电器在旋转、脉动、振荡等环境中的适应能力。

影响继电器振动特性的因素较多, 所以设计、制造满足用户要求的质量稳定的继电器并非是轻而易举的事情, 必须认真分析激振源位移传递途径, 从每一个零件、组件入手建立数学模型, 分析找到影响其振动特性的主要因素, 进一步优化参数、改进结构, 从而实现防护措施设计, 使继电器产品的固有抗振能力得到提高。

航天继电器作为机械力、磁动力、电力为一体的力平衡或非力平衡精密机械结构, 一般由电磁系统、接触系统及附属部件等构成, 零部件多达三十几个。继电器中发生机械

运动部分的簧片组(柔性体)与衔铁、轭铁、推动器(刚性体)一并构成了典型的刚柔耦合系统,使用继电器的设备在工作过程中产生的振动会使接触系统、电磁系统及其他结构件产生非线性响应,接触系统闭合触点间接触部位产生摩擦和发生相对位移。当触点间响应超过触点预变形时,则发生闭合触点对瞬间分离现象(抖断),如果动触簧的位移响应超过其与静触簧预变形,则发生断开触点对瞬间闭合现象(抖闭)。谐振条件下的损坏最为严重,短时间内继电器将会发生结构破坏。

国内外学者对继电器在振动和冲击环境下的失效机理进行了研究和分析,文献[9—16]根据实际工况下的继电器失效模式进行了试验和理论分析,指出力学环境下继电器失效的最主要形式为常开触点组受到外界激励干扰闭合或者常闭触点组受到干扰断开。

以图 1.1 所示的航天继电器为例,在释放状态下,衔铁受到永磁或者返簧提供的保持力紧密贴近在轭铁①处,左边常闭触点组的静合簧片和动簧片通过装配时产生的簧片变形力维持接触。由于受到继电器时间参数、寿命和驱动功率等指标制约,释放状态下维持接触系统接触状态的触点间初始压力与维持衔铁系统位置的保持力较小,很容易在外界的激励下发生簧片抖动断开或者衔铁误触动簧片造成继电器误动作。而在吸合状态下衔铁和接触系统的状态都由线圈产生的电磁吸力提供,远大于释放状态下的保持力,在外界激励下发生误动作的概率也较小。因此对继电器的耐振动设计一般以释放状态下的接触系统和衔铁系统为主。另外,支架在振动过程中也可能发生共振,使衔铁系统发生共振误触动接触系统,但该情况出现的概率较低。

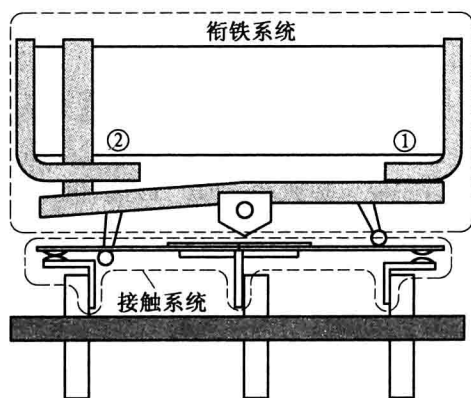


图 1.1 某型号航天继电器内部结构示意图

另外,触点的振动也会引起触点的磨损及影响继电器的寿命,甚至会造成触点的熔焊,严重影响触点工作的可靠性和寿命。因此,电接触振动是各类电接触失效的重要根源。如能最大限度地减小电接触振动,必将大大提高电接触器件的可靠性和寿命。

簧片系统与衔铁系统具有可分合的接触特征,这也是致使继电器产品在超环境应力使用中出现触点组抖断抖闭、衔铁组件抖动、整机框架谐振等失效模式的原因所在。航天继电器耐力学环境性能的提高与其接触系统、电磁系统及整机结构的结构动力学特性都是密不可分的,因此通过建立其柔性多体结构非线性控制方程,理论分析其在力学环境条件下关键位置的动态响应及影响因素,对优化航天继电器乃至电子元器件的力学环境指

标具有重要的实用价值,同时所开展的含非线性接触特征的柔性多体结构动力学研究也将具有重要的理论价值。

1.3 航天继电器耐力学环境设计技术的现状及发展

高耐力学环境指标是国外航天继电器产品的主要特点,以美国专业航天继电器制造商德立台公司(Teledyne)为例,其继电器均已满足V类环境条件要求,特别是专用于高抗振动条件的产品可满足振动频率为3 000 Hz、振动加速度为380g的要求,专用于高抗冲击条件的产品可满足振动加速度为4 000g,0.5 ms半正弦波的要求。国内外单独针对密封继电器结构动力学的相关研究报道很少。继电器耐力学环境设计属于交叉学科问题,涉及结构振动特性分析技术、结构冲击特性分析技术、结构优化设计技术。

1.3.1 结构振动特性分析技术

目前,解决结构振动工程问题的方法已日趋成熟,包括经典解析法和现代数值解法在内的各种方法如传递矩阵法、集中质量法、广义坐标法、里兹法、假设模态法、模态综合法等都已经得到了广泛的应用,取得了很好的研究成果。虽然经典解析法对于形状及边界条件都比较简单的弹性体才能得到振动的精确解,但是这些精确解有助于理解复杂情况下弹性体的振动特性。对于复杂的线性振动系统,要精确地列写其运动微分方程并求解其振动特性往往十分繁复,甚至是不可能的。因此,对于复杂的线性振动问题,必须采用一些行之有效的常用近似方法来建立其数学模型并分析、计算其振动特性。

特别是电子计算机的飞速发展以及大型、综合结构分析程序的不断出现,已使有限元法成为结构分析的有力工具。有限元法是分析复杂结构动力问题最有效的方法。从杆、梁结构、框架结构、板壳结构到一般的三维弹性连续体结构,均可应用有限元法进行静、动力分析。

通常对于大型结构主要应考虑对整体影响较大的因素,而微小结构在其中的影响很小,计算时往往被忽略掉。例如在火箭大部段的动力学计算时,对配挂的仪器(如继电器、传感器、火工品等)一般作为集中质量点,只需保证整体模型的质量、质心参数正确即可,而在单独进行微小结构的有限元计算分析时,则必须对该结构中非常微小的各部件进行精确模拟。由于有限元计算本身不考虑结构的几何尺寸、质量等单位,在单独进行微小结构建模时,可采用小量级的公称单位(如毫米、克等),不会造成计算舍入误差。而对于要同时考虑大型整体结构和附着其上的微小结构的情况,一般不提倡直接对大模型的局部构造得过细。这种情况下通常的处理方法是先单独进行大型整体结构的计算,获得微小结构局部位置的计算结果以后,把它作为微小结构模型的外部载荷环境,再单独进行微小结构的理论计算。文献[19]进行某卫星天线的灵敏度分析计算时,首先进行了全箭整体的有限元分析,对卫星的局部特性予以忽略,在此基础上将卫星平台的计算结果再输出作为天线模型的激励载荷进行二次分析。

微小结构的计算可采用理论解析解或自编计算程序、通用计算软件等不同解法。其

优点在于可根据理论分析构造适应特定结构本构关系的形函数、离散方程等,计算有针对性且效率高。缺点是对不同结构的通用性差,因此在工程上有较多的局限性。采用通用有限元软件进行相应的力学分析,包括应力分析、振动模态分析和载荷响应分析等,尤其是先进国家的航天领域,无论对大型复杂结构还是对微小结构进行优化分析的技术都已经成熟,例如某计算机配件厂对磁盘驱动器的壳体进行力学计算,用以避开共振频率并提高结构刚度等。

1.3.2 结构冲击特性分析技术

冲击或撞击是一种常见的力学现象,是物体运动状态发生急剧变化的力学过程,而引起冲击的载荷称为冲击载荷。冲击载荷在机械结构中是普遍存在的,它不仅在大量高速设备或机构中存在,而且在一些速度并不很高的设备中也普遍存在,例如快速启动设备、快速制动设备或高加速度的机构。军事和航天装备中,基于性能要求,冲击载荷作用的电子系统或高加速度电子系统更是广泛存在,而这类电子系统中开关器件的可靠性对武器装备的性能发挥与安全保障又极其关键,MIL-STD-810F 在航天和国防应用中归纳的冲击特征见表 1.3,冲击载荷的普遍性与重要性使继电器冲击响应分析的研究极具价值。

表 1.3 应用环境中的冲击特征

应用场合	冲击峰值/ <i>g</i>	冲击响应持续时间/ <i>ms</i>
战斗车辆	20	15~23
飞行器	40	15~23
路面车辆(发生碰撞时)	40	15~23
飞行器(发生碰撞时)	75	8~13

航天继电器的冲击过程非常复杂,很难进行精确的解析分析,当前继电器冲击特性设计仍以实验与经验为指导,相关理论研究较少。文献[26]通过对继电器典型的平衡旋转式结构和耐环境性能指标的分析,结合试验数据和经验公式,设计了一种耐高冲击条件的小型密封直流电磁继电器,有一定的工程参考价值,但缺少深层的分析与理论依据,不具有普遍性。试验与数值仿真是当前对结构在冲击下动态特性进行工程分析的主要手段。以有限元法和有限差分法为主的数值分析方法,具有低成本、操作便捷和计算功能强大等特点,是进行工程结构冲击响应分析的首选。近年来,有限元软件如 MSC. Patran/Nastran, MSC. DYTRAN, ADINA, LS-DYNA3D, ABAQUS 和 COMSOL Multiphysics 等,在结构力学、冲击动力学、流体力学和爆炸力学等冲击响应研究领域中得到大量应用。文献[27]建立舰用框架断路器冲击系统的数学模型,对冲击载荷作用下框架断路器进行了有限元建模和动力学仿真,分析了施加不同方向冲击载荷和施加不同大小冲击载荷时框架断路器机构的位移、加速度、应力历程、能量变化等动态响应特性,为开关电器的设计与研究开辟了新思路和方法。舰船受水下爆炸影响是冲击响应研究的热点问题,文献[28]应用 LS-DYNA3D 有限元程序,对舰船在水下爆炸载荷作用下的动态响应进行了

研究,给出了流体网格尺寸、流体边界形状、自由表面尺度等一些重要参数对计算结果的影响。文献[29—31]运用多材料 Eulerian 方法和耦合的 Lagrangian—Eulerian 有限元法对舰船结构的动响应和破坏程度进行了研究,采用正交异性壳单元模拟加筋板结构,分析了船体在受水下爆炸冲击时的破坏数据。对于其他机械结构在冲击载荷下的可靠性研究方面,文献[32—34]从仿真和试验两方面对冲击载荷作用下的机床和连接件等机械结构的可靠性的研究,提出了检验冲击可靠性的合理判据。以上研究皆采用了有限元软件分析机械结构在冲击下的位移、速度和能量等响应量的时间历程,其分析对象与航天继电器存在一定的相似性,其分析方法和结论有一定的参考价值。

1.3.3 结构优化设计技术

结构优化设计就是将工程设计问题转化为最优化问题,利用数学规划方法、电子计算机的高速运算能力和逻辑判断能力,从可行的设计方案中按照预定的目标自动寻找最优的设计方案。结构形式包括尺寸、形状和拓扑等信息,对于试图产生超出设计者经验的有效新型结构来说,优化是一种很有价值的工具。优化的目标通常是求解某方面特征达到最值(例如质量最小、刚度最大或体积最小等)的结构,同时必须满足一定的约束条件,以获得最佳的静力或动力等形态特征。显然,结构优化设计的结果可以有效地缩短产品的设计周期,降低材料消耗,减轻结构自重并最大限度地提高产品的性能和质量。

结构优化设计方法从麦克斯韦(Maxwell)理论和 Michell 桁架出现至今已有一百年,现在优化问题的求解方法大致可以分为三类:最优准则法、仿生学算法和数学规划法。

结构优化的准则法有满应力准则法、能量准则法和演化结构优化算法等,是一种根据工程经验、力学概念以及数学规划的最优性条件,通过预先建立某种准则,通过相应的迭代方法,获得满足这一准则的设计方案(解)的方法。在早期的结构优化中,大多按工程经验与直觉来提出准则,如等强度设计准则、同步失效准则和满应力准则等。在准则法中,目标函数并不突出,只是强调寻求一个满足某种准则的设计即为最优设计,对大量设计变量和少量约束的问题具有较高的优化效率,特别适合工程应用。但对于多约束问题,由于要依次引入相应约束的拉格朗日(Lagrange)乘子,每个 Lagrange 乘子要采用不同的准则,此时优化求解效率将大大降低,有时不能收敛到局部最优解,或者不收敛,这些都阻碍了其更广泛的应用。

仿生学算法主要有遗传算法、模拟退火算法、蚁群优化算法和粒子群优化算法等,一般不需要复杂的数学计算。仿生学算法得到的解不能保证是问题的全局最优解,但一般能逼近全局最优解。以上仿生优化方法不需要计算导数信息,所以优化求解的效率很低,另外基于启发式和仿生学原理的优化算法一般应用于无约束或者简单边界约束的优化命题,而对于存在较多复杂等式约束和不等式约束的优化命题十分困难。

数学规划法是将优化问题抽象成数学规划形式来求解的方法,结构优化设计通常可表述为

$$\begin{aligned}
 & \min f(\mathbf{X}) \\
 & \text{s. t. } g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (j=1,2,\cdots,m) \\
 & h_k(\mathbf{X})=0 \quad (k=m+1,m+2,\cdots,p)
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

式中 $\mathbf{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T$ ——设计变量;

$f(\mathbf{X})$ ——目标函数;

$g_i(\mathbf{X})$ ——不等式约束;

$h_k(\mathbf{X})$ ——等式约束。

当前用于式(1.1)的最优问题的算法主要有序列线性规划法(SLP)、序列二次规划法(SQP)、序列凸规划法(SCP)和序列增广拉格朗日法(SAL)。其中 SQP 是目前应用最为广泛、最为有效的非线性优化算法,其强大的非线性处理性能和良好的稳定性在处理中小规模优化命题中得到广泛认可。该算法本质上是一种迭代算法,其基本思想是在给定的近似点处通过二次近似逐渐得到一个更好的迭代点,这需要通过求解一个二次规划(Quadratic Programming, QP)子问题得到。在当前迭代点处算法通过求解一系列的二次规划子问题,使得迭代点逐步接近原优化命题的最优点,算法最终收敛到最优解。序列二次规划算法与序列线性规划算法的主要区别在于,该方法对原问题的近似表达式中包含有二阶导数信息,所以对于原问题的近似更加精确,并可望得到快速收敛性能,如超线性收敛性能。随着计算机技术的高速发展, SQP 已被 ANSYS, iSIGHT 和 I-deas 等多个商业软件所集成,并与有限元方法相结合应用于发动机叶片、承重支架和大型水坝结构等多种优化任务,但 SQP 在与有限元结合应用上仍存在以下缺点:

(1)当几何形状改变时,重新定义有限元网格较为困难。

(2)形状优化设计的敏度信息仅与边界有关,而用有限元法需将内部节点的信息外推至边界节点。

目前先进的优化设计方法并没有在我国的电器行业普及,多数产品的设计和改造仍然是以数据表格、设计人员经验以及一些经验公式为基础,对产品进行类似“修改参数—试验—修改参数”的尝试法进行优化。这样的研发模式不但要求经验丰富的设计人员,而且不利于缩减成本和缩短产品的研发周期。该问题已经得到广泛的重视,文献[52—58]通过理论推导、有限元仿真和试验等方式对断路器、接触器和继电器的电磁系统及动态性能进行研究,给出了部分材料、尺寸及结构变量对产品性能的影响规律,并基于此进行优化。这种方法对于简单优化对象有较好的效果,但是通过有限次的分析计算并不能获得产品参数最优的尺寸组合。文献[59—60]对开关电器的执行机构建立等效力学模型,采用蚁群和遗传算法对运动方程进行优化得到最优结构参数,但由于采用了简化的模型,其优化结果精度较低。另外,仿生物算法虽简单,但计算时间过长,不适用于大运算量的目标函数求解。