

炮载精密电子设备振动影响 评估理论与试验方法

任国全 李冬伟 王怀光 范红波 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

炮载精密电子设备振动影响 评估理论与试验方法

任国全 李冬伟 王怀光 范红波 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

炮载精密电子设备振动影响评估理论与试验方法 /
任国全等著. —北京:国防工业出版社, 2016. 6
ISBN 978 - 7 - 118 - 11065 - 4

I. ①炮… II. ①任… III. ①火炮—电子设备—
振动影响—评估 ②火炮—电子设备—振动试验—
试验方法 IV. ①TJ303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 211843 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 10½ 字数 195 千字
2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

现代自行火炮已成为集机、电、液、光、磁于一体的复杂武器系统,射程远、精度高、机动性强、信息化程度高成为这类装备的显著特点,但是随着火炮威力的增大,射击过程中的强烈冲击与二次振动效应越来越明显,这将严重影响各种炮载精密仪器设备(如初速雷达、火控计算机、定位定向导航系统、激光测距直瞄镜等)的正常工作,甚至导致其损伤失效。火炮射击工况下的振动冲击环境因炮种、弹种、射击条件、火炮部位的不同而不同。一般情况下炮身,尤其是炮口装置、反后坐装置、摇架、托架、供输弹系统的加速度幅值较大,牵引火炮的大架、自行火炮的车体部分加速度幅值则较小。例如,某大口径火炮射击时炮口横向振动冲击加速度幅值在 $800 \sim 1200g$,身管管壁弹性应力波频率可达 $40kHz$,身管后坐加速度幅值为 $300 \sim 500g$,频率范围为 $0 \sim 3kHz$;反后坐装置、摇架、托架、炮塔、供输弹系统加速度幅值为 $100 \sim 300g$,频率主要分布在 $0 \sim 1kHz$ 。射击振动冲击的时域信号呈现为多次复杂振荡衰减波形。

火炮射击时的强振动与大冲击会严重影响这些光、机、电集成炮载设备的工作性能,降低其使用寿命。靶场试验中,某大口径自行加榴炮经过45发连续射击后,其初速雷达的红外误启动故障率增加了2倍;某新型榴弹炮定型试验中,惯导系统因直接安装在摇架上,射击大冲击曾导致里程计出现较大幅度不确定漂移;某车载加榴炮的火控终端曾因线缆连接固定不合适导致射击时出现黑屏,瞄准手操纵台也因母板应力条件导致射击时短时失灵。另外,新型武器装备的靶场定型试验,不仅需要考核射击时大载荷振动与过载冲击对武器装备中精密设备、仪器工作性能的影响,同时要分析炮载精密设备、仪器因恶劣的振动与冲击环境导致的性能下降对整个武器系统战术技术性能指标的影响。

强烈的振动与冲击是火炮射击过程中不可避免的,为了减小其对炮载设备的影响,必须在全面、准确评估射击时振动与冲击对各类精密设备影响的基础上,制定科学、合理的振动环境考核试验方法,并选用高弹性、大阻尼材料进行合理、有效的缓冲隔振设计。其中包含三方面问题。其一,自行火炮射击属于复杂多体动力学问题,理论分析涉及多体系统动力学建模和非线性冲击响应计算两个难点,由于自由度数目巨大,非线性、时变性、变拓扑明显,导致只能采用数值近似方法求解,但受到仿真技术限制,使得理论分析大口径自行火炮射击振动冲击响应存在精度

不高、不稳定等问题。其二,现有的武器装备振动冲击环境试验方法与损伤评估理论,还不能满足对大口径火炮射击振动环境考核试验要求,影响了对炮载精密设备振动冲击损伤机理、损伤模式的评估。其三,现有减振材料选用及减振结构设计还不能满足大口径火炮连续射击对隔振缓冲性能指标的要求,比如常用的四点垂直弹性橡胶支承结构(炮长操纵显控台采用)对由于火炮低角度射击带来的水平向冲击隔振效果很差,根据靶场实弹射击试验测试结果,显控台上表面加速度振动峰值衰减率不到 15%。

本书是作者近年来从事精密设备振动分析与实验技术方面的科研学术工作经验及研究成果的总结,书中研究成果对于完善大口径履带式自行火炮射击动力学建模仿真方法、不同工况振动冲击载荷激励下炮塔精密仪器、设备位置处动态响应仿真计算理论,提高精密设备、仪器振动冲击效应的损伤评估与射击冲击下精密电子设备隔振缓冲系统设计技术水平均有明显的促进作用。同时,本书设计的炮载精密设备振动冲击效应损伤实验评估软硬件系统,为未来新型大口径自行火炮靶场定型试验中对于精密设备的环境考核试验提供了重要的技术支持,具有重要的工程应用价值。

本书在系统介绍精密电子设备冲击振动响应分析评估的基础上,以某型大口径履带式自行火炮火控计算机为主要研究对象,针对以下六个问题展开研究。

1. 自行火炮电子设备动力学建模与射击冲击振动响应分析

本章基于多体动力学理论、接触理论、发射动力学等理论,主要以某履带式自行火炮为对象,考虑射击时火力系统、炮塔系统、底盘系统各零件的接触作用关系模型,建立其发射动力学 Adams 虚拟样机模型;最后通过底盘系统、反后坐装置等与试验数据的定性、定量比对,验证了仿真模型与实际自行火炮射击过程的相近度。在此基础上,对不同射角、不同射向条件下自行火炮射击动力学进行了仿真分析,建立了炮载精密电子设备的射击振动响应随射角及射向变化响应谱曲线。

2. 火炮射击试验电子设备冲击振动测试系统设计

本书设计了火炮射击冲击振动响应专用测试系统。利用 DSP 模块化设计、网络技术与多线程编程技术,开发了无线多路振动信号采集分析软硬件系统,可实现多路振动加速度、速度、应力等物理量的无线、有线实时采集、触发采集与分析处理,可在强振动、大冲击环境下工作。利用嵌入式设计、稀土永磁等技术,设计了磁性粘贴式火炮后坐冲击响应记录仪,具有传感器炮尾任意位置安装、冲击峰值自动捕捉、冲击响应远程监控等功能。利用设计的测试系统对某型履带式自行火炮进行了实弹射击冲击振动响应试验,从加速度响应幅值、频带角度验证了实测数据与仿真数据的吻合程度,为炮载电子设备振动损伤分析提供数据支持。

3. 典型炮载电子设备元器件射击冲击振动有限元分析

本书以某型履带式自行火炮火控计算机为对象,首先利用 Ansys 建立火控计

算机箱有限元模型,基于此,建立带有弹性支承装置的火控计算机 Adams 刚体动力学仿真模型,分析在火控计算机受到射击冲击激励后,机箱多自由度振动响应,并与实测数据比对,验证弹性装置弹性阻尼参数的有效性;对火控计算机四种插接印制电路板(PCB)进行模态仿真,预估各电路板受到冲击激励作用于板中心位置关键元器件受到的瞬态应变响应,为损伤评估提供动态变形数据。

4. 炮载精密电子设备冲击振动损伤机理分析

本书对射击冲击振动激励下因过载冲击、应力集中、变形过大、反复作用等动态影响,火控计算机类精密电子设备易出现的插接电路板弹出、BGA 焊点松脱、DIP 引脚断裂、焊盘引线疲劳等损伤失效机理进行数值分析、有限元仿真、台架试验与显微观测等研究,寻找上述三种损伤形式在射击振动冲击环境下的衍生规律、薄弱环节与影响因素,为炮载电子设备抗振缓冲优化设计提供参考依据。

5. 炮载电子设备冲击振动损伤评估软件设计

基于已有理论,本书设计了炮载精密电子设备冲击振动损伤分析评估软件系统,可实现:分析评估不同安装位置条件炮载电子设备对火炮射击冲击振动响应传递特性的影响;分析评估不同固定支撑装置在火炮射击、越野行驶过程中弹性阻尼特性与减振缓冲性能;通过电路板和元器件的应变测试,分析评估电子设备中关键元器件的振动冲击损伤程度。

6. 炮载精密电子设备隔振抗振设计

本书分别对电子设备整机级、PCB 组件级及器件级三个层次进行隔振及抗振设计研究。对整机隔振,通过建立隔振系统物理模型,得到系统固有频率与隔振器刚度之间的解析关系与虚拟样机模型;对 PCB 抗振设计,从材料特性、安装方式和元器件布局对固有频率的影响进行了探讨,探讨了提高电路板固有频率的有效方法;对器件级抗振,通过对不同直径和高度焊点的研究发现,大直径低高度焊点抗振性能较好,而对引脚分析表明,可通过改变引脚尺寸来调整器件固有频率,以达到抗振要求。

本书对炮载精密电子设备射击振动冲击效应评估实验方面的研究成果在兵器工程、装备试验、电子技术、精密制造等国防工业领域有着广阔的应用前景。作者期望本书的出版对我国在该领域及相关学科的研究和应用能尽微薄之力。

本书由任国全、李冬伟等合作完成,任国全负责第1、3、5章,李冬伟负责第2、4章,王怀光负责第6、7章,范红波负责第8章,全书由任国全定稿。课题组中李本、矫英琪、吴守军、姜文韬等研究生做了部分公式推导、数值仿真、试验系统搭建等研究工作以及文字、图形处理和校稿工作,在此一并表示感谢。书中部分测试数据取自国家兵器试验中心,为此向郑鹏翱、张亚欧等靶场试验技术工作者表示由衷的感谢。军械工程学院马吉胜教授、张培林教授和张英堂教授在百忙之中审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。另外,写作过程中参考了大量国内外相关

书籍和文献,特向这些作者们致以诚挚的谢意。

本书出版工作得到国防工业出版社的大力支持与帮助,同时,感谢总装备部武器装备试验技术研究项目对本书研究工作的资助。

限于作者知识水平和经验,书中的不足和疏漏在所难免,恳请广大专家和读者不吝赐教。

作者
2016年3月

内 容 简 介

本书针对火炮射击产生的强振动与大冲击对炮载精密电子设备工作性能、使用寿命造成严重影响的现实,系统阐述了大口径履带式自行火炮射击动力学理论、炮塔精密电子设备动态响应分析方法以及振动冲击损伤效应试验评估测试系统设计方法等研究成果。全书共8章。第1章介绍精密电子设备振动冲击效应分析理论与方法的基本概念、国内外研究现状与应用情况。第2章针对某型自行火炮火控计算机安装结构特点,分析了炮载电子设备动力学建模流程与射击冲击振动响应变化规律。第3章介绍了火炮射击冲击振动测试系统的设计方法,并进行了多型自行火炮电子设备射击振动对比试验。第4章系统研究了某型火控计算机内部器件振动冲击的有限元分析方法,并给出典型振动激励下的作用结果。第5章结合已获得的炮载电子设备动力学特性,分别对插接板卡件、BGA(Ball Grid Array)焊点、DIP(Double In-line Package)引脚三种典型对象在振动冲击载荷下的失效机理进行了理论分析与实验研究。第6章介绍了炮载电子设备冲击振动损伤评估软件的设计方法、功能特点及架构组成。第7章针对射击振动与冲击对精密电子设备性能产生的严重影响,从三方面对电子设备隔振抗振系统设计进行了分析,提出了相应的加固技术方案。第8章全书总结。

本书内容丰富,深入浅出,既有理论分析又有仿真实验,研究成果可广泛应用于兵器工程、国防军工、精密测量、精密制造等领域中的电子设备振动控制与减振降噪。本书既可作为高等院校有关专业高年级学生、研究生和教师的参考用书,也可供在该领域从事研究与实践的工程技术人员参考。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本书研究的必要性和意义	1
1.2 火炮发射动力学理论研究现状	3
1.2.1 国外研究概况	3
1.2.2 国内研究概况	4
1.3 电子设备动力学特性理论研究现状	4
1.3.1 国外研究概况	4
1.3.2 国内发展现状	5
1.4 电子设备振动损伤分析基本原理	6
1.4.1 损伤机理	6
1.4.2 损伤模式	7
1.5 振动结构有限元基本理论及方法	7
1.5.1 弹性力学基本方程	7
1.5.2 有限元分析方法	10
1.6 振动冲击对精密电子设备影响试验考核研究现状	11
1.7 本书主要工作	12
第 2 章 自行火炮电子设备动力学建模与射击振动响应仿真分析	14
2.1 自行火炮发射动力学基础理论	14
2.1.1 基本假设	14
2.1.2 火炮身管刚柔耦合动力学模型	15
2.1.3 火力部分力学模型	17
2.1.4 底盘系统动力学模型	20
2.2 全炮虚拟样机模型的建立	23
2.2.1 实体模型建立	23
2.2.2 全炮拓扑关系	24
2.2.3 ADAMS 中履带式底盘建模方案	24
2.2.4 某型自行火炮多体动力学模型的建立	26
2.3 虚拟样机模型的验证	27

2.3.1	定性验证	27
2.3.2	定量验证	28
2.4	炮载设备射击动力学响应仿真分析	30
2.4.1	某一工况下的算例分析	30
2.4.2	射角响应谱分析	32
2.4.3	射向响应谱分析	36
2.5	炮载设备射击冲击振动响应仿真模型验证	39
2.6	小结	41
第3章	电子设备冲击振动测试系统设计与试验	42
3.1	火炮射击试验对振动冲击测试设备提出的要求	42
3.1.1	射击冲击测试传感器动态特性的特殊要求	42
3.1.2	多路动态信号的现场实时运算与处理要求	43
3.1.3	实弹射击的安全性要求	44
3.2	炮载精密设备多路振动冲击响应测试仪的开发	44
3.2.1	系统硬件设计	44
3.2.2	系统软件设计	52
3.3	火炮射击后坐冲击响应专用测试仪的开发	53
3.4	大口径自行火炮电子设备射击冲击振动试验	57
3.4.1	试验目的及内容	57
3.4.2	射击试验注意事项	57
3.4.3	火炮实弹射击条件下炮载设备冲击振动测试	58
3.5	小结	63
第4章	典型炮载电子设备射击冲击振动有限元分析	64
4.1	引言	64
4.2	火控计算机机箱动力学分析	64
4.2.1	火控计算机机箱整体动力学分析	64
4.2.2	火控计算机机箱模态分析	69
4.2.3	火控计算机射击振动响应仿真分析	73
4.3	PCB 动力学仿真分析	76
4.3.1	物理模型的建立	77
4.3.2	动力学仿真	78
4.3.3	电路板模态分析实验	86
4.4	小结	97
第5章	炮载精密电子设备冲击振动损伤机理分析	98
5.1	插接件弹出损伤分析	98

5.1.1	有限元建模	99
5.1.2	边界条件、接触及载荷定义	99
5.1.3	结果分析	101
5.1.4	振动冲击试验	104
5.2	BGA 焊点失效分析	106
5.2.1	有限元建模	106
5.2.2	边界条件及载荷条件的定义	107
5.2.3	仿真结果分析	108
5.2.4	实验验证	111
5.3	DIP 引脚失效分析	114
5.3.1	物理模型的建立	114
5.3.2	有限元仿真分析	117
5.3.3	试验分析	118
5.4	电子元件振动疲劳失效分析	120
5.4.1	电子设备振动疲劳分析基本理论	121
5.4.2	基于力学仿真的全寿命随机振动疲劳寿命分析	122
5.4.3	电子器件疲劳寿命试验	123
5.4.4	引脚断裂的疲劳寿命估算	125
5.5	小结	126
第6章	炮载电子设备冲击振动损伤评估系统设计	127
6.1	引言	127
6.2	炮载精密电子设备安装位置对射击冲击振动效应影响评估原理	127
6.3	炮载电子设备支承装置弹性阻尼特性评估原理	129
6.4	精密电子设备内部元器件振动冲击损伤效应评估原理	130
6.5	系统组成与功能	132
6.6	系统软件界面	133
6.7	小结	138
第7章	炮载精密电子设备隔振抗振设计	139
7.1	引言	139
7.2	整机级隔振设计	139
7.2.1	物理模型的建立	139
7.2.2	虚拟平台的建立	141
7.2.3	仿真结果分析	141
7.2.4	隔振器的选择与布局	144
7.3	PCB 组件级抗振设计	145

7.3.1	材料特性	145
7.3.2	安装方式	146
7.3.3	元器件布局	146
7.4	器件级抗振设计	147
7.4.1	焊点直径设计	147
7.4.2	焊点高度设计	148
7.4.3	引脚设计	148
7.5	综合设计	150
7.6	小结	150
第8章	总结和展望	151
8.1	主要研究内容及创新点	151
8.2	进一步工作的方向	152
参考文献		153

第 1 章 绪 论

1.1 本书研究的必要性和意义

现代自行火炮已成为集机、电、液、光、磁于一体的复杂武器系统,射程远、精度高、机动性强、信息化程度高成为这类装备的显著特点,但是随着火炮威力的增大,射击过程中的强烈冲击与二次振动效应越来越明显,这将严重影响各种炮载精密仪器设备(如初速雷达、火控计算机、定位定向导航系统、激光测距直瞄镜等)的正常工作,甚至导致其损伤失效。火炮射击工况下的振动冲击环境因炮种、弹种、射击条件、火炮部位的不同而不同。一般情况下炮身,尤其是炮口装置、反后坐装置、摇架、托架、供输弹系统的加速度幅值较大,牵引火炮的大架、自行火炮的车体部分加速度幅值则较小。例如,某型大口径自行火炮射击时炮口横向振动冲击加速度幅值为 $800 \sim 1200g$,身管管壁弹性应力波频率可达 $40kHz$,身管后坐加速度幅值为 $300 \sim 500g$,频率范围为 $0 \sim 3kHz$;反后坐装置、摇架、托架、炮塔、供输弹系统加速度幅值为 $100 \sim 300g$,频率主要分布在 $0 \sim 1kHz$ 。射击振动冲击的时域信号呈现为多次复杂振荡衰减波形。表 1-1 是某大口径自行火炮某种状态射击时各炮载仪器安装部位的振动冲击环境。

表 1-1 炮塔内部各种炮载仪器安装部位的振动冲击环境

测点部位	加速度幅值/ g	主要频率分布/ Hz	装药条件	射角/ $(^{\circ})$
寻北仪基座上下方向	113	3 ~ 5, 32 ~ 34, 71 ~ 74	强装药	0
火控操作台上下方向	9	3 ~ 4, 31 ~ 33, 70 ~ 73	强装药	0
火控计算机上下方向	39	3 ~ 4, 30 ~ 31, 69 ~ 72	强装药	0
姿态角传感器上下方向	8	1 ~ 2, 31 ~ 34, 73 ~ 75	强装药	30
航向保持器上下方向	3	2 ~ 3, 31 ~ 32	全装药	30
计算机显示器上下方向	24	3 ~ 5, 32 ~ 34, 66 ~ 67	全装药	30
协调器上下方向	19	3 ~ 4, 28 ~ 32, 60 ~ 63	弹装药	63
弹架本体上下方向	5	1 ~ 3, 28 ~ 30	全装药	50
推弹机支架上下方向	9	30 ~ 35	输弹工况	—

火炮射击时的强振动与大冲击会严重影响这些光、机、电集成炮载设备的工作性能,降低其使用寿命。靶场试验中,某型履带式自行火炮经过 45 发连续射击后,

其初速雷达的红外误启动故障率增加了2倍;某型轮式榴弹炮定型试验中,惯导系统因直接安装在摇架上,射击大冲击曾导致里程计出现较大幅度不确定漂移;某车载榴弹炮的火控终端曾因线缆连接固定不合适导致射击时出现黑屏,瞄准手操纵台也因母板应力条件导致射击时短时失灵。

另外,新型武器装备的靶场定型试验,不仅需要考核射击时大载荷振动与过载冲击对武器装备中精密设备、仪器工作性能的影响,同时要分析炮载精密设备、仪器因恶劣的振动与冲击环境导致的性能下降对整个武器系统战术技术性能指标的影响。

强烈的振动与冲击是火炮射击过程中不可避免的,为了减小其对炮载设备的影响,必须在全面、准确评估射击时振动与冲击对各类精密设备影响的基础上,制定科学、合理的振动环境考核试验方法,并选用高弹性、大阻尼材料进行合理、有效的缓冲隔振设计。其中包含三方面问题。其一,自行火炮射击属于一类复杂多体动力学问题,理论分析涉及多体系统动力学建模和非线性冲击响应计算两个难点,由于自由度数目巨大,非线性、时变性、变拓扑明显,导致只能采用数值近似方法求解,但受到仿真技术限制,使得理论分析大口径自行火炮射击振动冲击响应存在精度不高、不稳定等问题。其二,现有的武器装备振动冲击环境试验方法与损伤评估理论,还不能满足对大口径火炮射击振动环境考核试验要求,影响了对炮载精密设备振动冲击损伤机理、损伤模式的评估。其三,现有减振材料选用及减振结构设计还不能满足大口径火炮连续射击对隔振缓冲性能指标的要求,比如常用的四点垂直弹性橡胶支承结构(炮长操纵显控台采用)对由于火炮低角度射击带来的水平向冲击隔振效果很差,根据靶场实弹射击试验测试结果,显控台上表面加速度振动峰值衰减率不到15%,同时,自行火炮目前常用的橡胶材料制造的减振缓冲装置由于自身固有理化特性、力学特性的限制,恶劣环境适应性较低,难以满足大冲击载荷、持续宽频激励、宽温域变化、强油污腐蚀等实际环境条件对大口径自行火炮中精密设备隔振缓冲装置提出的苛刻要求。

强烈的振动与冲击是火炮射击过程中不可避免的。为了减小其对炮载电子设备的影响,必须在全面、准确评估射击时振动与冲击对各类电子设备影响的基础上,制定科学、合理的振动环境考核试验方法。通过选用适当的材料,采取对应的措施,进行合理、有效的隔振抗振设计,以提高电子设备的使用可靠性。

本书主要以某型大口径自行榴弹炮的火控计算机和惯导系统方位保持仪为对象,首先利用刚柔耦合多体理论建立大口径自行火炮动力学仿真模型,再采用非线性有限元法计算不同工况下火炮射击时炮塔的振动冲击响应,同时,结合实测炮击时精密设备振动冲击试验数据,对理论模型参数进行修正,建立完整的炮塔结构振动冲击响应谱。基于此,借助数值仿真和实验室振动冲击试验,确定精密设备在冲击振动环境中的损伤特征、损伤模式及损伤阈值,再根据射击时整个炮塔的振动冲

击响应分布,结合其他类型精密设备的结构特点和性能要求,分析其振动冲击损坏模式及评判准则。最后选用新型金属橡胶材料作为炮载精密仪器、设备的主支承材料,设计相应的火控计算机和方位保持仪减振缓冲结构,在数值仿真和原理样机台架试验的基础上,优化火炮射击时振动冲击载荷作用下金属橡胶支承结构的隔振缓冲特性,同时,结合靶场实弹射击试验验证上述理论和方法的正确性以及金属橡胶减振缓冲结构的可行性。

本书研究成果对完善火炮发射动力学理论、炮载电子设备振动冲击损伤效应评估技术和炮载电子设备的抗振设计将产生促进作用;同时,为促进炮载电子设备冲击振动模拟实验的规范化,全面考核武器装备战术技术指标和完善靶场试验技术方法提供理论和技术支持,并对提高大口径自行火炮炮载电子设备的可靠性和环境适应性具有重要的工程参考价值。

1.2 火炮发射动力学理论研究现状

弹丸发射过程一般是指射击类武器从击发底火开始到弹丸后效期结束这一运动过程。由于自行火炮系统结构非常复杂,加之发射过程伴随着高温、高压、高速、瞬态、多体、突变等恶劣环境,使得研究火炮在发射过程中的运动规律十分困难^[1]。随着力学和数值方法的发展,为研究火炮发射过程中各零部件的动态特性提供了有效手段,已经应用到了火炮领域多个研究方向。

1.2.1 国外研究概况

国外对火炮发射动力学进行了大量的研究,美陆军司令部截至 2001 年每隔两三年就会召开一次火炮动力学会议,并且设置专门的研究机构开展研究^[2-4]。欧洲每年召开的仿真学术会议,其中就有大量关于火炮动力学方面的理论运用成果^[5-10]。J. C. Hokanson 和 P. A. Cox 等^[11]以坦克炮身管为研究对象,利用二维梁建立了身管的动力学模型,并且利用该模型分析了该坦克炮身管的水平横向运动、垂直横向运动以及扭转运动。T. Soifer Martin 等^[12]采用有限元方法,对某型火炮的物理模型进行仿真模拟,得到了炮口位移、速度及加速度的仿真结果。H. J. Sneek^[13]采用有限段法模拟身管的柔性,并通过调整身管段的自由度以及其间的扭簧刚度,使其与身管的基频相符合。Hopkins^[14]利用三维单元构成动态有限元模型,通过研究该有限元模型的力学特性来研究武器系统的动力学特性。美国通用动力公司建立了塔式格特林自动炮的多体系统动力学模型,并研究了其动力学特性,该模型包含了柔性炮护罩、柔性转管和非线性后坐缓冲装置等要素^[15]。Donald 等^[16]对弹丸通过抽气装置时所产生的激扰进行了仿真,并且认为炮口截面的变化是产生激扰的主要原因。日本的松下义宜^[17]就履带式车辆的操纵性能进行了分析,建立了用于性能预测的动力学模型,并对车体进行了量化分析,为了验

证模型的正确性,将分析结果和野外道路试验数据进行对比,取得了较为满意的结果。

1.2.2 国内研究概况

国内对火炮动力学的研究起步于 19 世纪 80 年代,在相关部门的高度重视以及工程技术人员的努力下得到了快速的发展。毕世华^[18]采用 Kane - Huston 方法建立了在连续射击作用下自行火炮的多刚体系统动力学模型。杨国来^[19]基于多柔体系统动力学理论,建立了考虑身管弹性变形的自行火炮发射动力学模型。马吉胜^[20]建立了某高炮 26 自由度的发射动力学模型,并采用子系统迭代方法得到了运动微分方程的收敛解。楚志远^[21-22]基于非线性有限元法的基本理论,建立了自行火炮非线性结构动力学方程,并且对该方程的各种解法进行了探讨。刘雷^[23]通过考虑摇架刚性、身管弹性以及高低机齿轮齿弧的接触与碰撞,利用有限段法和接触模型建立了弹丸与身管之间相耦合的动力学模型。王德石^[24]利用多体系统动力学理论,对所建立的火炮多体系统进行振动特性的计算。葛建立和蔡文勇^[25-26]考虑身管自重弯曲的情况下弹丸与身管的耦合作用,建立了车载火炮的多柔体系统动力学模型。闵建平、曾晋春、李刚等^[27-29]基于多柔体系统动力学理论,借助工程软件分别建立了自行火炮、车载火炮及炮塔的动力学模型,对发射过程进行了仿真模拟计算。芮筱亭^[30]在《多体系统传递矩阵法及其应用》一书中对多体系统传递矩阵法及其理论体系进行了系统的阐述,建立了多体系统传递矩阵库,进而解决了多柔体系统特征矢量正交性难题,建立了基于传递矩阵法的火炮系统发射动力学理论及仿真系统。国内对火炮发射动力学的研究至今,关于非线性有限元方法在其中的运用还不是十分成熟,仍有深入研究的必要。许多研究人员基于有限元方法在火炮动力学领域所取得的成果^[31-39]将会推动其在火炮研究方面的运用。

1.3 电子设备动力学特性理论研究现状

目前,随着电子设备性能的不断提高,为了扩展其用途并根据特定需要将电子设备安装到了不同的载体上(如车辆、飞机)。载体的运动必然会使得电子设备处于不同严酷程度的振动与冲击环境中。长期处于这类环境下的电子设备将会出现不同程度的损伤和破坏,进而导致其工作性能的下降甚至完全不能工作。为了保证电子设备的使用可靠性,许多学者已经通过理论分析、仿真分析和试验分析等手段对电子设备的力学性能和可靠性进行研究,取得了很大进步。

1.3.1 国外研究概况

国外于 20 世纪就开始了对电子设备的动态性能分析和研究。Lunney 和 Crede 等^[40]于 1956 年结合试验数据对电子设备进行了振动方面的研究。Eshleman^[41]针对

电子设备在太空上所承受的振动与冲击,提出了一系列减振措施。1988年,Steinberg^[42]在《Vibration Analysis for Electronic Equipment》一书中,对电子元件、印制电路板(PCB)及电子机箱的力学特征进行了研究,被视为各类电子设备动态性能研究的理论支柱之一。

PCB大量存在于电子设备中,并且在振动冲击环境中容易损坏。但是,在振动与冲击条件下难以通过试验的手段测得PCB的应力和应变。随着有限元分析技术的进一步发展和成熟,通过有限元分析工具来对电子设备结构进行仿真分析已成为一种趋势。Engel、Lau、Barker等^[43-45]人均采用有限元分析方法,对PCB、表面贴装组件进行了有限元建模,并在模型上对其动力学特性进行了研究。在此基础上,Pitarresi^[46-47]不仅总结并提出了PCB有限元建模的五种方法,而且对电子元件在随机振动情况下的动态响应进行了分析,并通过建立的计算机主板模型对其进行仿真计算,从中发现基频是影响主板冲击响应的主要因素。

Taniguchi等^[48]借助于频闪观测仪,结合全息摄影技术和图形(像)处理技术准确绘制出电路板在冲击条件下的变形图。Yang等^[49]通过试验手段对PCB进行了模态分析,可用于验证有限元模型的准确性。Roizman^[50]针对电子设备安装方式对其振动响应的影响,对移动载体上的电子设备进行了相应的分析。Tee^[51]结合有限元方法和实验方法,建立了某型焊点的寿命模型,进而研究了引脚应力和冲击寿命二者之间的关系。Ong^[52]等人用试验的方法对手机中产品级和电路板级的焊点冲击响应特性进行了研究。Wang^[53]和Luana^[54]均利用有限元方法建立了PCB模型,并结合该模型进行了跌落环境下的数值模拟和试验分析,并且二者的结果基本相同。

1.3.2 国内发展现状

电子设备动力学在国内的研究起步较晚,水平也相对落后,但是工程技术人员在积极吸收国外研究成果的基础之上,也不断取得了新的突破。1981年,邱成涕^[55]系统地对电子设备结构的动力学响应理论进行了阐述,并介绍了振动与冲击对电子设备工作性能的影响及电子设备隔振缓冲的有效措施。1985年出版的文献^[56]系统地介绍了电子设备常见的机械环境以及振动与冲击的基础理论,并在电子设备抗振设计方面提出了相应的措施^[56]。谢坤、刘治虎等^[57,58]为了得到电子设备在随机振动和冲击作用下的响应结果,通过有限元方法进行了分析计算,为其合理布局和减振设计提供了依据。王锐^[59]为了保证舰载显控台的使用可靠性对其进行适当的加固,首先利用I-DEAS软件对其进行了模态分析。乔峰^[60]针对电子设备所承受的振动与冲击,以提高电子设备可靠性为目标,从结构设计和整体布局出发,提出了相应的隔振缓冲措施。王红芳^[61]在其硕士学位论文中,分别对电子设备的框架结构、PCB以及SMT(Surface Mounted Technology)焊点进行了有限元仿真和试验分析。司俊珊^[62]通过计算机仿真的手段,对建立的机载电子设备振动模型进行了加速度冲击载荷下的动力学响应分析。李朝旭^[63]通过对电路板和元