



电子装备机电耦合 理论、方法及应用



科学出版社

电子装备机电耦合 理论、方法及应用

段宝岩 著

科学出版社

北 京

作者简介

段宝岩, 1955 年生于河北省冀州市。1981、1984 与 1989 年在西安电子科技大学(前身为中国人民解放军军事电信工程学院、西北电讯工程学院)先后获工学学士、硕士与博士学位。1991—1994 年在英国利物浦大学做博士后研究,2000 年在美国康奈尔大学访问。现为西安电子科技大学电子机械学科教授。

长期从事电子机械工程的科研与工程实践工作,致力于电子装备机电耦合技术的研究与应用;系统建立了大型微波反射面天线结构位移场与电磁场的场耦合理论模型,提出了反射面保型的系统优化设计方法;针对雷达天线伺服系统结构因素对波束指向等电性能的影响,系统提出了结构与控制集成设计方法;建立了典型电子装备结构位移场、电磁场、温度场的场耦合理论模型,得出了机械结构因素对电性能的影响机理。上述成果已成功应用于探月工程、载人航天、深空探测及主力战舰等国家重大工程中。以第一完成人获国家科技进步二等奖 2 项,省部级科技进步一等奖 3 项。论文被 SCI、EI 分别检索 31、139 篇,著书 3 部,论著他引 986 (SCI 他引 136)次。以第一完成人申请国家发明专利 20 项,其中授权 9 项。

现为我国电子学会会士、电子学会电子机械工程分会主任、教育部科技委工程技术学部委员、总装备部卫星有效载荷及应用技术专业组成员、工业和信息化部电子科技委委员及英国 IET Fellow 等。任《电子机械工程》编委会主任,《计算力学学报》与《电子学报(英文版)》等学术刊物的编委。

曾被授予全国“五一”劳动奖章(2003)、全国师德先进个人(2004)、全国先进工作者(2005)、全国优秀科技工作者(2010)等称号。

序

当今,在国防、航空、航天及诸多国民经济领域,广泛应用了复杂的、精密的电子装备。设计这些电子装备,不但需要具备电子学的理论与知识,还需要有机械结构的丰富学识。机与电相互影响,相互耦合,二者的结合决定了电子装备的性能指标。近年来,国外提出了机电耦合的理论,迅速推动了电子装备设计与制造的发展。该书是我国电子机械领域第一部关于电子装备机电耦合的专著,开拓了我国电子装备新的研究领域,具有国际先进水平。

该书所提出的机电耦合理论模型,是通过某些典型电子装备体现的,包括反射面天线、平板裂缝阵天线、有源相控阵天线和高密度组装系统,推导了其各自的机电耦合公式,可直接用于典型对象的分析;提出的结构因素对电性能的影响机理,是通过大量的试验和样件测试得到的。因此,该书具有很高的工程实际应用价值。

该书的主要特点:一是内容广泛。电子装备部件种类繁多,该书涉及雷达与通信天线、信道系统、伺服系统、高密度组装等方面,体现了机电耦合理论的广泛适用性。二是理论与实际的紧密结合。该书以机电耦合理论和方法为主,通过大量的工程实际案例,说明耦合理论与方法的具体作用,并通过测试与评价,体现耦合理论与方法的实用价值。三是具有创新性。该书从电磁、机械结构、热、力等多个学科领域研究电子装备,分析诸学科之间的内在联系,思路新颖。

该书的作者是国内电子机械工程领域的知名专家,长期致力于电子装备机电耦合技术这一交叉学科的研究与设计,有着深厚的理论水平和丰富的工程实践经验,是 973 项目的首席科学家。

该书是对 973 项目“电子装备机电耦合基础问题研究”成果的总结与提升。相信该书的出版对从事电子装备设计、制造的工程技术人员,以及高等院校电子工程、机械工程专业及相关专业的师生会有很大的帮助。

张履谦

中国工程院院士

2011 年 4 月 26 日

前 言

复杂信息与电子装备是电磁、精密机械结构、传热等多学科相结合的系统,其电性能的成功实现不仅依赖于各学科领域的设计水平,更取决于多学科的有机结合,如机械结构不仅是电性能实现的载体和保障,且往往制约着电性能的实现。另外,电性能对机械结构也提出了更高的要求。所以,机、电相互联系、相互依存、相互影响、密不可分,尤其对高频段、高增益、高密度、小型化、快响应、高指向精度的复杂电子装备,机、电呈现出强耦合的特征。电子装备这种机、电之间的相互影响关系称为电子装备的机电耦合问题。

复杂电子装备传统的机、电分离设计,导致装备研制的性能低、周期长、成本高、结构笨重。这已经成为长期制约电子装备性能提高并影响下一代装备研制的一个发展瓶颈。因为传统的机、电分离设计是电设计人员根据电性能指标的要求,提出对机械结构设计的要求,结构设计人员的任务就是设法去满足这一要求。由于电设计人员对机械结构与制造的难度了解不够,同时为了给后面的电性能调试留出足够的空间,往往提出的精度很难实现,有时甚至超出了机械制造的能力。另一方面,因机械结构设计人员缺乏对电磁知识的了解和掌握,所以只能被动地千方百计去满足要求。这带来两个问题,一是按照精度要求制造的结构并不能保证百分之百地满足电性能,二是未达到精度要求的结构又时常满足电性能指标。这一状况已经存在了很长时间,未能得到根本解决。

可见,电子装备设计的关键是进行机电耦合问题的研究。具体包括:建立机械结构位移场、电磁场及温度场之间的场耦合理论模型,发掘机械结构因素对电性能的影响机理,提出机电耦合的测试方法、评价方法以及基于场耦合理论与影响机理的多学科优化设计方法,研制集电磁、结构、热于一体的综合设计软件平台,从根本上解决制约电子装备性能提高并影响下一代装备研制的这一长期悬而未决的瓶颈问题。

正是基于这一思想,作者从 20 世纪 80 年代初作硕士研究生开始,就一直从事电子机械工程的科研与工程实践工作,致力于交叉学科——电子装备机电耦合技术的研究与应用。之后,于 21 世纪初,在过去长期研究工作的基础上,进一步提出了“电子装备机电耦合基础问题研究”的 973 项目并获得立项。在由大学、研究所等单位技术人员组建的研究团队的共同努力下,取得了理论和技术上的实质性进展,研制了综合设计软件平台,在典型工程案例中得到了应用,取得了满意的结果。

本书内容是作者多年来在机电耦合方面科研工作的总结。在书稿准备过程

中,王从思、郑飞、黄进、陈光达、平丽浩及王勇等同志以不同方式提供了积极的帮助。书中第 4.5 节由黄进执笔完成初稿,第 5、6 章由陈光达执笔完成初稿,第 8 章由王从思执笔完成初稿。另外,本书还部分包括了其他同志的工作,如李鹏、宋立伟、保宏、王伟、周生怀、周金柱、马洪波、朱敏波、张福顺、焦永昌、郭先松、史峻冬、严志坚、熊长武、沈振芳等。在此特向他们表示衷心感谢。

作者还特别感谢以张履谦院士、张光义院士、张锡详院士为代表的 973 项目专家组的帮助,他们在项目的进行中给予了卓有成效的指导。

作者深切感谢导师叶尚辉教授,从 1982 年攻读硕士学位开始,就在叶教授的指导下学习、工作,对于恩师的指导与多方面的帮助,作者终生难忘。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

段宝岩

2011 年 3 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电子装备的定义与特点	3
1.2 电子装备的基本组成	5
1.2.1 电子装备的结构部分	5
1.2.2 电子装备的电气部分	6
1.3 电子装备机电耦合研究的现状与发展	6
1.3.1 电子装备机电耦合研究的国外现状	6
1.3.2 电子装备机电耦合研究的国内现状	7
1.3.3 电子装备的发展趋势	8
1.4 电子装备传统设计中存在的问题	9
1.4.1 电子装备的传统设计方法及存在问题	9
1.4.2 电子装备的机电耦合问题及解决方法	10
1.5 电子装备设计的关键科学与技术问题	11
1.5.1 电子装备系统设计的整体论	11
1.5.2 电子装备的机电耦合理论	11
1.5.3 电子装备的测试与评价方法	11
1.5.4 电子装备的环境防护与组装	12
1.5.5 特种电子装备	12
1.5.6 电子装备的机电耦合设计	13
参考文献	15
第 2 章 电子装备的机电热场耦合理论模型	19
2.1 电磁场、结构位移场、温度场、流场的场描述方程	19
2.1.1 电磁场	20
2.1.2 结构位移场	20
2.1.3 温度场	20
2.1.4 流场	21
2.2 各物理场之间的相互关系	21
2.3 多物理场耦合问题数学模型建立的思考	22

2.4	反射面天线机电两场耦合模型	24
2.4.1	主反射面变形的影响	25
2.4.2	馈源位置误差的影响	27
2.4.3	馈源指向误差的影响	28
2.4.4	机电两场耦合模型	29
2.4.5	双反射面天线	29
2.4.6	试验验证	30
2.5	平板裂缝天线机电两场耦合模型	33
2.5.1	辐射缝位置偏移的影响	34
2.5.2	辐射缝指向偏转的影响	35
2.5.3	缝腔变形对辐射缝电压的影响	35
2.5.4	机电两场耦合模型	36
2.5.5	试验验证	36
2.6	有源相控阵天线机电热三场耦合模型	39
2.6.1	辐射单元位置偏移的影响	41
2.6.2	辐射单元指向偏转的影响	42
2.6.3	温度对 T/R 组件电流幅度的影响	42
2.6.4	温度对 T/R 组件电流相位的影响	43
2.6.5	机电热三场耦合模型	43
2.7	高密度组装系统机电热三场耦合模型	44
2.7.1	接触缝隙的影响	44
2.7.2	散热孔和结构变形的影响	45
2.7.3	机电热三场耦合模型	46
2.7.4	试验验证	46
	参考文献	56
第3章	机电热场耦合问题的求解策略与方法	58
3.1	多物理场耦合问题的求解策略	58
3.2	多物理场耦合问题的求解方法	59
3.3	多物理场网格匹配的一般方法	60
3.4	机电两场之间的网格转换与信息传递	62
3.5	机电热三场之间的网格转换与信息传递	64
3.5.1	变形信息的传递	64
3.5.2	变形网格的提取	65
	参考文献	68

第 4 章 机械结构因素对天馈系统性能的影响	70
4.1 结构因素对电性能影响的数据挖掘方法	70
4.1.1 数据建模方法	71
4.1.2 数据样本的获取	72
4.1.3 数据挖掘的多核回归方法	74
4.1.4 数据挖掘的应用	76
4.2 反射面天线结构因素对电性能的影响	82
4.2.1 数据收集与挖掘	82
4.2.2 影响机理分析模型的建立	82
4.2.3 试验验证	85
4.3 平板裂缝天线结构因素对电性能的影响	87
4.3.1 结构因素和电性能的层次化关系模型	87
4.3.2 辐射功能构成件中结构因素对单元幅相的影响	88
4.3.3 耦合功能构成件中结构因素对单元幅相的影响	93
4.3.4 激励功能构成件中结构因素对驻波的影响	98
4.3.5 样件制作与试验验证	100
4.4 微波馈线与滤波器结构因素对电性能的影响	102
4.4.1 结构因素对谐振腔滤波器影响的层次化关系模型	102
4.4.2 结构因素对谐振腔无载 Q 值的影响	103
4.4.3 结构因素对耦合系数的影响	112
4.4.4 调谐螺钉对谐振频率和耦合系数的影响	115
4.4.5 结构因素对微波滤波器功率容量的影响	116
4.4.6 样件制作与试验验证	119
4.5 雷达天线伺服系统结构因素对系统性能的影响	120
4.5.1 间隙对伺服系统性能的影响	120
4.5.2 摩擦对伺服系统性能的影响	124
4.5.3 伺服试验台的研制与试验验证	126
参考文献	129
第 5 章 电子装备机电耦合的测试技术	131
5.1 机电耦合测试因素分析	131
5.1.1 客观耦合度计算方法——数据包络分析方法	131
5.1.2 主观耦合度计算方法——主观评分方法	133
5.1.3 主、客观耦合度/权重的综合	133
5.2 典型案例机电耦合的测试技术	134
5.2.1 平板裂缝天线测试技术	134

5.2.2 三维天线座测试技术	139
5.2.3 电调双工滤波器测试技术	143
5.3 典型案例机电耦合综合测试系统	147
5.3.1 平板裂缝天线综合测试平台	147
5.3.2 三维天线座综合测试平台	148
5.3.3 电调双工滤波器综合测试平台	148
参考文献	150
第6章 电子装备机电耦合的评价方法	151
6.1 耦合理论和影响机理的正确性验证	151
6.1.1 模糊-灰色综合检验方法	151
6.1.2 吻合度	155
6.2 耦合理论与影响机理的有效性评价	156
6.3 某平板裂缝天线应用的评价	158
6.4 某机载雷达三维天线座应用的评价	160
6.5 某电调双工滤波器应用的评价	162
参考文献	164
第7章 基于机电耦合理论模型的机电耦合优化设计	166
7.1 反射面天线机电耦合优化设计	166
7.1.1 机电耦合优化设计的数学描述	166
7.1.2 数值仿真与工程应用	166
7.2 高密度机箱机电热耦合优化设计	170
7.2.1 机电热耦合优化设计的数学描述	170
7.2.2 某实际机箱的优化设计	171
7.3 雷达天线伺服系统结构与控制集成优化设计	174
7.3.1 伺服系统结构分系统设计方法	174
7.3.2 伺服系统控制分系统设计方法	175
7.3.3 伺服系统结构与控制集成设计方法	176
7.3.4 数值仿真与试验验证	178
7.4 基于统一设计向量的多场耦合问题的优化设计方法	186
参考文献	187
第8章 电子装备机电耦合分析与设计的原型软件系统	188
8.1 总体思路与系统方案	188
8.2 专业软件的集成	190
8.3 机电热场耦合理论分析的原型软件系统	191
8.3.1 基本思路与框架	191

8.3.2 场耦合分析的交互界面	193
8.3.3 数据交换接口	193
8.3.4 原型软件系统	195
8.4 结构因素对电性能影响机理的原型软件系统	200
8.4.1 基本思路与框架	200
8.4.2 天馈系统影响机理的原型软件系统	200
8.4.3 伺服系统影响机理的原型软件系统	201
8.5 机电耦合测试与评价的原型软件系统	206
8.5.1 基本思路与框架	206
8.5.2 工作流程	207
8.5.3 数据库	207
8.5.4 测试数据接口	208
8.5.5 综合测评原型软件系统	211
参考文献	218
第9章 电子装备机电耦合理论与方法的应用	220
9.1 探月工程 40m 口径 S/X 双频段反射面天线	220
9.2 某舰载近程反导武器系统火控雷达伺服系统	221
9.3 某敌我识别系统	222
9.4 某电调双工滤波器	222
参考文献	223

第 1 章 绪 论

电子装备是以电磁信号的获取、传输及处理等电性能为目标,以机械结构为载体的一种特殊机电装备。

复杂高性能电子装备通常是电、机、热等多学科相结合的系统,其性能的成功获取不仅依赖于各学科本身的设计水平,更取决于多学科的对立统一,如机械结构不仅是电性能实现的载体和保障,而且制约着电性能的实现。所以需要研究电子装备的机电耦合问题,建立其机电耦合理论与方法,通过机电耦合分析进行机电耦合设计。

工业革命以来机械装备就成为工业的基础,20 世纪中叶以来电子技术和计算机技术飞速发展,使电子装备逐渐成为现代工业社会的重要装备,在陆、海、空、天等各个领域得到广泛的应用。随着科技的发展,对复杂高性能电子装备的需求越来越迫切。

电子装备的发展从器件上分,经过了电子管时代、晶体管时代到现在的集成电路时代;而从频率上分,则经历了低频时代、高频时代,正向着超高频、太赫兹 (THz) 频段发展。相对于早期的电子装备,现代电子装备的一个突出特点就是高频段、高增益、宽频带、高指向精度、高密度以及小型化,这对机械结构部件的设计与制造提出了更高的要求,有些要求甚至超出了传统机械加工手段的极限。这时必须将电子装备的电气部分和机械结构部分综合考虑,进行机电耦合设计^[1,2]。遗憾的是,传统设计是机电分离的,这导致装备研制的性能差、周期长、成本高、结构笨重,严重地制约了电子装备水平的提高。

解决机电分离的途径就是通过机电耦合分析进行机电耦合设计。电子装备的机电耦合问题包括多场耦合问题和机械结构因素对电性能的影响机理。前者从场耦合的角度研究机和电的关系,后者则研究难以用场来描述的结构因素对电性能的影响问题,两者互为补充,是机电耦合理论的两种表现形式^[3,4]。

对电子装备机电耦合问题的深入研究是研制高性能电子装备的前提,早期的研究未从机电耦合的层面展开,这是因为当时或是因工作频段没那么高,或是对体积要求没那么苛刻。而现在却不然,机、电已经到了密不可分的程度,必须从机、电或机、电、热耦合的系统层面上展开研究以求彻底解决问题。机电耦合有两种表现形式,一是场耦合的形式,二是影响机理的形式。工程上对影响机理认识较早,开展研究也较多,随着科技的发展,人们逐渐认识到不同物理场的作用,因而开始从场的角度研究电子装备机电耦合问题。

就影响机理而言,目的是了解、发现及掌握机械结构因素对电性能的影响机理,进而给出指导电子装备机电耦合设计的经验公式、图表以及设计规范等,机械结构因素包括结构参数与制造精度。而场耦合理论则是要给出不同物理场之间耦合的数学关系式,即数学模型。

一般而言,多物理场耦合问题(coupled multi-field problems, CMFP)是指两个或两个以上的物理场通过相互作用而彼此影响的物理现象,这种现象在客观世界和工程实际中广泛存在^[5]。常见的耦合问题有流-固耦合、气-固-液耦合、结构-电磁-热耦合、结构-光耦合、声-结构耦合、静电-结构耦合等^[6~15]。通过对实际工程中出现的一些耦合现象的分析和各物理场本身固有特性的研究,可初步确定各物理场之间的相互影响关系(见图 1.1)。图 1.1 中圆圈内部为一个物理场,有向线段表明各物理场之间的相互作用,线段中的文字表明作用的物理量。

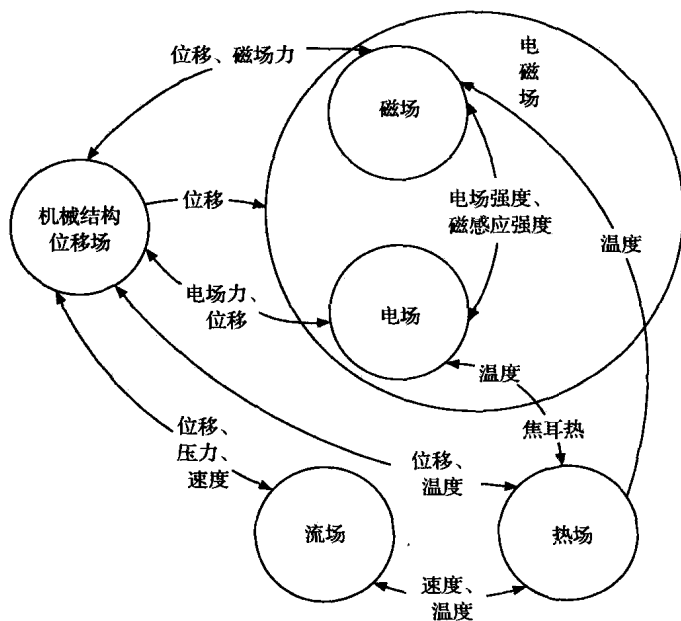


图 1.1 各物理场耦合关系图

针对电子装备中出现的 CMFP,各物理场的耦合关系中有些因素是可以忽略的。例如,雷达天线反射面作为电磁场的边界,当受到外部载荷(自重、风荷、温度、振动、冲击等)作用时,雷达天线反射面会产生变形,导致电磁场的边界条件改变,进而影响电性能的实现。由于天线电性能变化对反射面形状的影响比较弱,可以忽略不计,即认为反射面变形与电性能之间只存在单向耦合作用^[16]。而对于正在研制中的 65m 口径波束波导反射面天线则不尽然,当大功率高频段微波通过波束波导传输时,就可能引起波导的变形,从而影响天线的电性能。该 65m 天线是我

国目前最大口径的全可动反射面天线,将用于深空探测,首先是承担对火星探测的信息接收与测轨任务。可见,对不同用途的电子装备(机载、弹载、车载以及空间环境),需具体研究各物理场之间的耦合关系。

1.1 电子装备的定义与特点

现代电子装备种类繁多、功能多样、外形各异。最典型的电磁信号接收和发射的设备就是天线,反射面天线又是应用最广的一种天线形式,如探月工程中天线使用的反射面天线、通信卫星上的天线,如图 1.2 和图 1.3 所示。最早的电磁信号处理设备是雷达的发射机、接收机和功放等设备,现代电子技术通常将这些设备作为一个功能模块,再集成起来成为一台设备。例如航空电子设备,各个功能模块安装在同一个机箱内,下部是共用的散热通道。

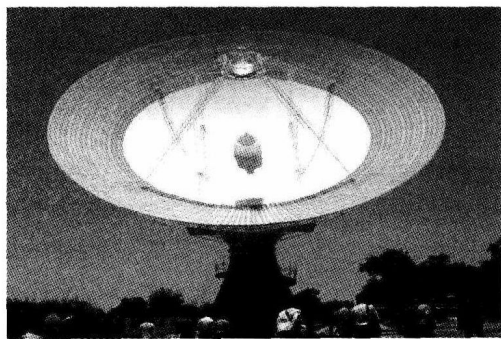


图 1.2 探月工程中的反射面天线

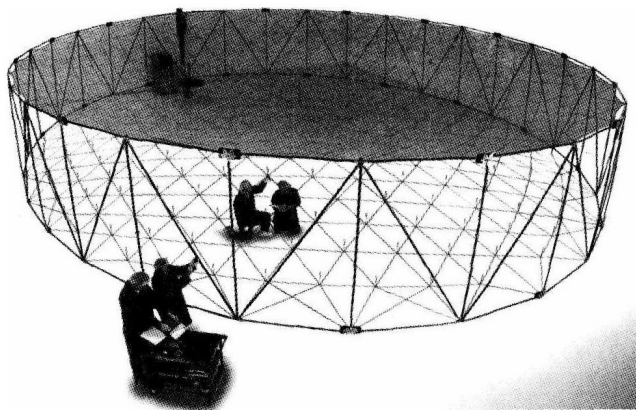


图 1.3 某通信卫星的可展开天线

现代电子装备的功能更强大,系统更复杂,远远超出早期电子装备的范畴。例如空警 2000 预警机(见图 1.4),不但机上的雷达系统与通信系统是电子装备,甚至整个预警机本身就是一台电子装备。同样对于图 1.5 所示的远望号远洋测量船,不论其体积和大小,以及上面有多少纯机械设备,考虑测量船本身的工作任务就是电磁信号的测量与处理,故也可以称之为为一台电子装备。

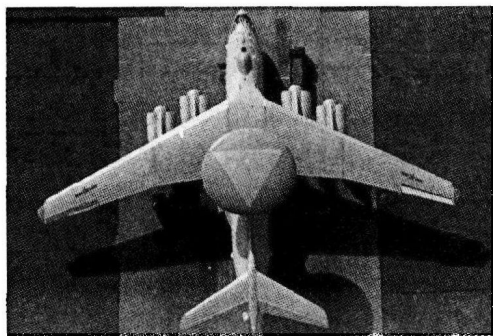


图 1.4 空警 2000 预警机

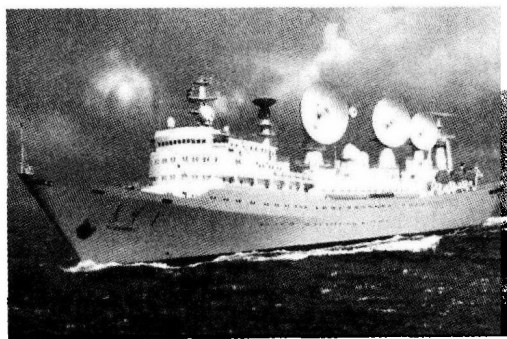


图 1.5 远望号远洋测量船

电子装备最显著的特点就是机电结合。但区别于一般含电气部件的机械设备的特點是,电子装备以电性能为整个装备的主要工作性能,机械结构性能是服务于电性能的,即是电性能实现的载体与保障。

与一般机械或传统机械相比,电子机械的特点具体体现在:在目的上,电子机械追求电子装备系统的电性能,而常规机械则追求其机械性能;在实现手段上,电子机械主要通过改变、优化机械结构参数与工艺来实现,而传统机械则主要通过加入电子、光电子等技术(当然也包括改变机械结构参数)来实现。

电子装备是电子机械工程领域的主要研究对象之一,其实质是研究不同学科

间的交叉与融合问题,以期通过研究不同物理量或物理场之间的耦合问题发现提高系统或设备性能的理论、方法与技术手段。电子机械工程主要研究电子设备、信息设备或电子系统的机械与结构的设计和制造等问题,其特点在于使系统或设备在复杂的机械环境、电磁环境以及热环境中满足对电性能的要求,并具有较高的可靠性。

1.2 电子装备的基本组成

1.2.1 电子装备的结构部分

电子装备的结构部分主要包括两个方面:一是电子装备结构的总体布局,根据装备的使用环境和技术要求,对系统整体进行构思,并对各分系统进行设计和规划;二是力学参数的设计,对安装于运动平台或有运输要求的装备,应有足够的强度和刚度,以抵御各种外部载荷引起的材料疲劳、结构谐振对电气性能的影响,必要时还应采用特殊的隔振与缓冲措施。

这是电子装备结构设计的最传统的领域,也是发展最早,设计理论和方法最为成熟的一个领域。

此外结构部分也有对电磁兼容性的要求。同样包含两个方面:一是能够满足电子装备使用要求的电气性能及其组成部(器)件的要求;二是装备整体的电磁兼容性要求。后者是指通过采取各种措施,从电路、结构、工艺以及组装等各个方面控制电磁干扰,同时还应满足成本要求。它又包含两个方面的含义:一是电子设备能够抵御外部电磁环境干扰;二是电子设备自身辐射的电磁波不干扰其他电子设备。

对于电子装备的结构设计而言,关键是提高其电磁屏蔽效能,这是一个与内部器件和外部环境无关的电磁兼容性指标。无论电子设备是舰载的、机载的还是陆地上的,甚至太空环境中使用的电子设备,都有对电磁屏蔽效能的要求。

电子装备的结构还有热控要求,电子装备的热控设计主要是针对电子元器件和整机进行温度控制。不同于常规机械设备的能源生热或机械结构摩擦生热,电子装备的热量主要是由电子器件工作时产生的。因为对于现代的高密度组装设备而言,电子器件的热承受能力远低于机械结构部分,所以需要更加严格的热控措施,其主要目的是防止电子元器件因温度过高而失效。

这体现了电子设备与其他机械设备的区别,目前已经发展成为一项专门的技术——电子设备热分析与热控制技术,它包含了热分析、热设计和热测试三方面的内容。散热方法可以粗略地分为风冷和液冷两种,需根据内部器件功耗和外部环境选用。某些特殊环境使用的设备可能还需要局部散热,如太空环境。

结构部分还应该考虑的其他方面包括:防腐蚀设计,即根据具体的使用环境选取相应的防护措施和结构;人机工程设计,即要求方便操作人员的使用和维护。此外,电气接触点的连接设计会影响装备的可靠性,也逐渐引起设计人员的重视。

综上所述,电子装备的结构部分包含了极为广泛的内容,涉及力学、机械学、材料学、热学、电磁学、环境科学、美学等多个领域,是一门边缘交叉学科。因而其设计也应该从多学科的角度开展。

1.2.2 电子装备的电气部分

电气部分可以分为两类:一类是电路部分,包括各种电路的布局,印制板的设计,甚至是某个芯片或电子器件的设计;另一类是电磁场部分,主要是雷达天线、波导等,通过某些结构或电子器件,实现电磁场在空间的某种分布。

电气部分不可避免地要通过结构部分来实现,因而电子装备的电气部分必然受到结构部分的影响和制约。

1.3 电子装备机电耦合研究的现状与发展

1.3.1 电子装备机电耦合研究的国外现状

电子装备的机电耦合问题是一个涉及面广泛的基础理论问题,也是制约军用电子装备的高性能、研制周期与成本的核心技术问题之一。长期以来发达国家对该领域的关键研究成果基本上是保密的,很少见到关于电子装备机、电、热场耦合理论和机械结构因素对电性能影响机理的公开报道。从各种可能获取的信息资料分析,国外发达国家,特别是美国和俄罗斯,在机电耦合的理论与方法上有较深入的研究,具体国外研究现状概述如下。

首先,在部件级或局部上有较深入的研究并有部分应用^[17~19],如随机皱纹形状对电磁波传输特性的影响^[20],声表面滤波器中的机电耦合及其影响系数问题^[21],感应加热设备中电场与热场间的耦合问题^[22],相控阵列天线机械结构制造精度对电性能的影响^[23]等。在电动机的强电磁耦合问题方面,研究文献相对较多,如利用瞬态有限元法计算感应电机中外线圈与转子速度间的耦合关系^[24]等。

其次,在电子装备系统级上也有零星报道,如针对星载天线反射器所开展的结构、电磁及热的多学科综合优化设计的初步研究^[25],军用电子装备热场的分析与布局的研究^[26]等。

再者,随着研究工作的深入,一些商品化的专业分析软件相继出现,如电磁分析的 Ansoft,结构分析的 ANSYS,还有 MARC、FLORMERICS、ALGOR、SPECTRUM 等。这些软件能够较好地支持特定物理场的分析,后来增加了其他物理场