

· 学科进展 ·

## 高精度电子装备机电耦合研究进展\*

王国彪<sup>1</sup> 段宝岩<sup>2</sup> 黎明<sup>1</sup> 宋建丽<sup>1</sup>

赖一楠<sup>1\*\*</sup> 黄进<sup>2</sup> 王从思<sup>2</sup>

(1 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085;

2 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071)

**[摘要]** 高精度电子装备机电耦合设计理论与方法是当前学科交叉领域的研究热点之一, 围绕该主题, 在国家自然科学基金委员会第 94 期“双清论坛”研讨成果的基础上, 结合国家重大需求和学科发展前沿, 分析了电子装备机电耦合领域在国防建设、航空航天、国民经济、社会发展以及学科发展中面临的挑战, 阐述了电子装备机电耦合领域的主要研究内容、研究热点及发展趋势, 提出了该领域未来 3—5 年的优先资助建议。

**[关键词]** 双清论坛, 学科交叉, 电子装备, 机电耦合

20 世纪中叶以来, 随着电子信息技术的飞速发展, 承担信息采集、传输和处理任务的电子装备在陆、海、空、天各个领域得到了越来越广泛的应用。几乎所有的电子装备都存在机电耦合问题, 即机械结构与电磁之间存在着相互影响、相互依存的关系<sup>[1]</sup>。因为高精度电子装备是机电结合的系统, 其电性能的成功实现不仅依赖于机械、电磁、热学等学科的设计与制造水平, 更取决于不同学科之间的交叉与融合。但遗憾的是, 传统设计中, 机械与电气是独立进行的, 电讯设计人员依据工作频段与服役环境, 提出对机械结构设计的要求, 而机械工程师的任务就是千方百计地去满足结构设计要求, 有一定盲目性。因此导致以下两个问题长期得不到解决: 一是提出的设计与制造精度太高, 往往超出机械结构的设计与制造能力; 二是有时精度要求满足了, 却又不能保证电性能, 致使电子装备研制周期长、成本高、结构笨重, 严重制约了其整体性能的提高, 并影响下一代装备的研制。可见, 系统而深入地开展电子装备机电耦合科学问题的研究具有极端的重要性和紧迫性。

“双清论坛”已有十余年的历史, 是国家自然科

学基金委员会(以下简称“基金委”)主办的高层次战略性学术研讨会, 是确定学科优先资助领域的重要途径之一。针对长期制约我国电子装备性能提高的机电耦合领域的瓶颈问题, 基金委于 2013 年 5 月 24 日—26 日在西安召开了第 94 期双清论坛, 本期论坛由工程与材料科学部、信息科学部和数理科学部联合主办, 西安电子科技大学承办, 论坛主题为“高精度电子装备机电耦合前沿研究”。其宗旨是立足于国家对高精度电子装备的重大需求, 聚焦国际学术前沿, 厘清影响我国电子装备未来发展的重要基础科学问题; 通过充分交流和思想碰撞, 提出前瞻性的政策建议, 促进学科交叉与融合, 推动我国复杂电子装备的科学研究水平和自主创新能力。来自国内 27 个高等院校和科研院所的 12 位院士和 40 余位机械工程、电子科学、通信科学、材料科学、数学和力学等领域的专家学者出席了会议。

与会专家围绕“电子装备机电耦合研究的极端重要性及迫切性”、“电子装备机电耦合中的基础科学问题”和“电子装备机电耦合研究现状与展望”3 个中心议题, 从“电子装备电磁场、结构位移

\* 本文根据第 94 期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* Email: laiyn@nsfc.gov.cn

本文于 2014 年 3 月 5 日收到。

场、温度场的多场耦合”、“机械结构(设计与制造)因素对电子装备电性能的影响机理”、“电子装备机电耦合与材料”、“电子装备机电耦合的多尺度效应”、“电子装备路耦合”和“电子装备机电耦合问题的内涵和外延”等6个方面开展了热烈而深入的研讨,凝练了高精度电子装备机电耦合领域的关键科学问题,明确了未来3—5年的重点研究和资助方向,提出了电子装备多学科交叉融合研究的新思路。

## 1 高精度电子装备面临的挑战

高精度电子装备在我国国防建设与社会经济发展中起着非常重要的支撑作用,但是传统的机电分离设计导致了电子装备研制周期长、成本高、性能受限等严重问题。据不完全统计,机电分离设计对天线及馈线系统、伺服系统、通信设备等典型高精度电子装备性能的影响达到60%—70%,对研制周期的影响达到30%—50%,对研制成本的影响达到30%—50%<sup>[2]</sup>。以下从3个方面进行分析。

### 1.1 高精度电子装备设计存在的问题

目前,我国还没有解决高精度电子装备的性能指标与其设计及制造精度之间的映射关系问题,因而产生下述问题:(1)电性能指标过度依赖设计与制造精度;(2)设计与制造精度满足要求,而调试后电性能却不一定能达到指标;(3)设计与制造精度虽未达到要求,但调试后电性能却能满足要求。

例如,对某机载火控雷达平板裂缝天线而言,根据现有电磁理论分析,我国的制造精度要求为:波导槽、缝槽及辐射缝偏心尺寸公差 $\pm 0.02$ — $\pm 0.03$  mm,俄罗斯的公差要求为 $\pm 0.05$  mm,但俄罗斯研制的产品电性能却与我国的相当。因我国平板裂缝天线制造过程极其复杂,工艺难度大,使得产品研制周期长、合格率低、成本高昂。某散射通信系统的关键设备—电调双工滤波器,当传动、位置等误差引起的插入损耗每增大1 dB时,通信作用距离将缩短10 km,因其是通过机械传动实现500个频率点的准确定位的,对其结构精度要求甚高;但仅凭经验调试机械传动误差代价很大,实际生产中的成品率仅为30%—40%,每件产品的调试时间长达4天。

### 1.2 高精度电子装备发展需求

随着国防、航天等领域的快速发展,高精度电子装备的发展趋势为:(1)高频段、高增益;(2)高密度、小型化;(3)快响应、高指向精度。

例如,我国萤火计划的35 m天线(重达750 t)工作于Ka频段且要求具有77 dB增益,这就要求天线具有很高的反射面形面精度(0.3 mm)和较高的发射功率;从而带来两个技术难点:一是反射面保型,即如何在所有工作姿态下达到要求的形面精度;二是造价问题,必须一次成功。因此解决上述难点的唯一途径就是进行机电耦合设计。

同时,随着航空、航天等高技术发展,要求电子装备中元器件的密度越来越高,而体积却越来越小。如工作于S频段的预警机有源相控阵雷达,为了实现同时对数百个目标的跟踪,采用了上千个T/R组件。虽然每个T/R组件的自重只有几百克,但附加冷却系统固定安装后却重达几十公斤,与馈电系统组装后整个子阵重量达到数百公斤,机械结构部分占了整个系统重量的约70%。而工作于X频段的四代机有源相控阵雷达具有几千个T/R组件,每个组件封装在硬币大小的模块中,其热流密度很高。而对于大功率微波集成电路、高通量处理器等高密度组装设备来说,其热流密度甚高,已达10—100 W/cm<sup>2</sup>。

对具有目标跟踪要求的电子装备,不仅要求指向精度高,而且要求具有很快的响应速度与加速度。如某舰载近程反导武器系统的火控雷达天线固连于火炮支架上,为有效地拦截来袭导弹,要求在每分钟发射数千发炮弹的剧烈冲击下,雷达天线具有极高的角速度、角加速度和指向精度。因此,研制中必须解决隔振、轻量化及快速跟踪等技术难点。

可见,上述现代电子装备的发展需求使得传统的机电分离设计问题日益突出。

### 1.3 高精度电子装备机电耦合的研究意义

高精度电子装备属国家的重大需求,应用领域广泛,对陆、海、空、天等领域的电子信息综合平台的整体性能、安全性与可靠性有重要影响。在下一代预警机、无人机、大飞机、深空探测、载人航天、空间探测器、航母、核潜艇、深海探测、微系统、新能源、太空发电站等国家重大专项和新型武器装备研制中,有诸多与电子装备机电耦合有关的重要科学问题亟待解决,迫切需要继续深入、系统地开展机电耦合方面的基础研究。

高精度电子装备机电耦合的研究突破,将会带来显著的社会效益与经济效益。以中国电子科技集团公司为例,每年承担约1000亿元人民币的电子装备研制任务,通过解决机电耦合领域的相关问题,将

会降低研制成本约10%、缩短研制周期20%,同时装备的性能与可靠性都能得到相应提高,必将带来明显的社会与经济效益。

综上所述,传统的机电分离设计严重影响了我 国航天和国防重大装备与工程的发展,机电耦合设计已成为制约电子装备性能提高并影响下一代装备研制的一个长期悬而未决的瓶颈问题。因此,迫切需要开展电子装备机电耦合领域基础科学问题的研究。

## 2 电子装备机电耦合的内涵与现状

电子装备是以电磁信号的获取、传输及接收等为目标,以机械结构为载体的特殊机电装备。其机电耦合的内涵包括两方面,一是对于具有高分辨率、高灵敏度等电性能要求的装备,其电性能对机械结构精度非常敏感;二是对于机械结构部分而言,要求其具有满足电性能指标的高结构精度,而不是一般意义上的机械加工与装配精度。近年来许多国内外学者从不同角度对电子装备机电耦合问题展开了研究。

### 2.1 部件级

国外对部件级电子装备的机电耦合已进行了较为系统的研究,并取得了一定的成果,主要表现为以下4个方面:

(1) 超声换能器:换能器带宽,即传输机械能对存贮总能量的比值,由机电耦合系数确定。实验结果表明,换能器中的串联电容对机电耦合系数无影响,而并联电容会降低机电耦合系数,表明机械能的传输效率会影响换能器的带宽<sup>[3]</sup>。

(2) 磁通感应加热设备:研制的关键是如何对感应器进行优化设计。首先需通过求解稳态电流(电磁)与热的耦合问题,得到感应能量分布,并作为后续热计算的输入,进而得到温度分布,然后基于温度场进行感应器的优化设计<sup>[4]</sup>。

(3) 感应电机:转子与能量供应之间存在着机电耦合问题。由于感应电机开始工作时的能量供应不再是正弦规律,对于这种机电耦合问题,一般是基于有限元矩量方程,对电路方程和机电方程同时求解来保证电机的工作<sup>[5]</sup>。

(4) 波纹喇叭波导:因波导的波纹形状对高功率微波传输的损耗与衰减有明显影响,即波导结构因素(如尺寸、精度)对其电性能有着制约作用,解决此类机电耦合问题时,可采用一个确定数学函数给出连续波纹形状,进而代入波导传输损耗公式进行

分析<sup>[6]</sup>。

### 2.2 系统级

系统级电子装备机电耦合方面的研究较少,且不系统。如:(1)通信卫星天线:移动通信卫星系统常应用轻质的多波束反射面天线,但在轨天线反射面的热变形对天线增益影响很大,故多采用波束阵列馈源来进行补偿<sup>[7]</sup>。(2)柔性星载天线:热作为外载荷,使用机电热综合优化方法,以电指标作为约束,通过优化结构来提高天线性能<sup>[8]</sup>。(3)电子设备热场分布:一般是结合工作环境与指标要求,进行各种电子设备的散热方式选择和散热系统的设计,并通过实验测试给出相关问题的解决策略<sup>[9]</sup>。

### 2.3 国内基础理论和工程实践情况

我国自20世纪80年代以来陆续开展了微波电子装备的机电耦合问题研究,其中具有代表性的有:

(1) 天线副面撑腿:根据不同载荷对天线结构变形的影响,为减小遮挡,以天线效率为目标,优化副面撑腿结构尺寸<sup>[10]</sup>。

(2) 馈源相位中心:基于反射面天线馈源相位中心,达到提高变形反射面天线电性能的目的<sup>[11]</sup>。

(3) 波导缝隙天线:分析阵面平面度组成因素与评定方法,来指导结构设计和公差分配<sup>[12]</sup>。

(4) 相控阵天线:基于相控阵天线阵面随机误差均值与副瓣电平抬高的经验关系式,进行以结构重量和副瓣电平为目标的机电综合优化设计<sup>[13]</sup>。

自20世纪60年代,我国工程技术人员在实践中发现电子装备电讯与机械结构存在着某种联系,但始终未在理论层面上得到系统解决。比如,中国电子科技集团公司所属研究所的工程技术人员,尤其是机械结构设计与工艺人员,在工程实践中发现了许多问题与矛盾,虽然用尽各种方法(加工设备与手段),但往往仍难以满足电讯设计人员对加工制造精度提出的要求。同时,在电子设备的最终调试中时常会发现,付出高昂代价而达到精度要求的产品并不一定能保证满足电性能指标。尽管机械结构设计与工艺人员开始思考这一问题,并从实践中总结归纳出一些经验,但范围、层次有限,缺乏一般指导意义。另外,随着技术人员的流动,许多宝贵的经验未能保留和传播。

综上所述,国际上在部件级机电耦合问题方面有较深入研究,并有成功应用,而在电子装备系统级方面的研究只有零星报道;我国在电子装备机电耦

合理理论方面有初步研究。随着科技的发展,目前工程上急需机电耦合方面的相应解决方法,理论上需探究机电耦合的科学内涵。

### 3 典型高精度电子装备机电耦合研究进展

高精度电子装备机电耦合内涵丰富,不仅涉及机械结构、电讯、热,而且包含其服役环境、控制系统、内部结构、制造工艺与材料、测试与补偿等方面。因电子装备种类繁多,限于篇幅,下面仅对电子装备服役环境、控制系统、内部结构耦合设计等3种典型的机电耦合问题研究进展加以分析。

#### 3.1 服役环境与电子装备结构的耦合关系

高精度电子装备服役环境通常较一般装备更复杂与苛刻,包括:瞬态风荷与稳态风荷、振动冲击、太阳照射、冰雪包裹等多种典型服役环境。这些环境都会引起高精度电子装备结构的系统变形,从而降低电子装备工作性能,甚至引发电子装备失效。因电子装备种类繁多且服役环境各异,下面以大型反射面天线为例,说明其典型服役环境与电子装备结构的关系。

大型反射面天线主要存在两个问题:一是机电分离设计问题,二是反射面在不同仰角姿态下的保型问题。机电分离是指反射面天线在温度、自重等载荷作用下会发生变形,导致电性能的下降。同时,工程中还存在随机风荷、随机结构参数等随机因素,这使得在确定性因素下设计的天线往往不能满足工程需要,所以应考虑不确定因素的影响(图1)。显

然,结构与电磁性能密不可分,必须寻求电与结构性性能全优的机电综合优化设计。另外,反射面保型要求天线在不同仰角 $\alpha$ 的时候始终为一同族抛物面(图2),这对小口径天线比较容易实现,而大口径反射面的保型是工程上的难点。

研究人员早在20世纪60年代就注意到天线的结构和电性能是有内在联系的,天线结构设计人员也开始研究结构参数对天线电性能的影响关系。在此期间取得了一系列的研究成果,引入最佳吻合抛物面的概念,并于20世纪80年代出版了有关专著,内容涵盖了天线电磁设计<sup>[14-16]</sup>、结构设计<sup>[17]</sup>以及天线座的伺服系统设计<sup>[18]</sup>等,包括雷达天线所涉及的大部分领域,成为国内反射面天线设计的经典著作,并一直沿用至今。

进入21世纪以来,研究人员经过长期的研究,在最佳吻合抛物面、保型设计理论及机电综合设计的基础上,发现电性能与结构的关系体现为结构位移场与电磁场的耦合关系。实现天线电性能与结构性性能全优的突破口是找到场耦合关系,建立机电场耦合模型,进行机电综合设计。基于此,文献<sup>[19-26]</sup>从馈源相位中心的概念出发,系统研究了机电耦合问题,建立了反射面天线机电耦合理论模型;该模型解决了反射面天线的机电分离设计问题,与著名的Ruze公式相比,可以在达到相同电性能指标的同时,降低对反射面精度的要求,从而降低研制成本、缩短研制周期;反之,对相同的反射面精度可提高其电性能。

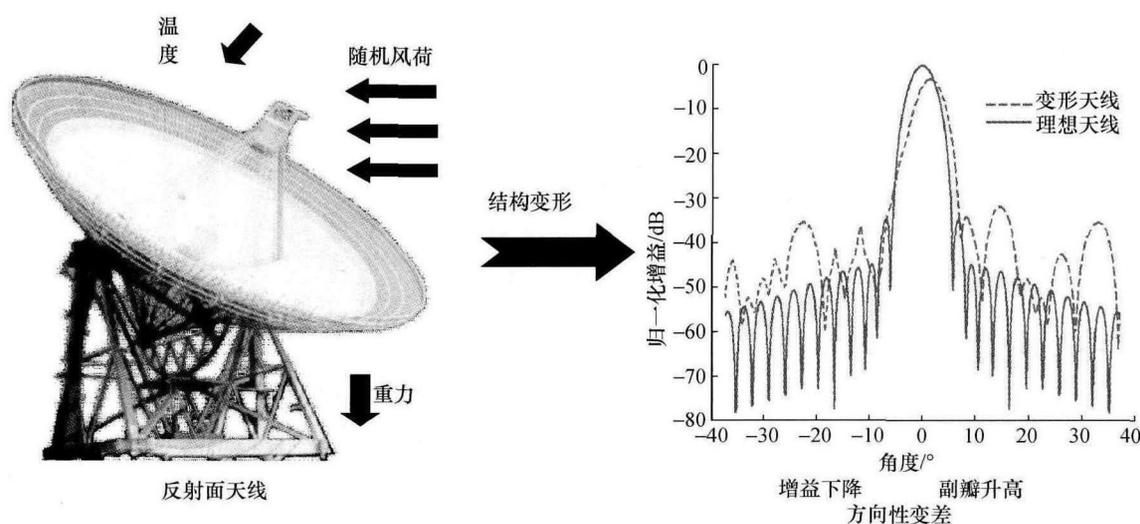


图1 结构因素与电性能的相互影响关系示意图

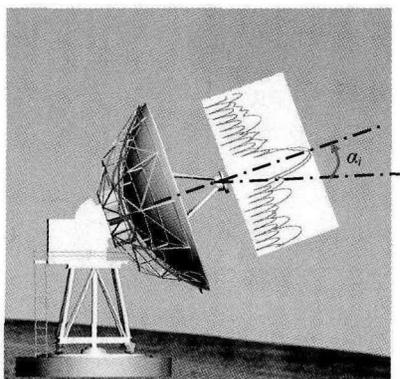


图2 不同仰角下的变形反射面

对于反射面天线而言,为了观测不同的目标,天线须在不同的仰角下工作,故存在多工况的问题,即在不同的仰角工况都要满足电性能要求,因此,就需要采用系统优化方法进行保型设计。在天线保型优化设计方面,已经系统开展了多方面的研究工作。在形状优化方面,提出了形状优化混合法,解决了Hessian阵奇异化问题<sup>[27]</sup>;拓扑优化方面,提出了多工况优化方法,解决了多工况、预定位移场与非线性约束问题,拓宽了结构优化的范畴<sup>[28]</sup>;可靠性优化方面,解决了可靠性约束显式化处理的难题,突破了概率隐式约束难以表征的数学障碍<sup>[29]</sup>;其他方面的研究工作,还有大系统优化<sup>[30]</sup>、可视化优化<sup>[31]</sup>和两态动力优化(星载可展开天线)<sup>[32]</sup>等。上述工作,初步形成了我国天线机电耦合设计的学科体系。

在此基础上,将上述机电耦合理论推广到其他的天线形式,如平板裂缝阵天线、有源相控阵天线等,将会使天线结构设计水平提高到一个新的高度。

### 3.2 控制系统设计与结构的耦合关系

为实现高精度电子装备的高性能,需进行装备控制系统(电路、伺服等)的精密设计,其中包括结构与控制系统的机电耦合。结构与控制集成设计的研究始于20世纪80年代<sup>[33]</sup>,国内外学者进行了卓有成效的研究,主要集中在如下3个方面:太空系统结构与控制的集成设计<sup>[34-36]</sup>,尤其是柔性结构系统,以杆件的横截面为设计变量,结构的质量和能量为目标,但不适用于可变结构(或机构)问题;直流电动机的结构与控制集成设计问题<sup>[37-38]</sup>,以直流电动机为例,从状态空间模型入手,研究了结构和控制之间的耦合,指出集成设计的必要性,但对于复杂机构来说,其状态空间模型不易获得;机构系统中机构与控制的集成(或协同、并行)设计问题<sup>[39-42]</sup>,根据集成的理念来设计机构。上述研究均未考虑机构的固有频率、动态目标跟踪控制的稳定性、准确性及快

速性等非线性约束,也未给出可同时实现机构轻量化与跟踪控制稳、准、快的详细集成设计模型。

雷达天线作为控制系统机电耦合问题最突出的典型电子装备,其指向精度与快速响应等性能取决于伺服系统的设计水平,包括结构设计与控制器设计。结构设计将影响到控制性能的实现,如何伺服控制带宽的实现依赖于结构固有频率;控制性能反过来又会影响到结构设计,如何伺服系统中驱动力的大小将影响天线座结构的设计。因此,为“看得准”与“看得清”,必须进行结构与控制的集成设计。

然而,传统的雷达天线伺服系统往往将结构和控制进行单独设计,再调校以达到要求的指标。实际上,伺服系统,尤其在高性能伺服系统中,结构和控制存在着紧密的相互耦合关系。如在控制设计时未能充分考虑伺服机构的特性,将导致伺服跟踪性能降低,甚至无法达到要求的性能指标;另一方面,在结构设计时如未能充分考虑控制作用,就不能得到最优的设计,甚至无法设计出满足条件的结构。传统的设计方法严重制约了高性能雷达的研制和系统整体性能的提高。因此,在一个集成系统考虑控制与结构的耦合问题非常重要。文献<sup>[43-51]</sup>以控制增益、结构尺寸、传动比为设计变量,以结构重量、跟踪精度和控制能量为目标函数,以稳定性、跟踪性能指标及许用强度等为约束,系统建立了雷达天线伺服系统的结构与控制集成设计理论与方法。

### 3.3 电子装备内部结构设计耦合关系

在现代高精度电子装备内部,结构位移场、电磁场、温度场(机电热三场)之间的相互联系更为紧密(图3),其结构与电磁设计、热设计有着高度的耦合关系。电子装备的服役环境与结构参数会影响电子装备的结构位移场,而结构位移场会影响电子装备温度的分布,即影响温度场。同时位移场也会改变电磁场的边界条件,从而影响电子装备的电性能。另外,电子装备的温度场的变化会影响电子器件性能的稳定性,从而影响电性能,温度场的变化也会导致电子装备结构位移场的变化,进而又影响电磁场。这就是电子装备结构位移场与电磁场、温度场(机电热)之间的相互耦合关系<sup>[52-53]</sup>。

高密度组装系统(如各类机载、星载的高密度机箱、机柜等)和有源相控阵天线是具有机电热三场耦合问题的典型电子装备。对于高密度组装系统,其设计的3个主要方面(结构刚/强度、通风散热和电磁兼容)之间存在相互矛盾。具体体现在:(1)质量和刚度的矛盾,结构强度要求高,要求能在各种工况

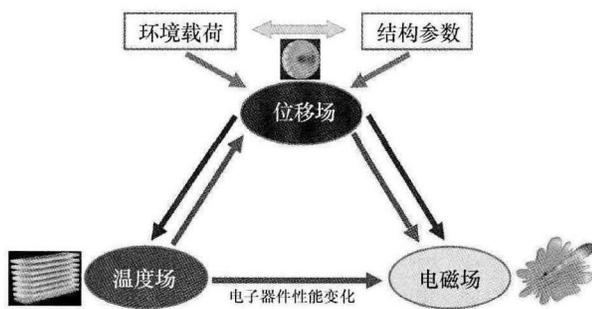


图3 机电热场耦合关系图

的冲击与振动下正常工作,服役环境要求体积小、质量轻,特别是机载、星载设备。(2)电磁屏蔽和通风散热的矛盾,较大的孔缝有利于散热却不利于电磁屏蔽,而过高的温度又会影响电子器件的效能。因此,高密度组装系统要同时满足结构刚/强度、电磁兼容和散热控温3方面的要求。

传统的高密度组装系统设计分别考虑结构刚/强度、电磁兼容及通风散热3方面的要求,给出各自设计方案,由于出发点和目的不同,方案之间会发生冲突。所以,需要设计人员根据经验进行平衡与取舍,得出可行的设计方案。在早期工作频段不高,体积与密度要求不苛刻时,这种方法尚可;但随着对电子装备要求的不断提高,这种机电热分离的设计方法越来越难以同时满足各方面的要求。因此,文献[54—55]从多场耦合的角度开展研究,基于所建立的高密度组装系统的机电热多场耦合模型,开展多学科耦合优化设计,进行机电热耦合分析与设计,以指导工程实践。

对于有源相控阵天线,因其多功能、低散射截面(RCS)、高可靠性、可同时搜索和跟踪多目标等无可比拟的优势,是一类具有广阔发展前景的天线,已成为今后几十年战略预警、战术攻防以及通信、遥感等领域中的核心装备之一<sup>[56]</sup>。由于有源相控阵天线(APAA)阵面中存在着大量的发热器件,发热总量通常达几千瓦,其中还有对温度敏感的T/R组件。阵面温度分布的不合理将严重影响天线阵面的相位控制精度。而复杂的工作环境载荷(振动冲击等)和温度分布都将引起结构变形,从而使阵面辐射单元(阵元)的方向以及相互间的互耦效应都发生变化,最终导致天线电性能达不到要求,甚至无法实现。为此,文献[57—60]基于环境载荷和阵面温度分布对结构变形的影响,以及温度分布对T/R组件激励电流幅度相位的影响,建立了有源相控阵天线的机-电-热三场耦合模型。利用有源相控阵天线机-电-热三场耦合模型,对其结构、热、电磁进行耦

合分析,可有效实现有源相控阵天线的最佳综合设计,在相同电性能指标要求下,降低对冷却系统、结构加工精度、焊接精度与装配精度的要求;而在相同冷却系统参数和结构精度要求下,提高冷却效率,降低结构重量、环控要求,提高有源相控阵天线的综合性能。

#### 4 高精度电子装备发展趋势

随着电子技术、信息技术、材料、工艺等学科的高速发展,高精度电子装备也得到了快速发展,具有以下发展趋势:

(1) 极高频段。基于大通信容量、高传输速率及高分辨率的需求,电子装备的工作频率不断提升,从微波、毫米波向亚毫米波甚至太赫兹波的方向发展。当前米波、厘米波的探测雷达已经相对成熟,毫米波在通信系统中得到广泛应用,正在研发的高速短距传输设备的频率可达数十吉赫兹(GHz),更高太赫兹的应用研究已初见端倪,射电天文领域观测的电波频段可达上百吉赫兹(GHz)。

(2) 极端环境。航空、航天、航海领域的电子装备,其工作环境往往十分恶劣,而且随着科学探索的不断深入,从常规工作环境向着南北极、临近空间、外太空、深海等极端服役环境发展。2012年我国的天文望远镜已经安装到南极冰盖的最高处,将来还将建立南极天文台,这些极端环境对电子装备提出了极为苛刻的要求。

(3) 宽频带、多波段、高增益。当前和将来对电子设备的另一要求是(a)宽频带,如要求射电望远镜的工作频率从200 MHz到120 GHz,甚至更宽。(b)多波段,如要求同一天线可工作在多个波段上。(c)高功率,如卫星上的设备,希望在体积不变的情况下,发射功率尽可能大。这3个要求给电子装备的设计与制造带来了新的问题和更大的难度。场耦合关系更加复杂,加工精度要求更高,需要进行新材料、新结构与新工艺的探索和研究。

(4) 高密度、小型化。电子装备正向着体积更小、密度更大、功耗更低的方向发展,如组装的密度越来越高,而且由二维组装向三维组装发展,相应地要求装备的体积越来越小。如典型电子装备射频系统的尺寸已由2000年的0.03 m<sup>3</sup>减小到目前的0.01 m<sup>3</sup>,预计到2015年将达到0.001 m<sup>3</sup>,急剧增加的密度将带来严重的机电耦合问题。

(5) 快响应、高指向精度。对装备的机动性与反应速度的要求越来越高,而且在要求快速跟踪的

同时,能够精确定位。例如,某舰载雷达天线座与稳定平台,要求其具有极高的快速性、低速平稳性以及定位精确性。

(6) 特殊/特种装备。随着服役范围的不断拓展,满足某些特殊/特种需求的电子装备不断涌现。如预警机的有源相控阵雷达天线安装在机身上方,使飞机的气动性能变差,希望能做成共形天线或分离式天线。所谓共形天线是指将天线阵面做得与飞机外形的形状相同,而分离式天线是指将众多辐射单元置于飞机机身,通过置于机身蒙皮内的光纤连接。再如超高音速飞行平台,除具有结构和电磁功能,还需要额外克服气动加热的问题。又如,太空可展开天线,因其具有高收缩比、大口径、高性能等特点,具有良好发展前景。因此,需要电子装备集防护、天线、馈线、功分及信息处理等功能于一体。

为了适应上述发展趋势,急需深入进行机电耦合理论的研究、拓宽其应用领域、提升应用层面。如太空环境会带来新的问题,更高频率(如太赫兹)会使频率敏感问题更加突出,微纳尺度的高密度装联会导致问题进一步复杂,这些问题都会拓展目前机电耦合的内涵及应用。同时,更加深入地研究机电耦合设计技术,突破传统机电分离设计的设计理念也是亟待解决的重要问题。

## 5 未来3—5年的优先资助方向建议

随着电子装备向极高频段、极端环境、宽频带、多波段、高增益、高密度、小型化、快响应、高指向精度的方向发展,其机电之间的耦合与矛盾日益突显,关键技术的创新更具有综合性的特点,需充分发挥综合集成优势与学科交叉特色,为提升我国该领域的科学与技术水平奠定基础。

经过充分研讨,与会专家在机电耦合的内涵、类型、范围、定位及本质等方面达成以下共识:(1) 电子装备的机电耦合问题涉及范围广,而我国电子装备机电耦合的研究与国外相比仍有差距,基础研究亟待加强。(2) 传统电子装备机电耦合包括电磁场、位移场与温度场,而电路(芯片、元器件、基板)、材料、传感、工艺、制造、测量等同样具有机电耦合问题,亟待解决。(3) 除多场耦合、路耦合、材料、制造工艺以及多尺度外,建模、动态因素、结构功能一体化等也应是机电耦合研究的内容。(4) 为能有效解决实际工程问题,机电耦合综合设计平台的研制与建设意义重大。(5) 要妥善处理保密与管理制度和基础研究的关系,在保证国家安全的前提下,加强

不同领域、不同专业间的学术交流。

通过凝练,与会专家一致认为影响我国电子装备未来发展的三大关键基础科学问题主要有:

(1) 多场、多尺度、多介质的耦合机制。基于多种电磁媒质的材料特性,研究高精度电子装备电磁场、结构位移场、温度场等多物理场之间的相互作用,探明其在微波、毫米波、亚毫米波等频域范围,以及从微观到宏观的跨尺度域上的演变规律。

(2) 多工态、多因素的影响机理。针对电子装备机电耦合问题中难以从多场耦合角度进行机、电关系研究的部分,分析多种工况下机械结构因素对电性能的影响机理,得出结构因素对电性能影响的定性或定量关系。

(3) 系统结构与功能集成设计理论与方法。为避免分离设计导致的功能异化和性能劣化,需要从系统层面研究机械结构、电磁、传热等部分的综合设计,统筹考虑硬件集成、信息集成和功能集成。

为此,建议未来3—5年的优先资助方向为:

(1) 高精度电子装备的多场耦合建模。继续深入研究电磁场、结构位移场、温度场等多物理场之间的耦合关系,挖掘多场之间的物理联系参数及影响因素,研究影响电子装备综合性能的因素,提出不同高精度电子装备多场耦合理论模型的统一表述方法。

(2) 高精度电子装备的路耦合。研究高精度电子装备中力、电、热等能量在封闭空间中的耦合理论,以及结构因素、载荷信息、材料特性对电路性能的影响机理,实现电路中结构因素、载荷信息、材料属性的多尺度、多频段动态建模,研究面向最优传输性能的电路结构、性能与功能的集成设计理论与方法。

(3) 高精度电子装备机电耦合的材料特性影响机理。研究电子装备中,材料(常规材料和新材料)的机械参数和电磁参数对装备性能的影响,探索加工制造过程和服役环境条件下材料特性的变化规律,挖掘材料特性对电子装备性能的影响机理。

(4) 机械结构(设计与制造)因素对电子装备性能的影响机理。针对电子装备设计与制造中多工态和多因素对电性能的影响机理,探究机械结构设计参数和制造工艺参数对电性能的影响规律,挖掘设计、制造因素与电性能之间的定性或定量关系,研究电子装备的设计-制造-测量-运行全过程协同仿真和补偿技术。

(5) 高精度电子装备机电耦合的跨尺度建模方

法与仿真。基于电子装备机、电、热多场耦合以及跨空间、跨时间尺度的特征,研究电子装备在多场作用下跨空间和时间尺度的建模与仿真,电子装备中关键部件的性能优化和关键参数传递对系统性能演变的机理,电子装备机械结构的跨尺度建模和电性能分析,以及结构功能一体化的设计理论与关键技术。

## 6 结束语

复杂高精度高性能电子装备应用领域广泛,对陆海空天领域内电子信息综合平台的整体性能、安全性与可靠性有重要影响。在载人航天、深空探测、二代导航、高分辨率对地观测和大飞机等重大工程中,有诸多与电子装备机电耦合有关的重要科学问题亟待解决。电子装备机电耦合问题研究,不仅涉及到数学、物理、力学等基础学科,更涉及到电磁、机械结构、传热、材料、控制、制造工艺、测试等工程领域,是一个多学科、多领域联合攻关的科学问题。通过将机电耦合与设计的结合,可使高精度电子装备的设计更量化、更精密化;机电耦合与材料科学的结合,会加强复合材料、功能材料等新材料的应用,使高精度电子装备更“精”、更“轻”、更“强”;机电耦合与制造工艺学的结合,可使高精度电子装备的制造方法与工艺流程更高效、产品质量更优良;机电耦合与电子信息技术的结合,可使高精度电子装备的“耳目”更聪明,“大脑”更智慧,“决策”更英明,“行动”更迅捷精准。

本次双清论坛的主题正是基于国家对高精度电子装备的重大需求、国际学术前沿的研究现状而选定的,对推动我国高精度电子装备研制意义重大。与会专家一致认为,电子装备机电耦合问题研究具有“国家重大战略需求明确、学科交叉研究综合度高、国内具有良好研究基础、国外正在加紧突破”的特点。应及时抓住国家重大装备发展的需求,组织优势研究力量,瞄准国际学科前沿,针对高精度电子装备机电耦合涉及的科学问题开展深入、系统的研究,探索电子装备多场、多尺度、多介质的耦合机制,发掘多工况、多因素的影响机理,突破系统结构与功能集成设计的藩篱,形成电子装备机电耦合领域的基础理论和设计方法体系,为国家新型电子装备研制水平的提升和可持续发展提供强有力的科学与技术支撑。

## 参 考 文 献

[1] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用. 北京: 科学出版社, 2011.

- [2] 电子装备机电耦合基础问题研究. 国家安全重大基础项目综合论证报告. 西安电子科技大学、中国电子科技集团公司, 2006.
- [3] Yaralioglu GG, Ergun AS, Bagram B, et al. Calculation and measurement of electromechanical coupling coefficient of capacitive micromachined ultrasonic transducers. *IEEE Trans Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(4): 449—456.
- [4] Dughiero F. Numerical and experimental analysis of an electro-thermal coupled problem for transverse flux induction heating equipment. *IEEE Trans. Magnetics*, 1998, 34(5): 35—46.
- [5] Pham TH, Wending PF, Salon SJ. Transient finite element analysis of an induction motor with external circuit connections and electromechanical coupling. *IEEE Trans Energy Conversion*, 1999, 14(4): 1407—1412.
- [6] Amari S, Vahldiech R., Bornemann J. Analysis of propagation in corrugated waveguides with arbitrary corrugation profile. *IEEE AP-S Int Symp, Orlando, USA*. 290—293, July 1999.
- [7] Suzuki Y, Harada S. Deformed antenna pattern compensation method for onboard multi-beam antennas. *25th AIAA Int Communications Satellite Systems Conference AIAA 2007—3269*.
- [8] Adelman HM, Padula SL. Integrated thermal-structural-electromagnetic design optimization of large space antenna reflectors. *NASA Technical Memorandum 87713*.
- [9] Price DC. A review of selected thermal management solutions for military electronic systems. *IEEE Trans Components and Packaging Technologies*, 2003, 26(1): 26—39.
- [10] 刘京生, 曾余庚. 天线副面(馈源)支撑结构的机电综合优化设计. *通信学报*, 1988, 9(6): 60—63.
- [11] 徐国华, 漆一宏, 段宝岩, 等. 反射面天线馈源相位中心的研究. *电子学报*, 1990, 18(4): 88—92.
- [12] 张雪芹, 冯小明. 波导缝隙相阵天线阵面平面度误差分析. *火控雷达技术*, 2000, 29(4): 15—19.
- [13] 唐宝富, 束咸荣. 低副瓣相控阵天线结构机电综合优化设计. *现代雷达*, 2005, 27(3): 67—70.
- [14] 魏文元, 宫德明, 陈必森. *天线原理*. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [15] 谢处方, 邱文杰. *天线原理与设计*. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [16] 约翰·克劳斯. *天线(上册、下册)*. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [17] 叶尚辉, 李在贵. *天线结构设计*. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986.
- [18] 朱钟铨, 叶尚辉. *天线结构设计*. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [19] Duan BY, Qi YH. Study on optimization of mechanical and electronic syntheses for antenna structures. *Int J Mechatronics*, 1994, 4(6): 553—564.
- [20] Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3409—3413.
- [21] Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas. *International Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2007, 33(6): 519—528.
- [22] 宋立伟. 表面误差对反射面天线电性能的影响. *电子学报*, 2009, 37(3): 552—556.

- [23] 宋立伟. 反射面表面与馈源误差对天线方向图的影响. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1269—1274.
- [24] 马洪波, 段宝岩, 王从思. 随机参数反射面天线机电集成稳健优化设计. 电波科学学报, 2009, 24(6): 1065—1070.
- [25] 王伟, 段宝岩, 马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用. 电子学报, 2008, 36(6): 1114—1118.
- [26] 王伟, 段宝岩, 马伯渊. 重力作用下反射面变形及其调整角度的确定. 电波科学学报, 2008, 23(4): 645—650+698.
- [27] Duan B Y, Ye S H. A mixed method for shape optimization of skeletal structures. *Int J Engineering Optimization*, 1986, 10(3): 183—197.
- [28] Duan B Y, Templeman A B, Chen J J. Entropy-based method for topological optimization of truss structures. *Int J Computers & Structures*, 2000, 75(5): 539—550.
- [29] Chen J J, Duan B Y. Structural optimization by displaying the reliability constraints. *Int J Computers & Structures*, 1994, 50(6): 777—783.
- [30] Duan B Y, Templeman A B, Chen J J. Entropy-based method for topological optimization of truss structures. *Int. J. Computers & Structures*, 2000, 75(6): 539—550.
- [31] 段宝岩, 张劲柏. 基于可视化的工程结构优化设计. 计算力学学报, 2001, 18(4): 435—442.
- [32] Duan B Y, Ye S H. Study on topology optimization of truss structures under multiple loading conditions with nonlinear behavior constraints. *Civil-Comp Press, U. K.*, 1996.
- [33] Toumi K Y. Modeling, design and control integration: A necessary step in mechatronics. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 1996, 1(1): 29—37.
- [34] Onoda J, Haftka R T. An approach to structure/control simultaneous optimization for large flexible spacecraft. *AIAA Journal*, 1987, 25(8): 1133—1138.
- [35] Rao S S. Combined structural and control optimization of flexible structures. *Engineering Optimization*, 1988, 13: 1—16.
- [36] Yamakaya H. A unified method for combined structural and control optimization of nonlinear mechanical and structural systems. *Computer Aided Optimum Design of Structures*, 1989, 287—298.
- [37] Reyer J A, Fathy H K, Papalambros P Y. Comparison of combined embodiment design of control optimization strategies using optimality conditions. *ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, September 9—12, 2001, Pittsburgh, Pennsylvania, New York; ASME, 2001; 1—10.
- [38] Reyer J A, Papalambros P Y. Combined optimal design and control with application to an electric DC motor. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124(6): 183—191.
- [39] Wu F X, Zhang W J, Li Q, et al. Integrated design and PD control of high-speed closed-loop mechanisms. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2002, 124: 522—528.
- [40] 姚燕安, 查建中, 颜鸿森. 机构与控制的协同设计. 机械工程学报, 2004, 40(10): 1—5.
- [41] 谢进, 魏宏, 阎开印, 等. 混合驱动连杆机构的串行和并行设计. 机械工程学报, 2007, 43(9): 179—184.
- [42] 王其东, 姜武华, 陈无畏, 等. 主动悬架和电动助力转向系统机械与控制参数集成优化. 机械工程学报, 2008, 44(8): 67—72.
- [43] 李素兰, 黄进, 段宝岩. 一种雷达天线伺服系统结构与控制的集成设计研究. 机械工程学报, 2010, 46(19): 140—146.
- [44] 保宏, 段宝岩, 杜敬利等. 复杂机构的控制与结构同步优化设计. 计算力学学报, 2008, 25(1): 8—13.
- [45] 周金柱, 段宝岩, 黄进等. 伺服系统摩擦的支持向量回归建模与反步控制. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1405—1409.
- [46] 周金柱, 段宝岩, 黄进. 含有齿隙伺服系统的建模与对开环频率特性的影响. 中国机械工程, 2009, 20(14): 1721—1725.
- [47] Zhou J Z, Duan B Y, Huang J. Adaptive control of servo systems with uncertainties using self-recurrent wavelet neural networks. 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 18—21, Jinan, China.
- [48] 马艳玲, 黄进, 张丹. 基于反步自适应控制的伺服系统齿隙补偿. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1090—1094.
- [49] Huang J, Li C, Duan B Y. Adaptive backstepping integral control of servo systems with backlash. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, 225(8): 1149—1162.
- [50] Tong X F, Huang J, Zhang D X. Multidisciplinary joint simulation technology for servo mechanism analysis. 2009 IEEE International Conference on Information and Automation, June 22—25, 2009, Zhuhai, China.
- [51] 李正大, 陈光达, 马洪波. 结构因素对雷达伺服系统性能影响及其测试技术研究. 现代电子技术, 2008, 31(3): 33—36.
- [52] 段宝岩, 宋立伟. 电子装备机电热多场耦合问题初探. 电子机械工程, 2008, 24(3): 1—7+46.
- [53] 段宝岩, 宋立伟. 电子装备多物理场的建模与求解. 庆祝中国力学学会成立50周年暨中国力学学会学术大会, 2007.
- [54] Duan B Y. Analysis and optimization design of multi-field coupling problem in electronic equipments. *International Workshop 2007: Advancements in Design Optimization of Materials, Structures and Mechanical Systems*, 17—20 December 2007, Xi'an, China, 252—261.
- [55] Wang C S, Duan B Y. Electromechanical coupling model of electronic equipment and its applications. 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2010), August 4—7, 2010, Xi'an, China.
- [56] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [57] Wang C S, Duan B Y, Zhang F S, et al. Coupled structural-electromagnetic-thermal modelling and analysis of active phased array antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2010, 4(2): 247—257.
- [58] Wang C S, Duan B Y, Zhang F S, et al. Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error. *International Journal of Electronics*, 2009, 96(5): 549—559.
- [59] Wang C S, Bao H, Zhang F S, et al. Analysis of electrical performances of planar active phased array antennas with distorted array plane. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(4): 726—731.
- [60] 王从思, 康明魁, 王伟, 普涛. 结构变形对相控阵天线电性能的影响分析. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1644—1649.

## Electromechanical Coupling of High Accuracy Electronic Equipments: A Review

Wang Guobiao<sup>1</sup> Duan Baoyan<sup>2</sup> Li Ming<sup>1</sup> Song Jianli<sup>1</sup>

Lai Yinan<sup>1</sup> Huang Jin<sup>2</sup> Wang Congsi<sup>2</sup>

(1 Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;

2 Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design (Xidian University), Ministry of Education, Xi'an 710071)

**Abstract** Design theory and methodologies for electromechanical coupling problems on high accuracy electronic equipments is one of the research hotspots in the field of discipline-crossing. Focused on this theme, combined with the key national needs, and the topics of the 94th ShuangQing Forum of National Natural Science Foundation of China, the challenges to national defense, economy, social and discipline development in the field of electromechanical coupling of electronic equipments are analyzed. Main research contents, hotspots and development trends in this field have been discussed, and priority funding suggestions in the future 3–5 years have also been proposed.

**Key words** ShuangQing Forum, discipline-crossing, electronic equipments, electromechanical coupling

### · 资料信息 ·

#### 2014 年度国家自然科学基金项目申请数量前 20 位的依托单位: 申请总量

排序	依托单位名称	申请项目 总数	面上项目	青年基金	重点项目	杰出青年 基金	优秀青年 基金	创新研究 群体	地区科学 基金
1	上海交通大学	2877	1393	1089	129	58	98	11	0
2	华中科技大学	2112	947	959	46	34	59	5	0
3	浙江大学	2086	1038	673	86	67	138	7	0
4	复旦大学	1838	849	712	65	56	77	11	0
5	北京大学	1599	781	439	81	83	108	15	0
6	同济大学	1500	768	548	36	32	56	1	0
7	山东大学	1470	717	614	23	35	33	1	0
8	中山大学	1430	738	483	55	33	61	3	0
9	中南大学	1382	643	636	25	18	26	1	0
10	武汉大学	1372	668	533	56	29	48	2	0
11	吉林大学	1329	576	635	34	19	39	1	0
12	四川大学	1314	583	559	47	30	53	1	0
13	清华大学	1246	596	270	82	79	123	6	0
14	西安交通大学	1177	515	515	43	20	41	1	0
15	苏州大学	1115	445	542	24	18	54	2	0
16	哈尔滨工业大学	1003	517	370	25	23	41	1	0
17	首都医科大学	996	481	467	14	5	10	1	0
18	郑州大学	972	375	393	5	1	2	0	0
19	中国人民解放军 第二军医大学	944	413	452	30	9	21	1	0
20	南昌大学	936	124	158	6	6	7	0	628
申请量前 20 位单位项数 及所占比例		28 698 18.95%	13 167 22.25%	11 047 16.99%	912 30.15%	655 32.23%	1095 33.04%	71 27.10%	628 4.82%
申请量前 100 位单位项 数及所占比例		68 823 45.44%	30 139 50.94%	26 932 41.42%	1838 60.76%	1277 62.84%	2195 66.23%	159 60.69%	3502 26.88%
申请量前 200 位单位项 数及所占比例		93 215 61.55%	38 927 65.79%	37 204 57.22%	2180 72.07%	1506 74.11%	2542 76.70%	182 69.47%	7122 54.66%

(张丽萍、李东 供稿)