评述

电子装备机电耦合研究的现状与发展

段宝岩^{①②}^① 电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071^② 西安电子科技大学机电科技研究所, 西安 710071

E-mail: byduan@xidian.edu.cn

收稿日期: 2014–10–16; 接受日期: 2014–11–20; 网络出版日期: 2015–02–06

国家自然科学基金(批准号: 51490661)资助项目

摘要 高精度电子装备被广泛应用于陆、海、空、天等各个领域. 针对高性能、高精度电子装备中普遍存在的机电耦合问题, 本文系统地介绍了国内外电子装备研制的机电分离、机电综合与机电耦合三个阶段的情况, 重点讨论了机电耦合的概念、理论与方法, 进而阐述了机电耦合研究的现状与内涵、主要进展、研究内容、研究热点及发展趋势.

关键词 电子装备 机电分离 机电综合 机电耦合 机电热场耦合 影响机理

1 引言

高性能复杂机电装备在我国国防建设、民用工业、高新技术等领域应用广泛, 其技术水平是国家整体科技水平的重要体现. 机电装备离不开机与电, 按照两者之间的关系可分为两大类, 一是以机械为主, 电服务于机, 如数控机床、汽轮机等, 即应用电子信息技术来提升传统机械的性能, 使机械执行系统更精密、更高效、更智能; 二是以电性能为主, 机服务于电, 如微波天线(微波反射面天线、有源相控阵天线)、导弹天线罩、光学望远镜等(图1), 其机械结构用于保障特定电磁性能的实现.

电子装备是一个机电结合的系统, 其特点是机电耦合, 即机械结构(包括热)与电磁之间存在着相互影响、相互依存的关系^[1]. 高精度电子装备电性能的成功实现不仅依赖于机械、电磁、传热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. 遗憾的是, 传统设计中, 机械结构与电磁设计却是分离进行的, 电磁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这一要求, 带有较大的盲目性. 这就带来两个问题: 一是电设计人员提出的设计与制造精度太高, 往往超出机械结构设计制造的能力; 二是有时机械结构精度要求满足了, 而电性能却不满足. 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问题的研究具有重要的理论意义和广阔的应用前景.

高精度、高性能电子装备设计的发展, 主要经历了机电分离、综合与耦合三个阶段. 1980年以前, 电子装备的工作频段较低, 传统的分离设计可以满足要求, 可称为昨天. 第二阶段约为1980–2010年代, 随着工作频段的提高, 机电之间的相互影响明显了, 机电分离设计遇到的问题越来越多, 无法满足要求, 于是, 出现了机电综合设计. 2010年以后, 不仅工作频段进一步提高, 带宽加大, 而且组装密度越

引用格式: 段宝岩. 电子装备机电耦合研究的现状与发展. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 299–312, doi: 10.1360/N112014-00307

图 1 四类典型复杂电子装备. (a) 上海 65 m 口径射电天文望远镜; (b) 空空导弹及天线罩; (c) 哈勃太空望远镜光学镜面; (d) 远程反导预警雷达

Figure 1 Several typical complicated electronic equipments. (a) Shanghai 65 m diameter radio telescope; (b) air-to-air missile and radome; (c) the Hubble space telescope optical lens; (d) remote anti-missile early warning radar

来越高、体积越来越小. 这使得机电之间的联系和影响变得更为紧密, 呈现出紧耦合的特征. 于是, 进入到机电耦合设计的新阶段.

2 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、不可替代的作用, 但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微波馈线系统、雷达天线伺服系统、通信系统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%^[2]. 以下从三个方面加以分析.

2.1 高精度电子装备设计存在的问题

虽然关于电子装备存在的问题很早就已被认识到, 且一直进行着研究, 但始终未从根本上解决问题. 关键之处在于尚未从根本上发现或找到机电之间的影响规律、耦合机理, 当然也未曾建立机电之间的耦合模型并提出耦合设计的理论与方法. 这就导致高性能电子装备的设计多处于分离、凭经验进行的层面.

以某机载火控雷达平板裂缝天线为例, 根据现有电磁理论分析, 我国所要求的制造精度为: 波导槽、缝槽及辐射缝偏心尺寸公差 $\pm 0.02 \sim \pm 0.03$ mm, 而俄罗斯的公差要求为 ± 0.05 mm, 但俄罗斯研制的天线电性能却与我国的相当. 因我国平板裂缝天线制造过程复杂、工艺难度大, 使得产品研制周期

长、合格率低且成本高昂. 又如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来实现 500 个频率点的准确定位的, 对其结构精度 (如光洁度、不垂直度等) 要求甚高. 而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.

2.2 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是: 高频段、高增益, 高密度、小型化、快响应、高指向精度.

如为实施萤火计划研制的 35 m 口径 S/X/Ka 三波段反射面天线的增益要求达到 77 dB, 这就要求天线具有很高的反射面形面精度 (r.m.s. 0.3 mm) 和较高的发射功率. 其设计存在两个难点: 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; 二是机电耦合, 即如何设计结构来保证电性能. 显然, 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、子系统的密度越来越高, 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, 为实现同时对数百个目标的跟踪, 需采用上千个 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, 每个组件封装在一元硬币大小的模块中, 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 10~1000 W/cm².

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要求. 因此, 研制中必须突破隔振、轻量化及快速跟踪等难点.

可见, 上述现代电子装备的三大发展趋势使得传统的机电分离设计问题日益突出.

2.3 高精度电子装备的研究意义

高精度电子装备属国家重大需求, 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、安全性与可靠性意义重大. 在下一代预警机、无人机、大飞机、深空探测、载人航天、深空探测器、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关系紧密的科学与技术问题亟待解决, 迫切需要继续深入、系统地开展机电耦合方面的基础与应用基础研究.

高精度电子装备机电耦合理论的突破, 可望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, 已成为一个长期制约电子装备性能提高并影响下一代装备研制的瓶颈问题. 因此, 迫切需要深入开展电子装备机电耦合的基础研究和关键技术攻关.

3 电子装备机电耦合研究的现状与内涵

如上所述, 电子装备是以电磁信号的发射、接收、传输、处理及显示等为目标, 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极高的机械结构精度, 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.

3.1 部件级

国外对部件级电子装备的机电耦合问题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 点.

(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, 取决于机电耦合系数. 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, 即机械能的传输效率会影响换能器的带宽^[3].

(2) 磁通感应加热设备: 主要是如何对感应器进行优化设计. 首先, 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^[4].

(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^[5].

(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^[6].

3.2 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. 如对通信卫星天线而言, 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^[7]. 对柔性卫星天线而言, 热作为外载荷, 应用机电热综合优化方法, 以电性能指标为约束, 通过优化结构布局来提高天线的电与结构性能^[8]. 对设备的热场分布而言, 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设计, 并通过实验测试给出相应问题的解决策略^[9].

3.3 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, 有代表性的包括:

(1) 双反射面天线副面撑腿: 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^[10].

(2) 馈源相位中心: 基于反射面天线馈源相位中心的概念, 通过优选结构尺寸来达到提高变形反射面天线电性能的目的^[11].

(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^[12].

(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近似公式, 进行以结构重量和副瓣电平为目标的机电综合优化设计^[13].

自 20 世纪 60 年代, 我国工程技术人员在实践中发现, 电子装备电磁性能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又时常会发现, 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得到保留和传播.

综上所述, 国际上在部件级机电耦合研究方面有较深入研究, 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综合设计方法上有初步研究. 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.

4 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研究的内涵丰富, 不仅涉及机械结构、电磁、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, 下面就微波天线、雷达天线伺服系统、高密度组装系统等三类典型电子装备机电耦合研究进展加以阐述.

4.1 微波天线的机电热耦合问题

工作于微波波段及以上的天线包括各种大型射电望远镜、大中型反射面天线、平板裂缝天线、有源相控阵天线、空间可展开天线等. 微波天线本身不仅存在着明显的机电耦合问题, 而且其恶劣的服役环境, 如随机风荷、振动冲击 (车载、舰载、机载、弹载、箭载、星载等)、太阳照射 (均匀、不均匀、大温差等)、冰雪雹等多种典型服役环境, 又使这种耦合问题更为突出.

大型反射面天线主要存在两个问题: 一是机电耦合设计, 二是反射面在不同仰角姿态下的保型问题. 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制造的天线往往不能满足需要, 所以必须考虑不确定因素的影响 (图 2). 更为重要的是, 随着天线工作频段的提高, 结构与电磁设计已密不可分, 必须探明结构误差 (系统与随机) 与电性能的内在关系, 进而提出旨在实现天线电磁与结构性能全优的机电综合设计的理论与方法. 另外, 反射面保型要求天线在不同仰角 α 时始终为一同族抛物面 (图 3), 这对小口径天线比较容易实现, 而对大口径反射面天线而言, 是相当困难的, 因为要在成千上万的构件尺寸、节点坐标及拓扑变量中寻求最优解, 且是多工况, 还必须保证一次成功, 显然, 系统优化设计是唯一出路.

早在 20 世纪 60 年代, 天线设计工作者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进行结构参数对天线电性能影响的研究. 在此期间取得了一些有益的成果, 如提出了最佳吻合抛物面的概念, 并于 20 世纪 80 年代出版了有关天线的专著, 内容涵盖了天线电磁设计^[14~16]、结构设计^[17]以及天线座的伺服系统设计^[18]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.

进入新世纪, 研究人员在最佳吻合抛物面、反射面保型设计理论及机电综合设计的基础上, 发现

图 2 反射面天线结构变形对电性能影响

Figure 2 Reflector antenna structure's deformation effects on electrical performance

图 3 不同仰角下的变形反射面

Figure 3 Deformed reflector under different elevations

电性能与结构设计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 [19~26] 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; 与著名的 Ruze 公式相比, 该模型可在相同电性能指标要求时, 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电性能.

对反射面天线而言, 为观测不同的目标, 天线须在不同的仰角下工作, 故存在多工况问题, 即在不同的仰角工况都能满足电性能, 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, 已系统开展了多方面的研究工作. 如在形状优化方面, 提出了形状优化混合法, 解决了 Hessian 阵奇异化问题 [27]. 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, 并拓宽了结构优化的范畴 [28]. 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 [29]. 其他方面的研究工作, 还有大系统优化 [30]、可视化优化 [31] 及两态动力优化 (星载可展开天线) [32] 等. 上述工作, 初步形成了我国微波天线机电综合设计的学科

体系.

在此基础上, 将上述机电耦合理论推广到其他领域, 如平板裂缝阵天线、有源相控阵天线、微波馈线、高密度电子装备等, 将会把电子装备的设计水平推向一个新的高度.

4.2 雷达天线伺服系统中控制与结构的耦合问题

雷达天线具有快响应、高指向精度的要求, 为满足这些指标要求, 就需要进行伺服系统的结构与控制的集成设计, 而首要的是探明两者之间的耦合关系. 结构与控制集成设计的研究始于 20 世纪 80 年代^[33], 主要集中在如下三个方面: (1) 太空系统结构与控制的集成设计^[34~36], 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, 但不适于可变结构 (或机构) 问题. (2) 直流电动机的结构与控制集成设计问题^[37~38], 以直流电动机为例, 从状态空间模型入手, 研究结构和控制之间的相互作用关系, 进而实现集成设计. 遗憾的是, 对于复杂机构来说, 其状态空间模型不易获得. (3) 机构与控制的集成 (或协同、并行) 设计问题^[39~42], 根据集成理念来设计机构. 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之一, 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, 结构与控制的集成设计是十分必要的.

然而, 传统的雷达天线伺服系统设计中, 往往将结构和控制分别、单独设计. 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. 文献^[43~51]以控制增益因子、结构尺寸、传动比为设计变量, 以结构重量、跟踪精度及控制能量为目标函数, 以稳定性、跟踪性能指标及许用应力等为约束, 系统地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.

4.3 高密度组装系统机、电、热耦合问题

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 4), 其结构设计、电磁设计、热设计之间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场的分布, 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. 其次, 电子装备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, 温度场的变化还会导致电子装备结构位移场的变化, 进而影响电磁场. 再者, 对于高功率微波传输问题, 除上述问题外, 还存在这样的问题, 即电磁场对结构位移场、温度场的影响. 这就是电子装备结构位移场与电磁场、温度场 (机电热) 之间的相互场耦合关系^[52,53].

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, 其设计的三个主要方面 (结构刚/强度、通风散热及电磁兼容) 之间存在相互矛盾. 具体体现在: 质量和刚度的矛盾, 即结构刚强度要求高, 要求能在各种工况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. 其次, 电磁屏

图 4 电子装备机电热场耦合关系图

Figure 4 Electronic equipment's structural-thermal-electric coupled field

效和通风散热的矛盾, 即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、电磁兼容和散热温控三方面的要求.

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三方面的要求, 给出各自设计方案, 由于出发点不同, 方案之间往往会发生冲突. 这就需要设计人员根据经验进行平衡与取舍, 以得出可行的设计方案. 在工作频段不高, 体积与密度要求不苛刻时, 这种方法尚可. 而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] 从多场耦合的角度出发, 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优势, 是一类具有广阔发展前景的天线, 已成为今后战略预警、战术攻防以及通信、遥感等领域中的核心装备之一 [56]. 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, 甚至报废. 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/相的影响, 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, 可降低对冷却系统、结构加工精度、焊接精度以及装配精度的要求. 而在相同冷却系统参数和结构精度要求下, 可提高冷却效率, 降低对结构重量、环控要求, 提高有源相控阵天线的综合性能.

5 高精度电子装备发展趋势

随着电子技术、信息技术、材料、工艺等学科快速发展, 高精度电子装备下一步的发展趋势是 [61]:

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宽频带, 如要求某大型射电望远镜的工作频率从 200 MHz 到 117 GHz, 甚至更宽; 多波段, 如要求同一天线可工作在多个波段上; 高功率, 如高功率微波传输、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. 这三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

目前, 电子装备向着体积更小、密度更大的方向发展, 如组装的密度越来越高, 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. 如射频系统的尺寸已由 2000 年的 0.03 m^3 减小到目前的 0.01 m^3 , 预计到 2015 年将达到 0.001 m^3 , 急剧增加的密度将使机电耦合问题更为突出.

5) 快响应、高指向精度

对装备的机动性与响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, 某舰载近程反导武器系统的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布式天线. 所谓共形天线就是指将天线阵面做得与飞机外形的形状相同, 而分布式天线则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, 要求太空可展开天线, 具有大口径、高收缩比、高频段、高增益、大带宽等特点.

为适应上述发展需求, 急需深入进行机电耦合理论、方法及综合设计平台的研究、并拓宽其应用领域、提升应用层面. 如太空环境会带来新的问题, 更高频段 (如太赫兹) 会使频率敏感问题更加突出, 高密度装联会导致问题进一步复杂, 这些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理论与方法, 突破关键技术是亟待解决的重要问题.

为此, 亟待开展下面几个理论问题的研究:

(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. 具体为:

(a) 高精度电子装备的多场耦合建模

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.

(b) 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机理, 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.

(c) 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.

(2) 多工况、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、电关系描述的部分, 分析多种工况下机械结构因素 (结构参数、制造精度) 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. 如:

(a) 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) 的机械结构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.

(b) 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况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.

(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、传热等各部分在内的综合设计, 统筹考虑硬件集成、信息集成及功能集成.

6 结束语

复杂高精度高性能电子装备是一种机电热等多学科结合的复杂系统, 机械结构不仅是电性能实现的载体和保障, 而且往往制约着电性能的实现.

关于电子装备机电耦合问题的研究, 已经取得了可喜的进展, 并得到了一些满意的成果, 如微波天线的场耦合理论模型的建立、雷达天线伺服系统与控制集成设计理论与方法的提出、高密度组装系统机电热集成设计方法的出现以及机电热综合设计软件平台的研制成功等等.

但是, 上述工作仅仅是开始, 还有更深入、更艰巨的工作需要继续攻关, 如极高频段、极端环境下电子装备机电耦合问题、路耦合问题、多尺度问题等等.

显然, 高性能高精度电子装备机电耦合问题研究具有国家重大战略需求明确、多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. 为此, 我国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, 探明电子装备多场、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理论和设计方法体系, 为我国下一代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。

致谢 作者十分感谢黄进、王从思、王伟等同志的合作, 另外还要特别感谢王国彪、黎明等同志以不同方式提供的帮助。

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 西安电子科技大学, 中国电子科技集团公司. 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, 2006
- 3 Yaralioglu G G, Ergun A S, Bagram B, et al. Calculation and measurement of electromechanical coupling coefficient of capacitive micromachined ultrasonic transducers. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Frequency Contr*, 2003, 50: 449–456
- 4 Dughiero F. Numerical and experimental analysis of an electro-thermal coupled problem for transverse flux induction heating equipment. *IEEE Trans Magnet*, 1998, 34: 35–46
- 5 Pham T H, Wending P F, Salon S J. Transient finite element analysis of an induction motor with external circuit connections and electromechanical coupling. *IEEE Trans Energy Convers*, 1999, 14: 1407–1412
- 6 Amari S, Vahldiech R, Bornemann J. Analysis of propagation in corrugated waveguides with arbitrary corrugation profile. In: *IEEE AP-S Int Symp, Orlando*, 1999. 290–293
- 7 Suzuki Y, Harada S. Deformed Antenna Pattern Compensation Method for Onboard Multi-Beam Antennas. In: *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2006
- 8 Adelman H M, Padula S L. Integrated thermal-structural-electromagnetic design optimization of large space antenna reflectors. *NASA Technical Memorandum*, 87713
- 9 Price D C. A review of selected thermal management solutions for military electronic systems. *IEEE Trans Component Packag Technol*, 2003, 26: 26–39
- 10 Liu J S, Zeng Y G. Electromechanical synthetic optimization of antenna's subreflector support structures. *J Commun*, 1988, 9: 60–63 [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: 60–63]
- 11 Xu G H, Qi Y H, Duan B Y, et al. Study on feeds phase center of reflector antennas. *Acta Electron Sin*, 1990, 18: 88–92 [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: 88–92]
- 12 Zhang X Q, Feng X M. Analysis of surface planeness error of slotted waveguide phased array. *Fire Control Radar Technol*, 2000, 29: 15–19 [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: 15–19]
- 13 Tang B F, Shu X R. An optimal mechanical and electrical integrated design for structure of low sidelobe phased array antenna. *Modern Radar*, 2005, 27: 67–70 [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: 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 朱钟淦, 叶尚辉. 天线结构设计. 北京: 国防工业出版社, 1980
- 19 Duan B Y, Qi Y H. Study on optimization of mechanical and electronic syntheses for antenna structures. *Int J Mechatr*, 1994, 4: 553–564
- 20 Duan B Y, Wang C S. Reflector antenna distortion analysis using MEFCM. *IEEE Trans Anten Propag*, 2009, 57: 3409–3413
- 21 Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas. *Int J Struct Multidisc Optimiz*, 2007, 33: 519–528
- 22 Song L W. The effect of surface error on reflector antenna performance. *Acta Electron Sin*, 2009, 37: 552–556 [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: 552–556]
- 23 Song L W. Effect of reflector errors and phase center errors of feed on the far-field pattern of reflector antennas. *Syst*

- Engineer Electron, 2009, 31: 1269–1274 [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: 1269–1274]
- 24 Ma H B, Duan B Y, Wang C S. Deformed reflector antenna with random factors and integrated design with mechanical and electronic syntheses. Chin J Radio Sci, 2009, 24: 1065–1070 [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: 1065–1070]
- 25 Wang W, Duan B Y, Ma B Y. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application. Acta Electron Sin, 2008, 36: 1114–1118 [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: 1114–1118]
- 26 Wang W, Duan B Y, Ma B Y. Gravity deformation and best rigging angle for surface adjustment of large reflector antennas. Chin J Radio Sci, 2008, 23: 645–650, 698 [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: 645–650, 698]
- 27 Duan B Y, Ye S H. A mixed method for shape optimization of skeletal structures. Int J Engineer Optimiz, 1986, 10: 183–197
- 28 Duan B Y, Templeman A B, Chen J J. Entropy-based method for topological optimization of truss structures. Int J Comput Struct, 2000, 75: 539–550
- 29 Chen J J, Duan B Y. Structural optimization by displaying the reliability constraint. Int J Comput Struct, 1994, 50: 777–783
- 30 Duan B Y, Templeman A B, Chen J J. Entropy-based method for topological optimization of truss structures. Int J Comput Struct, 2000, 75: 539–550
- 31 Duan B Y, Zhang J S. Scientific visualization and optimum design of engineering structures. Chin J Comput Mech, 2001, 18: 435–442 [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: 435–442]
- 32 Duan B Y, Ye S H. Study on Topology Optimization of Truss Structures Under Multiple Loading Conditions With Nonlinear Behavior Constraints. London: Civil-Comp Press, 1996
- 33 Toumi K Y. Modeling, design and control integration: A necessary step in mechatronics. IEEE/ASME Trans Mechatron, 1996, 1: 29–37
- 34 Onoda J, Haftka R T. An approach to structure/control simultaneous optimization for large flexible spacecraft. AIAA Journal, 1987, 25: 1133–1138
- 35 Rao S S. Combined structural and control optimization of flexible structures. Engineer Optimiz, 1988, 13: 1–16
- 36 Yamakaya H. A unified method for combined structural and control optimization of nonlinear mechanical and structural systems. Comput Aided Optimum Des Struct, 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. In: ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2001. Pittsburgh, Pennsylvania. New York: ASME, 2001, 2001: 1–10
- 38 Reyer J A, Papalambros P Y. Combined optimal design and control with application to an electric DC motor. J Mechan Des, 2002, 124: 183–191
- 39 Wu F X, Zhang W J, Li Q, et al. Integrated design and PD control of high-speed closed-loop mechanisms. J Dynam Syst Measure Contr, 2002, 124: 522–528
- 40 Yao Y A, Cha J Z, Yan H S. Co-design of mechanism and control. Chin J Mech Engineer, 2004, 40: 1–5 [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: 1–5]
- 41 Xie J, Wei H, Yan K Y, et al. Sequential and Concurrent Design of Linkages Mechanism with Hybrid Actuators. Chin J Mech Engineer, 2007, 43: 179–184 [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: 179–184]
- 42 Wang Q D, Jiang W H, Chen W W, et al. Simultaneous optimization of mechanical and control parameters for integrated control system of active suspension and electric power steering. Chin J Mech Engineer, 2008, 44: 67–72 [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: 67–72]
- 43 Li S L, Huang J, Duan B Y. Integrated design of structure and control for radar antenna servo-mechanism. Chin J Mech Engineer, 2010, 46: 140–146 [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: 140–146]
- 44 Bao H, Duan B Y, Du J L, et al. Simultaneous optimization of control and structural systems of a complex machine.

- Chin J Comput Mech, 2008, 25: 8–13 [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: 8–13]
- 45 Zhou J Z, Duan B Y, Huang J, et al. Support vector regression modeling and backstepping control of friction in servo system. *Contr Theory Appl*, 2009, 26: 1405–1409 [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: 1405–1409]
 - 46 Zhou J Z, Duan B Y, Huang J. Modeling and effects on open-loop frequency for servo systems with backlash. *China Mech Engineer*, 2009, 20: 1721–1725 [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: 1721–1725]
 - 47 Zhou J Z, Duan B Y, Huang J. Adaptive control of servo systems with uncertainties using self-recurrent wavelet neural networks. In: *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, 2007
 - 48 Ma Y L, Huang J, Zhang D. Backlash compensation in servo systems based on adaptive backstepping-control. *Contr Theory Appl*, 2008, 25: 1090–1094 [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: 1090–1094]
 - 49 Huang J, Li C, Duan B Y. Adaptive backstepping integral control of servo systems with backlash. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I. J Syst Contr Engineer*, 2011, 225: 1149–1162
 - 50 Tong X F, Huang J, Zhang D X. Multidisciplinary joint simulation technology for servo mechanism analysis. In: *IEEE International Conference on Information and Automation*, Zhuhai, 2009
 - 51 Li Z D, Chen G D, Ma H B. Structure factor to radar servo system performance influence and its test research. *Modern Electron Technol*, 2008, 31: 33–36 [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: 33–36]
 - 52 Duan B Y, Song L W. On coupled multi-field problems in electronic equipments. *Electro-Mechanical Engineering*, 2008, 24: 1–7, 46 [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: 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论文集, 2007
 - 54 Duan B Y. Analysis and optimization design of multi-field coupling problem in electronic equipments. In: *International Workshop 2007: Advancements in Design Optimization of Materials, Structures and Mechanical Systems*, Xi'an, 2007. 252–261
 - 55 Wang C S, Duan B Y. Electromechanical coupling model of electronic equipment and its applications. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Xi'an, 2010
 - 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 Microw Anten Propag*, 2010, 4: 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. *Int J Electron*, 2009, 96: 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. *J Syst Engineer Electron*, 2009, 20: 726–731
 - 60 Wang C S, Kang M K, Wang W, et al. Analysis of electrical performances of phased array antennas with structural deformations. *Syst Engineer Electron*, 2013, 35: 1644–1649 [王从思, 康明魁, 王伟, 等. 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: 1644–1649]
 - 61 Wang G B, Duan B Y, Li M, et al. Electromechanical coupling of high accuracy electronic equipments: A Review. *Science Foundation in China*, 2014 [王国彪, 段宝岩, 黎明, 等. 高精度电子装备机电耦合研究进展, 中国科学基金, 2014]

Review of electromechanical coupling of electronic equipment

DUAN BaoYan^{1,2}

1 Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xi'an 710071, China;

2 Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071, China

E-mail: byduan@xidian.edu.cn

Abstract High-performance and highly accurate electronic equipment are utilized in various areas on land, in the sea, in the air, and in outer space. As a prelude to exploring the electromechanical coupling problem in electronic equipment, this paper first gives a broad overview of the state-of-the-art in electronic equipment, including concept, theory, and methodology, problem areas, hot spots, research progress, and new trends in the field. Consequently, typical examples of electronic equipment are discussed, including the microwave reflector antenna, plate-slot array antenna, active phased array antenna, and high density chassis.

Keywords electronic equipment, electromechanical separation, electromechanical integration, electromechanical coupling, thermal and electromagnetic field-coupling, influencing mechanism

DUAN BaoYan an academician at the Chinese Academy of Engineering, was born in 1955. He received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Xidian University, Xi'an, China, in 1981, 1984, and 1989, respectively. From 1991 to 1994, he was a postdoctoral fellow at the University of Liverpool, U.K., and a research fellow at Hokkaido University, Japan. He was also a visiting scientist at Cornell University, Ithaca, N.Y., in 2000. He is currently a full professor in the School of Electromechanical Engineering, Xidian University where he founded the Laboratory of Electronic Equipment Structures Design. His current research interests include mechatronics, electromechanical coupling theory and application, engineering structural optimization, and CAD/CAE. He has published four books, and has served as the first author or coauthor for over 180 papers.