

# 迈向机电耦合的机电一体化技术

高精度、高性能复杂机电装备被广泛应用于国防建设、国民经济、高新技术等重要领域,其设计与制造水平是国家整体科技水平与实力的重要体现。复杂机电装备主要包括两大类:一类是以机械性能为主,电性能服务于机械性能的机电装备,如大型数控机床、加工中心等加工装备,以及兵器、化工、船舶、农业、能源、挖掘与掘进等行业重大装备,主要是运用电子信息技术来改造、武装、提升传统装备的机械性能。另一类则是以电性能为主,机械性能服务于电性能的电子装备,如雷达、通信、计算机、导航、天线、射电望远镜等,其机械结构主要用于保障特定电磁性能的实现,被广泛应用于陆、海、空、天等各个关键领域,发挥着不可替代的作用。

这两大类装备从广义上讲,均属于机电结合的复杂装备,是机电一体化技术重点应用的典型代表。机电一体化(Mechatronics)概念,最早出现于20世纪70年代,其英文是将Mechanical与Electronics两个词掐头去尾组合而成,体现了机械与电磁(气)技术不断融合的内涵演进和发展趋势。

伴随着机电一体化技术的发展,相继出现了诸如机-电-液一体化、流-固-气一体化、生物-



段宝岩,电子机械工程专家,中国工程院院士,现任西安电子科技大学电子机械学科教授。曾任西安电子科技大学校长。主要研究方向为交叉学科—电子装备机电耦合技术等。

电磁一体化等概念,虽然说法不同,但实质上基本还是机电一体化,目的都是研究不同物理系统或物理场之间的相互关系,从而提高系统或设备的整体性能。

高性能复杂机电装备的机电一体化设计从出现至今,经历了机电分离、机电综合、机电耦合三个不同的发展阶段。在高精度与高性能电子装备的发展上,这三个阶段的特征体现得尤为突出。

机电分离(independent between mechanical and electronic technologies, IMET),指电子装备的机械结构与电磁设计分开、独立进行,但彼此间的信息可实现在(离)线传递、共享,即机械结构、电磁性能的设计仍在各自领域独立进行,但

在边界或域内可实现信息的共享与有效传递,例如反射面天线的结构与电磁、有源相控阵天线的电磁-结构-温度等。

需要指出的是,这种信息共享在设计层面上仍是机电分离的,故传统分离设计固有的诸多问题依然存在,最明显的有两点:一是电磁设计人员提出的对机械结构与制造精度的要求往往太高,时常超出机械的制造加工能力,而机械结构技术人员因缺乏对电磁知识的深入了解,只能千方百计地设法去满足,带有一定的盲目性。二是工程实际中,有时会出现奇怪的现象,即机械结构技术人员费了九牛二虎之力制造出的产品,电性能又时常出现不满足的情况。相反,机械制造精度未达要求的产品,电性能又是满足的。原因何在,知其然而不知其所以然。因此,实际工程中,只好采用备份的办法,最后由电调来决定选用哪一个。这两个问题的长期存在,导致电子装备研制的性能低、周期长、成本高、结构笨重,成为长期制约电子装备性能提升并影响下一代装备研制推进的一个悬而未决的制约瓶颈。

随着电子装备工作频段的不断提高,机电之间的相互影响愈发明显,机电分离设计遇到的问题愈来愈多,矛盾也愈发突出。

于是,机电综合(syntheses between mechanical and electronic technologies, SMET)的设计概念出现了。机电综合是机电一体化的较高层次,它比机电分离前进了一大步,主要表现在两个方面:一是建立了同时考虑机械、电磁、热等性能的综合设计的数学模型,可在设计阶段有效消除某些缺陷与不足。二是建立了一体化的有限元分析模型,如在高密度机箱机柜分析中,可共享相同几何空间的电磁、结构、温度的数值分析模型。

21世纪初以来,电子装备呈现出高频段、高增益,高密度、小型化,快响应、高指向精度的发展趋势,机电之间呈现出强耦合的特征。于是,机电一体化迈入了机电耦合(coupling between mechanical and electronic technologies, CMET)的新阶段。

机电耦合,是比机电综合更进一步的理性机电一体化,其特点主要包括两点:一是分析中不仅可实现机械、电磁、热的自动数值分析与仿真,且可保证不同学科间信息传递的完备性、准确性与可靠性。二是从数学上导出了基于物理量耦合的多物理系统的耦合理论模型,探明了非线性机械结构因素对电性能的影响机理。设计是基于该耦合理论模型和影响机理的机电耦合设计。可见,机电耦合与机电综合相比具有本质不同,有了质的飞跃。

从机电分离、机电综合到机

电耦合,机电一体化技术发生了鲜明的代际演进,为高端装备设计与制造提供了理论与关键技术支撑,而复杂装备制造的未来发展,将不断趋于多物理场、多介质、多尺度、多元素的深度融合,机械、电气、电子、电磁、光学、热学等融于一体,巨系统、极端化、精密化将成为新的趋势,以机电耦合为突破口的设计与制造技术也将迎来更大的挑战。

随着新一代电子技术、信息技术、材料、工艺等学科快速发展,未来高性能电子装备的发展将呈现出两个极端特征,一是极端频率,如对潜通信等极低频段,天基微波辐射天线等应用的毫米波、亚毫米波乃至太赫兹频段。二是极端环境,如南北极、深空与临近空间、深海等。这些都对机电耦合理论与技术提出了前所未有的挑战,亟待开展如下研究。

第一,电子装备涉及到的电磁场、结构位移场、温度场的场耦合理论模型(electro-mechanical coupling, EMC)的建立。因为它们之间存在着相互影响、相互制约的关系,需揭示它们之间的影响与耦合机理,廓清多场、多域、多尺度、多介质的耦合机制,多工况、多因素的影响机理,并描述为定量的数学关系式。

第二,电子装备存在的非线性机械结构因素(结构参数、制造精度)与材料参数,对电子装备的电磁性能影响明显,亟待探索这些非线性因素对电性能的

影响规律,进而发现它们对电性能的影响机理(influence mechanism, IM)。

第三,机电耦合设计方法。需综合分析耦合理论模型与影响机理的特点,进而提出电子装备机电耦合设计的理论与方法,这其中将伴随机、电、热各自分析模型以及它们之间的数值分析网格间的滑移等难点的处理。

第四,耦合度的数学表征与度量。理论上讲,任何耦合都应该是可度量的。为深入探索多物理系统间的耦合,有必要建立一种通用的度量耦合的数学表征方法,进而导出可定量计算耦合度的数学表达式。

第五,应用中的深度融合。机电耦合技术不仅存在于几乎所有的机电装备中,而且在高端装备制造转型升级中扮演着十分重要的角色,是迭代发展的共性关键技术,在装备制造业的发展中有诸多重大行业应用,进而贯穿于我国工业化与信息化的整个历史进程中。随着新科技革命与产业变革的到来,尤其是随着以数字化、网络化、智能化为标志的智能制造的出现,工业与信息技术的深度融合势在必行,而该融合在理论与技术层面上则体现为机电耦合理论的应用,由此可见其意义深远、前景广阔。

段宝岩

(西安电子科技大学,西安 710126)