

我国电磁场理论研究的现状及发展展望

张志健

刘宏 宋文淼

(国家自然科学基金委员会 北京 100083) (中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 本文从国家自然科学基金委员会所资助的研究项目的角度,论述了我国电磁场理论研究现状,并对今后的发展方向作了一些探讨。

关键词 电磁场理论,发展展望

1 电磁场理论发展展望

电磁场理论的研究已经有了一个多世纪的历史。但是电磁场理论的发展仍保持着强大的生命力,这是由下面几个方面的因素所决定的:

1.1 科学和工程技术发展是电磁场理论发展的最强大的推动力

电磁场理论的早期发展历史是和无线通信和雷达的发展分不开的,它主要应用在军事领域。而现在电磁场的应用已经遍及地学、生命科学和医学、空间科学、材料科学和信息科学等几乎所有的技术科学领域。这些工程技术领域对电磁理论提出了各种新的要求:如在大规模集成电路和微波单片集成电路的发展中,随着集成度的提高,它的各种元器件和连线的尺度已缩小到微米和纳米的量级。这样,旧有的集中参数的概念已完全不再适用,要求用场的理论来处理。而这些集成电路的结构是十分复杂的,这就提出了如何处理如此复杂结构的电磁场问题的新课题。又如电子战中隐身与反隐身技术的发展,提出了各种复合材料和新型材料表面的电磁散射问题,在电磁波用于地物勘探以及医学应用中都遇到了类似的问题,这些问题统称为复杂介质中的电磁场问题。再如遥感技术的发展,特别是微波遥感的发展,对电磁场理论提出了更为复杂的要求,从外层空间经过电离层、大气层到地表(地表存在着各种极复杂的几何形状和各种不同电磁特性的物体),而电磁波还能透入地表深入到一定深度的地下并从地下反射回来,最后通过同样的复杂途径返回到空间的接收器。这是一个何等复杂的环境系统。研究这类复杂环境下的电磁场问题,不仅要研究散射问题更要研究其逆散射问题,这将是电磁场理论工作者面临的一个更为艰巨的任务。正是在这些工程技术,也就是生产力发展这一最强大力量的推动下,使得电磁场理论的发展仍保持了强大的生命力。

1993-12-16 收到, 1994-02-28 定稿

张志健 男, 1937年生, 高级工程师, 国家自然科学基金委员会信息科学部电子学科主任。

刘宏 男, 1964年生, 助理研究员, 从事电磁场理论和应用的研究工作。

宋文淼 男, 1938年生, 研究员, 博士生导师, 从事电磁场理论与微波技术的研究工作。

1.2 计算机和计算技术的发展也给电磁学的发展带来了新的推动力

计算科学对于电磁场理论发展的影响决不仅仅是提供一个计算工具的问题,而是使整个电磁场理论的发展发生了革命性的变革。可以毫不夸张地说,近二三十年来,电磁场理论本身的发展,无一不是与计算科学的发展相联系的。

1.3 数学和物理学的发展及其在电磁场理论中的应用给电磁场理论的发展同样也带来了巨大的影响

这里特别应该指出现代数学分析方法在电磁场理论中的应用给电磁场理论带来的革命性的变革。经典的数学分析是在欧氏空间中进行的,而现代分析则把数学分析的领域从欧氏空间扩大到抽象空间中去。特别是其中建立在线性函数空间上的分析方法——线性泛函分析或线性算子理论,它的发展已有近一个多世纪的历史,但它在电磁场理论中的应用却还只有 30 多年的时间。而它在电磁场理论中的应用正是和计算技术在电磁场理论中的应用紧密地联系在一起的。电磁场工作者正是通过电磁场的数值计算工作才了解和掌握了这一现代数学方法;反过来,人们又发现算子理论在电磁场理论中的应用价值远不限于数值方法的范围,它也可以大大的扩充解析求解的范围并更深入反映电磁场的物理本质。近十几年来一些新的数学方法和概念,如分形数学、混沌动力学以及子波分析方法等的发展也将给电磁学的发展带来新的活力。特别是混沌动力学,它不仅是一种新的数学工具,也是一种新的物理概念,或者说它给人们带来了认识自然界或科学的一种新的思维方法。

综上所述,作为物理学的一个重要的领域,特别是作为获取信息的最重要的手段和远距离传输信息的几乎唯一的工具,电磁场理论在今后信息社会中的应用领域将会越来越宽广;它的发展尽管受到了国际上军事应用萎缩的影响,但仍保持着强大的生命力。

2 五六十年代我国电磁场理论发展历史的简单回顾

中华人民共和国成立以后,我国电磁场理论的研究工作受到国家领导的高度重视。在五六十年代,电磁场理论的发展与国防尖端科学技术紧紧地结合在一起,主要为军事通信、雷达技术、电子对抗和卫星技术等军事应用服务。与国际上的发展相应,当时的电磁场理论从不同的应用目标出发,形成了电波传播、天线和微波技术等几个专业领域。由于当时数学理论和计算技术的条件限制,只能对一些极简单的问题进行麦克斯韦方程组的精确求解。而对于比较复杂的实际工程技术中的电磁场的边值问题,只能从工程问题的特殊要求出发,发展出一套近似的方法,大量地引用集中参数电路中的一些基本概念,如电压、电流、阻抗等。而使原来属于同一个数学问题的一些领域形成了极不相同的学科特点:如微波技术中,人们大量引用了关于网络的概念和分析方法;在天线理论中,总是在辐射面上寻找等效电流,不管辐射的面是传输线的端口、缝隙或是金属线段,一般总是寻找等效电流,然后计算等效电流的辐射;电波传播理论中,主要研究偶极子或其他简单振子在地面、大气层到电离层之间的空间内的传播。文献[1—6]反映了我国科学家在这期间对电磁场理论所作的主要贡献。

文献[1,2]反映了在电波传播方面的一些工作。文献[1]首次提出了一种方法,它能

得出可同时适用于中性大气部分和电离大气部分的关于大气折射率和群速的统一表示式;这样就有可能把包括中性大气部分和电离大气部分的整个大气层作为整体,来进行电波传播的理论分析和实验计算。并在此理论分析的基础上提出了“漏波滑行传播”的概念。论证了这种传播方式可以解释空间飞行器与地面间绕过地球阻挡的远距离传播,也可以解释地面上两点间的远距离(指约4000km以上)的传播。这在当时,对于认识超短波的对流层和电离层传播机理有较大的理论意义。文献[2]讨论的是无线电波绕地面的绕射理论问题,经过许多有名望的数学家和物理学家,如瓦特逊(G. N. Watson)、范德伯(B. Van der Pol)、勃勒莫(H. Bremmer)、福克(B. A. Фок)等人的研究,一般认为已经获得了完全解决。但作者提出了自己的更精确的求解方法,进一步发展和完善了这一理论。

“微波理论和技术”^[3]虽出版于1979年,但该书的内容实际上是著者从50年代到70年代初的20多年工作的总结。作者在微波技术领域所作的贡献是多方面的,特别是在TEM波传输线波阻抗的计算方法^[4]上,该方法的简明性和精度性都超过了当时国际上所用的其它方法,受到了国际同行的高度赞誉,被称为“林钟法”。

在文献[5,6]中,作者应用耦合模理论把各种微波电路、微波元件中的电磁理论问题作了综合。这对于不论从物理概念上来理解这些微波电路和元件的工作机理还是从工程应用的需要上来设计这些电路或元件都有重要的意义。作者的这一工作和以后在特种光纤理论上所作的贡献,都赢得了国际同行的高度赞誉。

以上这些只是这一期间中我国科学家在电磁场理论领域的一小部分最突出的工作,到60年代中,我国不论从电磁理论工作队伍的数量和水平、所开展的研究工作的广度和深度以及电磁场理论在解决通信、遥测遥控、雷达以及卫星工程等实际问题所起的作用都说明我国的电磁场理论和应用的水平已跟上或接近当时的国际水平。

3 七八十年代我国电磁场理论发展概况

60年代中开始,国际上由于计算技术的应用,而使电磁场理论获得了飞快的发展。计算电磁学的出现和线性算子理论在电磁场理论中的广泛应用,使电磁场理论和方法都得到了跃进式的发展,旧有的学科之间的界线很快被打破,新的研究领域和方法不断涌现。到70年代末,我国的电磁场理论研究大大地落后于国际的发展水平。

从70年代末到80年代初,一批华裔科学家回国讲学和我国第一批访问学者学成归国,又开始了我国电磁场理论快速发展的时期。当时对我国电磁场理论工作者影响最大的两本书是:Harrington教授的“Field Computation in Electro-magnetic Theory”^[5],和戴振铎教授的“Dyadic Green's Function in Electro-magnetic Theory”^[6]。Harrington教授的工作主要是把电磁场的边值问题归结为二阶自共轭线性偏微分算子的算子方程问题,然后把线性泛函分析中的最优逼近理论和矩量法引用到电磁场问题的数值计算中来。考虑到电磁场理论中的特有的边界情况和边界条件,从矩量法又发展出各种适合于特殊边界情况的方法,如边界元法、单矩法以及数值方法与解析相结合的方法。文献[9,10]的作者就是在Harrington教授的实验室工作过的我国第一批访问学者。他们把

Harrington 教授的理论和方法带回国内,并通过自己的工作发展了这一套理论和方法。在“Engineering Electromagnetism: Functional Methods”^[11]一书中,著者把一些常用的电磁场数值计算的方法用线性泛函的统一框架表示出来,使电磁场的数值方法更加理论化和系统化。

并矢格林函数理论不同于以前经典电磁场理论中常用的一些方法。由于麦克斯韦方程的复杂性,在戴振铎的工作以前,人们一直没有找到对于麦克斯韦方程组或者说对于矢量波方程的普遍的求解方法。从前一节中也可以看到这一点。而并矢格林函数不再是针对某种特殊问题的,而是讨论电磁场问题的普遍的解析方法。虽然对于戴振铎工作的严密性或者说解的“完备性”问题有过不少争论,但这些都影响它的重大的理论意义。更为令人惊奇的是,戴振铎和 Harrington 这两位教授在几乎同一时期提出来的在形式上很不相同的,两本在电磁理论中最有影响的著作中,所用的方法却几乎是一样的。实际上用的都是矩量法。虽然在戴振铎的书中从未提过矩量法这一个词,但实际上该书中所用的方法只是试函数与权函数都用矢量波函数的矩量法。国内一些学者在戴振铎工作的基础上作了不少工作^[12-14],特别是文献[12]在用矢量函数空间理论和矢量算子理论来处理电磁场的本征问题和格林函数问题上,作了有意义的尝试。

把以并矢格林函数为基础的解析方法和以矩量法为基础的数值法结合起来,既可以解决微波电路和元件中的电磁理论问题^[15]、天线中的问题^[16],同样可以解决电磁散射问题^[17]。虽然这一方法在近年来的电磁场理论中已占了主导地位,但是一些处理电磁场问题的特殊方法,如几何绕射理论、电磁射线理论等在处理某些具体问题时有其独特的方便之处,近年来仍有些发展,但这些方法在实际应用时一般仍要用并矢格林函数等基本的理论作为基础。文献[18]是关于复射线法的专著,作者发展和完善了电磁射线法。我国学者在毫米波传播,特别在雨对毫米波衰减方面的研究也取得了国际水平的成果^[19]。

4 电磁场理论的新进展与探索

Harrington 所提出的电磁场的数值计算方法。矩量法和随后发展起来的各种数值方法都有一个共同的不足之处,就是它们处理的都是标量拉普拉斯算子的问题。并矢格林函数在理论上是考虑了矢量场,但在实际应用中也只见到处理标量场问题。电磁场是一个矢量场。只有对于一些简单的系统,它的场可以用一个模式(TE 模或 TM 模)来表示,这时上述数值方法可以求得电磁场的精确的结果;而对于复杂的结构用单一模式计算的结果与实际场差别很大^[20-23]。文献[20, 21]是用两种相近的边界匹配方法求双重入腔的谐振频率。由于这类结构的回旋对称性。其场的最低模式是纯 TM 模。这时它的计算结果与实际测量结果之间附合得非常好,误差不超过 0.1%。而文献[22]是用几乎相同的方法来计算耦合腔结构的特性,由于这类结构中有一个非回旋对称的腰状耦合槽,因而对最低模式,同样存在 TE 模和 TM 模的耦合。只求单一模式的标量场的数值计算产生的误差达 15%。对于某些二维结构,分别对两个标量场算子进行数值计算,通过包含两个标量函数特殊组合的比较复杂的边界匹配,可得到包含两个模式的精确解^[23]。但这一情况毕竟也只是一种二维的特殊情况,要真正解决三维电磁场的一般解问题就不是

前面的这些方法所能胜任的。在文献[12]中虽探讨了用电磁场的算子理论解决解析边界下的三维电磁场问题的可能性,但由于这类问题的解析和数值计算都很复杂,至今还未见实际的结果。

三维电磁场问题是目前极受关注的问题,因为象集成电路的设计或复杂目标的散射截面的计算等重要的电子工程技术问题都与三维电磁场的精确计算问题密切相关。时域差分法(FD-TD法)是解决这一问题的最有希望的办法。因为FD-TD法不同于以往的任何一种方法,它直接对麦克斯韦方程组(实际上只是对一组联立的旋量方程组,而不考虑高斯方程)中的矢量 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{j} 以及旋度算子和矢量边界条件进行数值计算。这样,所得的结果应该是“完备”的矢量场,由此所算出的三维电磁场也应该是精确的。FD-TD法使电磁场的理论与计算从处理稳态问题发展到瞬态问题^[24],从处理标量场问题发展到直接处理矢量场问题,这在电磁场理论中是一个极有意义的重大的发展。这一发展又是与计算科学的发展紧密联系在一起,FD-TD法的发展是与计算科学中并行算法的发展分不开的。应用一般的计算方法,对于这种有七个变量的偏微分方程组的计算是很困难的,它将需要很长的计算时间,而这类问题采用并行算法可以大量的节省计算时间。国际上,FD-TD法的普遍应用正是与并行算法的发展联系在一起,从这里我们可以进一步看到计算科学对电磁场理论发展的巨大作用。

近年来国内很多单位在FD-TD法方面进行了有意义的工作^[25,26],文献[26]中所用的方法并不是直接的FD-TD法,而是把矩量法直接用到矢量函数和矢量算子中去。我们相信随着FD-TD法和其它直接处理矢量算子的数值方法的发展,不仅为三维电磁场问题的计算和有关工程问题的设计带来最为有力的工具,也将对电磁场理论本身的发展带来极大的影响。用这些方法从理论上应该可以计算出“完全的”电磁场,但是在实际的电子工程问题中,仅有这“完全的”电磁场解还是不够的。因为在实际的微波工程系统中,发射和接收天线并不发送和接收任意组合的全极化信号,而是用两个天线分别的发送或接收两个垂直极化的信号,例如在微波遥感中就是这样。在这种情况下,人们需要的是分别对于不同极化的散射和交叉极化散射的情况,而不仅是总的散射。这就要把这些方法与基本的电磁场理论结合起来进行深入的研究,从而不仅会获得更有效的计算方法,也能更深入地揭示电磁场理论的本质规律。

除了FD-TD法和有关的直接计算矢量算子的各种数值法外,近年来随着电子工程技术发展的需要与新的数学物理方法的出现,国内的电磁场理论工作者还开展了以下诸方面的探索性的工作:

(1) 随着微波遥感的发展,电磁散射和电磁辐射的遥感理论越来越引起广泛的兴趣。文献[27]是一本这方面的专著,它以矢量辐射传输理论为基础,讨论了当今遥感理论的一些主要发展方向。在不论是微波遥感还是微波通信中都要涉及电磁波在大气层和电离层中的传播问题,这些介质是随机的,我国学者近年来在这一领域也做了不少的工作^[28,29]。随着电磁波在地学、生物学和医学中的广泛应用,电磁场的逆散射问题越来越受关注。不论在结构重建还是在参数重建,不论是一维目标还是二维目标的逆散射成像问题,我国学者都做了不少的工作^[30,31]。

(2) 手征介质(或称旋波介质)是一种用于隐身技术的新型复合材料。把半径很小又

截得很短的金属螺旋线随机地埋入普通的介质中,可以作为这种材料的一种模型。由于介质中存在螺旋状的导体,介质特性中就有了电场与磁场的耦合。这类材料的理论分析是非常困难的。文献[32]做了一些初步的理论分析工作。

(3) 小波分析是 80 年代末期发展起来的现代调和的一个分支。小波正交基的多分辨率结构是空间(时间)自适应算法的有效框架。与傅里叶变换不同,它将信号分解成多种尺度成分,可以获得不同分辨率上的细节,非常适合分析回波信号。所以它在电磁场散射理论中应用是有前景的,但目前国内尚未见这方面的工作报导,国际上也刚处于起步状态。在国家自然科学基金的资助下,西安交通大学正在开展这方面的研究工作。

(4) 分形(或分数维)是近十多年才发展起来的一种数学方法,它的发展又是与计算科学的发展紧密联系在一起。它在电磁场理论中的应用国际上也刚刚起步,只有一些很初步的理论探讨文章,实际应用成果的报道还没有。但它的应用前景是十分诱人的。在微波遥感中的地物目标都是既有不同的几何特性又有不同的物理(或电磁)特性的复杂目标。在遥感器所获得的信息中总是把几何特性与电磁特性的信息混合在一起,而且几何特性的量化描述又是很困难的。分数维理论就可用来把几何特性进行量化的描述。能否通过分数维的理论结合电磁散射理论把遥感信息中表征几何特性的量与表征电磁特性的量分离开来,这是遥感工作者最感兴趣的问题。但至今这一问题还只是一种很好的愿望,而没有找到解决问题的实际途径。在国家自然科学基金的资助下中科院电子所、西安电子科技大学等单位正在开展这方面的研究工作。

(5) 混沌动力学被称为从量子力学和相对论创立以来,二十世纪的第三次科学革命。它研究复杂的不可预测的随时间演变的非线性现象,混沌现象广泛存在于物理、化学、生物、气象和地质等自然科学和经济、人口等社会科学中。近十年来,在国外引起人们极大的关注并有着飞快的发展。电磁场中混沌现象的研究国际上也刚刚起步,研究内容目前主要还限于自由电子激光的非线性相互作用过程中的混沌现象。中科院电子所在国家自然科学基金的资助下,正在开展这一探索性的研究工作,并已取得了初步的成果。

本文论及的 80 年代以后的各项工作,大部分获得过国家自然科学基金委员会信息科学部的支持。本文的绝大部分材料也来自国家自然科学基金委员会的有关资料。那些没有得到国家自然科学基金委员会资助的,也有很多很好的工作。对于这些工作难免有所遗漏,仅在此表示歉意。电磁场理论领域很广,由于我们的知识面所限,本文中定会有些不妥的论述,欢迎指正。

参 考 文 献

- [1] Lu Bao-wei. *Scientia Sinica*, 1957, 8(7): 761—780.
- [2] Lu Bao-wei. *Scientia Sinica*, 1965, 19(4): 553—560.
- [3] 林为干. *微波理论与技术*, 北京: 科学出版社, 1979.
- [4] 林为干, 钟祥礼. *物理学报*, 1963, 19(4): 249—268.
- [5] 黄宏嘉. *微波原理*, 北京: 科学出版社, 1966.
- [6] Huang Hung-chia. *Coupled Mode Theory as Applied in Microwave and Optical Transmission*. Utrecht, The Netherlands: 1984.
- [7] Harrington R F. *Field Computation in Electromagnetic Theory*, New York: Macmillan Company, 1968.

- [8] Tai C T. Dyadic Green's Function in Electromagnetic Theory, Scatton, Pa: Intext Educational Publishers, 1971.
- [9] 梁昌洪. 计算微波, 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [10] 曹伟, 严鑫海, 朱效年. 电子学报, 1989, 17(5): 124—127.
- [11] Zhang Wen-Xun. Engineering Electromagnetism: Functional Methods, Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1991.
- [12] 宋文淼. 并矢格林函数和电磁场的算子理论, 北京: 中国科技大学出版社, 1991.
- [13] 潘生根. 电子科学学刊, 1986, 6(1): 14—23.
- [14] 张善杰. 电子学报, 1984, 12(1): 107—108.
- [15] 李嗣范, 何立权. 毫米波技术基础研究进展. 南京: 东南大学出版社, 1992.
- [16] 杨弃疾. 电磁场理论, 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [17] Wu K L, Delisie G Y, Fang D G, Lecours M. Coupled Finite and Boundary Element Method in Electromagnetic Scattering Problems, New York: Elsevier Science Publishing Company, 1990.
- [18] 阮颖铮. 电磁射线理论基础, 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1989.
- [19] Zhang Minggao. Researches on Radio Propagation above 10 GHz in China, Proceedings of 1993 International Symposium on Radio Propagation, 1993, Beijing, China, 145.
- [20] 朱敏, 吴鸿适. 电子学报, 1981, 9(4): 8—15.
- [21] 李镇淮, 宋文淼. 电子科学学刊, 1987, 9(5): 441—450.
- [22] 张昭洪, 吴鸿适. 电子学报, 1986, 14(1): 11—16.
- [23] 徐善鸾. 电子科学学刊, 1983, 5(1): 6—15.
- [24] Wang Changqin, Gandhi O P. IEEE Trans. on MTT, 1989, MTT-37(1): 118—126.
- [25] 王长清. 北京大学学报, 1993, 20(3): 84—86.
- [26] 方静, 张玉胜, 肖衍明. 边界有限元法与矢量吸收边界条件相结合计算三维散射问题: [内部报告]. 西安交通大学, 1993.
- [27] 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京: 科学出版社, 1993.
- [28] 黄际英, 王一平. 无线电物理中的随机场. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [29] Wang Z S. Letters in Mathematical Physica, 1987, 13(2): 241—245.
- [30] 葛德彪. 电磁逆散射原理. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1987.
- [31] Wang Weiyan, Zhang Shou-rong. IEEE Trans. on AP, 1992, AP-40(11): 1292—1296.
- [32] 尹文言. 电子学报, 1992, 20(3): 84—86.

CURRENT SITUATION AND PROSPECT OF ELECTROMAGNETIC FIELD INVE- STIGATION IN CHINA

Zhang Zhijian

(National Natural Science Fundation of China, Beijing 100083)

Liu Hong Song Wenmiao

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract Based on the materials mainly got from the National Natural Science Fundation of China supported projects, the histroy, current situation and prospect of electromagnetic field investigation in China are summarized.

Key words Electromagnetic field theory, Current situation and prospect