

关于现代电磁场理论的探讨¹

王 颖 徐 诚 张晓娟 宋文淼

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文简述了经典场论中存在的困难, 现代电磁场理论如何在现代数学方法与现代物理概念的基础上建立起自恰的理论体系, 克服了经典场论的困难, 求得了麦克斯韦方程组的自恰解, 并在此基础上探讨把宏观与微观的电动力学衔接起来的可能性。

关键词 现代电磁场理论, 经典电磁场理论, 量子电动力学

中图分类号 O441

1 引 言

众所周知, 经典场理论是麦克斯韦在 19 世纪 50 年代末到 60 年代的十多年里发展起来的, 并以 1873 年出版的《电磁学通论》这部巨著标志着电磁场理论的建立。赫兹等人在麦克斯韦之后才证明了电磁波的存在, 并把麦克斯韦的理论用简洁的形式表达出来, 并只考虑真空 (或空气) 介质和理想的导体边界条件下, 麦克斯韦方程组为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu_0(\partial \mathbf{H} / \partial t), \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \varepsilon_0(\partial \mathbf{E} / \partial t), \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho / \varepsilon_0, \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0, \\ \hat{n} \times \mathbf{E} &= 0 \text{ 和 } \hat{n} \cdot \mathbf{H} = 0, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{在域内} \\ \\ \\ \\ \text{在理想导体边界上} \end{array} \quad (1)$$

在麦克斯韦之前经典的电磁学实验定律早已完成, 很多著名的科学家都致力于把经典电磁学定律统一成一个完整的理论体系的工作, 那些工作虽然对于麦克斯韦理论的建立有一定的贡献, 但是都没有能够得到在物理学上有意义的结果, 而麦克斯韦的工作却开创了人类科学和技术发展的新时代。那么他与前人工作的差别主要在什么地方呢? 我们认为主要有两个方面: 一是他完善了矢量偏微分算符运算的数学工具并把它作为描述电磁场的基本的数学方法, 二是他对于场这一当时还是有争论的物理概念有深刻的理解, 而且把它与光的波动性联系起来, 从而使他在总结经典电磁学规律的研究中有一个明确的方向。在以往经典场论的著作中过分强调麦克斯韦的位移电流和全电流定律的假设在创建电磁场理论中的作用, 这对于电磁场领域的初学者是一种误导。实际上位移电流的概念只是麦克斯韦为了在他的理论体系中加入一个以前经典电磁学实验定律中并不存在的物理量而作的一种说明, 为了在当时历史条件下容易为人们所接受才提出了关于位移电流和全电流定律的解释。从现代物理学的概念, 把电场的时间变化率与电流等价起来是没有任何物理意义的, 关于位移电流或全电流定律除了在极其狭隘的范围内可以近似地说明一些特定的物理现象外, 在一般的情况下是毫无意义和用处的。

麦克斯韦理论和赫兹所总结的方程组是在一个世纪前完成的, 当时既没有量子力学的理论也没有描述量子规律特有的现代数学, 即希尔伯特关于抽象空间的数学理论。麦克斯韦理论是

¹ 2000-03-23 收到, 2000-12-08 定稿
国家自然科学基金 (69871028) 资助项目

在把电磁现象与力学规律的类比基础上建立起来的, 即建立在以经典数学为基础的机械波的模式上的。为了“证明”这一电磁波的“机械波模型”的合理性, 在麦克斯韦以后的很长一段历史时间里, 人们相信电磁波是在称为“以太”的介质中传播的, 并致力于以太的研究。但是在以太的存在早已被否定后, 整个 20 世纪的经典电磁场理论的发展中, 仍然把电磁波的力学模型作为其基本的理论基础。因而经典场论越来越脱离现代数学和现代物理学的发展, 而完全失去了它在物理学中的活力。

我们说经典场论的力学近似主要是指: 在数学上, 经典场论通过洛伦茨规范或任何其它类似洛伦茨规范的数学变换, 把双旋度算符的矢量偏微分方程变换为拉普拉斯算符的方程, 这种变换没有数学上的严格依据, 只是因为旋度算符是不能在欧氏空间中把矢量运算分离成标量运算的, 而欧氏空间中的经典分析只能对标量偏微分方程进行分析; 在物理上, 经典场论通过坡印廷关于电磁场的能流方向和动量定理, 把具有量子特性的电磁波简化为机械波。这两种简化在电磁场理论的发展过程中是必要的, 但是它不反映电磁波的本质, 因而也是无法满足现代科技发展对电磁场理论的要求的。

以上就是我们进行现代电磁场理论研究的依据。用一句话来表述: 现代电磁场理论就是用量子力学的方法来研究宏观的电动力学规律。即从本质上把电磁波看作是具有量子特性的物质波, 但是我们研究的是其群体的而不是个体的性质。电磁波与实体物质的基本区别在于: 对实体物质当考虑其群体特性时, 波动性被忽略了, 保留的是其粒子性, 而对电磁波恰好相反, 忽略的是其粒子性, 保留的则是它的波动性。但这种波动性不是机械波的波动性而是量子波的波动性, 因而对于这种波的分析不能在经典数学所局限的欧氏空间中进行, 而必须在 H 空间中进行。在现代电磁场理论中研究的是群体的而不是个体的特性, 这是它与量子电动力学的基本区别, 也就是说在现代电磁场理论中研究的是宏观的电磁波与宏观的物质 (主要是指各种物质状态中的带电粒子) 之间的相互作用中所体现的基本特性。在这种相互作用中, 对于电磁波忽略的是其粒子性保留的是其波动性, 而对于与其相互作用的物质忽略的是其波动性保留的是粒子性。简而言之, 现代电磁场理论就是研究具有量子特性的电磁波与具有经典特性的物质之间的电磁相互作用。

我们在这里谈了很多经典电磁场理论在数学上与物理上的近似性, 但使我们感到惊异的并不是麦克斯韦方程组的不完善性, 恰恰相反使我们惊异的倒是麦克斯韦方程组的包容能力。不需要改变方程 (1) 的任何形式, 只要用现代数学的方法去理解和解释麦克斯韦方程组, 就可以得到现代电磁场理论的所有主要结果。也就是说, 我们的出发点不需要作任何改变, 只是运用现代数学的方法, 去掉经典场论中的洛伦茨规范和坡印廷定理这两个基于力学近似的假定, 就可得到现代电磁场理论中几乎所有的基本结果。

2 现代电磁场理论的数学基础——矢量偏微分算子

综上所述, 要解决经典场论中的困难首先需要解决数学方法, 在文献 [1] 中提出了关于矢量偏微分算子的理论的一些基本问题。首先, 这里所讨论的“矢量”不是数学家的抽象的矢量, 而是三维空间中与力和运动相联系的基本物理矢量。数学家从单变量问题直接跳跃到 N 维空间, 而没有特别研究三维空间。自从广义相对论提出了三维空间的弯曲和把三维空间想象为更高维空间“球”上的“球面”以后, 三维空间的物理实在性也变得模糊起来。但是到现在为止还没有实验能证明物质能够存在于三维空间以外的任何空间。在电磁场理论中电磁波的最基本的特性就是它满足旋度运算, 而旋度运算是三维空间所特有的性质。数学家可以按照在三维空间中的方法对 N 维空间建立类似的“曲线”和“曲面”, 以及用“微分流形”来研究这些抽象的曲面的数学性质, 但是无法建立起三维空间以外的任何其它维空间中的旋度运算。直到现在旋度运算或者说双旋度算子仍然是描述光量子的场特性 (实际上就是与宏观实体物质相互作用时的力学特性) 的基本的数学形式。所以矢量偏微分算子理论应该不仅只是在宏观电磁场理论中有意

义, 在数学上和现代物理学上同样应该有重要意义。它研究了“力”在宏观的与微观的电磁相互作用中的某种逻辑联系。

矢量偏微分算子的工作是把泛函分析与广义函数理论, 从一般的标量函数空间推广到矢量函数空间。矢量函数空间中包含着三个子空间。当把矢量函数空间对笛卡儿坐标中的基矢的射影分离为子空间时, 就称它为三维欧氏空间。这就是经典数学和经典物理学所研究的范围。矢量偏微分算子的主要工作就是把矢量函数空间在矢量偏微分算子的本征函数空间上进行射影, 研究由此射影所产生的子空间的数学性质, 并进行在矢量算子空间及其子空间上的泛函和广义函数的分析研究。这些研究工作的主要结果, 特别是与电磁场理论密切相关的结果有:

2.1 算子方程与广义函数理论

在经典场论中总是把麦克斯韦方程组中所有的函数同等地看成是经典函数, 而现代数学理论则把微分方程、偏微分方程的边值问题看作是一个算子方程问题。在那里函数被分成了两类, 与算子作用的待求函数是基本函数或称为好函数, 它存在任意阶的导数; 而等式另一边的函数, 即激励函数, 不再是原来的经典函数, 而是经典函数在算子的本征函数上的广义函数^[2]。这一理论并没有被物理学家所重视, 其原因是当算子是标量算子时, 激励函数与它的广义函数一般说来没有特别大的差别, 当算子是微分算子时, 激励函数与其对应的广义函数之间的区别, 一般只出现在个别的奇点上, 在激励函数的连续可导部分, 其对应的广义函数收敛于原来的函数。只是在奇点上, 原来的经典函数不能进行分析, 而对应的广义函数却仍有好的解析性质。在物理学家看来这两者没有本质的区别。但是对于矢量偏微分算子, 情况就完全不同了, 因为矢量偏微分算子中包含着相互正交的子空间, 当经典函数在不同的子空间上取广义函数时, 其广义函数就完全不同了, 更不同于原来的经典函数。而麦克斯韦方程组中实际上包含着对于旋量场算子(双旋度算子)和无旋场算子两个独立的算子方程。按算子理论, 电磁场理论的边值问题实际上只是旋量场算子的边值问题, 只有用广义函数理论才能得到精确的自恰解, 在经典数学的范畴内根本不可能得到自恰解。

2.2 矢量函数空间和矢量广义函数理论

在文献[3]中首先提出了广义的亥姆霍兹定理, 即电磁场矢量函数在矢量偏微分算子的本征函数空间内的完全射影定理

$$\mathbf{F} = F_x \hat{x} + F_y \hat{y} + F_z \hat{z} = \nabla \varphi_l + \nabla \times \varphi_m \hat{z} + \nabla \times \nabla \times \varphi_n \hat{z} \quad (2)$$

该式的第一个等式表示了矢量函数在欧氏空间内的射影, 第二个等式则表示了矢量函数在矢量波函数空间内的射影, 由此得到矢量函数在这两类空间内射影的等价性。并由此得到了基于矢量波函数射影的子空间的数学性质, 如这些子空间的正交性和完备性, 并得到麦克斯韦方程组在矢量波函数子空间上的分离形式。

2.3 矢量函数空间中的广义函数理论和矢量偏微分算子问题的格林函数形式

把函数空间理论、广义函数和通过本征函数展开求逆算子的一系列现代分析中的数学理论和方法, 从标量函数空间扩展到矢量函数空间。对于理想导体边界条件和一维无限大域辐射边界条件所组成的电磁系统的格林函数问题, 可以通过闭域内的函数空间理论和一维无限大域下的傅里叶变换和广义傅里叶变换理论, 来求得它的格林函数。为此首先通过广义亥姆霍兹定理把矢量函数空间分离为三个独立的标量函数空间, 用这些标量函数性质的子空间来构造出矢量函数空间, 进而把广义函数、广义函数的 δ 函数以及广义函数的傅里叶变换和逆变换等扩展到电磁场所特有的矢量函数空间, 建立起两类类似于标量偏微分算子理论中的特殊的广义函数, 即并矢形式的格林函数和 δ 函数。这些并矢函数与经典场论中的并矢函数的概念完全不同: 它们只是矢量函数空间中与一般的广义函数相对应的奇异函数的一种表示方式, 虽然这些函数本身具有“并矢”的形式, 而它是不能直接进行分析的, 我们也永远不会对这些奇异函数直接进行分析或运算, 而是把这些奇异函数与好的函数的内积组成广义函数, 这些广义函数则是具有好的解析性质的矢量函数, 从而为麦克斯韦方程组的严格的解析求解建立了严格的数学基础。

3 现代电磁场理论的工程应用——边值问题的解析和数值方法

矢量偏微分算子虽然是与电磁场问题密切联系在一起的,但是它基本上只是一种数学理论,同样尽管经典电磁场理论存在着近似性,但是它毕竟经受了—个多世纪的实践的检验。所以如何把矢量偏微分算子理论应用到电磁场工程的实践中去,看它能否比经典场论更合理、更精确地解决实际问题,是对这一理论的最大的考验。当然算子理论在电磁场工程中的应用是一个长期的逐步的过程,它不可能在短期内替代经典电磁场理论,有些问题上可能永远也替代不了经典电磁场理论的方法。这里讨论的只是电磁场理论中最简单也是最基本的问题:就是在真空介质与完纯导体边界和一维无限大边界条件下,电磁场频域齐次和非齐次的边值问题。对应的物理与工程问题就是理想导体边界、无介质条件下的电磁谐振腔、波导与端口为单模的微波网络的本征特性、传输特性与散射矩阵的解析与数值方法问题。宏观电磁场理论的复杂性就在于它要研究以波动性为主要特征的电磁波与以粒子性为主要特征的宏观物质之间的相互作用,只有在上而所限定的范围内,宏观物质的特性可以简化为对电磁波的全反射特性,所以矢量偏微分算子理论看来可以比经典理论更加方便而精确地解决这些问题:

3.1 麦克斯韦方程组的算子规范及算子规范下的自恰的方程形式

以方程组 (1) 式表示的原始的麦克斯韦方程组是一种非自恰的形式,因为作为一个边值问题,其方程的数目大于待求参量的数目。不论经典场论还是现代电磁场理论都要通过一定的规范把它变换为自恰的形式。与经典场论不同的是,现代电磁场理论中不以任何人为的数学变换作为规范,而是以矢量函数空间理论本身,它的完备性、正交性这些基本数学性质来约束方程组,把它变换为自恰的方程组。在算子理论中也不允许对于方程组两边任意地作旋度或散度运算,对方程两边的任何增加或去除一种矢量偏微分运算都必须证明这种运算的等价性。把 (2) 式中的后一个等式代入方程组 (1) 式,经过矢量偏微分算子理论下的严格的等价变换,其与 φ_l 相关的无旋场分量可以通过子空间的正交性而分离出去,得到如下的标量方程组形式的边值问题:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \varphi_m + k^2 \varphi_m &= -\rho_m, \\ \nabla^2 \varphi_n + k^2 \varphi_n &= -\rho_n, \\ \hat{n} \times \mathbf{E} &= 0, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{在域 } v \text{ 内} \\ \text{在边界 } S_d \text{ 上} \end{array} \quad (3)$$

和三个辅助方程:

$$\mathbf{E} = \nabla \times \varphi_m \hat{z} + (1/k) \nabla \times \nabla \times \varphi_n \hat{z} \quad (4)$$

$$\rho_m = -\frac{i\omega\mu_0}{[k^2 - (1/\varphi_m)(\partial^2 \varphi_m / \partial z^2)]} \hat{z} \cdot \nabla \times \mathbf{J} \quad (5)$$

$$\rho_n = -\frac{i\omega\mu_0}{[k^2 - (1/\varphi_n)(\partial^2 \varphi_n / \partial z^2)]} \hat{z} \cdot \frac{1}{k} \nabla \times \nabla \times \mathbf{J} \quad (6)$$

这里电场实际上只有旋量场,它由两个独立的标量函数 φ_m 和 φ_n 与领示矢量的旋度来表示,所以是纯旋量场函数。原来的激励函数 \mathbf{J} 是一个三维的矢量,而现在变换成两个标量函数 ρ_m 和 ρ_n 。这两个标量函数可以看成是电流在 m 和 n 子空间上的广义函数。

上面的方程组在数学上是严格自恰的,因为它是由两个独立的标量波动方程所组成,其边界条件实际上也是由两个对于 φ_m 和 φ_n 的标量方程所组成的,只是在一般条件下这两个方程是一组联立方程组。对于这个方程组的严格推导是非常繁复的,限于篇幅不在这里给出。下面我们来看一下这个方程组与辅助方程在电磁场问题中的实际应用。

3.2 规则边界下电磁场的本征问题与格林函数问题

首先我们来看一下对于规则边界下的情况, 可以证明在规则边界下边界条件可以分离为对于 φ_m 和 φ_n 的独立的边界条件, 由此得到的本征问题的解就是经典场论中的 M 和 N 类两类矢量波函数^[4]。也就是说现代电磁场理论对于规则边界条件下本征问题与经典场论是完全一致的。因为在这种情况下矢量算子的问题简化为独立的标量算子的问题。只是经典场论中通常用对于 E_z 和 H_z 的标量波动方程来求得的, 然后再通过对 E_z (或 H_z) 取旋度来求 H_t (或 E_t), 如果说这一做法可以理解的话, 那么对 H_t (或 E_t) 再取一次旋度来求出三维的电场(或磁场), 即对 E_z (或 H_z) 取两次旋度来求出包括 E_z (或 H_z) 的电场(或磁场)的三维矢量, 在逻辑上就难以理解了。所以经典场论的一般教科书上的本征问题的解有点像凑出来的, 因此各分量之间的关系系数需要硬记。现代电磁场理论中所有本征场都由一个严格推导的统一的公式来表示。对于格林函数更不必像经典场论中那样通过极其复杂的并矢运算去求解, 更没有经典场论的并矢格林函数中的奇异项。而是简单地从(3)式分别求出对应于 φ_m 和 φ_n 的标量格林函数 G_m 和 G_n , 再代入(5)和(6)式的源函数, 求得 φ_m 和 φ_n , 最后代入场的表达式(4)式, 然后把源函数从 ρ_m 和 ρ_n 还原为电流 \mathbf{J} 的形式, 就可以得到并矢格林函数的形式:

$$\overline{\mathbf{G}} = \overline{\mathbf{G}}_m + \overline{\mathbf{G}}_n = \nabla \times \nabla' \times (\hat{z} \hat{z} G_m(\mathbf{R}, \mathbf{R}')/k_c^2) + (1/k^2) \nabla \times \nabla \times \nabla' \times \nabla' \times (\hat{z} \hat{z} G_n(\mathbf{R}, \mathbf{R}')/k_c^2) \quad (7)$$

在现代数学中格林函数不是一个解析函数, 而是奇异函数。实际上不会对它进行真正的运算, 或者说对它的运算不会产生有意义的结果, 而它与某一函数组成的泛函才是有意义的具有好的解析性质的矢量函数, 它就是非齐次问题的解。在这个并矢格林函数的形式中, 两个标量格林函数是容易严格求出来的, 所谓的并矢, 实际上只是把在完全无关的两个空间(场空间和原空间)上的两个矢量放在一起, 不必进行任何并矢运算, 前后项的次序也没有关系。一切经典场论中繁杂而混乱的东西都不再出现了。更不必说奇异项了。

从这里可以看到现代场论与经典场论的又一个基本差别: 对于麦克斯韦方程组中的电流的物理内容有不同的理解, 按照现代场论的观点, 电磁波并不是电流本身的属性, 而是电流与电磁波的相互作用的产物。把电流看作广义函数, 也就是说麦克斯韦方程组中的电流, 并不是电流的经典函数形式本身, 而是它在场的本征函数空间中的广义函数。所谓广义函数, 在数学上就是电流在场的本征函数空间上的射影, 而射影又是通过内积来表示的, 而电流与场的本征函数的内积, 在物理上则正好表示了场与电磁波模式的相互作用。在经典场论中, 把电流看作经典函数本身。当电流这一在局部空间中存在的矢量函数, 在这一局部的源空间内与电磁波所能存在的模式正交时, 就不会激励起任何电场。这一点也是为电磁场工程实践所证明了的。在各类电子器件中, 特别是在速调管中, 输出腔间隙的电流只有与输出腔的模式匹配时才能激励出电磁波, 如果不匹配, 即电流与场模式之间的相互作用为零, 则不会激励任何电磁波。从经典场论的观点, 为了从经典数学的观念上把麦克斯韦方程组的两边等起来, 当电流与场本征模的内积为零时, 也必须存在一个电场, 这个电场就应该是电流本身。从数学上说, 其格林函数上就有一个 δ 函数。但是当电流函数在场空间上的射影正好等于电流函数本身时, 这时电场的解在经典数学意义上也满足麦克斯韦方程组, δ 函数就又不必要了。由于矢量函数空间可以分离为三个互不相交的子空间, 而电磁波的场又只存在于其中两个子空间中, 并且与无旋场正交, 这样以函数空间理论为基础的数学方法与经典数学的差别就清楚地显示出来了。

最后一个问题就是用(3)式表示的格林函数确实比经典场论中的并矢格林函数简单得多了, 但是它是否能够解决电磁工程中的实际问题? 文献[5]初步回答了这一问题, 用上面的格林函数形式解决了横截面为两个矩形波导用一个公共边界耦合在一起的异形波导的截止频率的计算问题。通过并矢格林函数来实现耦合边界上的场匹配, 求得了对于 TE 模的八个最低的本征频率。在以前这类问题一般只能用标量格林函数问题来求解, 因而只能解决单一模式的问题。而用现在的方法则可以求解复合系统的所有模式的本征问题。

3.3 基于算子理论的三维电磁谐振腔本征问题的数值方法

经典场论中电磁谐振腔的本征问题的数值方法一直受到由于无旋场影响而产生的非物理模的困扰, 虽然通过一些数学技巧可以去除非物理模, 但是在这些方法中用对无旋场算子上加惩罚因子的办法, 人为地改变无旋场的本征值使它远离计算所需要模式的非本征值^[6]。这一方法虽能解决某些工程问题, 但是并不能彻底排除无旋场的干扰。基于算子理论的本征问题完全在纯旋量场空间内进行计算:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \varphi_m + \lambda^2 \varphi_m &= 0, \\ \nabla^2 \varphi_n + \lambda^2 \varphi_n &= 0, \end{aligned} \right\} \quad \text{在域 } v \text{ 内} \quad (8)$$

$$\hat{n} \times (\nabla \times \varphi_m \hat{z} + (1/\lambda) \nabla \times \nabla \times \varphi_n \hat{z}) \nabla = 0, \quad \text{在边界 } S_d \text{ 上}$$

而电场依然如(4)式所示, 只要把 k 换成 λ , 所以计算的场保证整个域内散度等于零。文献 [7] 已经完成了对于简单模型下三维问题的数值方法, 由于计算所用的模型是一种“准三维”模型, 按照领示矢量选取的不同该模型既可以看作三维问题, 没有独立的 TE 和 TM 模, 而必须计算两种模式的耦合模; 也可以处理成具有独立 TE 和 TM 模的问题, 所以计算结果可以与解析结果进行比较。20 个最低模式计算结果与解析方法相比有极高的精度, 也没有发现任何非物理模式。当然这些工作只是初步的, 要建立可以与经典方法相竞争的微波网络的软件包还有很长的路要走。

4 现代场论的物理基础——电磁波的动量与传播

在对现代电磁场理论的数学基础与工程应用作了初步研究后, 我们还将探索一下更深入的与电磁波有关的物理问题, 主要是关于电磁波的动量与传播的问题。之所以把与动量有关的问题作为电磁波基本的物理问题来研究, 一方面是因为电磁波的动量是与电磁波的速度和传播方向这样一些电磁波基本的物理量密切相关的参量, 另一方面对动量问题的描述反映了经典理论与量子理论的根本差别。光速的问题是一个极其复杂又是令人最感兴趣的问题。光速不变性经过爱因斯坦相对论的描述已经成了物理学的一个基本规律, 但是在经典场论中实际上还没有找到一种描述光速的数学方法。在经典场论中对于电磁波有各种不同的速度的描述方法, 如电磁波的相速度、群速度等, 这些速度都不是不变的, 而是变化的, 既可以小于光速也可以大于光速, 它们不仅与介质有关还与边界条件有关。显然这些速度都不应该是爱因斯坦所指的不会改变的光速。从量子理论来研究电磁波的动量将有助于我们正确地理解关于光速和光速不变性的含义。这首先是因为动量是必须在 H 空间中的现代数学方法才能够正确表达的, 而不是用欧氏空间中的经典数学所能够表达的。这也就是为什么经典电磁场理论无法精确描述电磁波动量和能流方向的原因。坡印廷理论是经典电磁场理论中一个基本的定理, 但是这一定理实际上只是把复杂的电磁波简化成为平面电磁波假定下才适用的一种应用范围极其有限的近似理论^[8]。近年来, “超光速”的实验研究已经引起广泛的关注^[9], 超光速问题的研究涉及到对于电磁场理论的更加深入的层次, 它更是经典场论所难以解决的。这一问题既是量子的又是宏观的, 因为超光速本身与建立在宏观的因果律基础上的相对论是难以兼容的, 但是它毕竟又不是微观的效应, 特别在微波超光速的实验中, 所有的实验都是在宏观的尺度和宏观测量所能达到的范围之内进行的。因此既以量子特性中的波动性和量子力学的基本数学方法为基础, 又研究其宏观的力学属性的现代电磁场理论的深入研究, 也许对于超光速问题的理解能够提供一些有用的方法和概念。21 世纪的技术已经接近或进入微观世界与宏观世界的交界处, 但是对于宏观世界与微观世界目前存在着两种在哲学逻辑上相互矛盾的理论, 科学界不能不面对这个问题。从一定意义上说, 相对论与量子力学的发展都是在麦克斯韦理论出现后所产生的与麦克斯韦的电磁场理论有密切联系的。在这两种对立理论的基础上, 寻找一种更能包容的新的理论的过程中, 希望电磁场理论的研究和发展, 同样能对这一问题作出自己的贡献。

参 考 文 献

- [1] 宋文森, 现代电磁场理论的数学基础——矢量偏微分算子, 北京, 科学出版社, 1999, 第3章, 第5章.
- [2] N. M. 盖尔芳特等著, 林坚冰译, 广义函数 I 卷, 北京, 人民教育出版社, 1965, 第2章.
- [3] 宋文森, 张晓娟, 王颖, 任晓雨, 电磁场在矢量波函数空间的完全射影定理, 电波科学学报, 1999, 14(3), 247-253.
- [4] 宋文森, 并矢格林函数与电磁场的算子理论, 合肥, 中国科学技术大学出版社, 1991, 第5章.
- [5] Zhang Xiaojuan, Xu Cheng, Song Wenmiao, Calculating higher order mode characteristics of heteromorphic waveguide by operator theory, Proceeding of 2000 Asia-Pacific Microwave Conference, Sydney, 2000, 970-974.
- [6] S. Silaev, Computer simulation of electromagnetic field in the tritron cavities, Nucl. Instr. & Meth. in Physics Research, A342(1994), 348.
- [7] 张晓娟, 基于矢量偏微分算子理论的电磁场本征问题研究及其应用, [博士论文], 北京, 中国科学院电子学研究所, 2000.
- [8] Zhao Pengfei *et al.*, Investigation on Poyntin's theorem and wave propagation, 25th IRMMT Conference, Beijing, 2000, 473-474.
- [9] 黄志洵, 超光速研究, 北京, 科学出版社, 1999, 第二部分, 79-157.

DISCUSSION ON MODERN ELECTROMAGNETIC THEORY

Wang Ying Xu Cheng Zhang Xiaojuan Song Wenmiao

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract The difficulties that exist in classical electromagnetic field theory are discussed and it is pointed out that the Maxwell's equation set in classical theory is not self-consistent and only the approximate solutions can be gotten in classical electromagnetic theory. And how to establish the modern electromagnetic field theory based on modern mathematics and concepts of modern physics is given for solving this problem. By the modern electromagnetic theory, the mathematical form for macroscopic electromagnetic field theory is obtained and the exact solutions for electromagnetic field boundary value problem can be gotten.

Key words Classical electromagnetic field

王 颖: 女, 1970 年生, 博士生, 从事电磁场理论与微波在石油开采与石油工业应用领域的研究工作.
 徐 诚: 男, 1972 年生, 博士生, 从事电磁场理论与微波技术领域的研究工作.
 张晓娟: 女, 1964 年生, 博士, 副研究员, 从事电磁场理论与微波技术领域的研究工作.
 宋文森: 男, 1938 年生, 研究员, 博士生导师, 从事电磁场理论与微波技术领域的研究工作.