

用自展模糊电磁系列推导精确的微带电路元件及微带天线 CAD 公式^{*}

周 雍 唐万春

(香港城市大学电子工程系,香港)

摘要: 模糊电磁学是从建立在物理概念基础上的模糊起始式开始,通过严格的推导,得到实际电路元件精确的 CAD 公式,它含有 1 到 2 个任意常数。自展的意思就是所得到的 CAD 公式又可以作为模糊起始式用来推导更复杂元件的 CAD 公式。如此进行下去,就形成了一个自展系列。该系列给出了集成电路中许多无源元件的场的理论公式,频率范围从直流到射频。由于在每一步都有一个任意常数进行“中段校准”,所以所有这些公式的精度可以保持在 2% 左右。自展模糊电磁系列还可以延续到尺寸远大于波长的结构,如贴片天线,同样可以得到既简单精度又高的公式。

关键词: CAD 公式, 电路元件, 贴片天线, 模糊电磁学, 自展

Accurate CAD Formulas of Circuit Components and Antennas in Microstrip from a Bootstrapped Fuzzy EM Series

Y Leonard Chow, Wan C Tang

(Dept. of Electronic Engineering, City University of Hongkong, Hongkong)

Abstract: Started with a physics-based fuzzy formulation, the fuzzy EM does a rigorous derivation, built-in with one or two arbitrary constants, and leads to an accurate CAD formula of a practical circuit component. Bootstrapping means that the CAD formula resulted is, in turn, taken as fuzzy formulation leading to the CAD formula of a more complicated component. In succession, a bootstrapping series is formed giving the field theoretic formulas of many of the passive components of an integrated circuit from DC to RF. Because of the “mid-course correction” of one arbitrary constant in each step, the accuracies of the formulas are maintained at around 2%. The bootstrapped fuzzy EM series is then continued into larger structures in terms of wavelength, i.e., patch antennas. Similarly simplicity and high accuracy are obtained.

Key words: CAD formula, Circuit component, Patch antenna, Fuzzy EM and bootstrapping

1 引言

通常在电磁学当中处理具体问题时,总是从 Maxwell 方程出发,经过严格推导,然后进行优化,最后做数值计算。如果采用解析方法,则推导过程长而且比较困难;若采用矩量法等数值方法,推导过程虽短,但计算量比较大。如果我们改变处理问题的顺序,即在问题的一开始就进行简化,然后经过严格推导,同样可以得到简单又较为精确的 CAD 公式。由于这些公式是推导出来的,它们的适用范围比较宽,而误差也不比通常的解析法或数值法大很多,我们称之为模糊电磁学。

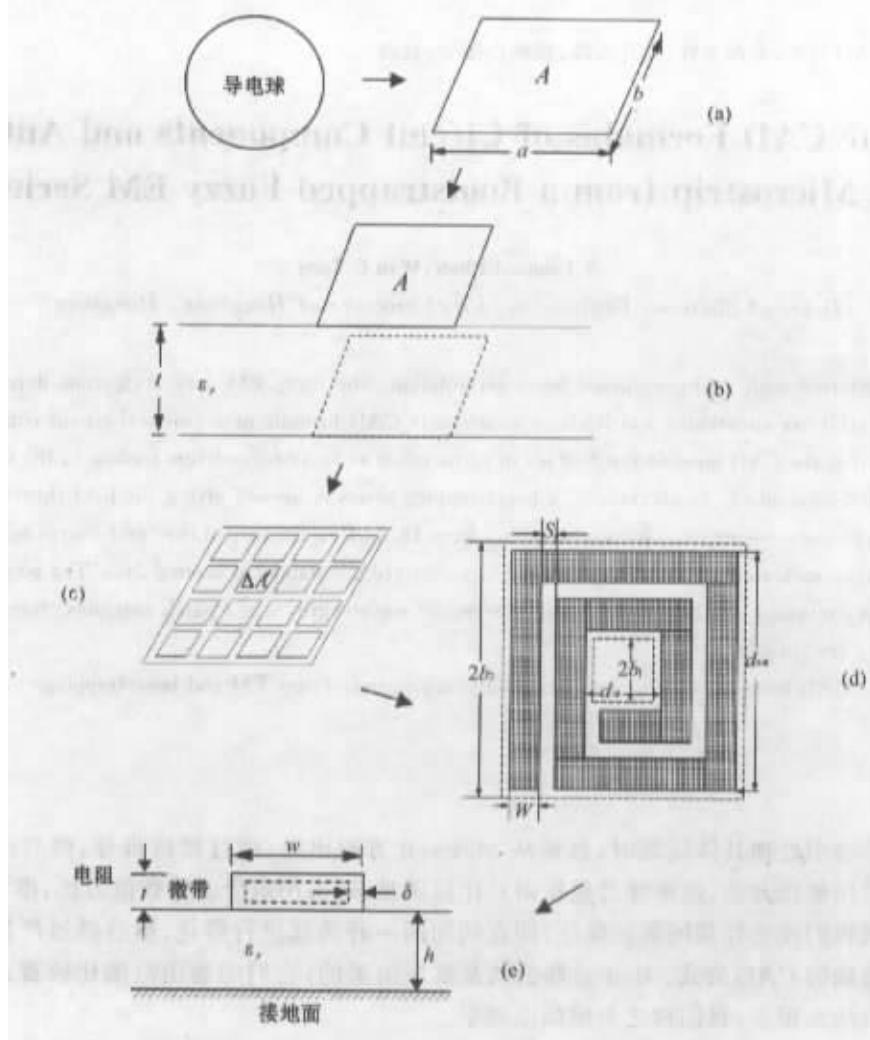
打个比方,一个神射手要想击中远距离的目标,首先必须精确瞄准,但对导弹来说,只需要模糊瞄准加中段校准就可以击中远距离的目标。对后者人们不需要在瞄准上下太多工夫。对一个更远距离的目标来说,

(巡航)导弹需要通过中间目标经过两段航程和两次中段校准才能击中目标。这就是本文所要讲述的“自展”的本质。相对神射手来说,这时候人们所要做的工作,即解析推导,就更少了。

在模糊电磁学推导中,模糊瞄准就是模糊起始式,中段校准就是1到2个任意常数,它们是通过与1到2个数值计算结果相匹配得来的,目标就是CAD公式。巡航导弹的多段航程就是自展,即从一个简单元件的公式(例如,一个导电球)扩展到复杂实际元件的公式(例如,螺旋电感)。

从一个基本的导电球到一个实际的螺旋电感器的等效电路,实际上有几段航程,即几个自展步骤。该等效电路中包含了所有等效元件的公式,其中包括接地衬底上的电感,对地电容,圈间电容以及空气桥的影响(空气桥是用来将位于螺旋中心的端口引到外面的一段金属引线)。

下面自展系列中的例子有时需要特殊的数学技巧,这些技巧将在例子中需要的时候作介绍。目前,我们已经得到了超过50种结构的CAD公式,其中30个已经发表。在图1中,本文给出了一系列的自展例子,它们涵盖了集成电路中的基本元件:电阻,电感及电容,并考虑了它们的边缘场效应。在图4中,本文扩展了这个系列,从低频电路元件(尺寸远小于波长)到高频电路元件(尺寸远大于波长),即适用于不同场合的贴片天线,例如宽带贴片天线和小型化贴片天线。这些公式既简单精确,又能给出物理涵义。



(a) 导电球与导电平板 (b) 平行平板 (c) 网状导体;

(d) 螺旋电感器 (e) 从直流到射频的微带线电阻

图1 电路元件的自展模糊电磁学系列举例

2 一些基本电路元件的自展例子(低频)

例1 万用表和导电平板的电容——面积平方根公式

这个公式表述的是一个凸导体的电容等于具有同样表面积的导电球电容乘以一个形状因子 $C_f^{(1)}$:

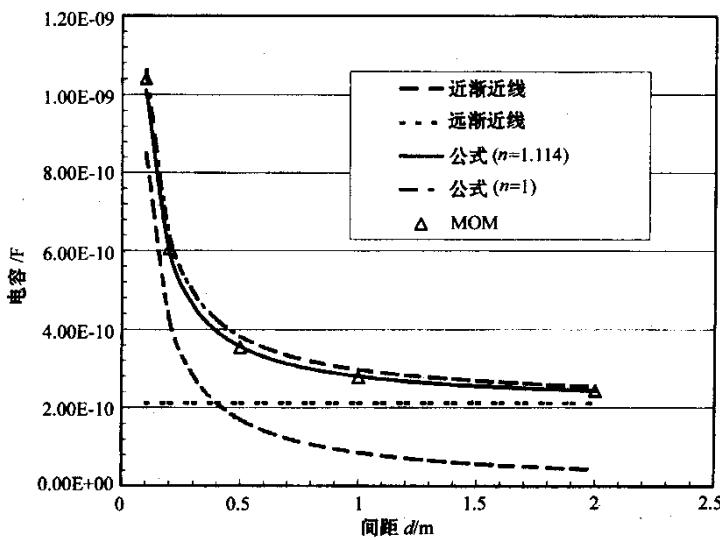
$$C_0 = C_f \epsilon_0 \sqrt{4\pi S} \quad (1)$$

格林定理证明了 C_f 是一个随形状缓慢变化的函数,对导电球取 1,对一个面积为 A 的正方形平板取 0.9,其中 $S = 2A$,如图 1(a)所示。

例 2 平行平板电容器的电容——综合渐近式

$$C = \epsilon_0 \left\{ \left(\frac{\epsilon_r A}{t} \right)^n + \left[\frac{\epsilon_r + 1}{2} C_f \sqrt{2\pi A} \right]^n \right\}^{1/n} \quad (2)$$

综合渐近式⁽²⁾是这样一个公式:当介质板厚度 t 趋于 0 的时候,它将收敛于近渐近式(即平行平板公式(2)中的第一项);当介质板厚度 t 趋于无穷大的时候,它将收敛于远渐近式(即公式(1)变成(2)式中的第二项)。幂 n 是一个任意常数,它是与某一点的数值结果相匹配得到的。图 2 示出了当 n 从 1 变化到 1.114 时,公式(2)的最大误差从 10% 降到 1%。对于一个外加盖板的电容器,衬底厚度 $h = t/2$ 并且接地,其电容就是(2)式乘以 2。



2 分别由(2)式和矩量法计算得到的图 1(b)的平行平板电容, $\epsilon_r = 9.6$, $A = 1\text{m}^2$

例 3 网状导体的电容——解析矩量法

采用矩量法计算一个平板导体的电容,需要将该平板导体分成 N 个子区间,然后构造矩阵并求解该矩阵。对网状导体来说,如图 1(c)所示,如果该网状导体有 N 个孔,就相当于将平板导体每个子区间中的金属去掉一部分。因此在采用矩量法构造的矩阵中,每个自项会在公式(1)的基础上增加 Δp_0 (文献(2)有详细说明),但是互项保持不变,仍然适用库仑定律。对该改变后的矩阵采用解析法进行分析,即解析矩量法,我们可以从(1)式的平板电容 C_0 得到网状导体电容 $C^{(2)}$,如下式所示:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + \frac{\Delta p_0}{N} \quad (3)$$

上式精度比较高(误差 < 3%),而且相比于数值矩量法来说非常简单。将该网状导体放在接地衬底上,就变成了一个电容器,此电容器的电容公式与(2)式非常相似。

例 4 螺旋电感器的电感——电感与电容间的二重性

网状导体是在平板导体上打洞只留少部分金属面积而形成的,螺旋电感器也类似。因此,将(3)式以及电容与 N 圈电感的二重性结合在一起,得到

$$L = 4 \frac{\mu_0 \epsilon_0}{C} N^2 (b_1 + b_2)^2 \quad (4)$$

图 1(d)中的螺旋电感器可以放在接地衬底上,所得到的公式与(4)式类似。

例 4(a) 接地衬底上螺旋电感器的等效电路——例 3 与例 4 的结合

一个接地衬底上的螺旋电感器可以用一个 π 型等效电路来表示。(4)式中的 L 是横臂 Y_{21} (3)式中的 $C/2$ 是两个垂直臂 Y_{11} 和 Y_{22} ^[3]。利用该等效网络计算得到的结果与 IE3D 的结果吻合得很好。图 3 给出了一个数值计算的例子。

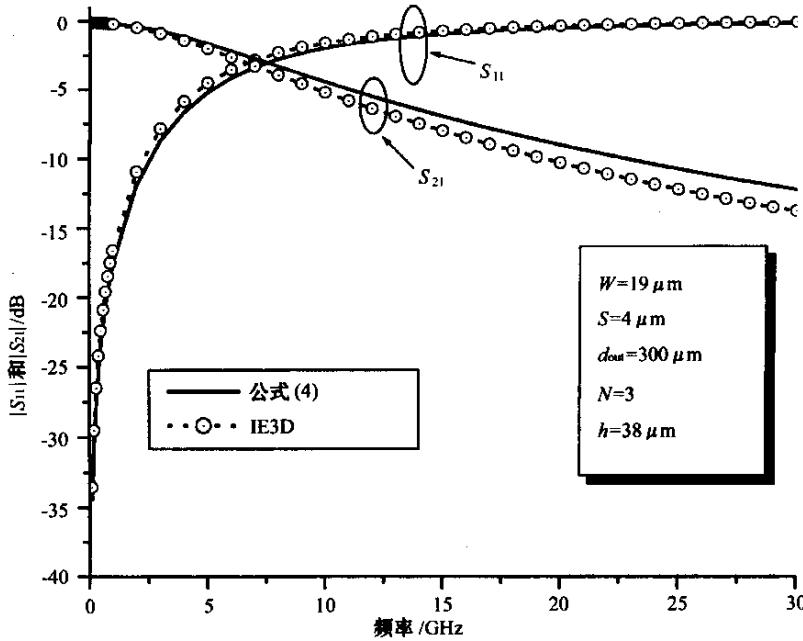


图 3 分别由(4)式和 IE3D 计算得到的图 1(d)正方形螺旋电感的 S 参数, $\epsilon_r = 1$

电螺旋(导体)中的间隙形成磁螺旋。对(4)式再次应用二重性, 经过计算, 我们可以得到磁电感, 即圈间电容。将此电容并联在该等效电路中, 就会进一步减小图 3 中 S_{12} 的误差。

例 5 从直流到射频的微带线电阻——对频率的综合渐近式

电阻 R_{dc} 是低频时的渐近式, R_{ac} 是高频时的渐近式, 如图 1(e)所示。采用(2)式的形式, 我们得到从直流到射频的微带线电阻的综合渐近式^[4]:

$$R = [R_{dc}^n + (\kappa R_{ac})^n]^{1/n} \quad (5)$$

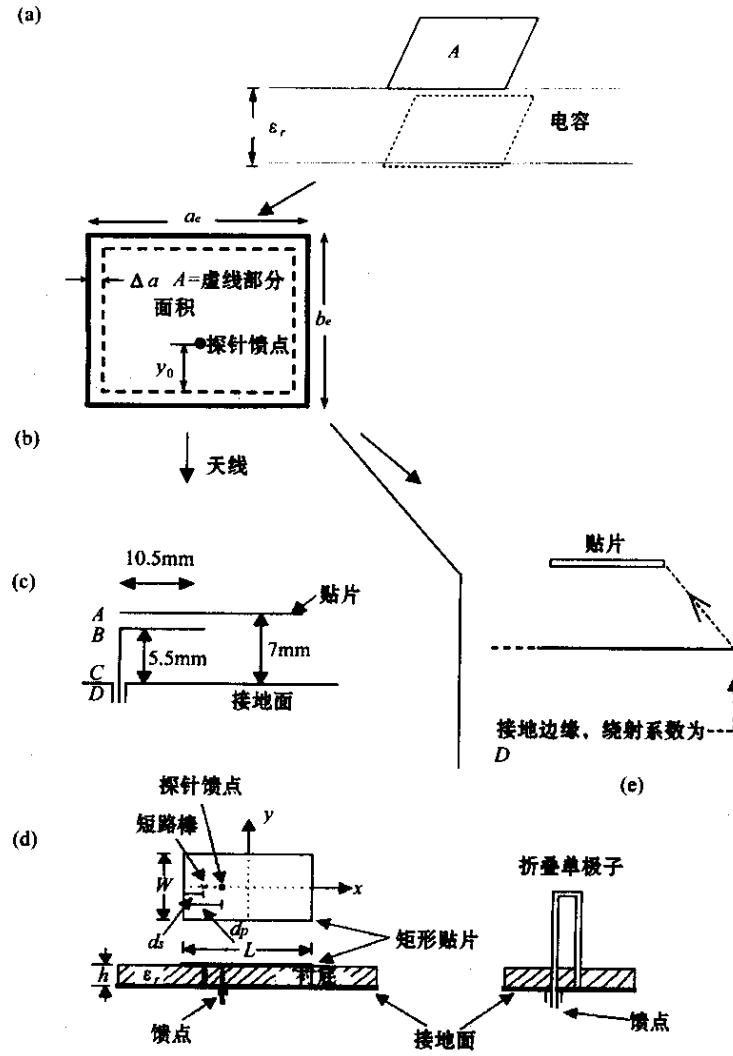
这里 $n = 1.9$, $\kappa = 1.2$ 。 κ 从 1 增加到 1.2 是考虑了接地面的欧姆损耗。该公式最大误差在 3% 左右。

3 一些贴片天线的自展例子(高频)

例 6 探针馈电贴片天线——边缘场对频率的不变性

从图 4(a)和 4(b)两个结构可以看出, 接地衬底上的贴片电容与贴片天线在结构上是一样的, 它们的不同之处在于一个用在低频, 另一个用在高频。对于贴片天线来说, 如果衬底很薄(例如 $< \lambda/12$), 那么只有二维的侧向波在贴片下传播, 这意味着垂直传播分量 k_z 等于零, 即使在贴片天线的边缘, 在垂直方向上依然保持这种类似于直流的特性, 而在离开边缘 $\lambda/2\pi$ 的距离以后, 这种垂直方向的特性就具有波动的特性^[5]。因此, 无论是对高频下的贴片天线还是对低频下的贴片电容, 若衬底很薄的话, 在贴片边缘的边缘场是一样的(即不变的)。贴片电容边缘场效应的公式很容易从(2)式总的电容中得到, 这也就是高频下贴片天线的边缘场公式, 然后由腔模可以得到贴片天线的模式 CAD 公式^[5]。

在平行平板电容模型中, 要考虑边缘场的影响, 可以将贴片电容的四边加以扩展, 如图 4(b)所示。而要分析贴片天线, 一样可以在腔模中通过同样的扩展将边缘场包括进来。这种边缘场的不变性并不准确, 但足够精确(即模糊), 而且根据不同的设计要求, 调整也非常容易。下面给出 3 个例子。



(a) 平行平板 (b) 探针馈电贴片天线 (c) L形探针馈电的贴片天线；
 (d) 在馈电探针附近加短路棒的小型化贴片天线 (e) 有限地板贴片天线

图 4 贴片天线的自展模糊电磁系列举例

例 7 L形探针馈电的贴片天线——L形探针可看作双支线调节器

贴片天线边缘场的不变性说明了可以方便地将场的效应分离,这对于边缘静电场和贴片下的二维波都是有效的。对于 L形探针馈电的贴片天线来说,我们也可以将 L形探针的影响与贴片天线分离开来,即:将贴片看作是地板,L形探针就变成了一个开路支线并同负载相串联(即贴片的 A 点),如图 4(c)所示。在贴片下方 B 点,有一个垂直探针(即圆锥形串联支线)连接到 C 点,在 C 点并联一个电容器(即同轴线开端的边缘场效应),最后进入到 50Ω 的同轴线。圆锥形串联支线和并联电容可以等效为一个双支线调节器,用于将负载(即贴片的 A 点)匹配到同轴线的 D 点。从图 5 的史密斯圆图上可以看到,位于 D 点的阻抗曲线有一个 $SWR < 2$ 的谐振环,因此这是一个宽频带的贴片天线,频带宽度约 45%。同实验结果以及 IE3D 相比较,结果吻合的很好^[6]。

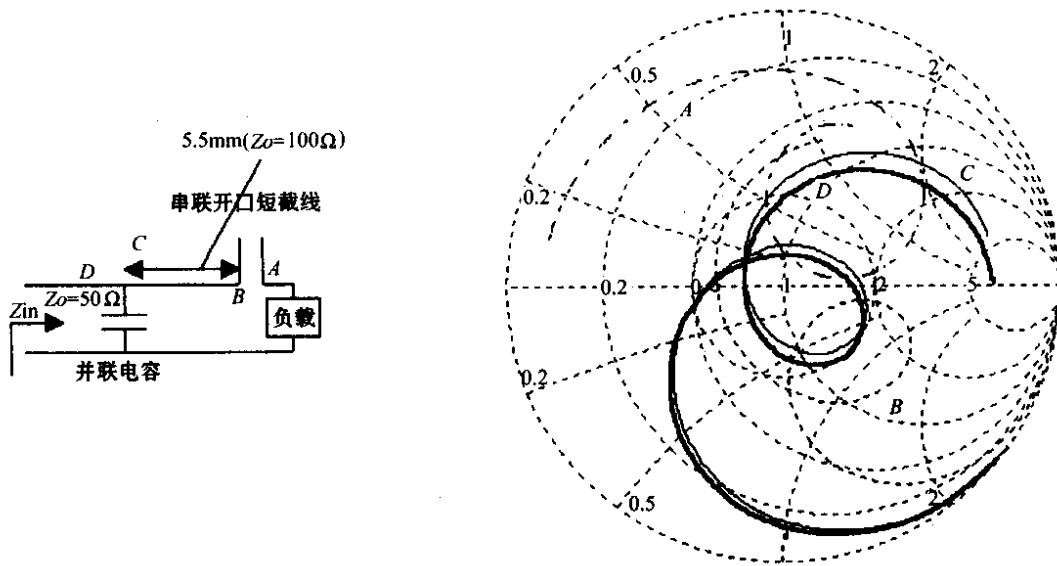


图 5 例 7 中 L 形探针馈电的贴片天线的双支线等效图和 A(在贴片上),
B, C 和 D(得到宽带匹配) 在史密斯圆图上的频率轨迹

例 8 在馈电探针附近加短路棒的小型化贴片天线——类似于折叠单极天线

图 4(d) 示出了加短路棒的贴片天线和与之相似的折叠单极天线。除了加短路棒的贴片有一个短得多的支线, 亦即大得多的支线电纳 Y_d 以外, 从折叠处开始这二者的支线是一样的。于是, 它们的输入导纳具有相同的形式^[7]:

$$Y_{in} = Y_d + \xi^2 Y_a \quad (6)$$

这里 Y_a 是所考察单极天线或贴片天线的辐射导纳, ξ 是所考察单极天线中辐射电流占馈电探针中总辐射电流的百分比。贴片天线中 Y_d 的公式可以从例 6 中得到。由图 6 可以看到, 与实验结果相比, 吻合得很好。将(6)式的结果画在史密斯圆图中, 我们可以看到: 1)这个小型化贴片天线不能比 $\lambda/4$ 短很多, $\lambda/4$ 对应于图 6 中第一个谐振频率点; 2)该小型化贴片天线的欧姆损耗大, 在本例中效率只有 11%。

例 9 有限地板贴片天线的阻抗——在几何绕射基础上的综合渐近式

对于有限地板贴片天线这样一个结构, 如果用数值方法例如矩量法进行计算, 非常耗时, 因为矩量法要对贴片和地板进行网格划分。但从物理概念可很容易看出, 有限地板边缘的绕射线(如图 4(e)所示)对贴片的阻抗有微扰。这种绕射线到微扰阻抗的转换可以根据绕射系数^[8]来得到, 也就是将有限地板的边缘看成是半透明的镜子, 从而得到微扰阻抗的公式。将此微扰阻抗与例 6 贴片天线(无穷大地板)的阻抗公式加在一起, 就得到了我们所要的有限地板贴片天线阻抗公式^[8]。

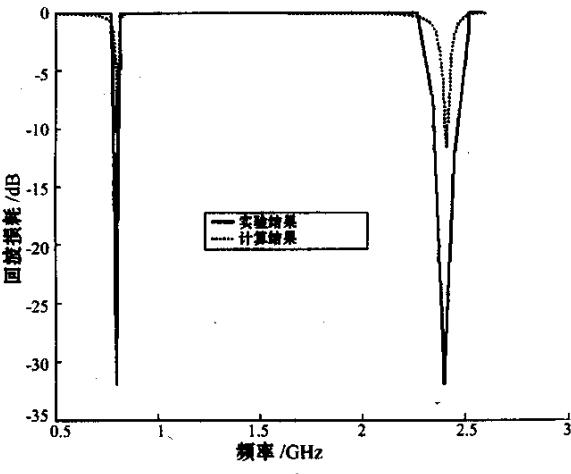


图 6 例 8 中实验与“折叠”贴片天线公式(6)计算的反射损耗比较

4 结论

在物理概念基础上的模糊电磁学逼近给出的 CAD 公式简单, 精确, 而且有物理意义。目前大约有 50 个公式已经推导出来, 它们覆盖了很宽的范围结构, 频率从直流到几何绕射。而考虑表面波以后的微带衬底格林函数的 CAD 公式也已经完成^[9]。

在设计中为了使物理概念清晰, 任意常数的个数一定要尽量少, 在每个自展步骤中为 1 到 2 个。因为这些公式是建立在物理概念基础上的, 所以误差都不会太大。对有“中段校准”的所有步骤来说, 小于 2% 到

3%。对于实际设计和制造来说,这样的误差范围通常已足够了。

自展步骤不要太多。例如,从一个简单的导体球电容公式到复杂的螺旋电感加寄生电容公式,总共只有4步(例1到例4)。利用边缘场的不变性(2)式的平行平板电容通过自展可以扩展到各种不同设计的贴片天线和振器,如宽带贴片天线,小型化贴片天线以及有限地板贴片天线。

正如本文例子所示,这种逼近清楚,精确,简单易学,且易于发展。工程师们往往要利用过去所积累的经验来进行设计,而在自展系列中模糊电磁学也是这样。

模糊电磁学所得到的CAD公式覆盖范围宽,而且简单,这对于设计来说可以提供非常好的物理基础,但是这些公式却需要1到2个任意常数用以“中段校准”,该任意常数又需要与数值软件结果相匹配来得到。更进一步来讲,在实际设计过程当中,具有2%到3%误差的CAD公式仍然不够准确。因此,就象Bandler的空间映射过程^[10]一样,我们可以将CAD公式看作是“非常粗糙但还算准确的模型”用于初始设计与优化,然后用通用数值软件给出“精细模型”以提高设计精度,完成最后一步优化。

参 考 文 献

- [1] Y L Chow, M M Yovanovich. The shape factor of the capacitance of a conductor. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53: 8470~8475.
- [2] Y L Chow, W C Tang. Development of CAD formulas of integrated circuit components-fuzzy EM formulation followed by rigorous derivation. *J. of EM Waves and Appl.*, 2001, 15(8): 1097~1119.
- [3] Wan C Tang, Y Leonard Chow. Inductance formulas of square spiral inductor on grounded substrate by duality and synthetic asymptote. *IEEE-MTT Int. Symp.*, Seattle WA, USA, June 2~7, 2002. 2069~2072.
- [4] Y L Chow, N N Feng, D G Fang. A simple method for ohmic loss in conductors with cross-section dimensions on the order of skin depth. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1999, 20(5): 302~304.
- [5] Y X Sun, Y L Chow, D G Fang, K M Luk. CAD formula of rectangular microstrip patch antenna on thick substrate. *IEEE-AP Int. Symp.*, San Antonio TX, USA, June 16~21, 2002. 866~869.
- [6] Y L Chow, K L Wan. Band broadening of patch antenna by elementary stub tuners of transmission line. *IEEE AP-S Int. Symposium*, Boston MA, USA, July 8~13, 2001. 110~113.
- [7] Y L Chow, K L Wan. Miniaturizing patch antenna by adding a shorting pin near the feed probe—a folded monopole equivalent. *IEEE-AP Int. Symp.*, San Antonio TX, USA, June 16~21, 2002. 6~9.
- [8] C L Mak, Y L Chow, K M Luk. On finite ground plane effect of a microstrip patch antenna—A CAD formula of impedance perturbation by synthetic asymptote and GTD. *IEE Proc. Ant. Prop.*, revision done March 12, 2002.
- [9] Y Leonard Chow, Wan C Tang. 3D Green's functions of microstrip separated into simpler terms—behavior, mutual interaction and formulas of the terms. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2001, 49(8): 1483~1491.
- [10] J W Bandler, R M Biernacki, Shao Hua Chen, P A Grobelny, R H Hemmers. Space mapping technique for electromagnetic optimization. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1994, 42(12): 2536~2544.

周 雍 1965年获得加拿大多伦多大学博士学位,1964~1966年在美国National Radio Astronomy Observatory工作,1966年后到加拿大滑铁卢大学工作,从事单片微波集成电路的数值方法和优化方法研究,1996~2002年在香港城市大学工作。到目前为止,在各种期刊和会议上发表文章超过250篇,另外还拥有5个美国和加拿大的专利。

E-mail: ylchow@mahtab.uwaterloo.ca

唐万春 1990年获得清华大学电子工程系工学学士学位,1995年获得南京理工大学工学硕士学位,现在香港城市大学电子工程系攻读博士学位。主要研究方向为单片微波集成电路的数值方法和优化方法的研究。

E-mail: wctang@ee.cityu.edu.hk

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>