

文章编号 1000-5013(2002)01-096-04

压控变容二极管电容特性的解析表达式

王建成 明 杨

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 利用场论说推导出非线性电容特性的普遍公式, 并根据生产厂家给出的实验特性曲线, 用 Matlab 程序进行曲线拟合, 得出 MMVL105GT1 变容二极管的非线性电容作为电压的函数解析式, 为工程上使用变容二极管的解析表达式提供了理论依据.

关键词 场论说, 非线性电容, 变容二极管, 解析式

中图分类号 TN 111.02 TM 151+.3

文献标识码 A

场论说^[1]把属于不同学科的物理电动力学与电工理论有机地结合起来, 在网络理论中提出‘网络场论说’学术思想. 它主张电网络理论的基础应彻底和完全建立在麦克斯韦方程组基础上, 并运用纯逻辑推理, 去演绎从线性网络到非线性网络中的有关问题^[2]. 本文利用场论说, 推导出非线性电容特性普遍公式^[3]. 它对于可作为非线性电容器的变容二极管, 依已知的实验特性曲线, 推导出它们的非线性电容作为电压的函数解析式. 此举使理论与生产实际更好地结合起来, 因而能广泛使用非线性电容提供了新的途径.

1 变容二极管的数学模型

场论说已给出倒电容与倒电容张量分量之间的关系为^[4]

$$\frac{1}{C} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \left(\frac{1}{C} \right)_{mn} \cos^2(\mathbf{j}^D, \mathbf{e}_n), \quad (1)$$

式中

$$\left(\frac{1}{C} \right)_{mn} = \frac{\int_{\Omega} \mathbf{h}_m \cdot \mathbf{h}_n \, d\Omega}{\int_{\Omega} (\epsilon_{mn}^{(0)} + \epsilon_{mn}^{(1)} + \dots + \epsilon_{mn}^{(k)} + \dots) S_m(u_1 u_2 u_3)}, \quad m = 1, 2, 3.$$

而 $S_m (m = 1, 2, 3)$ 是等位面 S 在广义正交坐标系变量, u^1, u^2, u^3 为常数的坐标面上的投影, $h_m (m = 1, 2, 3)$ 称为广义正交坐标的度量系数. 令

$$\epsilon_{mn} = \epsilon_{mn}^{(0)} + \epsilon_{mn}^{(1)} + \dots + \epsilon_{mn}^{(k)} + \dots, \quad m, n = 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中 ϵ_{mn} 为时间导数电容率张量. 而

$$\epsilon_{mn}^{(1)} = \sum_{l=1}^3 \epsilon_{mnl} \hat{E}_l,$$

$$\begin{aligned}\epsilon_{nn}^{(2)} &= \frac{3}{4} \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 \epsilon_{nlp} (\hat{E}_l \hat{E}_p + \hat{E}_l \hat{E}_p^*), \\ \epsilon_{nn}^{(3)} &= \frac{1}{6} \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \epsilon_{nlpq} (4 \hat{E}_l \hat{E}_p \hat{E}_q + 10 \hat{E}_l \hat{E}_p \hat{E}_q^*),\end{aligned}$$

依次称为非线性一级、非线性二级、……的时间导数电容率张量, 其中 $\epsilon_{nn}^{(0)}$, ϵ_{nml} , ... 称为各阶电容率张量.

把变容二极管视为非线性电容器, 并用平行板电容器来等效. 设板面面积为 S , 板距为 d , 其内非线性介质的 3 个主轴与选取的直角坐标 3 个轴一致. 令平行板法线方向为介质主轴 z 轴, 因此有

$$\left(\frac{1}{C}\right)_{mn} = 0, \quad \cos(\mathbf{j}^D, \mathbf{e}_x) = \cos(\mathbf{j}^D, \mathbf{e}_y) = 0, \quad \cos(\mathbf{j}^D, \mathbf{e}_z) = 1, \quad m \neq n.$$

故由式(1), 可得

$$\frac{1}{C} = \frac{h}{0} \frac{dz}{\epsilon_z S}. \quad (3)$$

若只计实数, 则根据式(2), 可把式中的 ϵ_{zz} 表示为

$$\epsilon_{zz} = \sum_{i=1}^n \epsilon E^i, \quad (4)$$

式中 $\epsilon = \epsilon^0$, $\epsilon = \epsilon_{zz}$, $\epsilon = \frac{3}{2} \epsilon_{zzz}$, $\epsilon = \frac{7}{3} \epsilon_{zzzz}$, ...

如假定 $E = V/h$, 则把式(4)代入式(3), 可得

$$C = \sum_{i=0}^n \frac{\epsilon S V^i}{h^{i+1}}. \quad (5)$$

于是, 电容可表示为电压的多项式形式, 即

$$C = \sum_{i=0}^n b_i V^i, \quad (6)$$

其中 $b_i = S \epsilon / h^{i+1}$. 由式(6)可知, 若能用给定的一组实验数据 (C_i, V_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 拟合一个多项式, 得出 b_i , 可求出 ϵ . 进而可得出各阶非线性电容率张量 $\epsilon_{nn}^{(0)}$, ϵ_{nml} , ...

2 曲线拟合的原理

对于非线性电容器, 设有一组 n 个实验点 (V_i, C_i) ($i = 1, 2, \dots, n$). 现要用 m 次多项式

$$C = P_m(V) = b_0 + b_1 V + b_2 V^2 + \dots + b_m V^m$$

拟合这一组数据, 且多项式的次数 $m < n-1$. 采用最小二乘法拟合, 使这个多项式在各个 V_i 处的值与实验值 C_i 之差的平方和

$$Q = \sum_{i=1}^n (P_m(V_i) - C_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=0}^m b_j V_i^j - C_i \right]^2$$

极小. 在 Q 的表达式中, V_i, C_i 是已知的. 因此, 把 Q 看作多项式系数 b_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$) 的函数, 相对于 b_k 求 Q 的偏微商并令之为零. 有

$$\frac{\partial Q}{\partial b_k} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=0}^m b_j V_i^j - C_i \right] V_i^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m,$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b_k} = 2(\sum_{j=0}^m b_j \sum_{i=1}^n V_i^{j+k} - \sum_{i=1}^n (C_i V_i^k)) = 2(\sum_{j=0}^m b_j P_{j+k} - t_k) = 0,$$

其中 $P_j = \sum_{i=1}^n V_i^j$, $t_k = \sum_{i=1}^n C_i V_i^k$. 因此, 最小二乘法拟合的多项式系数满足 $\sum_{j=0}^m b_j P_{j+k} = t_k$. 求出系数, 便可得到拟合的压控多项式. 进而, 可求出给定的非线性电容的各级电容率张量.

3 压控变容二极管 MMVL105GT1 的解析表达式

下面以压控二极管MMVL105GT1为例, 数据如表1所示. 根据Motorola公司给出的实表1 压控二极管 MMVL105DT1 的数据.

序号	C/pF	V/V	序号	C/pF	V/V	序号	C/pF	V/V
1	18.50	0.3	7	15.88	0.9	13	8.38	5.0
2	18.13	0.4	8	15.50	1.0	14	7.38	6.0
3	17.75	0.5	9	13.63	1.5	15	6.50	7.0
4	17.25	0.6	10	12.38	2.0	16	5.75	8.0
5	16.75	0.7	11	10.75	3.0	17	5.25	9.0
6	16.38	0.8	12	9.75	4.0	18	5.00	10.0

验特性曲线, 推导电容作为电压的函数解析式. 分别采用二次和五次多项式, 利用 Motorola 程序进行曲线拟合. 拟合的结果如图 1, 2 所示. 显然, 五次多项式拟合的效果要好一些, 它的

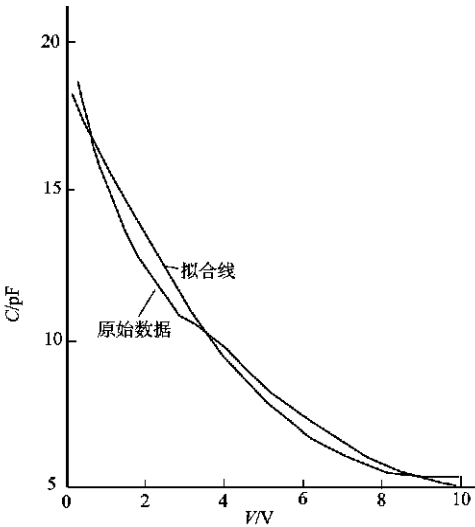


图1 二次多项式曲线拟合

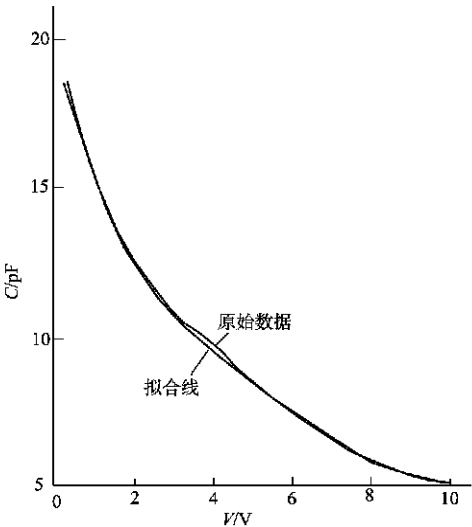


图2 五次多项式曲线拟合

系数 $b_j(j = 0, 1, \dots, 5)$ 如表 2 所示.

表2 五次多项式的系数表

b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
-------	-------	-------	-------	-------	-------

-6.56×10^{-4} 2.25×10^{-2} -0.291 1.82 -6.67 20.60

所以, 与变容二极管 MMVL105GT1 相当的实体非线性电容器的电容, 其作为电压函数的解析表达式为

$$C = -6.56 \times 10^{-4} V^5 + 2.25 \times 10^{-2} V^4 - 0.291 V^3 + 1.82 V^2 - 6.67 V + 20.6.$$

设 S 为单位面积, h 为单位长度, 则可求得非线性电容的各级电容率张量. (1) 当 $i = 0$ 时, $\epsilon_z^{(0)} = \epsilon_0 = b_0 = 20.6$. (2) 当 $i = 1$ 时, $\epsilon_{zz} = \epsilon_1 = b_1 = -6.67$. (3) 当 $i = 2$ 时, $\epsilon_{zzz} = 2\epsilon_2/3 = 2b_2/3 = 1.21$. (4) 当 $i = 3$ 时, $\epsilon_{zzzz} = 3\epsilon_3/7 = 3b_3/7 = -0.125$. (5) 当 $i = 4$ 时, $\epsilon_{zzzzz} = 0$.

4 结束语

作为网络场论说的应用之一, 本文给出压控变容二极管电容特性的解析表达式. 根据场论说的理论, 还可给出流控变容二极管电容特性的解析表达式, 以及晶体二极管非线性电容器电阻特性的流控和压控多项表达式. 这些内容将另文予以研究.

参 考 文 献

- 1 陈 年, 何煜光. 非线性网络与线性网络统一的场论说[J]. 中国科学(A 辑), 1994, 24(12): 1316 ~ 1326
- 2 王建成, 明 杨, 李 强. 各项异性磁介质中传输线的自感[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2001, 22(1): 90 ~ 93
- 3 陈 年, 王建成. 从线性到非线性的四种基本电子元件特性普遍公式[J]. 科学通报, 1993, 38(16): 1527 ~ 1531
- 4 陈 年, 陈思明, 王建成. 从麦克斯韦方程组建立的新电路理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 222 ~ 232

Analytic Expression of Capacitance Characteristic of Voltage-Operated Varactor

Wang Jiancheng Ming Yang

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract By using the statement of field theory, a general formula is derived for nonlinear capacitance characteristic. Based on experimental characteristic curve given by manufacturer, the curve-fitting is carried out by using Matlab program. thus the nonlinear capacitance of MMVL105GT1 varactor can be obtained. This nonlinear capacitance of MMVL105GT1 varactor may serve as functional analytic formula of voltage, it provides theoretical basis to the analytic expression of varactor used in engineering.

Keywords statement of field theory, nonlinear capacitance, varactor, analytic expression