

一种计算电感线圈分布电容的简化模型

陈 龙,赵艳美,张 宁

(南京师范大学磁电子学实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 建立了计算电感线圈分布电容的简化模型. 等效电路分析显示层间电容是电感线圈分布电容的主体. 根据电场储能是由空间内电场强度分布决定的原理,分析了“Z 型”和“U 型”两种不同的紧密排绕方式线圈的电场储能,并推导出该两种不同线圈的等效分布电容的具体表达式. 通过与实验数据比较,显示由上述计算方法得到的线圈分布电容是可靠的. 其表达式简明,方便用于指导电感器和滤波器的设计,以及变压器分布电容等的预估.

[关键词] 电感线圈,分布电容,电场储能

[中图分类号] O441.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2014)02-0055-05

A Simplified Model to Calculate the Distributed Capacitance of Inductor Coil

Chen Long, Zhao Yanmei, Zhang Ning

(Magnetic Electronics Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A mode to calculate distributed capacitances of inductances coil was suggested. Analysis based on effective circuit shows that the interlayer capacitance was the main part of the distributed capacitance of inductor coils. According to the principle of the energy of electric field determined by the electric field distribution, the electric field energies of both kinds of coils wound with "Z" and "U" types were analyzed, and their expressions of the equivalent distributed capacitances derived, respectively. Through the comparison of experimental results with that of the calculation, the mode was proved to be correct. The expression was simple and easy to use for the design of inductors and filters, as well as the estimation of the distributed capacitance of transformer, etc.

Key words: inductor coil, distributed capacitance, electric field energy storage

众所周知,任何两个绝缘导体之间都存在电容. 例如导线之间、导线与大地之间,都是被绝缘层和空气介质隔开的,所以也都存在着电容. 这种非电容形态形成的一种寄生参数称之为分布电容. 随着电子产品高频化,器件寄生参数对产品性能的影响已不可忽略. 作为在电路中的主要能量传递器件——电感器,其分布参数对电路性能的影响更大. 目前报道的有关电感线圈分布电容的文献不少是实验测量方法^[1-4],部分文献从理论上定性分析了影响分布电容大小的因素^[5-7],文献[8]首先对每匝线圈与周围线匝构成的分布电容进行分析,将每匝线圈集总为一个电节点,得到完整的电感器分布电容网络后,通过电容网络的节点电压方程推导出等效导纳从而得到电感器两端的等效分布电容. 文献[9]利用有限元分析软件建立线圈截面导体和分布电容矩阵,然后计算其电容关联矩阵,从而求得线圈的分布电容,可获得较精确的结果. 但以上两种分布电容的计算方法都比较繁琐,而且均没有给出明确的表达式,在实际工程中不便广泛应用. 因此采用简化而有效的模型来预估电感器件的分布电容,从而指导电感器件的设计有着重要的意义.

1 计算方法

1.1 线圈分布电容初步分析

电感线圈广泛应用在各种电器设备中,而且通常是在交流状态下工作,通常会考虑他们的电感、阻抗等,但由于电感线圈的匝和匝之间、线圈的层和层之间不可避免的存在着分布电容,分布电容的存在将对

线圈的其他电学量的有效值造成影响^[2,10,11]. 绕组同一层的各匝线圈之间的分布电容称为匝间电容 C_c , 同一绕组不同层间的分布电容称之为层间电容 C_g , 如图 1 所示.

如果匝数较多, 相邻两匝之间的电势差会比较小, 匝间电容储存电荷会比较少. 由上图 1 可知, 从绕组端口 A、B 看, 所有的匝间电容都是串联的, 由于多个电容串联后等效电容很小, 因此在分析线圈总的分布电容时可以忽略掉匝间电容. 而同一绕组层与层间的电容是并联的, 并联后总电容等于个电容值之和. 经过以上简单分析, 可以得出层间电容是线圈分布电容的主要部分.

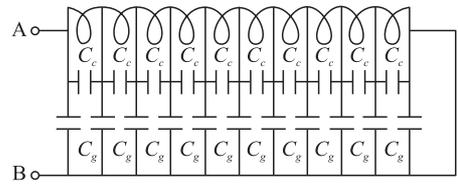


图 1 绕组分布电容示意图

Fig. 1 Distributed capacitance of winding

1.2 线圈分布电容表达式推导

由 1.1 中分析可知, 层间电容是线圈分布电容的主体, 因此这里重点研究层间电容的理论计算方法. 通常, 电感线圈绕组有两层或更多层, 多层的情况可以看成是两层情况的推广, 计算方法是类似的. 因此, 首先以绕组为两层的分布电容为例计算绕组的分布电容, 然后对多层加以推广. 为了方便计算与表述, 首先做以下两个基本的假设^[12]:

- (1) 电压分布正比于导线长度, 即两线圈间的电势差正比于线圈间所包括的线圈长度.
- (2) 在同一圈中, 电压被认为是常数, 其大小等于此圈开始端电压和结束端电压的平均电压.

我们这里只探讨紧密排绕线圈的分布电容, 根据前面的两个基本假设, 线圈绕组不是 1 个等势体, 所以在计算绕组的层间分布电容时需要考虑绕组的电压分布情况. 以下图 2(a)、图 2(b) 分别为“Z 型”和“U 型”2 种不同的紧密排绕方式示意图. 可见相邻两层绕线对应匝间的电势差分布是不一样的, 下图 3 中坐标的纵轴 U 表示上下两层间对应匝的电势差, 横坐标 k 表示从每层的一端开始数第 k 匝, N 为每一层的线圈匝数. 对于“Z 型”绕线方式, 由基本假设可得到其电势差分布如下图 3(a), “U 型”绕线方式的电势差分布如下图 3(b) 所示.

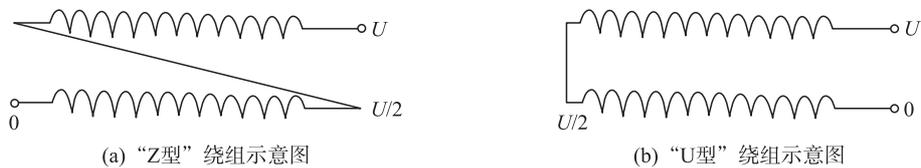


图 2 绕组示意图

Fig. 2 Sketch map of winding

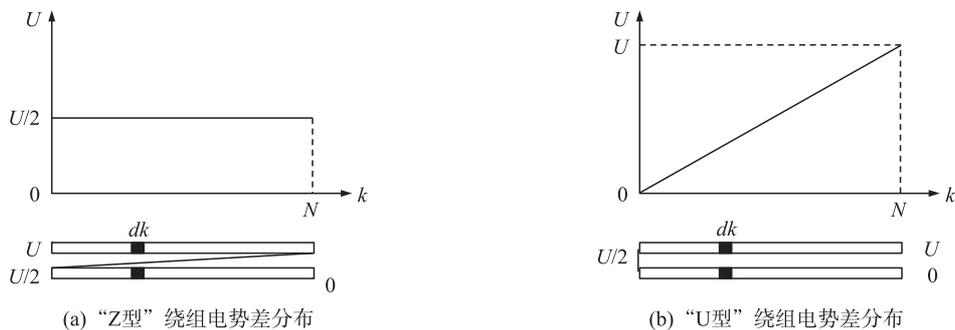


图 3 绕组电势差分布

Fig. 3 Distribution of electric potential difference of coil winding

“Z 型”绕线方式时, 由 3.2(a) 中电势差分布与线圈排列的关系结合电场能量公式 $W_e = \iiint \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2} dV$ ^[13], 可求出两层绕线间区域所储存的电场能量为:

$$W_e = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{2d} \cdot \left(\frac{U}{2}\right)^2 \cdot l \cdot ND = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 l N D U^2}{8d}, \quad (1)$$

其中 l 为平均匝长, D 为导线截面直径, d 为层间距离.

另有,电容储能公式

$$W_e = \frac{1}{2} C_p U^2, \quad (2)$$

对比式(1)和式(2)可得出层数为2时“Z型”绕组的等效分布电容为

$$C_{pz} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l N D}{4d}, \quad (3)$$

若绕组为 n 层,由图3(a)可知,相邻两层对应线圈间的电势差始终为 $\frac{U}{n}$,层间区域所储存的总的电场能为 $n-1$ 倍的单个相邻层间的区域所储存的电场能.算法与两层类似,当 n 不是很大时可认为匝长仍为 l ,则 n 层绕线间区域所储存的电场能量为:

$$W'_e = (n-1) \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{U}{n}\right)^2}{2d} \cdot l \cdot N D = \frac{n-1}{n^2} \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l N D U^2}{2d}, \quad (4)$$

对比式(2)和式(4)可得层数为 n 层时“Z型”绕组的等效分布电容为

$$C'_{pz} = \frac{(n-1) \varepsilon_r \varepsilon_0 l N D}{n^2 d}, \quad (5)$$

“U型”绕线方式时,由3(b)中电势差分布与线圈排列的关系,得两层中第 k 匝线圈对应的电势差为

$$U(k) = \frac{U}{N} k, \quad (6)$$

两层间 dk 段区域所储存的电场能为

$$dW_e = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l \cdot D \cdot U(k)^2}{2d} dk, \quad (7)$$

所以两层线圈间整个区域所储存的电场能为

$$W_e = \int_0^N \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l \cdot D \cdot U(k)^2}{2d} dk, \quad (8)$$

把式(6)代入式(8)并积分可得

$$W_e = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l \cdot D N \cdot U^2}{6d}, \quad (9)$$

对比式(9)和式(2)可得出层数为2时“U型”绕组的等效分布电容为

$$C_{pu} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l D N}{3d}, \quad (10)$$

若绕组为 n 层,方法与计算两层类似,相邻两层中第 k 匝线圈对应的电势差为

$$U(k)' = \frac{2}{n} \frac{U}{N} k, \quad (11)$$

相邻两层间 dk 段区域所储存的电场能为

$$dW'_e = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l \cdot D \cdot U(k)'^2}{2d} dk, \quad (12)$$

所以 n 层线圈间整个区域所储存的电场能为

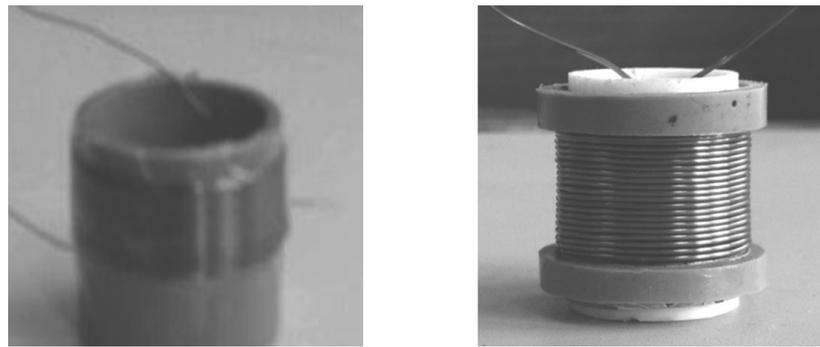
$$W'_e = (n-1) \int_0^N \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 l \cdot D \cdot U(k)'^2}{2d} dk = \frac{1}{2} C'_{pu} U^2, \quad (13)$$

联立式(11)和式(13)可得层数为 n 层时“U型”绕组的等效分布电容为

$$C'_{pu} = \frac{4(n-1) \varepsilon_r \varepsilon_0 l D N}{3n^2 d}. \quad (14)$$

2 实验验证

为证实上述模型的可行性,下面进行实验验证.图4(a)、4(b)分别为手工绕制的“Z型”线圈和“U型”线圈绕组实物图.



(a) “Z型”绕组实物图
(a)The pictures of “Z” type

(b) “U型”绕组实物图
(b)The pictures of “U” type

图 4 绕组实物图

Fig. 4 The pictures of coil winding

表 1、表 2 分别列出了“Z 型”线圈绕组和“U 型”线圈绕组的参数情况:

表 1 “Z 型”线圈绕组参数

Table 1 The “Z” type coil winding parameters

层数 n	每层匝数 N	平均匝长 l/mm	漆包线漆 ϵ_r	导线截面直径 D/mm	层间距 d/mm
2	22	100.7	2	0.45	0.12

表 2 “U 型”线圈绕组参数

Table 2 The “U” type coil winding parameters

层数 n	每层匝数 N	平均匝长 l/mm	漆包线漆 ϵ_r	导线截面直径 D/mm	层间距 d/mm
2	20	73.8	2	0.9	0.18

上表中漆包线漆(聚四氟乙烯)的相对介电常数、导线截面直径、漆包线漆厚度可通过常用漆包线规格及参数表查到. 将表 1 中参数代入式(5)中,可求得此“Z 型”线圈等效分布电容 C_{pz} 的理论值为 36.8 pF. 将表 2 中参数代入式(14)中,可求得此“U 型”线圈等效分布电容 C_{pu} 的理论值为 43.5 pF.

目前电感线圈的分布电容不能直接测量得到,需要采用间接的测量方法. 这里我们采用文献[2]中的方法对上述“Z 型”绕组和“U 型”绕组的分布电容进行测量. 即通过在不同的频率 $f_1, f_2 (f < \frac{1}{3}F_z, F_z$ 为谐振频率)下,分别测出电感线圈对应的两个有效电感值 L_{e1} 和 L_{e2} ,代入下式(15)中便可测得电感线圈的等效分布电容.

$$C_p = \frac{L_{e2} - L_{e1}}{4\pi^2 L_{e1} L_{e2} (f_2^2 - f_1^2)} \quad (15)$$

采用 LCR 分析仪对图 4(a)中“Z 型”线圈和图 4(b)中“U 型”线圈依据上面的实验原理进行测量,其测量结果如下:

表 3 “Z 型”线圈分布电容实验测量结果

Table 3 Distributed capacitance measurement results of “Z” type coil winding

f_1/kHz	$L_{e1}/\mu\text{H}$	f_2/kHz	$L_{e2}/\mu\text{H}$	C_p/pF	\bar{C}_p/pF
600	84.78	700	86.30	40.5	41.6
700	86.30	800	88.20	42.2	
800	88.20	900	90.46	42.2	

表 4 “U 型”线圈分布电容实验测量结果

Table 4 Distributed capacitance measurement results of “Z” type coil winding

f_1/kHz	$L_{e1}/\mu\text{H}$	f_2/kHz	$L_{e2}/\mu\text{H}$	C_p/pF	\bar{C}_p/pF
1 000	30.09	1 100	30.44	46.1	46.4
1 100	30.44	1 200	30.83	45.8	
1 200	30.83	1 300	31.28	47.3	

首先,对上面“U型”线圈绕组分布电容的理论值 43.5 pF 与其实验测量值 46.4 pF 进行比较,可以看出两种结果比较接近,即证实了“U型”紧密排绕方式线圈的分布电容的简化模型是可靠的.其次,对“Z型”线圈绕组的理论值 36.8 pF 与其实验测量值 41.6 pF 进行比较,可以看出两种结果比较接近,其简化模型也是可靠的,但其误差相对“U型”线圈要大一些,经过分析得到,是由于“Z型”线圈绕制时两层线圈间相当于“接入了一根长约为 ND 的导线”,这部分导线分得了一小部分电压,这使得上下两层间对应匝的电势差实际上比图 3(a)中 $U/2$ 要稍大些,再结合式(1)和式(2)可得出本文中“Z型”线圈分布电容表达式的值比实际值有所偏小.综合来看“U型”和“Z型”线圈的分布电容,其理论值都略小于实验值,这个结果与实际情况相吻合,因为本文的简化模型中忽略了同一层线圈的匝间电容.

3 结论

本文建立了计算电感线圈分布电容的简化模型,从建立过程可以看出相对于前文叙述的文献[8,9]中的计算方法要简便,而且得到了简明的电感线圈等效分布电容表达式,通过与实验数据比较,显示由此简化模型得到的线圈分布电容是可靠的.本模型方便用于指导电感器和滤波器的设计,也可用于变压器分布电容等的预估.此外,从得到的分布电容表达式可以直观地看出:在绕组每层线圈匝数一定的情况下,绕组层数越多,等效分布电容就越小;在绕组每层线圈匝数和绕组层数相同的情况下,“Z型”绕组较之“U型”绕组能够有效降低等效分布电容.

[参考文献]

- [1] 郭华. 电感磁芯线圈间分布电容的研究与测试方法[J]. 微电机, 2010, 43(9): 109-112.
- [2] 高剑森, 王帆. 电感线圈分布电容对电学测量的影响与修正[J]. 煤矿机, 2010(6): 46-47.
- [3] 林辛, 张雄金. 空芯线圈分布电容测试的研究[J]. 电测与仪表, 1997, 34(379): 25-27.
- [4] 丁斌, 杨宁, 王志萍. 电感线圈分布电容和谐振频率的仿真与测量[J]. 变压器, 2010, 47(9): 42-50.
- [5] 齐玮, 钟和清, 林磊, 等. 分布电容对高频高压变压器性能的影响及其控制措施[J]. 通信电源技术, 2008, 25(3): 6-8.
- [6] Jian Hongyan, Tang Zhangwen, He Jie, et al. Analysis and optimum design of differential inductors using distributed capacitance model[J]. Chinese Journal of Semiconductor, 2005, 26(6): 1 077-1 082.
- [7] 蔡圣清, 周玉慧. 分布电容对变压器内参数影响不可忽略性分析[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2008, 24(4): 30-33.
- [8] 袁义生. 电感器分布电容的建模[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5): 90-93.
- [9] 杜建平, 李岩, 徐希强, 等. 基于有限元法的变压器分布电容参数计算方法的研究[J]. 变压器, 2012, 49(2): 6-9.
- [10] 仲崇权, 兰敬辉, 杨素英. 一种消除分布电容影响的电阻测量方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(3): 372-376.
- [11] 蒋力, 傅鹏, 潘圣民, 等. 高压分压器分布电容补偿的研究[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(9): 61-64.
- [12] Wu C H, Tang C C, Liu S I. Analysis of on-chip spiral inductors using the distributed capacitance model[J]. Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(6): 1 040-1 044.
- [13] 赵凯华, 陈熙谋. 新概念物理教程电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

[责任编辑: 顾晓天]