

分类号_____

编 号_____

U D C_____

密 级_____



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

本科生毕业设计（论文）

题 目：_____导电纤维的寄生电容研究_____

姓 名：_____夏丙一_____

学 号：_____11612208_____

系 别：_____电子与电气工程系_____

专 业：_____微电子科学与工程_____

指导教师：_____叶 涛_____

2019 年 06 月 09 日

诚信承诺书

1. 本人郑重承诺所呈交的毕业设计(论文),是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果,所有数据、图片资料均真实可靠。
2. 除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本论文的研究作出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确的方式标明。
3. 本人承诺在毕业论文(设计)选题和研究内容过程中没有抄袭他人研究成果和伪造相关数据等行为。
4. 在毕业论文(设计)中对侵犯任何方面知识产权的行为,由本人承担相应的法律责任。

作者签名:

2020 年 06 月 09 日

导电纤维的寄生电容研究

夏丙一

(电子与电气工程系 指导教师：叶涛)

[摘要]：柔性传感器能够满足可穿戴电子设备的未来发展需求，在医疗、航空、娱乐等产业内有广阔的发展前景。越来越多的研究关注导电织物在柔性电子器件方面的应用。本项目研究导电纤维的寄生电容现象，以金属导电纤维为例，提出了一种实验方法来估算单位长度上的寄生电容。

寄生电容是难以精确测量的分布参数，本项目中将导电纤维绕制成螺线管，并测量其两端得频率阻抗信息将寄生电容反映在共振频率上。基于螺线管的电感和自带电容的研究，本项目提出了由导电纤维制成的螺线管的等效电路模型。实验制作了多个导电纤维单层空芯螺线管，利用网络分析仪测量阻抗数据，最终经过数据处理测得了导电纤维的寄生电容。结果显示，本项目通过实验验证了寄生电容存在于金属导电纤维上并且与提出的等效电路模型的实验结果吻合；本项目提出的方法可以预测寄生电容的大小，作为对导电纤维的电学性能的评估，为基于导电纤维的柔性传感器件设计提供指导。基于此方法，项目测试了三种直径不同的金属导电纤维，计算出导电纤维的单位长度上寄生电容分别为：0.0970pf/m, 0.0935pf/m 和 0.0905pf/m。

[关键词]：导电纤维；寄生电容；柔性电子；

[ABSTRACT]: Flexible sensor is suitable for the future development of wearable electronic equipment, and has a broad prospect in medical, aviation, entertainment and other industries. More and more researches are reported on the application of conductive fabric in flexible electronic devices. This project focus on the parasitic capacitance of conductive fiber. An experimental method is proposed to estimate the parasitic capacitance per unit length. Parasitic capacitance is a distribution parameter that is difficult to measure accurately. In this project, the conductive fiber is made into a solenoid which resonant with the influence of the parasitic capacitance. The equivalent circuit model of the solenoid made of conductive fiber is proposed based on the research of solenoid inductance and self-capacitance. In order to verify the model, the single-layer hollow core solenoid of conductive fiber is made and the impedance data was measured by network analyzer. The expected parasitic capacitance data is obtained by data processing. As the result, this project verifies the existence of parasitic capacitance through experiments, and the proposed circuit model is consistent with the experimental results; the method proposed in this paper can predict the size of parasitic capacitance as an evaluation of the electrical performance of conductive fibers. Finally, the project has tested three kinds of metal conductive fibers with different diameters, and calculated the parasitic capacitance on the unit length of conductive fibers, which respectively is 0.0970pf/m, 0.0935pf/m and 0.0905pf/m.

[Keywords]: Conductive Fiber; Parasitic Capacitance; Flexible Electronics

目录

1. 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究方案.....	2
1.3 研究的创新点.....	3
2. 导电纤维与寄生电容.....	4
2.1 金属导电纤维.....	4
2.1.1 金属导电纤维的工艺与结构.....	4
2.1.2 金属导电纤维的寄生电容.....	6
2.2 螺线管的参数研究.....	7
2.2.1 螺线管的电感研究.....	8
2.2.2 螺线管的寄生电容.....	9
3. 建立模型与实验内容.....	12
3.1 等效电路模型.....	12
3.2 设计实验.....	13
3.2.1 螺线管设计.....	13
3.2.2 网络分析仪测量.....	14
4. 结果分析.....	16
4.1 实验结果.....	16
4.1.1 螺线管电感.....	16

4.1.2 寄生电容现象.....	16
4.2 估算寄生电容.....	18
4.2.1 验证等效电路模型.....	18
4.2.2 估算结果.....	20
5. 总结.....	22
5.1 结论.....	22
5.2 改进方向.....	22
参考文献.....	23
致谢.....	24

1. 绪论

1.1 研究背景

2013 年被称为“可穿戴设备元年”，而经过了近几年的进步，可穿戴电子设备领域已经发展出巨大的全球市场，不断成熟的技术正在改变人们的生活。可穿戴设备是能够延续性地穿戴在个人用户身体上，或能整合到个人用户的衣服、饰件中，并具备数据采集、处理、交互等能力的便携式电子设备。早在 2013 年跨国科技巨头诸如谷歌、三星和苹果已经向可穿戴电子设备领域进军，将其作为智能终端未来发展的关键。例如智能眼镜和智能手表这样的娱乐应用快速获得了人们的认可，将可穿戴设备的概念普及。当传统的互联网设备例如手机和电脑的市场发展停滞，汇聚了各类前沿技术和应用的可穿戴设备被视为下一个商业机遇。可穿戴设备是人、物联网、智能家居连接的最理想的互联网智能设备，是移动互联网进一步发展中极具市场潜力的应用。根据 IDC《中国可穿戴设备市场季度跟踪报告》报道，2018 年中国可穿戴设备市场出货量为 7321 万台，同比增长 28.5%；2019 年全年中国可穿戴设备市场出货量 9924 万台，同比增长 37.1%。相对于不断下滑的智能手机市场，中国可穿戴设备市场保持着高速增长的趋势^[1]。

柔性可穿戴电子传感器具有轻薄便携、电学性能优异和集成度高等特点，使其成为最受关注的发展方向。柔性薄膜电子器件在医学和休闲娱乐等领域有广阔的前景，特别是在医疗领域，柔性电子的发展与应用将是人们未来生命健康监测与治疗的主流方向。传感器是可穿戴电子器件设计的关键一环，直接影响了其的功能和效率。按照传感原理，柔性传感器主要可以分为压阻、电容和压电三大部分^[2]。柔性传感器可以要求实现不同的特性例如轻薄、透明、绝缘耐腐蚀等，这成为了柔性电子的关键优势^[3]。

织物由于其优异的柔韧性及透气吸水特性，越来越多地被选择为柔性电子器件的衬底材料，并被广泛应用于可穿戴电子领域。纺织面料具有更为理想的柔韧性、透气性和耐磨性，几乎可以实现任意角度的弯曲、扭转、拉伸等力学形变，能够满足日常生活中人体运动的要求，因此在纺织面料衬底上构筑柔性电子器件更适合未来可穿戴电子设备的开发^[4]。传统的导电织物早已得到应用，起初在纤维纱线中掺入导电金属丝短纤维，加工织造成导电面料用来消除衣服表面静电现

象，如无尘车间的抗静电服。未来的柔性传感器和可穿戴设备对导电纤维提出了例如高的导电性、可实现复杂的电路和电子元器件的互联结构等新的要求。兼具导电性能和穿戴舒适性的导电织物必将是未来柔性可穿戴电子领域重要的组成部分。图 1 展示了导线纤维整合到衣物上的纺织过程。

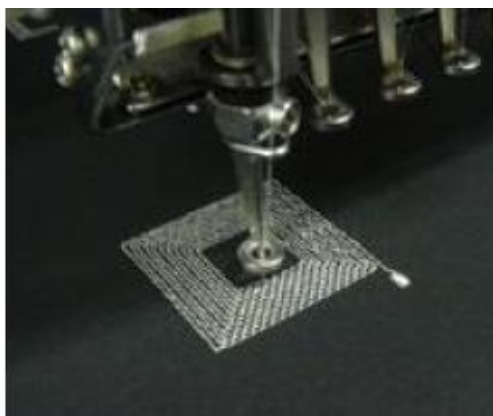


图 1 导电纤维可以与衣物完美结合

近年来不断有研究报道了导电纤维在柔性电子方面的应用。例如，Roudjane 等人介绍了一种用于人体呼吸实时监测的新型智能纺织品，其将 6 个非侵入式传感器阵列放置在人体的胸腹壁位置的衣物上。无线传感器通过蓝牙地将数据发送到检测基站。该传感器由中心频率为 2.4 GHz 的螺旋形光纤天线连接到一个发射器。基于呼吸过程中胸腔和腹部的变形引起螺旋形光纤天线的工作频率偏移来检测呼吸过程^[5]。另外 Rongzhou Lin 等人提出了一种导电纤维传感器，在人贴身衣物上的多点建立无源近场传感网络，用于动作检测。该项目通过导电纤维将多个传感器连接到一个 NFC 读写器上，由此实现了实时、多节点测量脊柱姿势以及在运动期间连续感知温度和步态方面的效用^[6]。

1.2 研究方案

本项目主要研究金属导电纤维的寄生电容现象，通过建立电路模型来估算寄生电容，在此基础上评估金属导电纤维的电磁属性。导电纤维的寄生电容已经在之前的科研工作中被发现，它作为分布参数难以准确地直接测量或从根本上消除，本研究提出了预测金属导电纤维的寄生电容的方法。影响寄生电容的因素很复杂，而表现形式也多种多样，因此本项目在保留主要特性的前提下将复杂的模型简化，以此直观地反映寄生现象并且为导电纤维的应用研究提供可参考的支持。技术路线展示在图 2 中，具体内容如下：

(1) 通过对金属导电纤维的微观结构观察得知其由更细的金属丝绞合而成，细丝之间存在缝隙，因此可以推测寄生电容的存在，并且建立金属导电纤维的电路模型。

(2) 提出谐振法测量导电纤维的寄生电容。向导电纤维的电路系统中引入电感，则该系统在某一频率发生谐振。通过实验取得谐振频率、电感、电阻值后基于电路模型计算电路的电容值。

(3) 设计实验。将金属导电纤维制成单层圆柱形螺线管作为电感，在高频的工作条件下形成谐振，分析得到的阻抗数据证明寄生电容存在。

(4) 基于螺线管的电路模型，提出估算金属导电纤维得寄生电容的算法。由对照试验得到的数据经分析可以确定寄生电容的数量级。

本文在第二部分首先总结了导电纤维的发展与制作工艺。在显微镜下观察金属导电纤维的结构提出假设建立电路模型。而后展示了螺线管的理论研究，包括电感的计算和节间电容的现象。第三部分介绍了在理论上建立的 RLC 电路模型和设计金属导电纤维与普通铜线的对照实验，并且对实验内容作说明。第四部分展示实验数据，由此证明导电纤维的寄生电容现象。另外介绍了估算寄生电容的数据处理方法。

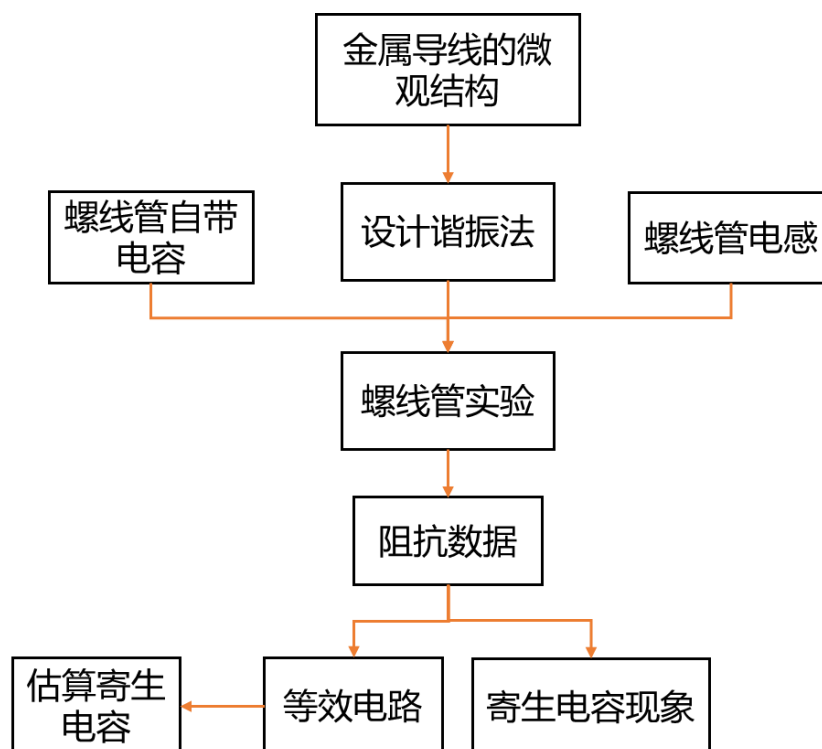


图 2 本项目的技术路线

1.3 研究的创新点

本项目基于前人对螺线管的研究，提出了螺线管谐振法，实现了通过实验估算导电纤维的寄生电容。具体而言，本研究的创新点主要表现在以下三个方面。

（1）实验上证明了关于寄生电容现象的存在，验证了一些此前在柔性传感器中提出的假设。

（2）提出了预测导电纤维的寄生电容的实验方法。此前对导电纤维的研究主要集中于其柔性和导电性能，而本项目对寄生电容的研究补充了其电学性能的评估方面。

（3）本项目的研究方法是在螺线管寄生电容和螺线管电感研究的基础之上做出改进，将模型进行推广。

2. 导电纤维与寄生电容

导电纤维是指通过导电成分赋予纺织纤维导电属性，图 3 展示了显微镜下，导电纤维上不同导电成分在纺织纤维上的分布情况。其电阻率一般在 $10^4 - 10^7 \Omega/cm$ 的范围内，先进的技术可以使其达到 $10^2 \Omega/cm$ 。一般有以下三类：金属导电纤维、含碳纤维或碳黑的复合纤维、有机高分子导电纤维^[7]。其中碳纤维是通过复合纺丝技术，以碳黑母粒为芯聚合物为外皮制成导电纤维；有机高分子导电纤维使用聚苯胺（PANI）、聚吡咯（PPY）、聚噻吩（PTH）等高分子，通过化学掺杂提高导电性。其中高聚物保证其柔韧性。本项目中主要使用金属导电纤维作为实验材料^[8]。

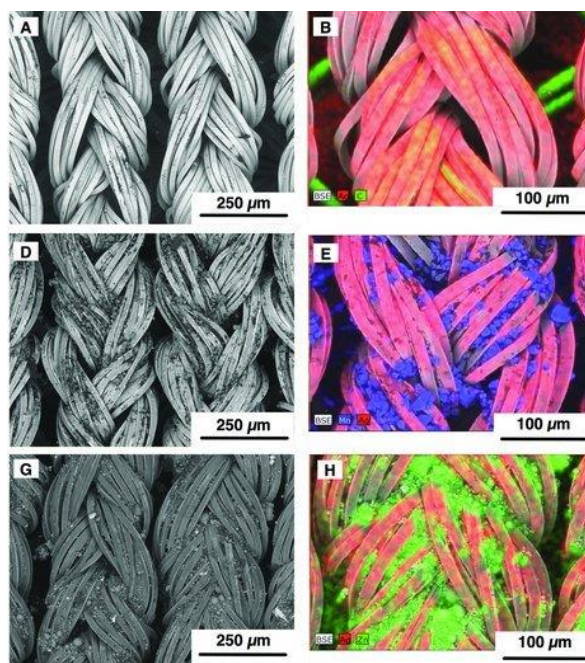


图 3 赋予纺织纤维导电成分制成导电纤维。彩色荧光为不同导电成分。

2.1 金属导电纤维

金属纤维是发展最早、最常见的导电纤维，指的是通过特定加工方法将金属材料加工成适用于纺织的纤维。金属纤维性能最接近金属，具有良好的导电性、导热性、耐腐蚀性^[8, 9]。

2.1.1 金属导电纤维的结构与工艺

传统的制造方法选取铜、不锈钢、铝等金属材料，通过拉丝法或切削法制成 $10\mu m$ 直径左右的细丝。导电性最好，但是难以拉伸，柔性不足。时下较为流行

的工艺使用金属镀层技术，在纺织纤维表层外镀金属。工艺有真空镀、化学镀、电镀等。真空镀是在真空状态下在纺织物表面沉积金属原子形成纳米薄膜；化学镀是采用还原剂使金属离子还原沉积在织物表面；电镀是用电流让溶液中的金属离子还原。金属化合物材料往往选取铜、银、镍的硫化物或者碘化物^[9]。

2.1.2 金属导电纤维的寄生电容

金属导电纤维的寄生电容是由其结构引起的分布参数。图4给出了一种典型的金属导电纤维微观结构，导电纤维是由截面直径为微米级别的金属细丝绞合、交织在一起构成的。相比于传统的金属导线，这样的结构提高了柔韧性的同时也会增大导线的电阻率和产生寄生电容。导线的电阻被称为本征电阻，主要受到工艺和材料的影响。一般来说，金属导电粒子有高导电率，碳系导电粒子保证了一定的电导率同时有较轻的比重。而寄生电容的来源主要是细丝之间的空气间隙。导电时，电流分布在每根细丝之上，假设细丝与间隙的分布均匀，则通电导线之间存在电容。从而可以建立金属导电纤维的等效电路模型，如图5所示，一根细丝的本征电阻并联上该细丝与其他细丝间的电容。细丝之间互不相干，则电容也是互相并联。

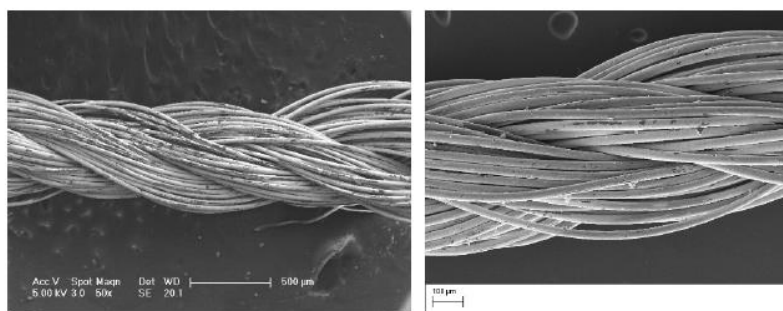


图4 金属导电纤维扫描电子显微镜微观照片。金属导电纤维由微米级别的细丝绞合而成，细丝之间存在空气缝隙。

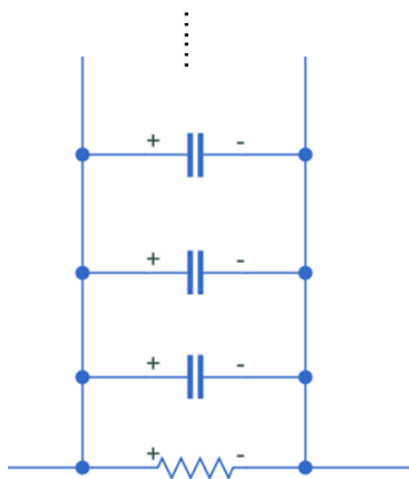


图5 金属导电纤维的等效电路模型。包含寄生电容与本征电阻。

2.2 螺线管的参数研究

单层螺线管是最常用的电气元件之一，其便利之处在于可以通过线圈匝数、轴心直径、线圈密度控制螺线管的自感。如图7所示为单层空芯螺线管的结构示意图。将导线绕成单层可产生寄生电容最小的电感器，因此可产生最高的共振频率。获得高共振频率和低损耗是产生具有与纯电感相似的射频特性的线圈的关键。在本项目中使用单层空心的圆柱形螺线管作为一个可控电感。本项目将导电纤维制成螺线管引入电感形成 RLC 电路使其在高频下谐振，由此确定寄生电容的大小。另外已经有研究表明螺线管本身也会形成

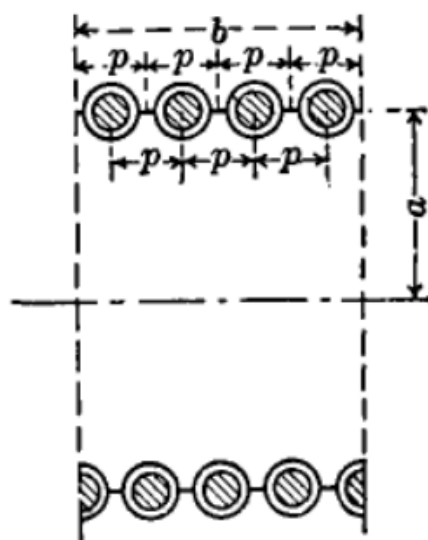


图6 单层空芯螺线管的结构示意图

2.2.1 螺线管的电感研究

影响螺线管电感的因素有很多，主要包括螺线管长度和直径、导线直径和间距、截面形状、支撑介质、绝缘层厚度等。通过最基础的电动力学的知识，磁链定义为通过所有匝数的磁通量之和，而器件的电感定义为单位电流的磁链。对于一个理想化的螺线管不难得到其电感为：

$$L = \frac{\mu N^2 S}{d} \quad (1)$$

其中 N 为匝数， d 为螺线管长度， μ 为磁导率， S 为螺线管截面积。然而这种理想情况并不适用于长度有限、导线有间隔和横截面的实际情况。

$$L = \frac{25.4r^2 N^2}{9r + 10l} \quad (2)$$

公式(2)给出了另外一种根据实验得到的 Wheeler Formulas 可以很方便的用于计算，其中 L 为电感单位为 μH ， r 为螺线管半径单位是 mm ， l 为螺线管长度， N 为匝数。通常情况下对于单层空心长螺线管有不错的准确度，只是本实验中采用的长间距并不适合此公式。目前而言，较为准确的电感计算方式有有限元计算、椭圆积分数值计算、以及柱形电流面（cylindrical current sheet）的等效模型等方法。这里主要讨论等效模型的方法。

电流面指的是将每一圈环绕的电流视为是在圆柱体表面的一个极小的径向厚度层中沿圆柱体轴线流动的。这种方法最早由 Ludwig Lorenz 提出，并且通过椭圆积分给出了有限长螺线管的解析表达式。 μ_0 为真空下磁导率， N 为匝数， r 为螺线管半径， l 为螺线管长度， $K(\kappa)$ 和 $E(\kappa)$ 分别为一阶和二阶椭圆积分。

$$L = \mu_0 N^2 \frac{8r^3}{3l^2} \left[\frac{2\kappa^2 - 1}{\kappa^3} E(\kappa) + \frac{1 - \kappa^2}{\kappa^3} K(\kappa) - 1 \right] \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{D}{\sqrt{D^2 + l^2}}$$

而后 Nagaoka 基于实验规律，通过引入一个无量纲参数 K 对公式(3)进行修正，而将 Ludwig Lorenz 的模型统一到公式(1)的形式，应用到实际计算中。

$$L = \frac{\mu \pi r^2 N^2 K}{l} \quad (4)$$

其中 μ 为磁导率， N 为匝数， r 为螺线管半径， l 为螺线管长度，参数 K 与螺线管长度和半径有关^[10]。该计算方法的精确度达到了 $\pm 0.33\%$ ， $l \geq 0.4D$ 。

实际情况中，线圈绕组不能够完全抽象成表面电流，这一改变影响了线圈与线圈间的互感。Rosa 在此基础上研究了导线截面的实际大小对螺线管电感的影响，对公式进行了进一步的修正。加入了另一个无量纲修正系数 K_m ，反映一组线圈与整个电流面模型的互感。

$$\Delta L = 0.004\pi a N(G + H) \quad (5)$$

其中 G 与 H 为与螺线管直径 a 和导线直径有关的常数，而且 H 还与匝数 N 有关^[11]。

2.2.2 螺线管的电容研究

在高频工作状态下与低频工作状态下的电感的性能有很大的不同。趋肤效应和近似效应（proximity effect）使线圈的电阻增大，而电感随工作频率的增大略有减小。此外，高频时线圈的自带电容也不可忽视。这个电容显著影响电感的性能和共振频率。匝间电容是由相邻导体匝间的绝缘隔离引起的。这些电容串联形成螺线管的自带电容。导体匝间的间隔是由于导线绝缘涂层的厚度或导体匝间的空气空隙导致的。Kazimierczuk 等人发表了一系列研究，在一些假设的前提下，提出了一种分析方法来计算单层螺线管空芯电感的自带电容。

分析假设如下：（1）自电容是线性的，频率和电压不变。它的电抗在直流电路上是无穷大的，不影响电感器的低频性能。（2）电感线圈环绕在一个绝缘的圆柱形结构上。从而忽略金属轴心与导线产生的电容，假设内部的相对磁导率是 $\mu_{rc} = 1$ 。（3）分析至第一共振频率。

首先分析线圈与线圈之间的电容的成因，也就是关注电场穿过的区域，包括绝缘体上的电容和空气间隙的电容。通过微元法，以导线的轴为中心，取角度为 θ 的扇形截面作为单位元 dS ，得到公式（6）

$$dC = \frac{\epsilon dS}{x} \quad (6)$$

该公式可以表示这个单位元与另一个单位元之间的电容，其中 x 是两个产生电容的微元间电场的距离。针对两种情况，找到对应的电场分布就可以得到不同的计算公式。分析模型如图 7 所示

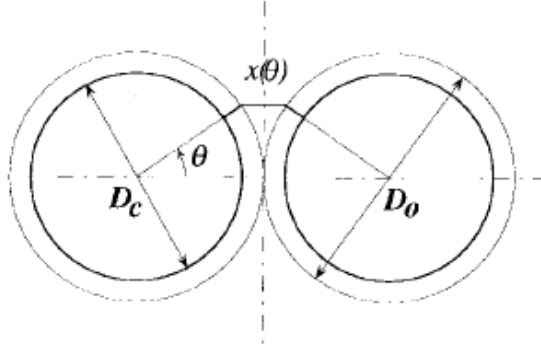


图7 螺线管匝间电容的物理模型。图中为相邻的两圈线圈沿着螺线管轴向的横截面，取角度微元 θ 作为单位元。

对于绝缘层所谓间隙的电容，对于绝缘层积分可得：

$$dC_{tt} = \frac{\epsilon}{2} d\theta \int_0^{l_t} dl \int_{r_c}^{r_o} \frac{r}{dr} = \frac{\epsilon l_t}{2 \ln \frac{r_o}{r_c}} d\theta \quad (7)$$

其中 r_c 是绝缘体的内边到轴心的距离， r_o 是绝缘体的外边到轴心的距离， l_t 是导线的长度， ϵ 是绝缘体的介电常数^[12]。

同样对于空气缝隙进行分析。微元包含绝缘层，而 $x(\theta)$ 随角度变化，得到如下公式（8），其中 ϵ_0 是真空的介电常数， l_t 是导线的长度， D_o 是导线包含绝缘层的直径

$$\frac{dC_g}{d\theta} = \epsilon_0 \frac{l_t D_o}{2x(\theta)} = \epsilon_0 \frac{l_t D_o}{2D_o(1 - \cos \theta)} = \epsilon_0 \frac{l_t}{2(1 - \cos \theta)} \quad (8)$$

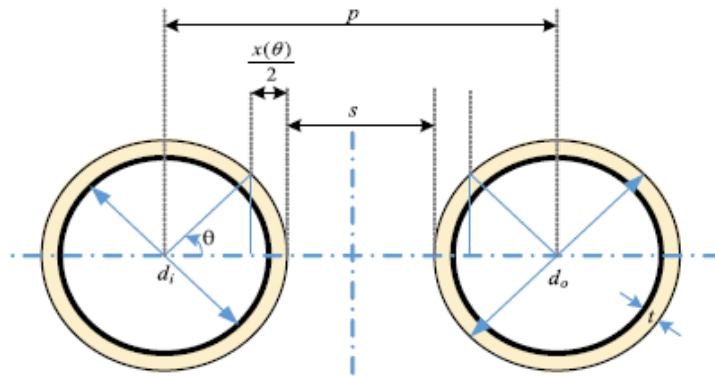


图8 匝间距较大时的分析模型。对空气间隙部分进行了修正。

如图8，对于匝间距较大的情况，空气间隙需要修正^[13]。结构如图4所示，修正的公式如下：

$$\frac{dC_g}{d\theta} = \epsilon_0 \frac{l_t}{2(\frac{p}{D_o} - \cos \theta)} \quad (9)$$

而后 Kazimierczuk 等人提出了一种简化模型用于整个螺线管的自带电容预测。如图 8，对于整个螺线管建立一个等效电路模型，其自带电容来自两部分，匝间电容是一部分，另一部分来自周围环境。如图所示， C_t 表示线圈与线圈间的电容，而 C_s 表示地面的影响， R 与 L 分别表示本征电阻和电感。为了简化模型，将地面的影响和边缘效应忽略，从而得到一系列串联的电容，最终得到模型如图 9。由此可以得到两个模型间的关系如公式 (10) 反映^[14]。

$$L = nL_t, R = nR_t, C = \frac{C_t}{n-1} \quad (10)$$

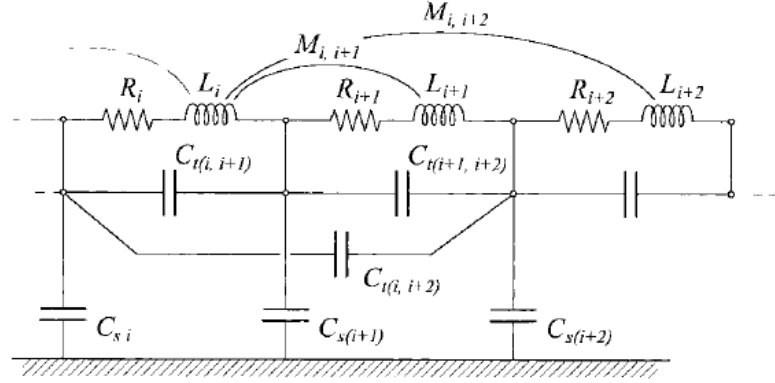


图 9 螺线管的自带电容的等效电路模型

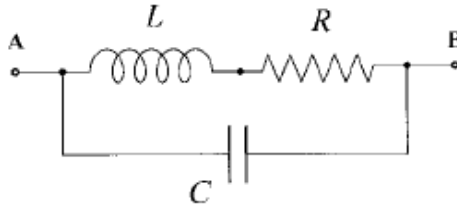


图 10 化简的等效电路

3. 建立模型与实验内容

3.1 等效电路模型

通过前文的理论研究，可以得到螺线管等效电路如图 10。前文中金属细丝可以简化为由本征电阻和寄生电容组成的等效电路。按照同样的方法分析由金属导电纤维制成的螺线管，可以推导出相似的等效电路。由于寄生电容的存在，本项目提出一种修正后的模型，如图 11 所示

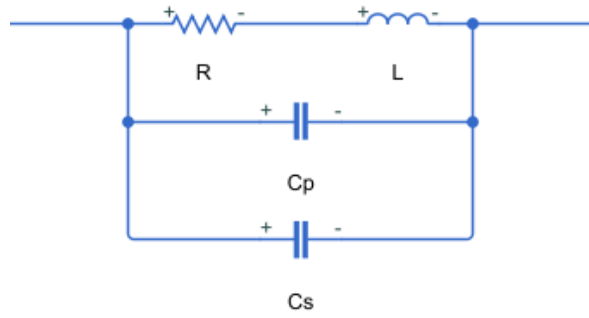


图 11 金属导电纤维制成的螺线管的等效电路模型

其中 C_s 表示螺线管结构的自带电容， C_p 表示由导电纤维寄生电容， R 表示螺线管的电阻， L 表示螺线管的电感。在此基础上可以得到等效电路阻抗的表达式如公式（11）：

$$Z = \frac{(R + j\omega L) * \frac{1}{j\omega C}}{(R + j\omega L) + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{(R + j\omega L)(1 - \omega^2 LC - j\omega RC)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} \quad (11)$$

既

$$Z = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} + j \frac{-\omega^3 L^2 C - \omega R^2 C + \omega L}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} \quad (12)$$

其中

$$C = C_p + C_s \quad (13)$$

由公式（12）可以得到螺线管的共振频率，并且可以省略高阶项

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_s} - \frac{R^2}{L^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_s}} \quad (14)$$

3.2 设计实验

实验的目的有两点，（1）分别用金属导电纤维和铜线制成螺线管，通过对照试验证明寄生电容；（2）通过实验测得螺线管在不同频率下得阻抗数据，带入电路模型，估算金属导电纤维得寄生电容。

实验步骤依次为（1）分别以漆包铜线和不同直径的金属导电纤维制作螺线管。以均匀的圆柱形纸壳作为螺线管的绝缘体支撑，直径作为变量；控制线圈间距为 2cm ；表 1 中给出了各组导线的参数。（2）通过网络分析仪测得每个组的不同频率下的阻抗数据，找到共振点。阻抗数据分成实部和虚部，扫频范围为 $1\text{MHz} - 50\text{MHz}$ 。（3）绘制阻抗与频率的关系图，比较共振点的偏移，根据电路模型的阻抗公式（12）设计算法，以直径为 44mm 的铜芯漆包线作为对照组，估算金属导电纤维的寄生电容。

表一 导线参数

	直径/mm	电阻率	型号
金属导电纤维	43	$13\ \Omega/\text{m}$	KTFB235/4
金属导电纤维	48	$9\ \Omega/\text{m}$	KTFB235/3
金属导电纤维	54	$7\ \Omega/\text{m}$	KTFB235/2

由图 10 的等效电路可以预期，阻抗的虚部曲线在第一共振频率处为零。对于铜线螺线管就是由于螺线管的电感和自带电容谐振；而对于引入了寄生电容的实验组，会出现频点偏移。通过图 11 的模型可以推测，导电纤维的整体电容相对于铜线对照组增大，而电感相同的情况下，共振频率增大。

3.2.1 螺线管设计

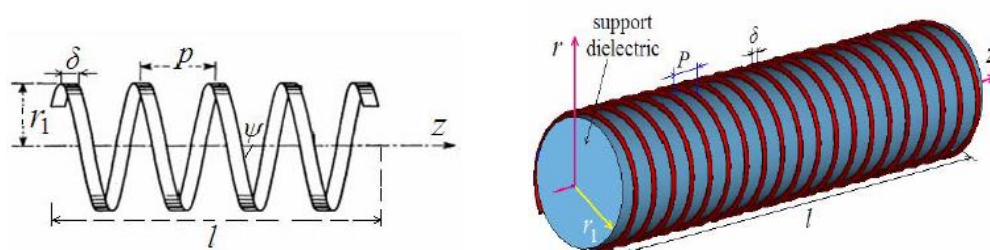


图 12 单层空芯圆柱形螺线管结构示意图。螺线管是在空芯纸壳上缠绕导线。在实验组中用导电纤维作为导线，而对照组中用铜芯漆包线

实验中采用单层空芯圆柱形螺线管，示意图如图 12。通过前文给出的理论计算方法，螺线管的自带电容在 pF 量级，螺线管的电感在 μH 量级，可以使螺线管的共振频率在 $20 - 40MHz$ 。在制作的要求中，螺线管匝数过多和直径过大将不利于制作；匝数过少则计算精度下降。因此选取匝数为 $10 - 20$ ，直径为 $30 - 50mm$ 。螺线管的匝间距 p 设置为 $20mm$ 是考虑到螺线管匝间距增大将会减小螺线管的自带电容，防止其过大会使得导电纤维的寄生电容表现不明显。最终各组数据由表二和表三给出。

表二 实验组螺线管参数

编号	匝数	螺线管直径/mm	导线直径/mm	连接线长度/mm
18a1	18	44	43	360
18a2	18	44	48	360
18a3	18	44	54	360
14b1	14	56	43	280
14b2	14	56	48	280
14b3	14	56	54	280

表三 对照组螺线管参数

编号	匝数	螺线管直径/mm	导线直径/mm	连接线长度/mm
18a0	18	44	44	360
14b0	14	56	44	280

在制作过程中，导线紧贴 $20mm$ 宽的纸带一侧，交替紧密缠绕在绝缘体上；在表面面的轴向上取直线，将线圈的起点终点固定在直线上；两端各自留出多余的与螺线管长度相等的导线以接入网络分析仪。

3.2.2 网络分析仪测量

实验环境如图 13 所示。螺线管在高于地面 $1m$ 处固定，由此保证地面和操作台的影响可以忽略。螺线管两端留有多余的导线负责连接仪器，与螺线管形成一个近似等边三角形以防止两根的导线对数据产生影响。导线接入一个转换口，借此两根导线分别连接同轴线的两极也就是外导体层和内导体层。长度为 $20cm$ 的同轴线连接仪器的输入端口，本项目使用 KEYSIGHT E5071C 网络分析仪测量螺

线管的阻抗，扫频范围 $1\text{MHz} - 50\text{MHz}$ ，间隔为 245kHz 。

通过实验可以得到螺线管的阻抗扫频数据，而需要的电感、电阻共振频率还需要进一步处理。绘制出阻抗随着频率变化的曲线则可以通过共振峰位置得到共振频率。另一方面，在低频下该系统的容性可以忽略，将其简化为图 14 中的近似电路。由此可以得到螺线管的电阻 R 和电感 L 。

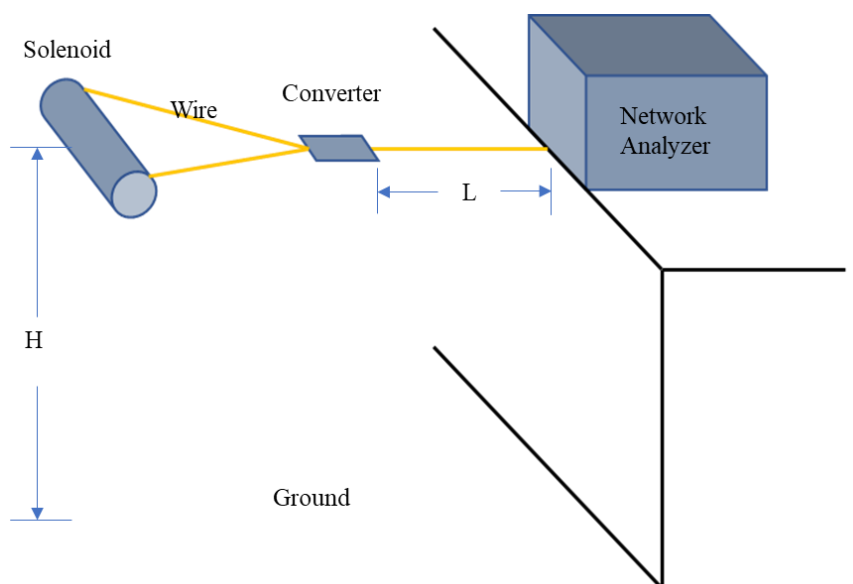


图 13 实验环境示意图。螺线管通过转换头接入网络分析仪



图 14 低频下的近似电路

4. 结果分析

4.1 实验结果

4.1.1 螺线管电感

通过前文的电路模型得知，将 $1MHz$ 时实验数据的虚部视为仅由电感决定的。对于各组螺线管，实验值与理论值得比较见表三。误差值平均为 1.55% 。在后续的数据分析中使用实验数值。

表四 电感的理论值与实验值

编号	理论值/ μH	实验值/ μH
18a1	4.1103	4.1908
18a2	4.0608	4.0300
18a3	4.0054	4.0758
14b1	4.3478	4.3277
14b2	4.2996	4.1576
14b3	4.2457	4.2033

4.1.2 寄生电容现象

实验得到的阻抗数据展示在下列图中。图 15 为匝数为 18 的各组（18a0, 18a1, 18a2, 18a3）螺线管的扫频得到的实部，图 16 为匝数为 18 的各组螺线管的虚部。实部与虚部保持一致的变化规律。根据前文的推导，取实部的峰值或者虚部为零的点为共振点。作为铜线（紫色）的对照组，共振频率最高；而其他各实验组，由于寄生电容的影响出现了频率向下偏移。据此可以从实验角度证明寄生电容的存在。

图 17 为匝数为 14 的各组（14a0, 14a1, 14a2, 14a3）螺线管的扫频得到的实部，图 18 为匝数为 14 的各组螺线管的虚部。图中展示了与前文一致的规律，可以得出同样的结论。

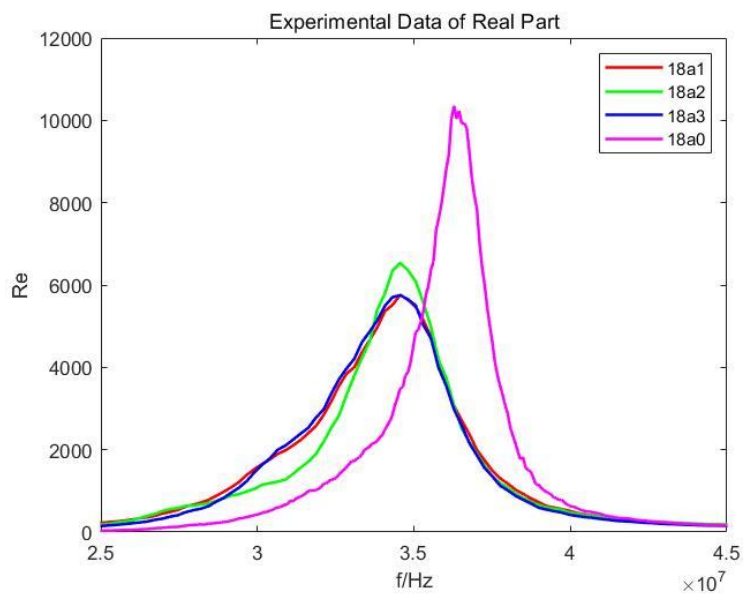


图 15 匝数 $N = 18$ 的各组螺线管的实验数据的实部

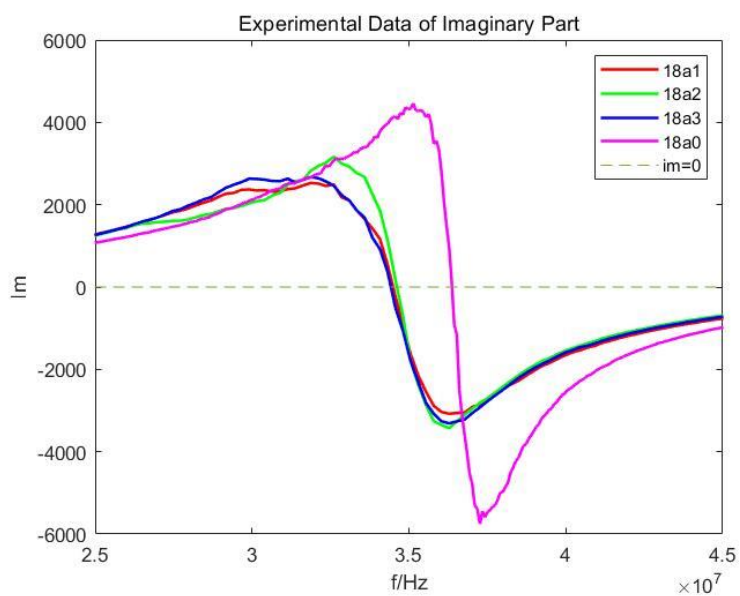


图 16 匝数 $N = 18$ 的各组螺线管的实验数据的虚部

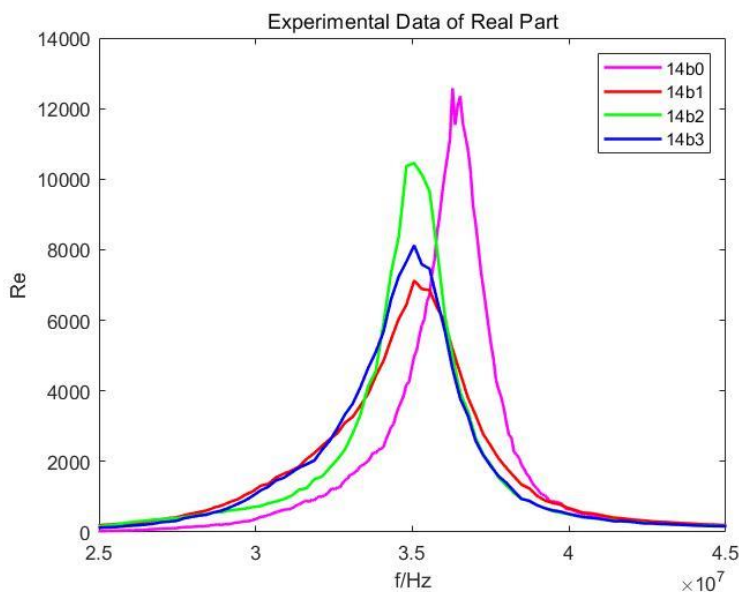


图 17 匝数 $N = 14$ 的各组螺线管的实验数据的实部

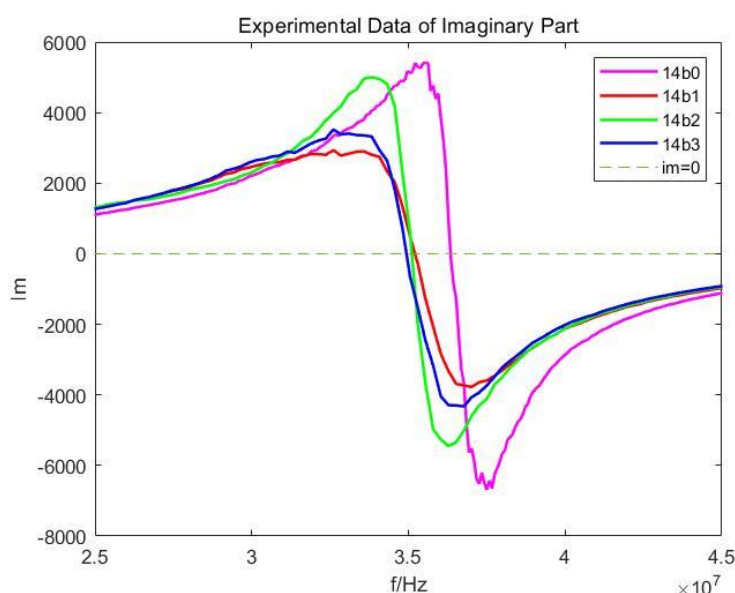


图 18 匝数 $N = 14$ 的各组螺线管的实验数据的虚部

4.2 估算寄生电容

4.2.1 验证等效电路模型

本项目通过 MATLAB 处理数据，通过共振频率公式（14），带入电阻和电感值可以计算出整体的电容值。在得到了电阻电感电容的前提下，利用公式（12），可以绘制出预测的阻抗曲线。

预测的曲线如下。图 19 为匝数 $N=14$ 的各组螺线管的实部的预测曲线。图 20 为虚部的。可以与图 15 和图 16 对比看出，曲线的变化规律基本一致，实部出现

了谐振峰，而虚部在共振处归零。因此证明图 11 的电路模型基本正确。

同样图 21 和图 22 给出了其他实验组的预测曲线，得到了与上文一样的结果。

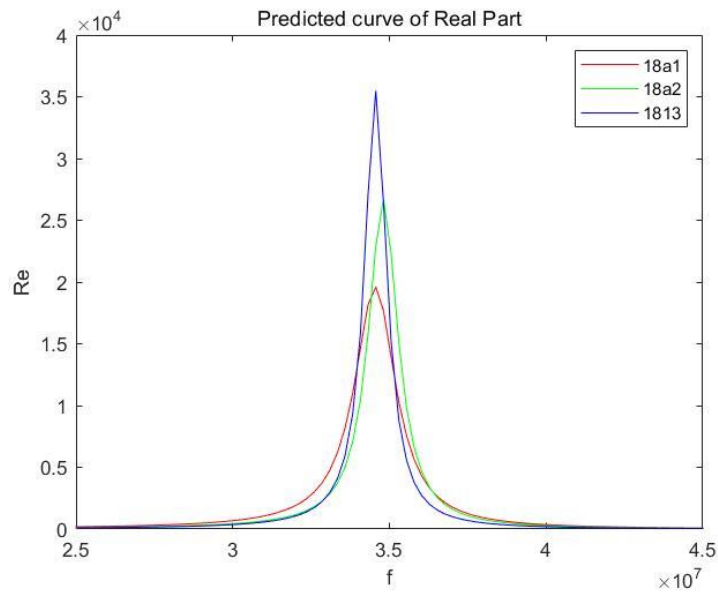


图 19 匝数 $N=18$ 的各组螺线管的实部预测曲线

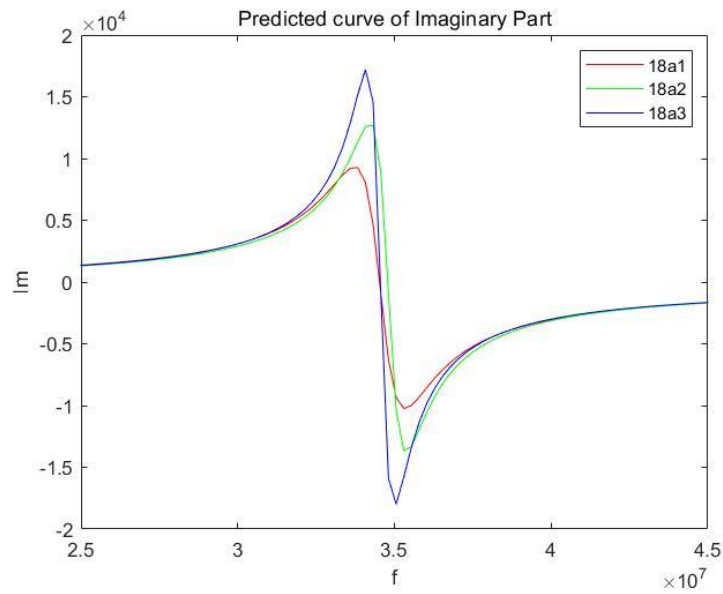


图 20 匝数 $N=18$ 的各组螺线管的虚部预测曲线

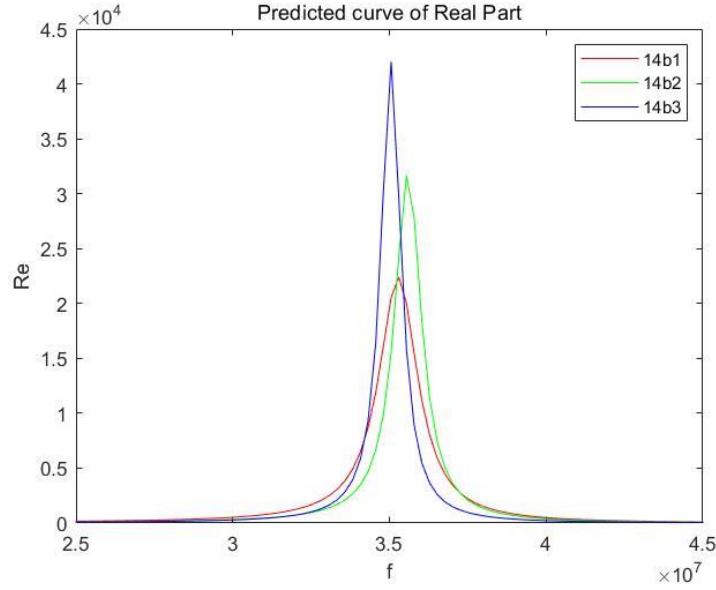


图 21 匝数 $N=14$ 的各组螺线管的实部预测曲线

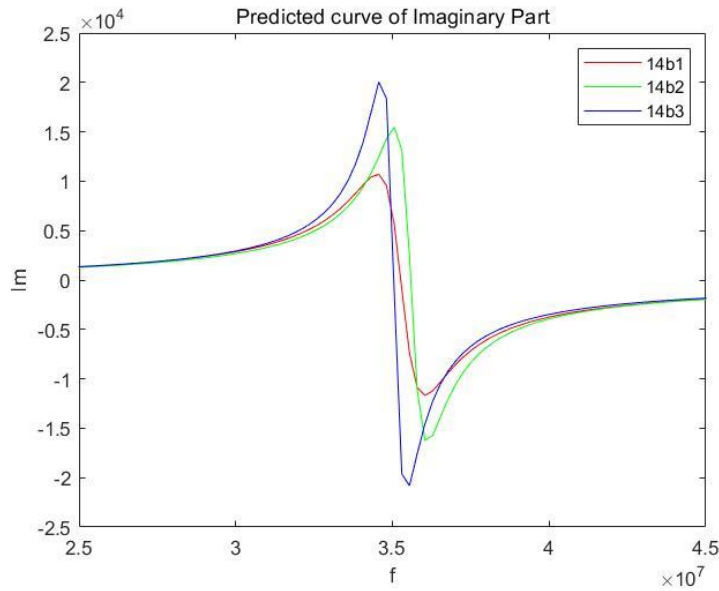


图 22 匝数 $N=14$ 的各组螺线管的虚部预测曲线

4.2.2 估算结果

根据谐振频率得到的电容值,对于实验组来说作为整个等效电路的电容,而对照组中使用的铜线不存在寄生电容,可以将这个电容作为螺线管的自带电容 C_s 。而自带电容由螺线管结构决定,实验组和对照组的自带电容是一致的。具体来说,18a0 作为 18a1、18a2、18a3 三组的对照组;14a0 作为 14a1、14a2、14a3 三组的对照组。通过公式(14)得到的螺线管寄生电容值如下表五所示。可以看到实验组的电容包含了寄生电容和螺线管自带电容,电容值总是大于对照组。

表五 直径为43mm导电纤维的寄生电容的计算结果

编号	对照组 C_s/pF	实验组 C/pF
18a1	4.86	5.06
18a2	4.86	5.19
18a3	4.86	5.20
14a1	4.73	5.02
14a2	4.73	4.93
14a3	4.73	4.90

对表五中的实验组和对照组做差则得到整个螺线管上的导电纤维的寄生电容。假设寄生电容是均匀分布的,为了让不同参数的螺线管得到的实验结果有参考性,这里计算单位长度的导电纤维包含的寄生电容。对于不同直径的导电纤维,分别用多组不同的实验组算出结果后取平均。最终得到,直径为43mm的导电纤维的单位长度上寄生电容为 $0.0970pF/m$;直径为48mm的导电纤维的单位长度上寄生电容为 $0.0935pF/m$;直径为54mm的导电纤维的单位长度上寄生电容为 $0.0905pF/m$ 。具体每个实验组估算的寄生电容展示在表六、表七、表八中。

表六 直径为43mm导电纤维的寄生电容的计算结果

实验编号	单位长度寄生电容值/ $pF * m^{-1}$
18a1	0.078
14b1	0.116

表七 直径为48mm导电纤维的寄生电容的计算结果

实验编号	单位长度寄生电容值/ $pF * m^{-1}$
18a2	0.129
14b2	0.058

表八 直径为54mm导电纤维的寄生电容的计算结果

实验编号	单位长度寄生电容值/ $pF * m^{-1}$
18a3	0.135
14b3	0.071

5. 总结

5.1 结论

本项目研究导电纤维的寄生电容现象。微观结构显示，导电纤维的细丝之间存在的空隙造成了寄生电容现象。在此基础上本项目提出了导电纤维的等效电路，由本征电阻与细丝之间的电容组成。在寄生电容均匀分布的假设下，每根细丝之间的互相影响被抽象为一个整体的分布参数，由此得到一个简化的电路模型。在此基础上本项目设计了实验，以金属导电纤维为例测量寄生电容。在实验中导电纤维被制作成单层空芯螺线管，在第一谐振频率可以得到由寄生电容和螺线管自带电容组成的电容值。

结果证明，金属导电纤维存在非常细微的寄生电容现象，对于高频工作下的射频器件例如天线和传感器会产生影响；本项目提出的等效电路模型和实验方法可以估算金属导电纤维的数量级，作为制造导电纤维和开发应用的参考。

5.2 改进方向

本项目由微观结构提出假设实验思路建立在对螺线管的研究基础上，但是在实验过程和数据处理方面还有继续发展的空间，具体来说还有以下改进的方向：

（1）不同直径的导电纤维制成的螺线管虽然在几何形状上保持一致，但是导线直径也是影响电感的重要因素。实际中难以找到与导电纤维直径完全一致对照铜导线，因此实验组与对照组的电感差会造成共振频率误差最终影响寄生电容的计算结果。

（2）实验采取的导电纤维都是同一类型的金属导电纤维，采用拉丝工艺。等效电路和计算方法应用到其他工艺和类型的导电纤维上时可能会有差异。

（3）仅实现了对寄生电容的验证和估算。精确度还需要更多实验数据验证。

参考文献

- [1] 耿怡, 安晖, 李扬, 等. 可穿戴设备发展现状和前景探析 [J]. 电子科学技术, 2014, 01(02): 238-45.
- [2] 钱鑫, 苏萌, 李风煜, 等. 柔性可穿戴电子传感器研究进展 [J]. 化学学报, 2016, 74(07): 565-75.
- [3] 卢忠花, 王卿璞, 鲁海瑞, 等. 柔性可穿戴电子的新进展 [J]. 微纳电子技术, 2014, 51(11): 685-91+701.
- [4] 马飞祥, 丁晨, 凌忠文, 等. 导电织物制备方法及应用研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(01): 1114-25.
- [5] ROUDJANE M, BELLEMARE-ROUSSEAU S, DROUIN E, et al. Smart T-shirt Based on Wireless Communication Spiral Fiber Sensor Array for Real-Time Breath Monitoring: Validation of the Technology [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 1-.
- [6] LIN R, KIM H-J, ACHAVANANTHADITH S, et al. Wireless battery-free body sensor networks using near-field-enabled clothing [J]. Nature communications, 2020, 11(1): 444.
- [7] 王金凤. 导电针织柔性传感器的电—力学性能及内衣压力测试研究 [D]; 东华大学, 2013.
- [8] 韩阜益. 导电织物的制备及其性能研究 [D]; 东华大学, 2008.
- [9] 张鸿. 聚苯胺复合导电纤维的制备与应用基础研究 [D]; 大连理工大学, 2008.
- [10] GROVER F W. Working formulas and tables [J]. 1996,
- [11] ROSA E B. Calculation of the self-inductance of single-layer coils [M]. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce and Labor, Bureau of Standards, 1906.
- [12] MASSARINI A, KAZIMIERCZUK M K. Self-capacitance of inductors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(4): 671-6.
- [13] AYACHIT A, KAZIMIERCZUK M K. Self-Capacitance of Single-Layer Inductors With Separation Between Conductor Turns [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(5): 1642-5.
- [14] GRANDI G, KAZIMIERCZUK M K, MASSARINI A, et al. Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1162-8.

致谢

首先感谢叶涛教授对本项目的指导和帮助。叶涛老师提供了本项目的灵感与实验思路，更敏锐的发现我的错误、耐心地与我讨论。叶涛老师渊博的学识与丰富的经验令我高山仰止，严谨治学的科研精神，平易近人的低调气质是我终身学习的榜样。

课题组里的学长与同辈也给我提供了大量意见和帮助。本项目是建立在刘宇龙学长在编制天线柔性传感器的基础之上。学长不仅教给我经验和方法，还指导我独立科研。另外与我一起做实验的王淼和余梦霞同学也在各方面给我帮助。其他同组前辈在科研工作中的严谨的态度、灵活的思维和耐心的品质都给我留下了深刻的印象，并成为我今后学习科研中的学习对象。

最后还要感谢南科大对我的培养。我求学路上的每一位老师都是德才兼备，既传授予我知识，也塑造了我的人格。以及感谢在四年中对我起到帮助的行政人员、同学、辅导员。他们给我的大学生活营造了和谐积极的氛围，对我的学习生活提供了巨大的支持。