

The Speed of Alternating Electricity Can Be 20 Times Faster than the Speed of Light

—Comments on “EM Wave Propagation Speed” by Yi Zheng and Others

Tsao Chang, Kangjia Liao

Department of Nuclear Science and Technology, Fudan University, Shanghai

Email: tsaochang@alu.fudan.edu.cn

Received: Oct. 26th, 2015; accepted: Nov. 10th, 2015; published: Nov. 13th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Alternating electromotive force generates alternating electrical potential difference and produces a longitudinal electric field in circuits. An alternating electric field within the metal wire leads the movement of electrons, resulting in a current and electric power. The speed of alternating electricity is not constant, which is associated with the circuit parameters. In most cases, the speed of alternating electricity is less than the speed of light. However, under some specific circuit parameters, the speed of alternating electricity may exceed more than 20 times the speed of light. The voltage equation of RL circuit involves the Ohm's law. This equation is independent of Maxwell equations. The key in our experiment is: in RL circuits, the time delay of alternating electric field is caused by the wire inductance, which is related to the length of the wire. Our experimental results show that the speed of alternating electricity may be 20 times faster than the speed of light. The speed of light is not the up-limit in universe.

Keywords

Speed of Alternating Electricity, RL Circuit, Longitudinal Electric Field, Time Delay, Faster than the Speed of Light

交流电速度可能超光速20倍

—兼评郑翊等人的论文“电磁场的传播速度”

张 操, 廖康佳

文章引用: 张操, 廖康佳. 交流电速度可能超光速 20 倍[J]. 现代物理, 2015, 5(6): 125-132.

<http://dx.doi.org/10.12677/mp.2015.56016>

复旦大学, 核科学与技术系, 上海
Email: tsaochang@alu.fudan.edu.cn

收稿日期: 2015年10月26日; 录用日期: 2015年11月10日; 发布日期: 2015年11月13日

摘要

交流电源产生的电动势在电路内产生了交变电势差以及纵向电场。交变电场在金属导线内带动了电子运动, 产生了电流和电功率。交流电(功率)的速度不是常数, 它与电路参数相关。在大多数情况下, 交流电的速度是低于光速的。可是在特定的电路参数情况下, 交流电的速度可能超过光速20倍以上。我们实验的出发点是RL交流电路的电压方程, 其中包含了欧姆定律。这个方程是与Maxwell方程相互独立的。本实验的关键是: RL电路中纵向交变电场的时间延迟是由直导线自身的电感引起的, 导线自感量与长度有一定的相关性。实验表明, 交流电在金属导线中可能以超光速传输信号和电能。光速不是一切物质运动的极限。

关键词

交流电的速度, RL电路, 纵向电场, 时间延迟, 超光速

1. 引言

在现代的电路理论中, 低频交流电的时间延迟通常是忽略不计的。原因之一, 大多数电路的尺度与一微秒时间内的光程相比是很小的。原因之二, 由于电磁学的成功, 人们在没有精确实验数据的情况下, 电磁学教科书就假定电路中低频交流电场的速度就是光速或者小于光速[1] [2]。然而, 近年来许多文献表明, 电磁场在低频近场的情况, 存在超光速现象[3]-[6]。

从 Maxwell 方程组出发可以解出电磁波的波动方程, 电磁波在真空中的传播速度是光速 c 。狭义相对论认为, 光速 c 是物质或者信息传播速度的上限, 任何物质或者信息只能以低于 c 的速度传播。本文作者近期在《现代物理》发表了两篇论文[5] [6], 测量了电信号在金属导线中的传播速度, 实验发现低频电信号在导线中的传播速度可能超过光速 20 倍。

在郑翊教授等人的论文“电磁场的传播速度”中[7], 他们利用传输线理论中的电磁波信号反射现象评论了我们关于电信号的测量工作。郑翊教授认为, 由于我们实验中采用的传输线接收端的阻抗不匹配, 导致我们实验中观察到的信号是入射波与反射波的合成信号, 其相位并不能反应入射信号的真实相位。

其实, 传输线理论并不适用于讨论我们的实验。传输线理论是一门用来处理高频电磁信号传播的理论。传输线主要结构型式有平行双导线、平行多导线、同轴线、带状线等。它的特点是平行双导线的长度大于工作波长, 平行双导线之间的间距一般小于 1.0 cm。在这样的条件下, 平行双导线之间的分布电容不能忽略, 从而传输线理论对于这样的电路条件有效。作为传输线理论的推论, 电磁波在阻抗不匹配的电路会出现反射等现象[8]。

不同于传输线理论的电路条件, 我们的实验有如下几个特点:

(1) 由单根漆包铜线构成回路, 单根漆包线的总长度小于 10 米;

(2) 构成电路回路的线间尺度小于 3 米, 导线间的分布电容可以忽略;

(3) 我们选用交变电信号的工作频率小于 3 MHz。工作频率越低, 效果越好。仅仅是为了容易在示波器上显示, 我们选用交变电信号的工作频率在 1~2 MHz。

(4) 电路中采用大电阻, 微电流。接收端的电阻为 $1\text{ M}\Omega$, 所以电路的阻抗严重不匹配。

正是在上述 4 个特定的条件下, 我们的实验发现低频电信号在导线中的传播速度超过光速 20 倍。

以工作频率 2 MHz 为例子, 如果交变电信号在铜导线中作为电磁波以光速传播, 它的波长将是 150 m , 然而我们实验的尺度仅仅是波长的 3% 。对于交变电信号的工作频率 2 MHz , 它的周期是 500 ns (纳秒), 这个工作频率可以在示波器上显示出完整的周期, 并且可以显示出二个交变电信号的时间差达到 0.5 ns 的精度。如果把示波器上显示出的交变信号的正弦曲线简单地想象为电磁波, 这是一种误解。

2. 关于实验测量原理以及实验数据

根据库伦定律, 静电场是无旋纵场。静电场服从静电场环路定理:

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1)$$

在低频交流电路中, 金属导线中的电场与静电场有一定的相似性, 它们都是纵场, 都是有源场。金属导线中的纵向电场与能流方向一致。我们日常应用的 50 Hz 交流电路, 是典型的超低频似稳电路。方程式(1)与电路理论中的基尔霍夫第二定律是一致的。对于低频小尺度电路, 基尔霍夫第二定律要求其全部组成支路上任一闭合回路的电压代数和为零。

虽然低频电路中的纵向电场与真空中的静电场有一些相似性, 可是实际上它们有很大的差别。在低频电路理论中, 起主导作用的是由电源产生的电动势, 以及电路中的电阻和电感。联系这些物理量的方程式与感抗和欧姆定律有关。实验和理论表明, 对于频率是 10 GHz 以下的交变电场, 欧姆定律都有效。我们研究的是 $1\sim 3\text{ MHz}$ 的交变电场。欧姆定律是与 Maxwell 方程相互独立的, 它不服从 Lorentz 变换。

在我们的实验中, 它是二个 RL 电路的并联电路。实验的出发点是交流电路的电压方程, 其中包含了欧姆定律。带有电感和电阻的交流电路的电压方程可以写为:

$$U(t) = I(t)R + LdI(t)/dt \quad (2)$$

在式(2)中, $U(t)$ 代表电动势, $I(t)$ 代表电路中的电流, R 代表电阻, L 代表电感。对于二个 RL 电路的并联电路, L_1 和 L_2 分别代表短导线和长导线的自感。 $R_1 = R_2 = 1\text{ M}\Omega$ 。

由于金属导线中存在电感, 使得电路中的纵向电场产生了微小的时间延迟。直导线的电感值由以下近似公式计算:

$$L = 2l [Ln(2l/r) - 0.75] 10^{-7} \quad (3)$$

在式(3)中, l 为导线长度, r 为导线截面的半径。长度以 m 为单位取数值, 计算结果单位是 H (亨利)。在我们的实验中, 铜导线直径为 1.0 mm , 长度为 0.4 m 的铜导线的分布电感大约为 $0.5\text{ }\mu\text{H}$; 长度为 6 m 的铜导线的分布电感为 $11\text{ }\mu\text{H}$ 。

我们的实验给出了交流电路中低频电场的时间延迟的初步测量结果。实验结果表明, 在小于 3 MHz 的频率区, 纵向电场的速度是明显超光速的。

测量交变电场时间延迟的实验由函数发生器作为信号源, 产生频率为 $1\sim 10\text{ MHz}$ 的正弦交变电场信号。在输出端有一个 T 型“三通”元件, 分别连接一根短的铜导线以及一根长的铜导线。短铜线长度为 0.4 m , 长铜线长度为 6.4 m 。二根铜线的另一端分别连接到数值示波器的二个通道。函数发生器与示波器之间有一根短的铜导线作为共地线, 构成回路。示波器显示图像的纵坐标代表测量到的电压, 横坐标代表测量到的时间。这样, 通过二根不同长度的导线的时间差就在示波器上明确地显示出来。为了保证测量的可信度, 我们把长铜线从 6.4 m 改为 9.4 m , 重复进行了测量。在实验过程中, 我们首先交换两个示波器通道, 表明交变信号的显示无变化, 这说明示波器的二个通道性能一致。

我们实验研究的条件试验是 1~10 MHz 的交变电场。在这个频区, 我们选取了大约 30 个不同频率的信号作试验。在实验中, 我们得到了不同频率的交流电场信号通过二根不同长度的金属导线的延迟, 实验结果见图 1。

在图 1 中, 红色曲线代表导线长度差是 9 m 的数据, 蓝色曲线代表导线长度差是 6 m 的数据。图中, 二条水平线代表光速参考线。也就是说, 如果假定金属导线中的交变电场以光速运动, 它通过 9 m 长度的时间是 30 ns, 通过 6 m 长度的时间是 20 ns。所以在图 1 中, 水平方向的红色直线代表 9 m 导线的光速参考线, 水平方向的蓝色直线代表 6 m 导线的光速参考线。在光速参考线上的数据是亚光速, 在光速参考线下面的数据是超光速。

我们的实验数据表明, 在信号频率超过 3 MHz 以后, 通过 9.4 m 导线的信号(红线)会出现一定的幅度改变。而通过 6.4 m 导线的(蓝线)信号要在更高的频率时才会出现此现象。与此同时, 示波器显示的相位也出现明显的位移。这二个现象很可能是由导线的电感与示波器内部的电容和电感相互作用导致的。

在我们的实验中, 实际测量的是长短二个 RL 电路中纵向交变电场的时间延迟的差。由于示波器对于时间差测量的精度为 0.5 ns。如果测量结果是 0.5 ± 0.5 ns, 对于长度差是 6.0 m 的导线, 换算成纵向交变电场在金属导线中的速度是光速的 20 倍到正无穷大。也就是说, 我们的实验可以确定交流电速度的下限, 不能决定交流电速度的上限。

在文献[6]中, 我们给出了长短二个 RL 电路中纵向交变电场的时间差的理论值。对于信号小于 3 MHz 的工作频率, 当长度差是 6.0 m 导线, 电感差大约为 10 μ H, 长短二个 RL 电路的时间差的理论值大约为 0.01 ns。于是, 我们得到交流电速度的理论值是 $v = \text{长度差}/\text{时间差} = 2000c$, 即是光速的 2000 倍。这个理论值与我们的实验值是相容的。

3. 金属导线内的交变电场信号不是电磁波

在郑翊教授等人的论文“电磁场的传播速度”中[7], 他们利用传输线理论中电磁波的反射现象评论

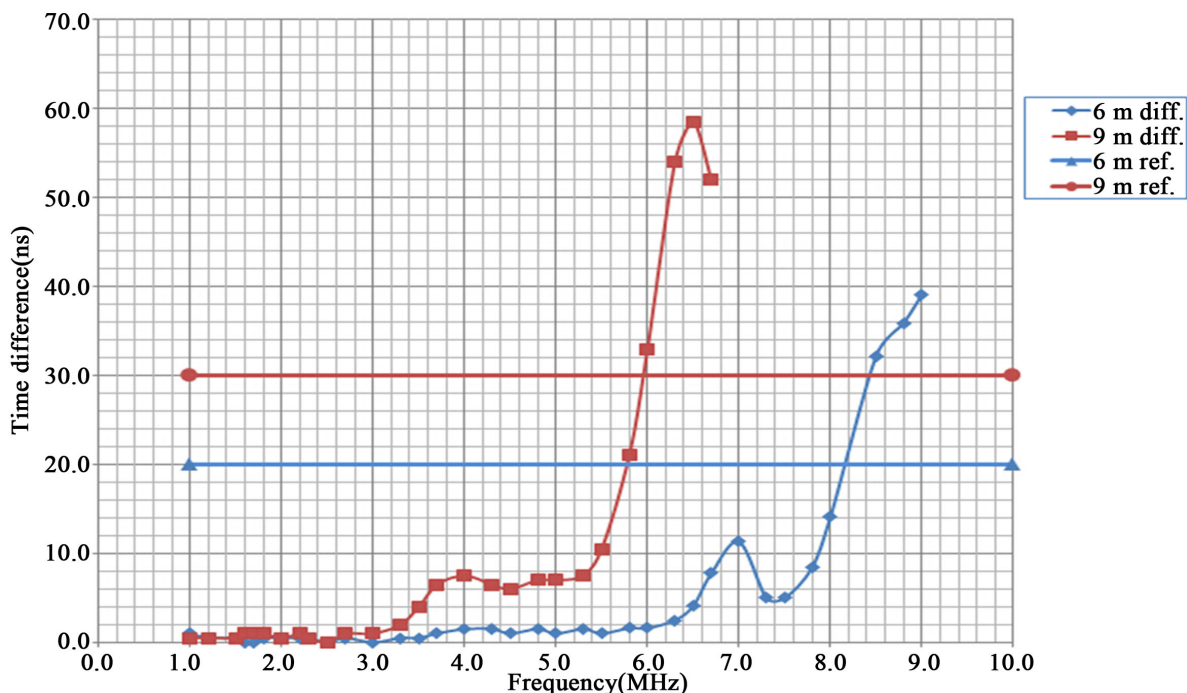


Figure 1. The curve of time difference vs frequency

图 1. 时间差 vs 频率曲线

了我们关于交变电信号的测量工作。他们的理论出发点是将欧姆定律代入麦克斯韦方程组, 从而得到如下方程式:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

其中, σ 是导电系数, ε 是介电常数。公式(4)是一个带阻尼项的波动方程, 在绝缘介质条件下, 即 $\sigma = 0$ 的情况下, 公式(4)退化成为没有衰减的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

由于金属是一种高导介质, 电磁波在金属中传播时振幅的衰减非常明显, 电磁波的相速度也远远小于光速。也就是说, 公式(5)不适用于电磁波在金属中的传播。

我们需要强调出, 电磁波是横波。金属导体中的纵向电场速度不能与电磁波在金属导体中的传播混为一谈。在郑翊等人的论文中[7], 对高导电介质包括金属给出了电磁波相速度的公式:

$$v(t) = (4\pi f / \mu\sigma)^{1/2} \quad (6)$$

很显然, 交变电信号在导线内的传播速度实验数据不符合公式(7)。这个事实充分说明, 在导线内传播的交变电信号不是电磁横波。实验表明, 低频电磁波在金属导体中的传播速度是非常小的, 比如 400 Hz 时只有约 10 米/秒[8]。

然而, 传输线理论主要是从公式(5)推导得到的。传输线理论主要用来处理高频电信号传播的理论, 由传输线理论可以导出波动, 反射等现象[9]。

如果把我们的实验中的电路条件与传输线理论中的电路条件相比较, 除了电路尺度上的差别以外, 导线的分布电容的因素也是一个重要差别。在传输线理论中, 分布电容是不可以忽略的必要条件。按照无损耗的传输线理论, 电信号在双平行线上的相速度为:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (7)$$

式中的 L_1 与 C_1 分别是平行导线单位长度的电感和分布电容。然而, 如果实际的平行导线的长度不是很长, 两导线相隔足够远, 两导线之间的分布电容就可以足够小。按照公式(7), 交变电信号在导线上的传播速度可以不受光速 c 的限制, 也就是说, 传播速度可以足够大到超光速。例如我们取 $L_1 = 1 \mu\text{H}$ 与 $C_1 = 1 \text{ pF}$, 从公式(7), 我们得到 v_p 大约是 $3c$ 。这样的推论与我们的实验电路条件以及实验结果是很接近的。

对于无耗传输线, 特性阻抗为一实数:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (8)$$

当传输线工作在行驻波状态时, 行波与驻波的相对大小决定于负载与传输线的失配程度。传输线上反射波的大小, 可用反射系数的模来描述。反射系数模的变化范围为

$$0 < |\Gamma| < 1 \quad (9)$$

在物理学上定性地说, 在双平行线之间存在交变的电磁场, 这个近距离的电磁场对于导线中的电场以及电流是有反作用的。这种反作用表现为阻抗不匹配时会出现类似反射或者驻波的现象。在我们的实验条件下, 导线外的电磁场对于导线内部的交变信号的振荡幅度的影响很小。

我们的实验结果表明, 如果交变信号的频率小于 2 MHz, 郑翊教授提到的“传输线效应”中反射对

实验的影响是很小的。对无损耗介质或损耗可忽略不计时, 传输线中的电信号是入射波和反射波的叠加信号, 合成波可以如下表示:

$$E = E_0 [\cos(\omega t - kz) - |\Gamma| \cos(\omega t - kz + \theta) + 2|\Gamma| \cos(kz) \cos(\omega t + \theta)] \quad (10)$$

式中 E_0 为入射信号强度, ω 为入射信号频率, k 为波矢值, θ 为反射系数的相位角。在我们的实验中, 采用的示波器的输入阻抗为 $1 \text{ M}\Omega$, 远大于传输线的阻抗(大约 $10 \text{ }\Omega$), 所以几乎是接近于全反射的条件。按照传输线理论, 反射系数模接近于 1, 合成波将形成了驻波。于是, 方程(10)退化为:

$$E = 2E_0 |\Gamma| \cos(kz) \cos(\omega t + \theta) \quad (11)$$

根据(11), 不同位置处的信号均在作“驻波振荡”, 只是它们的振荡幅度不同, 振荡幅度受 $\cos(kz)$ 因子的调制。现在我们按照传输线理论作如下的估算: 假设电信号的频率是 3 MHz , 它在导线中以光速 c 传播, 振荡波长为 $\lambda = 100 \text{ m}$, 如果信号幅度在导线上是呈驻波分布, 对于实验中采用的 9 m 长度导线, 信号受 $\cos(kz)$ 调制的数值是 0.84 。然而在我们实验中, 在 3 MHz 处以及 9 m 导线情况下, 信号幅度几乎和信号源一致, 并没有观察到信号幅度明显变化。同例, 在 3 MHz 以及 6 m 导线情况下, 我们也没有观察到信号幅度明显改变的现象。

我们的实验结果表明, 交变电信号在导线中的传播不是电磁波。交变电信号的速度与 RL 电路的阻抗参数有关, 但并不受到光速 c 的限制, 或者说低频交变电信号在导线中的传播速度与光速 c 没有相关性。

郑翊教授等人做了三个方面的条件试验。他们的试验大部分是用了同轴电缆、考虑了阻抗匹配, 以及信号频率超过 3 MHz 。由于这些实验条件与我们实验的电路参数不一样, 他们实验结果不能反证我们的实验结论。值得强调的是, 在我们设置的实验条件下, 郑翊等人的实验结果与我们在图 1 中显示的实验结果是一致的。

4. 交流电速度可能超光速的物理意义

我们实验的出发点是 RL 低频交流电路的电压方程, 其中包含了欧姆定律。欧姆定律与 Maxwell 方程是相互独立的, 它不服从 Lorentz 变换。本实验的关键是: RL 电路中纵向交变电场的时间延迟是由直导线自身的电感是引起的, 导线自感量与长度有一定的相关性。实验表明, 交流电在金属导线中可能以超光速传输信号和电能, 这是一种宏观的非定域效应, 它与 Maxwell 理论没有冲突。金属导体电能的传输问题传统上属于电工学的内容, 其能量传输功率公式 $P = UI$ 得到了大量的实验检验。

根据我们实验中对于速度的工作定义, 金属导线中的交流电速度等于导线长度差除以时间差。实验结果得到的交流电速度可能是远远超光速。这说明电源产生的交变电动势是非定域地作用在电路中导体的各个部分。根据电流在金属导线内的经典微观理论, 自由电子在纵向电场的作用下, 沿电场强度方向产生定向的飘移, 形成了电流。电流使得纵向电场沿导线有个重新分布。也由于金属导线自身分布电感与长度有关, 所以纵向电场的时间延迟与导线长度有关。在我们的实验中, 从时间延迟计算得到的纵向电场速度代表电信号的速度, 也代表导体内的交流电能的速度。

电路中的低频交变电场具有频率以及相位的特征, 可是不存在波长的定义。电路中的交变电场信号既不是电磁横波, 也不是纵波。交变电场信号是导线中每一部分的电场在进行“纵向同步震荡”, 它们的相位随时间同步变化。由于示波器的设计有周期性的扫描功能, 它把相位随时间的同步变化在示波器的横向坐标显示出来。所以, 交变电场的能量以及信号是随时间同步变化的, 它不是“行波”。既然电路中的纵向交变电场不是电磁波, 于是它不存在相速度的定义, 也没有群速度的定义。更加明确地说, 在交流电路的情况, 电源产生的交变电动势直接把能量和信息以纵场的形式同步地传送给电路的各个部

分。这种传送能量的方式与电磁波是完全不同的。

因为导体内的低频纵向电场速度可能远远超过了电磁波在真空中传播的速度, 我们的实验证明了: 电源产生的纵向电场把作用力施加于金属导线内的自由电子, 产生了电流, 同时消耗了电源的功率。低频交流电能几乎完全是在金属导线内部传输的。也就是说, 几乎没有电磁能流从导线外部传输到导线内部[10]。

在我们的电路设置中, 线间电容很小, 可以忽略不计。关于如何测量实际的线间电容, 目前还是一个技术难点。实验中示波器输入端的电容是不能忽略不计的, 可是由于我们观测的是二个信号的时间差, 它们的效应是互相减掉的。

在我们的实验中, 实际测量的是长短二个 RL 电路中纵向交变电场的时间延迟的差。由于示波器对于时间差测量的精度为 0.5 ns。如果测量结果是 0.5 ± 0.5 ns, 对于长度差是 6.0 m 的导线, 换算成纵向交变电场在金属导线中的速度是光速的 20 倍到正无穷大。也就是说, 我们的实验可以确定交流电速度的下限, 不能决定交流电速度的上限。我们认为交变电场在金属导线中的传播速度是有限的, 它取决于电路的参数, 并且不受到光速 c 的限制。

关于与本文有关的超光速研究, 可参见文献[11]-[16]。

本文的实验结果表明, 狭义相对论是有一定适用范围的。光速不是一切物质运动的极限。狭义相对论为相对时间添加了一种新定义: 时钟的速率与相对速度有关。这是爱因斯坦为物理学作出的贡献。可是, 狭义相对论中的时间定义仅仅是许多相对时间定义中的一种。如果把狭义相对论的相对时间作为物理学的唯一的时间定义, 那是一种偏见[14]。

宇宙万物都在运动之中。作为与运动相关量的时间也在不停地流逝着, 测量时间的方法可以是多种的。物理学时间的定义以及同步异地的时钟的方法也可以是多种的。时间(和空间)是比光速更为基本的物理量。世界上即使没有光线, 也照样有时间的定义。时间的定义不应该局限于一种特定的物质运动, 例如光的运动。

为了减少误解, 人们可以采用其它的方式表述绝对时间。例如, 相对论的先驱者洛仑兹认为, 除了相对论时间外, 还应该存在一种“真实”的时间(True Time)。作为洛仑兹时间观的表述, 文献[14]中介绍的一种推广伽利略变换的时间, 它对应于宇宙的格林威治时间。当采用这种时间定义时, 同时性是绝对的, 其时间箭头都是正向的, 不会产生“时钟佯谬”的逻辑矛盾; 超光速运动也不会引起时间的倒演。

总之, 某些物质运动, 例如中微子, 可以是超光速的。金属导线内的低频交变电场的运动速度也可以是超光速的。我们的实验表明, 在特定的电路参数情况下, 交流电速度可能超过光速 20 倍以上。

5. 结论

交流电源产生的电动势在电路内产生了交变纵向电场。交变电场在金属导线内带动了电子运动, 产生了电流和电功率。交流电(功率)的速度不是常数, 它与电路参数相关。在大多数情况下, 交流电的速度是低于光速的。可是在特定的电路参数情况下, 交流电的速度可能超过光速 20 倍以上。我们实验的出发点是 RL 交流电路的电压方程, 其中包含了欧姆定律。这个方程是与 Maxwell 方程相互独立的, 它不服从 Lorentz 变换。在我们实验的 RL 电路中, 纵向交变电场的时间延迟是由直导线自身的电感是引起的, 导线自感量与长度有一定的相关性。我们的实验结果不能用传输线理论导出的波动和反射等推论进行解释。

我们的实验表明, 低频交流电在金属导线中可能以超光速传输信号和电能, 这是一种宏观的非定域效应。文献[16]是另外一种超光速的宏观非定域效应。狭义相对论是有一定适用范围的, 光速不是一切物质运动的极限。超光速运动以及物理学时间的定义值得进一步讨论。

致 谢

我们感谢郑翊教授和他的合作者。他们的论文“电磁场的传播速度”对于我们交流电速度测量问题

进行了认真的讨论。本文作者也感谢樊京博士的重复实验和有益的讨论。

参考文献 (References)

- [1] Jackson, J.D. (1962) *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons Ltd., New York.
- [2] 蔡圣善, 朱耘. 经典电动力学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1985.
- [3] Budko, N.V. (2009) Observation of Locally Negative Velocity of the Electromagnetic Field in Free Space. *Physical Review Letters*, **102**, Article ID: 020401. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.020401>
- [4] 张操, 樊京. 纵向电场和超光速研究[J]. 现代物理, 2014, 4(5): 107-112.
- [5] 张操, 廖康佳. 樊京导线中交流电场时间延迟的测定[J]. 现代物理, 2015, 5(4): 29-34.
- [6] 张操, 廖康佳. 交变电场速度测量的物理原理[J]. 现代物理, 2015, 5(4): 35-39.
- [7] 郑翊, 徐骋, 牟晋君. 电磁场的传播速度[J]. 现代物理, 2015, 5(5): 114-123.
- [8] 张梦心, 何久安. 关于导体中电磁波的实验[J]. 上海师范学院学报(自然科学版), 1984, 133(1): 50-54.
- [9] Shen, L.C. and Kong, J.A. (1995) *Applied Electromagnetism*. 3rd Edition, PWS Publishing Company, Boston.
- [10] 樊京, 张操. 关于金属导线中直流电能的传输[J]. 南阳理工学院学报, 2014(3): 1-4.
- [11] Zhang, L., Li, Z., Kai, Q., *et al.* (2011) Superluminal Propagation at Negative Group Velocity in Optical Fibers Based on Brillouin Lasing Oscillation. *Physical Review Letters*, **107**, Article ID: 093903. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.093903>
- [12] Chang, T. (1986) Does a Free Tachyon Exist? *Proceedings of the Sir A. Eddington Centenary Symposium, Vol. 3, Gravitational Radiation and Relativity*, 431.
- [13] Chang, T. and Ni, G.-J. (2002) An Explanation of Negative Mass-Square of Neutrinos. *Fizika*, B11, 49; e-print hep-ph/0009291.
- [14] 张操. 物理时空理论探讨——超越相对论的尝试[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2011.
- [15] 樊京, 周治平, 田子建. 自由空间磁力线速度测量实验[J]. 中国传媒大学学报: 自然科学版, 2013, 20(2): 64-67.
- [16] Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A.E., *et al.* (2015) Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometers. *Nature*, **526**, 682-686. <http://dx.doi.org/10.1038/nature15759>