

由基尔霍夫定律看电磁场理论与电路理论的关系

李凤霞

(太原理工大学电气与动力工程学院 太原:030024)

摘要 从电磁场理论观点出发,运用麦克斯韦方程推导出电路中基尔霍夫定律,进一步阐述了电磁场理论与电路理论的内在联系。

关键词 电磁场 电路 基尔霍夫定律

1 概述

在电磁场问题中,我们所关心的是发生在某一物理系统中空间各点的电磁过程以及电磁能量在空间的传输和分布情况。所讨论的各个物理量是描述各点电磁特性的场景。该物理系统本身的状况,则是通过在各点上媒质的介电常数 ϵ 、磁导率 μ 、电导率 γ 以及局外场强 E 等来表示的,所涉及的能量损耗与电场能量都以能量体密度的形式出现。

在电路问题中,用电路模型以及电路的物理量来描述一个物理系统的电磁过程。表征这些电磁过程的物理量是电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 、磁通 $\varphi(t)$ 和电荷 $q(t)$ 。常见的电路模型则由电阻、电感及电容等无源元件以及电压源、电流源有源元件联结而成。对于一定结构的电路在给定的电路参数 π ,并求得各物理量的解答后,则在该物理系统中我们所关心的能量变换与转换、信号的传输都可得到反映,从而达到研究该物理系统的目的。

由此可见,电磁场与电路都是研究一个物理系统中所发生的电磁过程的。而任何真实存在的电磁现象都必须遵循电磁场基本定律。电磁场理论所描述的电磁现象要比电路理论更普遍。如在电路理论中的“电压”、“电流”的概念,在本质上是什么?对于这些电路理论常用却又解释不清,电磁场理论都给予了清楚的答案。即电流是电流密度沿某一面积的分,而电压则是电场强度沿某一路径的线积分。所以电路理论是电磁场理论在一定条件下的特殊形式。当某物理系统各方向的尺寸远小于所传递的电磁波的波长时,则可按集中参数电路的观点进行分

析。在集中参数电路中常用的电流、电压要受到两种约束:一种约束来自组成电路的元件,因为元件上的电流和电压必须满足电路元件所具有的电压——电流关系;另一种约束则是来自电路元件的互连方式,因为电路元件之间的互连性必然迫使诸元件中的电流之间和诸元件上的电压之间有联系或者说约束,体现这种约束的是基尔霍夫定律。现在我们就从电磁场的基本理论出发推导基尔霍夫定律。

2 推导过程

2.1 首先推导基尔霍夫电流定律

设有 N 条载流线在 P 点相交,围绕 P 点作一封闭面,如图 1 所示,图中 S 表示载流线的截面积, δ 表示传导电流密度。设在集中参数条件下,(电场只分布在电容器中)只有 S_1, S_2, \dots, S_5 这五条载流线的传导电流密度 δ_c 和位移电流 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 存在,而其余载流线的面上 δ_c 和 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 都为零,故图中未画出。

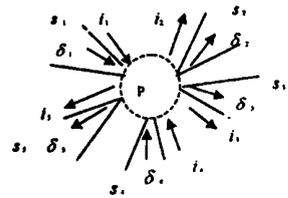


图 1 P 点的载流线

根据麦克斯韦第一方程

$$\nabla \times H = \delta_c + \frac{\partial D}{\partial t}$$

对其两边进行散度运算,得

$$\nabla \cdot \nabla \times H = \nabla \cdot \left(\delta_c + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \quad (1)$$

根据向量恒等式知 $\nabla \cdot \nabla \times H = 0$, 所以

$$\nabla \cdot \left(\delta_c + \frac{\partial D}{\alpha} \right) = 0 \quad (2)$$

对式(2)两边求体积分, 根据散度定理可得

$$\int_V \nabla \cdot \left(\delta_c + \frac{\partial D}{\alpha} \right) dV = \oint_S \left(\delta_c + \frac{\partial D}{\alpha} \right) \cdot dS = 0 \quad (3)$$

式中 V 为闭合面 S 所限定的体积。此式即为全电流连续性定律的积分表达式。

在图1中, $S_1 \cdots S_5$ 截流线的面积上有传导电流流过时, 由于在集中参数条件下, 电场只存在于电容器中, 在外电场作用下, 载流线中被极化的分子发生位移产生的位移电流是很小的, 即使在极高的频率下, 位移电流比起传导电流来仍是微不足道的, 所以 $\int_S \frac{\partial D}{\alpha} \cdot dS = 0$ 。又根据电流与电流密度关系, $i = \int_S \delta_c \cdot dS$, 所以式(3)的积分值为 $-i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 = 0$, 其一般形式为

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (4)$$

上式即为基尔霍夫电流定律。

2.2 再推导基尔霍夫电压定律

设有一 RLC 串联电路, 如图2所示。根据电磁场理论方程组, 可知具有局外场强的导电媒质中, 应有 $\delta_c = \gamma(E_c + E)$ 。式中 γ 是电导率, E_c 是局外场强, E 是由库仑场和感应场合的电场强度。

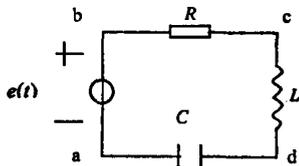


图2 RLC 串联电路

在时变场中, E 和动态位 φ, A 的关系为: $E = -\nabla\varphi - \frac{\partial A}{\alpha}$, 其中右边第一项由电荷产生, 第二项由变动的磁场产生。所以 $\delta_c = \gamma \left(E_c - \nabla\varphi - \frac{\partial A}{\alpha} \right)$, 或

$$E_c = \frac{\delta_c}{\gamma} + \nabla\varphi + \frac{\partial A}{\alpha} \quad (5)$$

将式(5)沿图2所示的闭合路径进行线积分, 则有

$$\oint E_c \cdot dl = \oint \frac{\delta_c}{\gamma} \cdot dl + \oint \nabla\varphi \cdot dl + \oint \frac{\partial A}{\alpha} \cdot dl \quad (6)$$

由于局外场强只存在于电源中, 当 E_c 的闭合线积分路径通过电源时, 上式左边的积分为

$$\oint E_c \cdot dl = e(t) \quad (7)$$

式中 $e(t)$ 为电源电动势; 假设热能损耗集中在电阻中, 因此式(6)右边第一项的积分为

$$\oint \frac{\delta_c}{\gamma} \cdot dl = \int_b^c \frac{\delta_c}{\gamma} \cdot dl = i \int_b^c \frac{1}{\gamma S} \cdot dl = Ri \quad (8)$$

还由于假设了电荷只积累在电容器的极板上, 且电场只存在于电容器两极板间, 所以式(6)右边第二项只需在 $d-a$ 间积分, 有

$$\oint \nabla\varphi \cdot dl = \int_a^d \nabla\varphi \cdot dl = u_c \quad (9)$$

式中 u_c 为电容器两端的电压; 电路中所有磁场变化产生电场的效应集中在线圈中。

因为 $\varphi = \int_S B \cdot ds$, 磁感应强度与向量位函数的关系又可表示为 $B = \nabla \times A$, 因而

$$\varphi = \int_S B \cdot ds = \int_S \nabla \times A \cdot ds$$

根据斯托克斯定理把面积分变换成线积分, 则

$$\int_S \nabla \times A \cdot ds = \oint_\gamma A \cdot dl$$

式(6)右边第三项又可写成

$$\oint \frac{\partial A}{\alpha} \cdot dl = \frac{\partial}{\alpha} \oint A \cdot dl = \frac{\partial \varphi}{\alpha} = L \frac{\partial i}{\alpha} = L \frac{di}{dt} \quad (10)$$

所以式(6)又可写为

$$e(t) = Ri + u_c + L \frac{di}{dt} \quad (11)$$

上式即为基尔霍夫电压定律。

3 结论

综上所述, 电路理论是电磁场理论在一定条件下的近似结果, 即电磁场应封闭在器件内; 被测电压、电流在器件外; 器件在准静态范围内工作, 即波长远远大于电路尺寸; 在电路元件上求端电压时, 应合理选择积分路径。这样才能保证电压、电流和器件参数有确切的定义, 从而给出器件的电路特性。在这样条件下就可由电磁场理论的基本定律导出电路理论的基本定律。但由于要以这些条件为前提, 就使得一些基本概念变得模糊, 出现一些含义不太明确的词汇, 如分布电容、引线电感。可见, 电路理论有很强的实用性, 有广泛的工程应用领域, 而电磁场理论却能比较深刻地揭示电磁现象的本质, 适应范围更宽。

(下转第44页)

影响,并增加滤波器平滑能力。

2 实航数据处理结果

对目标直航和机动航行两种情况进行处理, $\alpha=0.01$, $T=0.15\text{s}$, 根据时延数据存在某个起伏周期, 取数据窗口长度 $N=201$ 。图1为目标直航时的时延值($\tau_{12}-\tau_{23}$), 实线为滤波输出, 下方曲线为状态方差 $P_{11}(k)$, 对图1方框内数据进行统计, 卡尔曼滤波器增益为10dB以上。

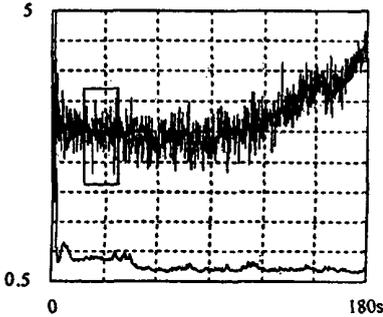


图1 直航时延差值滤波效果图

图2为目标作回旋机动时的时延值($\tau_{12}-\tau_{23}$), 实线为滤波输出, 下方曲线为状态方差 $P_{11}(k)$ 。结果表明, 所提出的卡尔曼时延值滤波器具有较好的跟踪滤波能力。

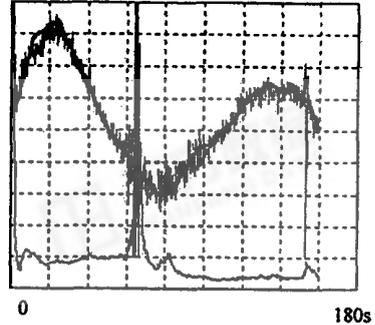


图2 回旋时延差值滤波效果图

参 考 文 献

- 1 I. Pitas and A. N. Venetsanopoulos. Nonlinear Digital Filters Principles and Applications. Kluwer Academic Publishers, 1999
- 2 周宏仁等. 机动目标跟踪. 北京:国防工业出版社, 1991

Kalman Filter for Delays

Huang Qing

(Radio Engineering Department of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, the Kalman filter for delays in the passive tracing system is introduced, the filtering result is presented in the system tests.

Keywords: delay filter; Kalman filter

(上转第42页李凤霞文)

参 考 文 献

- 1 冯慈璋. 电磁场. 北京:高等教育出版社, 1983

- 2 徐永斌等. 工程电磁场基础. 北京航空航天大学出版社, 1992
- 3 王嵩. 基本电路理论. 上海交通大学出版社, 1993

Theory of Electromagnetic Fields Has a Connection with Theory of Circuits Through Analyzing Kerchief's Law

Li Fengxia

(College of Electrical & Power Engineering of TUT, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Starting from the point of view of electromagnetic—field's theory, Kerchief's law is derived from Maxwell's equations, it goes further and discusses the relation between theory of electromagnetic fields and theory of circuits.

Keywords: electromagnetic fields; circuits; Kerchief's law

由基尔霍夫定律看电磁场理论与电路理论的关系

作者: [李凤霞](#)
 作者单位: [太原理工大学电气与动力工程学院, 太原, 030024](#)
 刊名: [电气电子教学学报](#)
 英文刊名: [JOURNAL OF ELECTRICAL & ELECTRONIC ENGINEERING EDUCATION](#)
 年, 卷(期): 2001, 23(3)
 被引用次数: 2次

参考文献(3条)

1. 冯慈璋 [电磁场](#) 1983
2. 徐永斌 [工程电磁场基础](#) 1992
3. 王藹 [基本电路理论](#) 1993

相似文献(10条)

1. 学位论文 冯然 八毫米电路功率合成技术研究 2008

本文研究了八毫米频段两路电路级功率合成放大技术。首先对影响功率合成效率的各种因素进行了讨论。然后,对3dB电桥、魔T以及三端口无耗网络功率分配/合成网络进行了理论分析,并运用三维电磁场仿真软件对这三种网络进行了场分析和比较。在此基础上,本论文制作了波导-微带双探针过渡结构功率分配/合成网络,并进行了测试。测试结果显示,该功率分配/合成网络具有频带宽、差损小以及回波损耗低的优点,在29~38GHz频段内,一个波导微带双探针过渡结构的损耗小于0.28dB,回波损耗小于-15dB。最后本论文采用该功率分配/合成网络,制作了八毫米频段电路级功率合成放大器,并进行了测试。

由于在大功率放大器中放大单片的散热问题会对功率放大器的性能产生很大的影响,本论文还对该功率合成放大器进行了热分析,对功率合成放大器上稳态温度场分布进行了模拟和仿真。由于采用了合理的散热方式并且通过调试使其具有了很高的稳定性,该功率合成放大器能够在全温度范围(-40℃~70℃)稳定工作。经过测试,在-40℃时,该功率合成放大器在31~38GHz频段内1dB压缩点输出功率大于37.5dBm;在70℃时,该功率合成放大器在31~38GHz频段内1dB压缩点输出功率大于34dBm;在常温下,该功率合成放大器在31~38GHz频段内1dB压缩点输出功率大于36dBm;在31GHz处获得38.87dBm(7.71W)的最大饱和输出功率;在36GHz处获得最高功率合成效率约为92%。

本论文还提出了一种三路功率分配/合成网络。该功率分配网络由一个9分枝波导4.7dB定向耦合器和一个5分枝波导3dB定向耦合器构成。通过三维电磁场的仿真分析发现该功率分配/合成网络不仅具有比较宽的工作频带,而且三条支路之间还具有良好的幅度和相位一致性以及很好的隔离特性。

2. 学位论文 甘后乐 平面微波电路的新型设计及其电磁场数值方法分析 2006

微波平面电路是射频和微波收发机前端的主要实现方式。其中的重要模块,如滤波器、放大器的结构和性能,与整机的性能直接相关。微波平面电路的电磁场分析和设计,是微波工程领域一个持久而重要的课题。

论文对新型微波带通滤波器的实现进行了研究。主要成果是:(1)提出了一种平行耦合微带带通滤波器的多步法改进设计方法;(2)提出了采用层叠阶梯阻抗谐振器、折叠梯形谐振器、带T型中心分支线的半波长谐振器实现的新型滤波器结构;(3)还对采用左手介质实现波导和平面滤波器做了初步的研究。以上结果为设计尺寸更小,性能更优秀的微波滤波器提供了新的思路和丰富的信息。

论文的另一部分工作是对宽频放大器电路进行了研究。主要成果是:(1)提出了一种微波平衡放大器的改进失配法设计方法;(2)较深入地研究了级联单级分布式放大器的设计原理和准则。以上结果在前人基础上进一步丰富了关于宽频放大器电路分析和设计的知识。

另外,论文还对微带电路的一种混合FDTD算法进行了研究。主要成果是:提出了一种在线FDTD和传统FDTD的过渡带算法,并将两者结合,同时运用于微带电路的电磁场分析,大大减少了计算的时间和存储量。

以上一系列研究和成果对于新型微波平面电路的分析和设计有着重要的意义。

3. 学位论文 王超 高速背板的电磁场建模和仿真 2007

需求不断地推动着电子学系统的性能发展,随着半导体工艺的进步,片上时钟的速度和板级时钟的速度都在逐年提高,信号的带宽已经进入了传统的微波电路的频带范围。为了研究在如此高的带宽条件下系统的工作性能,采用电磁场的理论和工具作为信号完整性主要的分析手段已经不可避免。此时,除了反射和串扰这些在速度较低时就存在的问题外,趋肤效应和介质损耗等由于信号的时间尺度缩小到亚纳秒时起作用效应造成的影响,比如码间干扰等都是必须解决的问题。

背板是由无源器件组成的板级互连,几乎没有一个电子系统离不开背板或背板型的结构,高速串行背板研究是近年来发展很快的领域,业界对背板性能也在不断提出新的要求,对背板的研究代表了当前高速电路设计的一个主流。电磁场数值计算方法应用于高频条件下的电路互连仿真和设计以及电磁兼容分析是近几年来发展很快的领域,针对背板分析的宽频带和复杂结构仿真要求,时域有限差分方法具有突出优越性。本文通过分析在数据速率Gbps以上时PCB上起主导作用的物理机制,利用时域有限差分方法提取高速电路的传输参数并通过数拟合建模,探讨高速串行背板传输特性的仿真方法。

本论文的第一章首先讲述了板级高速互连的现状、趋势,同时介绍了在数据速率Gbps以上时起主导作用的物理机制,特性区域的划分以及信号完整性的要求。第一章还总结了近年来高速电路研究方法的发展,分析了常用的建模和仿真方法的适用范围;并指出:随着速率的不断提高,系统能达到的极限性能往往被“推到”互连材料的选择和互连结构优化上,而解决这些问题必须采用电磁场理论和分析方法,从而引入高速电路电磁场仿真的必要性。

第二章介绍了电磁场时域有限差分方法以及它在高速电路仿真中的应用。主要介绍了时域有限差分方法在不同频带范围内对信号与我破坏的贡献和防治方法;利用2维FDTD-SPICE混合仿真方法分析了板级电源分配系统的特性;利用时域有限差分方法验证了差分对共模辐射的估计结果。

第三章是本文的重点之,利用时域有限差分方法主要分析了高速背板设计中遇到的介质损耗、趋肤效应对传输线特性的作用;提取了PCB上常见的不连续结构的S参数,分析了过孔、分割槽等在不同频带范围内对信号传输特性破坏的贡献和防治方法;利用二维 FDTD-SPICE混合仿真方法分析了板级电源分配系统的特性;利用时域有限差分方法验证了差分对共模辐射的估计结果。

第四章主要讨论的是模型的有理函数拟合方法,并以过孔、参考平面和有损耗传输线组成的电源分配系统为例,给出拟合模型和HSPICE仿真结果。

第五章尝试探讨高速串行背板的建模和仿真方法。介绍了高速串行背板差分传输通道中建模和模型简化以及仿真和测试结果验证。并指出今后的工作方向主要是通过测试验证仿真的结果。

4. 会议论文 杨育霞, 廖晓辉 集总电路与准静态电磁场 2004

本文从电磁场基本理论出发,运用麦克斯韦方程组证明了基尔霍夫定律的正确性,阐述了电路的集总条件与准静态电磁场的条件之间的关系,澄清了长期以来电路的集总假设与电磁场之间关系的模糊认识,揭示了电路理论与电磁场理论的内在联系。

5. 学位论文 赵刚 低场磁共振分析仪的磁体和探头的设计 2005

自从磁共振技术问世以来,人们就对它的各个部分进行了大量的研究工作。它主要有两部分组成:磁场和电路。这两部分的性能直接的决定了这个系统的性能,设计各项性能稳定的单元就是当务之急。

电路部分的性能直接关系到系统工作状态,是整个系统能否正常工作的关键。因为系统场强低,能接收到的磁共振信号非常微弱,信噪比极低,本文的主要工作就是在现代电路与数字技术的基础上构建一个低场脉冲核磁共振数字接收电路平台,准确有效地提取和处理信号。

岩样核磁共振中的磁体设计方案有多种,其设计目标是使磁体的轻便,易于携带,有一定体积的均匀区,同时要有好的稳定性。这就是问题所在,而这些问题的解决主要靠电磁场的计算。本文首先阐明这些问题,接着对方案进行了优化分析计算,进而从中找出一个最佳的解决方案。利用本文设计的磁体成功地研制了微型核磁共振分析仪。经过实际的现场实验测试,表明由此磁体构成的磁共振岩样分析仪的稳定性、重复性都不错,同时在一定的恶劣环境下也能正常工作。

6. 学位论文 苏亮 铝合金半连续铸造复合电磁场控制系统的研究 2009

复合电磁场应用于铸造技术是一项集机械、电气、铸造和加工工艺等多学科和新技术于一体的研究课题。铝合金半连续铸造生产过程中,在结晶器外设置低频复合电磁场,能够改善凝固结晶条件和铸锭表面品质,从而提高铸坯的质量。复合磁场控制系统为电磁铸造装置提供可控的电流,从而实现磁场控制。因此,复合磁场控制系统的研究对于铝低频半连续铸造的应用具有重要意义。

论文分析了低频电磁场在半连续铸造中的作用机理和复合磁场形成原理,提出了复合磁场控制系统的的核心设计要素;利用矩阵变换器设计功率电路,讨论了复合磁场与功率电路输出电流之间的联系;设计了空间矢量调制的双级式矩阵变换技术的电流波形闭环控制方案,使输出电流跟踪给定函数的变化。

在系统控制电路设计中,基于PLC和触摸屏组成工艺监控层;基于SOPC(System on a Programmable Chip)技术,在FPGA的硬件开发中采用VerilogHDL硬件描述语言设计高频窄脉冲发生器、CAN通信、液晶显示等模块;利用ACTEL的Cortex-MI软核在FPGA上搭建了一个基于Cortex构架的嵌入式ARM控制核心。设计了人机接口电路、看门狗电路及电压电流检测等电路。引入嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 构建软件架构,实现任务实时切换以及资源的合理调度;研究并设计了电流波形发生器,同时对自定义用户IP设计驱动函数接口。

针对系统工艺过程参数复杂多变、功率电路及电磁感应装置模型复杂的特点,采用自抗扰控制器实现对输出电流的控制。仿真及部分现场运行调试结果表明,该算法可以有效地改善控制系统的动态性能,得到满意的控制效果。整个复合磁场控制器的研究和设计合理,能够达到预期效果。

7. 学位论文 陆科杰 X波段宽带单片集成低噪声放大芯片研究 2010

本论文对x波段8~12GHz宽带单片集成低噪声放大芯片(MMIC LNA)进行了研究,论文主要介绍了MMIC LNA的设计原理及方法,芯片电路设计、版图设计及其的电磁场仿真,芯片的流片以及最后的测试。芯片测试结果达到国内领先水平。

本次设计采用台湾WIN半导体公司提供的0.15 μm GaAs Low Noise PHEMT工艺进行X波段单片集成低噪声放大芯片的电路设计。本论文设计的低噪声放大芯片采用三级级联放大的拓扑结构,每一级根据不同的指标要求分别对管芯及其匹配电路进行设计,同时为了便于级联,将各级的输入/输出匹配到50欧姆,然后再进行三级的级联以及电路的优化设计,以满足宽带,低噪声,高增益的要求。待电路设计完成,根据工艺要求设计电路版图并进行版图的电磁场仿真,根据仿真结果,对电路进行改进优化,最后完成电路的整体设计。在设计过程中,末级电路采用了负反馈结构,提高了芯片在工作频带内的增益及其平坦度。采用源端负反馈结构和稳定衰减结构来保证电路的稳定性。并对电路进行敏感度优化,以保证电路加工的成品率。

最后实现的X波段宽带单片集成低噪声放大芯片在8~12GHz的工作频带内具有很好的性能,测试结果表明噪声系数典型值1.2dB,增益大于25dB,增益平坦度小于 $\pm 1\text{dB}$,输入输出驻波小于1.5,达到了设计指标的要求。

8. 期刊论文 王敏 电力系统分析学习的知识准备(一):电路和电磁场部分 -中国电力教育2008, "" (z1)

<电力系统分析>具有理论性强、密切联系生产实际的特点,在专业教学和培养高质量专业人才计划中占有十分重要的地位。在电力系统分析教学中如何合理的协调电力系统分析和其它课程之间的关系,增加学生的学习兴趣,提高课堂教学的效果,是课程教学的难点所在。本文根据教学实践详细分析了在电力系统分析课程中涉及的多门基础学科中的电路和电磁场部分的重要概念和理论,帮助学生抓住电力系统分析学习的关键,获得分析问题和解决问题的能力。

9. 学位论文 石磊 引信感应装定能量传输研究 2007

本文主要对引信感应装定系统中的能量非接触传输理论和技术进行研究。在现代信息化战争的背景下,为了有效拦截来袭导弹,需要对引信进行实时装定,包括能量和信息的传输,而随着感应装定技术的发展,对能量传输的要求也越来越高。本文以某防空小口径弹药引信以及某多管火箭弹引信为应用背景,对其感应装定能量的传输进行研究,以实现其快速可靠装定。

根据感应装定系统的组成及工作原理,在互感模型的基础上,研究了能量传输耦合回路的数学模型,利用理论计算公式对一具体耦合回路计算得到理论值。

在电磁场有限元理论分析的基础上,提出利用ANSYS电磁场电路耦合分析方法对耦合回路进行仿真分析,包括平行板结构、弧形结构、同心管结构等;并在同心管结构的基础上,分析了多管之间的干扰以及铁心、屏蔽、负载、频率、空气间隙、引信体和金属管等对耦合回路次级线圈输出电压的影响,得出的一系列结论,为进一步进行试验,优化耦合回路结构,提高能量传输效率提供理论参考。

为了验证仿真结果,利用某装定器进行试验,并根据试验环境修改仿真模型和参数,得到近似条件下的试验结果与仿真结果,进行对比,验证了仿真结果。为各种型号感应装定系统的设计以及系列化提供了一种方法。

10. 会议论文 高峰, 陈立东, 翟建鹏, 吴存学, 张强 汽车点火系统建模及传导骚扰仿真 2008

为预测点火系统产生的传导骚扰,在分析点火系统各元件工作特性基础上,利用三维电磁场数值计算方法计算出电路参数,从而建立了整个点火系统的等效电路模型,并仿真分析了点火系统工作中产生的传导骚扰。试验与仿真的对比结果表明,建立的点火系统电路模型能够用于点火系统传导骚扰的仿真预测。

引证文献(2条)

1. 王士彬, 张莲, 万沛霖, 包明 "电磁场"课程教学内容改革的实践[期刊论文]-电气电子教学学报 2006(5)

2. 何立志 直流电路中欧姆定律与基尔霍夫电压定律的统一性探析[期刊论文]-株洲工学院学报 2005(4)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqdzjxxb200103013.aspx

授权使用: 同济大学图书馆(tjdx.tsing), 授权号: 33646deb-0eef-4e2b-8513-9e19017b9a28

下载时间: 2010年10月24日