

多物理场仿真的功能及其在 磁共振等技术中的解析

The function of multiphysics field simulation and its analysis in the safety technology of magnetic resonance and lithium ion battery

叶云燕

摘要: 本文将从多物理场仿真的理念入手对其在借助磁共振实现灵活的无线充电与构建更安全的锂离子电池热管理系统等领域的应用作分析说明。

关键词: 多物理场仿真, 磁共振, 热-电耦合, 锂离子电池, 线圈与调谐

Abstract: this paper starts with the concept of multi-physical field simulation to analyze its application in the fields of flexible wireless charging and building a more secure lithium ion battery thermal management system with magnetic resonance.

Keywords: multi-physics field simulation, magnetic resonance, thermo-electric coupling, li-ion battery, coil tuning

1 前言

在上个世纪 90 年代以前, 由于计算机资源的缺乏, 多物理场模拟仅仅停留在理论阶段, 有限元建模也局限于对单个物理场的模拟, 最常见的也就是对力学、传热、流体以及电磁场的模拟。看起来有限元仿真的命运好像也就是对单个物理场的模拟。现在这种情况已经开始改变。经过数十年的努力, 计算科学的发展为我们提供了更灵巧简洁而又快速的算法, 更强劲的硬件配置, 使得对多物理场的有限元模拟成为可能。新兴的有限元方法为多物理场分析提供了一个新的机遇, 满足了工程师对真实物理系统的求解需要。有限元的未来在于多物理场求解。

多物理场仿真工具的出现, 使产品研发和设计工作不再受限于物理原型的束缚, 工程师们因此获得了前所未有的自由, 大幅提升了产品的研发效率和产品可靠性。其开发的成功案例, 已从太阳能热发电、飞机的雷电防护、石油勘探等工业领域, 到电子器件设计和半导体纳米光刻工艺等高新技术领域, 正在为中国的工业发展和技术创新提供助力。

值此本文将从多物理场仿真的理念入手对其在借助磁共振实现灵活的无线充电与构建更安全的锂离子电池热管理系统等领域的应用案例作分析说明。

2 多物理场 (Multiphysics) 的理念与仿真

2.1 新的理念

其一是计算机仿真中研究的耦合物理现象。这种多个物理场相互叠加的问题就叫做多场耦合问题, 也是一种耦合。其多场耦合在现实工程中, 物理场是许多的, 如温度场、应力场及湿度场等等均属于物理场, 而我们要解决的许多问题是这些物理场的叠加问题, 因为这些物理场之间是相互影响的。比如炼钢的时候温度高低对于应力分布就有影响。其二是对多个相互作用的物理属性之间的研究。

* 理解什么是多物理场与耦合方法

* 多物理场耦合 我们可以使用各种物理定律来描述万物的产生和变化。数十年以来, 人们就一直在致力于利用计算机来理解各种物理现象。最初的时候, 由于计算资源非常稀缺, 研究主要集中在各种孤立的物理效应。然而, 我们现实世界中的物理现象并不是孤立发生的。而多物理场现实世界在本质上是一个多物理场的世界。我们每个人用的手机就是这样一个例子。手机中的天线用来接收电磁波; 触摸屏或按键是用来与使用者进行交互的机械和电子元件; 电池会发生化学反应, 并包含离子运动和电子流动等等。这样一个小小的设备, 包含着多种物理现象的相互

作用。由此借助具有多物理场功能的仿真工具，我们可以准确地抓住产品设计工作中的关键因素。这种多个物理场相互叠加的问题就叫做多场耦合问题，也是一种耦合。

* 而多物理场耦合方法从传递现象、电磁场理论和固体力学等第一性原理出发，将其作为实现软件功能的基本构成要素，根据具体的仿真需求，设计工程师可以条理清晰地将这些基本要素组合在一起来解决自己的问题。

2.2 关于多物理仿真

* 在不断拓展的仿真应用中，工程师和设计者必须精确预测复杂产品在多种物理场相互作用的自然界中的真实行为。多物理场解决方案使得用户能够评估他们的设计在真实世界多物理场条件下的运作状况。其提供的软件使得工程师、科学家们能够在简单统一的工程仿真环境中模拟结构力学、热传递、流体流动和电磁学相关问题及其多物理场相互作用的问题。

而为多物理场和单一物理场分析都提供了全面的解决方案。该产品包含结构、热、流体和高-低频电磁场分析功能，包含多物理场直接耦合场单元和多场求解器，从而同时提供直接耦合和顺序耦合求解多物理场问题的解决方案。将工业界领先的结构、热、流体和电磁各学科求解器技术与开放的（如 ANSYS Workbench）环境、灵活的仿真方法和并行产品组合包结合起来，为用户提供足够的手段解决真实世界的、具有挑战性的多物理场问题。

* 多物理场带来的更多好处：针对所有物理场的高品质求解器，包括结构力学、热传递、流体流动和电磁场，能统一的多物理场仿真环境机和全参数化多物理场分析及多物理场仿真的并行求解。

2.3 功能特色

其一是可靠的求解器技术。多物理场解决方案建立在可靠的求解器技术之上，将工业领先的结构、热、流体和电磁各学科求解器技术与开放的环境、灵活的仿真方法和并行的产品组合包结合起来，为用户提供足够的手段解决真实世界的、具有挑战性的多物理场问题。其二是统一仿真环境。强大的多物理场仿真环境，为应用增添了利器，为 CAD 接口、几何修复、网格划分、结果后处理提供通用工具，并赋予协同工作能力。使得多物理场仿真能够在这样一个开放、适应的软件架构中完成。其三是灵活的仿真方法。多物理场解决方案提供了两个被公认的求解技术来求解多物理场问题，包括直接耦合求解与顺序耦合求解。

这两种途径提供了灵活的仿真方法来求解广泛的直接耦合和顺序耦合的多物理场问题，如：感应加热、静电激励、焦耳热生成和流固耦合作用。

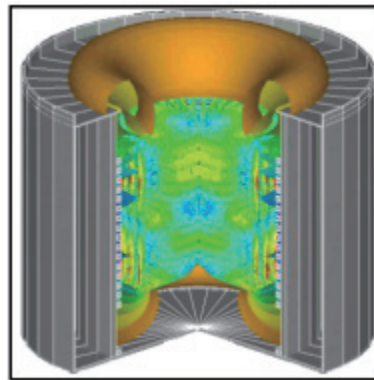


图 1 为灵活的流体耦合仿真方法在通用感应加热炉电磁中的应示意图。

* 多物理仿真典型应用 可在 MEMS、压电、热-电耦合及流固耦合等多个领域中应用。其中 MEMS 应用是最需要多场耦合分析的领域之一，如 MEMS 扭转谐振器（电-结构耦合）；而热-电耦合包括断路器、电容器、电感、变压器、电动机、发电机及变压器电子元件和电子系统攻击及热-电冷却器等；压电应用有换能器、应变计、传感器、麦克风系统及喷墨打印机驱动系统等；而流固耦合有汽车燃料喷射器、控制阀、风扇、水泵、航天飞机机身及推进系统及其部件及可变形流动控制设备，生物医学上血流的导管及阀门与人造心脏瓣膜等。值此以在借助磁共振实现灵活的无线充电与构建更安全的锂离子电池热管理系统等领域的应用案例作分析说明。

3 多物理场仿真在助力技术创新中的应用

3.1 借助磁共振实现灵活的无线充电

人工智能已改变着人们的生活方式。由此人们不妨想象一下，回家后，只需将手机、笔记本电脑和蓝牙（Bluetooth）耳机丢到厨房餐桌上，它们就能实现自动充电；或者只需把电动汽车开到车库的充电垫上，第二天早上就能充满电；再或者在医疗器械上一种新型无需使用电源线或更换电池的新型医学植入物，能够完美替代您身体内正使用的那个旧型植入物。无线能量传输正将这些场景和其他一些应用变为现实，它支持以无线方式对各类电气器件进行充电。如今基于磁共振的无线充电技术，是迄今

为止最方便消费者使用的电力无线传输技术。而新型的无线充电方法可支持同时对多个设备进行充电、远距离充电以及能够穿透木材、塑料、花岗岩以及玻璃等物体进行充电。使用这项技术已在各类产品中使用,例如混合电动汽车、智能手机、可穿戴电子产品和心脏泵等。而这项新技术呈现得益于仿真技术应用。值此对具体仿真技术作如下解析:

* 用磁共振延长了传输距离 在其他无线能量传输选项中,设备需要精确放置在非常靠近(通常需要直接放在)充电电源的充电板或充电底座上,单个电源线圈仅支持对单个器件进行充电。现在仿真技术正借助磁共振的力量来对这些限制进行重新思考。它们的“高度共振无线能量传输”系统见图2所示。

* 对图2的分析:图2上图为仿真技术背后的概念,即包括线圈、控制电源输出和管理的电子设备、用于保证电源设备(见图2上左)和采集设备(见图2上右)之间正确电源输出的无线通讯。而图2下图为此项技术支持通过不同的材料表面进行充电(见图2下左);又可以通过谐振中继器延长无线充电距离(见图2下右)。

由交流电通过线圈时所产生的振荡时变磁场,其中,

通过线圈的交流电被作为电源。将一个功率放大器连接到电源线圈上,通过控制功率大小和工作频率来驱动磁场。采集设备作为接收器来采集磁场,其中包含另一个调谐到与电压相同频率的线圈(见图2上左)。接收器中的磁场将磁能转换回射频交流电,经调谐后,它可以作为一个新的受电子设备控制的本地电源。

仿真技术与其他方法最大的差异在于磁共振的使用。当两个线圈都被调谐到相同的共振频率时,接收线圈能以极低的损耗采集到最大的能量,电源和采集设备无需放在一起或完全对齐就能实现能量的传输。

* 运动及放置的灵活性是一大优势:接收线圈无需与设备直接接触。例如,开车时,您可以直接将手机放到靠近收集设备的杯托上,不需要放在充电垫上,就可以同时为所有设备充电,包括对电源要求各异的不同电子设备。

无线类同的扩展也非常容易:每个共振中继器中都包括另一套电路,线圈可以放置在电源和接收器之间,使能量可以“跳跃”到更远的距离(见图3所示)。

即使电源和接收器之间存在阻碍,比如人体和混凝土墙,还是可以进行高效的能量传输。而图3左为采集谐振器、

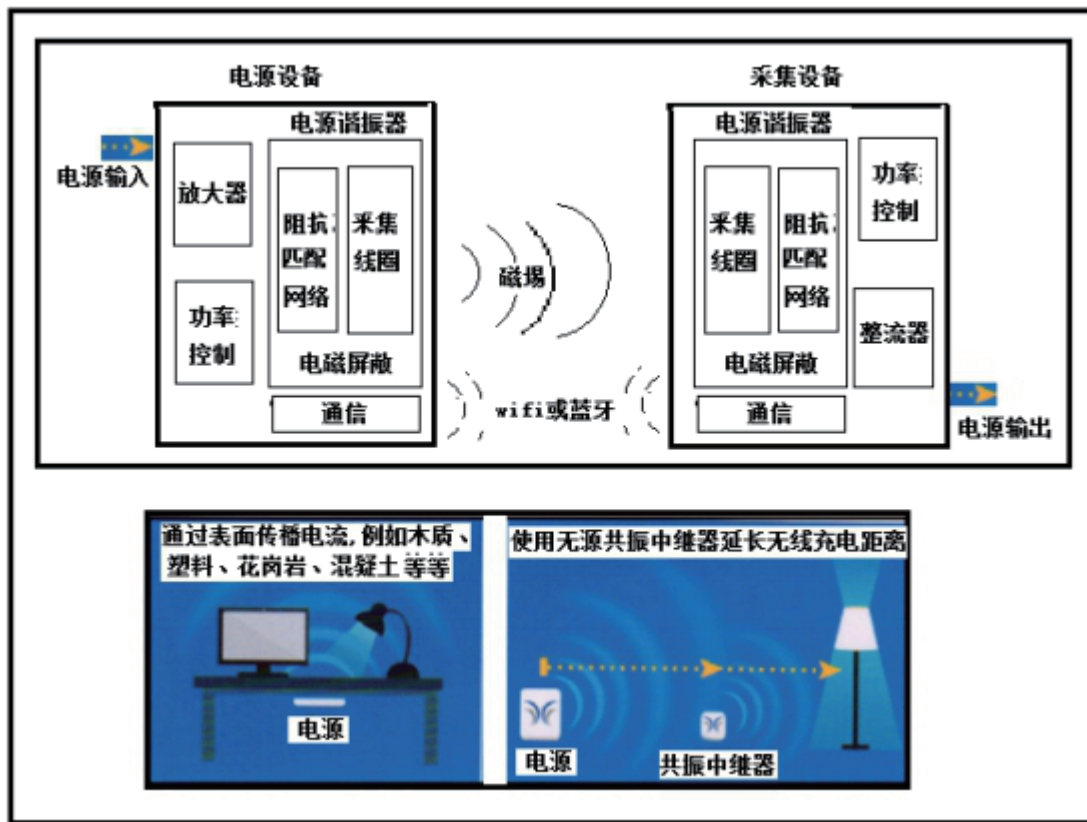


图2 所示为仿真技术的“高度共振无线能量传输”系统

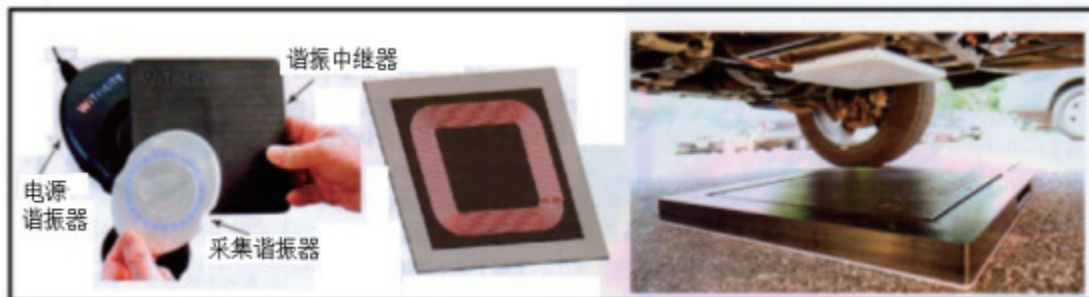


图3 所示为共振中继器线圈使能量可以“跳跃”到更远的距离示意

谐振中继器和电源谐振器。图3中为设计用于消费电子应用的电源共振器。图3右为停在充电板上正在进行无线充电的电动车。

3.2 构建更安全的锂离子电池热管理系统

为应对锂离子电池的安全性问题，使用新型（如COMSOL）软件构建了锂离子电池热管理系统，提升了锂离子电池的安全性。

* 问题的提出

锂离子电池因其重量轻、能量密度高、无污染等特点，成为了电子产品、交通运输、航空航天等各领域中最广泛的电池类型，然而锂离子电池在充放电过程中若使用不当，可能会引发热失控，进而发生燃烧、爆炸等严重的安全事故（图1），因此，锂离子电池热安全成为了电池行业的迫切要解决的热点。

由此根据多物理仿真应用热-电耦合理念使用新型软件可创建了锂离子电池的电化学-热耦合模型，并开发出了一种用于锂离子电池系统散热及防止热失控传播的复合板，大幅提升了锂离子电池的热安全性能。

* 锂离子电池产热规律的仿真及分析

许多电池安全事故都是由电池短路引起的。电池短路时，过大的电流会在电池内部产生大量的热量，导致电池的温度急剧上升。过高的温度会引发电池内部严重的热失控，造成电池燃烧，甚至爆炸。因此，对电池内部热产生过程的分析是锂电池安全性研发中十分重要的部分。为了能够对电池（组）进行有效的热管理，提高电池的安全性，在研发时选取了商用的钛酸锂软包电池作为试验对象，通过实验和仿真两种方法对锂离子电池循环充放电的产热过程和热量分布进行了研发。

* 仿真的合理性 使用新型软件多物理场仿真软件建

立了电池的三维电化学模型，模型耦合了电场和温度场，可用于探究电池内部及表面的温度变化。为验证模型的准确性，需对电池表面的温度进行了实际测量。又将锂电池放置到绝热加速量热量（ARC）中，然后利用充放电循环仪对电池进行循环充放电，并用热电偶记录电池表面的温度变化。通过比较仿真和测量得到的电池表面温度数据，则可以深入了解到模型参数设置的合弹性。

图2显示了使用仿真及试验方法得出的锂离子电池温升曲线，实线为绝热条件下的实验测试结果，虚线为无冷却条件下的仿真结果。

在隔绝热量交换的条件下，当电池以1.0C（C为充放电倍率，用于描述相对于电池额定容量的充放电速率）进行充放电循环时，电池温升的仿真与试验数据完美契合，很好地模拟了电池的产热过程，为后续电池热失控的研发提供了基础。

* 对自然对流条件下不同充放电倍率时电池的温升的研发结果 其自然对流条件下不同充放电倍率时电池温升的对比见图3所示。

可以看出，随着电池充放电倍率的增大。这主要是因为电化学反应产热与焦耳热呈正比，并与电流的平方呈正比。为此同时对充放电循环中产生热量最高的阶段进行了分析。从温度变化曲线可以看出，电池出现了两个温度峰：一个温度峰对应的是放电过程和充电过程之间的转换阶段，主要是因为放电阶段产热速率大于充电阶段；另一个温度峰对应的是恒压充电末期，由于负极嵌锂接近饱和，内阻增大，产热更多。

* 由锂离子电池热管理系统有效防止热失控的有效选择

* 锂离子电池热失控的危险 电池在实际热失控过程

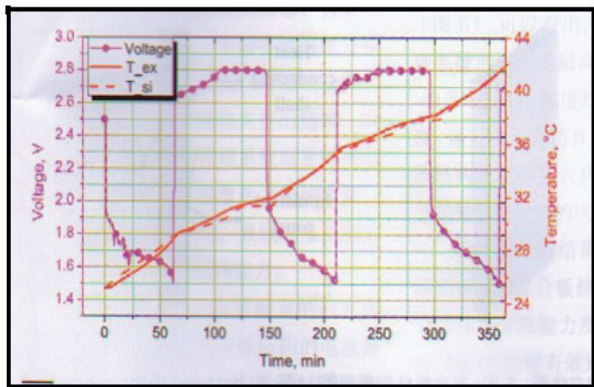


图2 为使用仿真及试验方法得出的锂离子电池温升曲线

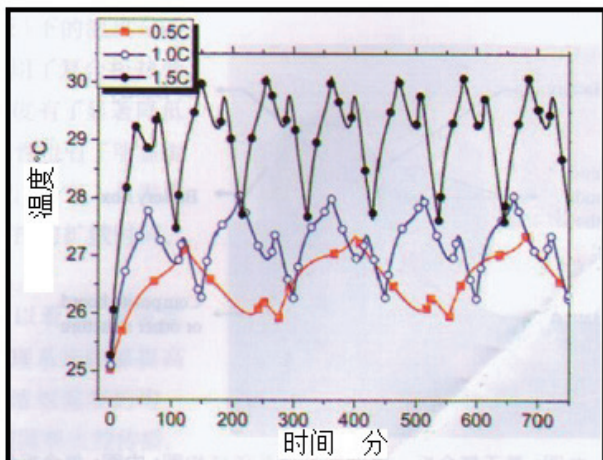


图3 为自然对流条件下不同充放电倍率时池温升的对比

中，由于温度过高会产生很多副反应，而这些副反应的产热是热失控过程后期的主要热源，但现有的很多热失控模型并未考虑到这部分化学反应产热。为此综合考虑了不同荷状态电状态下电池系统可能的反应特性和产热特性，将其耦合到电池的热平衡方程中，并对一维电化学模型和三维热模型进行联合，建立了耦合化学反应热的热失控模型。

该在部型软件中模拟了电池发生热失控的过程，得到了电池内部温度变化过程、电池发生热失控的时刻等参数。以图4中的左图和右图分别为1Ah和50Ah钛酸锂电池的热失控过程为例。对比两个具有不同容量的电池，可以发现两者之间的相似之处在于当电池内的温度上升至隔膜熔断温度170℃左右时，电池发生内短路，内部的材料发生了化学反应，短时间内突然释放出大量的热从而引发热

失控、存绝热工况下，电池温度随着充放电循环次数的增加而升高。热失控发生时，电池内部的中间部位温度最高，随着充放电电流的增加，电池产热速率增大。相比于没有考虑化学反应产热的模型，考虑反应产热的模型发热失控的时候叫显提前，热失控的危险更大。

* 锂离子电池热管理系统是有效安全举措 电池在使用过程中产生的热量如果不能及时移除，将会导致严重的后果。因此，设计人员需要使用热管理系统来控制电池组的温度。锂离子电池热管理系统的主要目的是保证电池处于最佳的工作温度范围以及保证电池组中各部位的温度均匀。设计人员通常用两个参数来衡量热管理系统是否有效，一个是电池内的最高温度，另一个是电池组内的最大温差。电池组包含失控阻隔，用于防止连锁热失控。增加阻隔措施，会导致系统散热效率降低，引起电池温度分布不均；而降低隔离措施可增强电池间的散热效率，但会增强热失控的传播。因此开发新型的热管理系统需要解决电池热失控阻隔与系统散热之间的矛盾。使两者能够协同作用，兼顾电池组的散热能力和热失控的阻隔能力。

针对此问题，应用一种基于复合板结构的电池热管理系统。复合板由导热壳、隔热板、相变材料组成。呈现三明治结构，如图4所示。

外面的导热壳能将单体电池产生的热量转移到相变材料和环境中，提高了电池组的散热能力；内部填充的相变材料能吸收大量热量，保证电池在正常温度范围之内工作，并极大地提高了电池组温度的均一性；中间的隔离板能阻止热量直接穿过复合板，可以有效隔离热失控单体电池产生的热量，使得电池热失控局限在单一电池内，从而防止电池组发生连锁热失控。

随后也对电池间阻隔材料的影响进行了分析，模拟出了正常工况下电池组间无阻隔，及不同阻隔方式（空气、散热板、复合板）下的温度分布特性，从而可以得知，使用了复合板热管理系统的电池的最高温度有了显著降低（9℃左右），温度均一性有了明显提高。通过进一步仿真分析，由此发现该结构还能够延长热失控的扩散时间，从而降低热失控的风险。

由仿真分析结果可以看出，提出的复合板热管理系统能够提高电池组的散热能力及电池组温度的均一性，同时还能够有效地阻隔热失控传播，从而提高电池组的安全性。

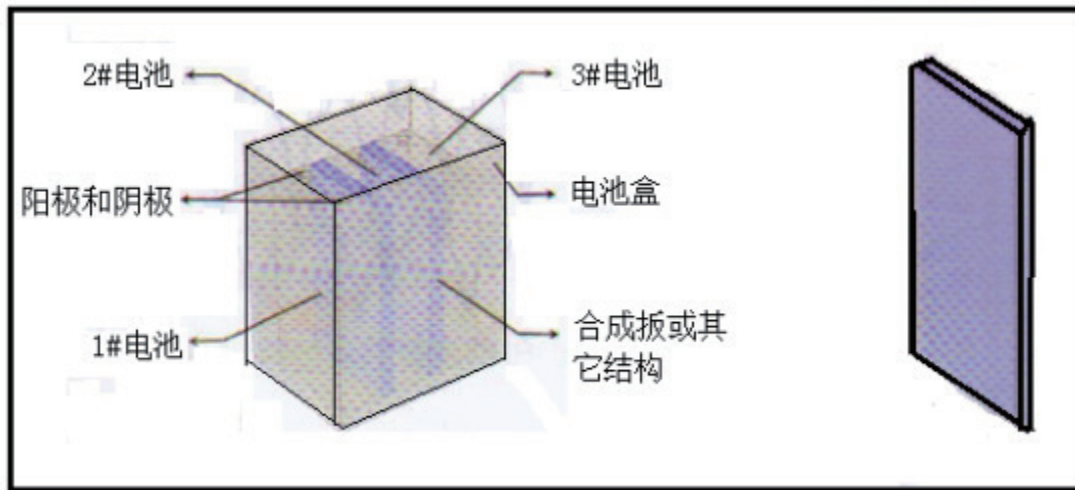


图4 左为图基于复合板结构的电池热管理系统结构图；右图为复合板结构俯视图

上接135页

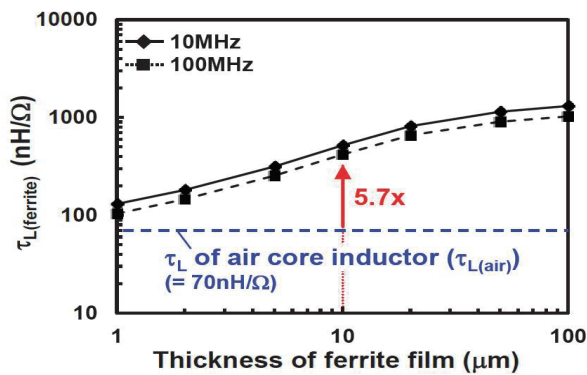


图6 电感器 τ_L 与铁氧体薄膜和空心电感器的相关性

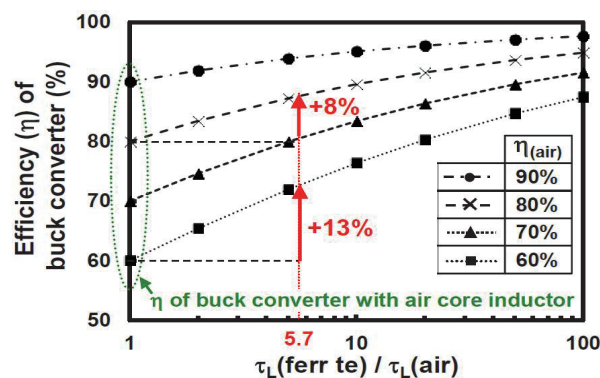


图7 使用铁氧体薄膜电感器改善降压转换器的效率。

$\eta_{(空气)}$ 是具有空芯电感器的降压转换器的 η 。

器的效率得到提高。通过使用 10m 厚铁氧体薄膜的电感器，当空心电感器的降压转换器效率分别为 60% 和 80% 时，降压转换器的效率提高了 13% 和 8%。

4 结论

在本文中，研究了带有铁氧体薄膜的内插器上的电源电路电感器。在这项工作中，DC-DC 降压转换器用作电源电路。通过场电磁仿真评估铁氧体膜改善的电感和 τ_L 。首先，讨论了电感对铁氧体薄膜位置的依赖性。仿真结果表明，位于电感器上下两侧的铁氧体薄膜的电感远高于仅位于电感器下侧的铁氧体薄膜。此外，金属之间的铁氧体膜将电感提高了 20-60%。这些结果表明铁氧体薄膜应位于电感器的上下两侧以及金属之间。然后，评估了使用具有铁氧体膜的电感器的降压转换器的效率提高情况。通过使用 10m 厚铁氧体薄膜的电感器，当空心电感器的降压转换器效率为 60% 时，降压转换器的效率提高了 13%。考虑相对渗透率对频率的依赖性的调查是未来的工作。

参考文献

- [1] G. Schrom, P. Hazucha, F. Paillet, D. S. Gardner, S. T. Moon, and T. Karnik, "Optimal Design of Monolithic Integrated DC-DC Converters," Proc. IEEE International Conference on IC Design and Technology, pp.1-3, 2006.