

软磁材料的可用性及其 在电力电子中应用的经济可行性

在电力电子应用中，纳米晶软磁磁芯可以提供更高的效率和功率密度。直至最近，这一材料已经实现大规模应用了。当其用于商用车应用中的电力电子设备时，结果完全出乎意料。本文将介绍与 Innoelectric 合作进行的一项研究。

目录

简介	3
软磁材料 - 普遍认识	6
技术挑战	7
开发和采购	8
产品线	9
测试	11
技术性分析 - 测试结果	12
经济性分析	14
总结和展望	15
Innoelectric 和巴西矿冶公司简介	17

简介

纳米晶软磁材料可以确保电力电子领域（例如，电动汽车充电应用）的磁性元器件实现进一步小型化和高效运行。这是因为纳米晶材料在多种频率、环境和机械条件下具有高导磁率、低矫顽力、低磁致伸缩、高居里温度（高达 570 °C）和高饱和磁通密度等特性。与铁氧体相比，纳米晶材料具有高饱和磁感和高工作点，因此可以提高功率密度；此外，由于具有高磁导率，因此这类铁芯的绕线更为简洁，且在冷却系统的设计上具有更大灵活性。

铌是纳米晶软磁材料生产的关键元素，作为铌生产和商业化的全球领导者，巴西矿冶公司与 innoelectric 公司合作进行了本国际研究项目。研究的主要目的是分析在 innoelectric 制造的以下系列产品上使用纳米晶软磁材料的好处：具有通用功率因数校正 (PFC) 和电感器-电感器电容器 (LLC) 拓扑的车载充电器系统 (OBC)。本研究的器件由全球不同制造商和工程服务提供商根据要求提出。

所设定的研究目标是通过概述性能、交货时间和成本等方面的差异，证明采用纳米晶材料制造的部件适用于电力电子领域当前或计划的开发项目。本文从不同方面介绍并评估了交流滤波器和直流共模电感的特定研究结果。

研究项目的背景

虽然，汽车行业的电子元器件供应面临诸多挑战（其中包括成本敏感性、严格的安装空间限制以及轻量化和增效需求）；

但是，innoelectric 的客户领域却独具优势。基于总体拥有成本做出采购决策，意味着可以为使用新的磁性材料提供可能性，从而针对最终应用带来优化解决方案。

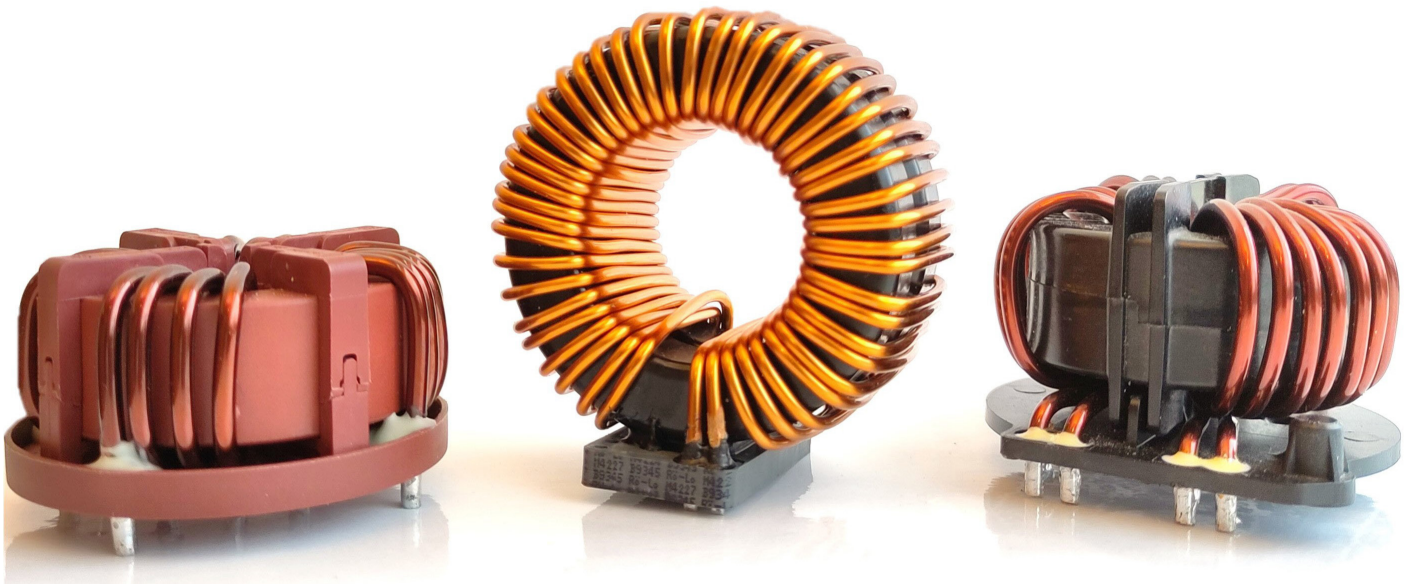


图 1 车载充电器系统应用中使用的标准器件如下：交流共模电感（左）、交流网侧滤波器（中）、直流共模电感（右）

© 201/2023 Proterial Ltd. - “纳米晶软磁材料 FINEMET®”： https://www.proterial.com/products/catalog/sm/PR-EM07_FINEMET_Ribbon_PR-EM07.pdf

作为联合研究工作的一部分，该创新型纳米晶软磁芯材料正在 Innoelectric 制造的车载充电器直接应用中进行测试。为了进行全面的性能测试和潜在效益分析，直接在现有产品中进行电气和热行为测试以及电磁干扰测试。

通常，标准的车载充电器电力电子设计由 PFC 和 LLC 级组成。

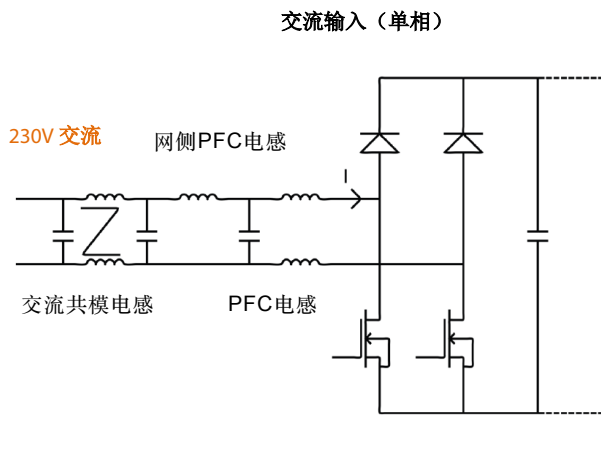


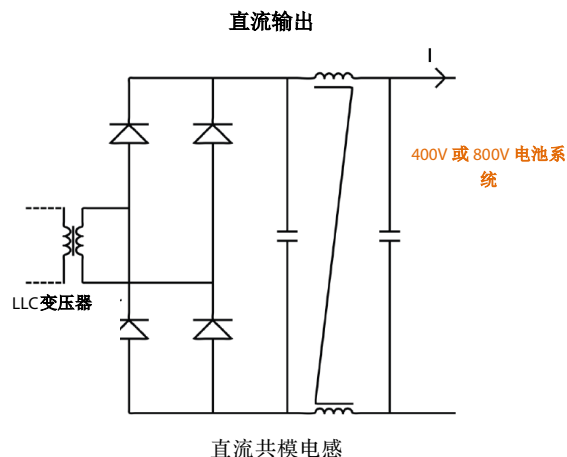
图2 单相车载充电器的简化原理图

PFC 级

标准 PFC 级包含三个主要电感:交流共模电感、次级网侧滤波器(网侧PFC电感-图2)和单个电感(PFC扼流圈-图2)，可将共模噪声和对电网的谐波注入降至最低。

初始功率因数校正“PFC”级可以调节和过滤三相交流输入，并在 LLC 级生成整流直流输出。

第二级是两个电感 (L) 加一个电容器 (C) “LLC”和直流输出级，即可在最终的电动汽车电池充电过程中实现电流和电压调节。



然后，接入主 PFC 电感器对交流电流进行整流。所有三个器件既对车载充电器的设计和功能至关重要，也对其体积、成本和效率产生重大影响。因此，本研究选择所有三个元件进行分析、调整和优化。

LLC 和直流输出级

LLC 和 DC 输出级包括两个主要器件。LLC 主变压器的主要功能是根据高压汽车安全标准的要求隔离车载充电器的输入和输出。另一个主要功能则是根据不同的电池电压水平进行电压转换。该变压器的运行频率在几百千赫兹范围内。在如此高的频率下，可以预计纳米晶材料将无法获得实质性的改进。

因此，未将该器件作为进一步分析的优先选择对象。然而，就其他项目和产品而言，当重量和体积发挥的作用大于效率和电磁辐射时，情况可能会有所不同。尽管如此，直流共模电感仍被选择作为研究对象。其主要功能是为具有电磁兼容性的滤波器。



软磁材料

普遍认识

在当今市场上存在多种多样的软磁材料可供使用，例如，晶粒取向硅钢薄板 (GO)、晶粒无取向硅钢 (NGO)、铁氧体 (Mn-Zn 和 Ni-Zn)、铁粉 (Fe)、铁合金粉 (Fe-Si-Al、Fe-Si 和 Fe-Ni-MO 等)、纳米晶带材 (Fe-Si-B-Cu-Nb) 和非晶带 (Fe-Si-B 和 Co-Fe 等)。纳米晶软磁材料 (NSMM) 是一种先进的软磁材料，用于助力新兴电力电子系统在高频磁性器件的设计中达到较高功率密度和效率。

在生产过程中，这一材料通过快速凝固并形成薄带状 (例如，厚度为 14~30 米)。这是一种名为“熔体快淬”的工艺，熔体以射流的形式被推到冷却后的转轮或转筒上，然后从轮中弹出形成带状。随后，经过大约 500~600°C 的热处理，将最终的磁性特性诱导到材料中，形成初始非晶态的微观结构，并最终形成纳米晶状态。

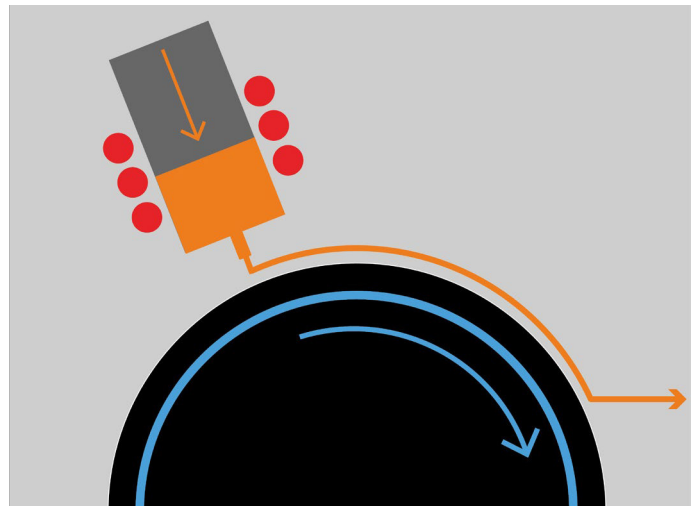


图3 熔体快淬工艺

纳米晶材料开发价值链

除了本项目研究的共模电感、PFC电感器和变压器外，纳米晶软磁材料 (包括带状和磁芯形式) 的其他应用还包括直流-直流电感器、电流互感器、电流检测仪、磁放大器、电机定子、磁屏蔽和无线充电。

如今，巴西矿冶公司可以列举全球超过100家从事纳米晶软磁材料生产以及配套器件设计的公司。涉及的国家包括中国、韩国、日本、印度、德国 和美国。因此，无论是竞争力还是可及性，均大幅提高。

在过去十年中，市场情况日新月异，纳米晶软磁材料曾经价高且难求。

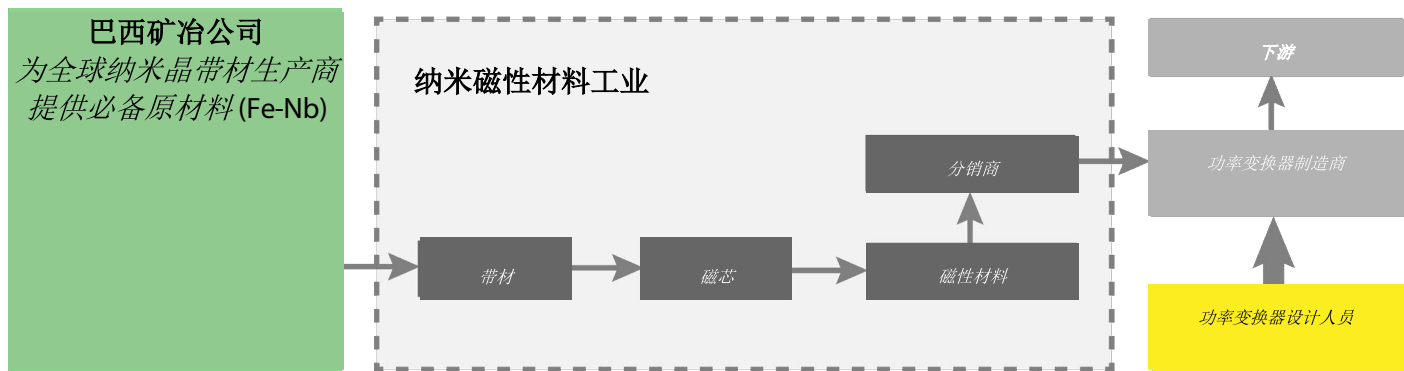


图4 纳米晶材料开发价值链

技术挑战

在许多情况下，车载充电器是车辆上为传动和辅助用电设备输送总能量的单元。车载充电器的效率不仅强烈影响车辆的运营成本，也影响车辆的购前评估。

例如，充电过程是全球统一轻型车辆测试程序 (WLTP) 的一部分，该程序用于测量车辆能耗并提供强有力的购买评估标准。如果车载充电器的热损失较高，则其必须通过相应增大的车辆冷却系统来消散这些损失。可用的安装空间严重受限，尤其是在小型客运车辆中。现代车辆应为容纳舒适性功能和必要的附加外围设备(例如，执行器)提供安装空间。在货运车辆中，电力电子设备的重量每增加一点，可能的有效载荷将直接减少。在这方面，大多数设计仍有极大的优化空间。包含磁芯和绕组的器件可轻易占据电动汽车中电力电子设备总重量的 15% 以上，包括车载充电器。

替代器件所需的占地面积和安装空间应更小，效率应更高，或电磁滤波器性能应更优越。

此外，应以车载充电器中的现有安装空间为限，并且必须遵守印刷电路板的温度限制。必须保持功率密度。

尤其是在直流输出中，1000 伏的高电压以及随之而来的绝缘和高充电电流，均是难以满足的要求。因此，根据不同要求实现器件优化，是一个多目标优化问题。

以上挑战已经转嫁到了替代器件的潜在供应商身上。唯一清楚的是不同应用下的最低必要要求，以及现有器件的数据表(若有)。

研究背景动因

- 改进效率，降低运行成本。
- 实现小型化，为高端乘用车功能预留空间。
- 轻量化设计，增加运输车辆的有效载荷。
- 车载充电器的可开发潜力巨大。
- 满足当前产品的技术要求仍然是一项挑战。

开发与采购

为了提出挑战，本研究仅接触那些在互联网上公开宣传其在纳米晶材料领域的专业知识的公司。

为了将有限的规格书仅提供给替代器件的潜在供应商，所提供的信息和要求如下：

报价请求参数

应用 (电感)

阶段 (2/4)

基本频率

标称电压和电流水平

电感频率特性

温度额定值

安装方向和占地面积（适用于印刷电路板部件）

特定要求（例如，绝缘或最大尺寸）

询问生产量的公司得到的答案是生产量在四位数范围内。但是，可以出于测试目的提供样品索取要求。例如，北美大陆的公司就是这一情况，这些公司更多地是从事服务提供业务，或也主动支持研究项目。

有趣的是，在大多数询问中，对纳米晶磁性材料的要求被反复提及。

当提到应用市场时，可以预期到成本效益是严格关注的焦点，因此使用软磁材料的决定受到了质疑。

在所有情况下，均可在下订单后的 **4~8** 周内获得样品。样品是免费的，或对于开发服务提供商，则每件样品的成本在三位数欧元的较低范围内。

产品线

在许多设计中，采用铁基纳米晶材料的部件用于交流输入端的共模电感。该部件是一个系列产品，可在供应商市场上轻易获取。将该器件与基于铁氧体磁芯的变体进行比较。

因此应能评估将元件与纳米晶磁芯结合使用后已经实现的节约潜力。结果表明，双环磁芯的高度和直径均存在明显差异。

交流共模扼流圈的比较

交流 CMC：广泛使用的纳米晶磁芯版本

交流 CMC：基于铁氧体的解决方案

<p>真实尺寸对比</p>	 <p>10 毫米</p>	 <p>10 毫米</p>
<p>芯材</p>	<p>纳米晶材料</p>	<p>铁氧体</p>
<p>供应商</p>	<p>欧洲；现成产品</p>	<p>北美：从原型设计到批量生产；定制制造</p>
<p>尺寸</p>	<p>50 毫米* 18 毫米**</p>	<p>62 毫米* 26 毫米**</p>
<p>重量</p>	<p>165 克</p>	<p>430 克</p>

* 外芯直径

** 高度

与交流共模电感一样，直流输出端的标准器件可从欧洲公司和分销商处 轻易获取，而磁芯则是经典的铁氧体磁芯。替代方案的设计最初委托给负责开发用于比较的铁氧体基交流共模电感的同一制造商。如下图所示，替代方案1已经出现了明显区别。随后，该方案被提供给其他供应商，作为附加参考。结果如替代方案2所示。

磁芯的尺寸和绕组的数量几乎相同。由于存在光学差异，因此仅基板需要使元件适应现有的印刷电路板。替代方案 3 在尺寸上形成了一个中央跨距。由于替代方案 1 来自仅专门生产工程样品和小型系列产品的制造商，因此无需对其进行经济性分析，因为其定价与替代方案 2 和 3 的大规模生产商无可比性。

直流共模扼流圈的比较

	直流 CMC: 广泛使用的版本	直流 CMC: 替代方案 1	直流 CMC: 替代方案 2	直流 CMC: 替代方案 3
真实尺寸对比				
芯材	铁氧体		纳米晶体	
供应商	欧洲; 现成产品	北美; 从原型设计到批量生产; 定制制造	亚洲; 大规模生产商; 定制制造	
尺寸	45 毫米* 20 毫米**	34 毫米* 13 毫米**	34 毫米* 13 毫米**	45 毫米* 18 毫米**
重量	182 克	50 克	60 克	102 克

* 外芯直径 ** 高度

测试

比较器件的功能测试包括三个阶段:(1) 测定无负载时的电气特性(电阻、电容和电感 - RLC);(2) 满负载下的功能、功耗和热行为;以及(3) 根据标准测定传导电磁干扰行为。对作为示例的车载充电器拓扑进行功率损耗和电磁干扰的初始基线测量。

首先在无负载的情况下单独检查器件的电磁参数,包括共振频率的测定。然后,在作为示例的车载充电器拓扑中逐一连续交换使用上述器件,以尽可能在独立的情况下评估其行为。通过运行两个不同的操作点来分析系统全输出功率下电流(最低输出电压)和高开关频率(最高输出电压)的最高可能负载。

在电压和电流的高频采样率下以电气方式测定功率损耗。

在相同条件下,保持恒定通风,在磁芯和绕组冷却的过程中监测其温度。为了分析电磁兼容性(EMC),采用汽车电力电子开发通用测定方法,该方法依据的是广泛使用的UNECER10标准。在设置上注重输入和输出的传导干扰,可参考 CISPR 16-2-1(车辆交流或直流电源线的传导干扰)、CISPR 25 和 IEC 61000-3-12 标准在常规电子实验室中记录该电缆的传导干扰。



技术性分析

测试结果

总体研究结果

- 对 RLC 值的初步分析表明，纳米晶软磁芯明显十分突出。对共振频率的分析表明，这些材料覆盖的频率范围广泛得多，比达到 16MHz 等值的铁氧体磁芯高出约 20~30 倍，而并非仅是达到共振前的 0.5MHz。
- 由于供应商获得不同频率下的多个(最小)电感固定点，因此磁性材料的不同衰减量差异明显。替代直流共模电感的值高出 20%(替代方案 1)至 90%(替代方案 3)。
- 凭借纳米晶材料的功能，达到必要电感值所需的绕组数减少，因此寄生电容器件的数量有所减小，例如，直流共模电感的寄生电容减小到原来的十分之一至千分之一不等。

交流共模电感 - 铁氧体比较

对于交流输入共模电感，纳米晶材料显示出了明显更好的性能。比较磁芯尺寸可知，潜在的节约量大约为印刷电路板组件面积的 34%。磁芯的体积减小了大约 54%，共模电感器件的重量降低了 62%。同时，效率大同小异。已测定的热损失在两个负载点上相差 +10% 至 -10%。铁氧体变体在较高的电流负载范围内表现略好。目前与纳米晶软磁材料结合使用的变体在高输出电压下表现更佳，为实现这一点，必须提高电力电子设备晶体管的时钟速率。

磁芯和绕组的温度最高也仅相差 6°C。即使在高输出电压时，温度变化范围仅为 53°C~59°C 时，纳米晶变体表现更佳。

在这方面，磁芯的尺寸优势未对其效率产生不利影响。由于采用铁氧体材料的共模电感在尺寸上大于广泛使用的元件，因此无法在常规测试设置中安装。因此，无法进行可靠的电磁干扰测量比较。

直流共模电感- 替代方案

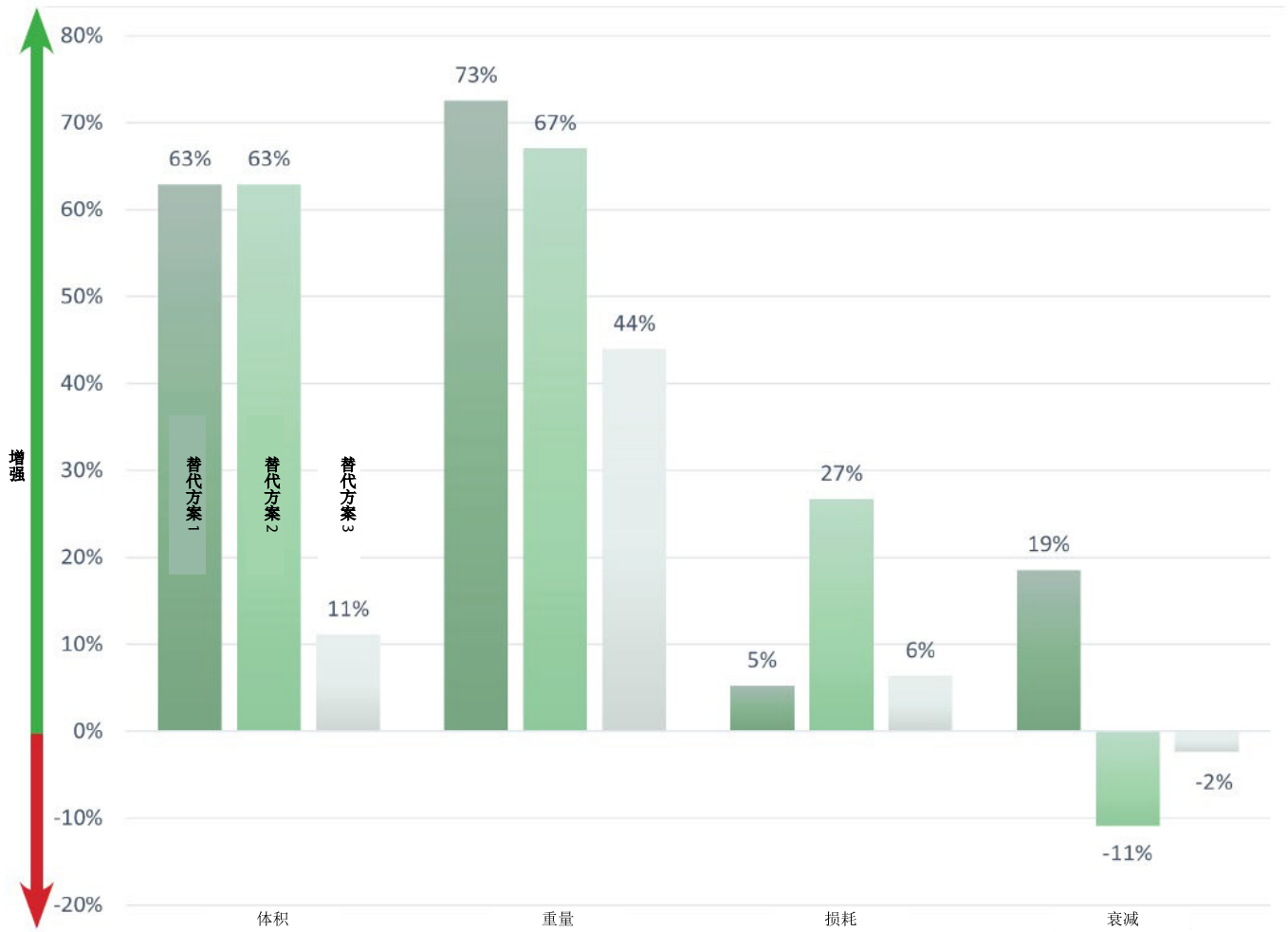
比较直流输出端的共模电感可知，使用纳米晶材料的替代方案在机械性能方面展现出明显的优势。在替代方案中，磁芯的重量和体积均可减少到三分之一。仅替代方案 3 在这一方面的优势较少，尽管在使用同种材料的情况下，凭借较高的内径仍可通过更紧密的几何形状实现优化。在热损耗和电磁行为方面，情况更加多变。如图 5 所示，在考虑损耗和衰减时，

不同器件的特性差异极大。但是，仅替代方案 1 在损耗和衰减两个方面仍较现有的铁氧体磁芯器件具有明显优势。

损耗方面，在最高潜在输出电流下的工作点存在差异，在这一情况下，器件被加热至大约 90°C，但在所有情况下均低于铁氧体元件。差异越小，输出电压越高，因此 LLC 频率越高。

替代方案 2 和 3 的滤波特性较弱。尽管如此，衰减与损耗和其他参量之间不存在线性关系。

因此，就替代方案 3 而言，在实现幅度和效率优势的同时，滤波效果似乎有所减弱。但是，就替代方案 1 和 2 而言，未发现直接的相关性。



- 体积: 磁芯体积
- 重量: 磁芯和绕组的总重量
- 损耗: 在最高输出电流为 65A 时的最具挑战性的工作点下的损耗
- 衰减: 将 LLC 最具挑战性工作点处的衰减 (以 dB 为单位) 与当前应用的最大输出电流下的元件进行比较

图 5 DC 共模电感 - 对现有元件的改进

经济性分析

由于仅与制造商的单个器件进行原型比较，因此实现交流共模电感替代所涉及的财务考量毫无意义。

另一方面，对于直流共模电感，可以进行有趣的对比。由于供应商并未实现经济上可行的大规模生产，因此仅替代方案 1 不参与比较。

同一制造商的纳米晶磁芯比铁氧体磁芯贵两倍——这是一种较为主观的评估。在替代方案 2 和 3 中，大规模生产商提供的直流共模电感每件价格低至个位数欧元。

如图 6 所示，在这一情况下，这仅是目前应用的器件价格的三分之一至四分之一。目前安装且可以轻易获取的器件的采购价格为高个位数欧元。

因此，在数量相同的情况下，该单一品牌的产品比其他公司要求的替代品昂贵得多。即使采用纳米晶磁芯的器件可能比采用简单铁氧体磁芯的器件更昂贵，但是开发和生产是更重要的因素。即使在选择最佳供应商后不同材料之间仍然存在价格差异，这一差异也可以在产品运行过程中予以摊销。为此，我们将举例说明以下考虑因素。

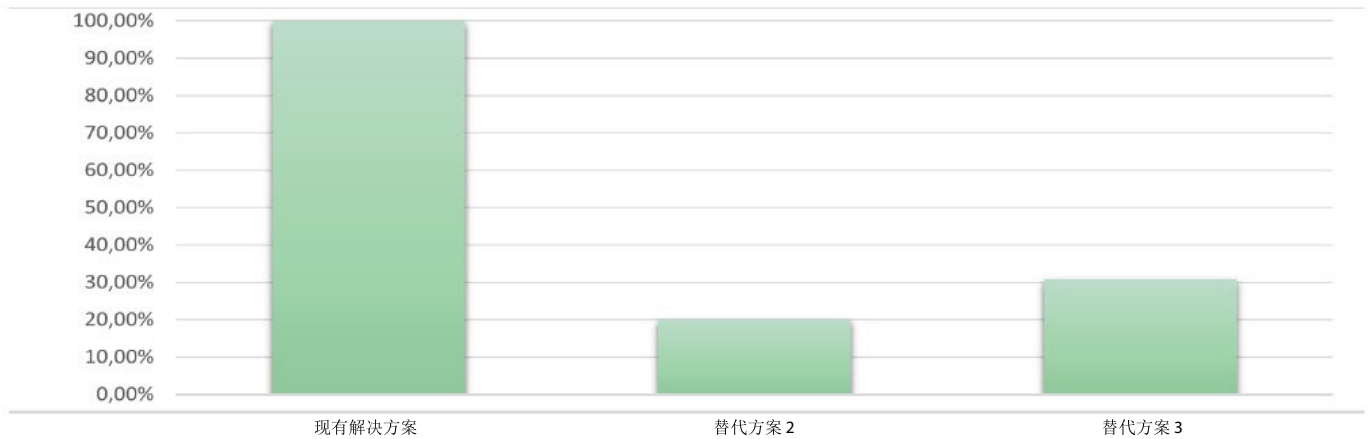


图 6 替代方案 2 和 3 与目前应用的器件的相对定价比较

考虑纳米晶软磁材料在总体拥有成本上的优势

现在如何证明此处所示替代方案的技术优势可以弥补其超出铁氧体磁芯的购买成本？为此，参考车载充电器的简单使用示例：交流充电过程对终端客户系统能效和能源成本的总体拥有成本影响。

为此，提出以下高度简化的假设：

- 直流共模扼流圈替代方案的价格较基于铁氧体的元件贵 2 欧元。
- 商用车(例如，送货车)每天耗能 50 千瓦时，行驶距离为 250 公里。
- 每年充电 300 次，电费为 30 美分/千瓦时。
- 直流共模扼流圈在系统中的损耗为 50 瓦，占 22 千瓦系统总功率的 0.23%，因此每次充电 113.6 瓦时，每年充电 34 千瓦时。
- 使用纳米晶磁芯的替代元件的采购价格成本高 2 欧元。

假设仅当前应用的器件所需的年拥有成本就达到大约 10 欧元。如本例中的器件所示，效率可提高 5%~27%，投入运营一年到最多四年即可收回投资。与其他电力电子设备一样，车载充电器是专门针对商用车的使用寿命而设计的。

以 16 年为例，经过 6.5%~25% 的使用期后，可达到损益平衡点。

尺寸、重量和电磁兼容性等其他参数亦可考虑，但这些参数对所讨论的设备而言更为具体。

总结和展望

软磁磁芯、纳米晶软磁磁芯能够在车载充电器应用领域实现强大优化——这一假设可以得到证实。上述材料可以被轻易用于实现缩小器件尺寸和减小器件重量，以满足市场需求，同时不影响现有的高效率和电磁兼容性。

无需提供详细要求和具备专业知识，全球不同供应商均可根据要求提供替代方案。这些替代方案的交付速度可观，且始终保持优质。除了技术方面，这些替代方案也具有强有力的商业可行性。独特的卖点和在总体拥有成本方面为客户提供的优势完全可以弥补材料带来的可控成本劣势。

该项目积累的一个重要经验在于，对不同报价进行比较以及在整个系统中进行详细测试是值得的。技术附加值和财务费用差异极大。

替代方案2和3均具有经济可行性，但是在选择过程中二者的差别在于电磁行为。尤其当这是项目面临的较大挑战时。

未来，innoelectric AG 将在创新产品和电力传动系统领域优先使用纳米晶软磁材料，并愿意与其他伙伴合作开发项目。

巴西矿冶公司将持续展示纳米晶软磁材料在电动汽车电磁器件和电池方面的应用和革命，并以铌作为其中的关键构成。诚邀所有潜在合作伙伴加入贯穿铌和软磁材料供应链所有环节直至终端用户的整个网络。开发人员可以获得深入的科学知识和应用说明，以及器件寻源支持。



纳米晶软磁材料在电力电子应用中可以提供何种优势？



商用和工业车辆车载充电器应用方面存在何种挑战和潜力？



在当今不断增长的全球市场上可用的材料能达到何种性能水平？比较和测试可发挥何种重要作用？



与标准材料相比，采用纳米晶磁芯的器件能否在短期内具有经济优势？



如果您对本白皮书、本研究的具体内容或纳米晶软磁材料的应用有任何疑问，请扫描二维码与我们联系：





Insoelectric AG 始终坚持将创新与深度知识相结合。公司致力于开发和测试商用电动汽车使用的充电通信和电力电子设备。从首个原型到系列设备，所有元器件均在公司位于波鸿总部内开发完成。

公司的产品组合包括：作为灵活交直流充电系统解决方案的 400V 和 800V innoelectric 车载充电器；专为直接电网连接应用而开发的直流充电控制器和车载充电器电网。除了制造用于批量生产的成品外，innoelectric 团队还提供工程服务。

通过这种方式，innoelectric 可以针对客户项目单独设计产品，同时开展持续的研究工作（例如，以与巴西矿冶公司合作开展的联合研究项目的形式）。



巴西矿冶公司是铌产品生产和商业化的全球领导者，具有超过 60 年的市场经验。公司总部位于巴西，并在中国、荷兰、新加坡、瑞士和美国设有区域办事处。公司从事铌产品的生产和供应，并在基础设施、交通运输、航空航天、健康和能源等领域开发与铌产品应用相关的技术。长期以来，公司的产能均超越了铌产品的全球需求。借助遍布于各大洲的强大物流基础设施，公司为 50 个国家的 400 多家客户提供服务。其商业模式以坚实的公司治理为指导，立足于供应保障、创新以及与全球最知名的研究中心合作进行的新技术开发工作。

欢迎登录 www.cbmm.com 了解更多与巴西矿冶公司相关的信息，或登录 www.niobium.tech 了解更多与铌技术及其各种应用相关的信息。