

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2312015

## 三相旋转磁场高效耦合自取能研究\*

颜沛武<sup>1</sup>, 刘子超<sup>2</sup>, 张文斌<sup>1</sup>, 黄汝金<sup>3</sup>, 谭清华<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500; 2. 昆明品启科技有限公司 昆明 650211;  
3. 昆明理工大学理学院 昆明 650500)

**摘要:**目前三芯电缆自取能效率低已经成为限制电缆沿线在线监测技术发展的关键,为此提出了一种用于三芯电缆的全新磁场自取能方案。与基于互感器原理的传统取能方案不同,创新性地提出了一种基于电机原理的磁场取能方案,此方案提升了磁芯与三相电流产生的旋转磁场的耦合程度,将线圈正法线与电缆表面切向平行改为与径向平行,并给出了最佳取能位置。仿真结果表明,该方案相比以往方案可获得更高的线圈开路电压和输出功率,在磁场自取能效率上有显著提升。结合有限元仿真与神经网络算法,进一步分析一次侧电流、磁芯材料和磁芯尺寸等参数对线圈开路电压的影响,并给出具体的优化设计方案。最后制作样机,在实验室条件下开展相关实验,根据实验结果,一次侧电流 50 A,三组线圈共 2 100 匝时最大输出功率为 2. 243 mW。

**关键词:** 三芯电缆; 旋转磁场; 自取能; 磁芯设计

**中图分类号:** TH707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480. 50

## Research on the high-efficient coupling energy self-harvesting from Three-phase rotating magnetic field

Yan Peiwu<sup>1</sup>, Liu Zichao<sup>2</sup>, Zhang Wenbin<sup>1</sup>, Huang Rujin<sup>3</sup>, Tan Qinghua<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Kunming Pinqi Technology Co., Ltd., Kunming 650211, China; 3. College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Currently, the low self-harvesting efficiency of three-core cables has become a critical limitation for the application of online monitoring technology along cable routes. To address this issue, this paper proposes a novel magnetic field self-harvesting solution for three-core cables. Unlike traditional energy harvesting approaches based on the principle of transformers, this study innovatively proposes a magnetic field harvesting approach based on motor principles. This approach enhances the coupling between the core and the rotating magnetic field generated by the three-phase current, modifying the normal orientation of coil from tangentially parallel to the cable surface to radially parallel, and identifies the optimal energy harvesting position of device. The simulation results demonstrate that the approach proposed in this study yields higher open-circuit voltage and output power of coil compared to previous reported methods, thereby providing a significant enhancement of magnetic field self-harvesting efficiency. By combining finite element simulations with neural network algorithms, further analysis is conducted to assess the impact of parameters such as primary-current, material and dimensions of magnetic core on the open-circuit voltage of coils. Accordingly the optimization design strategies are proposed. Finally, a prototype is constructed and experiments are conducted in a laboratory setting. It's found that the maximum output power is 2. 243 mW when the primary-side current is 50 A and three sets of coils possess 2 100 turns.

**Keywords:** three-core cable; rotating magnetic field; energy self-harvesting; magnetic core design

## 0 引言

考虑到美化城市和节约输电走廊占地,配电电缆更多采用直埋或电缆沟道的方式敷设,电缆线路取代传统架空线路已成必然趋势<sup>[1-2]</sup>。为保障电缆安全可靠运行,电网中分布式在线监测装置将大幅增加<sup>[3]</sup>。例如电缆温度、电流、电场和绝缘状态等分布式在线监测设备<sup>[2,4-5]</sup>,在运行与通信时均需稳定电源,常规电池供电方案受限于电池寿命和补能困难等问题,这使得在线监测设备的供电单元运维成本随之升高。在未来,电网在线监测传感网络对于供电的稳定性、可靠性和经济性有更高的要求,与传统的传输供电和蓄电池供电等方式相比,自取能供电技术具有可靠性高、应用场景广和运维成本低等优点。其中光伏、风电等户外取能技术难以应用于敷设在地下电缆沿线;压电、摩擦纳米发电机和温差发电等技术的输出功率较低,难以满足在线监测设备的基本供电需求;在不破坏绝缘层的情况下,铠装层极大的限制了电场取能<sup>[6]</sup>。相较之下结构灵活多样、能量密度较高的磁场感应取能被许多学者所重视<sup>[7-10]</sup>,但目前多数学者的研究对象为单芯电缆,对三芯电缆磁场自取能的研究十分有限。与单芯电缆不同,三芯电缆外磁场更为复杂,至今依然没有可靠的自取能产品,这也是导致三芯电缆沿线各类在线监测设备难以有效开展的主要原因之一。

目前三芯电缆磁场自取能研究均基于电流互感器(CT)原理做改进与拓展,取能装置共有3种不同的设计方案。方案1,三段独立线圈<sup>[2,11-12]</sup>(SDXQ)保留了单芯电缆CT取能中磁芯圆环形设计,将磁芯上线圈均分为三段,三段线圈可独立电磁感应,输出感应电压相位相差 $120^\circ$ 。方案2,三段独立磁芯<sup>[13-14]</sup>(SDCX)提出在三分线圈的基础上,将磁芯也均分成独立的三段,以上两种方案都是通过改变互感器结构将本应抵消的感应电压分别取出。方案3,新型缺口环芯<sup>[15]</sup>(NNRC)将电缆放置在圆环形磁芯缺口处取能,结论表明NNRC取能效率要明显高于SDXQ、SDCX,且为线圈留有充足绕线空间。但不难看出NNRC与SDXQ、SDCX相比空间利用率较低,且以上研究均未分析磁芯材料、尺寸和形状对取能效果的影响,均未给出仿真与实验中磁芯具体参数。

为解决三芯电缆磁场感应自取能效率低的问题,本文首先通过理论分析与有限元仿真相结合的方法比较单芯、三芯电缆外磁场差异,总结三芯电缆与单芯CT相比磁场取能困难的3个原因。其次根据旋转磁场特征,提出基于电机原理的三芯电缆磁场自取能方案。通过仿真与其他3种取能方案对比取能效率,结果表明本文磁芯效率最高,且有更大的优化设计空间。将有限元仿真与神经网络结合,进一步分析一次侧电流、磁芯材料和磁芯尺寸等参数对线圈开路电压的影响,并给出具体优化设

计方案。最后制作样机并在实验室条件下开展相关实验,一次侧电流 $I_{rms} = 50$  A,线圈共2100匝时,开路电压实验中3组700匝线圈输出均在500 mV以上,整流后最高直流电压1.53 V,最大输出功率2.243 mW。

## 1 单芯与三芯电缆外磁场对比分析

为方便理论分析不考虑趋肤效应,采用电缆理想几何模型,单芯电缆、三芯电缆的线芯均为无线长直导线,且三芯电缆线芯对称分布。单芯电缆几何模型如图1(a)所示,三芯电缆几何模型如图1(b)所示。

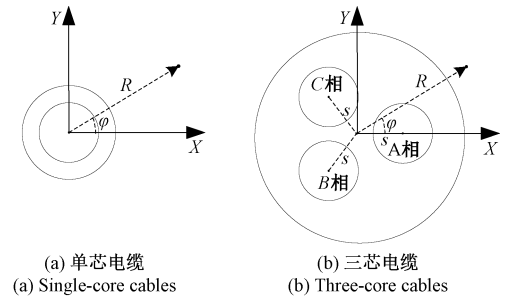


图1 单芯和三芯电缆几何模型

Fig. 1 Geometric modeling of single-core and three-core cables

图1中, $s$ 为三芯电缆中心到各相线芯中心的距离,电缆外任意一点位置表示为 $(R\cos\varphi, R\sin\varphi)$ 。当电流为 $I(t)$ 时,根据毕奥-萨伐尔定理可知,单芯电缆外任意一点的磁场强度可以表示为:

$$H_{\text{单}} = \frac{I(t)}{2\pi R} \quad (1)$$

由于对称性,三芯电缆外磁场强度 $\varphi$ 、 $\varphi + 120^\circ$ 、 $\varphi + 240^\circ$ 处有相同的周期性变化。定义与电缆轮廓垂直方向称为径向,与电缆轮廓相切方向称为切向, $\varphi \in [0, 120^\circ)$ 时 $I_A(t)$ 在电缆外任意一点的产生磁场强度可表示为:

$$H_{A\text{径}} = \frac{I_A(t) \cdot s \sin\varphi}{2\pi(s^2 + R^2 - 2sR\cos\varphi)} \quad (2)$$

$$H_{A\text{切}} = \frac{I_A(t) \cdot (R - s\cos\varphi)}{2\pi(s^2 + R^2 - 2sR\cos\varphi)} \quad (3)$$

$\varphi \in [0, 120^\circ)$ 三相电流对称且电流幅值30 A时, $R = 5$  s = 0.065 m处电缆外复合磁场强度如图2所示。三芯电缆外复合磁场为椭圆偏振场,磁场方向与大小均随时间改变。径向磁场 $\varphi = 60^\circ \pm 180^\circ$ 取得最大值,切向磁场 $\varphi = 0^\circ \pm 180^\circ$ 取得最大值。

复矢量求解椭圆偏振场大小<sup>[16-17]</sup>,当三相电流对称时,可得:

$$H_{\text{三}} = \frac{3I}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{s^4 + s^2 R^2}{R^6 - 2s^3 R^3 \cos(3\varphi) + s^6}} \quad (4)$$

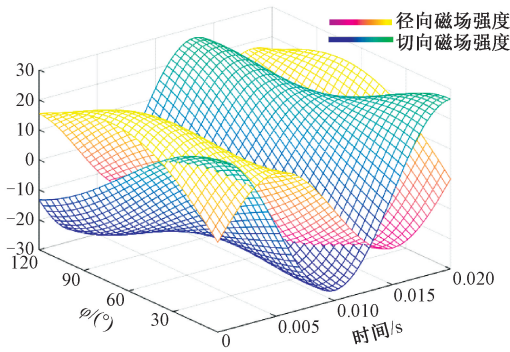


图2 三芯电缆外径向、切向磁场强度

Fig. 2 The strengths of radial and tangential magnetic field outside the three-core cable

将式(1)和(4)进行比较发现,如在半径  $R$  的圆上同一位置处取能,  $R \geq 6.74 \text{ s}$  时三芯电缆外磁场强度小于单芯电缆,  $R < 6.74 \text{ s}$  时三芯电缆外局部位置磁场强度大于单芯电缆。但载流能力相同情况下,单芯电缆尺寸更小,取能磁芯、线圈更接近一次侧电流,相较之下三芯电缆的磁场取能更为困难。

由毕奥-萨伐尔定律可知,单芯电缆外磁场方向为切向,由式(2)、(3)看出,三芯电缆外某点的磁场方向在时刻变化。换言之之磁场在旋转,这意味着单芯电缆取能时有更稳定的磁路,相较之下三芯电缆磁场取能更为困难。电流幅值  $30 \text{ A}$  时电缆外磁场强度分布仿真结果如图3所示。图3与理论分析一直,三芯电缆外为旋转磁场,频率与相电流一致。

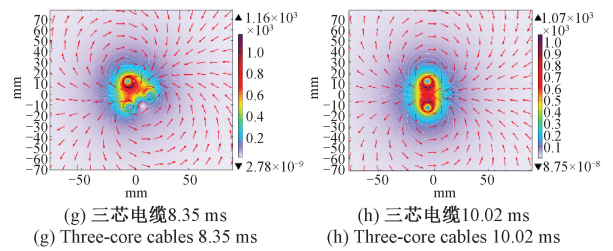


图3 单芯与三芯电缆外磁场分布

Fig. 3 External magnetic field distribution of single-core and three-core cables

单芯电缆 CT 取能已经十分成熟,主流磁芯形状为圆环形,圆环形与单芯电缆外磁路形状十分契合,所以使用高磁导率材料可以显著提高磁感应强度,进而提升取能效率。而三芯电缆外磁路形状和位置不停变化,且磁路穿过电缆自身,无法找到与磁路匹配的磁芯形状,即便是开口式磁芯也受到退磁、气隙等原因影响使聚磁效果大打折扣。低磁阻材料的引入对磁场有不可忽视的影响,

单芯电缆和三芯电缆外添加圆环形磁芯后的磁场分布仿真结果如图4所示。图4(a)、(b)分别为圆环形磁芯对单芯、三芯电缆外磁场分布的不同影响。可以看出由于磁路与磁芯形状匹配度高,单芯电缆外磁场分布变化较小,而三芯电缆外磁场被高磁阻束缚在磁芯内部,此磁场属于低频交变电磁场,所以磁场难以穿过高磁导率材料<sup>[18]</sup>。为获得更大磁通量,通常会增大圆环磁芯的径向厚度,因此在磁路与磁芯形状不匹配时,磁芯的高磁导率一定程度上成为了取能的阻碍。

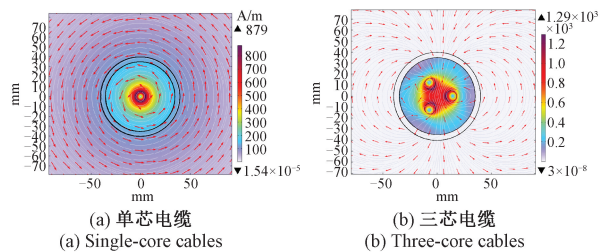
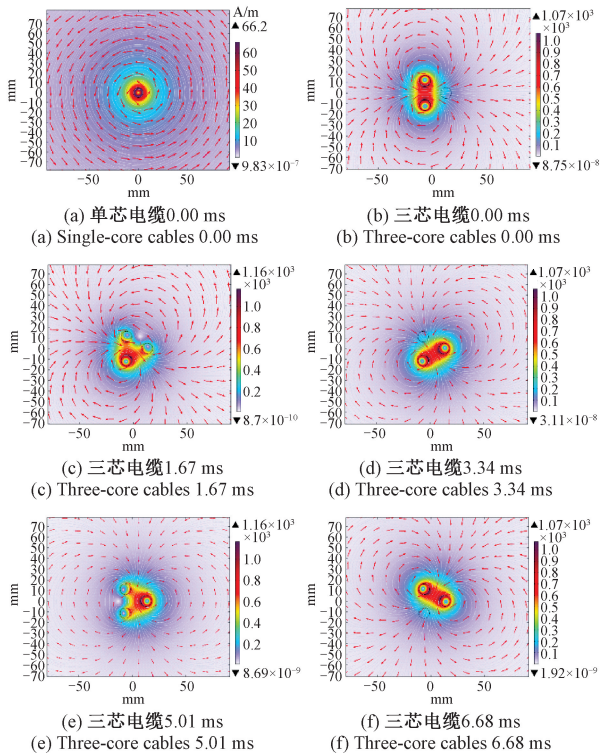


图4 圆环形磁芯对电缆外磁场影响

Fig. 4 Influence of toroidal cores on the external magnetic field of cables

综上所述可以总结出三芯电缆磁场自取能与单芯电缆相比有如下难点:1)可利用的磁场强度更低;2)磁场旋转和磁路穿过电缆本身使磁芯无法覆盖完整磁路;3)磁场不可避免穿过空气(高磁阻)和磁芯(低磁阻)两种不同介质,由于频率低,磁场难以穿透高磁导率材料,所以磁芯的聚磁效果并不理想。结合以上分析可知,三芯电缆取能装置的能量密度低于单芯 CT 取能装置是不可避免的,所以为了弥补取能不足,应该适当的增大装置体积和

增加线圈匝数。另外,为了尽可能在更小的尺寸中获得更高的取能效率,应该研究适配旋转磁场的磁芯与取能方案。

## 2 磁芯设计

通过有限元仿真和理论分析发现,三芯电缆外磁场是旋转的,可以一定程度上认为此磁场类似于电机内旋转磁场(图 3)。为了充分利用这一特征高效切割磁感线,本文提出一种新型三芯电缆磁场自取能装置。此取能装置基于电机原理,即旋转磁场切割平行于电缆表面的线圈产生感应电动势。由于三芯电缆产生的旋转磁场与电机中磁场不能完全等效,通过有限元仿真分析适配三芯电缆外磁场的磁芯几何形状。

### 2.1 磁芯几何形状

与电机中高频、多极的强磁场相比,三芯电缆外磁场频率仅有 50 Hz、两极、幅值较低且非均匀分布。有限元仿真电流幅值 30 A 时,距离电缆中心 0.035 m 处的磁场强度径向分量分布如图 5 所示,虚线示意线芯位置。

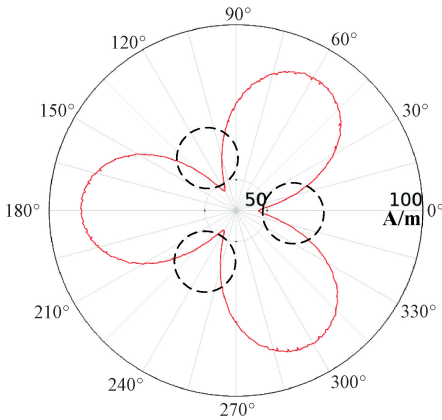


图 5 三芯电缆外磁场强度径向分量分布  
Fig. 5 Radial component pattern of external magnetic field strength for three-core cable

仿真结果表明磁场强度径向分量与电缆内线芯位置相关,最大值出现在两线芯正中间的位置。由此可知磁芯与电缆线芯相对位置会影响自取能效率,取能装置存在最佳安装位置。图 5 中磁场分布成中心对称,每 120° 循环一次,为留足绕线空间,本文磁芯设计成三齿三槽式,齿、槽交替布置,槽中嵌放线圈。磁芯有效磁通为三齿内磁通径向分量,所以最佳安装位置为齿对准两线芯正中间位置,即径向磁通分量最大值处,槽对准线芯位置。槽底有一周圆环磁芯,此设计一方面可以降低磁阻,增加齿中磁通径向分量,另一方面封闭磁环也降低了退磁场的影响,综上本文设计的磁芯形状如图 6 所示。

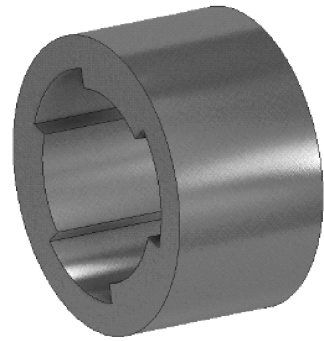


图 6 本文磁芯形状示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the core shape in this article

### 2.2 取能效率比较

合理的取能方案和磁芯设计可以有效提高取能效率,通过有限元仿真定量比较本文 4 种取能方案。功率密度  $D_p$  是常见衡量取能效率的技术指标,定义为:

$$D_p = \frac{P}{V} \quad (5)$$

式中: $P$  为取能功率; $V$  为取能装置体积。通常取能线圈匝数越多,取能功率越大,带载能力越强。不难看出线圈匝数对取能功率  $P$  的影响远大于对体积  $V$  的影响,单匝线圈有效磁通量直接反应取能装置性能。有限元仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

名称	参数
电流 $I_{rms}$	50 A
磁芯材料硅钢	$\mu=480.0, \varepsilon=1.0, G=1.0 \times 10^6$ S/m
空气	$\mu=1.0, \varepsilon=1.0, G=0.0$ S/m
铜	$\mu=1.0, \varepsilon=1.0, G=5.8 \times 10^7$ S/m
电缆相关 电磁参数	交联聚乙烯 $\mu=1.0, \varepsilon=2.3, G=0.0$ S/m
	聚氯乙烯 $\mu=1.0, \varepsilon=2.3, G=0.0$ S/m

4 种取能方案的磁芯截面与绕线方式如图 7 所示。

图 7 中橙色线表示取能线圈,蓝色箭头表示有效磁通量方向,SDXQ、SDCX 和 NNRC 磁芯的有效磁通量方向为切向,本文磁芯的有效磁通量方向为径向。图 7 中  $r_1$  为磁芯距离电缆几何中心的最短距离,由于本文仿真与实验均以电缆 YJV-8.7/15 kV-3×70 为准,其直径为 0.060 m,取  $r_1=0.035$  m 为定值,间隙为 0.005 m。靠近几何中心的磁芯表面称为内径,远离几何中心的磁芯表面称为外径, $a$  为 SDXQ 磁芯内、外径的差值, $b$  为 SDCX 磁芯内、外径的差值, $\beta$  为 SDCX 磁芯总角度的 1/3, $c$  为 NNRC 磁芯内、外径的差值, $r_2$  为本文磁芯槽底到电缆几

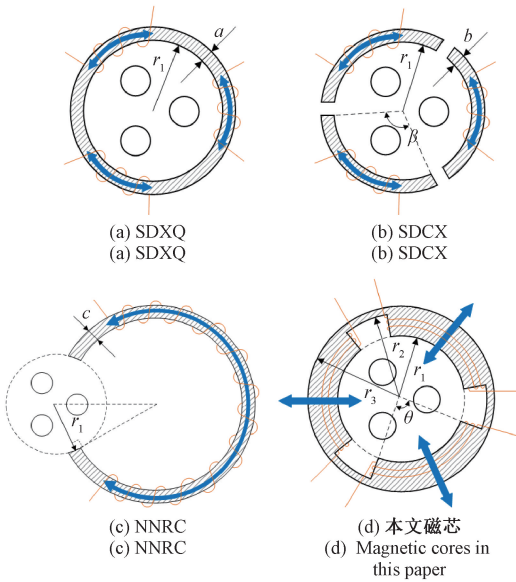


图7 磁芯截面与绕线方式示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cross sections for magnetic core and winding

何中心的距离,  $r_3$  为本文磁芯外表面到电缆几何中心的距离,  $\theta$  为齿顶总角度的  $1/3$ , 图7中各磁芯均处在取能效率最高位置。

不同体积4种磁芯尺寸如表2所示, 磁芯的厚度  $L$  (垂直于图7纸面方向) 均为  $0.1\text{ m}$ 。

表2 四种磁芯尺寸  
Table 2 Four core sizes

体积 ( $\times 10^{-4}\text{ m}^3$ )	SDRX	SDCX	NNRC	本文磁芯
	$a/(\times 10^{-3}\text{ m})$	$\beta/(\text{ }^\circ),$ $b/(\times 10^{-3}\text{ m})$	$c/(\times 10^{-3}\text{ m})$	$r_2/(\times 10^{-3}\text{ m}),$ $r_3/(\times 10^{-3}\text{ m}),$ $\theta/(\text{ }^\circ)$
1.76	7.3	$114^\circ, 8.4$	17.5	$40, 43, 100^\circ$
2.84	11.1	$116^\circ, 11.9$	28.1	$46, 50, 70^\circ$
3.38	13.0	$119^\circ, 13.2$	33.4	$45, 50, 90^\circ$
4.41	16.3	$110^\circ, 18.6$	43.7	$48, 53, 100^\circ$
5.39	19.2	$118^\circ, 19.4$	53.3	$50, 58, 80^\circ$
8.80	28.5	$110^\circ, 31.3$	87.1	$60, 65, 110^\circ$

不同体积磁芯内有效磁通对比结果如图8所示, 磁芯四种方案磁芯中磁通量的分布并不均匀, 数据为平均值。

由图8可知, SDXQ、SDCX 方案的有效磁通相差不多, 且  $a$  和  $b$  增大并不会提高取能效率; NNRC 取能效率明显高于 SDXQ 和 SDCX, 但  $c$  的增大不会明显提高取能效率, 且  $c$  达到一定数值后取能效率不增返降; 本文磁芯

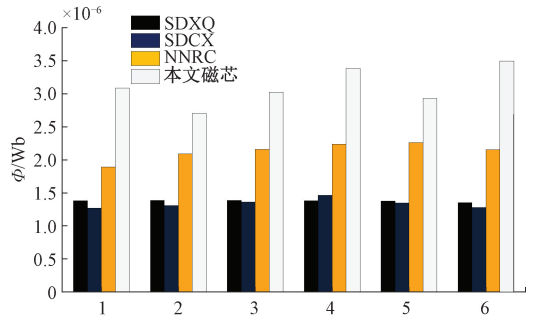


图8 磁芯有效磁通量  $\Phi$  对比结果

Fig. 8 Comparison results of core's effective flux  $\Phi$

在取能效率上表现最为优异, 磁芯尺寸参数可明显改善取能效率, 且有更大的优化和设计空间。

### 2.3 磁芯有效磁通量分析

本文取能装置的设计共有三组对称线圈, 单组线圈开路电压的理论方程如式(6)所示。

$$U = \omega N \Phi = 100\pi N \Phi(I, \mu, r_2, r_3, \theta) \quad (6)$$

式中:  $U$  为单组线圈开路电压的有效值;  $\omega$  为一次侧电流角频率;  $N$  为单组线圈匝数;  $\Phi$  单匝线圈的有效磁通量。

当用电负载确定时, 线圈输出电压越高负载功率越大。从式(6)可以看出, 增加线圈匝数与增加单匝线圈有效磁通量均可提升输出功率, 下面重点分析影响单匝线圈有效磁通量的主要参数。

材料与形状都直接影响磁芯聚磁能力, 由于理想情况下, 磁场所在平面垂直于电缆延伸方向, 可以认为磁芯厚度  $L$  对磁通量  $\Phi$  的影响成线性。所以在不考虑磁芯厚度  $L$  的情况下,  $\Phi(I, \mu, r_2, r_3, \theta)$  是与一次侧电流幅值, 磁芯磁导率和几何参数相关的函数, 函数  $\Phi$  共5个变量。为拟合函数  $\Phi$ , 通过有限元软件中对5个变量进行参数化扫描获得足够的样本, 再通过具有 Sigmoid 函数的两层前馈神经网络拟合  $\Phi$  函数, 最终拟合度为  $0.9942$ 。下面根据函数  $\Phi(I, \mu, r_2, r_3, \theta)$  分析不同参数对磁芯取能效率的影响。以下仿真图例单位米,  $r_1 = 0.035\text{ m}$ ,  $L = 0.1\text{ m}$ 。

由图9可知, 一次侧电流对磁芯内磁通的影响呈线性, 结论符合奥-萨伐尔定理, 验证了式(2)、(3)结论。

由图10可知,  $\mu$  与  $\Phi$  正相关, 随着  $\mu$  增加到450附近  $\Phi$  逐渐趋于饱和。由于磁路中空气、交联聚乙烯和聚氯乙烯等高磁阻材料对磁能损耗极大, 这使得绝缘层外磁芯聚磁效果大打折扣。所以相较于单芯电缆CT取能, 更换高磁导率材料对取能效率的提升有限, 相比之下硅钢具有成本低、涡流损耗低和饱和磁通密度高等优点, 更适合将分布式自取能推广至三芯电缆沿线。

( $r_2 - r_1$ ) 影响线圈绕线空间, 磁芯体积确定时, 应尽可能增大( $r_2 - r_1$ ) 以增加线圈匝数, 进而提升输出功率。

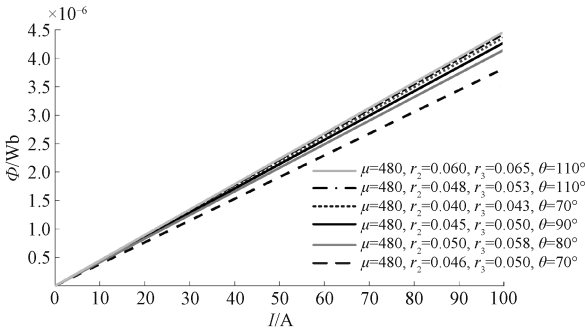


图 9  $I$  对  $\Phi$  的影响  
Fig. 9 Impact of  $I$  on  $\Phi$

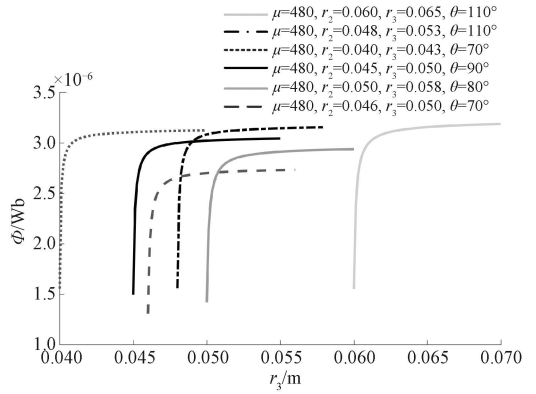


图 12  $r_3$  对  $\Phi$  的影响  
Fig. 12 Impact of  $r_3$  on  $\Phi$

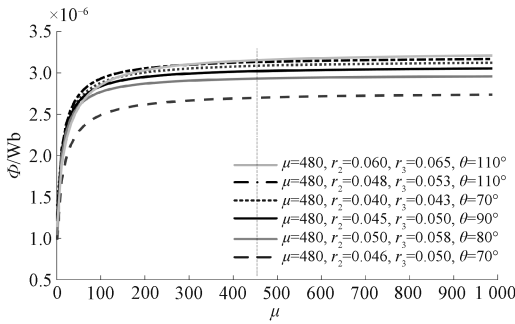


图 10  $\mu$  对  $\Phi$  的影响  
Fig. 10 Impact of  $\mu$  on  $\Phi$

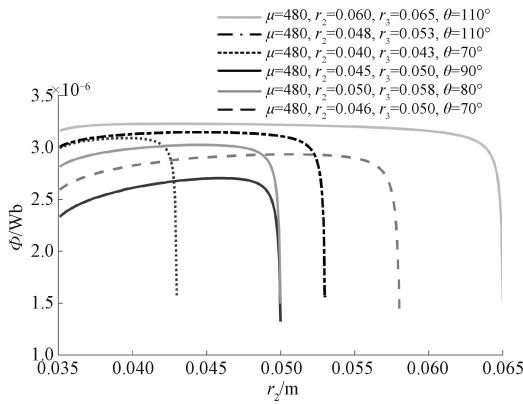


图 11  $r_2$  对  $\Phi$  的影响  
Fig. 11 Impact of  $r_2$  on  $\Phi$

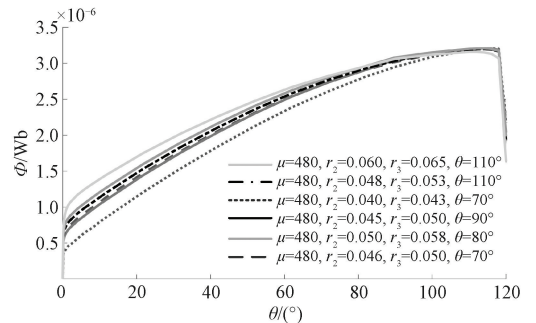


图 13  $\theta$  对  $\Phi$  的影响  
Fig. 13 Impact of  $\theta$  on  $\Phi$

的方式,而非无限制的增大体积。

$\theta$  影响线圈绕线空间,磁芯体积确定时,应尽可能减小  $\theta$  以增加线圈匝数,进而提升输出功率。由图 13 可知  $\theta$  增加到  $90^\circ$  时  $\Phi$  逐渐趋于饱和。

由图 11 可知,当磁芯轭厚  $(r_3 - r_2)$  小于一定数值时,有效磁通  $\Phi$  陡降,设计时应确保  $(r_3 - r_2) > 0.005 \text{ m}$ 。

体积影响线圈匝数和面积,体积的增大有利于提升装置输出功率。本文磁芯体积  $\pi L(r_3^2 - r_1^2)$ ,其中三芯电缆线径决定  $r_1$ ,由图 12 可知,随着  $r_3$  的增加  $\Phi$  逐渐趋于饱和,为高效提升输出功率应适当增加磁芯厚度  $L$ , $L$  在设计时需考虑电缆弯曲和安装工艺的限制。综上装置应呈现出模块化属性,当功率需求较高时应采用串联升压

本文实验电流  $I_{\text{rms}} = 50 \text{ A}$ ,电缆型号 YJV-8.7/15 kV-3×70,线径 60 mm,取能装置体积控制在  $0.50 \text{ dm}^3$  以内。综合本章仿真与分析,实验磁芯  $r_1 = 0.035 \text{ m}$ , $L = 0.13 \text{ m}$ , $r_3 = 0.052 \text{ m}$ , $r_2 = 0.047 \text{ m}$ , $\theta = 90^\circ$ ,B50A470 硅钢片加工,最终实验用取能装置体积为  $0.465 \text{ dm}^3$ 。

### 3 实 验

为测试自取能装置的性能,首先直接测量线圈的开路电压,并将结果与理论计算数值比较;然后设计三相整流电路,对三组线圈输出做 AC/DC 变换,得到不同负载阻值的输出电压和输出功率曲线。

#### 3.1 开路电压实验

开路电压实验平台示意图与实物如图 14 所示。采用三相电源发生 50 Hz 三相对称电压,电源连接大电流发生器,在三芯短接的电缆中输入大电流。实验器材的详细参数如表 3 所示。

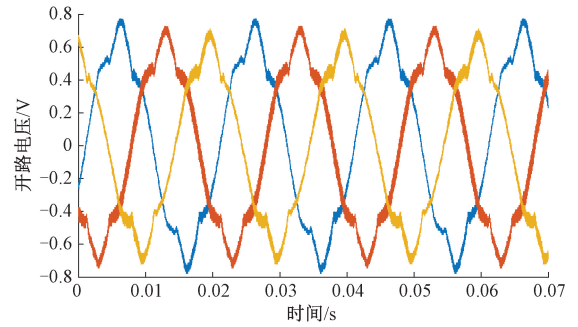
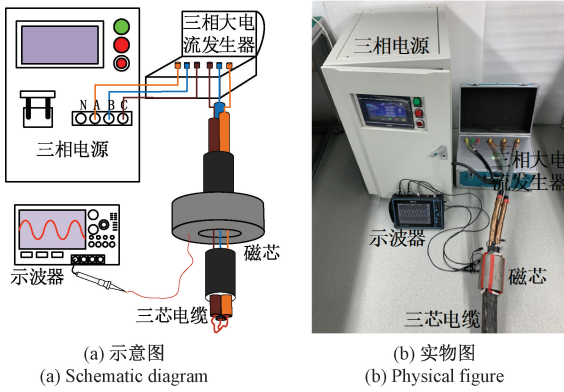


图 16 开路电压波形

Fig. 16 Open circuit voltage waveform

图 14 开路电压实验平台示意图与实物

Fig. 14 Schematic and physical figure of open circuit voltage experiment platform

表 3 实验器材参数

Table 3 Parameters of experimental equipment

名称	参数	描述
三相电源	输出功率为 3 kVA	无锡安耐斯电子科技有限公司 ANZ13-3 kVA-1 000 Hz 电源
三相大电流发生器	输入 0~380 V, 输出 0~500 A	江苏奋进电力设备有限公司 SLQ-100 A 三相大电流发生器
三芯电缆	直径 0.06 m, 额定电流 225 A	YJV-8.7/15 kV-3×70, 铜
示波器	采样率 1 GSa/s	麦科信 STO1004
实验磁芯	$r_1 = 0.035 \text{ m}, r_2 = 0.047 \text{ m}, r_3 = 0.052 \text{ m}, L = 0.130 \text{ m}, \theta = 90^\circ, \mu = 480$	材料 B50A470, 堆叠系数 0.96, 加工误差 $\pm 0.02$

根据式(6)计算磁芯的理论开路电压有效值为 550.1 mV, 实验结果 504.2、513.4、546.1 mV, 分别为理论数值的 91.6%、93.3%、99.3%。实验与理论相差小于 10%, 这部分误差是由电缆弯曲、线圈位置偏移和手工绕线等原因造成的。电压波形相位差为 120°, 可知磁场满足空间对称。

与同体积磁芯的以往研究对比, SDXQ 单组线圈 (700 匝) 开路电压有效值为 223.0 mV, SDCX 单组线圈 (700 匝) 开路电压有效值为 176.3 mV, NNRC 线圈 2 100 匝开路电压有效值为 834.8 mV。由此可见基于电机原理的取能方案在效率上有明显提升, 并且更紧凑的结构有利于实现模块化的“自取能电池”。

### 3.2 整流实验

由于取能线圈共有三组且输出成 120° 相位差, 为方便储能, 设计三相桥式整流电路如图 17 所示。

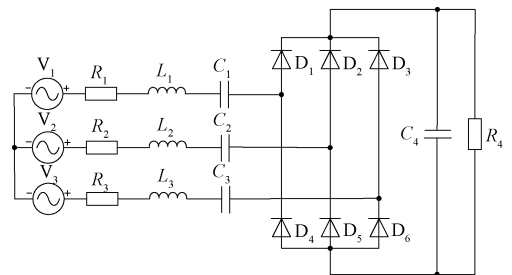


图 17 非受控 AC/DC 转换电路

Fig. 17 Uncontrolled AC/DC conversion circuit diagrams

电缆一次侧电流输入电流波形如图 15 所示, 匝 700 单组线圈开路电压波形如图 16 所示。

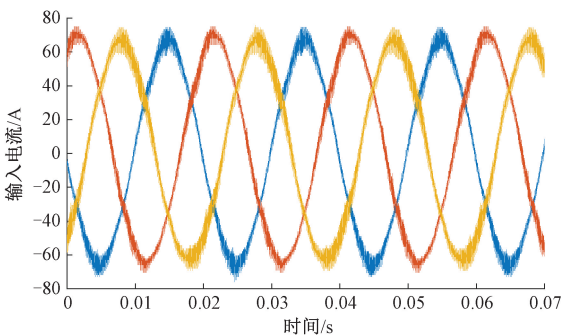


图 15 输入电流波形

Fig. 15 Input current waveform

绕制漆包线除了互感外, 也存在自感系数。虽然工频只有 50 Hz, 但由于绕线线圈匝数较多, 其感抗较大。如果线圈直接连接到转换电路, 则捕获能量的一部分将作为无功功率消耗, 从而降低能量收集设备<sup>[19]</sup>的输出功率。为了提高能量收集的输出功率, 需要在整流桥前增加匹配电容, 以减小线圈自感的影响, 利用串联谐振原理消除等效电源阻抗的虚部<sup>[20]</sup>。电容的数值选择可以由式(7)确定。

$$j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = 0 \quad (7)$$

LCR 仪实测三组线圈电感为 229.6、219.5 和 227.1 mH,所以匹配电容选择 47  $\mu$ F。受控 AC/DC 模块需要外部开关电路,不适合自取能设备,桥式三相整流电路图 17 所示。全桥整流器采用 SS24-SMA 肖特基二极管,导通压降约为 0.22 V(电流范围内 0.1 A 以下),电能损耗小。

在不同负载电阻时,电路的直流输出电压和输出功率实验结果如图 18 所示。随着负载电阻的增大,直流输出电压先增大后缓慢下降,当电阻为 3 250  $\Omega$  时最大输出电压达到 1.53 V。输出功率先增后降,当负载 325  $\Omega$  时,最大输出功率为 2.243 mW。

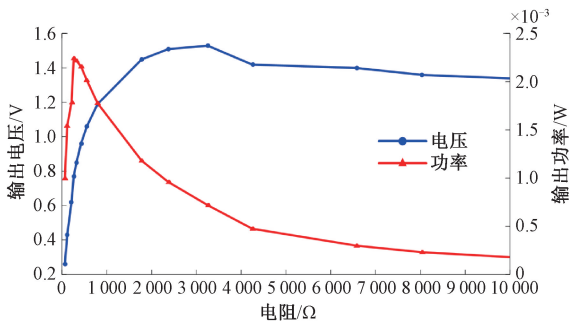


图 18 直流输出电压和输出功率实验结果

Fig. 18 The output voltage and output power as function of different load resistance

## 4 结 论

通过对三芯电缆外磁场的理论与仿真分析,本文给出了三芯电缆相较单芯电缆磁场自取能更困难的 3 个原因:1)可利用的磁场强度更低;2)磁场旋转和磁路穿过电缆本身使磁芯无法覆盖完整磁路;3)低频磁场的磁路中存在空气、绝缘层等高磁阻材料,其磁压降较高,因此取能磁芯的聚磁效果并不理想。受旋转磁场启发,本文基于电机原理设计了一款三齿三槽式取能磁芯,并找到了最佳取能位置。结合神经网络算法分析磁芯材料和几何参数对有效磁通的影响,并给出优化设计方案。开路电压实验验证了本文提出的设计方案的合理性,实验中在一次侧电流  $I_{ms} = 50$  A,单组线圈总共 700 匝的情况下,开路电压有效值为 504.2、513.4、546.1 mV,负载 3 250  $\Omega$  时最大直流输出电压 1.53 V,负载 325  $\Omega$  时最大输出功率 2.243 mW。

本文提出基于电机原理的取能方案,通过仿真与实验验证了其在取能效率上较以往研究有明显提升。后续研究可针对铠装电缆、磁芯开口和最大功率传输等问题

建立更为完善的取能装置参数化模型和优化设计路线,根据具体应用场景做针对性设计,建立完整的取能、储能和传感一体化在线监测设备。

## 参考文献

- [1] 袁燕岭,高中强,陈昕,等. 高压电缆线路接地系统在线监测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 77-82.  
YUAN Y L, GAO ZH Q, CHEN X, et al. Real-time monitoring of the high-voltage cable line's grounding system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 77-82.
- [2] 南保峰,卢雨欣,孙廷玺,等. 基于三芯电缆自取能技术的热状态评估系统研制[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 103-107.  
NAN B F, LU Y X, SUN T X, et al. Development of thermal condition evaluation system based on energy self-harvesting technique for three-core power cables[J]. Power Grid Analysis & Study. 2020, 48(11): 103-107.
- [3] 郭卫,周松霖,王立,等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.  
GUO W, ZHOU S L, WANG L, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [4] 王尉军,陈旻,殷慧,等. XLPE 电缆绝缘状态低频信号感应在线监测技术研究[J/OL]. 现代电力, 1-8 [2024-08-21].  
WANG W J, CHEN M, YIN H, et al. Research on online monitoring technology for XLPE cable insulation characteristics based on low frequency signal induction [J/OL]. Modern Electric Power, 1-8 [2024-08-21].
- [5] 崔江静,吴宏晓,南保峰,等. 基于 FVMD&WVD 方法的非接触式电缆故障在线监测技术研究与应用[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 205-214,220.  
CUI J J, WU H X, NAN B F, et al. Research and application of non-contact on-line monitoring technology of cable based on FVMD&WVD method [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 205-214,220.
- [6] 陈赦,胡东阳,汪泓,等. 电网状态监测装置自取能技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2077-2089.  
CHEN SH, HU D Y, WANG F, et al. Review on energy-harvesting technology for power grid condition monitoring device[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2077-2089.
- [7] 鲁帆,周健瑶,赵行,等. 结合超级电容与锂电池的 CT 取能电源研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(6):



- 89-95,112.
- LU F, ZHOU J Y, ZHAO H, et al. Study on the current transformer energy-absorbing source combined with super capacitor and lithium battery[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(6): 89-95,112.
- [ 8 ] 焦斌亮, 付伟, 赵德功. 高压输电线路 CT 取能电源的设计[J]. *电源技术*, 2013, 37(1): 130-133.
- JIAO B L, FU W, ZHAO D G. Design for CT energy-getting power of high voltage transmission line [ J ]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(1): 130-133.
- [ 9 ] 程志远, 吴龙飞, 李峥, 等. 输电线缆组合材料式 CT 低电流取能技术研究与应[J]. *电气传动*, 2022, 52(16): 26-31,36.
- CHENG ZH L, WU L F, LI ZH, et al. Research and application of low-current energy extraction technology of combined-material CT for power transmission cables[J]. *Electric Drive*. 2022, 52(16): 26-31,36.
- [ 10 ] 于玉铭, 陈常涛, 邹振宇, 等. 负载对 CT 取能的影响分析及实验研究 [ J ]. *中国电力*, 2016, 49(4): 97-102.
- YU Y M, CHEN CH T, ZHOU ZH Y, et al. Analysis and experimental study of the effect of load on CT energy extraction[J]. *Electric Power*, 2016, 49(4): 97-102.
- [ 11 ] 袁燕岭, 董杰, 高岭, 等. 一种用于三芯电缆的感应式取电方法 [ P ]. CN108494107A, 2018-09-04.
- YUAN Y L, DONG J, GAO L, et al. An induction type electricity obtaining method for three-core cable [ P ]. CN108494107A, 2018-09-04.
- [ 12 ] IBRAHIM M E, ABD-ELHADY A M. A proposed non-invasive Rogowski coil design for measuring 3-phase currents through a 3-core cable [ J ]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 593-599.
- [ 13 ] 曾祥峰, 李洪杰. 三芯配电电缆非侵入式取电装置的设计与制作[J]. *电工技术*, 2016(10): 29-31.
- ZENG X F, LI H J. Design and manufacture of three-core cable non-invasive power taking device [ J ]. *Electric Engineering*, 2016(10): 29-31.
- [ 14 ] 孙廷玺. 三芯电缆自取能方法及其在热状态监测中的应用研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(12): 215-220.
- SUN T X. Research on energy harvesting and its application in thermal condition monitoring of three-core power cables [ J ]. *High Voltage Engineering*, 2019, 55(12): 215-220.
- [ 15 ] LIU L Y, WEN X R, SHI R C, et al. High-efficiency magnetic field energy harvesting from a three-core cable[J]. *Sensors & Actuators, A. Physical*, 2023, 360: 114501-114505.
- [ 16 ] MORO F, TURRI R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 1042-1048.
- [ 17 ] ZHU K, LEE W K, PONG P W T. Energization-status identification of three-phase three-core shielded distribution power cables based on non-destructive magnetic field sensing [ J ]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(22): 7405-7417.
- [ 18 ] 周辉. 磁屏蔽技术的仿真研究 [ D ]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- ZHOU H. Simulation research of magnetic shielding technology[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [ 19 ] SAFAEE A, WORONOWICZ K, DICKSON T. Reactive power compensation in three phase high output inductive power transfer [ C ]. 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015: 375-380.
- [ 20 ] LI P, WEN Y, ZHANG Z Q, et al. A high-efficiency management circuit using multiwinding upconversion current transformer for power-line energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(10): 6327-6335.

## 作者简介



颜沛武(通信作者), 2019年于昆明理工大学获得学士学位, 2023年于昆明理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为电流传感器与磁场取能。

E-mail: ypw\_xwpw\_0495@163.com

**Yan Peiwu** ( Corresponding author )

received his B. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2019, and M. Sc. degree in 2023 from Kunming University of Science and Technology in 2023. His main research interests include current sensor and magnetic field energy harvesting.