

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.015

## 换流阀磁场自取能装置取能特性分析及优化

王维<sup>1</sup>, 苏文博<sup>1</sup>, 许晨进<sup>1</sup>, 吴雨薇<sup>2</sup>, 石宇辰<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**换流阀温度监测可以辅助预判故障,是保障换流站安全稳定运行的关键技术之一,但其可靠的能量供给问题却鲜有合适的解决思路。文中根据叠加式磁通计算方法,提出基于磁场感应取能技术的精确输出功率特性模型,分步降维研究磁心关键参数对取能功率的影响,并提出优化方法;针对换流阀厅空间限制,提出磁心轻量化技术方案,在此基础上研究贴片式取能装置受应用环境影响产生偏转条件下的取能功率特性,并提出非最优位置下的取能功率特性优化分析方法。文中设计的贴片式取能装置能够在宽范围电流波动下稳定驱动传感器并实现长距离无线通信,同时能够在换流站等狭窄高温空间下满足电力设备长期免维护监测需求。

**关键词:**换流阀;磁场感应取能;贴片取能方式;取能功率特性;轻量化结构;温度监测

**中图分类号:**TM721;TM75

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2025)01-0143-12

### 0 引言

随着电网蓬勃发展,电力设备全覆盖状态监测<sup>[1-4]</sup>成为当前数字化电网较为重要的核心技术之一。换流站是直流输电工程的重要组成部分<sup>[5-7]</sup>。由于输电电流受负荷等因素影响,波动范围大,其带来的阀厅发热问题已成为换流站最常见的故障风险之一<sup>[8-10]</sup>,实时准确监测阀厅内套管等接头温度状态是保障其正常运行的重要手段。但阀厅温度波动范围广<sup>[11]</sup>,阀厅内电抗器、晶闸管布置密度大,温度传感器可部署空间容量小,设备不易维护。因此,在监测装置能量来源可靠、输出稳定的条件下实现装置轻量化是换流阀传感设备发展的必由之路。

在能量来源方面,当前能源和环境问题突显,环境能量采集技术应运而生<sup>[12-14]</sup>,而磁场感应取能具备能量丰富、分布广泛、场源稳定等优点<sup>[15-19]</sup>,成为了当前的研究热点<sup>[20-22]</sup>。磁场取能技术根据应用场景特征分为套环式结构<sup>[23-24]</sup>与贴片式结构<sup>[25-26]</sup>。套环式结构在阀厅内安装困难、易饱和,难以适应换流阀内部取能的场景要求。而贴片式结构具有抗饱和能力强、适应电流变化范围宽、安装灵活性高且维护成本低等特点,在高压大电流状态监测领域备受关注<sup>[17]</sup>,成为换流阀厅内状态监测的理想解决方法。

在贴片式取能研究上,文献[27]将线圈互感和内阻作为铁心和线圈参数的量化指标,建立基于H型块状磁心的独立式磁场取能装置(free-standing

magnetic field energy harvester, FSMFEH)的精确功率模型,优化了芯柱、芯层尺寸和线圈匝数、线径,提升了功率密度且功率密度偏差在5%以内。文献[28]提出立式磁场感应取能装置RLC集总参数等效模型,优化磁心结构,从而提高取能功率。文献[16]分析基于通流铁轨场源的立式磁场感应取能装置,通过仿真和实验得出感应取能装置的线圈电阻和自感仍受通流体材料及摆放位置影响的结论。

在安装空间方面,磁场取能装置体积和重量主要集中在磁心,而磁心体积缩减意味着取能功率的降低。因此文中从磁心结构入手,在保障磁心性能不发生大幅衰减的情况下,通过空腔结构缩小磁心体积,以满足阀厅空间需求和重量限制。同时,空腔结构使得磁心表面积增加,可以提高磁心的散热性能,保护取能绕组安全,延长装置寿命。

在缩小磁心体积方面,国内外研究人员提出了采用磁浓缩技术的磁心设计,如哑铃形<sup>[29]</sup>、领结形<sup>[28]</sup>和I形<sup>[30]</sup>磁心。文献[31]基于输电线路对电流互感器(current transformer, CT)型取能装置的重量要求进行限制,提出CT取能端轻型化设计方法,通过改变磁心形状、引入气隙等方式,在保证输出功率需求的同时减小装置体积。文献[32]以磁心重量和输出功率为目标函数设计了内外双环形磁心,通过优化磁心参数减小磁心体积。

文中基于叠加式磁通计算方法精确建立贴片式自取能装置输出功率特性模型,系统化分析贴片式自取能装置输出功率特性的影响因子。在此基础上,针对换流阀厅承重问题,通过设计磁心通孔提出磁心轻量化方法。同时,针对贴片式取能装置

收稿日期:2024-06-30;修回日期:2024-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107005)

在安装过程中可能存在的错位问题,研究贴片式取能磁心在发生偏移和旋转下的取能功率特性及优化方法,为贴片式磁场取能机理与性能优化的研究提供理论参考。

## 1 自取能装置输出功率特性分析与计算

### 1.1 自取能装置输出功率特性分析

文中研究的磁场感应取能装置安装位置如图 1 所示。其中,TFM 板卡为晶闸管触发和监测板。

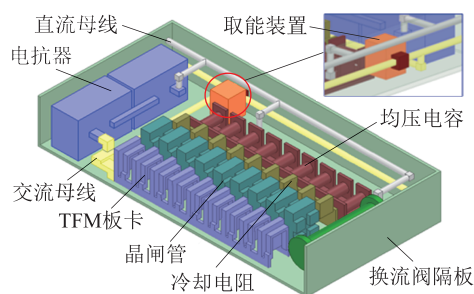
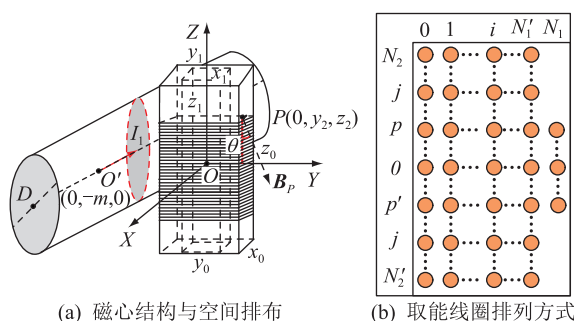


图 1 取能装置位置示意

Fig.1 Schematic diagram of the location of the energy harvester

取能装置采用贴片式方型柱状结构,如图 2(a) 所示。贴片式磁场感应取能装置贴近载流导体,以贴片式磁场磁心中心点为坐标原点  $O$ ,载流导体轴线上距离坐标原点最近的点为参考原点  $O'$ ;载流导体径向长度为  $D$ ;取能磁心横向长度为  $x_0$ ,纵向长度为  $y_0$ ,高度为  $z_0$ ;磁心空腔横向长度为  $x_1$ ,纵向长度为  $y_1$ ,高度为  $z_1$ ;  $I_1$  为载流导体中的电流有效值;  $\mathbf{B}_p$  为  $P$  点磁感应强度矢量;  $\theta$  为  $\mathbf{B}_p$  与  $Z$  轴的夹角。



(a) 磁心结构与空间排布

(b) 取能线圈排列方式

图 2 贴片式磁场感应取能装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the magnetic field induction energy harvester with patch core

取能线圈的理想排列形式如图 2(b) 所示,  $N_1$  为取能线圈圈数;  $N_2$  为取能线圈上半部分层数;  $N_2'$  为取能线圈下半部分层数;  $p$  为最外侧上层绕组层数;  $p'$  为最外侧下层绕组层数。其中,  $N_1' = N_1 - 1$ ;  $N_2 + N_2' + 1$  为取能线圈总层数;  $p + p' + 1$  为取能线圈最外侧总层数。  $N_2$  与  $N_2'$  存在如下关系: 当线圈层数为奇数时,  $N_2' = N_2$ ; 当线圈层数为偶数时,  $N_2' = N_2 - 1$ 。当最

外侧绕组层数为偶数时,  $p' = p - 1$ ; 当最外侧绕组层数为奇数时,  $p' = p$ 。绕组总匝数为  $(N_1 - 1)(N_2 + N_2' + 1) + p + p' + 1$ 。设  $i$  为线圈任意圈数,  $j$  为线圈任意层数,  $P$  为  $YZ$  平面第  $j$  层线圈内一点, 则其坐标为  $(0, y_2, z_2)$ ,  $|z_2| = jd$ ,  $d$  为线圈直径; 设  $m$  为载流导体轴线与磁心中心点的距离, 则须满足约束条件  $m \geq N_1 d + y_0/2 + R/2$ ,  $R$  为线圈阻值。

为简化分析,文中不考虑磁心空腔的情况,令  $x_1 = y_1 = z_1 = 0$ 。从磁心磁通分布入手,将磁心截面分为 5 个部分,如图 3 所示。

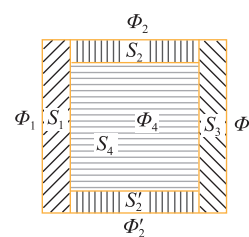


图 3 磁通分布情况示意

Fig.3 Schematic diagram of magnetic flux distribution

图 3 中,以贴片式磁心沿  $X$  轴方向的切线为边界,将取能线圈分割为 4 个部分,设  $S_1, S_2, S_2', S_3$  为 4 个部分的取能线圈截面积,  $S_1$  为距离载流导体最近的线圈截面积;  $S_2, S_2'$  为与取能磁心在  $X$  轴方向上平行的 2 块线圈截面积;  $S_3$  为距离载流导体最远的线圈截面积;  $S_4$  为磁心截面积。  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  为流过取能装置截面积的磁通量,其中  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  分别为流过取能线圈截面积  $S_1, S_2, S_2', S_3$  的磁通量;  $\Phi_4$  为流过取能磁心截面积  $S_4$  的磁通量,则  $t$  时刻流过第  $i$  圈第  $j$  层线圈的总磁通量表示为:

$$\Phi_{ij}(t) = \int_S \mathbf{B}_p \cos \theta dS = \Phi_1(t) + 2\Phi_2(t) + \Phi_3(t) + \Phi_4(t) \quad (1)$$

式中:  $S$  为线圈导线横截面积。各磁通量分别表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}-id}^{-\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} (x_0 + 2id) dy_2 \\ \Phi_2(t) = \Phi_2'(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} id dy_2 \\ \Phi_3(t) &= \int_{\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}+id} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} (x_0 + 2id) dy_2 \\ \Phi_4(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_e \mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} x_0 dy_2 \\ \cos \theta &= (y_2 + m) / \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: $\mu_0$ 为真空磁导率; $\mu_e$ 为取能磁心的等效磁导率。

$$\mu_e = 1 / \left[ \frac{1}{\mu_r} + \left( 1 - \frac{1}{\mu_r} \right) N_e \right] \quad (3)$$

式中: $\mu_r$ 为取能磁心的相对磁导率; $N_e$ 为总退磁因子,且 $N_e = (N_f + N_m) / 2$ , $N_f$ 、 $N_m$ 为不同方向的退磁因子。

$$\begin{cases} N_f = \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{4x_0y_0}{z_0\sqrt{4x_0^2 + 4y_0^2 + z_0^2}} \right) + \\ \frac{z_0}{2\pi x_0y_0} (F_1 + F_f(x_0, y_0) + F_f(y_0, x_0)) \\ N_m = \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{x_0y_0}{z_0\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) + \\ \frac{1}{3\pi x_0y_0z_0} (F_2 + F_3) + \frac{1}{2\pi x_0y_0z_0} F_{mm} \\ F_{mm} = F_m(x_0, y_0, z_0) + F_m(y_0, x_0, z_0) - \\ F_m(z_0, x_0, y_0) - F_m(z_0, y_0, x_0) \end{cases} \quad (4)$$

$F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_f$ 、 $F_m$ 关系如下:

$$\begin{cases} F_1 = \sqrt{4x_0^2 + z_0^2} + \sqrt{4y_0^2 + z_0^2} - \\ \sqrt{4x_0^2 + 4y_0^2 + z_0^2} - z_0 \\ F_2 = x_0^3 + y_0^3 - 2z_0^3 + \\ (x_0^2 + y_0^2 - 2z_0^2) \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \\ F_3 = (2z_0^2 - x_0^2) \sqrt{x_0^2 + z_0^2} + \\ (2z_0^2 - y_0^2) \sqrt{y_0^2 + z_0^2} - (x_0^2 + y_0^2)^{3/2} \\ F_f(u, v) \equiv \\ u \ln \left( \frac{z_0^2(8u^2 + 4v^2 + z_0^2 + 4u\sqrt{4u^2 + 4v^2 + z_0^2})}{(4v^2 + z_0^2)(8u^2 + z_0^2 + 4u\sqrt{4u^2 + z_0^2})} \right) \\ F_m(u, v, w) \equiv \\ u^2 v \ln \left( \frac{(u^2 + w^2)(u^2 + 2v^2 + 2v\sqrt{u^2 + v^2})}{u^2(u^2 + 2v^2 + w^2 + 2v\sqrt{u^2 + v^2 + w^2})} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u$ 、 $v$ 、 $w$ 为形参,指代 $F_f$ 、 $F_m$ 运算中使用的变量。

取能线圈感应电压表示为:

$$\begin{aligned} u_{oc}(t) = N \frac{d\Phi}{dt} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \frac{d\Phi_{ij}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \frac{d\Phi_{ij}(t)}{dt} + \\ \sum_{i=1}^{N_1} \frac{d\Phi_{i0}(t)}{dt} + \sum_{j=1}^p \frac{d\Phi_{N_1j}(t)}{dt} + \sum_{j=1}^{p'} \frac{d\Phi_{N_1j}(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $N$ 为线圈总匝数; $\Phi$ 为总磁通; $\Phi_{i0}(t)$ 为 $t$ 时刻轴线上第 $i$ 圈线圈的磁通量; $\Phi_{N_1j}(t)$ 为 $t$ 时刻最

外圈第 $j$ 层线圈的磁通量。

此外,在谐振情况下,由最大功率传输定理可知,当接入的负载阻值与线圈阻值一致时,所得功率最大。线圈阻值 $R$ 表示为:

$$\begin{cases} R = R_1 + R_2 + R_3 \\ R_1 = \frac{\rho}{S} (N_2 + N_2') \sum_{i=0}^{N_1} [2x_0 + 2y_0 + 4(i+1)d] \\ R_2 = \frac{\rho}{S} (p + p') [2x_0 + 2y_0 + 4(N_1 + 1)d] \\ R_3 = \frac{\rho}{S} \sum_{i=0}^{N_1} [2x_0 + 2y_0 + 4(i+1)d] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\rho$ 为铜的电阻率。

进一步可得取能装置输出功率为:

$$P = \frac{U_{oc}^2}{4R} \quad (8)$$

式中: $U_{oc}$ 为取能线圈感应电压有效值。

## 1.2 非均匀分布的自取能磁心感应取能特性分析

考虑到磁心空腔使磁心介质分布不均匀,当磁力线穿过不同介质时,磁心磁通和取能线圈磁通改变。文中建立非均匀分布的磁心模型,如图4所示,空腔横向长度为 $x_1$ ,纵向长度为 $y_1$ 。设空腔中心点为 $Q$ ,其坐标为 $(x_3, y_3, z_3)$ 。

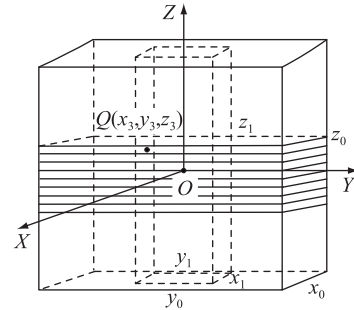


图4 贴片式不均匀分布磁心示意

Fig.4 Schematic diagram of a patch unevenly distributed magnetic core

由于空腔介质磁导率与磁心介质不同,磁场取能装置截面介质分布可分为2种情况,如图5所示。

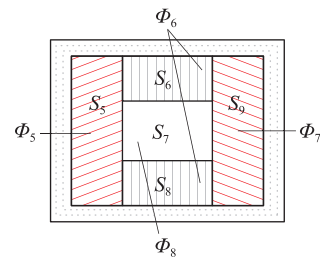


图5 介质分布情况示意

Fig.5 Schematic diagram of media distribution

空腔在  $Y$  轴方向上的位置变化引起磁通变化,直接影响到取能输出电压。设  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_8$ 、 $S_9$  为被空腔沿  $X$  轴方向的切线分割为 4 个部分的取能磁心截面积,其中  $S_5$  为距离载流导体最近的磁心截面积; $S_6$ 、 $S_8$  为与取能磁心在  $X$  轴方向上平行的 2 块相同的截面积; $S_9$  为距离载流导体最远的磁心截面积; $S_7$  为空腔截面积。 $\Phi_5$  为流过磁心截面积  $S_5$  的磁通量; $\Phi_6$  为流过磁心截面积  $S_6$  和  $S_8$  的磁通量总和; $\Phi_7$  为流过磁心截面积  $S_9$  的磁通量; $\Phi_8$  为流过空腔截面积  $S_7$  的磁通量。各磁通量分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_5(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_1}{2}} \frac{\mu_e \mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} x_0 dy_z \\ \Phi_6(t) &= \int_{\frac{y_1}{2}}^{\frac{y_3+y_1}{2}} \frac{\mu_e \mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} (x_0 - x_1) dy_z \\ \Phi_7(t) &= \int_{\frac{y_1}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_e \mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} x_0 dy_z \\ \Phi_8(t) &= \int_{\frac{y_1}{2}}^{\frac{y_3+y_1}{2}} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta}{2\pi \sqrt{(m+y_2)^2 + z_2^2}} x_1 dy_z \end{aligned} \right. \quad (9)$$

则  $t$  时刻空腔覆盖范围内流过第  $i$  圈第  $j$  层线圈的总磁通量表示为:

$$\Phi'_{ij}(t) = \Phi_1(t) + 2\Phi_2(t) + \Phi_3(t) + \Phi_5(t) + \Phi_6(t) + \Phi_7(t) + \Phi_8(t) \quad (10)$$

### 1.3 自取能磁心位置偏移下感应取能特性分析

贴片式取能装置在安装过程中可能存在错位问题,因此须研究自取能装置横向或纵向偏移带来的影响。贴片式取能装置偏移情况如图 6 所示。

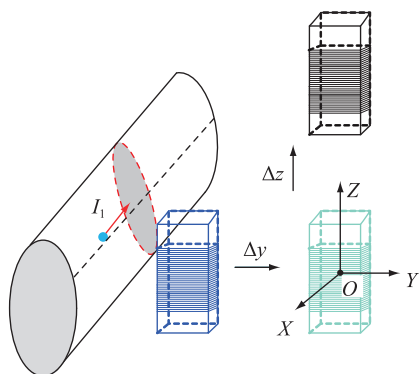


图 6 取能装置横向或纵向偏移情况示意

Fig.6 Schematic diagram of lateral or vertical offset of the energy harvester

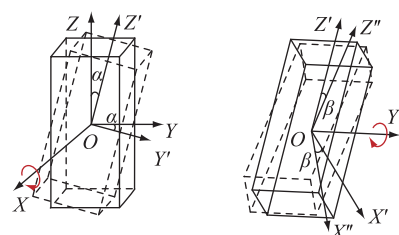
图 6 中,设  $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别为取能装置在  $Y$  轴和  $Z$  轴正方向的偏移量,则:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}-id}^{-\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta_{\Delta}}{2\pi \varepsilon} (x_0 + 2id) dy_2 \\ \Phi_2(t) = \Phi'_2(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta_{\Delta}}{2\pi \varepsilon} id dy_2 \\ \Phi_3(t) &= \int_{\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}+id} \frac{\mu_0 I_1(t) \cos \theta_{\Delta}}{2\pi \varepsilon} (x_0 + 2id) dy_2 \\ \Phi_4(t) &= \int_{-\frac{y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \frac{\mu_e \mu_0 I_1(t) \cos \theta_{\Delta}}{2\pi \varepsilon} x_0 dy_2 \\ \varepsilon &= \sqrt{(m+y_2 \pm \Delta y)^2 + (z_2 \pm \Delta z)^2} \\ \cos \theta_{\Delta} &= (y_2 + \Delta y + m) / \varepsilon \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: $\theta_{\Delta}$  为偏移后  $P$  点磁感应强度  $B_p$  与  $Z$  轴的夹角; $\varepsilon$  为  $P$  点与载流导体轴线的距离。当线圈平面位于  $Y$  轴正半轴时, $\varepsilon$  表达式中  $\Delta y$  取“+”,反之取“-”;当线圈平面位于  $Z$  轴正半轴时, $\varepsilon$  表达式中  $\Delta z$  取“+”,反之取“-”,继而推导出取能装置最大输出功率。

### 1.4 自取能磁心角度旋转下感应取能特性分析

贴片式磁心围绕  $X$  轴、 $Y$  轴旋转,如图 7 所示,磁心绕  $X$  轴旋转角度为  $\alpha$ ,绕  $Y$  轴旋转角度为  $\beta$ 。

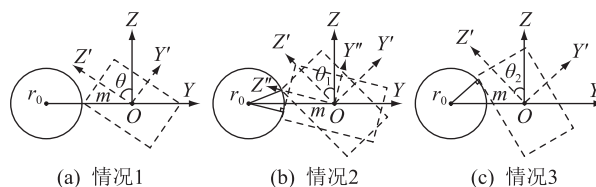


(a) 磁心围绕X轴旋转 (b) 磁心围绕Y轴旋转

图 7 贴片式磁心旋转方式

Fig.7 The rotating mode of the patch core

若取能装置围绕  $X$  轴旋转,旋转角度受到取能磁心与载流导体距离的影响,其示意如图 8 所示,其中  $r_0$  为载流导体自身半径。磁心可旋转角度分为 3 种情况。



(a) 情况1 (b) 情况2 (c) 情况3

图 8 YZ 平面下取能装置围绕 X 轴旋转示意

Fig.8 Schematic diagram of rotation of the energy harvester in the YZ plane around the X axis

(1) 情况 1。当磁心与载流导体距离  $m$  满足式 (12) 时,磁心旋转角度不受限制。

$$m \geq \sqrt{(y_0/2)^2 + (z_0/2)^2} + r_0 \quad (12)$$

(2) 情况 2。当磁心与载流导体距离  $m$  满足:

$$z_2/2 + r_0 \leq m < \sqrt{(y_0/2)^2 + (z_0/2)^2} + r_0 \quad (13)$$

磁心在  $0 \sim \pi/2$  区间中可旋转角度  $\theta_1$  可分为 2 段区间:

$$\theta_1 \in \left[ 0, \pi/2 - \left[ \arctan(y_2/z_2) + \arccos\left(\frac{m^2 + (y_2/2)^2 + (z_2/2)^2 - r_0^2}{2m\sqrt{(y_2^2 + z_2^2)/4}}\right) \right] \right] \cup \left[ \arcsin\left(\frac{r_0 + z_2/2}{m}\right), \frac{\pi}{2} \right] \quad (14)$$

(3) 情况 3。当磁心与载流导体距离  $m$  满足:

$$0 < m < (z_2/2) + r_0 \quad (15)$$

磁心在  $0 \sim \pi/2$  区间中可旋转角度  $\theta_2$  为:

$$\theta_2 \in \left[ 0, \pi/2 - \left[ \arctan(y_2/z_2) + \arccos\left(\frac{m^2 + (y_2/2)^2 + (z_2/2)^2 - r_0^2}{2m\sqrt{(y_2^2 + z_2^2)/4}}\right) \right] \right] \quad (16)$$

若取能装置围绕  $Y$  轴旋转,则无角度限制。

进一步分析取能装置围绕坐标轴旋转状态下的取能功率特性。当围绕  $X$  轴旋转时,设  $P'$  为  $P$  点旋转后的坐标点,令旋转角度为  $\alpha$ ,则其坐标为  $(0, y_2 \cos \alpha + z_2 \sin \alpha, z_2 \cos \alpha - y_2 \sin \alpha)$ ;当围绕  $Y$  轴旋转时,设  $P''$  为  $P$  点旋转后的坐标点,令旋转角度为  $\beta$ ,则其坐标为  $(z_2 \sin \beta, y_2, z_2 \cos \beta)$ ,将旋转后  $P'$  与  $P''$  坐标替换旋转前的  $P$  点坐标即可得到旋转后的各磁通量模型。

## 2 仿真对比分析与优化

### 2.1 贴片式磁心取能功率特性仿真分析

基于瞬态场建立感应取能仿真模型,分析磁心尺寸、线圈匝数和线圈绕制方式变化对取能输出功率的影响。贴片式磁场感应取能装置模型及其与载流导体的空间位置关系如图 9 所示。

其中,谐振电容根据线圈匝数变化实时调节,使取能线圈工作在谐振状态,取能模型忽略趋肤效应和非高频工作环境下涡流效应产生的线圈附加电阻,仿真参数如表 1 所示。

值得注意的是,文中采用简化线圈模型以提高有限元仿真运算效率,其中,  $N_1 = 60, N_2 = N'_2 = 250, p = p' = 0$ ,磁心与载流导体距离  $m$  为 12.5 mm。数值

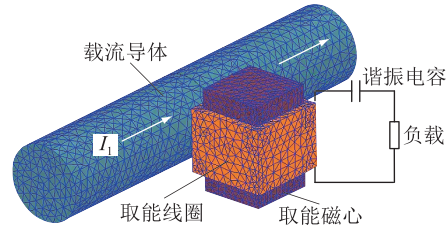


图 9 贴片式磁场感应取能装置模型

Fig.9 The model of the magnetic field induction energy harvester with patch core

表 1 取能装置仿真参数

Table 1 Simulation parameters of energy harvester

取能装置参数	数值
磁心尺寸	25 mm×25 mm×40 mm
磁心材料	铁基纳米晶 1K107
初始磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	80 000
线圈匝数	30 000
线圈绕制方式	500 层×60 圈
线圈线径/mm	0.05
载流导体电流/A	100

计算结果与仿真结果存在一定误差,这是因为简化模型下的线圈电阻与计算的线圈内阻存在偏差。分析磁心尺寸变化对取能输出功率的影响,取能磁心输出功率与磁心尺寸的变化关系如图 10 所示。其中,  $R_L$  为负载阻抗;  $R_w$  为等效内阻。

随着磁心横向长度  $x_0$  增加,线圈截面积  $S_1, S_3$  和磁心截面积  $S_4$  增大,使得线圈磁通量  $\Phi_1, \Phi_3$  和磁心磁通量  $\Phi_4$  增加,取能装置总磁通量随之增大;而随着磁心高度  $z_0$  增加,取能磁心等效磁导率  $\mu_e$  增加,磁心磁通量  $\Phi_4$  增加,使得取能装置总磁通量增大,因此接入不同负载的取能输出功率与磁心横向长度  $x_0$ 、磁心高度  $z_0$  呈正相关关系。随着磁心纵向长度  $y_0$  增加,线圈截面积  $S_3$  远离载流导体,线圈磁通量  $\Phi_3$  下降,使得取能线圈总磁通量降低。而在纵向长度  $y_0$  变化较小时,其延伸带来的线圈磁通量  $\Phi_2$  增长速度超过了线圈磁通量  $\Phi_3$  跌落速度,使得取能磁心在  $y_0$  较小时存在最优输出功率,输出功率呈先增后减的趋势。当纵向长度  $y_0$  在 5~6 mm 范围内变化时,取能磁心仿真输出功率最大。

分析线圈匝数变化对取能输出功率的影响,输出功率随线圈匝数变化的关系如图 11 所示,左侧纵坐标为  $R_L = 5, 10, 15 \text{ k}\Omega$  条件下的取能功率,右侧纵坐标为  $R_L = R_w$  条件下的取能功率。

由仿真和计算结果可知,取能装置在满足阻抗匹配条件,即  $R_L = R_w$  下,最大输出功率随着线圈匝数增加而增加。而在不同负载条件下,取能输出功

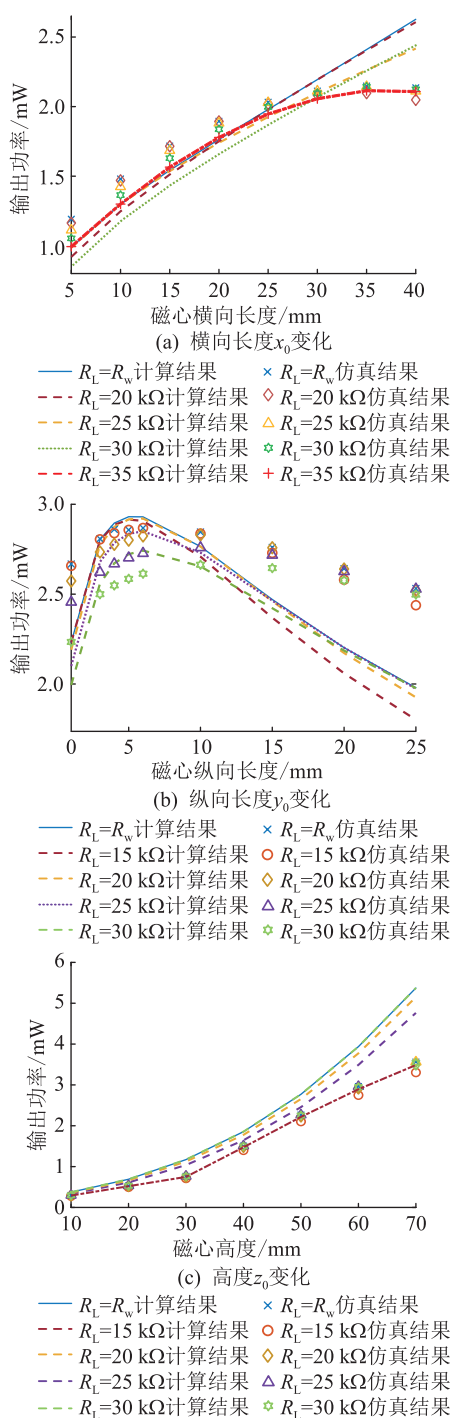


图 10 输出功率随磁心尺寸变化

Fig.10 The output power changes with the size of the magnetic core

率随着匝数增加呈先增后减的趋势,且随着负载阻抗  $R_L$  增加,取能输出功率最优值同步提高,对应的最优匝数  $N$  也增加。当线圈匝数  $N > 10^4$  时,功率模型计算得出的输出功率曲线与仿真结果趋势基本一致。

进一步改变绕制方式,取能磁心输出功率变化如图 12 所示。

当取能磁心与载流导体处于正交位置时,随着

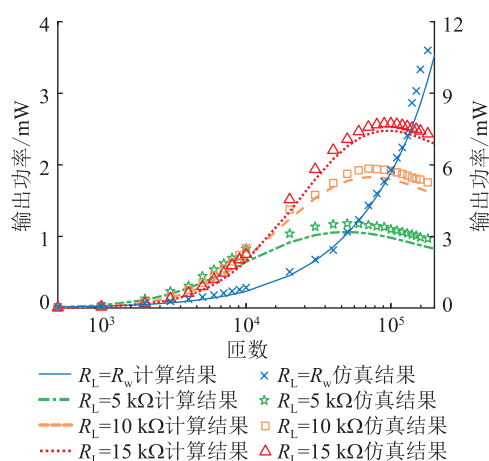


图 11 输出功率随线圈匝数变化

Fig.11 The output power changes with the number of turns

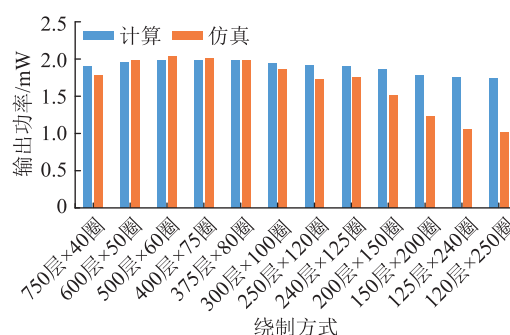


图 12 输出功率随绕制方式的变化关系

Fig.12 The variation of output power with winding methods

线圈层数增加,最外层线圈与磁心表面距离增加,磁通量降低,输出功率减少;随着线圈圈数增加,最外圈线圈远离磁心中心,磁通量降低,输出功率也降低。因此,相同线圈匝数下采用不同的绕制方式时,随着线圈圈数增加,线圈层数减少,最大输出功率呈先增后减的趋势。当匝数为 30 000 匝时,综合考虑线圈耗材和最大输出功率值,选取 500 层×60 圈绕制方式时取能磁心输出功率较优。在实际应用中,取能装置应避免线圈层数过多导致线圈高度逼近磁心高度的情况,同时避免线圈圈数过多导致外侧线圈磁通量大幅降低的情况,须根据实际要求选择合适的线圈圈数、层数配比,从而获得较优的取能输出功率。

## 2.2 轻量化磁心自取能功率特性仿真分析

为分析取能磁心空腔结构尺寸、空腔位置与取能输出功率的变化关系,在贴片式磁场感应取能模型磁心中增加空腔结构,以达到减小磁心质量的目的。设磁心添加空腔前的输出功率为  $P_{max}$ ,磁心添加空腔后的输出功率为  $P_{min}$ ,则取能输出功率比为

$P_{\min}/P_{\max}$ 。令磁心中心与空腔中心重合,取能输出功率比与空腔体积的变化关系如图 13 所示。

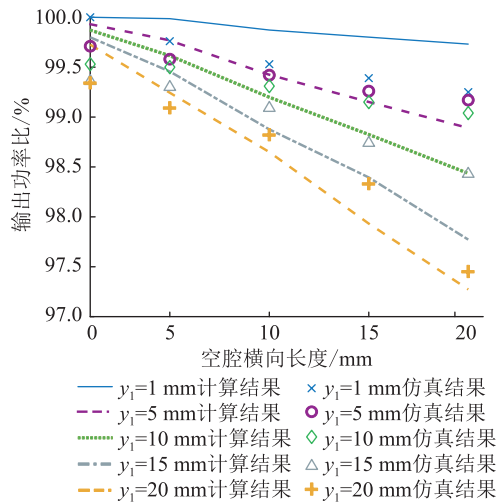


图 13 输出功率比随空腔体积的变化关系

Fig.13 The variation of output power ratio with the volume of the cavity

随着空腔体积增大,空腔在磁心总体积中的占比增加,使得输出功率比缓慢降低。当空腔体积占磁心体积的 2/3 时,输出功率比仍能超过 95%。因此,选取取能磁心时,可适当增加空腔体积,在损失较少取能输出功率的前提下,大幅缩减磁心整体重量,满足轻量化需求。

进一步改变空腔位置,使空腔沿 Y 轴逐渐远离载流导体。取能输出功率与空腔位置的变化关系如图 14 所示。

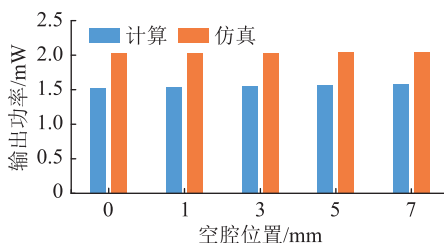


图 14 输出功率随空腔位置的变化关系

Fig.14 The variation of output power with the cavity position

随着空腔沿 Y 轴方向逐渐远离载流导体,邻近载流导体的磁心介质面积逐渐增加,磁通增加量远大于空腔占据的磁心介质磁通量,取能输出功率随之增大,这一结论与计算结果吻合。因此,在减小磁心质量时,空腔区域应尽量远离载流导体,以取得较大的取能输出功率。

由仿真分析可得,取能输出功率受到空腔体积和位置影响,因此,文中针对换流阀厅空间需求和重量限制问题,提出一种磁心轻量化方法,如图 15 所示。

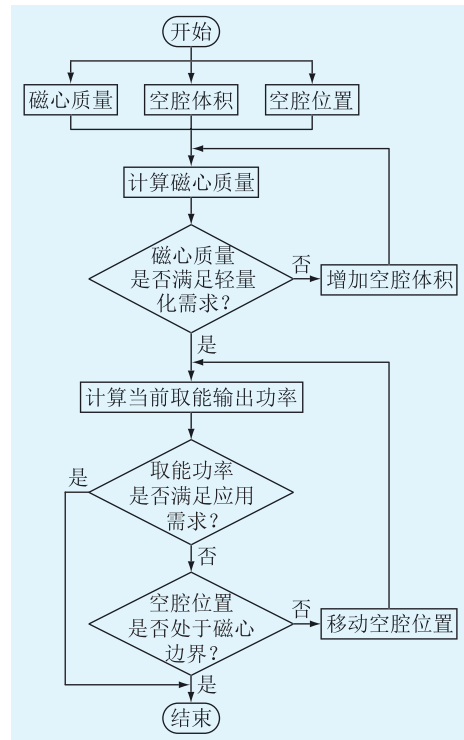


图 15 磁心轻量化方法流程

Fig.15 Flow chart of magnetic core lightweight method

空腔初始位置位于磁心中央,空腔中心与磁心中心重合。由于空腔体积改变对磁心取能功率影响较弱,可通过增加空腔体积实现磁心质量的减小,在此基础上,调节空腔与载流导体距离,进一步补偿取能输出功率以满足实际应用需求。

### 2.3 位置偏转下自取能功率特性仿真分析

贴片式磁心横向、纵向偏移或者多角度安装都会对取能性能产生影响。针对贴片式取能装置在安装过程中可能存在的错位问题,仿真分析贴片式取能磁心发生偏移或旋转对取能功率特性的影响。设置取能磁心紧贴载流导体,其偏移时取能功率的变化如图 16 所示。

当取能装置仅发生横向偏移时,随着取能磁心逐渐远离载流导体,取能磁心磁通量降低,取能功率也逐渐降低;当取能装置仅发生纵向偏移时,随着取能磁心中心逐渐偏离载流导体轴线,接近载流导体的磁心部分所获取的磁通量远小于远离载流导体的磁心部分所衰减的磁通量,取能功率也随之降低。

其次,分析贴片式取能装置围绕 X 轴、Y 轴旋转对取能功率特性的影响。取能功率随磁心旋转的变化关系如图 17 所示。

当取能装置发生横向偏移且围绕 X 轴或 Y 轴旋转时,仿真结果与理论计算结果的趋势基本吻合。当取能磁心围绕 X 轴或 Y 轴旋转时,取能磁心

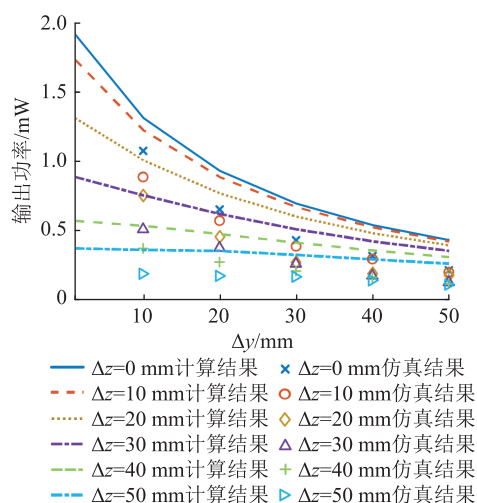
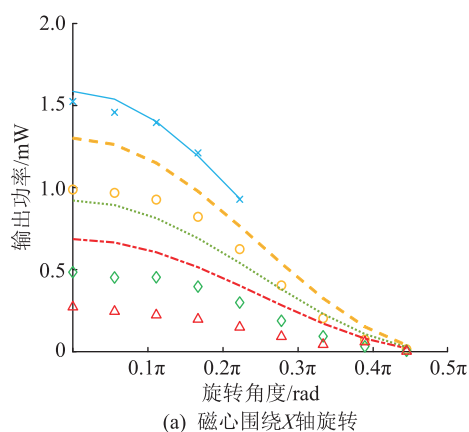
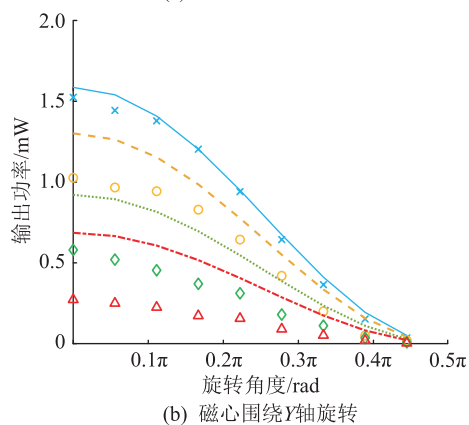


图 16 输出功率随磁心偏移距离的变化关系

Fig.16 The variation of output power with the deviation distance of magnetic core



(a) 磁心围绕X轴旋转



(b) 磁心围绕Y轴旋转



图 17 输出功率随磁心旋转角度的变化关系

Fig.17 The variation of output power with the rotation angle of magnetic core

最大输出功率呈先增后减的趋势,当旋转角度处于  $(\pi/18, \pi/9)$  时,取能功率存在最大值;而当旋转角度继续增加时,最大取能功率急剧下降;当旋转角度为  $0.5\pi$  时,磁心与载流导体之间磁通量几乎为

零,取能磁心处于失效状态。实际应用中,取能磁心在保证合理安装的情况下应避免由过度倾斜导致的取能磁心完全失效的情况。

针对贴片式磁场取能装置在安装过程中可能存在的错位问题,提出取能装置非最优位置下的取能功率优化策略,如图 18 所示。

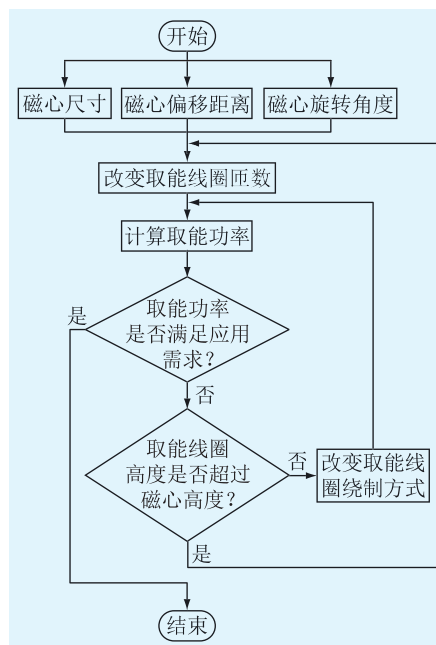


图 18 非最优位置下取能功率优化策略流程

Fig.18 Flow chart of harvested power optimization strategy in non-optimal position

在实际应用中,可根据取能装置负载大小,灵活改变线圈匝数和线圈绕制方式,以获得取能磁心错位时的最优取能功率。

### 3 实验验证

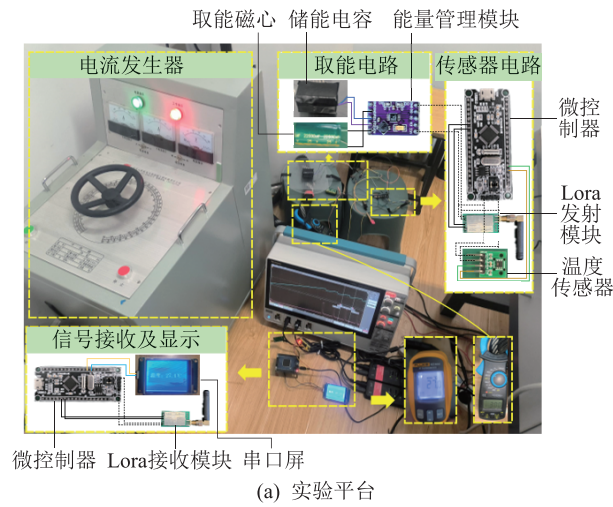
实验平台采用升流器设备模拟载流导体,利用卡钳式电流表监测电流状态,将取能装置固定于载流导体上,能量管理芯片采用 LTC3588,温度传感芯片采用 SHT20,Lora 模块采用 A39C-T400A,通过示波器监测取能装置储能电容两端的电压情况。实验器件参数如表 2 所示,实验平台搭建及实验波形如图 19 所示。

贴片式磁场取能装置采用铁基纳米晶 1K107 作为取能磁心材料,通过能量管理芯片采集交流磁场能量并存储至储能电容中,储能电容经过电容初始储能过程后驱动传感器工作。当能量跌落至启动门槛以下时,传感器休眠,储能电容重新积累能量;当储能再次达到放电门槛时,能量管理芯片向后级模块供能,使传感器周期性工作。而温度传感器作为能量管理芯片的后级模块,实时监测载流导



表 2 实验器件参数  
Table 2 Experimental device parameters

实验器件参数	数值
取能磁心磁导率/( $H \cdot m^{-1}$ )	80 000
取能磁心尺寸	25 mm×25 mm×40 mm
线圈线径/mm	0.05
线圈绕制方式	500 层×60 圈
储能电容容值/mF	22
载流导体电流/A	300
载流导体频率/Hz	50
Lora 发射功率/mW	≈100
微控制器型号	STM32L431CBT6
微控制器工作功率/mW	≈12



(a) 实验平台

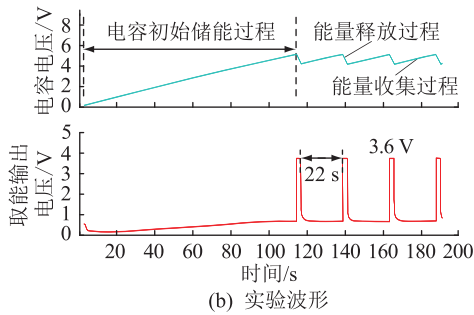


图 19 实验平台及波形

Fig.19 Experimental platform and waveforms

体温度状态,并通过微功耗控制器采集传感器差分模拟量,处理后将温度数据发送至 Lora 无线通信模块,并通过屏幕显示。

为验证贴片式磁场感应取能装置偏移状态下的输出功率特性,实验采用储能电容充电时间反映取能输出功率变化。设储能电容放电电压为  $U_m$ ,充电电压为  $U_n$ ,则储能电容单次充电能量  $E_c$  可表示为:

$$E_c = \frac{1}{2} C (U_m - U_n) \quad (17)$$

其中,  $U_m$  由负载电路启动门槛功耗决定,  $U_n$  由

能量管理芯片的运行模式决定,  $C$  为储能电容容量。而取能装置输出功率  $P$  为:

$$P = \frac{E_c}{t_c} \quad (18)$$

式中:  $t_c$  为储能电容充电时间。

在实验中,固定储能电容充电能量  $E_c$ ,则储能电容充电时间  $t_c$  与取能装置输出功率  $P$  成反比,通过储能电容充电时间变化能够反映取能装置输出功率变化。另一方面,文中针对换流站具体应用场景,采用实际传感器替代负载阻抗、监测电容充电时间替代监测阻抗电压的方式验证了取能装置输出功率变化。借助实验平台分析贴片式取能装置充电时间,如图 20 所示。

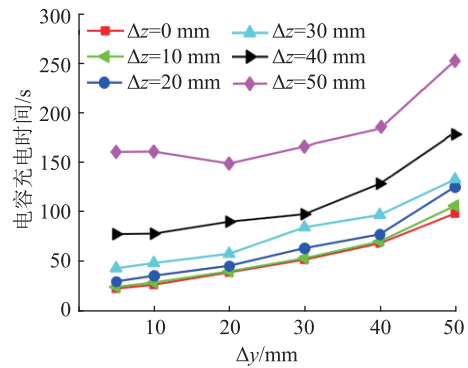


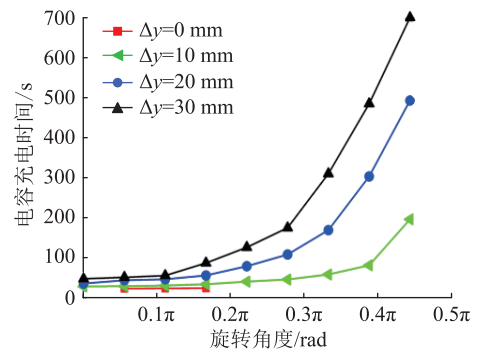
图 20 偏移情况下储能电容充电时间对比

Fig.20 Charging time comparison of energy storage capacitor under offset condition

在  $\Delta y$  相同的条件下,电容充电时间随着磁心沿  $Z$  轴偏移的距离  $\Delta z$  增加而增加;在  $\Delta z$  相同的条件下,磁心在  $Y$  轴上偏移距离  $\Delta y$  增加时,储能电容充电时间呈线性关系增长。随着偏移距离增加,贴片式取能装置能量采集效率明显降低,进而导致取能功率下降,且纵向偏移取能衰减程度更加显著,与仿真计算结果一致。

进一步验证贴片式磁场感应取能装置在旋转情况下的储能电容充电时间,如图 21 所示。

贴片式取能磁心围绕  $X$  轴和  $Y$  轴的旋转角度小于  $0.3\pi$  时,充电时长变化不明显;旋转角度大于



(a) 磁心围绕 X 轴旋转

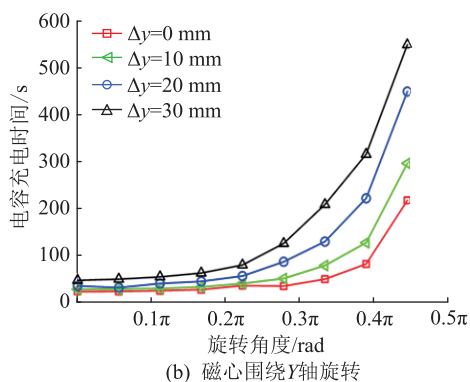


图 21 旋转情况下储能电容充电时间对比

Fig.21 Comparison of charging time of energy storage capacitor under rotating condition

0.3π 时,随着角度增加,充电时间快速增加,取能性能逐渐下降。

#### 4 结语

文中介绍了贴片式磁场感应取能装置,采用基于磁通叠加方式的区域剖分式计算方法,建立了贴片式取能装置的精确输出功率特性模型。基于贴片式磁心结构,研究取能磁心尺寸、线圈匝数及绕制方式对取能装置输出功率的影响,同时针对换流站等高压应用场景,建立了空腔化磁心取能输出功率精确计算模型,给出了轻量化解决方法。在此基础上,分析了贴片式磁场感应取能装置在发生偏移和旋转情况下输出功率的变化关系,提出了取能装置非最优位置下的取能功率特性优化策略。实验采用 Lora 模块结合 SHT20 温度传感器测试取能装置输出性能,结果表明,贴片式磁场感应取能装置在 300 A 电流条件下能够稳定供能并支撑温度传感器周期性工作。文中研究的贴片式磁场感应取能装置满足换流阀厅日常维护和监测需求,具有实用价值与指导意义。

#### 致 谢

本文得到江苏省“333 高层次人才培养工程”项目(3-16-292),江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB470021)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术,2023,49(5): 1765-1778.  
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49 (5): 1765-1778.

[2] LIU J M, ZHAO Z Y, JI J, et al. Research and application of wireless sensor network technology in power transmission and

distribution system [J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(2): 199-220.

[3] 谢萱萱,李俊娥,李福阳,等. 面向新型电力系统的智能终端后门检测方法[J]. 电力建设,2024,45(1):45-55.  
XIE Xuanxuan, LI June, LI Fuyang, et al. A backdoor detection method for intelligent terminal in modern power system [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 45-55.

[4] 相晨萌,高树国,刘宏亮,等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. 高压电器,2024,60(4): 83-91.  
XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 83-91.

[5] 全晓方,黄松强,黄繁朝. 换流站设备状态多方面管理及远程管控系统设计[J]. 能源与环境,2022,44(1):236-241.  
QUAN Xiaofang, HUANG Songqiang, HUANG Fanchao. Multi-aspect management of converter station equipment status and design of remote control system [J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(1): 236-241.

[6] 刘伯强,任凯,杨帆,等. 基于换流站监测信息采集与展示的便携式智能终端设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(2):84-89.  
LIU Boqiang, REN Kai, YANG Fan, et al. Design of portable intelligent terminal based on monitoring information collection and display of converter station [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2023(2): 84-89.

[7] 肖凯,王振,邹延生,等. 高压直流输电工程换流阀均压电极断裂机理研究[J]. 高压电器,2023,59(5):43-51.  
XIAO Kai, WANG Zhen, ZOU Yansheng, et al. Study on fracture mechanism of equalizing electrode of converter valve in HVDC projects [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 43-51.

[8] 吕圣琦. 换流站阀厅设备发热缺陷分析及运维措施研究 [J]. 自动化应用,2022(9):27-30.  
LV Shengqi. Analysis of heating defect of valve hall equipment in converter station and research on operation and maintenance measures [J]. Automation Application, 2022(9): 27-30.

[9] 李凤祁,张娟,余振球,等. 特高压换流阀 TFM 板卡降温研究与工程实践 [J]. 高压电器,2024,60(8):245-251.  
LI Fengqi, ZHANG Juan, SHE Zhenqiu, et al. Research and engineering practice on cooling of TFM board for UHVDC converter valve [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 245-251.

[10] SUN H, ZHOU X Q, ZHENG G Q, et al. Thermal sensitive parameters extraction method of UHVDC thyristors based on TCAD [C] // 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Beijing, China. IEEE, 2022: 104-108.

[11] 李秀婧,徐友,张意,等. 某直流换流站高压穿墙套管发热故障分析与处理 [J]. 电工技术,2022(3):47-49.  
LI Xiujing, XU You, ZHANG Yi, et al. Analysis and treatment of heating fault of high voltage through wall bushing in a DC converter station [J]. Electric Engineering, 2022(3): 47-49.

- [12] 屈辰,陶然,李刚. 基于环境能量自供电的无线传感器节点设计[J]. 科技创新导报,2018,15(26):125-127.  
QU Chen,TAO Ran,LI Gang. Design of wireless sensor node based on environmental energy self-power supply[J]. Science and Technology Innovation Herald,2018,15(26):125-127.
- [13] 李春龙,黄辉,梁云,等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]. 中国电力,2021,54(2):27-35.  
LI Chunlong,HUANG Hui,LIANG Yun,et al. Power sensor-oriented development and challenges of environmental energy harvesting technologies[J]. Electric Power,2021,54(2):27-35.
- [14] 赵东生,黄缙华,王云龙,等. 并联电容器组状态监测的新型无线传感器设计关键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(1):20-26.  
ZHAO Dongsheng,HUANG Jinhua,WANG Yunlong,et al. Research on key technology of wireless intelligent sensor design for monitoring condition of parallel capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2023,44(1):20-26.
- [15] 吕品雷,王子乔,杨爱军,等. 基于电磁感应和压电效应复合的变压器振动能量收集研究[J]. 高压电器,2023,59(12):145-151.  
LYU Pinlei,WANG Ziqiao,YANG Aijun,et al. Research on hybrid vibration energy collection based on electromagnetic induction and piezoelectric effect for transformer[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(12):145-151.
- [16] KUANG Y,CHEW Z J,RUAN T W,et al. Magnetic field energy harvesting from current-carrying structures:electromagnetic-circuit coupled model,validation and application[J]. IEEE Access,2021,9:46280-46291.
- [17] ESPE A E,HAUGAN T S,MATHISEN G. Magnetic field energy harvesting in railway[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(7):8659-8668.
- [18] WANG W,ZHU Z B,WANG Q,et al. Optimisation design of real-time wireless power supply system overhead high-voltage power line[J]. IET Electric Power Applications,2019,13(2):206-214.
- [19] 詹坤,高广德,陈亚龙,等. 基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(10):74-83.  
ZHAN Kun,GAO Guangde,CHEN Yalong,et al. An online stable energy extraction method for a transmission line based on adaptive adjustment of auxiliary core impedance[J]. Power System Protection and Control,2024,52(10):74-83.
- [20] 聂晴晴,彭晗,李红斌,等. 宽频带范围内磁场能量收集的匹配网络设计[J]. 中国电力,2021,54(10):134-143,195.  
NIE Qingqing,PENG Han,LI Hongbin,et al. Design of matching network for magnetic field energy harvesting in wide frequency range[J]. Electric Power,2021,54(10):134-143,195.
- [21] 许晨进,王维,汪鹤,等. 输电线路感应取能电源宽流带拓扑性能对比分析与优化[J]. 中国电机工程学报,2021,41(22):7631-7640.  
XU Chenjin,WANG Wei,WANG He,et al. Topology comparison and optimization design of energy harvester based on wide-range current overhead AC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(22):7631-7640.
- [22] 贺家慧,张丹丹,张露,等.  $\pm 500$  kV 换流站工频电磁环境测量与实验室模拟[J]. 高压电器,2023,59(4):10-16.  
HE Jiahui,ZHANG Dandan,ZHANG Lu,et al. Measurement and laboratory simulation of power frequency electromagnetic environment of  $\pm 500$  kV converter station[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(4):10-16.
- [23] 宁杰,王磊,张佰富,等. 基于阻抗控制的电流互感器取能控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(3):39-47.  
NING Jie,WANG Lei,ZHANG Baifu,et al. Current transformer energy harvesting control strategy based on impedance control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(3):39-47.
- [24] CHEN F,YANG C R,GUO Z B,et al. A magnetically controlled current transformer for stable energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(1):212-221.
- [25] 柳百毅,陈为,李榜,等. 基于感应取能的微功率能量收集器[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1474-1485.  
LIU Baiyi,CHEN Wei,LI Bang,et al. Micro-power energy harvester based on electromagnetic induction[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(5):1474-1485.
- [26] 李勇,罗海军,杨环宇,等. 基于磁心与线圈参数优化的非侵入式磁场取能系统功率密度提升方法[J]. 电工技术学报,2024,39(2):313-324.  
LI Yong,LUO Haijun,YANG Huanyu,et al. Power density improvement method of non-invasive magnetic field energy harvester system based on optimization of magnetic core and coil parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(2):313-324.
- [27] YANG H Y,LI Y,LIU Z W,et al. An accurate power model and high power density design method of free-standing magnetic field energy harvesters with H-shaped core[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2023,70(8):7965-7975.
- [28] YUAN S,HUANG Y,ZHOU J F,et al. Magnetic field energy harvesting under overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(11):6191-6202.
- [29] TASHIRO K,WAKIWAKA H,HATTORI G Y. Estimation of effective permeability for dumbbell-shaped magnetic cores[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(1):4000304.
- [30] WANG H,SHI G Y,HAN C Z. A free-standing electromagnetic energy harvester for condition monitoring in smart grid[J]. Wireless Power Transfer,2021,8(1):6685308.
- [31] 谭悦. 配电网线路在线监测设备轻型感应取能电源研究[D]. 重庆:重庆理工大学,2022.  
TAN Yue. Study on light-weight induction power supply for on-

line monitoring equipment of distribution network line [D].

Chongqing:Chongqing University of Technology,2022.

- [32] 陈新岗,谭悦,赵蕊,等. 基于内外环磁芯结构的输电线轻型感应取能CT设计[J]. 磁性材料及器件,2022,53(4):48-54.

CHEN Xingang,TAN Yue,ZHAO Rui,et al. Design of light induction energy harvesting CT for transmission lines based on inner and outer annular magnetic core structure[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices,2022,53(4):48-54.

作者简介:



王维

王维(1988),男,博士,副教授,研究方向为无线电能传输技术、输变电环境取能技术等(E-mail:wangw\_seu@163.com);

苏文博(1999),男,硕士,研究方向为环境取能技术;

许晨进(1996),男,博士在读,研究方向为电磁场能量收集与状态感知技术。

## Analysis and optimization of energy harvesting characteristics of converter valve magnetic field self-powered harvester

WANG Wei<sup>1</sup>, SU Wenbo<sup>1</sup>, XU Chenjin<sup>1</sup>, WU Yuwei<sup>2</sup>, SHI Yuchen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Automation Engineering,Nanjing Normal University, Nanjing 210023,China;2. NARI Technology Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China)

**Abstract:** Temperature monitoring of converter valves can aid in fault prediction, and it is one of the key technologies to ensure the safe and stable operation of converter stations. However, there are few suitable solutions to the problem of reliable energy supply. In this paper, an accurate output power characteristic model based on magnetic field induction energy harvesting is proposed, utilizing a superimposed magnetic flux calculation method. The impact of key core parameters on energy harvesting power is explored step by step, and an optimization method is proposed. To address the space constraints of the converter valve hall, a lightweight design for the magnetic core is proposed. On this basis, the energy harvesting characteristics of the chip-based energy harvesting device under deflection condition, influenced by the application environment, are studied. An optimization analysis method of energy taking power characteristics under the non-optimal position is proposed. The chip-based energy harvesting device designed in this paper can drive the sensor stably across a wide range of current fluctuations and realize long-distance wireless communication. At the same time, it can meet the needs of long-term maintenance-free detection of power equipment in narrow and high temperature space such as converter stations.

**Keywords:** converter valve; magnetic field induction energy harvesting; patch energy harvesting method; energy taking power characteristics; lightweight structure; temperature monitoring

(编辑 陆海霞)