

一种新型 Halbach 阵列永磁振动发电机的设计与输出特性分析*

李佳泽, 王博文, 邹尊强

(河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130)

摘要: 给出了一种永磁振动发电机感应电动势的计算公式, 设计了一种新型 Halbach 阵列永磁振动发电机, 机体两侧分别固定了两组永磁体, 内部 6 个线圈串联。采用有限元法, 与普通 Halbach 阵列和传统永磁振动发电机进行了对比分析, 新型 Halbach 阵列的应用大幅度提升了振动发电机的性能。正弦规律振动的振源频率为 10 Hz, 振幅为 3 mm 时, 新型振动发电机的最大输出功率为 355.85 mW, 开路电压有效值为 6.402 9 V。最后, 对线圈相对永磁体的位置进行了优化, 最大输出功率达到了 414.81 mW, 进一步提升了 16.57%, 此时开路电压有效值为 7.036 6 V。

关键词: 永磁振动发电机; 有限元法; Halbach 阵列

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)10-0067-05

Design and Output Characteristics of Permanent Magnet Vibration Generator Using New Halbach Arrays*

LI Jiaze, WANG Bowen, ZOU Zunqiang

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: A formula of induced electromotive force of leaner vibration generators was presented. Linear permanent magnet vibration generator equipped with the new Halbach arrays was designed, two sets of permanent magnets were fixed on two sides of the body, and the inner six coils were connected in series. Compared with those using the conventional Halbach array and traditional permanent magnets, finite element analysis used, the application of the new Halbach array greatly improves the generators' performance. The maximum output power was 355.85 W, and the open circuit effective voltage was 6.402 9 V, with the sinusoidal vibration frequency was 10 Hz, and the amplitude was 3 mm. At last, the coils' relative positioning to magnets was optimized, the maximum output power was up to 414.81 mW, 16.57% improved, and the open circuit effective voltage was 7.036 6 V.

Key words: permanent magnet vibration generator; finite element analysis; Halbach arrays

0 引言

振动发电机可以将环境中的振动能转化为电能, 给微机电系统和无线传感器等供电。按照能量转换原理的不同, 可分为电磁式、压电式^[1]和静电式^[2]。其中, 压电式振动发电机一般工作于

100~1 000 Hz 的频率范围内; 静电式则需要外加电源充电, 应用较少; 电磁式振动发电机工作于低频振动的环境中, 具有低成本、高性能的特点^[3]。Jiabin Wang 等人将永磁直线发电机应用到了汽车悬挂系统^[4], 并建立了数学模型。南加州大学设计了一种微型磁弹簧发电装置, 可以利用人体

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51171057)

作者简介: 李佳泽(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为振动发电技术。

王博文(1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为磁性材料与智能器件。

运动产生电能^[5]。

提高电磁式振动发电机输出功率的途径主要有:利用机体结构的谐振频率^[6-7],改变绕组参数及其相对永磁体位置关系^[8],采用不同的永磁体分布方式等^[9]。Halbach 阵列将不同充磁方向的永磁体按照一定的顺序排列,相邻永磁体的磁场强度互相叠加,使得阵列一侧的磁力线分布密集,另一侧磁力线分布十分稀疏,磁场分布呈现单边性,对外表现出良好的自屏蔽效应。在粒子加速器^[10]、高性能直线型电机^[11]和无刷直流电机^[12]上得到应用。将 Halbach 阵列应用于振动发电机,尤其是小型发电机,弱磁场区域放置电子器件无须考虑电磁干扰,方便能量采集电路和发电装置的集成设计。

本文设计了一种新型 Halbach 阵列永磁振动发电机,利用有限元法对其进行了仿真研究。仿真表明,此新型阵列对振动发电机最大输出功率和开路电压有效值的提升效果明显,可将其应用于低频率、低振幅环境中。

1 永磁振动发电机的原理

永磁振动发电机的结构示意图如图 1 所示。由法拉第电磁感应定律,导体回路中磁通密度随时间改变,或者导体回路和磁场间产生相对位移,导体两端就会产生电动势。前者引起的电动势称为感生电动势,后者称为动生电动势,分别用 E_{in} 和 E_{mo} 表示。振动发电机中单匝线圈的电动势 E_i 可以表示为

$$E_i = E_{in} + E_{mo} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} + \oint_l (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) d\mathbf{l} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{B}$ ——磁通密度矢量;

$\mathbf{v}$ ——线圈和磁场的相对运动速度矢量;

$\mathbf{S}$ ——线圈回路所围平面矢量;

$\mathbf{l}$ ——线圈回路的有效长度矢量;

t ——时间。

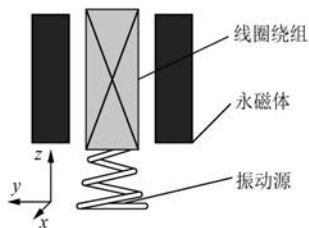


图 1 永磁振动发电机结构示意图

图 1 给出的振动发电机结构示意图,线圈和永磁体发生相对运动,进而产生感应电动势。磁通密度可表示为 $\mathbf{B} = B_x \mathbf{e}_x + B_y \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z$,其中 B_x 、 B_y 、 B_z 分别为线圈上一点的磁通密度在 x 、 y 、 z 轴上的分量大小。轴向位移矢量 $\mathbf{h} = h \mathbf{e}_z$,则速度矢量 $\mathbf{v} = v \mathbf{e}_z = (dh/dt) \mathbf{e}_z$ 。本文中线圈以 y 轴为轴心进行绕制,磁力线分布平面与 x 轴垂直,则有 $d\mathbf{l} = dx \mathbf{e}_x$ 。相应的微分面元矢量为 $d\mathbf{S} = dx dz \mathbf{e}_y$,将以上各式代入式(1)可得:

$$\begin{aligned} E_i = & - \int_x \int_y \frac{\partial B_y}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \mathbf{e}_y dx dy \mathbf{e}_y + \\ & \int_x [v \mathbf{e}_z \times (B_x \mathbf{e}_x + B_y \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z)] dx \mathbf{e}_x = \\ & - v \frac{\partial B_y}{\partial h} \int_x \int_y dx dy + v B_y \int_x dx = \\ & v \left(- \frac{\partial B_y}{\partial h} S + B_y l \right) \end{aligned} \quad (2)$$

对于匝数为 N 的线圈,总感应电动势 E 可以表示为各线圈感应电动势的叠加:

$$E = \sum_i^N v_i \left(- \frac{\partial B_{yi}}{\partial h} S + B_{yi} l \right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,影响振动发电机输出电动势的因素有:速度 v ,磁通密度在 y 轴上的分量 B_y 和 $\partial B_y / \partial h$,以及线圈回路所围面积 S 和线圈回路的有效长度 l 。

2 新型 Halbach 阵列永磁振动发电机的结构与有限元仿真

2.1 新型 Halbach 和普通 Halbach 阵列永磁振动发电机输出特性对比

新型 Halbach 阵列永磁振动发电机(以下简称新型振动发电机)的纵向剖面结果如图 2 所示。图 3 则采用普通 Halbach 阵列。图 2、图 3 均给出了静态下的磁力线分布特点:两者磁力线分布都呈现明显的单边性,但是前者分布更为集中、紧凑。两发电机除永磁体结构不同外,其他参数保持一致,如表 1 所示。新型 Halbach 阵列的永磁体纵向截面为等腰三角形,底边长 30 mm,高 8 mm,7 个一组固定放置在机体两侧;普通 Halbach 阵列的永磁体纵向截面为 30 mm×8 mm 的矩形,永磁体阵列长度保持不变。

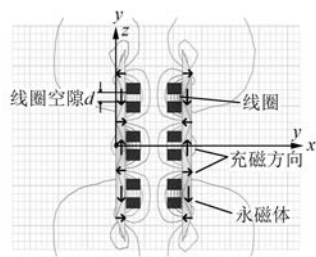


图2 新型 Halbach 阵列永磁振动发电机纵向剖面

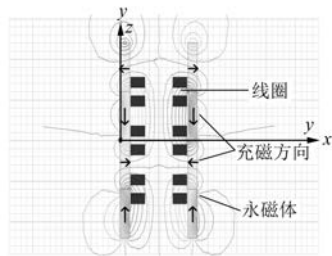


图3 普通 Halbach 阵列永磁振动发电机纵向剖面

表 1 振动发电机设计参数

参数名称	参数值
永磁体规格/mm	30×8×80
永磁体间距/mm	50
气隙宽度/mm	2
线圈匝数	300
线圈空隙 d/mm	9
线圈横截面/mm	12×6.5

考虑到环境中的振动大多为低频率、低振幅,给定正弦规律振动的振源频率为 10 Hz,振幅为 3 mm。利用有限元软件对两种发电机进行分析,得到了其感应电动势随时间变化的曲线,如图 4 所示。两发电机感应电动势的峰值分别为 18.11 V 和 7.092 V,开路电压有效值分别为 6.402 9 V 和 2.507 4 V,最大输出功率分别为 355.85 mW 和 54.57 mW,新型 Halbach 阵列具有明显优势。根据式(3),在其他各项参数一致条件下, B_y 和 $\partial B_y / \partial h$ 值是影响两种振动发电机输出感应电动势大小的关键因素。图 5 给出了两种振动发电机左侧永磁体内侧 2 mm 处 $B_y - h$ 和 $\partial B_y / \partial h - h$ 曲线:相比后者,新型振动发电机 B_y 值大部占优,并且 $B_y - h$ 曲线在相同距离上有两个完整周期,符合图 2 中机体内部磁场分布的特点;两者 $\partial B_y / \partial h$ 值的数量级为 10^{-2} ,并且数值差异不大,

对感应电动势影响较弱。通过对 Halbach 阵列永磁体的改进,新型振动发电机内部磁场分布得到了优化,最大输出功率也随之大幅提升。

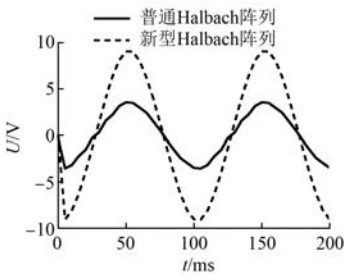


图4 新型 Halbach 和普通 Halbach 阵列永磁振动发电机感应电动势

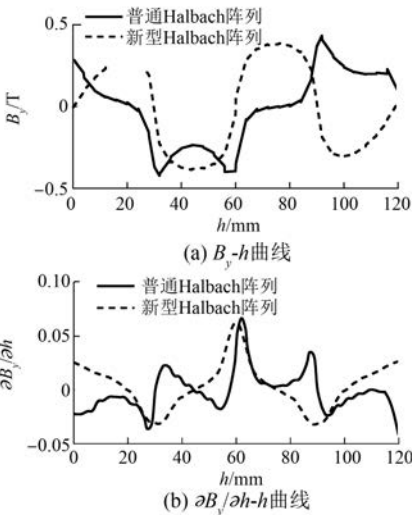


图5 新型 Halbach 和普通 Halbach 阵列永磁振动发电机 B_y-h 及 $\partial B_y / \partial h-h$ 曲线

2.2 新型 Halbach 阵列和传统永磁振动发电机输出特性对比

相比普通 Halbach 阵列,新型 Halbach 阵列的磁场分布得到了明显改善,应用新型阵列的振动发电机的输出功率明显提高。图 6 给出了传统永磁振动发电机的纵向剖面结构,机体左右两侧各固定了 4 个横向充磁的永磁体,内部 6 个线圈串联,发电机各项参数参照表 1。新型 Halbach 阵列和传统永磁振动发电机具有相似的内部磁场分布,但后者磁场分布不具备单边性。

振源参数保持不变,两种振动发电机的感应电动势如图 7 所示,传统永磁振动发电机的开路电压有效值为 5.272 9 V,最大输出功率为

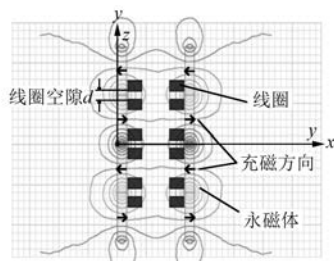


图6 传统永磁振动发电机纵向剖面

241.35 mW。新型振动发电机在此基础上分别提升了 21.43% 和 47.44%, 保证发电机体积不变的同时, 提高了发电机的最大输出功率。

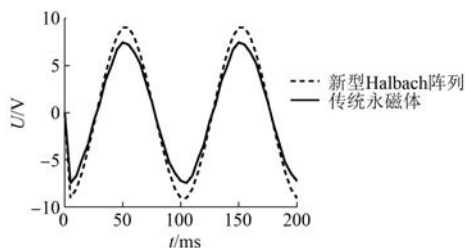
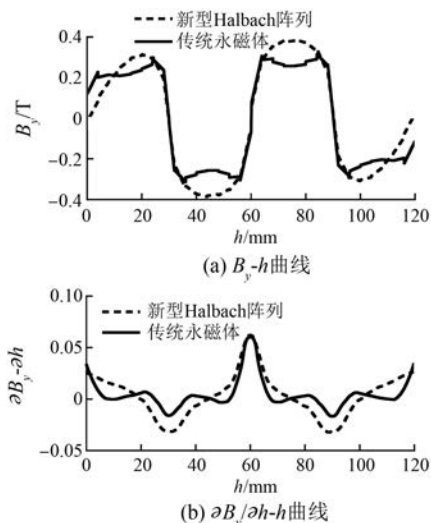


图7 新型 Halbach 阵列和传统永磁振动发电机感应电动势

图 8 给出了两种振动发电机左侧永磁体内侧 2 mm 处的 $B_y - h$ 和 $\partial B_y / \partial h - h$ 曲线。两发电机 $B_y - h$ 曲线的走势和周期大致相同, 符合两发电机内部磁场分布相似的特点; 新型振动发电机内侧磁力线分布更加密集的特点在图 8 中也有显现, 该结构下 $B_y - h$ 曲线峰值具有明显优势,

图8 新型 Halbach 和传统永磁振动发电机 $B_y - h$ 及 $\partial B_y / \partial h - h$ 曲线

$\partial B_y / \partial h$ 值也大部占优。新型振动发电机不仅保持了传统永磁振动发电机内部磁场变化周期短的优点, 还进一步提升了 B_y 值, 并且磁场分布具有优秀的单边性。另一方面, 通过对比两种发电机内部的磁场分布情况和 $B_y - h$ 及 $\partial B_y / \partial h - h$ 曲线的特性, 普通 Halbach 阵列性能较差的原因就在于机体内部磁场变化周期长、磁力线分布略显均匀, 相同距离仅有一个完整的磁场变化周期, 而其他两种振动发电机都拥有两个完整的磁场变化周期。

3 新型 Halbach 阵列永磁振动发电机的优化

图 8(a) 中两种发电机 $B_y - h$ 曲线分布特点相似, 在 $h = 15 \text{ mm}$ 、 45 mm 、 75 mm 、 105 mm 处, 也就是横向充磁永磁体底边中点附近, 两发电机 $B_y - h$ 曲线达到峰值, $\partial B_y / \partial h - h$ 曲线达到零点。两者 $B_y - h$ 曲线峰值附近正负 10 mm 的区间内差异较大, 正是提高发电机性能的关键所在, 如果线圈尽量多地在此区间内振动, 那么新型振动发电机的输出感应电动势理论上会进一步得到提升。

改变线圈空隙 d 的大小, 随着 d 的增加线圈外边缘会逼近 $h = 15 \text{ mm}$ 、 45 mm 、 75 mm 、 105 mm 处。根据表 1 所示, d 的最大取值应小于 17 mm, 故分别在线圈空隙 d 取值为 1 mm、3 mm、5 mm、7 mm、9 mm、11 mm、13 mm、15 mm、16 mm 时, 对新型振动发电机进行了三维有限元仿真, 得到各参数下发电机的感应电动势, 如图 9 所示。开路电压有效值分别为 3.845 2 V、4.667 0 V、5.362 0 V、5.933 3 V、6.402 9 V、6.770 5 V、7.033 6 V、7.269 1 V 和 7.325 6 V, 依次增大, 验证了之前对有限元仿真曲线分析的正确性。

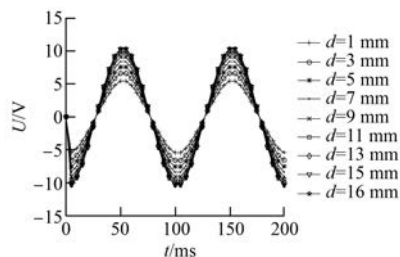


图9 新型 Halbach 阵列振动发电机不同线圈参数下的感应电动势

从图 9 可以看出, 当 d 达到 13 mm 之后, 感应

电动势增大不再明显,故取定 $d=13\text{ mm}$ 为最终设计参数。在振幅 3 mm 、振动频率 10 Hz 的正弦振动激励下,优化后的新型振动发电机开路电压有效值为 $7.033\ 6\text{ V}$,最大输出功率达到了 414.81 mW ,相比优化前提升了 16.57% 。

4 结 语

利用有限元软件对 Halbach 阵列应用于振动发电机的问题进行了研究,设计了一种新型 Halbach 阵列永磁振动发电机,并对其进行了优化。正弦规律振动的振源频率为 10 Hz 、振幅为 3 mm 时,新型振动发电机最大输出功率达到了 414.81 mW ,开路电压有效值为 $7.033\ 6\text{ V}$ 。相较于同参数的传统永磁振动发电机的 241.35 mW 和 $5.272\ 9\text{ V}$,分别提升了 71.87% 和 47.44% ,发电机性能得到了大幅提升,解决了普通 Halbach 阵列振动发电机最大输出功率低的问题,Halbach 阵列的优良特性得到了发挥,为电磁式振动发电机性能的优化提供了一种可行方案。

【参 考 文 献】

- [1] SAADON S, SIDEK O. Ambient vibration-based MEMS piezoelectric energy harvester for green energy source [C] // Icmsao, 2011: 1-6.
- [2] SIDEK O, KHALID M A, ISHAK M Z, et al. Design and simulation of SOI-MEMS electrostatic vibration energy harvester for micro power generation [C] // International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, 2011: 207-212.
- [3] BOUENDEU E, GREINER A, SMITH P J, et al. A low-cost electromagnetic generator for vibration energy harvesting [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11 (1): 107-113.
- [4] WANG J, WANG W, ATALLAH K. A linear permanent-magnet motor for active vehicle suspension [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (1): 55-63.
- [5] ZHANG Q, WANG Y, KIM E S. Electromagnetic energy harvester with flexible coils and magnetic spring for $1 - 10\text{ Hz}$ resonance [J]. Journal of Microelectro-Mechanical Systems, 2015, 24 (4): 1.
- [6] SARDINI E, SERPELLONI M. An efficient electromagnetic power harvesting device for low-frequency applications [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2011, 172 (2): 475-482.
- [7] 杨晓光,汪友华,张波,等.一种新型振动发电装置及其建模与实验研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (1): 113-118.
- [8] SHAHOSSEINI I, PETERSON R L, AKTAKKA E, et al. Elec-tromagnetic generator optimization for non-resonant energy harvester [C] // IEEE SENSORS 2014 Proceedings, 2014: 178-181.
- [9] SHAHOSSEINI I, NAJAFI K. Cylindrical halbach magnet array for electromagnetic vibration energy harvesters [C] // IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2015: 1051-1054.
- [10] HALBACH K. Permanent magnets for production and use of high energy particle beams [C] // Intern Workshop on Rare Earth Magnets & Their Appl. Presented at the 8th Intern. Workshop on Rare Earth Magnets and their Appl, 1985: 1-18.
- [11] LEE M G, LEE S Q, GWEON D G. Analysis of Halbach magnet array and its application to linear motor [J]. Mechatronics, 2004, 14 (1): 115-128.
- [12] HULL J R, TURNER L R. Magnetomechanics of internal-dipole, Halbach array motor/generators [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36 (4): 2004-2011.

收稿日期: 2017 -02 -24

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063 电话: 021 - 62574990 - 745 传真: 021 - 62576377

国内邮发代号: 4 - 199 每册定价: 12.00 元 全年定价: 144.00 元