doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.S1.044

基于印制绕组的电磁式自供电拖拉机轮速传感器研究

李思语[1,2]　李　臻[1,2]　何志祝[1,2]　傅梁起[1,2]　王亚东[1,2]　才　胜[1,2]
(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.中国农业大学农业柔性传感技术研究中心,北京 100083)

摘要:针对传统供电方式难以适应现代农业传感器网络使用需求的问题,设计了一种基于印制绕组和 Halbach 阵列的电磁式自供电拖拉机轮速传感器。装置采用中间定子、两侧转子的结构形式,基于法拉第电磁感应定律对装置的输出感应电动势进行理论推导,确定其影响参数。使用有限元仿真软件,对影响装置输出性能的磁体排列方式、线圈匝数和装置气隙等进行仿真分析,并结合实际工程经验确定了定子线圈形状和永磁体极对数等参数。设计了后端电路,其可对装置的输出电压进行整流、测量和传输,从而计算转速,并可由装置直接供电。制作了装置样机,分别开展台架标定测试和实车应用试验。试验结果表明,装置转速和电压线性拟合结果良好,决定系数 R^2 为 0.999 91,在转速 400 r/min 下整流后的直流电压输出约为 3.16 V,可以满足为后端电路供电的需求。与商用编码器相比,在台架测试中装置的转速测量精度保持在 1% 以内,实车测试中精度基本保持在 5% 以内,可以满足实际使用要求。

关键词:拖拉机;轮速传感器;自驱动;印制电路板绕组;Halbach 阵列
中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)S1-0411-08

Design of Electromagnetic Self-powered Tractor Wheel Speed Sensor Based on Printed Winding

LI Siyu[1,2]　LI Zhen[1,2]　HE Zhizhu[1,2]　FU Liangqi[1,2]　WANG Yadong[1,2]　CAI Sheng[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Agricultural Flexible Sensing Technology Research Center*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To solve the problem that the traditional power supply methods were difficult to adapt to the needs of modern agricultural sensor networks, an electromagnetic self-powered tractor wheel speed sensor based on printed winding and Halbach array was designed. The device adopted the structural form of an intermediate stator and two rotors on both sides. Based on Faraday's electromagnetic induction law, the output induced electromotive force of the device was theoretically derived and its influence parameters were determined. By using finite element simulation software, the magnet arrangement, coil turns and air gap which affected the output performance of the device were simulated and analyzed, and the best parameters of stator coil shape and permanent magnets pole number were determined. The back-end circuit was designed, which can rectify, measure and transmit the output voltage of the device, so as to calculate the speed, and can be directly supplied by the device. The prototype of the device was made, and the bench calibration test and actual vehicle application test were carried out respectively. The results showed that the linear fitting results of the device speed and voltage were good, the R^2 was 0.999 91, and the rectified DC voltage at 400 r/min was about 3.16 V, which can meet the demand of supplying power to the back-end circuit. Compared with the commercial encoder, the measurement accuracy of the speed in the bench test was kept within 1%, and the accuracy in the actual vehicle test was basically kept within 5%. It can meet the requirements of actual use.

Key words: tractor; wheel speed sensor; self-driven; PCB winding; Halbach array

收稿日期:2023-06-15　修回日期:2023-08-01
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2000300)、国家自然科学基金项目(52175259)和拼多多-中国农业大学研究基金项目(PC2023B01005)
作者简介:李思语(2000—),男,硕士生,主要从事环境能量收集和自驱动传感系统研究,E-mail:lisiyu@cau.edu.cn
通信作者:才胜(1985—),男,讲师,博士,主要从事智慧农业及轻量化技术研究,E-mail:sheng.cai@cau.edu.cn

0 引言

随着物联网、大数据、人工智能等技术的快速发展，应用于农业领域的小型传感器数量快速增长[1-2]。传统电池供电的方式难以支持数量庞大且布置灵活分散的传感器网络，并且传统化学电池还易造成资源浪费和环境污染等问题。因此许多研究人员开始对自然能源收集与无须依赖外部电力的自驱动传感系统进行研究[3-6]。自驱动系统主要由能量采集/转换单元和后端应用单元组成[7]。利用基于电磁感应原理的电磁发电机采集机械能并将其转换为电能是一种最常见的方式。

旋转式电磁发电机具有输出功率高、耐久性强和运行稳定性高的优点。研究人员通过将印制电路板(Printed circuit board, PCB)技术应用到电机线圈绕组的制作中，极大地减小了装置的体积和重量，使其结构大为紧凑[8]。同时，Halbach 阵列的应用可以在不增加磁体体积和重量的前提下提高磁场强度，进一步优化了发电机的输出性能[9]。

拖拉机是最典型、最常见的农业作业机械，车轮转速是计算滑转率、判断拖拉机工作状态的一个重要参数，为操作人员和电子控制系统提供精准的车轮转速数值是保证安全正常作业的重要前提。轮速传感器是拖拉机必须配备的基本传感器之一，必须保证其测量的精准性[10]。本文提出一种基于印制绕组和 Halbach 阵列的电磁式自供电拖拉机轮速传感器，其由电磁部分和后端电路两部分组成，无需外部供电即可进行拖拉机轮速测量和信号传输。对其进行结构设计、理论分析、仿真优化以及试验测试，以验证其功能的可行性和转速测量性能的精准性。

1 传感器设计与理论分析

1.1 工作原理与方案设计

电磁式自供电轮速传感器主要由盘式电磁发电机和信号测量传输电路两部分组成。根据法拉第电磁感应定律，电磁发电机在不同转速下会产生不同输出电压，通过对输出电压的监测即可推算出发电机转速，从而实现转速测量的功能。信号测量传输电路模块可以对电磁部分的输出电压进行实时测量，并通过蓝牙无线传输的方式将数据传输到手机中，实现对转速信号的检测和记录。并且电磁部分产生的电能可以为电路模块供电，从而达到自供电的效果。

基于 PCB 绕组的盘式发电机根据定子和转子的数量及相对位置关系可以分为单定子单转子结构、单定子双转子结构、双定子单转子结构、多盘式结构等 4 种[11]。其中，单定子双转子结构(图 1)两侧气隙对称，其双边转子的磁拉力可以相互平衡，并且双边转子使其具有更高的磁通密度，在永磁体体积相同的条件下，双侧转子结构可以比单侧转子结构的气隙磁密提高 10% 左右[12]。因此，本装置采用 PCB 绕组在中、永磁体位于两侧的单定子双转子结构。装置的结构爆炸图如图 2 所示。

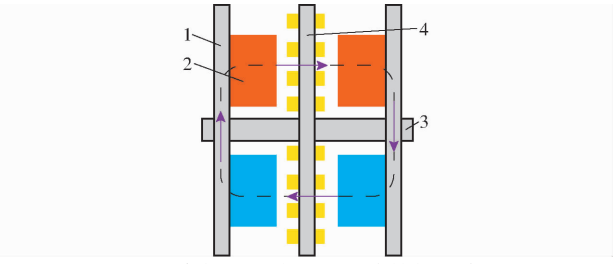


图 1 单定子双转子及磁路结构示意图

Fig. 1 Schematic of single stator double rotors and magnetic circuit structure

1. 背铁 2. 永磁体 3. 传动轴 4. PCB 板

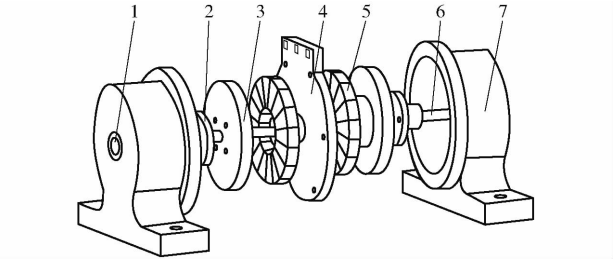


图 2 装置结构爆炸图

Fig. 2 Exploded view of device

1. 轴承 2. 法兰联轴器 3. 转子背铁 4. PCB 板 5. 永磁体 6. 传动轴 7. 壳体

1.2 理论模型构建

根据法拉第电磁感应定律，当穿过闭合电路的磁通量发生变化时，闭合电路中就会有感应电流产生。电路中感应电动势与穿过电路的磁通量的变化率成正比。根据磁通量变化方式的不同，感应电动势可以分为动生电动势和感生电动势两种。动生电动势是由于导体或导体回路在磁场中做切割磁感线运动而产生的电动势，感生电动势是由于通过闭合导体回路的磁通量发生变化而产生的感应电动势。N 匝线圈电路中感应电动势可表示为

$$E = N\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中 E——感应电动势

φ——穿过电路的磁通量

t——时间

导体作切割磁感线运动时产生的动生电动势为

$$E = -BLv\sin\theta \tag{2}$$

式中 B——磁感应强度

L——导体长度

v——切割磁感线运动速度

θ——磁感应强度方向和切割磁感线运动速度方向的夹角

对于本装置而言，其电磁部分的运动为转子永磁体相对定子线圈作旋转运动。导体所在的磁场强度不变，导体有效部分作切割磁感线运动，从而产生动生感应电动势。选取多匝线圈中的一匝对其进行感应电动势的分析。如图 3 所示，由于不同位置的磁场差异，一根导体不同半径处的磁场强度也存在差异性，这种差异由极角决定。此外，由于不同半径处导体切割磁感线的速度不同，导体不同半径处产生的感应电动势也不同。

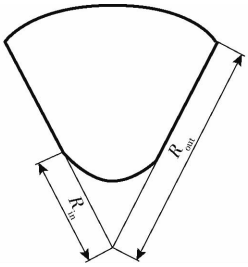


图 3　单根导体尺寸示意图

Fig. 3　Diagram of single conductor size

当永磁体旋转角速度为 ω 时，第 i 根导体切割磁感线的线速度为

$$v_i = \omega r \tag{3}$$

式中　r——导体半径

则第 i 根导体产生的平均感应电动势 e_i 为

$$e_i = \omega K_F B_\delta \frac{\int_{R_{in}}^{R_{out}} r\mathrm{d}r}{R_{out} - R_{in}} = \frac{1}{2}\omega K_F B_\delta (R_{out} + R_{in}) \tag{4}$$

式中　K_F——气隙磁密分布因数

B_δ——在极角 δ 下平均半径处气隙磁密

R_{out}——导体外径

R_{in}——导体内径

由于各层线圈与永磁体的距离不同，因此各层线圈处的磁感应强度也有所不同，故 n 层单相线圈所产生的感应电动势为

$$E_p = \frac{1}{2} mN\omega \sum_{j=1}^{n} K_F B_j (R_{out} + R_{in}) \tag{5}$$

式中　m——单相绕组槽数

B_j——第 j 层线圈平均半径处气隙磁密

综合上述分析，对感应电动势具有直接影响的因素包括转子转速、绕组匝数、磁感应强度和绕组尺寸等，感应电动势和转速成正比例关系。在设计过程中，需要尽可能增大其磁感应强度及磁通变化率等，同时降低内部阻抗以保证其具有较高的输出性能，确保装置在有限的体积内有足够的输出电压为后端电路供电，以实现自供电传感器的功能。

2　关键参数设计与优化

2.1　转子

永磁体的材料对装置的性能有非常大的影响，目前常用的永磁体材料主要有铝钴镍、铁氧体、钐钴和钕铁硼等[13]。其中钕铁硼凭借其剩余磁感应强度高、矫顽力大以及最大磁积能高的优点得到了广泛的应用[14]。永磁体厚度越大，气隙中的磁通密度越大，装置的输出性能越强。但是永磁体厚度过大会造成装置体积和重量过大，因此综合考虑气隙磁通密度及尺寸等因素，选用厚度为 5 mm 的 N52 型钕铁硼永磁体。

Halbach 阵列将永磁体单元按照特殊的排列方式排列，可以显著增大一侧的磁场强度，用相同数量的永磁体产生更强的磁场[15-16]。这种结构还有利于获得更为理想的正弦分布磁场，提高装置的性能。如图 4 所示，Halbach 阵列根据相邻两块磁体充磁方向的不同，可以分为 90°、60°和 45°共 3 种结构。永磁体的充磁方向对于整体的磁通密度分布具有重要影响，角度越小，阵列中的主磁通越多，磁通密度的正弦性更好，但是其制作和装配的难度也更大。本文中转子永磁体按照 90°圆环形 Halbach 阵列排列。

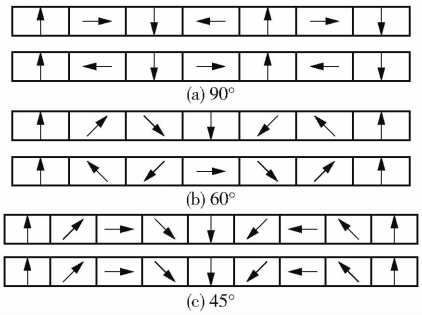


图 4　Halbach 阵列原理图

Fig. 4　Schematics of Halbach array

通过有限元仿真可以直观获取永磁体排列方式对装置输出性能的影响。分别建立 Halbach 阵列和普通轴向磁通阵列的模型(图 5)，每个阵列安装有 16 枚扇形永磁体，永磁体内径为 20 mm，外径为 46 mm。对使用两种磁通阵列装置的开路电压输出进行仿真分析，结果如图 6 所示。Halbach 阵列的开路电压峰值约为 1 400 mV，而普通轴向磁通阵列的开路电压峰值约为 330 mV。可以看出，Halbach 阵列相较于普通轴向磁通阵列明显输出电压更高，并且波形更加平滑，正弦性更好。但由于 Halbach 阵列分为主磁极和副磁极两部分，副磁极仅起到辅助作用，故相较于普通轴向磁通阵列，Halbach 阵列的

频率较低。

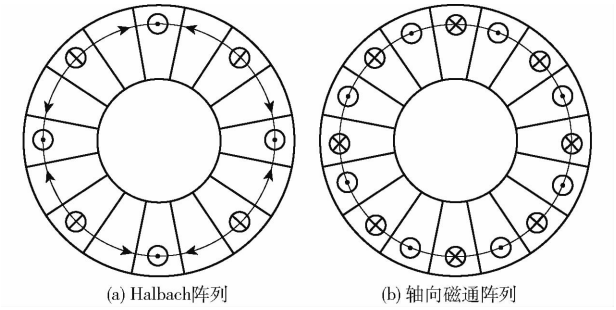


图 5 不同磁体阵列仿真模型

Fig. 5 Simulation models of different magnet arrays

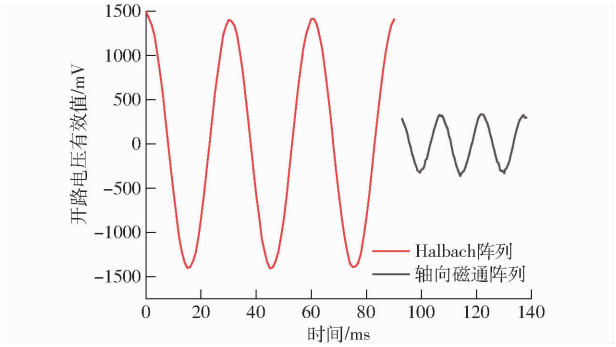


图 6 不同磁体阵列仿真结果

Fig. 6 Simulation results of different magnet arrays

转子背铁选用便于表贴式磁体安装的硅钢材料,由于 Halbach 阵列背铁一侧的磁通密度很低,背铁的导磁作用并不明显,因此可以选用较小的厚度。确定背铁厚度为 3 mm,以降低装置整体的体积和质量。

2.2 定子

PCB 电路板的应用,有效地利用了气隙空间,降低了装置的轴向尺寸。与传统绕组相比,印制绕组散热面积更大、导热性更好,因此可以通过合理的尺寸参数设计增大绕组的承载能力,以增强装置的输出性能[17-19]。

定子绕组根据线圈的连接方式可以分为波形绕组和螺旋形绕组两种结构[20],本装置采用效率较高的螺旋形绕组,在设计过程中通过减少中心区域面积和增加绕组匝数的方式增大磁通面积。

螺旋形绕组主要有图 7 所示的圆形、菱形、梯形和混合形 4 种[21]。其中混合形绕组综合了梯形绕组与圆形绕组的特点,其径向采用梯形绕组的形式,有效利用了 PCB 板的径向空间,同时端部采用圆形绕组的设计,减小了端部绕组的长度,降低了线圈铜损,具有更好的输出性能,在实际中得到了广泛的应用[22-23]。因此本文采用混合形螺旋绕组。

线圈匝数是影响装置输出特性的重要参数,随着匝数的增加,装置开路电压也会增加,但是线圈的内阻也随之增大,故需分析线圈匝数对装置输出性能的影响。建立了单相单层匝数分别为 8、9、10 的 3 种不同仿真模型,在不同转速下对其进行瞬态场仿真,结果如图 8 所示。随着线圈匝数的增加,装置的开路电压也呈增加的趋势,考虑到 PCB 板面积和加工工艺的限制,确定单相单层线圈匝数为 10 匝。

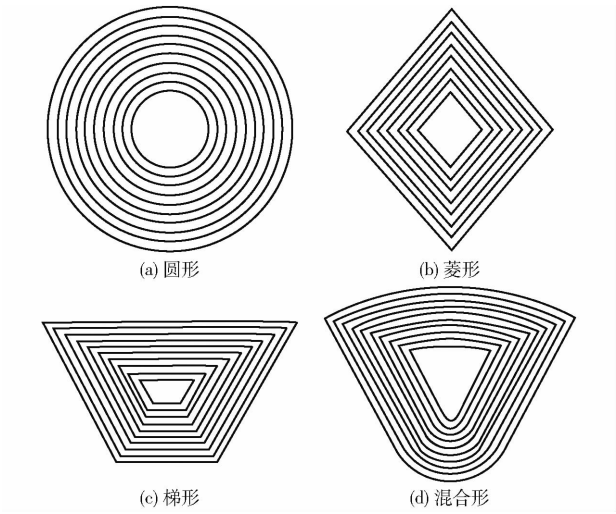


图 7 4 种不同印制绕组构型

Fig. 7 Four different printed winding configurations

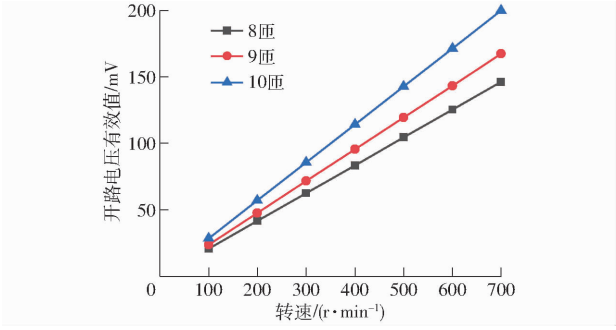


图 8 不同线圈匝数仿真结果

Fig. 8 Simulation results of different coil turns

2.3 转、定子匹配设计与仿真优化

装置的气隙是指转子和定子之间的空隙,较小的气隙可以保证定子线圈处具有较大的磁通密度,有利于提高装置输出性能。但是 PCB 板在实际加工过程中会产生翘曲的问题。此外,Halbach 永磁体阵列在装配过程中由于磁体间的相互排斥和装配精度的问题,表面会出现凹凸不平的状况。因此装置的气隙需要适当增大,不能无限制缩小。

为了进一步明确气隙对装置输出性能的影响,分别建立了气隙长度为 0.6、0.8、1.0、1.2 mm 的 4 种仿真模型,在不同转速条件下对装置的开路电压进行仿真分析,结果如图 9 所示。线圈的开路电压输出随气隙长度的增加而下降,但由于 0.6 mm 气隙长度在实际装配中存在较大困难,最终确定装置

的气隙长度为 0.8 mm。

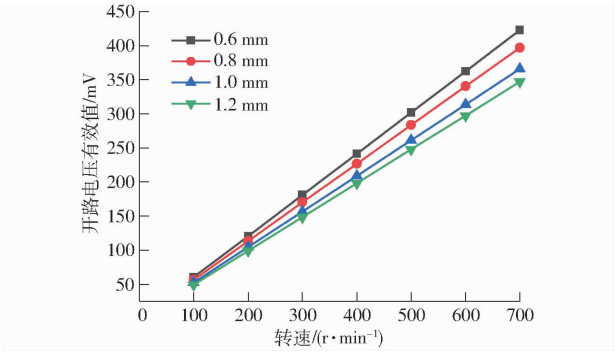


图 9　不同气隙长度仿真结果

Fig. 9　Simulation results of different air gaps

转子永磁体极数和定子绕组槽数相互配合，应满足极数与槽数不能相等的要求，定子绕组也应当尽量均匀分布。增加转子永磁体极数可以提高磁通量变化率，但是如果极对数过高，单枚永磁体的尺寸将会过小，这对永磁体的加工工艺及制作成本提出了更高的要求，故最终确定永磁体极对数为 4，单个转子由 16 枚永磁体组成，单枚永磁体两边夹角为 22.5°。

根据前文确定的参数，建立整机仿真模型，对整机性能进行仿真分析。首先对装置模型进行稳态场分析，装置的磁场分布如图 10a 所示。永磁体表面最大磁感应强度约为 1.44 T，线圈处最大磁感应强度约为 0.64 T。随后对装置进行瞬态场分析，计算其不同转速下的开路电压输出，波形和峰值结果如图 10b 所示。在较低转速下，装置即可产生较高的输出。随着转速的增加，装置的开路电压峰值呈线性增加的趋势，与理论推导相符。

2.4　后端电路设计

由于装置电磁部分的输出为三相交流电，无法直接为后端电路供电，因此需要对其进行整流处理。三相桥式全波整流电路具有输出电压脉动小、易滤波的特点，适用于整流负载容量较大和要求快速控制的场合。选取 SS34 型肖特基二极管，同时外接电容为 220 μF、耐压为 50 V 的滤波电容，以减小输出电压的脉动。

装置输出的电压会随转速的增加而增加，为使其能为后续电路供电而不致因电压过大造成元件损坏，需要设计降压及稳压电路。选用 LT8609 同步降压稳压芯片，其具有 3～42 V 的宽电压输入范围，可以提供 3.3 V 的固定输出。为保证供电电压的稳定，以 TPS78233 芯片为核心搭建稳压电路，减小电压的波动。

使用分压法对装置经过整流后的直流输出电压进行测量，其优点在于可以最大程度地简化电路结构。选用 nRF52832 低功耗蓝牙芯片读取电压数据并在经过内部处理后通过无线传输发送到接收端手机 APP 中，从而实现转速测量和信号传输的功能。该蓝牙芯片是一款超低功耗 SoC，具有强大的运算能力。蓝牙电路原理图如图 11 所示。

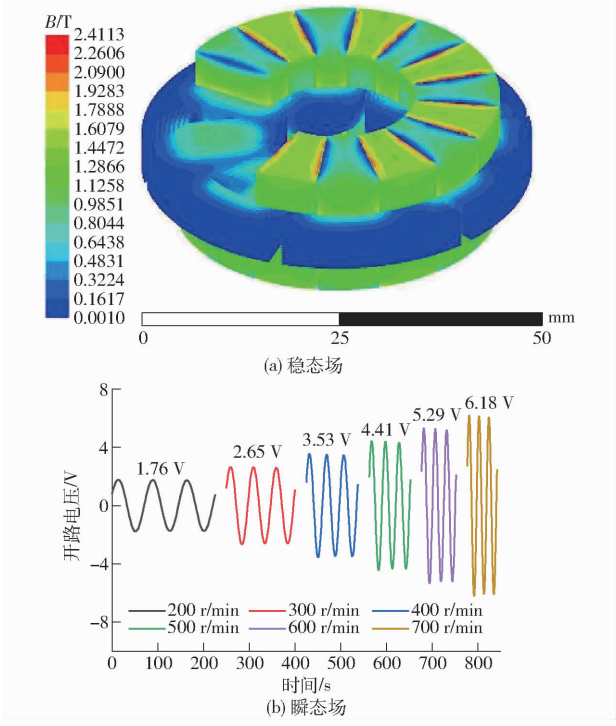


图 10　装置总成仿真结果

Fig. 10　Simulation results of device

3　试验测试与结果分析

3.1　台架标定测试

为测试转速传感器电磁部分的输出特性，搭建如图 12a 所示的试验台架对其不同转速下的输出性能进行测试。试验台架主要由光学平台、步进电机、步进电机控制器、转速传感器、万用表等组成。步进电机和转速传感器通过 3D 打印制作的底座固定在光学平台上，由步进电机控制器控制步进电机以不同的转速带动样机旋转，以获得转速传感器样机在不同转速下的输出电压数据。

使用三相全桥整流电路将装置输出的三相交流电转化为直流电。对装置在转速 0～2 000 r/min 下的直流输出电压进行测试记录，使用数据处理软件对测得的数据进行线性拟合处理，可以得到电压与转速之间的线性关系。为提高拟合精度，测量点的选取应尽可能密集。如图 12b 所示，当转速为 400 r/min 时，装置的直流电压输出可以达到 3.16 V，拟合直线的决定系数 R^2 为 0.999 91，标准误差为 0.154 75，拟合结果精度较高。

为测试转速传感器在实际工作时的测量精度，

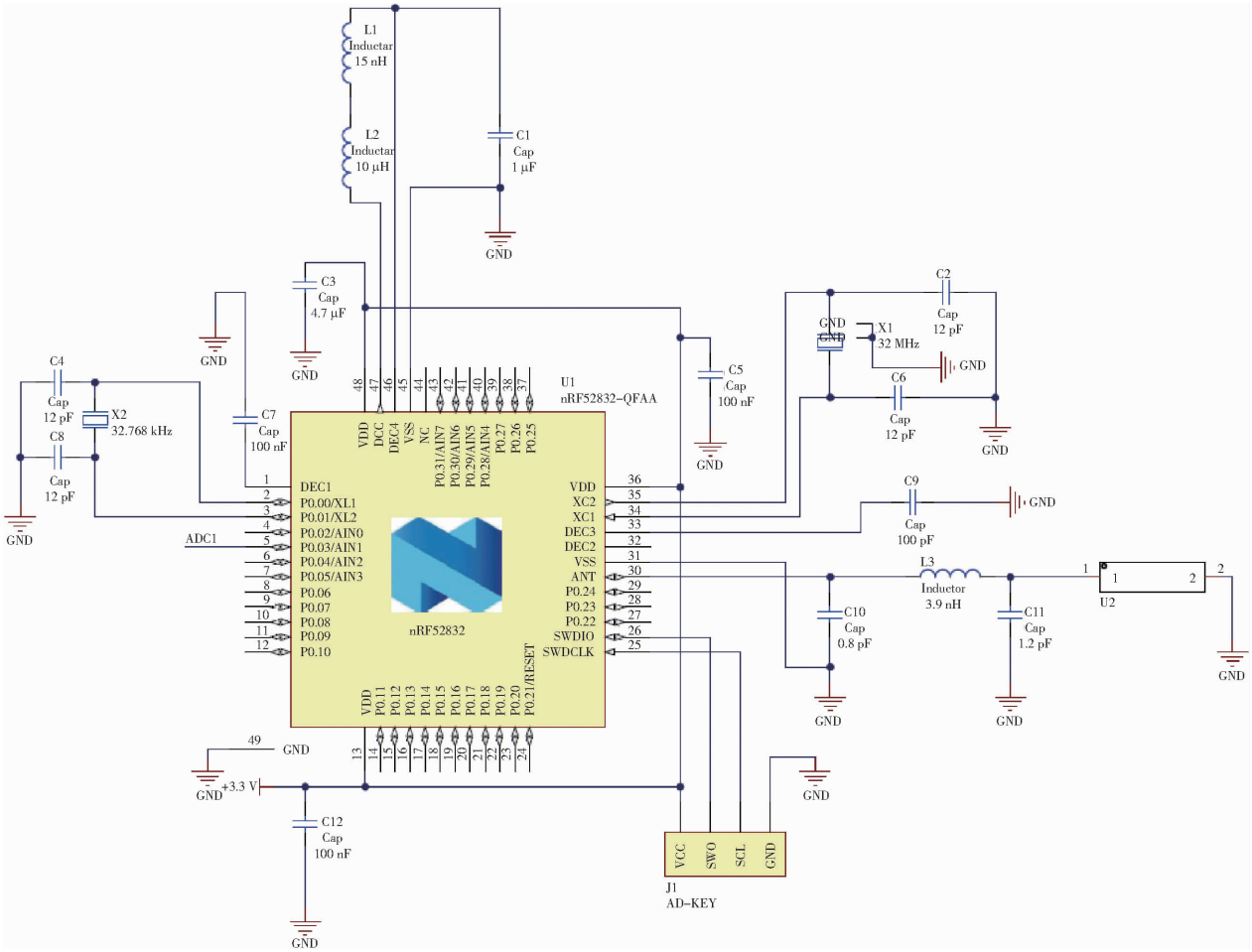
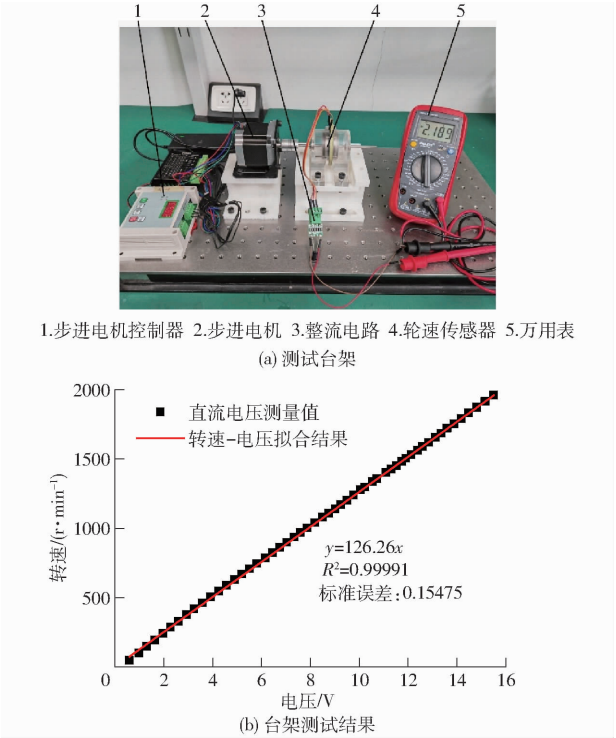


图 11 蓝牙电路原理图

Fig. 11 Bluetooth circuit schematic

将商用编码器同轴安装在装置后端,测量其工作时的实际转速。使用步进电机带动装置和编码器在不同转速下同步转动,将装置和编码器测量的转速数据进行对比。由图 13 可以看出,在由低到高的 4 种不同转速工况下,转速传感器测量结果精度均较高,相对误差基本保持在 1% 以内。



1.步进电机控制器 2.步进电机 3.整流电路 4.轮速传感器 5.万用表

(a) 测试台架

(b) 台架测试结果

图 12 测试台架及测试结果

Fig. 12 Test bench and results

3.2 实车场景试验

以某型四轮拖拉机(11.03 kW)作为试验平台,在拖拉机右后轮处安装测试系统,对其行驶过程中的车轮转速进行测量。为保证装置有足够的输出电压为电路供电,需在车轮处安装增速机构以实现较高的转速输出。车轮中心处通过定制连接件和法兰联轴器与行星齿轮增速器连接,行星齿轮增速器的增速比为 71,车轮处的大扭矩输出可以满足增速机构的机械输入端的要求。增速器的输出端与装置的传动轴同轴连接,装置的外壳与铝合金底座用螺栓固定。编码器通过联轴器同轴安装在装置后端。铝合金底座与车身壳体通过连杆固定,防止其随车轮一起转动。拖拉机实车测试平台如图 14 所示。

分别测试拖拉机在低速 1 挡(1.25 km/h)、低速 2 挡(1.42 km/h)、低速 3 挡(2.15 km/h)和高速

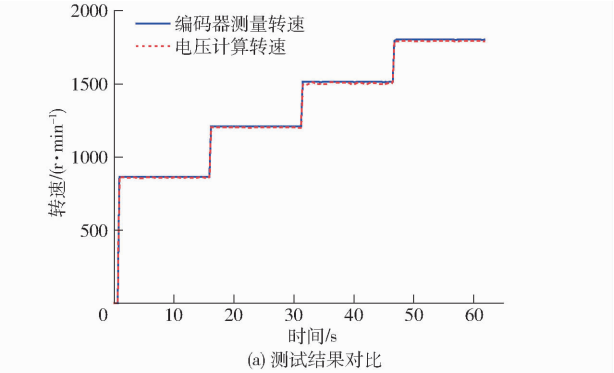


图 13　不同转速下性能测试结果

Fig. 13　Performance test results at different speeds



图 14　实车测试平台

Fig. 14　Actual vehicle testing platform

1 挡(3.72 km/h)、高速 2 挡(6.00 km/h)、高速 3 挡(8.18 km/h)6 个挡位下使用离合怠速行驶时的 6 种工况的数据。由图 15 可以看出,在拖拉机以不同的速度行驶过程中,由于拖拉机在行驶时会产生较大的抖动,以及路面不平等因素影响,车轮转速会产生较大的波动,导致装置的测量误差比台架试验时偏大。但整体上看,装置在不同车速工况下都实现了正常工作并保持了较高的响应速度和测量精度,具有较宽的适用范围,在绝大部分情况下测量误差都在 5% 以内,可以满足实际使用需求。

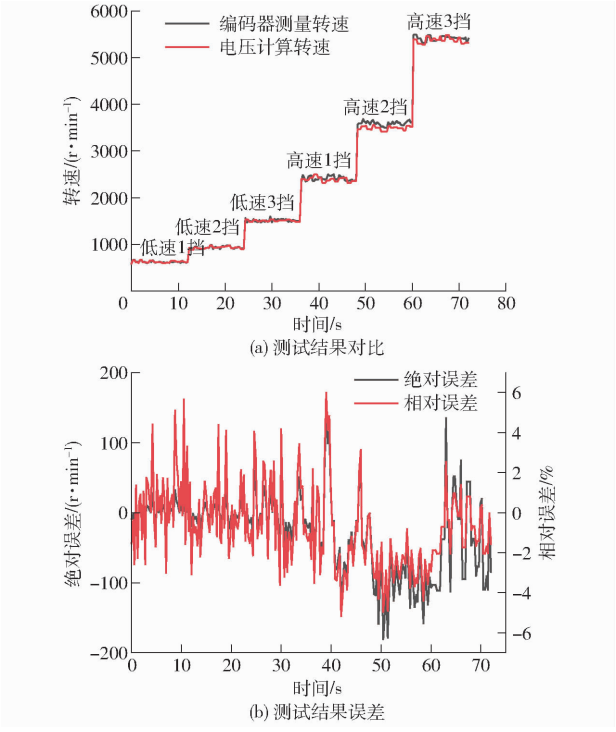


图 15　实车测试结果

Fig. 15　Results of actual vehicle testing

4　结论

(1)设计了一种用于拖拉机车轮处的电磁式自供电转速传感器,其主要由电磁部分和后端电路两部分组成。电磁部分采用单定子双转子结构,通过应用 Halbach 阵列和 PCB 技术提高装置的输出性能。根据电磁感应定律,对装置的感应电动势进行理论推导,确定影响感应电动势的参数。

(2)通过有限元仿真分析各参数对装置电磁输出性能的影响,确定装置主要结构参数。对装置总成进行稳态场和瞬态场仿真分析,在转速 400 r/min 下,开路线电压峰值可达 3.53 V。装置电压峰值与转速成正比例关系,与理论推导结果相符。对后端电路进行设计,实现整流、信号检测和传输功能,并由装置电磁部分直接供电,达到自供电的效果。

(3)搭建室内测试台架和拖拉机实车测试平台,进行试验测试。对装置电压输出进行测试,将装置的转速和电压进行线性拟合,决定系数 R^2 达到 0.999 91,转速 400 r/min 下整流后的直流电压输出可达 3.16 V,满足为后端电路供电的使用需求。台架和实车性能测试结果表明,装置在不同工况、不同转速下均有较高的测量精度,台架试验误差基本保持在 1% 以内,实车试验误差基本保持在 5% 以内,装置性能可以满足实际使用要求。

参　考　文　献

[1]　韩瑞瑞,张燠诗,赵洲,等. 基于环境微能量的农田无线传感器自供电技术研究[J]. 物联网技术,2021,11(10):80 - 82.

[2] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2022,53(4):1 - 20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):1 - 20. (in Chinese)
[3] 吉喆. 基于环境能量采集的传感器自供电技术研究[D]. 南昌:南昌大学,2021.
JI Zhe. Research of self-powered technology on sensor based on ambient energy harvesting[D]. Nanchang: Nanchang University,2021. (in Chinese)
[4] 侯文驰,唐晓龙,方林,等. 基于摩擦纳米发电机的向量转速传感器[J]. 微纳电子技术,2022,59(10):1066 - 1071,1080.
HOU Wenchi, TANG Xiaolong, FANG Lin, et al. Vector rotational speed sensor based on triboelectric nanogenerator[J]. Micronanoelectronic Technology,2022,59(10):1066 - 1071,1080. (in Chinese)
[5] 吴志东,房俊龙,孙培栋,等. 基于压电的传感器自供电系统设计方法[J]. 北京理工大学学报,2020,40(12):1347 - 1355.
WU Zhidong, FANG Junlong, SUN Peidong, et al. Design method of sensor self-powered system based on piezoelectricity[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2020,40(12):1347 - 1355. (in Chinese)
[6] 刘超然,王益哨,方灵星,等. 基于摩擦发电的自供电加速度传感器实验设计及应用[J]. 实验技术与管理,2020,37(11):116 - 119,124.
LIU Chaoran, WANG Yishao, FANG Lingxing, et al. Experimental design and application of self-powered acceleration sensor based on friction power generation[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(11): 116 - 119, 124. (in Chinese)
[7] 杨红梅. 基于摩擦纳米发电和电磁发电技术的机械能转换和自供电系统的研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
YANG Hongmei. Mechanical energy conversion and self-powered system investigation based on triboelectric nanogenerator and electromagnetic generator[D]. Chongqing: Chongqing University,2021. (in Chinese)
[8] TAQAVI O, MIRIMANI S M. Design aspects, winding arrangements and applications of printed circuit board motors: a comprehensive review[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(9):1505 - 1518.
[9] WANG Xiaoyuan, LI Xiang, LI Chunpeng, et al. Design of a PCB stator coreless axial flux permanent magnet synchronous motor based on a novel topology Halbach array[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019(3): 414 - 424.
[10] 李欣玉,梁品. 轮速传感器概述及可靠性测试方法研究[J]. 汽车电器,2016(8):55 - 57.
LI Xinyu, LIANG Pin. Study on wheel speed sensor and reliability testing methods[J]. Auto Electric Parts,2016(8):55 - 57. (in Chinese)
[11] 黄旭东. 高频供电条件下的 PCB 定子盘式永磁电机绕组优化设计[D]. 天津:天津大学,2021.
HUANG Xundong. Optimal design of winding with PCB staor of permanent magnet motor based on high frequency[D]. Tianjin: Tianjin University,2021. (in Chinese)
[12] 卢怀东. PCB 定子盘式永磁同步电机的优化设计[D]. 天津:天津大学,2018.
LU Huaidong. Design optimization of winding for disc-type permanent magnet synchronous motor with PCB stator[D]. Tianjin: Tianjin University,2018. (in Chinese)
[13] 庞炜. PCB 盘式无铁心永磁同步电机绕组设计及转子磁钢优化[D]. 天津:天津大学,2019.
PANG Wei. Winding design and magnetic steel optimization of coreless axial flux permanent magnet synchronous motor with PCB stator[D]. Tianjin: Tianjin University,2019. (in Chinese)
[14] MARIGNETTI F, VOLPE G, MIRIMANI S M, et al. Electromagnetic design and modeling of a two phase axial flux printed circuit board motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018,65(1):67 - 76.
[15] NEETHU S, SAURABH P N, SAUMITRA P, et al. Performance comparison between PCB-stator and laminated-core-stator-based designs of axial flux permanent magnet motors for high-speed low-power applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7):5269 - 5277.
[16] 夏加宽,李响,冯小雪,等. 应用新型 Halbach 阵列的 PCB 定子轴向磁通永磁电机性能分析[J]. 微电机,2020,53(11):7 - 12.
XIA Jiakuan, LI Xiang, FENG Xiaoxue, et al. Performances analysis of PCB stator for axial flux permanent magnet synchronous motor base on a novel topology Halbach array[J]. Micromotors,2020,53(11):7 - 12. (in Chinese)
[17] GAMBETTA D, AHFOCK A. Designing printed circuit stators for brushless permanent magnet motors[J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(5):482 - 490.
[18] NEETHU S, NIKAM S, SINGH S, et al. High-speed coreless axial-flux permanent-magnet motor with printed circuit board winding[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2):1954 - 1962.
[19] 孙杨. 轴向磁场印制绕组永磁无刷直流同步电机的设计研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.
SUN Yang. Study and analysis of coreless axial flux permanent magnet (AFPM) machine with PCB windings[D]. Beijing: China University of Mining and Technology,2019. (in Chinese)
[20] NEETHU S, NIKAM S P, FERNANDES B G, et al. Multiphysics analysis of printed circuit board winding for high-speed AFPM motor[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(6):805 - 811.
[21] 王晓远,李响,庞炜,等. PCB 定子无铁心盘式电机分布式绕组的对比分析[J]. 电机与控制学报,2018,22(11):11 - 18.
WANG Xiaoyuan, LI Xiang, PANG Wei, et al. Comparative analysis of distributed winding for PCB stator coreless axial flux permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control,2018,22(11):11 - 18. (in Chinese)
[22] FRANÇOIS G, DEHEZ B. Impact of slit configuration on eddy current and supply current losses in PCB winding of slotless PM machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6035 - 6044.
[23] 南献茹. 基于 PCB 绕组的永磁无刷电机有限元仿真[D]. 济南:山东大学,2019.
NAN Xianru. Finite element simulation of permanent magnet brushless motor based on PCB winding[D]. Ji'nan: Shandong University,2019. (in Chinese)