DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.275 **中图分类号**：TM724 **文献标志码**：A

电机定转子间电场耦合式无线信号传输方法及电路设计

崔学深(中国电源学会会员)，郎川淏，李天伯，潘炜烽，李 军
(华北电力大学电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要：采集电机转子侧的电流、温度等参数，可以有效预防电机的转子侧故障，更好地实现电机的矢量控制。但运行中的电机转子是高速旋转的，将转子侧测量得到的信号提供给定子侧的控制器十分困难。所提出的电场耦合式无线信号传输技术将2对轴向正对的圆环形平行板构成电容器，分别安装于电机端部的定、转子两侧，并利用近距离极板电容的高频低阻抗特性将数字信号传递于电机定转子间，且信号延迟明显低于其他无线通信技术。进一步对通信电路进行建模，计算各元件的参数，分析信号畸变的原因，实现了基于平行板耦合电容的无接触式高频信号传输电路的设计。搭建实验平台，采集并传输转子侧的模拟量信号，并通过对比实验结果验证了通信理论的正确性。

关键词：电机控制与故障检测；电场耦合；平行板电容；无线信号传输

Wireless Signal Transmission Method and Circuit Design for Electric Field Coupling Between Motor Stator and Rotor

CUI Xueshen, *Member*, *CPSS*, LANG Chuanhao, LI Tianbo, PAN Weifeng, LI Jun
(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Collecting parameters such as current and temperature on the motor rotor can effectively prevent rotor side faults and achieve motor vector control better. However, the running rotor rotates at high speed, making it very difficult to provide the signal measured on the rotor side to the controller on the stator side. The electric field coupling wireless signal transmission technology consists of two pairs of axially aligned circular parallel plates forming capacitors, which are installed on both sides of the stator and rotor at the end of the motor. High-frequency and low impedance characteristics of the close-range plate capacitors are utilized to transmit digital signals between the motor stator and rotor, with significantly lower signal delay than other wireless communication technologies. Then modeled the communication circuit, calculated the parameters of each component, analyzed the causes of signal distortion, and the design of a contactless high-frequency signal transmission circuit based on parallel plate coupling capacitors was realized. An experimental platform was built, analog signals from the rotor side were collected and transmitted. By comparing the experimental results, the correctness of communication theory was verified.

Keywords: Motor control and fault detection; electric field coupling; parallel plate capacitor; wireless signal transmission

如今，异步电机在各个领域都有着广泛的应用。在异步电机的运行控制与故障分析的过程中，需要在定子侧对转子侧的参数进行测量与计算。以鼠笼型异步电机为例，在其转子侧发生故障期间通过定子侧测量的信息间接进行故障检测与诊断较为困难，若能在电机运行过程中将采集的转子侧电流和温度等信号通过无线通信传递出，就可以更直观、简洁、快速、准确地实现对转子断条故障、转子过温以及气隙偏心故障等电机转子侧故障的预警[1-2]。绕线式异步电机可以使用电刷滑环在定子侧测量转子绕组的电压/电流，但无法传递转子

收稿日期：2024-08-15；**修回日期**：2024-09-12；**录用日期**：2024-09-29；**网络首发日期**：2024-11-15

温度信号，且电刷滑环不仅维护成本较高，还存在产生电火花等诸多安全隐患。对于级联式无刷双馈电机，在其矢量控制中，如果能够通过无线通信实现定转子间各参数的采样与传输，就可以进一步提升控制性能，有效抑制转子过流等问题[3]。

现阶段，较为成熟的无线通信方式包括蓝牙通信技术、射频识别技术、ZigBee 等，它们均具有成本低、传输速度快等优点，故在多种场合得到广泛应用[4]。但是，在电机运行过程中，因转子旋转而产生的磁场以及一些恶劣的自然环境会对通信的稳定性造成干扰，同时，对于电机控制与故障检测，由于转子电流以较高的频率交变，因此需要实时准确地检测转子电流参数，才能有效实现电机的矢量控制。上述通信方式均具有毫秒级的延迟，且不能满足数据传输快速性的要求。

电场耦合式无线电能传输 EC-WPT(electric-field coupling wireless power transfer)技术，具有结构简单、成本低、耦合机构质量小、无涡流损耗等优点，是一种基于平行板电容器实现高频电能无接触式近距离高速传递的电能传输手段和适用性广、性能优良的电能传输方式[5-6]。本文将 EC-WPT 技术应用于无线通信领域，设计一种电场耦合式无线信号传输电路，通过平行板电容器实现固定部件与旋转部件间的高频数字信号传输。将圆环形平行板电容器的一侧极板安装于电机定子侧；另一侧安装于转子侧，随转子旋转。工作时，转子侧的信号采样装置将采集到的电流、温度等模拟量参数转化为数字量信号并发出，信号发射端的耦合电容极板在由高、低电平组成的数字电压信号的影响下产生快速交变的正、负电荷，在电容极板间耦合电场的作用下使得接收端的电容极板感应出与接收端极性相反的感应电荷，进而改变接收端电容板的电位，继而于接收侧读取高、低电平信号并解码。当数字信号的波特率足够高时，电容的容抗很小，此时等效于数字信号以有线通信的方式从电机转子侧传输到电机定子侧，具有较低的延迟与较高的准确性。

文献[7]实现了电场耦合式的电能信号并行传输，相比于发展较为成熟的以磁场为介质的耦合式信号传输，电场耦合系统具有较好的收敛性，可以将大部分的电场局限于耦合极板之间，损耗较低、抗干扰能力较强，从而可以有效克服电机运行过程中带来的电磁干扰等问题，大幅提高数据的准确性。由于电容的充放电速度很快，一般为纳秒级，因此，这种通信方式延迟很低，可以保证信号传输的快速性[7-9]。但是，由于电容的容值较小，信号发射端与接收端不共地，会产生电压振荡，同时，阻容电路会使方波信号发生畸变，进而影响信号传输的准确性。

本文基于传统的 EC-WPT 电路进行改进，去除了补偿网络部分，避免了因谐振导致的传输失准与效率降低等问题，使得传输信号更可靠。首先选择合适的单片机与通信协议，并基于差分信号理论，实现对电压、电流等信号的采样和无线传输；然后分析信号畸变的原因，改进信号传输的电路图，合理优化电路参数，以削弱传输过程中波形畸变等因素带来的干扰，保证数据传递的快速性与准确性；最后进行实验验证，为电机运行过程中的功率控制与故障检测等提供新思路。

1 总体设计

电场耦合式无线信号传输示意如图 1 所示。

1.1 平行板电容的设计

电容极板及整体安装示意如图 2 所示，其中，图 2(a)为电场耦合式无线信号传出于绕线式异步电机上的安装示意，图 2(b)为图 2(a)的右视图，由图可见，转子侧发送信号的电容极板与包含电流互感器、温度传感器、单片机且高度集成的信号采样发送模块安装于 1 个法兰盘中，法兰盘固定在转子上随转子旋转。在电机运行过程中，法兰盘可以起到屏蔽磁场干扰的作用，保证信号采样发送的准确性与稳定性。图 2(c)为图 2(a)未安装转子侧电容板时的左视图，由图可见，定子侧接收信号的电容极板与信号接收模块固定于电机定子侧，以接收来自转子侧电容板的数字信号。

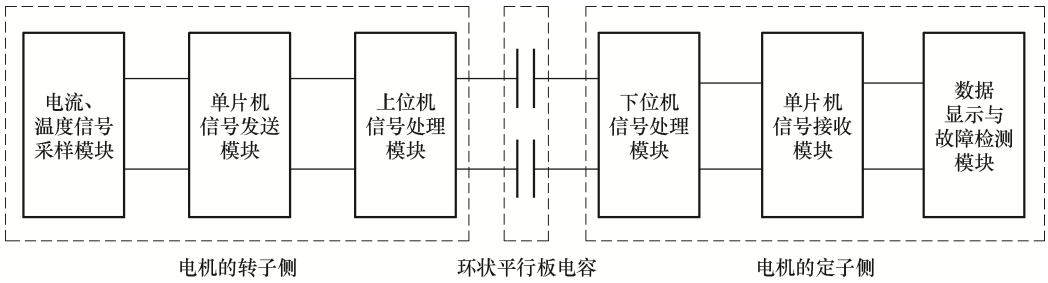
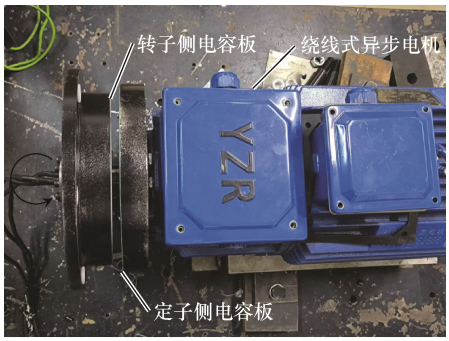
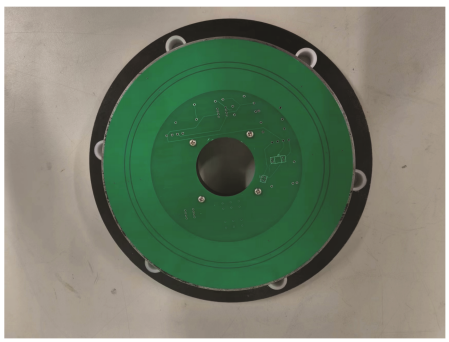


图 1　电机定、转子间电场耦合式无线信号传输示意图

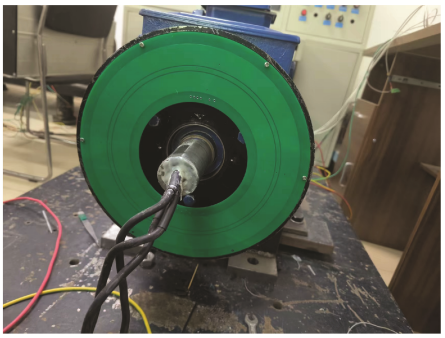
Fig. 1 Schematic diagram of wireless signal transmission based on electric field coupling between motor stator and rotor



(a) 整体安装示意图



(b) 转子侧电容极板



(c) 定子侧电容极板

图 2　电容极板及整体安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of capacitor plates and overall installation

在应用于电机的定、转子无线通信系统中时，电容板的面积不宜过大，否则安装在转子处的电容板旋转时，将会具有较大的转动惯量，还会占用更多的空间，这不仅会增加安装成本，还会使运行稳定性下降、故障率提高。本文选定面积约为 100.53 cm²的 2 对共圆心的环形平行板电容器，如图 2(b)、2(c)所示。使用环形电容板是为了便于安装在电机的转子上。此外，在 2 路传递信号的环形电容之间，还增加了 1 圈面积较小的环形屏蔽电容，目的是将 2 路信号路隔开一定的距离，防止安装时因电容板没有对正使得一路信号的耦合电场对另一路的电场产生干扰，同时，两侧单片机的地和屏蔽电容连接时，还可以减小差分信号的杂波与振荡，提高数据传输的准确性。

在使用时，平行板电容间的距离不宜过远，否则不仅会导致电场损耗增加，还会使得外界干扰更严重，影响数据传输的稳定性；距离也不宜过近，否则将会导致传输过程中的杂波过大，下位机错误地将杂波识别为有效信号导致误码率增加。经试验对比，本文平行板电容的间距选择为 5 cm 效果最佳。

1.2　整体电路的设计

除平行板电容外，通信电路还包括差分信号产生电路、减法运算电路以及迟滞比较电路，整体电路如图 3 所示。其中：差分信号产生电路位于上位机侧(通常位于转子侧)，将转子侧单片机发出的数字信号进行差分放大处理；减法运算电路与迟滞比较电路位于下位机侧(通常位于定子侧)，将经由平行板电容传递出的高频数字信号于电机定子侧进行处理与还原，使得下位机能够正确识别数字信号。

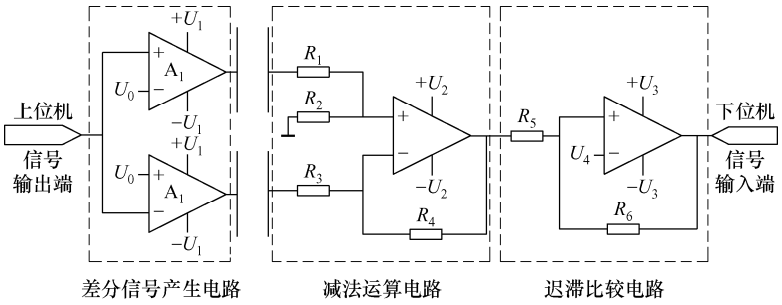


图 3 电场耦合式无线信号传输通信电路图

Fig. 3 Circuit diagram of electric field coupled wireless signal transmission communication

1.3 单片机与通信协议

本文在信号采样和发送的上位机以及信号接收的下位机均选用 STM32F103C8T6(STM32)单片机，在相同主频 f_{PCLK}(STM32 单片机主频为 72 MHz)和波特率 B_{Band} 的情况下，能够保证信号传输和接收的同步性。为减少电容极板的对数，本文选用无需时钟信号的 USART 通信协议。USART 异步通信数据传送方式为按帧传输，从上位机的发送引脚(TxD)以单线通信的方式传输给下位机的接收引脚(RxD)，其中，一帧数据包含起始位、数据位、校验位和停止位[10-11]。此外，上位机与下位机需要设定相同的 B_{Band} 来保障信号的识别，B_{Band} 的计算公式为

$$B_{\mathrm{Band}}=\frac{f_{\mathrm{PCLK}}}{16D_{\mathrm{div}}} \tag{1}$$

式中，D_{div} 为分频系数。为尽可能使用高频率的数字信号以减小电容容抗，选择二分频，根据式(1)可知通信 B_{Band}=2.25 Mbps。

2 电路设计与参数计算

2.1 平行极板间的电容计算

假设一对平行板电容器在输入电压 U 的作用下分别携带+Q 和−Q 的电量，根据平行板电容器的电容公式[12]可知

$$C=\frac{\varepsilon_0 S}{d} \tag{2}$$

式中：ε_0 为真空介电常量，ε_0=8.854 187 17×10^{-12} F/m；S 为耦合电容极板的面积；d 为平行板电容的距离。已知 S=100.53 cm²、d=5 cm，根据式(2)可计算平行板电容的容值约为

$$C_1=\frac{\varepsilon_0 S}{d}=1.780\ 22\times10^{-12}\ \mathrm{F} \tag{3}$$

再结合信息 B_{Band} 与信号长度可得到信号频率 f 的近似值，从而计算出平行板电容的容抗约为

$$X_1=\frac{1}{2\pi f C_1}=3.973\ 415\times10^{4}\ \Omega \tag{4}$$

2.2 差分信号产生电路的参数计算

在通信过程中，上位机和下位机需要将地线连接到一起(即共地)来实现高、低信号的准确识别。在电场耦合式无线信号传输系统中，上位机和下位机的地线通过平行板电容间接耦合到一起。由于平行板电容的容值太小，这种共地方式很不可靠，可近似看作不共地系统，再加上电压振荡，下位机不能有效区分高、低电平信号。

根据上述理论，本文以差分信号作为系统通信信号。差分信号是 1 对高、低电平状态完全相反的电信号，本质上是由同 1 组数据变换极性而来[13]。当 1 对差分信号分别通过 2 对平行板电容器时，所产生的振荡与杂波是相似的，于下位机侧通过减法运算电路对信号做差，即可消除振荡与杂波，实现在不共地的情况下对高、低电位的正确识别。

本文使用集成运算放大器 LT1361 来实现上述功能，其输出特性分为线性区和非线性区两部分。由于集成运算放大器放大的是差模信号，且未通过外电路引入反馈[14]，故当其工作在线性区时，有

$$U_{\text{out}} = A_{\text{od}}(U_{\text{P}} - U_{\text{N}}) \tag{5}$$

式中：U_{out}为输出电压；A_{od}为差模开环电压放大倍数，在 LT1361 中 A_{od}=4.2 V/mV；U_{P}和 U_{N}分别为比较器的正、负端输入电压。将此模块用作电压比较器时，要保证运算放大器工作于非线性区，此时放大器的同相与反向输入端的电流均近似为 0，即“虚断”。电压比较器两端的电压满足

$$\left|U_{\text{P}} - U_{\text{N}}\right| \geqslant \frac{U_{\text{OM}}}{A_{\text{od}}} \tag{6}$$

式中，U_{OM}为运算放大器的输出电压幅值。

本文取 U_0=1.65 V，确保上位机侧 2 路运算放大器可以稳定产生相位相反的差分信号，并于下位机侧使用图 3 所示的减法运算电路对信号做差。当 R_1=R_2=R_3=R_4 时，减法器的输出电压即可满足 U_{out}=U_{12}−U_{11}，其中，R_1、R_2、R_3、R_4 为各个器件对应的电阻，U_{12}、U_{11}为各个器件对应的电压。

2.3 系统延迟计算

整个系统的通信延迟主要来自比较器的输出延迟和电容的充放电时间。比较器输出延时 t_{R}的表达式为

$$t_{\text{R}} = t_{\text{SR}} + t_{\text{r}} + t_{\text{f}} + t_{\text{s}} \tag{7}$$

式中：t_{SR}为比较器的转换时间，是比较器输出电压与转换速率的比值，根据 LT1361 比较器的参数可知，其转换速率为 0.35 V/ns、输出电压幅值为±5 V；t_{r}、t_{f}、t_{s}分别为比较器的上升时间、下降时间、建立时间，查阅手册后代入式(7)可得

$$t_{\text{R}} = \frac{5}{0.35} + 4.3 + 4.3 + 65 = 87.885\,7 \text{ ns} \tag{8}$$

对于 RC 电路，电容的充电电压 U_t随时间变化的公式为

$$U_t = U_0[1 - \text{e}^{(-t/RC)}] \tag{9}$$

式中：U_0为目标充电电压；R、C 分别为电路中的电阻、电容。理论上，电容充满电的时间趋近于无穷，当 t=5RC 时，U_t=0.99U_0，可近似认为电容已充满，放电过程同理[15]。因此电容的充放电总延时 t_C为

$$t_C = 10RC = 44.505\,5 \text{ ns} \tag{10}$$

在本线路中，信号需要通过 3 个比较器与 1 个平行板电容，则通信系统的最高延时 t_{n}约为

$$t_{\text{n}} = t_C + 3t_{\text{R}} \approx 308.162\,6 \text{ ns} \tag{11}$$

由此可见，电场耦合式无线信号传输相比于其他无线通信方式，延迟明显降低。在电机矢量控制的过程中，IGBT 开关频率与模拟量信号的采样频率一般均为 10 kHz。在以 100 μs 为周期的反馈控制中，这种通信方式完全能够满足电机控制对数据传输的快速性要求。

3　电压畸变的分析与处理

3.1 电压畸变分析

电压信号经上位机差分信号产生电路后，被放大成幅值为±5 V 的矩形方波。假设在某一时刻，电信号由低电平转变为高电平，则在此时间段内的信号 $f(t)$傅里叶分解后的表达式[16]为

$$f(t) = \frac{20}{\pi}\left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \cdots\right] = \frac{20}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1}{2n-1}\right)\sin[(2n-1)\omega t] \tag{12}$$

式中：ω为基波的角频率；n 为谐波次数。平行板电容器属于线性电容的一种，对于第 n 次谐波，电容对其容抗缩小 n 倍。由于平行板电容后连接的是减法器电路，这就使得通信线路的负荷是阻容型的，由 RC 电路相位角公式可知

$$\varphi = -\arctan\frac{X_n}{R_1 // R_2} \tag{13}$$

式中：φ为相位偏移量；X_n为 n 次谐波对应的容抗。随着谐波频率的升高，容抗减小，电阻不变，高次谐波在电容上的压降明显减小。在信号接收侧，高次谐波会出现明显的相位变化，导致方波发生畸变。因此，为了提高信号传输的准确性，通过合理选取减法器电路的输入电阻，将与基频正弦波相位差较小的 3、5 次谐波与基波共同合成方波，相位差较大的高次谐波通过迟滞比较电路消去，保障通信的准确性。本文选取 R_1=5 kΩ，根据减法器参数

可知 R_1=R_2=R_3=R_4，将式(4)代入式(13)并类推可知 1、3、5 次谐波的相位角分别为

$$\begin{cases}\varphi_1=-\arctan\dfrac{X_1}{R_1//R_2}=-86.399^\circ\\ \varphi_3=-\arctan\dfrac{X_3}{R_1//R_2}=-79.311^\circ\\ \varphi_5=-\arctan\dfrac{X_5}{R_1//R_2}=-72.537^\circ\end{cases}\tag{14}$$

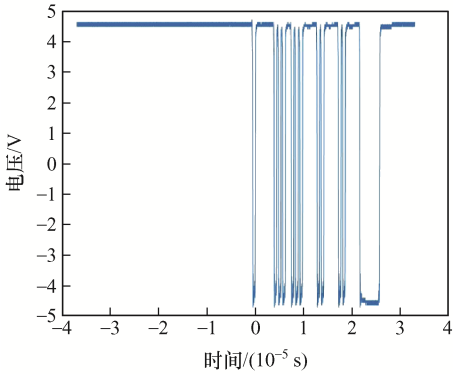
3.2 利用迟滞比较电路的还原

为消除与基频正弦波相位相差较大的高频谐波，在减法运算电路后增加迟滞比较电路。迟滞比较器(又称施密特触发器)，是一种带有滞回特性的比较器，当 U 满足 $U>U_{T1}$ 时，输出电压为正；当 $U<U_{T2}$ 时，输出电压为负，这样就可以消除 U 中幅值较小的高频谐波，其中，U_{T1}、U_{T2} 为迟滞比较器的 2 个门限电压。当参考电压 U_4=0 时，满足

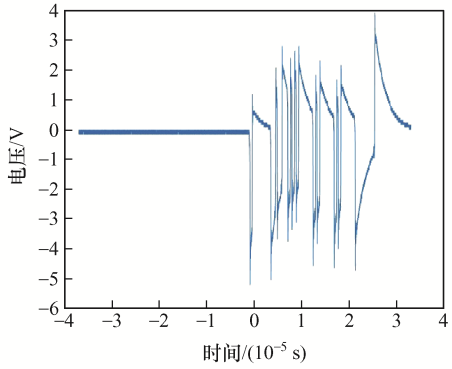
$$\begin{cases}U_{T1}=+\dfrac{R_5}{R_6}U_3\\ U_{T2}=-\dfrac{R_5}{R_6}U_3\end{cases}\tag{15}$$

本文利用迟滞比较器主要消除 7 次及以上的高频谐波，其幅值 U_7=0.909 V，可令 R_5=1 kΩ、R_6=5 kΩ、U_3=5 V，并将其代入式(15)，即可将幅值为 1 V 及以下的谐波全部消除，使得输出波形被整合成为方波。

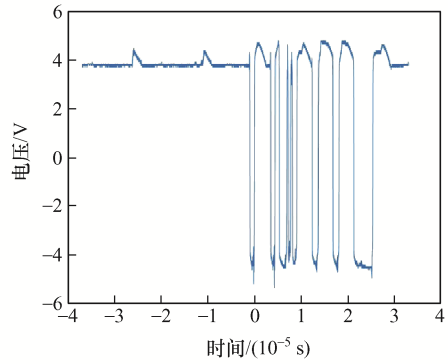
为便于观测波形畸变，在实际通信电路中，由上位机传输 1 组固定的二进制数据，其原始波形与经阻容电路后的畸变波形分别如图 4(a)、4(b)所示，可以直观看出，电压波形经阻容电路发生明显畸变。高频方波信号经处理后最终的波形如图 4(c)所示，可以直观地看出，电压信号在下位机侧被较好地还原。虽然存在毛刺电压，但由于其幅值远小于信号电压，因此，该信号可以有效地被下位机侧的单片机识别。



(a) 原始信号波形



(b) 经阻容电路后的信号畸变波形



(c) 下位机信号还原波形

图 4 数字信号的原始、畸变与还原波形

Fig. 4 Waveforms of original, distorted and restored digital signals

4 数据接收模块与误差分析

4.1 数据接收模块

经迟滞比较器处理后的数字信号低电平的电压为负值，不能够被单片机识别，因此，使用高频整流二极管将小于 0 的电压信号消除，进而将高、低电平的电压范围限制在 0~3.3 V。下位机侧同样使用 STM32 单片机作为信号接收工具，由于单片机内置解码器，具有较高的集成性，因此无需增加额外的电路。为了能够实时观察电流、温度的波形，使用单片机控制 8 位数字模拟转换器 DAC (digital-to-analog converter)模块，将接收到的数字信号波形还原为模拟量信号，并读取 DAC 模块的

输出值，以便直观地对电机的运行故障进行预判。

4.2 误差分析

平行板电容电场的耦合性较好，在近距离传输的情况下几乎没有泄漏。虽然电容的充放电结合迟滞比较器会使得信号波形的宽度略有偏差，但是由于 USART 通信协议对于每一位电平信号均会增加校验位，并根据校验结果中出现较多的电位进行读取，因此，不会对数据准确性产生任何影响。

电流互感器的励磁损耗与温度传感器的阻值变化等因素使得采样环节存在非线性误差，根据数据手册查询其值不超过±0.3%。通信数据是 8 位二进制的数字信号，因此会存在由于分辨率不足而带来的误差，即量化误差。这使得最终接收到的信号由平滑曲线转变为阶梯曲线，进而对数据的准确性造成影响；同时，由于 B_{Band} 较高，对信号的完整性要求较为严格，噪声、温度变化会对信号质量产生干扰，增大误码率。此外，对于高速 ADC，还存在采样抖动、直流失真、时钟抖动、温度漂移等因素造成的干扰，采用最坏情况分析法将所有误差以误差系数δ_1、δ_2、δ_3、δ_4的形式叠加，可计算系统的最大误差δ为

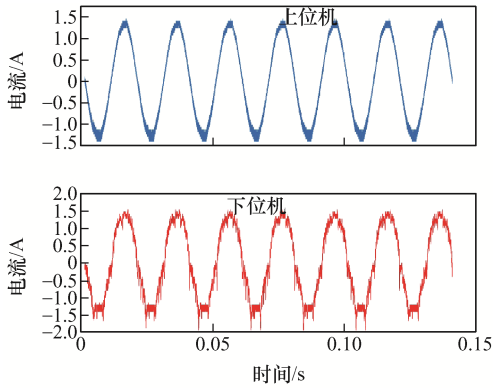
$$\delta = 1-(1-\delta_1)(1-\delta_2)(1-\delta_3)(1-\delta_4) = 2.174\% \tag{16}$$

5　实验及结果分析

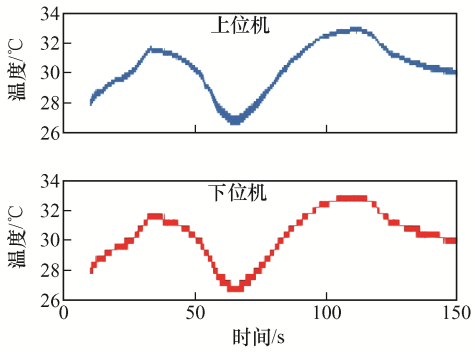
为验证电场耦合式无线信号传输的数据准确性，按照图 2 所示的方式，将正对的环形平行板电容分别安装于电机的定、转子处。于转子侧采集电流与温度信号，并结合电场耦合式无线信号传输电路，在无线通信模式下，将定子处下位机侧接收到的数字信号进行解码处理，还原为模拟量信号波形，实验波形对比如图 5 所示。

通过电刷滑环向转子侧注入频率为 50 Hz 的电流，上位机的电流采样信号与下位机侧测量解码的还原电流信号波形对比如图 5(a)所示，可以看出，还原电流与采样电流的频率、相位以及有效值是一致的，误差在可接受范围内。个别误码可以通过软件低通滤波的方式消除，并且由于在电机运行过程中，如果出现转子侧故障，电流的相位与频率会出现较大的偏差，因此该通信方式可以对转子侧的故障进行灵敏捕捉，实现电机故障的实时监测。

电机故障检测过程中，还需实时采集电机转子侧的温度参数来预防转子过热等问题。使用热敏元件于电机转子侧采集转子温度参数，并以同样的方式传输至定子侧。对比上位机的温度采样波形与下位机的还原波形，如图 5(b)所示，可以看出，此通信方式可以实时准确地反映转子的温度变化。



(a) 上位机采样电流波形与下位机测量解码的电流波形



(b) 上位机温度采样波形与下位机的解码温度还原波形

图 5　无线通信模式下，上位机的采样数据与下位机的解码还原波形对比

Fig. 5 Comparison of sampling data from the upper computer and decoding and restoring waveforms from the lower computer in wireless communication mode

上述结果验证了电场耦合式无线信号传输的通信速度较快、延迟很低、波形还原率较高、误码率较低，同时该通信方式纳秒级的延迟可以满足对数据传输快速性的要求，传输可靠性较高。

6 结论

电场耦合式无线信号传输是一种利用近距离电容极板高频低阻抗特性的无接触式通信方式，在通信速率上其性能接近有线通信，充分保证了信号传输的低延迟性。该通信方式用于电机定转子间时，平行板电容的电场泄露少、抗干扰能力强、各元件成本低，且在电机的故障检测及控制等方面具有良好的适用性。本文设计并改进了电场耦合式无线信号传输电路，结合了差分信号、减法运算电路以增强通信能力，实现了将电机转子侧的信号快速准确地传输到定子侧；通过分析谐波源，并基于阻容电路的相位变化理论及傅里叶分解，对方波信号畸变的原因进行分析，合理设计迟滞比较电路的参数，有效解决了信号传输过程中波形畸变的问题，进一步提高了信号传输的准确性。为验证通信设计的合理性和有效性，基于 STM32F103C8T6 单片机对电压信号进行采样通信实验。对比上位机侧的采集信号与下位机侧的解码还原信号波形，验证了该通信方式具有较低的延迟性和较高的准确性。

这种电场耦合式无线信号传输能够应用于更多旋转部件与静止部件之间的无线通信领域，同时根据应用场景要求还可以实现信号结合能量并行传输，在未来拥有极其广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 李凤琴, 李鹏. 异步电动机故障在线检测及其保护装置的研究[J]. 电子制作, 2020, 28(17): 70-72, 12.
Li Fengqin, Li Peng. Research on on-line fault detection and protection device of asynchronous motor [J]. Practical Electronics, 2020, 28(17): 70-72, 12. (in Chinese)

[2] Zamora Y M, Hernández-Callejo L, Duque-Pérez O, et al. Diagnosis of broken bars in wind turbine squirrel cage induction generator: Approach based on current signal and generative adversarial networks [J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6942.

[3] 姚兴佳, 石磊, 郭庆鼎. 基于模糊控制的无刷双馈电机直接转矩控制[J]. 电源学报, 2011, 9(6): 54-58.
Yao Xingjia, Shi Lei, Guo Qingding. Brushless doubly-fed machine direct torque control based on fuzzy strategy [J]. Journal of Power Supply, 2011, 9(6): 54-58. (in Chinese)

[4] Sharma R, Chopra S R, Gupta A. Power optimization of unmanned aerial vehicle-assisted future wireless communication using hybrid beamforming technique in disaster management [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1285(1): 012025.

[5] 苏玉刚, 邓晨琳, 胡宏晟, 等. 基于电场耦合的电能信号并行传输系统串扰抑制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1613-1626.
Su Yugang, Deng Chenlin, Hu Hongsheng, et al. Crosstalk suppression method for electric-field coupled power and signal parallel transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1613-1626. (in Chinese)

[6] 余江华, 孙岩洲, 韦延方. 电场耦合式无线电能传输系统的功率源设计[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 191-198.
Yu Jianghua, Sun Yanzhou, Wei Yanfang. Design of power source for electric-field coupled wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2): 191-198. (in Chinese)

[7] 周玮. 基于共享通道的电场耦合式电能与信号并行传输技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Zhou Wei. Research on electric-field coupled power and signal parallel transmission technology via a shared channel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

[8] Zhang Liancheng, Tian Zihan, Li Zhaoxuan, et al. Parallel contactless transmission of power and rotor temperature of electrical machines via magnetically-coupled resonance and capacitive radio frequency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4): 3955-3965.

[9] Zhang Zhen, Pang Hongliang, Georgiadis A, et al. Wireless power transfer——an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.

[10] Behseresht S, Love A, Valdez Pastrana O A, et al. Enhancing fused deposition modeling precision with

serial communication-driven closed-loop control and image analysis for fault diagnosis-correction [J]. Materials, 2024, 17(7): 1459.

[11] Dawoud S D, Dawoud P. Serial Communication Protocols and Standards [M]. River Publishers, 2022.

[12] 郑小瑶, 江彦伟, 疏许健, 等. 宇称-时间对称电场耦合无线电能传输系统电场分布特性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 60-66.
Zheng Xiaoyao, Jiang Yanwei, Shu Xujian, et al. Study on electric-field distribution characteristics of parity-time symmetric electric-field coupled wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 60-66. (in Chinese)

[13] Cao Yonggui, Xiao Yin, Chen Wen. Optical analog-signal transmission system in a dynamic and complex scattering environment using binary encoding with a modified differential method [J]. Optics Express, 2023, 31(10): 16882.

[14] Zou Yajie, Liu Hongwei, Liu Yiying, et al. A compact model for carbon nanotube field effect transistors incorporating temperature effects and application for operational amplifier design [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2024, 13(4): 041001.

[15] Hurtado-Gutiérrez R, Tejero Á. Measuring capacitor charge and discharge using an LED and a smartphone [J]. European Journal of Physics, 2023, 44(6): 065201.

[16] 李颖川, 王琛琛, 董志强. 基于傅里叶级数拟合实现的三电平 SHEPWM[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 55-62.
Li Yingchuan, Wang Chenchen, Dong Zhiqiang. Realization of three-level SHEPWM based on Fourier series fitting [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 55-62. (in Chinese)



崔学深

作者简介：

崔学深(1973—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：双馈感应电机及风力发电控制。E-mail：cxs@ncepu.edu.cn。

郎川淏(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电场耦合式无线通信。E-mail：761546330@qq.com。

李天伯(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：双馈电机控制。E-mail：961762447@qq.com。

潘炜烽(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：飞轮储能。E-mail：a704692076@163.com。

李军(1989—)，男，硕士研究生。研究方向：变流器矢量控制。E-mail：lijun19895@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)