

无线电能传输变频控制方法及系统设计

秦庆磊¹, 张昌州¹, 欧世峰²

(1. 烟台大学文经学院, 山东 烟台 264005; 2. 烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 为了应对无线电能传输技术由于系统成本高、传输效率低等原因造成普及速度缓慢的问题, 设计了一种基于变频功率控制的无线电能传输系统, 具有根据负载功率自动调整传输功率, 自动识别接收端并根据负载电流自动进入恒流充电、恒压供电状态。对系统方案及变频功率控制原理进行介绍, 对系统电路实现及元器件选型等关键问题进行说明, 对影响传输效率的因素进行了理论分析和实验测试。通过实验数据, 给出了传输效率与负载功率、线圈间距和谐振频率之间的关系, 验证了使用变频式功率调节对系统传输效率影响较小, 系统方案可行。

关键词: 无线电能传输; 谐振耦合; 电池充电; 变频功率控制; 传输效率; 最佳频率点

Wireless power transmission frequency conversion control method and systematic design

QIN Qinglei¹, ZHANG Changzhou¹, OU Shifeng²

(1. Wenjing College Yantai University of China, Yantai 264005, China; 2. Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In order to deal with the slow popularization speed of wireless power transmission technology caused by high system cost and low transmission efficiency, A wireless power transmission system based on variable frequency power control which can automatically adjust the transmission power according to the load power, can automatically identify the receiving end and can automatically enter the constant current charging state and the constant voltage power supply state according to the load current is designed. The system scheme and the principle of frequency conversion power control is introduced, some key problems of system circuit realization and component selection are explained and theoretical analysis and experimental tests on factors influencing transmission efficiency are conducted. The relationship between transmission efficiency and load power, coil spacing and resonant frequency is concluded based on the analysis of experimental data. That the use of variable frequency power regulation has little impact on the transmission efficiency of the system, and that the system scheme is feasible are verified.

Key words: wireless power point transmission; resonant coupling; battery charging; variable frequency power control; transmission efficiency; optimum frequency point

0 引言

目前, 智能机器人大多使用触点式或直插式接口充电, 但在潮湿、含有易燃易爆气体及水下

等特殊环境下, 传统充电接触方式容易产生的短路、电火花等问题, 而无线电能传输技术作为一种新型的电能传输方式, 传输过程中避免了设备与电网的直接连接, 为特殊环境应用巡检机器

山东省自然科学基金资助项目 (ZR2017MF008)

人、水下机器人、安防机器人和无人机等智能设备的电池充电应用提供了新的充电方案。

近几年,国内外学者对无线电能传输技术做了大量研究。文献[1-4]从系统结构角度分析了影响无线电能传输效率的因素并给出解决方案。文献[5-7]从系统电路结构及电路参数入手,建立系统模型,分析传输距离对传输功率和效率的影响。文献[8-10]分析了不同线圈结构对无线电能传输效率的影响,并给出最优化设计方案。文献[11-12]分析了负载电阻对传输效率的影响,提出了最佳传输效率点会随着负载的改变而偏移的观点。

上述研究大多针对单一因素与传输效率之间的关系进行理论研究和仿真设计,然而在实际应用过程中还有以下几点需要考虑:①发射端大多时间处于待机状态,需要实时监测接收端的存在并进入工作状态;②发射端输出功率需要根据负载功率实时变化,以减少无功功率的消耗和系统自身损耗;③系统工作时应具有较大的线圈间距范围,提升通用性,降低机器人在充电时的定位准确度要求。本文以200 W磁耦合谐振式无线电能传输系统为例,结合以上问题,从系统电路的设计及控制方案角度,研究无线电能传输系统的构架,介绍其实现方法,旨在使用较简单的硬件电路结构配合程序算法实现无线电能传输和电池充电管理的功能。

1 无线充电系统建模

1.1 无线电能传输原理

无线电能传输原理与变压器原理类似,在发射侧线圈产生磁通,变化的磁通在接收侧线圈产生感应电动势,从而实现电能的传递。在无线电能传输过程中使用磁耦合谐振技术可有效解决由于传输介质不同影响磁导率,降低电能传输效率的问题。磁耦合谐振电能传输需要线圈间有相似的谐振频率,发射端利用电能转换装置将市电转换成高频交流电,高频交流电产生变化的磁场,穿过空气等非金属介质将能量发射出去。接收端放置于发射端的磁场中,会感应出电流,然后通

过电能转换装置转换成终端设备所需要的电量。当发射端工作频率接近最佳谐振频率时,线圈谐振电压幅度最高、传输功率最大,当工作频率远离谐振频率时则相反,利用这一原理,可以根据负载需求调整传输功率,以达到功率调节的目的。

1.2 无线充电电路模型分析

为简化分析,考虑线圈在高频下存在寄生电阻,电源内阻及线圈间耦合关系,建立等效电路模型。如图1所示,在发射端, U_1 为供电电压, Z_1 为电源内阻, C_1 为线圈谐振电容, L_1 为线圈等效电感, R_1 为调谐电容、电感线圈和变频器内阻;在接收端, Z_2 为负载阻抗, C_2 为线圈谐振电容, L_2 为线圈等效电感, R_2 为调谐电容、电感线圈和电压变换器内阻; M 为系统线圈间互感系数, ω 为振荡角频率。

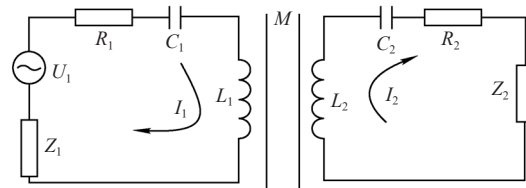


图1 磁耦合谐振电路等效模型

Fig. 1 Equivalent model of magnetic coupled resonant circuit

根据建立的模型,设发射端、接收端工作电流分别为 I_1 、 I_2 。则发射、接收回路阻抗 Z_T 、 Z_R 分别为

$$Z_T = Z_1 + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

$$Z_R = Z_2 + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (2)$$

根据等效电路模型和基尔霍夫电压定律得

$$U_1 = Z_T I_1 + j\omega M I_2 \quad (3)$$

$$0 = Z_R I_2 + j\omega M I_1 \quad (4)$$

由式(1)~式(4)可求出发射端、接收端工作电流分别为

$$I_1 = \frac{Z_R U_1}{Z_T Z_R + (\omega M)^2} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{-j\omega M U_1}{Z_T Z_R + (\omega M)^2} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可求出系统输入功率 P_{in} 、输出功率 P_{out} 分别为

$$P_{in} = \frac{U_1^2 Z_1}{Z_T Z_R + (\omega M)^2} \quad (7)$$

$$P_{out} = \frac{U_1^2 Z_2 (\omega M)^2}{[Z_T Z_R + (\omega M)^2]^2} \quad (8)$$

由式(1)、式(2)、式(5)和式(6)得无线供电系统传输效率 η 为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Z_2 (\omega M)^2}{Z_R [Z_T Z_R + (\omega M)^2]} \quad (9)$$

由式(9)可知,传输效率与系统各部分内阻、谐振频率和互感有关,根据文献[13]中对线圈间耦合系数研究,当两端使用相同线圈时,互感 M 为

$$M = 2\mu_n \mu_0 N \frac{2\pi r^2}{4D^3} \quad (10)$$

式中, μ_0 为真空磁导率; μ_n 为磁导率; N 为线圈匝数; r 为线圈半径; D 为线圈间距。

当系统各部件不变,且线圈参数固定时,系统内阻、线圈匝数和线圈半径不变,则传输效率主要取决于谐振频率和线圈间距。

2 无线充电系统实现

2.1 总体设计方案

系统结构如图2所示,发射端由变频发射单元、参数采集单元、无线数据传输单元和控制器单元组成,接收端由电磁接收转换单元、参数采集单元、无线数据传输单元和控制器单元组成。整体结构类似于隔离型DC/DC电源,区别在于隔离线圈的磁心换成了空气,反馈的数据由无线通信完成。

系统设计主要参数为发射端供电电压为DC 24 V±1 V;最大发射功率为300 W;工作频率为79.66~120 kHz;系统输出恒压恒流输源,输出电压为29.4 V;最大输出电流为7 A;系统最佳传输效率大于80%,线圈间传输距离为2~8 cm。

系统工作流程如下。

1) 发射端上电,初始化各单元参数,传输状

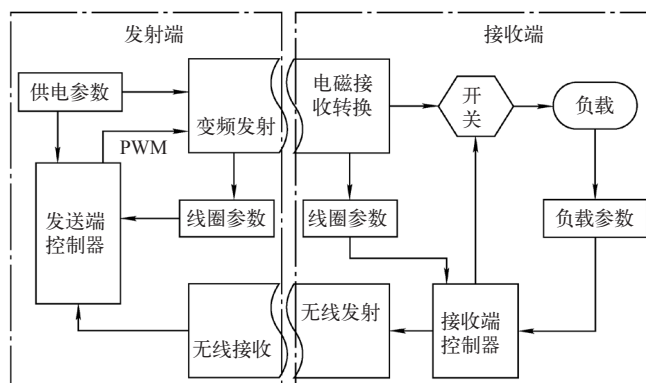


图2 无线充电系统结构示意图

Fig. 2 Diagram of wireless charging system

态数据到人机界面。

2) 发射端读取供电参数是否在设置范围内,若是、执行步骤3) 若否、则报警灯闪烁状态A并返回步骤2)。

3) 发射端控制器以最高频率发射间断的PWM脉冲,在此期间读取线圈参数,判断谐振电路是否正常。若是,则继续执行;若否,则报警灯闪烁状态B,关闭PWM并返回步骤3)。读取无线通信单元是否收到配对信号,若是,则执行步骤6); 若否,则执行步骤2)。

4) 接收端线圈放置在有效范围内,接收到脉冲电流,如果供电能满足接收端系统起动,说明线圈间距满足要求,随即发送无线配对信号,执行步骤5)。

5) 接收端读取线圈参数、负载参数并通过无线发送到发射端,判断负载有无短路现象,若有,则负载开关关闭,报警灯闪烁状态C,无线发送报警数据并返回步骤5); 若否,则继续执行。判断接收到的电流能否满足负载的要求,若是,则开关打开;若否,则开关关闭,返回步骤5)。

6) 发射端持续发送磁场,读取无线接收的数据,根据供电参数和负载参数计算电能传输效率,发射端线圈参数和传输效率一起可判断线圈间距是否在满足要求,若是,执行步骤7); 若否,则报警灯闪烁状态D并执行步骤2)。

7) 发射端根据PWM的频率范围、发射线圈参数和负载参数一起综合判断,实时调整发射功率,给负载提供先恒流再恒压的充电过程。判断

有无接收端报警数据,若有,则报警灯闪烁状态C,关闭PWM并等待;若无,则继续执行。判断在规定时间内有无收到无线接收数据,若有,则执行步骤6);若无,则说明接收端已移走,执行步骤2)。

2.2 发射端电路结构

发射端电路结构如图3所示,供电采集由ACS711电流传感器、分压电阻网络分别采集供电电流、电压,计算供电功率。线圈参数由两级分压电阻网络采集线圈谐振幅值和波形失真度,谐振幅值一定程度反映线圈间距,当负载固定时,距离越大幅值越大,当间距小于设定值时,由于线圈反射电阻增加,谐振波形失真,计算线圈间距用于传输功率和谐振频率的控制,保护发射端电路不被烧坏。无线通信单元采用Nordic公司的2.4 G无线射频收发芯片NRF24L01,设置为单向接收模式,读取接收端参数。变频发射单元采用AOSMD公司的DrMOS芯片AOZ5166,该芯

片集成了半桥式MOSFET和MOSFET驱动,两颗AOZ5166组成的全桥式驱动电路,驱动线圈产生谐振磁场。控制器单元以TMS320F28335芯片为核心,完成任务有:①输出互补PWM信号,控制变频发射单元的输出;②DSP芯片的高速数据采集和数据处理算法性能更利于线圈参数的采集、各参数间的协调运算以及控制接收端输出精确充电电压;③控制无线通信单元并读取数据;④通过串行通信传输数据到人机界面。

谐振发射单元由4颗1812封装NPO电容和320芯利兹线绕制的线圈组成,NPO电容介质损耗小,绝缘电阻高,温度特性好,利兹线绕制在隔磁片上,以减小线圈在高频下的趋肤效应,降低线圈的欧姆消耗电阻和辐射消耗电阻,提升电能传输效率。

2.3 接收端电路结构

接收端电路结构如图4所示,接收转换电路由谐振接收电路接收磁场电流,经过桥式整流电

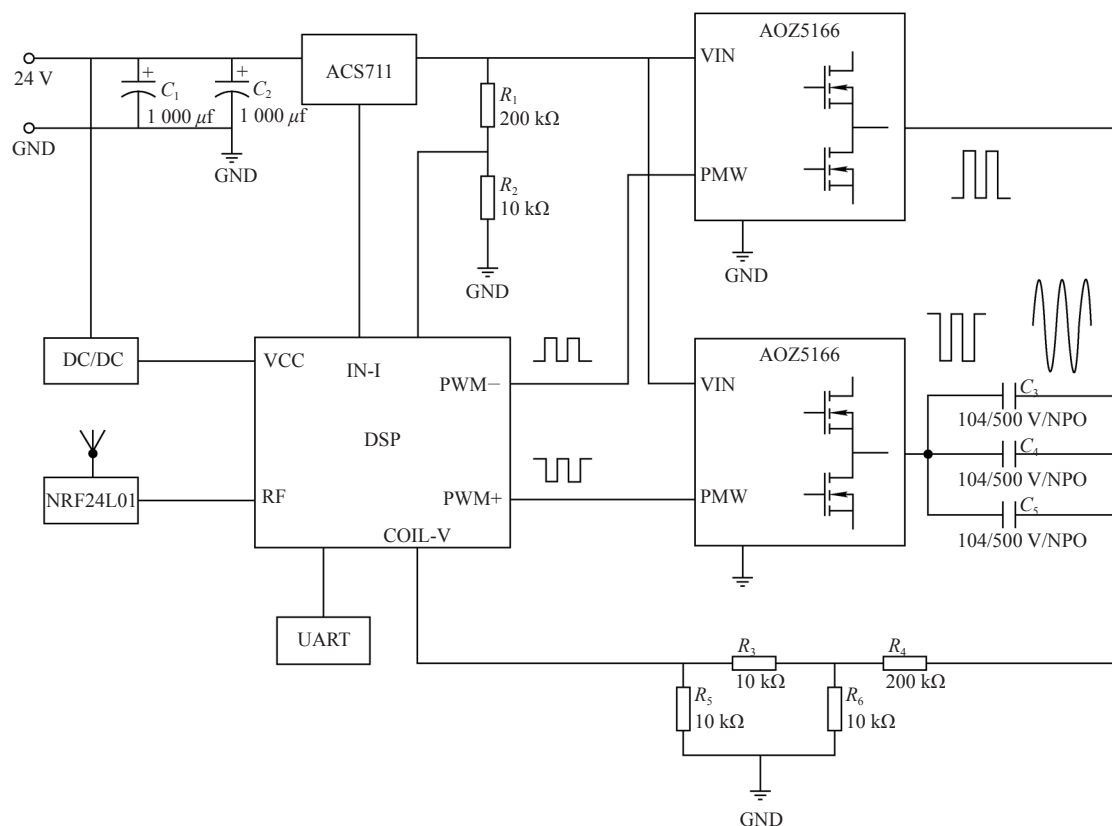


图3 发射端电路结构示意图

Fig. 3 Diagram of transmitter circuit structure

路、滤波电路输出稳定电流。谐振接收电路由6颗1206封装NPO电容和线圈组成。控制器单元以STM32F103芯片为核心,通过参数采集单元实时

采集线圈输出电压、电池电压和充电电流等数据,并通过无线传输发送到发射端,根据设定开关P沟道MOSFET管,保护接收端电路和负载设备。

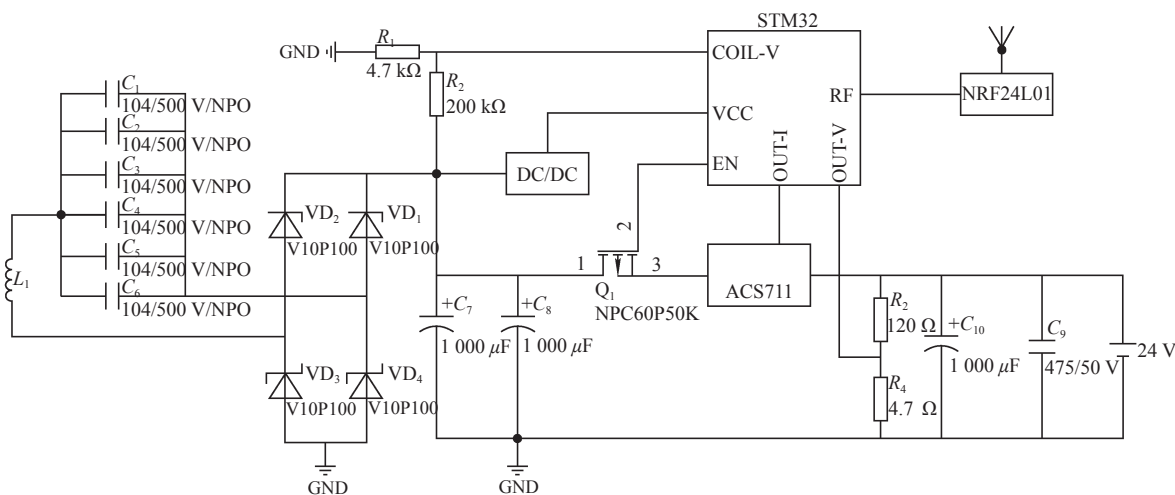


图4 接收端电路结构示意图

Fig.4 Diagram of receiver circuit structure

2.4 变频功率控制原理

发射功率调节的方式有变压式功率调节和变频式功率调节,变压式功率调节即调节发射驱动电压从而调节谐振磁场,但这种调节方法在本系统实现较复杂,且增大系统体积,不利于实际应用。变频式功率调节即在最佳谐振频率点一侧,通过调节谐振频率来调节谐振幅度,具有控制简单、无须增加辅助电路等优点。本设计使用了改进后的变频式功率调节方法,根据上述电路结构描述,发射端和接收端的中心谐振频率点不同,主要从以下方面考虑:①如果设计为相同的谐振频率,且系统工作在谐振频率点,系统将获得最佳的传输性能,但是此时发射线圈的谐振幅值将达到几千伏,NPO电容和变频发射电路将承受相同的压差,系统稳定性降低、设计成本增加,不利于批量化生产;②两端谐振频率点差值较近,对传输效率影响较小,并可获得更宽的调节范围,更利于传输功率控制;③通过差异化的设计配合程序算法,更便于修正因谐振电容和线圈量产时误差引起的谐振频率点偏移。

上述电路设计中,发射端谐振电容 $C=0.4\mu\text{F}$,线圈电感 $L=9.98\mu\text{H}$,通过 LC 频率计算公式

$f = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$,得最佳谐振频率为79.66 kHz。接收端谐振电容 C 为 $0.6\mu\text{F}$,线圈电感 L 为 $9.98\mu\text{H}$,计算中心谐振频率为64.04 kHz。工作区间设计在发射端最佳谐振频率点右侧,最低工作频率为79.66 kHz。发射端在待机状态发射间断磁场,接收线圈在10 cm距离可以接收到磁场且系统正常启动,此时允许的最大工作频率为120 kHz,因此设定系统工作区间为79.66~120 kHz,如图5所示。

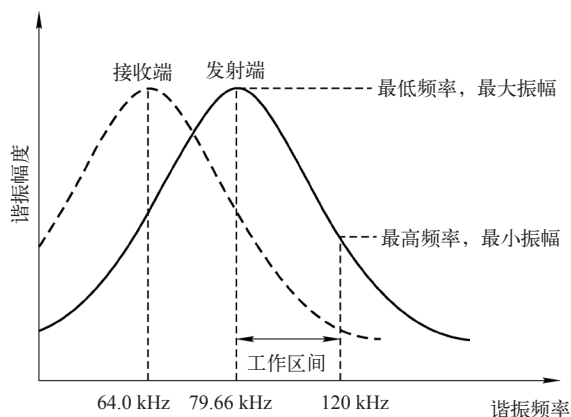


图5 谐振频率工作区间

Fig. 5 Resonant frequency operating interval

在上文所述工作流程中的步骤7)阶段,发射端控制器通过调节PWM输出频率,控制谐振发射电路调整谐振幅度,从而改变接收线圈振幅,达

到输出稳定的目的，输出频率的计算与优化基于PI控制原理，已有文献介绍^[14]。发射端谐振频率越趋于最佳谐振频率点，谐振幅度越大，传输效率越高，接收端谐振幅度也越高，传输的功率越大；反之，谐振频率越高，传输功率越低。

3 系统测试

系统装置由24 V/12 A开关电源、发射电路模块、接收电路模块、相同参数线圈和人机显示器组成。其中，线圈绕制成外径为20 cm、内径为10 cm扁圆形，固定在方形隔磁片上，负载功率由300 W电子负载设置，如图5所示。

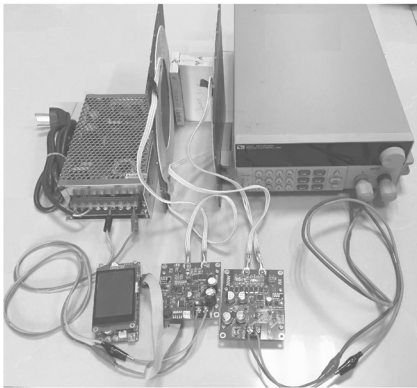


图6 系统实物图

Fig. 6 Photograph of the robot system

系统在工作时，只有当线圈间距在有效范围内才进行电能传输，其他时间发射端处于待机状态，并实时监测是否有接收线圈存在，降低待机时的功耗有助于提高系统整体效率。发射端线圈每隔一段时间，以最低功率发射一次电能，并检测无线接收电路是否收到配对信号，实现上述工作流程中步骤3)、步骤4)的功能。图7给出了接收端在起动瞬间的电能传输示意图。图7中，CH1为发射端线圈谐振电流波形，CH2为接收端整流滤波后电压波形，线圈间距为8 cm。当两个线圈在有效范围内，一般1~2次起动信号，接收端便可以起动，为了便于观察起动过程，测试时关闭了接收端自动应答，不起动充电。发射端每隔800 ms发射一次频率为120 kHz、时长为20 ms的脉冲波，接收端接收到电流，通过DC/DC电路转换为3.3 V电压提供给控制器芯片和无线发射电路工作，需

在50 ms内完成系统起动并无线配对成功，系统才能进入充电状态。

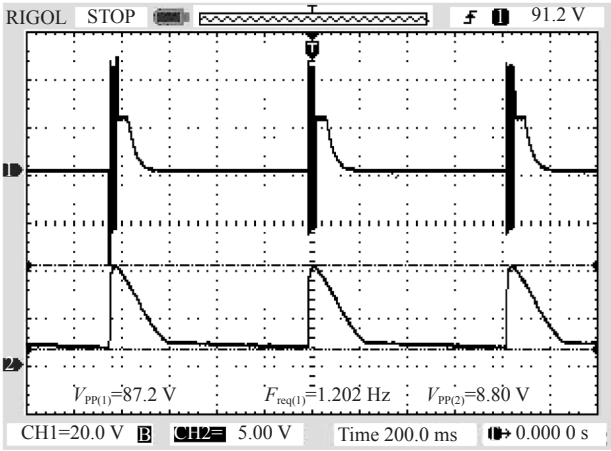


图7 接收端起动电压波形图

Fig. 7 Energy waveform diagram and receiving end

根据上文模型分析及式(9)、式(10)中的结论，影响传输效率因素为线圈间互感系数，而针对本文所述系统结构，影响互感系数的主要因素为线圈间距。

为了验证线圈间距对传输效率的影响，以及变频控制方案的可行性，测试不同线圈间距下的供电功率、谐振频率与传输效率变化的关系，设置电子负载固定功率为117.6 W (29.4 V/4 A)，测试数据如下表所示。

表 线圈间距对传输效率的影响

Tab. Influence of coil spacing on transmission efficiency

线圈间距 /cm	供电功率 /W	谐振频率 /kHz	谐振幅度 /V _{p-p}	传输效率 (%)
2	134.4	82.1	138	87.5
3	134.4	80.5	156	87.5
4	136.8	80.3	183	86
5	144.6	80	239	81.7
6	156	79.8	291	75.4
7	177.6	79.7	370	66.2
8	208.8	79.7	499	56.3

根据实验数据，随着线圈间距的增加，谐振频率逐渐趋于最佳谐振点，谐振幅度升高，供电功率增大，表明通过变频控制方式的可行性。系统传输效率在距离为2~4 cm时变化较小，随着间距继续增加互感参数迅速减小，成为影响传输效率的主要因素，与前文分析一致。当距离大于8 cm时，谐振幅度大于系统设定值，发射功率停止增

加,接收电流无法满足负载应用,系统无法正常工作。

为了验证不同负载对谐振频率、传输效率的影响,设置电子负载为固定功率模式,固定线圈间距为3 cm,通过改变负载功率,测试谐振频率以及传输效率的变化,得到传输效率、谐振频率与负载功率间的变化曲线,如图8所示。

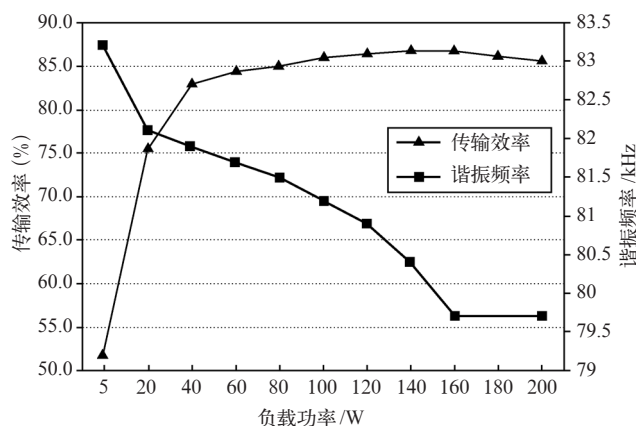


图8 负载功率与谐振频率/传输效率曲线图

Fig. 8 Curves of load power and resonant frequency / transmission efficiency

测试数据表明,当负载功率小于40 W时,由于系统工作功率的存在,影响了整体传输效率。随着负载功率的增加,工作功率比值逐渐减小,谐振频率逐渐趋于最佳谐振点79.66 kHz,发射线圈谐振幅度同步增大,传输效率升高,当负载功率为160 W时,系统工作在最佳谐振点附近,此时传输效率最高,当负载功率继续增加,谐振频率变化较小,而此时发射线圈振幅增大,驱动电路开关管损耗和杂散参数引起的系统消耗功率增加量,传输效率基本不变。通过对固定线圈间距下的传输效率测试实验说明,当负载功率接近系统传输功率上限时,使用变频式功率控制方法对传输效率影响较小,反之则影响较大,与上文结论一致。

4 结束语

设计了一种适用于机器人的无线电能传输系统,具有自动识别接收端、电能传输效率高和设计成本低等特点。文中对系统结构原理及变频控制方法进行了分析,并给出了适用于变频功率控制的无线电能传输电路图,最后通过实验数据验

证了系统的可行性,并对实际应用中影响传输效率因素进行了分析,对于进一步优化系统结构和无线电能传输技术的普及应用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 靳伟,张希,顾力强,等.一种磁耦合谐振式无线电能传输系统的研究[J].电力电子技术,2018,52(1):108-111.
JIN Wei, ZHANG Xi, GU Liqiang, et al, Study of a magnetic resonant wireless power transfer system[J]. Power Electronics, 2018, 52(1): 108-111.
- [2] 黄峰,陈海宾,蒋超,等.无线电能传输系统最高效率点控制策略的研究[J].电子技术应用,2017,43(11):143-146.
HUANG Feng, CHEN Haibin, JIANG Chao, et al. A maximum efficiency point tracking control scheme for wireless power transfer systems [J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(11): 143-146.
- [3] 唐治德,杨帆,徐阳阳,等.磁耦合谐振式无线电能传输系统功效同步研究[J].电工技术学报,2017,32(21):190-197.
TANG Zhide, YANG Fan, XU Yangyang, et al. Research on power-efficiency synchronization of wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 190-197.
- [4] 宋凯,朱春波,李阳,等.基于磁耦合谐振的自主无线充电机器人系统设计[J].电工技术学报,2014,29(9):38-43.
SONG Kai, ZHU Chunbo, LI Yang, et al. Design and implementation of an autonomous wireless charging robot system using magnetically coupled resonances [J]. Transactions of China Electronic Society, 2014, 29(9): 38-43.
- [5] 张军歌,刘宜成,杜玉洁,等.基于改进E类放大器的无线电能传输系统[J].电力电子技术,2016,50(11):73-77.
ZHANG Junge, LIU Yicheng, DU Yujie, et al.

- Wireless power transfer system system using improved class E amplifier[J]. Power Electronics, 2016, 50(11): 73-77.
- [6] 伍红霞, 陈希有. 电场耦合式无线电能传输恒压输出电路的研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(10): 13-15.
- WU Hongxia, CHEN Xiyong. Research on constant voltage out circuit of capacitively coupled power transfer[J]. Power Electronics, 2015, 49(10): 13-15.
- [7] 路超. 基于电磁耦合的无线供电技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- LU Chao. Design and research on hybrid excitation magnetic levitation feeding platform [D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology, 2014.
- [8] 王惠中, 张永恒, 张宏亮. 谐振式无线电能传输系统的电容选择[J]. 电力电子技术, 2017, 51(6): 104-106.
- WANG Huizhong, ZHANG Yongheng, ZHANG Hongliang. Capacitance selection of coupling resonant wireless power transmission system[J]. Power Electronics, 2017, 51(6): 104-106.
- [9] 王维, 黄学良, 谭林林, 等. 磁谐振式无线电能传输系统谐振器参数对传输性能的影响性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 1-6.
- WANG We, HUANG Xueliang, TAN Linlin, et al. Effect analysis between resonator parameters and transmission performance of magnetic coupling resonant wireless power transmission System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 1-6.
- [10] 仲崇德, 朱武, 张乐. 谐振耦合式无线电能传输系统谐振线圈的优化设计[J]. 电测与仪表, 2017, 54(21): 116-121.
- ZHONG Chongde, ZHU Wu, ZHANG Le. Optimal design of the resonant coil of resonant coupling wireless power transmission system [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(21): 116-121.
- [11] 唐治德, 徐阳阳, 赵茂, 等. 耦合谐振式无线电能传输的传输效率最佳频率[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 8-13.
- TANG Zhide, XU Yangyang, ZHAO Mao, et al. Transfer efficiency maximum frequency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(3): 8-13.
- [12] 李阳, 张雅希, 杨庆新, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统最大功率效率点分析与实验验证[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 18-24.
- LI Yang, ZHANG Yaxi, YANG Qingxin, et al. Analysis and experimental validation on maximum power and efficiency in wireless power transfer system via coupled magnetic resonances [J]. Transactions of China Electronic Society, 2016, 31(2): 18-24.
- [13] 胡金德, 张小强, 章伟. 磁耦合谐振式无线电能传输效率的最优化研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(5): 131-134.
- HU Jinde, ZHANG Xiaoqiang, ZHANG Wei. Optimization of magnetically coupled resonant wireless power transmission system [J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(5): 131-134.
- [14] 盛万红. 基于效率优化和恒流充电控制的无线电能传输系统研究[J]. 电工技术, 2018(8): 137-140.
- SHENG Wanhong. Wireless power transfer systems base on efficiency optimization and constant current charging control[J]. Electric Engineering, 2018(8): 137-140.

作者简介



秦庆磊

秦庆磊(1984—), 男, 高级实验师, 主要从事电气自动化控制研究。

(收稿日期: 2018—11—19) **EA**