

# 无线电能传输系统最大效率跟踪控制策略

刘翼<sup>1</sup>, 王玲桃<sup>2</sup>

(1. 国网运城供电公司, 山西 运城 044000;

2. 山西大学 电力与建筑学院, 山西 太原 030013)

**摘要:** 在无线电能传输系统中, 由于传输过程中能量损失较大, 从而导致系统传输效率下降。为了使系统高效率运行, 须对系统进行最大效率跟踪控制, 以满足运行要求。为了提升传输效率, 提出一种基于断续电流模式的有源阻抗匹配方法。首先, 分析了三种DC-DC(direct current to direct current)变换器在电感电流连续模式(continuous current mode, CCM)和电感电流断续模式(discontinuous current mode, DCM)下的工作特性, 得出DCM模式下的Buck-Boost变换器传输效率不受负载影响; 其次, 提出耦合系数实时辨识的最大效率跟踪控制策略, 当变耦合系数和变负载时, 可以实现最大效率运行; 最后, 通过搭建实验平台验证该控制策略的可行性和有效性。

**关键词:** 最大效率跟踪控制; 阻抗匹配; 耦合系数估计

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0033-05

## Maximum Efficiency Tracking Control of Wireless Power Transfer System

LIU Yi<sup>1</sup>, WANG Ling-tao<sup>2</sup>

(1. State Grid Yuncheng Electric Power Supply Company, Yuncheng 044000 China;

2. School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030013 China)

**Abstract:** In the wireless power transmission system, the transmission efficiency of the system decreases due to the large energy loss in the transmission process. In order to make the system run efficiently, the system must be tracked and controlled with maximum efficiency to meet the operating requirements. In order to improve the transmission efficiency, an active impedance matching method based on discontinuous current mode is proposed. Firstly, the operating characteristics of three direct current to direct current (DC-DC) converters in continuous current mode (CCM) and discontinuous current mode (DCM) are analyzed, and it is concluded that the transmission efficiency of the Buck-Boost converter in DCM mode is not affected by the load. Secondly, a maximum efficiency tracking control strategy with real-time identification of coupling coefficients is proposed. When the coupling coefficients and loads are changed, the maximum efficiency operation can be achieved. Finally, the feasibility and effectiveness of the system are verified by building an experimental platform.

**Keywords:** maximum efficiency tracking control; impedance matching; coupling coefficient estimation

## 0 引言

磁耦合谐振式无线电能传输(magnetically coupled resonant wireless power transfer, MCR-WPT)技术, 是基于近场谐振时磁场强耦合的概念, 实现无接触式电能传输<sup>[1]</sup>。

评价WPT系统最重要的一个技术指标就是传输效率。传输效率往往会随着耦合系数、系统参数及负载的变化而变化。针对最大效率跟踪控制, 目前的研究大多数是通过阻抗匹配来维持能量高效率地传输<sup>[2-5]</sup>。无源阻抗匹配使用电感、电容阵列实现阻抗匹配, 虽然具有较强的设计自由度, 但也伴随控制方式复杂等问题<sup>[6-10]</sup>。有源阻抗匹配通过DC-DC变换器实现负载阻抗匹配, 进行最

大效率跟踪控制<sup>[9-11]</sup>。文献[12]和文献[13]使用粒子群算法对WPT系统进行优化设计, 在运行过程中搜索系统最大效率, 但是在负载变化大的时候可能导致结果不收敛, 或者被困在局部最优。

本文针对传输效率对负载和耦合系数变化敏感的特点, 提出一种基于电感电流断续模式(DCM)下的Buck-Boost阻抗匹配方法, 通过对工作特性进行分析, 得出该电路的输入电阻与负载无关, 实现了负载和传输效率的解耦。通过实时计算耦合系数动态追踪最大传输效率点, 并采用移相调压方法使输出电压恒定。

## 1 理论分析

### 1.1 SS型WPT系统分析

收稿日期: 2023-11-24

本文采用SS型补偿结构如图1所示。

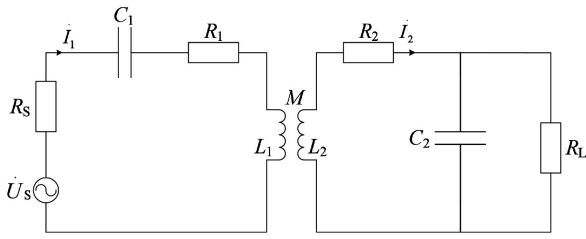


图1 SS型补偿结构

图1中,  $U_s$ 为交流电源,提供高频电压; $R_s$ 、 $R_L$ 、 $R_1$ 和 $R_2$ 分别为电源内阻、负载电阻、发射线圈内阻和接收线圈内阻; $L_1$ 、 $L_2$ 和 $C_1$ 、 $C_2$ 分别为一、二次侧线圈电感和补偿电容。 $M$ 为两电感线圈之间互感。

SS型补偿结构的KVL方程为:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = Z_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 \\ 0 = -j\omega M \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $Z_1$ 、 $Z_2$ 为一次侧和二次侧等效阻抗,且满足  $Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 - 1/j\omega C_1$ ,  $Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 - 1/j\omega C_2$ 。当系统工作在谐振状态下,谐振频率 $\omega$ 满足 $\omega = 2\pi f$ ,且  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$ 。则  $Z_1 = R_s + R_1$ ,  $Z_2 = R_2 + R_L$ 。

系统的输入功率为:

$$P_1 = \frac{U_s^2 (R_2 + R_L)}{(R_s + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2} \quad (2)$$

系统的输出功率为:

$$P_0 = \frac{(\omega M)^2 U_s^2 R_L}{[(R_s + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2]^2} \quad (3)$$

系统的效率为:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_2 + R_L)[(R_s + R_1)(R_2 + R_L) + (\omega M)^2]} \quad (4)$$

通过式(4)可以分析出在线圈的位置和参数确定时,传输效率与电源内阻和负载电阻有关。当电源内阻一定时,随负载的增大,传输效率先增大后减小,这就意味着存在一个最优负载使得系统的传输效率最大。

## 1.2 有源阻抗匹配分析

为选取合适的DC-DC变换器用于WPT系统阻抗匹配,本文分别分析了Buck、Boost和Buck-Boost变换器在电感电流连续模式(CCM)和电感电流断续模式(DCM)下的输入/输出电阻表达式见表1。

表1 DC-DC变换器输入电阻表达式

模式	Buck	Boost	Buck-Boost
CCM	$R_{in} = \frac{1}{D^2} R_L$	$R_{in} = (1-D)^2 R_L$	$R_{in} = \frac{(1-D)^2}{D^2} R_L$
DCM	$R_{in} = \frac{2Lf_s}{D^2} \frac{U_{in}}{U_{in} - U_L}$	$R_{in} = \frac{2Lf_s}{D^2} (1 - \frac{U_{in}}{U_L})$	$R_{in} = \frac{2Lf_s}{D^2}$

其中,  $U_{in}$ 和  $U_L$ 分别为变换器输入、输出电压,  $f_s$ 为MOSFET的开关频率。

通过在Matlab中建立CCM和DCM两种模式下的变换器模型,输入电压  $U_{in}$ 为300V,占空比  $D$ 为0.25,开关频率  $f_s$ 为10kHz,CCM电感  $L$ 为5mH,DCM电感  $L$ 为50 $\mu$ H。两种模式下输入电阻随负载电阻的变化情况如图2所示。

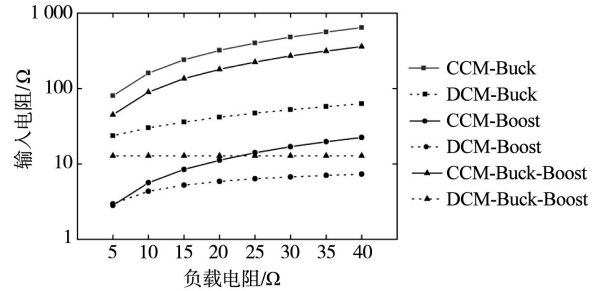


图2 CCM和DCM模式输入电阻变化情况

从图2可以看出,在理想情况下,DCM模式下的Buck-Boost电路输入电阻与负载电阻无关,与理论分析结果相同。其余变换器负载电阻和输入电阻成正比。对于Buck和Boost电路,因为它们的负载变化范围有限,而Buck-Boost电路克服了这一缺点,并且工作在DCM下的Buck-Boost电感电流在开关周期内电流总会到零,具有零电流开关的特性,也解决了二极管的反向恢复问题。因此在二次侧和负载前添加DCM下Buck-Boost电路更适用于阻抗匹配。

## 2 最大效率跟踪控制策略

### 2.1 确定最优负载点

通过前面的分析可知,在线圈位置相对固定的情况下,负载对传输效率的影响很大。将式(3)对负载  $R_L$ 求偏导,可得到最优负载为:

$$R_{L-\eta_{max}} = \sqrt{\frac{R_2(\omega^2 M^2 + R_1 R_2 + R_1 R_s)}{R_1 + R_s}} \quad (5)$$

系统确定时,电源内阻、原副边线圈内阻、谐振频率和线圈互感值也是确定的,由式(5)可以确定出系统的唯一最优负载。令副边等效电阻为  $R_{eq}$ ,得  $R_{eq} = 8R_{in}/\pi^2$ 。当  $R_{eq} = R_{L-\eta_{max}}$ 时,可得最优占空比为:

$$D_{\eta_{max}} = \sqrt{\frac{16L_3 f_s}{\pi^2 R_{L-\eta_{max}}}} \quad (6)$$

由式(6)可知,系统确定时,有源阻抗匹配的最优占空比只与最优负载有关,由于最优负载是唯一的,因此最优占空比也是唯一的。因此,进行阻抗匹配时,无论负载怎么变化,最优占空比不会改变,系统一直会保持最大功率运行。

### 2.2 耦合系数的实时辨识

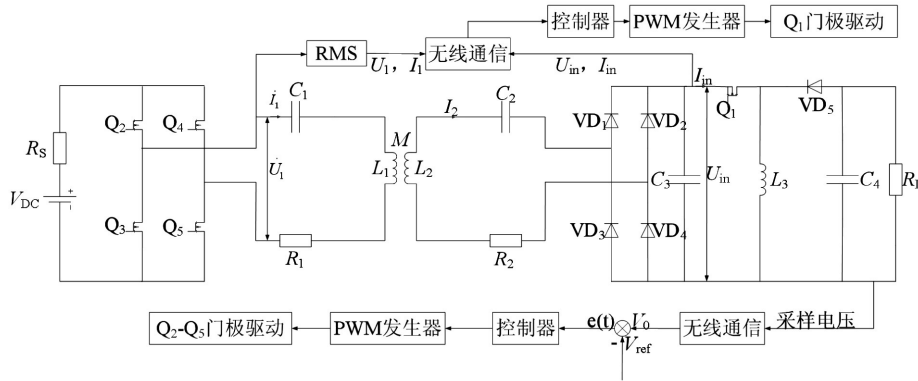


图3 WPT系统框图

由于最优负载与耦合系数有关,而耦合系数和线圈参数以及偏移距离有关,因此在确定最优负载时需要对耦合系数进行实时辨识。

图3为系统结构图,  $V_{DC}$  为输入电压源,  $R_S$  为电源内阻,  $Q_2 \sim Q_5$  组成全桥逆变器,  $C_1$ 、 $C_2$  为补偿电容,  $R_1$ 、 $R_2$  为线圈内阻,  $VD_1 \sim VD_4$  构成副边侧整流桥,  $Q_1$ 、 $L_3$ 、 $C_4$ 、 $VD_5$  构成 Buck-Boost 变换器,  $R_L$  为负载电阻。原、副线圈经过无线通信传输信号, 将  $U_1$ 、 $I_1$ 、 $U_{in}$ 、 $I_{in}$  和  $V_0$  信号采样收集, 通过控制器运算产生信号给 PWM 发生器, 来控制  $Q_1 \sim Q_5$  门极驱动, 进行最大效率追踪控制。

结合图3, 得出副边侧电路阻抗  $Z_s$  为:

$$Z_s = R_2 + R_{eq} = R_2 + \frac{8}{\pi^2} \frac{U_{in}}{I_{in}} \quad (7)$$

原边电流  $I_1$  为:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1 + Z_{ref}} \quad (8)$$

式中,  $Z_{ref}$  为副边侧折算到原边侧的等效阻抗, 且  $Z_{ref} = \omega^2 k^2 L_1 L_2 / Z_s$ , 将式(7)代入式(8)中可得耦合系数  $k$  的表达式为:

$$k = \frac{\sqrt{(R_2 + \frac{8U_{in}}{\pi^2 I_{in}})(\frac{U_1}{I_1} - R_1)}}{\omega \sqrt{L_1 L_2}} \quad (9)$$

通过实时采集原、副边电压和电流, 根据式(9)计算出耦合系数, 进而计算出系统的最优负载值, 得到最优占比, 控制  $Q_1$  来实现最大效率跟踪控制。

### 2.3 恒压输出控制

当选择不受负载调节范围限制的 DCM 模式下的 Buck-Boost 电路的有源阻抗匹配网络来实现最大效率跟踪时, 选择具有更好调压效果的恒压输出控制方法尤为重要。

DC-DC 变换器不仅可以实现系统最优负载匹配, 还可以实现直流电压等级转换。但在原边增加一个 DC-DC 变换器不仅会使系统体积变大, 而且其开关管等功率器

件会加大系统损耗从而降低系统效率, 而移相调压控制方法可以克服这些不足之处。

## 3 仿真与实验

### 3.1 耦合系数实时辨识验证

为了验证所设计的最大效率跟踪策略的可行性, 在 MATLAB 中搭建了 WPT 系统仿真模型。输入输出电压均为 300 V, 功率等级为 3.7 kW, 仿真参数如表 2 所示。

表2 仿真参数

参数	数值	参数	数值
$V_{DC}/V$	300	$R_1/m\Omega$	10
$f/kHz$	85	$R_2/m\Omega$	10
$f/kHz$	10	$R_S/m\Omega$	500
$C_1/nF$	25	$C_2/\mu F$	100
$C_2/nF$	25	$L_3/\mu F$	50
$L_1/\mu F$	140.21	$C_4/\mu F$	100
$L_2/\mu F$	140.18	$V_0/V$	300

实验中, 需要得出线圈偏移时耦合系数的大小, 因此在 Maxwell 中搭建线圈模型, 通过仿真模拟线圈沿 X 轴偏移时耦合系数的变化, 并以此仿真数据为基础, 对耦合系数实时辨识方法进行验证。

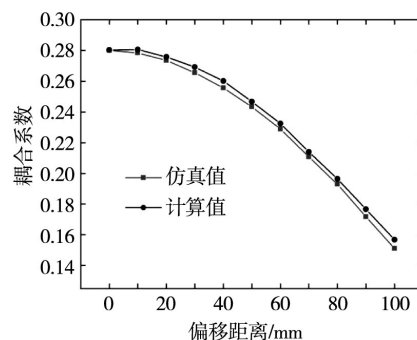


图4 偏移距离和耦合系数变化关系

从图4中可以看出耦合系数会随线圈偏移距离的增大而逐渐减小, 并且偏移距离越大, 耦合系数下降得越明显。耦合系数的实时计算值与仿真结果基本一致, 从而

验证了实时辨识耦合系数方法的可行性。

### 3.2 最大效率跟踪验证

图5给出了在耦合系数 $k=0.28$ 时,三组不同负载( $R_L=20\ \Omega, 40\ \Omega, 60\ \Omega$ )条件下,系统传输效率变化情况。可以看出基于DCM下的Buck-Boost阻抗匹配电路在负载变化时,传输效率几乎不变。相较于文献[6]和文献[7]所用的最大效率控制策略,本文所提出的控制策略在负载变化时响应时间更短,并且在运行的过程中更稳定。

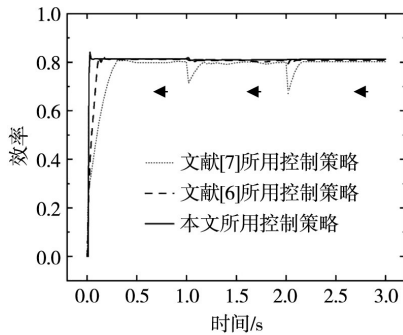


图5 负载电阻和传输效率

加入恒压闭环控制后,测试系统在变负载情况下的最大效率追踪时电压变化情况。图6可以看出在无调压时,电压会随着负载变换。相比DC-DC调压,移相调压的响应时间更短,更适合无线电能传输系统。

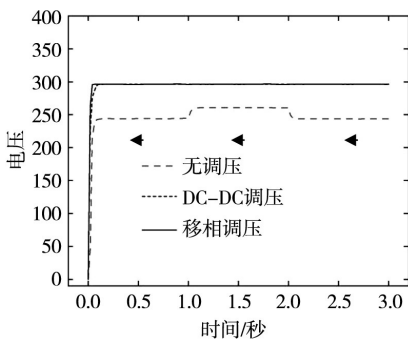


图6 负载电阻和输出电压

### 3.3 实验验证

设计的MCR-WPT系统实物模型如图7所示。接收、发射线圈采用 $0.1 \times 500$ 股的利兹线圈绕制而成。为了方便起见,采用48V的稳压电源作为发射端的直流电源,最大传输功率为300W。

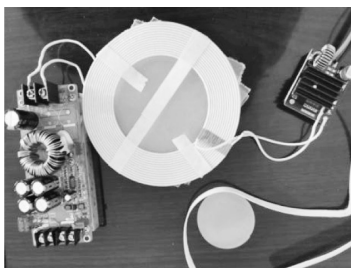


图7 WPT实物模型

图8、图9分别为负载电阻、偏移距离与传输效率的关系。

从图8和图9中可以看出,与理想的情况相比,实际模型输出效率会下降。因为实物模型运行在非理性的情况下,会有额外的损耗,导致效率比理想情况偏低。

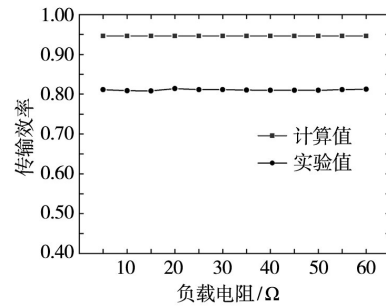


图8 负载电阻与传输效率

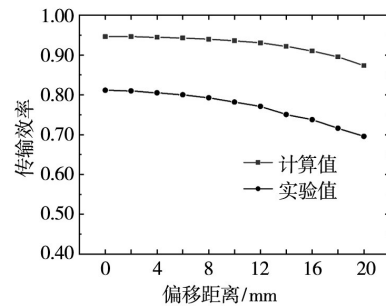


图9 偏移距离与传输效率

在耦合系数一定的情况下,通过改变输出端电阻的阻值,并对相应的传输效率进行测量记录。各个阻值对应的输出效率如图8所示。当耦合系数一定,但负载变化时,可以看出无线充电系统输出效率维持在80%上下,与前文的理论推导和仿真结果相符。

图9为保持负载电阻一定,通过改变线圈的偏移距离来模拟耦合系数的改变。随着线圈偏移距离变大,系统的传输效率也在随之降低,与前文理论分析结果一致。当偏移距离为20mm时,系统的传输效率也可以达到70%。

## 4 结束语

通过对不同变化器的不同工作模式进行分析,验证了DCM模式下的Buck-Boost变化器的优越性。针对耦合系数变化导致等效负载变化使得传输效率降低的情况,提出一种实时辨识耦合系数的方法,当耦合系数和负载电阻变化时,可以根据系统实时参数计算出耦合系数,实现最大效率跟踪控制,耦合系数识别准确度达98%以上。并且为保证充电安全,采用移相调压控制方法来使得系统恒压输出。仿真和实验结果表明,本文所提出的最大效率跟踪控制策略,在负载和耦合系数变化的情况下,均可以实现最大效率运行,耦合系数为0.28时,传输效率可达80%。

## 参考文献：

- [1] 张振丽. 电动汽车动态无线充电技术[J]. 中国科技信息, 2022(10):78-80.
- [2] 周成虎, 黄明明, 高振东, 等. 三相LCL/P补偿无线充电系统设计及建模分析[J]. 中国测试, 2022, 48(8):86-93.
- [3] 付琳琳, 逢海萍. 带前级DC/DC的无线充电系统建模与分析[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3):124-129.
- [4] 陈义平, 代冲. 磁耦合谐振无线供电最佳传输效率的跟踪方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(2):233-238.
- [5] 窦润田, 张献, 李永建, 等. 磁耦合谐振无线电能传输系统电磁屏蔽应用发展与研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报:1-22 [2022-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220916.1432.006.html>.
- [6] 孙运全, 陆洋锐, 顾加亭. 基于LCC-S补偿结构无线电能传输的阻抗匹配的研究[J]. 电子器件, 2020, 43(1):94-99.
- [7] 李子硕, 孙宇, 周岩. 基于爬山法的双Boost双向DC/DC效率优化研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(7):109-112.
- [8] 史佳兰, 蔡黎, 代妮娜, 等. 电动汽车磁耦合谐振无线充电系

统研究发展综述[J]. 电池工业, 2022, 26(4):190-192, 197.

- [9] 许肖颖, 夏能弘, 朱益民, 等. 一种用于无线电能传输系统的有源中继结构设计与分析[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(4):315-321.
- [10] 魏金成, 廖师师, 邱晓初, 等. 谐振式无线电能传输系统恒功率输出特性研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3):231-236.
- [11] 刘树来, 赵丹, 李文慧, 等. 基于熵权法的小水电上网电能质量自动化监测模型[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(10):171-174.
- [12] 陈晓平, 刘岩. 多负载磁耦合谐振无线电能传输系统功效分析与优化[J]. 电气技术, 2022, 23(4):37-41.
- [13] 许秋平, 张春阳. 基于粒子群算法对无线能量传输系统的优化研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(1):95-97.

作者简介: 刘翼(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 无线电能传输。

(上接第13页)

小区大豆数控排种器在实际田间应用实验中发现, 排种器用电随播种作业幅宽加大而增加, 拖拉机电瓶蓄电量是一定的, 一般拖拉机现有发电量不足, 需要定时对电源补充电量。

以往的小区排种器采用变换机械链轮调整传动比调整播种粒距, 粒距差大, 机构复杂, 预充种和清种需人工手动完成; 小区大豆数控排种器采用触摸屏的界面输入粒距值, 通过PLC程序完成速比变化, 无级调整粒距, 结构简单, 调整快捷, 预充种和清种通过PLC程序自动或遥控完成。

## 4 结束语

将PLC与排种器相结合设计的小区大豆数控排种器, 实现了小区大豆精密播种, 可自动或手动完成预充种、播种和清种的功能, 提高了作业效率, 减轻了劳动强度, 解决了目前小区育种没有专用的排种器的问题, 促进大豆育种行业的发展, 为粮食安全提供了保障, 具有很好的推广应用前景。本轮设计试验后, 要进一步深入研究电子器件参数匹配, 选择合理的电子元件; 解决拖拉机的电源供应问题。

## 参考文献：

- [1] 韩丹丹, 何彬, 周毅, 等. 气吸式密植精量排种器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(1):237-247.
- [2] 叶岩. 小区播种机的使用与维护保养[J]. 农机使用与维修, 2023(8):129-131.
- [3] 韩丹丹, 王清, 颜君坤, 等. 气吸式绿豆密植精量排种器的优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9):147-157.

- [4] 马紫涛, 唐铮, 肖瑶, 等. 玉米大豆间作播种机排种器的研究与试验[J]. 农业工程与装备, 2023, 50(3):1-4.
- [5] 李晓红, 张汉山, 屈哲, 等. 内充种式大豆排种器仿真和试验研究[J]. 大豆科学, 2021, 40(4):546-552.
- [6] 李东洋. 电驱动大豆排种控制系统的设计与试验[D]. 大庆: 八一农垦大学, 2023.
- [7] 李威, 徐浩, 李晓红, 等. 基于EDEM的大豆侧窝排种器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(12):164-169.
- [8] 李鹏. 侧置导引式大豆高速精量排种器设计与试验[D]. 西北农林科技大学, 2022:1-73.
- [9] 俞传阳, 陈状, 陈黎卿. 小麦小区条播机电控排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1):75-83.
- [10] 侯云涛. 精量排种器的研究现状与发展趋势[J]. 现代农业装备, 2023, 44(4):15-18.
- [11] 黄玉祥, 李鹏, 董建鑫, 等. 大豆高速播种机侧置导引式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10):44-53, 75.
- [12] 王瑾, 卢静. 数字化设计应用于精量播种机的优化分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(11):189-193.
- [13] 王淦. 气吸式电驱动绿豆精量播种控制策略与控制系统研究[D]. 大庆: 八一农垦大学, 2023.
- [14] 段军, 高瞻, 屠晓栋. 基于5G的远程驾驶操控系统的设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(3):91-95.
- [15] 朱道华, 郭雅娟, 韦磊, 等. 基于5G软件定义网络的变电站巡检智能控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7):111-116.
- [16] 甄海涛, 王刚, 徐化春, 等. 基于STM8的精密播种计量装置的研制[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(3):107-109, 112.

作者简介: 赵举文(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事农机工程、自动化控制方面的研究。