doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.068

温室双电机分布式驱动履带拖拉机设计与试验

郭惠萍[1,2]　王霆伟[1,2]　谢广杰[1,2]　王子豪[1,2]　陈宏博[1,2]　王常林[3]　杨福增[1,2]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.农业农村部北方农业装备科学观测实验站,陕西杨凌 712100;3.浪潮集团有限公司,济南 250014)

摘要:针对现有小型电动动力机械驱动性能不足、转向性能较弱,较难满足温室作业空间狭小的生产需求等问题,设计了一种温室双电机分布式驱动履带拖拉机。基于质心位置分配法确定电动履带拖拉机质心理论位置,对各部件位置进行优化使质心实际位置接近理论位置,以得到质心最佳位置方案。以犁耕和运输作业为目标进行电动履带拖拉机电驱系统核心部件匹配,完成了电动履带拖拉机电控系统设计,并对试制的电动履带拖拉机进行基本性能试验和犁耕工况试验。结果表明:在直线行驶中,平均百米跑偏量为 1.259 m,单边制动最小转向圆半径平均值为 1 096 mm,单边制动最小通过圆半径平均值为 1 232 mm,原地转向最小转向圆半径平均值为 729 mm,电动履带拖拉机直线行驶性能和转向性能较好;当行驶速度为 1、3、5、7 km/h 时,拖拉机牵引功率分别达 1 367.1、4 201.1、6 922.8、9 173.3 W,最小平均牵引力为 5 320.4 N,远大于相近功率的燃油拖拉机和双电机分布驱动轮式拖拉机牵引力,可满足温室种植作业需求;在犁耕试验中,平均耕深 17.18 cm,平均耕幅 40.55 cm,续航时间 3.35 h,电动履带拖拉机动力性能和续航性能良好。双电机分布式驱动履带拖拉机可满足温室多种作业农艺需求,可为温室新能源动力机械研发提供依据。

关键词:电动履带拖拉机;双电机分布式驱动;温室农业

中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0780-09　　**OSID**:

Design and Test of Greenhouse Dual-motor Distributed Drive Crawler Tractor

GUO Huiping[1,2]　WANG Tingwei[1,2]　XIE Guangjie[1,2]　WANG Zihao[1,2]　CHEN Hongbo[1,2]
WANG Changlin[3]　YANG Fuzeng[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Northern Agricultural Equipment Scientific Observation and Experimental Station*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Inspur Group Co.*, *Ltd.*, *Ji'nan* 250014, *China*)

Abstract: The existing compact electric-powered agricultural machinery suffers from insufficient traction performance and weak steering capability, which limits its adaptability to confined greenhouse spaces. Aiming to address these issues, a greenhouse dual-motor distributed drive crawler tractor was designed. The theoretical centroid position of the electric tracked tractor was determined by using the centroid position allocation method. Component placement was optimized to bring the actual centroid position as close as possible to the theoretical position, thereby achieving the optimal centroid placement scheme. Core component matching for the electric drive system was performed by targeting plowing and transport operations. The electronic control system for the electric tracked tractor was subsequently designed. Basic performance tests and plowing operation tests were conducted on the prototyped electric tracked tractor. The results demonstrated the follows: during straight-line travel, the average deviation over 100 m was 1.259 m; the minimum turning radius with single-side braking was 1 096 mm, the minimum passing radius with single-side braking was 1 232 mm, and the minimum turning radius for on-the-spot steering was 729 mm, indicating excellent straight-line travel and steering performance. The tractor's tractive power at travel speeds of 1 km/h, 3 km/h, 5 km/h, and 7 km/h, the tractor's drawbar power reached 1 367.1 W, 4 201.1 W, 6 922.8 W, and 9 173.3 W, respectively. The minimum average tractive force

收稿日期:2025-01-19　修回日期:2025-05-20

基金项目:陕西省技术创新引导专项(2021QFY08-05)和浙江省农机研发制造推广应用一体化试点项目(YF20220801)

作者简介:郭惠萍(1980—),女,副教授,主要从事智能农机装备关键技术研究,E-mail:imghp@163.com

measured in the test was 5 320.4 N, which significantly exceeded the tractive force of comparable diesel-powered tractors and dual-motor distributed drive wheeled tractors, thereby meeting the operational requirements of greenhouse cultivation. In plowing tests, the average plowing depth was 17.18 cm, the average plowing width was 40.55 cm, and the endurance time was 3.35 h, indicating good power and endurance performance of the electric crawler tractor. The dual-motor distributed drive crawler tractor satisfied the agricultural requirements of various greenhouse operations and provided a basis for the development of new energy-powered agricultural machinery for greenhouse applications.

Key words: electric crawler tractor; dual-motor distributed drive; greenhouse agriculture

0　引言

截至 2023 年，我国设施农业种植面积已达 2.6×10^6 hm^2，居世界首位，绿色农业成为设施农业发展的新方向[1]。电动拖拉机具有节能、环保、安全、高效等优点，是设施农业机械发展的重要研究之一[2-3]。现有电动拖拉机研究主要以中大功率型号为主[4]，如约翰迪尔的 SESAM 和 Gridcon 系列纯电动拖拉机、E100 - Vario 型纯电动拖拉机和纽荷兰 T4 型电动无人驾驶拖拉机概念机[5-7]，以及中国一拖集团有限公司牵头研发的“超级拖拉机 I 号”等[8]，机身体积较大，适合于大田作业环境，难以适应温室作业。因此，研发适合于温室等作业环境，低噪声、无污染的小型纯电驱动拖拉机越来越迫切[9]。THOMAS 等[10]在燃油拖拉机上，用电动机代替燃油机开发了电动拖拉机，但传动系统较为复杂。陈黎卿等[11]设计了一套单电机驱动总成系统，但未形成样机。YOO 等[12]设计了基于单电机驱动的小型轮式电动拖拉机，具有良好的驱动性能，但转向灵活性不足。王元杰等[13]设计了一种适合于温室作业的小型单电机驱动拖拉机，可以实现犁耕作业，但续航性能不足。LIU 等[14]设计了一种坐骑式小型单电机驱动拖拉机，能通过动力输出(Power take-off，PTO)进行旋耕作业，但机型仍较大。王宝超等[15]设计了一种单电机驱动的小型增程式电动履带拖拉机，能实现旋耕和开沟等作业，也有较好的续航能力，但转向性能较弱。谢斌等[16]提出了双轮驱动电动拖拉机方案，但未形成样机。ZHANG 等[17]和 RODNEI 等[18]均提出了一种坐骑式双电机驱动轮式拖拉机方案，LI 等[19]提出分布式传动的轮式电动拖拉机方案，驱动性能较好，但原地转向灵活性不足。崔志超等[20]设计了一款温室用双电机驱动履带式作业平台，但牵引性能较弱，只能进行小载荷运输作业。赵思夏等[21]和武仲斌等[22]分别提出了提高底盘牵引性能的相关方案，但其对双电机驱动履带式作业平台的牵引性能提升效果尚不明确。上述研究在电动拖拉机相关设计中取得了一定成果，早期电动拖拉机大多是在燃油机基础上进行改良，能实现节能，但传动系统较复杂；新研制的单电机驱动拖拉机，结构设计和传动系统较简单，但转向灵活性较差、动力需求不足；双电机驱动轮式拖拉机，驱动性较好，但动力性能不足，较难满足犁耕等较大载荷作业。

为解决上述问题，本研究根据温室作业环境特点，在团队已研发的单电机驱动微小型履带拖拉机基础上，基于双电机分布式驱动系统，采用质心位置分配法确定各部件位置，以旋耕、犁耕等重载荷作业需求为目标，进行电动履带拖拉机电动机、动力电池和电控系统匹配与设计，设计一种适合于温室作业的双电机分布式驱动电动履带拖拉机，以期为温室电动履带拖拉机设计提供理论依据。

1　总体结构和工作原理

根据温室作物参数、种植环境与作业需求，基于结构简洁、转向灵活的双电机分布式[23-24]驱动的动力传动方式，设计一种可以满足温室重载作业的电动履带拖拉机。电动履带拖拉机结构如图 1 所示，包括履带行走系统、动力电池组、电控系统及驱动电机等。工作原理如图 2 所示，动力电池组通过电池管理系统(Battery management system，BMS)分别向履带行走系统的两侧电机控制器和旋耕电机控制器提供电能，电机控制器控制电机转速、转矩及转向，行走系统左右驱动电机通过锥齿轮减速器实现动力传递；另外，动力电池组通过 BMS 与 DC/DC 转换器

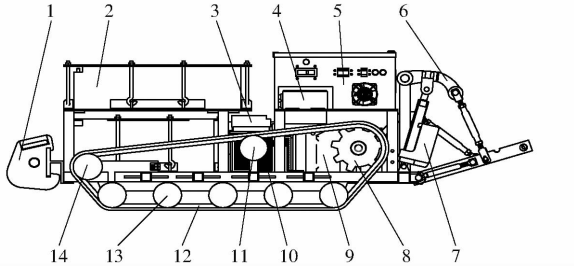


图 1　温室双电机分布式驱动履带拖拉机结构图

Fig. 1　Structure diagram of greenhouse dual-motor distributed drive crawler tractor

1. 配重块　2. 动力电池组　3. DC/DC 转换器　4. 电机控制器　5. 电气柜　6. 悬挂系统　7. 电动推杆　8. 驱动轮　9. 减速器　10. 驱动电机　11. 拖带轮　12. 履带　13. 支重轮　14. 导向轮

为启动电源供电，进而向电动推杆、总控制器及刹车器等部件提供电能；电动履带拖拉机控制系统通过控制器局域网(Controller area network，CAN)总线实现对电机控制器和电动推杆等的控制。

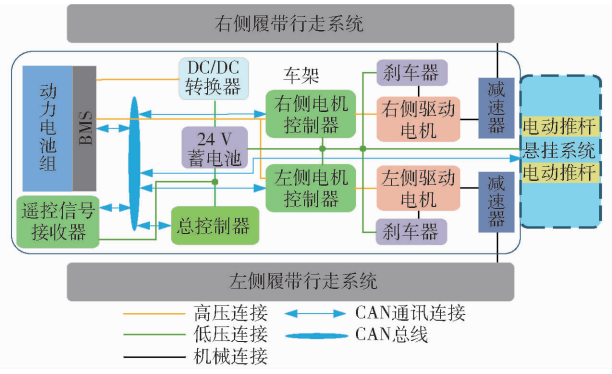


图 2 温室双电机分布式驱动履带拖拉机工作原理图

Fig. 2 Operation principle of greenhouse dual-motor distributed drive crawler tractor

根据温室种植环境特点、农艺要求，及犁耕、播种、收获和运输等作业的动力需求，电动履带拖拉机主要技术性能参数如表 1 所示。

表 1 主要技术性能参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值/形式
作业速度/(km·h^{-1})	0～7
使用质量/kg	1 000
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 240×940×850
轨距/mm	790
最小离地间隙/mm	180
犁耕续航时间/h	3
整机操纵方式	遥控操纵
转向方式	差速转向

2 主要结构设计与三电系统匹配

双电机分布式驱动履带拖拉机设计主要包括质心位置确定、三电系统设计与匹配。以电动履带拖拉机稳定性为目标，进行电动履带拖拉机质心位置确定，完成电动履带拖拉机结构设计；以拖拉机犁耕作业及运输作业为目标，对电动机、动力电池和电控系统参数进行计算与匹配。

2.1 质心位置分配法

质心位置对电动履带拖拉机稳定性和压力中心影响较大。当电动履带拖拉机质心位置偏向尾部，压力中心后移，发生翘头现象，牵引附着性能和稳定性降低。电动履带拖拉机质心坐标、压力中心坐标、各部件坐标及受力情况如图 3 所示。

压力中心纵向坐标 C_x(即压力中心到通过驱动轮中心垂直平面距离)表示履带支承面上的垂直载荷沿履带支撑面长度的分布情况，当其他条件不变时，若垂直载荷沿履带支承面均匀分布，则滚动阻力最小，附着性能提升。因此，合理排布各部件位置，优化质量分布，使质心位置和压力中心在满足牵引性能的同时，不会因偏移影响电动履带拖拉机稳定性。

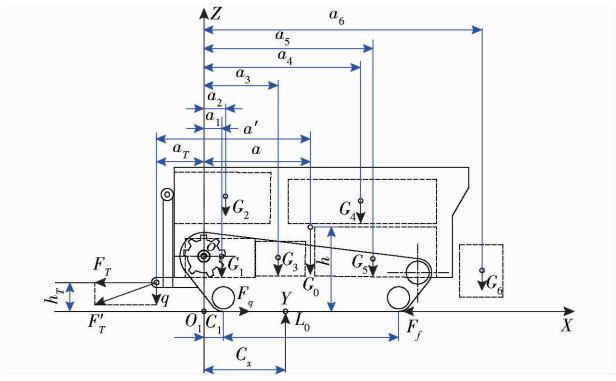


图 3 电动履带拖拉机质心分布及受力简图

Fig. 3 Diagram of tractor centroid distribution and forces

电动履带拖拉机质心纵向坐标设计值 a 为

$$a = \frac{G_1 a_1 + G_2 a_2 + \cdots + G_6 a_6}{G_1 + G_2 + \cdots + G_6} \tag{1}$$

式中 G_1、G_2、…、G_6——各部件重力

a_1、a_2、…、a_6——各部件重心纵向坐标

根据图 3，对作用于电动履带拖拉机上的所有外力对点 O_1 取矩得

$$G_0 a = YC_x + F_T h_T + q a_T \tag{2}$$

式中 G_0——电动履带拖拉机实际使用时所受重力，N

Y——土壤对履带支承段上全部垂直反力的合力，N

F_T——平均牵引阻力，N

q——总牵引阻力 F'_T 在垂直方向上分力，N

h_T——F_T 到水平面高度，m

a_T——牵引点到驱动轮中心水平距离，m

当电动履带拖拉机在水平地面稳定运动时，取 $q=0$，$Y=G_0$，将式(2)简化为

$$C_x = a_0 - \frac{F_T h_T}{G_0} \tag{3}$$

由式(3)可知，牵引力 F_T 增大，压力中心纵向坐标 C_x 减小，压力中心后移，电动履带拖拉机发生车头上翘，压力呈三角形分布，垂直载荷沿履带支承面分布不均匀。为使垂直载荷均匀分布，压力中心应始终位于履带支撑面中心。因此，C_x 为

$$C_x = C_1 + 0.5 L_0 \tag{4}$$

式中 C_1——履带支承段末端到驱动轮中心距离，m

L_0——履带接地长度，m

由式(3)、(4)得电动履带拖拉机质心纵向坐标

理论值为

$$a_0 = C_1 + 0.5L_0 + \frac{F_T h_T}{G_0} \tag{5}$$

将 $G_1 \sim G_6$、$a_1 \sim a_6$ 代入式(1)得 $a = 672$ mm。将 C_1、L_0、F_T、h_T、G_0 代入式(5)，得电动履带拖拉机质心纵向坐标理论值 $a_0 = 727$ mm。电动履带拖拉机质心纵向坐标设计值与理论值相差较大，压力中心距离支撑面中心靠后，电动履带拖拉机车头上翘。因此，对电动履带拖拉机结构布局进行优化，将配重重力 G_6 增大到 200 N，同时将电池组位置前移 120 mm，电池组重心纵向坐标 a_4 增大 120 mm，将优化后参数代入式(1)，得电动履带拖拉机质心纵向坐标设计值 $a = 722$ mm，与质心纵向坐标理论值 a_0 接近，满足设计要求。

2.2　犁耕工况

以双铧犁犁耕所需功率进行动力计算。由于犁耕作业时速度较低、加速动作很少，因此，忽略加速功率和空气阻力功率消耗。根据图 3，电动履带拖拉机驱动平衡方程为

$$F_q = F_f + F_T \tag{6}$$

其中

$$F_T = 0.1keb_n h \tag{7}$$

$$F_f = mgf \tag{8}$$

式中　F_q——驱动力，N

F_f——行驶阻力，N

k——土壤比阻，取 60 kPa

e——铧犁数量，取 2

b_n——单体犁铧宽度，取 20 cm

h——耕深，取 18 cm

m——电动履带拖拉机使用质量，取 1 000 kg

g——重力加速度，m/s^2

f——滚动阻力系数，取 0.10

将 k、e、b_n、h、m 和 f 代入式(6) ~ (8)得：$F_q = 5\,300$ N，$F_T = 4\,320$ N。

在犁耕作业过程中，考虑到履带与地面间附着力 F_ϕ 的限制[25]，应满足

$$F_\phi = \phi mg \geqslant F_q \tag{9}$$

式中　ϕ——附着系数，取 0.65

将 ϕ 和 m 代入式(9)得：$F_\phi = 6\,370$ N $\geqslant F_q$，说明驱动力 F_q 满足地面附着力要求，平均牵引阻力 F_T 符合功率需求。

2.3　驱动电机匹配

根据 2.2 节计算，电动履带拖拉机犁耕作业需求功率为

$$P_N \geqslant \frac{F_{TN} v}{3.6\eta_M} \tag{10}$$

其中

$$F_{TN} = 1.2F_T \tag{11}$$

式中　P_N——电动履带拖拉机犁耕作业时额定功率，kW

F_{TN}——额定牵引力，N

v——犁耕作业理论速度，取 3.0 km/h

η_M——电动履带拖拉机从电动机到牵引农具间传递效率，取 0.55

将 F_T、v、η_M 代入式(10)、(11)得：$P_N \geqslant 7.85$ kW。因此，电动履带拖拉机行走系统两驱动电机总功率大于 7.85 kW。永磁同步电机具有控制性能好、效率高等特点[26]，因此，行走电机选择 2 台额定电压 96 V、额定功率 4 kW、额定扭矩 25.4 N·m、额定转速 1 500 r/min、TZQ180－4－96B－X 型永磁同步电机。

2.4　动力电池匹配

电动履带拖拉机动力电池为磷酸铁锂电池[27]。根据 2.3 节的功率需求，计算动力电池容量。在实际工作过程中，动力电池组存在一定的放电损耗，常用电池组有效放电系数 ξ_{SOC} 来衡量电池组可实际输出能量。根据市场现状设定 ξ_{SOC} 为 0.82。因此，动力电池组实际总容量为

$$C_r = \frac{1\,000 P_N T}{\xi_{SOC} U} \tag{12}$$

式中　C_r——动力电池组需求总容量，A·h

T——犁耕作业额定续航时间，取 3 h

U——动力电池组额定电压，取 96 V

将 P_N、T、U 代入式(12)得：$C_r = 299.16$ A·h，故选定动力电池组总容量为 300 A·h，额定电压为 96 V，总能量为 28.8 kW·h。

2.5　控制系统设计

电动履带拖拉机控制系统包括电控系统和数据采集系统。电控系统通过 CAN 通讯控制左右驱动电机、电动推杆等控制器，主要包括：动力源模块、遥控操纵模块、控制与执行模块等，如图 4 所示。动力源模块包括动力电池组、BMS 和 DC/DC 转换器。遥控操纵模块包括遥控发射器和遥控信号接收器。控制与执行模块包括总控制器、左侧电机控制器、右侧电机控制器、电动推杆控制器、左侧驱动电机、右侧驱动电机、电动推杆和直流接触器。总控制器通过 CAN 总线对遥控信号接收器及 BMS 中的报文进行解析，将得到的目标信息处理后向控制器发送控制指令，实现对驱动电机和电动推杆等控制。

电动履带拖拉机驱动电机控制原理如图 5 所示。采用永磁同步电机 $i_d = 0$ 矢量控制方法，给定转速 n^* 与反馈转速 n_{real} 作差后输入到速度环控制器中，输出 q 轴电流 i_q^* 经电流环控制器及 PARK 逆变换后输入给 SVPWM 模块，然后经逆变器控制驱

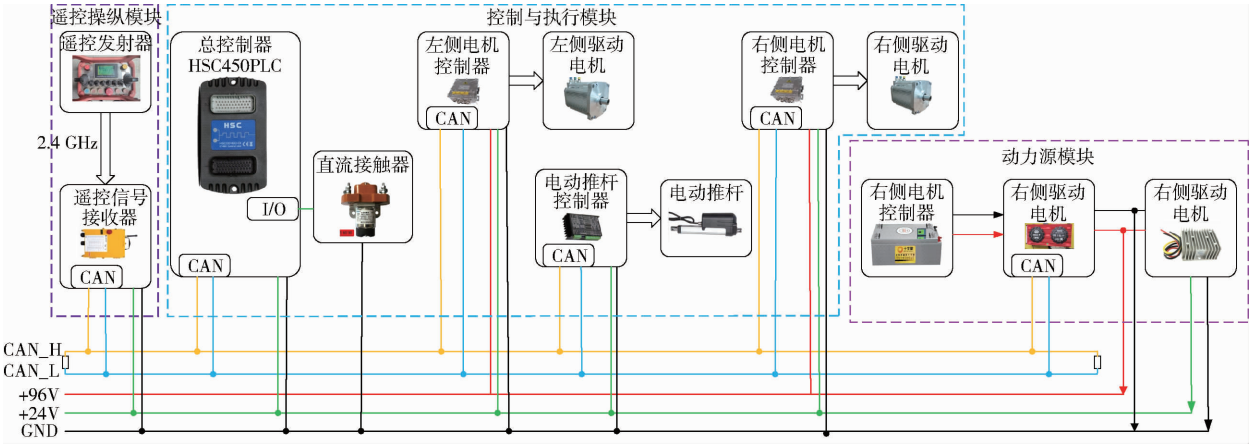


图 4 电控系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of electronic control system

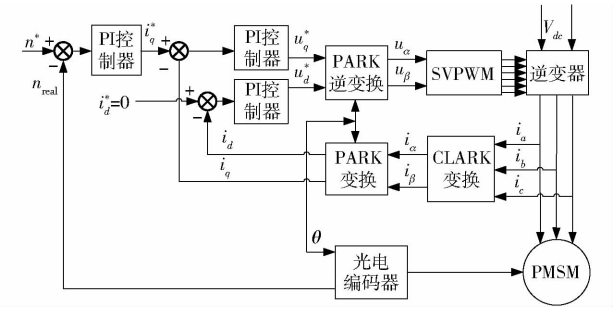


图 5 驱动电机控制原理图

Fig. 5 Diagram of drive motor control system

动电机工作。工作中,始终给定 d 轴电流为 0。

电动履带拖拉机作业时,数据采集系统动态获取试验数据,系统工作原理如图 6 所示。工控机通过 CAN 分析仪实时获取 BMS 记录的剩余电量、输出电流、输出功率,以及计米器和拉力传感器输出参数等数据,存储在本地并同步到手机 APP 上。

3 试验

3.1 基本性能试验

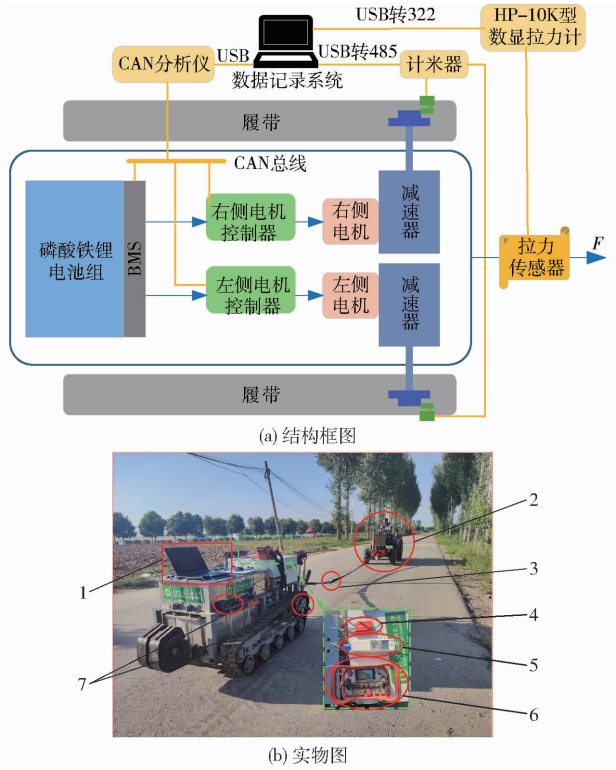
3.1.1 直线行驶性能试验

在西北农林科技大学丘陵山地“土壤-机器-作物”综合实验平台,采用 Mars 4H 型 NOKOV 度量光学三维动作捕捉系统,对电动履带拖拉机进行直线行驶性能试验,如图 7 所示。

拖拉机行驶速度为 2 km/h,土壤含水率平均值为 15.2%,土壤坚实度平均值为 742.8 kPa。试验结果如图 8 所示,电动履带拖拉机最大跑偏量为 1.765 m,平均跑偏量为 1.259 m,远小于国家标准(GB/T 15370.4—2012)[28],表明电动履带拖拉机直线行驶性能较好。

3.1.2 转向性能试验

电动履带拖拉机行驶速度为 2 km/h,试验地面坡度小于 3%[29],进行单边制动转向试验和原地转向试验,如图 9 所示。



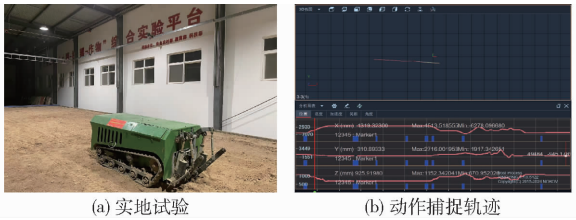
(a) 结构框图

(b) 实物图

图 6 试验数据采集与记录系统

Fig. 6 Test data acquisition and recording system

1. 数据记录系统 2. 牵引负载 3. 拉力传感器 4. CAN 分析仪 5. 数显拉力计 6. 遥控器 7. 计米器



(a) 实地试验 (b) 动作捕捉轨迹

图 7 直线行驶试验

Fig. 7 Straight-line driving tests

在转向轨迹上每隔 120°取 1 个点测量轨迹直径,分别为 D_1、D_2、D_3,试验结果如表 2、3 所示。电动履带拖拉机单边制动最小转向圆半径平均值为

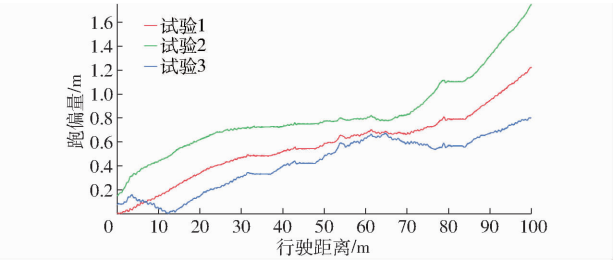


图 8　直线行驶跑偏量变化曲线

Fig. 8　Straight-line driving deviation change curves



(a) 实地试验　　(b) 动作捕捉轨迹

图 9　转向性能试验

Fig. 9　Steering performance tests

1 096 mm，单边制动最小通过圆半径为 1 232 mm，原地转向最小转向圆半径为 729 mm。电动履带拖拉机转向性能良好，符合温室作业空间狭小要求。

3.1.3　牵引性能试验

电动履带拖拉机行驶速度为 1、3、5、7 km/h，根据 GB/T 3871.9—2006[30] 进行牵引性能试验。行驶速度、牵引力、电池输出特性及两侧驱动电机输出扭矩变化情况，如图 10 和表 4 所示。电动履带拖拉机在 4 种行驶速度下，两侧履带滑转率均低于 15% 时，牵引功率分别为 1 367.1、4 201.1、6 922.8、9 173.3 W。随着行驶速度增加，牵引功率显著提升。电动履带拖拉机最小平均牵引力为 5 320.4 N，远大于 RODNEI 等[18] 研制的轮式拖拉机牵引力（1 766 ~ 1 956 N）和相近功率燃油拖拉机牵引力（1 700 ~ 2 500 N），具有良好的牵引性能。

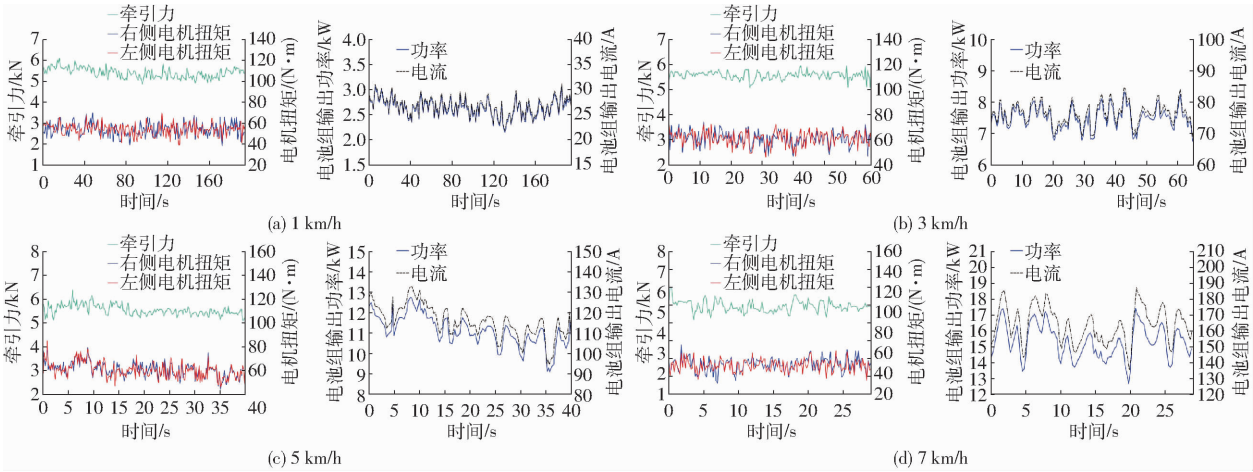


图 10　不同行驶速度下拖拉机牵引性能试验

Fig. 10　Traction tests of tractor at different speeds

表 4　不同行驶速度下拖拉机牵引性能试验结果

Tab. 4　Traction test results of tractor at different speeds

参数	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
理论速度/(km·h^{-1})	1	3	5	7
实际速度/(km·h^{-1})	0.918	2.769	4.500	6.207
平均牵引力/N	5 361.0	5 461.9	5 538.2	5 320.4
电池输出功率/W	2 643	7 485	11 816	15 289
耗电量/(W·h)	143.9	135.2	131.3	123.2
左履带滑转率/%	7.98	7.48	9.55	10.53
右履带滑转率/%	8.04	7.61	9.69	10.75

表 2　单边制动转向半径

Tab. 2　One-sided braking and turning radius　mm

轨迹直径		左转	右转
D_1	转向圆	2 183	2 199
	通过圆	2 465	2 478
D_2	转向圆	2 188	2 179
	通过圆	2 445	2 499
D_3	转向圆	2 207	2 208
	通过圆	2 480	2 485
最小转向半径平均值	转向圆	1 096	1 098
	通过圆	1 232	1 244

表 3　原地转向半径

Tab. 3　In-situ turning radius　mm

轨迹直径	左转	右转
D_1	1 466	1 448
D_2	1 458	1 458
D_3	1 468	1 466
最小转向半径平均值	732	729

3.2　温室犁耕作业工况试验

3.2.1　犁耕试验

在温室中，根据 GB/T 14225—2008[31]，对电动履带拖拉机进行犁耕试验。犁耕速度为 3 km/h，试验时间 70 s，目标耕深 18 cm、耕幅 40 cm，土壤含水率为 17.5% ~21.6%，土壤坚实度为 243.4 ~479.5 kPa。犁耕试验结果如表 5 所示，耕深和耕幅平均值分别为 17.18 cm 和 40.55 cm，满足犁耕作业要求。电池组

表 5 犁耕试验结果

Tab. 5 Results of plowing test

参数	数值
实际速度/(km·h^{-1})	2.560
滑转率/%	14.6
电池输出功率/W	8 677
耗电量/(W·h)	169.4
平均耕幅/cm	40.55
平均耕深/cm	17.18

输出功率及两侧驱动电机总输出扭矩变化曲线如图 11 所示。

驱动电机输出扭矩及电池组输出电流波动较大,两电机总输出扭矩为 49 ~ 174 N·m,动力电池组输出电流为 58.9 ~ 125.6 A。电驱动系统过载能力较强,可适应土壤性质变化并提供足够驱动力。

3.2.2 续航试验

在 3.2.1 节犁耕工况下,进行电动履带拖拉机续航试验。动力电池组输出功率曲线如图 12 所示,电池组输出功率虽稍有震荡,但基本稳定。动力电池组剩余电量变化曲线如图 13 所示,电量从 100% 到 0,可作业约 200 min。电动履带拖拉机在犁耕工况平均耕幅 40.20 cm、平均耕深 17.05 cm 作业条件下,续航时间可达 3.35 h,满足设计要求。

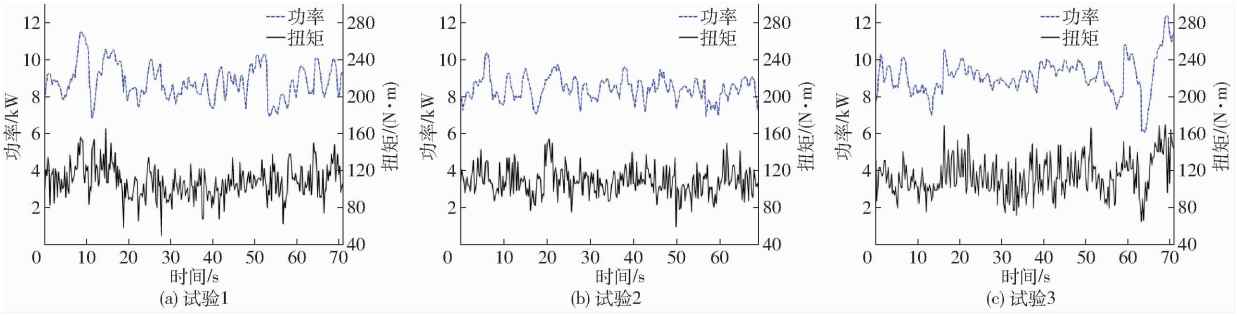


图 11 动力电池组输出功率及两电机总输出扭矩变化曲线

Fig. 11 Variation curves of output power of power pack and total output torque of two motors

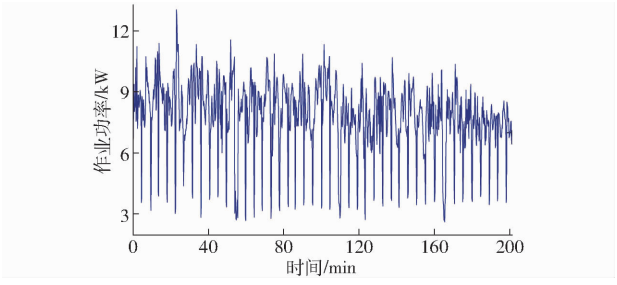


图 12 动力电池组输出功率曲线

Fig. 12 Output power curve of power pack

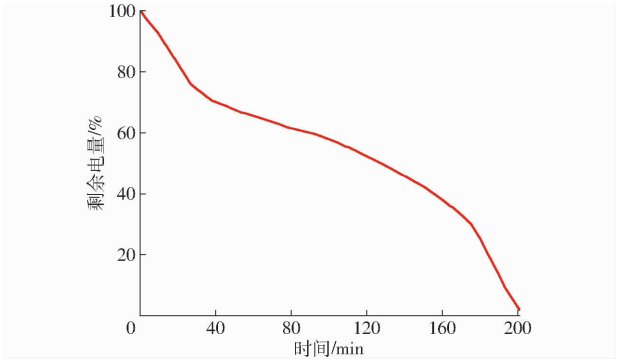


图 13 动力电池组剩余电量变化曲线

Fig. 13 Change curve of remaining power of power pack

4 结论

(1)针对目前小型电动动力机械驱动性能不足、转向性能较弱,较难满足温室作业空间狭小的生产需求等问题,提出了一种以双电机分布式驱动为动力传动方式的电动履带拖拉机设计方案。

(2)基于质心位置分配法确定电动履带拖拉机质心位置理论值,优化各部件排布位置,使电动履带拖拉机实际质心位置接近理论位置,完成电动履带拖拉机整机结构设计;以犁耕作业和运输作业为目标,进行了电动履带拖拉机电驱动系统核心部件匹配,并完成了电控系统设计。

(3)在温室中进行电动履带拖拉机基本性能和工况试验。电动履带拖拉机平均百米跑偏量为 1.259 m,原地转向最小转向圆半径平均值为 729 mm,平均牵引力大于 5 320.4 N,具有良好的直线行驶性能、转向性能和牵引性能;犁耕平均耕深为 17.18 cm,犁耕作业续航时间可达 3.35 h,电动履带拖拉机动力性能和续航性能良好。

参 考 文 献

[1] 牟磊. 浅谈设施农业对农业发展的影响[J]. 河北农业, 2024(11): 22 - 23.

[2] 徐立友,张俊江,闫祥海,等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 1 - 12.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, YAN Xianghai, et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 1 - 12. (in Chinese)

[3] 孙景彬,曾令坤,应婧,等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 202 – 220.
SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 202 – 220. (in Chinese)

[4] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 348 – 364.
LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 348 – 364. (in Chinese)

[5] 徐立友,赵一荣,赵学平,等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 355 – 363.
XU Liyou, ZHAO Yirong, ZHAO Xueping, et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 355 – 363. (in Chinese)

[6] Electric Vehicles, Inc. Huge electric tractor—Fendt e100 vario electric tractor[EB/OL]. (2019 – 03 – 13) [2023 – 05 – 05]. https://electricvehicles.in/huge-electric-tractor-fendt-e100/.

[7] KNECHTGES H, RENIUS T K. Gesamtentwicklung Traktoren[J]. Jahrbuch Agrartechnik, 2016, 27: 42 – 53.

[8] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 412 – 420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412 – 420. (in Chinese)

[9] SILVEIRA F D, RUPPENTHAL J E, LERMEN F H, et al. Technologies used in agricultural machinery engines that contribute to the reduction of atmospheric emissions: a patent analysis in Brazil[J]. World Patent Information, 2021,64: 102023.

[10] THOMAS W, STEPHAN H. New battery driven vehicle generation of electric tractors[J]. ATZheavy Duty Worldwide, 2019, 12(4): 16 – 21.

[11] 陈黎卿,詹庆峰,王韦韦,等. 纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 388 – 394.
CHEN Liqing, ZHAN Qingfeng, WANG Weiwei, et al. Design and experiment of electric drive system for pure electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 388 – 394. (in Chinese)

[12] YOO I, KIM B. A study of driving simulation considering the various working modes of electric tractor[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2013, 14(11): 5357 – 5365.

[13] 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23 – 29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23 – 29. (in Chinese)

[14] LIU Jing, XIA Changgao, JIANG Donglin, et al. Determination and application of maximum efficiency curve of crawler electric tractor motors[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1 – 10.

[15] 王宝超,乔明睿,初香港,等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431 – 439.
WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431 – 439. (in Chinese)

[16] 谢斌,张超,陈硕,等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 8 – 13.
XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 8 – 13. (in Chinese)

[17] ZHANG Shengli, XIE Bin, WEN Changkai, et al. Intelligent ballast control system with active load-transfer for electric tractors [J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 143 – 155.

[18] RODNEI R M, FERNANDO L M A, SÉRGIO D, et al. Conception of an electric propulsion system for a 9 kW electric tractor suitable for family farming[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(12): 1993 – 2004.

[19] LI Xianzhe, LIU Mengnan, HU Chenming, et al. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor[J]. Energy, 2024, 292: 130485.

[20] 崔志超,管春松,陈永生,等. 温室用小型多功能电动履带式作业平台设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 48 – 57.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, CHEN Yongsheng, et al. Design of small multi-functional electric crawler platform for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2019, 35(9): 48 – 57. (in Chinese)

[21] 赵思夏,刘孟楠,徐立友. 电动拖拉机底盘多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 492 – 498.
ZHAO Sixia, LIU Mengnan, XU Liyou. Optimization design of electric tractor chassis based on multiple performance objectives [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 492 – 498. (in Chinese)

[22] 武仲斌,刘宇,张君,等. 电动拖拉机动力电池压载构型设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 425 – 433.
WU Zhongbin, LIU Yu, ZHANG Jun, et al. Configuration design and parameter optimization of power battery ballast for electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 425 – 433. (in Chinese)

[23] 陈兵,马凯璇,刘洋,等. 双电机驱动履带车辆直驶稳定性分层控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(10): 2752 – 2760.
CHEN Bing, MA Kaixuan, LIU Yang, et al. Straight driving stability hierarchical control for dual-motor driving electric tracked vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(10): 2752 – 2760. (in Chinese)

[24] HAN Jiangyi, WANG Fan, WANG Yuhang. A control method for the differential steering of tracked vehicles driven independently by a dual hydraulic motor[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6355.
[25] 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
[26] CAI W, WU Xiaogang, ZHOU Minghao, et al. Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles[J]. Automotive Innovation, 2021, 4(1): 3 - 22.
[27] YANG Yue, CHEN Lei, YANG Lijun, et al. Capacity fade characteristics of lithium iron phosphate cell during dynamic cycle [J]. Energy, 2020, 206: 118155.
[28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业拖拉机 通用技术条件 第4部分:履带拖拉机: GB/T 15370.4—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
[29] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 农业拖拉机 试验规程 第5部分:转向圆和通过圆直径: GB/T 3871.5—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业拖拉机 试验规程 第9部分:牵引功率试验: GB/T 3871.9—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 铧式犁: GB/T 14225—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(上接第 765 页)

[14] 陈嘉鹤. 桑黄在中国的潜在分布、液体发酵培养与多糖抗氧化研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2023: 22 - 28.
CHEN Jiahe. Potential distribution in China, liquid fermentation optimization and antioxidation of polysaccharides of *Sanghuangporus*[D]. Shenyang: Liaoning University, 2023: 22 - 28. (in Chinese)
[15] ALASALVAR H, YILDIRIM Z. Ultrasound-assisted extraction of antioxidant phenolic compounds from *Lavandula angustifolia* flowers using natural deep eutectic solvents: an experimental design approach[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2021, 22: 100492.
[16] PARES D, TOLDRA M, CAMPS E, et al. RSM optimization for the recovery of technofunctional protein extracts from porcine hearts[J]. Foods, 2020, 9(12): 1733.
[17] ALVAREZ C, LELU P, LYNCH S A, et al. Optimised protein recovery from mackerel whole fish by using sequential acid/alkaline isoelectric solubilization precipitation (ISP) extraction assisted by ultrasound[J]. LWT, 2018, 88: 210 - 216.
[18] YANG K, XU T R, FU Y H, et al. Effects of ultrasonic pre-treatment on physicochemical properties of proteins extracted from cold-pressed sesame cake[J]. Food Research International, 2021, 139: 109907.
[19] 高思聪,黄文选,黄志超,等. 食叶草蛋白的提取工艺及其性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 189 - 198.
GAO Sicong, HUANG Wenchuan, HUANG Zhichao, et al. Study on the extraction process and properties of protein from edible dock[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(1): 189 - 198. (in Chinese)
[20] PIGNATARO M F, HERRERA M G, DODERO V I. Evaluation of peptide/protein self-assembly and aggregation by spectroscopic methods[J]. Molecules, 2020, 25(20): 4854.
[21] SU J, CAVACO-PAULO A. Effect of ultrasound on protein functionality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105653.
[22] 牛雅倩. 基于生物技术的马铃薯淀粉废水处理工艺研究[D]. 天津:天津科技大学, 2021: 26 - 28.
NIU Yaqian. Study on patato starch wastewater treatment process based on biotechnology[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021: 26 - 28. (in Chinese)
[23] KRILOV D, BALARIN M, KOSOVIC M, et al. FT - IR spectroscopy of lipoproteins-a comparative study[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2009, 73(4): 701 - 706.
[24] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2010: 493 - 496.
[25] ALAVI F, EMAM-DJOMEH Z, MOHAMMADIAN M, et al. Physico-chemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105554.
[26] CHENG J, CUI L. Effects of high-intensity ultrasound on the structural, optical, mechanical and physicochemical properties of pea protein isolate-based edible film[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 80: 105809.
[27] SUN X, ZHANG W, ZHANG L, et al. Effect of ultrasound-assisted extraction on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(3): 1150 - 1160.
[28] LI Y, CHENG Y, ZHANG Z, et al. Modification of rapeseed protein by ultrasound-assisted pH shift treatment: ultrasonic mode and frequency screening, changes in protein solubility and structural characteristics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105240.