

机器人用伺服系统性能测试加载系统的设计

卿湘运¹, 陆 聰²

(1. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237;
2. 上海安规机电设备有限公司, 上海 201612)

摘要:采用西门子 S7-1500 可编程控制器和 Sinamics S120 变频器设计了机器人用伺服系统性能测试加载系统。介绍了性能测试系统的组成以及加载系统的软硬件设计方法。给出了加载闭环控制系统的建模方法,设计了转矩比例积分控制器和转矩微分负反馈控制器,以消除加载转矩静差和抑制转矩超调。实际应用结果表明,该系统各项性能指标均满足设计要求。

关键词: 电机性能测试; 加载试验; Sinamics S120; S7-1500; 闭环控制

中图分类号: TM921.541 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)11-0080-06

doi: 10.12177/emca.2023.137

Design of Loading System for Performance Test of Servo Systems in Robots

QING Xiangyun¹, LU Cong²

(1. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China;
2. Shanghai Angui Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd., Shanghai 201612, China)

Abstract: A loading system for performance test of servo systems in robots is designed by using a programmable logic controller S7-1500 and a variable frequency converter Sinamics S120. The compositions of performance test system, hardware and software designs of the loading system are presented. The close-loop control of loading system was modeled, and the torque proportional-integral controller and torque differential negative feedback controller are introduced to eliminate static torque errors and suppress torque overshoots. The practical application results show that the system performance indicators can meet design requirements.

Key words: motor performance test; loading test; Sinamics S120; S7-1500; close-loop control

0 引言

据统计,至 2021 年全球工业机器人运营库存已接近 350 万台,中国工业机器人累计运营库存数量为 115 万台。尽管受全球疫情影响,2021 年中国工业机器人全年累计产量仍达到 36.6 万台,新增装机量达 21 万台。工信部《十四五机器人产业发展规划》提出我国到 2025 年机器人产业营业收入年均增长超过 25%,到 2035 年我国机器人产业综合实力达到国际领先

水平。作为工业机器人的核心部件,伺服系统是影响工业机器人工作性能的主要因素。工业机器人用伺服系统具有响应迅速、起动转矩惯量比大、调速范围宽、伺服电机体积小、轴向尺寸短,能频繁的正反向以及加减速运行等特点,特别在机器人仿生关节和机械手臂领域,新型多自由度电机具有控制精度和效率明显提高、体积和质量大幅度减小等特点^[1],对于任何一种新型号机器人伺服系统来说这些性能指标的测试都是一项基础工作。设计新型实用的伺服

收稿日期: 2023-06-20; 收到修改稿日期: 2023-08-14

作者简介: 卿湘运(1977—),男,博士,研究方向为运动控制。

系统性能测试和分析平台,不仅能为标准化国产交流伺服系统提供参考意见,还能为其伺服系统生成厂家提供测试和分析的具体手段^[2]。

目前已有一些基于对拖式测功机的伺服系统性能测试或变速器测试的方案设计,文献[3]设计了基于西门子可编程控制器(PLC)S7-300和Sinamics S120系列变频器的三相异步电机型式加载系统,提出的方案在某知名电机厂得以应用;文献[4]设计了基于西门子1215C型PLC的超声电机测试系统,完成超声电机机械特性测试、自动加减速载测试、带负载启动特性测试和手动测试。文献[5-8]给出了基于西门子可编程控制器S7-1200和S120系列变频器的伺服电机及系统特性性能测试设计,介绍了系统的设计思路与软硬件结构,所设计的系统已投入实际检测应用;文献[9]利用Visual Studio 2019开发环境中的C#编程语言开发了电机综合测试系统采集分析软件;文献[10]介绍了基于S120变频器的汽车变速器加载试验台的系统原理和设计过程。文献[11]基于西门子S120变频器的叉车门架动态加载系统,使用伺服电机加减速机和链轮链条的方式进行叉车门架动态闭环PID加载。可以看出,对于具有高控制精度和短响应时间要求的高性能测功机加载系统,考虑到系统长期运行的稳定性,目前电机性能测试加载系统一般采用西门子S120变频器。

本文主要介绍基于西门子S7-1500PLC和S120系列变频器的机器人用伺服系统性能测试对拖式测功机中加载系统的设计,并在西门子新一代软件开发框架TIA博途软件中编程实现了加载系统的软件开发。加载系统主要为被测伺服电机转轴上提供连续变化或突变的转矩负载,同时为了满足相关交流伺服系统性能测试的国家标准和机械行业标准要求,加载系统也以速度控制和位置控制的方式拖动被测电机完成相关性能指标测试。本文在给出了测功机平台及S120驱动系统硬件组态与配置的基础上,进一步对加载系统转矩闭环控制进行了研究,在开发的产品中进行了测试与长时间运行验证。

1 机器人用伺服系统性能测试系统

服务于机器人用伺服系统性能测试的测功机

平台示意图如图1所示。为了可靠测试伺服系统在高速和低速运行时的性能,设计了高速和低速两个台架,高速台架加载电机为新一代西门子1PH8系列交流异步电机,低速台架为西门子SFM系列永磁同步伺服电机,低速台架配有减速器。电参数测量装置由横河功率分析仪构成,能够获得被测电机的电压、电流、功率因数、输入和输出功率等参数。温度测量装置在负载和温升及过载等试验时记录温度参数,Kstler转矩转速传感器及其仪表记录实际作用在被试电机轴上的各种转矩上,其值应跟踪加载系统给定转矩值。由于被测伺服系统转速高,加载转矩大,对被测电机、转矩转速传感器和加载电机之间的机械连接需要有足够的同轴度和机械稳定性^[12],所以系统配有激光对中仪,以便在伺服系统测试前进行联轴器对中。

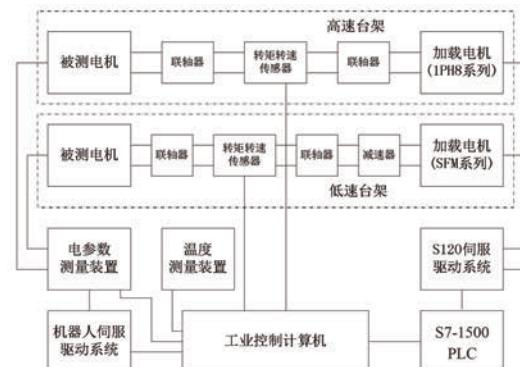


图1 测试系统原理图

选用西门子S7-1500系列PLC作为加载系统的核心控制器,工业控制计算机即上位机根据机器人用伺服系统性能测试要求发送各种工艺命令如定转速控制、闭环定转矩加载和闭环定输入输出功率加载等给PLC,PLC根据接收的工艺命令设计控制算法,下发命令给加载系统S120伺服驱动器,驱动加载电机运行完成各项性能测试。PLC也将加载系统的运行数据、故障和报警状态信息等通过以太网返回给上位机。上位机同时根据测试需求从所连接的传感器自动采集试验数据,根据试验要求处理和保存数据,绘制曲线并生成相关试验报告。测试系统现场如图2所示。由于这种测试框架在目前的测功机中较常采用,所以本文主要介绍加载系统的软硬件设计。



图 2 测试系统现场图

2 基于西门子 S7-1500 PLC 和 S120 变频器的加载系统硬件设计

本加载系统硬件部分由以下几个部分构成：

(1) S7-1500 CPU 模块与点对点通信模块。

本系统采用西门子新一代 SIMATIC PLC 产品 1513-1 PN, CPU 模块响应时间短^[13], 位指令执行时间最短只需 1 ns, 集成运动控制功能、标准以太网接口和 PROFINET 接口等, 可以使用 LAD、STL 和 SCL 等编程语言, 因此能够方便地实现较复杂的控制算法。本系统 PLC、驱动控制单元与上位机之间的通信如图 3 所示。除了采用 MODBUS TCP/IP 协议与上位机通信用以发送驱动器运行信息之外, 还配置一块点对点(P2P)通信模块, 使用 RS232 协议接收上位机的工艺命令和用于闭环调节的转矩传感器数据。PLC 通过 PRIFINET IO 实现与驱动控制单元的实时通信。

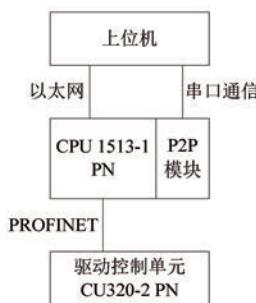


图 3 测试系统通信图

(2) 驱动控制单元。本系统采用 CU320-2 PN 作为系统的多个单轴电机模块的控制单元, 其与整流模块单元、单轴电机模块、伺服电机以及编码器的组态如图 4 所示, 使用 DRIVE-CLiQ 布线。驱动控制单元提供驱动功能和工艺功能, 驱动器的闭环控制都在此单元中实现, 负责

所有驱动轴的转速控制、转矩控制以及位置伺服控制^[14]。在本系统中, 高速台架加载系统主要实现转速/转矩控制, 低速台架还要实现位置控制功能。

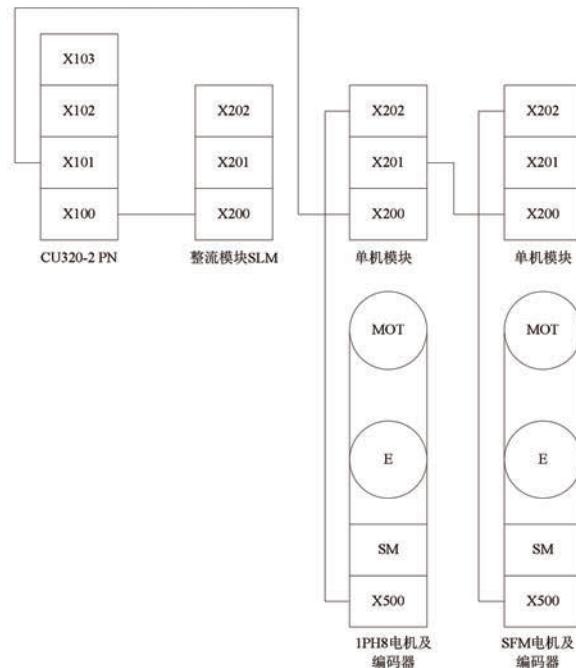


图 4 驱动单元组态

(3) 电源模块。本系统采用书本型非调节型回馈整流单元 SLM, 将交流整流为直流, 且将两个单机电机模块即逆变单元连接到该整流模块的直流母线上, 加载电机在加载试验时工作于回馈制动状态, 其能量通过直流母线回馈到电网。

(4) 电机模块。两个单机电机模块分别为 1PH8 交流异步电机和 SFM 永磁同步伺服电机的功率单元, 由整流模块的直流母线供电, 通过 DRIVE-CLiQ 与驱动控制单元相连。

(5) 加载电机与编码器。为实现高精度的转速、转矩与位置闭环控制, 所选用的西门子电机均配套编码器, 即图 4 中的 E。编码器也通过 DRIVE-CLiQ 与对应的电机模块相连。

3 基于西门子 PLC 和 S120 变频器的加载系统软件设计

上位机根据机器人用伺服系统测试要求向 PLC 发送转速、转矩和位置控制工艺命令, 如定速度加载、快速定转矩加载、闭环定转矩加载、闭环

定输入输出功率加载与位置控制等。PLC 根据接收到的工艺指令与工艺参数,结合上位机传送的传感器数据,将每道工艺用西门子的函数(FC)实现,各函数对驱动控制单元发送控制指令和在线修改驱动单元参数。系统组态、软件编程和电机调试均在西门子 TIA 博途软件中实现。TIA 博途软件采用新型、统一的软件框架,为全集成自动化的实现提供了统一的工程平台^[15]。本系统 PLC 编程中用到的函数(FC)与函数块(FB)大部分用结构化编程语言 SCL 实现,便于实现复杂的数学计算与控制逻辑,组织块(OB)则用传统的梯形图(LAD)实现。每道工艺含六个状态,其状态流程图如图 5 所示。首先对将要执行的工艺计算初始参数,如加减速斜率和加载转矩步长等;然后给驱动单元上电,如为加载运行进行闭环控制,将转矩传感器上转矩值调节至 0 转矩附近,在接到运行指令后驱动单元开始运行,在运行中收到新的工艺指令则修改工艺参数继续运行。如果需暂停,则驱动器暂停,但保持工艺参数不变,等待继续运行指令,工艺执行完毕则退出此工艺,并清除所有工艺参数。

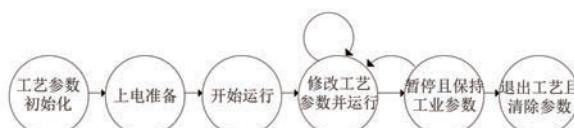


图 5 加载系统状态流程图

下面介绍软件编程中几个重要的注意事项。

(1) PLC 与电源模块和电机模块的通信报文。选用合适的报文便于 PLC 发送控制字并读取驱动单元状态字,同时由于 TIA 博途软件中包含面向 SINAMCS 变频控制的驱动功能块,因此电源模块选用 370 报文,便于使用 SINA_INFEED 功能块。高速台架的电机模块选用 352 报文,此报文可向 PLC 返回西门子电机转矩、转速、报警和故障的信息,将接收报文中的两个保留字设为转矩设定值,然后 S7-1500 调用系统功能块“DPRT_DAT”读取高速台架电机模块数据,调用系统功能块“DPWR_DAT”将数据写入此电机模块。低速台架的电机模块因要实现位置功能,故选用 111 报文,便于使用 SINA_POS 功能块。由于 111 报文主要面向位置控制,而低速台架也要实现转速/

转矩控制功能,因此需要扩充此报文。驱动单元接收 PLC 指令的报文扩充 4 个字,其中两个字为转速设定值,另两个字为转矩设定值,驱动单元向 PLC 发送信息的报文扩充 2 个字,分别为转速实际值和转矩实际值。通过此报文选取和扩充设计,既能满足本系统的功能要求,又能最大程度地利用 TIA 中的功能块。

(2) 通过 BICO 技术实现转速、转矩与位置控制模式的切换及转矩设定。S120 中的 BICO 互联技术可以对驱动设备功能进行控制,从而满足各种应用的要求。因此,在高速台架中,转速控制与转矩控制模式的切换通过改变命令参数 P1501 来实现,将 P1501 与 r2090.8 进行 BICO 互联,而 r2090.8 对应 352 报文中控制字的 STW1.8 位,因此通过 PLC 在线修改 STW1.8 位的值,即可实现转速与转矩控制模式的切换。S120 中的转矩设定值为命令参数 P1503,此参数与 352 接收报文中的转矩设定值进行 BICO 互联,即可在线设定转矩值。

对于低速台架要实现三个模式之间的切换更为复杂。本系统将 111 报文中的 STW1.12 位(r2090.12)与命令参数 P2550 互联,实现位置控制激活;STW1.14(r2090.14)与命令参数 P1142 互联,实现速度控制激活;STW1.15(r2090.15)与命令参数 P1501 互联,实现转速与转矩控制切换。位置控制模式与速度控制模式切换需要屏蔽一些位置控制参数,防止驱动报故障信息。转速设定命令参数 P1155 和转矩设定命令参数 P1503 则通过 BICO 与驱动单元接受报文扩充字互联,驱动单元报文发送扩充字则与转速实际值和转矩实际值互联。同时需要适当修改 SINA_POS 功能块源代码,实现三个控制模式之间的切换。

(3) S120 参数的在线修改。在系统运行时,通过驱动功能库中的 SINA_PARA_S 功能块在线修改 S120 驱动单元的加减速时间、最大转速和转矩上下限值。

(4) 捕捉再启动。在进行性能测试时,被测电机经常先运行,处于旋转状态,加载系统驱动单元在上电后,通过设定参数 P1200 来激活“捕捉再启动”功能,将加载系统逆变单元自行切换到正在旋转的加载电机上,可以避免整个测试装置在初始加载时发生剧烈抖动。

除了以上事项,软件编程最核心的任务是转矩加载闭环控制。西门子驱动系统内部计算的转矩值经过闭环调节跟踪加载系统驱动器的转矩给定值,而转矩传感器测得的真实转矩值与此给定值常存在偏差,因此需要设计闭环控制算法。其反馈为转矩传感器的测量值,使得此测量值快速跟踪上位机的转矩给定值,消除稳态误差。

4 加载闭环控制

4.1 加载闭环控制建模

如前所述,加载闭环控制系统的转矩反馈值应为转矩传感器测量值,而不是驱动单元内部计算得到的转矩值。由于驱动单元内部控制算法的详细模型很难得到,因此用一个一阶惯性系统对驱动单元内部的转矩控制进行建模,其惯性时间常数 τ_1 设为 PLC 发送转矩控制指令至转矩稳定输出的时间,约为 0.03 s。驱动单元内部计算得到的转矩值与转矩传感器测量值的偏差作为转矩扰动,主要为摩擦转矩^[16],包括电机本身的空载转矩和传动机构的转矩等,因此需要一个积分环节来消除稳态误差。同时,加载测试时一般要求转矩超调值要尽可能小,有些测试场景甚至不允许出现转矩超调,因此本设计使用转矩微分负反馈控制方法,在阶跃转矩给定时,能有效减少转矩输出超调量。

加载闭环控制系统的动态结构如图 6 所示,图中: T^* 为上位机发送的加载转矩给定值; T 为转矩传感器测量值; ΔT 为两者之差,对 ΔT 使用比例积分(PI)调节器得到 ΔT^* ; k_p 为 PI 调节器的比例系数; k_i 为积分系数。设有积分限幅及调节器输出限幅,转矩给定值 T^* 与转矩差调节器输出值 ΔT^* 之和 T_e^* 为发送给驱动单元的转矩设定值; T_i 为 S120 驱动单元返回的转矩计算值; T_d 为转矩扰动,即为实际测量转矩与驱动单元转矩返回值之差; T 则为连轴器上转矩传感器测量得到的转矩。测量转矩经滤波与延时反馈给 PLC,用一个一阶系统来描述其反馈通道,惯性时间常数为 τ_2 ,其值可设定为采样时间 0.1 s。引入时间常数为 τ_3 的转矩微分负反馈,使的转矩调节器退饱和的时间提前,减少突加转矩给定时的转矩超调量。

4.2 试验结果

首先使用 Simulink 对转矩闭环控制系统进行

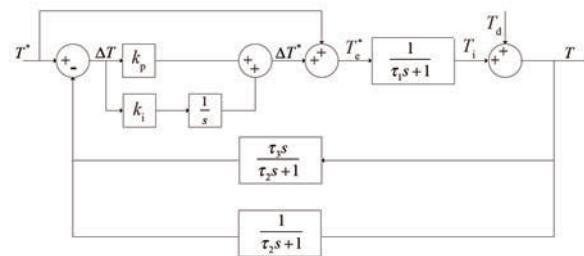


图 6 加载闭环控制系统动态结构图

建模仿真,以检验建模和控制算法的可行性。当给定转矩值从 0.5 N·m 以步长 1 N·m 增至 4.5 N·m,转矩扰动设为给定值的 10% 时,其仿真结果如图 7 所示,转矩无超调,且能实现转矩无静差,转矩上升时间很短。结果表明,使用转矩 PI 调节器能消除转矩稳态误差,加入转矩微分负反馈能抑制突加转矩时的转矩超调。图 8 是实际运行结果,其加载方式与模拟加载一致,转矩给定阶跃变化时转矩超调量很小,其后加载运行时转矩能稳定在给定值。

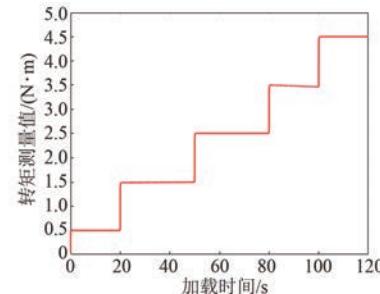


图 7 加载闭环控制系统模拟结果

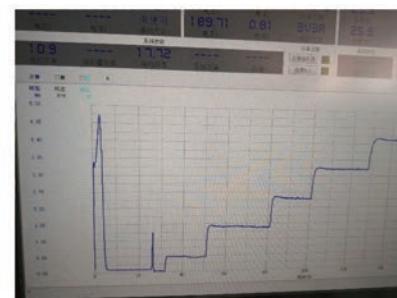


图 8 实际加载闭环控制系统运行结果

5 结语

所设计的加载系统已在上海某机器人伺服电机性能测试中心运行三年多,经过大量在线调试和整定参数工作,该系统已为许多主流机器人用

伺服系统厂商进行了实际检测应用。按照国家标准《交流伺服系统通用技术条件》、《永磁交流伺服电动机通用技术条件》和行业标准等进行温升测试、过载试验、负载试验,T-N 曲线测试、转速波动、转矩波动、转速和转矩变化的时间响应等测试,各项测试性能指标均满足设计目标。并与电机厂家自有的性能测试平台进行比较,在抑制转矩脉动和转矩超调方面性能表现更优。详细的加载性能量化指标,如转矩控制精度和响应时间等,依赖于加载转矩给定值和电机运行速度等,此伺服电机性能测试中心也展开了类似文献所述测试新能源汽车电机性能的测试项目^[17],记录和分析了测试结果,均满足要求。现正改进系统,采用倍福 TwinCAT3 平台与西门子 S120 变频器实现高速数据采集与通信的高性能伺服系统性能测试加载系统。

【参考文献】

- [1] 李争, 邢璇璇, 刘力博, 等. 多自由度电机的发展及关键技术综述[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 1-11.
- [2] 滕福林, 胡育文, 李宏胜, 等. 伺服系统性能测试和分析平台[J]. 电气传动, 2011, 41(1): 45-50.
- [3] 吴健, 余真, 陈秀琴, 等. 三相异步电机型式试验台电源与加载系统[J]. 电气传动, 2014, 44(5): 75-77+80.
- [4] 郑伟, 黄伟彬, 周景亮, 等. 基于可编程逻辑控制器的超声电机测试系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 123-126+130.
- [5] 王海军, 李怀珍. 伺服电机及系统特性性能测试系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 127-130.
- [6] 王传军. 交流伺服系统特性分析与测试[J]. 电机控制与应用, 2018, 45(6): 117-121.
- [7] 王传军, 李怀珍, 方栋梁. Sinamics 120 在伺服系统测试中的应用[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 93-96.
- [8] 汪蓉, 李孜, 周腾嘉, 等. 基于伺服加载技术的电机综合性能测试台研制[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(4): 51-54.
- [9] 董陟嵩, 李怀珍. 电机综合测试系统采集分析软件设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 103-109.
- [10] 郁林聪, 吴达. 基于 Sinamics S120 的变速器实验台加载控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2010, 32(10): 219-220.
- [11] 倪侖, 丁利锋, 童可嘉. 基于西门子 S120 变频器的叉车门实动态加载系统[J]. 装备制造技术, 2022(4): 250-253+269.
- [12] 曹俊, 郑敏仙. 两类永磁同步伺服电机性能测试平台的比较[J]. 伺服控制, 2013(5): 38-42.
- [13] 廖常初. S7-1200/1500 PLC 应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [14] 徐清书. SINAMICS S120 变频控制系统应用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [15] 崔坚. SIMATIC S-1500 与 TIA 博途软件使用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [16] 顾和祥. 运动控制系统应用及实例解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [17] 严蓓兰. 新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 109-116.

(上接第 36 页)

- [18] 刘鹏, 李云伍, 梁新成. 基于遗忘递推最小二乘与自适应无迹卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估计[J]. 汽车技术, 2022, 557(2): 21-27.
- [19] 孙金磊, 邹鑫, 顾浩天, 等. 基于 FFRLS-EKF 联合算法的锂离子电池荷电状态估计方法[J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 505-513.
- [20] 高峰, 贾建芳, 元淑芳, 等. 基于 GRU-UKF 的锂离子电池 SOC 估计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 160-169.
- [21] HE Y J, YANG K, SONG Z X, et al. SOC estimation of liquid metal battery based on BC-FFRLS online parameter identification [C] // 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2022.
- [22] 袁正峰, 郭兴众, 花晓飞. 基于改进的 AEKF 铅酸电池 SOC 在线估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 228-235.