

脉冲发电机励磁控制器的先进触发控制^{*}

叶 强, 李华俊, 李维斌

(核工业西南物理研究院聚变科学所, 四川 成都 610041)

摘要: 利用 LabVIEW RT、LabVIEW FPGA 软件模块和 CompactRIO 硬件平台, 设计了一种具有先进触发控制的励磁控制器。控制器由上位机、励磁调节器和励磁触发器构成。励磁调节器和上位机分别完成 PID 控制和人机交互功能。基于 CompactRIO 内嵌 FPGA 电路开发的励磁触发器则实现同步信号的频率可靠跟踪和可控硅触发脉冲的高精度控制。搭建试验验证平台对新型励磁控制器进行了验证。结果表明: 该控制器各部分可靠运行, 整体协调有序, 脉冲触发控制满足高精度要求; 该控制器提高了励磁调节中的触发控制效率。

关键词: 励磁调节; 触发控制; CompactRIO; LabVIEW RT; LabVIEW FPGA

中图分类号: TM301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0037-06

doi: 10.12177/emca.2022.017

Advanced Trigger Control of Excitation Controller for Pulse Generator^{*}

YE Qiang, LI Huajun, LI Weibin

(Center for Fusion Science, Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: An excitation controller with advanced trigger control is designed by using LabVIEW RT, LabVIEW FPGA software modules and CompactRIO hardware platform. The controller is composed of master computer, excitation regulator and excitation trigger. The excitation regulator and master computer carry out PID control and human-computer interaction functions, respectively. The excitation trigger developed based on CompactRIO with the embedded FPGA circuit realizes reliable frequency tracking of synchronization signal and high-precision control of thyristor trigger pulse. An experimental verification platform is built to verify the new excitation controller. The results show that each part of the controller operates reliably, and the whole is coordinated and orderly. The pulse trigger control meets the requirements of high precision, and the trigger control efficiency in excitation regulation is improved.

Key words: excitation regulation; trigger control; CompactRIO; LabVIEW RT; LabVIEW FPGA

0 引言

我国目前规模最大、参数最高的新一代核聚变试验研究装置中国环流器 2 号 M 装置(HL-2M)主供电系统包括 4 台飞轮脉冲发电机组, 其中 2 台 80 MVA 机组(1#、2#)通过变压器和不可控整流设备为环向场线圈供电; 125 MVA(3#)和 300 MVA(4#)机组经变压器和可控硅变流单元为

极向场线圈供电^[1-3]。

励磁控制器作为 HL-2M 脉冲发电机励磁装置的主要构成之一, 起着调控作用, 是等离子体物理试验大系统中的关键环节。由于 HL-2M 装置中的环向场线圈供电回路的整流环节为不可控式, 线圈电流波形只能由励磁控制器控制, 同时励磁控制回路和环向场线圈供电回路时间常数较大, 需要励磁控制器具备更短的响应时间、更高的

收稿日期: 2022-01-07; 收到修改稿日期: 2022-04-27

*基金项目: 四川省科技计划资助项目(2021JDTD0022)

作者简介: 叶 强(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大功率脉冲发电机励磁控制技术。

李华俊(1970—), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为大功率脉冲供电技术。

控制精度和更好的可靠性,尤其是在实现 HL-2M 装置 MA 级等离子体放电能力的目标下,这种需求更为迫切。现有励磁控制系统仍沿用 HL-2A 时期的 DOS 系统,随着时间的推移呈现出了一些局限性,如数据实时传输方面难以满足当前励磁控制需求;同时系统需要由多个功能模块共同完成脉冲发电机的励磁控制,尤其是需要单独的数字触发板实现触发控制,可靠性较低。

为了满足 HL-2M 高水平等离子体物理试验对励磁控制系统快速响应的需求,本文利用 CompactRIO 嵌入式系统设计一种具有先进触发控制且适用于不同磁场线圈的励磁控制器。该控制器触发环节的精度较高,有利于提升控制器的整体控制精度。

1 励磁控制器基本原理及其硬件设计

脉冲发电机为磁场线圈负载和二级高压加热负载提供可靠的电力输出时离不开励磁控制器的参与。HL-2M 装置的 4 台脉冲发电机励磁控制器运行环境基本相同,运行环境如图 1 所示,其中, i_t 为励磁整流柜输出的励磁电流。励磁控制器工作原理是:励磁控制器的上位机在励磁投入前,下载、解析中控设置的参考波形 VEC 文件和控制参数 DPF 文件,在励磁退出后,完成励磁控制过程数据的打包上传,励磁控制器在待机期间,还不断检测来自励磁 PLC 系统的强励时序信号以投入工作;投入励磁控制后,励磁控制器的算法调节部分按时序以 1 ms 的控制周期实时调节励磁,在调节过程中输出控制电压 U_k 和控制信号 CTRL,并在灭磁完后整理形成励磁控制过程数据,控制器的触发部分根据同步信号周期和实时输出的 U_k 与 CTRL 生成励磁整流单元的脉冲信号,实现对脉冲发电机励磁电流的控制。

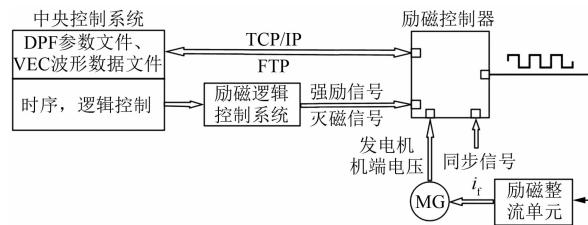


图 1 励磁控制器运行环境

根据励磁控制器的运行环境与工作原理,确
— 38 —

定基本硬件架构为 PC+CompactRIO,如图 2 所示,PC 上位机为励磁控制器与中控的接口,实现人机交互和中控文件解析功能;CompactRIO 为励磁控制器的控制核心,提供浮点运算、实时控制和逻辑处理等功能^[3-5],由实时控制器、可重配置的 FPGA 和工业级 I/O 模块 3 个部分组成^[6-7]。基于实时控制器和 LabVIEW 图形化环境可实现集成浮点数据处理和过程控制的实时控制平台;实时控制器+FPGA+I/O 的硬件布局使 CompactRIO 具备高精度测量和高速逻辑处理的能力。CompactRIO 由励磁调节器与励磁触发器构成,分别实现励磁实时控制和脉冲触发控制。根据 CompactRIO 各部分的特点并结合励磁调节器和励磁触发器的任务需求,确定了下位机布局,即在 RT 层面实现励磁调节以及在 FPGA 电路中实现励磁触发。



图 2 励磁控制器基本硬件框架

2 励磁实时控制及人机交互

励磁调节器实现励磁控制器的核心功能,即根据励磁控制算法和策略对脉冲发电机端电压进行实时控制。依据中控所设参考波形,将励磁调节过程划分为 4 个阶段:延时阶段、通电阶段、反馈阶段和灭磁阶段。控制时序如图 3 所示, t_{fe} 为强励时刻, t_p 为通电时刻, t_f 为反馈时刻, t_{de} 为灭磁时刻, t_o 为退出时刻。延时阶段下励磁调节器不工作,仅用于计时;通电阶段要求励磁调节器依照励磁参考波形输出 U_k ,其目的是为了保证在反馈时刻达到反馈设定的范围,进而提高反馈控制效率;反馈阶段的作用是基于 PID 控制算法调节目标波形,以按照中控设置的参考波形变化;最后是灭磁阶段,目的是减小在励磁功率柜上的冲击。根据控制的任务和特点,在 RT VI 中设计了初始化程序以接收上位机下传的参数;设计时间局部变量 t 、分段控制选择程序和增量 PID 控制程序实现核心算法的控制;设计 FPGA 接口读写程序实现 U_k 与脉冲信号的转换。为了完善励磁调节器,还设计了故障保护程序以及励磁调节数据整

理收集程序。调节器执行流程如图 4 所示, W 为励磁电压参考波形。



图 3 控制时序

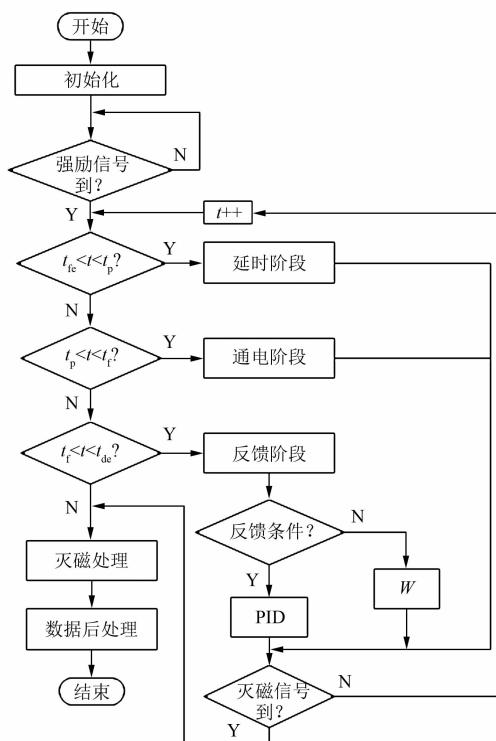


图 4 励磁调节器实时控制流程图

HMI 人机交互界面包括炮号更新显示区、状态监测区、数据波形显示区、参数设置区；此外，上位机还要完成文件处理非实时任务。作为中控系统与 CompactRIO 的桥梁，上位机与中控通过 TCP/IP 协议通信，采用共享变量方式与 CompactRIO 进行数据交互。为保证励磁调节时放电参数不刷新，设计一个表征励磁控制状态的布尔变量 ExWork 实现上位机文件解读与下位机励磁调节互锁，只在 ExWork = False 时执行放电文件的下载和解读。工作过程如图 5 所示。

3 高精度触发控制

励磁触发器实现频率追踪和脉冲控制等功能。在励磁触发器软件开发中采用模块化、集成化和多线程的先进算法结构，有利于未来对系统

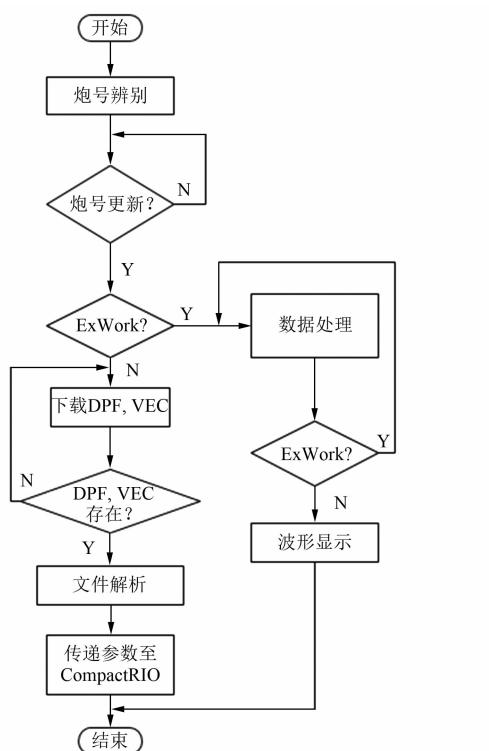


图 5 上位机流程图

进行升级和扩展，缩短开发周期和降低成本^[8]。

所谓同步，就是要求加在励磁整流柜晶闸管的触发脉冲与加在晶闸管阳极电路上的电压在频率和相位上是一致的。实现同步是同步信号处理模块的主要功能，只有实时准确地测量出频率，且确保触发脉冲输出相位正确，才能可靠实现跟踪控制^[9]。为获取高精度频率测量结果和提高同步信号故障检测的能力，在 FPGA VI 中采用 3 个高速循环结构并行执行采样、测量和诊断等任务。采样循环中以高达 1 sample/10 μs 的速度对同步信号进行采样，并完成正、负零点的判定；测量模块利用内嵌单周期定时循环 (SCTL) 结构以一个硬件时钟的循环步长测量同步信号周期；根据三相电压输入的各种情况^[10] 和缺相特征，在诊断循环中设计了相序错误和缺相的判断程序。同步信号处理模块的运行过程如图 6 所示， T 为同步信号周期。

脉冲控制要求控制精度高、实时性好、对称度高、稳定性强、触发安全可靠^[11]。而实现高精度脉冲触发控制对逻辑处理速度要求较高。FPGA 具有强大的逻辑处理能力和可重配性，易实现触发器的脉冲控制，借助 LabVIEW FPGA 工具使功

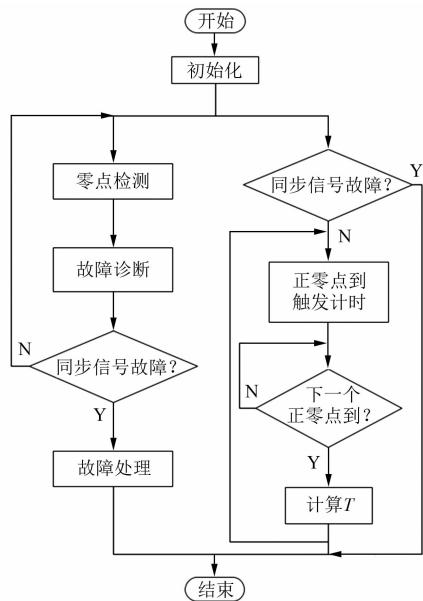


图 6 同步信号处理流程图

能开发更加灵活。

HL-2M 单台脉冲发电机组的励磁功率单元由 2 个晶闸管整流柜并联而成。在整流柜合闸起动过程中或电流断续时,为了保证电路的正常工作,需确保同时导通的 2 个晶闸管均有脉冲。由于宽脉冲触发方式存在脉冲变压器易饱和的问题,且改善成本较大,采用双脉冲触发。产生双窄脉冲的方法有 2 种,分别是外双脉冲法和内双脉冲法。基于 FPGA+I/O 灵活架构并考虑到实现的难易度,采用内外双窄脉冲混合触发的方式。然而,实际中采用双窄脉冲触发整流电路时往往会造成晶闸管热量升高和影响功放板中脉冲变压器的功能。为此,在触发双窄脉冲基础上,使之变成与之对应的一系列窄脉冲,从而形成双窄脉冲列输出。不同的可控硅可能需要脉冲列中脉冲个数不同,为了解决此问题,将脉冲列中窄脉冲周期设计为可调。

脉冲控制需要解决 3 个核心问题:频率是否与同步信号可靠同步;是否在正确时刻施加脉冲;脉冲形式的产生。具体设计为,在同步信号处理模块 FPGA VI 中建立并行的脉冲控制线程,实现脉冲触发控制与同步信号处理 2 个线程在硬件层面上的并行执行,满足 2 个模块对逻辑处理的高速性和独立性要求,并利用“同步信号周期”局部变量实时读取同步信号周期,实现 2 种信号的可

靠同步;采用平铺式顺序结构+触发性延时结构组合用于固定脉冲施加的时间基准点(正确的起始时刻),确保脉冲施加的有效性,提高系统可靠性;在 SCTL 中,根据励磁调节器设置的触发角 α 和脉宽,以硬件时钟为执行周期,输出一个周期的高低电平组合,形成标准的双窄脉冲,在双窄脉冲的基础上增加频率可调的低电平信号列,两者信号相加后,双窄脉冲信号低电平段不变,高电平段形成高低交替的脉冲列。脉冲触发控制模块执行过程如图 7 所示,CTRL 为解封锁信号。

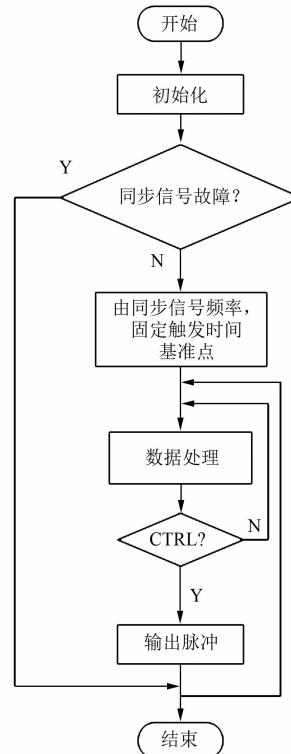


图 7 脉冲控制流程图

4 试验验证

首先利用搭建的小型试验平台对跟炮下载与解读中控文件、励磁分段控制、同步信号周期测量、同步信号故障判断、脉冲信号触发控制等基础功能进行了验证,然后在与原有 DOS 微机励磁控制系统的并联运行中进行了调试。部分频率测量结果如表 1 所示,在 80 Hz 处出现最大测量误差 $(80.0883 - 80.0000) / 80 = 0.11\%$ 。当输入 50 Hz 同步信号时,设置不同触发角对励磁整流柜的桥臂 1、3、5 双窄脉冲信号进行移相控制,脉冲控制结果如图 8 所示,脉冲信号的施加起始时刻正确,

频率和同步信号可靠同步,在不同 α 控制下,脉冲控制精度均在100 μs 内,其中 $\alpha=36^\circ$ 、 90° 和 126° 时,控制误差分别为66.67 μs (3 666.67–3 600.00)、66.67 μs (6 666.67–6 600.00)和66.67 μs (8 666.67–8 600.00)。图9给出了双窄脉冲列信号及设置不同周期(对应脉冲列中极窄脉冲个数)的控制效果,极窄脉冲周期设置在30 μs 和50 μs 时,测量显示分别为32 μs 和48 μs ,极窄脉冲周期最小可设置为20 μs ,可提高励磁控制器触发功能实用性。CompactRIO励磁控制器与DOS励磁控制器并联跟炮运行,在某一炮号下2个励磁控制系统的双窄脉冲输出波形对比如图10所示,其中黑色曲线是DOS保存的波形,灰色曲线是CompactRIO保存的波形,可以看出并联调试时,在强励信号正确触发励磁投入后,2个系统产生的控制趋势几乎一致。

表1 部分频率测量结果

理论值	实测值	Hz
30.000 0	30.004 1	
50.000 0	50.004 2	
80.000 0	80.088 3	

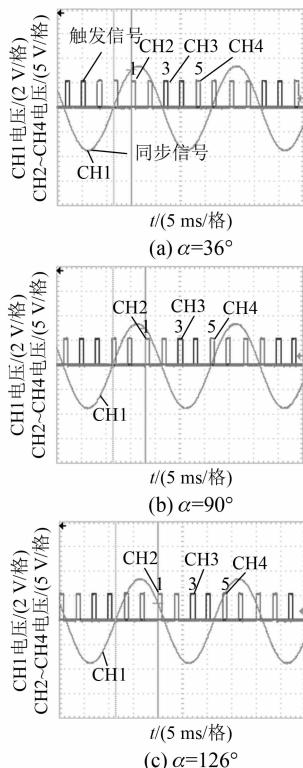


图8 双窄脉冲移相控制

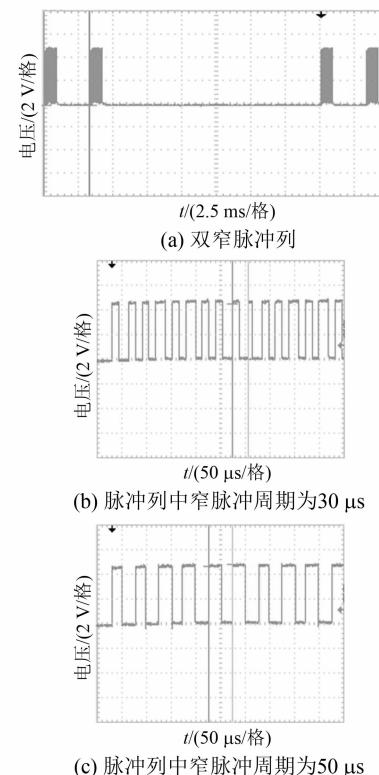


图9 双窄脉冲列控制

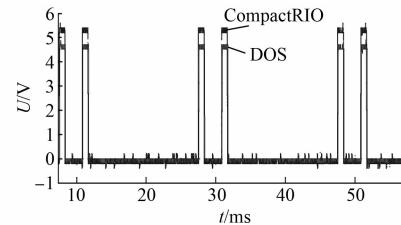


图10 控制波形对比

5 结语

为了提高HL-2M脉冲发电机励磁控制的兼容性和可靠性,基于CompactRIO设计了一种励磁控制器。该控制器打破了原有需要单独数字触发板才能实现触发控制的励磁控制架构局限,降低了硬件设备复杂度,提高了励磁控制的可靠性。此外,控制器核心算法采用模块化编程,在FPGA+I/O架构下可适用于在环向场和极向场两种负载下开展励磁控制研究,提高了励磁控制的兼容性。基于试验验证平台进行验证,从上位机的数据解析和命令接收,到RT实时励磁控制,再到FPGA触发控制,整个过程协调有序;频率测量和

脉冲控制精度均在微秒级,脉冲信号与同步信号可靠同步;可设置不同脉冲形式,对于双窄脉冲列脉冲形式还可以根据功放板需要设置构成脉冲列的极窄脉冲个数;新励磁控制系统产生的控制逻辑与原有系统一致。验证结果表明励磁控制器具备高精度、高灵活的先进触发控制功能,控制结果正确,满足励磁控制需求。

【参考文献】

- [1] 李华俊,徐丽荣,刘学梅,等. HL-2A 装置环向场电源系统及其控制[J]. 工兵自动化,2004(1): 55.
- [2] 李维斌,卜明南,刘学梅,等. HL-2A 装置脉冲发电机励磁控制系统[J]. 核聚变与等离子体物理,2014,34(1): 40.
- [3] 王驰,李华俊,卜明南. 基于 CompactRIO 的脉冲发电机励磁调节器[J]. 电机与控制应用,2017,44(7): 34.
- [4] 王丁丁,武杰,张杰,等. 基于 CompactRIO 的数据采集模块设计[J]. 核技术,2012,35(7): 539.
- [5] YUSIVAR F, SEMBIRINGR J. Implementation of space vector pulse width modulation using CompactRIO [C] // 2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T), 2013.
- [6] MOHD S, ZULKIFLIS A, RANGKUTI R G A, et al. Electric vehicle energy management system using National Instruments' CompactRIO and LabVIEW [C] // 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), 2013.
- [7] CHEN W, SU J. Comparison of several communication methods between host computer and CompactRIO [C] // Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012.
- [8] 周建,任磊磊,宋显明,等. HL-2M 装置等离子体放电反馈控制系统[J]. 核聚变与等离子体物理,2020,40(1): 52.
- [9] 单鹏乐. 基于 TMS320F28377D 的同步发电机励磁控制器的研究[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [10] BIDGOLI M A, SOORI A, BINA M T. A new phase sequence detector for the three-phase rotary loads [C] // 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2011.
- [11] 陈革辉,申群太. 基于 DSP 的晶闸管全数字控制器[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2003,34(6): 670.

· 下期论文预告 ·

基于反电动势谐波分析的 FSCW-PMSM 失磁故障诊断

摘要:为避免永磁体局部失磁对永磁电机控制精度和安全运行带来影响,提出了一种基于反电动势谐波分析的分数槽集中绕组永磁同步电机(FSCW-PMSM)局部失磁故障诊断方法。在推导出的 FSCW-PMSM 局部失磁时磁动势和单槽反电动势的数学模型基础上,根据单槽反电动势各谐波分量的幅值和特征绕组系数得到单相反电动势各谐波幅值的定量变化关系,并验证利用单相反电动势谐波变化诊断失磁故障的可行性。最后,基于一台 20 极 24 槽内置式永磁同步电机的样机参数建立二维有限元模型开展电磁仿真分析,获得单相反电动势特征谐波的变化规律。结果表明:单相反电动势特征谐波的大小随故障数量增大呈周期性变化。当失磁永磁体的数量为 5 的倍数时,各谐波幅值最低;当失磁数量接近 5 的倍数间的中间数时,各谐波幅值最高,而基波幅值则随失磁永磁体数量的增大而几乎线性下降。

基于并联 CNN-LSTM 的弱受端直流输电系统故障诊断

摘要:现有的故障诊断手段面对复杂电网时,难以精确提取故障特征,急需适应性强、识别率高的故障诊断方法。鉴于此,提出一种基于压缩感知与并联卷积神经网络(CNN)和长短期记忆网络(LSTM)结合的电网故障诊断方法。搭建永富直流输电系统模型采集原始故障数据,原始故障数据应用压缩感知原理进行压缩采样,获得压缩域故障信号,以提高网络的计算效率。然后搭建了麻雀搜索算法(SSA)优化的并联 CNN-LSTM 深度学习模型。通过 SSA 确定并联 CNN-LSTM 的网络结构及参数,利用并联 CNN-LSTM 深度学习模型直接在故障的压缩域挖掘故障波形特征和时序特征,并对故障进行识别。仿真结果表明该模型相较于传统方法具有更高的故障诊断精度。