

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0087-05

面向风电机组维修工作的软硬件结合仿真培训技术

王海潇

(大唐河北新能源(张北)有限责任公司,河北张家口075100)

摘要:为了提高风电机组的运行维护管理水平,设计一个软硬件结合的风电机组仿真模型,对相关工作人员的技术水平进行培训提升。结果显示,研究构建的仿真培训技术,对风电机组实时状态的预测结果相似度可达到0.99,故障预警时间可降至1s内。采用该仿真培训技术可将工作人员的技术培训时间压缩至15d左右。研究设计的风电机组仿真培训技术,可显著降低风电机组运维管理人员的培养成本,有利于提高风力发电设施的经济效益。

关键词:风电机组;培训;维修;仿真模型

中图分类号: TP277;TP391.9;TM315

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0087-05

Software and hardware integration simulation training technology for wind turbine maintenance work

WANG Haixiao

(Datang Hebei New Energy (Zhangbei) Co., Ltd., Zhangjiakou 075100, Hebei, China)

Abstract: To improve the operation, maintenance and management level of wind turbines, a software and hardware integrated wind turbine simulation model is designed to train and enhance the technical level of relevant personnel. The results show that the simulation training technology developed by the research can achieve a similarity of 0.99 in predicting the real-time status of wind turbines, and the fault warning time can be reduced to within 1 second. The use of this simulation training technology can compress the technical training time of the staff to about 15 days. The research and design of wind turbine simulation training technology can significantly reduce the training cost of wind turbine operation and maintenance management personnel, and is conducive to improving the economic benefits of wind power generation facilities.

Keywords: wind turbines; train; repair; simulation model

社会经济的发展离不开能源的消耗,传统经济发展的能源消耗多依靠不可再生的化石能源^[1]。随着化石能源储量的不断降低,风、光能源等可再生清洁能源逐渐成了经济发展中主要的消耗能源^[2]。风电能源是最廉价易得的能源之一,但其相关设备需要花费人力与物力进行管理维护^[3]。当前对风电机组运行维护管理人员的培训多依靠建立风电机组仿真模型,加深工作人员对风电机组运行机制的理解来实现^[4]。尹尧杰等为了分析风电机组变桨过程中故障发生的原理与机制,开发设计了一个电驱独立变桨实训平台,对风电机组变桨过程进行了深入分析。结果显示,该实训平台可平稳运行,并帮助操作人员了解风电机组的运行状态^[5]。Nguyen等为了培训风电机组的运行维护管理人员,设计开发了一种风力发电运行实时模型,对工作人员的风电机组运行维护能力进行培训。结果显示,该模型可加强工作人员对风电机组的了解,使工作

人员具备相关基础知识^[6]。由于风电机组设备价值较高,且无法随意移动,导致现有培训技术对工作人员进行技能培训时,仅停留于理论阶段,相关操作接触较少。因此,为了强化现有风电机组培训技术的水平,研究设计了一种结合软硬件结构的半实物仿真培训系统,强化工作人员对风电机组的运行维护管理水平。

研究的创新点在于,构建了风电机组运行数学模型,并基于该数学模型,设计了一个风电机组故障维修培训的半实物仿真模型。研究的主要贡献是改进了风电机组的仿真培训方式,强化了风电机组仿真培训的教学水平,有助于提高风电机组的运行维护管理水平。

1 双馈风机仿真实训系统

1.1 风电机组数学模型构建

风电机组的基本结构包括机械动力设备、控制系统及

收稿日期:2024-08-29;录用日期:2024-09-18

基金项目:河北省可再生能源示范区发展十四五规划项目(KT20220218036)

作者简介:王海潇(1995—),男,本科,助理工程师,研究方向:设备检修维护方向。

引用本文:王海潇.面向风电机组维修工作的软硬件结合仿真培训技术[J].自动化技术与应用,2026,45(2):87-91(WANG Haixiao. Software and hardware integration simulation training technology for wind turbine maintenance work[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(2):87-91)

监控系统。动力设备包括叶轮、发电机等设备,控制系统包括主控、变桨、变频等,监控系统包括上位机监控与人机交互^[7]。风电机组的数学模型包括风速模型、风轮模型、传动模型、电机模型^[8]。风速模型可模拟风电机组的实际工作环境,研究设计的仿真模型中,风速相关方式可分为实际风速数据、自控风速数据与组合风速数据。实际风速数据由风电场收集的历史风速数据,自控风速由操作人员在仿真系统直接输入的风速数据,组合风速为多种风速特性组合得到的风速数据^[9-10]。风轮模型需要分析风轮在工作状态中的受力情况进行构建,风电机组工作状态,其风轮受力情况如图1所示。

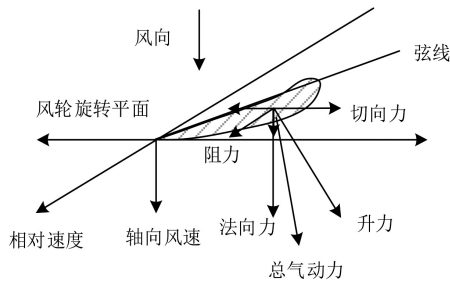


图1 风电机组风轮受力分析

Fig. 1 Force analysis of wind turbine rotor

若将风电机组的叶素弦长视为定值,那么叶素在工作状态下受到的升力与阻力可表示为

$$\begin{cases} dL = 0.5\rho Clw^2 dr \\ dD = 0.5\rho Cd w^2 dr \end{cases} \quad (1)$$

式中, dL 表示叶素在工作状态下的升力, dD 表示叶素在工作状态下的阻力, ρ 表示空气密度, C 表示升力系数, w 表示叶素弦线的方位角, dr 表示叶片半径微元, l 表示风轮叶片与旋转平面的夹角。

根据叶轮叶素的升力与阻力可计算叶素微元的转矩公式为

$$dT = 0.5\rho rV^2 C_{sin} \theta \times dS_{cot} \theta \quad (2)$$

式中, dT 表示叶素微元转矩; V 表示风速; dS 表示叶素弦长沿半径方向的微元面积; r 表示当前叶素微元的半径。风轮转矩的计算公式^[11]

$$T = \int_{r_1}^{r_2} 0.5\rho rV^2 C_{sin} \theta \times dS_{cot} \theta dr \quad (3)$$

式中, T 表示风轮转矩。

传动系统负责连接风轮与发电机,利用风轮做工带动发电机做工,构建传动模型时,采用刚性传动模型。传动系统可利用齿轮箱,将风轮做工提供的转速放大,其放大比例计算公式^[12-13]为

$$n = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (4)$$

式中, ω_r 表示风轮转速, ω_g 表示发电机转速, n 表示转速放大比例。

风轮侧与发电机侧运动方程式为

$$\begin{cases} J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - T_d - nT_m \\ J_g \frac{d\omega_g}{n_p dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (5)$$

式中, J_r 表示风轮侧转动惯量, T_r 表示风轮轴上的转矩, J_g 发电机侧转动惯量, T_e 表示发电机轴上的转矩, T_d 表示机械阻转矩, T_m 表示齿轮箱转矩, n_p 表示发电机转速放大比例。

将式(5)进行简化后即可得到传动系统模型为

$$\left(J_r + n^2 \frac{J_g}{n_p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - T_d - nT_e \quad (6)$$

双馈风电机组的发电机是一个时变系统,其定子电压方程式为

$$\begin{cases} u_A = -R_s i_A + d\psi_A/dt \\ u_B = -R_s i_B + d\psi_B/dt \\ u_C = -R_s i_C + d\psi_C/dt \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_A, u_B, u_C 表示定子相电压, i_A, i_B, i_C 表示定子相电流, ψ_A, ψ_B, ψ_C 表示定子绕组磁链, R_s 表示定子绕组等效电阻。

双馈风电机组转子电压方程式为

$$\begin{cases} u_a = -R_r i_a + d\psi_a/dt \\ u_b = -R_r i_b + d\psi_b/dt \\ u_c = -R_r i_c + d\psi_c/dt \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_a, u_b, u_c 表示转子相电压, i_a, i_b, i_c 表示转子相电流, ψ_a, ψ_b, ψ_c 表示转子绕组磁链, R_r 表示转子绕组等效电阻。

1.2 风电机组故障模拟

风电机组运维管理的培训主要针对风电机组的故障检查与维修,风电机组的故障模拟功能,收录了风电机组可能出现的故障类型,及该故障对应的位置及原因。风电机组故障按照类型划分可大致划分为28种故障,共计200种以上的具体故障类型^[14-15]。研究设计的故障模拟功能采用树状列表的形式,对风电机组故障进行表示。故障树状列表分为三级结构,一级结构为风电机组的具体部件,也是故障发生的大概位置,如叶轮、发电机等。二级结构为一级结构中的具体组成,是故障发生的具体位置。三级结构是具体的故障。故障模拟时,将风电机组故障分为演示性与触发性。触发演示性故障模拟时,仿真培训系统交互界面会出现故障发生的原因及处理方法,还会附带演示图片。触发触发性故障时,不仅会出现演示性故障的全部内容,还会显示一个故障触发模拟指令按钮,点击该按钮时,风电机组仿真模型的主控制系统的控制指令会发生改变,使仿真模型出现该故障。故障触发功能的信号传递程序流程如图2所示。

如图2所示,在实现故障触发功能时,每一个故障类型的按钮均对应一个故障类型信号。该信号会通过系统通信协议向仿真模型传递,仿真模型在接收信号后,根据接收故障信号的类型,选择不同的传递方式,将信号向总控制柜传递。若故障类型属于温度故障,则其相关信号需

要向控制柜传递温度模拟量。此时故障触发按钮在连入故障全局变量的同时,保持与温度全局变量的连接。若未触发故障按钮,则控制柜向风电机组模型输入正常温度范围,若触发按钮,则控制柜向风电机组模型输入异常温度范围,使主控系统触发风机停机。

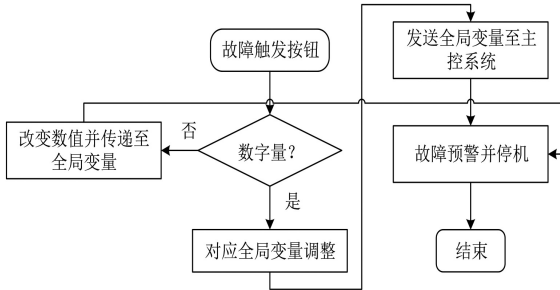


图2 故障信号传递程序流程

Fig. 2 Fault signal transmission procedure flow

1.3 仿真培训系统硬件结构设计

为了使培训系统可根据需求调整环境与场地,研究设计的仿真培训系统包含在线模式与离线模式。在线模式为实时仿真,离线模式为非实时仿真。该系统主结构包含3个子系统,第1个子系统为模型机子系统,该子系统内容包括风机、电机等风电机组部件,第2个子系统为上位机子系统,该子系统主要负责故障信号模拟触发,第3个子系统为主控系统。模型机子系统结构中包含的硬件结构为工控机、PCI板卡与RIO设备。上位机子系统结构中的硬件结构为人机交互可视化设备。主控系统结构中的硬件结构包括可编程逻辑控制器、主站从站系统、数字模块机板卡等。根据仿真培训系统硬件结构的基本组成,研究开发设计了一套基于虚拟现实的一体式可移动体验培训设备,设计图如图3所示。

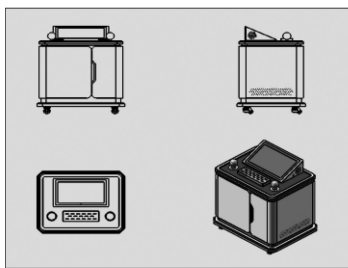


图3 一体式可移动体验培训设备设计图

Fig. 3 Design diagram of integrated mobile experience training equipment

研究设计的一体式可移动体验培训设备主要以安全用电培训为主,为了加强学员真实感受,研究通过安全用电体验培训系统研究与应用,开发了触电体验装置用于触电模拟培训教育,导电过载体验装置用于电流过载体验的培训教育。在保证体验人员安全的前提下,进行实体电流冲击体验,让体验人员真实感受电流带来的冲击感,让体验人员在意识上加强自我保护,从而实现较高的安全培训预期。低压电弧体感培训系统,由硬件设备、控制软

件、操作界面和安全防护等部分组成。硬件设备包括电弧发生器、传感器、控制器等;控制软件负责控制硬件设备的运行,实现培训场景的设置与切换;操作界面提供用户与系统的交互接口,方便用户进行操作和学习;设备之间通过高速通信接口进行连接,确保数据的实时传输和处理,通过图形化展示和交互式操作,使用户能够轻松地设置培训场景、控制设备运行并获取反馈信息;安全防护措施则确保用户在体验过程中的安全。

1.4 仿真培训系统软件场景定制

风电机组的日常工作场景主要涉及设备的检查与维护,根据风电机组日常工作场景,研发制作开发了风电机组高风险作业安全事故体验软件。该软件以UE4引擎开发设计高风险作业场景并1:1还原。研究在该软件中设置的安全事故场景包括风机作业高处坠落、机舱吊物口物体打击、风机叶轮未锁安全事故等实际场景,学员可通过VR设备在该软件中模拟风电机组的实际操作,熟悉操作步骤和注意事项,并在虚拟环境中亲身体会这些危险场景。研究设计开发软件的模拟场景界面如图4所示。



图4 风电机组模拟场景操作体验软件

Fig. 4 Wind turbine simulation scenario operation experience software

传统的风机培训需要使用实际的风机设备,导致风电机组设备的损耗及维修成本增加,且培训相关设备无法随意挪动,导致学员学习成本也较高。利用该软件并结合VR设备,学员可通过模拟危险场景,学习如何正确使用安全设备、采取紧急避险措施等,增强应对突发事件的能力。

2 平台应用测试

为了验证研究设计的半物理仿真培训平台的有效性与性能,研究对该系统的发电机组性能预测相似度及异常预警情况进行了对比分析。对比系统为文献[5]中提出的变桨实训平台及文献[6]提出的瞬态仿真系统。风电机组发电机温度预测相似度及故障预警时间比较结果如图5所示。

图5(a)为3种仿真模型在预测发电机温度时的相似度,可以看到,研究设计的半物理仿真培训平台在预测发电机温度时,与实际温度之间的相似度始终保持在0.95以上,最高可达到0.99的相似度。变桨实训平台在预测发电机温度时,与实际温度之间的相似度保持在0.8~0.9之间,最高可达到0.93的相似度。瞬态仿真系统在预测

发电机温度时,与实际温度之间的相似度始终保持在0.8左右,最高可达到0.86的相似度。研究设计的模型在预测发电机温度变化时,可更加准确地模拟实际情况,更利于操作人员的管理培训。图5(b)为3种模型在不同故障类型中的预警时间。可以看到,研究设计的仿真模型对不同故障的预警时间最长为3.5 s,最低为0.8 s。变桨实训

平台对不同故障的预警时间最长为25.1 s,最短为6.5 s。瞬态仿真系统对不同故障的预警时间最长为7.4 s,最短为2.7 s。研究设计的仿真培训平台实现故障预警的时间显著短于其余两种模型。研究进一步分析了半物理仿真培训平台在风速由20 m/s降为8 m/s时,对风机的监控效果,结果如图6所示。

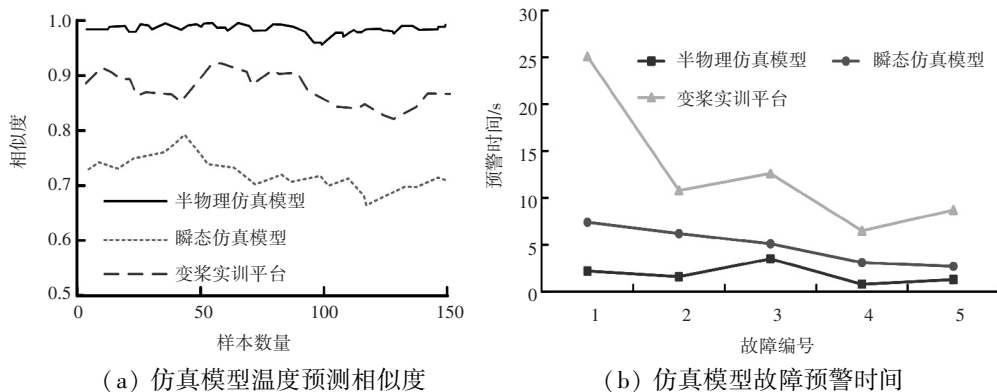


图5 仿真培训平台性能测试结果

Fig. 5 Performance test results of simulation training platform

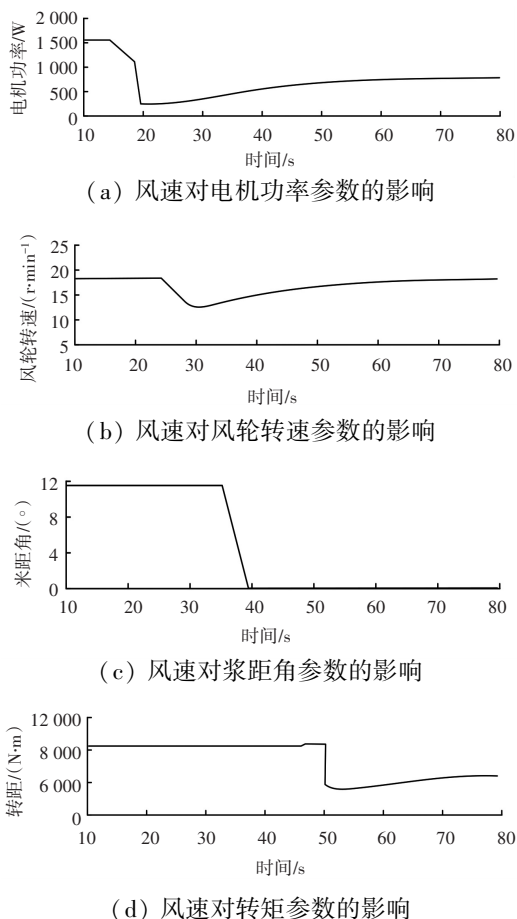


图6 风速变化下风机参数变化情况

Fig. 6 Changes in fan parameters under wind speed variations

图6(a)为风速变化下,电机功率参数的变化情况,可以看到,风速为20 m/s时,电力功率为1 500 W左右,风速为8 m/s时,稳定功率为700 W左右。风速发生变化后,电机功率参数在7 s左右恢复至新的稳定状态。

图6(b)为风速变化下,风轮转速参数的变化情况,可以看到,风速为20 m/s时,风轮转速为17.5 r/min,风速为8 m/s时,风轮转速也为17.5 r/min。风轮转速为风速发生变化后,风轮转速在25 s左右恢复至新的稳定状态。图6(c)为风速变化下,桨距角参数的变化情况。风速为20 m/s时,桨距角为12°,风速为8 m/s时,桨距角为0°,风速变化后,桨距角在4 s左右恢复至新的稳定状态。图6(d)为风速变化下,转矩参数的变化情况。在风速为20 m/s时,转矩为8 000 N·m,风速为8 m/s时,转矩为3 800 N·m。风速发生变化后,转矩参数在15 s左右恢复至新的稳定状态。研究构建的仿真模型,可在风速距离变化的情况下,快速调整模型参数,使模型恢复至稳定状态。研究最后评估了该仿真培训平台对风电机组运维管理人员技术水平的培训能力,结果如表1所示。

表1 不同培训方式的运维管理人员技术水平比较

Tab. 1 Comparison of technical levels of operation and maintenance management personnel with different training methods

培训人员编号	传统培训方案		仿真培训方案	
	培训周期/d	技术评分	培训周期/d	技术评分
1	32	81	15	85
2	33	79	16	84
3	32	82	15	85
4	35	85	15	86
5	32	84	17	85
6	31	79	16	84
7	35	84	15	84
8	32	85	14	85
9	34	83	15	85
10	32	84	16	84

表1中可以看到,采用传统培训方案时,培训人员完

成相同培训任务的周期约为 32 d,最长培训周期为 35 d,最短培训周期为 31 d,所有培训人员的培训耗时均保持在 30 d 以上。采用传统培训方案时,工作人员经过技术培训后,工作技术评分可达到 80 分以上,最高为 85 分。但也存在经过培训后,技术评分仅 79 分的工作人员。采用仿真培训方案时,工作人员完成相同培训任务的周期显著缩短,大多数工作人员的培训周期均被压缩至 15 d,个别工作人员的培训周期需要 17 d。采用仿真培训方案后,所有工作人员的技术评分均可达到 84 分以上,最高技术评分为 86 分。研究设计的风电机组运维管理人员可显著降低工作人员的培训周期,同时使工作人员技术评分经过培训后,保持在 85 分左右。

3 结论

为了降低风电机组运维管理人员的培训成本,提高风电机组的运维管理水平,研究结合风电机组仿真模型,设计了面向风电机组故障识别诊断的半物理仿真培训平台。结果显示,研究设计的半物理仿真培训系统,在预测风电机组发电机温度时,与实际结果的相似度可达到 0.99,而其余两种模型对风电机组发电机温度的预测结果与实际结果的相似度最高为 0.93,显著低于研究设计的仿真培训平台。研究设计的仿真培训平台对风电机组不同故障类型的预警时间最高为 3.5 s,最低仅 0.8 s。而其余两种仿真模型对不同故障类型的预警时间最高可达到 25.1 s,最低仍需要 2.7 s。研究设计的仿真模型在环境参数变化的情况下,可迅速调整风电机组相关参数,使其区域稳定。采用研究设计的仿真培训方案时,工作人员的培训周期可降至 15 d 左右,同时使工作人员的技术评分达到 90 分以上。研究设计的风电机组仿真培训方案可有效提高风电机组运维管理人员的技术水平。但研究设计的仿真培训平台在离线仿真模拟培训时,对风电机组环境参数变化不

敏感。未来研究将进一步优化仿真培训平台的离线模式。

参考文献

- [1] 娄刻强, 王晓东, 赵庆旭, 等. 风电机组非定常数值模拟方法研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(8):2354-2362.
- [2] 阮爱国, 沈忠明, 刘发炳, 等. 一种单样本风电机组传动链故障诊断方法[J]. 机械传动, 2024, 48(8):161-168.
- [3] 王一博, 韩巧丽, 刘海洋, 等. 风电机组叶片的无人机除冰控制系统设计与优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7):641-647.
- [4] 刘颖明, 徐雪峰, 王晓东, 等. 基于多目标灰狼算法的漂浮式风电机组浮台内 TMD 参数优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7):672-680.
- [5] 尹尧杰, 褚景春, 姜培学. 大型双馈风电机组弹性支动态特性分析[J]. 可再生能源, 2024, 42(8):1054-1060.
- [6] NGUYEN T T, VU T, ORTMEYER T, et al. Real-time transient simulation and studies of offshore wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3):1474-1487.
- [7] 谢善益, 谢恩彦, 杨强, 等. 台风条件下风电安全运行仿真模拟系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):146-149,180.
- [8] 李慧, 李珠林, 刘思嘉, 等. 基于双补偿下垂-MQPR 的直驱式风电机组并网控制[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3):142-149.
- [9] 汪希玥, 柯德平, 徐箭, 等. 考虑动态无功支撑的双馈风电机组协调控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(6):728-737.
- [10] 辛治铨, 汪隆君, 刘沈全. 基于迁移学习的风电机组轴承早期故障预警策略[J]. 可再生能源, 2024, 42(7):915-922.
- [11] 李俊卿, 耿继亚, 国晓宇, 等. 一种 POA-VMD 和自编码器结合的风电机组轴承劣化指标构建及故障诊断方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(13):219-226.
- [12] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7):57-64.
- [13] 陈龙, 刘璐洁, 符杨, 等. 计及高风速和低风速影响的风电机组两阶段滚动优化维护策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(7):80-87,95.
- [14] 张鹏, 杨苹, 唐玉烽, 等. 风电机组自适应步进惯量控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(8):3401-3408.
- [15] AMIN A, BIBO A, PANYAM M, et al. Vibration based fault diagnostics in a wind turbine planetary gearbox using machine learning[J]. Wind Engineering, 2023, 47(1):175-189.

(上接第 11 页)

- [7] LIN Z, ZHANG C, WU W, et al. Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(12):2610-2614.
- [8] CHEN X, WANG Y, GAO S, et al. Filterbank canonical correlation analysis for implementing a high-speed SSVEP-based brain-computer interface[J]. Journal of Neural Engineering, 2015, 12(4):046008.
- [9] ATTIA M, HETTIARACHCHI I, HOSSNY M, et al. A time domain classification of steady-state visual evoked potentials using deep recurrent-convolutional neural networks[C]//2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). Washington DC: IEEE, 2018:766-769.
- [10] NGUYEN T H, CHUNG W Y. A single-channel SSVEP-based BCI speller using deep learning[J]. IEEE Access, 2018(7):1752-1763.
- [11] RAVI A, BENI N H, MANUEL J, et al. Comparing user-dependent

- and user-independent training of CNN for SSVEP BCI[J]. Journal of Neural Engineering, 2020, 17(2):026028.
- [12] 于鸿伟, 谢俊, 何柳诗, 等. 基于卷积神经网络和支持向量机的事件相关电位识别方法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(12):47-54.
- [13] 范方朝. 基于深度学习的脑电信号识别与分类算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2023.
- [14] 周晶, 周丽丽. 基于非侵入式多模态 BCI 的情绪识别与情感分析[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4):186-188.
- [15] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//IEEE Computer Society (IEEE CS), Computer Vision and Pattern Recognition Technical Committee (CVPR-TC). Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, USA:CVPR, 2018:7132-7141.