

引用格式: 张侨禹, 宋汉江, 李良才, 等. 基于数字孪生的舰船动力系统智能运维技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(增刊 1): 73-80.

ZHANG Q Y, SONG H J, LI L C, et al. Marine power system intelligent operation and maintenance platform based on digital twin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(Supp 1): 73-80.

基于数字孪生的舰船动力系统 智能运维技术



扫码阅读全文

张侨禹¹, 宋汉江², 李良才¹, 宋振国¹, 李政享¹

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

2 海军研究院, 北京 100161

摘要: [目的] 为提高舰船动力设备的可靠性并降低维护成本, 研究基于数字孪生的舰船动力系统智能运维技术及实现方法。[方法] 首先, 根据模块功能及结构体系需求, 建立数字孪生特征的动力系统智能运维架构; 然后, 通过工况标杆库建立、控制参数智能寻优以及运行自优化, 实现基于综合平稳度的智能控制技术; 最后, 根据基于知识、基于模型及基于大数据驱动故障诊断方法, 实现复杂系统综合故障诊断技术, 形成以数字孪生为技术特征的动力系统智能运维体系。[结果] 动力系统智能运维平台的应用案例验证了实现智能控制、故障诊断功能的可行性。[结论] 研究成果可为舰船智能机舱的研究和设计提供参考。

关键词: 舰船动力系统; 智能机舱; 故障诊断; 智能运维

中图分类号: U664.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02654

Marine power system intelligent operation and maintenance platform based on digital twin

ZHANG Qiaoyu¹, SONG Hanjiang², LI Liangcai¹, SONG Zhenguo¹, LI Zhengxiang¹

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2 Naval Research Academy, Beijing 100161, China

Abstract: [Objectives] In order to improve the reliability and reduce the maintenance costs of marine power equipment, this paper study intelligent operation and maintenance techniques and implementation methods for marine power systems. [Methods] First, a marine power system intelligent operation and maintenance framework based on digital twin technology is established according to module functions and system structure. Intelligent control technology based on the aggregative stability indicator is then proposed, including the optimal operating condition database, intelligent control parameter search method and variable operation process optimization method. Finally, according to the knowledge-based, model-based and big data-driven fault diagnosis methods, the integrated fault diagnosis of complex systems is realized, and a digital twin-based intelligent operation and maintenance system for power systems is constructed. [Result] The application case of an intelligent power system operation and maintenance platform verifies the feasibility of realizing intelligent control and fault diagnosis functions. [Conclusion] The results of this study can provide valuable references for the research and design of intelligent engine rooms.

Key words: marine power system; intelligent engine room; fault diagnosis; intelligent operation and maintenance

0 引言

自2005年起,我国舰船装备进入了快速发展期,多型舰船从无到有,初步建立了舰船设计、制

造、测试等研发体系,但在舰船设备智能化方面尚未开展系统性研究。目前,我国在积极推动民船领域动力系统智能运维技术的发展,主要体现在机舱智能运维方面,在《智能船舶规范》中,智

收稿日期: 2021-11-25

修回日期: 2022-04-18

网络首发时间: 2023-01-04 10:24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709249)

作者简介: 张侨禹,男,1987年生,博士,工程师

*通信作者: 张侨禹

能机舱是智能船舶的六大功能模块之一。经过近年来的蓬勃发展,民船智能运维技术已建立了体系发展框架及相关规范^[1-3],但舰船装备领域的动力系统智能化发展则略显不足。

在舰船设备故障诊断方面,目前主要采用运行数据与预先设定的正常参数对比的方式,具有快速、直接等优点,但对于复杂系统故障则无法准确判断及定位。随着智能技术的发展,形成了3类相对成熟的智能诊断方法,分别为基于模型、基于知识及基于机器学习的故障诊断。基于模型的故障诊断即依靠设备运行模型和故障模型进行判断,其对于设备级故障的定位、诊断较为清晰,但对于大型被诊断系统,往往需要大量计算、再测量并多次迭代才能完成定位^[4];基于知识的故障诊断即将专家的历史诊断经验归纳为规则,并通过推理进行诊断,其过程简便且速度快,但存在知识获取瓶颈问题,且不适用于复杂系统或无经验系统的故障诊断^[4];基于机器学习的故障诊断方法具有强大的学习与分析能力,通过多层非线性网络训练,即可学习样本的潜在特征,从而提高分类或预测能力,故其在系统级复杂故障诊断方面具有一定潜力^[5-6]。此外,综合运用故障诊断技术也是解决复杂系统故障诊断的有效方法^[7]。

在舰船智能运行方面,目前的监控体系多以理想状态的数据为参考基础,并以预先设定的控制系数进行自动控制操作,难以满足复杂系统在动态多变运行环境下实时评估、预测及调整的需求。数字孪生技术具备以数字化形式对物理对象行为进行动态呈现的能力^[8],并能根据物理对象的实时状态修正数学模型^[9],因此,数字孪生技术为解决系统控制的瓶颈问题提供了新的思路^[10-11],其通过预测物理对象的发展趋势,进而优化系统控制策略并提升系统动态性能。

随着用装强度的提升以及海军从近海到深远的战略转型,作为向舰船提供能源和机动的关键系统,动力系统需具备更好的安全性和可靠性,这对系统设计及人员操作提出了更高的要求,因此,有必要借助智能化手段提升设备控制的稳定性、故障定位及诊断的准确性,从而提高舰艇性能,同时减少舰船的工作量和人员编制需求。基于此,本文拟开展舰船动力系统的智能化研究,将采用数字孪生的智能运维框架结构来突破基于综合平稳度的智能控制技术、复杂系统综合故障诊断技术,并通过舰船动力系统智能运维平台的搭建及应用案例,最终验证该技术的可行性。

1 总体框架体系

1.1 数字孪生特征的智能运维架构

双向数据交互是数字孪生的关键特征,基于数字孪生的动力系统智能运维架构如图1所示,整个系统包括实物层、接口与传输层、数据与资源层、模型与算法层、调度管理层和服务层。实物层对应动力系统的各个设备和子系统,通过标准接口与控制系统或传感设备之间实现数据通信,所采集的数据将汇集到数据与资源层的数据库中。调度管理层根据任务需求来完成模型生成、算法选取及参数设置,通过模型运行管理而获得相应输出,并通过数据、图表等表现方式传输至服务层的各个功能子系统,从而完成系统的状态监测、维护指导、故障诊断、运行优化或设备管理。

动力系统智能运维平台的具体模块及功能如下:

1) 状态感知系统。实时获取动力系统的状态数据,为数字孪生体的虚实同步、状态评估、运行操作反馈等提供数据支撑,是整个智能运维平台的基础。

2) 镜像模型及算法。根据状态感知获得的数据,实时计算并反映实际物理对象的特性,其中模型结构、跟踪算法、高效数值计算方法是确保模型跟踪性能的基础。

3) 智能控制模型及算法。利用状态感知获得的数据,通过镜像模型实现物理对象的稳定状态评估,进而优化运行模式和控制策略,并利用镜像模型完成测试之后的实际运行指导及调控。

4) 故障诊断模块。利用状态感知获得的数据,通过基于模型、基于知识和大数据驱动的故障诊断子系统,得到故障定位及故障诊断结果。

5) 大数据管理系统。用于可靠、高效地实现数据查询、维护和管理。动力系统智能运维平台不仅涉及物理对象的大量历史数据和实时数据,还涉及了运行标杆数据及故障库等数据。

6) 人机交互系统。为用户及时、充分地掌握物理对象、虚拟对象的状态和性能而提供直观、方便的展现,同时也为系统的人为干预提供合理方式。

7) 数据接口。为动力系统智能运维平台各个功能子系统之间实现数据交换而提供硬件及软件条件。

1.2 基于综合平稳度的智能控制技术

1) 控制参数智能寻优技术。

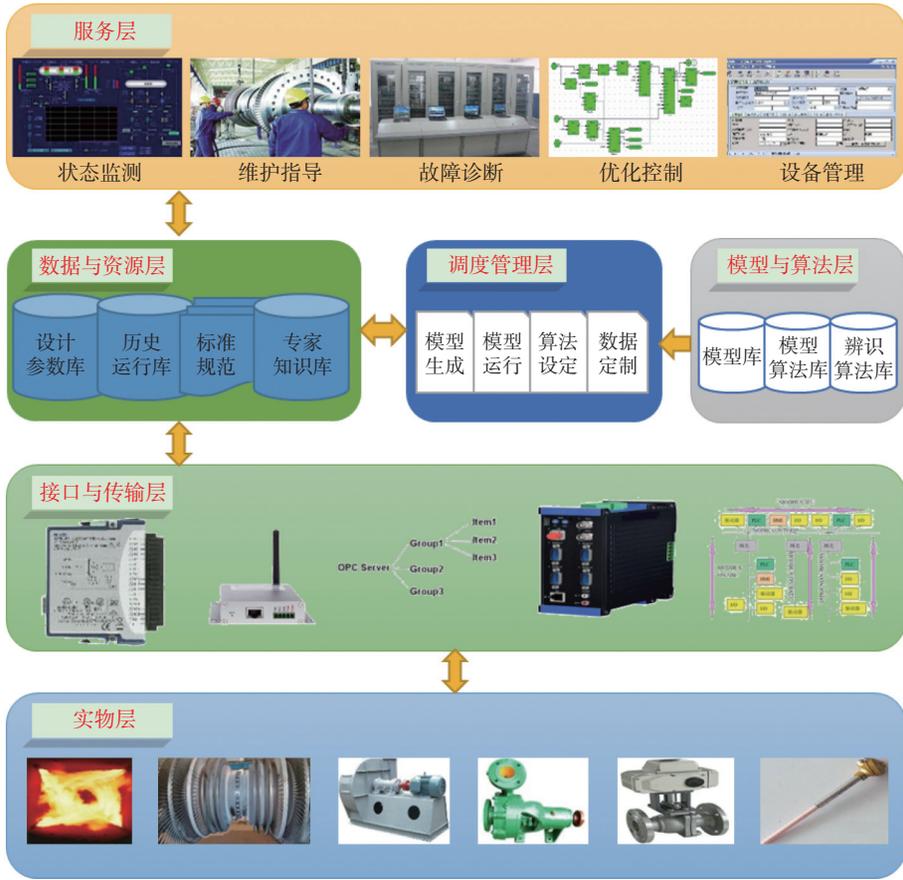


图 1 基于数字孪生的动力系统智能运维层次结构

Fig. 1 Framework of intelligent operation for engine room based on digital twin

整个工况的智能寻优流程如图 2 所示。首先, 根据任务目标, 结合当前工况信息(运行参数及设备性能参数等)组合成特征参数集, 并在工况标杆库中进行工况搜寻, 若能获得匹配度较高的工况, 则直接应用该工况作为现场目标工况, 用于生成操作参数集; 否则, 需利用所匹配到的

最相近工况, 结合任务目标并利用工况参数优化计算以获得测试模型的目标工况。然后, 在此基础上, 通过镜像模型获得测试模型的初始工况, 通过测试模型获得主要参数变化过程的运行参数集, 并基于该参数集完成该过程的性能评估计算, 从而评估目标工况设定的合理性。最后, 对

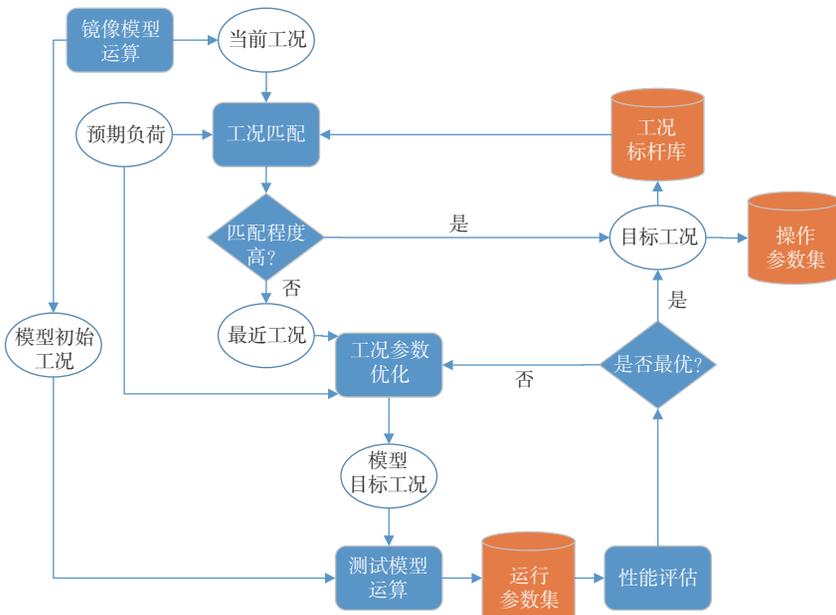


图 2 控制参数的智能寻优流程

Fig. 2 Process of intelligent optimization for operation parameters

性能评估结果进行判断,若已为最佳工况,则直接将模型目标工况作为现场的目标工况,用于生成对应的操作参数集,通过改变控制器或远控设备的目标值来实现工况调整;否则,需进一步更新模型的目标工况,再通过测试模型进行测试。经过测试之后的目标工况,将按照既定规范存储于工况标杆库中。

2) 基于综合平稳度的动力系统多工况切换运行自优化技术。

首先,构建操控集。操控集即完成一次状态切换所制定的操作模式集合,通过对比测试可以筛选出最优的操作模式,用于指导系统的运行优化。操作模式包含单变量控制与多变量控制、多变量同步控制与多变量异步控制、阶跃控制与渐进控制,还可以排列组合,最终形成多种不同的控制方案。

然后,计算综合平稳度。在状态切换时,要求系统能够“稳、快、准”地从当前状态转换至目标状态,除了稳定性之外,状态切换的过渡时间也是重要的评价指标,本文中的过渡时间 t_0 (图3)是指从状态切换开始至扰动在误差范围内结束的耗时。图3中, $Y(t)$ 为物理量; t 为时间; ε 为设定的物理量扰动误差范围。

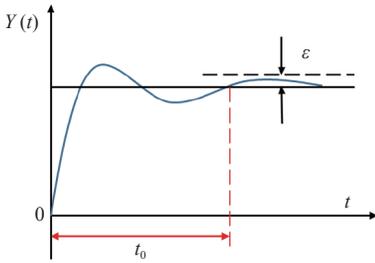


图3 过渡时间示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transition time

所谓平稳度,即状态切换过程中相关参数的平稳程度,在 t 时刻的平稳度 V_t 为

$$V_t = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{Y_i - Y_{is}}{Y_{ih} - Y_{il}} \right)^2 \eta_i} \quad (1)$$

式中: Y_i 为第 i 个参数值的当前值, $i=1, 2, \dots, M$,其中 M 为设定的系统状态参量的最大数目; Y_{is} 为第 i 个参数值的稳态值; Y_{ih}, Y_{il} 分别为系统第 i 个参数值的上限和下限; η_i 为第 i 个参数值的权重因子,缺省值为1。 V_t 是基于各状态参量相对稳态值偏差平方的归一化均值,其具体数值与各状态参数偏离稳态的程度相关,数值越小,则表示在 t 时刻各参数偏离目标状态的程度越小。

工况切换的自优化流程如图4所示,主要分为4个步骤,依次为系统状态定义、系统状态确

定、系统状态切换及切换路径评估。首先是系统状态定义,即明确系统对象、注入任务模式、选择驱动任务的目标参数以及能够体现状态差异的评估参数集合;其次是系统状态确定,即明确任务目标参数、当前状态和目标状态;接下来是系统状态切换,即生成操作序列并基于舰船动力系统仿真平台进行验证;最后需对上一步系统状态切换的数据进行评估并选择最优的切换路径。

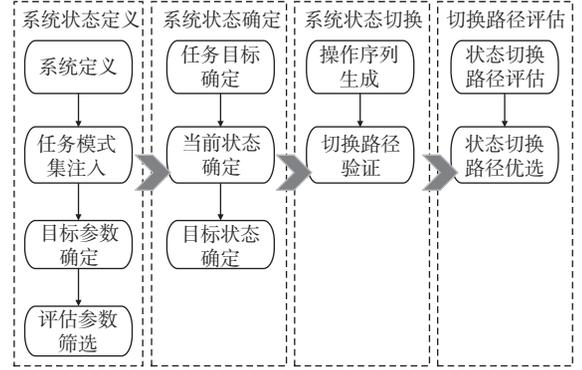


图4 工况切换的自优化流程图

Fig. 4 Process of intelligent optimization for operation model switch

1.3 复杂系统综合故障诊断技术

1) 基于知识的故障诊断。

基于知识的故障诊断方法即以故障树分析法为基础,将系统故障形成原因由总体至部件按树枝状逐级细化,并描绘出逻辑结构图的分析方法,其目的是判断基本故障,确定故障原因、影响和发生概率,不仅形象直观,还可为使用者提供明确的改进信息。该方法的基本思路是以专家经验为基础,根据故障发生的“因果关系”、“层级结构”来构建树状知识,主要包括层级判别规则加载、数据抽取及清洗、逻辑判断等基本过程(图5),从而实现故障判别、故障源追溯等功能。

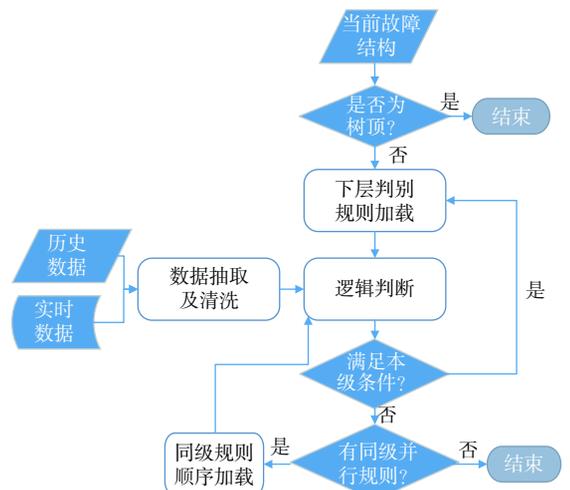


图5 基于知识的故障诊断过程

Fig. 5 Process of fault diagnosis based on experience

2) 基于模型的故障诊断。

基于模型的故障诊断方法即利用舰船运行时的状态参数变化来判断其性能变化,具有信息来源稳定、信息量丰富等特点。该方法沿用了早期轮机人员对舰船动力装置的故障诊断思路,首先实时获取系统的特性参数,并基于设备或子系统的即时数据进行在线计算以获取其性能指标,当性能参数的蜕变程度超过既定阈值,则判定故障发生。具体流程如图 6 所示,主要包括数据预处理、性能计算、性能分析、故障判断、故障信息输出等基本过程。

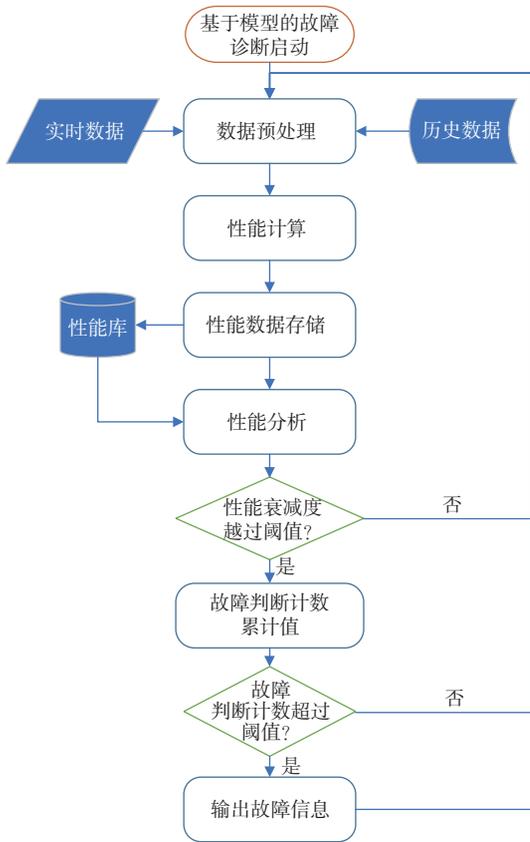


图 6 基于模型的故障诊断的基本流程

Fig. 6 Process of fault diagnosis based on physical model principle

3) 基于大数据驱动的故障诊断技术。

基于模型和基于知识的故障诊断方法的本质均为依靠对设备及相关故障的先验认知而进行的故障判别和分析,然而,其仅对预期故障具有分析能力,对于非预期故障则无用武之地。为了提高诊断系统的适用范围,需引入大数据驱动的故障诊断方法,其基本思路为根据故障类型来构建神经网络,并按照实际子系统构建神经集群,进而建立整个神经网络集。该方法不仅可以有效解决大规模神经网络训练过程的时间复杂度和空间复杂度极高的问题,还有利于神经网络局部结构的更新以及诊断功能的拓展,从而为系统的逐渐完善创

造条件。大数据驱动故障诊断子系统的基本流程如图 7 所示,主要包括定义故障状态、数据预处理、网络结构构建和训练、故障诊断等 5 个基本流程。

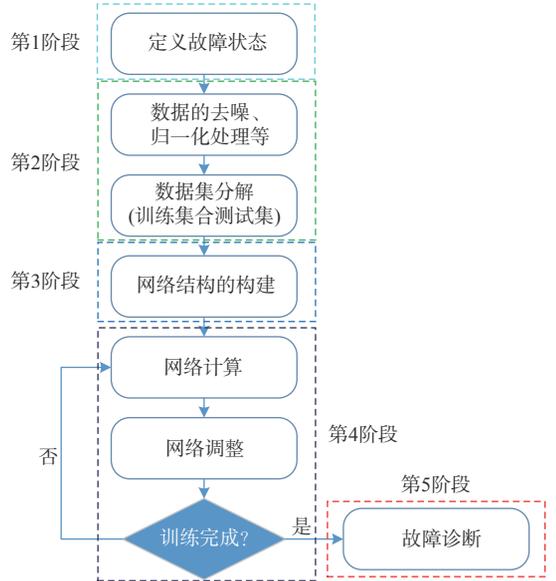


图 7 大数据驱动故障诊断的基本流程

Fig. 7 Basic process of big data driven fault diagnosis

2 动力系统智能运维技术的应用案例分析

本文基于前期开发的舰船蒸汽动力系统虚拟设计分析及试验平台(V-Dats),扩展了智能控制和故障诊断模块(maintain and operation optimization system, MOOS),即动力系统原理型智能运维平台。智能控制系统主要包括特征参数定制系统、分析与评估计算系统两部分,其中特征参数定制系统包含系统状态参数提取、典型过程工况集确定等子功能模块;分析与评估计算系统包含操控寻优模块、系统状态分析及评估模块等子功能模块。智能控制系统的主要建设流程如下:

1) 系统状态参数提取。主要包括任务确定、任务关键参数提取、关键参数权值设定、阈值及参数数量设定、参数相关性系数计算与分析、重要参数集获取,以及系统状态参数集的确定等基本过程。

2) 典型过程工况集确定。通过建设标杆工况库,用于存储、更新和查询系统的“最优”操控模式,从而构建典型稳定工况参数、典型过程工况参数以及对应工况下的关键参数值允许范围。

3) 操控寻优模块。通过向仿真系统导入预设的操作模式集合,并对操控集内的所有操控模式进行对比测试,然后筛选出操控集中最优的操控模式,进而用于指导系统的优化运行。

4) 系统状态分析及评估模块。主要包括工况确定、关键参数确定、重要参数确定、参数允许范围确定、参数重要性权重确定以及工况稳定性判定、最大超调量计算、综合平稳度计算、过渡时间计算等功能。

故障诊断系统主要包括基于模型、基于知识和大数据驱动故障诊断子系统三部分,其中基于模型的故障诊断子系统包含故障诊断模型运行管理、故障诊断模型维护管理和基于模型的故障参数设置等多个子功能模块;基于知识的故障诊断子系统包含故障树搜寻管理、故障树维护管理和基于知识的故障参数设置等子功能模块;大数据驱动故障诊断子系统主要包含神经网络诊断计算管理、神经网络训练管理和大数据驱动的故障参数设置等各子功能模块。故障诊断系统的主要建设流程如下:

1) 孪生体模型的构建。基于设计参数,采用V-Das分析平台完成计算分析模型的构建。

2) 故障特征参数集的构建。根据系统工况范围来确定其典型工况集,以主要特征参数为基础,通过合理的激励进行参数故障相关度计算和

分析,进而得到故障特征参数集。

3) 性能计算模型的构建。以子系统或设备为单元,对研究对象进行分类,并构建反映对象性能的计算模型,从而完成模型性能的在线计算。

4) 故障树集的构建。以先验知识为基础,按照故障树的基本要素,完成故障层级的分解、源象参数的分解,并通过统一的方式实现源象参数关系的表征,进而结合节点参数来构建整个故障树及故障树集。

5) 神经网络的构建。基于“小网络集群”的思想,以子系统或设备为对象,确定输入输出节点的数量及内容,并通过“自调整”的方式构建各个小网络的结构,进而完成整个网络集群的构建。

同时,需在运维平台设定标准的通信接口,用以与其他系统联合进行深入分析或为其他系统提供数据输入。图8所示为运维平台的工作流程,主要包含系统动态模型启动、运维平台设置信息加载、智能控制系统初始化、故障诊断系统初始化、智能控制启动、故障诊断启动等功能环节。

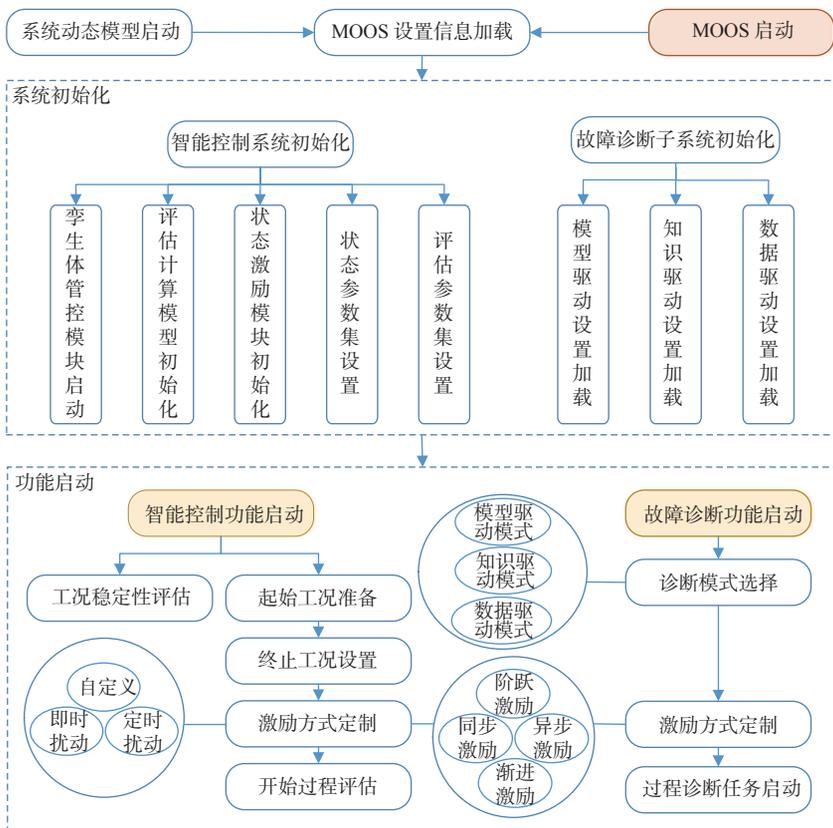


图8 动力系统原理型智能运维平台的工作流程

Fig. 8 Workflow of intelligent operation and maintenance platform based on power system principle

如图9所示,对于舰船典型蒸汽动力系统的凝给水子系统,通过修改给水旁通阀的性能参数进行故障注入,并采用智能运维平台进行故障诊

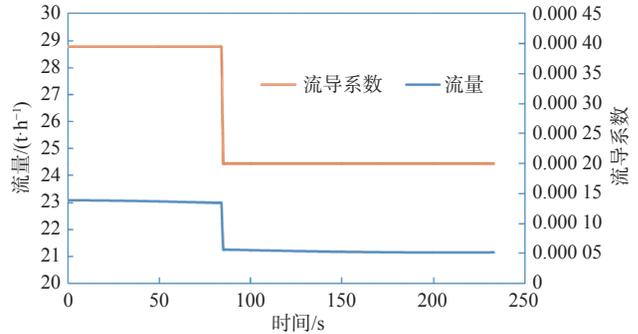
断。根据综合分析,得出了系统给水旁通阀严重阻塞的故障诊断结果,该诊断结果与故障注入一致,验证了本文方法的可行性。

图 10 所示为在动力系统负荷急剧下降情况下, 智能运维平台快速自动求解了凝给水系统中给水泵的 3 种控制方式(单变量、双变量同步、双

变量异步)的响应结果, 最终判断并推荐了双参数同步控制方式, 从而使系统及给水泵转速实现了快速稳定。



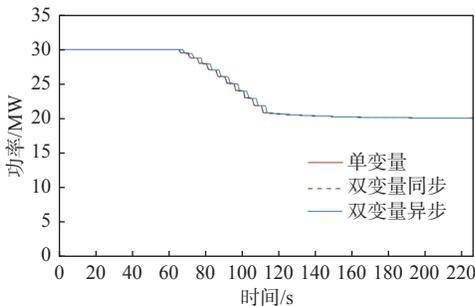
(a) 故障诊断结果



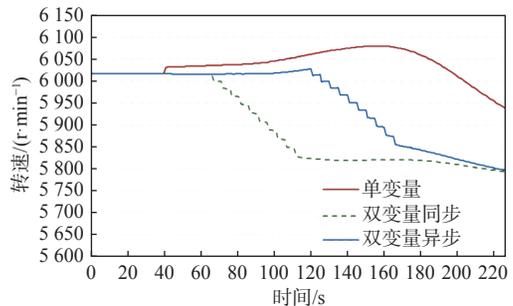
(b) 故障注入后系统参数的变化曲线

图 9 智能运维平台的综合故障诊断案例

Fig. 9 Cases of integrated fault diagnosis of intelligent operation platform



(a) 功率随时间变化的对比曲线



(b) 给水泵转速随时间变化的对比曲线

图 10 智能运维平台的控制参数优化案例

Fig. 10 Cases of operation parameters optimization of intelligent operation platform

上述示例验证了基于数字孪生的舰船动力系统智能运维技术的可行性, 通过在舰船蒸汽动力系统虚拟设计分析及试验平台(V-Dats)上扩展故障诊断及智能运行模块(MOOS), 即可实现本文提出的数字孪生智能运维架构、基于综合平稳度的智能控制技术以及复杂系统综合故障诊断技术。

3 结 语

以提升舰船动力系统智能化水平为目标, 本文研究了基于数字孪生的舰船动力系统智能运维技术。首先, 建立了数字孪生特征的智能运维架构, 实现了动力系统设备数据采集、数学模型管控、数据综合管理及人机接口功能; 然后, 通过工况标杆库的建立、控制参数智能寻优以及动力系统多工况切换运行自优化, 实现了基于综合平稳度的智能控制技术, 并构建了包含基于知识、基于模型及基于大数据驱动的复杂系统综合故障诊断技术; 最后, 形成了以数字孪生为技术特征的智能运维平台, 通过应用示例验证了动力系统智能控制、故障诊断的可行性, 本文的研究成果可

为舰船智能机舱的设计和落地提供参考。

参考文献:

- [1] 庞路, 何沁园. 《智能船舶规范》下的机舱智能化探究[J]. 船舶, 2018, 29(1): 63-67.
PANG L, HE Q Y. Exploration of machinery intelligence based on CCS "rules for intelligent ships"[J]. *Ship & Boat*, 2018, 29(1): 63-67 (in Chinese).
- [2] 李光正, 宋新刚, 徐瑜. 基于“工业 4.0”的智能船舶系统探讨[J]. 船舶工程, 2015, 37(11): 58-60, 71.
LI G Z, SONG X G, XU Y. Study of intelligent ship system based on Industrie 4.0[J]. *Ship Engineering*, 2015, 37(11): 58-60, 71 (in Chinese).
- [3] 王亮, 吕卫民, 李伟, 等. 复杂系统健康状态评估技术现状及发展[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 830-832, 8848.
WANG L, LV W M, LI W, et al. Status and perspectives of health condition assessment for complex system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(4): 830-832, 8848 (in Chinese).
- [4] 蒋瑜, 陈循, 杨雪. 智能故障诊断研究与发展[J]. 兵工自动化, 2002, 21(2): 12-15.

