

基于子空间映射的船舶核动力二回路系统 闭环故障诊断方法研究

乔新宇^{1,2}, 李献领^{3,4}, 罗浩^{1,2}, 徐晓艺^{1,2}, 宁哲远^{1,2}, 王豪^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 复杂系统控制与智能协同全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 船舶热能动力全国重点实验室, 湖北 武汉 430205; 4. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要:为进一步提高船舶核动力二回路系统的安全性与可靠性,提出基于子空间映射的船舶核动力二回路系统闭环故障诊断方法。首先,考虑船舶核动力二回路系统闭环控制结构,构造与噪声项无关的辅助矩阵,实现辅助矩阵与噪声之间的解耦;然后,对辅助矩阵与输出矩阵进行乔里斯基(Cholesky)分解,求解出二回路系统数据驱动残差观测器,即稳定核描述(Stable Kernel Representation, SKR);同时,根据训练的输入和输出数据设计阈值、检验统计量与故障检测逻辑,并通过测试的输入和输出数据对二回路系统进行故障诊断;最后,在二回路系统的凝给水泵和冷凝器上进行算法实验测试。实验结果验证说明所提方法可以有效的检测二回路系统发生故障诊断。

关键词:二回路系统;子空间方法;闭环故障诊断;稳定核描述

中图分类号:U664.15 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2025.06.019

[引用本文格式]乔新宇,李献领,罗浩,等.基于子空间映射的船舶核动力二回路系统闭环故障诊断方法研究[J].热能动力工程,2025,40(6):165-171. QIAO Xinyu, LI Xianling, LUO Hao, et al. Study on subspace-aided closed-loop fault diagnosis approach for second loop system of ship nuclear power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6):165-171.

Study on Subspace-aided Closed-loop Fault Diagnosis Approach for Second Loop System of Ship Nuclear Power Plant

QIAO Xinyu^{1,2}, LI Xianling^{3,4}, LUO Hao^{1,2}, XU Xiaoyi^{1,2}, NING Zheyuan^{1,2}, WANG Hao^{1,2}

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001;
2. National Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Agent Cooperation, Harbin, China, Post Code: 150001;
3. State Key Laboratory of Marine Thermal Energy and Power, Wuhan, China, Post Code: 430205;
4. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, China, Post Code: 430205)

Abstract: To further improve the safety and reliability of second loop system of ship nuclear power plant, a subspace-aided closed-loop fault diagnosis approach was proposed for the second loop system of ship nuclear power plant. Firstly, considering the closed-loop control structure of the second loop system of ship nuclear power plant, an auxiliary matrix irrelevant to the noise term was constructed to decouple the auxiliary matrix from the noise. Then, Cholesky decomposition was performed on the auxiliary matrix and the output matrix to solve the data-driven residual observer of the second loop system, that is, the stable kernel representation (SKR). Meanwhile, the threshold, test statistic and fault detection logic were designed based on the trained input and output data, and the second loop system was diagnosed for faults through the tested input and output data. Finally, the experimental testing was conducted on the conden-

收稿日期:2024-12-24; 修订日期:2025-01-22

基金项目:热能动力技术重点实验室开放基金资助项目(TPL2021C01)

Fund-supported Project: Open Fund of Science and Technology on Thermal Energy and Power Project Laboratory (TPL2021C01)

作者简介:乔新宇(1996-),男,哈尔滨工业大学博士研究生。

通信作者:罗浩(1984-),男,哈尔滨工业大学教授。

sate pump and condenser of the second loop system. The experimental result verifies that the proposed method can effectively detect and diagnose faults in the second loop system.

Key words: second loop systems, subspace-aided method, closed-loop fault diagnosis, stable kernel representation(SKR)

引 言

船舶核动力系统是保证船舶海上持续航行的关键核心系统之一,对船舶提速降速、转弯等具有重要作用。该系统主要由一回路系统和二回路系统组成,一回路将核能转为热能,二回路将热能转化为船舶电能和动能^[1]。由于船舶长期处于复杂的海洋环境,船舶核动力二回路系统通常处于高负荷的工作状态,一旦其子系统发生故障,对船舶的转向及提速降速会产生直接影响,甚至造成船舶停机的风险。因此,有必要采用先进的故障诊断方法对船舶二回路系统进行故障检测,保障船舶行驶的可靠性与安全性。

二回路系统是由机械系统和电气系统组成的复杂机电系统,通常存在电气故障、机械故障和传感器故障等多种类型故障。目前,针对二回路系统的故障诊断方法可分为定性的故障诊断方法和定量的故障诊断方法。定性的故障诊断方法包括专家系统^[2-4]、符号有向图^[5-7]和模糊推理^[8]等,这类方法主要依据人工经验和二回路系统的状态进行故障诊断分析,但存在专家知识不完备或历史经验不充分的故障漏判情况。

另一方面,定量的故障诊断方法包括基于解析模型的故障诊断方法和数据驱动的故障诊断方法。基于解析模型的故障诊断方法主要从二回路的物理建模出发,将二回路系统中的汽轮机、发电机、冷凝器、汽水分离器以及蒸汽发生器等设备进行数学模型重构,设计对应设备的诊断观测器进行故障检测^[9-10]。然而,随着智能化设备的不断升级以及传感器在原有系统上的增加,重新解析二回路系统模型需要大量的时间,而数据驱动的故障诊断方法具有可移植性强及自学习能力强的优点。随着人工智能、大数据、大模型技术在语义识别、图像及视频处理等方面的优势,给基于深度学习的数据驱动故障诊断方法提供了技术支持^[11],但是深度学习可解释性一直以来都是探讨的热点问题,导致数据驱动的

故障诊断方法往往要结合模型信息进行分析。作为数据驱动方法的重要组成部分,子空间故障诊断方法已经在解析模型和数据驱动方法之间的等价性证明,给出了合理的解释与说明^[12]。

基于此,本文提出基于子空间映射的船舶核动力二回路系统闭环故障诊断方法,以标准的闭环系统为例,对二回路系统中的闭环凝给水泵和冷凝器进行了故障诊断算法设计。通过收集控制输入和测量输出数据,构造汉克尔矩阵,结合控制器信息,设计与输入输出无关的辅助矩阵。基于子空间投影技术,对构造的汉克尔矩阵进行 Cholesky 分解,获得数据驱动的诊断观测器,即稳定核描述(Stable Kernel Representation,SKR),通过输入和输出数据设计阈值、检验统计量,根据故障检测逻辑判断二回路系统是否发生故障。

1 船舶核动力二回路系统建模与描述

图 1 为船舶核动力二回路系统,主要由蒸汽发生器、汽轮发电机组、冷凝器、凝水泵、给水泵、蒸汽排放阀组和泄放水箱等设备组成,形成了一个可控的闭环机电系统。

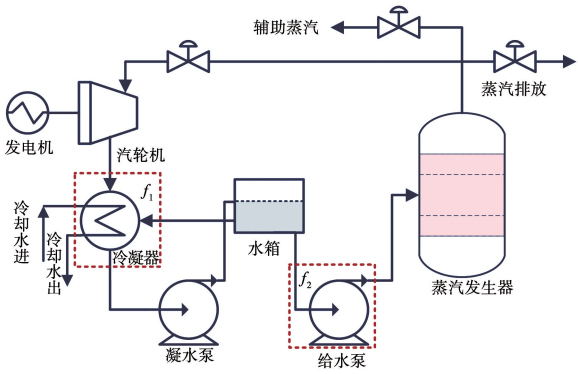


图 1 船舶核动力二回路系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of second loop system of ship nuclear power plant

具体的工作原理是一回路核反应堆裂变产生的能量由一回路冷却剂传递给二回路中的蒸汽发生

器,将二回路中的水蒸发为蒸汽注入到汽轮机做功,做完功的蒸汽进入冷凝器形成水,再由凝水泵、水箱及给水泵将水返回到蒸汽发生器中,组成二回路的闭环循环。二回路系统的冷凝器和凝给水泵通常处于高负荷的运行状态,运维的频次高。因此,本文主要研究冷凝器和凝给水泵的故障诊断,并对其数学模型进行主要阐述。

1.1 冷凝器

冷凝器输入包含汽轮机的排汽量、冷却水的流量和冷凝器的补水量等,输出包含冷凝器的工作压力、热井水位和凝水的过冷度等。在蒸汽区,蒸汽质量方程为:

$$\frac{dG_s}{dt} = G_{st} + G_{ost} - G_c - G_{ss} \quad (1)$$

式中: G_s —冷凝器壳侧的蒸汽量; G_{st} —汽轮机排汽量; G_{ost} —冷凝器其他进汽量; G_c —蒸汽主凝结量; G_{ss} —抽出的蒸汽量; t —时间。

蒸汽压力方程为:

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{R_s}{V} (T_s + T_t) \frac{dG_s}{dt} \quad (2)$$

式中: p_s —冷凝器内部蒸汽压强; R_s —蒸汽气体常数; V —冷凝器内部汽气空间的体积; T_s —饱和气体的温度; T_t —绝对零度的温度。

空气质量方程为:

$$\frac{d\Theta_a}{dt} = \Theta_{vb} + \Theta_n + \Theta_g - \Theta_{air} \quad (3)$$

式中: Θ_a —冷凝器内总体的空气量; Θ_{vb} —真空破坏阀进入冷凝器的空气量; Θ_n —正常漏入冷凝器的空气量; Θ_g —轴封漏入冷凝器的空气量; Θ_{air} —抽气器抽出的空气量。

热井水质量方程为:

$$\frac{d\Xi_w}{dt} = G_c + G_{gp} - \Phi_{wo} \quad (4)$$

式中: Ξ_w —热井水质量; Ξ_{gp} —鼓泡除氧乏汽量; Φ_{wo} —冷凝器出水量。

冷凝器管侧的动态热平衡模型为:

$$M_w C_w \frac{dT_2}{dt} = Q_c - Q_w \quad (5)$$

式中: M_w —循环水质量; C_w —循环水比定容热容; Q_c —蒸汽放热量; Q_w —循环水吸热量; T_2 —循环水出口温度。

1.2 凝给水泵

凝给水泵通过泵与管路的特性曲线方程得出泵的转速与流量关系,然后根据电机功率计算出泵的轴功率 P_z :

$$P_z = \sqrt{3} UI \eta_d \eta_s \cos \varphi \quad (6)$$

式中: U, I —电机的电压和电流; η_d, η_s —电机效率和传动效率; $\cos \varphi$ —功率因数。

泵的有效功率 P_s 计算式为:

$$P_s = \rho g \gamma H \quad (7)$$

式中: ρ —工质密度; g —重力加速度; γ —工质体积流量; H —泵的工作扬程。

泵的工作效率 η :

$$\eta = P_s / P_z \quad (8)$$

综上所述,针对上述的冷凝器和凝给水泵数学模型可以用广义的映射函数关系进行描述:

$$y = f(x, u) + f_d \quad (9)$$

式中: y —传感器测量或观测到的变量; $f(\cdot)$ —广义的映射函数关系; u —输入到冷凝器和凝给水泵的变量; x —冷凝器和凝给水泵的状态变量; f_d —故障发生的变量。

虽然前文已给出冷凝器和凝给水泵的数学模型表达式,但是其数学模型的建立存在假设条件:不考虑冷凝器向环境散热、不考虑化学补水与疏水闪蒸;不考虑热井水向环境散热以及热井水向循环水管散热;热井水面的动态蒸发量与动态凝结量相等。

在复杂的实际情况中,冷凝器和凝给水泵的输入、输出参数之间的关系相对复杂,参数间存在耦合关系。因此,有如下两个问题需要考虑:

(1) 如何在避免二回路系统冷凝器和凝给水泵模型的假设条件下进行数据驱动的故障诊断;

(2) 冷凝器和凝给水泵是闭环结构,如何在闭环回路中进行精准故障诊断有待进一步研究。

2 闭环子空间的故障诊断方法

2.1 闭环系统的扩展描述

图2为标准反馈控制回路系统,标准反馈空回路系统 $G(z)$ 可视为冷凝器和凝给水泵,用状态空间形式描述如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{B}u_k + \sigma_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{D}u_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (10)$$

式中: A, B, C, D —常系数矩阵; σ_k, v_k —过程噪声和测量噪声; u_k —控制输入向量; y_k —测量输出向量; x_k —系统的状态向量。

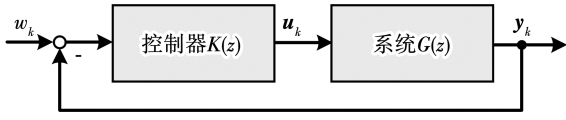


图2 标准反馈控制回路系统

Fig.2 Standard feedback control loop system

一般情况下,冷凝器和凝给水泵的反馈控制器 $K(z)$ 也可以由状态空间实现,即:

$$\begin{cases} x_{c,k+1} = A_c x_{c,k} + B_c (w_k - y_k) \\ u_k = C_c x_{c,k} + D_c (w_k - y_k) \end{cases} \quad (11)$$

式中:矩阵 A_c, B_c, C_c, D_c —控制器的常系数矩阵; w_k —跟踪参考信号; $x_{c,k}$ —控制器的状态向量。

基于互质分解技术,系统 $G(z)$ 的左互质分解和右互质分解如下所示:

$$G(z) = \hat{M}^{-1}(z) \cdot \hat{N}(z) = N(z) \cdot M(z) \quad (12)$$

式中: $\hat{M}(z), \hat{N}(z), N(z), M(z)$ —系统 $G(z)$ 互质分解后稳定的系统。

根据式(12)中系统的左互质分解,可以形成在无噪声情况下系统的 SKR,即:

$$r(z) = \left[-\hat{N}(z) \quad \hat{M}(z) \right] \begin{bmatrix} u(z) \\ y(z) \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

式中: $r(z), u(z), y(z)$ —残差、输入和输出的 z 域形式。

式(13)是基于模型的开环系统稳定核描述的形式。在此基础上,提出子空间映射的数据驱动闭环稳定核描述表示形式并进行故障诊断。为了实现数据驱动的故障方法,给出如下数据结构的定义,设 $d_k \in R^{n_f}$ 是第 k 个离散时间样本的任意数据向量,引入整数 s , 定义长度为 s 的数据向量:

$$d_{s,k} = \begin{bmatrix} d_k \\ \vdots \\ d_{k+s-1} \end{bmatrix} \in R^{sn_f} \quad (14)$$

此外,存在整数 N , 对于描述 $d_{s,k}$ 样本长度的整数,定义符号长度为 N 的汉克尔矩阵为:

$$D_{k,s,N} = [d_{s,k} \quad \cdots \quad d_{s,k+N-1}] \in R^{sn_f \times N} \quad (15)$$

在本文中,数据向量 d_k 可以是 $w_k, u_k, y_k, x_k, \omega_k, v_k$ 。因此,系统输入和输出测量数据向量如下:

$$u_{s,k} = \begin{bmatrix} u_k \\ \vdots \\ u_{k+s-1} \end{bmatrix} \in R^{sl}, y_{s,k} = \begin{bmatrix} y_k \\ \vdots \\ y_{k+s-1} \end{bmatrix} \in R^{sm} \quad (16)$$

式中: s —从第 k 个采样时刻开始数据截断的长度; l —控制输入 u_k 的信号维数; m —测量输出 y_k 的信号维数。

然后,将参考信号、控制输入和输出汉克尔矩阵以及扩展状态向量分别定义为:

$$W_{k,s,N} = [w_{s,k} \quad \cdots \quad w_{s,k+N-1}] \quad (17)$$

$$U_{k,s,N} = [u_{s,k} \quad \cdots \quad u_{s,k+N-1}] \quad (18)$$

$$Y_{k,s,N} = [y_{s,k} \quad \cdots \quad y_{s,k+N-1}] \quad (19)$$

$$X_{k,1,N} = [x_k \quad \cdots \quad x_{k+N-1}] \quad (20)$$

式中: $W_{k,s,N}, U_{k,s,N}, Y_{k,s,N}$ —参考输入、控制器输入和测量输出的汉克尔矩阵; $X_{k,1,N}$ —扩展状态向量。

根据子空间方法,式(10)的扩展状态空间表达式为:

$$Y_{k,s,N} = \Gamma_s X_{k,1,N} + H_{u,s} U_{k,s,N} + H_{\phi,s} \Psi_{k,s,N} \quad (21)$$

式中: $H_{\phi,s} \Psi_{k,s,N}$ —噪声矩阵; Γ_s —可观测矩阵; $H_{u,s}$ —下三角矩阵,具体形式如下:

$$\Gamma_s = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{s-1} \end{bmatrix}, H_{u,s} = \begin{bmatrix} D & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{s-2}B & CA^{s-3}B & \cdots & D \end{bmatrix} \quad (22)$$

同样地,式(11)的控制器扩展状态空间表达式为:

$$U_{k,s,N} = \Gamma_s^c X_{k,1,N}^c + H_{u,s}^c W_{k,s,N} - H_{u,s}^c Y_{k,s,N} \quad (23)$$

其中, $X_{k,1,N}^c = [x_{c,k} \quad \cdots \quad x_{c,k+N-1}]$, Γ_s^c 和 $H_{u,s}^c$ 是由控制器 $K(z)$ 的参数 A_c, B_c, C_c, D_c 组成的,其结构与 Γ_s 和 $H_{u,s}$ 类似。将式(23)代入(21)中,获得以下等式成立:

$$T_s Y_{k,s,N} = \Gamma_s X_{k,1,N} + H_{u,s} \Gamma_s^c X_{k,1,N}^c + H_{u,s} H_{u,s}^c W_{k,s,N} + H_{\phi,s} \Psi_{k,s,N} \quad (24)$$

其中, $T_s = I_{sm} + H_{u,s} H_{u,s}^c$, T_s 的可逆性在文献[13]中已经被证明,并且说明了系统输出由系统和控制器的状态、跟踪参考和噪声序列唯一性确定。

定义如下辅助矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{k,s,N} &= \mathbf{U}_{k,s,N} + \mathbf{H}_{u,s}^c \mathbf{Y}_{k,s,N} = \mathbf{I}_s^c \mathbf{X}_{k,1,N}^c + \\ &\mathbf{H}_{u,s}^c \mathbf{W}_{k,s,N} \end{aligned} \quad (25)$$

因此,式(23)重新写为:

$$\mathbf{Y}_{k,s,N} = \mathbf{T}_s^{-1} (\mathbf{I}_s^c \mathbf{X}_{k,1,N} + \mathbf{H}_{u,s} \mathbf{M}_{k,s,N} + \mathbf{H}_{\phi,s} \boldsymbol{\Psi}_{k,s,N}) \quad (26)$$

式(26)是闭环系统子空间扩展描述,为后续数据驱动稳定核描述故障诊断提供基础。

2.2 闭环实现数据驱动的稳定核描述

按照式(17)~式(20)的结构形式,汉克尔矩阵定义如下:

$$\mathbf{Z}_{p,N} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{p,N} \\ \mathbf{Y}_{p,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{k-s_p,p,N} \\ \mathbf{Y}_{k-s_p,p,N} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{Z}_{f,N} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f,N} \\ \mathbf{Y}_{f,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{k,s_f,N} \\ \mathbf{Y}_{k,s_f,N} \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中, $\mathbf{U}_{k-s_p,p,N} = [u_{s_p,k} \cdots u_{s_p,k+N-1}]$, $\mathbf{Y}_{k-s_p,p,N} = [y_{s_p,k} \cdots y_{s_p,k+N-1}]$, $\mathbf{U}_{p,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{p,N}$ 分别是 $\mathbf{U}_{k-s_p,p,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{k-s_p,p,N}$ 简单记作, $\mathbf{Z}_{p,N}$ 表示 $\mathbf{U}_{p,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{p,N}$ 堆叠的汉克尔矩阵, s_p 表示过去时间段的长度, p 表示 s_p 的简单记作。同样地, $\mathbf{U}_{f,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{f,N}$ 分别是 $\mathbf{U}_{k,s_f,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{k,s_f,N}$ 简单记作, 并且汉克尔矩阵 $\mathbf{U}_{k,s_f,N} = [u_{s_f,k} \cdots u_{s_f,k+N-1}]$, $\mathbf{Y}_{k,s_f,N} = [y_{s_f,k} \cdots y_{s_f,k+N-1}]$, $\mathbf{Z}_{f,N}$ 表示 $\mathbf{U}_{p,N}$ 和 $\mathbf{Y}_{p,N}$ 堆叠的汉克尔矩阵, s_f 表示未来时间段长度, f 表示 s_f 的简单记作。然后, 给出式(24)的过去和未来时间段的辅助矩阵 $\mathbf{M}_{p,N}$ 和 $\mathbf{M}_{f,N}$:

$$\mathbf{M}_{p,N} = \mathbf{U}_{p,N} + \mathbf{H}_{u,s_p}^c \mathbf{Y}_{p,N} \quad (29)$$

$$\mathbf{M}_{f,N} = \mathbf{U}_{f,N} + \mathbf{H}_{u,s_f}^c \mathbf{Y}_{f,N} \quad (30)$$

结合式(27)和式(28)的汉克尔矩阵定义形式, 给出如下含有控制器闭环解耦的过去和未来时间段的汉克尔矩阵 $\mathbf{Z}_{c,p,N}$ 和 $\mathbf{Z}_{c,f,N}$

$$\mathbf{Z}_{c,p,N} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{p,N} \\ \mathbf{Y}_{p,N} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{c,f,N} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{f,N} \\ \mathbf{Y}_{f,N} \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中, $\mathbf{M}_{f,N}$ 与过去的噪声序列不相关, 通过正交投影的概念, 将 $\mathbf{Y}_{f,N}$ 正交投影到 $\mathbf{Z}_{c,p,N}$ 和 $\mathbf{M}_{f,N}$ 的行空间上来实现数据驱动的 SKR 闭环识别。利用矩阵分解将投影至不同的空间之中, 即:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{c,p,N} \\ \mathbf{M}_{f,N} \\ \mathbf{Y}_{f,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{c,11} & 0 & 0 \\ \mathbf{L}_{c,21} & \mathbf{L}_{c,22} & 0 \\ \mathbf{L}_{c,31} & \mathbf{L}_{c,32} & \mathbf{L}_{c,33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{c,1} \\ \mathbf{Q}_{c,2} \\ \mathbf{Q}_{c,3} \end{bmatrix} \quad (32)$$

基于子空间投影技术, 式(26)重新描述为:

$$\mathbf{Y}_{f,N} = \mathbf{L}_{c,zp} \mathbf{Z}_{c,p,N} + \mathbf{L}_{c,m} \mathbf{M}_{f,N} + \mathbf{L}_{c,33} \mathbf{Q}_{c,3} \quad (33)$$

其中,

$$\mathbf{L}_{c,m} = \mathbf{L}_{c,32} \mathbf{L}_{c,22}^{-1} \quad (34)$$

$$\mathbf{L}_{c,zp} = \mathbf{L}_{c,31} \mathbf{L}_{c,11}^{-1} - \mathbf{L}_{c,32} \mathbf{L}_{c,22}^{-1} \mathbf{L}_{c,21} \mathbf{L}_{c,11}^{-1}$$

与式(26)进行比较, 下式满足:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{c,zp} \mathbf{Z}_{c,p,N} &= \mathbf{T}_{sf}^{-1} \mathbf{I}_{sf}^c \mathbf{X}_{k,1,N} \\ \mathbf{L}_{c,m} &= \mathbf{T}_{sf}^{-1} \mathbf{H}_{u,sf} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\mathbf{L}_{c,33} \mathbf{Q}_{c,3} = \mathbf{T}_{sf}^{-1} \mathbf{H}_{\phi,s} \boldsymbol{\Psi}_{k,s,N}$$

同样地, 有如下等式满足:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{f,N} \\ \mathbf{Y}_{f,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{c,21} & \mathbf{L}_{c,22} \\ \mathbf{L}_{c,31} & \mathbf{L}_{c,32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{c,1} \\ \mathbf{Q}_{c,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{L}_{c,33} \mathbf{Q}_{c,3} \end{bmatrix} \quad (36)$$

则数据驱动的 SKR 被得到如下式:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{d,u,sf} & \mathbf{K}_{d,y,sf} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_{d,sf}} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{f,N} \\ \mathbf{Y}_{f,N} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_{d,sf} \mathbf{L}_{c,33} \mathbf{Q}_{c,3} \quad (37)$$

其中

$$\mathbf{K}_{d,sf} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{c,21} & \mathbf{L}_{c,22} \\ \mathbf{L}_{c,31} & \mathbf{L}_{c,32} \end{bmatrix} = 0 \quad (38)$$

2.3 闭环系统故障诊断

根据式(37)中数据驱动的 SKR, 给出用于故障检测的残差产生器:

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{K}_{d,sf} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{sf,k} \\ \mathbf{y}_{sf,k} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$\mathbf{K}_{d,y,sf} \mathbf{L}_{c,33} \mathbf{Q}_{c,3}$ 为闭环系统的残差矩阵, 则该协方差矩阵 $\sum_c$ 为:

$$\sum_c = \frac{\mathbf{K}_{d,y,sf} \mathbf{L}_{c,33} (\mathbf{K}_{d,y,sf} \mathbf{L}_{c,33})^T}{N-1} \quad (40)$$

一般而言, $\sum_c$ 是满足可逆条件的, 而且过程噪声和测量噪声假设为服从正态分布。然后, 设计如下的 T^2 检验统计量 J 进行故障诊断, 即:

$$J = \mathbf{r}(k) \sum_c^{-1} \mathbf{r}(k)^T \quad (41)$$

合适的阈值 J_{th} 设计如下:

$$J_{th} = \chi^2_{\alpha}(n_K) \tag{42}$$

其中, χ^2 为卡方分布, α 为置信度, n_K 为矩阵 K_{d,s_f} 的行数。最后, 设计故障检测逻辑为:

$$\begin{cases} J \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障} \\ J > J_{th} \Rightarrow \text{故障} \end{cases} \tag{43}$$

3 实验结果及分析

为了证明所提方法的有效性, 以二回路系统中的凝给水泵给水转速调节系统和冷凝器水位控制系统为例验证故障诊断方法。本文实验采用文献[1]中的船舶二回路系统进行仿真验证, 并搭建的凝给水泵和冷凝器仿真平台, 其模型可用式(10)进行描述。两个系统仿真由 PID 进行控制的, 由于 PID 参数是人为经验设定, 可转为已知的状态空间模型进行描述。实验过程中, 实验参数设置为窗口大小 $N = 5\,000$, 过去数据采样时刻长度 $s_p = 10$, 未来数据采样时刻长度 $s_f = 60$ 。系统的典型故障可分为 3 大类: 传感器故障、系统故障和执行器故障, 即冷凝器执行器故障、冷凝器水位传感器故障和凝水器系统故障。在本文实验中, 冷凝器的执行器故障和水位传感器故障分别在 3 000 个采样点之后注入故障(仿真中注入的故障信号分别是阶跃故障和正余弦故障), 凝水器系统故障在 8 000 个采样点之后注入故障(注入故障类型是系统参数发生阶跃偏置)。

图 3 为残差信号服从正态分布的验证, 在故障检测时, 设置阈值的置信度为 $\alpha = 0.99$, 保证所提方法故障检测结果的合理性。

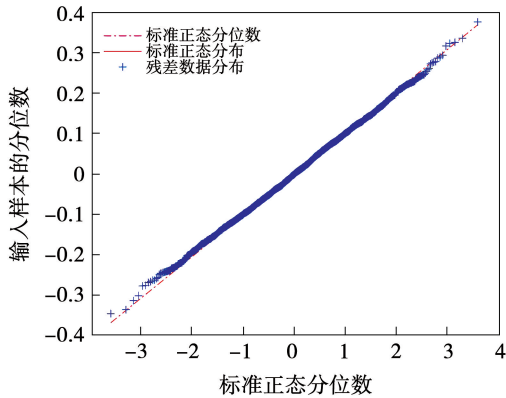


图 3 残差信号服从正态分布的验证

Fig. 3 Verification of residual signal following normal distribution

图 4 ~ 图 6 为所提方法对冷凝器执行器故障、冷凝器水位传感器故障和凝水器系统故障的检测结果。设定的阈值可以通过式(42)计算为 $J_{th} = 6.634\,9$ 。从图中结果可以发现, 所提方法在 3 000 个采样点之后对冷凝器执行器和水位传感器故障进行了有效的检测, 而且无故障情况下误报率也是能够接受的。同样地, 凝水器系统故障也可以在 8 000 个采样点之后有效地进行检测。在上述实验中, 针对二回路系统的凝给水泵和冷凝器进行了所提方法的验证, 结果表明所提方法具有较好的扩展性, 不仅能够适用凝给水泵和冷凝器, 还可以对汽轮机或蒸汽发生器进行故障检测。因此, 所提方法可以对二回路系统的故障进行检测, 保障其安全与高效稳定运行。

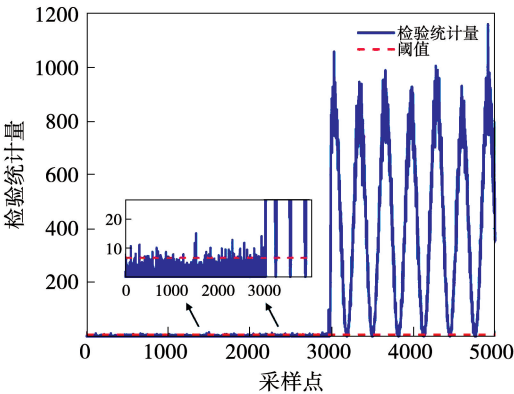


图 4 冷凝器水位传感器故障检测结果

Fig. 4 Fault detection result of condenser water level sensor

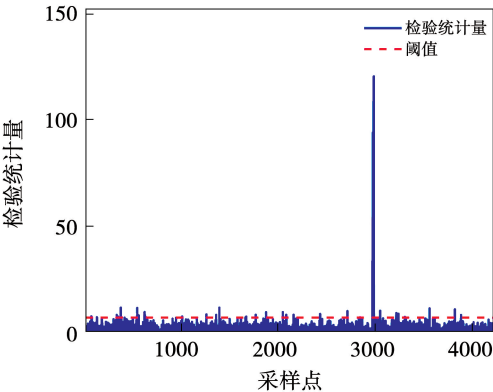


图 5 冷凝器执行器故障检测结果

Fig. 5 Fault detection result of condenser actuator

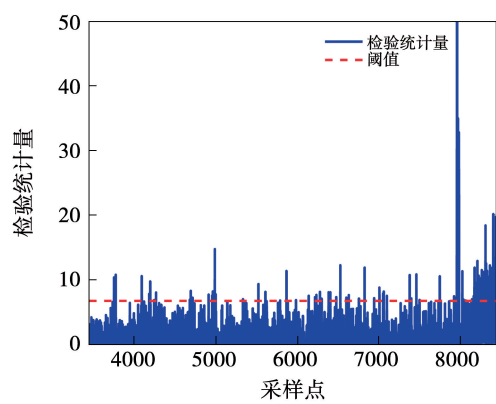


图6 凝给水器系统故障检测结果

Fig.6 Fault detection result of condensate system

4 结 论

(1) 所提的故障诊断方法将闭环控制器信息解耦,避免冷凝器和凝水器系统的噪声与控制输入之间的相关性的影响,提高故障检测与诊断性能。

(2) 船舶二回路系统仿真实验结果表明,数据驱动的残差产生器具有一定的可扩展性和可移植性,能够在可接受的误报率情况下对冷凝器和凝水器系统的传感器和执行器故障进行有效地检测。基于此,下一步研究计划将所提方法在二回路控制系统硬件上实现的无缝集成,助力相关从业人员对二回路系统更好地运维。

参考文献:

[1] 张思兵. 船舶核动力二回路热力系统建模与仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.

ZHANG Sibing. Modeling and simulation of secondary circuit thermal system for marine nuclear power[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.

[2] CHENG C, QIAO X, TENG W, et al. Principal component analysis and belief-rule-base aided health monitoring method for running gears of high-speed train[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(9): 199–202.

[3] 周志杰, 杨剑波, 胡昌华, 等. 置信规则库专家系统与复杂系统建模[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

ZHOU Zhijie, YANG Jianbo, HU Changhua, et al. Belief rule base expert system and complex system modeling[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[4] YIN X, ZHANG B, ZHOU Z, et al. A new health estimation model for CNC machine tool based on infinite irrelevance and belief rule base[J]. Microelectronics Reliability, 2018, 84: 187–196.

[5] 曾春阳. 基于符号有向图的核电二回路复杂系统传感器优化布置与仿真验证[D]. 南京: 东南大学, 2022.

ZENG Chunyang. Optimal sensor placement and simulation verification in complex nuclear power second-loop system based on signed directed graph[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.

[6] 马 杰, 张龙飞, 彭 俏, 等. 基于分层符号有向图的二回路系统故障诊断[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 176–181.

MA Jie, ZHANG Longfei, PENG Qiao, et al. Research on fault diagnosis method for secondary system based on hierarchical signed directed graph[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(8): 176–181.

[7] 高 东, 许 欣. 符号有向图与定性趋势的半定量验证方法[J]. 控制工程, 2019, 26(3): 515–520.

GAO Dong, XU Xin. Signed directed graph and qualitative trend based model semiquantitative validation[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(3): 525–520.

[8] 董春玲, 赵 越, 张 勤. 动态故障诊断中的立体因果建模与不确定性推理方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(7): 614–622.

DONG Chunling, ZHAO Yue, ZHANG Qin. Cubic causality modeling and uncertain inference method for dynamic fault diagnosis[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(7): 614–622.

[9] DING S X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools[M]. London: Springer Science & Business Media, 2008.

[10] SAHU A R, PALEI S K, MISHRA A. Data-driven fault diagnosis approaches for industrial equipment: A review[J]. Expert Systems, 2024, 41(2): e13360.

[11] 章壮炜. 基于相关分析和深度学习的核电二回路回热系统故障诊断研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.

ZHANG Zhuangwei. Fault diagnosis on nuclear power secondary circuit regenerative system based on correlation analysis and deep learning[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

[12] LUO H. Plug-and-play monitoring and performance optimization for industrial automation processes[M]. Duisburg: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

(王治红 编辑)