

DOI: 10.13382/j.jemi.B2609162

基于多物理场因果建模的船用升降机故障注入研究*

赵建忠¹ 韩丹阳² 于劲松³ 顾钧元¹ 许宜贺¹ 张 峥¹
(1. 海军航空大学 烟台 264001; 2. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际
创新学院) 杭州 311115; 3. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘 要:针对船用升降机故障样本稀缺、实机故障复现风险高且成本昂贵的问题,提出一种基于多物理场因果建模的船用升降机建模方法和故障注入方法,用于故障样本生成。区别于传统仅在可测信号层叠加偏差的测量偏置型故障注入方法,该方法立足于船用升降机的多物理场耦合特性建立故障注入模型,通过动态修改部件级关键物理参数,实现升降机从部件级性能变化到系统级功能失效的演变。基于所提出的船用升降机故障注入方法,通过故障-物理量表征行为分析,以及与测量偏置型故障注入方法的对比实验,验证方法在多部件间故障传播的有效性;通过多种典型故障诊断算法的诊断效果一致性,证明提出方法作为故障诊断验证基准的有效性。所提出的方法能够生成具备强物理因果性的故障样本,为船用升降机智能运维与故障诊断算法的训练提供可靠的故障数据支撑。

关键词:船用升降机;故障注入;多物理场耦合;因果关联

中图分类号: TP277; TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on fault injection and diagnosis of marine elevators based on multi-physics causal modelling

Zhao Jianzhong¹ Han Danyang² Yu Jinsong³ Gu Junyuan¹ Xu Yihe¹ Zhang Zheng¹
(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. International Innovation Institute of Beihang
University (International Innovation College of Beihang University), Hangzhou 311115, China;
3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract:To address the problems of scarce fault samples, high risk in reproducing faults on real equipment, and high cost, this paper proposes a marine elevator modelling method and a fault injection method based on multi-physics causal modelling for a fault sample generation method. Different from the traditional measurement-bias fault injection method that only superimposes deviations at the level of measurable signals, the proposed method establishes a fault injection model based on the mechanical-electrical-hydraulic coupling characteristics of marine elevators, and by dynamically modifying key component-level physical parameters, realises the evolution of the elevator from component-level performance changes to system-level functional failure. Based on the marine elevator fault-injection method proposed in this paper, the method's effectiveness in fault propagation across multiple components is verified through fault-physical-quantity characterisation behaviour analysis and comparative experiments on performance with measurement-bias injection. Meanwhile, the effectiveness of the proposed method as a verification benchmark for fault diagnosis is demonstrated through the consistency of the effects of multiple typical fault diagnosis algorithms. The proposed method can generate fault samples with strong physical causality, providing reliable fault data support for the training of intelligent operation and maintenance and fault diagnosis algorithms for marine elevators.

Keywords:marine elevator; fault injection; multiphysics coupling; causal correlation

0 引言

船用升降机作为远洋甲板作业体系的核心组成部分,承担保障物资的垂直转运任务,是连接甲板与固定层站的重要枢纽。船用升降机的运行状态与舰船整体作业效率和安全高度关联,一旦发生故障,轻则导致甲板作业流程中断,重则引发船用设备损毁、人员伤亡等严重事故。因此,船用升降机的运行可靠性直接决定海上运行效能,监测其健康状态具有重要的研究价值和实际应用意义。

智能故障诊断是监测船用升降机健康状态、提高运维水平的关键技术。现有故障诊断方法多依赖大批量故障样本作为算法训练与验证的基础。然而,实际运行中,船用升降机故障样本采集面临诸多困难:1)实机复现故障存在极高安全风险,易对装备本体和作业人员造成危害;2)实机故障试验涉及装备停机、专业人员调配、试验方案制定等多项投入,成本昂贵;3)船用升降机故障偶发且隐蔽,自然服役过程中难以积累足够的故障数据,故障样本稀缺。因此,亟需开展船用升降机故障注入研究,生成故障样本,满足船用升降机故障诊断算法早期训练与验证需求。

目前,国内外学者围绕故障注入技术开展多层次探索。经典方法虽不乏从硬件级实现故障注入^[1],但考虑到实际装备试验成本较高的客观约束,现有故障注入方法多从故障模式与传感器信号的映射关系入手,将故障注入模块作为中间件,在信号与数据链路层的输出信号中直接改变信号行为^[2]。李隆鹏^[3]通过在起落架电磁阀信号叠加故障状态,模拟开路、短路及电平异常时的输出逻辑;陈洁等^[4]模拟舵面“卡阻”状态,直接对民机飞控系统特定位置的传感器信号钳位。该类方法属于典型的测量偏置型故障注入方法,其本质是绕过系统内在机理过程,在输出端直接添加故障扰动,在集成电路^[5-6]、软件工程^[7-9]、机器人^[10-11]等领域应用广泛。尽管上述方法在各自领域证明有效性,但尚未充分考虑深层物理故障到系统整体响应的因果链条,难以模拟故障链中多物理量的联动行为。

针对上述问题,故障注入向具备故障注入解释性的机理建模型故障注入方式转变^[12-13]。刘素艳等^[14]在数字孪生框架下构建轴承接触力学模型,生成轴承内、外环故障数据;Xu等^[15]聚焦永磁电机电磁成因量化与高频信号表征,对匝间短路故障进行模拟;丁宁等^[16]通过数字孪生技术,模拟机电转子系统故障并生成故障数据。上述方法通过物理机理,分别讨论部件级故障模拟方式,并未全面描述故障在各部件间的传播因果关系以及最终在系统性能上的表现。

综上,现有故障注入方法普遍停留于信号末端干预或局限于单一部件建模,对于以船用升降机为代表的多物理场耦合系统,难以反映部件、子系统层级化运行机理,也无法有效描述类似于电流突变、振动激增与平台倾斜之间物理参数关联的故障传播因果链路。因此,为应对船用升降机复杂故障注入的需求,亟需从物理机理出发,探索具备明确因果映射关系的故障注入新范式,构建涵盖“隐含物理量变化→多物理量耦合响应”的完整故障演化因果链路^[17]。

基于上述需求,针对船用升降机故障样本缺乏、难以支撑故障诊断算法前期验证的工程痛点,本文提出一种由物理参数驱动的,基于多物理场因果建模的船用升降机故障注入方法,揭示故障从关键物理参数变化到传感器信号偏差的传递机理,明确故障与信号的映射关系。

本文构建了包括升降台主体、隔离门及液压驱动装置的多物理场耦合机理模型,全面描述船用升降机运行机理和多物理场间的映射关系,为故障注入提供物理因果关联。在多物理场因果关联的船用升降机运行机理模型构建基础上,通过关键物理参数变化,实现由部件状态衰退向系统性能改变的传播。通过运行机理分析,证明多物理场因果关联的船用升降机模型构建有效性;通过与测量偏置型故障注入方法进行对比,证明本文提出的故障注入方法在描述部件-系统故障传播的优越性;通过改变排线筒摩擦系数与升降机承载物总重量,探究内外负载对故障注入效果的影响。基于本文提出方法生成的故障数据,通过多种成熟故障诊断算法测试,故障诊断准确率在95%以上,证明故障数据生成的有效性和一致性,能够作为故障诊断算法前期效果验证的数据基准。

1 多物理场因果关联船用升降机建模

1.1 基于运行逻辑因果关联的船用升降机框架

在基于因果关联的数字模型构建中,广义的“因果关联”可以描述部件间、部件与子系统逻辑运行关联关系,以及部件内物理参量和跨部件间物理参数的数学转化关系^[18-20]。运行逻辑因果描述由系统功能架构决定的子系统间时序依赖与控制流约束,例如当升降台到达某一高度时,对应的隔离门会响应开关指令;多物理场计算因果描述不同物理变量间以本构方程、几何约束与能量守恒为约束的确定性计算关系。基于这一思想,本文构建的船用升降机数字模型通过描述物理实体的数学关系和运行逻辑,实现从组件级物理变量扰动到系统级运行异常的模拟。

船用升降机运行架构如图1所示。船用升降机系统是一个复杂的多物理场耦合系统,由升降台主体、隔离门及控制系统3部分构成,其中升降台主体与隔离门主要

包含机械动力场、电磁场、液压流场以及热力学场,控制系统主要涉及到控制律,各子系统间通过物理参数转换的物质流与子系统间相互制约的信息流实现协同作业的因果关联。

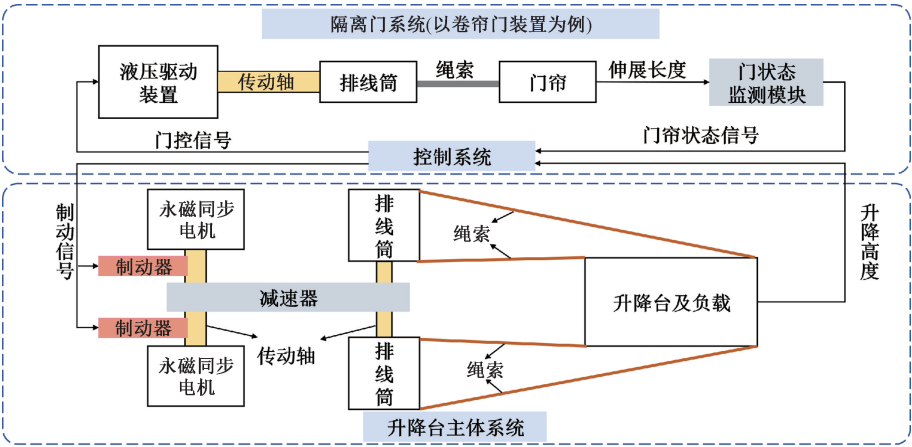


图 1 船用升降机系统架构
Fig. 1 Architecture of marine elevator

升降台主体系统采用四角驱动冗余设计,核心动力学传递链路遵循“电磁转矩-机械转矩-线性拉力”的物理逻辑。路径为永磁同步电机输出转矩,经由传动轴与减速器进行增扭减速,驱动排线筒旋转,进而卷绕钢丝绳产生张力,最终克服重力与摩擦力带动升降平台垂直运动。

隔离门系统包含顶层双开门机构与中底层卷帘门机构。该系统以液压驱动装置为动力源,通过阀控缸动力机构带动连杆或卷筒,将液压能转化为门板的旋转运动或门帘的线性位移,实现层站封闭与开启。

升降机主体、隔离门之间通过控制系统实现相互配合作业。控制系统基于实时采集的平台高度与各层门装置状态,协调主传动链与门系统的动作时序。当平台到达目标层站时,控制系统触发门控模块,指令对应的液压

驱动装置执行开关门动作,确保作业流程的连贯性与安全性。

1.2 基于参数转化因果关联的子系统物理机理建模

除运行逻辑关联之外,因果关联的另一种表现形式在于物理参数间的转换关系。本文针对船用升降机核心子系统,以及子系统间的关键物理变量、传感器变量关系,建立数学关系描述的物理机理模型,模拟船用升降机系统的运行机理。

1) 永磁同步电机机理模型

船用升降机通常采用永磁同步电机作为驱动器。其功能是将电能转换为机械能,驱动减速器,带动整个起升机构。永磁同步电机常看做双闭环控制的伺服系统,通过控制电机转动,拉动绳索,带动升降台升降,其框架结构如图 2 所示。

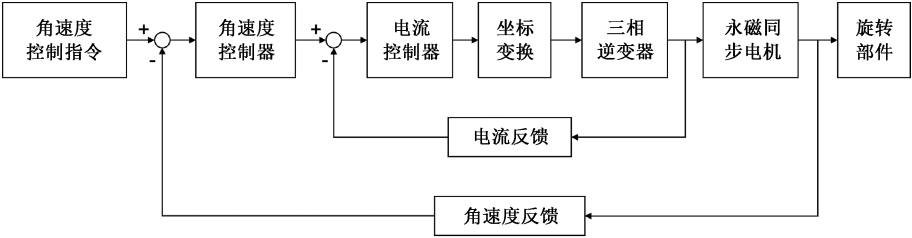


图 2 永磁同步电机伺服系统框架
Fig. 2 Permanent magnet synchronous motor servo system framework

永磁同步电机属于直驱式电机,其基本原理是通过计算各相位电压矢量合成满足要求的总电压矢量,形成磁场后带动永磁同步电机转子转动。永磁同步电机的数学模型通常在 $d-q$ 同步旋转坐标系下描述,有效简化电磁关系。电压方程、磁链方程和电磁转矩方程是其核心

组成部分,电压方程如式(1)和(2)所示。

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \tag{1}$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d \tag{2}$$

式中: u_d 、 u_q 分别表示 d 、 q 轴定子电压; i_d 、 i_q 分别表示 d 、 q 轴定子电流; R_s 表示定子电阻; ψ_d 、 ψ_q 分别表示 d 、 q 轴定子交链磁通; ω_e 表示电角速度。这些方程建立了电机电气侧输入(电压)与内部电磁状态(电流、磁通)之间的动态关系。

磁链方程如式(3)和(4)所示。

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

式中: L_d 、 L_q 分别表示 d 、 q 轴电感; ψ_f 表示转子永磁体磁链。这些方程描述定子磁通与定子电流和永磁体磁通之间的转换关系。 L_d 和 L_q 的值反映电机内部的结构特性(凸极比),是设计高性能电机驱动器的关键参数。永磁体磁链 ψ_f 是衡量永磁体磁化强度和性能的关键指标,其减弱预示着永磁体的退磁故障。

永磁同步电机的电磁转矩是由定子电枢磁场与转子永磁磁场相互作用产生的,如式(5)所示。

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

式中: p_n 表示极对数。此方程表示电磁转矩与永磁体磁链、定子电流以及电机电感参数的转换关系,是电机对外输出机械能的直接体现。

永磁同步电机输出轴运动方程描述了电机的机械行为,如式(6)所示。

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L = T_e \quad (6)$$

式中: J 表示转动惯量; B 表示阻尼系数; ω_m 表示电机旋转角速度; T_L 表示负载转矩; T_e 表示电磁转矩。此方程结合电磁转矩和机械载荷,用于分析电机的动态响应和速度稳定性。

2) 减速器机理模型

减速器用于永磁同步电机机械转速与转矩的转换,实现减速增扭或增速减扭。它由一系列齿轮组成,其主要物理参数包括传动比和传动效率。减速器通过齿轮的啮合传动实现减速和增扭。输入轴带动小齿轮旋转,小齿轮与大齿轮啮合,通过不同齿轮级的配合,最终在输出轴实现预定的减速比和扭矩增大比例。

减速器的核心物理机理是齿轮传动力学。输出扭矩与输入扭矩、减速比之间的关系如式(7)所示。

$$T_{out} = T_{in} \times i \times \eta - T_f \quad (7)$$

式中: T_{out} 表示输出扭矩; T_{in} 表示输入扭矩; i 表示减速比; η 表示传动效率; T_f 表示减速器内部摩擦力矩,重点考虑粘性摩擦。

减速器对转速的变换作用如式(8)所示。

$$\omega_{low} = \frac{\omega_{high}}{i} \quad (8)$$

式中: ω_{low} 表示输出端转速; ω_{high} 表示输入端转速。

减速器中润滑油遵循热力学原理。减速器内部产生的热量一部分来源于齿轮啮合、轴承滚动产生的摩擦损耗,另一部分则通过传导和对流散热,作用在润滑油中。而润滑油的温升模型通常与环境温度、冷却效率以及摩擦功率损失有关,方程如式(9)所示。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} (P_{nload} + P_{load} - P_{diss}) \quad (9)$$

式中: C 表示润滑油等效热容; P_{nload} 表示空载损失功率; P_{load} 表示负载损失功率; P_{diss} 表示总散热功率。

3) 传动轴机理模型

传动轴用于支撑旋转轴,减少运动部件间的摩擦,并在动力传动过程中传递机械功率,同时将能量损失和磨损降至最低。其中,传动轴摩擦力矩作为主要影响因素,可以用粘性摩擦和库仑摩擦表示:

$$T_f = T_v + T_c \quad (10)$$

式中: T_v 表示粘性摩擦力矩; T_c 表示库仑摩擦力矩。

粘性摩擦力矩的计算方式如式(11)所示。

$$T_v = B_{bearing} \cdot \omega_m \quad (11)$$

式中: $B_{bearing}$ 为传动轴的粘性摩擦系数; ω_m 为机械角速度。

当机械角速度不等于0时,考虑计算库仑动摩擦力矩,计算方式如式(12)所示。

$$T_c = T_{cd} \cdot \text{sign}(\omega) \quad (12)$$

式中: T_{cd} 表示库仑动摩擦转矩。当机械角速度为0且输入扭矩小于库仑静摩擦转矩 T_{cs} 时,传动轴保持静止。

传动轴的振动信号是监测升降机健康状态的重要参数,传动轴的振动由3部分组成:轴承内部缺陷(如滚道、滚子或保持架缺陷)引起的冲击性振动、轴上不平衡质量引起的不平衡振动以及随机噪声。传动轴的振动幅值计算公式如下:

$$V_b = V_{imb} + V_{shock} + V_{noise} \quad (13)$$

式中: V_{imb} 表示不平衡振动; V_{shock} 表示冲击性振动; V_{noise} 表示随机噪声。

4) 排线筒机理模型

排线筒是将旋转运动转换为线性运动的关键部件,负责升降机绳索的伸展和收回,控制升降机主体升降。排线筒的转矩平衡方程如式(14)所示。

$$T_{in} - T_{load}^r - T_f^d = J^d \cdot \alpha \quad (14)$$

式中: T_{in} 表示排线筒驱动转矩; T_{load}^r 表示通过绳索拉力施加在排线筒的负载转矩; T_f^d 表示排线筒内摩擦力矩; J^d 表示排线筒转动惯量; α 表示排线筒角加速度。

5) 牵引绳索机理模型

牵引绳索是连接排线筒和升降机主体的关键传动部件,其主要是将排线筒的旋转运动转化为升降机平台垂直线性运动,并传递平台重量及运动所需的力。

牵引绳索伸展长度与排线筒转动角度之间的转换关

系如式(15)所示。

$$l_r = \theta_d \cdot R_d \quad (15)$$

式中: l_r 表示绳索伸展长度; θ_d 表示排线筒转动角度; R_d 表示排线筒半径。绳索伸展长度等价于升降台实际高度。

牵引绳索的磨损度与张紧度是影响船用升降机稳定运行的重要因素。其中,牵引绳索的磨损度随时间积累,看做是所有时间步长磨损增量的总和。如果在第 n 个时间步长计算,则该时刻的磨损度如式(16)所示。

$$w_{\text{total}}^{(n)} = w_{\text{total}}^{(n-1)} + \Delta w^{(n)} \quad (16)$$

式中: $\Delta w^{(n)}$ 表示磨损增量。

牵引绳的张紧度与其受到的瞬时拉力与动态附加力有关,张紧度计算方式如式(17)所示。

$$D_t = \frac{F_{\text{total}}}{F_N} \times 100\% \quad (17)$$

式中: F_{total} 表示瞬时拉力与动态附加力的总和; F_N 表示额定张力。

6) 升降台机理模型

升降台是执行装载负载的直接元件。在船用升降台机理模型中,由横滚角与俯仰角表示平台倾斜度。横滚角的计算方式如式(18)所示。

$$\theta_{\text{roll}} = \arctan\left(\frac{\Delta H_{\text{roll}}}{W_{\text{platform}}}\right) \quad (18)$$

式中: ΔH_{roll} 表示升降台左右侧高度差; W_{platform} 表示平台的宽度。

俯仰角的计算方式如式(19)所示。

$$\theta_{\text{pitch}} = \arctan\left(\frac{\Delta H_{\text{pitch}}}{L_{\text{platform}}}\right) \quad (19)$$

式中: ΔH_{pitch} 表示升降台前后侧高度差; L_{platform} 表示升降台的长度。

7) 液压驱动装置机理模型

顶层层站配置的双开门与其他层站配置的卷帘门整体机构,都需要液压驱动装置作为动力源。液压驱动原理为通过比例阀控制液压油流量,在液压缸腔体内形成压力,产生的压力差带动活塞杆克服负载做直线伸缩运动,利用连杆机构将活塞杆的直线位移转换为传动轴的旋转角度。调节阀芯位移控制流入和流出液压缸的流量 Q_L , 其线性化方程如式(20)所示。

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L \quad (20)$$

式中: K_q 表示流量增益; x_v 表示阀芯位移; P_L 表示进油腔与回油腔的压强差; K_c 表示流量-压力系数。

液压油进入密闭腔体后,由于液体压缩性和腔体体积变化发生活塞运动,油腔压力变化如式(21)所示。

$$Q_L + Q_s = A_1 \cdot v_{\text{piston}} + \frac{V_0 A_1 x_{\text{piston}}}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (21)$$

式中: Q_s 表示液压缸内外泄漏流量; A_1 表示进油腔有效

面积; v_{piston} 表示活塞杆速度; V_0 表示液压缸初始容积; x_{piston} 表示活塞杆位移; β_e 表示油液的有效体积弹性模量。

液压缸产生的净驱动力 F_{hyd} 等于两腔油液分别作用在对应有效面积上的合力:

$$F_{\text{hyd}} = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (22)$$

式中: P_1 表示进油腔压强; P_2 表示回油腔压强。这些方程共同构成了非线性微分方程组,描述液压驱动装置的动态响应、控制特性。

液压缸产生的净驱动力与活塞杆动力学之间的转换如式(23)所示。

$$F_{\text{hyd}} - F_f - F_{\text{load}} = m_{\text{eq}} a_{\text{eq}} \quad (23)$$

式中: F_f 表示摩擦力; F_{load} 表示外部载荷力; m_{eq} 表示等效到活塞杆总质量; a_{eq} 表示活塞杆加速度。

活塞杆位移可以通过加速度计算得到,由于液压缸与连杆构成几何约束,活塞杆伸出长度与传动轴转角之间存在固定的几何函数关系。假设活塞杆伸出量为 x_p , 传动轴角度为 θ , 他们之间满足非线性几何关系函数 f :

$$x_p = f(\theta) \quad (24)$$

顶层层站配置的双开门装置是由两个门板组成的,每个门板各自连接一个传动轴,受液压驱动装置驱动。门板产生的负载力矩受门板重力与旋转角度的影响:

$$T_{\text{load}} = m_{\text{door}} \cdot g \cdot d \cdot \cos\theta \quad (25)$$

式中: m_{door} 表示门板重量; g 表示重力加速度; d 表示门板重心到旋转轴的距离; θ 表示传动轴的旋转角度。

其他层站配置的卷帘门装置与顶层门板不同,卷帘门通过排线筒牵引在滑轨上运动,排线筒旋转运动被转化为卷帘门帘片的直线运动,因此帘片的伸展长度与转动角度正相关。

2 基于关键物理参数扰动的故障注入方法设计

本文基于多物理场因果关联构建的船用升降机机理模型,根本目的在于突破现有信号层叠加外部噪声的故障注入方式的局限性,生成具备物理因果性的故障样本。采用基于“关键物理参数驱动”的白盒化注入方法,通过描述船用升降机内部关键物理参数变化,从根源上激发船用升降机在多部件的异常响应,保障故障样本具备物理因果一致性。

2.1 物理参数典型故障扰动行为

基于船用升降机运行过程中关键物理参数随时间演化的特性,常见故障行为可划分为偏差和缓变两类。该分类方法以故障在时间域上的表现为依据,动态刻画故障发生及其对系统运行状态的影响规律,为故障注入策略提供数学描述依据。

故障注入时物理参数扰动的基本原理如图 3 所示,其中,突发故障是指故障在极短时间内突然发生,其产生往往源于系统部件的瞬时损坏、电子器件击穿或控制逻辑异常等突发性事件。这类故障会导致物理参数在短时间内发生显著变化,引发系统性能急剧下降或功能失效。

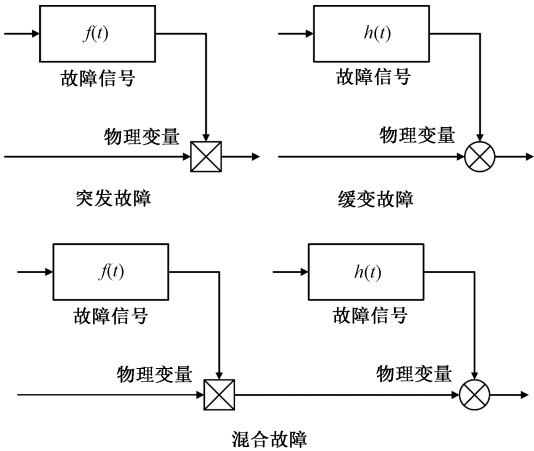


图 3 不同故障类型下物理参数扰动行为
Fig. 3 Parameter perturbation behavior
under different fault types

渐变故障表现为物理参数随时间缓慢演化,其变化过程通常较为平滑,短期内难以通过单次测量或阈值判断加以识别。该类故障多由机械结构老化、元器件性能退化或长期环境应力作用等因素引起,虽然初期不会直接导致明显异常,但会逐步削弱系统性能,若未及时发现

和处理,最终可能演化为严重故障。因此在故障注入时的物理参数扰动行为重点体现其渐进性和持续性特征。

为定量描述物理变量扰动行为,故障状态下,记 $z(t)$ 表示物理参数正常值, $y(t)$ 表示物理参数实际值。正常状态下,实际值与正常值保持一致,如式 (26) 所示。

$$y(t) = z(t)$$
 (26)

故障状态下,实际值与正常量之间的关系如式 (27) 所示。

$$y(t) = z(t) + f(t) + h(t)$$
 (27)

式中: $f(t)$ 和 $h(t)$ 分别为突变和渐变故障协变量。其具体形式根据故障类别的不同存在差异。偏差故障为 $f(t) = b$, 其中 b 为常数偏差值;渐变故障为 $h(t) = bt$, 其中 b 为偏移系数;突发故障为 $f(t) = \text{step}(b, t)$, 其中 b 表示常数偏差值, t 表示为故障发生时间。

更特殊的,噪声注入参考故障信号的描述方式,可以将噪声故障定义为 $f(t) = n(t)$ 。其中, $n(t)$ 为高斯噪声、白噪声、有色噪声等。

2.2 船用升降机故障模式分析

与传感器输出端直接添加故障分量的“测量偏置型”故障注入方式不同,本文提出方法将各类故障模式映射为物理模块内部参数的动态演化过程。结合船用升降机系统的物理链路特征,本文将故障注入点限定升降机主体和隔离门包含的 5 个核心物理模块:驱动电机、传动轴、减速器、绳索和液压驱动装置中。各部件的典型故障模式与参数影响关系如表 1 所示。

表 1 升降机部件典型故障与参数影响

Table 1 Typical faults of lifting equipment components and their influence on parameters

隶属子系统	部件	故障模式	直接影响	间接影响
升降机主体部分	永磁同步电机	定子绕组匝间短路、转子退磁	磁链 ψ_f , 定子绕组等效电阻 R_s	三相定子电流 i_a, i_b, i_c , 三相定子电压 u_a, u_b, u_c , 转速 ω_m
	传动轴	机械磨损、裂纹故障	振动幅值 V	摩擦转矩 J_f
	减速器	润滑油污染润滑油泄漏	减速器油温度 T , 齿轮油污染度 O_p	输出低速端转速 ω_L
	绳索	断股、疲劳松弛	张紧度 D , 磨损度 W	伸展长度 l , 线速度 v , 升降台高度 H , 横滚角 ϕ , 俯仰角 θ
隔离门	液压驱动装置	液压缸内泄油液污染	液压缸输出推力 F_{hyd}	门板转动角度 θ , 门帘伸展长度 L

在永磁同步电机模块,针对定子绕组匝间短路与转子磁钢退磁等典型故障,研究通过在电机电压方程中引入磁链参数退化因子,实现对电磁转矩常数下降或定子电阻突变等故障特征的精准模拟。

传动轴模块主要针对机械磨损与裂纹故障开展注入设计,基于摩擦力矩模型,通过阶跃式增大粘性摩擦系数与库仑摩擦力矩,模拟轴承卡滞所引发的非线性负载增加,同时在输出端叠加基于故障程度系数的振动信号模

型,以此表征传动轴的结构损伤状态。

减速器模块故障注入侧重于热力学与效率特性的退化模拟,研究通过修正热容方程中的功率损耗项,模拟润滑油污染导致的传动效率下降与温升速率异常,同时引入齿轮油污染度参数并使其随时间发生阶跃突变,直接驱动温度模型产生非正常响应,从而复现减速器相关故障场景。

绳索模块故障注入以胡克定律与多体动力学方程为

理论基础,通过改变绳索张紧度以模拟绳索断股等故障。绳索张紧度改变会破坏升降台力矩平衡状态,导致升降台四角拉力的重新分配以及平台姿态角偏移。

隔离门液压驱动装置模块聚焦在隔离门系统执行机构的故障模拟,通过调整流量-压力系数以及泄漏系数,复现液压缸内泄或油液污染等故障现象,此类故障会集中体现为液压推力的异常衰减,并进一步影响门板或门帘关闭过程的动态响应特性。

基于实际船用升降机测点排布,本文构建的仿真模型通过传感器信号构建多维度观测空间,作为故障诊断方法有效性验证的故障样本输入。船用升降机各部件与传感器参数间的对应关系如表 2 所示。

表 2 升降机部件与对应测量参数

Table 2 Lifting equipment components and corresponding measuring parameters		
子系统	部件	测量参数
升降机主体部分	永磁同步电机	转速 ω_m , 三相定子电流 i_a, i_b, i_c 三相定子电压 u_a, u_b, u_c
	传动轴	振动幅值 V
	减速器	减速器油温度 T , 齿轮油污染度 O_p
	绳索	伸展长度 l , 线速度 v
	升降台	升降高度 H , 横滚角 ϕ , 俯仰角 θ
隔离门	液压驱动装置	液压缸输出推力 F_{hyd}
	门板/门帘	门板转动角度 θ , 门帘伸展长度 L

2.3 多物理场耦合因果链路故障传播分析

本文基于多物理场因果关联建模的船用升降机模型,通过建立多部件之间功能约束、物理参数转换的因果关联,实现多物理场耦合。结合 2.2 节的多物理场因果关联船用升降机模型,以机械物理量为主线,重点考虑机械动力学场、电磁场、液压流体场与热力学场,分析机械-电磁耦合、机械-热力学耦合、机械-液压耦合下的故障传播因果链路。

1) 机械-电磁耦合的船用升降机故障因果链路

永磁同步电机作为典型的电磁部件,与升降机本体通过转速、力矩等动力学参数联接。电机与各执行机构通过刚体动力学与永磁同步电机矢量控制,实现故障下物理参数影响传播。

当绳索发生疲劳断丝或松弛故障时,其等效弹性模量下降,导致模型中的刚度系数退化。根据胡克定律,在负载不变的前提下,故障侧绳索的弹性伸长量显著增加。由于升降台被视为刚性体,四角绳索伸长量的不一致导致平台发生几何偏转,增加平台横滚角或俯仰角,打破四角驱动系统的力矩平衡状态。根据刚体动力学方程,负载转矩会自发向刚度较大的健康侧电机转移。为维持目标转速恒定,永磁同步电机的速度环控制器将自动调节电机电流以补偿负载力矩的变化,进而引发电机电流值偏移。

2) 机械-热力学耦合的船用升降机故障因果链路

减速器模块是机械-热力学耦合的主要载体。根据船用升降机运行机理,减速器通过摩擦损耗以及机械部件与润滑油的接触,实现从机械磨损到润滑油热力学参数转换,体现传动效率对系统能量流传递的影响。

当减速器出现齿面磨损或润滑度下降时,齿轮等效摩擦系数增大,导致内部摩擦阻力矩上升。摩擦系数的增加使得摩擦损耗功率剧增,打破原有的热平衡状态,导致油温升高。同时,输出转矩的跌落会引起瞬时转速的微弱下沉,在输入功率不变的前提下,有效输出转矩以及传动效率对应下降。

3) 机械-液压耦合的船用升降机故障因果链路

机械-液压耦合故障传播机制主要体现在隔离门系统中,通过流体动力学与多体动力学耦合,建立从液压源到执行机构的动力学映射。

当液压驱动装置发生内泄漏增加或油液污染时,流量-压力系数变化,液压缸进油腔与回油腔建立压差的速率变慢,导致净输出推力下降。输出推力减小直接导致活塞杆及门板的角加速度降低。由于活塞位移与门板角度之间存在非线性几何约束,推力下降最终表现为门板开启过程变缓,预期到达门板转动角度或门帘伸展长度的时间延长。

3 故障注入实验与讨论

基于前文描述的多物理场因果关联船用升降机机理模型和关键物理参数扰动的故障注入方法,本章对故障注入方法的效果进行讨论。由于船用升降机实机复现风险高且成本昂贵,故障样本暂时难以获取,本文实验参考文献[17,21]的分析思路,构建机理一致性验证、故障注入性能对比以及诊断一致性验证的多层次有效性验证,从物理机制、传播路径与算法适配性 3 个角度评估生成的故障样本。

1) 机理一致性验证。故障注入以部件关键物理参数变化为起点,经过多物理场耦合传播,输出符合物理规律的传感器信号变化,验证注入故障的物理合理性。

2) 故障注入性能对比验证。与传统测量偏置型故障注入进行对比,分析不同故障注入方法对故障传播的描述能力。

3) 诊断一致性验证。验证典型诊断算法在生成故障样本上的判别结果是否一致,分析故障样本可诊断性。

3.1 故障注入机理一致性验证

首先对故障注入方法有效性进行验证,基于图 4 所示开发的船用升降机故障注入平台,分别选用绳索断股故障为代表的突变故障和驱动电机退磁为代表的渐变故障两类故障模式,验证故障注入的有效性。实验中设定

船用升降机系统运行模式为升降台逐一上升,每 10 m 为一层,升降机到达每层后停留 20 s,并在到达顶层 30 m 高度后停止。



图 4 船用升降机故障注入平台界面
Fig. 4 Platform interface of the marine elevator fault injection

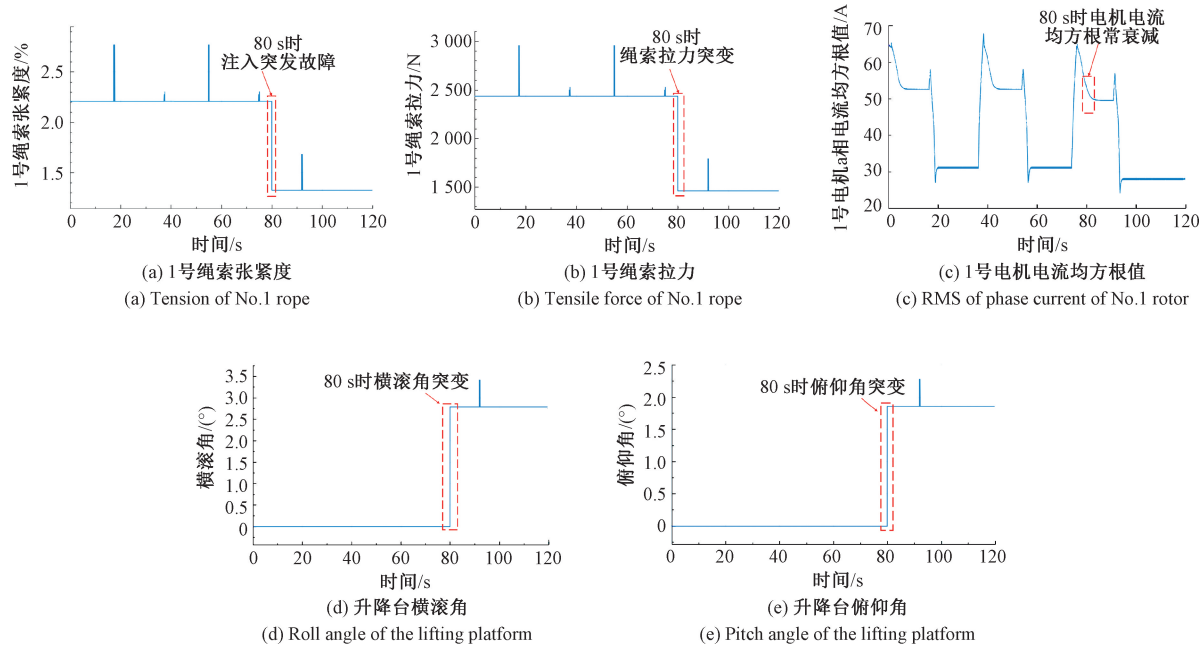


图 5 绳索断股故障注入关键物理参数变化曲线
Fig. 5 Change curves of critical physical parameters during a broken-strand fault injection

本文实验通过改变驱动电机磁链系数的方式注入驱动电机退磁渐变故障,参数变化如图 6 和表 4 表示。在船用升降机爬升阶段,在恒压条件下以 0.002 Wb/s 的速度退化至初始磁链系数的 70%。由表 4 可以看出,受磁链参数退化影响,驱动电机电流均方根值由 53.56 A 升高至 63.23 A,电机转速由 24.98 rad/s 下降至 18.11 rad/s,绳索拉伸线速度也相应下降。从船用升降机运行机理分析,当驱动电机退磁故障发生时,磁链系数降低导致转矩输出不足,引发电机转速和绳索线速度下降。控制器为提高输出力矩,通过电流补偿提升电机

绳索断股故障注入通过改变绳索张紧度的方式模拟绳索断股现象。实验在船用升降机爬升阶段第 80 s 将绳索张紧度降低至初始值的 60%,相关参数变化如表 3 和图 5 所示。从表 3 可以看出,当绳索断股故障发生,绳索张紧度下降,绳索拉力由 2 435.97 N 降为 1 461.58 N,引发平台侧偏,平台的俯仰角和横滚角分别变为 1.86°和 2.79°,同时侧偏的电机负载降低,驱动电机电流均方根从 53.56 A 降为 49.59 A。从船用升降机运行机理角度分析,当发生绳索断股故障时,直接影响参数为绳索张紧度。绳索张紧度下降导致绳索拉力降低,无法支撑平台,因此平台的横滚角与俯仰角都会发生偏离;而当绳索张紧度和拉力瞬时下降时,驱动电机负载瞬时降低,因此电机电流会呈现下降的现象。关键物理参数变化与船用升降机故障注入机理分析吻合,同时体现机械-电磁耦合的突变故障传递因果链路。

转速。

表 3 绳索断股故障注入关键物理参数变化					
Table 3 Change of critical physical parameters during a broken-strand fault injection					
	绳索张紧度/ %	绳索 拉力/N	俯仰角/ (°)	横滚角/ (°)	电机电流 均方根/A
绳索断股	1.32	1 461.58	1.86	2.78	49.59
正常状态	2.20	2 435.97	0	0	53.56

表 3 和 4 分别为船用升降机发生绳索断股和驱动电

机退磁故障时,各关键物理参数相对正常状态的偏差变化。从物理参数在各故障模式下的变化行为与物理机理分析相匹配可以得出结论,本文提出的船用升降机故障

注入方法在特定故障模式下与运行物理机理分析吻合,从机理一致性验证的角度说明本文提出故障注入方法的物理合理性,具备故障诊断算法前期验证的基本条件。

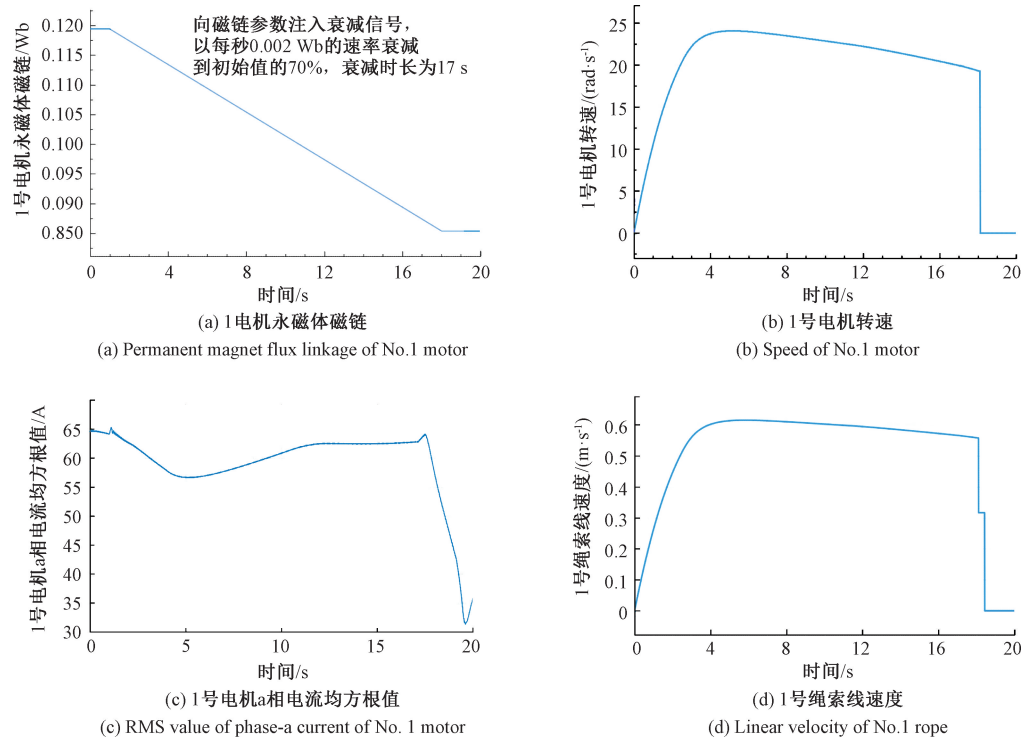


图 6 驱动电机退磁故障注入关键物理参数变化曲线

Fig. 6 Change curves of critical physical parameters during a motor demagnetization fault injection

表 4 驱动电机退磁故障注入物理参数变化
Table 4 Change of critical physical parameters during a drive motor demagnetization fault

	磁链系数/ Wb	电机电流 均方根/A	电机转速/ (rad·s ⁻¹)	绳索线速度/ (m·s ⁻¹)
电机退磁	0.08	63.23	18.11	0.56
正常状态	0.11	53.56	24.98	0.63

3.2 故障注入方法性能对比

为定量评估本文提出的多物理场因果建模船用升降机故障注入方法的先进性,实验选用测量偏置型故障注入作为对照,模拟典型故障时的各部件物理参数变化的差异性。两类范式的根本区别在于多物理场因果建模以部件内的关键物理参数在故障下的表征为注入起点,使故障通过多物理场耦合模型沿物理链路传播并最终体现在系统可观测的物理量中;而测量偏置型故障注入方法仅对传感器输出端施加恒定偏置,改变观测值而非系统内部物理约束与能量转换过程,未形成与真实故障一致的因果演化。

实验延续机理一致性验证,分别选用绳索断股故障和驱动电机退磁故障作为验证案例。根据多物理场因果

关联船用升降机机理分析,分别记录本文故障注入方式、测量偏置型故障注入方式和升降机健康状态下各相关物理参数变化,分别如表 5 和 6 所示。

表 5 绳索断股故障注入物理参数变化对比
Table 5 Comparison of physical parameter changes during a broken-strand fault injection

故障注入方式	俯仰角变化/(°)	横滚角变化/(°)	升降台高度/m	电机电流均方根	涉及部件	影响参数
多物理场因果驱动型	1.86	2.79	30.09	52.97	绳索张紧度、拉力、升降台、驱动电机	绳索张紧度、拉力、升降台姿态角与高度
测量偏置型	0	0	30.03	53.60	升降台	升降台高度
正常状态	0	0	30.08	53.56	—	—

由表 5 和 6 实验结果可知,在绳索断股故障中,多物理场因果驱动型故障注入方式通过改变绳索张紧度,能够在绳索、升降台和驱动电机多部件涉及的物理参数间传播;信号端偏置仅通过改变平台高度传感器参数模拟绳索断股,对其他部件的物理参数无影响。在驱动电机

退磁故障中,多物理场因果驱动型故障注入方式通过改变磁链系数,按照驱动电机、绳索、升降平台的顺序在多部件参数间传播;信号端偏置仅通过改变电机电流传感器参数模拟退磁现象,同样对其他参数部件不产生影响。

表 6 驱动电机退磁故障注入物理参数变化对比

故障注入方式	电机相电流 均方根/A	绳索线速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	升降台 高度/m	升降台到达 终点时间/s	涉及部件	影响参数
多物理场因果驱动型	63.75	0.52	30.07	101.54	驱动电机、绳索、 升降台	电机磁链电机电流电机转 速绳索线速度、升降台高度
测量偏置型	37.95	0.46	30.03	109.50	电机	电机电流
正常状态	53.56	0.63	30.08	92.45	—	—

对比表 5 和 6 可知,多物理场因果驱动型故障注入能够通过改变关键物理参数,使故障沿真实物理链路在多部件间传播并呈现多变量协同特征,保证故障样本具备更强的物理因果一致性与系统级可解释性;相较之下,测量偏置型注入虽然实现简单,但其注入点位于传感器末端、缺少对内部机理的反映,生成的故障样本仅为单变量偏置,难以有效刻画以船用升降机为代表的复杂系统中故障传播。

3.3 内外负载对故障注入影响对比

为定量分析自身载荷(内载荷)与外界载荷(外载荷)对故障注入的影响,本实验选取排线筒摩擦系数和升降机承载物总重量分别作为内载荷与外载荷的表征物理参数,通过负载逐级递增,探究故障注入后,不同负载程度对关键物理参数变化的影响。实验设定船用升降机的工况及故障注入模式与 3.1 节相同,选取 0.6~1.6 倍负载下的故障注入场景,并加入 1 倍负载下正常状态作为关键物理参数变化对比。其中, k_f^0 表示初始排线筒摩擦系数, m_0 表示初始升降机承载物总重量。在不同负载类型、系数和故障模式下,实验得到的关键物理参数变化如表 7~10 所示。

表 7 排线筒摩擦系数(内负载)与绳索断股故障影响对比
Table 7 Comparison of the effects of friction coefficient (inner load) and a broken-strand fault in the winding drum

负载倍数	绳索 张紧度/%	俯仰角/ ($^{\circ}$)	横滚角/ ($^{\circ}$)	电机电流 均方根/A	运行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
正常状态	2.20	0	0	53.56	0.62
0.6 k_f^0	1.32	1.86	2.79	51.62	0.64
0.8 k_f^0	1.32	1.86	2.79	52.14	0.63
1.0 k_f^0	1.32	1.86	2.79	52.97	0.62
1.2 k_f^0	1.32	1.86	2.79	53.80	0.62
1.4 k_f^0	1.32	1.86	2.79	54.71	0.60
1.6 k_f^0	1.32	1.86	2.79	55.98	0.59

该差异说明,相比信号端偏置,物理参数注入在刻画“部件内参数变化按照功能-物理因果链路影响传感器参数”方面更为突出,而信号偏置本质上是对输出读数的直接修改,无法描述各部件之间物理参数变化的约束关系。

表 8 升降机承载物总重量(外负载)与绳索断股故障影响对比

负载倍数	绳索 张紧度/%	俯仰角/ ($^{\circ}$)	横滚角/ ($^{\circ}$)	电机电流 均方根/A	运行速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
正常状态	2.20	0.00	0.00	53.57	0.62
0.6 m_0	0.79	0.67	1.00	34.00	0.81
0.8 m_0	1.06	1.19	1.79	41.55	0.75
1.0 m_0	1.32	1.86	2.79	52.97	0.63
1.2 m_0	1.59	2.68	4.01	61.13	0.48
1.4 m_0	1.85	3.64	5.45	71.18	0.38
1.6 m_0	2.12	4.75	7.11	83.68	0.17

由表 7 和 8 可以看出,在绳索断股故障模式下,内负载的增加导致驱动电机负载升高,运行速度降低;但由于排线筒摩擦系数的改变并没有直接作用在升降平台,因此升降平台的俯仰角和横滚角并无明显变化;当升降机承载物总重量增加时,电机负载增加,导致驱动电机电流升高,运行速度下降,并且由于外负载直接作用在平台上,因此平台的俯仰角和横滚角会随着外负载的增加而加重倾斜。这说明内负载作为船用升降机的内部影响因素,受各部件和物理场的传播关系约束,影响范围有限,而外负载作为外部扰动,对船用升降机整体产生影响,可在多个部件和物理场中体现。

从表 9 和 10 可以看出,在驱动电机退磁故障注入时,排线筒摩擦系数增加同样会导致驱动电机电流升高和转速下降,但在确定上升高度目标下,摩擦系数的改变不会影响到船用升降机的稳态高度;当升降机承载物总重量增加时,负载增加会导致驱动电机电流升高,运行速度下降,并且会导致稳态高度轻微下降。这说明内负载变化主要影响船用升降机的动态过程,而外负载的变化会同时影响到船用升降机的动态和稳态过程。

表 9 排线筒摩擦系数 (内负载) 与
驱动电机退磁故障影响对比

Table 9 Comparison of the effects of friction coefficient
(inner load) and a motor demagnetization fault
in the winding drum

负载倍数	磁链系数/ Wb	电机电流 均方根/A	电机转速/ (rad·s ⁻¹)	最终高度/m
正常状态	0.12	53.57	24.99	30.08
0.6 k_f^0	0.09	63.34	18.39	30.08
0.8 k_f^0	0.09	63.59	17.75	30.08
1.0 k_f^0	0.09	63.75	17.06	30.07
1.2 k_f^0	0.09	63.98	16.48	30.06
1.4 k_f^0	0.09	64.21	15.83	30.06
1.6 k_f^0	0.09	64.41	15.18	30.07

表 10 升降机承载物总重量 (外负载) 与
驱动电机退磁故障影响对比

Table 10 Comparison of the effects of the total weight
of the load (external load) and a motor
demagnetization fault in the elevator

负载倍数	磁链系数/ Wb	电机电流 均方根/A	电机转速/ (rad·s ⁻¹)	最终高度/m
正常状态	0.12	53.57	24.99	30.08
0.6 m_0	0.09	46.94	29.39	30.13
0.8 m_0	0.09	57.69	24.48	30.11
1.0 m_0	0.09	63.75	17.06	30.07
1.2 m_0	0.09	83.54	14.39	30.02
1.4 m_0	0.09	100.15	8.05	29.99
1.6 m_0	0.09	125.45	5.58	29.98

3.4 故障诊断有效性验证

为证明本文提出的船用升降机故障注入方法生成的故障数据,能够支撑故障诊断算法验证的有效性和一致性,实验选取随机森林(random forest, RF)、支持向量机(support vector machine, SVM)、多层感知机(multi layer perceptron, MLP)作为故障诊断模型,分别对测量偏置型和多物理场因果驱动型注入方式生成的故障样本进

行判定,分别计算准确性、召回率和 F1 分数。
实验选取绳索断股与电机退磁故障模式作为数据集中故障数据来源,分别在 1 号电机、2 号电机以及 4 根绳索上执行故障注入以生成故障样本,并与正常数据结合,按照 3 : 2 的比例划分训练集与测试集。测试集在 3 个故障诊断模型上的最终结果如表 11~13 所示。

表 11 随机森林模型故障诊断测试结果

Table 11 Fault detection results of the Random Forest

注入方式	精确率	召回率	F1 分数
多物理场因果驱动型	0.97	0.96	0.97
测量偏置型	0.43	0.34	0.36

表 12 SVM 模型故障诊断测试结果

Table 12 Fault detection results of the SVM

注入方式	精确率	召回率	F1 分数
多物理场因果驱动型	0.97	0.96	0.96
测量偏置型	0.37	0.36	0.36

表 13 MLP 模型故障诊断测试结果

Table 13 Fault detection results of the MLP

注入方式	精确率	召回率	F1 分数
多物理场因果驱动型	0.97	0.96	0.96
测量偏置型	0.37	0.32	0.34

两种故障注入方式生成的数据集在 3 种故障诊断模型上的分类混淆矩阵如图 7 和 8 所示。从实验结果可以看出,采用多物理场因果驱动型故障注入方式得到的故障样本,能够在故障发生时影响不同的参数,区分性更强,也间接说明多参数变化更能反映故障模式与船用升降机内关键物理量、传感器物理量间的因果关系,更适合作为判定故障诊断算法准确率的依据。而不同的故障诊断算法对于相同故障样本,准确率都在 95%以上,说明生成的故障样本在不同类型算法中具备一致性,能够作为故障诊断有效性前期验证的基准。

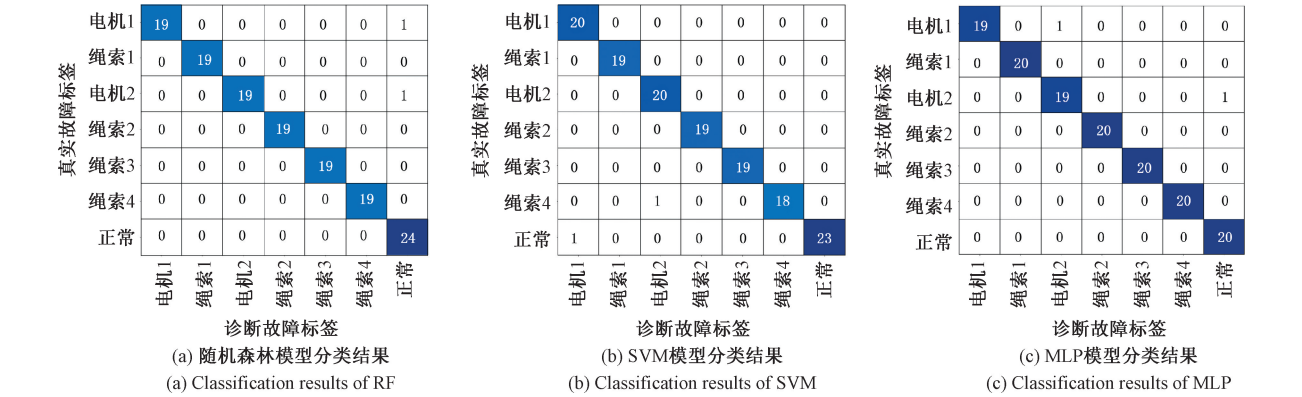


图 7 基于多物理场因果驱动型故障数据的故障诊断混淆矩阵

Fig. 7 Confusion matrix of fault diagnosis based on multi-physics causality-driven fault data

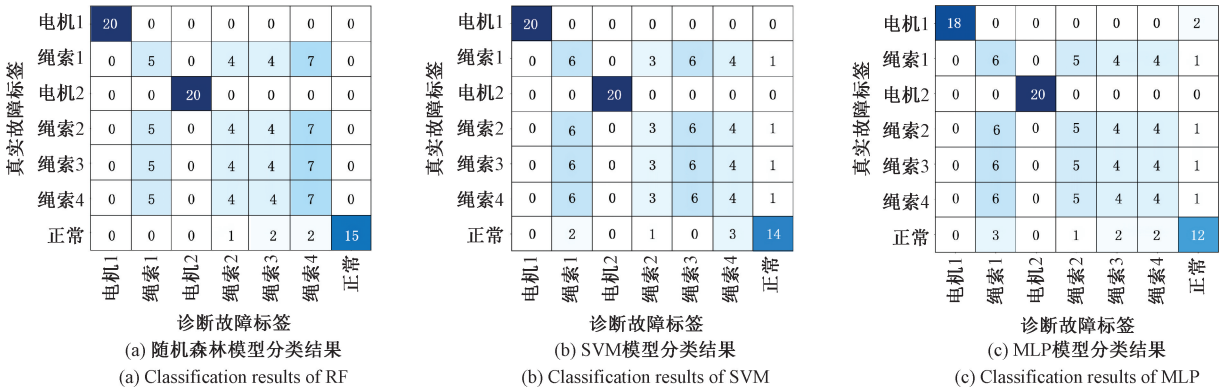


图 8 基于测量偏置型故障数据的故障诊断混淆矩阵

Fig. 8 Confusion matrix of fault diagnosis based on measurement bias fault data

4 结论与展望

针对船用升降机故障样本稀缺,难以支撑故障诊断算法验证的瓶颈,本文基于船用升降机功能关系、多物理场耦合因果关联,提出一种基于物理参数驱动的故障注入方法,用于故障样本生成。本方法首先提出船用升降机多物理场耦合的运行机理模型,作为故障注入的基础,再基于故障模式分析,通过动态修改部件级关键物理参数,实现升降机从部件级性能变化到系统级功能失效的演变。本文选取绳索断股和驱动电机磁退故障作为突变故障与渐变故障典型案例,验证提出方法的机理一致性,分析性能的优越性,以及内外负载对故障注入效果的影响。最后,基于生成的故障样本,选用随机森林、支持向量机和多层感知机作为故障诊断模型,均获得 95% 以上诊断准确率,证明作为故障诊断算法效果验证的有效性和一致性。本文提出的方法能够生成具备物理因果性的故障样本,为船用升降机故障诊断算法的效果早期验证提供故障数据支撑。

本文提出方法在未来仍需在下 4 个方向进行深化与拓展。

- 1) 受限于实机故障复现风险高、成本昂贵,本文尚未引入真实故障数据进行对比验证。未来将结合实际工程监测数据,通过参数辨识与模型校正进一步提升故障样本生成的真实性与泛化能力。
- 2) 开展故障模式库的深度扩充与精细化建模,现有研究主要聚焦于单故障的发生和在多部件、多物理场的传播现象,缺乏对多部件复合故障的考虑,需要更贴近复杂服役环境下的真实故障特征。
- 3) 融入环境因素的耦合建模,本文构建的模型尚未充分考虑舰船海上服役的海洋环境特性,后续将引入盐雾腐蚀、船体摇摆、船体振动冲击等环境因素,建立环境因素与部件参数退化的关联关系,让数字模型更贴合船

用升降机的实际服役工况。

4) 本文构建的机理模型,可以支撑船用升降机数字孪生模型的构建,通过机理建模与数据驱动的融合,引入船用升降机实际工程监测的多源异构数据,采用数据驱动方法对机理模型的参数进行辨识、修正与优化,提升模型对实际装备的适配性和泛化能力。

参考文献

[1] 丁景贤, 左建勇, 任利惠. 基于等效故障注入试验的列车风源系统故障影响规律与分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 44-52.

DING J X, ZUO J Y, REN L SH. Fault influence law and analysis of train air supply systems based on equivalent fault injection test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 44-52.

[2] 朱洪基, 李丹, 崔志恒, 等. 涡轴发动机控制系统故障注入试验方法研究[J]. 中国机械, 2025 (14): 12-15.

ZHU H J, LI D, CUI ZH H, et al. Research on fault injection testing methods for turboshaft engine control systems [J]. Machine China, 2025(14): 12-15.

[3] 李隆鹏. 基于 LabVIEW 的起落架收放控制故障注入系统设计[J/OL]. 计算机测量与控制, 1-8 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4762.tp.20251121.1150.016>.

LI L P. Development of landing gear retracting and extending control fault injection system based on LabVIEW [J/OL]. Computer Measurement & Control, 1-8 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4762.tp.20251121.1150.016>.

[4] 陈洁, 孟扬, 刘宏明. 面向民机飞控系统适航的空中故障注入系统[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-14 [2026-05-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0705>.

CHEN J, MENG Y, LIU H M. Airborne fault injection

- system for airworthiness compliance of civil aircraft flight control systems [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-14 [2026-05-07]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0705>.
- [5] 华国环, 蒋子昀. 基于 Xilinx 7 系列 FPGA 的寄存器传输级故障注入模拟技术[J]. 电子器件, 2025, 48(3): 495-500.
- HUA G H, JIANG Z Y. Register transfer level fault injection simulation technology based on Xilinx 7 series FPGA[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2025, 48(3): 495-500.
- [6] 王瑶, 温铁钝, 陈亚平, 等. 基于边界扫描的航空发动机电子控制器故障注入与检测方法研究[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2025, 25(4): 10-19.
- WANG Y, WEN T D, CHEN Y P, et al. Research on fault injection and detection methods for aero-engine electronic controllers based on boundary scan [J]. Integrated Circuits and Embedded Systems, 2025, 25(4): 10-19.
- [7] 唐鸿辉. 针对 DRAM 的电磁脉冲故障注入攻击及分析技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- TANG H H. Electromagnetic pulse fault injection attack and analysis method for DRAM [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [8] 方加娟, 李婉晴. 基于软件故障注入的系统运行鲁棒性测试方法[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(8): 121-123.
- FANG J J, LI W Q. System operation robustness testing method based on software fault injection [J]. Industrial Control Computer, 2025, 38(8): 121-123.
- [9] 张威, 刘剑超, 王翔, 等. 某飞行控制仿真系统中故障注入模块的实现[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(5): 170-175.
- ZHANG W, LIU J CH, WANG X, et al. Implementation of fault injection module in a flight command simulation system [J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(5): 170-175.
- [10] DONG Y, SUO M, LU C, et al. Research on standardized fault injection technology for multiple failure mode of electronic control systems[C]. 7th International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE). IEEE, 2025: 375-380.
- [11] MEYWERK T, HERDT V, DRECHSLER R. Symbolic fault injection for plan-based robotics [C]. 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2022: 1710-1715.
- [12] 赵玲, 秦佳继, 李攀, 等. 基于故障注入的列车齿轮箱振动特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2026, 46(2): 1-7.
- ZHAO L, QIN J J, LI P, et al. Analysis of train gearbox vibration characteristics based on fault injection [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2026, 46(2): 1-7.
- [13] 沈永浩, 李和林, 郑书峰, 等. 抽水蓄能电站启闭机液压系统故障仿真分析[J]. 机床与液压, 2025, 53(12): 188-193.
- SHEN Y H, LI H L, ZHENG SH F, et al. Simulation analysis of hydraulic system failure of tailgate hoist in pumped storage power station [J]. Machine Tool & Hydraulic, 2025, 53(12): 188-193.
- [14] 刘素艳, 董一林, 乔一鸣, 等. 基于改进蜣螂优化算法的轴承数字孪生模型的动态故障注入研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(11): 1-12.
- LIU S Y, DONG Y L, QIAO Y M, et al. Research on dynamic fault injection of bearing digital twin model based on improved dung beetle optimization algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(11): 1-12.
- [15] XU Z, ZHANG J, CHENG M. Investigation of signal injection methods for fault detection of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 2207-2216.
- [16] 丁宇, 宁国澳, 靳凯新, 等. 基于层级数字孪生的机电系统故障数据生成[J/OL]. 航空学报, 1-28 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251125.1924.006>.
- DING Y, NING G A, JIN K X, et al. Fault data generation for electromechanical systems based on hierarchical digital twin [J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1-28 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251125.1924.006>.
- [17] 李刚强, 杨斌, 刘霞勇, 等. 喷水推进装置液压系统故障建模及仿真分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(4): 76-82.
- LI G Q, YANG B, LIU X Y, et al. Fault modeling and simulation analysis of hydraulic system in water jet's propulsion unit [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2025, 39(4): 76-82.
- [18] 崔铁军, 李莎莎. 系统故障因果关系分析的智能驱动方式研究[J]. 智能系统学报, 2021, 16(1): 92-97.
- CUI T J, LI SH SH. Intelligent analysis of system fault data and fault causal relationship [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2021, 16(1): 92-97.
- [19] 张晓瑜, 吕亚蕊, 郭润夏, 等. 基于因果图的飞控系统故障传播路径识别方法[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-10 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.tn.20260226.1645.059>.

ZHANG X Y, LYU Y X, GUO R X, et al. A Fault propagation path identification method for flight control systems based on causal diagrams [J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-10 [2026-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2488.tn.20260226.1645.059>.

- [20] 吕佳朋, 史贤俊, 秦亮, 等. 基于因果关系的故障传播路径辨识方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(12): 4090-4100.

LYU J P, SHI X J, QIN L, et al. Research on fault propagation path identification method based on causality[J]. System Engineering and Electronics, 2023, 45(12): 4090-4100.

- [21] 李浩宇, 徐平, 铁瑛, 等. 基于机液联合仿真模型的闸门启闭机故障注入及诊断研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(13): 198-209.

LI H Y, XU P, TIE Y, et al. Fault injection and diagnosis of gate hoist based on mechanical-hydraulic joint simulation model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13): 198-209.

作者简介



赵建忠, 2002 年于山东理工大学获得学士学位, 2009 年于海军航空工程学院获得硕士学位, 2013 年于海军航空工程学院获得博士学位, 现为海军航空大学副教授, 主要研究方向为武器系统工程、装备保障工程。

E-mail: zjznavy@163.com

Zhao Jianzhong received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2002, M. Sc. degree from Naval Aeronautical Engineering Institute in 2009 and Ph. D. degree from Naval Aeronautical Engineering Institute in 2013, respectively. Now he is an associate professor at Naval Aviation University. His main research interests include weapon systems engineering and equipment support engineering.



韩丹阳 (通信作者), 2017 年于中国海洋大学获得学士学位, 2023 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为杭州北京航空航天大学国际创新研究院博士后, 主要研究方向为故障预测与健康管理。

E-mail: hdy_daniel@buaa.edu.cn

Han Danyang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Ocean university of China in 2017 and Ph. D. degree from Beihang University in 2023, respectively. Now he is the Postdoc in Hangzhou International innovation institute of Beihang University. His main research interests include prognostic and health management.



于劲松, 1989 年于南京航空航天大学获得学士学位, 1996 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 2004 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授, 主要研究方向为自动化测试和故障预测与健康管理技术。

E-mail: yujs@buaa.edu.cn

Yu Jinsong received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1989, M. Sc. degree from Beihang University in 1996 and Ph. D. degree from Beihang University in 2004, respectively. Now he is a professor in the School of Automation Science and Electrical Engineering at Beihang University. His main research interests include automated testing and prognostics and health management (PHM) technologies.



顾钧元, 2005 年于空军航空大学获得学士学位, 2008 年于海军航空工程学院获得硕士学位, 2012 年于海军航空工程学院获得博士学位, 现为海军航空大学讲师, 主要研究方向为装备保障。

E-mail: gjy-at@163.com

Gu Junyuan received his B. Sc. degree from Air Force Aviation University in 2005, M. Sc. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2008 and Ph. D. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2012, respectively. Now he is a lecturer at Naval Aviation University. His main research interests include equipment support.



许宜贺, 2004 年于军事交通学院获得学士学位, 2007 年于军事交通学院获得硕士学位, 现为海军航空大学讲师, 主要研究方向为特种机械机电控制。

E-mail: 1301128318@qq.com

Xu Yihe received his B. Sc. degree from the Military Transportation University in 2004 and M. Sc. degree from the Military Transportation University in 2007, respectively. Now he is a lecturer at Naval Aviation University. His main research interests include mechatronic control of special-purpose machinery.



张峥, 2020 年于西北农林科技大学获得学士学位, 2023 年于山东大学获得硕士学位, 现为海军航空大学助教, 主要研究方向为航空导弹保障。

E-mail: 1505852322@qq.com

Zhang Zheng received his B. Sc. degree from Northwest A&F University in 2020 and M. Sc. degree from Shandong University in 2023, respectively. Now he is a teaching assistant at Naval Aviation University. His main research interest includes aviation ammunition support.