

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413073

# 非完美维修下线控转向系统间歇故障预测\*

郁明,程区奇,程瑞

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘要:**线控转向系统是自动驾驶技术的关键部分,其可靠性直接影响驾驶安全。间歇故障的随机性以及非完美维修的复杂性,使故障预测方法设计面临巨大挑战。因此,如何在非完美维修下解决线控转向系统的间歇故障预测问题,对驾驶安全性具有重要意义。本文创新性地提出基于变尺寸窗口与工况依赖复合退化模型的非完美维修下线控转向系统间歇故障预测方法。通过变尺寸窗口的概念提取间歇故障的两个特征,构建考虑非完美维修效应的工况依赖复合退化模型以预测间歇故障元件的剩余使用寿命。实验结果表明,所提方法在2种工况下的剩余使用寿命预测的相对精度分别达到95.48%和96.14%,明显优于对比实验采用的现有文献中的方法。

**关键词:**线控转向系统;间歇故障;非完美维修;变尺寸窗口;工况依赖的复合退化模型

**中图分类号:** TH165+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Intermittent fault prognosis for steer-by-wire system in the presence of imperfect maintenance

Yu Ming, Cheng Quqi, Cheng Rui

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The steer-by-wire system is a key part of the development of autonomous driving technology, and its reliability directly affects driving safety. The randomness of intermittent faults and the complexity of imperfect maintenance pose significant challenges to the design of fault prediction methods. Therefore, how to solve the intermittent fault prognosis problem of the steer-by-wire under imperfect maintenance is of great significance for driving safety. This article innovatively proposes an intermittent fault prediction method for the steer-by-wire system in the presence of imperfect maintenance based on the variable-size window and the operation condition-dependent compound degradation models. Extracting two features of intermittent fault through the concept of variable size window, the operation condition-dependent compound degradation models incorporating the effect of imperfect maintenance are formulated to predict the remaining useful life of the intermittently faulty component. The experimental results show that the developed method can achieve the relative accuracies of remaining useful life prediction with 95.48% and 96.14% under two operation conditions, which is obviously superior to the methods used in the existing literatures for comparative experiments.

**Keywords:** steer-by-wire system; intermittent fault; imperfect maintenance; variable-size window; operation condition dependent compound degradation models

## 0 引 言

线控技术作为智能汽车的关键技术之一,由于在控制集成和通信方面具有较高的灵活性,引起了工业界和学术界的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。线控转向系统作为线控技术的

重要组成部分,在自动驾驶汽车领域有着广泛的应用前景。不同于传统的车辆转向系统,线控转向系统取消了方向盘与前轮之间的机械转向柱,以电子软连接进行代替,通过电信号传递驾驶员的转向意图。因此,线控转向系统的独特结构为驾驶员带来了更好的驾驶体验。然而,由于系统中包含诸多的电子元件,线控转向系统的故

收稿日期:2024-07-19 Received Date: 2024-07-19

\* 基金项目:国家自然科学基金(62173119)项目资助

障发生率也随之提高。因此,为了提高驾驶安全性能,需要及时诊断车辆行驶过程中发生的故障,并对故障元件的剩余使用寿命进行预测。

一般来说,故障可分为两种类型:永久故障和间歇故障。永久故障在发生后会一直保持着故障状态。文献[3]针对搭载了线控转向系统的车辆的前轮角度传感器故障诊断和容错问题,提出了一种基于解析冗余与扩展卡尔曼滤波的方法。文献[4]设计了一种基于线性矩阵不等式的故障检测观测器用于解决线控转向系统中的故障估计问题。文献[5]提出了一种基于广义基尼指数和脉冲神经网络的电弧故障检测方法。文献[6]提出了一种基于自适应滑模观测器的故障诊断方法,用于检测新能源汽车永磁同步电机驱动系统中电流传感器的微小故障。与永久故障不同,间歇故障可以在相同的元件中重复出现,并且能够在无外界干预的情况下自动消失。文献[7]提出了一种基于动态贝叶斯网络的间歇故障诊断方法,以解决存在瞬态故障和间歇故障的电子系统的故障诊断问题。文献[8]提出了一种基于联邦多表示域适应的不同工况下滚动轴承故障诊断方法。文献[9]提出一种基于并行卷积核和通道注意力机制的滚动轴承故障诊断方法。文献[10]针对焊点中的间歇故障设计了一种基于动态分析的故障诊断方法。然而,针对线控转向系统间歇故障诊断方法的研究工作鲜有报道。

近些年来,剩余使用寿命预测在系统状态监测领域发挥着重要的作用,得到了众多研究人员的关注。文献[11]提出了一种基于改进隐半马尔可夫模型的剩余使用寿命预测方法。该方法设计了一种改进的隐半马尔可夫模型用于描述持续时间依赖的退化过程。文献[12]针对单一源域信息有限、域自适应粒度不足导致滚动轴承剩余使用寿命预测精度低的问题,提出了一种多源域子域自适应的轴承剩余使用寿命预测方法。文献[13]提出一种基于多传感器融合的多头注意力和残差长短时记忆网络的电机轴承剩余使用寿命预测方法。然而,该方法不能处理间歇故障的随机性,因此,不能解决线控转向系统的间歇故障预测问题。文献[14]研究了一种基于间歇故障特征和隐半马尔可夫模型的剩余使用寿命预测方法。目前,针对汽车线控转向系统间歇故障预测的研究十分有限。文献[15]针对线控转向系统提出了一种基于复合退化模型的间歇故障预测方法。该方法采用固定长度的观测窗口提取间歇故障的特征(故障频率和故障持续时间)。然而,固定长度的观测窗口无法描述间歇故障的随机性。此外,该方法没有考虑到预防性维修对间歇故障特征退化的影响<sup>[16]</sup>。

预防性维修是一种在系统失效之前开展的维修方式。根据维修后系统的恢复程度,预防性维修可分为3类:完美维修、最小维修和非完美维修。完美维修假设

经维修后的系统完好如新;最小维修假设经维修后系统依然如旧;非完美维修假设经维修后系统退化状态介于完美维修和最小维修之间<sup>[17]</sup>。目前关于非完美维修建模方法的研究工作已经发展的比较成熟,但很少有研究考虑非完美维修对剩余使用寿命预测的影响<sup>[18-20]</sup>。文献[21]针对退化系统提出了一种基于状态的主动维修方法,该方法同时考虑了完美维修和非完美维修对系统退化的影响。文献[22]研究了基于维纳过程的退化模型用于解决非完美维修下的剩余使用寿命预测问题,该模型使用独立同分布的随机变量来量化每次非完美维修对系统退化的影响。然而,该方法主要针对永久故障,不能用于预测非完美维修下间歇故障元件的剩余使用寿命。因此,非完美维修下间歇故障元件的剩余使用寿命预测是一个亟待解决的问题。

线控转向系统由于老化和长期使用,可能会出现间歇故障。如果系统中出现的间歇故障没有被及时检测,或者未对故障元件采取有效的纠正措施,最终可能造成无法挽回的损失。此外,由于线控转向系统对车辆主动安全性能有着重要影响,因此需要采取周期性或非周期性的非完美维修措施,以提高间歇故障下线控转向系统的可靠性。本文提出了一种非完美维修下线控转向系统的间歇故障预测方法。首先,建立线控转向系统的非线性键合图模型,并设计基于键合图模型的故障检测和隔离方法。其次,提出变尺寸窗口的概念,并基于变尺寸窗口提取2个可以表征间歇故障退化过程的间歇故障特征。接着,基于所提取的间歇故障特征,建立考虑非完美维修的工况依赖的复合退化模型。此外,为了综合考虑所提取的两个间歇故障特征对元件退化的影响并对间歇故障元件的剩余使用寿命进行预测,提出了一个统一的健康指标(unified health indicator, UHI)。最后,通过实验验证了所提方法的有效性。

## 1 线控转向系统故障诊断方法

线控转向系统如图1所示,包括2个子系统:方向盘子系统和前轮子系统。方向盘子系统由方向盘、方向盘角度传感器、反馈电机、反馈电机角度传感器和减速器组成。前轮子系统包括转向电机、转向电机角度传感器、减速器、齿轮齿条机构、齿轮角度传感器、前轮和前轮角度传感器。此外,线控转向系统还包含两个用于控制反馈电机与转向电机的控制器。本文采用基于键合图模型的故障诊断方法,完整的建模过程是间歇故障检测、隔离和辨识的基础。图2给出了线控转向系统的非线性键合图模型,具体建模过程如下。

1) 方向盘。方向盘使用势源  $Se: T_{hw}$ 、阻性元件  $R: R_w$ 、惯性元件  $I: J_w$  和容性元件  $C: 1/C_h$  进行建模,





前轮拖距;  $\beta$  表示车辆的质心侧偏角;  $\gamma$  表示横摆角速度;  $l_f$  为前轮到重心的距离;  $V$  表示车辆行驶速度;  $\theta_f$  为前轮转角。

方向盘系统中的 2 个传感器由流传感器  $Df_1: \dot{\theta}_w$  和  $Df_2: \dot{\theta}_{mr}$  进行建模, 其中,  $Df_1$  用于测量方向盘的角速度,  $Df_2$  用于测量反馈电机的角速度。前轮子系统中的 3 个传感器使用流传感器  $Df_3: \dot{\theta}_s$ 、 $Df_4: \dot{\theta}_r$  和  $Df_5: \dot{\theta}_f$  进行建模, 分别用于测量转向电机的角速度、齿条的线速度和前轮转角的角速度。齿条的线速度  $\dot{\theta}_r$  不能直接测量, 需要借助齿轮角速度  $\dot{\theta}_p$  的测量值进行计算, 计算公式为:

$$\dot{\theta}_r = r_p \dot{\theta}_p \quad (2)$$

线控转向系统中的非线性摩擦的本构关系为:

$$e_h = B_v f_h + T_{v,c} \text{sign}(f_h) + (T_{v,s} - T_{v,c}) e^{-\alpha_v |f_h|} \text{sign}(f_h) \quad (3)$$

其中,  $B_v$ 、 $T_{v,c}$  和  $T_{v,s}$  分别表示粘性摩擦系数、库伦摩擦转矩和静摩擦转矩,  $v \in \{w, mr1, s2, p, f\}$ 。  $e_h$  和  $f_h$  分别表示相应功率键的势变量和流变量,  $h \in \{2, 9, 22, 29, 36\}$ ,  $\alpha_v$  为描述  $T_{v,c}$  和  $T_{v,s}$  之间转换关系的常数。

$F_{PID_1}(E_1)$  为反馈电机驱动器的比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 控制器,  $E_1 = T_{rf} - T_{af}$  表示施加在方向盘上的参考反馈力矩  $T_{rf}$  与实际测量的反馈力矩  $T_{af}$  之间的差值。

$$T_{rf} = T_e \frac{S_c}{G_{hf}}, T_{af} = C_h (\theta_w + \theta_{mr} / G_f) \quad (4)$$

其中,  $S_c$  为车辆的速度系数,  $G_{hf}$  为方向盘到前轮的扭矩传动比<sup>[24]</sup>。  $F_{PID_2}(E_2)$  为转向电机驱动器的 PID 控制器,  $E_2 = \theta_w / G_a - \theta_f$  表示期望的前轮转角与实际的前轮转角之间的差值, 其中  $G_a$  表示实际的方向盘转角与期望的前轮转角之间的比例。

根据线控转向系统的键合图模型, 可推导出如下 5 个独立的解析冗余关系 (analytical redundancy relations, ARR<sub>s</sub>):

$$\begin{aligned} ARR_1: & T_{hw} - J_w \frac{d^2(\theta_w)}{dt^2(\beta_{\theta_w})} - C_h \left( \frac{\theta_w}{\beta_{\theta_w}} + \frac{\theta_{mr}}{\beta_{\theta_{mr}} G_f} \right) - \\ & (T_{w,s} - T_{w,c}) e^{-\alpha_w \left| \frac{d(\theta_w)}{dt(\beta_{\theta_w})} \right|} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_w)}{dt(\beta_{\theta_w})} \right) - \\ & B_w \frac{d(\theta_w)}{dt(\beta_{\theta_w})} - T_{w,c} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_w)}{dt(\beta_{\theta_w})} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} ARR_2: & U_1 K_1 k_{mr} - \frac{C_h}{G_f} \left( \frac{\theta_w}{\beta_{\theta_w}} + \frac{\theta_w}{\beta_{\theta_w} G_f} \right) - \\ & J_{mr} \frac{d^2(\theta_{mr})}{dt^2(\beta_{\theta_{mr}})} - B_{mr1} \frac{d(\theta_{mr})}{dt(\beta_{\theta_{mr}})} - \\ & (T_{mr1,s} - T_{mr1,c}) e^{-\alpha_{mr1} \left| \frac{d(\theta_{mr})}{dt(\beta_{\theta_{mr}})} \right|} \end{aligned}$$

$$\text{sign} \left( \frac{d(\theta_{mr})}{dt(\beta_{\theta_{mr}})} \right) - T_{mr1,c} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_{mr})}{dt(\beta_{\theta_{mr}})} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} ARR_3: & U_2 K_2 k_s - J_s \frac{d^2(\theta_s)}{dt^2(\beta_{\theta_s})} - C_s \left( \frac{\theta_s}{\beta_{\theta_s}} - \frac{\theta_r G_{r1}}{\beta_{\theta_r} r_p} \right) - \\ & (T_{s2,s} - T_{s2,c}) e^{-\alpha_{s2} \left| \frac{d(\theta_s)}{dt(\beta_{\theta_s})} \right|} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_s)}{dt(\beta_{\theta_s})} \right) - \\ & B_{s2} \frac{d(\theta_s)}{dt(\beta_{\theta_s})} - T_{s2,c} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_s)}{dt(\beta_{\theta_s})} \right) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} ARR_4: & \frac{C_s G_{r1}}{r_p} \left( \frac{\theta_s}{\beta_{\theta_s}} - \frac{\theta_r G_{r1}}{\beta_{\theta_r} r_p} \right) - M_r \frac{d^2(\theta_r)}{dt^2(\beta_{\theta_r})} - \\ & \frac{C_r}{G_{r2}} \left( \frac{\theta_r}{\beta_{\theta_r} G_{r2}} - \frac{\theta_r}{\beta_{\theta_r}} \right) - B_p \frac{d(\theta_r)}{dt(\beta_{\theta_r})} - \\ & (T_{p,s} - T_{p,c}) e^{-\alpha_p \left| \frac{d(\theta_r)}{dt(\beta_{\theta_r})} \right|} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_r)}{dt(\beta_{\theta_r})} \right) - \\ & T_{p,c} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_r)}{dt(\beta_{\theta_r})} \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} ARR_5: & C_r \left( \frac{\theta_r}{\beta_{\theta_r} G_{r2}} - \frac{\theta_f}{\beta_{\theta_f}} \right) + T_c - J_f \frac{d^2(\theta_f)}{dt^2(\beta_{\theta_f})} - \\ & (T_{f,s} - T_{f,c}) e^{-\alpha_f \left| \frac{d(\theta_f)}{dt(\beta_{\theta_f})} \right|} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_f)}{dt(\beta_{\theta_f})} \right) - \\ & B_f \frac{d(\theta_f)}{dt(\beta_{\theta_f})} - T_{f,c} \text{sign} \left( \frac{d(\theta_f)}{dt(\beta_{\theta_f})} \right) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\beta_{\theta_w}$ 、 $\beta_{\theta_{mr}}$ 、 $\beta_{\theta_s}$ 、 $\beta_{\theta_r}$  和  $\beta_{\theta_f}$  分别表示传感器  $\dot{\theta}_w$ 、 $\dot{\theta}_{mr}$ 、 $\dot{\theta}_s$ 、 $\dot{\theta}_r$  和  $\dot{\theta}_f$  的有效因子。

在故障检测模块, 当 ARR<sub>s</sub> 的数值超出故障阈值时, 可以检测到故障的发生。故障检测的结果用一个二进制相干向量  $\mathbf{CV} = [cv_1, cv_2, \dots, cv_5]$  表示。在  $\mathbf{CV}$  中, 当第  $i$  个残差超出相应的阈值时, 则称  $ARR_i$  是不一致的, 此时,  $cv_i = 1$ , 反之  $cv_i = 0$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, 5\}$ 。当系统无故障时,  $\mathbf{CV}$  为一个零向量, 反之  $\mathbf{CV}$  为非零向量。当系统检测到非零  $\mathbf{CV}$ , 可以将它与表 1 所示的故障特征矩阵进行比较, 以获得可能故障集。故障特征矩阵表示故障和 ARR 之间的对应关系, 在表 1 中, 第 1 行表示  $ARR_1, ARR_2, \dots, ARR_5$ 、故障可检测性 ( $D_b$ ) 和故障可隔离性 ( $I_b$ )。表中每个单元格的输入值是一个布尔值, 每一行在  $ARR_1, ARR_2, \dots, ARR_5$  下的布尔值组成该行所对应参数的故障特征, 在每个 ARR 的列下, 数值 1 表示该 ARR 对该行的参数故障是敏感的, 数值 0 表示该 ARR 对该行的参数故障是不敏感的。如果一个参数的故障特征里面至少有一个数值 1, 则该参数是故障可检测的, 由  $D_b = 1$  表示。  $D_b = 0$  表示该参数的故障是不可检测的。当一个参数的故障特征唯一时, 该参数是故障可隔离的, 用  $I_b = 1$  表示, 否则  $I_b = 0$ 。

在利用故障特征矩阵隔离出可能故障集之后, 需要

表1 线控转向系统的故障特征矩阵

Table 1 Fault signature matrix of the steer-by-wire system

	$ARR_1$	$ARR_2$	$ARR_3$	$ARR_4$	$ARR_5$	$D_b$	$I_b$
$\beta_{\theta_w}$	1	1	0	0	0	1	0
$\beta_{\theta_{mr}}$	1	1	0	0	0	1	0
$\beta_{\theta_s}$	0	0	1	1	0	1	1
$\beta_{\theta_r}$	0	0	1	1	1	1	1
$\beta_{\theta_f}$	0	0	0	1	1	1	0
$T_{f,c}$	0	0	0	0	1	1	0
$\beta_f$	0	0	0	0	1	1	0
$C_r$	0	0	0	1	1	1	0

定位真实故障元件并且辨识间歇故障的幅值、出现时刻和消失时刻。在进行故障估计之前,需要对间歇故障进行建模。为了方便表示,采用 $\Omega$ 代表线控转向系统中所考虑的故障元件, $\Omega \in \{\beta_{\theta_w}, \beta_{\theta_{mr}}, \beta_{\theta_s}, \beta_{\theta_r}, \beta_{\theta_f}, T_{f,c}, \beta_f, C_r\}$ 。元件 $\Omega$ 中的间歇故障可以建模如下:

$$F^\Omega(t) = F_{Norm}^\Omega - (F_{Norm}^\Omega - F_1^\Omega) \times \gamma(t - v_1^\Omega) + (F_{Norm}^\Omega - F_1^\Omega) \times \gamma(t - \omega_1^\Omega) \cdots - (F_{Norm}^\Omega - F_{L_f}^\Omega) \times \gamma(t - v_{L_f}^\Omega) + (F_{Norm}^\Omega - F_{L_f}^\Omega) \times \gamma(t - \omega_{L_f}^\Omega) \quad (10)$$

$$\text{其中, } \gamma(a) = \begin{cases} 0, & a < 0 \\ 1, & a \geq 0. \end{cases}$$

式中: $F_{Norm}^\Omega$ 和 $F^\Omega(t)$ 分别表示元件 $\Omega$ 的标称值和实际值; $F_j^\Omega$ 表示间歇故障第 $j$ 次发生时的幅值; $v_j^\Omega$ 和 $\omega_j^\Omega$ 分别表示间歇故障第 $j$ 次发生时的出现时刻和消失时刻, $j \in \{1, 2, \dots, L_f\}$ 。

由于ARR是间歇故障元件 $\Omega$ 的函数,而 $\Omega$ 的模型是间歇故障幅值、出现时刻和消失时刻的函数,因此,间歇故障估计问题可以视为优化问题,该优化问题的适应度函数表示如下:

$$F_{fit} = \frac{1}{\left( \sum_{j=1}^{L_s} \sum_{i=1}^5 k_i |ARR_i^j| + \varepsilon \right)} \quad (11)$$

式中: $L_s$ 表示采样点的个数; $\varepsilon$ 是用于避免零除的常数。当 $ARR_i$ 不一致时, $k_i = 1$ ,反之 $k_i = 0$ 。

在获得可能故障集之后,本文基于式(11)定义的适应度函数,利用鲫鱼优化算法进行间歇故障估计。鲫鱼优化算法是一种基于种群的元启发式算法,该算法受到海洋中鲫鱼寄生行为的启发。鲫鱼优化算法的寻优过程主要包括两个阶段:全局搜索阶段和局部探索阶段,算法详细的寻优过程可参考文献[25]。

## 2 考虑非完美维修的剩余使用寿命预测

### 2.1 基于变尺寸窗口的间歇故障特征提取

由于间歇故障具有随机出现、随机消失以及幅值非

单调等特性,仅仅根据故障估计结果无法实现对间歇故障元件的剩余使用寿命预测,因此需要提取合适的间歇故障特征来描述间歇故障的严重程度。本文提出变尺寸窗口的概念以提取间歇故障特征,每个变尺寸窗口内包含相同的故障出现次数。

间歇故障中相邻两次故障出现时刻之间的时间间隔随着故障元件的退化不断减小,使得变尺寸窗口的宽度会随着变尺寸窗口数量的增加呈现出下降的趋势。因此,可以将变尺寸窗口的宽度视为间歇故障的一个特征,该特征表示为:

$$\xi_N^{\Omega, W} = v_{N+1,1}^\Omega - v_{N,1}^\Omega \quad (12)$$

式中: $\xi_N^{\Omega, W}$ 表示元件 $\Omega$ 在间歇故障下的第 $N$ 个变尺寸窗口的宽度; $N \in \mathbb{N}^+$ , $v_{N+1,1}^\Omega$ 和 $v_{N,1}^\Omega$ 分别表示第 $(N+1)$ 个和第 $N$ 个变尺寸窗口内元件 $\Omega$ 间歇故障首次出现的时刻。

为了同时考虑故障持续时间特征和故障幅度特征对间歇故障元件退化的影响,将变尺寸窗口内故障实际值与标称值所围成的面积定义为间歇故障的另一个特征,该特征的计算公式如下:

$$\xi_N^{\Omega, A} = \int_{v_{N,1}^\Omega}^{v_{N+1,1}^\Omega} |F^\Omega(t) - F_{Norm}^\Omega| dt \quad (13)$$

式中: $\xi_N^{\Omega, A}$ 表示元件 $\Omega$ 在第 $N$ 个变尺寸窗口内的面积特征值, $\xi_N^{\Omega, A}$ 的值随着 $N$ 的增加不断变大,该变化趋势能够表征间歇故障的退化过程。

### 2.2 考虑非完美维修的工况依赖的复合退化模型

一般来说,系统中的故障元件在不同的工况(道路条件、温度和湿度等)下具有不同的退化速率。例如,悬架系统的裂纹在恶劣道路上的扩展速度比良好道路上的扩展速度要快<sup>[26]</sup>。此外,非完美维修的效果也会随着工况的变化而变化。例如,相比于潮湿天气,金属元件的焊接(旨在减少裂纹长度)在干燥天气下更有效。基于上述分析,本文考虑了3种不同的工况:潮湿的沥青路面(工况1)、有雪的沥青路面(工况2)和干燥的沥青路面(工况3)。道路状况对车辆行驶速度有着显著影响,通常情况下,在良好道路(如干燥的沥青路面)上的车辆行驶速度会大于在恶劣道路(如有雪的沥青路面)上的车辆行驶速度<sup>[27]</sup>。在线控转向系统中,自回正力矩 $T_c$ 和速度系数 $S_c$ 均与车辆行驶速度相关,因此,上述3种不同路面条件会对系统状态和退化过程产生不同程度的影响。

假设在工况 $i$ 下每隔 $L_M$ 个变尺寸窗口进行一次非完美维修,其中 $L_M > 2, i \in \{1, 2, 3\}$ 。那么,工况 $i$ 下考虑非完美维修的变尺寸窗口宽度特征退化模型可以表示如下:

$$\xi_{M,i,N}^{\Omega, W} = \begin{cases} \Delta_i, & D_i = 1 \\ \nabla_i, & D_i > 1 \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$\Delta_1 = \begin{cases} \xi_{i,N}^{\Omega,W}, & N \in [N_i^+, N_{i,1}) \\ \xi_{i,N}^{\Omega,W} + \sum_{p=1}^{D_i} \varphi_{i,p}^W, & N \in [N_{i,D_i}, N_i^{\circ}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\nabla_1 = \begin{cases} \xi_{i,N}^{\Omega,W}, & N \in [N_i^+, N_{i,1}) \\ \xi_{i,N}^{\Omega,W} + \sum_{p=1}^k \varphi_{i,p}^W, & N \in [N_{i,k}, N_{i,(k+1)}), k = 1, \dots, D_i - 1 \\ \xi_{i,N}^{\Omega,W} + \sum_{p=1}^{D_i} \varphi_{i,p}^W, & N \in [N_{i,D_i}, N_i^{\circ}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\xi_{M,i,N}^{\Omega,W}$  表示在非完美维修和工况  $i$  下第  $N$  个变尺寸窗口的宽度;  $D_i$  表示工况  $i$  下元件在失效之前经历的非完美维修总数;  $N_i^+$  表示工况  $i$  的开始时刻 (该时刻记为  $t_i^+$ ) 所在的变尺寸窗口的序号;  $\xi_{i,N}^{\Omega,W}$  表示在工况  $i$  下未经维修的第  $N$  个变尺寸窗口的宽度。当工况  $i$  为初始工况 (即间歇故障首次出现时系统的工况) 时,  $\xi_{i,N}^{\Omega,W} = \sigma_i^{\Omega,W} \times \exp(\eta_i^{\Omega,W} \times N)$ , 否则,  $\xi_{i,N}^{\Omega,W} = \sigma_i^{\Omega,W} \times \exp(\eta_i^{\Omega,W} \times (N - N_i^+)) - \sigma_i^{\Omega,W} + s_i^{\Omega,W}$ , 其中,  $\sigma_i^{\Omega,W}$ 、 $\eta_i^{\Omega,W}$  和  $s_i^{\Omega,W}$  是工况  $i$  下变尺寸窗口宽度特征退化模型中的未知退化系数。  $N_i^{\circ}$  表示当系统处于工况  $i$  时, 失效阈值首次被超出时的变尺寸窗口的序号,  $\varphi_{i,p}^W$  表示工况  $i$  下第  $p$  次非完美维修所修复的变尺寸窗口宽度特征的退化量,  $p \in \{1, \dots, D_i\}$ 。当  $p = 1$  时,  $\varphi_{i,p}^W = \mu_{i,p}^{\Omega,W} \times \xi_{i,(N_{i,p}-1)}^{\Omega,W} - \xi_{i,N_{i,p}}^{\Omega,W}$ , 其中  $N_{i,p} = L_M \times (p + \lfloor N_i^+ / L_M \rfloor)$  表示工况  $i$  下第  $p$  次非完美维修所在的变尺寸窗口的序号,  $\mu_{i,p}^{\Omega,W} = \rho_i^{\Omega,W} - (\rho_i^{\Omega,W} - 1) \times \cos(\pi / (2p + 2 \lfloor N_i^+ / L_M \rfloor))$  表示变尺寸窗口宽度特征在工况  $i$  下第  $p$  次非完美维修的效果因子,  $\rho_i^{\Omega,W} > 1$  为工况  $i$  下变尺寸窗口宽度特征的非完美维修系数。当  $p > 1$  时,  $\varphi_{i,p}^W = \mu_{i,p}^{\Omega,W} \times \xi_{i,(N_{i,p}-1)}^{\Omega,W} - \xi_{i,N_{i,p}}^{\Omega,W} + (\mu_{i,p}^{\Omega,W} - 1) \sum_{j=1}^{p-1} \varphi_{i,j}^W$ 。

工况  $i$  下考虑非完美维修效应的面积特征退化模型如下:

$$\xi_{M,i,N}^{\Omega,A} = \begin{cases} \Delta_2, & D_i = 1 \\ \nabla_2, & D_i > 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中,

$$\Delta_2 = \begin{cases} \xi_{i,N}^{\Omega,A}, & N \in [N_i^+, N_{i,1}) \\ \xi_{i,N}^{\Omega,A} - \sum_{p=1}^{D_i} \varphi_{i,p}^A, & N \in [N_{i,D_i}, N_i^{\circ}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\nabla_2 = \begin{cases} \xi_{i,N}^{\Omega,A}, & N \in [N_i^+, N_{i,1}) \\ \xi_{i,N}^{\Omega,A} - \sum_{p=1}^k \varphi_{i,p}^A, & N \in [N_{i,k}, N_{i,(k+1)}), k = 1, \dots, D_i - 1 \\ \xi_{i,N}^{\Omega,A} - \sum_{p=1}^{D_i} \varphi_{i,p}^A, & N \in [N_{i,D_i}, N_i^{\circ}) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\xi_{M,i,N}^{\Omega,A}$  表示在非完美维修和工况  $i$  下第  $N$  个变尺寸窗口的面积特征值,  $\xi_{i,N}^{\Omega,A}$  表示在工况  $i$  下未经维修的第  $N$

个变尺寸窗口的面积特征值, 当工况  $i$  为初始工况时,  $\xi_{i,N}^{\Omega,A} = \sigma_i^{\Omega,A} \times (N)^{\eta_i^{\Omega,A}}$ , 否则,  $\xi_{i,N}^{\Omega,A} = \sigma_i^{\Omega,A} \times (N - N_i^+)^{\eta_i^{\Omega,A}} + s_i^{\Omega,A}$ , 其中,  $\sigma_i^{\Omega,A}$ 、 $\eta_i^{\Omega,A}$  和  $s_i^{\Omega,A}$  是工况  $i$  下面积特征退化模型中的未知退化系数。  $\varphi_{i,p}^A$  表示工况  $i$  下第  $p$  次非完美维修所修复的面积特征的退化量。当  $p = 1$  时,  $\varphi_{i,p}^A = \xi_{i,N_{i,p}}^{\Omega,A} - \mu_{i,p}^{\Omega,A} \times \xi_{i,(N_{i,p}-1)}^{\Omega,A}$ , 否则,  $\varphi_{i,p}^A = \xi_{i,N_{i,p}}^{\Omega,A} - \mu_{i,p}^{\Omega,A} \times \xi_{i,(N_{i,p}-1)}^{\Omega,A} + (\mu_{i,p}^{\Omega,A} - 1) \sum_{j=1}^{p-1} \varphi_{i,j}^A$ , 其中  $\mu_{i,p}^{\Omega,A} = \rho_i^{\Omega,A} + \frac{2}{\pi} \times (1 - \rho_i^{\Omega,A}) \times \arctan(p + \lfloor N_i^+ / L_M \rfloor - 1)$  表示面积特征在工况  $i$  下第  $p$  次非完美维修的效果因子,  $\rho_i^{\Omega,A} < 1$  为工况  $i$  下面积特征的非完美维修系数。

式(14)~(19)所示的退化模型分别描述了考虑非完美维修的变尺寸窗口宽度特征和面积特征在工况  $i$  下的完整退化过程。然而, 在实际系统运行中, 工况  $i$  可能在元件失效之前发生切换。因此, 实际的间歇故障特征退化过程可以表述如下:

$$\xi_{M,N}^{\Omega,W} = \xi_{M,i,N}^{\Omega,W}, N \in [N_i^+, N_i^-) \quad (20)$$

$$\xi_{M,N}^{\Omega,A} = \xi_{M,i,N}^{\Omega,A}, N \in [N_i^+, N_i^-) \quad (21)$$

式中:  $\xi_{M,N}^{\Omega,W}$  表示实际情况下考虑非完美维修的第  $N$  个变尺寸窗口的宽度;  $N_i^-$  表示工况  $i$  结束时所在的变尺寸窗口的序号;  $N_{i,1} < N_i^- \leq N_i^{\circ} + 1$ ;  $\xi_{M,N}^{\Omega,A}$  表示实际情况下考虑非完美维修的第  $N$  个变尺寸窗口的面积特征值。

### 2.3 基于 UHI 的剩余使用寿命预测

为了同时考虑所提取的两个间歇故障特征对元件退化的影响并对间歇故障元件的剩余使用寿命进行预测, 提出如下的 UHI:

$$\xi_N^{\Omega,H} = \begin{cases} \frac{\xi_N^{\Omega,A}}{\xi_N^{\Omega,W} F_{Norm}^{\Omega}}, & F_{N,j}^{\Omega} < F_{Norm}^{\Omega} \\ \frac{\xi_N^{\Omega,A}}{\xi_N^{\Omega,W} (F_{Up}^{\Omega} - F_{Norm}^{\Omega})}, & F_{N,j}^{\Omega} > F_{Norm}^{\Omega} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\xi_N^{\Omega,H}$  表示第  $N$  个变尺寸窗口的 UHI 值;  $F_{Up}^{\Omega}$  表示元件  $\Omega$  的幅值上界;  $F_{N,j}^{\Omega}$  表示第  $N$  个变尺寸窗口中元件  $\Omega$  的间歇故障在第  $j$  次发生时的幅值,  $\forall j \in \{1, \dots, L_{\text{life}}\}$ 。

在单故障情况下, 线控转向系统的剩余使用寿命等于系统中间歇故障元件的剩余使用寿命, 即指从当前时刻到该元件达到其预定寿命终点之前所剩余的时间。因此, 当  $\xi_N^{\Omega,H}$  超出失效阈值时, 则元件  $\Omega$  到达终止寿命。值得注意的是, 式(22)中等式右侧分子和分母拥有相同的物理量纲 (面积), 它们的比值 (UHI) 形式简单, 且易于评估。根据式(20)和(21)中描述的非完美维修下实际的间歇故障特征退化过程以及式(22)中定义的 UHI, 实际情况下考虑非完美维修的第  $N$  个变尺寸窗口的 UHI 值 (记作  $\xi_{M,N}^{\Omega,H}$ ) 可表示如下:

$$\xi_{M,N}^{\Omega,H} = \begin{cases} \xi_{M,N}^{\Omega,A} & F_{N,j}^{\Omega} < F_{Norm}^{\Omega} \\ \xi_{M,N}^{\Omega,W} F_{Norm}^{\Omega} & \\ \xi_{M,N}^{\Omega,A} & \\ \xi_{M,N}^{\Omega,W} (F_{Up}^{\Omega} - F_{Norm}^{\Omega}) & F_{N,j}^{\Omega} > F_{Norm}^{\Omega} \end{cases} \quad (23)$$

在预测故障元件的终止寿命和剩余使用寿命之前,需要估计式(14)~(19)中的未知系数。在式(15)和(16)中,当工况*i*为初始工况时,未知退化系数 $\sigma_i^{\Omega,W}$ 和 $\eta_i^{\Omega,W}$ 可以根据工况*i*下第1和第2个变尺寸窗口的故障估计结果( $\xi_{M,1}^{\Omega,H}$ 和 $\xi_{M,2}^{\Omega,H}$ )进行计算,结果为 $\sigma_i^{\Omega,W} = (\xi_{M,1}^{\Omega,W})^2 / \xi_{M,2}^{\Omega,W}$ ,  $\eta_i^{\Omega,W} = \ln(\xi_{M,2}^{\Omega,W} / \xi_{M,1}^{\Omega,W})$ 。此外,未知非完美维修系数 $\rho_i^{\Omega,W}$ 可以根据第1次非完美维修所在的变尺寸窗口以及该变尺寸窗口的前一个变尺寸窗口的故障估计结果( $\xi_{M,L_M}^{\Omega,W}$ 和 $\xi_{M,(L_M-1)}^{\Omega,W}$ )进行求解,结果为 $\rho_i^{\Omega,W} = \xi_{M,L_M}^{\Omega,W} / \xi_{M,(L_M-1)}^{\Omega,W}$ 。当工况*i*不为初始工况时, $s_i^{\Omega,W}$ 、 $\sigma_i^{\Omega,W}$ 和 $\eta_i^{\Omega,W}$ 可以根据工况*i*下第1、第2和第3个变尺寸窗口的故障估计结果( $\xi_{M,N_i^+}^{\Omega,H}$ 、 $\xi_{M,(N_i^++1)}^{\Omega,H}$ 和 $\xi_{M,(N_i^++2)}^{\Omega,H}$ )进行计算,结果为 $s_i^{\Omega,W} = \xi_{M,N_i^+}^{\Omega,W}$ ,  $\sigma_i^{\Omega,W} = (\xi_{M,(N_i^++1)}^{\Omega,W} - \xi_{M,N_i^+}^{\Omega,W})^2 / (\xi_{M,(N_i^++2)}^{\Omega,W} - 2\xi_{M,(N_i^++1)}^{\Omega,W} + \xi_{M,N_i^+}^{\Omega,W})$ ,  $\eta_i^{\Omega,W} = \ln((\xi_{M,(N_i^++2)}^{\Omega,W} - \xi_{M,(N_i^++1)}^{\Omega,W}) / (\xi_{M,N_i^+}^{\Omega,W} - \xi_{M,(N_i^++1)}^{\Omega,W}))$ 。 $\rho_i^{\Omega,W}$ 可以根据工况*i*下第一次非完美维修所在的变尺寸窗口以及该变尺寸窗口的前一个变尺寸窗口的故障估计结果( $\xi_{M,N_{i,1}}^{\Omega,W}$ 和 $\xi_{M,(N_{i,1}-1)}^{\Omega,W}$ )进行求解,结果为 $\rho_i^{\Omega,W} = (\xi_{M,N_{i,1}}^{\Omega,W} / \xi_{M,(N_{i,1}-1)}^{\Omega,W}) - \cos(\pi/2(1 + \lfloor N_i^+ / L_M \rfloor)) / (1 - \cos(\pi/2(1 + \lfloor N_i^+ / L_M \rfloor)))$ 。式(18)和(19)中的未知系数求解过程同上,这里不再赘述。

在获得未知的退化系数和非完美维修系数之后,可以根据退化模型以及预先设置的失效阈值预测故障元件在每种工况下的终止寿命和剩余使用寿命。为了获得可靠的剩余使用寿命预测结果,定义第 $N_i^{\circ}$ 个变尺寸窗口的开始时刻作为故障元件 $\Omega$ 在工况*i*下的失效时刻。那么,故障元件 $\Omega$ 在工况*i*下的终止寿命和剩余使用寿命计算公式如下:

$$\begin{cases} t_i^{\Omega,E} = t_f + \sum_{j=N_i^+}^{N_i^{\circ}-1} \xi_{M,i,j}^{\Omega,W} + P_i \\ t_i^{\Omega,R} = \sum_{j=N_{i,1}^++1}^{N_i^{\circ}-1} \xi_{M,i,j}^{\Omega,W} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $t_f$ 表示间歇故障首次出现的时刻; $t_i^{\Omega,E}$ 和 $t_i^{\Omega,R}$ 代表元件 $\Omega$ 在工况*i*下的终止寿命和剩余使用寿命;当工况*i*为初始工况时, $P_i = 0$ ,否则 $P_i = \sum_{j=1}^{N_i^+-1} \xi_{M,j}^{\Omega,W}$ 。

本文所提方法的总体方案框图如图3所示,从图中可以看出每个功能模块之间的关系。

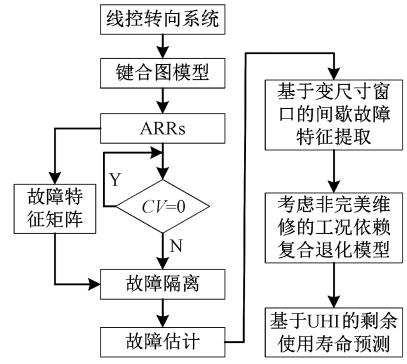


图 3 总体方案

Fig. 3 Overall scheme diagram

### 3 实验验证

为了验证本文所提出的非完美维修下线控转向系统健康监测方法的有效性,基于图1所示的线控转向系统实验平台进行实验研究,其中PC机通过数据采集卡PCI-1716和NI PCI-6221与线控转向系统相连接。表2给出了线控转向系统的标称参数值。

表 2 线控转向系统参数标称值

Table 2 Nominal parameters values of the steer-by-wire system

参数	标称值	参数	标称值
$K_1$	1 A/V	$G_{r1}$	15
$K_2$	7 A/V	$R_{mr2}$	0.22 $\Omega$
$G_f$	5	$R_{s1}$	0.03 $\Omega$
$k_{mr}$	0.123 Nm/A	$J_{mr}$	4.5 $e^{-5}$ kg $\cdot$ m <sup>2</sup>
$k_s$	0.097 Nm/A	$J_s$	2.8 $e^{-4}$ kg $\cdot$ m <sup>2</sup>
$C_h$	4 Nm/rad	$B_{mr1}$	2.06 $e^{-4}$ Nm/(rad/s)
$C_s$	1 Nm/rad	$B_{s2}$	0.012 4 Nm/(rad/s)
$C_r$	250 Nm/rad	$B_p$	20 Nm/(m/s)
$J_w$	0.028 kg $\cdot$ m <sup>2</sup>	$B_f$	25 Nm/(rad/s)
$J_f$	0.05 kg $\cdot$ m <sup>2</sup>	$T_{w,s}$	0.331 Nm
$M_r$	3 kg	$T_{w,c}$	0.33 Nm
$r_p$	0.08 m	$T_{mr1,s}$	0.06 Nm
$G_{r2}$	1.4 m/rad	$T_{mr1,c}$	0.059 Nm
$\alpha_w$	0.001	$T_{s2,s}$	0.69 Nm
$\alpha_{mr1}$	0.001	$T_{s2,c}$	0.05 Nm
$\alpha_{s2}$	0.007	$T_{p,s}$	0.61 Nm
$\alpha_p$	0.006	$T_{p,c}$	0.6 Nm
$\alpha_f$	0.001	$T_{f,s}$	0.7 Nm
$B_w$	0.05 Nm/(rad/s)	$T_{f,c}$	0.6 Nm

在线控转向系统中,方向盘角度传感器和齿轮角度传感器的输出信号均为CAN信号,不能被数据采集



卡采集,需要借助单片机(型号为飞思卡尔MC9S12XEP100)和数模转换模块(型号为DAC8562)进行信号转换,并将转换后的信号送入PCI-1716。反馈电机和转向电机的角度信号由NI PCI-6221采集,前轮转角信号由PCI-1716采集。

实验中考虑转向电机角速度传感器( $\theta_s$ )故障,通过改变传感器的有效因子 $\beta_{\theta_s}$ 进行间歇故障的注入,表3给出了间歇故障幅值、出现时刻和消失时刻的真实值。工况在 $t_2 = 219$  s从潮湿的沥青路面(即工况1)切换到有雪的沥青路面(即工况2),车辆在工况1下的行驶速度和速度系数分别为 $V = 40$  km/h和 $S_c = 0.19$ ,而在工况2下的行驶速度和速度系数分别为 $V = 21$  km/h和 $S_c = 0.153$ 。当路面条件发生改变时,自回正力矩会发生变化,因此,用来产生该扭矩的阻力电机输出也发生相应的变化。 $\beta_{\theta_s}$ 的复合退化模型为: $\xi_{1,N}^{\beta_{\theta_s},W} = 50.7022 \times \exp(-0.0652 \times N)$ ,  $\rho_1^{\beta_{\theta_s},W} = 1.05$ ,  $\xi_{1,N}^{\beta_{\theta_s},A} = 1.8 \times N^{0.9594}$ ,  $\rho_1^{\beta_{\theta_s},A} = 0.8$ ,  $\xi_{2,N}^{\beta_{\theta_s},W} = 52.71 \times (N-5)^{0.97} + 5.9$ 和 $\rho_2^{\beta_{\theta_s},A} = 0.85$ 。相邻两次非完美维修之间的变尺寸窗口数量 $L_M$ 设置为4,每个变尺寸窗口内包含的故障次数 $L_{ov}$ 设置为3。线控转向系统的残差响应如图4所示,其中虚线和实线分别代表阈值和残差,从图4可以得出 $CV = [00110]$ ,将该 $CV$ 与表1所示的故障特征矩阵比较可以隔离出转向电机传感器故障 $\beta_{\theta_s}$ 。接着,采用鲫鱼优化算法进行故障估计,表3给出了 $\beta_{\theta_s}$ 的故障估计结果,其中, $v_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 、 $\omega_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 和 $F_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 分别表示 $\beta_{\theta_s}$ 的间歇故障在第 $N$ 个变尺寸窗口中第 $j$ 次发生时的出现时刻、消失时刻和幅值, $\hat{v}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 、 $\hat{\omega}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 和 $\hat{F}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$ 是对应的估计值。

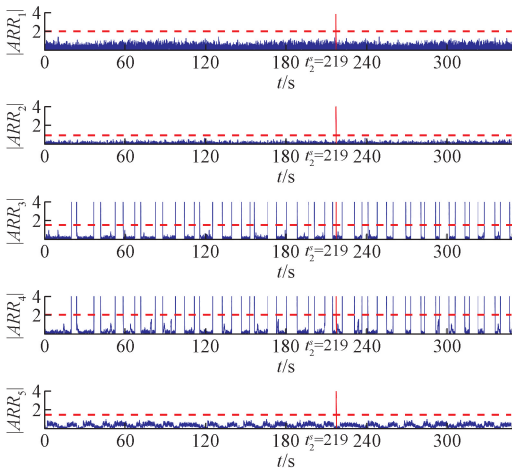


图4 残差响应

Fig. 4 Residual responses

基于故障估计结果,可以计算出 $\beta_{\theta_s}$ 的变尺寸窗口宽度特征和面积特征退化曲线上的坐标点。 $\beta_{\theta_s}$ 在工况1

表3  $\beta_{\theta_s}$ 的间歇故障真实值和估计值

N/ 个		真实值			估计值			
j	$\beta_{\theta_s}$	$v_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}/s$	$\omega_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}/s$	$F_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$	$\hat{v}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}/s$	$\hat{\omega}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}/s$	$\hat{F}_{N,j}^{\beta_{\theta_s}}$	
		1	20	24.077	0.87	20.012	24.067	0.870
1	2	37	42	0.89	37.012	42.007	0.888	5
1	3	53	59	0.88	52.985	58.990	0.880	9
1	1	67.5	72.004	0.79	67.472	71.994	0.791	1
2	2	83	88.5	0.8	83.014	88.486	0.801	2
2	3	98	104.61	0.78	98.008	104.626	0.777	9
3	1	112	116	0.73	112.018	116.016	0.731	4
3	2	126	133	0.72	126.01	133.009	0.7213	
3	3	140	147.08	0.7	139.99	147.068	0.698	7
4	1	153.69	157.017	0.76	153.681	157.011	0.760	7
4	2	167.19	173.5	0.79	167.178	173.490	0.789	3
4	3	181.19	188.911	0.74	181.201	188.929	0.740	9
5	1	197.46	201.83	0.7	197.485	201.822	0.701	5
5	2	209.85	215.6	0.7	209.873	215.590	0.700	8
5	3	222.85	231.8	0.68	222.843	231.812	0.681	0
6	1	237.46	241.91	0.63	237.439	241.920	0.631	2
6	2	248.85	255.801	0.64	248.83	255.814	0.640	5
6	3	260.85	270.212	0.61	260.835	270.193	0.611	5
7	1	274.03	281.46	0.59	274.003	281.485	0.591	2
7	2	284.46	292.432	0.57	284.476	292.443	0.568	7
7	3	295.46	302.614	0.56	295.467	302.631	0.558	5
8	1	307.41	314.41	0.6	307.403	314.433	0.599	3
8	2	317.9	324.131	0.58	317.92	324.166	0.579	0
8	3	328.9	337	0.57	328.921	337.028	0.570	8
9	1	340.98	347.831	0.59	341.014	347.854	0.590	9

下的变尺寸窗口宽度退化模型中的未知退化系数可由故障估计结果和式(12)计算得到的坐标点 $(1, \xi_{M,1}^{\beta_{\theta_s},W}) = (1, 47.46)$ 和 $(2, \xi_{M,2}^{\beta_{\theta_s},W}) = (2, 44.546)$ 进行求解,结果为 $\hat{\sigma}_1^{\beta_{\theta_s},W} = 50.5646$ ,  $\hat{\eta}_1^{\beta_{\theta_s},W} = -0.0634$ 。 $\beta_{\theta_s}$ 的变尺寸窗口宽度特征在工况1下的非完美维修系数可通过坐标点 $(3, \xi_{M,3}^{\beta_{\theta_s},W}) = (3, 41.663)$ 和 $(4, \xi_{M,4}^{\beta_{\theta_s},W}) = (4, 43.804)$ 进行求解,结果为 $\hat{\rho}_1^{\beta_{\theta_s},W} = 1.0514$ 。工况1下 $\beta_{\theta_s}$ 的面积特征退化模型中的未知退化系数和非完美维修系数的求解过程与变尺寸窗口宽度特征退化模型系数求解过程类似,结果为 $\hat{\sigma}_1^{\beta_{\theta_s},A} = 1.796$ ,  $\hat{\eta}_1^{\beta_{\theta_s},A} = 0.9635$ ,  $\hat{\rho}_1^{\beta_{\theta_s},A} = 0.8008$ 。基于上述求解出的退化模型系数和非完美维修系数,可以



获得 $\beta_{\theta_s}$ 在工况 1 下的复合退化模型。基于该模型和设置的失效阈值 $\xi_{fail}^{\beta_{\theta_s},H} = 0.64$ ,可以预测 $\beta_{\theta_s}$ 在工况 1 下的剩余使用寿命为 $t_1^{\beta_{\theta_s},R} = 422.724$  s (对应的真实值为 404.445 s)。工况在第 219 s (即第 5 个变尺寸窗口内)发生切换,切换后 $\beta_{\theta_s}$ 在新工况下的复合退化模型系数可以通过该工况下的故障估计结果进行求解,结果为: $\hat{\sigma}_2^{\beta_{\theta_s},W} = 50.85$ , $\hat{\eta}_2^{\beta_{\theta_s},W} = -0.069$ , $\hat{s}_2^{\beta_{\theta_s},W} = 39.954$ , $\hat{\rho}_2^{\beta_{\theta_s},W} = 1.0216$ , $\hat{\sigma}_2^{\beta_{\theta_s},A} = 1.9327$ , $\hat{\eta}_2^{\beta_{\theta_s},A} = 0.9722$ , $\hat{s}_2^{\beta_{\theta_s},A} = 5.8662$ , $\hat{\rho}_2^{\beta_{\theta_s},A} = 0.8485$ 。基于更新后的复合退化模型系数,可以确定 $\beta_{\theta_s}$ 在工况 2 下的复合退化模型。最后, $\beta_{\theta_s}$ 在该工况下的剩余使用寿命的预测结果为 $t_2^{\beta_{\theta_s},R} = 106.358$  s (对应的真实值为 110.631 s)。

为了验证所提出的工况依赖的复合退化模型的优越性,采用文献[28](记作 $M_1$ )和文献[22](记作 $M_2$ )中的退化建模和剩余使用寿命预测方法进行对比。 $M_1$ 利用指数函数对电磁释放的时域方差特征的退化过程进行建模。然而,该方法忽略了非完美维修对特征退化状态的影响。 $M_2$ 提出了一种包含负跳变效应的维纳过程模型用于描述非完美维修下退化系统的退化过程。然而, $M_2$ 中采用固定的非完美维修效果因子。在对比实验中,将这两种方法用于研究对象(线控转向系统)的间歇故障退化过程建模。图 5 给出了使用 $M_1$ 、 $M_2$ 以及本文所提出的方法(记作 $M_3$ )对 $\beta_{\theta_s}$ 在两种工况下的剩余使用寿命的预测过程。

在利用 $M_1$ 进行剩余使用寿命预测时,工况 1 下的未知复合退化模型系数可以根据前 2 个变尺寸窗口的故障估计结果进行计算,因此,在第 3 个变尺寸窗口激活 $M_1$ 在工况 1 下的剩余使用寿命预测模块。然而,在利用其余两种方法(即 $M_2$ 和 $M_3$ )预测剩余使用寿命时,需要前 4 个变尺寸窗口的故障估计结果计算未知的复合退化模型系数。因此,在第 5 个变尺寸窗口激活 $M_2$ 和 $M_3$ 在工况 1 下的剩余使用寿命预测模块。为了进行公平的比较,统一在第 5 个变尺寸窗口激活 $M_1$ 、 $M_2$ 和 $M_3$ 在工况 1 下的剩余使用寿命预测模块。在工况发生切换之后, $M_1$ 在工况 2 下的未知复合退化模型系数需要 3 个变尺寸窗口(第 5~7 个变尺寸窗口)的故障估计结果进行计算,因此,在第 8 个变尺寸窗口激活 $M_1$ 在工况 2 下的剩余使用寿命预测模块。而其余两种方法( $M_2$ 和 $M_3$ )在工况 2 下的未知复合退化模型系数需要 4 个变尺寸窗口(第 5~8 个变尺寸窗口)的故障估计结果进行求解。因此,在第 9 个变尺寸窗口激活 $M_2$ 和 $M_3$ 在工况 2 下的剩余使用寿命预测模块。同理,为确保对比的公平性,统一在第 9 个变尺寸窗口激活这

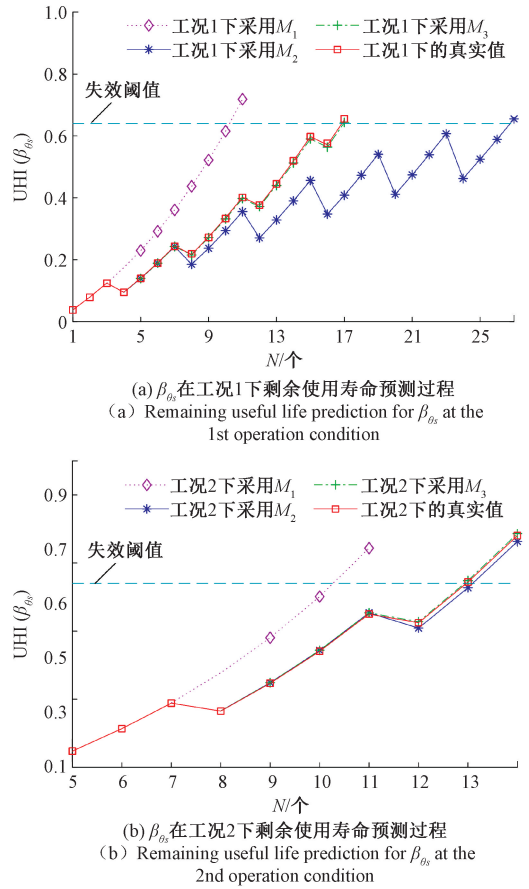


图 5  $\beta_{\theta_s}$  在不同工况下的剩余使用寿命预测过程  
Fig. 5 Remaining useful life prediction processes for  $\beta_{\theta_s}$  at different operation conditions

3 种方法在工况 2 下的剩余使用寿命预测模块。

图 5 (a) 给出了 $\beta_{\theta_s}$ 在工况 1 下使用不同预测方法进行剩余使用寿命预测的过程,从图中可以看出,利用 $M_1$ 预测的剩余使用寿命远远小于 $M_2$ 和 $M_3$ 预测的剩余使用寿命,因为 $M_1$ 忽略了非完美维修对故障特征退化的影响。此外, $M_2$ 预测的剩余使用寿命要大于 $M_3$ 预测的剩余使用寿命,因为 $M_2$ 没有采用随着维修次数变化的非完美维修效果因子。上述结论同样可以从图 5 (b) 中得到。为了进一步进行定量的对比分析,采用相对精度(relative accuracy, RA)来比较不同剩余使用寿命预测方法的预测精度,表 4 给出了上述 3 种剩余使用寿命预测方法的预测结果,从表中可以发现 $M_3$ 具有最好的预测性能。可以看出,本文所提出的方法在不同工况下的剩余使用寿命预测性能明显优于文献[22]和文献[28]中所采用的方法,因为本文提出的方法可以同时考虑非完美维修对故障特征退化过程的影响和维修次数对非完美维修效果因子的影响。

表4 不同预测方法的剩余使用寿命预测结果

Table 4 Remaining useful life prediction results using different methods

故障	工况	方法	剩余使用寿命/s	RA/%
$\beta_o$	工况 1	真实值	404.445	/
		$M_1$	189.734	46.91
		$M_2$	733.149	18.73
	工况 2	$M_3$	422.724	95.48
		真实值	110.631	/
		$M_1$	52.807	47.73
		$M_2$	135.013	77.96
		$M_3$	106.358	96.14

## 4 结 论

作为自动驾驶技术的关键环节,线控转向系统的可靠性和安全性尤为重要。线控转向系统中间歇故障的随机性和非完美维修对退化过程的复杂影响对故障预测算法研究带来了一定的困难。因此,考虑中间歇故障和非完美维修条件下的线控转向系统的健康监测方法研究是一个具有挑战性的问题。本文提出了一种基于变尺寸窗口和工况依赖复合退化模型的非完美维修下线控转向系统的健康监测方法。该方法包含两个步骤:故障诊断和剩余使用寿命预测。在故障诊断过程中,分别基于ARRs、故障特征矩阵和鲫鱼优化算法对中间歇故障进行检测、隔离和估计。在剩余使用寿命预测过程中,采用变尺寸窗口对两个中间歇故障特征进行提取,并建立工况依赖的复合退化模型以描述中间歇故障特征在工况变化和非完美维修下的演化趋势。此外,为了综合考虑所提取的两个中间歇故障特征对故障元件退化的影响,提出了基于UHI的中间歇故障元件的剩余使用寿命预测方法。最后,通过实验对比分析验证了所研究方法的优越性和可行性。

在未来的研究工作中,可以将本文所提方法推广到更为复杂的多重中间歇故障情况。此外,未来研究可以针对线控转向系统进行中间歇故障预测和容错控制协同设计。

## 参考文献

[1] SU CH R, LI H H, QIAO B J, et al. Personalized steering feel design for steer-by-wire systems based on the rack force estimation [J]. International Journal of

Automotive Technology, 2023, 24(4): 1151-1161.

[2] MORTAZAVIZADEH S A, GHADERI A, EBRAHIMI M, et al. Recent developments in the vehicle steer-by-wire system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1226-1235.

[3] ZOU S CH, ZHAO W ZH, LIANG W H, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant compensation strategy for wheel angle sensor of steer-by-wire vehicle via extended kalman filter [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2): 1756-1766.

[4] HUANG CH, NAGHDY F, DU H P. Delta operator-based fault estimation and fault-tolerant model predictive control for steer-by-wire systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(5): 1810-1817.

[5] 刘晓琳, 米哲, 荆涛. 基于广义基尼指数和脉冲神经网络的航空交流串联电弧故障检测 [J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(3): 154-161.

LIU X L, MI ZH, JING T. Aviation AC series arc fault detection based on generalized Gini indices and spiking neural network [J]. Foreign Electric Measurement Technology, 2024, 43(3): 154-161.

[6] 许水清, 刘锋, 何怡刚, 等. 基于自适应滑模观测器的新能源汽车驱动系统电流传感器微小故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7277-7288.

XU SH Q, LIU F, HE Y G, et al. Minor fault diagnosis for current sensor of new energy vehicle drive system based on adaptive sliding mode observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7277-7288.

[7] CAI B P, LIU Y, XIE M. A dynamic-Bayesian-network-based fault diagnosis methodology considering transient and intermittent faults [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 276-285.

[8] 康守强, 杨加伟, 王玉静, 等. 基于联邦多表示域适应的不同工况下滚动轴承故障诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 165-176.

KANG SH Q, YANG J W, WANG Y J, et al. Fault diagnosis method of rolling bearings under different working conditions based on federated multi-representation domain adaptation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 165-176.

[9] 贾朱植, 刘凯, 刘佳鑫, 等. 基于DACNN的电机滚动

- 轴承故障诊断方法[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(6): 179-190.
- JIA ZH ZH, LIU K, LIU J X, et al. DACNN based fault diagnosis of rolling bearing in motor[J]. Foreign Electric Measurement Technology, 2024, 43(6): 179-190.
- [10] LI H K, LYU K H, ZHANG Y, et al. Study of solder joint intermittent fault diagnosis based on dynamic analysis [ J ]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(9): 1748-1758.
- [11] CUI J R, SU CH G, Li X Q, et al. The prediction of remaining useful life of aluminum reduction cells based on improved hidden semi-Markov model [ J ]. JOM, 2023, 75(6): 2054-2063.
- [12] 黄庆卿, 胡欣堪, 韩延, 等. 多源域子域自适应的滚动轴承剩余寿命预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 100-107.
- HUANG Q Q, HU X K, HAN Y, et al. Remain useful life prediction of rolling bearing based on multi-source subdomain adaption network [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 100-107.
- [13] 张菡, 张泰瑀, 贾民平, 等. 多传感器融合和 MHA-LSTM 的电机轴承剩余寿命预测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 84-93.
- ZHANG W, ZHANG T Y, JIA M P, et al. Prediction of remaining life of motor bearing using multi-sensor fusion and MHA-LSTM [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 84-93.
- [14] LI Q, LYU K H, QIU J, et al. Research on residual life prediction for electrical connectors based on intermittent failure and hidden semi-Markov model [ J ]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1373.
- [15] YU M, WANG ZH CH, WANG H, et al. Intermittent fault diagnosis and prognosis for steer-by-wire system using composite degradation model[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2023, 13(2): 557-571.
- [16] SHARMA G, RAI R N. Failure modes based censored data analysis for repairable systems and its industrial perspective [ J ]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 107439.
- [17] LIU B Y, PANG J, YANG H D, et al. Optimal condition-based maintenance policy for leased equipment considering hybrid preventive maintenance and periodic inspection[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 242: 109724.
- [18] LI X L, RAN Y, CHEN B J, et al. Opportunistic maintenance strategy optimization considering imperfect maintenance under hybrid unit-level maintenance strategy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 185:109624.
- [19] LI X L, RAN Y, WAN F M, et al. Condition-based maintenance strategy optimization of meta-action unit considering imperfect preventive maintenance based on Wiener process[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2022, 34(1): 204-233.
- [20] WEI SH CH, NOURELFATH M, NAHAS N. Analysis of a production line subject to degradation and preventive maintenance [ J ]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108906.
- [21] DO P, VOISIN A, LEVRAT E, et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions [ J ]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133: 22-32.
- [22] WANG ZH Q, HU CH H, SI X SH, et al. Remaining useful life prediction of degrading systems subjected to imperfect maintenance: Application to draught fans[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 100: 802-813.
- [23] SUN ZH, ZHENG J CH, MAN ZH H, et al. Nested adaptive super-twisting sliding mode control design for a vehicle steer-by-wire system [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 122: 658-672.
- [24] LIANG W H, ZHAO W ZH, WANG CH Y, et al. Harmonic suppression and road feeling control of steer-by-wire system with permanent magnet synchronous motor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 172:108983.
- [25] JIA H M, PENG X X, LANG CH B. Remora optimization algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 185:115665.
- [26] LUO J H, PATTIPATI K R, QIAO L, et al. Model-based prognostic techniques applied to a suspension system[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2008, 38(5): 1156-1168.

- [27] TANG T Q, WANG Y P, YANG X B, et al. A new car-following model accounting for varying road condition[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 70 ( 2 ): 1397-1405.
- [28] SU X P, ZHANG ZH L, WEI J X. Remaining useful life prediction of electromagnetic release based on whale optimization algorithm—particle filtering[J]. *Energies*, 2024, 17(3): 670.

## 作者简介



**郁明** (通信作者), 2012 年于新加坡南洋理工大学获得博士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院教授, 主要研究方向为复杂系统的故障诊断与预测, 混杂系统建模和容错控制。

E-mail: yu0202@hfut.edu.cn

**Yu Ming** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanyang Technological University in 2012, Singapore. He is currently a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include fault diagnosis and prognosis of complex system, hybrid system modeling, and fault tolerant control.



**程区奇**, 2023 年于安徽理工大学获得学士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院硕士研究生, 主要研究方向为故障诊断和自愈系统的健康监测。

E-mail: 2023110434@mail.hfut.edu.cn

**Cheng Quqi** received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2023. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Hefei University of Technology. His main research interests include fault diagnosis and health monitoring of the self-healing system.



**程瑞**, 2021 年于安徽建筑大学获得学士学位, 2024 年于合肥工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为间歇故障诊断和预测, 键合图模型和非完美维修。

E-mail: 2021110422@mail.hfut.edu.cn

**Cheng Rui** received his B. Sc. degree from Anhui Jianzhu University in 2021, and received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2024. His main research interests include intermittent fault diagnosis and prognosis, bond graph modeling, and imperfect maintenance.