

# 基于动力学模型的柔性加工设备机电系统状态监测与故障预警\*

邱静 温熙森 胡政

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

**摘要** 在建立的加工设备机电系统精确动力学模型及对模型参数实时辨识的基础上<sup>[1]</sup>,建立柔性加工设备机电系统的状态监测模型,包括 BA YES故障检测、突发故障检测及故障分析与定位等;同时利用 Kullback 信息距离和多层递阶 AR模型实现系统的状态与故障预警。在加工设备上的实验表明模型可行有效,它能排除柔性多变工况、时变性及随机干扰对监测与预警功能的影响,提高其鲁棒性和自适应能力。

**关键词** 柔性加工设备, 机电系统, 动力学模型, 状态监测, 故障预警

分类号 TH 165.3

## Condition Monitoring and Fault Prediction of Mechanical-Electronic Systems of Flexible Machining Devices Based on Dynamics Model

Qiu Jing Wen Xisen Hu zheng

(Department of Mechatronic Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** Based on the dynamics models and their identification of mechanical-electronic systems of flexible machining devices, we have built up a real condition monitoring model which includes BA YES fault detection, abrupt fault detection and fault analysis & location. Utilizing the Kullback information distance and the multilevel hierarchical AR model, we have realized the prediction and alarming of faults of flexible machining devices. The experiments on the JCS-020M Machine Center have indicated the models are feasible and valid. They can properly eliminate the influence of the changeful machining mode and process, the factors of time-varying and random disturbances on the condition monitoring, fault diagnosis and prediction, and greatly improve robustness and adaptability of monitoring and diagnosis in the FMS environments.

**Key words** flexible machining device, mechanical-electronic system, dynamics model, condition monitoring, fault prediction & alarming

## 1 监测与诊断系统模型

### 1.1 基于 BA YES 决策的故障检测

当过程动力学模型确定后<sup>[1]</sup>,实时辨识的模型参数通常可看成是随机的,因此参照其标称值 $\theta_0$ ,可获得其变化量 $\Delta\theta$ 。为此采用 BA YES 检验决策来判断加工过程状态的变化。设过程参数向量序列为 $\theta_i(j)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ ,表示实时辨识参数, $i$ 表示各不同参数。假设 $\theta_i(j)$ 服从正态分布,且是统计独立的。由 BA YES 决策理论,故障检测与定位算法为

1) 确定正常状态的均值与方差:

$$\hat{\mu}_{i0} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \theta_i(j), \quad \hat{\sigma}_{i0}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\theta_i(j) - \hat{\mu}_{i0}]^2 \quad (1)$$

\* 国防预研基金资助项目

1999年9月2日收稿

第一作者: 邱静, 男, 1964年生, 副教授

2) 过程参数变动检测:

$$d_i(k) = \frac{\hat{\xi}_{\rho i}(k)}{\xi_{\rho i 0}^2} - h \frac{\hat{\xi}_{\rho ii}(k)}{\xi_{\rho i 0}^2} - 1 \quad (2)$$

其中: 均值  $\hat{\xi}_{\rho i}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \theta_i(k-j)$ ,

$$\text{方差 } \hat{\xi}_{\rho i}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\theta_i(k-j) - \hat{\xi}_{\rho i 0}]^2, \quad \hat{\xi}_{\rho ii}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\theta_i(k-j) - \hat{\xi}_{\rho i}]^2$$

3) 决策律:

$$d_i(k) \begin{matrix} < \lambda \\ > \lambda \end{matrix} \begin{matrix} H_0 \\ H_1 \end{matrix} = 2 \ln \frac{NP_0}{1-P_0} \quad (3)$$

$P_0$ 为无故障先验概率,  $N_1$ 为小于  $N$  的正整数。对模型的不同参数建立决策率, 可实现各参数的在线监测。由于各参数直接或间接对应着加工系统各物理环节, 因此, 对其的检测也就是对加工系统设备的状态监测

## 1.2 故障诊断与原因分析

由文 [1] 的式 (3) ~ (14), 可定性定量的分析引起状态参数变化的原因, 即系统出现故障的原因, 实现故障的定位与分离。由文 [1] 的式 (3)、(5) 的辨识参数  $R$ ,  $L$ ,  $C_m$  可对各电机系统进行确切的故障诊断与分离。

传动系统较复杂, 为节省篇幅, 只简单地对进给系统 (丝杠传动系统) 作判断分析。设采用轴向-径向轴承, 则 [1] 文中式 (7) 的第二项为 0。设工件质量远小于拖板质量, 则可忽略  $m_w$ ; 设无齿轮传动连接, 直接由联轴器连接, 则  $i=1$ ,  $Z_g=1$  得

$$a = (m_T g) d \quad d = \frac{h_{sp}}{2C_{SM}} Y \quad a = \frac{h_{sp}}{2C_{SM}} (m_T g) Y \quad Y = \frac{h_{sp}}{2C_{SM}} \quad (4)$$

$$J = m_T \frac{h_{sp}^2}{4C^2} + J_l + J_{SP} + J_M \quad (5)$$

设加工正处于切削状态。如果检测的前三个参数同时变化, 其根源在  $Y$  即  $h_{sp}$ ,  $Z_M$ , 也即进给系统的丝杠导程导距有异常或进给丝杠螺母有故障。如果  $a$  单独变化, 则  $m_T$  变化, 即导板质量变化。如果  $a$ 、 $Y$  同时变化, 则说明  $\frac{h_{sp}}{2C_{SM}}$  变化, 即传动系统导轨的摩擦系数变化, 说明其导轨出现异常。如果  $J$  变化, 则  $m_T$ ,  $h_{sp}$ ,  $J_l$ ,  $J_M$ ,  $J_{SP}$  发生变化; 如果这时  $a$  也变化, 则说明导板质量变化, 如果  $a$ 、 $Y$ 、 $d$  也同时变化, 则说明  $h_{sp}$  变化, 即进给丝杠导程导距异常, 否则是电机轴或进给丝杠轴出现异常; 这时, 如果电机的电参数出现异常, 则电机轴出现异常的可能性较大。对于空载时,  $Y$ 、 $d$  参数无意义, 主要分析  $J$  和  $a$  即可。

如此等等, 不一一枚举。可见, 通过对模型参数、加工过程、监测对象等的关联分析, 可简洁地实现其监测与故障诊断, 可靠性高。

## 2 多层递阶自适应故障预报及突发故障检测

通常的预测模型一般存在一些缺点, 主要表现在预报误差较大, 随着预报期间 (步长) 的增加, 这种误差很快增大, 因此这些方法的应用受到限制, 其原因主要是系统的时变性与进行预报的数学模型参数非时变性之间的差异。柔性加工设备表现更为突出, 且还有柔性多变工况与强干扰等因素, 系统的输入又很难理想地获得, 因此对其状态与故障的预警一直未能很好解决。

### 2.1 多层自适应预报模型<sup>[5]</sup>

其思想是把对时变系统的状态预报分离成对时变参数的预报和在此基础上对系统状态的状态的预报两部分。对每一模型参数 (下标  $i$  表示), 可建立其自适应滤波模型为

$$y_{i, k+1} = X_i \theta_{i, l}^T + v_{i, l} = y_i \theta_{i, l}(k) + y_{i, l-p} \theta_{i, l}(k-1) + \dots + y_{i, l-p} \theta_{i, l}(k-p) + v_{i, l} \quad (6)$$

其中,  $i$  表示不同的参数;  $l$  表示时刻标识;  $k$  表示模型参数标识;

$$X_{i,l} = \{y_{i,l}, y_{i,l-1}, \dots, y_{i,l-p_i}\}, \quad \theta_{i,l} = \{\theta_{i,l}(k), \theta_{i,l}(k-1), \dots, \theta_{i,l}(k-p_i)\}$$

由跟踪算法<sup>[4]</sup>, 可获得时变参数的跟踪值序列向量  $\hat{\theta}_{i,1}, \hat{\theta}_{i,2}, \dots, \hat{\theta}_{i,N}$ .

1) 如果获得的参数序列  $\hat{\theta}_{i,j}$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 为非时变的, 记为  $\hat{\theta}_i^*$ , 则一步预报为

$$y_{i,N+1}^* = X_{i,N} \hat{\theta}_i^{*T} \tag{7}$$

其向前  $h$  (当  $h > p_i + 1$ ) 步预报公式为

$$y_{i,N+h}^* = X_{i,N+h-1}^* \hat{\theta}_i^{*T}, \quad X_{i,N+h-1}^* = \{y_{i,N+h-1}^*, y_{i,N+h-2}^*, \dots, y_{i,N+h-p_i}^*\} \tag{8}$$

2) 如参数序列  $\hat{\theta}_{i,j}$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 为时变的, 则将其看成  $y_{i,l}$ , 重新建立自适应 AR 模型:

$$\hat{\theta}_{i,k+1} = \hat{\theta}_{i,l} a_{i,l}(k) + \hat{\theta}_{i,l-1} a_{i,l}(k-1) + \dots + \hat{\theta}_{i,l-p_i} a_{i,l}(k-p_i) + e_{i,l} = \varphi_{i,l}^T a_{i,l} + e_{i,l} \tag{9}$$

其中  $\varphi_{i,l} = \{\hat{\theta}_{i,l}, \hat{\theta}_{i,l-1}, \dots, \hat{\theta}_{i,l-p_i}\}$ ,  $a_{i,l} = \{a_{i,l}(k), a_{i,l}(k-1), \dots, a_{i,l}(k-p_i)\}$

如果得到的  $a_{i,l}$  为时变的, 则将其看成状态量, 重复上述过程直到所得参数估计为非时变的, 记为  $a_i^*$ . 如果该过程重复  $r$  次, 所得参数估计为非时变的, 则称原时变参数序列  $\hat{\theta}_{i,l}$  为  $r$  层 AR 时序变参数序列. 在此基础上, 类似 1), 可逐层建立预报公式, 进行分层预报, 最终得出  $y_i$  的预报值:

$$y_{i,N+h}^* = f\{y_{i,0}, y_{i,1}, \dots, y_{i,N}, y_{i,N+1}^*, y_{i,N+2}^*, \dots, y_{i,N+h-1}^*, a_i^*, \theta_{i,N+1}^*, \theta_{i,N+2}^*, \dots, \theta_{i,N+h-1}^*\} \tag{10}$$

基于上述理论, 在对我们所建动力学模型的参数及物理量进行实时辨识的同时, 实时地进行这种估计与预测, 能很方便的实现对加工设备机电系统的状态与故障预警.

### 2.2 突发故障检测与基于 Kullback 信息距离的故障预测

一般的故障检测及突发性故障检测一是直接由参数辨识的结果, 规定一定的阈值, 若参数变化超过该值, 则认为系统有故障, 二是对无实际参数可标定的系统, 可采用文献 [2] 的监测模型进行故障检测. 由实时辨识获得各时刻  $k$  的模型参数向量  $\theta(k)$  或各参数  $\theta_i(k)$ , 生成如下特征判据来监测:

$$\Delta\theta = \|\theta(k) - \theta(k-1)\|, \quad \Delta\theta_i(k) = \theta_i(k) - \theta_i(k-1) \tag{11}$$

$$P(k) = \frac{\|\theta(k)\|}{\|\theta(0)\|}, \quad P_i(k) = \frac{\theta_i(k)}{\theta_i(0)} \tag{12}$$

$$W(k) = \frac{|\Delta\theta_i(k)|}{\Delta\theta_i^2(k-q) + \Delta\theta_i^2(k-q+1) + \dots + \Delta\theta_i^2(k-1)} \tag{13}$$

特征  $W$  对突变故障的决策尤其敏感  $\theta(0), \theta_i(0)$  为模型参数向量和参数的正常值

对故障预报来说, 突变性故障是无法或不能预报的, 因无任何规律可循. 预报渐变性故障的一个可能方法是, 由自适应滤波器可得到系统正常运行时的参数  $H_0$ , 实际运行时的参数  $H_1$ ,  $H_1$  与  $H_0$  间的差异可反映出系统的内在变化. 如能定义一个性能指标  $D(i)$  使其与  $H_1$  和  $H_0$  的差异值成正比, 则可根据  $D(i)$  的变化进行预报. 为此, 建立刀具/工件部位动态模型和各轴动力学模型实时辨识参数的自适应 AR 模型的 Kullback 信息距离<sup>[3]</sup> 函数为

$$D_{j+1} = \ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_j^2} - 1 + \frac{1}{\sigma_j^2} \{ \sigma_0^2 + [\Phi_0 - \Phi_{j+1}]^T R_0 [\Phi_0 - \Phi_{j+1}] \} \tag{14}$$

其中, 下标 0 表示正常状态;  $j$  表示实时监测的;  $\Phi_0 = [h_{01}, h_{02}, \dots, h_{0w}]^T$ ,  $\Phi_j = [h_{j1}, h_{j2}, \dots, h_{jw}]^T$  为正常状态和实时监测时动力学模型的参数向量;  $e$  为模型残差;

$$R_0 = \begin{bmatrix} r_0(0) & r_0(1) & \dots & r_0(M-1) \\ r_0(1) & r_0(2) & \dots & r_0(M-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_0(M-1) & r_0(M-2) & \dots & r_0(0) \end{bmatrix}, \quad r_0(k) = E\{x^0(t)x^0(t-k)\}$$

给定阈值  $T$ , 当  $D_{j+1}$  超过该值时, 认为系统将发生故障, 从而实现系统的故障预警.

### 3 系统实验

针对上述模型, 在 JCS-020 加工中心和 TGX4132B 数控镗铣床上进行了在线状态监测与故障预警实验, 给出的图示为 TGX4132B 上的实验结果. 图 1 是主电机磁链异常改变时的  $P_i(k)$ , 显然系统能

实时监测其变化。图 2 是进给丝杠轴与电机轴未对正时参数  $a$  的  $P_i(k)$ ，显然超了其正常变化范围。图 3 是刀具磨损时的  $W(k)$ ，磨损时  $W(k)$  变化剧烈且超限。图 4 是进给平台摩擦阻力增大时的  $a$ 、 $\gamma$ 、 $d$  的  $P_i(k)$ ，由于摩擦增大影响三个参数的变化。图 5 是正常铣削时进给平台受突然冲击时的结果，显然能迅速监测其异常变化。参数序列送入 BA YES 决策器和预测模型可分别得到检测与预测结果，限于篇幅这里没有给出具体图示。从图上可看出文 [1] 和本文提出的动力学模型、监测与诊断预警模型是正确的、有效的。

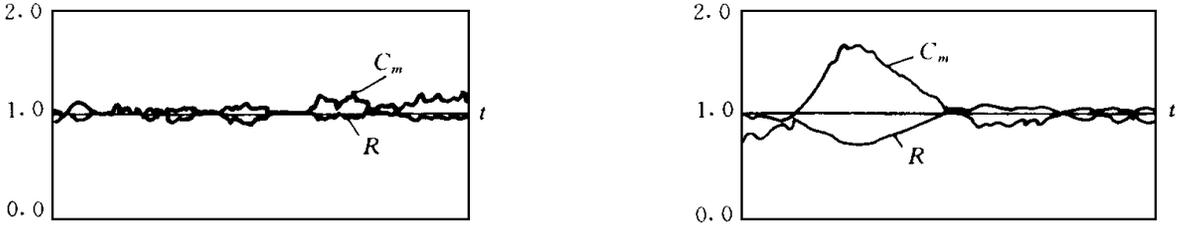


图 1 主电机磁链正常（左）与异常变化（右）

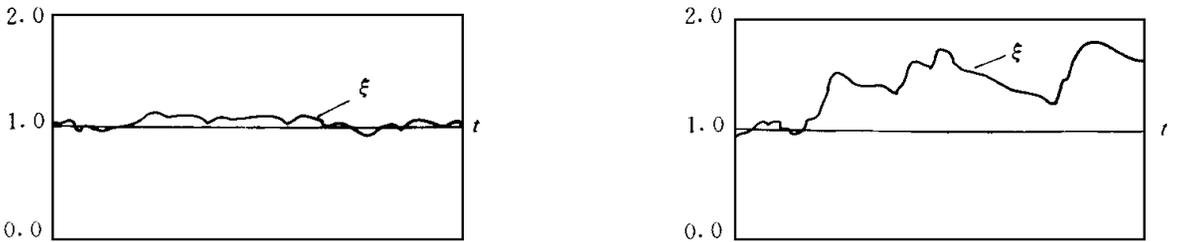


图 2 进给丝杠轴与电机轴对正（左）和不对正时（右）参数辨识结果

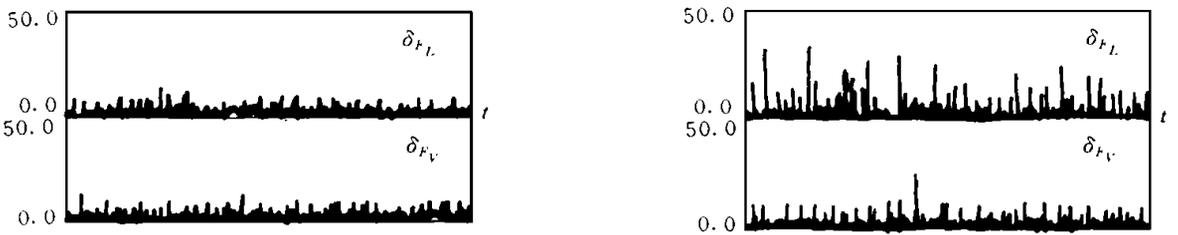


图 3 刀具正常（左）与磨损（右）状态参数辨识结果

## 4 结 论

以动力学模型的建立及参数的实时辨识结合故障检测及时变参数状态预测来判断加工系统的运行状态是一条解决复杂多变工况加工过程状态监测、故障诊断与预警的有效技术路径，其简捷快速的监测方法与策略和系统的“致简”硬件实现使之极易投入实际运用。从原理上说，可从本质上排除柔性多变工况、时变性、随机干扰等对监测与诊断及预警功能的影响，使其鲁棒性、适应性得到大大提高。进一步的工作将集中在建立 FMS 加工系统在线实时的状态监控、故障诊断与故障预警系统上。

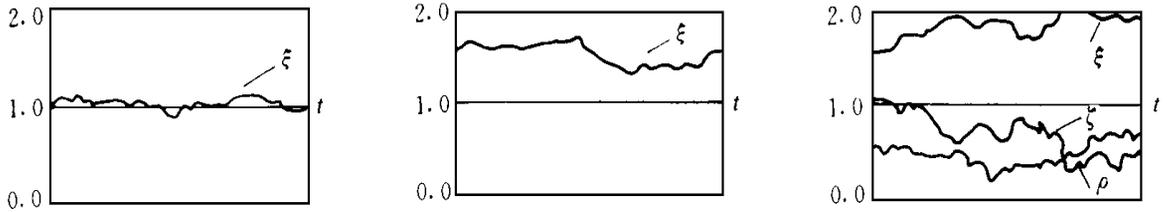


图4 进给平台正常 (左)、空载 (中) 和切削 (右) 时摩擦阻力增大的参数辨识的结果

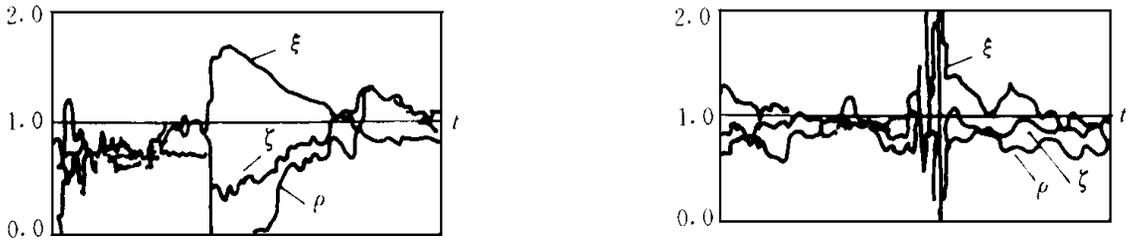


图5 切削中进给轴被突然冲击受阻的参数辨识结果 (左为主轴, 右为进给轴)

## 参考文献

- 1 邱静, 温熙森, 胡政. 柔性加工设备机电系统的动力学模型及辨识. 国防科技大学学报, 1998 20 (2): 31~ 35
- 2 邱静, 温熙森, 唐丙阳等. 面向柔性加工环境的过程状态振动监测. 国防科技大学学报, 1993 15 (3): 109~ 115
- 3 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术. 北京: 清华大学出版社, 1994 59~ 63
- 4 杨为钦, 顾岚. 时间序列分析与动态过程建模. 北京: 北京工业学院出版社, 1986 417~ 427
- 5 汤兵勇. 模糊模型的辨识及应用. 北京: 中国环境科学出版社, 1994