

柔性加工设备机电系统的动力学模型与辨识*

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 在剖析柔性加工设备机电系统结构、信息传递链等基础上,建立柔性加工设备机电系统较精确的动力学模型,并研制相应硬件,实现实时在线模型参数辨识,排除变工况与加工过程的时变性对状态监测与故障诊断的影响,为实现柔性加工环境下多变工况加工过程的实时状态监测、故障诊断与故障预警打下基础。

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 TN165·3

The Dynamic Models and Their Identification of Mechanical-Electronic Systems of the Flexible Machining Device

Qiu Jing Wen Xisen Hu Zheng

(Department of Mechatronic Engineering and Instruments, NUDT Changsha Hunan, 410073)

Abstract Based on the analysis of the system structure, information flow path of the flexible machining device, we have built up the precise dynamic model of mechanical-electronic systems of the machining center, and developed the hardware to realize the real-time identification of parameters of the models. It is a strong base both for building up a real-time condition monitoring, fault diagnosis and prediction system and for getting rid of the influence of the changeful machining mode and the factor of time-varying in the FMS environments.

Key words Flexible machining device, Mechanical-electronic system, Dynamic model Condition monitoring, Fault prediction

基于状态的预维修技术(CBM)是柔性制造系统(FMS)投入应用后亟待解决的技术关键。FMS的柔性多变特点使得实时状态监测与故障诊断实现起来较困难。目前的监测与诊断大多是基于系统的各种外部表征提取加工过程的各种征兆信息,如振动加速度信号、声发射信号等进行特征提取、系统建模,实现状态监测与故障诊断。其鲁棒性较差,抗随机干扰能力差。与此同时,故障预警也提到越来越重要的地位,出于相同原因及加工过程的时变性,该技术也未能很好解决^{[5][6][7]}。因此,柔性制造环境下在线实时的故障监测、诊断与预警仍是要解决的关键技术。

基于模型及参数辨识的状态监测思想早已提出并应用^{[10][11]},其鲁棒性、抗干扰能力和自适应能力非常强。由于加工设备的机电系统动力学模型无法解析获得,其模型参数构成的物理意义不明晰,该方法未能应用于FMS的状态监测与故障诊断。本文试图从建立加工系统精确动力学模型入手探讨从本质上排除各种随机干扰、变工况及时变性对监测与预警的影响,为实现柔性加工环境下的实时状态监测、故障诊断与预警打下基础。

* 国防预研基金资助项目
1997年6月26日收稿
第一作者: 邱静,男,1964年生,副教授

1 机电系统动态模型

加工设备机电系统由主轴电机与传动系统、各进给电机与传动系统、刀具工件部位等主要环节组成,可分别建立动力学模型。

1.1 刀具工件部位切削状态动态模型

刀具切削状态监控模型很多^{[6][7][9]},效果也较显著。如建立切削力与切削参数关系的经验公式^{[6][9]},再以实际切削过程辨识其系数来判断刀具状态。该模型对定机床、定材料、定某一类刀具及稳态切削过程的监测效果较好。本文采用对动态切削力和进给力建立六阶自适应AR模型来表征其切削状态,以模型参数变化率表征其状态变化。其模型为:

$$F(k) = \sum_{i=1}^6 a_i F(k-i) + \sigma^2(k) \quad (1)$$

$$\Delta\theta(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{\theta(k)} \quad \text{其中 } \theta = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \quad (2)$$

1.2 主轴与各进给轴动力学模型

借鉴文献[1]的结论,经进一步推导可得主轴机电系统动力学方程为:

$$L_m \frac{di_m}{dt} = u_m - c_{m_m} \omega_m - R_m i_m \quad (3)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + M_{om} + \alpha_m T_m = c_{m_m} i_m \quad (4)$$

其中,下标 m 表示主轴的; B 为机床主传动系统等效到电机轴上的粘性阻尼系数; M_{om} 为机床主传动系统等效到电机轴上的非载荷库仑摩擦力矩; α 为系统载荷耗损系数; J 为机床主传动系统等效到电机轴上的转动惯量; c_m 为电机电磁常数; i, u, ω 为电机的电流、电压、转速; R, L 为电机内阻和电感; T 为主轴切削扭矩。

柔性加工设备进给系统一般分丝杠传动系统和小齿轮—齿条传动系统两类。剖析其结构,分析其特征,为不失一般性,可将进给丝杠传动(齿轮连接电机轴与传动丝杠轴)系统的结构描述成图1所示。

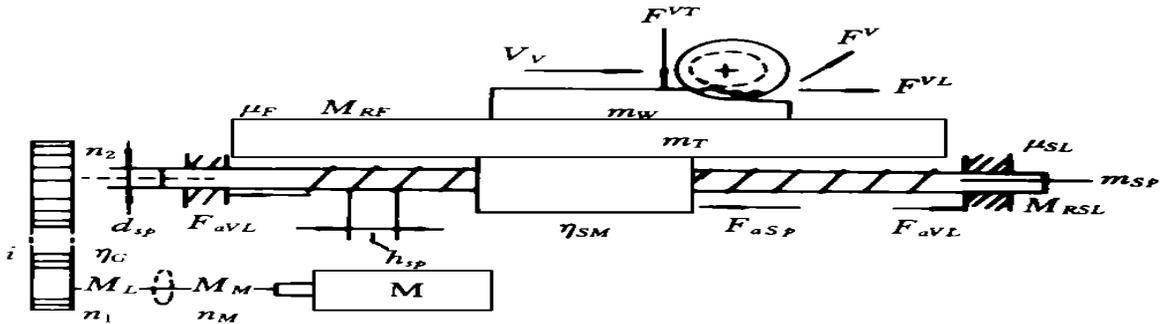


图1 带齿轮连接的进给丝杠系统结构模型

经详细的推导^{[1][2][3][4]},进给轴机电系统动力学方程为:

$$L_{fi} \frac{di_{fi}}{dt} = u_{fi} - c_{mfi} \omega_i - R_{fi} i_{fi} \quad (5)$$

$$J_{fi} \frac{d\omega_i}{dt} + \xi_{fi} + \zeta_{fi} F_{fi}^{VL} + \rho F_{fi}^{VT} = c_{mfi} i_{fi} \quad (6)$$

其中,对于进给丝杠传动装置:

$$\xi = \frac{\mu r h_{SP} (m_w + m_T) g}{2\pi \eta_{SM} \eta_{Ci}} + \frac{\mu_{SL} d_{mL} F_a^{VL}}{2\pi b_i} \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{h_{SP}}{2\pi \eta_{SM} b_i} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\mu_F h_{SP}}{2\pi\eta_{SM}\eta_{Gi}} \tag{9}$$

$$J = \frac{(m_W + m_T)gh_{SP}^2 + 4\pi J_1 + 4\pi^2 J_{SP}}{4\pi^2 i^2} + J_{G1} + \frac{J_{G2}}{i^2} + J_M \tag{10}$$

对于小齿轮—齿条传动装置:

$$\xi = \frac{\mu_{FT Ri}(m_W + m_T)g}{\eta_{Gi}} \tag{11}$$

$$\zeta = \frac{r_{Ri}}{\eta_{Gi}} \tag{12}$$

$$\rho = \frac{\mu_{FT Ri}}{\eta_{Gi}} \tag{13}$$

$$J = \frac{(m_W + m_T)r_{Ri}^2 + J_1 + J_{Ri}}{i^2} + J_{G1} + \frac{J_{G2}}{i^2} + J_M \tag{14}$$

下标 f_i 表示各进给轴, 且 i 取 1, 2, 3, 4, ..., 代表不同的进给轴; ζ 为机床进给传动系统等效到电机轴上的粘性阻尼系数; ξ 为机床进给传动系统等效到电机轴上的非载荷库仑摩擦力矩; ρ 为系统载荷损耗系数; m_W 为工件质量; m_T 为进给导板质量; μ_F 为进给驱动装置滑动件摩擦系数; F^V 为切削力; F^{VT} 为垂直于滑动件的切削力分量; F^{VL} 为平行于导板方向的切削力分量; h_{sp} 为进给丝杠的导程; J_{SP} 为进给丝杠的转动惯量; μ_{SL} 为进给丝杠轴承的摩擦系数; η_{SM} 为进给丝杠螺母的效率; F^{VL} 为除进给丝杠的预加负载之外而加于进给丝杠轴承上的轴向预加负载(或由于机械加工力 F^{VL} 而产生的轴向负载; 对于轴承而言, 没有预加负载); M_M 为电机转矩; M_L 为负载转矩; n_M, n_1 为电机转速; n_2 为齿轮转速; J_M 为电机转动惯量; J_{Gev} 为齿轮转动惯量(作用于轴 1 上); J_{G1} 为齿轮 1 的转动惯量; J_{G2} 为齿轮 2 的转动惯量; J_1 为联轴器转动惯量(一些传动系统直接以联轴器与电机轴相连, 无齿轮连接); η_i 齿轮传动装置的效率, 在没有齿轮传动时, $\eta_{Gi} = 1$; i 为传动比, 在没有齿轮传动装置的情况下, $i = 1$; d_{mL} 为轴承的平均直径; r_{Ri} 为小齿轮—齿条系统的齿轮半径; J_{Ri} 为小齿轮—齿条系统的齿轮转动惯量。

显然, 由方程(3) ~ (6) 系数的变化能判定加工设备机电系统各部件的性能状态, 同样, 加工设备电系统如出现异常, 必然会反映在其动态模型的系数中。

2 状态检测与参数辨识实现

从系统的动态模型可知, 实现系统参数的实时辨识, 仅需少量的状态变量(电流、电压、转速、切削力), 且大多可直接利用加工系统内部信号。当用于实时状态监测与故障预警时还需加工过程、加工工艺等参数, 为此, 将加工系统 PLC 的信息由 RS232C 接口联入微机。其硬件系统实现如图 2 所示。

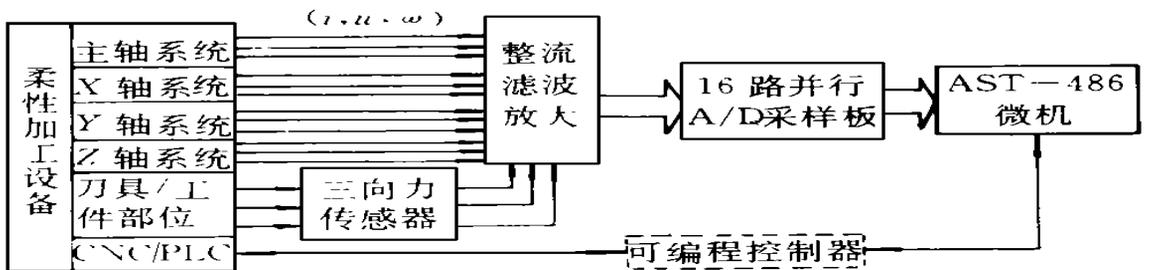


图 2 基于动态模型的监测与故障预警系统硬件图

为方便连续地进行参数的实时在线辨识, 将动力学方程(3) ~ (6) 的导数项移到方程右边, 并离散化, 考虑噪声干扰, 写成状态方程:

$$Y = \theta X + e \tag{15}$$

实时获取各电机的电流、电压和转速, 切削时的切削力(扭矩), 采用系统辨识中 UDU 分解和带遗忘因子的辅助变量法的递推辨识算法^[8]实时获取其模型参数。

$$\begin{aligned} \text{遗忘因子取: } \eta_{i+1} &= \alpha \eta_i + (1 - \alpha) \\ \eta_0 &= 0.95, \alpha = 0.99 \end{aligned} \quad (16)$$

以加强在算法开始阶段对瞬变过程的指数性数据加权。

由于模型参数与加工过程、加工工况无关,且为反应系统本质状态的量——结构及系统的物理参数,因此将它应用于状态监测与故障预警,其准确性、适应性和抗干扰能力将很强。

该系统在 JCS-020 加工中心及 TGX4132B 数控镗铣床上进行了铣削实验验证,包括各种空载状态、各种正常状态切削、电机磁链增加、进给丝杠与电机轴未对正、刀具磨损、进给轴联动的变工况切削等。结果表明所建动力学模型正确、有效。具体监测与诊断结果见另文发表。

3 结论

以建立加工设备机电系统精确动力学模型为基础,判断加工系统的运行状态,是解决复杂多变工况加工过程的状态监测、故障诊断与预警的可行理论与技术路径之一。其难点与关键是的建立物理意义明确的精确的动力学模型,并能在实际加工过程中快速有效地辨识出来。本文成功的实现了这一点,为下一步的实时状态监测与故障预警打下了基础。下文将进一步论述基于本文动力学模型及参数辨识的状态监测、诊断与预警模型及实验结果。

参考文献

- 1 刘飞、徐宗俊. 机床主动系统能量传输数学模型. 重庆大学学报, 1990, 13(2): 8~14
- 2 许实章. 电机学(上、下册). 北京: 机械工业出版社, 1980: 56~80
- 3 Hans Gross. Electrical Feed Drives for Machine Tools, John Wiley&Sons Ltd, 1983: 70~120
- 4 吴善元. 金属切削原理与刀具. 北京: 机械工业出版社, 1995: 127~149
- 5 Jemiecniak K. Difficulties in Time Life Prediction When Tuning With Variable Cutting Parameters. Annals of CIRP, 1995, 34(1): 27~34
- 6 Martin K F. A Review By Discussion of Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Machine Tools. Int. J. Mach. Tools Manufact. 1994, 134(4): 527~551
- 7 Koren Y, et al. Flank Wear Estimation Under Varying Cutting Conditions. Journal of Dyn. Syst. Measurement and Control, 1991, 113(6): 324~329
- 8 蔡季冰. 系统辨识. 北京: 北京理工大学出版社, 1989
- 9 万军. 先进制造中加工过程智能建模与监测技术研究: [博士论文]. 清华大学精密机械与仪器系. 1996
- 10 Isermann R. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods—A Survey. Automatica, 1984, 20(4): 387~404
- 11 Leyval L, Gentil S, et al. Model Based Causal Reasoning for Process Supervision. Automatica, 1994, 30(8): 1295~1306