

基于灰色预测理论的转子系统振动主动控制

刘永寿 支希哲 顾致平 岳珠峰

(西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

摘要 以灰色预测控制理论为基础,采用现代控制理论中的二次型优化原理,以控制力和响应加权最小为目标函数,设计了两种基于灰色预测理论的转子系统振动主动控制方案——灰色 GM(1,1)预测优化控制方案和灰色 Verhuslt 预测优化控制方案.并将该两种方案分别应用于带电磁阻尼器转子轴承系统的转子振动主动控制中,通过数值仿真验证了两种控制方法的有效性,并对两种方法的控振效果进行了比较.

关键词 转子系统,振动主动控制,灰色 GM(1,1)预测优化控制,灰色 Verhuslt 预测优化控制

引言

随着现代旋转机械的发展,转子振动主动控制的理论和方法研究日益受到国内外重视.已提出诸如变支承刚性主动控制、输出反馈控制、最优控制、激振力反馈、模态控制、优化转子加速度、开环控制等多种控制方法,但这些控制方法通常都要求转子系统的精确的数学模型,同时状态向量数目多,控制电路复杂,都不同程度的存在着滞后问题.

灰色控制理论是现代控制理论的新发展,它采用的是灰色系统理论中的新陈代谢模型,是通过系统行为数据列的提取,寻求系统发展变化规律,从而按照规律预测系统未来的行为,并根据系统未来的行为趋势,采取相应的控制决策进行预控制,其突出特点是建模迅速,对环境、参数的随机扰动反应灵敏,可以做到防患于未然,控制及时,具有较强的适应能力,能够克服滞后问题^[1].基于以上优点,已有研究者将灰色系统理论应用于转子振动控制中,已取得了一定的成果^[3,4].本文以灰色预测控制理论为基础,采用现代控制理论中的二次型优化原理,以控制力和响应加权最小为目标函数,设计了两种基于灰色预测理论的转子系统振动主动控制方案——灰色 GM(1,1)预测优化控制方案和灰色 Verhuslt 预测优化控制方案.并将该两种方案分别应用于带电磁阻尼器转子轴承系统的转子振动主动控制中.进行的数值仿真结果显示,基于灰色预测理论的两种控制方法不仅能够抑制转

子系统在加速过程的振动,而且对转子在某一工况运行也有较好的抑振作用;仿真结果同时表明,两种控制方法中,灰色预测优化控制方法的控振效果要好于灰色 Verhuslt 预测优化控制方法.

1 灰色预测控制原理

灰色预测控制是通过系统的行为数据,寻找系统发展的规律,按照规律预测系统未来的行为,根据系统未来的行为趋势,采取相应的控制决策进行控制.

灰色预测控制原理如图1示,即由采样装置对控制对象的输出向量 X_0 进行采集、整理;再由灰色预测模块进行建模,计算出以后若干步的预测值,最后在

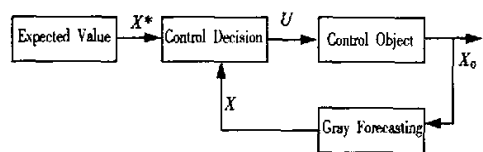


图1 灰色预测控制原理示意框图

Fig. 1 Gray forecasting control method

控制决策环节中,比较预测值 X 与给定值 X^* ,以确定合适的控制量 U ,此 U 作用在被控对象上,使未来的 X 能够尽量地接近期望值 X^* .

2003-08-28 收到第一稿,2003-11-17 收到修改稿.

- 陕西省自然科学基金资助项目(99CS1601),陕西教育厅专项科研计划资助项目(00JK138),西北工业大学青年教师创新基金资助项目(Y16141).

2 基于灰色预测理论的转子系统振动控制方案

2.1 控制方案设计

采用灰色模型作为预测模块,用现代控制理论中的二次型优化求解控制力. 用于转子系统振动主动控制的灰色预测优化控制系统方案具体设计如图 2 所示. 图 2 中,由采样装置对转子系统的输出位移向量进行采集、整理;再由灰色预测模块进行建模,

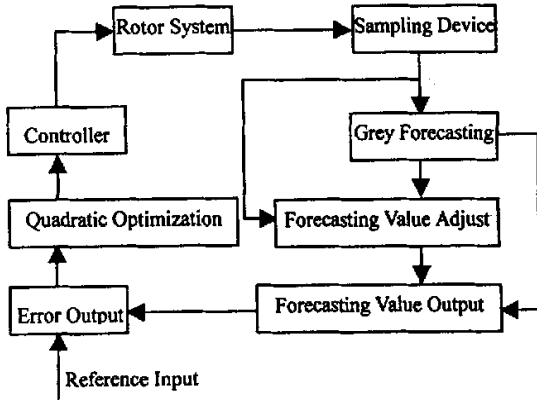


图 2 灰色 Verhuslt 预测优化控制方案图
Fig. 2 Gray forecasting-optimal control method

计算出以后若干步的预测值,对预测值进行修正后,比较预测值与给定值,得到误差输出,通过二次型性能指标优化计算出需要施加的控制力,由作动器执行优化计算模块计算出的控制力,从而实现控振目的:

2.2 灰色 GM(1,1)预测模型和灰色 Verhuslt 预测模型

在图 2 的控制方案中,对于环节 3 的灰色预测模块,分别采用灰色 GM(1,1)预测模型和灰色 Verhuslt 预测模型,所形成的控制方案分别称之为灰色 GM(1,1)预测优化控制方案和灰色 Verhuslt 预测优化控制方案. 以下是用于转子振动主动控制的灰色 GM(1,1)预测模型和灰色 Verhuslt 预测模型的具体建模过程.

定义 灰色模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^a$ 当实数 $a=0$ 时,称为灰色 GM(1,1)模型; $a=2$ 时,称为灰色 Verhuslt 模型.

用于转子系统的灰色预测模型建模过程如下:根据当前时刻转子系统位移输出的采样值 $x(n)$ 及在该采样时刻之前不同时刻的采样值 $x(n-3), x(n-2), x(n-1)$,按以下步骤可以求得系统输出的一

步预测值. n 为当前采样时刻.

1) 由上述数据生成原始数据列

$$x^{(0)}(k) = x(n+k-4), (k=1,2,3,4)$$

2) 对 $x^{(0)}$ 作一次累加(1-AGO)

$$x^{(1)}(k) = \text{AGO} \cdot x^{(0)} = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), (k=1,2,3,4)$$

3) 生成相邻均值序列 $z^{(1)}$

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], (k=2,3,4)$$

4) 建立灰色模型的白化方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b(x^{(1)}(k))^a$$

5) 求数据矩阵 B 和数据向量 Y_n

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ -z^{(1)}(4) & (z^{(1)}(4))^2 \end{bmatrix}; Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \end{bmatrix}$$

6) 求灰色模型的参数:记 \hat{a} 为参数向量

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$$

7) 求出白化形式微分方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \frac{a}{b \left(1 + \left(\frac{b}{ax^{(0)}(1)} - 1 \right) e^{-ak} \right)}$$

8) 作一次累减生成(1-IAGO),得到一步预测值

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \text{IAGO} \cdot \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$$

9) 由灰色预测模块求出 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$ 和还原值 $\hat{x}^{(0)}(k)$;由预测值校正模块得到模型校正值

$$e(k) = x(k) - \hat{x}^{(0)}(k),$$

最后得到输出的预测值

$$x_p = \hat{x}^{(0)}(k+1) + he(k) \quad (1)$$

式中 h 为加权系数^[5].

需要说明的是,1)在建立灰色预测模型的过程中,为满足建模对初始数据的要求,需要对数据进行等间距处理和数据提升的预处理,详见文献[5].

2)灰色 GM(1,1)预测模型和灰色 Verhuslt 预测模型的建模过程基本一致,只是在建模的第四步(建立灰色模型的白化方程)时,对于灰色 GM(1,1)预测模型,则 $a=0$;而对于灰色 Verhuslt 预测模型,则 $a=2$.

2.3 转子系统最优控制力

在外激励力作用下并受控制力控制的转子轴承系统的振动方程可表示如下

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = f(t) + K_u u(t) \quad (2)$$

其中 z 为 n 维复向量物理坐标, M 为正定对称质量

矩阵, K 是考虑陀螺效应和弹性支承的刚度矩阵, C 是考虑陀螺效应和弹性支承的阻尼矩阵, $f(t)$ 是 p 个频率相同、相位和幅值不一定相同的简谐外激励力, $u(t)$ 为控制力, K_u 为控制力矩阵.

可以推导出受控制力控制的转子轴承系统的强迫响应的幅频响应

$$Z = H(\omega)(F + K_u U) \tag{3}$$

时域响应

$$z = H(\omega)(f(t) + u(t)) \tag{4}$$

其中 $H(\omega) = (-\omega^2 M + j\omega C + K)^{-1}$.

为了使稳态不平衡响应受到最优控制, 定义如下二次型目标函数

$$J = \frac{1}{2} (Z^* Q Z + U^* R U) \tag{5}$$

其中 Z, U 分别是位移向量、控制向量, $*$ 表示转置共轭, 式中 Q 是 $n \times n$ 维半正定状态加权矩阵, R 为 $m \times m$ 维半正定控制力加权矩阵. 当 J 取得最小值时, 可求得系统的最优控制力为:

$$u = -Bz \tag{6}$$

其中 $B = K_u^* H(\omega)^* Q$. 根据前述所建立灰色预测模型(灰色 GM(1,1) 预测模型和灰色 Verhuslt 预测模型), 对每一振动方向按照(1)式进行预测, 得到 $x_{1p}, x_{2p}, \dots, x_{np}; y_{1p}, y_{2p}, \dots, y_{np}$ 然后组成 $Z_p =$

$$\begin{bmatrix} x_{1p} + jy_{1p} \\ x_{2p} + jy_{2p} \\ \vdots \\ x_{np} + jy_{np} \end{bmatrix}; Z_p \text{ 与参考输入 } Z, \text{ 构成如下控制量: } u$$

$= -B(z_p - z_r)$, 由于希望振动位移为零, 所以 $z_r = 0$. 从而获得基于灰色预测理论转子优化控制下的强迫响应

$$z = H(\omega)(f(t) + K_u B Z_p) \tag{7}$$

3 数值模拟

如图 3 所示的单盘对称转子轴承系统^[2], 假设

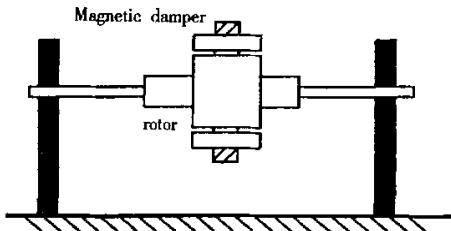


图 3 单盘对称转子轴承系统
Fig. 3 A symmetric rotor bearing system

转轴是对称的, 支承也是对称的, 作动器为电磁阻尼器. 电磁阻尼器由定子和转子组成, 定子是由磁性材料, 如矽钢片叠装成, 其上绕有四个独立的线圈, 当线圈上通入电流后就产生四个电磁力, 在 x 轴正负方向两个磁力和在 y 正负方向两个控制力, 这四个力组成 x, y 方向两个控制力, 正是这两个控制力控制转子的振动.

受电磁阻尼器控制的单盘对称转子轴承系统具体参数如下: 圆盘质量 $m_d = 1 \text{ kg}$, 轴颈参振质量 $m_b = 0.05 \text{ kg}$, 轴的阻尼和刚度系数: $C = 16 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$, $K = 6 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}$; 不平衡偏心量: $e_1 = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$. 轴承的阻尼和刚度系数: $K_{xx} = 6 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}$, $K_{yy} = -K_{xy} = 0$; $K_{yy} = 6 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}$; $C_{xx} = 20 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$, $C_{yy} = 20 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$; $C_{yx} = C_{xy} = 0$. 电磁阻尼器的结构参数如下: $\mu_0 = 4\pi \times 10^7 \text{ N}/\text{A}^2$, $s = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; $N = 500$; $\beta = 22.5^\circ$; $C_0 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ m}$; $\mu_r = 5000$; $L = 0.2 \text{ m}$; $I_0 = 0.1 \text{ A}$

控制系统采用 MATLAB 编程进行计算机仿真, 转子要经历启动、加速, 最后稳定在 $\omega = 500 \text{ rad}/\text{s}$ (工作转速) 的转速下. 在加速过程中, 经过一阶临界转速.

3.1 在转子加速中的情况

取采样周期 $\omega t = 0.2$, 状态加权矩阵 $Q = \begin{bmatrix} 15 & 0 \\ 0 & 45 \end{bmatrix}$. 受电磁阻尼器控制的单盘对称转子轴承系统加速过程中, 分别采用前述为灰色 GM(1,1) 预测优化控制方法和灰色 Verhuslt 预测优化控制方法对转子系统施以控制, 加控制前后转子在方向 y 的时域响应如图 4 所示. 图 4 中, Y_1 表示转子在 y 方向的未加控制时的时域响应, Y 表示转子在 y 方向施加灰色 GM(1,1) 预测优化控制后的时域响应, Y_2 表示转子在 y 方向加控制灰色 Verhuslt 预测优化控制后的时域响应.

由图 4 可以看出: 不加控制时转子最大位移分别是 $4.1191 \times 10^{-4} \text{ m}$, 经过灰色 GM(1,1) 预测优化控制后转子最大位移分别是 $2.3435 \times 10^{-4} \text{ m}$, 为不加控制时 57%; 经过灰色 Verhuslt 预测优化控制后转子最大位移分别是 $2.3548 \times 10^{-4} \text{ m}$, 为控制前 57%. 所以经过这两种灰色预测优化控制后, 转子系统都能够在共振区有效地降低振幅. 但是图 4(c) 中存在毛刺, 说明灰色 Verhuslt 预测模块存在预测严重失效的地方. 但是由于应用新陈代谢模型的缘故, 避免了某一模型的预测失效引起以后的一系列失效, 所以仍然取得了较好的控振效果.

3.2 转子稳定转速下的情况

受电磁阻尼器控制的单盘对称转子轴承系统在 $\omega = 500 \text{ rad/s}$ 即转速 $n = 4774 \text{ rad/min}$ 稳定转速下,取采样周期 $T = 0.0002 \text{ s}$,状态加权矩阵 $Q = \begin{bmatrix} 9 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 4 \times 10^4 \end{bmatrix}$,分别用灰色 GM(1,1)预测优化

控制方法和灰色 Verhuslt 预测优化控制方法对转子系统施以控制,加控制前后的时域响应如图 5 示.图 5 中,YYW 表示转子在 y 方向未加控制时的时域响应,YW 表示转子在 y 方向加灰色 GM(1,1)预测优化控制后的时域响应, Y_2W 表示转子在 y 方向加灰色 Verhuslt 预测优化控制后的时域响应.

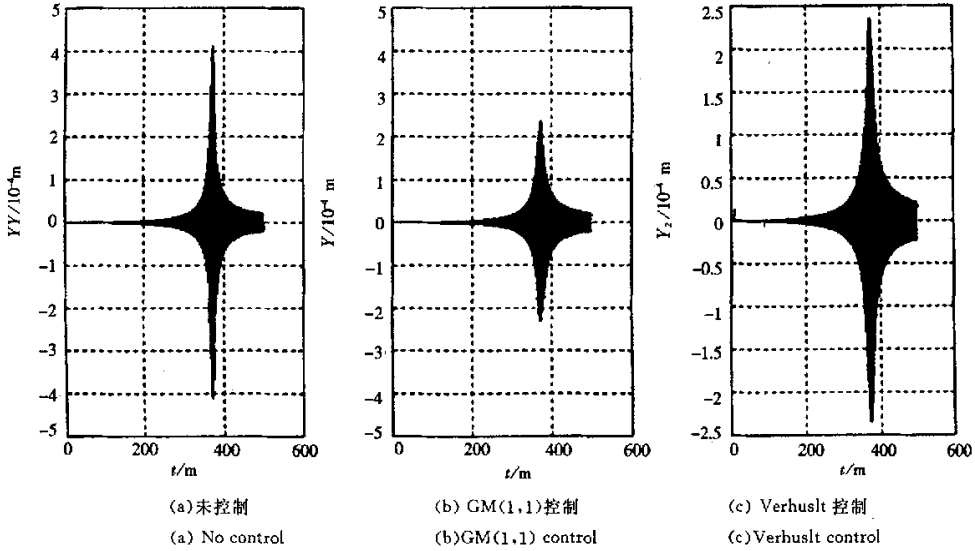


图 4 转子加控制前后的时域响应图
Fig. 4 The response of the rotor system

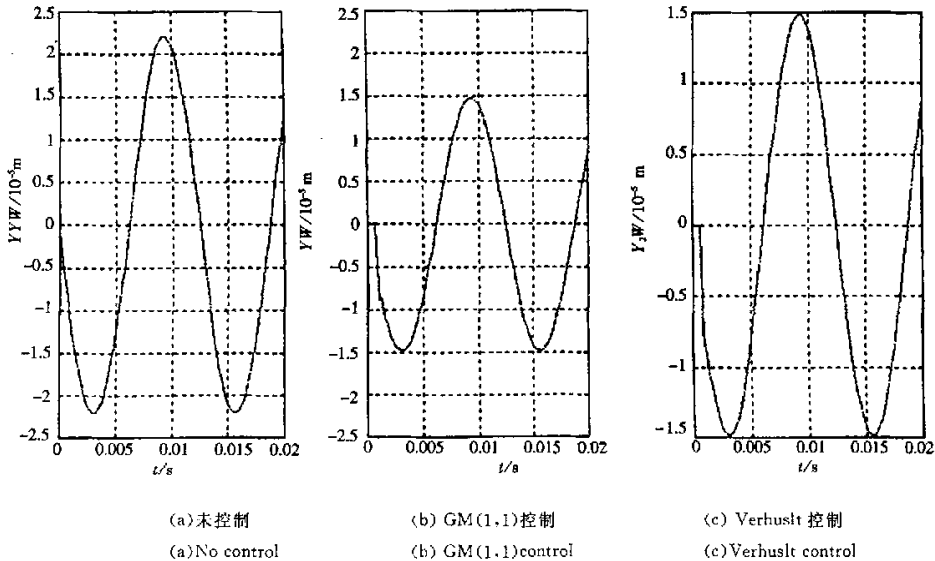


图 5 转子加控制前后的时域响应图
Fig. 5 The response of the rotor system

从图 5 中可以看出:不加控制时转子最大位移分别是 $2.2067 \times 10^{-5} \text{ m}$. 经过灰色 GM(1,1)预测优化控制后转子最大位移分别是 $1.4802 \times 10^{-5} \text{ m}$,

为不加控制时的 67%. 经过灰色 Verhuslt 预测优化控制后转子最大位移是 $1.4866 \times 10^{-5} \text{ m}$,为控制前的 67%. 所以经过这两种灰色预测优化控制后,能

够较为有效地降低转子系统在正常工作时的振幅。

在上述分析中,我们只分析了转子的径向振动,在轴向的振动分析中,灰色 GM(1,1)预测优化控制的控振效果要明显优于灰色 Verhuslt 预测优化控制,两种方法的转子振幅分别为 1.4788×10^{-5} m 和 1.845×10^{-5} m。从上述情况可以看出,两种灰色预测优化控制不仅能够抑制转子系统在加速过程的振动,而且在某一工况情况下也有较好的抑振作用。

4 结论

1)首次提出了用于转子系统振动的灰色控制方法——基于灰色预测理论的转子系统振动控制方法。该方法从另一角度来考虑转子系统建模,即以时间为自变量,以振动位移为因变量来建立转子系统灰色一元预测模型,从而克服了转子系统建模难、非线性、不确定性等问题。

2)采用现代控制理论中的二次型优化原理,以控制力和响应加权最小为目标函数,来确定施加的控制力。

3)采用两种灰色预测模型,建立了两种转子振动的灰色预测优化控制方法——灰色 GM(1,1)预测优化控制方法和灰色 Verhuslt 预测优化控制方法。两种预测模型要求测量数据少,精度低;建模简单、迅速,同时,具有超前性和预测性。

4)灰色 GM(1,1)预测优化控制方法和灰色 Verhuslt 预测优化控制方法对转子的振动控制具有几乎相同的效果。考虑建模的难点和对转子轴向振动的控制效果,应该采用灰色 GM(1,1)预测优化控制方法。

5)由理论分析和仿真计算结果可以看出,灰色预测优化控制不仅能有效抑制转子系统在加速过程的振动,而且对转子在某一工况下的振动也有较好的抑制作用。

参考文献

- 1 邓聚龙. 灰色控制系统(第二版). 武汉:华中理工大学出版社,1993(Deng Julong. Gray Control System(Second edition). Wuhan: HUST Press. (in Chinese))
- 2 董水光,汪希萱. 物理空间下转子轴承系统电磁阻尼器的最优控制研究. 振动与冲击,1995(3):27~32(Tong shuiguang, Wang Xixuan. Research on optimum control of electromagnetic damper in a rotor-bearing system in physical space. *Journal of Vibration and Shock*, 1995(3):27~32(in Chinese))
- 3 Zhi Xizhe. Application of grey system theory to controlling vibration. *The Journal of Grey System*, 1997,9(1):32~35
- 4 朱西平,支希哲,刘永寿,等. 转子系统振动的灰色预测控制研究. 机械科学与技术,2002,21(1):97~99(Zhu Xiping, Zhi Xizhe, Liu Yongshou, et al. The study of grey forecasting control for the vibration of rotor system. *Mechanical and Technology*, 2002,21(1):97~99(in Chinese))
- 5 王三舟. 转子系统振动的灰色控制方法研究. [硕士论文]. 西安:西北工业大学,2002(Wang Sanzhou. The study of gray control methods for the vibration of rotor system. [MSC Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Master Articles, 2002 (in Chinese))

THE GRAY FORECASTING CONTROL FOR VIBRATION OF ROTOR SYSTEM*

Liu Yongshou Zhi Xizhe Gu Zhiping Yue Zhufeng

(*Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

Abstract This paper proposed two control methods for the vibration of rotor system — gray GM(1,1) forecasting-optimal control method and gray Verhuslt forecasting-optimal control method. Based on the gray forecasting theory, using the optimization control method of the modern control theories, and modeling by gray GM(1,1) and gray Verhuslt model, a gray forecasting-optimal control scheme was designed for a symmetric rotor bearing system, which has a single round plate. The simulation result shows that the two methods are efficient for the vibration control of rotor system.

Key words rotor system, vibration active control, grey forecasting-optimal control, grey Verhuslt forecasting-optimal control

Received 28 August 2003, revised 17 November 2003.

- * The project supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province(99CS1601), Special Scientific Research Project of Shanxi Province Education Bureau(00JK138) and NPU Teachers Scientific and Technological Innovation Foundation(Y16141).