

转子系统振动的灰色关联控制方法研究*

刘永寿 支希哲 顾致平 朱西平

(西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

摘要 将灰色关联控制理论应用于转子系统的振动主动控制, 设计了转子系统振动的灰色关联控制方案. 该方案依据转子工作曲线和实测曲线的关联度实现对转子振动的控制, 因此不需要转子系统的精确的数学模型, 具有建模迅速, 控制及时、准确, 便于工程实现等优点. 将该方案应用于一带电磁阻尼器的单盘转子系统的振动主动控制中, 仿真结果验证了该控制方法的有效性.

关键词 转子系统, 振动主动控制, 灰色关联控制

引言

对于高速转子系统, 振动问题是一个比较突出且难以解决的问题. 按传统的设计方法, 一旦机器设计完毕, 然后制造出来, 那么机器的刚度和阻尼值基本上不可变, 使得机器工作时的最佳刚度和阻尼值不一定能适应机器过临界时的需要, 反之亦然. 此外, 由于各种因素的影响使得实际机器的临界转速难以避开工作转速而容易引起共振. 再有, 实际机器的振动现象、机理的复杂性, 结构参数不一定恰当, 强迫力难以估计得很精确, 因此要得到转子系统的精确的数学模型是困难的. 同时, 控制系统的实施必须考虑经济性和实际应用过程中的空间几何条件的限制. 因此, 转子振动问题是一个用常规控制方法比较难以解决的问题.

灰色关联控制是在对系统进行灰色关联分析的基础上根据灰色关联度进行控制的一种先进的控制方法. 它建模简单, 不需要系统的精确的数学模型, 有很强的实用性^[1]. 本文首次将灰色关联控制理论应用于转子振动主动控制问题研究之中, 设计了相应的控制方案, 并将其应用于带电磁阻尼器的转子轴承系统的振动控制中, 做了计算机仿真, 显示出控振效果良好. 本文的研究不仅拓展了灰色控制系统的应用范畴, 也为转子振动主动控制方法的研究提供了新的思路.

1 灰色关联控制原理

灰关联控制系统是对一般控制系统附加灰关联控制器而得的, 它通过灰关联度 $\gamma(J, Y)$ 确定控制向量, 从而使输出向量与目标向量的关联度不超

出某一预定的范围. 灰关联控制系统如图 1 所示. 设 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为输出向量, $J(j_1, j_2, \dots, j_m)^T$ 为目标向量. 若控制向量 $U(u_1, u_2, \dots, u_s)^T$ 中元素满足 $u_k = f_k(\gamma(J, Y))$, $k = 1, 2, \dots, s$ 其中 $\gamma(J, Y)$ 为输出向量 Y 与目标向量 J 的灰色关联度, 则称系统控制为灰关联控制.

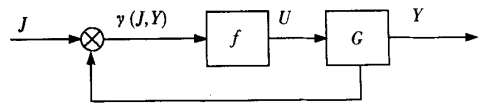


图 1 灰关联控制系统框图
Fig. 1 Gray-related control system

2 转子系统振动的灰关联控制方案设计

不考虑转子控制系统实际工程应用的空间几何条件的限制, 可以利用实验等技术手段, 得到转子正常工作时的幅频响应曲线, 以此工作曲线作为关联控制的参考曲线, 曲线上采集的离散数据序列作为参考数据序列, 用实际测得的数据序列和此参考数据序列作灰关联分析, 以其灰关联度进行控制. 控制框图如图 2 所示, 转子系统的位移信号通过传感器测量, 由采样装置采集测振设备得到的振幅, 通过灰关联控制器的作用, 产生控制量, 该控制量输入作动器, 由作动器产生控制力, 从而控制转子系统的振动. 其中的灰关联控制器设计如图 3 所示. 图 3 中, 数据采集模块主要完成转子振动频率和位移的实时测量; 参考数据生成模块是根据采集到的频率值在参考数据曲线上采点, 离散出参考数据序列; 关联度计算模块主要完成实测数据和参考

2004-07-11 收到第 1 稿, 2004-09-10 收到修改稿.

* 陕西教育厅专项科研计划项目(00JK138), 西北工业大学青年教师创新基金资助项目(Y16141), 西北工业大学“英才培养计划”基金资助项目(04DPOP0602)

数据的关联度计算;关联度阈值设定模块的主要作用是依据实时控制的精度设定关联度的阈值,依据转子振动控制的要求,原则上关联度阈值一般不小于0.8;控制量生成模块,则依据参考数据与实测数据的关联度和设定的关联度阈值之间的差值,经转换后产生控制量,控制量放大后作用于作动器产生控制力。

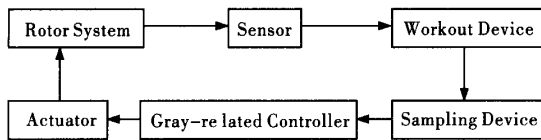


图2 灰关联控制器框图
Fig.2 Gray-related control system

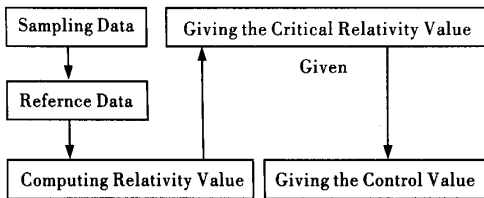


图3 灰关联控制器框图
Fig.3 Gray-related Controller

关联度阈值的选取对控制精度有重要影响,过小的关联度阈值会使控制精度降低,造成控制效果下降,甚至系统控制失效。过大的关联度阈值虽然可以提高控制的精度,但却使得系统的效率下降,同样不可取。因此,在实际的控制中,关联度阈值应介于0.7~0.9之间(这个取值范围是本文在用计算机模拟控制计算过程中得到的一个经验值)。

3 转子振动灰关联控制的实现

下面以文献[2]所给出的转子系统为例,对其实施灰关联控制。图4所示的转子轴承系统中,电磁阻尼器安装在轴正中,在左侧四分之一处装有一个圆盘,并加有偏心量,用来试加激振力,圆盘通过螺钉固定在轴上,可不考虑该圆盘的陀螺力矩,转轴两端用滚动轴承支承,看作铰支来处理。电磁阻尼器水平和垂直方向各电路参数及反馈系数选择一样,因此,电流刚度系数和位移刚度系数及反馈矩阵水平和垂直方向相等。

转子系统的各几何物理参数为:轴直径 $d = 1.0 \times 10^{-2}$ m,轴承间跨度 $l + B = 0.424$ m,弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11}$ N/m²,圆盘质量 $m_2 = 1.0$ kg,圆盘的偏心量 $e_2 = 1.8 \times 10^{-5}$ m,转子质量 $m_1 =$

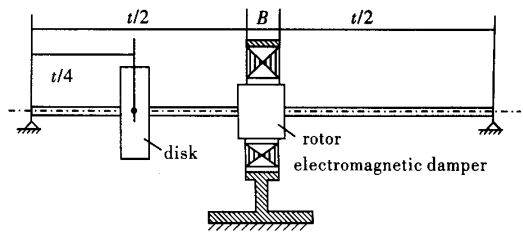


图4 带电磁阻尼器的转子轴承系统
Fig.4 A rotor system with an electromagnetic damper

0.5 kg,转子的偏心量 $e_1 = 2 \times 10^{-5}$ m,转子直径 $d_1 = 0.044$ m,阻尼器宽度 $B = 0.044$ m,轴两端支承距 $l = 0.38$ m。电磁阻尼器有关参数如下:真空中磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,磁路面积 $S = 10 \times 10^{-4}$ m²,阻尼器每个线圈匝数 $N = 720$,线圈内静态电流 $I_0 = 0.4$ A,阻尼器定子和转子间隙 $C_0 = 0.5 \times 10^{-3}$ m,径向磁路和坐标轴夹角 $\beta = 22.5^\circ$ 。

文献[2]研究了电磁阻尼器的最优控制规律,求得转子横向位移的幅频响应曲线如图5所示。我们以电磁阻尼器最优控制下得到的幅频响应曲线作为转子正常工作曲线,即认为如果转子能以此工作曲线运行,则其振幅在工作许可范围以内。由此得到如图6所示的转子工作曲线。

具体的实现过程如下描述:

1)生成转子工作时的实测比较数据序列

用于计算关联度的实测比较数据序列由数据采集模块完成,数据采集模块完成转子振动频率标度和位移的实时测量,形成参考数据序列。

记在采集的第1个频率标定时刻的转子横向位移值为 $x_1(1)$,采集的第2个频率标定时刻的转子横向位移值记为 $x_1(2)$,采集的第 k 个频率标定时刻的转子横向位移值记为 $x_1(k)$ 。因此,得到转子工作实测的比较数据序列 x_1 可表示为

$$x_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n)) \quad (1)$$

2)生成关联度计算的参考数据序列

转子工作曲线的参考数据序列生成,主要根据转子工作实测的比较数据序列频率标定,在转子正常工作曲线上实时离散采集完成,从而形成参考数据序列。

记转子正常工作曲线上第1个频率标定点(对应于实测比较数据序列的第1个频率标定时刻)的转子横向位移值为 $x_0(1)$,第2个频率标定点的转子横向位移值记为 $x_0(2)$,第 k 个频率标定点的转子横向位移值记为 $x_0(k)$ 。因此,得到的转子工作曲线参考数据序列 x_0 可表示为

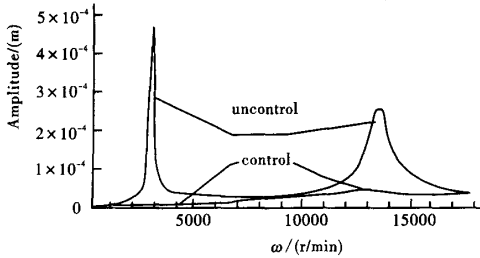


图5 转子横向位移的幅频响应曲线
Fig.5 The response of the rotor system

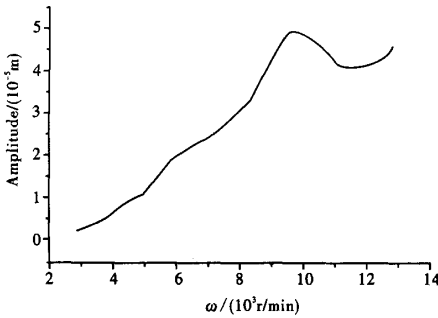


图6 转子的工作曲线
Fig.6 The expected response of the rotor system

$$x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)) \quad (2)$$

3) 计算实测比较数据序列与参考数据序列关联度

由数据采集模块,我们得到了计算关联度的参考数据序列和比较数据序列.需要说明的是,对应于一个标定频率 ω_k ,相应的参考数据和比较数据分别为 $x_0(k)$ 和 $x_1(k)$.

对于一个参考数据列 x_0 ,如果有好几个比较数据列 x_1, x_2, \dots, x_n 的情况,可以用下述关系表示比较曲线与参考曲线在各点(时刻)的差

$$\zeta_i(k) = (\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|) / (|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|) \quad (3)$$

式中 $\zeta_i(k)$ 是第 k 个时刻比较曲线 x_i 与参考曲线 x_0 的相对差值,这种形式的相对差值称为 x_i 对 x_0 在 k 时刻的关联系数.式中 ρ 是分辨系数,一般在 0.5 与 1.0 之间选取;而 $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 称为两级(两个层次)最小差.

$\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 是两级(两个层次)最大差.

对于本控制系统中的参考数据序列 x_0 和比较数据序列 x_1 ,可以用下述关系表示比较曲线与参考曲线在各点(时刻)的差

$$\zeta_1(k) = (\min_k |x_0(k) - x_1(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_1(k)|) / (|x_0(k) - x_1(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_1(k)|) \quad (4)$$

式中 $\zeta_1(k)$ 是第 k 个时刻比较曲线 x_1 与参考曲线 x_0 的相对差值,也就是 x_1 对 x_0 在 k 时刻的关联系数.式中 ρ 是分辨系数,一般在 0.5 与 1.0 之间选取.

将关联系数求平均值,得到标定频率 ω_k 时(或者说 k 时刻),实测比较数据序列与参考数据序列的关联度为

$$r_1 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta_1(k) \quad (5)$$

4) 控制量的生成

由关联度阈值设定模块依据实时控制的精度设定关联度的阈值,依据转子振动控制的要求,原则上关联度阈值 r 一般不小于 0.8.依据参考数据与实测数据的关联度 r_1 和设定的关联度阈值 r 之间的差值 $\Delta r = |r_1 - r|$,经转换后产生控制量,控制量放大后作用于作动器产生控制.

5) 控制实现与数值模拟

在没有加入灰关联控制器时,转子工作曲线如图6所示.现假定转子在某一外激励的作用下其实际幅频曲线发生如图7所示的变化.转子的振幅逐渐偏离了正常的工作曲线,设置关联度阈值为 0.8,取分辨率为 0.5,作该转子系统的灰色关联控制.经计算机实时模拟得到如图7所示的控振效果图.

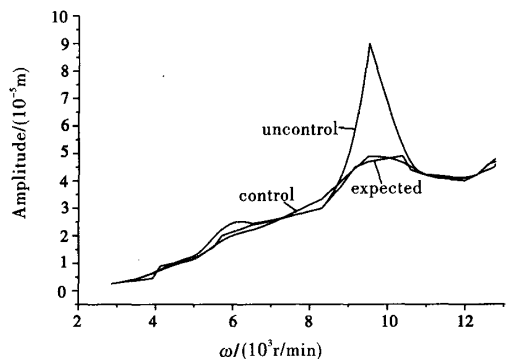


图7 灰关联控制控振效果
Fig.7 The response of the rotor system with related-controller

从图中可以看出,灰关联控制系统控振效果好,与所给定的工作曲线相比较,其最大误差只有 0.33×10^{-5} m,绝对误差是 10%,此时转速为 8182 r/min. 和控制前相比较,控制后转子的振幅得到了显著减小,控制前最大振幅达到 1.02×10^{-4} m,控制后仅为 0.46×10^{-4} m,是控制前的 45%. 此时转子转速是 9572 r/min,其工作曲线上相应转子振幅为 0.48×10^{-4} m. 控制后的曲线基本上和转子的的工作曲线明显吻合,也就是说,经过灰关联控制后,转子系统基本按照我们所给出的工作曲线运转.

4 结论

本文首次将灰色关联控制理论应用于了转子的振动主动控制中,拓宽了灰色系统理论的应用领域,为转子振动的主动控制的研究提供了一种新的理论方法. 本文的研究表明,灰色关联控制理论应

用于转子振动主动控制中,是合理可行的,而且不需要转子系统的精确的数学模型,具有建模迅速,控制及时、准确,便于工程实现等优点. 建模简单迅速、控制及时、准确、控振效果良好.

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,1993(in Chinese))
- 2 童水光,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

STUDY OF GRAY-RELATED CONTROL FOR VIVRATION OF RORTOR SYSTEM

Liu Yongshou Zhi Xizhe Gu Zhiping Zhu Xiping

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

Abstract Based on the gray-related analysis, a gray-related control scheme was proposed for a rotor system with an electromagnetic damper for the first time. According to the relative value of the two curves, i. e. the curve of the expected response and the curve of the real response of the rotor system, the amplitude of the rotor system was reduced. The gray-related control scheme has properties of rapid model building, timely control and high precision while the precise model of the rotor system is not needed. The simulation result showed that the gray-related control scheme was effective.

Key words rotor system, vibration active control, gray-related control

Received 11 July 2004, revised 10 September 2004

* The project supported by Special Scientific Research Project of Shanxi Province Education Bureau(00JK138) and Creation Foundation of NWPU for Youth Teachers(Y16141) and the fund of DPOP in NPU (04 DPOP0602)