

递阶辨识方法在转台伺服系统调试中的应用研究

赵霞 姚郁 方强

(哈尔滨工业大学航天学院·哈尔滨, 150001)

摘要: 针对转台伺服系统中机械谐振对系统产生的影响, 对包含机械谐振的被控对象, 采用计算量较小的参数递阶辨识方法辨识被控对象, 并对机械谐振进行有效抑制, 从而大大提高系统的动态响应指标。该方法不但克服了原有系统辨识过程中计算量和存储量大的缺点, 还克服了以往用试凑法抑制谐振的繁琐、低精度等缺点, 从而提高了系统调试的自动化水平, 并使系统性能得到了较充分的发挥。

关键词: 伺服系统; 递阶辨识; 机械谐振; 拟牛顿法

文献标识码: A

The Study on the Hierarchical Identification Method in the Debugging of Turntable Servo System

ZHAO Xia, YAO Yu and FANG Qiang

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology · Harbin, 150001, P.R. China)

Abstract: In view of the fact that mechanical resonance in the turntable servo system has serious effects on the whole system, this paper adopts hierarchical identification method with fewer quantity of computation to identify the plant containing mechanical resonance. After suppressing the resonance effectively by identification results, dynamic performance of the system has been improved greatly. The method not only overcomes the difficulty of large quantity of computation and storage, but also gets over problems of fussy debug procedure and low precision result proposed by the old method, and as a further result of which, it also improves the automatic debugging standard and the system's performance adequately.

Key words: servo system; hierarchical identification; mechanical resonance; quasi-newton method

1 引言(Introduction)

转台是航空航天领域中进行飞行器仿真或测试的关键设备之一。作为整个飞行仿真或测试系统中的一个组成部分, 它为飞行器提供了模拟的飞行环境, 因此其性能的优劣, 直接关系到整个仿真系统性能的优劣。转台伺服系统中, 当被控制对象转动惯量较大、粘性摩擦较小、传动装置的刚性较差时, 执行电机至被控对象之间的传动存在柔性传动。因此在系统运动过程中, 传动轴的弹性扭转变形将造成明显的滞后, 传动装置在传递运动时就会含有储能元件, 由于它速度阻尼小, 传递函数将出现高的谐振峰, 形成机械谐振。

为了满足飞行仿真或测试的需求, 常常要附不同型号负载进行仿真或测试, 从而使转台的框架结构变大, 造成转动惯量的增加, 机械结构固有谐振频率的降低。另一方面, 对转台伺服系统频响、精度要求的日益提高, 使系统带宽的增加成为必要。伺服系

统带宽的增加和机械谐振频率的降低, 使二者频带逐渐靠近, 甚至出现机械结构固有谐振频率落入伺服系统带宽之内的现象。此时, 伺服系统的噪声很容易激起系统整机结构的谐振, 而反馈又会使谐振持续下去, 造成系统性能下降, 甚至使系统不稳定。

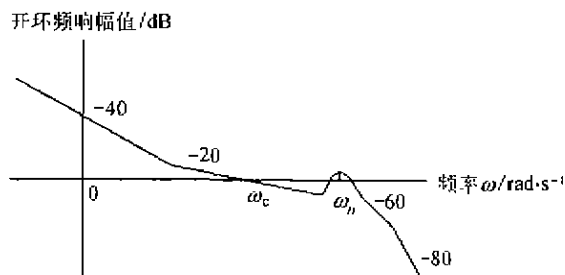


图 1 包含谐振的系统开环频率响幅图

Fig. 1 Open-loop frequency response of system containing resonance

图 1 为被控对象包含谐振时, 系统开环频率响应的幅频特性图。由于谐振的存在, 使系统的开环频

率特性在穿越频率之后又回升到 0dB 线之上,影响系统的动态指标甚至稳定性.因此,转台伺服系统中被控对象机械谐振的抑制在工程上具有重要的实际意义.

由于机械谐振是机电耦合作用的结果,因此解决此问题需从整体机械结构设计角度和伺服控制系统设计角度同时考虑,从系统的角度统筹设计,加以解决.

文[1]利用 H_∞ 滤波器代替常规的观测器进行不可测状态变量的观测,然后用状态变量反馈法进行系统极点的任意配置,以期达到谐振抑制和随动跟踪的要求.文[2]针对以往的谐振比控制必须使用高速干扰观测器,从而存在实现性问题,使用低速干扰观测器和谐振比控制器,达到抑制干扰和减小谐振的目的.文[1,2]均要用到输入信号为电机转速、电机转矩的观测器,在转台伺服系统中,电机转速可由测速装置直接得到,而电机转矩信号却不能直接测量.文[3]采用数字陷波滤波器,但这种方法有 5 个参数需要调节,未给出参数调节依据,即如何根据系统机械谐振的信息确定滤波器各参数,因此参数整定困难,如果调节不合适,就会影响滤波器抑制谐振的效果.更重要的是陷波滤波器只能较好抑制位于其中心频率处的谐振,对此中心频率附近的谐振抑制效果不好,只适合于理想较窄频率宽度谐振的抑制.因此对于谐振特性复杂的系统,不适合于采用陷波滤波器.

在转台实际使用过程中,当三个框架同时转动时,它们相对于各自转动轴的转动惯量随着转台转角的变化而变化,存在耦合;测试不同负载时,负载型号、大小、位置的变化等因素均使转台伺服系统中的谐振特性十分复杂,存在很多谐振频率且相互影响,有时谐振频率不能保持恒定.另外,由于转台伺服系统中机械谐振的存在,使其被控对象具有维数高、待估计的参数数目多等特点,因此辨识方法的计算量和存储量急剧增加,以至常规辨识算法难以实现.

本文基于对被控对象机械谐振实际情况的分析,选用数字式带式滤波器作为机械谐振的数学模型,同时为了减少被控对象辨识的计算量,采用基于频率域的计算量较小的参数递阶辨识方法^[4],把被控对象这一高阶系统分解为多个维数较小、变量数目较少的子系统,分别估计各子系统的参数.然后依据各子系统参数辨识结果设计相应的控制器和滤波器,最终构成伺服控制系统.

2 参数递阶辨识(Parameter hierarchical identification)

2.1 参数递阶辨识模型(Parameter hierarchical identification model)

无刷直流电动机驱动转台系统被控对象的理想数学模型为:

$$G_d(s) = \frac{1/K_e}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1}. \quad (1)$$

式中 $T_m = \frac{R_a J_m}{K_m K_e}$ 为机电时间常数, $T_e = \frac{L}{R_a}$ 为电磁时间常数.

对于无刷直流电动机系统来说,由于电流反馈的引入,一般系统都满足 $T_m \gg T_e$, 则上式可简化为

$$G_d(s) = \frac{K}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)}. \quad (2)$$

该式表明,电枢电压控制的无刷直流电动机的数学模型是一个二阶线性方程,其特性类似于直流电动机模型,该理想模型是为了简化系统的分析和设计过程,在较低频率段时它基本能反映系统特性,但是在较高频率段时,实际系统与该模型出入较大.如前所述,实际被控对象的数学模型还包括机械谐振和高频未建模动态特性等,后者可归到鲁棒控制器的设计问题,当系统频响要求不十分高时,它对系统的性能影响较小,可通过增益裕度和相角裕度设计使系统满足鲁棒稳定性,机械谐振对系统的性能影响较大.由调试经验知机械谐振模型可表示为:

$$G_R(s) = \frac{s^2 + as + \omega_c^2}{s^2 + bs + \omega_c^2}. \quad (3)$$

其中: ω_c 为中心频率, a, b 为实系数,且 $a > 0$, $b > 0$. 当 $a > b$ 时,谐振为带通形式,也称正谐振,如图 2 所示;当 $a < b$ 时,谐振为带阻形式,也称负谐振,如图 3 所示.一般文献仅考虑正谐振情形,实际系统中的负谐振也对系统特性有影响,从后面实验结果部分可知,对负谐振的抑制,使系统稳定裕度大幅度增加.

依据式(3)谐振模型设计的带式滤波器较之陷波滤波器,不仅可以对中心频率 ω_c 处的谐振有较好的抑制,而且可以对中心频率 ω_c 附近的谐振进行抑制,更重要的是它可以在损失的相角和抑制的谐振峰值间达到最优折衷,较符合转台伺服系统的实际谐振情况.当系统的谐振特性可用单一频率的谐振表示时,令式(3)的 $a \approx 0$,即陷波滤波器为带式滤波器的特例,此时可单独对这一频率处的谐振进行抑制.

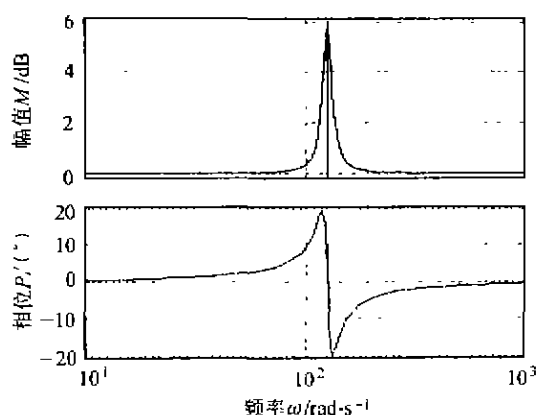


图2 正谐振波特图

Fig. 2 Bode diagram of positive resonance

总之,转台伺服系统实际被控对象的数学模型可表示为理想模型和若干个谐振模型的串联形式:

$$G(s) = G_d(s)G_{R_1}(s)G_{R_2}(s)\cdots G_{R_n}(s). \quad (4)$$

其中 $G_d(s)$ 为理想对象的传递函数, $G_{R_i}(s)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 个机械谐振的传递函数.

2.2 参数辨识算法 (Parameter identification algorithm)

递阶辨识中,各子模型的参数辨识,也称参数拟合,是通过极小化模型 $G_d(s)$ 或 $G_{R_i}(s)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 与实际数据之间的误差准则函数来确定模型的参数,即多变量求极值问题.对于多变量极值问题,以梯度法为基础的牛顿法是一种解析与数值计算相结合的方法,其突出特点是收敛很快,但需要计算二阶偏导数且目标函数的海赛矩阵可能为非正定矩阵.拟牛顿法克服了牛顿法的上述缺点,其基本思想是用不包含二阶导数的矩阵来近似牛顿法中的海赛矩阵的逆矩阵,使牛顿法中计算海赛矩阵的工作简化,由于构造矩阵的方法不同,因而出现了不同的拟牛顿法.

拟牛顿法是解非线性方程的有效方法,它不仅简化了计算过程,同时还能保证迭代程序的超线性收敛^[5].我们通过研究认为下述算法较适用于转台伺服系统被控对象参数的拟合.拟牛顿条件为

$$p^{(k)} = H_{k+1}q^{(k)}. \quad (5)$$

其中

$$H_{k+1} = H_k + \frac{(p^{(k)} - H_k q^{(k)})(p^{(k)} - H_k q^{(k)})^T}{(q^{(k)})^T (p^{(k)} - H_k q^{(k)})}, \quad (6)$$

$$p^{(k)} = x^{(k+1)} - x^{(k)}, \quad (7)$$

$$q^{(k)} = \nabla f(x^{(k+1)}) - \nabla f(x^{(k)}).$$

搜索方向为

$$d^{(k)} = -H_k \nabla f(x^{(k)}), \quad (8)$$

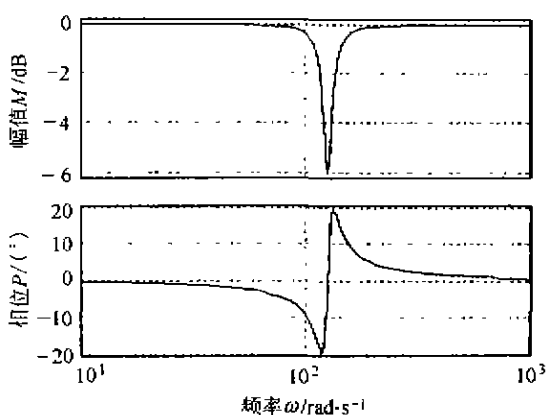


图3 负谐振波特图

Fig. 3 Bode diagram of negative resonance

沿 $d^{(k)}$ 方向搜索步长 λ_k , 满足

$$\lambda_k = \arg \min_{\lambda} f(x^{(k)} + \lambda d^{(k)}), \quad (9)$$

则

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}. \quad (10)$$

利用式(6)校正公式求解目标函数 $f(x)$ 极小值点时,先求出点 $x^{(k+1)}$ 处的梯度 $\nabla f(x^{(k+1)})$ 以及 $p^{(k)}$ 和 $q^{(k)}$,再用式(6)计算 H_{k+1} ,并用式(8)求出在点 $x^{(k+1)}$ 出发的搜索方向 $d^{(k+1)}$.依此类推,直至满足 $\|\nabla f(x^{(k)})\| < \epsilon$ 为止, ϵ 为预先给定的允许误差.本文的目标函数 $f(x)$,即给定模型与实际数据间的误差准则函数,选为两者差值的平方和.

2.3 参数递阶辨识步骤 (Parameter hierarchical identification steps)

针对递阶辨识模型(4),利用2.2节拟牛顿法分别辨识理想模型和各谐振模型参数的步骤如下:

首先,根据测得的被控对象的频率响应曲线 $|G(j\omega)|$,确定辨识理想模型的数据范围、模型参数拟合初值 $K^{(0)}, T_m^{(0)}, T_e^{(0)}$.对此数据段范围内的实际数据和理想模型(2)计算值间的误差准则函数求极小值,得到理想模型各参数拟合值 K, T_m, T_e ,进而得到理想模型 $G_d(s)$.

然后,从被控对象的频率响应曲线 $|G(j\omega)|$ 中修正掉已得到的理想模型 $G_d(s)$ 的频率响应曲线 $|G_d(j\omega)|$,即 $|G(j\omega)| / |G_d(j\omega)| = |G_{R_1}(j\omega)| * |G_{R_2}(j\omega)| * \cdots * |G_{R_n}(j\omega)|$,并依此曲线确定第一个谐振模型 $G_{R_1}(s)$ 的数据范围、模型参数拟合初值 $a^{(0)}, b^{(0)}, \omega_c^{(0)}$,对此数据段范围内的实际数据和谐振模型(3)计算值间的误差准则函数求极小值,得到第一个谐振模型各参数拟合值 a, b, ω_c ,进而得到第一个谐振模型 $G_{R_1}(s)$.

从 $|G(j\omega)| / |G_d(j\omega)|$ 频率响应曲线中再补

除掉此谐振模型的频率响应曲线 $|G_R(j\omega)|$ 。依此类推,可相继得到系统中存在的其它谐振模型参数 $G_{R_i}(s) (i = 2, \dots, n)$ 。但是,由于各子系统间可能存在关联变量,即第 i 个子系统包含了其它一些子系统的未知参数,使得迭代计算难以进行。文献[4]中为了解决这一问题,在计算 t 时刻第 i 个子系统的估计值时,其它子系统的未知数用它们在 $t-1$ 时刻的值代替。在转台伺服系统中,理想模型和各谐振模型的关联性较弱,它们分别处于系统低频段和中高频段。各谐振模型如关联性较强,则把关联较强的两个或三个谐振模型的串联作为一个模型进行处理即可,具体使用几个模型应依据实际谐振情况而定。如图4所示的两个关联性较强的谐振,两条实线分别表示两个中心频率较接近的谐振的Bode图,虚线则表示这两个谐振串联后的Bode图,这时可选用两个谐振模型的串联作为拟合模型,这样不会大幅度增加辨识计算量,还会减少只由一个谐振模型辨识产生的辨识误差。

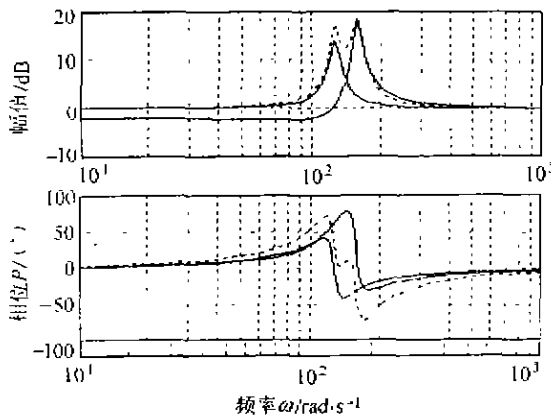


图4 关联性较强的谐振图形

Fig. 4 The diagram of two strong relevant resonance

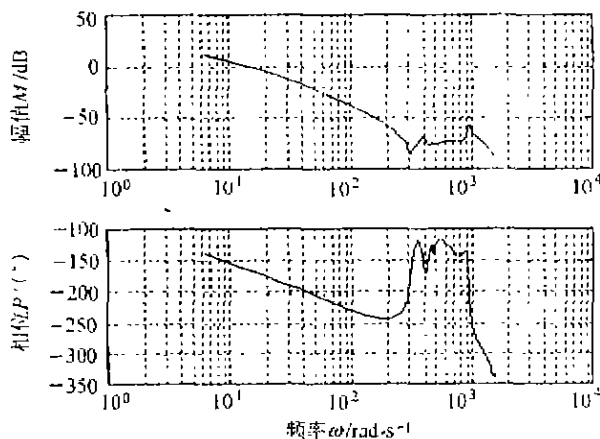


图5 被控对象的频率响应

Fig. 5 Frequency response of plant

最后,针对得到的谐振模型 $G_{R_i}(s) (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行相应机械谐振的补偿,并在此基础上用所得到的理想模型 $G_d(s)$ 进行系统分析与综合。

3 实验结果(Experimental results)

本文以某型三自由度红外成像导引头动态测试转台的外环调试为背景,进行了实验研究。

3.1 模型参数递阶辨识第一步(The first step of model parameter hierarchical identification)

根据被控对象的频率响应图5确定辨识理想模型的数据范围,这里选择数据范围为 $1 \sim 30\text{Hz}$, 选择理想模型参数拟合初值;用 Matlab 程序^[6], 对此数据段范围内的实际数据和理想模型计算值间的误差准则函数 $f(K^{(k)}, T_m^{(k)}, T_e^{(k)})$ 求极小值,直到误差准则函数满足 $\|\nabla f(K^{(k)}, T_m^{(k)}, T_e^{(k)})\| < \epsilon_1$, 其中 $\epsilon_1 = 10^{-4}$, 得到理想模型各参数的拟合值 K, T_m, T_e , 进而得到被控对象理想模型:

$$G_d(s) = \frac{34.1895}{(0.1265s + 1)(0.0166s + 1)} \quad (11)$$

3.2 模型参数递阶辨识第二步(The second step of model parameter hierarchical identification)

从图5所示被控对象的频率响应曲线中修正掉式(11)所示理想对象模型的频率响应曲线,得到如图6所示的谐振的频率响应图。根据此图确定第一个谐振模型的数据范围为 $40 \sim 60\text{Hz}$, 选取模型参数拟合初值;用 Matlab 程序, 对此数据段范围内的实际数据和谐振数学模型计算值间的误差准则函数 $f(a^{(k)}, b^{(k)}, \omega_c^{(k)})$ 求极小值,直到误差准则函数满足 $\|\nabla f(a^{(k)}, b^{(k)}, \omega_c^{(k)})\| < \epsilon_2$, 其中 $\epsilon_2 = 10^{-4}$, 得到第一个谐振模型各参数的拟合值 a, b, ω_c , 进而得到第一个谐振模型:

$$G_{R_1}(s) = \frac{s^2 + 18.1467s + (2 * \pi * 49)^2}{s^2 + 226.0837s + (2 * \pi * 49)^2} \quad (12)$$

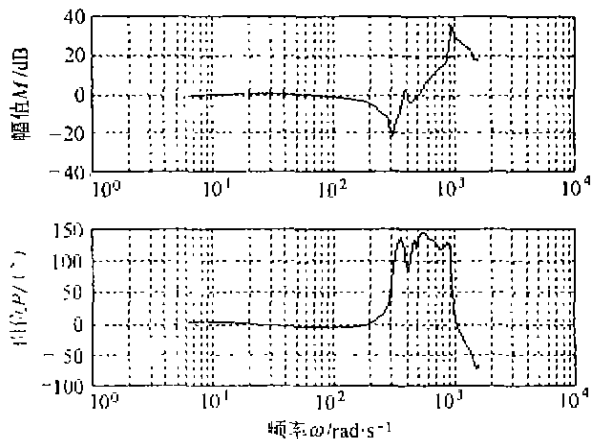


图6 机械谐振的频率响应

Fig. 6 Frequency response of mechanical resonance

同理,在谐振的频率响应图6中修正掉第一个谐振模型 $G_{R_1}(s)$ 后,可相继得到系统中存在的其它两个较明显的谐振模型:

$$G_{R_2}(s) = \frac{s^2 + 46.1136s + (2 * \pi * 63)^2}{s^2 + 19.0313s + (2 * \pi * 63)^2} \quad (13)$$

$$G_{R_3}(s) = \frac{s^2 + 1472.7s + (2 * \pi * 150)^2}{s^2 + 28.1s + (2 * \pi * 150)^2} \quad (14)$$

将图6中的三个谐振都补偿后,系统的频率响应如图7所示,1为补偿前图形,2为补偿后图形.从图中可以看出,把系统理想模型及机械谐振模型均补偿后,在较低频段内($0 \sim 10^3 \text{ rad/s}$)系统的频率特性基本接近一条直线.

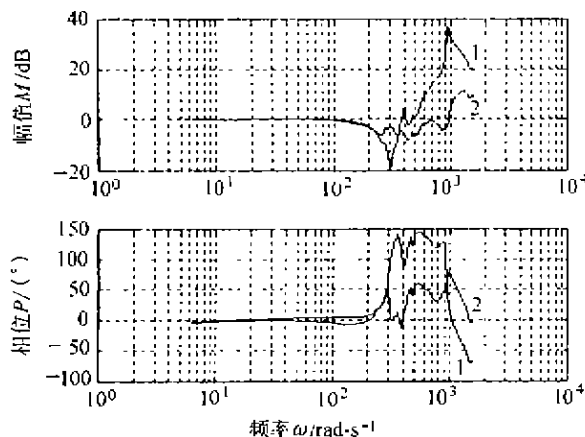


图7 补偿前后的图形

Fig. 7 Diagram before and after compensation

图9和图10分别是两种方法下系统在幅度1°,频率5Hz正弦信号作用下闭环响应曲线.图9不仅超调大,滞后相位大,而且曲线有谐波成分在内.图10所示

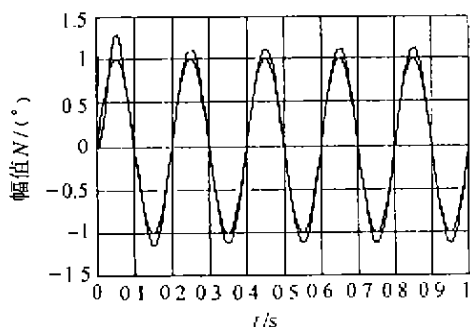


图9 经验法系统闭环正弦响应

Fig. 9 Close-loop sine response by experienced method

4 结论(Conclusions)

上述研究工作表明,递阶辨识方法在转台伺服系统调试中是可行的.用式(4)所表示的转台伺服系统被控对象的数学模型不但有清楚的物理含义,从而能更好地理解系统特性,而且可以大大减少辨识的计算量,占用内存小、容易实现,因而更便于系统

使系统在动态特性的潜力得到较充分地发挥.

3.3 结果比较(Result comparison)

用以往经验调试的谐振滤波器补偿图6所示的谐振,结果如图8中曲线2所示,曲线3为用本文方法设计的谐振滤波器补偿图6所示系统谐振的结果,可以明显看出,后者不但能更好地抑制系统谐振,而且能减少相角损失,经实验验证,系统的稳定裕度由原来的30°变为70°,因此系统的稳定性和性能均得到很大改善.由此可见,这种方法较好地补偿了机械谐振,从而使系统在动态特性方面的潜力得到较充分地发挥.

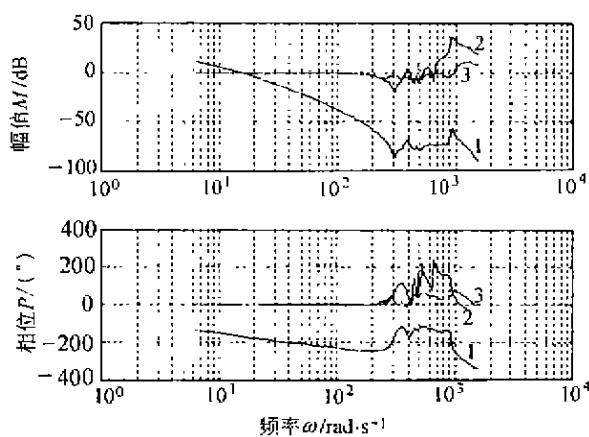


图8 谐振补偿比较

Fig. 8 Comparison of resonance compensation

曲线不仅超调小、相位滞后小,且响应曲线光滑、平稳.

同时实验表明,用递阶辨识方法进行辨识的运算速度提高了很多.

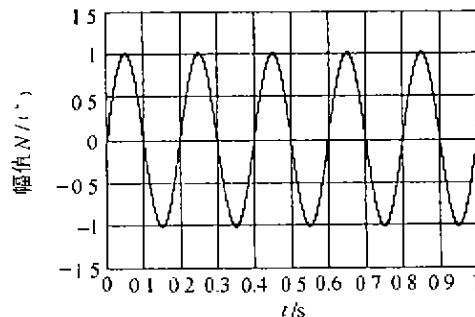


图10 递阶法系统闭环正弦响应

Fig. 10 Close-loop sine response by hierarchical method

的辨识与综合,主要表现在:① 理想模型中两个时间常数的获得使设计控制器有一定的依据;② 谐振模型参数的获得使设计者能对谐振进行有效抑制,并在此基础上,挖掘系统更大的潜力;③ 当系统中机械谐振较多时,即 n 较大时,这种方法的辨识计算量要比常规方法小得多.

参考文献(References)

- [1] Kim Jin-Soo, Yang Iee-Woo, Kim Young-Seok, et al. The vibration suppression control of the two-mass resonant system using H_∞ filter [A]. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society [C], 1998, 3: 1464 - 1470
- [2] Hon Yoichi, Sawada Hideyuki and Chun Yeonghan. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system [J]. IEEE Trans. on I. E., 1999, 46(1): 162 - 618
- [3] Zhang Weiguo, Cao Yonggang and Chen Tao. Digital filter approach to improving the resonance frequency of photoelectric theodolite [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(2): 77 - 82
- [4] Dung Feng and Yang Jiaben. Hierarchical identification of large scale system [J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(5): 647 - 654
- [5] Pemandez T and Newport Y. Extracting a bias-dependent large-signal MESFET model from pulsed I/V measurements [J]. IEEE Microwave and Techniques, 1996, 44(3): 372 - 378
- [6] Xue Dingyu. Computer-Aided Design of Control System-Matlab, Language and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1996, 25 - 138

本文作者简介

赵 震 1974 年生, 1999 年获哈尔滨工业大学自动化测试与控制系硕士学位, 现为哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为: 系统辨识、采样控制系统分析与设计。Email: neheyabo@sina.com

姚 郁 1963 年生, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为: 采样控制系统分析与设计, 非线性系统。

方 强 1975 年生, 2000 年获哈尔滨工业大学自动化测试与控制系硕士学位, 现为哈尔滨工业大学博士生。

(上接第 228 页)

- [7] Palavajhala S P, Montard R L and Joseeph B. Process identification using discrete wavelet transforms: design of prefilters [J]. AIChE Journal, 1996, 42(3): 777 - 790
- [8] Wang Jingchun, Jin Yihui and Fang Chongzhu. A data reconstruction method with wavelet transform [A]. IFAC 13th Triennial World Congress [C]. San Francisco, USA, 1996, 343 - 348
- [9] Mallat S and Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1991, 38(2): 617 - 636
- [10] Bahavik R B and Stephanopoulos G. Wave-net: a mutiresolution, hierarchical neural network with localized learning [J]. AIChE Journal, 1993, 39(1): 57 - 81
- [11] Schrama R J P. Accurate identification for control: the necessity of an iterative schema [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, 37(7): 991 - 994

本文作者简介

吕立华 1967 年生, 现做博士后研究, 主要研究方向为小波理论及其应用, 过程辨识, 智能控制

宋执环 1962 年生, 博士, 教授, 浙江大学工业控制技术研究所副所长, 主要研究兴趣为小波分析在辨识和控制理论中的应用, 预测控制及应用, 流程工业 CIMS 技术。Email: zhsong@upc.zju.edu.cn

李 平 1954 年生, 教授, 博士生导师, 浙江大学工业控制技术研究所所长, 主要研究兴趣为工业过程模型化、智能控制, 模糊控制及应用, 流程工业 CIMS 技术。