

## 光电跟踪架传递函数辨识方法及应用

秦来安, 侯再红, 吴毅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 鉴于传统的光电跟踪伺服控制系统频率响应测试方法复杂的缺点, 采用了一种全数字化频率响应测量方案对光电跟踪架的频率特性进行测试。提出了一种递阶辨识法与传递函数参数辨识算法相结合进行传递函数辨识的新方法, 并推导出了适用于不同阶次传递函数的辨识算法数学模型。在使用递阶辨识法辨识出系统阶次的基础上, 利用测试得到的数据, 分别采用最小二乘法和以新推导出的数学模型为基础的 Levy 法、Sanko 法和 Vinagre 法辨识出了光电跟踪架的传递函数。辨识结果表明, 新推导出来的数学模型正确, 以其为基础的辨识算法误差均小于最小二乘法; 3 种算法中, Sanko 法在整个频域内的辨识效果最好; 采用递阶辨识原理与参数辨识算法相结合的方法可行, 且精度较高。

**关键词:** 光电跟踪; 传递函数; 递阶辨识法; 模型辨识; Levy 法; 频率响应

**中图分类号:** TP13      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2012)10-2810-07

## Transfer function identification method and its application in photoelectrical tracking system

Qin Lai'an, Hou Zaihong, Wu Yi

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Transfer function is of great importance to the design and analysis of photoelectrical tracking servo system. However, as the basement of transfer function identification, traditional frequency response test method is too complex. To solve this problem, a digital test method was adopted. In order to identify accurate transfer function relatively, a new method which was based on hierarchical identification method and parameter identification algorithms, was proposed, and the identification algorithm mathematic model for different rank transfer function was also deduced. Using data from frequency response test, transfer function identification algorithms of photoelectrical tracking system were identified by using the least square method, Levy method, Vinagre method and Sanko method. Results show that the deduced model is correct, the performance of the three methods based on it is better than that of least square method. Among Levy method, Vinagre method and Sanko method, Sanko method has the best performance. The

收稿日期: 2012-02-12; 修订日期: 2012-03-03

基金项目: 国家 863 计划(2006AA861062)

作者简介: 秦来安(1983-), 男, 博士生, 主要从事光电跟踪设备及其控制系统方面的研究。Email: qinlai'an@aiofm.ac.cn

导师简介: 侯再红(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电仪器设计方面的研究。Email: zhhou@aiofm.ac.cn

吴毅(1960-), 研究员, 博士, 主要从事自适应光学校正技术、激光光斑数字图像处理与光学信息获取方法、激光大气光学参数测量等方面的研究。Email: wy@aiofm.ac.cn

new transfer function identification method is feasible and the result is preferable.

**Key words:** photoelectrical tracking; transfer function; hierarchical identification method; model identification; Levy method; frequency response

## 0 引言

星地激光通信因其容量大、保密性好、抗干扰能力强等优点而具有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。然而稳定的星地通信链路的建立离不开高精度的光电跟踪伺服控制系统。在伺服控制系统的设计过程中,分析被控对象的数学模型,建立精确的传递函数是进行控制系统设计、分析和控制算法仿真的基础。因此,开展光电跟踪系统受控对象传递函数模型的辨识研究具有重要的应用价值。

目前,传递函数辨识的方法有很多,但都以获取待辨识系统的频率响应特性数据和选择合适的辨识方法为基础。参考文献[3-4]使用的频率响应测试方法获得了系统较为完整的频率特性,但数据的获取需要使用动态信号分析仪等专门的测试仪器,增加了测试成本。闵跃军等人<sup>[5]</sup>虽然用 Levy 法辨识出了待测系统的传递函数,但其算法的数学模型却随待辨识传递函数阶次的变化而变化,尤其是当待辨识系统阶次较高时,推导过程复杂,增加了辨识的运算量和难度。赵霞等<sup>[6]</sup>采用递阶辨识法进行辨识,虽然在不同频段辨识出的传递函数参数比较精确,但对整个系统来说,其最终获得的函数并不一定是最优的,而且在辨识过程中需要不断地从原始数据中除去已辨识出频段的影响,当传递函数阶次较高时,过程比较繁琐。

因此,文中采用全数字化频率响应测试方案对光电跟踪架的频率特性进行测试<sup>[7]</sup>,并用测试得到的数据对传递函数的辨识方法进行研究,提出了一种递阶辨识法和参数辨识算法相结合的新方法进行传递函数的辨识。文中重点讨论了传递函数参数的辨识算法,推导并建立了适用于各阶次传递函数的算法数学模型,简化了对高阶系统的辨识过程。采用测试得到的数据对最小二乘法和基于该模型的 Levy 法、Vinagre 法和 Sanko 法的辨识性能进行了对比分析,验证了数学模型的正确性,总结出了各种算法的特点,为不同条件下选择合适的算法提供了依据。

## 1 全数字化频率响应特性测试原理

光电跟踪伺服控制系统结构如图 1 所示。在该系统中,位置反馈、位置补偿、速度反馈及速度补偿都是由编码器和数字运动控制器完成的<sup>[8]</sup>。在进行系统的频率特性测试时,编程使运动控制器在 A 点产生幅度、相位固定的离散正弦波信号,驱动转台做正弦摆动;则 B 点输出是一个频率相同,幅度、相位不同的正弦信号,记录该点输出的位置信号,待完成系统设计的采样周期数即可停止采样。不断改变输入正弦信号的周期,重复上面的测试过程,就可获得所测试频率范围内的扫频数据。利用相关算法对得到的数据进行处理,可计算出所测试频率范围内的幅值和相位值,即可绘出系统 A-B 在扫频段的开环 Bode 图,利用合适的辨识算法就可以辨识出系统的传递函数。

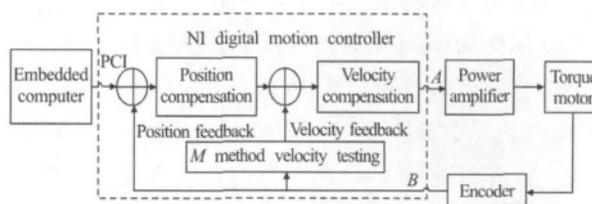


图 1 光电跟踪伺服控制系统结构框

Fig.1 Block diagram of photoelectrical tracking servo system

## 2 传递函数参数辨识算法

在传递函数辨识的过程中,不管采用哪种辨识方法,都要用到传递函数参数辨识算法。该算法的优劣直接决定了最终辨识误差的大小,因此算法的选择非常重要。

目前,常用的传递函数参数的辨识算法主要有最小二乘法、Levy 法及其改进算法。最小二乘法比较简单,易于实现,Levy 法及其改进算法在工程上也获得了广泛的应用。尽管如此,目前以 Levy 法为基础的算法还没有统一的算法数学模型,在辨识不同阶次的传递函数时都要求解一系列的偏导数方程来构建待辨识参数的系数矩阵,尤其是当传递函

数阶次较高时,构建系数矩阵较为困难。为解决这一问题,在研究算法原理的基础上,推导出了适用于不同阶次传递函数的算法数学模型。辨识时,只要将系统阶次和频率响应测得的数据带入该模型,就可以方便地构建出关于待求解系数的矩阵方程,省去了重复的求导过程。

## 2.1 Levy 法原理及算法数学模型推导

Levy 法<sup>[9]</sup>是由频率特性数据序列直接拟合系统传递函数参数的解析算法,它是通过极小化模型与测试数据之间的误差准则函数来确定模型的参数。

一般地,系统的传递函数模型可以表示为:

$$\hat{G}(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n} \quad m < n$$

对应的频率响应可由公式(1)表示:

$$\hat{G}(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m b_k (j\omega)^k}{1 + \sum_{k=0}^n a_k (j\omega)^k} = \frac{N(\omega)}{D(\omega)} = \frac{\alpha(\omega) + j\beta(\omega)}{\sigma(\omega) + j\tau(\omega)} \quad (1)$$

在给定的频率点,系统的拟合误差定义为:

$$\varepsilon(\omega) = G(j\omega) - \frac{N(\omega)}{D(\omega)} \quad (2)$$

式中: $G(j\omega)$ 为实测值。取全部采样点上的拟合误差的平方和作为回归分析评价函数,在此基础上运用最小二乘的方法就可以求取系统的未知系数。但是,若直接对公式(2)按最小二乘原理求系数,会使问题变为一个非线性回归问题。为消除拟合误差中的分式,Levy 引入了加权因子  $D(\omega)$ ,拟合误差被重新定义为:

$$E(\omega) = \varepsilon(\omega)D(\omega) = G(j\omega)D(\omega) - N(\omega) \quad (3)$$

将在所有频率上的拟合误差模的平方和定义为回归分析评价函数  $J$ 。省略各表达式中的  $\omega_p$ ,函数  $J$  可以表示为:

$$J = \sum_{p=1}^q |E|^2 = \sum_{p=1}^q |[\text{Re}(G) + j\text{Im}(G)](\sigma + j\tau) - (\alpha + j\beta)|^2 = \sum_{p=1}^q [\text{Re}(G)\sigma - \text{Im}(G)\tau - \alpha]^2 + [\text{Re}(G)\tau + \text{Im}(G)\sigma - \beta]^2 \quad (4)$$

式中: $\alpha(\omega) = \sum_{k=0}^m b_k \text{Re}(G) \times [(j\omega)^k]$ ,  $\beta(\omega) = \sum_{k=0}^m b_k \text{Im}(G) \times [(j\omega)^k]$ ,

$\sigma(\omega) = 1 + \sum_{k=0}^n a_k \text{Re}(G) \times [(j\omega)^k]$ ,  $\tau(\omega) = \sum_{k=0}^n a_k \text{Im}(G) \times [(j\omega)^k]$ 。

在公式(4)的基础上,运用最小二乘原理便可求得未知系数。即:对  $J$  求各未知系数的偏导数,并使

求得的偏导数表达式为 0,这样共得到的  $m+n+1$  个方程,假如扫频共测了  $q$  个频率点,那么,未知系数的矩阵方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ g \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:

$$A_{l,c} = \sum_{p=1}^q \{-\text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] - \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c]\} \\ l=0, \dots, m, c=0, \dots, m$$

$$B_{l,c} = \sum_{p=1}^q \{\text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] \text{Re}[G(j\omega_p)] + \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] \text{Im}[G(j\omega_p)] - \text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c] \text{Im}[G(j\omega_p)] + \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c] \text{Re}[G(j\omega_p)]\} \\ l=0, \dots, m, c=1, \dots, n$$

$$C_{l,c} = \sum_{p=1}^q \{-\text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] \text{Re}[G(j\omega_p)] + \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] \text{Im}[G(j\omega_p)] - \text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c] \text{Im}[G(j\omega_p)] + \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c] \text{Re}[G(j\omega_p)]\} \\ l=0, \dots, m, c=1, \dots, n$$

$$D_{l,c} = \sum_{p=1}^q \{(\text{Re}[G(j\omega_p)]^2 + \text{Im}[G(j\omega_p)]^2) \times \{\text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[(j\omega_p)^c] + \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[(j\omega_p)^c]\}\} \\ l=0, \dots, m, c=1, \dots, n$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$$

$$e_{l,1} = \sum_{p=1}^q \{-\text{Re}[(j\omega_p)^l] \text{Re}[G(j\omega_p)] - \text{Im}[(j\omega_p)^l] \text{Im}[G(j\omega_p)]\} \\ l=0, \dots, m$$

$$g_{l,1} = \sum_{p=1}^q -\text{Re}[(j\omega_p)^l] (\{\text{Re}[G(j\omega_p)]^2 + \text{Im}[G(j\omega_p)]^2\}) \\ l=1, \dots, m$$

公式(5)就是适用于不同阶次传递函数的 Levy 算法数学模型,由于系数矩阵中的各个元素都有固定的表达式给出,因此,在辨识不同阶次传递函数时,省去了重新推导系数矩阵的麻烦。直接将实测参数和  $m, n$  的值带入矩阵方程(5)并求解,便可获得待辨识的未知系数。

需要指出的是,上述未知参量的求取过程是在

加权目标评价函数  $J$  最小的条件下推导出来的,但是  $J$  最小并不意味着公式(2)所表达的拟合误差最小,如果待辨识的传递函数有多个极点,则  $|D(j\omega)|$  在待辨识的频段上变化很大,  $J_2$  并不能反映拟合的优劣程度,按照上述方法求取会出现较大的拟合误差。为获得更好的辨识效果,出现了 Levy 法的改进算法—Vinagre 法和 Sanko 法。

### 2.2 Vinagre 法辨识原理

由于低频数据对于公式(5)结果的求取影响很小,导致 Levy 法在低频段的拟合效果较差。为了提高算法的低频拟合精度,Vinagre 法<sup>[10]</sup>在 Levy 法原理的基础上又引入了合适的权重因子来改善算法在低频段的辨识性能。

若  $g(t)$  为系统的阶跃响应函数,则有:

$$\int_0^{+\infty} |g(t) - \hat{g}(t)|^2 dt = \int_0^{+\infty} \left| L^{-1} \left[ G(s) \frac{1}{s} \right] - L^{-1} \left[ \hat{G}(s) \frac{1}{s} \right] \right|^2 dt$$

根据帕斯瓦尔定理,上式可以表示为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| G(j\omega) \frac{1}{j\omega} - \hat{G}(j\omega) \frac{1}{j\omega} \right|^2 d\omega = \int_0^{+\infty} \frac{|\varepsilon(\omega)|^2}{\omega^2} d\omega$$

运用梯形迭代定理,上式可以近似为:

$$\sum_{p=1}^{f-1} \left[ \frac{\frac{|\varepsilon(\omega_{p+1})|^2}{\omega_{p+1}^2} + \frac{|\varepsilon(\omega_p)|^2}{\omega_p^2}}{2} \right] = \sum_{p=1}^f \frac{|\varepsilon(\omega_p)|^2}{\omega_p^2} \varphi_p$$

式中: $p$  为采样点。

$$\varphi_p = \begin{cases} \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}, & p=1 \\ \frac{\omega_{p+1} - \omega_{p-1}}{2}, & 1 < p < q \\ \frac{\omega_q - \omega_{q-1}}{2}, & p=q \end{cases}$$

将上式与公式(2)、公式(3)对比,新的回归分析评价函数  $J_V$  表示为:

$$J_V = \sum_{p=1}^q |E|^2 \frac{\varphi_p}{\omega_p} \quad (6)$$

运用与 Levy 法相同的分析方法构造矩阵方程,就可以辨识出待解的未知系数。对比公式(4)可以看出,Vinagre 法的回归分析评价函数仅比公式(4)多出了一个权重因子  $\varphi_p/\omega_p^2$ ,且该权重因子与待辨识系数无关,因此在构造矩阵方程时,公式(5)的结构不变,只需  $A、B、C、D$  4 个矩阵单元中的每个元素乘以该

权重因子即可。

### 2.3 Sanko 法辨识原理

由上述 Levy 法和 Vinagre 法辨识传递函数的原理可知,两种方法都是基于加权最小二乘原理来求对待辨识系数的。辨识结果可以使公式(3)的值最小,但系统的拟合误差不一定最小。为进一步改善系统的拟合精度,Sanko 法将迭代算法引入到辨识过程中。新的拟合误差定义为:

$$E_S = \frac{GD_L - N}{D_{L-1}}$$

式中: $L$  为迭代次数,  $D_{L-1}$  为上次迭代辨识的结果。相应地,回归分析评价函数为:

$$J_S = \sum_{p=1}^q |G(\omega_p)D_L(\omega_p) - N(\omega_p)|^2 \frac{1}{|D_{L-1}(\omega_p)|^2} \quad (7)$$

经过  $L$  次递推,  $|D_L(j\omega)/D_{L-1}(j\omega)|$  趋近于 1,所以拟合误差接近于公式(2)所表示的拟合误差。迭代次数  $L$  由被辨识参数需满足的精度  $e_s$  所决定,  $L$  需满足下面的准则函数判定

$$E = \max(\| \text{coefficientsOld} - \text{coefficients} \|) < e_s$$

式中:coefficientsOld 为第  $L-1$  次迭代辨识出来的未知参数向量;coefficients 为第  $L$  次得到的参数向量。

对比可以发现,Sanko 法其实也相当于在 Levy 法的基础上引入了权重因子  $1/|D_{L-1}(\omega_p)|^2$ ,而且它的值依赖于上一次辨识的结果,与本次辨识无关。因此,Sanko 法的辨识求解方法与 Vinagre 法类似,只需在把方程(5)系数矩阵中的每个元素乘以该权重因子并求解即可。

## 3 实例分析

### 3.1 传递函数模型辨识方法

传递函数模型的辨识包括了传递函数阶次的辨识和未知参数的辨识。从理论上讲,有了被控对象的频率响应特性数据,就可以通过曲线拟合的方法得到系统的传递函数。但实际上,控制系统中可能存在着复杂的谐振环节,系统的阶次一般比较高,直接运用曲线拟合的方法往往不能得到理想的效果。对于传递函数的辨识,工程上一般采用递阶辨识的方法进行处理。它按照被测系统的频率特性,将高阶系统分解为阶次较低的系统,根据频响测试得到的频率特性数据,先辨识低频环节,得出结果后从频率特

性数据中修正掉已辨识出的低频环节，然后按同样的方法进行中、高频环节的辨识。最后，将各个低阶子系统相乘，便得到了完整的系统传递函数。

尽管递阶辨识法分阶辨识的原理降低了单次传递函数参数求取计算过程的复杂度，但是，当总传递函数阶次较高时，它需要多次修正测得的频率响应数据，不断重复参数辨识的计算，况且递阶辨识法采用了各子系统相乘得到系统传递函数系数的方法，所得到的传递函数参数是不是最优还有待检验。

公式(5)给出了基于 Levy 法的适用于不同阶次传递函数的算法数学模型，即使待辨识的传递函数阶次较高，也能很方便地通过编程实现传递函数参数的求取。因此，文中利用该模型和递阶辨识思想相结合的方法辨识系统传递函数：以频率响应测试所得的 Bode 图为依据，先用递阶辨识的思想建立起系统的传递函数模型，然后再用基于模型(5)的 Levy 法或其改进算法辨识出传递函数的各个参数。

### 3.2 实例分析

按照第 1 节提出的方法对光电跟踪架进行频率特性测试，利用 Matlab 7.0 对数据进行处理，并将测试结果绘制成 Bode 图，如图 2 所示。应当注意的是，上述算法在计算相位差时采用的是反正切函数，因此，计算的相位差在大于 90°或小于 -90°时会产生相位跳变，需要根据相位差变化趋势对其进行 ±n×180°的处理。

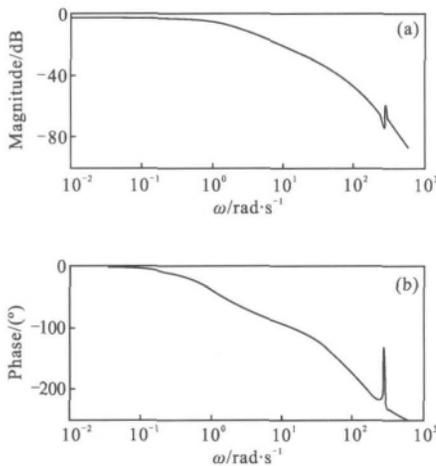


图 2 开环频率特性测试结果

Fig.2 Test results of open-loop frequency response

由低频段的幅频响应特性可以看出，该系统不含积分环节，为 0 型系统。在中低频段，系统由 3 个

惯性环节构成。在高频段(约大于 260 rad/s)，幅频特性和相频特性出现了急剧变化，出现了谐振现象。由曲线可以看出，在频率大于 260 rad/s 后，系统幅值急剧增大，相位滞后明显减小，说明系统应该包含 1 个二阶微分环节。幅值增大后又急剧下降，相位滞后明显增加，说明系统应该还包含一个振荡环节。因此，待辨识系统由 3 个惯性环节、1 个二阶微分环节和 1 个振荡环节构成。根据递阶辨识的思想，系统的传递函数可以由中低频段的 3 个惯性环节和高频段的二阶微分环节以及振荡环节的传递函数相乘得到此，光电跟踪架的传递函数模型可以表示为：

$$G(s) = \frac{s^2/\omega_n^2 + 2\zeta_1 s/\omega_n + 1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(s^2/\omega_m^2 + 2\zeta_2 s/\omega_m + 1)} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4 + a_5 s^5} \quad (8)$$

基于公式(8)的传递函数模型，分别用最小二乘法和基于公式(5)模型的 Levy 法、Vinagre 法、Sanko 法对该系统进行了参数辨识，结果如图 3 所示。由于根据递阶辨识原理构建了正确的传递函数模型，利用上述 4 种方法所辨识出来的传递函数幅频响应曲线与测得的曲线一致性较好，公式(5)所建立的数学模型比较准确。

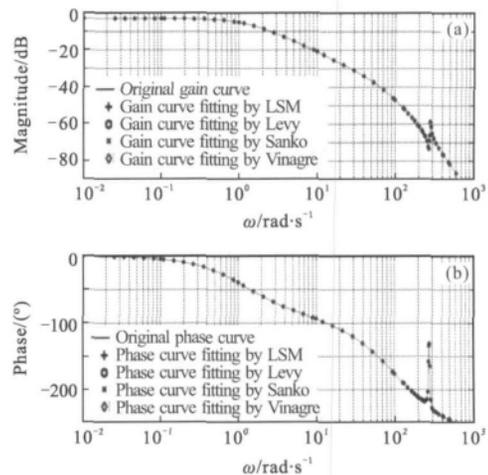


图 3 辨识函数曲线

Fig.3 Curves of identified function

若用公式(9)来表示各个频率点的拟合误差，则根据测量和辨识的结果，可以得到利用 Levy 法、Vinagre 法和 Sanko 法进行辨识的误差分别为  $7.8 \times 10^{-12}$ 、 $1.88 \times 10^{-14}$ 、 $4.18 \times 10^{-16}$ 。所以，在 3 种算法中，Sanko 算法的整体辨识精度最高，Vinagre 算法次之。

$$\varepsilon = \frac{\sum_{p=1}^q |G_T(j\omega_p) - G_{ID}(j\omega_p)|}{q} \quad (9)$$

式中:  $q$  为采样点数;  $G_T(j\omega_p)$ 、 $G_{ID}(j\omega_p)$  分别为  $\omega_p$  频率点实测的传递函数值和辨识出来的值。

为了更直观地显示各种算法在整个被测频段的辨识性能, 图 4 给出了图 2 所示频率特性曲线与利用前面所述 4 种辨识算法辨识所得传递函数频率特性曲线之间的误差。方框内的小图为误差曲线的局部放大图。

对比图 4 中的误差曲线可知: 采用递归辨识思想与 Levy 等算法相结合的传递函数辨识方法辨识的结果在整个测试的频段都较为准确, 而最小二乘辨识的结果始终都有较大的拟合误差。在低频段, 由于 Vinagre 法和 Sanko 法在辨识的过程中引入了权重函数, 它们的辨识误差明显优于其他两种方法。但是, 在中高频段, Vinagre 法和 Levy 法的辨识误差逐渐增大, 这是因为这两种算法都是建立在加权拟合误差基础之上, 辨识所得的结果并不一定能使原拟合误差最小。因此, 只有 Sanko 法的辨识精度最高,

$$G(s) = \frac{9.5696 \times 10^{-6} s^2 + 9.8912 \times 10^{-5} s + 0.708}{9.04 \times 10^{-10} s^5 + 2.0696 \times 10^{-7} s^4 + 8.3653 \times 10^{-5} s^3 + 1.5984 \times 10^{-2} s^2 + 0.8101 s + 1}$$

但是, 也应该注意到, Sanko 算法精度的提升是以增加算法复杂性为前提的, 迭代运算的引入势必会使算法的辨识速度减慢。在 Matlab7.0 中对 3 种算法辨识光电跟踪架传递函数所需的时间进行了测试, 结果如表 1 所示。测试中, 运行 Matlab 的计算机的 CPU 为 Pentium D 2.8 GHz, 内存为 2 G。

表 1 3 种算法辨识所需时间比较

Tab.1 Time consumption of the three algorithms

Algorithm	Time consumption/s
Sanko	0.047
Vinagre	0.017
Levy	0.016

从表中可以看出, 辨识精度最高的 Sanko 算法辨识所需的时间最长, Vinagre 法和 Levy 法耗费的时间几乎相等。这是因为 Sanko 法引入了迭代运算, 算法较为复杂, 而 Vinagre 法仅比 Levy 法多了一个权重因子, 二者算法的复杂程度相差无几。鉴于此, 在实际应用时, 应根据系统对辨识速度的要求来选择合适的算法。在对速度要求不高的场合, Sanko 法

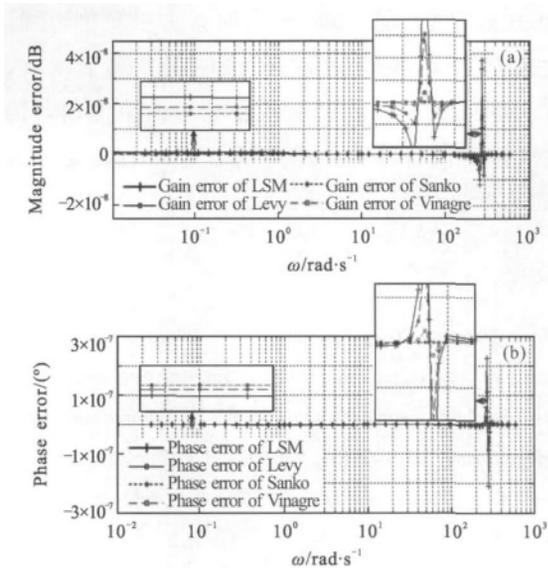


图 4 辨识误差

Fig.4 Error between identified data and test data

且在整体测试频段误差始终保持在较小的范围内, 因此采用该法辨识的结果作为最终系统传递函数的系数, 结果为:

是较为理想的系统传递函数辨识算法。

## 4 结论

针对现代光电跟踪伺服控制系统全数字化的特点, 采用数字扫频的方法进行光电跟踪架频率特性的测试, 进而利用合适的辨识方法推导出了跟踪架的传递函数。重点研究了 Levy 法、Vinagre 法和 Sanko 法等传递函数参数辨识算法, 并推导出基于 Levy 法的通用辨识算法数学模型, 解决了辨识不同阶次传递函数时需要重新推导待辨识系数方程的问题。提出了递阶辨识原理和 Levy 法等算法相结合进行传递函数辨识的思想, 利用根据递归辨识原理所建立的传递函数模型, 分别使用最小二乘法、Levy 法、Vinagre 法和 Sanko 法辨识出了跟踪架的传递函数。4 种算法的误差数据及误差曲线显示: 公式(5)所建立的 Levy 法数学模型较为准确; 采用递阶辨识原理和 Levy 法相结合的传递函数辨识方法所得结果误差较小; 4 种算法相比较, 最小二乘法效果最差, 误差始终较大。在低频段, Vinagre 法和 Sanko 法的辨

识效果比较理想,但 Vinagre 法的算法更简单,运算速度快;在中高频段,Vinagre 法的误差逐渐增大,Sanko 法的辨识误差仍能保持在较小的范围内。因此,在对速度没有特殊要求的场合,Sanko 法是较为合适的选择。

#### 参考文献:

- [1] Song Tingsong, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, et al. Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 934–938. (in Chinese)  
宋延嵩, 佟首峰, 姜会林, 等. 机载激光通信系统精跟踪单元变结构控制技术 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 934–938.
- [2] Lu Ning, Ke Xizheng, Zhang Hua. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 934–938. (in Chinese)  
卢宁, 柯熙政, 张华. 自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 934–938.
- [3] Hu Haojun, Ma Jianguang, Wang Qiang, et al. Transfer function identification in a fast steering mirror system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(7): 1–3. (in Chinese)  
胡浩军, 马佳光, 王强, 等. 快速控制反射镜系统中的传递函数辨识[J]. 光电工程, 2005, 32(7): 1–3.
- [4] Cascone E, Mancini D, Schipani P. Galileo telescope model identification[C]//SPIE, 1997, 3112: 343–350.
- [5] Min Yuejun, Xue Xu. Parameter identification method based on frequency domain of flexure hinged pendulum accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2008, 16(1): 94–103. (in Chinese)  
闵跃军, 薛旭. 基于频域的挠性摆式加速度计表头参数辨识方法[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 94–103.
- [6] Zhao Xia, Yao Yu, Fang Qiang. The study on the hierarchical identification method in the debugging of turntable servo system[J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(2): 229–234. (in Chinese)  
赵霞, 姚郁, 方强. 递阶辨识方法在转台伺服系统调试中的应用研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 229–234.
- [7] Wang Shuai, Chen Tao, Li Hongwei, et al. Frequency characteristic test and model identification for O–E tracking servo system[J]. *Opt and Precision Eng*, 2009, 17(1): 79–82. (in Chinese)  
王帅, 陈涛, 李洪文, 等. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 79–82.
- [8] Li Hongwen, Li Yuanchun. Neural network PID control based on model identifier for the odolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 442–446. (in Chinese)  
李洪文, 李元春. 基于模型辨识的神经网络 PID 控制在经纬仪中的应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 442–446.
- [9] Levy E C. Complex curve fitting [J]. *IRE Transaction on Automatic Control*, 1959, 4(3): 37–43.
- [10] Vinagre B M, Podlubny I, Hernández A, et al. Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications [J]. *Fractional Calculus & Applied Analysis*, 2000, 3: 231–248.