

基于Hammerstein-Wiener模型的射电望远镜 伺服系统参数辨识*

王 惠^{1,2} 许 谦^{1,3,4†} 薛 飞^{1,2} 曹晓曼¹ 邓静一^{1,2}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院射电天文与技术重点实验室 北京 100101)

(4 新疆射电天体物理重点实验室 乌鲁木齐 830011)

摘要 射电望远镜的大口径与高观测频段需求对伺服系统控制性能提出了更高要求. 针对天线系统中普遍存在的死区、饱和、齿隙等非线性耦合问题, 提出一种基于H-W (Hammerstein-Wiener)模型的天线伺服系统非线性建模方法, 设计了4步辨识步骤, 对H-W模型的输入非线性模块、动态线性模块及输出非线性模块进行估计. 利用新疆南山26 m射电望远镜辨识数据进行验证, 结果表明相较于传统线性系统模型, H-W模型在描述天线整体动态特性方面表现出更优性能.

关键词 望远镜, 方法: 数据分析, 方法: 数值

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

随着射电望远镜朝着大口径和高观测频段方向发展, 指向精度的提高愈发困难, 对伺服控制系统的动态响应特性和控制性能也提出了更严苛的要求. 但由于天线系统驱动链中普遍存在摩擦、齿隙引起的死区以及控制速度饱和等多种非线性耦合效应^[1], 严重制约了传统线性控制策略的性能边界.

射电望远镜动力学建模研究始于20世纪90年代, 常规方法通常是将被控对象进行理想化近似处理并建立线性化模型. Cascone等^[2]通过频域响

应分析实现了Galileo望远镜的12阶传递函数辨识. Ranka等^[3]利用观测器/卡尔曼辨识算法和特征系统实现算法, 建立了GBT (Green Bank Telescope)的线性模型. 张洁钰等^[4]通过机理建模方法构建了25 m射电望远镜俯仰系统动力学模型, 但该方法模型复杂, 参数难以测量. 侯晓拯等^[5]基于非线性采样数据的线性重构方法, 结合奇异值分解法与自回归神经网络, 对天线伺服系统的半实物实验平台进行了动力学模型辨识, 但模型的可解释性不足. 杨垒等^[6]结合相关分析与特征系统实现算法, 对射电望远镜伺服系统的动态特性进行了参数化建模与模型降阶. 以上研究, 虽实现了线性系统参

2025-02-25收到原稿, 2025-05-06收到修改稿

*新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01B72)、国家自然科学基金项目(12273102)、西部之光-西部交叉团队重点实验室专项(xbzbz-zdsys-202320)、中国科学院科研仪器设备研制项目(PTYQ2022YZZD01)、陕西省天线与控制技术重点实验室开放基金项目资助

† xuqian@xao.ac.cn

数估计, 却未能突破传统频域方法在非线性和非线性系统辨识中的理论局限. 过度的线性化处理不仅会降低天线指向精度、加剧跟踪延迟现象, 还会显著压缩系统的有效工作带宽.

天线系统中普遍存在如死区、饱和、齿隙等非光滑非线性特性, 这些特性往往会显著限制系统性能, 造成跟踪误差增大与振荡, 甚至引发不稳定^[7]. 通常使用双电机扭矩偏置方法来减少齿隙对系统的影响^[8]. 轮轨式的望远镜可以通过设置给定值的最小输出以粗略补偿轨道与滚轮之间静摩擦引起的死区^[9]. 文献^[10]对光学望远镜的摩擦开展系统辨识. 文献^[11]设计扰动观测器对摩擦进行观测补偿, 提升了系统的动态性能. 因此, 对射电望远镜天线开展非线性系统辨识, 是提升系统模型精度及控制性能的有效途径, 具有现实的工程意义. H-W (Hammerstein-Wiener)模型^[12]作为一种重要的非线性系统辨识方法, 在众多领域得到了应用, 例如通信系统中高功率放大器的非线性补偿^[13]、精密运动平台的非光滑非线性建模^[14]、化工等工业过程的辨识与预测控制^[15]等. H-W模型由输入静态非线性模块、中间动态线性模块和输出静态非线性模块串联构成, 能够较好地逼近许多实际的非线性系统, 相对于完全的黑箱模型(如神经网络), 其模块化设计支持对输入饱和、输出齿隙死区等物理可观测非线性进行独立辨识与优化, 保留了一定的物理可解释性^[16]. 然而, 如何有效辨识H-W模型中各个模块的参数, 尤其是面对实际系统中的复杂特性时, 仍然是一个挑战, 需要发展针对性的辨识策略.

针对射电望远镜伺服系统中多非线性耦合(输入饱和、摩擦、齿隙死区)导致的建模难题, 本文提出基于H-W模型的模块化辨识架构, 实现对系统中关键物理非线性环节(如输入饱和和输出死区)的有效分离与辨识. 通过对南山26 m射电望远镜实测数据的验证表明, 本文提出的基于H-W模型的辨识方法相较于传统线性模型, 拟合精度和非线性特征描述上均展现出显著优势, 能够为后续高性能控制器的设计奠定更精确的模型基础.

2 系统非线性分析

2.1 伺服系统结构

轮轨式天线采用方位和俯仰两个自由度的独立控制系统, 能够有效避免两者之间的相互干扰, 确保天线在全天候的高精度观测能力. 常规的控制和传动结构框图如图1所示, 方位和俯仰角度的控制均采用典型的3环控制回路结构. 位置环的控制由计算机或控制器实现. 方位传动链通过滚轮与轨道之间的摩擦传动提供方位座架的旋转驱动力, 而俯仰运动则依靠减速机输出轴上的小齿轮与天线背架支撑结构上的大齿轮的啮合来实现.

2.2 控制器输入的非线性

为了确保大型结构的安全并防止电机运行转速超过其额定值, 对控制器的输出进行了速度限幅. 为了避免因驱动力波动过大而引发运动振荡及减速机齿轮打齿, 对控制器输出的速度变化率也进行了限制. 同时, 电机的加速度被限制在电机和驱动器的最大电流范围内, 伺服驱动器对速度环指令输入进行了斜坡化处理, 并对输出的电流指令进行了限幅. 这些限幅措施同时应用于天线的方位和俯仰角度位置控制器, 导致控制器的控制量呈现出非线性特性. 作为目前望远镜普遍使用的控制器, PID (Proportional Integral Derivative) 控制器为了降低因限幅产生的积分饱和影响, 采用了抗积分饱和处理, 进一步增加了控制器的非线性程度. 某一类型的望远镜增量式PID控制器处理逻辑如图2所示, $e(k)$ 是偏差量, $\Delta u(k)$ 是控制增量, $u(k)$ 是控制总量, k 是离散时间采样序列点, 控制量在经加速度、速度限幅后, 总体呈现饱和和非线性特性, 如图3所示, 非线性函数 $f_{NL}(\cdot)$ 如下所示:

$$f_{NL}(u) = \begin{cases} \eta, & c_1 u(k) > \eta; \\ c_1 u(k), & -\mu \leq c_1 u(k) \leq \eta; \\ -\mu, & c_1 u(k) < -\mu, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u(k)$ 表示输入信号, c_1 是增益系数, η 是上限值, $-\mu$ 是下限值, 在运动阶段, 饱和宽度由方程中 η 和 μ 描述确定. 尽管饱和模块是静态的, 但其参数 η 和 μ 可能随位移缓慢变化. 在精密跟踪控制中,

若忽略这一现象, 将显著限制跟踪性能, 甚至导致 执行机构失效.

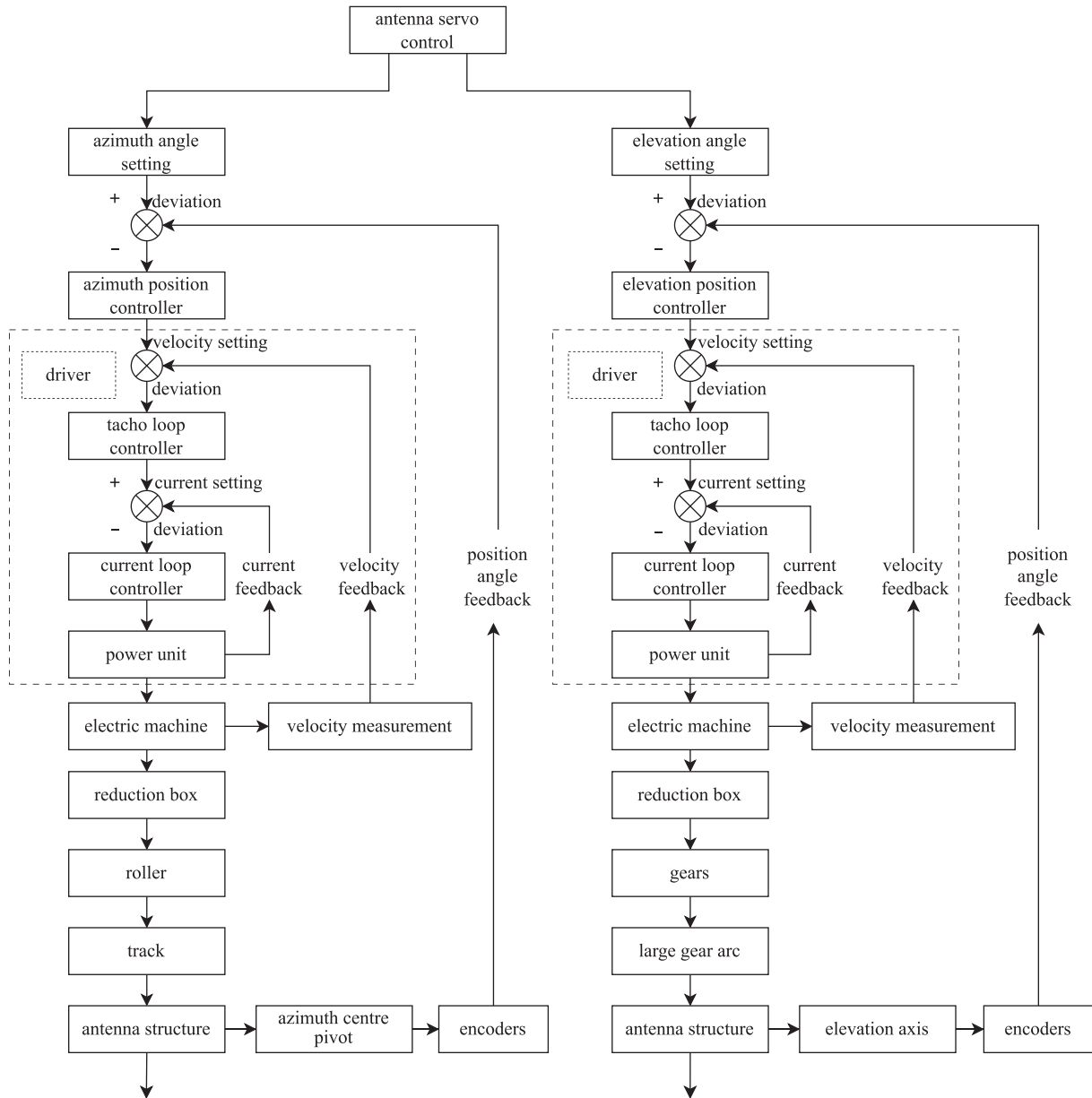


图 1 射电望远镜天线控制和传动结构框图

Fig. 1 Block diagram of radio telescope antenna control and drive structure

2.3 传动链的动态线性

射电望远镜的天线驱动部分通常采用驱动器驱动直流或交流电机实现调速控制. 在天线运动过程中, 电机产生的非线性影响较为微弱, 因此可

以忽略不计, 系统近似呈现动态线性特性. 电机驱动天线结构整体表现出大惯量的滞后特性, 需要对系统延迟周期进行判断. 在采用适宜的电机和驱动器并调整控制参数后, 将驱动器、电机、机

构的等效关系近似为离散时间线性传递函数 $G(z)$, 其常见形式可以写为:

$$G(z) = \lambda \frac{B(z)}{A(z)} = \lambda \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}, \quad (2)$$

其中, λ 是增益系数. $B(z)$ 和 $A(z)$ 分别是系统的输入和输出多项式, b_0, \dots, b_m 为输入多项式中的各个项的权重, a_1, \dots, a_n 为输出多项式中的各个项的权重, z^{-1} 为单位延迟算子, $m、n$ 为 $G(z)$ 的阶数.

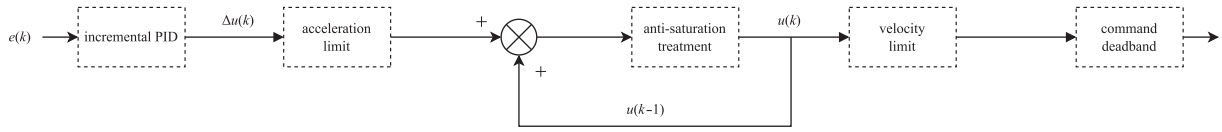


图 2 望远镜增量式PID控制器处理逻辑框图

Fig. 2 Processing logic block diagram of the incremental PID controller for the telescope

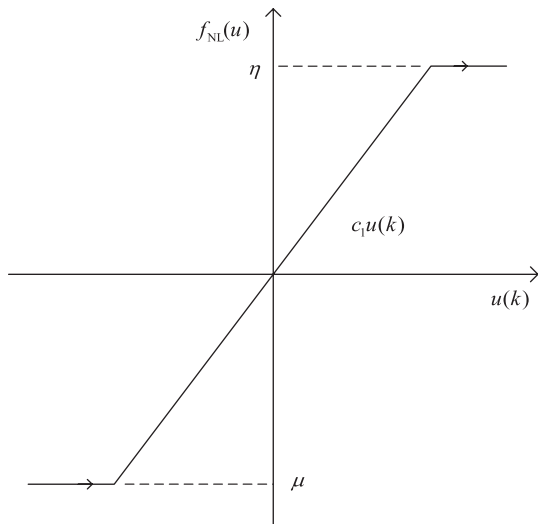


图 3 饱和非线性特性图

Fig. 3 Saturation nonlinear characteristic diagram

2.4 齿隙、摩擦产生的输出非线性

回差在机械传动系统中普遍存在, 尤其是在需要频繁改变运动方向的场景中更是不可避免的. 它会导致系统在低速运行时出现不平稳, 并在换向过程中引发误差、跳变, 从而对系统的跟踪性能和定位精度造成严重影响. 此外, 回差还具有强非线性、难以解析和不可微的特性. 在未知负载扰动和摩擦作用情况下, 还可能出现极限环振荡等稳定性问题. 齿隙是产生回差的主要因素, 当存在齿隙时, 输入与输出不会一一线性对应, 而会在反向啮合或方向切换时出现“松动”现象, 其动态特性可通过具有记忆性的非线性函数 $n_{NL}(\cdot)$ 描述,

如(3)式所示.

$$n_{NL}(w) = \begin{cases} g_2[w(k)], & w(k) > g_2^{-1}[y(k-1)]; \\ y(k-1), & g_1^{-1}[y(k-1)] \leq w(k) \leq g_2^{-1}[y(k-1)]; \\ g_1[w(k)], & w(k) < g_1^{-1}[y(k-1)], \end{cases} \quad (3)$$

式中, g_2 和 g_1 是严格单调上升和下降函数, $w(k)$ 为输入信号, $y(k-1)$ 为上一采样时刻输出.

图4展示了典型齿隙的非线性传动特性, 其输出不仅依赖于当前输入, 还与前序输入有关. 曲线的上升函数 $g_2(\cdot)$ 和下降函数 $g_1(\cdot)$ 是连续且严格单调的, 因此具有可逆性. 函数 $g_2(\cdot)$ 严格在 $g_1(\cdot)$ 的右边, 两者之间没有交点, 且分别具有已知的水平轴交点 a_1 和 a_2 . 当输入量在一定小范围内变化时(齿轮的间隙还未被“顶住”), 输出几乎无响应, 出现所谓“死区”. 以电机驱动为例, 转矩传递和转动惯量的影响导致输入和输出轴的速度不会同时发生突变, 为便于工程辨识与控制设计, 常将其在小幅换向区间近似为死区模型, 图5示意了该等效死区特性. 只有当输入超过阈值时, 才会继续传递力或位移. 这种死区会导致系统对小幅度变化不敏感, 进而在控制系统或传动系统中造成滞后、震颤或其他不利影响.

3 基于H-W模型的参数辨识

3.1 模型结构

为在保留线性动态特性的同时, 刻画静态非线性, 本文采用H-W模型对系统进行结构化建模,

其由输入侧静态非线性、动态线性模块与输出侧静态非线性串联组成, 如图6所示. 其中, $f_{NL}(\cdot)$ 、 $G(z)$ 与 $n_{NL}(\cdot)$ 与第2节表述意义一致. $u(k)$ 经输入非线性模块得到 $v(k)$, $v(k)$ 既是 $f_{NL}(\cdot)$ 的输出, 也是 $G(z)$ 的输入; 线性模块输出为 $w(k)$, 既是 $G(z)$ 的输出, 也是 $n_{NL}(\cdot)$ 的输入; 最终输出为 $y(k)$, 表示天线角度响应, $v(k)$ 、 $w(k)$ 为中间变量.

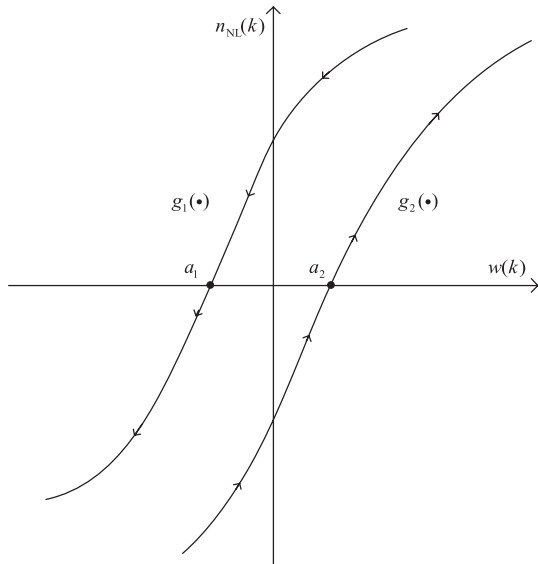


图 4 常规齿隙非线性特性

Fig. 4 Nonlinear characteristics of conventional backlash

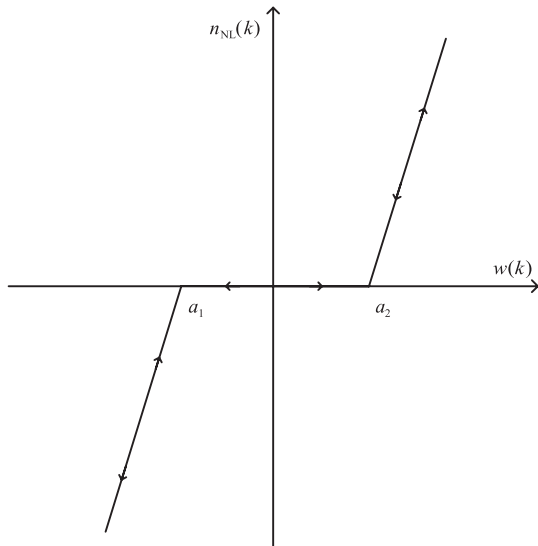


图 5 齿隙的死区特性

Fig. 5 Dead zone characteristics of the backlash



图 6 H-W非线性模型结构示意图

Fig. 6 Schematic structure of the H-W nonlinear model

相应地, 该结构可表示为:

$$\begin{cases} v(k) = f_{NL}[u(k)], \\ w(k) = G(z)v(k), \\ y(k) = n_{NL}[w(k)]. \end{cases} \quad (4)$$

传统齿隙模型因包含动态记忆成分, 不满足H-W模型非线性模块静态特性的要求. 实际工程中, 为抑制齿隙引起的滞回非线性, 达到刚性抗扰的目的, 通常采用电消除的方法, 通过向双电机注入等幅反向的速度或电流偏置实现. 偏置转矩必须足够大以克服摩擦并消除间隙, 但又不能过大, 否则会严重制约位置控制的性能. 速度或电流的偏置也会引入额外的传动链非线性, 并且电消除也并不能完全消除齿隙的非线性. 因此, 为满足H-W模型的静态特性要求, 采用死区模型对齿隙非线性进行简化描述, 具体形式为:

$$n_{NL}(w) = \begin{cases} c_2[w(k) - \alpha], & w(k) > \alpha; \\ 0, & \beta \leq w(k) \leq \alpha; \\ c_3[w(k) - \beta], & w(k) < \beta. \end{cases} \quad (5)$$

上式定义了1个参数化的死区非线性模块. 当输入信号 $w(k)$ 超过上限阈值 α 时, 输出由增益 c_2 线性放大; 当 $w(k)$ 低于下限阈值 β 时, 输出由增益 c_3 线性衰减; 在 α 和 β 之间的死区区间内, 输出恒为零. 该模型是一种静态标量分段线性非线性函数. 但由于其非光滑性(阈值点处不可导), 可能导致数值计算困难. 为确保非线性模块的输出可逆性假设成立, 可采用分段多项式插值对阈值点附近的逆映射进行平滑处理.

H-W系统模型的3重结构模型普遍存在模型参数化唯一性的问题, 即模型的辨识结果是一个集合而不是一个固定值. 为解决此问题, 做如下分析和假设: 在饱和和非线性模块的描述中, 输入 $u(k)$ 与输出 $v(k)$ 为斜率非负的非减函数, 而动态线性模块中, $G(z)$ 对输入 $v(k)$ 存在积分作用. 因此, 两模块串联后, 输入与中间量之间的关系为:

$$\left. \begin{aligned} v(k) &\propto u(k); \\ w(k) &\propto \sum v(k); \end{aligned} \right\} \Rightarrow w(k) \propto \sum u(k). \quad (6)$$

同理, 死区非线性模块的增益也可以统一到 $G(z)$ 中. 将 c_1 、 c_2 、 c_3 均设置为单位增益1, 通过动态线性模块的增益 λ 进行统一的建模和辨识. 最终, 将H-W模型完全参数化, 得到如下所示的描述方程:

$$y(k) = n_{\text{NL}}\{G(z)f_{\text{NL}}[u(k)]\}, \quad (7)$$

令

$$\mathbf{B}' = \{\lambda \cdot b_0, \lambda \cdot b_1, \dots, \lambda \cdot b_m\} = \{b'_0, b'_1, \dots, b'_m\}, \quad (8)$$

则需要辨识的H-W系统模型参数为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}} &= \{a_1, a_2, \dots, a_n\}; \\ \tilde{\mathbf{B}} &= \{b'_0, b'_1, \dots, b'_m\}; \\ \tilde{\mathbf{C}} &= \{\alpha, \beta\}; \quad \tilde{\mathbf{D}} = \{\eta, \mu\}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} l := n + m; \\ u(k) = 0, \quad y(k) = 0, \quad \text{when } k \leq 0. \end{cases} \quad (10)$$

3.2 辨识流程

设计4步辨识步骤对H-W模型参数进行辨识:

1. 动态线性模块辨识: 基于输入、输出数据集 $\{\mathbf{U}, \mathbf{Y}\}$ 对动态线性模块 $G(z)$ 进行辨识, 包括模块的结构参数, 获得 $G_0(z)$. 可以采用常规的传递函数或子空间辨识等多种方法; 2. 输入非线性估计: 利用初步辨识得到的 $G_0(z)$ 和输出数据集 $\{\mathbf{Y}\}$, 估计中间变量数据集 $\{\mathbf{V}\}$, 进而利用输入和中间变量集 $\{\mathbf{U}, \mathbf{V}\}$ 对输入非线性模块进行估计, 得到 $f_{\text{NL}0}(\cdot)$; 3. 输出非线性估计: 利用 $G_0(z)$ 和输入数据集 $\{\mathbf{U}\}$, 估计中间变量数据集 $\{\mathbf{W}\}$, 进而利用中间变量和输入数据集 $\{\mathbf{W}, \mathbf{Y}\}$ 对输出非线性模块进行估计, 得到 $n_{\text{NL}0}(\cdot)$; 4. 迭代优化: 以最小化输出误差为标准, 对 $\{f_{\text{NL}0}(\cdot) G_0(z) n_{\text{NL}0}(\cdot)\}$ 进行迭代, 得到最终辨识模型参数 $\{\hat{f}_{\text{NL}}(\cdot) \hat{G}(z) \hat{n}_{\text{NL}}(\cdot)\}$.

$$G(z) = \frac{0.004828z^{-3} - 0.01261z^{-4} + 0.0159z^{-5} - 0.009702z^{-6}}{1 - 3.726z^{-1} + 6.032z^{-2} - 4.712z^{-3} - 0.486z^{-4}} \times \frac{-0.003579z^{-7} + 0.01059z^{-8} - 0.009064z^{-9} + 0.003634z^{-10}}{5.157z^{-5} - 5.586z^{-6} + 3.056z^{-7} - 0.6973z^{-8} - 0.03809z^{-9}}, \quad (12)$$

3.3 辨识误差来源分析

本方法在进行实际应用时, 辨识精度可能受到多种因素的影响, 需要通过合理设计实验、选择合适的模型结构、采用鲁棒的辨识算法以及进行充分的模型验证来尽可能地减小这些误差的影响, 主要的误差来源可归纳如下:

1、实验数据中存在测量噪声, 激励信号在生成、离散化及施加过程中可能引入量化误差、采样效应或附加噪声;

2、非线性环节的近似误差, 系统降阶带来的匹配误差;

3、分块辨识存在的局部最优导致的误差, 联合优化算法存在的误差;

4、激励信号的局限性, 由于辨识实验激励信号不能完全激发实际系统的响应特性带来的误差.

4 辨识结果

为验证所提出的辨识方法的有效性, 采用新疆天文台南山基地26 m射电望远镜的方位伺服系统实测数据集, 开展方法验证. 实验中, 断开了伺服系统位置闭环控制回路, 采用速度指令作为激励输入, 采集轴角度编码器反馈信号作为输出响应, 实验系统的结构框图如图7所示. 根据文献[6]的研究可知, 伺服系统的主谐振峰位于2 Hz附近且数据采样率为20 Hz (对应控制周期0.05 s), 为激发天线的高频特性, 我们选用了[0, 5] Hz的正弦扫频信号作为速度激励. 选择5 Hz作为频率上限, 主要是因为已能够包含天线伺服控制带宽的范围, 同时在更高频率范围(例如[5, 10] Hz), 输出信号中测量噪声及其他高频扰动的影响则相对更为显著, 导致信噪比较低, 不利于进行精确的系统辨识.

经辨识得到的H-W模型参数如下:

$$f_{\text{NL}}(u) = \begin{cases} 0.438, & u(k) > 0.438; \\ u(k), & -0.335 \leq u(k) \leq 0.438; \\ -0.335, & u(k) < -0.335, \end{cases} \quad (11)$$

$$n_{NL}(w) = \begin{cases} w(k) - 0.00485, & w(k) > 0.00485; \\ 0, & -0.0225 \leq w(k) \leq 0.00485; \\ w(k) + 0.0225, & w(k) < -0.0225. \end{cases} \quad (13)$$

相应的模型辨识结果如图8所示, 蓝色实线为实际系统的响应曲线, 红色点线为辨识得到的H-W模型的响应曲线. 从图中可以看出, H-W模型能够较为准确地逼近天线方位伺服系统的运动特性.

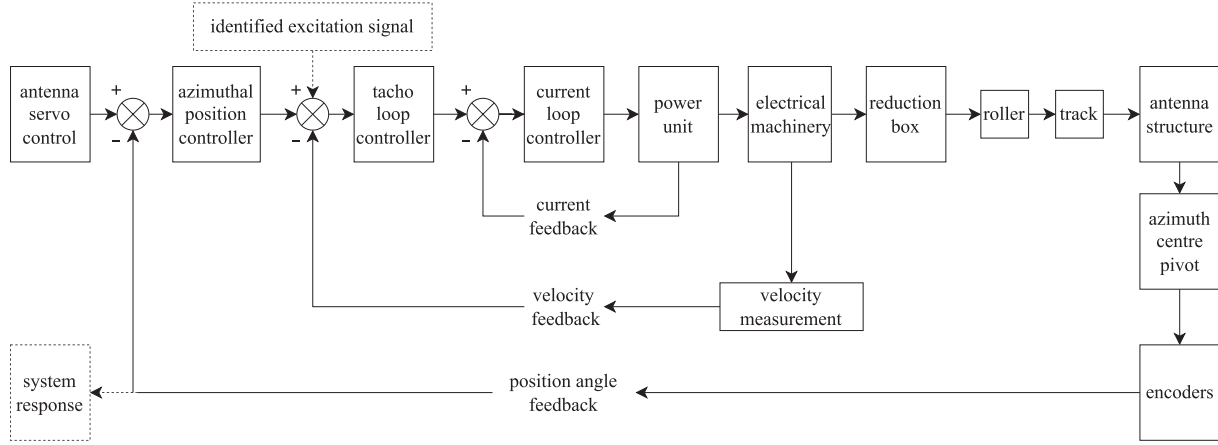


图 7 南山26 m射电望远镜方位伺服系统辨识框图

Fig. 7 Block diagram of azimuth servo identification for Nanshan 26 m radio telescope

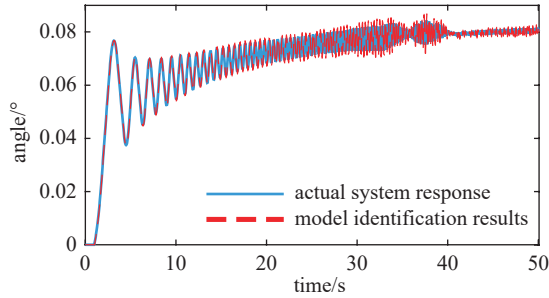


图 8 系统实际响应与辨识结果对比

Fig. 8 Comparison between the actual response of the system and the identification results

为了对比与线性模型的差别, 利用子空间辨识方法对同一组数据进行了辨识, 获得了线性辨识模型. 利用另外两组激励-响应数据进行验证, 其结果如图9所示: 蓝色实线为采样获得的实际系统响应, 红色点线为H-W辨识模型响应, 绿色虚线为线性辨识模型响应. 利用拟合优度(Fit Percentage)量化模型的精度, 计算方法如(14)式所示.

$$\text{Fit Percentage} = 100 \times \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \right), \quad (14)$$

其中: y_i 是实际值, \hat{y}_i 是预测值, \bar{y} 是实际值的平均值, N 是数据点的总数.

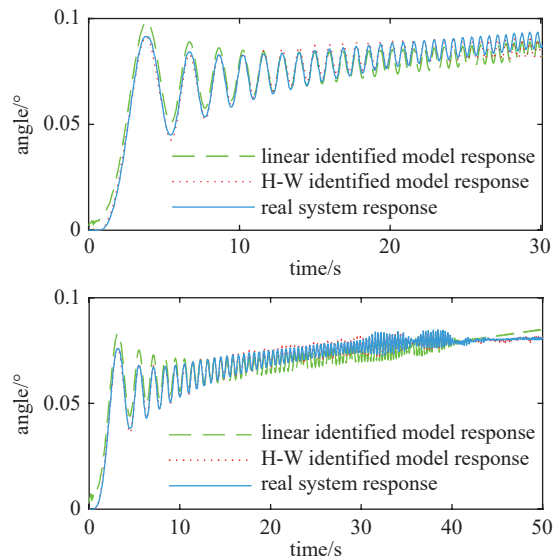


图 9 线性模型与H-W模型辨识结果对比

Fig. 9 Comparison of identification results between linear model and H-W model

从图9中可以看出, 本文提出的模型辨识结果较子空间方法辨识得到的线性模型对天线整体的

动态特性的描述效果更好,对微弱激励下的非线性特性具有更好的体现,对高频特性的反映也较线性模型更为准确.对于同一组激励信号,H-W模型对实际系统响应的拟合度达到94.6%,而线性模型仅为86.2%.为了进一步提高辨识的精度,尤其是在非线性特性上,可以设计特殊的激励信号,例如调幅调相的正弦扫频信号.通过施加幅值更小的激励信号,可以更清晰地激发系统的非线性特性,避免系统线性行为的干扰,从而更精确地辨识系统的非线性部分.

5 结论

本文针对射电望远镜伺服系统中普遍存在的非线性耦合问题,提出了一种基于H-W模型的非线性系统辨识方法.通过设计的4步辨识流程,成功对模型的输入非线性、动态线性和输出非线性模块进行了估计.利用新疆南山26 m射电望远镜方位轴的实测辨识数据对该方法进行了验证.结果表明,相较于传统的线性模型,本文提出的基于H-W模型的辨识方法能够更准确地描述天线伺服系统的整体动态特性,尤其在捕捉微弱激励下的非线性行为和高频特性方面表现更优,在验证数据集上的拟合优度达到了94.6%,显著高于线性模型的86.2%.H-W模型的模块化结构允许将复杂的非线性系统分解为相对独立的静态非线性环节和动态线性环节,这不仅有助于理解和分离如输入饱和、输出死区(简化齿隙)等关键物理非线性效应,也便于后续针对性地进行模型优化和控制器

设计,降低了辨识与应用的复杂度,具有良好的工程实践价值.未来我们会将该辨识方法扩展应用于俯仰伺服,进行详细的建模分析与性能验证,并基于方位轴和俯仰轴的精确H-W模型,探索更先进的非线性控制策略,以期进一步提升大型射电望远镜的指向精度和动态响应性能.

参考文献

- [1] Gawronski W. *ITCST*, 2007, 15: 276
- [2] Cascone E, Mancini D, Schipani P. *SPIE*, 1997: 343
- [3] Ranka T, Garcia-Sanz M, Weadon T, et al. 2014 American Control Conference. Portland: IEEE, 2014: 3692
- [4] 张洁钰, 保宏. *电子机械工程*, 2018, 34: 50
- [5] 侯晓拯, 许谦, 李琳, 等. *天文学报*, 2022, 63: 58
- [6] 杨垒, 刘志勇, 王娜, 等. *新疆大学学报(自然科学版)*, 2022, 39: 306
- [7] Nordin M, Gutman P O. *Autom*, 2002, 38: 1633
- [8] 冯锦平, 马文礼, 黄金龙. *光电工程*, 2009, 36: 64
- [9] Brandt J, Ford J, Hunter T, et al. PTCS Project Note 55. Precision Telescope Control System, 2007: 3
- [10] Kumar T S, Bastin C, Kumar B. Conference on Ground-Based and Airborne Telescopes VI. Edinburgh: SPIE, 2016: 99063
- [11] Su Y R, Wang Q, Yan F B, et al. *RAA*, 2021, 21: 185
- [12] Wang D Q, Ding F. *ISPL*, 2012, 19: 825
- [13] Sano A, Sun L. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. Osaka: IEEE, 2002, 3: 1521
- [14] Zhang Z, Zhang D, Zheng H, et al. 2019 Chinese Control Conference. Guangzhou: IEEE, 2019: 1637
- [15] Luo X S, Song Y D. *Information Sciences*, 2018, 422: 447
- [16] Taringou F, Hammi O, Srinivasan B, et al. *IET Circuits Devices & Systems*, 2010, 4: 282

Hammerstein-Wiener Model-Based Parameter Identification for Radio Telescope Servo Systems

WANG Hui^{1,2} XU Qian^{1,3,4} XUE Fei^{1,2} CAO Xiao-man¹ DENG Jing-yi^{1,2}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(4 Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011)

ABSTRACT The large aperture and high observation frequency requirements of radio telescopes impose stringent demands on servo system control performance. To address common nonlinear coupling issues in antenna systems, such as dead zones, saturation, and backlash, this paper proposes an H-W (Hammerstein-Wiener) model-based nonlinear modeling method for antenna servo systems. A four-step identification process is designed to estimate the input nonlinear module, dynamic linear module, and output nonlinear module of the H-W model. Validation using identification data from the 26 m radio telescope in Nanshan, Xinjiang, demonstrates that the H-W model outperforms traditional linear system models in describing the overall dynamic characteristics of the antenna.

Key words telescopes, methods: data analysis, methods: numerical