

# 广义 Hamilton 系统的观测器及基于观测器的 $H_\infty$ 控制设计\*

王玉振

(山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

葛树志

(新加坡国立大学电气与计算机工程系, 新加坡 117576, 新加坡)

程代展

(中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100080)

**摘要** 研究广义 Hamilton 系统的观测器设计 and 应用问题. 首先, 根据广义 Hamilton 系统的结构特性, 提出一种新的观测器设计方法: 扩张 + 反馈法. 基于该方法, 文中设计了两种观测器, 一种是针对系统结构中不含参数摄动的情况而设计的; 另一种是自适应观测器, 则是针对系统结构中含参数摄动的情况而提出的. 然后, 运用所得到的观测器研究广义 Hamilton 系统的基于观测器的  $H_\infty$  控制设计问题, 给出一种新的设计方法. 最后, 把得到的结果应用于电力系统, 给出单机无穷大系统的状态观测器和基于观测器的  $H_\infty$  控制方案. 仿真结果表明, 所提出的方法是非常有效的.

**关键词** 广义 Hamilton 系统 观测器 自适应观测器 零状态可检测 基于观测器的  $H_\infty$  控制 电力系统

在状态反馈控制设计中, 当系统的状态不可测时, 利用观测器重构系统的状态就成了一个不可缺少的环节. 自从 Luenberger<sup>[1]</sup> 提出观测器的概念以来, 观

2003-12-17 收稿, 2004-09-16 收修改稿

\* 新加坡国防科技处 (R-263-000-238-422) 和中国国家自然科学基金 (批准号: 60474001) 资助项目

\*\* E-mail: yzwang@tsinghua.edu.cn

测器的理论和设计倍受人们的关注<sup>[2~6]</sup>,已成为控制理论与控制工程中的一个重要研究课题.线性系统观测器的理论和设计已日渐成熟;而非线性系统来说,问题还远未解决,人们针对不同对象做了相应的探讨.

近几年,带标准输出的广义 Hamilton 系统 (Port-controlled Hamiltonian System<sup>[7]</sup>, 以下简称为 PCH 系统) 受到人们的重视并取得了许多重要的成果<sup>[8~15]</sup>. 在这类系统中, Hamilton 函数是系统的总能量 (在物理系统中是动能和势能之和); 该函数最大的优点是: 它能构成系统的 Lyapunov 函数. 目前, 关于该类系统有两个研究热点: 一是基于 PCH 系统的 Hamilton 函数方法的研究和应用<sup>[9~13]</sup>; 二是如何把一个非线性系统表示为一个耗散的 Hamilton 系统即广义 Hamilton 实现问题<sup>[14,15]</sup>. 这两个研究热点的关键, 仍是如何设计适当的状态反馈控制律以达到控制或实现的目标.

在 Hamilton 系统的状态观测器研究方面, Hebertt Sira-Ramírez 等人在结构矩阵和系统输出都是常值的情况下, 研究了 PCH 系统的观测器设计问题, 并把得到的结果应用于混沌同步研究<sup>[16]</sup>. Lohmiller 和 Slotine 基于他们早期的工作 (Contraction Analysis for Nonlinear Systems) 也给出了一类特殊 Hamilton 系统的观测器<sup>[17]</sup>. 关于一般 PCH 系统的观测器设计问题, 目前还没有这方面的文献报道.

本文研究 PCH 系统的观测器设计 and 应用问题. 根据 PCH 系统的结构特性, 提出了一种新的观测器设计方法: 扩张 + 反馈. 该方法的优点是: 避开了求误差系统. 在传统的观测器设计中, 需得到一个误差系统并证明其渐近收敛于零; 而大多数系统的误差系统往往难以得到, 因此本文方法可解决用传统方法不能解决的一类系统 (如 PCH 系统) 的观测器设计问题. 基于这种新方法, 本文将设计两种观测器, 一种是针对系统结构中不含参数摄动的情况而设计的; 另一种是自适应观测器, 则是针对系统结构中含参数摄动的情况而提出的. 然后, 本文运用所得到的观测器研究 PCH 系统的基于观测器的  $H_\infty$  控制设计问题, 给出一种新的设计方法. 最后, 把得到的结果应用于电力系统, 给出单机无穷大系统<sup>[18]</sup> 的状态观测器和基于观测器的  $H_\infty$  控制方案. 仿真结果表明, 本文的方法是行之有效的.

## 1 观测器设计

本节研究 PCH 系统的观测器设计问题, 提出一种新的设计方法: 扩张 + 反馈法, 并设计两类观测器.

考虑结构参数含未知摄动的 PCH 系统<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x, p) - R(x, p)] \frac{\partial H(x, p)}{\partial x} + g(x)u, \\ y = g^T(x) \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $p$  是结构参数摄动未知向量,  $J^T(x, p) = -J(x, p)$ ,  $R(x, p)$

半正定,  $H(x, p)$  是系统的 Hamilton 函数且  $H(x, 0)$  在  $x_0$  取得极小. 假设系统 (1) 不可测, 我们按两种情况来设计系统的观测器:  $p = 0$  和  $p \neq 0$ .

**1.1  $p = 0$  时观测器设计**

在这种情况下, 为设计系统 (1) 的观测器, 我们假设:

**S1**  $\nabla H(x, 0) \neq 0$  ( $x \neq x_0$ ) 且系统关于虚拟输出  $y_1 := R^{\frac{1}{2}}(x, 0)\nabla H(x, 0)$  和输入  $u$  零状态可检测<sup>[19]</sup>, 即由  $y_1 \equiv 0, u \equiv 0 \Rightarrow x \rightarrow x_0$  ( $t \rightarrow \infty$ ), 这里  $R^{\frac{1}{2}}(x, 0)$  定义为  $R(x, 0) = [R^{\frac{1}{2}}(x, 0)]^2, \nabla H(x, 0) := \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x}$ ;

**S2** 存在  $m \times n$  的非零矩阵  $K(x)$  和  $K_1(x)$  使得

$$W(x) := R(x, 0) + [g(x)K(x) + K^T(x)g^T(x)] \geq 0, \tag{2}$$

$K(x) = K_1(x)W(x)$  并且如下系统

$$\dot{x} = [J(x, 0) - W(x)]\nabla H(x, 0) \tag{3}$$

关于  $y_2 := W^{\frac{1}{2}}(x)\nabla H(x, 0)$  零状态可检测.

**注 1** 因为  $R(x, 0) \geq 0$ , 所以满足 (2) 式的  $K(x)$  的可解性是明显的. 得到  $K(x)$  后, 再由  $K(x) = K_1(x)W(x)$  求  $K_1(x)$ . 不难看出,  $K_1(x)$  也是可解的 (至少可求出特殊的  $K_1(x)$ ). 下面假设 S2' 中的可解性与此相同.

在假设 S1 和 S2 下, 我们设计如下形式的观测器:

$$\dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}, 0) - R(\hat{x}, 0)]\frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} + g(\hat{x})u + K^T(\hat{x})\left[y - g^T(\hat{x})\frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}}\right]. \tag{4}$$

以下所采用的处理方法与传统方法有所不同: 先将 (1) 和 (4) 组成一个扩展系统, 然后通过仅与  $\hat{x}$  有关的反馈将扩展系统变为耗散形式, 最后证明 (4) 的确是系统 (1) 的观测器. 这一方法可简单地描述为: 扩张 + 反馈.

由 (1) 和 (4) 式得

$$\dot{X} = [\bar{J}_1(X) - \bar{R}_1(X)]\frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial X} + \bar{g}(X)u, \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{J}_1(X) &= \begin{pmatrix} J(x, 0) & 0 \\ 0 & J(\hat{x}, 0) \end{pmatrix}, \\ \bar{R}_1(X) &= \begin{pmatrix} R(x, 0) & 0 \\ -K^T(\hat{x})g^T(x) & R(\hat{x}, 0) + K^T(\hat{x})g^T(\hat{x}) \end{pmatrix}, \\ X &= (x^T, \hat{x}^T)^T, \quad \bar{H}(X) = H(x, 0) + H(\hat{x}, 0), \\ \frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial X} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x} \\ \frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} \end{pmatrix}, \quad \bar{g}(X) = \begin{pmatrix} g(x) \\ g(\hat{x}) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

既然  $\bar{R}_1(X)$  不是对称形式, 选择仅与  $\hat{x}$  有关的控制律

$$u = -K(\hat{x})\frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} + v, \tag{6}$$

并将其代入 (5) 式得

$$\dot{X} = [\bar{J}(X) - \bar{R}(X)] \frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial X} + \bar{g}(X)v, \quad (7)$$

其中

$$\bar{J}(X) = \begin{pmatrix} J(x, 0) & -g(x)K(\hat{x}) \\ K^T(\hat{x})g^T(x) & J(\hat{x}, 0) \end{pmatrix},$$

$$\bar{R}(X) = \begin{pmatrix} R(x, 0) & 0 \\ 0 & R(\hat{x}, 0) + g(\hat{x})K(\hat{x}) + K^T(\hat{x})g^T(\hat{x}) \end{pmatrix}.$$

由文献 [7], (7) 是一个耗散的 Hamilton 系统.

**定理 1** 假设  $p = 0$  且 S1 和 S2 成立. 那么, 在控制 (6) 式的作用下, (4) 构成系统 (1) 的一个全局渐近观测器.

**证** 考察系统 (7) 的能量流, 当  $v = 0$  时, 得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{H}}(X) &= -\frac{\partial \bar{H}^T}{\partial X} \bar{R}(X) \frac{\partial \bar{H}}{\partial X} \\ &= -\nabla^T H(x, 0)R(x, 0)\nabla H(x, 0) - \nabla^T H(\hat{x}, 0)W(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) \leq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

由此可知, 系统 (7) 是稳定的, 而且收敛于包含在下列集合内的系统的最大不变集上

$$S = \left\{ X : \frac{d\bar{H}}{dt} = 0 \right\} = \left\{ (x, \hat{x}) : R^{\frac{1}{2}}(x, 0)\nabla H(x, 0) = 0, W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) = 0 \right\}. \quad (9)$$

因为 S1, S2 成立, 所以  $W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) = 0 \Rightarrow K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) = 0$ . 因此, 当  $v = 0$  且  $W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) = 0$  时, 系统 (7) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x, 0) - R(x, 0)]\nabla H(x, 0), \\ \dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}, 0) - W(\hat{x})]\nabla H(\hat{x}, 0) + K^T(\hat{x})g^T(x)\nabla H(x, 0). \end{cases} \quad (10)$$

又系统 (1) 关于  $y_1$  零状态可检测, 所以  $y_1 = 0 \Rightarrow x \rightarrow x_0 (t \rightarrow \infty)$ , 进而  $\nabla H(x, 0) \rightarrow 0$ . 此时, (10) 的第二部分变为

$$\dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}, 0) - W(\hat{x})]\nabla H(\hat{x}, 0). \quad (11)$$

另一方面, (3) 式关于  $y_2$  零状态可检测, 所以由  $y_2 = W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) \equiv 0$  可得  $\hat{x} \rightarrow x_0$ . 因此, 上述提到的系统的最大不变集仅包含一个点, 即  $(x_0^T, x_0^T)^T$ . 由 LaSalle 不变原理<sup>[20]</sup> 知, 系统 (7) 渐近稳定, 并且  $\|x - \hat{x}\| = \|x - x_0 + x_0 - \hat{x}\| \leq \|x - x_0\| + \|\hat{x} - x_0\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ .

**注 2** 因为控制 (6) 式仅与  $\hat{x}$  有关, 所以上述观测器是可实现的, 见图 1.

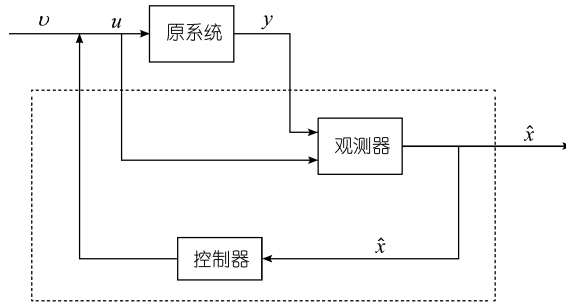


图1 实现框图

**注3** 因为  $\hat{x}$  是在控制器 (6) 式的作用下得到的,  $\hat{x}$  好像不是原系统状态的估计. 不过, 这没关系, 因为当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\nabla H(\hat{x}, 0) \rightarrow 0$ , 此时控制器 (6) 式变为零 (当  $v = 0$  时). 因此, 当  $t$  充分大时, 控制器不影响原始状态的估计. 在实际应用中, 只须根据问题的需要来设计  $v = v(\hat{x})$  (参考输入), 然后将其与 (6) 式合并, 得到一个总控制器, 它应满足: (i)  $\hat{x} \rightarrow x$ , (ii) 已设计的控制性能指标 (见第 2 节).

关于定理 1 的应用实例, 我们将在第 3 节中给出.

### 1.2 $p \neq 0$ 时观测器设计

当  $p \neq 0$  时, 除要对系统的状态进行估计外, 还必须考虑对未知摄动进行估计. 为达到以上目标, 本小节设计一种新的观测器: 自适应观测器. 所谓系统 (1) 的自适应观测器就是如下形式的动态系统

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \alpha(\hat{x}, \hat{\theta}, y, u), \\ \dot{\hat{\theta}} = \beta(\hat{x}, \hat{\theta}, y, u) \end{cases} \quad (12)$$

它使得  $\|x - \hat{x}\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ , 其中  $\hat{\theta}$  是  $\theta$  的估计,  $\theta$  是与  $p$  有关的未知向量 (定义下面给出).

为设计自适应观测器, 假设系统 (1) 满足:

**S1'**  $\nabla H(x, 0) \neq 0 (x \neq x_0)$  且系统关于虚拟输出  $y_1 := R^{\frac{1}{2}}(x, p)\nabla H(x, 0)$  和输入  $u$  零状态可检测;

**S2'** 存在  $n \times m$  的非零矩阵  $L(x)$  和  $L_1(x)$  使得

$$W(x) := R(x, 0) + [g(x)L^T(x) + L(x)g^T(x)] \geq 0,$$

$L^T(x) = L_1^T(x)W(x)$  并且如下系统

$$\dot{x} = [J(x, 0) - W(x)]\nabla H(x, 0).$$

关于  $y_2 := W^{\frac{1}{2}}(x)\nabla H(x, 0)$  零状态可检测.

**S3** 存在  $l \times m$  的常值矩阵  $\Phi$ , 使得

$$[J(x, p) - R(x, p)]\Delta_H(x, p) = g(x)\Phi^T\theta \quad (13)$$

成立, 其中  $\Delta_H(x, p) = \frac{\partial H(x, p)}{\partial x} - \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x}$ ,  $\theta \in R^l$  是与仅  $p$  有关的未知向量.

由 (13) 式, 系统 (1) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x, p) - R(x, p)] \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x} + g(x) \Phi^T \theta + g(x) u, \\ y = g^T(x) \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x}. \end{cases} \quad (14)$$

根据 (14) 式, 我们设计如下形式的观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}, 0) - R(\hat{x}, 0)] \frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} + g(\hat{x}) \Phi^T \hat{\theta} + g(\hat{x}) u + L(\hat{x}) \left[ y - g^T(\hat{x}) \frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} \right], \\ \dot{\hat{\theta}} = Q \Phi y, \end{cases} \quad (15)$$

其中  $Q \in R^{l \times l}$  是常值正定矩阵, 称为自适应增益矩阵.

由 (14) 和 (15) 式, 得

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{\theta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J(x, p) - R(x, p) & 0 \\ L(\hat{x}) g^T(x) & J(\hat{x}, 0) - R(\hat{x}, 0) - L(\hat{x}) g^T(\hat{x}) \\ Q \Phi g^T(x) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla H(x, 0) \\ \nabla H(\hat{x}, 0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g(x) \Phi^T \theta \\ g(\hat{x}) \Phi^T \hat{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g(x) \\ g(\hat{x}) \\ 0 \end{pmatrix} u. \quad (16)$$

为使 (16) 式成为一个耗散 PCH 系统, 我们设计一个仅与  $\hat{x}$  和  $\hat{\theta}$  有关的反馈律:

$$u = -L^T(\hat{x}) \nabla H(\hat{x}, 0) - \Phi^T \hat{\theta} + v. \quad (17)$$

将其代入 (16) 式, 得

$$\dot{X} = [\bar{J}(X, p) - \bar{R}(X, p)] \frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial X} + \bar{g}(X) v, \quad (18)$$

其中,  $X = (x^T, \hat{x}^T, \hat{\theta}^T)^T$ ,  $\bar{H}(X) = H(x, 0) + H(\hat{x}, 0) + \frac{1}{2}(\theta - \hat{\theta})^T Q^{-1}(\theta - \hat{\theta})$ ,

$$\bar{J}(X, p) = \begin{pmatrix} J(x, p) & -g(x) L^T(\hat{x}) & -g(x) \Phi^T Q \\ L(\hat{x}) g^T(x) & J(\hat{x}, 0) & 0 \\ Q \Phi g^T(x) & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\bar{R}(X, p) = \begin{pmatrix} R(x, p) & 0 & 0 \\ 0 & W(\hat{x}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial X} = \begin{pmatrix} \nabla H(x, 0) \\ \nabla H(\hat{x}, 0) \\ \frac{\partial \bar{H}(X)}{\partial \hat{\theta}} \end{pmatrix},$$

$$\bar{g}(X) = \begin{pmatrix} g(x) \\ g(\hat{x}) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

显然, 在假设 S2' 下系统 (18) 是一个耗散的 PCH 系统.

**定理 2** 假设系统 (1) 满足 S1', S2' 和 S3. 那么, 在控制 (17) 的作用下, (15) 式构成系统 (1) 的一个自适应观测器.

**证** 由耗散 Hamilton 系统的性质<sup>[14]</sup>知, 当  $v = 0$  时, (18) 稳定. 假设  $X_0 = (x_0^T, \hat{x}_0^T, \hat{\theta}_0^T)^T$  是系统的平衡点, 则  $\nabla H(x_0, 0) = \nabla H(\hat{x}_0, 0) = 0$ . 由假设 S1' 可知,  $\hat{x}_0 = x_0$ . 现考察系统 (18) 的能量流: 当  $v = 0$  时, 得

$$\begin{aligned} \dot{H}(X) &= -\frac{\partial \bar{H}^T}{\partial X} \bar{R}(X, p) \frac{\partial \bar{H}}{\partial X} \\ &= -\nabla^T H(x, 0) R(x, p) \nabla H(x, 0) - \nabla^T H(\hat{x}, 0) W(\hat{x}) \nabla H(\hat{x}, 0) \leq 0. \end{aligned} \quad (19)$$

由此可知, 系统 (18) 收敛于包含于下列集合内的最大不变集上

$$\begin{aligned} S &= \left\{ X : \frac{d\bar{H}}{dt} = 0 \right\} \\ &= \left\{ X : R^{\frac{1}{2}}(x, p) \nabla H(x, 0) \equiv 0, W^{\frac{1}{2}}(\hat{x}) \nabla H(\hat{x}, 0) \equiv 0 \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

类似于定理 1 的证明, 由系统的零状态可检测性可证明:  $R^{\frac{1}{2}}(x, p) \nabla H(x, 0) \equiv 0, W^{\frac{1}{2}}(\hat{x}) \nabla H(\hat{x}, 0) \equiv 0 \Rightarrow x \rightarrow x_0, \hat{x} \rightarrow \hat{x}_0 (t \rightarrow \infty)$ . 从而,  $\|x - \hat{x}\| = \|x - x_0 + x_0 - \hat{x}\| \leq \|x - x_0\| + \|\hat{x} - x_0\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ .

**注 4** 因为控制 (17) 仅与  $\hat{x}$  和  $\hat{\theta}$  有关, 所以自适应观测器 (15) 是可实现的.

**例 1** 考虑系统

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x, p) - R(x, p)] \frac{\partial H(x, p)}{\partial x} + g(x)u, \\ y = g^T(x) \nabla H(x, 0), \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $H(x, p) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}(1+p)x_3^2, p$  是未知参数摄动且满足  $|p| < 1$ ,

$$J(x, p) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, R(x, p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1+p \end{pmatrix}, g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

现设计系统 (21) 的自适应观测器. 因为  $R(x, p) > 0$ , 所以  $y_1 = R^{\frac{1}{2}}(x, p) \nabla H(x, 0) \equiv 0 \Rightarrow \nabla H(x, 0) \equiv 0$ . 从而可推出:  $x \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ , 故 S1' 成立. 现在取  $L(x) = (0, 0, \frac{1}{2}x_3)^T, L_1 = (0, 0, \frac{x_3}{2(1+x_3^2)})^T$ , 则有

$$W(x) = R(x, 0) + [g(x)L^T(x) + L(x)g^T(x)] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1+x_3^2 \end{pmatrix} > 0,$$

且  $L^T(x) = L_1^T(x)W(x)$ . 不难看出, S2' 也满足. 下面验证 S3. 直接计算得:

$$\Delta_H(x, p) = \frac{\partial H(x, p)}{\partial x} - \frac{\partial H(x, 0)}{\partial x} = (0, 0, px_3)^T. \text{ 令 } \theta = (1+p)p, \text{ 则有}$$

$$[J(x, p) - R(x, p)] \Delta_H(x, p) = g(x) \Phi^T \theta$$

成立, 其中  $\Phi = 1$ . 因此, S3 成立. 由定理 2 知,

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}} = \left[ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \frac{\partial H(\hat{x}, 0)}{\partial \hat{x}} \\ \quad + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix} \hat{\theta} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix} u + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix} [y - \hat{x}_3^2], \\ \dot{\hat{\theta}} = ly, \end{array} \right. \quad (22)$$

是系统 (21) 的一个自适应观测器, 这里  $u = -L^T(\hat{x})\nabla H(\hat{x}, 0) - \Phi^T \hat{\theta} + v = -\frac{1}{2}\hat{x}_3^2 - \hat{\theta} + v$ ,  $\hat{\theta}$  是  $\theta$  的估计,  $l > 0$  是增益常数.

## 2 基于观测器的 $H_\infty$ 控制

本节将利用 1.1 节给出的观测器, 研究 PCH 系统的  $H_\infty$  控制问题, 并给出一个新的基于观测器的  $H_\infty$  控制方法.

考虑如下受外界干扰的 PCH 系统

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H(x) + g_1(x)u + g_2(x)w, \\ y = g_1^T(x)\nabla H(x), \\ z = \rho g_2^T(x)\nabla H, \end{cases} \quad (23)$$

其中  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^m$  分别是系统的状态、输入和输出,  $J^T(x) = -J(x)$ ,  $R(x) \geq 0$ ,  $H(x)$  是系统的 Hamilton 函数且在  $x_0$  取得极  $z \in R^l$  是罚信号,  $\rho > 0$  是权重系数,  $w \in R^l$  是干扰. 这里, 假设系统 (23) 的状态不可测.

系统 (23) 的基于观测器的  $H_\infty$  控制问题可描述为: 给定干扰抑制水平  $\gamma > 0$ , 基于观测器设计一控制律  $u = \alpha(\hat{x}, y)$ , 使得闭环系统的  $L_2$  增益 (从  $w$  到  $z$ ) 不大于  $\gamma$ , 且当  $w = 0$  时闭环系统渐近稳定.

设系统 (23) 满足假设 S1 和 S2, 这里 S1 和 S2 中的  $H(x, 0)$ ,  $J(x, 0)$ ,  $R(x, 0)$  应分别由  $H(x)$ ,  $J(x)$  和  $R(x)$  代替. 由定理 1 知:

$$\dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}) - R(\hat{x})]\nabla H(\hat{x}) + g_1(\hat{x})u + K^T(\hat{x})[y - g_1^T(\hat{x})\nabla H(\hat{x})] \quad (24)$$

是系统 (23) 的一个全局观测器, 其中

$$u = -K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) + v. \quad (25)$$

令  $\Lambda = \frac{\rho^2}{2} + \frac{1}{2\gamma^2}$ ,  $W(x) = R(x) + [g_1(x)K(x) + K^T(x)g_1^T(x)]$ , 我们有:

**定理 3** 设系统 (23) 满足 S1 和 S2. 对给定的干扰抑制水平  $\gamma > 0$ , 若

$$R(x) + \Lambda[g_1(x)g_1^T(x) - g_2(x)g_2^T(x)] \geq 0, \quad W(x) - \Lambda g_1(x)g_1^T(x) \geq 0 \quad (26)$$

成立, 则系统 (23) 的基于观测器 (24) 的  $H_\infty$  控制律为

$$v = -\Lambda [y - g_1^T(\hat{x})\nabla H(\hat{x})]. \quad (27)$$



为证明定理 3, 先给一个引理.

**引理 1**<sup>[19]</sup> 考虑仿射系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)w, & f(x_0) = 0, \\ z = h(x), \end{cases} \quad (28)$$

其中  $x \in R^n, w \in R^s$  是干扰,  $z \in R^q$  是罚信号. 若存在函数  $V(x) \geq 0 (V(x_0) = 0)$  使得 Hamilton-Jacobi 不等式

$$\left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^T f(x) + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)^T g g^T \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2} h^T h \leq 0 \quad (29)$$

成立, 那么系统 (28) 的  $L_2$  增益 (从  $w$  到  $z$ ) 不大于  $\gamma$ , 即

$$\int_0^T \|z(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|w(t)\|^2 dt, \quad \forall w \in L_2[0, T],$$

这里  $\gamma$  是某个正数.

**定理 3 的证明** 令  $X = (x^T, \hat{x}^T)^T, \bar{H} = H(x) + H(\hat{x})$ . 由 (23), (24) 和 (25) 式, 得

$$\begin{aligned} \dot{X} = & \left[ \begin{pmatrix} J(x) & -g_1(x)K(\hat{x}) \\ K^T(\hat{x})g_1^T(x) & J(\hat{x}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R(x) & 0 \\ 0 & W(\hat{x}) \end{pmatrix} \right] \frac{\partial \bar{H}}{\partial X} \\ & + \begin{pmatrix} g_1(x) \\ g_1(\hat{x}) \end{pmatrix} v + \begin{pmatrix} g_2(x) \\ 0 \end{pmatrix} w. \end{aligned}$$

将 (27) 式代入上式, 得

$$\dot{X} = [\bar{J}(X) - \bar{R}(X)] \nabla \bar{H}(X) + \bar{g}_2 w := f(X) + \bar{g}_2 w, \quad (30)$$

其中  $\bar{g}_2 = (g_2^T(x), 0)^T$ ,

$$\begin{aligned} \bar{J}(X) = & \begin{pmatrix} J(x) & -g_1(x)K(\hat{x}) + \Lambda g_1(x)g_1^T(\hat{x}) \\ K^T(\hat{x})g_1^T(x) - \Lambda g_1(\hat{x})g_1^T(x) & J(\hat{x}) \end{pmatrix}, \\ \bar{R}(X) = & \begin{pmatrix} R(x) + \Lambda g_1(x)g_1^T(x) & 0 \\ 0 & W(\hat{x}) - \Lambda g_1(\hat{x})g_1^T(\hat{x}) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

取  $V(X) = \bar{H}(X) + c$ , 其中  $c$  是一常数, 它使得  $V(X) \geq 0, V(X_0) = 0 (X_0 = (x_0^T, \hat{x}_0^T)^T)$ . 由 (26) 式知

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V^T}{\partial X} f(X) + \frac{1}{2\gamma^2} \frac{\partial V^T}{\partial X} \bar{g}_2 \bar{g}_2^T \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{1}{2} z^T z \\ = & -\nabla^T \bar{H}(X) \bar{R}(X) \nabla \bar{H}(X) + \frac{1}{2\gamma^2} \nabla^T H(x) g_2(x) g_2^T(x) \nabla H(x) \\ & + \frac{\rho^2}{2} \nabla^T H(x) g_2(x) g_2^T(x) \nabla H(x) \\ = & -\nabla^T H(x) \{R(x) + \Lambda [g_1(x)g_1^T(x) - g_2(x)g_2^T(x)]\} \nabla H(x) \\ & - \nabla^T H(\hat{x}) [W(\hat{x}) - \Lambda g_1(\hat{x})g_1^T(\hat{x})] \nabla H(\hat{x}) \leq 0. \end{aligned}$$

由引理 1, 闭环系统的  $L_2$  增益 (从  $w$  到  $z$ ) 小等于  $\gamma$ . 下面计算系统 (30) 的能量流, 当  $w = 0$  时, 由假设条件知

$$\begin{aligned} \dot{H} &= -\nabla^T H(x)[R(x) + \Lambda g_1(x)g_1^T(x)]\nabla H(x) \\ &\quad - \nabla^T H(\hat{x})[W(\hat{x}) - \Lambda g_1(\hat{x})g_1^T(\hat{x})]\nabla H(\hat{x}) \leq 0. \end{aligned}$$

因此, 系统 (30) 是稳定的. 又因为  $\hat{x}$  是  $x$  的渐近估计, 所以当  $t \rightarrow \infty$  时, 上式可写为

$$\dot{H} = -\nabla^T H(x)R(x)\nabla H(x) - \nabla^T H(\hat{x})W(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) \leq 0.$$

从而当  $t \rightarrow \infty$  时, 系统 (30) 收敛于包含在下列集合内的最大不变集上

$$S = \left\{ X : \frac{d\bar{H}}{dt} = 0 \right\} = \left\{ (x, \hat{x}) : R^{\frac{1}{2}}(x)\nabla H(x) = 0, W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) = 0 \right\}. \quad (31)$$

另一方面, 当  $t \rightarrow \infty$  且  $w = 0$  时, 系统 (30) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H(x) - g_1(x)K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}), \\ \dot{\hat{x}} = [J(\hat{x}) - W(\hat{x})]\nabla H(\hat{x}) + K^T(\hat{x})g^T(x)\nabla H(x). \end{cases} \quad (32)$$

因为 S2 成立, 所以  $W^{\frac{1}{2}}(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) = 0 \Rightarrow K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) = 0$ . 以下类似于定理 1 的证明, 由系统的零状态可检测性可推出: 系统 (30) 渐近稳定.

**注 5** 由定理 3 的证明可以看出, 定理 3 所给出的控制器是基于 PCH 系统的结构特性而设计的, 它不是将已有的状态反馈控制器通过简单的状态替换 (用  $\hat{x}$  换  $x$ ) 而得到的.

由 (25) 和 (27) 式, 得

$$u = -K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) - \Lambda[y - g_1^T(\hat{x})\nabla H(\hat{x})], \quad (33)$$

这是系统总的控制器. 可以证明 (33) 式能保证 (i)  $\|\hat{x} - x\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ ; (ii) 达到  $H_\infty$  控制的性能指标.

下一节, 我们将应用定理 3 来设计电力系统的基于观测器的  $H_\infty$  控制方案.

### 3 单机电力系统基于观测器的 $H_\infty$ 控制方案

作为在电力系统中的应用, 本节将设计单机无穷大系统的观测器以及基于观测器的  $H_\infty$  控制方案.

#### 3.1 单机无穷大系统的观测器

考虑三阶模型<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M}P_m - \frac{D}{M}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0 E'_q V_s}{M x'_{d\Sigma}} \sin \delta, \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d}E'_q + \frac{1}{T_{do}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_f, \end{cases} \quad (34)$$

其中,  $\delta$  是功角 (单位: rad.);  $\omega$  是发电机转子角速度 (单位: rad/s),  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;  $E'_q$  是  $q$  轴内部暂态电压 (单位: p.u.);  $x_d$  是  $d$  轴绕组自感抗 (单位: p.u.);  $x'_d$  是  $d$  轴

绕组暂态电抗(单位: p.u.);  $u_f$  是发电机励磁电路电压, 控制变量(单位: p.u.);  $M$  是发电机转子转动惯量;  $D$  是阻尼常数(单位: p.u.);  $T_{d0}$  励磁电路时间常数(单位: s);  $T'_d$  定子闭路时的励磁绕组时间常数;  $P_m$  是机械功率, 假定为常数(单位: p.u.);  $V_s$ : 无穷大机组电压;  $x'_{d\Sigma} = x'_d + \frac{1}{2}x_L + x_T$ ,  $x_T$  变压器电抗,  $x_L$  输电线路电抗.

$$\begin{aligned} \text{令 } x_1 = \delta, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = E'_q, a = \frac{\omega_0}{M}P_m, b = \frac{D}{M}, c = \frac{\omega_0 V_s}{Mx'_{d\Sigma}}, d = \frac{1}{T'_d}, \\ e = \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s, h = \frac{1}{T_{d0}}, \end{aligned}$$

$$H(x) = -cx_3 \cos x_1 - ax_1 + \frac{cd}{2e}x_3^2 + \frac{1}{2}x_2^2, \quad (35)$$

并取  $y = -c \cos x_1 + \frac{cd}{e}x_3$ , 则系统 (34) 可写为

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H(x) + g_1(x)u, \\ y = g_1^T(x)\nabla H(x), \end{cases} \quad (36)$$

其中  $x = (x_1, x_2, x_3)^T, u = hu_f$ ,

$$J(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, R(x) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{e}{c} \end{pmatrix}, g_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

下面应用定理 1 来设计观测器. 先验证条件 S1 和 S2(此处, S1 和 S2 中的  $H(x, 0), J(x, 0), R(x, 0)$  应分别由  $H(x), J(x)$  和  $R(x)$  代替). 假设  $y_1 = R^{\frac{1}{2}}(x)\nabla H(x) \equiv 0, u \equiv 0$ , 则得  $\frac{\partial H}{\partial x_2} = x_2 \equiv 0, \frac{\partial H}{\partial x_3} = -c \cos x_1 + \frac{cd}{e}x_3 \equiv 0$ . 由  $x_2 \equiv 0$  以及 (36) 的表达形式, 易知  $a - cx_3 \sin x_1 = 0$ . 再结合上式, 得

$$\begin{cases} x_2 = 0, \\ a - cx_3 \sin x_1 = 0, \\ -c \cos x_1 + \frac{cd}{e}x_3 = 0. \end{cases} \quad (37)$$

(37) 正是系统的平衡点所满足的条件. 因此, 系统 (36) 关于  $y_1$  和  $u$  零状态可检测. 可见, S1 被满足.

现在取  $K(x) = (0, 0, 1), K_1(x) = \left(0, 0, \frac{c}{e+2c}\right)$ . 易知  $W(x) = R(x) + g_1(x)K(x) + K^T(x)g_1^T(x) = \text{Diag}\left\{0, b, \frac{e}{c} + 2\right\} \geq 0$  且  $K(x) = K_1(x)W(x)$ . 考虑系统

$$\dot{x} = \left[ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{e}{c} + 2 \end{pmatrix} \right] \nabla H(x). \quad (38)$$

类似地, 可以证明: (38) 式关于  $y_2 = W^{\frac{1}{2}}(x)\nabla H(x)$  零状态可检测. 因此, S2 也

成立.

由定理 1 知

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = & \left[ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{e}{c} \end{pmatrix} \right] \nabla H(\hat{x}) \\ & + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \left[ y + c \cos \hat{x}_1 - \frac{cd}{e} \hat{x}_3 \right] \end{aligned} \quad (39)$$

是系统 (34) 的一个渐近观测器, 其中

$$u = -K(\hat{x})\nabla H(\hat{x}) + v = c \cos \hat{x}_1 - \frac{cd}{e} \hat{x}_3 + v. \quad (40)$$

为验证观测器 (39) 的有效性, 下面给出数字仿真. 取一组参数:  $\{\omega_0, M, P_m, D, V_s, x_d, x'_d, x'_{d\Sigma}, T_{do}, T'_d\} = \{1, 7.6, 1, 3, 1.5, 0.9, 0.36, 0.36, 5, 5\}^{[12]}$ , 仿真结果见图 2 和 3. 仿真结果表明: 观测器 (39) 是非常有效的.

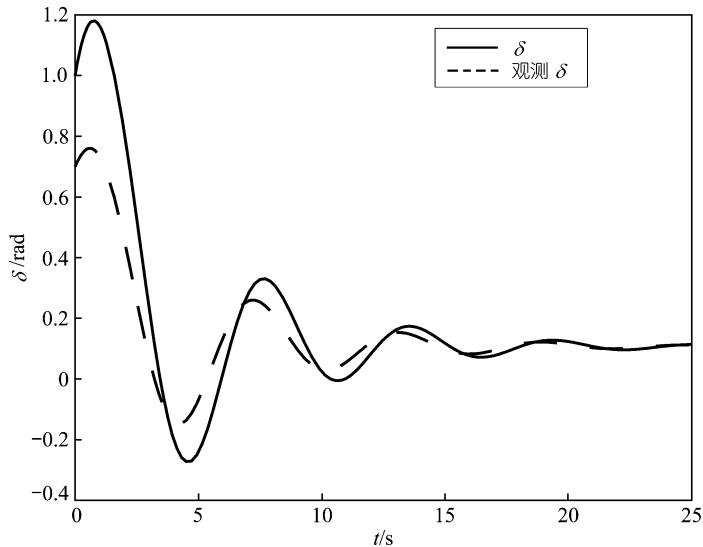


图 2

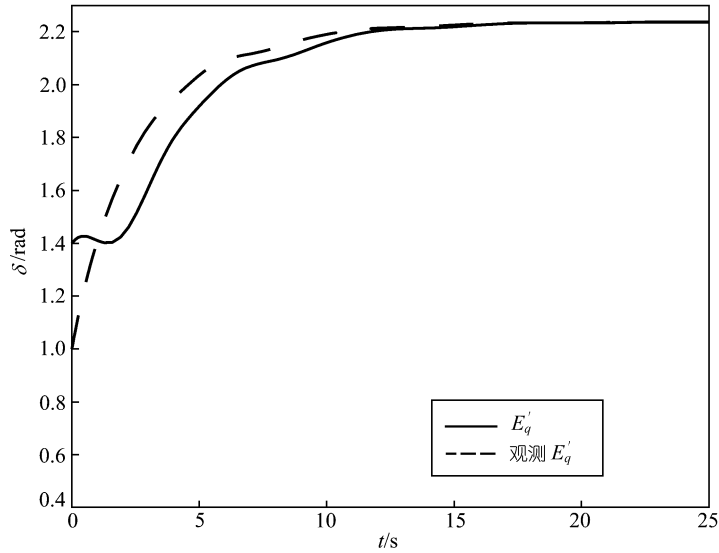


图 3

### 3.2 基于观测器的 $H_\infty$ 控制方案

考虑系统 (34) 受外界干扰的情况:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M} P_m - \frac{D}{M} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0 E'_q V_s}{M x'_{d\Sigma}} \sin \delta + w_1, \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d} E'_q + \frac{1}{T_{do}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_f + w_2, \end{cases} \quad (41)$$

其中  $w_1, w_2$  是干扰. 此时, 系统 (41) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)] \nabla H(x) + g_1(x)u + g_2w, \\ y = g_1^T(x) \nabla H(x), \\ z = \rho g_2^T \nabla H(x), \end{cases} \quad (42)$$

其中,  $g_2^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $w = (w_1, w_2)^T$ ,  $z$  是选定的罚信号,  $\rho > 0$  是权重,

其他量同第 3.1 节.

下面应用定理 3 来设计系统 (41) 的基于观测器的  $H_\infty$  控制方案. 取

$$\rho < \rho^* := \min \left\{ \sqrt{\frac{2D}{M}}, \sqrt{\frac{2M(x_d - x'_d)}{\omega_0 T_{do}} + 4} \right\}.$$

给定干扰抑制水平  $\gamma > 0$ , 当

$$\gamma \geq \gamma^* := \max \left\{ \sqrt{\frac{M}{2D - \rho^2 M}}, \sqrt{\frac{\omega_0 T_{do}}{2M(x_d - x'_d) + \omega_0 T_{do}(4 - \rho^2)}} \right\}$$

时, 容易证明:

$$R(x) + \Lambda[g_1(x)g_1^T(x) - g_2(x)g_2^T(x)] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b - \Lambda & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\epsilon}{c} \end{pmatrix} \geq 0,$$

$$W(x) - \Lambda g_1(x)g_1^T(x) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\epsilon}{c} + 2 - \Lambda \end{pmatrix} \geq 0,$$

其中,  $\Lambda = \frac{\rho^2}{2} + \frac{1}{2\gamma^2}$ . 又因为系统满足 S1 和 S2, 因此定理 3 的条件全部满足. 由定理 3 可知: 系统 (42) 的基于观测器 (39) 的  $H_\infty$  控制器为

$$v = -\Lambda \left[ y + c \cos \hat{x}_1 - \frac{cd}{e} \hat{x}_3 \right]. \quad (43)$$

代入 (40) 式, 得

$$u_f = \frac{1}{h} u = \frac{1 - \Lambda}{h} \left[ c \cos \hat{x}_1 - \frac{cd}{e} \hat{x}_3 \right] - \frac{\Lambda}{h} y. \quad (44)$$

**定理 4** 给定干扰抑制水平  $\gamma > 0$ . 如果  $\gamma \geq \gamma^*$ , 则系统 (41) 的基于观测器 (39) 的  $H_\infty$  控制方案可由 (44) 给出.

为验证控制器 (44) 的有效性, 我们给出仿真. 参数的选取同第 3.1 节. 通过计算可知,  $\rho^* = 0.8885$ ,  $\gamma^* = 1.1551$ . 仿真中, 取  $\rho = 0.2$ ,  $\gamma = 1.2$ . 故障设置为:  $t = 0.1$  s 时, 靠近母线处发生三相短路;  $t = 0.25$  s 时, 故障切除. 仿真结果见图 4 和 5.

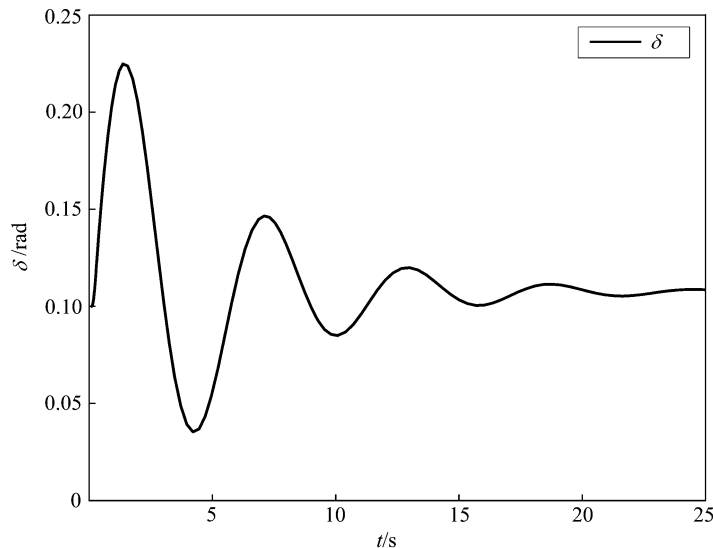


图 4

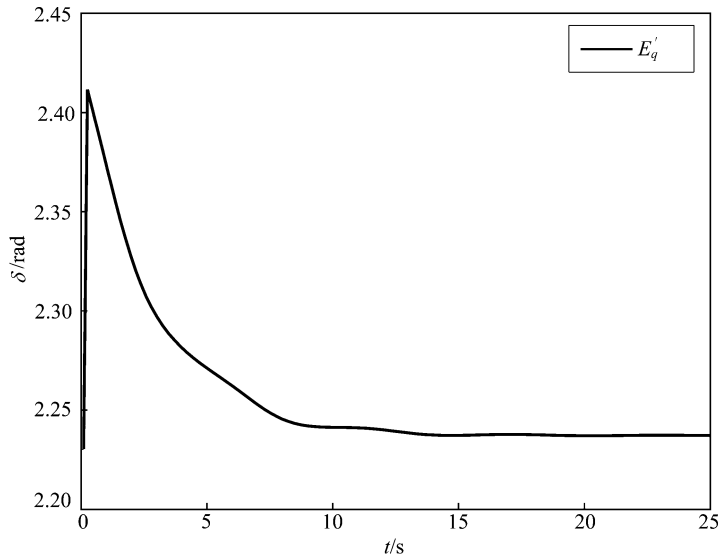


图 5

从图 4 和 5 中可以看出, 在控制器 (44) 的作用下, 故障带来的干扰很快被滤掉, 并且系统保持稳定. 这表明: 控制器 (44) 是行之有效的.

#### 4 结论

本文研究了 PCH 系统的观测器设计以及基于观测器的  $H_\infty$  控制设计和应用等问题. 根据 PCH 系统的结构特性, 本文提出了扩张 + 反馈的观测器设计方法. 基于该方法, 设计了两种观测器, 一种是针对系统结构中不含参数摄动的情况而设计的; 另一种是自适应观测器, 则是针对系统结构中含参数摄动的情况而提出的. 运用所得到的观测器, 本文又研究了 PCH 系统的基于观测器的  $H_\infty$  控制问题, 给出了一种新的设计方法. 最后把得到的结果应用于电力系统, 给出了单机无穷大系统的状态观测器和基于观测器的  $H_\infty$  控制方案. 仿真结果表明, 本文的方法是非常有效的.

#### 参 考 文 献

- 1 Luenberger D G. Observers for multivariable systems. IEEE Trans on Autom Contr, 1966, 11: 190~197
- 2 O'Reilly J. Observer for linear systems. New York: Academic Press, 1983
- 3 Slotine J J E, Hedrick J K, Misawa E A. On sliding observers for nonlinear systems. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109: 245~252
- 4 Hunt L R, et al. Observers for nonlinear systems in steady state. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(10): 2113~2118
- 5 Park J K, Shin D R, Chung T M. Dynamic observers for linear time-invariant systems. Automatica, 2002, 38: 1083~1087
- 6 Giua A, Seatzu C, Basile F. Observer-based state-feedback control of timed petri nets with deadlock

- recovery. IEEE Trans on Autom Contr, 2004, 49(1): 17~29
- 7 Maschke B M, Ortega R, van der Schaft A J. Energy-based Lyapunov functions for forced Hamiltonian systems with dissipation. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(8): 1498~1502
  - 8 Ortega R, van der Schaft A J, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems, Automatica, 2002, 38(4): 585~596
  - 9 Cheng D, Xi Z, Hong Y, et al. Energy-based stabilization in power systems. In: Proceedings of the 14th IFAC World Congress, Beijing, China, Vol.O, 1999. Oxford: Pergamon Press, 1999, 297~303
  - 10 Shen T, Ortega R, Lu Q, et al. Adaptive  $L_2$  disturbance attenuation of Hamiltonian systems with parameter perturbations and application to power systems. In: Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, Vol.5, 2000. New York: IEEE, 2000, 4939~4944
  - 11 Sun Y, Shen T, Ortega R, et al. Decentralized controller design for multimachine power systems on Hamiltonian structure. In: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida. New York: IEEE, 2001, 3045~3050
  - 12 Xi Z, Cheng D. Passivity-based stabilization and  $H_\infty$  control of the Hamiltonian control systems with dissipation and its application to power systems. Int J of Control, 2000, 73(18): 1686~1691
  - 13 Wang Y, Cheng D, Li C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based  $L_2$ -disturbance attenuation control of multimachine power systems, IEEE Trans on Autom Contr, 2003, 48(8): 1428~1433
  - 14 Wang Y, Li C, Cheng D. Generalized Hamiltonian realization of time-invariant nonlinear systems. Automatica, 2003, 39(8): 1437~1443
  - 15 Wang Y, Li C, Cheng D. New approaches to dissipative Hamiltonian realization of nonlinear systems. Science in China, Ser, F, 2003, 46(6): 431~444
  - 16 Hebertt S R, et al. Synchronization of chaotic systems: A Hamiltonian approach. In: Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June. New York: IEEE, 2000, 769~773
  - 17 Lohmiller W, Slotine J J E. Simple observers for Hamiltonian systems. In: Proceedings of the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, June. New York: IEEE, 1997, 2748~2753
  - 18 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 北京: 科学出版社, 1993
  - 19 van der Schaft A J.  $L_2$ -gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control. Berlin: Springer, 1999
  - 20 Khalil H. Nonlinear Systems. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996