双自由度陀螺仪再平衡回路的控制解耦*

郭海荣，马建辉

（中国航天科技集团十六研究所，西安 710100）

[摘要] 给出了现有双自由度解耦控制的一般方法，根据自抗扰控制原理，提出了双自由度陀螺解耦控制的自抗扰控制方案（ADRC），给出了分析原理和一定的实现模块，可以看出自抗扰控制（ADRC）比较简单可行。

[关键词] 力平衡回路解耦控制；自抗扰控制；状态观测器（ESO）；动力调谐陀螺仪

[中图分类号] TJ765.2·V241.5 [文献标识码] A

Dividing Coupling Controller of the Force Equilibrium Circuits for Double Freedom Gyro

GUO Hai-rong, MA Jian-hui

(No.16 Institute, Chinese Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: Give a general method for force equilibrium circuits dividing coupling controller of the double freedom gyro, according to the active disturbance rejection control technique, the method based on ADRC was presented for double freedom gyro. Gave some analyse in the principle and accomplishing mode, so the method is a little simpleness and doable.

Key words: force equilibrium circuits dividing coupling control; active disturbance rejection control; extended state observer (ESO); dynamically tuned gyro

1 引言

高性能陀螺仪要求具有高精度的良好特性，不受飞行的大角运动与大角速率的限制，且必须保证在载体恶劣动态环境下正常工作。自抗扰控制技术是一种不依赖于系统模型的新型非线性控制器，它具有低超调、收敛速度快、精度高、鲁棒性好、抗干扰能力强等特点。对双自由度陀螺来说，系统的耦合成分直接影响再平衡回路控制的好坏。

2 自抗扰控制

许多实际被控对象可以简化成如下形式：

$$\begin{cases} x^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \cdots, x^{(n-1)}, w(t), t) + bu \\ y = x(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $w(t)$ 表示外扰作用，自抗扰控制技术的核心是采用合适的方法，用希望得到的输出信号 $r(t)$ 和系统的实际输出信号 $y(t)$ 的差（即误差信号），以及控制输入量 $u(t)$ 来估计系统运行过程中的实时作用量 $a(t) = f(x, x^{(1)}, \cdots, x^{(n-1)}, w(t,), t)$ 并给予补偿，使系统变成积分串联型系统。这里的 $f(x, x^{(1)}, \cdots, x^{(n-1)}, w(t), t)$ 是已知还是未知、线性还是非线性、时变还是时不变都不重要，只要它在过程中的实时表现 $a(t)$ 为有界就可以了。以二阶系统为例，则自抗扰控制器的结构如图1所示。

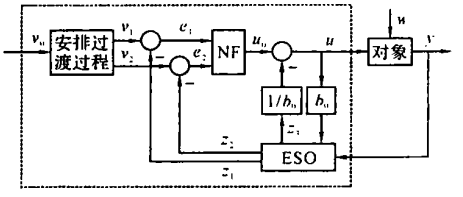


图1 ADRC控制器的结构

自抗扰控制器由三种功能组合而成：

(1) 用跟踪微分器（TD）[1] 来安排过渡过程并提取其微分信号；

(2) 用扩张状态观测器（ESO）估计对象状态和不确定扰动作用；

(3) 利用安排的过渡过程与状态估计之间误差的非线性组合（NF）和扰动估计量的补偿来

* 收稿日期：2006-04-19
作者简介：郭海荣（1981-），男，硕士研究生，研究方向：测量技术与设备。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生成控制信号。

其中扩张状态观测器(ESO)[2]的设计,目的是通过系统输出和输入来得到系统(1)的状态变量的微分信号以及系统所有内扰和外扰的总和,二阶系统需要设计三阶的扩张状态观测器,其形式为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = z_1 - y \\ z_1' = z_2 - \beta_{01}\varepsilon_1 \\ z_2' = z_3 - \beta_{02} fal(\varepsilon_1, \alpha_{01}, \delta) + b_0 u \\ z_3' = -\beta_{03} fal(\varepsilon_1, \alpha_{02}, \delta) \end{cases} \tag{2}$$

其中:

$$fal(\varepsilon,\alpha,\delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^{\alpha}\mathrm{sign}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \dfrac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}} & |\varepsilon| \le \delta \end{cases} \tag{3}$$

$\delta > 0, \alpha > 0, \beta_{01} > 0, \beta_{02} > 0, \beta_{03} > 0, b_0$ 为 b 的估计值,得到的 z_1 和 z_2 分别是 x 和 $\dot{x}$ 的估计,z_3 是对式子(1)中 $f(t) + (b - b_0)$ 的实时估计。

2.1　自抗扰控制在多变量系统解耦控制中的应用[3]

以双输入双输出系统为例来说明解耦控制方法。设有控制对象:

$$\begin{cases} y_1'' = f_1(y_1, y_1', y_2, y_2', w_1(t)) + b_{11}(t)u_1 + b_{12}(t)u_2 \\ y_2'' = f_2(y_1, y_1', y_2, y_2', w_1(t)) + b_{21}(t)u_1 + b_{22}(t)u_2 \end{cases} \tag{4}$$

其中:f_1, f_2 为不确定函数,$w_1(t), w_2(t)$ 为未知扰动。令:

$$\begin{cases} U_1 = b_{11}(t)u_1 + b_{12}(t)u_2 \\ U_2 = b_{21}(t)u_1 + b_{22}(t)u_2 \end{cases}, B(t) = \begin{bmatrix} b_{11}(t) & b_{12}(t) \\ b_{21}(t) & b_{22}(t) \end{bmatrix} \tag{5}$$

在此假定矩阵 $B(t)$ 可逆。如果矩阵 $B(t)$ 已知,那么 U_1 和 U_2 分别将:

$$\begin{cases} a_1(t) = f_1(y_1(t), y_1'(t), y_2(t), y_2'(t), w_1(t)) \\ a_2(t) = f_1(y_1(t), y_1'(t), y_2(t), y_2'(t), w_2(t)) \end{cases} \tag{6}$$

作为各自的系统扰动而实现自抗扰控制,这样就能实现解耦控制。

如果矩阵 $B(t)$ 不确定,则在 $B(t)$ 的变化范围内取一可逆矩阵 B_0,B_0 是其 $B(t)$ 的某一值。并把 $(B(t) - B_0)\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$ 当作系统新的外扰项。若矩阵 $B(t) - B_0$ 不甚大,那么就能用 U_1 和 U_2 分别实现各自通道的自抗扰控制,从而最终实现解耦控制。

3　双自由度陀螺仪转子运动方程

以双自由度挠性陀螺为例,其无阻尼、理想的二自由度陀螺传递函数为:

$$\begin{bmatrix} \beta(s) \\ \alpha(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{A(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{-w_n}{As(s^2 + w_n^2)} \\ \dfrac{w_n}{As(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{1}{A(s^2 + w_n^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x(s) \\ M_y(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi_x(s) \\ \Phi_y(s) \end{bmatrix} \tag{7}$$

其中:α, β 为陀螺两轴的偏角,A 为转子赤道轴转动惯量,w_n 为章动频率,M_x, M_y 为作用于陀螺转子上的外力矩,主要由力矩电流产生。见图 2。

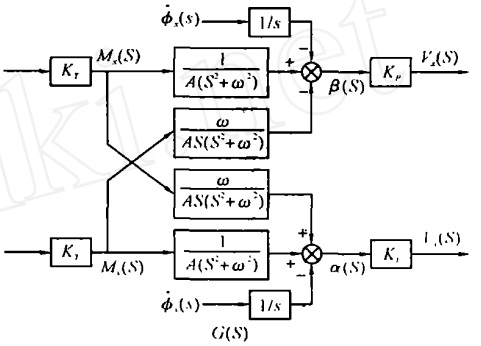


图 2　动力调谐陀螺仪的传递模型

$$G(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{A(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{-w_n}{As(s^2 + w_n^2)} \\ \dfrac{w_n}{As(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{1}{A(s^2 + w_n^2)} \end{bmatrix} \tag{8}$$

由(8)式可以看到,耦合部分就在 $G(s)$ 矩阵中。

4　利用自抗扰控制来实现陀螺仪解耦控制

可以将(7)式改写成:

$$\begin{bmatrix} s\beta(s) \\ s\alpha(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{s}{A(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{-w_n}{A(s^2 + w_n^2)} \\ \dfrac{w_n}{A(s^2 + w_n^2)} & \dfrac{s}{A(s^2 + w_n^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x(s) \\ M_y(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s\Phi_x(s) \\ s\Phi_y(s) \end{bmatrix} \tag{9}$$

为了与(4)式表示式相同,将(9)式写成时域的表达式:

$$\begin{cases} \beta'(t) = -\Phi_x'(t) + \dfrac{\cos w_n t}{A} M_x(t) - \dfrac{\sin w_n t}{A} M_y(t) \\ \alpha'(t) = -\Phi_y'(t) + \dfrac{\sin w_n t}{A} M_x(t) - \dfrac{\cos w_n t}{A} M_y(t) \end{cases} \tag{10}$$

这里:

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B(t)=\begin{bmatrix}\frac{\cos w_n t}{A} & \frac{-\sin w_n t}{A}\\ \frac{\sin w_n t}{A} & \frac{\cos w_n t}{A}\end{bmatrix}$$

$$\begin{cases}U_1=\frac{\cos w_n t}{A}M_x(t)-\frac{\sin w_n t}{A}M_y(t)\\ U_2=\frac{\sin w_n t}{A}M_x(t)+\frac{\cos w_n t}{A}M_y(t)\end{cases}$$

这里的矩阵 $B(t)$ 是不确定的,但是它的取值是有界的。所以可取一个可逆矩阵 $B0$,可以把它取为各个值为 $1/2A$ 的矩阵,并把 $(B(t)-B_0)\begin{bmatrix}M_x(t)\\M_y(t)\end{bmatrix}$ 当作系统新的外扰项。则:

$$\begin{bmatrix}a_1(t)\\a_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\Phi'_x(t)\\-\Phi'_y(t)\end{bmatrix}+(B(t)-B_0)\begin{bmatrix}M_x(t)\\M_y(t)\end{bmatrix}$$

这时 U_1 与 U_2 表达式变为:$\begin{bmatrix}U_1\\U_2\end{bmatrix}=B_0\begin{bmatrix}M_x(t)\\M_y(t)\end{bmatrix}$

则(10)式可以写成:

$$\begin{cases}y'_1(t)=a_1(t)+U_1\\ y'_2(t)=a_2(t)+U_2\end{cases}\qquad(11)$$

那么就能用这里的 U_1 和 U_2 分别实现各自通道的自抗扰控制,从而最终实现解耦控制。而这里的系统是一阶的,所以需要设计二阶的扩张状态观测器(ESO),来对对象 $a_i(t)$ $(i=1,2)$ 扰动进行估计,并对系统补偿。设计ADRC控制结构简框图如图3。

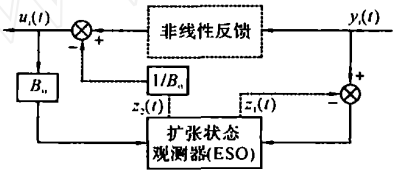


图3 ADRC控制结构框图

其中,$u_{0i}(t)=\beta_{0i}fal(-y_i(t),\alpha_0,\delta_0)$ $(i=1,2)$ 为非线性反馈部分,$-z_{2i}(t)/B_0$ $(i=1,2)$ 用来补偿系统的未知扰动 $a_i(t)$ $(i=1,2)$,$\alpha_0>0$、$\delta_0>0$、$\beta_0>0$ 为可调参数。ADRC将对象模型(相当于内部扰动)及未知扰动(外部扰动)视为系统总的未知扰动加以估计并及时补偿,从而实现抗干扰的功能。实现解耦控制。

按照图3框图使用 matlab/ simulink 进行数字仿真,其模型如图4。按照下式(12)进行编程实现自抗扰控制算法,Δt 为采样步长在这取0.01s,在matlab中调试参数(β_{01},β_{02},β_1,α_0,α_1,α_2,δ_0,δ)整定后取为(100,65,85,0.75,0.5,0.1,0.02,0.01)。

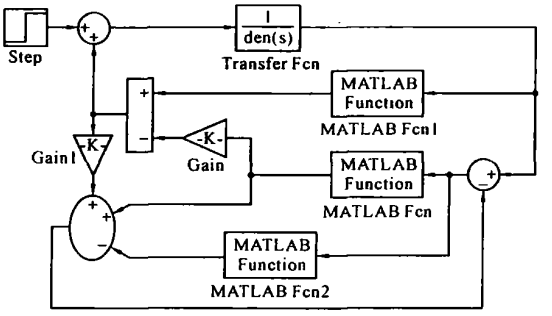


图4 ESO仿真结构图

$$\begin{cases}\varepsilon_i(k)=z_{1i}(k)-y_i(k)\\ z_{2i}(k)=z_{2i}(k-1)-\beta_{02}fal(\varepsilon_i(k),a_2,\delta)\Delta t\\ u_{0i}(k)=\beta_{01}fal(-y_i(k),\alpha_0,\delta_0)\\ u_i(k)=u_{0i}(k)-z_{2i}(k)/b_0\\ z_{1i}(k+1)=z_{1i}(k)+[z_{2i}(k)-\beta_{01}fal(\varepsilon_i(k),a_1,\delta)+b_0u_i(k)]\Delta t\end{cases}\qquad(12)$$

在这仿真时把扰动量 $a(t)$ 给做是阶跃和正弦信号,其输出响应如图5。

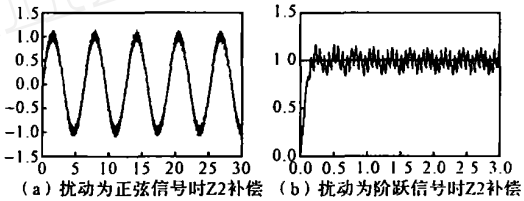


图5 阶跃响应与正弦响应 Z2 对扰动的跟踪

从图5可以看出系统能够很好地跟踪扰动量 $a(t)$,说明此方法可以实现使一个输出对应一个输入,可以实现双自由度陀螺的解耦控制。

5 总结

文中将自抗扰在解耦控制应用到双自由度陀螺解耦控制中,给出了一定的分析和实现框图及仿真结果。从仿真的结果可以看出,可以有效地跟踪扰动即耦合量,使系统实现解耦。

[参 考 文 献]

[1] 韩京清,袁露林. 跟踪微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学,1999,19(3):268-273.

[2] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策,1995,10(1):85-88.

[3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998,13(1):19-23.

[4] 周百令. 动力调谐陀螺仪设计与制造[M]. 南京:东南大学出版社,2002.

[5] 陈忻彦,黄一,韩京清,等. 自抗扰控制思想在动力调谐陀螺仪力平衡回路中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2003 11(6):84-89.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net