

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.023

## 扩展状态观测器在陀螺稳定平台中的应用仿真

张钊, 周勇, 王钊

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高陀螺稳定平台速度稳定精度, 提出基于扩展状态观测器的陀螺稳定平台速度稳定回路设计方法。通过扩展状态观测器, 实时对系统综合扰动量进行观测并予以补偿, 以提高陀螺稳定平台速度稳定精度及平滑度。系统仿真实验结果表明: 该方法简单易行, 可对系统扰动进行有效补偿, 具有一定的实用性。

**关键词:** 陀螺稳定平台; 速度稳定环; 扩展状态观测器; 扰动补偿

**中图分类号:** TJ810.3 **文献标志码:** A

## Application Simulation of Extended State Observer in Gyro-Stabilized Platform

Zhang Zhao, Zhou Yong, Wang Qian

(Dept. of Armament Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to increase the stabilization precision of gyroscope-stabilized platform, put forward a method of velocity loop of gyroscope-stabilized platform based on extended state observer (ESO). The disturbances can be observed in real time by using ESO, so the stabilization precision and smoothness of the gyroscope-stabilized platform can be advanced. The system simulation shows that this method is easy to carry out, and compensates the system disturbances effective, so it has great advantages in utility.

**Keywords:** gyroscope-stabilized platform; velocity loop; extended state observer; disturbances compensation

### 0 引言

陀螺稳定平台在机载、舰载、车载等平台上都已得到广泛应用。陀螺稳定平台的目的在于隔离外部载体运动扰动, 从而保证瞄准线(视轴)在惯性空间的稳定指向, 以实现目标的精确稳定跟瞄或打击。陀螺稳定平台的被稳定对象(光电跟踪转台、武器站等)受多种非线性因素的影响, 诸如平台结构弹性振动、载体平台运动扰动、风阻力矩、电气参数波动、摩擦力矩、轴系间耦合等<sup>[1]</sup>, 因而实际的被控对象具有强烈的不可精确建模动态, 其稳定控制也更具有挑战性。目前, 常规控制方法已很难更大程度提升陀螺稳定平台精度, 而作为研究热点的模糊控制、神经网络控制又由于其算法复杂性以及实现的难度, 在工程实际中尚未广泛应用<sup>[2]</sup>。因此有必要寻求快速简单、稳定性好、稳定精度高的控制算法来实现稳定控制。为使平台具有较高的稳定精度以及抗干扰能力, 笔者采用扩展状态观测器<sup>[3-5]</sup>(extended state observer, ESO)来实现陀螺平台速度稳定回路控制。

### 1 速度稳定回路

陀螺稳定平台速度稳定回路经简化的数学模型图 1。

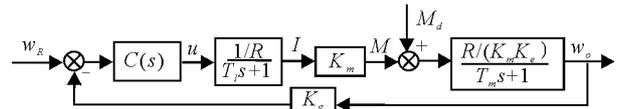


图 1 速度稳定回路简化数学模型

如图 1 所示, 未校正速度回路开环传递函数为:

$$G_v(s) = \frac{1/R}{T_l s + 1} \cdot K_m \cdot \frac{R/(K_m K_e)}{T_m s + 1} \cdot K_g \quad (1)$$

式中:  $R$  为电枢阻抗;  $T_l$  为电气时间常数;  $K_m$  为电磁力矩系数;  $K_e$  为电机反电势系数;  $T_m$  为机电时间常数;  $K_g$  为陀螺反馈比例系数;  $T_l = \frac{L}{R}$ ,  $L$  为电枢电感;  $T_m = \frac{J_\Sigma R}{K_m K_e}$ ,  $J_\Sigma$  为折算到电机轴上总转动惯量。

图 1 中  $w_r$  为速度回路参考输入;  $w_o$  为速度回路输出;  $I$  为电枢电流;  $M$  为电机输出转矩;  $M_d$  为内外扰动等效力矩;  $C(s)$  为稳定控制器;  $u$  为控制量输出。

该式为理想情况下传递函数的数学表达。工程实际中, 由于各种非线性因素的存在, 难以完全对系统模型进行精确描述。

### 2 ESO 控制器设计

对于平台简化模型, 考虑实际情况, 记内外非

收稿日期: 2011-07-16; 修回日期: 2011-08-26

作者简介: 张钊(1987—), 男, 陕西人, 在读硕士研究生, 从事高精度伺服控制技术研究。

线性综合扰动因素为  $w$ ，则控制量  $u$  与输出量  $w_o$  的关系可表述为

$$w_o(s) = \frac{1/R}{T_l s + 1} \cdot K_m \cdot \frac{R/(K_m K_e)}{T_m s + 1} \cdot u + w \quad (2)$$

可得，

$$\ddot{w}_o = bu - c\dot{w}_o - dw_o + w' \quad (3)$$

其中， $b \approx b_0 = \frac{1}{T_l T_m K_e}$ ， $c \approx c_0 = -\frac{1}{T_l + T_m}$ ，

$d \approx d_0 = -\frac{1}{T_l \cdot T_m}$ ， $b_0$ ， $c_0$ ， $d_0$  为理想状态下的参数

值。这里，将控制量与综合扰动作分离，因此将系统表述为

$$\ddot{w}_o = (b - b_0)u - c\dot{w}_o - dw_o + w' + b_0 u = f + b_0 u \quad (4)$$

$f$  系统内外综合扰动。令  $x_1 = y = w_o$ ， $x_2 = \dot{w}_o$ ，

$x_3 = f$ ，可得平台状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ef \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

其中， $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \end{bmatrix}$ ， $C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ ， $E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

取系统 (5) 对应的扩展状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{z} = \hat{A}z + \hat{B}u + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{C}z \end{cases} \quad (6)$$

其中， $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ， $\hat{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ ，

$L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ ，为观测器增益向量。

选取合适的  $L$ ，使得  $z_3$  充分逼近  $f$ ，取  $u = (-z_3 + u_0)/b_0$ ，则系统 (4) 可化为

$$\dot{w}_o = (f - z_3) + u_0 \approx u_0 \quad (7)$$

从而对未知干扰进行补偿，系统亦简化为积分串联形式。取  $u_0 = K_p(r - z_1) - K_d z_2$ ， $K_p$ ， $K_d$  为控制量调节因子， $r$  为给定量，依据系统简化后的积分串联形式，该系统控制框图如图 2。

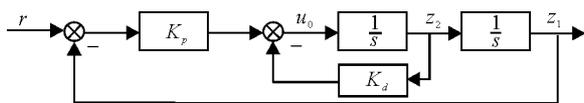


图 2 未知扰动补偿后系统等效框图

若未知扰动  $f$  能够较好地得到抑制，那么根据图 2，速度稳定回路闭环传递函数可写为：

$$G(s)_{ASR} = \frac{K_p}{s^2 + K_d s + K_p} \quad (8)$$

由此将速度环简化为较精确的数学模型，为位置环的校正提供了基础。 $K_p$ 、 $K_d$  参数值可根据系统性能指标进行选择。

### 3 数值仿真

平台速度稳定回路控制结构如图 3。

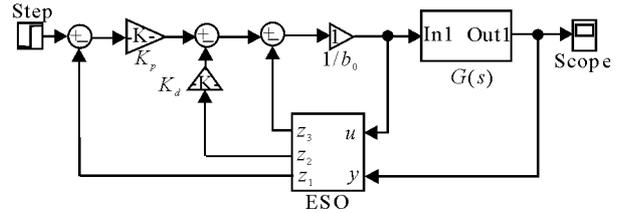


图 3 系统仿真模型

取某型转台俯仰轴系为被控对象，其传递函数为

$$G(s) = \frac{0.2618}{(0.0015s + 1)(11.8154s + 1)}$$

期待速度回路频带为 80 ~ 100 rad/s，取  $K_p = 5000$ ， $K_d = 60$ ， $L = [0.01 \ 20000 \ 1650]^T$ ，根据四级海况参数，取内外综合扰动力矩  $M_d = 1.5 \sin(2\pi \times 2t)$ 。

图 4 为所期望的速度闭环特性，频带宽度为 80 rad/s，相位裕度为 73.7°。

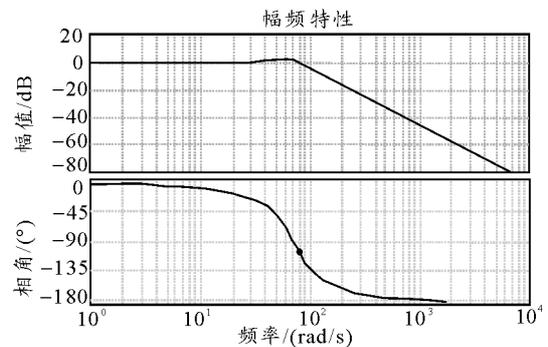


图 4 期望速度稳定闭环伯德图

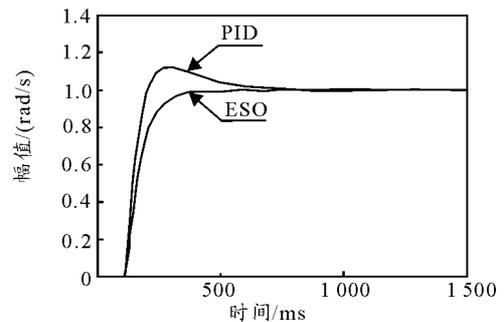


图 5 阶跃响应

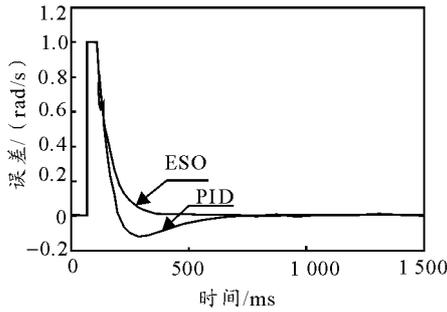


图 6 阶跃响应误差

系统响应性能分析:

对该被控对象进行 PID 校正, 并保证系统频带宽度与相位裕度, 施加相同干扰力矩情况下, 比较二者控制效果, 结果如图 5、6。

如图 5、图 6 所示, 分别对该系统的 PID 校正回路与 ESO 控制器回路进行阶跃响应对比, ESO 稳定控制器阶跃响应基本上无超调, 响应速度有所提升, 误差有所减小。对于高实时性系统来说, 该控制器具有快速响应能力。

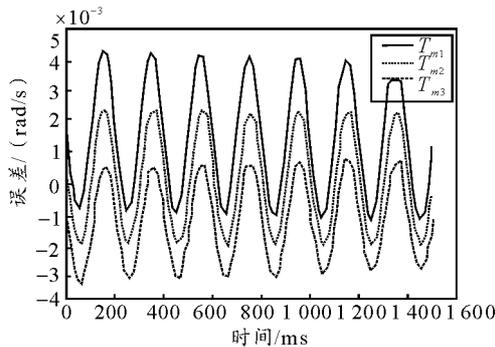


图 7 电气参数波动下误差

系统抗扰能力分析:

电气参数波动 20% 情况下, 分别取机电时间常数为  $T_{m1} = 0.8T_m$  和  $T_{m3} = 1.2T_m$ ,  $T_{m2} = T_m$ , 干扰力矩参数不变, 其响应对比如图 7。

如图 7 所示, 在电气参数有 20% 波动, 并且干扰力矩存在的情况下, 稳定精度仍然保持在  $10^{-3}$  数量级, 因此该控制器具有较好的抗干扰能力。

4 小结

通过在 ESO 基础上设计平台速度稳定回路并进行仿真实验的结果表明: 该方法算法简单, 且具有一定的快速响应与扰动抑制能力, 具有一定的实用性。由于输出速度作为 ESO 的输入, 该输出速度由陀螺测定, 但在仿真分析中并没有加入陀螺噪声, 实际使用中必须对陀螺信号进行预处理。因此, 陀螺信号的处理还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 秦继荣, 武利强. 车载稳瞄系统的自抗扰控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1791-1794.
- [2] 宋金来, 杨雨, 许可康, 等. 惯性平台稳定回路的自抗扰控制[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 391-393.
- [3] 韩京清. 一类不确定对象的扩展状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
- [4] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [5] 韩京清, 张荣. 二阶扩张状态观测器的误差分析[J]. 系统科学与数学, 1990, 19(4): 465-471.

\*\*\*\*\*

(上接第 82 页)

仿真电路图如图 5。按照仿真电路图, 将电源参数设置成压发电机的理想工作参数<sup>[5]</sup>, 用示波器对比增加填谷电路前后的二极管整流桥导通电流, 如图 6。图中平滑的标准正弦波形为电源电压的输出波形, 产生畸变的类正弦波形为整流电流的输出波形。

由图 6 可以看出, 增加填谷电路后, 整流二极管的导通角由  $90^\circ$  增加到  $150^\circ$ 。用功率表测量电源的输出功率为 0.705 W, 功率因数为 0.981。可见将滤波电容由填谷式电容二极管网络代替后, 输出电流的畸变减小, 二极管的导通角明显增大。电路的功率因数接近 1。

4 结束语

将填谷法优化的二极管电容储能滤波网络应用于大比功率压发电机, 使整流桥二极管的导通角

增大了  $60^\circ$ , 增幅为 66%。不仅使输入电流的波形由尖峰脉冲状改善为近似的正弦波形, 同时增大了发电机直接向负载供电的时间; 经过填谷法优化校正后的电路输入功率因数接近 1。表明改进后的储能滤波电路在结构较简单的前提下提高了利用发电机有功功率的能力。同时通过仿真实验也验证了填谷电路调高了系统的有功功率, 减少了无功损耗。

参考文献:

- [1] 李映平. 引信压电发电机原理及试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 69-90.
- [2] 陈荷娟, 孙加存. 高能多层压电陶瓷电源设计[J]. 弹道学报, 2003, 15(4): 82-86.
- [3] 张广超, 代道峰. 填谷式 PFC 电路分析与仿真[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 2010, 14(3): 29-31.
- [4] 周静, 李永振. 功率因数校正技术在松耦合电能传输系统中的应用[J]. 石油仪器, 2010, 24(6): 1-3.
- [5] 于强. 无源功率因数校正电路的应用研究[J]. 济南职业学院学报, 2005, 48(3): 44-45.