

· 电路与控制 ·

基于改进型重复控制的三轴转台解耦与控制

林存海, 曹广锋

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要: 针对三轴转台伺服系统位置精度要求不断提高, 提出了改进型重复控制与微分前馈控制相结合的复合控制作用于伺服系统的位置回路。根据某型三轴转台伺服系统的组成, 分析并建立了电流环、速度环与位置环的模型, 并于位置环设计了改进型重复控制器。设计时, 考虑了三轴转台的三个框架转动时互相产生的耦合影响, 并分析三个框架同时转动时三轴转台的内框快速性与稳定性。仿真结果表明, 采用复合控制策略时三轴转台的位置控制响应快、精度高、抗干扰性强, 满足系统性能指标。

关键词: 三轴转台; 三环控制; 重复控制; 耦合影响

中图分类号: TN710.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0079-04

Decoupling and Control of Three-axis Turret Based on Modified Repetitive Control System

LIN Cun-hai, CAO Guang-feng

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: The modified repetitive control and differential feed-forward control are combined to form compound control on the position loop of the servo system of three-axis turret in order to meet the increasing accuracy requirement. According to the structure of the turret servo system, models of current loop, velocity loop and position loop are analyzed and built. And the modified repetitive controller is designed for the position loop. The coupling effect from three frames of the three-axis turret rotating simultaneously is considered in the design. And the speed and stability of three inner frames are analyzed. Simulation results show that the turret has fast position control response, high precision and strong anti-interference using compound control, which can meet the system performance requirements.

Key words: three-axis turret; three-loop control; repetitive control; coupling effect

三轴转台是检测和评价惯性导航与制导系统的主要测试设备, 能够模拟出飞行器或者舰船的航向和位置信息, 在军用和民用方面都有很好的应用^[1]。三轴转台伺服系统的工作任务是根据指向空中某一方位具体位置的输入信号, 驱动框架负载, 使框架上的测试物在同一方位上与目标位置一致, 同时还要使测试物随着目标位置的运动而运动。这就需要三轴转台满足定位精准、反应迅速等要求。在转台的框架设置与动力结构等确定之后, 控制策略成为提高伺服系统精度的重要途径。首先对三轴转台伺服系统的位置-速度-电流三环控制系统进行了分析, 提出了一种重复控制与前馈微分的复合控制方法。

最后, 在电流-速度环均采用PI控制的基础上, 位置环采用复合控制, 同时考虑转台转动时三框产生的实时耦合影响进行仿真, 证明复合控制策略的优越性与可行性。

1 三轴转台伺服系统的组成

转台伺服系统被控对象相对比较复杂, 简单的单回路系统难以满足要求, 所以三轴转台伺服系统常采用电流-速度-位置多回路结构^[2]。系统中电流-速度环均采用PI控制, 通过电流环调节转矩, 通过速度环来分散解决控制过程中出现的干扰问题, 增加系统动态阻尼比等。位置环是保证系统精度的

收稿日期: 2013-12-04

作者简介: 林存海(1985-), 男, 吉林龙井人, 学士, 主要研究方向为光电伺服控制技术。

最重要的环节,位置环的精度决定整个伺服系统的精度。系统控制回路框图如图1所示。

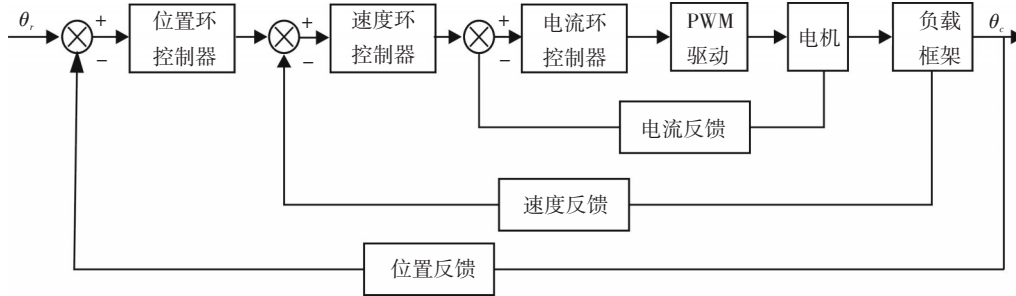


图1 三轴转台伺服系统电流-速度-位置三环控制回路框图

其相应的动态结构图如图2所示。

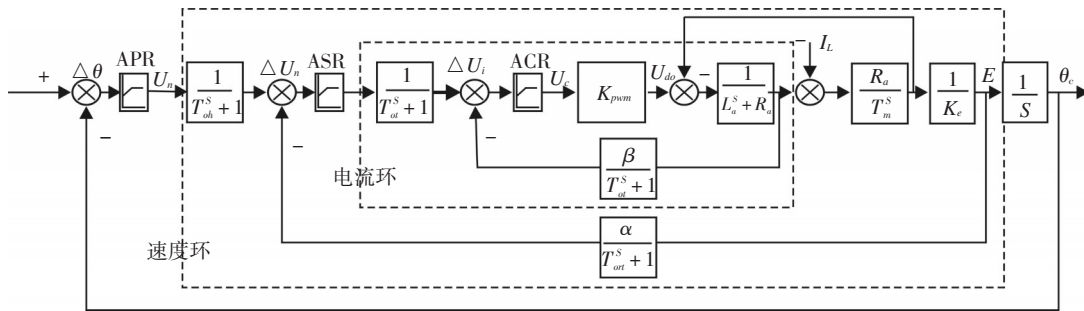


图2 三轴转台伺服系统电流-速度-位置三环控制动态结构图

2 电流环分析

电流环的作用是通过改变电枢电流调节电机转矩。电流环负反馈的引入可以充分利用电机的过载能力,同时限制电流的最大值,保护电机以免在启动或制动过程中高的电流对电机造成冲击。电流环输出的电流是电机每相的相电流,电流值由安置在驱动器内部的霍尔元件反馈回来。电流环动态结构图如图2所示。

根据三轴转台的内框所选择的成都精密电机厂的J215LYX03D型电机可以得到电流环相关参数如下(文中以分析内框为例,中外框类似)。

$$\text{电磁时间常数: } T_l = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.019}{11.2} = 0.0017 \text{ s}$$

$$\text{机电时间常数: } T_m = \frac{R_a \cdot J}{K_e \cdot K_t} = \frac{11.2 \times 0.038}{0.48 \times 4.36} = 0.2 \text{ s}$$

$$\text{电流反馈系数: } \beta = \frac{U_{i\max}}{I_{\max}} = \frac{10}{5.5} = 1.82 \text{ V/A}$$

$$\text{PWM功放系数: } K_{pwm} = \frac{U_{d0}}{U_c} = \frac{60}{10} = 6$$

$$\text{取滤波时间常数: } T_{oi} = 0.002 \text{ s}$$

电流环与速度环采用的均为PI调节器,其传递函数为^[3]

$$W_{pi}(s) = K_p + \frac{1}{K_i s} = K_p \frac{1 + \tau s}{\tau s} \quad (1)$$

式中, K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; $\tau = K_p K_i$ 。

可以计算出最终电流环PI调节器的系数为

$$K_{pi} = \frac{\tau_i R_a}{2T_{\Sigma i} \beta K_{pwm}} = \frac{0.0017 \times 11.2}{2 \times 0.002 \times 1.82 \times 6} = 0.436 \quad (2)$$

$$K_{li} = \frac{\tau_i}{K_{pi}} = \frac{0.0017}{0.436} = 0.0039 \quad (3)$$

3 速度环分析

速度环的引入,不但能保证速度回路的稳定,而且在转台框架和电机刚度不大的时候,可以通过速度环提高速度环刚度,同时亦可以通过速度环拓宽速度回路频带,提高转台快速性。此外,速度环还能分散抑制系统干扰、降低速度环死区电压等。

根据内框所选电机J215LYX03D参数可以得到速度环相关参数如下:

$$\text{速度反馈系数: } \alpha = \frac{U_{n\max}}{n_{\max}} = \frac{10}{110} = 0.09 \text{ v} \cdot \text{min} / r$$

$$\text{取滤波时间常数: } T_{on} = 0.01 \text{ s}$$

可以计算出最终速度环PI调节器的系数为:

$$K_{pm} = \frac{(h+1)\beta K_e T_m}{2h\alpha R_a T_{\Sigma n}} = \frac{6 \times 1.82 \times 0.48 \times 0.2}{2 \times 5 \times 0.09 \times 11.2 \times 0.014} = 7.43 \quad (4)$$

$$K_{in} = \frac{\tau_n}{K_{pm}} = 0.0094 \quad (5)$$

4 位置环分析

位置环为最后设计的回路,也是最重要的环节,它是转台伺服控制的主环。为了提高位置回路的精度,必须设计高精度位置回路控制器。联合微分前馈控制与改进型重复控制组成复合控制器,兼具开环控制的快速性与闭环控制高精度的优点。

4.1 微分前馈控制

微分前馈控制^[2]的主要作用是拓宽系统频带宽度。为了便于分析,将前馈微分控制嵌入简单反馈控制系统中,如图3所示。

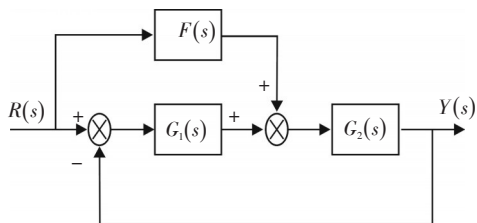


图3 微分前馈控制结构框图

对图3进行框图等效变换,系统输出与输入之间的关系为

$$Y(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)}R(s) + \frac{G_2(s)F(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)}R(s) \quad (6)$$

从式(6)可以看出, $F(s) = \frac{1}{G_2(s)}$ 时,则此时

$Y(s) = R(s)$, 系统输出即为系统输入,这是一个非常理想的状态,这种状态实现了完全不变性。这时的 $F(s)$ 可以展开为 s 的幂级数为

$$F(s) = a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n \quad (7)$$

实际上式(7)不能完全实现,而只是采用部分不变性来近似代替。一般情况下,取 $F(s) = a_1 s$ 。

4.2 重复控制及其改进

基本重复控制^[4]系统结构如图4所示。由重复控制的基本原理可以知道,重复控制其实质就是将上一周期与本周期的误差叠加作用于被控对象的控制器上,那么系统在第一周期的时候重复控制无法起到作用,如果应用到三轴转台伺服系统中,系统的快速性将无法达到要求。基于此,需要对基本重复控制进行改进。

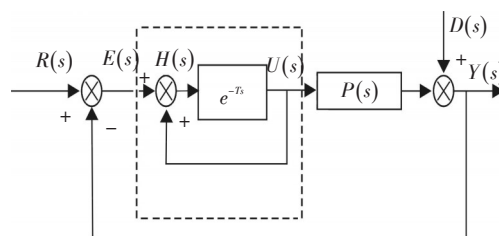


图4 基本重复控制系统结构图

已有定理证明,以上重复控制系统的稳定条件为 $\|1 - P(s)\|_{\infty} < 1$ (8)

式(8)表明,为了达到减少系统稳态误差的目的,必须首先满足上述不等式。

对于一般的系统,其被控对象部分往往频率特性较低,很难在整个频域内满足式(8)的理想稳定条件^[5]。这也是基本重复控制需要改进的原因之一。

首先,为了改善系统稳定性,可以在重复控制其的时滞环节之前加入低通滤波器。但加入滤波器的同时降低了系统的跟踪性能,因为参考信号中较高次谐波容易被滤波器滤去的原因。对于这一不良影响,可以在低通滤波器的输出端增加一个正比于误差的信号来克服。另一方面,由于时滞环节的存在,导致系统在第一期周期内一阶延迟而没有输出信号,因此重复控制在系统的第一周期内无法发挥作用,即便改善稳态过程中被控量的跟踪精度始终不能改善第一周期的响应。针对这一问题,可以通过将一个正比于误差的信号加到被控对象前也即过程的输入端前加以解决。改进后的重复控制系统如图5所示。

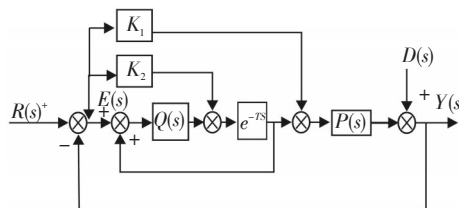


图5 改进后的重复控制系统

根据式(7)的推导,同理可以推导出改进后系统达到稳定时必须满足的条件为

$$\left\| Q(s) \cdot \left[1 - \frac{[K_2 + Q(s)]P(s)}{Q(s)[1 + K_1 \cdot P(s)]} \right] \right\|_{\infty} < 1 \quad (9)$$

改进后的重复控制器的设计可总结为如下步骤

(1)可以选择如下形式的低通滤波器传递函数 $Q(s)$ 为

$$|Q(s)| = \frac{1}{1 + T_1 s} \quad T_1 > 0 \quad (10)$$

$$\text{或者 } |Q(s)| = \frac{1 + T_2 s}{1 + T_1 s} \quad T_1 > T_2 > 0$$

(2)首先令 $K_2 = 0$,通过下式确定 K_1 的最大值

$$|Q(j\omega)| < \left| \frac{1 + K_1 \cdot P(j\omega)}{1 + (K_1 - 1) \cdot P(j\omega)} \right| \quad (11)$$

(3)在满足以上的条件下,调节 K_2 的值,改善系统跟踪精度。

5 仿真分析

三轴转台转动时,三框之间存在着非线性耦合关系,严重时直接影响到系统的稳定性,难以保证系统的动态与稳态性能^[6]。因而在对位置环跟踪仿真的研究中,必须考虑转动时造成的耦合影响对系统产生的影响。对于轴系之间的惯量交叉耦合和框架间的动态耦合问题,其实质是系统中力矩变化对系统的影响,最终反映在执行电机的就是对电机的输出力矩进行补偿设计^[7]。

通过对三轴转台三轴转动时的速度耦合与力矩耦合的分析,最终可以得到三轴转台的动力学方程^[8]。结合研究三轴转台相关参数,可以得到最终三轴转台动力学方程为

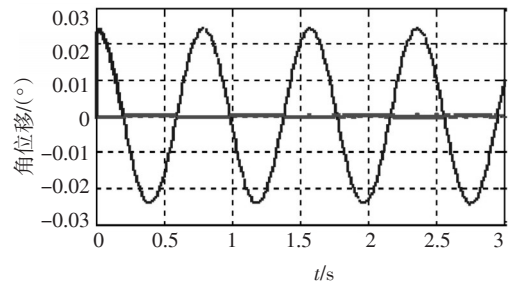
$$\begin{cases} M_{x\text{框}} = 1.168\ 93\alpha - 1.168\ 93\gamma \sin\beta - 1.168\ 93\beta\gamma \cos\beta \\ M_{y\text{框}} = 4.351\ 36\beta + 1.168\ 93\alpha\gamma \cos\beta + 0.757\ 95\gamma^2 \sin 2\beta \\ M_{z\text{框}} = 10.335\ 71\gamma - 1.168\ 93\alpha \sin\beta - 1.515\ 9\beta\gamma \sin 2\beta - \\ \quad 1.168\ 93\alpha\beta \cos\beta \end{cases} \quad (12)$$

对三轴转台伺服系统进行仿真,主要包括横滚框、俯仰框以及方位框的独立三环伺服控制系统,但是它们之间的耦合关系又把它们联系在一起,将三框的速度、加速度和位置信号作为式(12)的输入信号,输出为三框分别受到的耦合力矩,将此耦合力矩作为干扰力矩加到各自电机上。干扰观测器具有观测干扰以及补偿的作用,所以此处可以使用

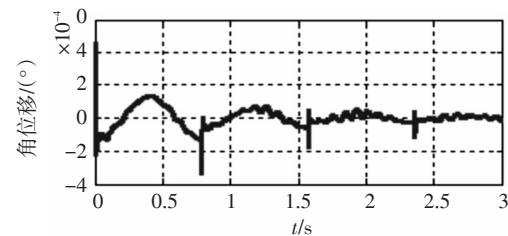
干扰观测器对耦合力矩进行观测与补偿^[9-10]。

文中所使用的转台的性能指标为:横滚框旋转角度范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$,俯仰框旋转角度范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,方位框旋转角度为 $0^\circ \sim 360^\circ$,三框最高转速均为 $120^\circ/\text{s}$,最大加速度均为 $800^\circ/\text{s}^2$,三框的角位置精度均为 $5''$ 。仿真时,输入横滚框、俯仰框和方位框转角范围内任一角度,同时注意角速度与角加速度均在要求范围内。位置环分别采用PID控制与复合控制进行仿真,观察内框的位置跟踪精度、快速性等。

选取其中一次仿真结果如图6所示,此时,横滚框转过 10° ,俯仰框与方位框分别转过 15° 、 45° 时,PID控制与复合控制对比图如图6a所示。此时,采用复合控制系统的控制精度已极高,将其放大后如图6b所示。



(a)PID控制与复合控制对比图



(b)微分前馈+改进重复控制仿真曲线图

图6 横滚框转过 10° ,系统仿真曲线图

从图6的仿真图可以看出,采用PID控制时,角位置误差达到 0.23° ;采用复合控制时,角位置误差最大时为 $0.000\ 4^\circ$ 。其余情况与以上仿真类似,三轴转台采用复合控制时,响应迅速,系统响应的第一周期亦能满足系统要求,同时对耦合干扰具有很好的抑制作用,使得角位置精度极高,完全复合精度要求。

6 结束语

提出了改进型重复控制与微分前馈控制相结合的复合控制作用于伺服系统的位置回路。并以

(下转第86页)

- [J]. 网络与信息, 2010(4).
- [2] 高超, 贺志强, 游志刚. 雷达对抗系统训练效果评估方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(5): 527-536.
- [3] 周升响, 张兵. 基于空闲处理的模拟训练成绩评判方法[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(5): 331-333.
- [4] 郭培, 高俊雄, 王耘波. 基于序列匹配的自动评分算法设计[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 78-80.
- [5] 任重, 张永, 徐池. 模糊综合评价法在模拟训练评分系统中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2012.
- [6] 魏培智. 复杂电磁环境下航空兵训练评估系统研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(31): 236-243.
- [7] 杨晓超, 张宏军, 马勇波, 等. 合同战术训练评估系统体系结构[J]. 计算机工程, 2008, 34(15): 54-59.
- [8] 王万请, 王德泉, 岳春生, 等. 信息采集技术在模拟训练中的应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 2(3): 67-70.
- [9] 尹朝庆. 人工智能与专家系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 曹汉卿, 聂伟. 基于专家系统的轮机模拟器自动评分系统研究[J]. 船电技术, 2013, 2(33): 37-39.

(上接第78页)

- 数优化[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(2).
- [6] 苏达, 王德苗. 大功率LED散热封装技术研究的新进展[J]. 电力电子技术, 2007 41(10): 13-15.
- [7] 刘胜, 陈明祥, 罗小兵. 大功率LED封装技术与发展[P]. 中国半导体照明产业发展年鉴, 2006.
- [8] 余彬海, 王垚浩. 结温与热阻制约大功率LED发展[J]. 发光学报, 2005, 26(6): 761-766.

(上接第82页)

此设计了电流环、速度环与位置环的转台模型。对比传统PID控制, 改进后的重复控制克服了频率范围窄、第一周期无响应等缺点, 使得三轴转台的位置控制响应更快、精度更高、抗干扰性更强。同时, 考虑了三轴转台的三个框架转动时互相产生的耦合影响, 并分析三个框架同时转动时三轴转台的内框的快速性与稳定性。结果表明, 采用复合控制策略时三轴转台的位置控制稳态输出快, 动态性能和跟踪精度得到大大的提高, 并具有较强的鲁棒性, 在实际的应用中取得了满意的结果。对科研和生产应用有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 汪临伟. 单神经元PID的三轴转台控制系统设计[D]. 九江: 九江职业技术学院, 2011, 13.
- [2] 崔栋良. 三轴摇摆台动力学仿真与复合控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 51-54.
- [3] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M](3版). 北京: 机械工业出版社, 2007, 8: 76-84.
- [4] 董婷. 直接驱动数控转台永磁环形力矩电机及其控制策略的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010: 60-62.
- [5] 丛爽. 一种改进的重复控制系统及其应用[J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(3): 292-296.
- [6] 黄卫权, 刘文佳. 三轴仿真转台耦合问题的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 99-103.
- [7] 蒋晓刚, 倪彬, 徐月明. 三轴惯导测试转台的交叉耦合问题及对策[J]. 2011(6): 266-267.
- [8] 邓雪云, 曹力, 史忠科. 实时飞行再现转台的建模与解耦[J]. 2009, 28(6): 721-725.
- [9] 刘晓东, 吴云洁, 田大鹏, 等. 基于干扰观测器的飞行仿真转台滑模控制器[J]. 2011, 45(3): 393-398.
- [10] QING Wei-jia. Disturbance rejection through disturbance observer with adaptive frequency estimation [J]. IEEE Transaction on Mechatronics, 2009, 45(6): 2675-2678.