

文章编号:1000-582X(2003)07-0121-03

工业 X-CT 二代扫描运动控制系统及其仿真*

冯 鹏, 魏 彪, 唐 波, 潘 英俊, 先 武

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:研制了一套工业 X-CT 二代(Ⅱ代)扫描运动控制实验装置,即“平移+旋转”的扫描运动系统。针对Ⅱ代扫描运动控制系统中的旋转运动,根据其运动特点,获得旋转运动的传递函数。利用 Matlab 开发软件,在时域和频域对系统的响应特性进行仿真,并对其进行一定程度的校正,改善其响应性能,以达到对二代扫描运动实验系统的最优化控制。

关键词:工业 X-CT; Ⅱ代扫描; 响应特性; Matlab 仿真

中图分类号: TU452; TL812

文献标识码: A

工业 X-CT(X-ray Computed Tomography),即工业 X 射线计算机层析成像技术,是一种集核技术、光机电一体化技术、自动控制及计算机图象技术于一体的高新技术,在航空、航天、军工、机械、电子、石油及钢铁等领域中有着广泛的用途^[1-2]。在工业 CT 技术中,扫描运动的自动控制技术是其关键技术之一。扫描运动控制性能将直接影响工业 CT 系统或装置获取扫描数据的可靠性,并最终影响 CT 成像的质量^[3]。因此,对工业 CT 二代扫描自动控制的研究也就具有十分重要的现实意义。自动控制系统的仿真,是描述 CT 扫描运动控制系统性能的一种有效的方法^[4-5]。所谓仿真,就是建立系统的动态模型并在模型上进行试验(或实验),以便对控制系统的稳定性、稳态误差、系统的时域响应以及频域响应等相关参数进行计算和分析^[6]。随着计算机技术的发展,基于计算机的自动控制系统仿真是十分便利的。由于计算机仿真能够为系统的分析、计算、研究、综合设计提供快速、经济、科学及有效的手段,故控制系统的计算机仿真将逐渐为人们所广泛使用,并扮演越来越重要的角色。

基于此,研制了工业 X-CT 二代扫描实验装置,并根据工业 CT 二代(Ⅱ代)扫描运动的特性,利用系统的传递函数,运用 Matlab 的开发环境对系统进行仿真,得出最优控制参数。之后,依据仿真结果,对系统进行有关校正,力求达到工业 X-CT 二代扫描运动实验系统的最优化控制。

1 系统构成及传递函数的建立

目前,工业 CT 扫描方式主要采用了三代(Ⅲ代)扫描和二代(Ⅱ代)扫描。在工业 CT 三代扫描方式中,扫描运动控制系统仅作“旋转”运动。工业 CT 的二代扫描方式,运动控制系统则采用“平移+旋转”运动。在工业 X-CT 系统的扫描运动中,因 X 射线束是小角度(一般小于 20°)的窄扇形束,对被检物的检测,其运动控制系统主要采用二代扫描方式,如图 1 所示。

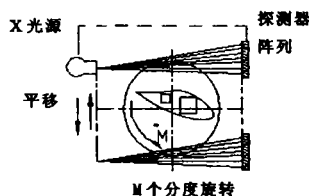


图 1 工业 X-CT 二代扫描方式示意图

在工业 X-CT 扫描运动控制中,研制的Ⅱ代扫描自动控制实验系统主要是由两部分组成的,即驱动部分和传递运动部分。驱动部分由专门的步进电动机驱动器构成,传递运动部分则由两相混合步进电动机构成。由于涉及到控制系统的闭环响应问题,为便于讨论,假设系统的闭环反馈系数是 -1,也就是说,系统是由一个驱动器和步进电机组成开环的前向通道,一个传递函数是 -1 反馈环节构成了整个系统的组成,如图 2 所示。

在明确了运动控制系统的构成之后,就可以建立

* 收稿日期:2003-03-25

基金项目:教育部骨干教师资助计划(教技司[2001]169号);重庆市科委应用基础研究项目(渝科发计字[2002]16号)

作者简介:冯鹏(1981-),男,河南商城人,重庆大学硕士研究生,主要从事自动控制应用研究。

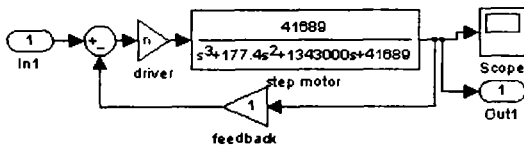


图2 工业 X-CT 二代扫描运动控制系统的构成或求取系统的传递函数。步进电动机的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{\frac{R}{L_p} \omega_{mp}^2}{s^3 + \left(\frac{R}{L_p} + \frac{D}{J}\right)s^2 + \left[\frac{R}{L_p} \cdot \frac{D}{J} + (1 + K_p)\omega_{mp}^2\right]s + \frac{R}{L_p} \omega_{mp}^2} \quad (1)$$

将步进电动机的各部分参数的相应数据代入公式后,其传递函数简化为:

$$G(s) = \frac{41689}{s^3 + 177.4s^2 + 1.343e006s + 41689} \quad (2)$$

对于步进电动机驱动器而言,其是由按照内部环形分配器决定的分配方式,控制电机各项绕组的导通和截止。为了使步距角能够达到更高的精度,其内部存在一个细分驱动电路,使得其传递函数就是在其细分数上乘上一个比例系数。

反馈部分是类似一个传递函数为 -1 的的反馈环节组成。

2 系统仿真

系统仿真,主要进行系统稳定性和系统暂态特性的分析。系统稳定性是决定系统能否工作的前提,而暂态特性是衡量系统工作状态优劣的指标。对系统仿真后,基于仿真结果,对系统进行校正,并对校正后的系统也进行仿真,以便观察校正效果。

2.1 稳定性

系统仿真的稳定性判据有两种:Nyquist 图稳定判据及闭环特征根稳定判据,其仿真结果如图3所示。

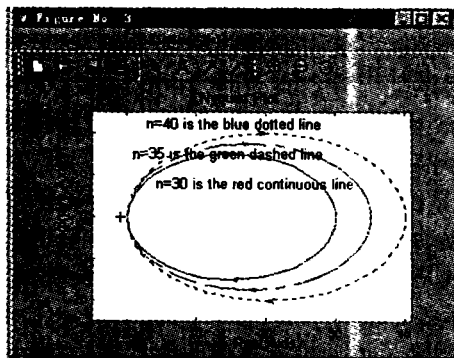


图3 采用 Nyquist 图稳定判据的仿真结果

由图可见,系统的 Nyquist 图并没有包括 (-1, j0) 点,图中所示 n, 是驱动器的传递函数,包括驱动器细分倍数,改变细分倍数,系统的稳定性不发生变化,依

然是一个稳定的系统。

系统闭环特征根:

$$n = 30$$

$$\text{ans} = 1.0e + 003 * -0.08821864944104 + 1.15526949821499i - 0.08821864944104 - 1.15526949821499i - 0.00096270111793$$

$$n = 35$$

$$\text{ans} = 1.0e + 003 * -0.08814100091674 + 1.15526364134017i - 0.08814100091674 - 1.15526364134017i - 0.00111799816653$$

上述数据表明,系统的闭环特征根都具有负实部,这同样说明系统是稳定的。这从另外一个方面说明了图3中采用 Nyquist 判据的仿真结果,即本论文所研制的工业 X-CT 二代扫描运动控制实验系统是稳定的判断,是正确的。

2.2 暂态性

对系统暂态特性的判别主要也有两种方法:闭环阶跃响应图法及开环 Bode 图法。本论文仅介绍闭环阶跃响应图法的仿真结果,其结果如图4所示。

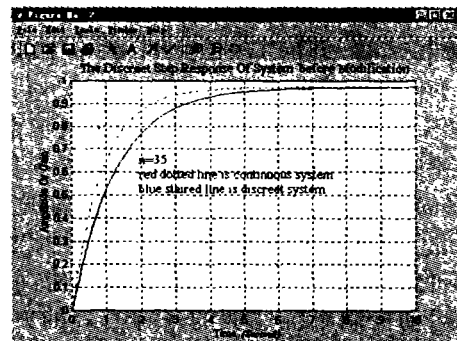


图4 采用闭环阶跃响应图法的仿真结果

由图中可见,系统的阶跃响应为单调递增的曲线,但是最终趋近一个固定值。且系统响应曲线始终没有超出 1,也就是说,系统的超调量为 0,系统具有良好的稳定性。

以下所列出的数据均是分别对应于 $n = 30, n = 35, n = 40$ 的情况,连续系统闭环阶跃响应相关参数:

$$tr =$$

$$2.3125$$

$$\text{上升时间: } 2.0250$$

$$1.8000$$

$$e_{ss} =$$

$$0.0401164853$$

$$\text{稳态误差: } 0.0314096179$$

$$0.0260667615$$

无论从图上直观的观察,或是由上面的数学结果分析,都说明系统的响应时间太长,到达稳态比较久,这样就必然会影响系统的正常工作速度。而且,系统的

稳态响应值距离1还有一定的距离,说明系统还存在一定的稳态误差。此仿真结果表明,本论文所研制的工业X-CT二代扫描运动控制系统,其暂态特性不甚理想,在使系统正常工作时存有一定的隐患,需要进一步的改进和完善。

2.3 校正

上述仿真结果表明,由于系统仍然具有一定的稳态误差,响应时间相对较长,因此,需对该系统进行必要的改进和校正,使其在不改变当前系统良好稳定性的基础上,既提高系统的快速响应性,又进一步减小系统响应的稳态误差。

校正手段选用PI校正器。而在实际使用中,采用有源滞后校正网络来实现PI控制器的功能,如图5所示。

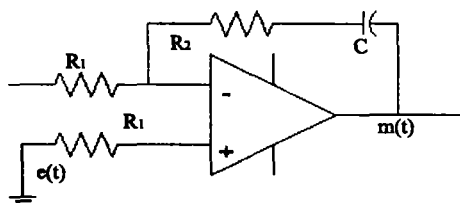


图5 有源滞后校正网络

其传递函数为:

$$G_c(s) = -K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = -K_c \frac{T_s + 1}{T_s} \quad (3)$$

PI控制器中, T_i, K 的获得,此处采用工程上常用的一种快速获取的方法,取 $T_i = \tau/10$,而 K 的选择,则因系统的不同而改变。其中, τ 是系统的时间常数。本例中时间常数 $\tau = 5(s)$,所以 $T_i = 0.5(s)$,选择 $K = 8$ 。

将PI控制器带入系统的前向通道中,构成串联校正系统。

校正后,前向通道的传递函数为:

$$G(s) = \frac{166\ 756s + 333\ 512}{0.5s^4 + 88.7s^3 + 671\ 300s^2 + 2.084e004s} \quad (4)$$

可见,在加入PI校正器后,系统的响应特性得到了明显的改善,系统仍然是个稳定的系统。这说明所采取的校正方法是可行的,其分析方法与前述相类似,此处不再赘述。

3 结论

1) 校正前系统是一个稳定的系统,系统无超调量,无振荡,稳态输出误差小,说明所研制的该二代扫描运动控制系统在一定程度上能够满足工业X-CT二代扫描工作要求。

2) 校正前系统响应时间长,快速性较差,且存在一定稳态输出误差。

3) 利用系统仿真结果,对系统进行PI校正,使所研制的工业X-CT二代扫描运动控制系统的性能得到明显的改善。

参考文献:

- [1] DENNIS M J. Industrial computed tomography[J]. Methods of Nondestructive Evaluation, 1996,36(2): 358-386.
- [2] SPENCER K A. Computer tomography - an overview[J]. J of Photographic Science, 1989,37:84-85.
- [3] CLAUDIA V K, NEEL S T. Basics of computed tomography [J]. Materials Evaluation, 2000,22(5):630-634.
- [4] 魏克新,王云亮. Matlab语言与自动控制设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 黄忠霖. 控制系统 Matlab 计算及仿真[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [6] 董景新,赵长德. 控制工程基础[M].北京:清华大学出版社,1998.

Simulation of Motion Control System Based on the 2nd Generation Scanning for X-Ray Industrial Computerized Tomography(X-CT)

FENG Peng, WEI Biao, TANG Bo, PAN Ying-jun, XIAN Wu

(College of Opto-electronics Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The second-generation control system of scanning motion of industrial computerized tomography (ICT) systems is that the scanning motion is divided into translation and rotation. This paper only focuses on rotation. After acquiring the transferred function of the rotation based on the features of the system, we simulate the system to get the parameters of the motion in the field of time and frequency with Matlab, and modify it to some extent in order to change its capability of response for getting the best control.

Key words: industrial X-ray computerized tomography; 2nd generation scanning; characters of response; Matlab for simulation

(编辑 张小强)