

直流力矩电机力矩波动抑制方法比较^{*}

刘志明, 陈 黎, 王德江, 李文明, 张雪菲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对直流力矩电机低速运行时, 力矩波动显著的问题, 分析了力矩波动产生的原因、机理并通过试验测出实际系统的力矩波动量对稳速性能的影响。建立了单速度闭环, 电流、速度双闭环和状态观测器直流力矩电机控制系统的数学模型三种抑制方法, 试验结果表明应用电流、速度双闭环方法可以将直流力矩电机力矩波动降低约 50%。

关键词: 直流力矩电机; 力矩波动; 电流、速度双闭环; 速度闭环; 状态观测

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)23-0068-03

Comparing of method about torque ripple reduction in DC motor drives

LIU Zhi Ming, CHEN Li, WANG De Jiang, LI Wen Ming, ZHANG Xue Fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: This paper, the torque ripple significant problems, analyzed the causes of torque ripple, mechanism, and the actual system by experiment measured the amount of torque fluctuation of the fixed-speed performance. The establishment of a single-speed closed-loop, current, speed and status of observer pairs of closed-loop DC torque motor control system mathematical model, simulation results by a comparative analysis of the performance of these three methods. The results show that, applied current, speed, double-loop algorithm can actually be the DC torque motor torque ripple reduced by about 50%.

Key words: DC torque motor; torque ripple; current & velocity loop; velocity loop; state observation

航空侦察相机扫描反射镜作为摆扫式航空相机的伺服控制机构, 其性能直接影响航空相机的成像分辨率。为了使航空相机获得清晰度较高的航拍图片, 必须保证扫描反射镜系统有较高的速度控制精度以消除飞行及姿态像移^[1]。

直流力矩电机作为伺服系统的执行元件, 其运行速度精度决定了像移量的大小, 因此必须采用有效的力矩波动抑制方法以减小力矩波动量对速度精度的影响。速度闭环方法可以通过提高系统增益来减小稳态误差, 提高抗扰能力^[2]。在速度环中引入电流环能在满足速度精度的同时, 更好更快地响应电流的变化, 从而使电流维持稳定、减小电流波动量^[3]; 状态观测器通过状态反馈和输出反馈的配置, 可以有效抑制力矩波动的影响^[4]。

1 力矩波动的抑制方法

1.1 引入力矩波动的直流力矩电机数学模型

直流力矩电机的动态方程为:

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a(t) \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (1)$$

式中: $e(t)$ 表示电机的反电势; $L_a(t)$ 表示电机电感; R_a 表示电枢电阻; $i_a(t)$ 表示电机电枢电流^[5]。

直流力矩电机波动力矩是由于齿槽效应、磁路不对称和换向电流波动造成的。当电机匀速旋转时, 冲片和槽相互交替经过磁极, 由于磁阻力矩的周期性变化, 该周期性力矩作用于电机轴时, 使得电机的输出转速产生了变化。而冲片和槽相互交替的频率决定了波动力矩的频率。其幅值和频率与电机输出转速成正比, 所以电机波动力矩可以用正弦函数表示^[6]:

$$Mr = K \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

式中, K 表示波动力矩的幅值; ω 表示正弦波的角频率。可将波动力矩视为外界扰动力矩, 波动力矩同外界其他周期性扰动信号作为电机的力矩波动的来源, 由于外界其他周期性扰动信号(如振动、负载不平衡引起的波动)相对于波动力矩来说占有一定的比例, 因此不

^{*} 基金项目: 国家 863 项目高技术研究发展计划资助项目(2006AA06A208)

能仅将波动力矩看作是电机的力矩波动。

电压输入与电压输入响应速度的闭环传递函数为:

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{U_a(s)} = \frac{K_m}{(JL_a s^2 + JR_a s^2 + K_c K_m)} \quad (3)$$

电机的速度波动量与电机力矩波动的传递函数为:

$$\frac{\Delta\dot{\theta}(s)}{M(s)} = \frac{R_a + L_a s}{(JL_a s^2 + JR_a s^2 + K_c K_m)} \quad (4)$$

电机的转速为:

$$\dot{\theta}_M(s) = \dot{\theta}(s) + \Delta\dot{\theta}(s) \quad (5)$$

由式(5)可知电机实际输出转速为期望转速与波动转速的和,波动转速越大,则系统输出精度越低。

1.2 控制算法数学模型

为了使电机运行速度的控制精度降低扰动对系统输出的影响,应尽可能地增加系统的开环放大倍数。但是随着系统开环放大倍数的提高,系统的稳定性受到影响,为了提高系统的控制精度和鲁棒性,在前向通路中串联速度调节器(采用二阶超前滞后算法)以改善系统的动态性能并提高系统的控制精度和稳定性。

由波动力矩引起的速度波动量为:

$$\Delta\omega(s) = \frac{K_m \cdot (R + Ls)}{Js \cdot [Ls + R + G_i(s)K_p K_v - K_c]} \Delta I(s) \quad (6)$$

由于系统力矩波动的影响,直流力矩电机的电枢电流会产生波动,在速度环中加入电流环增加系统的阻尼以抑制电枢电流的波动。系统电流环的带宽应为速度环带宽的5~10倍,这样电流内环才能起到快速调节电流的作用,改善速度输出的平稳性。电流、速度闭环控制系统的模型如图1所示。

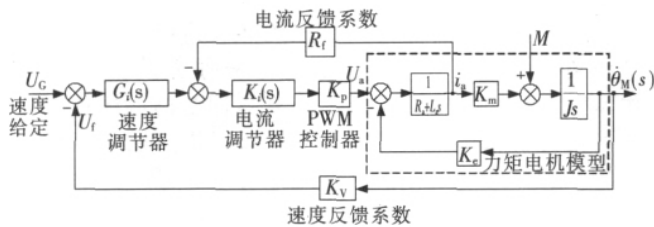


图1 电流、速度双闭环控制系统的控制模型

由引入电流环后波动力矩引起的速度波动量为:

$$\Delta\omega(s) = \frac{K_m \cdot (R + Ls) + R_i + Js}{Js \cdot (Ls + R) [Ls + R + G_i(s)K_i(s)K_p K_v - K_c]} \Delta I(s) \quad (7)$$

通过状态观测器设计,对系统的极点进行重新配置,也可以实现对系统力矩波动的抑制,将电枢电流和输出的角速度作为状态观测器的状态变量,输入变量为控制电压和力矩波动值,通过合理的参数设计,就可以很好地抑制输出转速的波动。直流力矩电机的数学模型为:

$$\begin{cases} U_a(s) - K_c \dot{\theta}(s) = I_a(s)(L_a s + R_a) \\ K_m I_a(s) - M = J s \dot{\theta}(s) \end{cases} \quad (8)$$

得出直流力矩电机的动态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ -\frac{K_m}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ M \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i \\ \theta \end{bmatrix}$$

2 仿真分析

为了验证上述三种方法对力矩波动的抑制效果,分别建立了速度闭环仿真模型,电流、速度双闭环仿真模型和状态观测器仿真模型,得出仿真结果,并且比较各种算法对电机波动力矩的抑制效果。

将系统输入信号设定为 $0.1^\circ/\text{s}$,力矩波动信号设定为 $0.01\sin(0.89t)$ 的正弦波信号,由式(4)可得电机波动力矩引起的速度波动幅值为 $0.02^\circ/\text{s}$ 。若采用速度闭环控制方法,其仿真结果如图2所示。

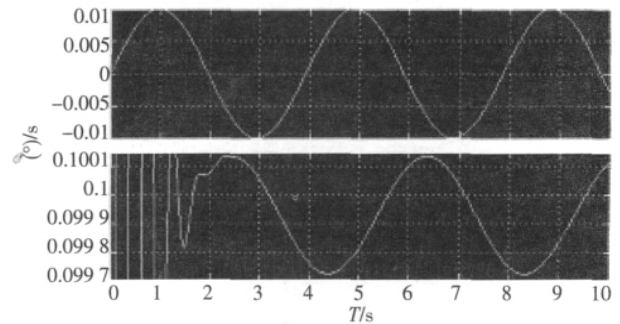


图2 速度闭环控制仿真图

图2中,上半部分为电机波动力矩引起幅值为 $0.02^\circ/\text{s}$ 的速度波动,下半部分为采用速度闭环控制方法后的速度波动量由原来的 $0.02^\circ/\text{s}$ 减少至 $0.0004^\circ/\text{s}$ 。

若采用电流、速度双闭环控制方法,其仿真结果如图3所示。

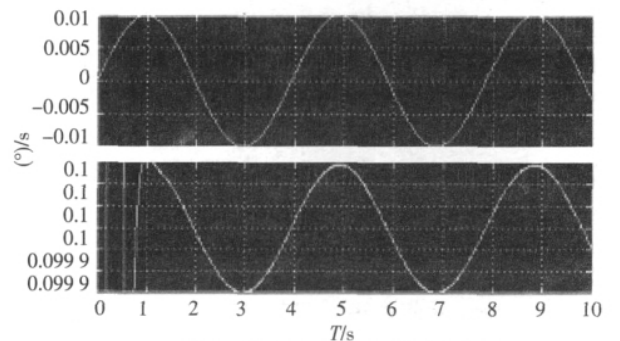


图3 电流、速度双闭环控制仿真图

图3中,上半部分为电机波动力矩引起幅值为 $0.02^\circ/\text{s}$ 的速度波动,下半部分为采用速度闭环控制方法后的速度波动量由原来的 $0.02^\circ/\text{s}$ 减少至 $0.00028^\circ/\text{s}$ 。通过状态观测器补偿,其仿真结果如图4所示。

力矩波动引起的速率波动信号幅值由原来的 $0.02^\circ/\text{s}$ 减小至 $0.008^\circ/\text{s}$ 。

比较三种算法的仿真结果,可以得出电流、速度闭环控制方法对电机的力矩波动抑制效果最为明显,速度

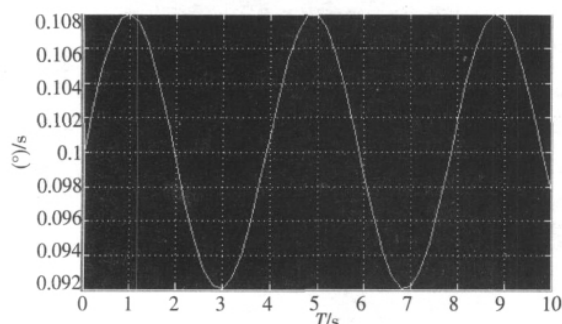


图4 状态观测器仿真图

闭环控制方法和状态观测器都不如速度闭环控制方法明显。

3 试验分析

根据仿真结果,本文最后通过试验比较电流、速度闭环控制方法与速度闭环控制方法对电机的力矩波动抑制效果,以验证仿真数据的真实性和合理性。

速度闭环控制系统的输入为幅值为 $0.1^\circ/\text{s}$ 的阶跃信号,得到阶跃响应曲线,如图5所示,从图中可以看出在稳速后,力矩波动导致速度波动比例约为13%。

同样的输入加载在电流、速度双闭环系统中,得到的阶跃响应速度波动比例约为7%,如图6所示。

针对直流力矩电机的力矩波动,提出了三种抑制方法。对仿真及试验结果进行了对比研究,结果表明电流、

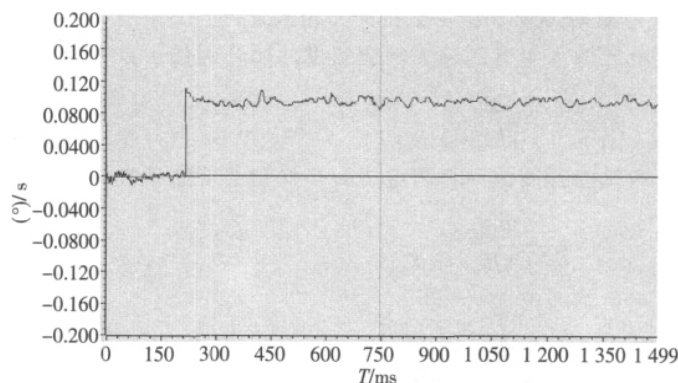


图5 速度闭环速度输出采样

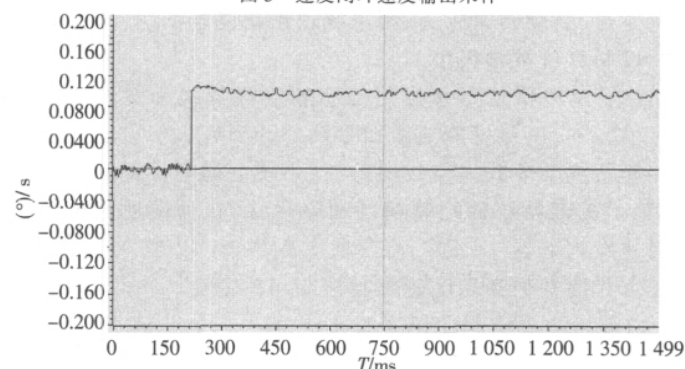


图6 电流、速度双闭环速度输出采样

(下转第73页)

(上接第67页)

半。而对无DLF的数字锁相环而言,每发生数据跳变可调整相位一次,因此平均每 $2T_b$ s可调整相位一次,故同步建立时间为:

$$t_s = N \cdot 2T_b = T_b^2 / \delta \quad (2)$$

有DLF的数字锁相环,要经过若干次比相才调整相位一次,故同步建立时间比式(2)大。

(3)同步带 Δf_s

收发两端码元周期的额定值都为 T_b (码速率 $f_b=1/T_b$),但实际上两者都存在偏差,因而两者之间存在频差。接收端同步锁相环能保持锁定的最大频差称为同步带 Δf_s 。

设收发两端固有码元周期分别为 $T_1=1/f_1$ 和 $T_2=1/f_2$,则:

$$|\Delta T| = |T_1 - T_2| = \left| \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right| = \frac{|f_2 - f_1|}{f_1 \cdot f_2} = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_b} \quad (3)$$

式中, Δf 为收发两端固有码元速率之差(频差), f_0 为收发两端固有码元速率的几何平均值,可认为近似等于额定码元速率 f_b 。如前所述,无DLF的数字锁相环平均每2个码元才能调整一次,调整量为 δ s,则平均一个码元周期内能调整 $\delta/2$ s。显然,只有 $|\Delta T| \leq \delta/2$ 时,才能保证锁相环同步(锁定),故同步带对应的收发码元最大周期之差为:

$$|\Delta T| = \delta/2 \quad (4)$$

由式(3)及式(4)得同步带为:

$$\Delta f_s = f_b^2 \cdot \delta/2 \quad (5)$$

有DLF的数字锁相环,调整相位的速率要比无DLF

的低,故同步带比式(5)小。

由式(1)、式(2)、式(5)可知,3个性能指标都取决于DCO周期调整步距 δ : δ 愈大,同步带愈大,同步建立时间愈短,但相位误差却增大了。所以 δ 应折中选取,在保证锁相环路能锁定(同步)的前提下, δ 尽可能取小些,以减小相位误差。

本设计采用单片机芯片实现数字电路相关器件,简化了相关器件复杂的逻辑电路设计,降低了系统的功耗和成本,提高了系统的可靠性。实现位同步的方法很多,本文讨论的是采用数字锁相环技术来提取位同步信号。在位同步提取中,如何缩小同步建立时间、降低位误差及增大同步保持时间是好的位同步设计的努力方向。

参考文献

- [1] 湛洪然. 单片机原理及实训教程[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008.
- [2] 樊昌信. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [3] 张厥盛, 郑继禹. 锁相环技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [4] 田智生. 基于锁相环的精确自动增益控制电路[J]. 现代电子技术, 2005, 28(3): 16-17.
- [5] 毕成军. 基于FPGA的位同步信号提取[J]. 现代电子技术, 2006, 20(4): 121-123.

(收稿日期: 2010-07-11)

作者简介:

王帆, 男, 1982年生, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 现代通信, 智能交通中具有共性的信号处理, DSP应用技术。

盘和设定电流值。

电路中 A/D 采样周期为 130 ms, 当定时器 T0 中断后进行一次采样, 单片机处理后, 输出 D/A 进行调节并显示。A/D 中断(INT0), 中断的功能有: 读采样数据、与设定值比较、控制调整电压和传送显示。设电压变化为 Δ , 当前电压为 V_n , 则新的值为 $V_{n+1} = \Delta \times M$ 。M 为常数, 可根据实际电路参数要求设定, 而且在程序进行中要考虑到 D/A 为 12 位, 电压有上、下限。在显示时考虑可视性, 测量值和设定值交替显示。定时器中断程序流程图如图 6 所示。

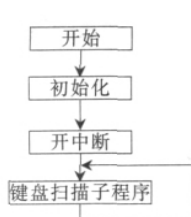


图5 系统主程序流程图

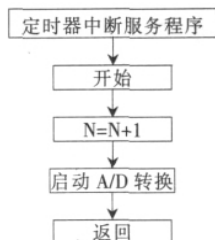


图6 定时器中断服务程序流程图

2 实验结果及分析

设计指标^[5]: 输入电压 180 V~250 V/50 Hz; 输出电流范围 20 mA~2 000 mA; 具有“+”、“-”步进调整功能, 步进 ≤ 10 mA; 输出电流绝对值 $<$ 输出电流值的 1%, 纹波电流 < 2 mA。

在给定电流 200 mA 作用下, 负载稳定度曲线如图 7 所示, 其中负载稳定度是指一定的工作情况下, 负载变化引起的输出电流变化。测试数据表明负载电压在 0~10 V 变化时, 输出电流最大偏差为 2 mA, 满足输出电流绝对值小于输出电流值的 1% 的设计要求。

纹波电流特性如图 8 所示, 取负载电阻 $R_L = 10 \Omega$, 纹波电流 = 纹波电压/负载, 从测试结果可以看出负载电流变化引起的纹流变化范围 < 2 mA, 其原因是因为所设计的电源输入和输出进行了稳压处理以及进行了高频滤波, 因此纹波特性较为理想, 达到了设计指标的要求。

本文设计了基于单片机数字控制的直流电流源, 优点为: (1) 采用数字化处理和控制, 可避免模拟信号传递的畸变、失真, 减少杂散信号的干扰; (2) 该数字控制电

(上接第 70 页)

速度双闭环补偿方法能够提高系统的低速稳定精度, 有效抑制了电机力矩波动, 与另两种方法相比, 力矩波动对输出速度的影响降低了约 50%。

参考文献

- [1] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. 光学精密工程, 2004(12): 30-34.
- [2] 毕永利, 刘洵, 葛文奇, 等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程, 2004, 31(2): 16-18.
- [3] BAI Xue Mei, AN Zhi Yong, CAO Wei Guo. Design of dynamic pattern generator based on the Linear motion system[C]. Proc. of SPIE 2008.

《微型机与应用》2010 年第 29 卷第 23 期

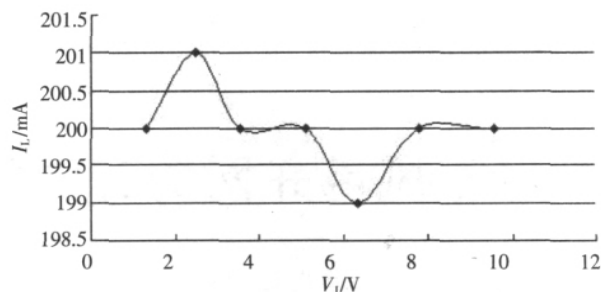


图7 200 mA 恒流特性图

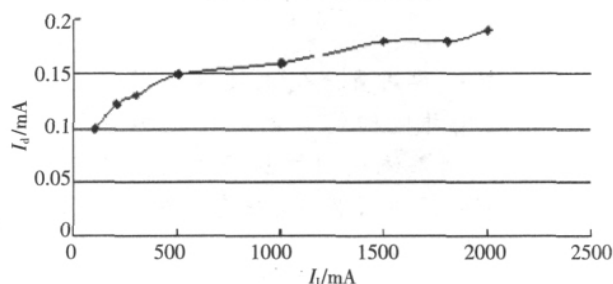


图8 纹波电流特性图

路相对于模拟控制电路具有设定准确、输出电流恒定、可调范围宽等优点。数字控制直流电流源随着控制策略不断完善, 将成为直流源电源发展的一个热点。

参考文献:

- [1] 何希才. 新型稳压电源及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 郑琼林, 耿文学. 电力电子电路精选—常用元器件·实用电路·设计实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [3] 孙涵. MCS-51/96 系列单片机原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [4] 刘华毅, 李霞, 徐景德. 基于单片机的宽范围连续可调直流稳压电源[J]. 电力电子技术, 2001, 35(6): 7-9.
- [5] 曲学基. 稳定电源电路设计手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

(收稿日期: 2010-04-12)

作者简介:

荣军, 男, 1978年生, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 开关电源技术研究。

- [4] 康健, 孙鹏远, 解小华, 等. 基于观测器的直流伺服电机速度控制[J]. 控制工程, 2004(7): 381-384.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理(第三版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [6] 杨松, 曾明, 苏宝库. 一种改进的基于分解控制的非线性力矩补偿策略及其在直流电机系统中的应用[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 365-369.

(收稿日期: 2010-05-09)

作者简介:

刘志明, 男, 1982年生, 助理研究员, 主要研究方向: 航空相机控制系统的技术研究。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 73