

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态性能的影响。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; $L_a(t)$ 表示电机电枢电感; 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]:

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

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)

技术与方法 Technique and Method

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：

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

电机的速度波动量与电机力矩波动的传递函数为：

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

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：

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

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。

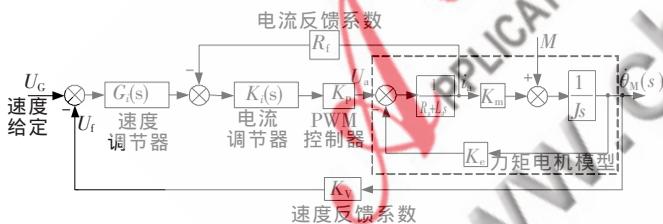


图1 电流、速度双闭环控制系统的控制模型

由引入电流环后波动力矩引起的速度波动量为：

$$\Delta\omega(s) = \frac{K_m \cdot (R + Ls) + R_f + J_s}{J_s \cdot (Ls + R) [Ls + R + G_i(s)K_p K_v - K_e]} \Delta I(s) \quad (7)$$

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：

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

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°/s,力矩波动信号设定为0.01sin(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°/s。若采用速度闭环控制方法,其仿真结果如图2所示。

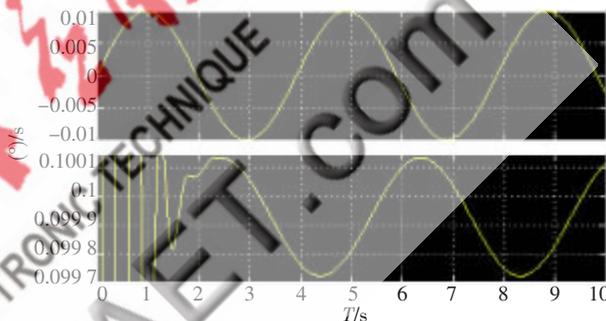


图2 速度闭环控制仿真图

图2中,上半部分为电机波动力矩引起幅值为0.02°/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°/s减少至0.0004°/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。

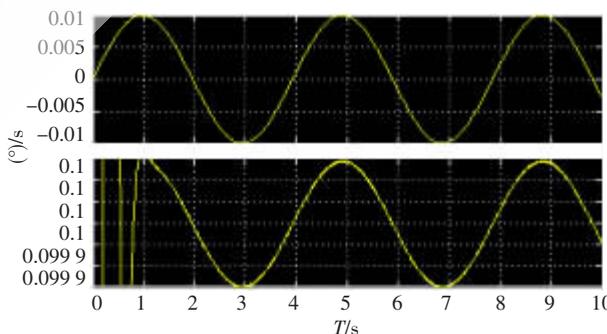


图3 电流、速度双闭环控制仿真图

图3中,上半部分为电机波动力矩引起幅值为0.02°/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°/s减少至0.00028°/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°/s减小至0.0008°/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

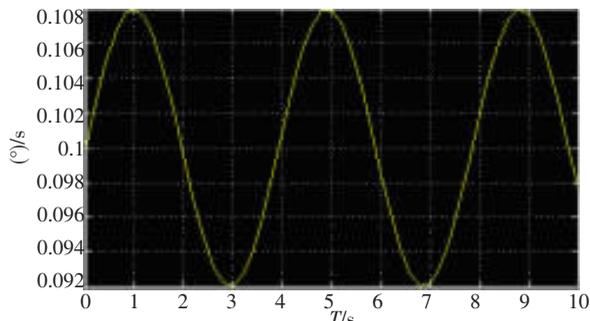


图4 状态观测器仿真图

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、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.

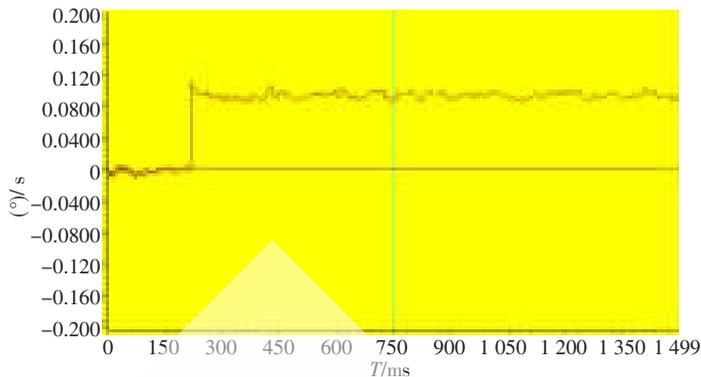


图5 速度闭环速度输出采样

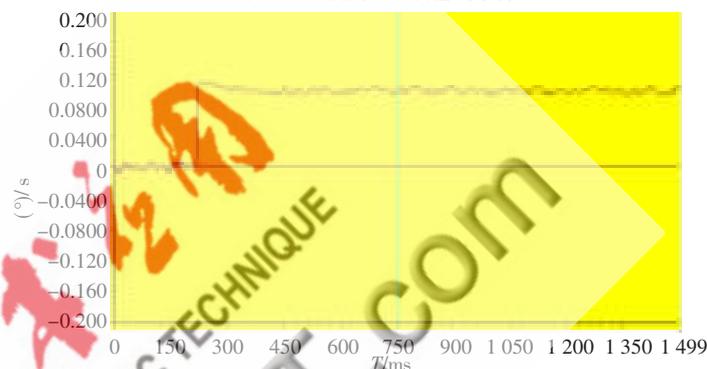


图6 电流、速度双闭环速度输出采样

[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。