

图 2 火炮炮盘平面倾角推导图

图 2 中 A_1 、 B_1 分别为 A 、 B 在水平面的投影，面 $ABMN$ 为火炮炮盘平面， MN 为火炮炮盘平面与水平面的交线， OA 为火炮身管方向且 $OA \perp OB$ ，则火炮的纵倾角为 $zq_0 = \angle AOA_1$ ，火炮横滚角为 $hq_0 = \angle BOB_1$ ，火炮的纵倾角和横滚角可以通过火炮的姿态传感器测量，为已知量， β 为火炮炮盘倾角。设 $OA = a$ ， $OB = b$ （其中 a 、 b 为任意常数）则

$$\begin{aligned} AA_1 &= a \cdot \sin(zq_0) \\ OA_1 &= a \cdot \cos(zq_0) \\ AN &= b \cdot \sin(\alpha) = \frac{AA_1}{\sin(\beta)} = \frac{a \cdot \sin(zq_0)}{\sin(\beta)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} BB_1 &= b \cdot \sin(hq_0) \\ OB_1 &= b \cdot \cos(hq_0) \\ BM &= b \cdot \cos(\alpha) = \frac{b \cdot \sin(hq_0)}{\sin(\beta)} \end{aligned} \quad (2)$$

由式 (1)、式 (2) 得：

$$\sin(\beta) = \frac{\sin(hq_0)}{\cos(\alpha)} = \frac{\sin(zq_0)}{\sin(\alpha)} \quad (3)$$

上式化解得：

$$\tan(\alpha) = \frac{\sin(hq_0)}{\sin(zq_0)}$$

上式 zq_0 、 hq_0 为通过姿态传感器测量的纵倾值和横倾值，为已知量，所以由上式可以计算得到 $\tan(\alpha)$ ，又根据三角函数关系得：

$$\cos(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2(\alpha)}} \quad (4)$$

当 $\tan(\alpha) > 0$ 时， $\cos(\alpha)$ 取符号和 $\sin(zq_0)$ 相同的值；当 $\tan(\alpha) < 0$ 时， $\cos(\alpha)$ 取符号和 $\sin(zq_0)$ 相反的值。将 $\cos(\alpha)$ 值带入式 (3) 得到 $\sin(\beta)$ 。

2.2 火炮旋转部分受力分析

火炮旋转部分受力示意图如图 3。

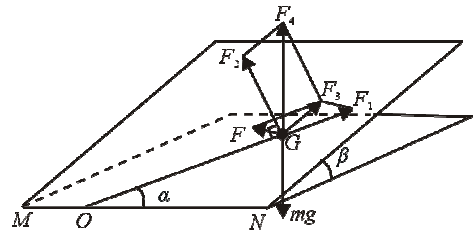


图 3 火炮旋转部分受力示意图

在图 3 中 mg 为火炮旋转部分重力， G 为火炮旋转部分重心位置，面 MNG 为火炮炮盘平面， O 为火炮方位旋转中心， OG 为刚性连接， GF_2 为面 MNG 对火炮旋转部分的支持力， $GF_2 \perp$ 面 MNG ， GF_1 为 OG 对 G 的支持力， GF 为伺服电机所提供的旋转力， $GF \perp OG$ ，因为 $MN \perp GF_2$ 、 $MN \perp GF_4$ ，所以 $\angle F_2GF_4 = \beta$ ；因为 $GF_4 = mg$ 所以 $F_2F_4 = GF_3 = mg \cdot \sin(\beta)$ ；因为 $\angle FGF_3 = \alpha$ ，所以： $GF = GF_3 \cdot \cos(\alpha) = mg \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha)$ 。

设火炮的传动比为 γ ，传动效率为 η ，则火炮重力对电机轴的转矩为：

$$T = \frac{\gamma}{\eta} \cdot OG \cdot GF = \frac{\gamma}{\eta} \cdot \sin(\beta) \cdot mg \cdot \cos(\alpha) \cdot OG \quad (5)$$

当火炮倾斜角一定时 $\frac{\gamma}{\eta} \cdot \sin(\beta) \cdot mg \cdot OG$ 为常数，此时重力对电机轴的转矩与方位角的余弦成比例关系。

2.3 扰动补偿方法

在某火炮伺服系统中采用矢量控制方法，三相永磁同步伺服电动机的输出电磁转矩可表示为：

$T_m = \frac{3}{2} p \cdot \psi_f \cdot i_q$ 。其中 ψ_f 为永久磁铁对应的转子磁链； p 为三相永磁同步电机的极对数； i_q 为力矩电流分量，对于同一电机 p 和 ψ_f 固定，所以力矩电流分量 i_q 和电磁转矩 T_m 成线性关系。

根据火炮的受力情况，可以得到火炮的机械运动方程式为：

$$T_m = T_L + r \cdot \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt}$$

其中， T_L 为负载转矩； r 为运动阻尼系数； ω_m 为旋转角速度； J 为电机和负载转动惯量之和。当火炮倾斜时， J 和 r 都将将发生变化，在本文中不做

讨论。令 $T = T_m$, 则

$$\frac{\gamma}{\eta} \sin(\beta) \cdot mg \cdot \cos(\alpha) \cdot OG = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_f \cdot \Delta i_q$$

可得到用来克服火炮倾斜时重力产生的扰动转矩所需电流为:

$$\Delta i_q = \frac{2mg \cdot \gamma \cdot \sin(\beta) \cdot OG \cdot \cos(\alpha)}{3p \cdot \eta \cdot \Psi_f} \quad (6)$$

其中 $\sin(\beta)$ 、 $\cos(\alpha)$ 分别由式 (3)、式 (4) 得到。将 Δi_q 作为 Q 轴电流正反馈, 调节 Q 轴电流即可补偿扰动力矩。

由上面的分析可知, Q 轴电流环 PI 控制的输入: $i = \Delta i_q + i_q^*$, 其中 i_q^* 为速度环 PI 调节器的输出; Δi_q 为补偿电流, 由式 (6) 计算得到。在实际使用中, 火炮旋转部分的重量 m 和重心到旋转中心的距离 OG 很难准确测量, 并且 OG 随高低角变化, 在实际使用时, 先通过概略计算, 计算出参数的大致范围, 然后通过反复调试选择合适的参数。

3 仿真及其结果分析

在某火炮伺服系统中进行验证, 火炮传动比为 614.4, 传动效率选为 80%, 采用正弦模拟航路, 分别比较火炮水平、火炮倾斜未采用补偿措施和火炮倾斜采用补偿措施 3 种情况下的随动控制精度, 分别如图 4、图 5、图 6。

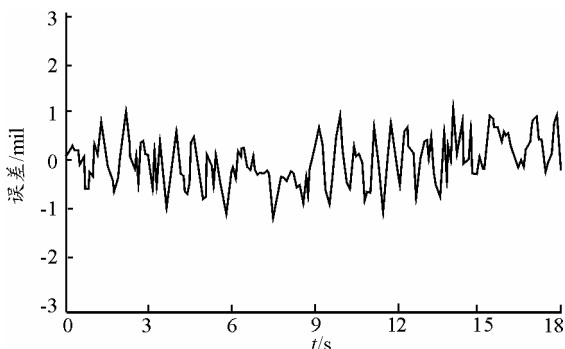


图 4 火炮水平时的误差

图 4、图 5、图 6 中实线为火炮跟踪误差曲线, 纵坐标表示火炮跟踪误差 (mil), 横坐标表示时间 (s), 数据采样周期为 80 ms。比较图 5 和图 6 结果可以看出, 采用笔者所提出的补偿措施可以有效补偿火炮倾斜对伺服控制精度的影响。通过比较图

4 和图 6 结果可以看出, 笔者所提出的补偿方法仍然不能完全补偿火炮倾斜扰动力矩, 这主要是火炮倾斜时, 火炮转动惯量发生变化, 影响控制精度。

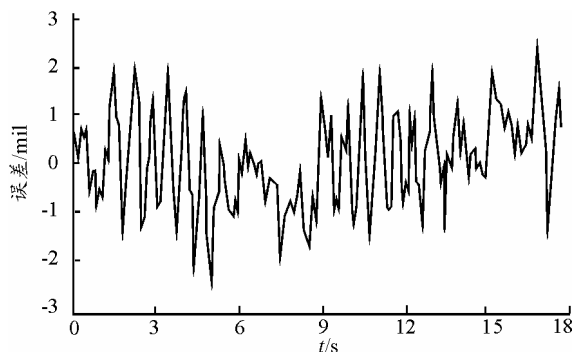


图 5 火炮倾斜未采用补偿措施

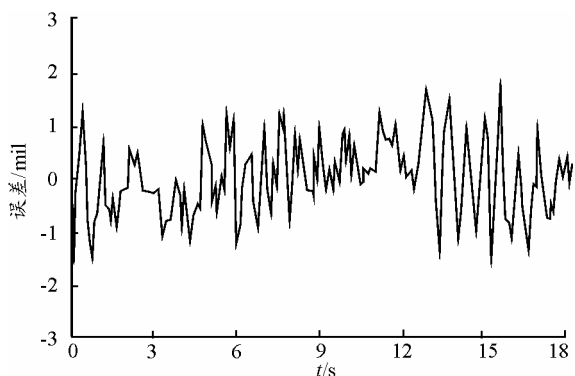


图 6 火炮倾斜采用补偿措施

4 结束语

试验证明, 该算法可以有效补偿火炮倾斜对伺服系统的影响, 提高伺服控制精度, 但结果还不够理想。下一步, 将从火炮倾斜状态下的摩擦阻力变化、大口径火炮的身管俯仰对重心的偏移变化等方面, 对火炮伺服系统的扰动进行深入研究。

参考文献:

- [1] 秦忆, 等. 现代交流伺服系统[D]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [2] 叶其, 肖孝, 等. 实用数学手册(第 2 版)[D]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 王体洋. 火炮身管膛线加工的轮廓一致性保证技术[J]. 兵工自动化, 2009, 28(9): 25.
- [4] 宋占岭, 王永良, 王亚莉. 基于三角模糊数 TOPSIS 的火炮发射阵地优选[J]. 兵工自动化, 2010, 29(8): 35-38.
- [5] 郭琦, 傅建平, 张培林, 等. 火炮内膛图像增强方法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 72-74.