

文章编号: 1001-2486 (2002) 03-0086-04

## 六自由度装置滚转轴干扰源的诊断及其抑制\*

马东平, 戴一帆

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 为了查找滚转轴出现定位偏差的原因, 通过对比多种情况下滚转轴的反馈信号, 结合相应的定位试验, 查出了导致滚转轴出现定位偏差的干扰源。基于对滚转轴反馈信号被干扰原因的分析, 有针对性地采取了多项措施, 并给出了这些措施的效果。最终采用给 Y 轴驱动器单独供电的方式解决了这一难题, 经风洞试验证明, 效果良好。

**关键词:** 滚转轴; 反馈信号; 干扰; 抑制; 隔离变压器

**中图分类号:** TH133.2; TH165<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

## Diagnosis and Depression of the Interference Source in the Roller Mechanism of the Six-Degree of Freedom Rig

MA Dong-ping, DAI Yi-Fan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to find out the cause of position deviation of the roller mechanism, the interference source is determined by comparing the feedback signals and making position test at different situations. Based on analysis of the reason that the feedback signals are interfered, several measures are adopted and their effects are given. In the end, the problem is solved by using an isolation transformer for Y-axis driver. It is shown that this solution has good effects in wind tunnel test.

**Key words:** roller mechanism; feedback signal; interference; depression; isolation transformer

世界上发达国家常采用捕获轨迹系统 (Captive Trajectory System, 简称 CTS) 及其试验技术来预测外挂物从飞机上分离的运动轨迹。20 世纪 80 年代初, 气动中心在 1.2 米跨超声速风洞中开展了 CTS 试验技术研究, 并成功地应用于多项外挂物型号的分离轨迹试验中, 对我国新机、外挂系统的研制和发展起了良好的推动作用。六自由度装置是 1.2 米跨超声速风洞捕获轨迹系统的核心设备, 该装置是 CTS 系统中外挂物模型的支撑装置及其运动的执行机构, 它由计算机控制, 为外挂物模型提供六个自由度 (轴向  $X$ 、横向  $Y$ 、铅垂方向  $Z$ 、俯仰  $\alpha$ 、偏航  $\beta$ 、滚转  $\gamma$ ) 的运动, 六自由度装置的定位精度直接影响风洞试验结果的可靠性。为了满足我国新型号研制的需要, 提高控制系统的定位精度、可靠性和稳定性, 在保留原机械部分和六台直流电机的基础上, 采用以工控机为核心、以置于工控机内部的位置伺服控制器和北京中宝伦公司的 PDC 直流伺服驱动单元为主要模块的控制系统代替了原来以单板机为核心的控制系统。

### 1 查找滚转轴定位出现偏差的干扰源

新的控制系统在静态调试中, 发现六自由度装置中滚转轴定位出现了偏差。分析认为, 出现这种故障的原因可能是滚转轴的反馈元件光电编码盘工作不正常或反馈信号受到了干扰。

如图 1 所示, 从光电编码盘出来的两路近似于正弦波的反馈信号经过机构上的信号处理板后变成两路相位差约为  $90^\circ$  的方波, 经洞壁接口、差分电路、PDC 驱动单元进入 5650 伺服器中的计数器。

将其余五个自由度的 PDC 驱动器与各自电机电枢线的接头断开, 滚转轴单独运行, 用 Fluke 示波

\* 收稿日期: 2002-03-08

作者简介: 马东平 (1972—), 男, 工程师, 硕士。

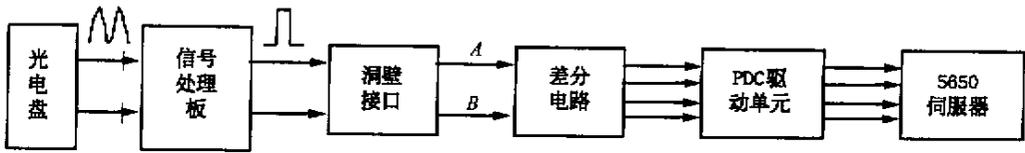


图1 滚转轴光电盘信号输出流程图

Fig.1 Flow graph of the photoelectric encode in the roller mechanism

表所测的滚转轴的反馈波形如图 2 所示。由图 2 的波形图可以看出，两路反馈波形的幅值都在 4.0V 以上，相位差为 90°，即滚转轴能输出幅值和相位都满足计数器要求的波形，滚转定位很准确，这就说明滚转轴的光电编码盘及其处理电路在滚转轴单独运行时其工作是正常的。由此可以断定，滚转轴定位出现偏差是由其他五个轴引起的。

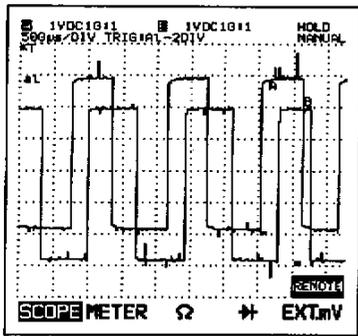


图2 滚转轴单独运行时的反馈信号  
Fig.2 Feedback signal of roller mechanism while running alone

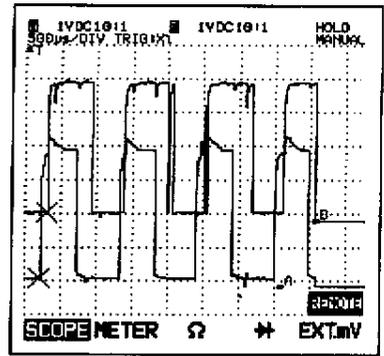


图3 接 Y 轴电机电枢线时滚转轴的反馈信号  
Fig.3 Feedback signal of roller mechanism with Y-axis

形成干扰有三个要素：即干扰源、干扰通道和受感器。要有效抑制干扰，首先要找到干扰发源地，防患于源处是积极的措施。为了判断干扰源，依次接上其余五个轴 PDC 驱动器的电机电枢接头，试验发现，只要接上 Y 轴电机的电枢线，滚转轴定位就有偏差，且偏差不定。图 3 为接上 Y 轴电机的电枢线后滚转轴的反馈信号波形图。由图 3 可以看出，滚转轴滚转时，其中 B 路方波中夹杂着幅值约为 3.5V 以上的随机干扰毛刺，这样的干扰毛刺足以导致计数器误计数，误计数会使滚转轴滚转不到位，从而产生滚转偏差。试验还发现，Y 轴电机电枢线对滚转轴反馈信号的干扰与其他轴不相关，是一个独立的干扰源。由此可见，Y 轴电机的电枢线是导致滚转出现偏差的主要干扰源。

## 2 分析转轴反馈信号被干扰的原因

转轴反馈信号被干扰的原因有以下几种：

(1) 通观六个自由度的位置反馈元件，仅有滚转轴所用反馈元件为自行研制的光电编码盘及其处理电路，其运行环境要求苛刻、抗干扰性较差，其余五个自由度所用光栅有专用的电缆及放大电路，抗干扰性较高。在机械结构的布局上，Y 轴电机及  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、Y 轴反馈元件都安装在带有 24V 电压的装置头上， $\alpha$ 、 $\beta$ 、Y 轴的光栅外壳与安装点绝缘，光栅的外壳都已可靠接地，仅有滚转轴反馈光电编码盘及其信号处理板无法接地。在机构内部的反馈信号线与电机电枢线并行布置，反馈信号线的屏蔽不完整，而且屏蔽线接地点较少。因此，滚转轴的反馈信号容易受干扰。

(2) 为了弄清仅有 B 路反馈信号中有毛刺的原因，我们测量了不接 Y 轴电机电枢线和接 Y 轴电机电枢线时滚转轴的反馈源信号（处理板之前的信号），如图 4 和图 5 所示。从两幅图中可以看出，B 路信号幅值比 A 路小，接 Y 轴电机电枢线后，两路信号均受到不同程度的干扰，其中 B 路反馈信号信噪比较小，因此 B 路经处理板处理后带有较多的干扰毛刺。

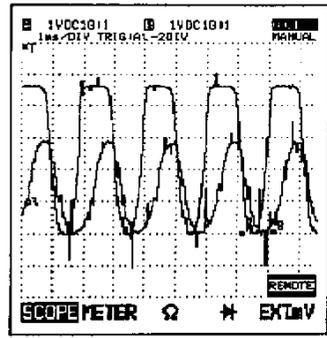
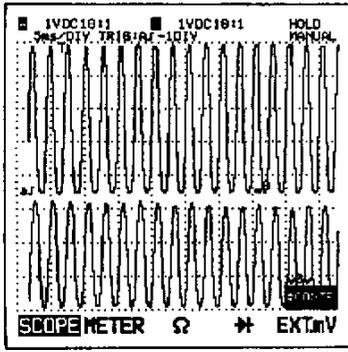


图4 不接Y轴电机电枢线时Y轴的反馈源信号图

图5 接Y轴电机电枢线时Y轴的反馈源信号

Fig.4 Feedback source signal of roller mechanism without Y-axis Fig.5 Feedback source signal of roller mechanism with Y-axis

(3) CTS 伺服控制系统是采用脉宽调制 (PWM) 的方式, 通过调节电机的供电电压来控制伺服电机的。PWM 的优点是控制系统效率高, 但缺点是噪音高。由双极式 PWM 放大器原理可知, 当占空比  $\rho = 1/2$  时, 正负脉冲电压的宽度相等, 输出电压平均值  $U_A = 0$ , 此时电机虽然不转动, 但电枢电压  $u_A$  并不等于零, 因此在电枢回路中还要流过一个交变电流  $i_A$ , 这个交变电流会产生高频噪声, 从而直接影响与电机相距较近的反馈元件。电枢电流  $i_A$  波动量最大值的精确公式做适当简化得到:

$$\Delta i_{Amax} = \frac{U_D T}{2L_a}$$

上式表明, 双极式 PWM 放大器输出电流的最大波动量  $\Delta i_{Amax}$  与直流电源电压  $U_D$  成正比, 与电枢电感  $L_a$  以及调制频率  $f (1/T)$  成反比。

除此之外, 实际上影响电机电枢电流  $i_A$  波动量的因素还有  $U_D$  的品质, 如果  $U_D$  中寄生有较强的谐波成分, 经过调制后电枢的电流也含有较强的谐波成分, 这些谐波成分会加大电枢电流的波动量, 从而会加强电磁干扰的强度, 加重对弱信号的干扰。

### 3 噪声的抑制措施及效果

干扰源通过一定的耦合形式对设备形成干扰, 因此, 研究干扰的耦合途径对抑制干扰就十分必要。干扰源的耦合形式有电阻耦合、容性耦合、感性耦合等。CTS 机构内部空间较小, 电机电枢线和信号线是并排布线的, 为了减少导线的数目, 机构内部相当多的电路中使用了公共电源线和地线, 因此电阻耦合、容性耦合、感性耦合均存在。但在原控制系统的控制下并未出现这种故障, 机构内部的布线也从未做过任何改动, 因此解决措施主要从以下两个方面入手:

#### (1) 保护受感器

给进入电路处理板的 B 路反馈源信号和电路处理板输出的 B 路反馈信号分别并联不同型号的电容, 测得的反馈波形见图 6。由图 6 可以看出, 并联电容并不能有效地抑制干扰毛刺, 而且 B 路的反馈信号幅值降低了, 上升沿仅有 3.0 V 左右, 这不利于信号的长距离传输和计数器准确计数。用铜皮将整个电路处理板包起来, 并将铜皮可靠接地, 收效仍然不理想。

#### (2) 抑制干扰源

要抑制 PWM 放大器的噪声, 即需减小电机电枢电流的波动。由上式可知, 降低电源电压  $U_D$ , 提高调制频率  $f$ , 选用电枢电感  $L_a$  大的电机可以使 PWM 放大器输出电流的最大波动量减小。在驱动器和电机定型以后, 驱动器的调制频率  $f$  不可改变, 仅有电源电压和电枢电感可以作适当调整。  $L_a$  可以通过外加的方式进行调整。文献 [2] 中采用外加电感的方式抑制电枢电流波动引起的高频噪声, 取得了较好的效果, 但在实际应用中较难操作。

据统计分析, 微机系统的干扰, 有 70% 是从电源耦合进来的, 因此在抗干扰措施中, 应重点考虑电源的干扰。通过新老控制系统的比较, 我们发现, 原来的控制系统有三个变压器, 给 Y 轴驱动

单元提供电压的是一个单独的变压器；新的控制系统中六个自由度共用一个能分别提供交流 120V、95V、65V 三个输出端的变压器，这样六个自由度会通过变压器的次级相互干扰。Y 轴电机是功率为 0.5kW 的永磁直流伺服电机，驱动器可提供的功率为 0.8kW，因此驱动器的供电电压还有下降的空间。笔者分别采用降低驱动器的供电电压和采取隔离变压器给 Y 轴供电这两种方式来研究抑制干扰的效果。

①降低驱动器的供电电压

利用变压器的另一个 65V 的输出端给 Y 轴供电，测得的滚转轴的反馈信号见图 7。与图 3 相比，B 路中的干扰毛刺数量有所减少，但并未完全消除干扰毛刺，定位依然有偏差，可见降低驱动器的供电电压能够抑制电机电枢电流所产生的电磁噪声，但还不能满足要求。该项实验还表明，Y 轴在其驱动器电压降低的情况下仍能正常工作。

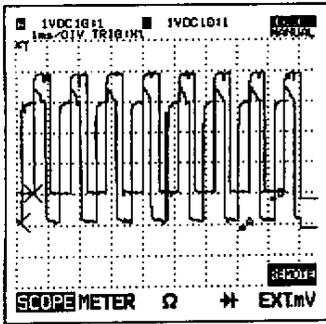


图 7 降低驱动器的供电电压后滚转轴的反馈信号  
Fig.7 Feedback signal with a lower power supply for Y-axis driver

②采取隔离变压器给 Y 轴供电

如图 8 所示，利用已有设备，通过调节可调三相交流变压器将 Y 轴的供电电压恢复到 95V，所测的滚转轴的反馈信号和滚转轴单独运行时的反馈信号相同，两路中都没有干扰毛刺，滚转定位也没有偏差。

4 结束语

反馈信号是位置控制系统中保证定位精度的关键，因此如何抑制控制系统的噪声、保护反馈信号免受干扰是工程技术人员面临的重大课题。笔者从查找干扰源入手，通过改善电源的品质，成功地解决了 PWM 放大器的噪声抑制问题，保证了滚转轴的定位精度。多项风洞试验结果表明，该措施效果良好。

参考文献：

[1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京：机械工业出版社，1992.  
[2] 董谦，谢剑英. 超声波无损检测系统的噪声干扰分析与抑制 [J]. 测控技术，2001，(11)：50-52.  
[3] 刘文彦，周学平，刘辉. 现代测试系统 [M]. 长沙：国防科技大学出版社，1995.  
[4] 张松春，赵秀芬. 电子控制设备抗干扰技术及其应用 [M]. 北京：机械工业出版社，1989.  
[5] 黄子俊等. 微机控制系统中的干扰与抗干扰措施 [J]. 自动化与仪器仪表，1999，(6)：49-51.

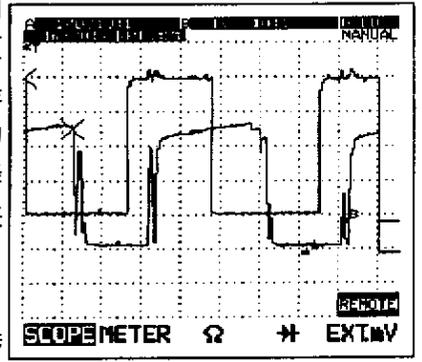


图 6 B 路并联电容后滚转轴的反馈信号  
Fig.6 Feedback signal of roller mechanism with a capacitance in B circuit

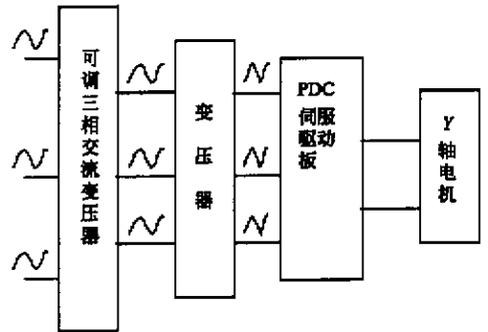


图 8 采取隔离变压器给 Y 轴驱动器供电  
Fig.8 Isolation transformer for Y-axis driver

