

风洞实验室的自动化控制系统电磁兼容问题分析与解决

沈阳航空工业能源与动力学院

太原依福特设备制造有限公司

摘要：本文介绍了某风洞自动化控制系统中变频器干扰测控系统的实例分析及干扰处理方法。通过在变频器输入、输出端以及其他控制部分电路中加装匹配的滤波器，及对整个供电系统进行一系列屏蔽和良好接地，有效解决了变频器工作时产生的电磁干扰（EMI）。经过多次整机调试及试验，实现了风洞实验室自动化控制系统的电磁兼容（EMC）。

关键词：变频调速 测控系统 电磁干扰 拟制措施 电磁兼容

风洞试验研究的应用在社会生产中占有十分重要的地位。随着生产领域和技术的不断发展，对风洞动力需求具备宽调速范围、高稳速精度、快速动态响应等相应的要求，随着电力电子技术的飞跃发展，各种容量和型式的变频电源、整流装置的研制成功以及计算机技术、控制理论的发展，使得交流调速传动在调速系统中应用领域不断拓宽，如何维护好变频调速器控制系统的正常工作，是从事工业自动化专业的工程技术人员所面临的实际问题，也是风洞试验数据精度提高的保证。

一、风洞工作原理

风洞是能人工产生和控制气流以模拟飞行器或物体周围气体的流动，并可量度气流对物体的作用以及观察物理现象的一种管道试验设备。风洞的动力段装有电机及风扇系统，电机在交流变频调速下旋转，带动桨叶，电能转变为桨叶的机械能，桨叶的机械能转变为空气介质的压力能，在风洞管道内产生介质的流动。通过对气流的修整，使之成为均匀平稳的气流，以便满足试验用流场。

二、风洞控制系统

2.1 风速控制

由变频器、PID 调节器、配套低压电器及压力传感器组成了变频调速系统如图 1 所示，系统中压力传感器负责检测系统压力差，将压力信号变换为电阻信号作为反馈输入 PID 调节器，经过与给定信号进行比较后其偏差值采用优化的 PI 算法输出控制信号控制变频器的输出频率，保证风速的恒定。

2.2 角度控制

风洞试验过程中时常要改变试验模型的角度，从而可以不间断测量各个角度对应的试验量，节省了时间，提高了效率和精度，实现全部自动化。

三、电磁兼容问题三要素

3.1 电磁骚扰源：任何形式的自然或电能装置所发射的电磁能量，能使共享同一环境的人或其它生物受到伤害，或使其它设备、分系统或系统发生电磁危害，导致性能降级或失效，即称为电磁骚扰源。

3.2 耦合途径：即传输骚扰的通路或媒介。

3.3 敏感设备（Victim）：是指当受到电磁骚扰源所发出的电磁能量的作用时，会受到伤害的人或其它生物，以及会发生电磁危害，导致性能降级或失效的器件、设备、分系统或系统。许多器件、设备、分系统或系统既是电磁骚扰源又是敏感设备。

系统要发生电磁兼容性问题，必须存在三个因素，即电磁干扰源、耦合途径、敏感设备。所以，在遇到电磁兼容问题时，要从这三个因素入手，对症下药，消除其中某一个因素，就能解决电磁兼容问题。

四、风洞实验室的变频器控制系统电磁兼容问题分析与解决

4.1 变频器干扰产生机理

变频器的主电路一般为交-直-交组成，外部输入 380V/50Hz 的工频电源经三相桥路不可控整流成直流电压信号，经滤波电容滤波及大功率晶体管开关元件逆变为频率可变的交流信号。在整流回路中，输入电流的波形为不规则的矩形波，波形按傅立叶级数分解为基波和各次谐波，其中的高次谐波将干扰输入供电系统。在逆变输出回路中，输出电流信号是受 PWM 载波信号调制的脉冲波形，对于 GTR 大功率逆变元件，其 PWM 的载波频率为 2~3kHz，而 IGBT 大功率逆变元件的 PWM 最高载频可达 15kHz。同样，输出回路电流信号也可分解为只含正弦波的基波和其他各次谐波，而高次谐波电流对负载直接干扰。另外高次谐波电流还通过电缆向空间辐射，干扰邻近电气设备。

4.2 干扰传播主要方式及预防：

4.2.1 辐射干扰

辐射干扰是指控制电缆与周围电气回路的静电耦合，在电缆中产生的电势。辐射干扰与现场设备布置及设备所产生的电磁场大小有关，特别使频率有关，一般通过设置屏蔽电缆和控制系统局部屏蔽及高压泄放元件进行保护。

4.2.2 接触不良干扰

接触不良干扰是指变频器控制电缆的电接点及继电器触点接触不良，电阻发生变化在电缆中产生的干扰。其可采用并联触点、镀金触点或选用密闭式继电器，对电缆连接点应定期做拧紧加固处理，以防干扰。

4.2.3 电源线传导干扰

控制系统的正常供电电源均来自电网，由于电网覆盖范围广，它将受到空间辐射的电磁干扰而在线路上产生感应电压和无用杂波。尤其是电网内部变化，入开关操作浪涌、大型电力设备起停、交直流传动装置引起的谐波、电网短路暂态冲击等，都通过输入线路传到电源周边。一般设备的电源均采用外系统供电，在输入侧装超级隔离变压器或滤波器，并且屏蔽接地，以防干扰。

4.2.4 接地干扰

接地不正确可能引起严重干扰信号，使系统无法正常工作。接地系统混乱对控制系统的干扰主要是各个接地点电位分布不均，不同接地点间存在地电位差，引起地环路电流，影响系统的正常工作。此外，屏蔽层、接地线和大地有可能构成闭合环路，在变化磁场的作用下，屏蔽层内会出现感应电流，通过屏蔽层与芯线之间耦合，干扰信号回路。若系统地与其他接地处理混乱，所产生的地环流就有可能在地线上产生不等电位分布，影响控制系统内逻辑电路和模拟电路的正常工作。控制系统工作的逻辑电压干扰容限较低，逻辑地电位的分布干扰容易影响控制系统的逻辑运算和数据存储，造成数据混乱、程序跑飞或死机。模拟地电位的分布将导致测量精度下降，引起对信号测控的严重失真和误动作。

4.3 系统干扰具体分析及其解决措施

图 1 控制系统原理图

传感器、步进电机、步进电机驱动源、控制仪器及配套低压电器的工作电源电压有 DC10V、AC110V、AC220V，在该系统中，用户要求能够直观从控制柜面板观测风洞风速大小及工作温度、电机时时转速等，

因此，选用温度传感器及自行开发的单片机风速显示及变角度系统，配合指针式指示表对风洞中的风速、温度、角度、电机的转速进行测量和显示。

在实际工作中发现，当变频器启动调速时，数字式转速表显示出现错误显示，转速直接跳到 580r/m 左右；步进电机抖动，打齿，自行走角度。变频器停止工作时，控制系统及转速表恢复正常。很明显，这是由于变频器高次谐波分量对电源的干扰造成的，通常，对此最为行之有效的办法就是对控制电路的供电电源加装变频器输入输出专用滤波器。整个系统的电气原理框图如图 1 所示。在变频器输入输出端加装专用电源滤波器后，启动变频器，步进电机恢复正常，转速表影响变小，显示跳到 180r/m。但是随后在整改转速表的时候老问题又出现了，步进电机又开始抖动，打齿。而且出现了新问题控制电路中的发给步进电机驱动源的脉冲信号无缘无故被吸收，步进电机失去控制。停电后对电路进行检查，在电路中没有发现短路点和其他的连接错误等现象。经现场仔细观察发现，在系统逐渐升速过程中，变频器运行输出在某个频段之间时步进电机出现抖动故障。而且，将变频器的外控制台调速电位机线(控制台内有变频器引进的线和步进电机控制出线)断开后，故障仍旧出现。进一步分析变频器的工作原理可知，在交-直-交型变频器中，电网通过三相整流桥给变频器供电，供电电流利用傅立叶级数可以分解为包含基波和 $6K \pm 1$ 次谐波($K=1, 2, 3 \dots$)分量等一系列谐波分量，谐波含量随进线电抗和直流滤波电抗的电感量增加而减少。具有关资料介绍，通常情况下，加电抗器后五次谐波、七次谐波、十一次谐波和十三次谐波仍然占到 40%、35%、25%和 20%左右。也就是说变频器加滤波器后，仍然有一部分谐波存在于线路中。在变频器配电柜内变频器的出线很长，靠近变频器的有信号控制线和转速表信号线，变频器启动，测量发现，在信号线上仍然有感应电压，这是变频器负载动力线上的高频信号耦合产生的干扰，属于空间辐射干扰。在分析清楚故障原因后，针对现场干扰源的主要来源途径即变频器的干扰、控制柜内线路混合的干扰及空间电磁干扰等，对控制显示系统采取了进一步的抗干扰措施。

首先，针对前述系统的故障状态，采用小型的信号滤波器分别对转速表信号线进行滤波。在对转速表调试的过程中逐渐增加信号滤波器的性能来寻求最佳的抑扰方案，有效的解决了转速表显示的显示错误的问题。对于步进电机信号线的干扰，用示波器观察信号线上的波形发现在方波基础上有许多无用的高频振荡信号及杂乱波形，在脉冲信号线上串联信号滤波器后观察示波器显示的波形为方波，将脉冲信号线接到步进电机调试打齿和抖动现象没有了。必须着重指出的是在变频器的配电柜内，给出的模拟量信号及相应的指示灯应该进行严格的金属屏蔽，并且对信号屏蔽线、金属屏蔽层进行严格的独立接地，信号线及控制线与电源线应采用金属管屏蔽隔离，空间位置相对垂直，不要并行敷设线路，这样能有效的防止空间的电磁干扰的窜入。

采取上述措施后，整个系统的工作恢复了正常，说明上述措施是完全有效可行的。同时，进一步实践发现，在解决转速表的干扰问题时，为了削弱通过线路传播的干扰信号，在电路中加的滤波器并不是按正常顺序直接串联相加的，而是利用电感电容的谐振特性，交替反相的接入需求最佳效果。

五、结束语

综上所述，在解决风洞实验室的变频器控制系统电磁兼容问题时，充分利用了电磁兼容问题三要素。预先抗干扰设计是必须的，系统的布线及连接要仔细；与此同时，必须充分考虑各种电气设备之间的互相干扰，特别是在小信号测量中，高次谐波对控制电路及测量信号的干扰影响，以及空间的辐射干扰。另外注意控制地与强电地、保护地分开，保持接地良好，营造一个绿色的电磁环境。