

HHT 风洞模型送进系统研制项目中的安全设计

潘德贤 陈德江 朱超

(中国空气动力研究与发展中心超高速所 四川 绵阳 621000)

摘要: HHT 风洞模型送进系统采用液压驱动,是集机、电、液一体化的精密四自由度运动控制机构,具有大载荷、高速度、高精度等技术特点。为了确保风洞试验过程中的人员及设备安全,在项目研制前期必须对模型送进系统运行中影响安全的各种因素进行分析,并针对存在的安全因素对系统进行稳妥可靠的安全设计。

关键词: 模型送进系统; 研制; 安全设计

0 引言

HHT 风洞模型送进系统安装于风洞设备试验段中,用于在风洞设备中安装支撑试验模型,并实现试验模型在风洞流场中的快速送进、姿态调整、精确定位等功能^[1-5]。该系统主要由 HHT/A 模型送进机构、HHT/B 模型送进机构、液压系统、控制系统和辅助设施等部分组成,系统组成框图见图 1。系统采用液压驱动,是集机、电、液一体化的精密四自由度运动控制机构,主体驱动载荷达 250t,最大运动速度达 600mm/s,角位移误差 0.1°,线位移误差 1mm,具有载荷大、速度高、精度高等技术特点。

系统的安全可靠性是项目研制的关键问题之一。风洞试验是一项复杂庞大的系统工作,为了确保风洞试验过程中的人员及设备安全,必须确保模型送进系统调试运行的安全稳定。因此,在项目研制前期,必须对模型送进系统运行中可能影响安全的各种因素进行分析,并针对可能存在的安全因素对系统进行稳妥可靠的安全设计。

1 安全因素分析

模型送进系统主要由机械系统、液压系统和控制系统等分系统组成,影响系统安全运行的因素也来源于这几个组成部分。

在机械系统方面,在设计阶段必须充分考虑的问题主要有以下几个:

- (1) 机械结构在大载荷的冲击下,是否会产生大的永久形变,从而造成运动卡死;
- (2) 机构运动时,在风载的作用下,其固有振动频率是否会与风洞洞体产生共振干涉,从而造成振动试验的数据误差;
- (3) 机构运动时,各自由度是否会与风洞洞体产生交叉干涉,造成运动受限;
- (4) 在风洞流场热气流冲击下,系统关键部件是否得到有效的保护;
- (5) 对整个机械部件进行安全监测与健康管埋。

在液压系统方面,在设计阶段必须充分考虑的问题主要有以下几个:

- (1) 液压驱动力是否充分,是否能够扩展;
- (2) 是否具有锁紧装置,保证机构在任何位置能够安全锁紧;
- (3) 多液压缸同步控制是否可行;
- (4) 液压系统供电线路突然断电怎么办;
- (5) 油管爆裂怎么办;
- (6) 液压系统 80% 左右的故障是由于介质污染而引起的,抗油污方面措施是否得当;
- (7) 温升也是引起液压系统失效的重要原因之一,液压温控措施是否科学。

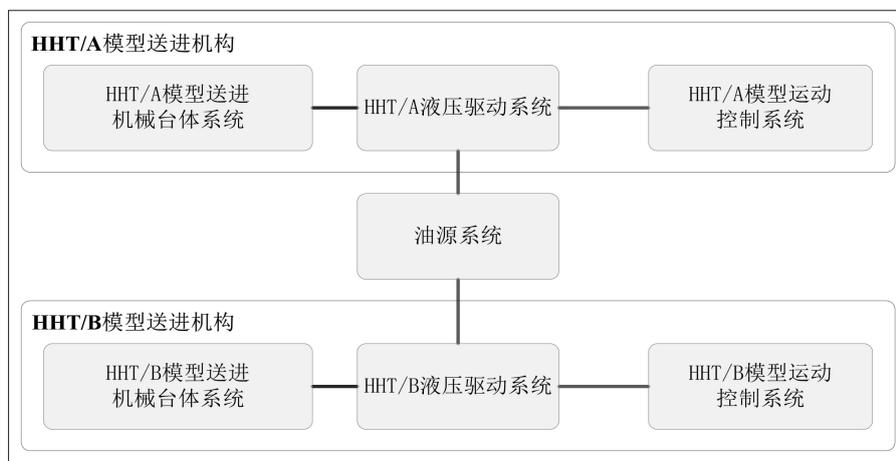


图 1 模型送进系统组成框图

在控制系统方面,在设计阶段必须充分考虑的问题主要有以下几个:

- (1) 控制硬件是否可靠;
- (2) 状态监控参数是否齐全;
- (3) 数据输入是否安全可靠;
- (4) 系统运行是否稳定;
- (5) 机构控制系统与风洞控制系统是否安全关联。

2 系统安全设计

2.1 机械系统安全设计

机械系统的安全性设计,主要指机械系统设计时,除了要保证机械系统具有足够的刚度、强度,还要保证台体在任何可能的运动中(包括正常运动和故障状态),机械部件之间不能发生干涉碰撞^[6]。

对机械系统进行可靠性设计,首先需要利用三维实体模型对各种工况下的机械部件的干涉情况校核,保证系统各部件间不存在干涉;其次,对机械部件的强度、刚度进行校核,保证具有足够的强度和刚度;再次,为了保证精度要求,设计时进行合理误差分配,加工过程中实施现场跟踪检测,安装时严格保证设计提出的安装精度要求;最后,为保证运动部件传递力和运动规律的准确性,同时避免引入非线性因素给系统动态特性造成不利影响,设计时必须考虑消除连接铰间隙的具体措施。

为了确保模型送进系统的机械结构在运行工况下的刚强度及振动模态满足设计要求,根据结构受力、力矩、重力等条件,采用专业软件 ANSYS 对机械结构进行有限元刚强度分析。分析过程中,对单元选择、网格划分及计算方法选择进行了周密考虑,确保了计算精度满足工程需求。根据有限元分析结果,给出了应力及位移云图和主要结果表,并对应力和变形结果进行考核,确保满足设计要求,分析结果见图 2、图 3。

针对风洞流场热气流冲击系统关键部件的问题,为了防止热气流进入操作平台下的模型机构安装舱,保护安装舱内线缆及液压阀门等关键部件,在试验段操作平台模型升降槽孔处研制水冷开合门。水冷开合门根据模型机构的运动情况自动控制开启与闭合。

模型送进系统在大载荷大冲击的作用下,必须充分认识风洞试验的复杂与困难程度。在系统设计过程中,所以有必要对系统的关键部件或者薄弱环节进行安全监测与健康监测,在主体支撑框架、运动导轨和滑块等部件安装应力传感器,监测其应变情况,根据监测结果,及时对系统

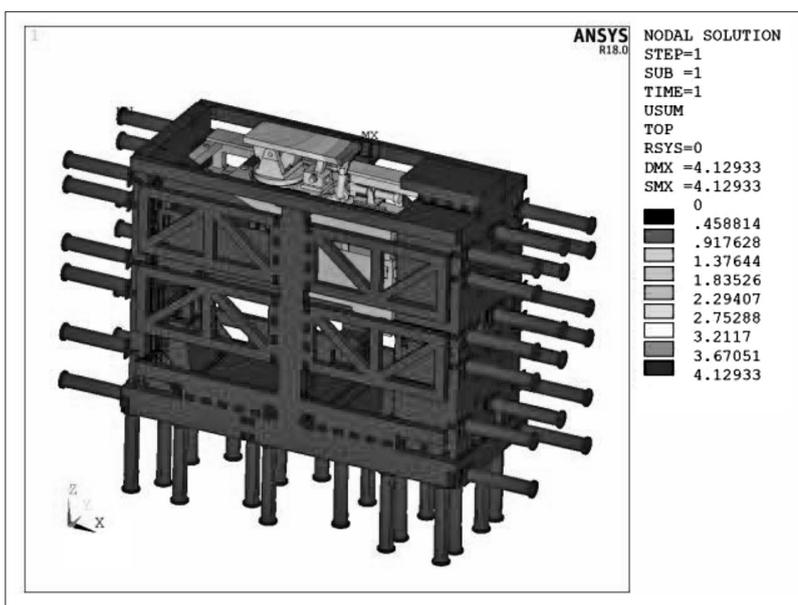


图 2 整体综合变形云图

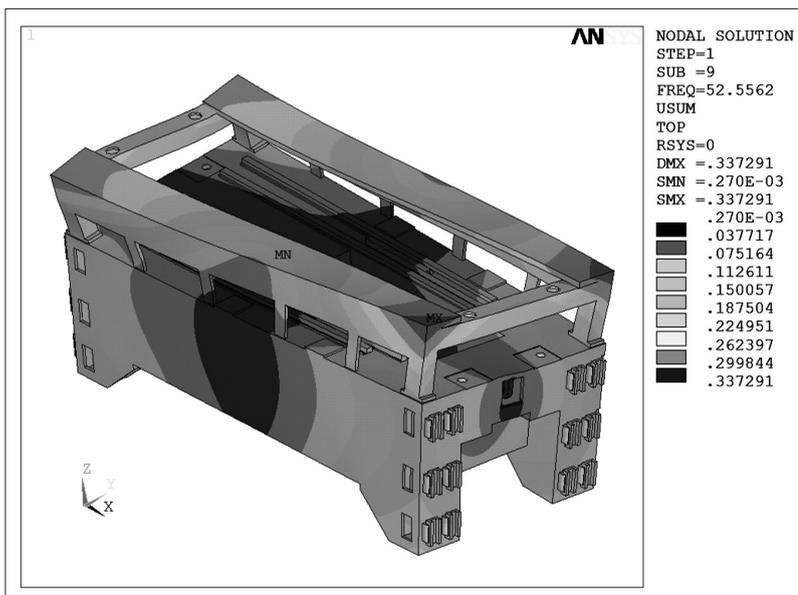


图 3 机构台体一阶振型图

进行安全养护与维修。

2.2 液压系统安全设计

液压系统包括液压驱动系统、液压锁紧系统、插销液压缸、液压泵站、活塞式蓄能器和高压氮气瓶组、管路及分配系统等部分^[7]。液压系统组成如图 4 所示。

液压系统是模型机构的运动执行部分,也是安全保护的具体执行者,为了保证系统的安全运行,更是对液压系统的安全可靠性进行全面的设计,达到其安全保护功能。在液压系统的安全设计过程中,首先必须根据模型送进系统研制技术要求,完成液压驱动系统的载荷分析和运动参数计算,完成送进系统液压驱动部分的配置;然后进行液压驱动系统的动静态响应分析;最后进行液压油源系统的设计,通过驱动系统对液压油源流量需要,在考虑冗

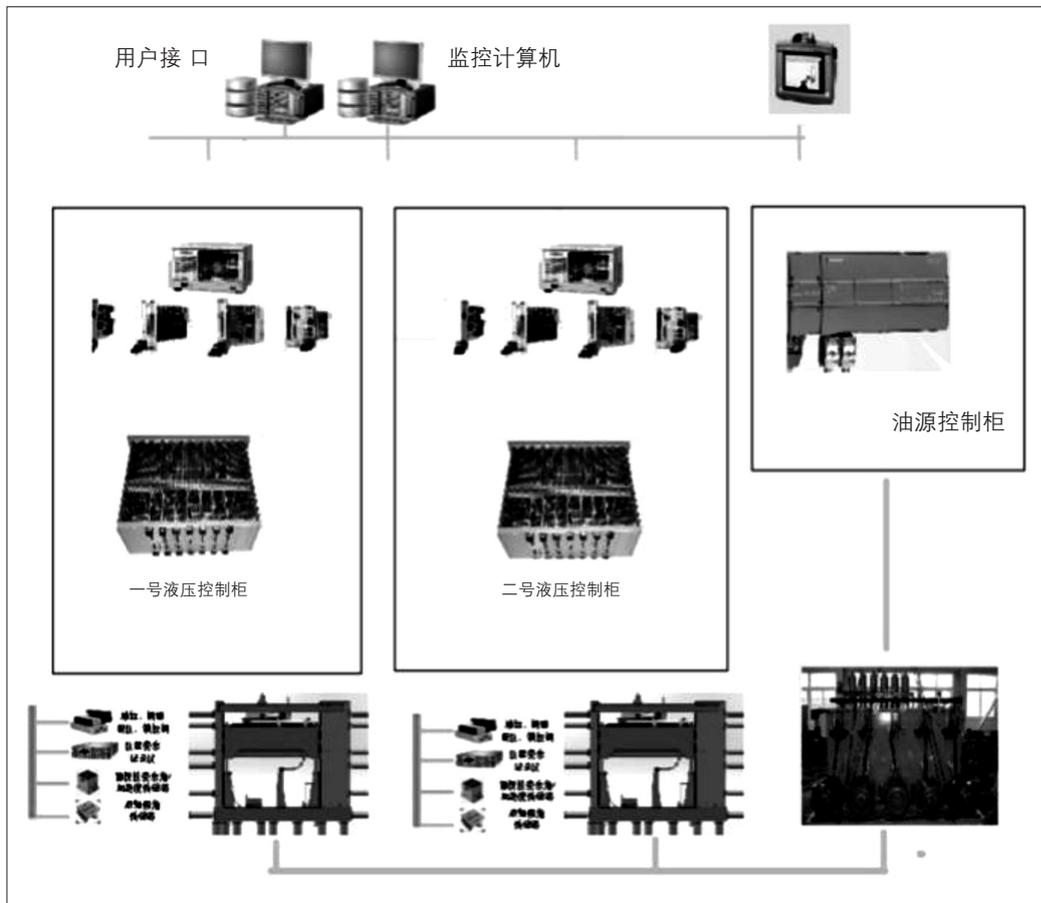


图4 液压系统组成框图

余与扩展的基础上,通过计算合理地选择液压泵和蓄能器。

在具体的安全功能方面,具有多方面的安全设计。首先,具有特定位置机械插销锁紧和任意位置液压锁紧功能。在模型安装零位设置液压机械插销锁,采用液压插销缸驱动,保证液压系统未工作时机构的初始位置锁定;同时在各自由度任意位置,设置液压抱闸锁紧机构。其次,在伺服液压缸与电液伺服阀之间的液压回路上设置液控单向阀,通过电磁换向阀控制液控单向阀的工作状态,当出现液压管路爆裂及压力陡降等危险情况时,可以实现液压锁紧功能。最后,具有断电保护功能,系统出现断电故障时,使伺服液压缸处于液压锁紧状态,保证平台在断电故障时,安全地停在某个位置。

该套系统有两个自由度采用两个伺服液压缸驱动平台运动,两个液压缸的同步控制是一个关键的控制技术。通过采用同步控制,可以保证两个液压缸一致运动,避免两个液压缸的内力对抗。

油液污染也是引起系统故障的高发因素,针对预防油源污染问题,考虑到模型送进系统是液压伺服系统,需要油液清洁度高,而锁紧器、插销缸等系统属于传动系统,油液清洁度要求较低,为避免油源混用带来的油液污染隐患,设计了液压伺服油源为送进系统的液压驱动伺服系统供油,液压传动油源为锁紧器、插销缸等供油。

本系统除在安装调试前进行管路清洗、净化和注油后的有效循环过滤、净化处理外,还注意选用密封性能好的元件、辅件,采用先进介质过滤技术等有效的抗污染措施。同时,系统还配备了先进的油液污染监测仪,对液压油可实行实时在线监测,使用方便、可靠。另外,针对温升引起液压系统失效的问题,在系统的设计中,合理设计了外循环冷却系统,可有效控制液压系统异常温升现象的出现。

为了保证系统的性能和可靠性,在设计时,所有标准部件均采用国内外高性能、高可靠产品,从而确保产品符合要求。

2.3 控制系统安全设计

控制系统由远程运行管理工作站、现场控制工

控机和现场控制器组成。现场控制器主要负责对模型各轴的油缸、阀组和油源系统进行控制,使各轴达到要求的运动精度。现场工控机除了负责在现场控制间对模型及试验段开合门进行远程控制以外,还将结合数据采集模块对各传感器的信息进行处理与实时监测。通过现场工控机可实时观察系统运行状态,显示报警信息。现场工控机通过CAN总线与底层控制器通讯,保证数据传输稳定、快速、可靠。远程运行管理工作站与现场工控机功能相同,可在测控大厅对模型的位置、姿态和油源系统进行控制。同时,在总控界面上显示模型实际运动状态和位置、姿态、角速度、加速度等反馈信息。远程运行管理工作站与现场工控机通过“工业以太网+OPC接口”形式进行通讯。控制系统组成结构图如图5所示。

在安全设计过程中,控制系统必须对电机运行、水冷却、冷却水水压过低、油源温度高、油源液位低、油源液位高、油源压力低、油源压力高、油源过滤器阻塞、油源压力、油源温度、油源液位等关键参数进行监控显示,并对故障进行报警,同时把故障信号纳入安全连锁。另外,机构控制系统与风洞控制系统互为关联,一旦风洞系统或者模型送进系统出现故障,则立即启动安全连锁程序,停止风洞或者模型机构的运行。

控制系统的安全设计包括硬件和软件两个方面。

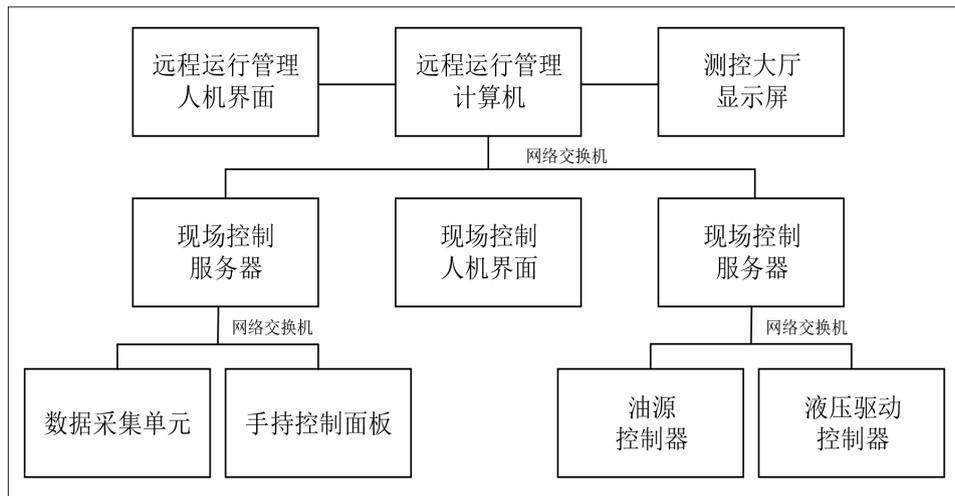


图5 控制系统组成结构图

在硬件方面，安全设计有：

(1) 线路监测与报警设计，为了能够对控制系统线路状态进行监测，一旦发现故障及时通知控制系统实现保护动作，在控制系统设计时，对主要线路进行实时状态监测，包括控制元件、驱动元件、传感器等控制和供电回路都设计了回路监测功能。一旦发现断线或者插头松脱等状态，控制系统能够及时进行保护处理。

(2) 计算机故障监测装置设计，该装置可以实时检测实时控制器的运行状态，一旦该实时控制器出现故障或死机，该装置将接管系统控制权，触发安全保护动作，将伺服液压缸锁定，实现系统的安全保护。

在软件方面，控制系统的软件安全也设计了多层保护：

(1) 系统开机自检，在系统运行之初，控制系统首先进行自检工作，包括看门狗自检、控制回路自检、关键部件自检等，在确认平台处于正常状态后，才允许启动系统。

(2) 输入有效性检测与处理，软件可以实时判断外界输入数据的有效性，并能拒绝执行那些不能够实现或错误的运动指令，同时给出提示信息。

(3) 系统逻辑保护，控制软件能够防止外部输入错误而引起逻辑的混乱，避免造成对试件和设备的损坏。逻辑保护主要包括逻辑互锁、信息提示、报警和紧急处理等。

(4) 故障分级处理报警，报警表明当前系统处于不良的运动状态，需要引起注意，任务管理软件操作界面会给出相应的提示信息。当系统出现严重故障时，立即启动急停锁紧处理方案，利用驱动系统具有的锁紧功能，台体将立即锁定在当前位置。该保护动作可由控制系统自动触发，而对于那些由操作人员判定故障的状态（如试件滑落、非试验人员进入试验区等），操作人员可以利用控制间或试验现场的急停按钮触发模型机构的保护动作。

为进一步提高控制系统的可靠性，在软件开发的各个阶段都要进行有效的质量控制。首先，控制系统软件

的开发与设计，需要遵循软件工程方法，保证了软件开发进度和开发质量。其次，在软件需求分析阶段进行严格的阶段评审，保证了软件结构、模块划分、主要算法和接口关系等的合理性。在详细设计阶段，对软件详细设计说明进行评审，保证模块功能的正确性、控制结构、数据结构和算法的合理性。同时，要求在软件设计的各个阶段，进行严格的单元测试和系统测试，保证了控制系统软件的可靠性。

3 结语

为了保证系统安全可靠工作，在设计的过程中从机械系统安全性设计、驱动系统的安全可靠性和控制系统硬件和软件可靠性设计等方面采用了多层安全性保护和可靠性设计策略。同时各个分系统之间相互协调，从不同的层次上保证系统的安全可靠性。

台体机械系统的刚度、强度设计和无干涉设计从最根本保证了机械系统的安全性，属于被动保护层。机械设计过程中会对系统机械强度、干涉情况进行校核，保证系统的安全。伺服液压缸安全性设计为系统的安全保护提供了基本保护措施和手段。控制系统安全性设计实现了平台最上层的保护，它和伺服液压缸相互作用来完成保护策略的最终实现，这部分保护属于主动保护层。最终，通过这些安全设计策略，保障了系统的安全稳定。

参考文献：

- [1] 张德久, 朱本华, 姜德龙, 等. 1.8m×1.4m 低速风洞模型支撑系统研制 [J]. 兵工自动化, 2017(5): 12-16.
- [2] 战培国. 国外大中型跨声速风洞模型支撑技术研究 [J]. 飞航导弹, 2019(10): 52-56.
- [3] 杜雨轩. 风洞攻角系统的设计与研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 1-2.
- [4] 虞择斌, 刘政崇, 陈振华, 等. 2m 超声速风洞结构设计与研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(2): 197-207.
- [5] 祝明红, 孙海生, 金玲, 等. 低速大迎角张线尾撑系统支架干扰影响研究 [J]. 实验流体力学, 2011, 25(3): 1-5.
- [6] 成大先. 机械设计手册: 第5卷 液压和气动 [M]. 5版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 21+57-63.
- [7] 路雨祥. 液压气动技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.