doi: 10.7690/bgzdh.2015.03.023

0.6 m 连续式跨声速风洞轴流压缩机联锁监控系统

张　文[1]，周恩民[1]，刘　恺[1]，程　松[1]，王　军[2]，张武军[2]
(1. 中国空气动力研究与发展中心高速所，四川 绵阳 621000；
2. 西安陕鼓动力股份有限公司自动化中心，西安 710075)

摘要：针对上位机 HMI 在监控 0.6 m 连续式跨声速风洞轴流压缩机时存在的不足，设计一套逻辑合理、运行可靠的联锁监控系统。结合 0.6 m 连续式风洞轴流压缩机的型式特点和安全特性，对启机条件联锁、运行工况监测、过程安全控制、紧急停机联锁和风洞联锁通信进行了程序设计和 HMI 组态，建立了一套安全监测与联锁控制系统。调试结果表明：该系统安全监测显示准确，联锁控制动作可靠，有效解决了完全依靠人工监控存在的信号遗漏问题，成功化解了轴流压缩机运行过程中出现的异常工况，达到了设计目的。

关键词：连续式跨声速风洞；轴流压缩机；联锁；监控
中图分类号：TJ06　　**文献标志码**：A

Interlocking and Monitoring System of an Axial Compressor in 0.6 m×0.6 m Continuous Transonic Wind Tunnel

Zhang Wen[1], Zhou Enmin[1], Liu Kai[1], Cheng Song[1], Wang Jun[2], Zhang Wujun[2]
(1. *High Speed Institute*, *China Aerodynamics Research & Development Center*, *Mianyang* 621000, *China*;
2. *Automation Center*, *Xi'an Shaangu Power Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710075, *China*)

Abstract: Aiming at defect of axial compressor HMI monitoring in 0.6 m×0.6 m continuous transonic wind tunnel, designed a logical and reliable interlocking and monitoring system. The interlocking startup conditions, monitoring of working situation, process safety control, emergency stop, communication with wind tunnel were achieved by program design and HMI configuration, which based on the characteristics of the axial compressor. The safety monitoring and interlocking control system was developed and successfully used in wind tunnel testing. The debugging results show that: the system detected accurately and reacted reliably, effectively solved defect of manual monitoring and abnormal situation of the axial compressor.

Keywords: continuous transonic wind tunnel; axial compressor; interlock; monitoring

0　引言

0.6 m 连续式跨声速风洞(简称 0.6 m 连续式风洞)采用 AV90-3 轴流压缩机作为驱动系统，压缩机转子旋转对气流做功，通过叶栅扩压提高气流压力[1-2]，驱动气流在洞体管道内稳定流动。区别于高炉鼓风、空分等普通工业应用[2-3]，0.6 m 连续式风洞轴流压缩机安装在闭合回路的洞体管道内，在风洞气流总压、模型攻角和二喉道开度等试验参数多变的复杂工况下[2]，对轴承箱密封性、轴系机械运转稳定性和喘振预防控制等提出了非常高的要求，运行过程中必须严密监控，确保机组安全稳定运行。

轴流压缩机控制系统采用 PLC 控制站+操作站方式，通过 PLC 控制程序和上位机 HMI 实现机组的启停操作及各子系统的远程监控。HMI 采取分屏组态设计，具有 I/O 点多、监控画面多和工况画面切换频繁等特点，完全依靠人工监控势必会产生视觉“盲区”，很难达到实时监控、快速判断和及时处理的要求；因此，笔者设计一套逻辑合理、运行可靠的联锁监控系统，对轴流压缩机的运行工况进行安全监测和联锁控制，主动保护机组安全。

1　设计目标

联锁监控系统设计的总体目标是：全面、准确、实时反应轴流压缩机系统运行工况，及时发出科学合理的逻辑指令，确保系统处于安全运行状态。主要包括以下几点：

1) 启机条件联锁：将轴流压缩机启动所需的软硬件条件程序联锁，所有条件均满足时方可启机；

2) 运行工况监测：实时监测、显示和判断轴流压缩机系统运行工况，运行异常时有明确报警信息；

3) 过程安全控制：设计轴流压缩机系统过程安全控制策略，运行工况持续恶化时有联锁控制输出；

4) 紧急停机联锁：将轴流压缩机系统最核心的

收稿日期：2014-09-26；**修回日期**：2014-11-11
作者简介：张　文(1984—)，男，四川人，学士，工程师，从事连续式风洞压缩机自动控制技术研究。

工况参数进行急停联锁，出现异常时能紧急停机；

5) 风洞联锁通信：风洞安全联锁系统监测轴流压缩机运行工况参数，输出联锁状态信号与急停指令。

2　实施方案

2.1　控制系统硬件布置

轴流压缩机采用 SIEMENS S7-400 系列 PLC 控制系统。控制站采用主从站控制模式，由 CPU、I/O 模块、通信模块和 ET200M 等组成[4]，完成所有现场信号的采集和控制；操作站配置工程师站 ES 和操作员站 OS 2 台服务器，分别独立对各子系统的运行状态进行集中监控、操作和保护。系统硬件布置见图 1。

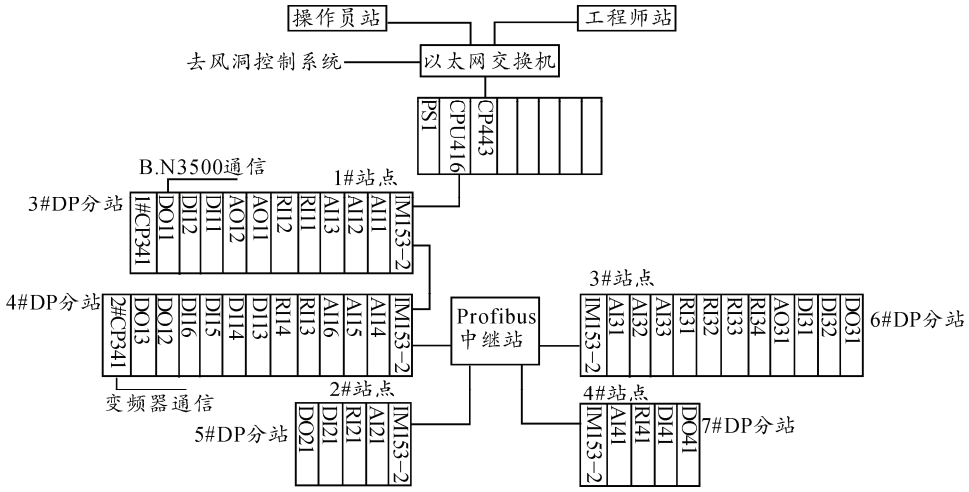

图 1　控制系统硬件布置

2.2　软件设计与实现

2.2.1　软件开发环境

上位机 HMI 采用 SIEMENS SIMATIC WinCC 过程可视化监视系统进行多用户系统设计，在 WinCC 资源管理器中调用图形、报警、归档等编辑器进行组态和项目管理[5-6]，可实现完备的过程监控、报警提示和过程归档等功能，组态画面样图见图 2。PLC 程序采用 SIEMENS SIMATIC STEP7 标准软件编制而成，由 SIMATIC 管理器对项目进行集中管理，实现硬件配置与参数设置、网络组态、编程、仿真和过程诊断等功能[6]。SIMATIC 管理器截图见图 3。

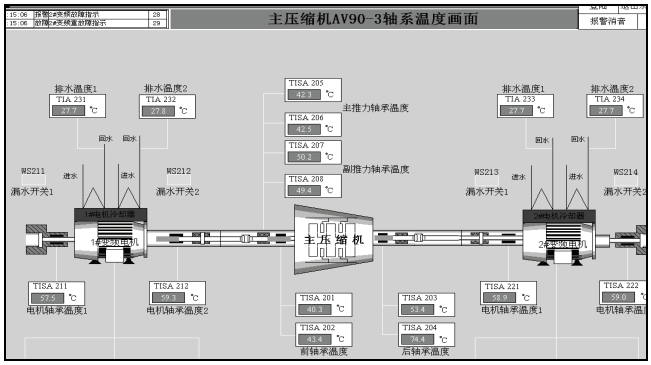

图 2　轴系温度监测画面

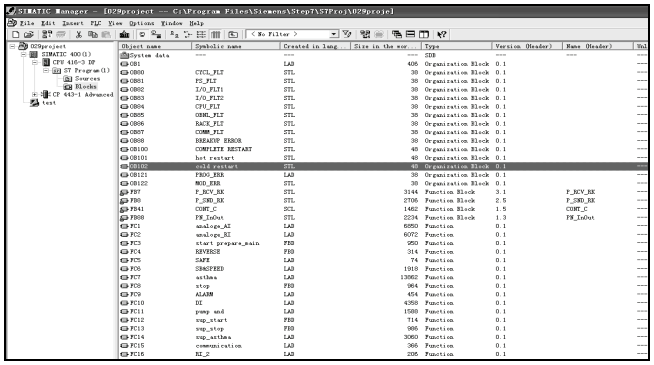

图 3　SIEMENS SIMATIC 管理器截图

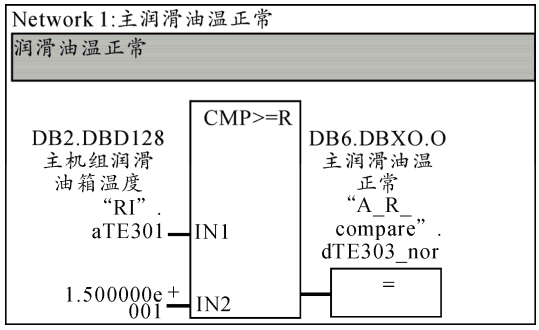

图 4　润滑油启机条件程序截图

2.2.2　启机条件联锁

程序设置 FC3 启机准备功能块。轴流压缩机启动前，PLC 程序首先对密封冷却气压力、润滑油温度和压力、静叶角度、防喘振阀开度和各试验开关位置等启机信号进行逻辑判定。当上述信号同时满足启机设定要求时，轴流压缩机才具备启机条件；而当任一信号不满足时，程序不允许高压运行柜合闸，变频器系统不能上高压电，压缩机无法正常启

动。该项设置可有效防止岗位人员误操作或忽略启机条件而盲目启机，导致润滑油吸入轴流压缩机流道、轴流压缩机或驱动电机轴承损坏等安全事故。

以轴流压缩机润滑油温度启机条件为例，图 4 为 PLC 程序设置。现场 RI 模块采集润滑油温度信号 RI.aTE301，并存入 DB2.DBD128，程序调用“CMP＞＝”实数比较指令，润滑油启机温度设定为 15 ℃。当 RI.aTE301≥15 ℃时，主润滑油温正常信号 A_R_compare.dTE303_nor 输出，同时点亮 HMI 中对应的信号图标，表示该信号已满足启机条件。

轴流压缩机启机条件逻辑框图见图 5，启机信号判定设置见表 1。

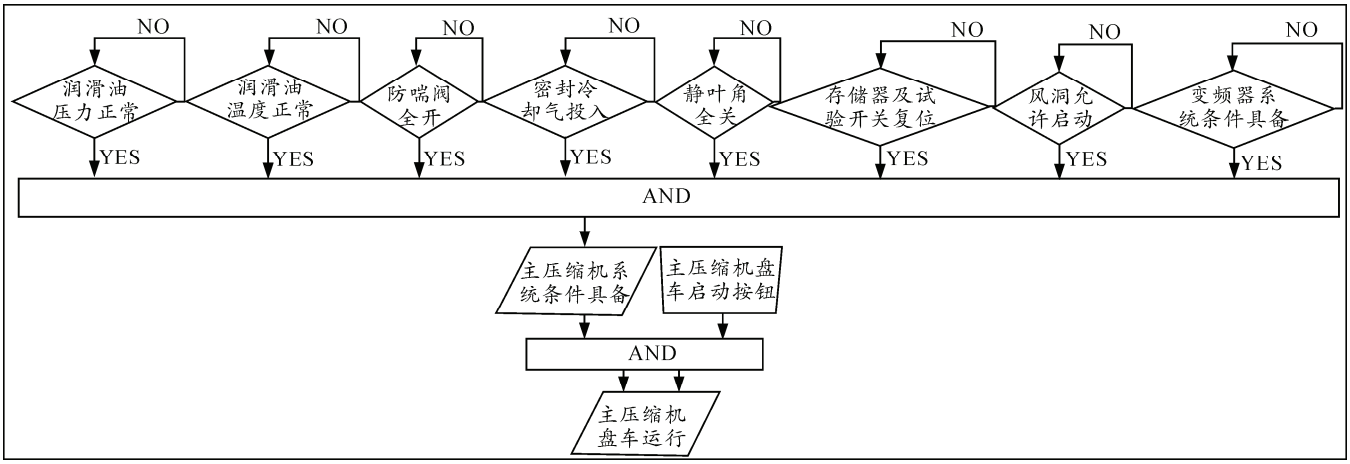

图 5　启机条件逻辑框图

表 1　轴流压缩机允许启机信号设置

信号	润滑油压力 p/kPa	润滑油温度 t/℃	防喘阀阀位	密封气总管压力 p/kPa	密封气支管压力 p/kPa	冷却气流量 Q/(Nm^3/h)	静叶角度 /(°)	存储器及试验开关状态
设置	≥130	≥15	≥97%	≥400	≥110	≥20	≤48	复位

2.2.3　运行工况监测

运行工况监测主要通过 PLC 程序和 HMI，对各子系统的工况参数进行采集、显示、判断和报警，方便岗位人员实时掌握轴流压缩机系统运行状态。PLC 程序首先设置 I/O 模块的通信地址，对现场振动、位移、温度、压力和流量等参数进行实时采集并存入 DB 块，WinCC 调用图形编辑器和变量管理器组态 HMI，根据各参数信号在 DB 块中的地址创建变量，并对图形编辑器的 I/O 控件进行变量组态，生成 PDL 监控画面文件。由于需监测的信号和组态画面多，为防止监控遗漏，程序设置了信号判断和报警功能，表 2 给出了轴流压缩机部分报警与急停参数设置。

以轴流压缩机入口温度报警设置为例，PLC 程序实时采集入口温度信号 RI.aTE101 并进行判定，当 RI.aTE101≥报警设置 35 ℃时，入口温度高信号 A_R_compare.dTE101_h 输出，同时触发监控画面 I/O 控件，HMI 将以信号图标黄绿交替闪烁和标题栏浮动列表信号由绿变红的方式显示报警，程序设置见图 6，部分报警组态画面见图 7。

表 2　部分联锁报警与停机参数设置

信号名称	正常值	报警设定	急停设定
压缩机轴位移/mm	0	≥0.4	≥0.8
压缩机轴振动/μm	＜75	≥108	≥133
压缩机轴承温度/℃	≤85	≥100	≥110
压缩机入口温度/℃	≤30	≥35	≥50
润滑油压力/MPa	0.11～0.18	≤0.09	≤0.06
密封气总管压力/MPa	0.4～0.6	≤0.45	≤0.35

对于轴流压缩机密封充气压力、润滑油压力、轴系运转及喘振工况等安全运行关键参数，HMI 调用 WinCC 报警器，专门设置了声音报警，更加明确地警示岗位人员，声音报警设置界面见图 8。报警信号设置是轴流压缩机运行工况监测最直接有效的方式，可明确提醒岗位人员注意，压缩机正处于非正常运行状态，需立即查明报警信号来源，判断危险程度，并根据实际情况进行妥善处理，防止运

行工况继续恶化。

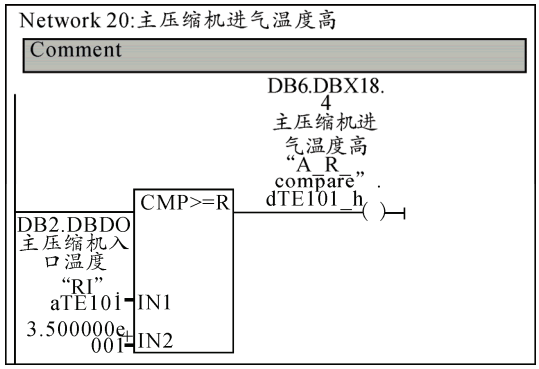

图 6　入口温度高报警程序截图

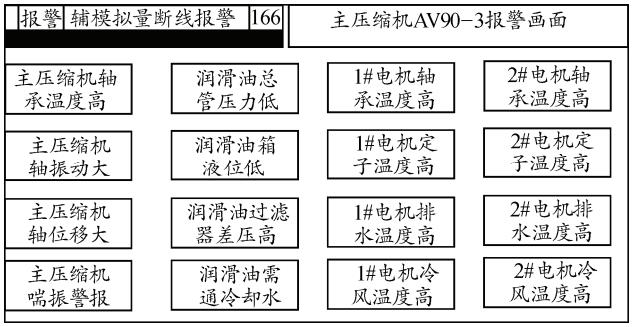

图 7　部分报警组态画面

图 8　声音报警设置界面

2.2.4　过程安全控制

过程安全控制包括防喘振控制、密封气阀门控制、风洞洞体超压控制和静叶角控制等，通过联锁控制输出，对轴流压缩机运行过程中出现的异常工况进行主动干预，迫使压缩机进入安全运行工况。过程安全控制方式和逻辑相通，只是在监测信号选取、参数设置和控制策略上存在差别，下面以轴流压缩机防喘振控制为例进行说明。

喘振是轴流压缩机的不稳定工况之一，轴流压缩机在喘振区内若不能及时"脱喘"，将会导致压缩机-风洞管网气流周期性震荡[1]，使机组振动加剧，造成密封和轴承损坏，甚至机组毁坏的严重事故[3]，因此必须进行防喘振控制设计，防止轴流压缩机在喘振区工作。

2.2.4.1　防喘振曲线设置

防喘振曲线包括防喘振报警线、防喘振线和喘振线，如图 9 所示。将轴流压缩机现场热力性能试验实测喘振点的流量和压比进行温度修正(修正到 20 ℃)，各转速下的喘振点以拟合曲线相连即为喘振线。防喘振线以实测喘振点的流量增大 6%、压比不变进行设置，报警线以实测喘振点的流量增大 12%、压比不变进行设置，轴流压缩机的运行范围更宽。报警线用于警示，防喘振线则会触发控制输出，防止轴流压缩机进入喘振区。

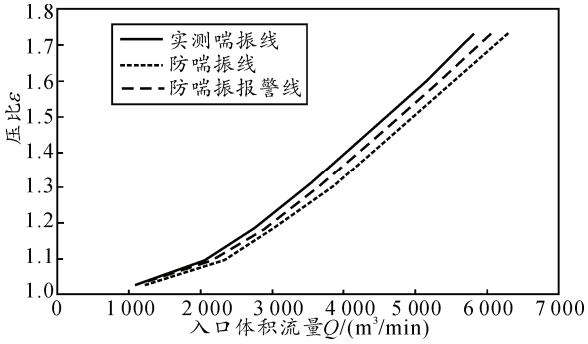

图 9　常压下 66°静叶角防喘振曲线设置

2.2.4.2　控制策略设计

防喘振控制策略包括喘振工况判定、程序逻辑设计、喘振报警、控制输出和紧急停机，逻辑框图见图 10，部分程序设计见图 11。

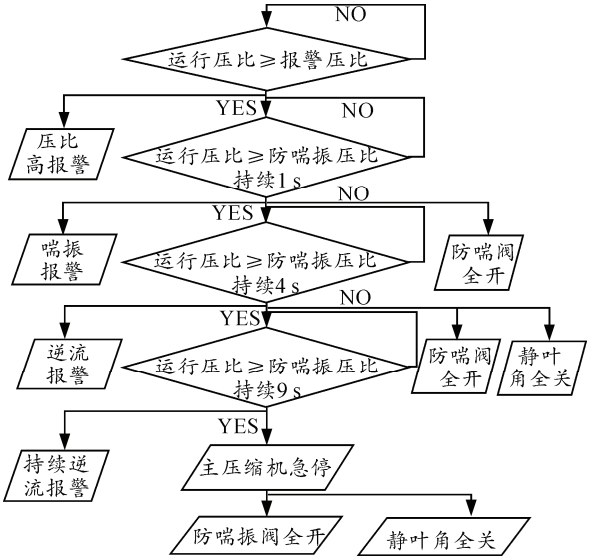

图 10　防喘振控制逻辑框图

根据试验马赫数要求，先选择特定静叶角下的防喘振曲线。程序实时采集流量 Q 和运行压比 ε 并判定，当运行工况点的流量 Q 一定，实测压比 $\varepsilon \geqslant$ 报警设定压比 $\varepsilon_{报警}$ 时，"压比高"报警触发，HMI 运行工况画面显示工况点在报警线上方，各报警画面开始报警；当运行工况点的实测压比 $\varepsilon \geqslant$ 防喘振

设定压比 $\varepsilon_{喘振}$且持续 1 s 时，喘振报警和防喘振控制输出同时触发，安装在旁通回路上的两只防喘振阀打开，增加轴流压缩机入口流量，使运行工况点向右移动，远离喘振区，同时 HMI 运行工况画面显示工况点在喘振线上方，各报警画面同时报警；当运行工况点的实测压比 $\varepsilon \geqslant$防喘振设定压比 $\varepsilon_{喘振}$且持续 4 s 时，逆流[7-8]报警、防喘振控制输出和静叶角控制输出同时触发，防喘振阀打开，静叶角回到初始位置 46°，压缩机进入“安全运行”模式；当运行工况点的实测压比 $\varepsilon \geqslant$防喘振设定压比 $\varepsilon_{喘振}$且持续 9 s 时，持续逆流报警和急停 DO 触发，快速切断高压电源，同时防喘振阀全开，静叶角回到 46°。

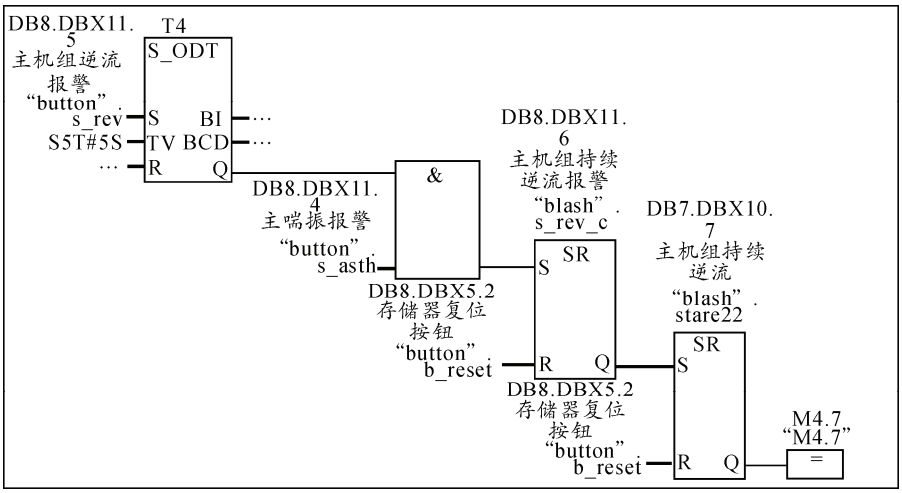

图 11　喘振报警程序设计

2.2.5　紧急停机联锁

为防止轴流压缩机运行工况越过报警而持续恶化，程序将可能会造成重大安全事故的工况参数进行了急停联锁，部分参数设置见表 2。当运行参数超过急停设置时，程序将立即触发急停输出，通过高压柜分闸线圈直接分断高压电源，压缩机开始自由降速停机，防喘振阀全开，静叶角回到初始位置 46°，最大程度降低事故危害。

2.2.6　风洞联锁通信

轴流压缩机联锁监控系统自身独立运行，同时也与风洞安全联锁系统通信，既为风洞提供压缩机状态信号，又接收风洞的联锁状态信号与急停指令。

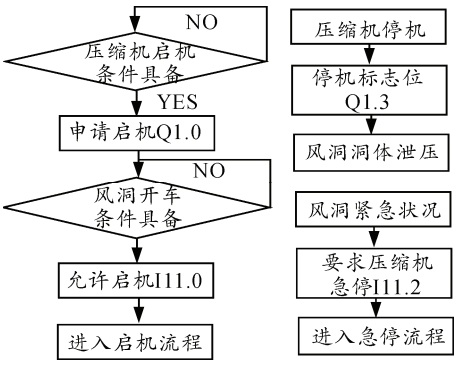

图 13　联锁监控系统与风洞安全联锁系统通信逻辑框图

轴流压缩机状态信号包括申请启机和停机标志位，风洞联锁状态信号包括风洞允许启动和紧急停机。压缩机启机条件具备时，程序向风洞安全联锁系统发送申请启机信号 Q1.0，风洞安全联锁系统接收此信号，并对风洞各子系统和洞体条件进行自检，满足开车条件后向压缩机发送允许启动信号 I11.0；压缩机停机后，程序向风洞安全联锁系统发送停机信号 Q1.3，风洞安全联锁系统接收此信号，并根据压缩机转速和洞体压力进行排气等操作；当风洞各子系统出现紧急情况时，风洞安全联锁系统向压缩机发送急停信号 I11.2，压缩机联锁监控系统接收此信号，进入急停流程。逻辑框图见图 13。

2.3　冗余设计

为防止联锁监控系统由于信号干扰、传感器故障等原因出现误报警或误动作，以及部分设备故障导致轴流压缩机异常，提高系统容错能力[9]和鲁棒性，联锁监控系统对软、硬件进行了冗余设计。

2.3.1　单信号多测点方式

对单点 DI/AI 信号进行多点采集，排除单个传感器工作异常导致的虚假信号。如润滑油压力过低(急停)信号，由 3 只压力开关 PS 同时采集，程序设置取其中任意 2 个信号作为触发点。

2.3.2　延时设计

程序对报警或急停原始信号进行延时处理，防止现场电磁干扰或信号突跳引起误报警或误动作。如轴流压缩机轴振动和轴位移信号，在 BENTLY3500 系统继电器模块内设置报警延时 3 s，急停延时 1 s；防喘振控制策略也按此方式设置。

2.3.3 关键设备自动切换运行

关键辅助设备并行使用，程序设置自动切换，确保运行状态持续。如润滑油泵配置 2 台油泵，一用一备，单台油泵运行时另一台投自控，当在用油泵故障停机时，备用油泵快速切换运行，提供油压。

2.3.4 分层分级设置

对报警和急停参数进行分级设置，两级参数之间留有一定余量，为操作人员预留判断和处理空间。报警与急停输出采取分层设计，报警仅用于提醒，无执行机构动作，不影响设备运行状态；急停则触发 DO，设备运行状态将发生改变。

3 结论

联锁监控系统已成功应用于 0.6 m 连续式风洞轴流压缩机的安全运行保护。在风洞调试期间出现的各类突发状况中，系统均成功介入，多次化解了压缩机的异常工况，起到了明显的保护作用，获得了安全运行经验，得到了如下主要结论：

1) 联锁监控系统是轴流压缩机安全运行必不可少的技术手段，机组运行前必须完成设计；

2) 程序逻辑设计、硬件布置和冗余设计是合理的，达到了预期目的和效果；

3) 局部设计仅适用于现有工况，后续应根据风洞试验要求、设备状况和运行实际加以修改完善，满足不同工况安全需求；

4) 设计思路和方法具有一定的通用性，可为其他连续式高速风洞轴流压缩机的联锁监控设计提供参考与借鉴。

参考文献：

[1] 李超俊, 余文龙. 轴流压缩机原理与气动设计[M]. 北京: 机械工业出版社,1986: 10-11; 233.

[2] 惠增宏. NF-6 风洞轴流压缩机喘振信号检测、分析与应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[3] 郝礼书, 乔志德, 武洁, 等. NF-6 风洞 AV90-2 轴流压缩机喘振曲线测试研究[J]. 西安: 西北工业大学学报, 2009, 27(4): 478.

[4] 朱静. ET200M 分布式 I/O 在电气自动化中的应用研究[J]. 现代商贸工业, 2011(18): 281.

[5] 向晓汉, 刘摇摇. 西门子 WinCC V7 从入门到提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 7-9.

[6] 陈海霞, 柴瑞娟, 任庆海, 等. 西门子 S7-300/400 PLC 编程技术及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 347-348, 26-27.

[7] 孙海清, 丁炳信. 轴流压缩机安全控制技术运行优化及实践[J]. 河南冶金, 2011, 19(2): 52.

[8] 王双群, 程力. 轴流压缩机的保护控制[J]. 能源研究与利用, 2000(6): 14.

[9] 常虹, 刘大柱. 控制系统中的容错技术[J]. 电力情报, 2002(1): 52.

****

（上接第 79 页）

[24] Carlotto M J. A cluster-based approach for detecting man-made objects and changes in imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2005, 43(2): 374-387.

[25] Catterall S P. Anomaly detection based on the statistics of hyperspectral imagery[C]//Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics, 2004: 171-178.

[26] 王维, 赵慧洁, 董超. 基于投影寻踪的高光谱图像异常检测并行算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(3): 342-346.

[27] 杜博, 高光谱遥感影像亚像元小目标探测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 1-37.

[28] 杨可明, 薛朝辉, 贾涛涛, 等. 高光谱影像小目标谐波分析探测模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 34-43.

[29] 寻丽娜, 方勇华, 李新. 基于 CEM 的高光谱图像小目标检测算法[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 18-21.

[30] 宗靖国, 张建奇, 秦翰林, 等. 基于非子采样金字塔变换的高光谱图像异常检测[J]. 红外技术, 2011, 33(1): 56-60.

[31] Mehmood A, Nasrabadi N M. Wavelet-RX anomaly detection for dual-band forward-looking infrared imagery[J]. Applied optics, 2010, 49(24): 4621-4632.

[32] 秦翰林, 姚柯柯, 程茂林, 等. 基于多尺度分解的超光谱图像异常检测[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 327-330.

[33] 张翔, 张建奇, 秦翰林, 等. 采用多分辨率分解的高光谱图像异常检测[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 570-575.

[34] 赵春晖, 胡春梅, 包玉刚. 一种背景误差累积的高光谱图像异常检测算法[J]. 光子学报, 2010, 39(10): 1830-1835.

[35] 梅锋, 赵春晖. 基于空域滤波的核 RX 高光谱图像异常检测算法[J]. 基于空域滤波的核 RX 高光谱图像异常检测算法, 2009, 30(6): 697-702.

[36] Chiang S S, Chang C I, Ginsberg I W. Unsupervised target detection in hyperspectral images using projection pursuit[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(7): 1380-1391.

[37] 谷延锋, 刘颖, 贾友华, 等. 基于光谱解译的高光谱图像奇异检测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(6): 473-477.

[38] 成宝芝, 赵春晖, 王玉磊. 结合光谱解混的高光谱图像异常目标检测 SVDD 算法[J]. 应用科学学报, 2012, 30(1): 82-88.

[39] 刘德连, 王博, 张建奇. 期望最大化聚类的高光谱亚像素目标检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(3): 512-526.