

0.6 米跨超声速风洞安全联锁控制系统研制

陈海峰¹, 熊波¹, 阎成¹, 谢明伟²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 高速所, 四川 绵阳 621000;

2. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 0.6 米跨超声速风洞控制系统采用基于现场总线和网络的开放式集散系统, 具有运行控制设备多、逻辑关系复杂的特点, 为保证风洞复杂系统的状态监控和运行安全, 研制了安全联锁控制系统。系统硬件包括应用层上位机、中间层 PLC、执行层各设备终端, 软件采用共享变量服务器 SVE 统一管理实现通信; 通过硬件电路和 ProfiNet 连接两种方式的结合, 实现了对风洞各设备的状态信息检测和控制指令发送; 通过对风洞状态监控、安全保护功能进行分析, 采用了三级冗余安全关车策略的关键技术和方法; 经调试实现了检测与控制所有与风洞运行安全相关的信息和设备, 能够在风洞运行出现异常时, 抢占控制权限, 控制各设备在安全状态下关车, 压力控制精度优于 0.5%; 经实际应用满足了技术上保护风洞设备和参试人员安全的工程应用。

关键词: 跨超声速风洞; 安全联锁; 状态监控; 三级联锁; 冗余安全

Development of Safety Interlocking Control System for 0.6 m Trisonic Wind Tunnel

Chen Haifeng¹, Xiong Bo¹, Yan Cheng¹, Xie Mingwei²

(1. China Aerodynamics Research and Development Center High Speed Institute, Mianyang 621000, China;

2. China Aerodynamics Research and Development Center Equipment Design & Test
Technology Institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: The 0.6m trisonic wind tunnel control system adopts an open distributed system based on Fieldbus and network, which has many operation control equipments and complex logic relationship, to ensure the state monitoring and operation safety of wind tunnel complex system, a safety interlocking control system is developed. The hardware of the system includes upper computer of application layer, the middle layer PLC, and the device terminals of execution layer. The software uses the shared variable server SVE to manage the communication in a unified manner, the combination of hardware circuit and ProfiNet connection realizes the state information detection and control instruction sending of each device of wind tunnel. Through the analysis of the status monitoring and safety protection functions of wind tunnel, the key technologies and methods of three-level redundant safe shutdown strategy are adopted. After debugging, all information and equipment related to the safety of wind tunnel operation are detected and controlled. When abnormal operation of wind tunnel occurs, the control right can be preempted, and the shutdown of all equipment in safe state can be controlled. The pressure control precision is better than 0.5%. The practical application of the wind tunnel meets the engineering application of protecting the safety of the wind tunnel equipment and the test personnel technically.

Keywords: trisonic wind tunnel; safety interlock; status monitoring; three-level interlock; redundant security

0 引言

目前, 国内外跨超声速风洞, 安全联锁控制系统(以下简称联锁系统)往往与风洞主控系统融合在一起, 联锁系统的主要作用是风洞启动条件判断与状态监控^[1], 系统本身不参与风洞控制。随着科技的发展, 自动化水平的提高, 风洞运行对主控系统高度依赖, 该系统一旦产生故障, 可能对风洞设备和参试人员造成严重危害。因此, 风洞联锁系统除了启动条件判断与状态监控之外, 还须在主控系

统故障时, 启动控制功能, 控制风洞各设备在安全状态下关车。

0.6 米跨超声速风洞(以下简称 0.6 米风洞), 是中国空气动力研究与发展中心在 2014 年建成通气的一座直流暂冲式三音速风洞, 该风洞采用引射下吹式运行方式, 试验马赫数范围 $M=0.3\sim 4.5$, 总压和马赫数控制精度分别优于 0.2% 和 0.002^[2]。该风洞控制系统采用基于现场总线和网络的开放式集散系统, 功能分散, 指挥集中^[3]; 具有运行控制子系统多、自动化程度高、各系统间信息交互多、逻辑关系复杂的特点; 联锁系统能够检测与控制所有与风洞运行安全相关的信息和设备, 从技术上保证风洞的安全运行。

1 研制技术要求

0.6 米风洞控制系统从功能布局上分为应用层、中间

收稿日期: 2019-05-03; 修回日期: 2019-05-22。

基金项目: 国家自然科学基金(61673211); 一院高校联合科技创新基金; 江苏省研究生创新基金; 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ18-11)。

作者简介: 陈海峰(1980-), 男, 山东海阳人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞测控设备设计及研制、风洞流场控制方向的研究。

层、执行层三层，其中，面向操作的应用层包括主控系统及连锁系统两个独立的子系统^[4-5]，二者共同组成了风洞控制系统。主控系统主要功能是负责提供好的流场品质和模型姿态；连锁系统主要负责风洞运行安全，系统拓扑图见图 1。

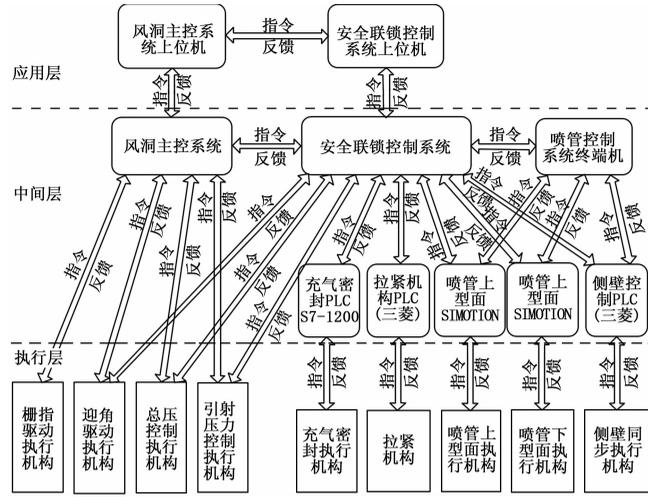


图 1 风洞控制系统拓扑图

系统研制功能及技术要求很多，从检测和控制专业角度上将其归纳为安全连锁与状态监控功能、三级冗余安全关车功能两部分技术要求^[6]。

1.1 安全连锁与状态监控功能技术要求

1) 风洞启动条件连锁。风洞启动前，连锁系统需完成启动条件检查，只有各系统状态信息正常，连锁系统才给主控系统发送允许启动信号，风洞方能启动。

2) 状态监控功能。系统对整个风洞的关键参数进行监控，完成预警报警，使风洞参试人员可以随时掌握风洞状态，该功能贯穿风洞运行全过程。

3) 指令下达及转发功能。系统通过网络通信实现控制指令的下达及状态信息的转发。

1.2 三级冗余安全关车功能技术要求

风洞运行过程中，当设备出现故障报警，连锁系统能够根据故障报警严重程度，自动启动三级冗余安全关车功能^[7]，以保证风洞各运行设备回到安全位置后，在安全状态下关车。

2 系统硬件结构及组成

连锁系统由 PLC、上位机、测控间控制台、网络、各系统状态信息、各执行机构、风洞洞体上布置的传感器及各状态量组成，其中 PLC 是系统的核心^[8]，PLC 选用西门子的 S7-300 系列，CPU 为 319-3PN/DP。该 CPU 模块集成了 ProfiNet、MPI/DP、Profibus-DP 共 3 个通信端口。为满足状态监控和控制功能，PLC 配置了 6 个 16 路的 DI 模块、4 个 16 路的 DO 模块、2 个 8 路的 AI 模块和 2 个 8 路的 AO 模块。

连锁系统组成图见图 2，系统对风洞各设备的状态信息

和控制指令通过 ProfiNet 和硬件电路连接两种途径联合实现：

1) 系统通过 ProfiNet 工业实时以太网与测控间上位机、气密封控制系统、拉紧机构控制系统、喷管侧壁控制系统、喷管型面控制系统之间实现通信，读取各系统的状态信息并下发控制指令；

2) 系统通过硬件电路连接方式与测控间控制台、主控系统 RT、模型迎角控制系统、主进气管路阀门控制系统、主旁路进气管路阀门控制系统、引射管路阀门控制系统、气密封控制系统、拉紧机构控制系统、喷管型面控制系统、风洞各部位传感器、等状态信息和控制设备之间进行连接，对各设备进行状态监控和下达控制指令。

硬件电路连接可以保证在网络出现异常时，连锁系统仍然可以通过硬件电路对风洞进行安全控制，确保风洞在安全状态下进行关车。

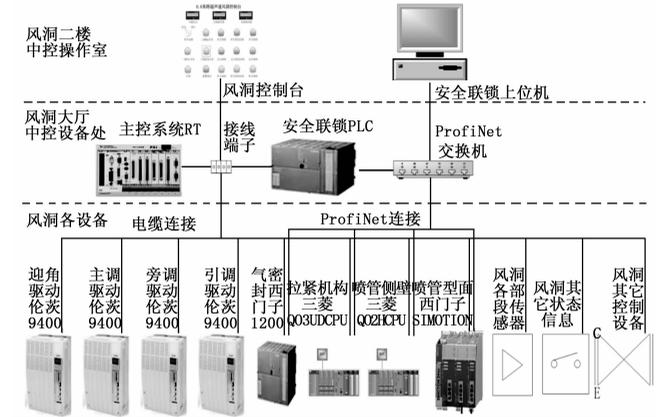


图 2 连锁系统组成图

3 系统软件设计及实现

3.1 软件通信方式

连锁系统软件包括上位机软件和下位机软件两个部分。系统上下位机之间及与其它系统之间的软件数据通信方式见图 3。数据通信包括三种方式：

1) 控制软件之间（主要指上位机间）信息交互，采用网络共享变量服务器 SVE 来统一管理通信变量，基于 PSP 协议自动进行数据发布更新^[9]；

2) 控制软件（安全连锁上位机）与设备（安全连锁 PLC）的通信，采用基于 OPC 技术的访问机制；

3) 安全连锁 PLC 对其它 PLC 的通信采用组态映射方式。

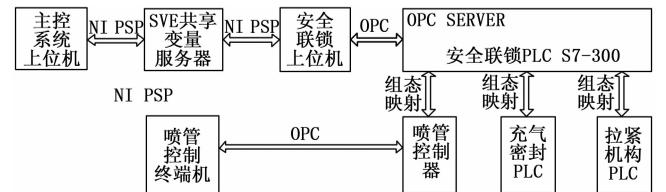


图 3 软件数据通信方式图

3.2 系统上位机软件

连锁系统上位机软件是该系统的人机交互界面, 是信息显示、指令发送中心, 通过该软件, 系统可以实时获取和掌握风洞现场设备运行状态, 可以发送控制指令, 可以对风洞安全运行进行管理, 上位机软件采用图形化开发工具 LabVIEW 2012 进行开发, 软件采用模块化设计, 主要包括的模块见图 4。

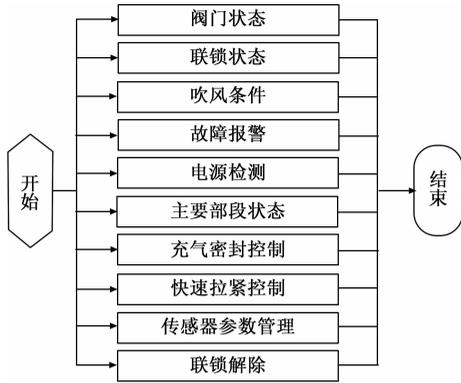


图 4 连锁系统上位机软件的模块组成

3.3 系统下位机软件

连锁系统下位机 PLC 软件采用西门子公司的 SIMATIC Manager Step7 v5.5 进行组态编程。通过 ProfiNet 工业实时以太网与上位机实现通信, 完成测控系统状态检测与监视、吹风条件检查、指令转发、异常报警、压力闭环控制、紧急停车等功能。软件层次结构及功能模块见图 5。

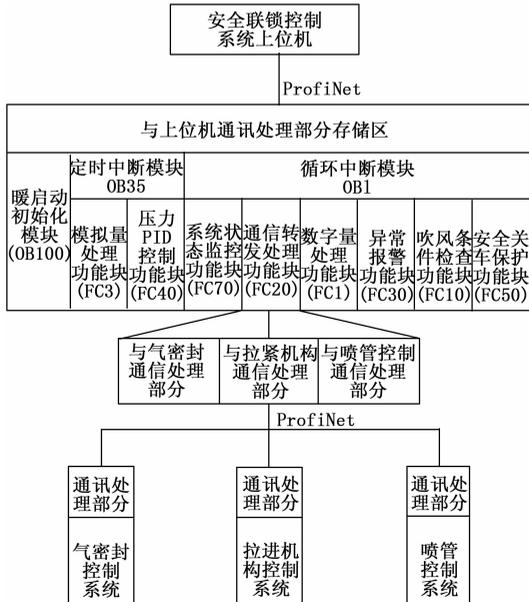


图 5 连锁系统程序功能模块图

PLC 软件模块及功能实现描述见表 1, 包括与上位机通信处理部分、暖启动初始化 OB100 模块、定时中断 OB35 模块、循环中断 OB1 模块四个大的模块; 其中, 定时中断 OB35 模块包括模拟量处理功能块 FC3、压力 PID 控制功能块 FC40 两个功能块, 循环中断 OB1 模块包括系统状态监

控功能块 FC70、通信转发处理功能块 FC20、数字量处理功能块 FC1、异常报警功能块 FC30、吹风条件检查功能块 FC10、安全关车保护功能块 FC50 七个功能块。

4 关键技术

4.1 三级冗余安全关车策略

系统冗余安全关车策略共分三级:

1) 一级关车保护功能。连锁系统通知主控系统故障类型, 提示主控系统按照预先设定的关车时序, 完成一级安全关车保护功能。

表 1 连锁系统 PLC 软件功能模块

模块名称	程序块	功能概述
初始化	OB100	状态初始化功能
模拟量处理	FC3	AI 通道数据采集、线性转换、滤波
压力 PID 控制	FC40	主调、旁调、引调在 PLC 执行关车时的压力闭环控制功能
系统状态监控	FC70	完成 PLC 系统的自身状态与网络通信状态监测
通信	FC20	与喷管、气密封、拉紧机构的通信功能
吹风条件检查	FC10	风洞在吹前的状态监控与允许开车条件检查
异常报警	FC30	主要完成一级、二级、三级报警功能
数字量处理	FC1	DI/DO 硬件通道与软件通道地址映射功能
安全保护	FC50	实现风洞在不同运行工况下的三级冗余安全关车功能

2) 二级关车保护功能。二级关车保护功能由安全连锁 PLC 实现。当主控系统不能正常关车或故障已经超过主控系统关车设定阈值时, 安全连锁 PLC 抢占控制权限, 由 PLC 控制风洞按照关车时序完成安全关车操作。

3) 三级紧急停车功能。若关键环节发生严重故障时, 连锁系统能够通过硬件电路直接快速切断气源, 以保证在任何情况下对风洞进行紧急停车操作, 保护风洞洞体。

4.2 电接点压力表的安装

稳定段总压电接点压力表、引射集气室压力电接点压力表是针对风洞超压最高级别的安全保护。从理论分析, 如果主控系统、安全连锁 PLC 两者没有同时故障, 压力是可控的, 即不会出现电接点压力表超高压的情况; 假如出现压力超压不可控的极端情况, 必须迅速切断气源, 避免气体超压爆炸对风洞及参试人员造成伤害。因此, 电接点压力表必须可靠, 不能有误动作。

考虑到机械压力表的特性, 易受环境震动干扰。通过静态实验, 我们发现在震动时, 压力表容易出现误动作。为避免出现误动作的情况, 一是选用抗震能力较强的压力表, 安装时选择震动相对较弱的位置并且进行减震处理; 二是将震动引起的误动作信号进行滤波。经以上两步措施, 在震动最强的工况下, 电接点压力表表现可靠, 没有误动作。

5 系统调试及应用情况

5.1 系统功能调试

在风洞进行综合性能调试之前, 联锁系统须具备安全关车保护功能, 以保证风洞能够安全关车。因此, 必须对联锁系统进行功能调试。调试内容除对供电模块功能、通信功能、PLC 输入输出功能、迎角机构紧急回零功能、控制台功能、吹风条件联锁等 6 个基本功能进行测试之外, 主要对二级关车保护及三级紧急停车两部分功能进行了测试; 其中一级关车保护功能由主控系统实现, 安全联锁只需完成通知提示功能。

5.1.1 二级安全关车保护功能调试

安全联锁 PLC 通过调节主进气管路、引射进气管路阀门系统控制风洞稳定段总压和引射集气室压力, 等待风洞各运行设备回到安全位置后, 完成安全关车。相比主控系统, PLC 的压力控制精度不需要达到 0.2%, 只需达到 0.5% 即可; 但一旦接管权限, 必须逻辑正确, 动作可靠。根据风洞不同运行工况, 匹配归纳出安全联锁二级关车方式包括下吹式、总压负压运行、开关车引射、全程引射四种, 经仿真和带压力调试, 各关车工况压力控制精度全部优于 0.5%, 时序正确。

在下吹运行工况下, 二级安全关车压力曲线和时序见图 6, 当 PLC 接管权限后, 继续调节稳定段总压至目标值, 等待风洞各运行设备回到安全位置后, 关闭主进气管路系统。

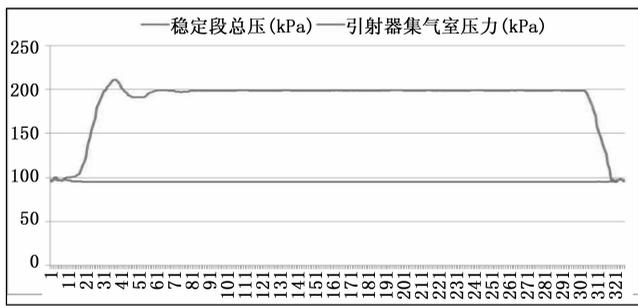


图 6 下吹运行工况二级关车压力曲线和时序

在稳定段总压为负压运行工况下, 二级安全关车压力曲线和时序见图 7, 当 PLC 接管权限后, 继续调节引射集气室压力至目标值, 并开启主进气管路系统, 把稳定段总压调节到目标压力值 (稍高于大气压) 时, 等待风洞各运行设备回到安全位置后, 同时关闭主进气及引射进气管路系统, 以防止稳定段总压为负压时, 激波返回时冲击载荷对模型及烧蚀丝网造成损害^[10]。

在开关车引射运行、全程引射运行工况下, 二级安全关车压力曲线和时序分别见图 8、图 9, 当 PLC 接管权限后, 继续调节稳定段总压至目标值, 并开启或调节引射进气管路系统, 引射集气室压力到达安全关车压力时, 等待风洞各运行设备回到安全位置后, 首先关闭主进气管路阀门系统, 待稳定段总压降至设定值时, 立即关闭引射进气管路系统, 以降低激波返回时冲击载荷对模型及烧蚀丝网

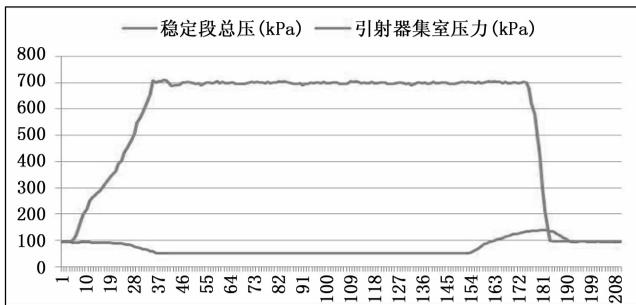


图 7 总压负压运行工况二级关车压力曲线和时序

造成损害。

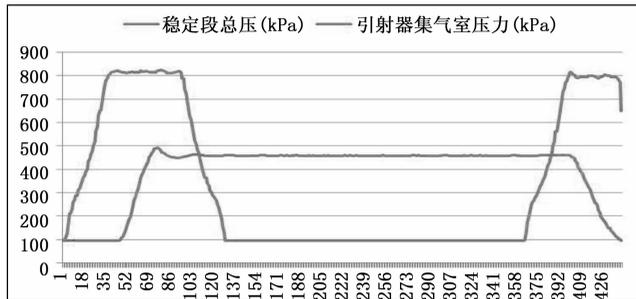


图 8 开关车引射工况二级关车压力曲线和时序

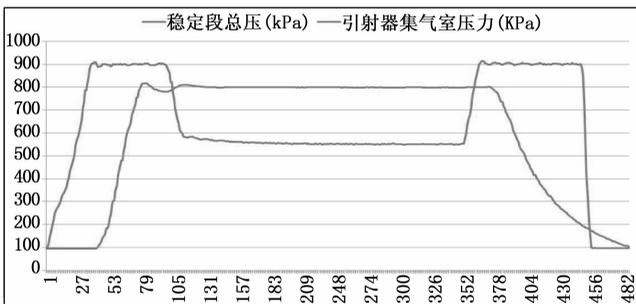


图 9 全程引射工况二级关车压力曲线和时序

5.1.2 三级紧急停车功能测试

吹风过程中, 如果稳定段总压、引射集气室压力超出电接点压力表设定值, 为了保证风洞洞体的安全, 联锁系统通过硬件电路触发进行三级紧急停车操作。三级紧急停车触发时, 联锁系统通过硬件电路直接关闭快速阀, 同时硬件电路给调压阀和风洞关键运行设备发送回零信号。

5.2 应用情况

通过调试, 联锁系统逻辑正确、功能可靠, 联锁系统的大屏显示界面及计算机操作显示界面见图 10、图 11。

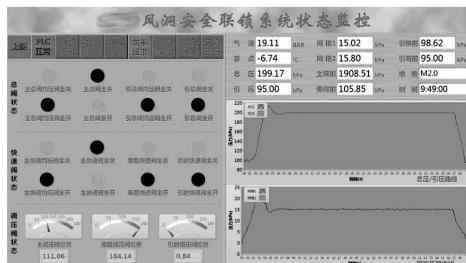


图 10 安全联锁大屏显示状态监控图

在后续的风洞综合性能调试、流校、标模试验及近几



图 11 安全连锁计算机操作显示界面

年的型号试验中, 连锁系统已经发挥出了其在技术上的保护作用, 能够避免设备不具备条件而启动; 当风洞在运行过程中状态超出预设条件, 发生报警和故障时, 安全连锁能够自动采取安全保护措施, 完成安全连锁与状态监控功能、三级冗余安全关车功能, 从而保证风洞的安全运行。

6 结束语

用 PLC 为核心的 0.6 米风洞连锁系统在设计、研制时结合了较为先进的控制自动化技术、故障报警诊断技术和软件技术, 系统保护功能完备、动作准确可靠、操作简单、显示形象, 确保了风洞安全运行, 达到了预期的目的。

(上接第 43 页)

5 结语

本文研究了基于双目视觉的工件引磁片定位与测量整个过程。在目标识别与特征点提取阶段, 通过双目系统标定实现引磁片图像对的立体矫正, 利用图像金字塔分层搜索策略结合带有缩放的亚像素形状模板匹配算法实现对工件引磁片区域的准确识别及特征点的提取, 使得在目标区域识别速度及特征点提取精度方面有很大的提升。在目标定位阶段, 利用极线约束准则与 NCC 相结合的灰度相关性匹配算法完成特征点的立体匹配, 降低了匹配错误和重复匹配的可能性, 并解决了左右两幅图像中目标特征定位点不匹配的问题; 进一步结合双目视觉测距原理、3D 坐标仿射转换和几何计算实现了对特征点的三维定位。在测量阶段, 通过空间曲线拟合公式取平均值的方法完成半径的测量; 利用提取的鞍点构建非正交平面坐标系与法向量, 通过点积运算实现超薄引磁片厚度的测量。实验结果表明, 基于 HALCON 的机器视觉技术, 整个流程通过软件算法达到亚像素精度, 有效地实现了对超薄引磁片的精确定位及高精度尺寸测量, 在一定程度上降低了硬件的使用成本, 对自动化大批量生产的超薄磁性车载手机支架铁片的高精度测量具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] Jaafari I E, Ansari M E, Koutti L. Fast edge-based stereo matching approach for road applications [J]. Signal, Image and Video Processing, Springer London, 2017, 11 (2): 267-274.
- [2] 董峰, 孙立宁, 汝长海. 基于双目视觉的医疗机器人摆位系统测量方法 [J]. 光电子·激光, 2014 (5): 1027-1034.

参考文献:

- [1] 王发祥. 高速风洞试验 [M]. 北京: 国防工业出版社.
- [2] 秦建华, 凌忠伟, 王博文. 0.6 米暂冲式跨超声速风洞流场控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 50-54.
- [3] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统 [J]. 兵工自动化, 2013, 02: 63-66, 70.
- [4] 朱小本, 孟祥生. 紧急停车及安全连锁系统设计 [J]. 石油规划设计, 2006, 17 (1): 44-46.
- [5] 孙之达, 陈雨虎. 用 PLC 实现合成氨厂安全连锁系统改造 [J]. 大氮肥, 1998, 21 (3): 203-204.
- [6] 褚卫华, 林辰龙, 谢明伟. 0.6m 暂冲式跨超声速风洞控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 69-73.
- [7] 谢明伟, 宋巍巍, 王飞, 等. 基于实时以太网的某连续式风洞安全连锁系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 09: 50-53.
- [8] 米林, 李利锋, 谭伟. 变速器试验台测控系统研发 [J]. 四川兵工学报, 2014, 05: 70-72, 101.
- [9] 陈树学, 刘萱. LabVIEW 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [10] 熊波, 林学东, 杨洋, 等. 2 m 超声速风洞冲击载荷抑制方法研究 [J]. 兵工自动化, 2016, 11: 16-19, 31.
- [3] 吕家国, 蒋晓瑜, 张鹏伟, 等. 医疗机器人双目视觉硬件系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7 (2): 307-314.
- [4] Stroppal, Castellini P, Paonen. Self-optimizing robot vision for online quality control [J]. Experimental Techniques, 2016, 40 (3): 1051-1064.
- [5] Ahmedaa, Elbashirmk, Osmana. Distance alert system using stereo vision and feature extraction [A]. International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering [C]. Khartoum: IEEE, 2017.
- [6] 蒋萌, 王尧尧, 陈柏. 基于双目视觉的目标识别与定位研究 [J]. 机电工程, 2018, 35 (4): 414-419.
- [7] 张如如, 葛广英, 申哲, 等. 基于 HALCON 的双目立体视觉工件尺寸测量 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 59-63.
- [8] 沈文波, 周武. 基于双目视觉的飞行头盔动载特性测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 52-55.
- [9] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 刘锐, 陈凤翔, 陈科羽, 等. 基于双目视觉的障碍物检测方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12): 67-71.
- [11] 林海波, 潘万贵. 基于变权重最小二乘法图像边缘特征提取算法的研究及应用 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 6: 118-120.
- [12] 杜柳青, 许贺作, 余永维, 等. 基于改进 SURF 算法的柔性装夹机器人快速工件匹配方法 [J]. 计算机应用, 2018, 7: 2050-2055.
- [13] Stefano Mattocchia. Stereo vision: algorithms and applications [M]. Department of Computer Science University of Bologna, 2013.
- [14] 卢宝莉, 刘育梁, 孙亮. 基于小尺度测量的双目立体视觉系统误差分析 [J]. 光子学报, 2015, 44 (10): 36-41.