

doi: 10.7690/bgzdh.2021.05.012

基于 EtherCAT 的柔壁喷管型面监测系统

邓章林, 荣祥森, 贾霜, 阎成

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为提升风洞柔壁喷管型面监测系统运行的安全性, 设计一套柔壁喷管型面监测系统。结合柔壁喷管的实际特点, 利用旋转编码器和行程开关实现柔壁型面位置监测, 运用油压和直线位移传感器实现液压运行过程监测, 搭建基于 EtherCAT 技术的环网, 通过总线技术实现分布式采集和集中式数据处理, 给出人机监测画面和实用的故障诊断方法。运行结果表明: 该系统能实时有效监测柔壁喷管型面, 提升柔壁喷管使用过程中的安全性。

关键词: 风洞; 柔壁喷管; 监测; 诊断

中图分类号: V211.74 **文献标志码:** A

Flexible Nozzle Profile Monitoring System Based on EtherCAT

Deng Zhanglin, Rong Xiangsen, Jia Shuang, Yan Cheng

(High Speed Institute of China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: For improving safety degree of wind tunnel flexible nozzle profile monitoring system operation, design flexible nozzle profile monitoring system. Combine with the flexible nozzle characters, use rotating encoder and travel switch to realize position monitoring of flexible nozzle profile, use oil pressure and straight line position sensor to realize hydraulic operation monitoring, establish ring net based on EtherCAT technology, realize distributed collection and centralized data processing by bus technology, and put forward man-machine monitoring scene and practical failure diagnosis method. The operation results show that the system can efficiently realize flexible nozzle profile monitoring in real time, and improve operation safety degree of flexible nozzle.

Keywords: wind tunnel; flexible nozzle; monitoring; diagnosis

0 引言

某跨超声速风洞主要由洞体结构、控制系统和测量系统组成, 是一座集亚、跨、超声速为一体的综合性风洞。柔壁喷管作为该风洞实现亚跨超声速试验的核心部段, 包括风洞喷管段结构部段及驱动控制系统。该喷管为二元多支点全柔壁喷管, 总长 9.195 m, 主要由电气-液压系统实现上下柔板型面控制。控制过程中, 定位螺母位置、液压油缸及电磁阀的工作状态等将直接影响柔壁的运行安全。为提升系统运行的安全性, 笔者结合柔壁喷管的实际特点, 设计一套较为完备的柔壁喷管型面监测系统。

1 系统组成及原理

图 1 为柔壁喷管组成。左右侧壁固定不动, 上下柔壁固定在上下梁上, 上下柔板均为一块整体, 分别由 15 套执行机构通过液压-电气系统控制, 使其在两平行侧壁之间改变型面并定位, 在超声速不同实验马赫数时, 需要更换喷管型面。喷管更换流程为: 首先通过液压系统实现柔板回零, 再通过电

气系统将定位螺母调节至指定型面, 最后通过液压系统使柔板成型, 吹风时还需要用高压锁紧柔板, 防止柔板受气动力变形^[1]。

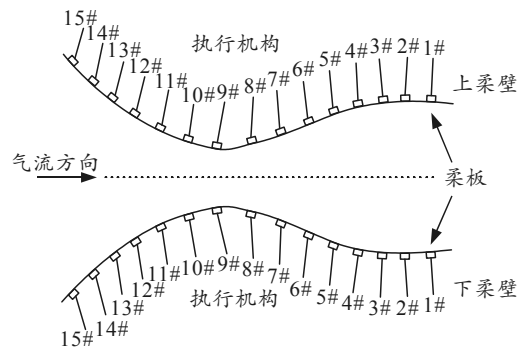


图 1 柔壁喷管组成

柔壁喷管的执行机构主要分为柔壁型面定位控制和柔壁柔板成型回零控制 2 部分。柔壁型面定位控制部分包含电机、刚性联轴节、丝杆、定位螺母、机械零位螺母、定位机构、编码器及机械计数器等; 柔壁柔板成型回零控制部分包含专用油源、电磁阀、油缸 (低压腔、高压腔) 等。执行机构的传动原理如图 2 所示, 在柔板回零状态下, 柔壁控制系统控制

收稿日期: 2021-01-02; 修回日期: 2021-02-09

作者简介: 邓章林(1983—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事自动控制研究。E-mail: 1944698592@qq.com。

电机传动定位螺母至指定型面后，通过电磁换向阀向油缸高压腔升压，驱动柔板向风洞轴线运动，直至定位机构运动至定位螺母位置，当 15 套执行机构均完成此过程，柔板成型完毕。

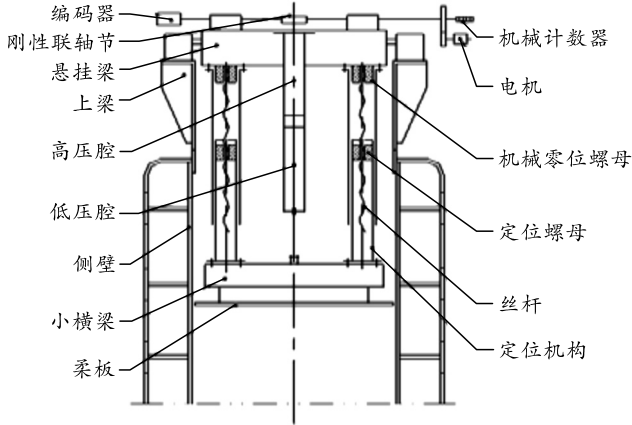


图 2 柔壁喷管执行机构传动原理

在更换喷管过程中，定位螺母位置的精准性将影响柔壁喷管型面的准确性；电磁阀、油缸等是否正常工作，将直接影响柔板的安全。原有柔壁喷管控制系统，一般通过岗位人员在操作过程中现场观察喷管是否运行正常，时效性差；且一旦出现设备故障，排查故障原因也缺少数据支撑，影响实验效率。文献[2-4]通过在风洞中建立状态监测系统，有力地提升风洞设备运行的安全性和实验效率；文献[5]建立了基于 LabVIEW 的液压站监控系统，可在远程集中监测各分布式站点信息；文献[6]也建立了基于网络实时监控液压元件运行数据的系统；因此，为提升该风洞柔壁喷管运行安全和实验效率，研制了柔壁喷管型面运行监测系统，通过技术手段监测喷管运行过程中的状态信息。

2 系统总体设计

2.1 监测对象选择

该风洞柔壁喷管的功能在于形成不同的喷管型面以满足不同实验马赫数的需要。在更换柔壁喷管型面的流程中，液压系统的主要控制和驱动装置为电磁换向阀和油缸。电磁换向阀卡死是液压控制系统中常见故障^[7]；液压油缸的泄漏，也将影响系统的机械效率，甚至对系统造成破坏^[8-9]。在该风洞柔壁喷管过往的设备故障中，也多次出现由电磁换向阀故障、油缸密封损坏导致内泄漏而造成的柔板安装结构损坏的情况。文献[10-11]还针对液压缸内泄漏建立故障诊断方法。在文中主要选择液压系统的关键环节进行监测，兼顾保证结构运行安全，主要

监测对象包括：

- 1) 油源油温和液位；
- 2) 电磁换向阀进出口压力；
- 3) 油缸位移；
- 4) 定位螺母位置；
- 5) 成型回零行程。

2.2 总体方案

柔壁型面监测系统是基于分布式网络架构，在设备现场构建基于 EtherCAT 环网的主从站点，上下柔壁从站点通过倍福 AI、DP、DI 等模块，采集上下柔壁电磁阀进出口油压、旋转编码器数值、拉线编码器数值、柔壁成型/回零接近开关等信息，再利用 EtherCAT 总线模块将数据传输至主站，主站实现信号处理，并在触摸屏和控制系统上位机上实现数据展示。控制系统上位机和安全联锁上位机通过 OPC 实现数据共享，安全联锁上位机再接入自主式保障系统局域网，将柔壁喷管全部监测数据通过 Modbus 协议上传至自主式服务器，服务器可利用监测数据，建立故障诊断模型，实现故障诊断。柔壁喷管型面监测系统总体架构如图 3 所示。

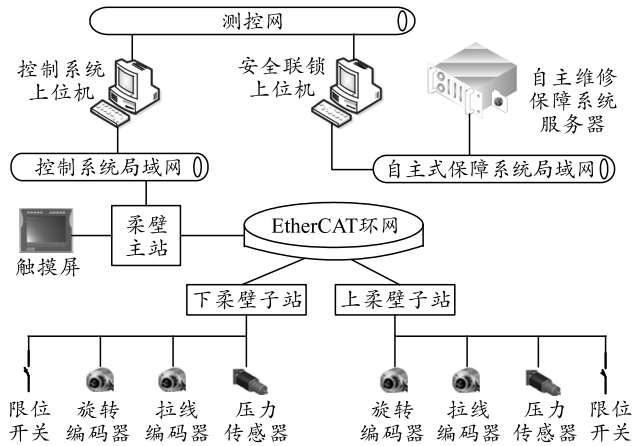


图 3 柔壁喷管型面监测系统总体架构

2.3 硬件组成

系统硬件主要涉及柔壁现场控制系统，方案将监测部分与控制部分有机结合，考虑系统监测信号多、位置相对分散，采用分布式采集、总线式传输的方式，简化了系统结构。主要硬件包括：

- 1) 控制器具有 EtherCAT 高速通信功能，可以保障系统采集控制的实时性和可靠性。
- 2) 触摸屏选择高性能嵌入式一体化触摸屏，可通过以太网方便快捷地与 PLC 通信，用户界面具备丰富的图像显示和数据处理功能，满足系统多信号显示监视使用要求。

3) 传感器主要包括绝对值编码器和压力变送器。其中：旋转编码器、拉线编码器通过 DP 通信实现数据采集，性能指标满足最大型面及测量精度要求；压力变送器测量范围为 0~16 MPa，综合精度±0.2%FS，输出信号为 4~20 mA，通过模拟量输入模块实现采集。

3 系统软件设计

监测系统软件包含 PLC 软件、触摸屏软件和上位机软件，上位机软件又包含控制系统上位机、安全联锁上位机和自主式系统上位机 3 部分。

3.1 PLC 软件

如图 4 所示,PLC 软件是整个软件平台的基础,采用模块化设计,主要包含数据处理、功能模块和通信模块等。系统监测主要分为油缸行程、型面定位位置、油压及行程指示 4 方面,针对各功能均单独定义其功能模块。

PLC 程序中,柔壁型面监测首先定义各功能模块,通过 DP 总线采集获取各传感器值,再进行数

值转换完成物理意义化,最后将物理意义值与实际表示值进行标定整理,得到最终实际监测值。以针对柔壁液压油缸行程监测的拉线传感器为例,在通过 DP 总线采集获取传感器数字量值后,定义 ENCODER_DATACHANGE_FB 模块将数字量值转换为长度单位值,再通过 WIREDATA_TO_REMOTE 模块将长度值标定为柔板型面的具体位置。

3.2 触摸屏软件

系统中,触摸屏与 PLC 采用通用的 TCP/IP 通信协议进行数据交换,主要优势在于线路简单、通信数据传输速度快、配制方法简便。触摸屏与 PLC 的 TCP/IP 通信配置的主要工作是在触摸屏上完成,包含 IP 地址、通信方式、通信周期和端口等。

触摸屏程序设计时充分考虑分区设置,并根据各监测信号在柔壁喷管结构上的具体位置布置监测画面,还利用颜色、实时柱状图等方式,为使用人员提供形象直接的监测画面。触摸屏运行监视界面如图 5 所示。

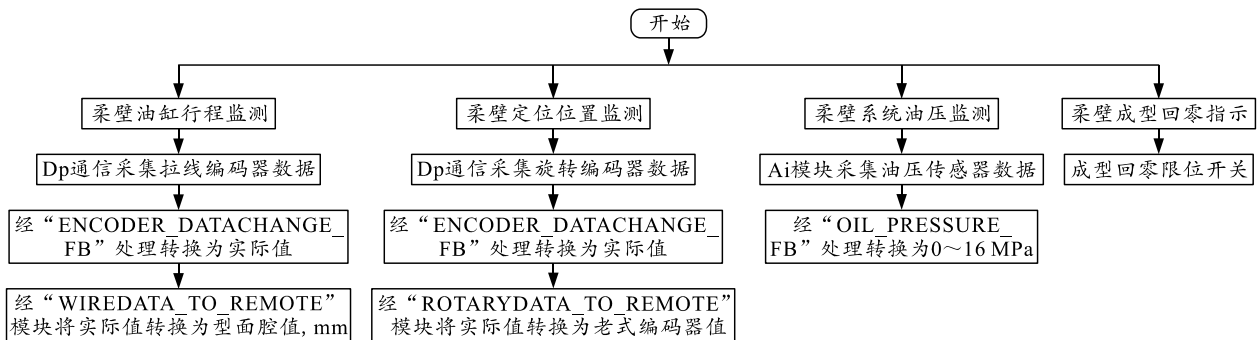


图 4 柔壁型面监测 PLC 程序

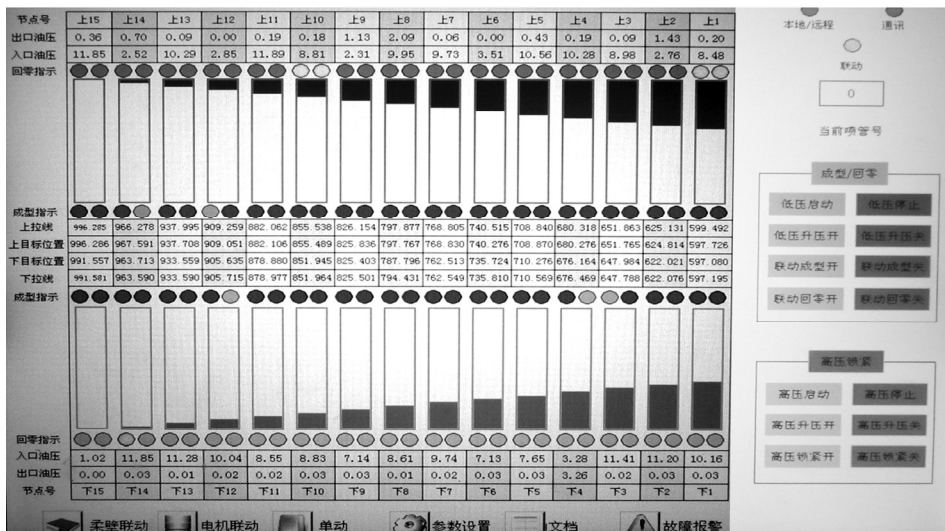


图 5 触摸屏运行监视界面

更换柔壁喷管型面时,定位螺母位置及油缸行程是监测重点。设计中,利用了组态软件内部配方

功能，将标定好的型面数据（包含定位螺母和油缸）以配方的形式存储于触摸屏内。在柔壁型面更换过程中，可实时对比目标位置与实际位置，实现过程和结果监测。

3.3 上位机软件

控制系统上位机软件将柔壁型面监测作为其重要的组成部分，集成于吹风运行界面。如图 6 所示，其功能界面与触摸屏界面一致。

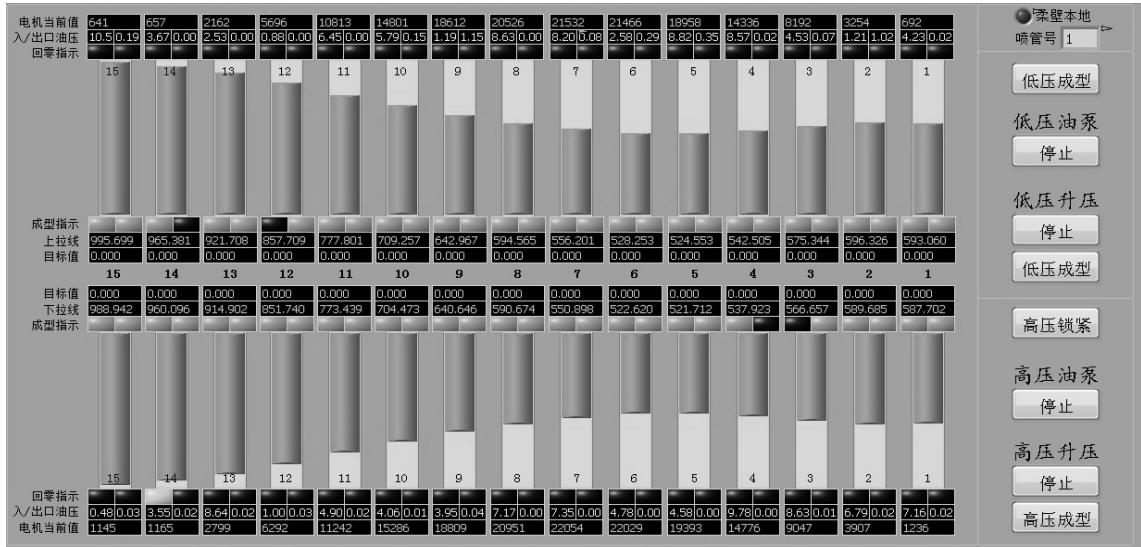


图 6 控制系统上位机运行监视界面

不同于控制系统上位机，安全联锁上位机针对柔壁型面监测，主要增加了监测数据的追溯功能，便于通过历史数据分析，进而掌握柔壁喷管各相应设备（如液压油缸、电磁阀、型面位置等）的性能状况。软件数据存储功能使用 LabVIEW DSC 功能模块实现，将变量信息存储在 NI 数据库中；再调用 Historical Trend (DSC) 子 VI 模块，实现了查询起始时间和终止时间的选择、数据历史曲线查询显示功

能。为了方便查询，使用图形化语言设计了车次号的刷新选择和变量刷新选择程序^[12]。安全联锁上位机历史数据查询界面如图 7 所示。

安全联锁上位机软件再调用“Write Variable”VI 将相应的值写入到“TOALMSS”MODBUS 库文件变量地址中，自主式保障系统软件通过 Modbus 协议实现数据读取，运行监测界面如图 8 所示。

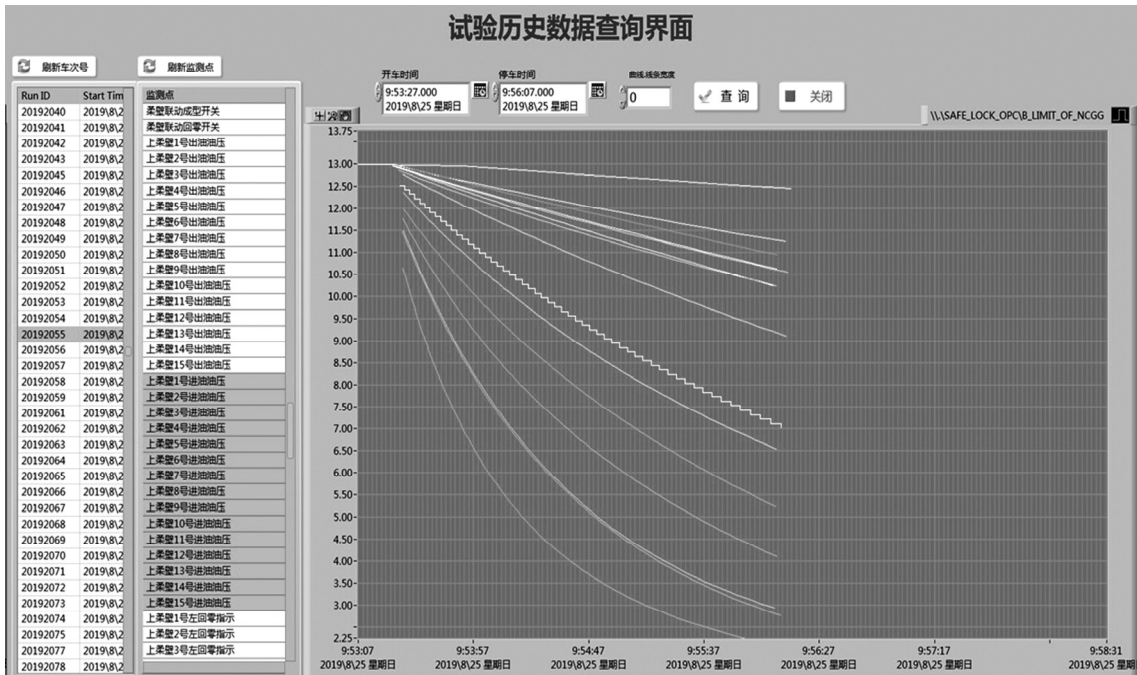


图 7 安全联锁上位机历史数据查询界面

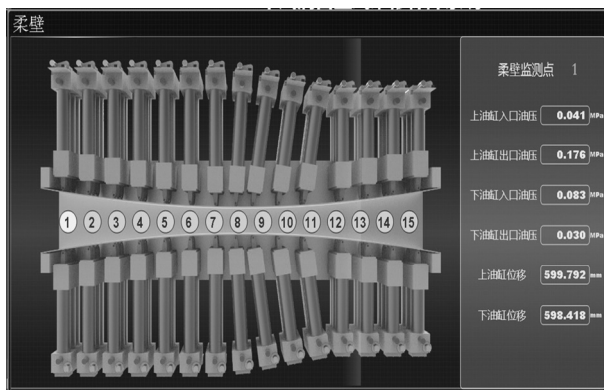


图 8 自主式保障系统上位机柔壁运行监测界面

4 关键技术及应用效果

柔壁喷管作为该风洞的核心设备，除设备设计加工的复杂程度外，由于上下柔板各由 15 套执行机构及液压油缸驱动，工作中上下 15 套机构联动执行，单点故障将影响其他节点的运行，可能导致柔壁出现连接件、机构损坏，甚至柔板出现不可修复性损坏。由于属于多机构联动，不同型面间互换式，

各节点运行的行程、速度等均不同，且系统容易受液压油源、机构传动等不确定性影响，故障模型很难建立。结合多年系统运行经验及液压系统设计，笔者选取液压油缸进出口压力作为分析对象，建立设备故障诊断模型，诊断规则如下：

规则 1：

If 高压腔压力小于 10 MPa and 高压锁紧 then 成型电磁阀故障 or 油缸内泄漏

规则 2：

If 低压腔压力大于 3 MPa then

回零电磁阀故障

通过规则 1 和规则 2，系统可以有效诊断预测由于电磁阀故障或者油缸内泄露可能带来的柔壁设备损坏，快速定位故障位置或者先期对设备进行维修，避免造成更严重的后果。系统在实际使用过程中，已通过历史数据分析及诊断规则多次发现电磁阀故障和密封损坏泄露问题(图 9 为诊断实例)，有效保证了柔壁喷管的安全使用。



图 9 自主式故障诊断界面

5 结论

风洞柔壁喷管型面监测系统的设计充分考虑了柔壁喷管电气—液压控制系统的实际，以液压系统、柔壁型面位置等关键信息为监测对象，搭建了基于 EtherCAT 技术的环网，利用总线技术实现了分布式采集和集中式数据处理。软件设计上充分考虑人为感官因素，形成了界面友好的触摸屏、上位机软件，并利用专家经验建立典型故障诊断模型，提升了柔壁喷管运行的安全性。

参考文献：

- [1] 王新功, 邓晓曼, 王涛, 等. FL-24 风洞性能与使用[M]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 2005: 6.
- [2] 罗昌俊, 邓晓曼, 吴军, 等. 1.2 m 跨超声速风洞运行监测系统研究[J]. 测控技术, 2012, 31(12): 26-28.
- [3] 郁文山, 马永一, 苏北辰, 等. 基于 LabVIEW 和 OPC 的 2.4 米风洞安全连锁系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(2): 72-74.
- [4] 张文, 周恩民, 刘凯, 等. 0.6 m 连续式跨声速风洞轴流

压缩机联锁监控系统[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 83-88.

[5] 谈宏华, 潘正春, 腾达. 基于 LabVIEW 的液压站监控系统[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(12): 94-97.

[6] 何亚平. 基于网络实时监控的液压元件数据监测与系统研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(1): 76-80.

[7] 吴小洪, 李四阶, 张建军, 等. 电磁换向阀的卡死故障诊断[J]. 机床与液压, 1997(6): 55-56.

[8] 王世明. 工程机械液压系统故障监测诊断技术的现状和发展趋势[J]. 机床与液压, 2009, 37(2): 175-180.

[9] 刘玲玲, 牛小军. 某型液压油缸内泄漏问题研究[J]. 航天制造技术, 2014, 4(2): 63-65.

[10] 张瑞华, 吴谨. 基于 LMBP 算法的液压油缸内泄漏故障诊断方法[J]. 天津师范大学学报, 2013, 33(1): 38-44.

[11] 唐宏宾, 吴运新, 滑广军, 等. 基于 PCA 和 BP 网络的液压油缸内泄漏故障诊断[J]. 中南大学学报, 2011, 42(12): 3709-3714.

[12] 邓章林, 贾霜, 阎成. 基于 EtherCAT 和 LabVIEW 的风洞安全联锁及状态监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 14-18, 27.

(上接第 3 页)

表 2 实测记录

项目	壁厚(≥7 mm)/mm							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	7.3	7.4	7.3	7.5	7.3	7.4	7.6	7.6
锥角角度(10°±1.5°)/(°)	9							
对称度偏差(0.5 mm)/mm	0.3							

4 结论

通过对管坯进行锥段缩口旋压和球形收口封底旋压, 最终得到完整的零件。

1) 通过对零件进行几何尺寸的测量发现, 其旋压角度偏差为-1°, 旋压区未出现明显的褶皱, 对称度偏差为 0.3 mm, 几何尺寸满足图纸要求。

2) 通过对壁厚进行测量, 锥段和球头的壁厚范围为 7.3~7.6 mm, 壁厚减薄完全满足图纸要求。

3) 此类零件旋压时进给量过大, 单道次下压量过大, 都会导致零件旋压时材料堆积出现褶皱。

此次试验探讨了大口径支撑杆的加工工艺方法, 提高了产品合格率, 保证了零件质量和稳定性, 节约了成本。从中得到的经验可以指导类似零件的生产。

参考文献:

[1] 李继贞. 中国制造 2025 与旋压技术[C]//第十四届全国旋压技术交流年会论文集. 2016: 1-4.

[2] 赖鹏. 旋压成形设备设计关键技术研究及应用锻压技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 21-23.

[3] 黄巍巍. 内强力旋压生产导弹部件[J]. 飞航导弹, 1996, 26(4): 57-61.

[4] WONG C C, DEAN T A, LIN J. A review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(14): 1419-1435.

[5] WONG C C, DANNO A, TONG K K, et al. Cold Rotary Forming of Thin-wall Component From Flat-disc Blank [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1): 53-62.

[6] 张美君, 刘福贺. 铝合金多楔带轮旋压成形数值分析与试验研究[J]. 锻压技术, 2015, 40(2): 79-86.

[7] 袁玉军, 夏琴香, 肖刚锋, 等. 大长径比不等径筒形件旋压成形试验研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(4): 21-25.

[8] 王鹏飞. 高压涡轮主动间隙控制系统的供气流路与机匣传热研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 31-33.

[9] 邱泽宇. 薄壁铝合金管材热压缩径增厚成形影响因素研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019: 25-27.

[10] 史敏, 赵亦希, 孔庆帅, 等. 薄壁铝合金封头挡板辅助旋压成形方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(10): 1497-1503.

[11] WANG L, LONG H. Investigation of effects of roller path profiles on wrinkling in conventional spinning[C]// The 10th International Conference on Technology of Plasticity. 2011: 56-60.

[12] 张坦, 李新和, 魏准, 等. 工艺参数对大径厚比薄壁筒形件旋压成形质量的影响研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(2): 75-81.

[13] 余勇, 占刚, 樊文欣, 等. 基于遗传算法的强力旋压连杆衬套工艺参数多目标优化[J]. 锻压技术, 2019, 44(12): 187-191.

[14] 陈建华, 邓强, 马飞, 等. 大直径薄壁铝合金封头剪切旋压成形研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(6): 38-43.