

发动机防热结构件智能压粘机控制系统设计

王新德¹, 包乐², 王超¹, 李培培¹, 王景贤¹

(1. 西安维控自动化科技有限公司, 西安 710065;

2. 中国航天科工集团第六研究院二二零所, 西安 710065)

摘要:为解决现有固体火箭发动机喷管防热结构件粘接自动化程度不高、生产效率低、人为因素影响多、粘接质量不稳定等问题,设计防热结构件智能压粘机控制系统;基于AM5718 DSP+ARM双核处理器开发,搭载综合驱动采集卡,进行系统多轴运动精准控制及信号精确采集,实现系统整体控制;并阐述了设计中的控制难点及解决思路;采用运动控制函数跟踪插补控制技术、压力位移多公差窗口匹配控制技术、比例调节控制技术等,实现涂胶均匀度控制、旋转保压排气控制、成型过程精准稳压控制;经实际应用与原有加工方式相比,加工时间缩短65%、溢胶率减少85%以上、一次粘接合格率提高25%。

关键词:智能化;压粘控制;运动插补算法;多公差窗口控制;比例调节

Design of Control System in Intelligent Pressure Glue Machine for Thermal Protection Structure of Motor

Wang Xinde¹, Bao Le², Wang Chao¹, Li Peipei¹, Wang Jingxian¹

(1. Xi'an WeiKong Automation Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

2. No. 210 Institute of The Sixth Academy of China Aerospace Science & Industry Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the existing problems such as low automation degree, low production efficiency, human factors affecting more, and unstable bonding quality in the thermal protection structure bonding process of solid rocket motor nozzles, the measurement and control system of intelligent press glue machine for the thermal protection structure has been designed. Based on AM5718 DSP+ARM dual core processor development, combined with the interface board of servo drive and data acquisition, the system carries out the facility controlment as a whole by processing multi-axes precision motion control and gathering high precision signal; meanwhile the controlling difficulties and solutions are elaborated; The system adopts techniques such as motion control function method by means of tracking interpolation, Multi tolerance window matching control of pressure and displacement, proportional adjustment control technology to realize coating uniformity control, etc. To realize glue coating uniformity control, rotation exhaust pressure-holding control, precision pressure control in moulding process; Compared with the original processing method, the processing time is reduced by 65%, the rate of glue overflow is reduced by more than 85%, and the qualified rate of one-time bonding is increased by 25%.

Keywords: intelligent; press glue control; interpolation algorithm for motion control; multi-tolerance window control; proportional control

0 引言

固体火箭发动机喷管防热结构件是影响发动机性能的关键部件,该部件在工作中受到巨大的压力和强烈的冲刷,时常会出现从粘接部位脱离的情况,一旦出现质量问题就会导致发动机工作异常直接影响到发动机的工作可靠性^[1]。

固体火箭发动机喷管防热结构件主要是将喷管壳体、喉衬、堵盖粘接成型。目前国内火箭发动机防热结构件粘接多采用分散式制造模式,需要大量人工操作,且经常出现溢胶、胶膜厚度均匀性差、胶膜中存在大量气泡等问题,严重影响粘接质量和制造效率。

针对防热结构件粘接工序自动化程度不高、生产效率低、人为因素影响多、粘接质量不稳定等问题,据此开发

一种固体火箭发动机防热结构件智能压粘机控制系统,可实现整个防热结构件涂胶、压粘、锁紧固化三个工序的整体化控制,并且在压装粘接过程中对涂胶量、涂胶均匀度、压装压力、固化锁紧压力等参数实现高精度控制,同时采用旋转施压、多级压力精准施压等压装方式大幅提升生产效率并降低压粘缺陷率以解决固体火箭发动机防热结构件粘接瓶颈问题。防热结构件智能压装粘接工艺流程如图1所示。

防热结构件智能压装粘接工作过程如图2所示。

1 系统存在的问题及难点

防热结构件压装粘接主要难点如下:

1) 涂胶量、涂胶均匀性无法精准控制:由于粘接用胶

收稿日期:2020-11-30; 修回日期:2020-12-08。

作者简介:王新德(1968-),男,陕西西安人,大学本科,研究员,主要从事固体火箭发动机测试技术方向的研究。

引用格式:王新德,包乐,王超,等.发动机防热结构件智能压粘机控制系统设计[J].计算机测量与控制,2021,29(2):108-115.

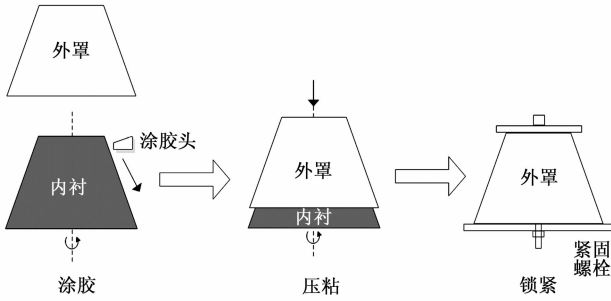


图 1 防热结构件智能压装粘接工艺流程图

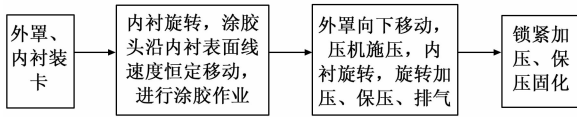


图 2 工作过程图

粘度大, 人工涂胶很难做到均匀、等量, 为了防止胶层覆盖不到的情况, 往往采用过量满图工艺, 胶量过多, 导致溢胶严重, 增加后期清理工作, 满图过程也很难做到涂层均匀, 压粘过程也不能保持涂层厚度均匀, 严重影响粘接质量及粘接效率。

2) 胶膜中气泡无法排尽: 现在采用机械压装粘接工艺, 施压过程没有压力和位移反馈, 很难做到压力精确控制, 加上不同工件采用的胶成分、组分不同, 物理特性也不同, 人工操作很难做到施压均匀、力值与位移匹配、无法将胶膜内气泡全部排出, 加之混合好的胶内也存在气泡, 导致一次粘接缺陷率较高, 生产效率低, 胶柱示意图见图 3。

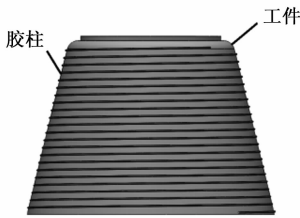


图 3 胶柱示意图

3) 锁紧压力无法精准控制: 现有锁紧方式均采用人工锁紧, 无法达到锁紧压力精准控制, 导致固化过程中胶膜厚度发生变化, 固化后无法保证壳体与内衬间的粘接力, 降低粘接成品率。

2 解决思路

针对上述存在的问题, 需要解决涂胶均匀控制、压粘过程压力控制保压排气、成型过程精确稳压技术。采取下述解决方案, 采用 x 、 y 轴运动控制过程中函数跟踪插补控制技术^[2], 保持涂胶头沿工件表面上下曲线运动, 同时工件主转轴以高度作为变量采用函数跟踪插补技术调节角速度, 保证涂胶头在工件表面涂胶过程中线速度相同; 采用预先检测实时跟踪补偿方法, 保持涂胶头与工件表面位移

相等实现涂胶均匀控制; 采用多窗口压力、位移匹配控制技术, 在窗口条件下进行保压旋转达到排气目的, 提高粘接质量; 采用比例调节技术, 进行工件的紧固, 精确控制固化成型压力。

3 系统总体设计

防热结构件智能压粘机控制系统主要由核心控制板、触摸屏及综合驱动采集卡组成, 如图 4 所示。核心控制板提供系统与触摸屏、综合驱动采集卡通讯接口, 并为控制软件及算法编制提供开发环境。综合驱动采集卡提供传感器输入接口及点胶阀、伺服电机等外界设备控制接口, 通过以太网与控制器进行通讯, 将现场设备状态传输至控制器, 并执行控制器发出的控制指令。

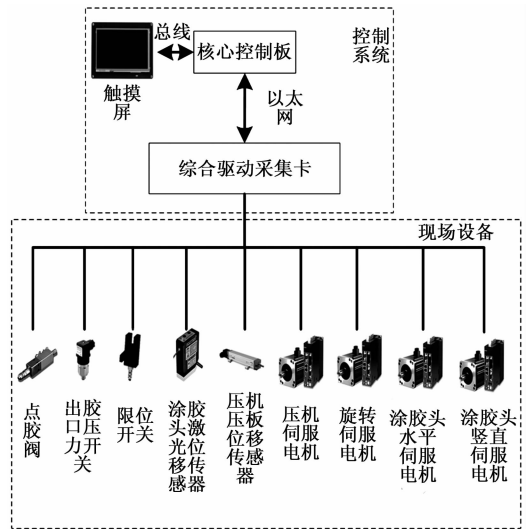


图 4 防热结构件智能压粘机控制系统示意结构图

4 系统硬件介绍

防热结构件压粘控制系统控制器主要用于涂胶头控制、压机多轴伺服控制、传感器接入以及点胶阀等设备开关控制。由于粘接工件外形的多样性, 控制器可进行多轴同步控制、多轴联动, 实现涂胶头空间直线、圆弧、曲线等运动控制。据此控制器具有强大的运算处理能力, 除能实现多轴直线插补、任意空间圆弧插补、螺旋插补及闭环控制^[3], 还能接受多品种复杂配方处理控制指令, 实现复杂的工艺制造过程的精确控制。

控制器主要包含: 核心控制板、触摸屏和综合数采驱动卡, 具体组成如图 5 所示。

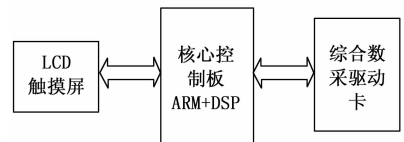


图 5 控制器结构图

控制器主要技术参数:

核心控制器: ARM + DSP; 主频: 微处理器子系统

(ARM) 1.5 GHz, 数字信号处理器 (DSP) 750 MHz, RAM: 2 G, ROM: 8 G;

LCD 显示系统: 7 寸, 分辨率 (1 024 × 600);

高速脉冲输出通道: 12 路, 脉冲速率: 5 MHz;

通用输入输出: 输入: 16 路, 输出: 16 路, 24 VDC, 通道均光电隔离;

ADDA 信号: AD: 6 路 0~10 V; DA: 4 路 0~10 V;

工作电源: 24 VDC, 功耗 < 15 W;

通信端口: Ethernet1, CAN 口 1, 485 口 1。

精度要求:

AD 输入信号转换精度 14 位, 数据采集精度 0.5%;

DA 输出信号转换精度 12 位。

4.1 核心控制板

核心控制板采用 ARM+DSP 双核处理器, 处理器选用 TI 公司 AM5718 双核处理器, 配备了 ARM Cortex - A15 内核、C66xDSP 内核、两个双核核可编程实时单元 (PRU)、两个 ARM Cortex - M4 内核以及视频/图形加速器。

控制软件软件运动逻辑控制和软件界面运行在 ARM (支持 Linux4.9.41 + QT5.6) 上, 数据处理算法由 DSP (TI-RTOS) 执行。运动逻辑控制 (带操作界面) 使用 Qt5 进行编程, 在 CCS7.0 下编写 DSP 进程运行的程序, 完成控制算法数据处理^[4-6]。

4.2 综合驱动采集卡

综合驱动采集卡主要为多轴伺服驱动及 IO 控制提供接口。

多轴伺服控制功能由 DSP 编程实现^[7-8]。其运动控制原理如图 6 所示。

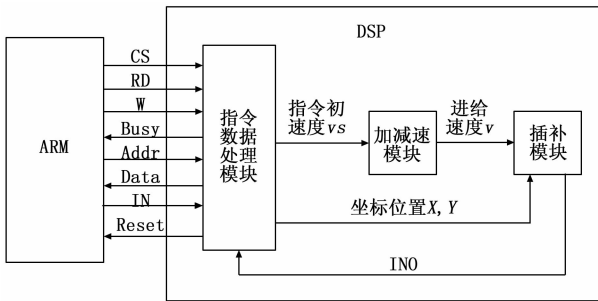


图 6 伺服运动控制原理图

控制器将控制参数发送给 ARM, 再传送到 DSP 计算, 由 DSP 控制输出脉冲和脉冲间延时, 通过高光耦合隔离后输出, 控制伺服电机运转。DSP 主要来实现指令和数据处理模块、加减速模块、插补功能模块等运动控制算法。

综合驱动采集卡还提供高精度的高精度模拟量输入信号接口及数字量输入输出信号接入。本系统模拟量信号主要为压粘机压力传感器 (经变送器输出)^[9]、压板位移传感器及涂胶头激光位移传感器^[10] 信号采集, 信号均为 0~10 V 电压信号, 采集精度: 12 位。数字量接口采用 GPIO 通用输入输出接口并经光电隔离后进行外部设备开关控制

及外部保护元器件的信号输入。其通道地址分配原理如图 7 所示。

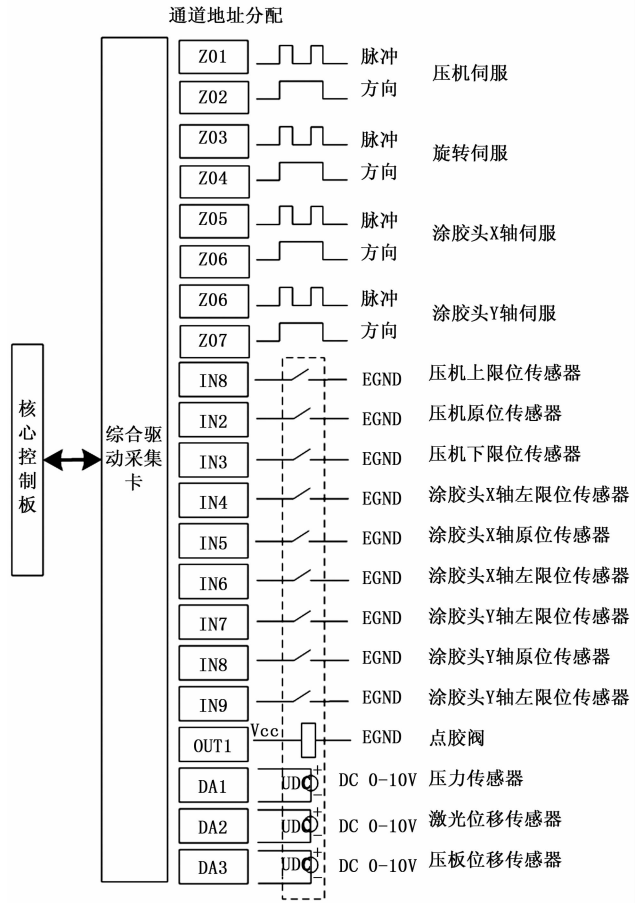


图 7 综合驱动采集卡通道地址分配原理图

5 软件功能及实现方法

隔热结构件智能压粘机控制系统软件主要针对粘接过程中涂胶 (包含涂胶量及涂胶均匀度)、压力控制保压排气、成型过程精准稳压三方面进行精准控制^[11]。

5.1 涂胶控制

涂胶过程控制主要进行涂胶量及涂胶均匀度的精确控制, 主要包含以下三方面内容, 如图 8 所示。

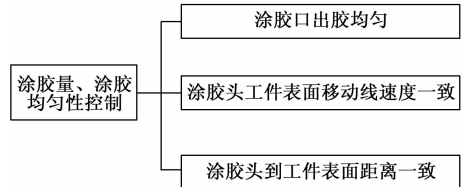


图 8 涂胶过程控制图

5.1.1 涂胶口出胶控制

涂胶枪压力稳定是保证出胶均匀的决定性条件。据此系统将涂胶枪压力接入控制器, 涂胶过程中实时监测涂胶枪压力, 并实时调整, 实现压力闭环控制, 确保涂胶枪均匀出胶。具体控制流程如图 9 所示。

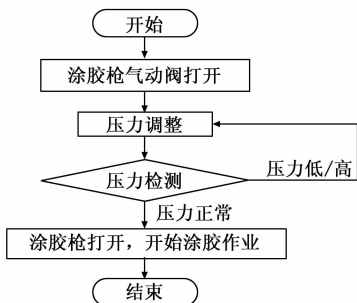


图 9 涂胶出口压力控制流程图

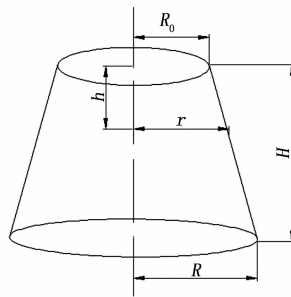


图 11 典型工件结构示意图

5.1.2 涂胶线速度控制

本控制系统通过工件旋转轴与涂胶头 X 轴 (横向)、Y 轴 (竖向) 移动, 实现涂胶头在工件表面移动, 如图 10 所示。涂胶头出胶均匀前提下, 保证涂胶头在工件表面移动线速度一致, 即可保证涂胶均匀性控制。

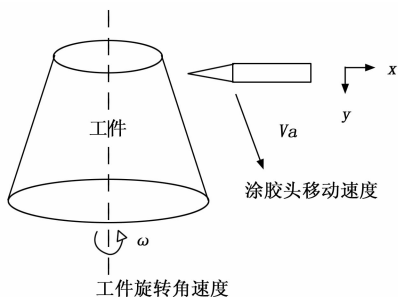


图 10 涂胶头运动示意图

1) 实现方法:

涂胶头沿工件表面曲面上下方向移动, 可以采用 x、y 轴同时跟踪工件表面函数进行插补控制方法实现, 同时还要对工件主转轴运动进行函数跟踪插补控制, 获得线速度匀速控制。

2) 典型工件涂胶主转轴运动控制算法:

以典型产品如图 10 所示的工件为例, y 轴跟踪函数 $y = kx$, x 轴跟踪函数 $x(t)$, 若 x 轴匀速运动, 则涂胶头移动速度 V_a 恒定。涂胶头移动速度 V_a 恒定的条件下, 根据涂胶头高度位置改变工件旋转轴角速度 ω , 可实现涂胶头在工件表面线速度恒定。旋转轴速度根据涂胶头高度位置及对应的工件直径等参数实时计算, 具体算法如下:

典型工件结构如图 11 所示。

主转轴运动控制算法如下:

为保证涂胶均匀, 在稳定供胶速度前提下, 保持涂胶头在工件外罩线速度恒定是关键, 涂胶面积计算公式如下:

$$\Delta S = \int_0^t v_a \cdot d_t \cdot \int_0^t v_b \cdot d_t = \int_0^t v_a \cdot v_b \cdot d_t$$

其中: v_a 为涂胶头给进速度; v_b 为涂胶头位置工作外罩线速度。

如图 11 可知, 若 ΔS 恒定则 $v_a \cdot v_b$ 为定值即可。

$$\text{设 } v_a \cdot v_b = M; v_b = \frac{2\pi r}{v_p} = \omega r; \frac{r - R_0}{R - R_0} = \frac{h}{H} \Rightarrow$$

$$r = \frac{R - R_0}{H} h + R_0 \tag{2}$$

v_p 为转速; ω 为角速度。

故:

$$v_b = \left(\frac{R - R_0}{H} \cdot \omega h + \omega R_0 \right) \tag{3}$$

结论: v_b 为定速, v_a 随 h 下降, 如 v_a 定值, 则:

$$\omega = \frac{1}{v_a} \cdot \frac{M}{\frac{R - R_0}{H} \cdot h + R_0} \tag{4}$$

涂胶头给定速度 v_a 为定值时, 要保证涂胶头线速度 v_b 恒定, 根据涂胶头实时位置高度计算出对应的旋转角速度 ω 即可, 此即为主转轴运动控制插补函数。

典型工件软件控制程序实现如下:

```
float absdis[2];
float roatedis = 180 * ZUNITANGLE; //首圈 180°可设置
float zspeed = UNITRAD / * 180 / π * / * roatesp / * 线速度
mm/s * //start / * 半径 * /;
setSpeed(ZAXIS, zspeed); //设置旋转轴速度
signalMove(ZAXIS, roatedis); //首圈涂胶
float curheigh = getPos(YAXIS) - totalStartHeigh;
float unitH;
float unitR;
float raduis = sraduis + curheigh * k; //高度对应的半径
float speed;
while(running()){
    fpos[XAXIS] = getPos(XAXIS);
    fpos[YAXIS] = getPos(YAXIS);
    curheigh = getPos(YAXIS) - totalStartHeigh; //获取当前
    高度
    HeighCalcRaduis(curheigh, &start, &unitH, &unitR);
    absdis[0] = unitR + fpos[XAXIS];
    absdis[1] = unitH + fpos[YAXIS];
    xyAxisMoveAbs(absdis); //胶头绝对位移
    raduis = sraduis + curheigh * k; //高度对应的半径
    zspeed = UNITRAD * roatesp / raduis; //线速度转化为角速度
    setSpeed(ZAXIS, zspeed); //改变角速度, 保证涂胶线速度
    不变
    speed = 1 / (2 * PI * start / roatesp) * (unitArea / roatesp);
    setSpeed(XAXIS, speed); //胶头速度
    signalMove(ZAXIS, 1); //顺时针旋转 }
```

3) 其他曲面工件涂胶主转轴运动控制

对于其他曲面的工件, 存在曲线 y 轴跟踪函数 $y = f_1(x)$, 如图 12 所示。

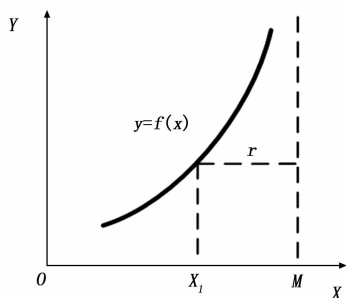


图 12 任意函数曲线图

X 轴跟随函数 $x(t)$ 。

主转轴旋转速度与半径相关, 其中半径 $r = M - x_1$ (M 为工件轴心 X 轴坐标点), 故存在跟踪函数高度:

$$h = f_2(x) \quad (5)$$

涂胶头速度恒定时, 角速度 ω 与高度 h 存在函数关系:

$$\omega = f_3(h) \quad (6)$$

由式 (5)、(6) 可计算出旋转轴角速度与 x 轴速度关系 $\omega = f_4(x)$;

故其他曲面的工件也可通过此方法插补跟踪函数运动控制获的匀线速度涂胶。

4) 模拟测试结果:

搭建模拟测试系统: 系统基于 LabVIEW 开发编程, 搭载脉冲及 IO 信号采集卡进行伺服控制及保护信号采集, 对耐热结构件智能压粘机控制系统进行模拟测试, 测试系统结构如图 13 所示。

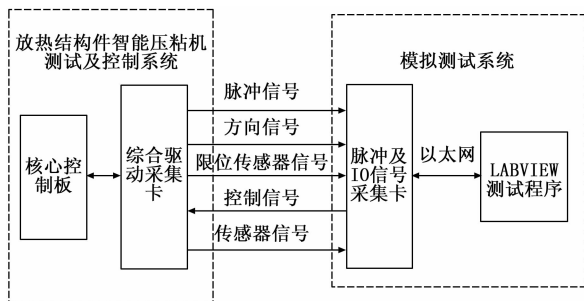


图 13 模拟测试系统结构示意图

此控制算法在实际典型圆台形工件模拟测试中涂胶头运动曲线如图 14 所示。

经计算, 图 14 中涂胶头实际运动曲线斜率 $K_{实际}$ 与工件外表面斜率 $K_{理论}$ 相同, 均为 4.35, 满足控制系统要求。

此控制算法在实际典型圆台形工件模拟测试中涂胶头线速度曲线如图 15 所示。

由图 14 可知, 涂胶头实际运行线速度波动小于 0.5%, 控制精度高, 线速度保持恒定, 满足控制系统要求。

5.1.3 涂胶头与工件作业表面高度检测与控制

由于耐热结构件的外壳和内衬在加工过程中存在应力,

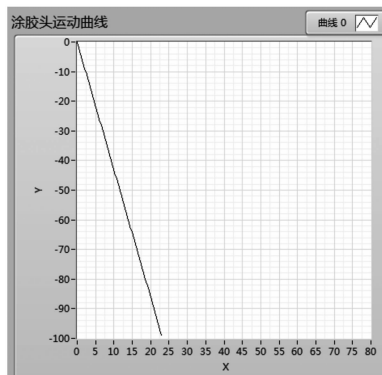


图 14 涂胶头实际运动曲线

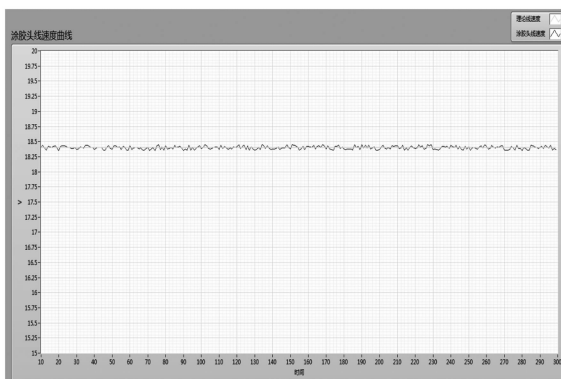


图 15 涂胶头实际线速度曲线

加工完成后会产生局部形变; 加之检测装置的安装误差、工装误差等综合因素, 则导致工件旋转过程中作业点的表面会产生凹凸变化, 因此造成涂胶头与作业面的距离频繁变化, 即使在涂胶头线速度恒定的条件下也无法保证均匀涂胶。

据此涂胶头上安装激光位移传感器, 对涂胶对应点高度进行实时测量并反馈至控制器, 控制器控制涂胶头 X 轴方向伺服对涂胶头高度进行调整, 实现涂胶头高度闭环控制, 保持涂胶头与工件表面位置始终保持一致, 具体结构如图 16 所示。

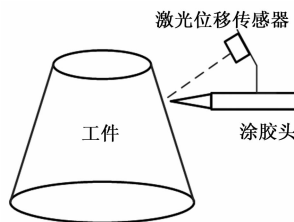


图 16 激光位移传感器结构示意图

涂胶头高度控制过程中, 传感器先将高度测量值并传至控制器, 控制器再控制涂胶头移动调整高度, 但此时涂胶头对应位置已偏离原测量点, 因此将传感器与涂胶头安装至同一水平高度, 两者间弧长为 L , 并采用预先测量高度, 高度实时跟踪补偿调整控制方式, 进行涂胶头工作高度精准控制。

1) 涂胶头与作业面高度控制方法:

如图 17 所示, 传感器布置至涂胶头同一高度运行方向后侧, 涂胶点 a_0 与传感器测试点 a_5 夹角为 θ , 对应工件弧长为 L 。为保证控制精度, 将弧长 L 均分为 5 段, 测试点 $a_0 \sim a_5$ 依次经过传感器时, 对其各对应点高度进行测量并将各对应点需调整高度值 h_{a_i} (测量高度 $H_{a_{测}}$ 与标准高度 $H_{a_{标}}$ 差值) 写入对应寄存器, 当 a_0 点移动至涂胶头位置时, 对应调整高度即为 h_{a_0} ; 当涂胶头再移动 $L/5$ 弧长时, 将 h_{a_0} 值移出, 其他数值依次左移, 将 h_{a_1} 点写入寄存器第一位, 此值即为涂胶头当前调整值, 如图 18 所示, 重复移位操作。

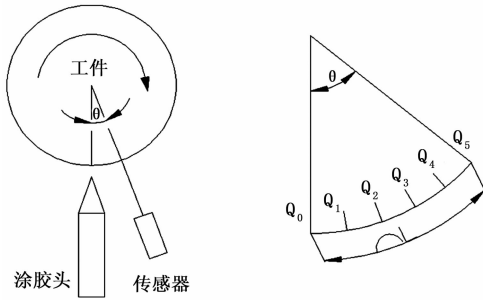


图 17 涂胶头高度控制原理图

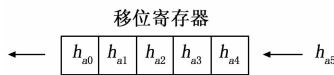


图 18 移位寄存器原理图

引入移位寄存器, 在涂胶头由 a_0 点到 a_1 点的移动过程中进行涂胶头高度调整, 到达 a_1 点时涂胶头对应的高度既是测量时需调整的准确高度。

弧长 L 的细分数可涂胶头运行线速度及高度调整时间进行计算, 满足高度调整时间的前提下, 尽可能进行多的细分, 以提高计算精度。

涂胶头高度调整软件控制程序如下:

```
const LEN = 10 '存取长度
const RADIS = 20 '弧长
dim adisarr(LEN)
dim DIS '工作高度
DIS = 45
const L = RADIS/LEN '转动弧长 L 进行调整
local cnt
local n
local changle
local cntchange
change = L/raduis * UNITRAD '转动角度
local changedis 'XAXIS 微调距离
local startangle '起始角度
startangle = abs(mpos(ZAXIS)/ZUNITANGLE)
while true
cntchange = startangle + change * cnt
if abs(mpos(ZAXIS)/ZUNITANGLE) > cntchange then
```

```
changedis = adisarr(0) '取出第一个值作为调整高度
base(XAXIS)
move(changedis) '微调高度
ad0 = AIN(0) * 10/4096 '获取激光模拟量输入
adis = 50 - (ad0 - 2.5) / 2.5 * 15 - DIS '微调高度
local i
for i = 0 to LEN - 2
adisarr(i) = adisarr(i+1)
next
adisarr(LEN-1) = adis '将新测量的值存入到数组
cnt = cnt + 1
endif
Wend
```

2) 模拟测试结果:

在基于 LabVIEW 开发模拟测试系统中进行涂胶头高度控制模拟测试: 涂胶头标准高度设定为 40 mm (传感器至工件表面距离), 涂胶头实际高度曲线如图 19 所示。

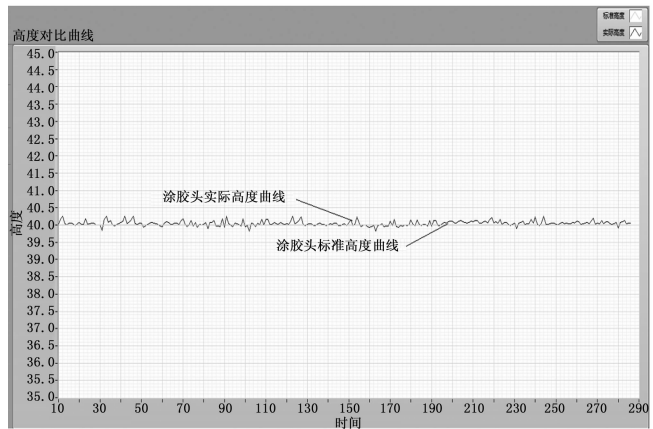


图 19 涂胶头实际高度变化曲线

由图 19 可知, 涂胶头实际高度与标准高度最大差值为 0.26 mm, 满足涂胶高度控制要求。

5.2 压力控制保压排气

压力控制系统按照粘接压力工艺曲线并采用多级加压及旋转加压方式, 设定多个压力台阶, 每个台阶进行旋转加压并保压, 将胶膜内气泡排出的同时, 并保证胶膜厚度均匀。

除多级加压及旋转加压控制外, 压力值精准控制是确保粘接压力按照工艺曲线控制的先决条件。

5.2.1 压力精准控制前提下旋转施压控制

压力精准控制通过控制器控制伺服压力机进行力值输出, 伺服压力机压力传感器将实际力值信号反馈至控制器, 与目标力值进行比较, 形成压力系统闭环控制, 从而达到压力的精准控制^[12]。

压力加载机构原理如图 20 所示。

压力控制通过控制器轴输出接口进行伺服压力器伺服电机控制, 控制器轴输出端口采用高速脉冲输出接口, 可将力值区间尽可能小的进行划分, 确保压力输出精度; 并

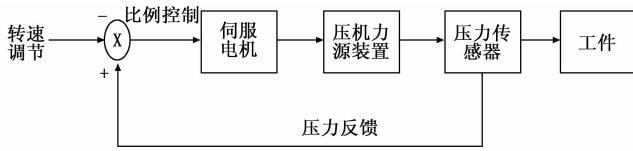


图 20 压力加载机构原理图

采用多段速输出控制，设置多个力值加载速度区间，当越接近目标力值，减缓力值增大（或减小）速度，保证加载效率的同时，提高压力加载精度。

5.2.2 压力、位移匹配多窗口控制

发动机防热结构件内衬与外罩粘接压装过程压力需满足工艺曲线要求，此方案设计的压装系统可实现压力的精细化控制外，并能够将粘接压力要求的工艺参数写入控制器（如图 21 所示），系统按照规定加压工艺曲线进行压粘控制，多级加压、保压，同时旋转施压，将内衬与外罩见胶膜内的气泡挤出，保证粘接的成品率，如表 1 所示。

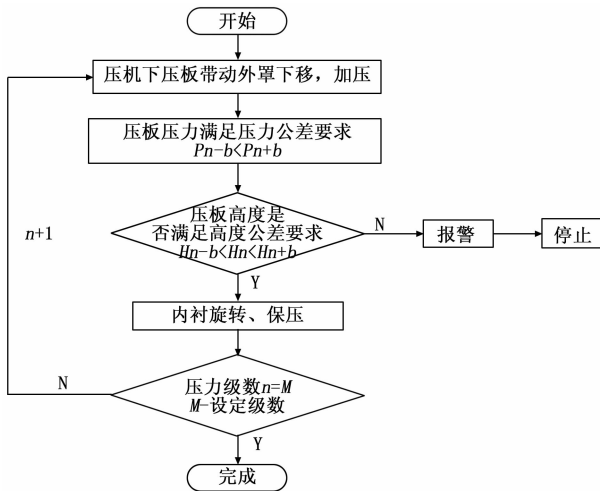


图 21 多级加压、旋转施压控制流程图

表 1 多级加压、旋转施压参数表

序号	压力/N	保压时间/s	旋转角度/(°)
1	100	60	1 080
2	200	60	1 080
3	300	60	1 080
4	400	60	1 080
5	500	60	1 080

系统为更加精确地保证压粘工艺，配置高精度压力传感器及压板位移传感器，施压过程中实时监测粘接压力及下压板位移，同时引入压力、位移匹配多公差窗口控制，每个公差窗口包含各级压力公差及对应的位移公差，通过控制多次设计压粘过程中公差窗口和保持压力时间。发生任何一种不符合公差窗口设置参数的状况，压粘机可立即停止并保护设备和零件不受损害，并通过控制系统发生报警信号。

多级加压、旋转施压控制流程如图 21 所示。

压粘过程中多级加压、旋转施压控制程序如下：

```

while(running())
{
    /* 获取 AD0 通道模拟电压值 */
    ad0 = getAI(0) * 10.0/4096;
    ad0 *= AD; /* 模拟量跟压力的转换关系 */
    /* 检测 5 个压力窗口曲线 */
    for(int i = 0; i < size; i++){
        /* 接近加压点减速加压 */
        if(ad0 > pressParam.at(i).downPress * 0.7
        && ad0 < pressParam.at(i).upPress){
            float speed = getSpeed(VAXIS);
            if(getSpeed(VAXIS) > 1) setSpeed(VAXIS, speed/2); //变速
        }
        if(ad0 > pressParam.at(i).downPress
        && ad0 < pressParam.at(i).upPress){
            /* 停止下降 */
            stopAxis(VAXIS);
            /* 停止旋转 */
            stopAxis(ZAXIS);
            /* 保压 */
            delay(pressParam.at(i).stime);
            /* 压机继续下降加压 */
            SignalMove(VAXIS, 1);
            SignalMove(ZAXIS, 1);
            break;
        }
        /* 加到最大下限压力,停止加压 */
        if(ad0 > pressParam.at(size-1).downPress){
            stopAllAxis();
            SetRunFlag(false);
        }
    }
}
    
```

5.3 成型过程精确稳压控制

成型过程精确稳压控制通过配置电动拧紧装置进行压粘成型后锁紧保压作业，电动拧紧装置按照程序设定来执行拧紧螺丝动作，彻底替代人工作业。

成型过程精确稳压控制原理如图 22 所示。

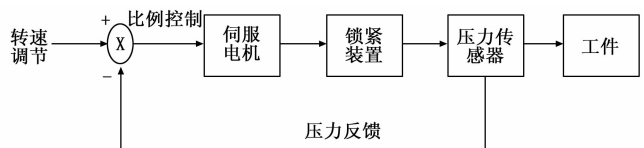


图 22 成型过程精确稳压控制原理图

控制器通过轴输出接口进行锁紧机构伺服电机转速控制，并实时接收锁紧过程中压机压力传感器力值进行所伺服电机转速调节，当力值小于锁紧设定力值（ $F < 10\text{ N}$ ）时，停止锁紧作业。锁紧过程中同时监测锁紧装置扭矩传感器扭矩值，防止锁紧螺栓与螺母不正而导致扭矩过大，造成设备及工件的损坏。

成型过程精确稳压控制流程如图 23 所示。

与之前手动涂胶压粘相比, 溢胶率最多可减少 89.6%。

表 4 一次粘接合格率对比表

序号	任务编号	工件型号	加工数量/个	合格率/%	
				现有控制系统	原有手工操作
1	2020-1009-001	***-I 型	10	100	70
2	2020-1009-002	***-II 型	20	95	80
3	2020-1012-001	***-I 型	20	90	75
4	2020-1012-002	***-II 型	20	100	80

与之前手动涂胶压粘相比, 一次粘接合格率提高 25%。

7 结束语

通过现有固体火箭发动机防热结构件智能压粘机与原有手动涂胶压粘方式在生产实际应用中相比, 整体压粘效率、一次粘接成品率有了显著提高、溢胶率大幅降低; 同时减少了人工干预, 自动化水平大幅提升, 满足生产工艺要求, 可广泛应用于发动机防热结构件智能压粘粘接作业。

参考文献:

- [1] 史宏斌, 钟伟芳. 含粘接缺陷固体发动机喷管堵盖受压分析 [J]. 推进技术, 1998 (4): 74-77.
- [2] 胡锦涛, 郭庆, 陈尚松. 一种基于二维运动系统的匀速插补算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010 (8): 133-135.
- [3] 李波, 黄伟志, 王太勇. 基于多轴运动控制器的开放式数控系统研究 [J]. 精密制造与自动化, 2003 (B09): 116-118.
- [4] 董晓威, 曹雪, 富宏亚. ARM+DSP 结构设计与实现 [J]. 自动化技术与应用, 2012 (5): 31-33.
- [5] 刘斌, 李仲阳. ARM+DSP 双核系统的通信接口设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005 (5): 22-24.
- [6] 陆文周. QT5 开发及实例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [7] 贾佳, 曹树坤. 基于 DSP 的多轴运动控制器研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2012 (4): 8-9.
- [8] 高梅, 王忠庆. 基于 DSP 的交流伺服电机控制系统的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2009 (5): 88-92.
- [9] 周静, 田文鹤. 压力传感器信号调理模块的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (1): 11-21.
- [10] 王世峰, 赵馨, 佟首峰, 等. 激光位移传感器数据采集技术 [J]. 微计算机信息, 2008 (4): 137-139.
- [11] 刘志伟, 熊长炜, 梅阳寒, 等. 双轨迹同步控制快速涂胶系统的设计 [J]. 机电工程, 2017 (8): 901-905.
- [12] 冯雪峰. 伺服压力机数控系统的设计与实现 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 张玉清, 王晓菲, 刘雪峰, 等. 云计算环境安全综述 [J]. 软件学报, 2016, 27 (6): 1328-1348.
- [14] Cao Q, Shen H W, Gao J H, et al. Popularity prediction on social platforms with coupled graph neural networks [A]. Proceedings of the 13th International Conference on Web Search and Data Mining [C]. Houston, Texas, UAS, 2020: 70-78.
- [15] Raff E, Sylvester J, Nicholas C. Learning the PE header, malware detection with minimal domain knowledge [A]. Proceedings of the 10th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security [C]. New York: ACM, 2017: 121-132.

6 验证与结果评价

本控制系统已进行防热结构件压粘实际生产应用, 分别对 10 月 9 日和 10 月 12 日进行的 ***-I 型及 ***-II 型产品粘接时间、溢胶率进行抽样、汇总, 并进行粘接质量缺陷检测, 与原有手工操作对比结果如表 2~4 所示。

表 2 加工时间对比表

序号	任务编号	工件型号	加工数量/个	加工时间/min	
				现有控制系统	原有手工操作
1	2020-1009-001	***-I 型	10	68	170
2	2020-1009-002	***-II 型	20	162	360
3	2020-1012-001	***-I 型	20	112	320
4	2020-1012-002	***-II 型	20	152	380

与之前手动涂胶压粘相比, 加工时间最长缩短约 65%。

表 3 溢胶率对比表

序号	任务编号	工件型号	加工数量/个	平均溢胶率/%	
				现有控制系统	原有手工操作
1	2020-1009-001	***-I 型	10	5.1	48
2	2020-1009-002	***-II 型	20	3.6	35
3	2020-1012-001	***-I 型	20	3.5	32
4	2020-1012-002	***-II 型	20	4.8	46

(上接第 107 页)

- [10] Akbanov M, Vassilakis V G, Logothetis M D. Ransom ware detection and mitigation using software - defined networking: The case of WannaCry [J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 76: 111-121.
- [11] 王晓妮, 段群. 基于云计算的数据安全风险及防御策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 199-202.
- [12] 徐艳, 王茜. 网络计算环境下大容量数据安全存储策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 147-150.
- [13] 张玉清, 王晓菲, 刘雪峰, 等. 云计算环境安全综述 [J].

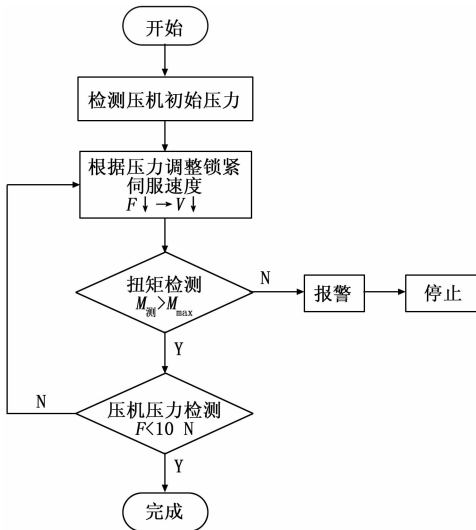


图 23 成型过程精确稳压控制流程图