



*****国家科技重大专项

低温贮箱绝热层柔性磨削末端执行机构设计与磨削工艺研究

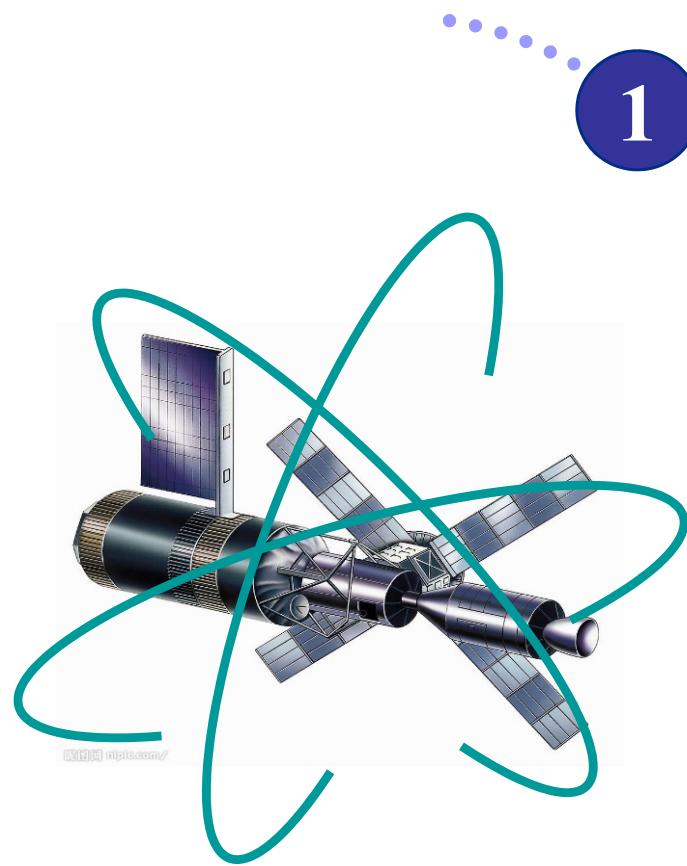
陶正瑞

上海交通大学机械与动力工程学院 | 制造技术与装备自动化研究所

2017年08月06日

联系地址：上海市闵行区东川路800号机械楼B楼312室，邮编：200240

电话：+86-21-3420-6804；传真：+86-21-3420-6317；邮箱：taozhengrui@sjtu.edu.cn

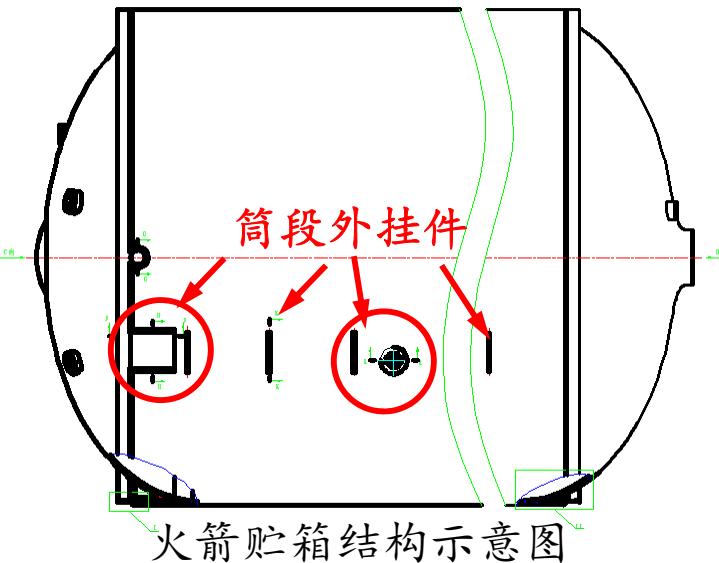


- 1 项目背景及需求
- 2 贮箱筒段打磨自动化工具设计
- 3 绝热层材料切削专用刀具设计
- 4 电涡流传感器测距标定试验
- 5 遇到的问题和拟采取的解决措施



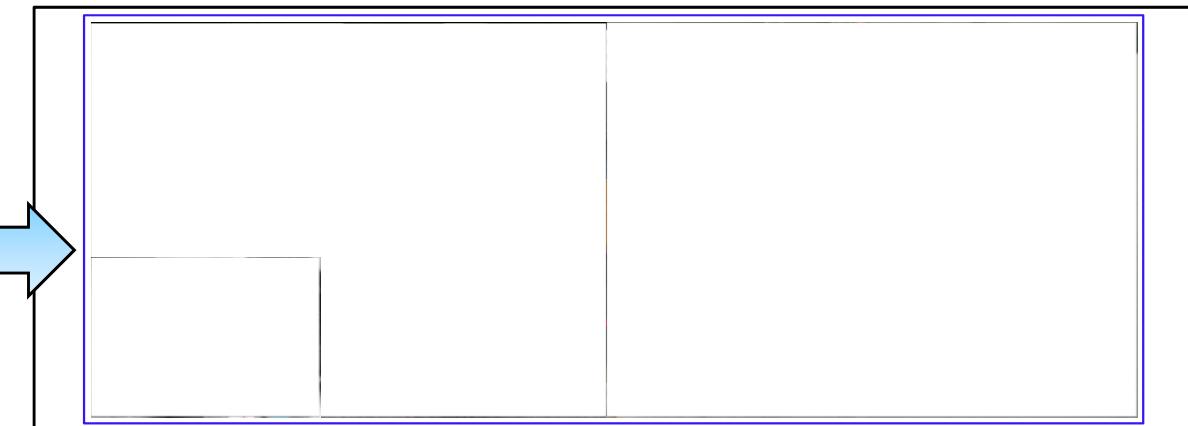
项目背景及需求

运载火箭贮箱种类多、结构复杂、尺寸跨度大：如CZ-5液氧箱直径为3350mm，筒段总长10614mm；CZ-6一级液氧箱直径为3350mm，筒段总长5386mm；CZ-6二级贮箱直径为2250mm，筒段总长5517mm；XX-6A液氧贮箱直径为3350mm，筒段总长为17000mm。



运载火箭低温贮箱筒段半自动喷涂

- 采用手工或半自动方式喷涂，绝热层厚度难以控制，厚薄不均；
- 半自动打磨时，由于贮箱圆度较差、打磨支臂刚性不足等原因，最终打磨厚度偏差较大。



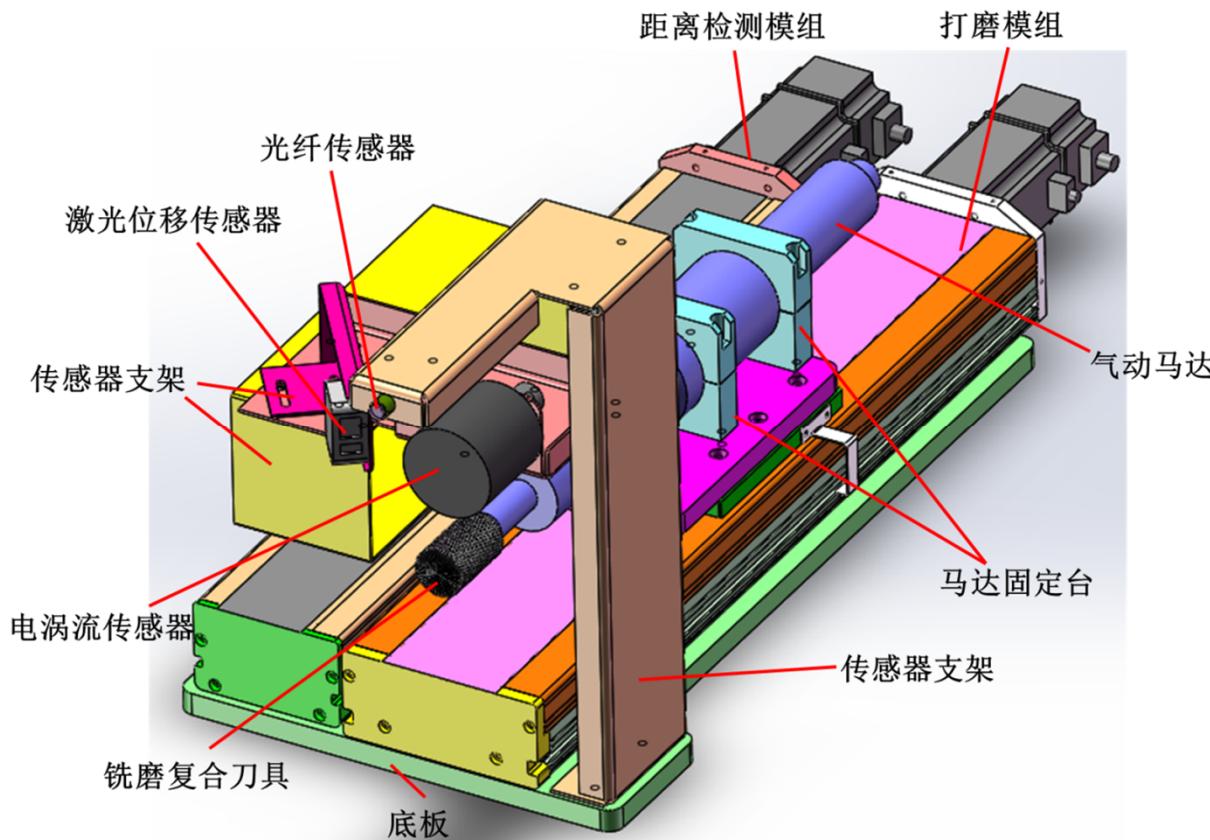
运载火箭低温贮箱筒段半自动打磨



贮箱筒段打磨自动化工具-机械结构设计

聚氨酯贮箱筒段圆柱面打磨过程需要同时具备实时测厚、自动切磨、随动吸尘及外挂件障碍规避等功能。

贮箱筒段打磨末端执行器结构图



其结构包括刀具控制系统（铣磨复合刀具、气动马达）、实时测厚系统（电涡流传感器和激光位移传感器）、避障系统（光纤传感器）、控制系统、固定支架等。

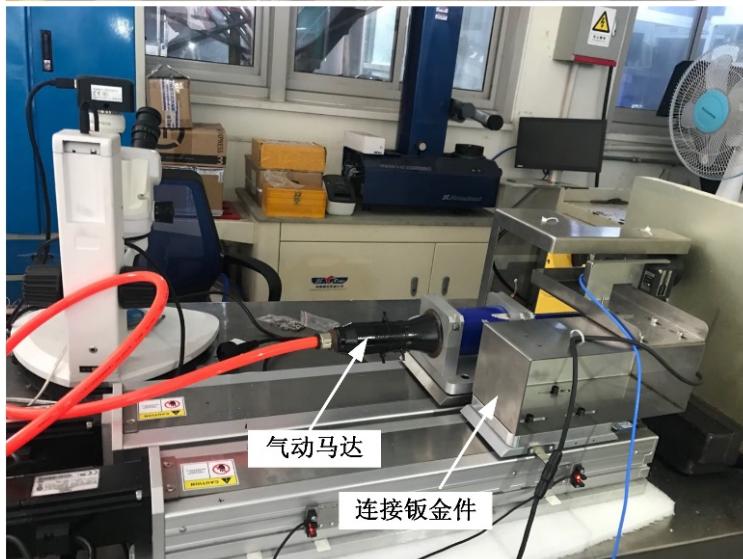
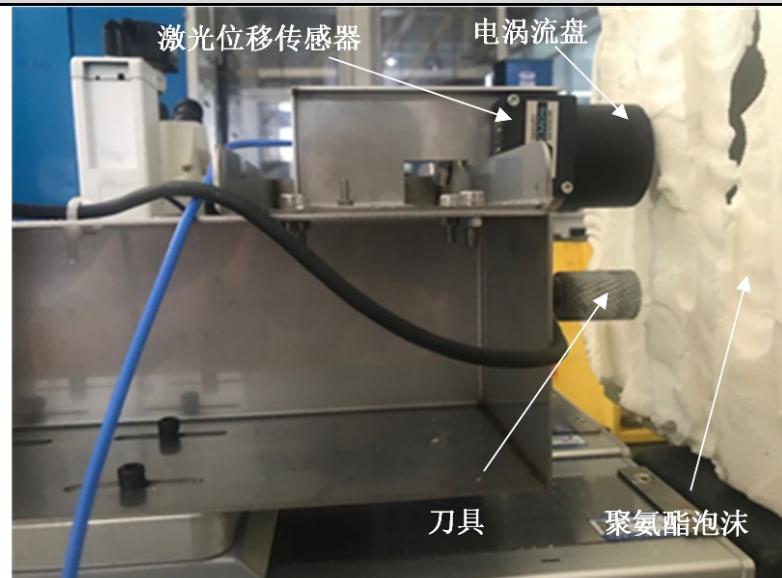
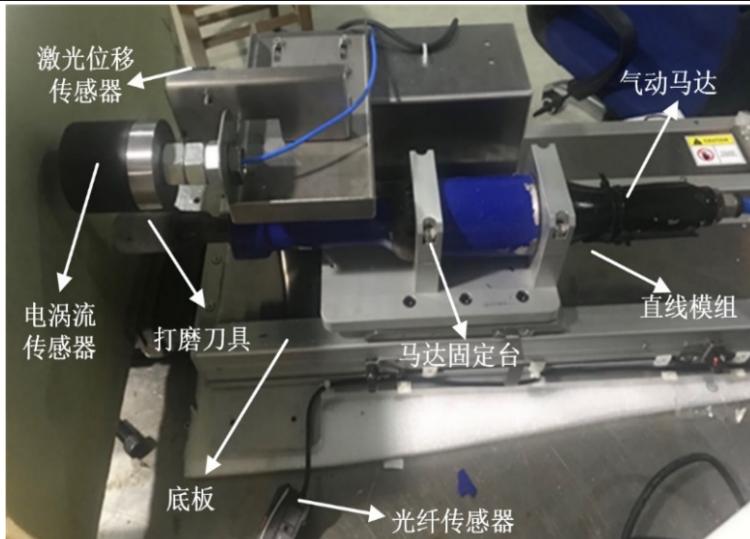
打磨刀具由气动马达和直线模组分别控制其转速及轴向进给；电涡流传感器和激光位移传感器协同测距在一起，由直线模组控制轴向进给实现传感器量程和工况条件匹配。

光纤传感器通过测距来检测障碍物，并通过伺服电机控制打磨模组和距离检测模组后退到待机位置，实现整个打磨末端的避障。



贮箱筒段打磨自动化工具-机械结构设计

贮箱筒段打磨末端执行器样机实物图





贮箱筒段打磨自动化工具-机械结构设计

贮箱筒段打磨末端执行器主要设备清单

搭建样机实际
总重为61 kg, 严重
超重

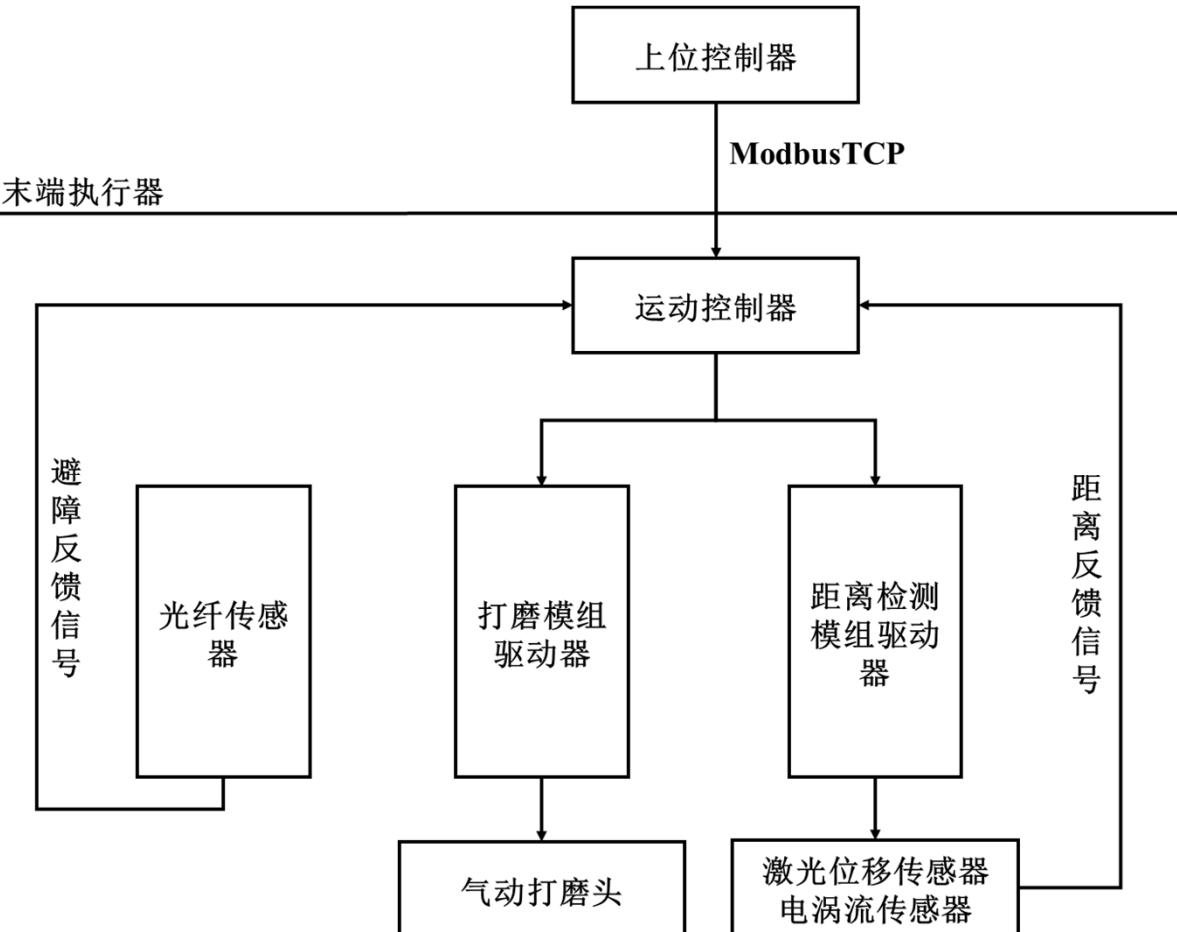
序号	部件	规格参数	重量(kg)	厂家	序号	部件	规格参数	重量(kg)	厂家
1	气动主轴	Z80 尺寸: φ80*310 重量: 6kg 功率: 4.6kw 刀具更换: 气动, HSK E25 刀具夹持上限: 10mm	4	上海灵远代理德国 Sycotec(K AVO)	5	激光位移传感器	OMRON ZX2-LD100 测量中心距离:100mm 量程:70mm(-35mm~+35mm) 分辨率:5μm 光斑直径:110μm 线性度:±0.1%F.S. (65~100mm) ±0.15%F.S. (全范围) 工作温度:0~50°C 尺寸:47.5*35.5*22.8	0.2	欧姆龙自动化有限公司
2	刀具		1	自主设计与定制	6	电涡流传感器	RP6660 量程:4~40mm 灵敏度:0.32mA/mm 精度:<2%量程 盘径:35mm 工作温度:-35°C~185°C	0.5	上海东太传感科技
3	轴向进给直线电机	星纳特 XNTD10-100-BR-100W带刹车 额定转速:3000 rpm 电机功率:100w 丝杆导程:10mm 模组尺寸 (L×W×H) :400 mm×108 mm×78.5 mm	10	东莞市星纳特机械设备科技有限公司	7	光纤传感器	光纤单元:OMRON E32-LD11R 光纤放大器:OMRON E3NX-FA11 响应时间:动作、复位各30μs	0.3	欧姆龙自动化有限公司
		星纳特 XNTD14-100-BR-400W带刹车 额定转速:3000 rpm 电机功率:400w 丝杆导程:10mm 模组尺寸 (L×W×H) :432*135*91	10						
4	固定架	铝合金结构壳体	20	自主设计与定制	8	控制系统	施耐德 LMC058 系列运动控制器 施耐德 Lexium23 系列伺服驱动器两套	不计	苏州朱卫忠



贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

自动打磨控制系统集成度较高，本控制系统配备的运动控制器通过现场总线实现各轴同步和协调运动，通过以太网 Modbus TCP 通讯接口与上位控制器通讯。

控制系统整体结构框图



控制系统硬件由运动控制器、电机驱动器、触摸屏、继电器开关、传感器部分、直线模组、通讯部分等组成

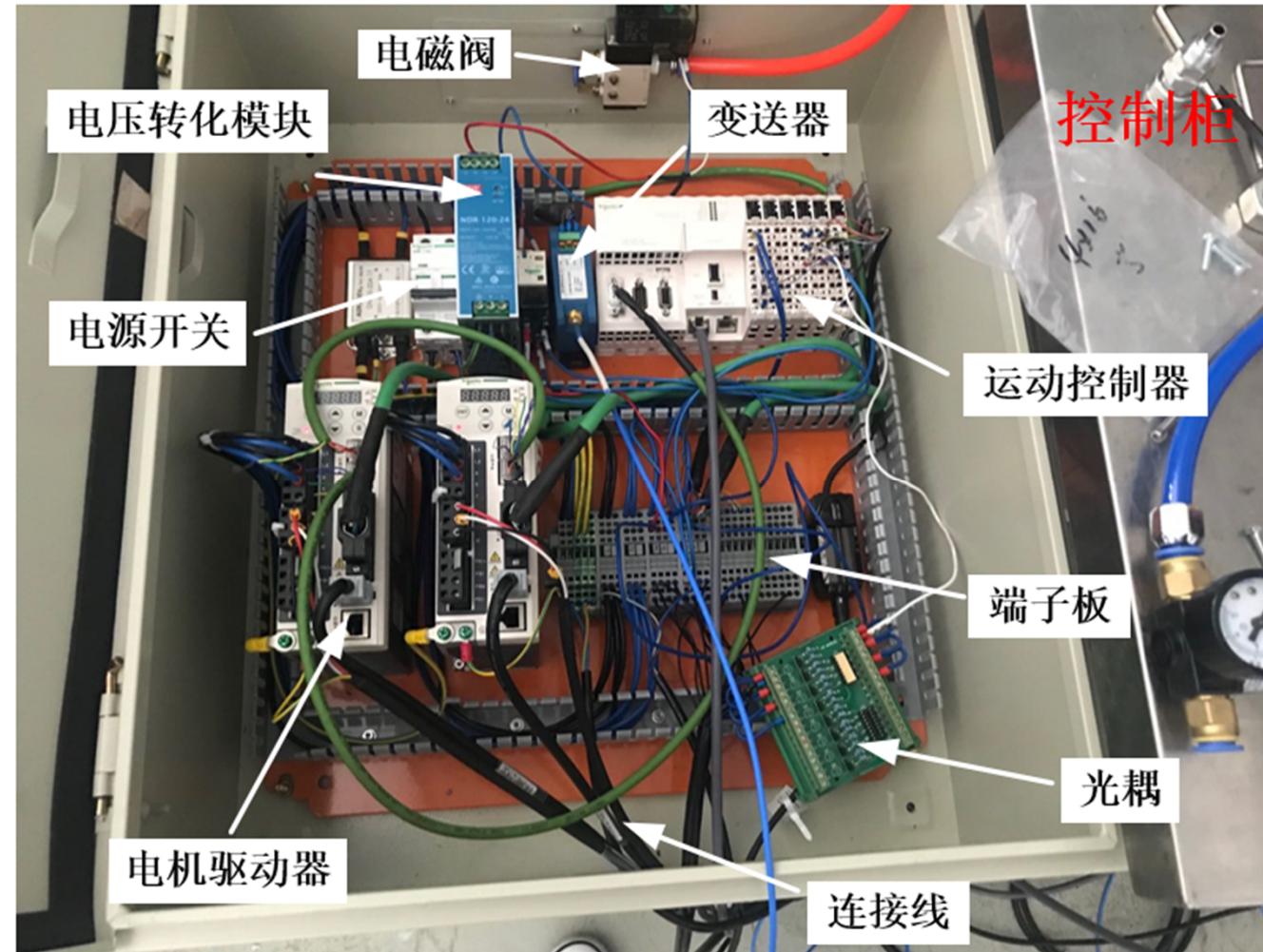
运动控制器从上位控制器接收到打磨工作指令，控制打磨模组、距离检测模组的协同运动，主要负责解析指令、计算、判断、分派等工作。

传感器信号直接由运动控制器读取，包括距离反馈信号、避障反馈信号以及电机驱动器上传的位置、速度信号



贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

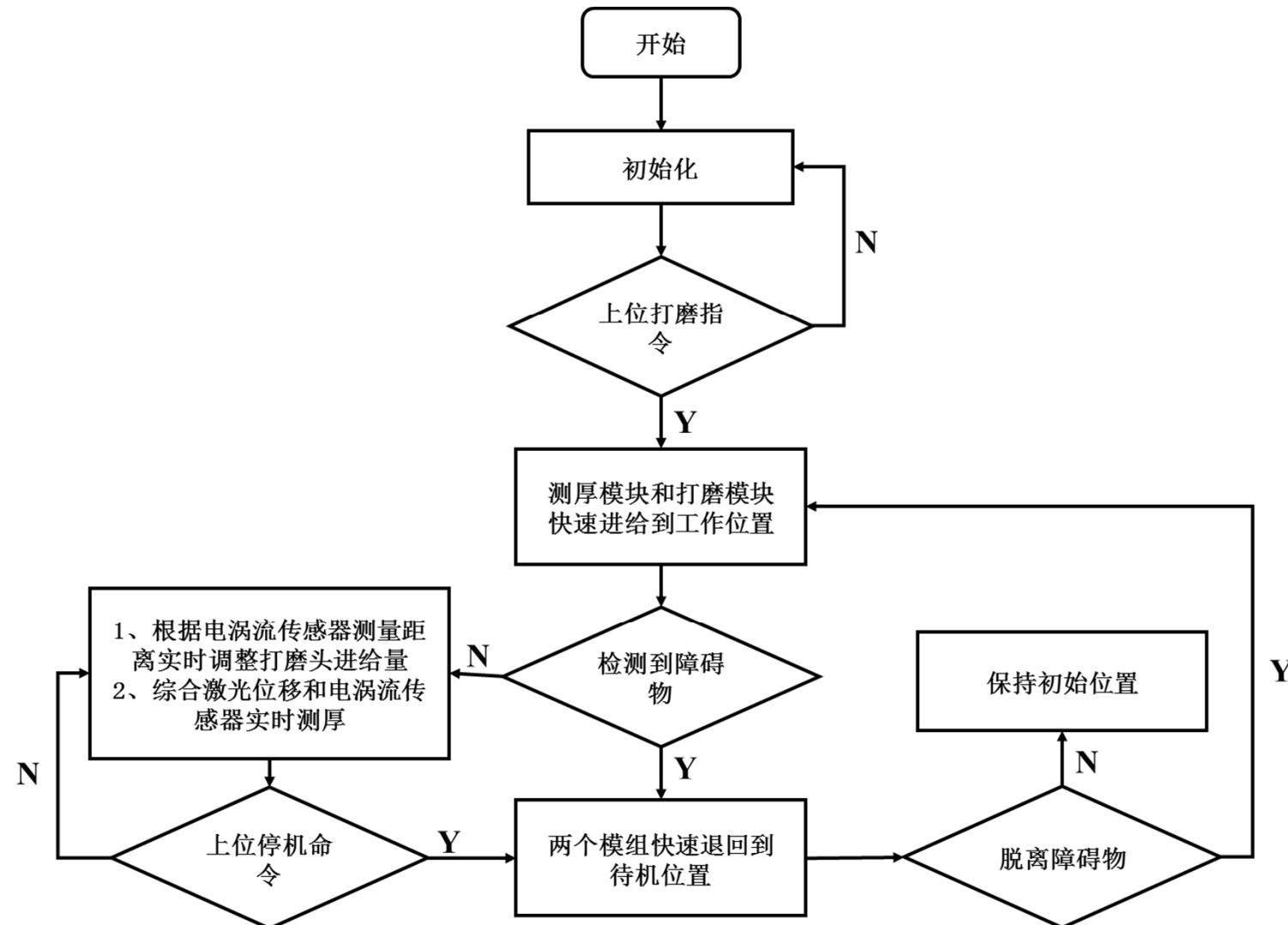
贮箱筒段打磨末端执行器控制柜





贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

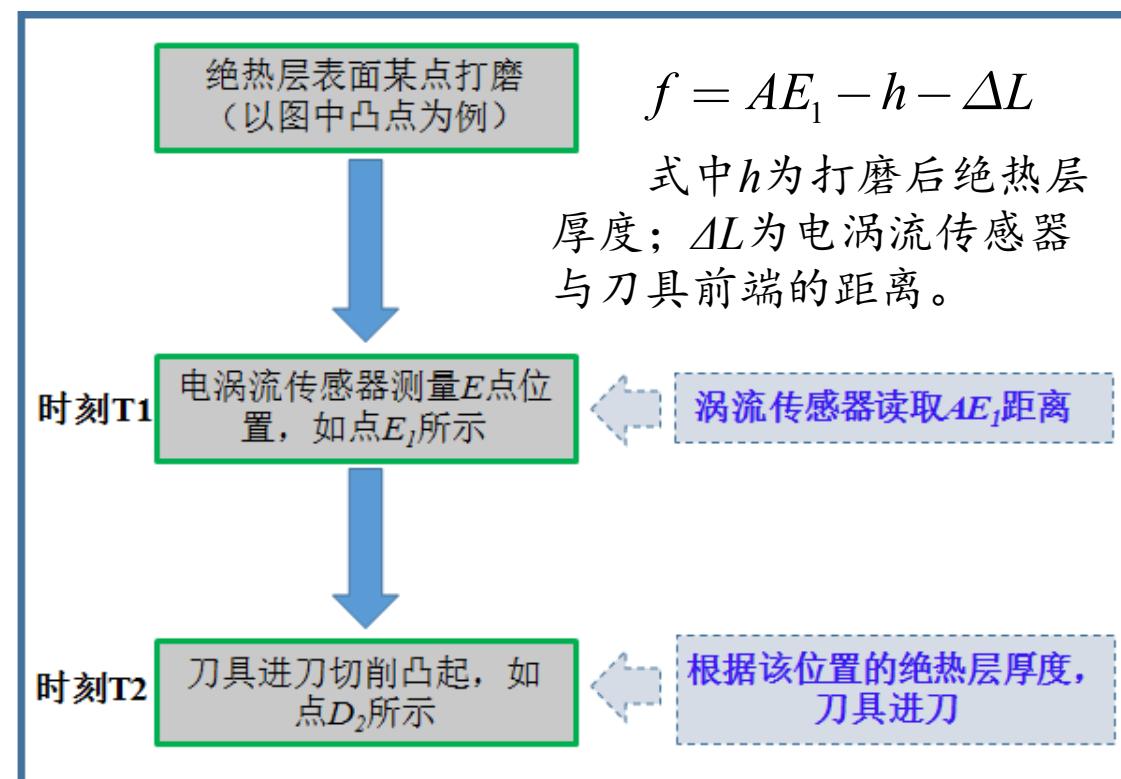
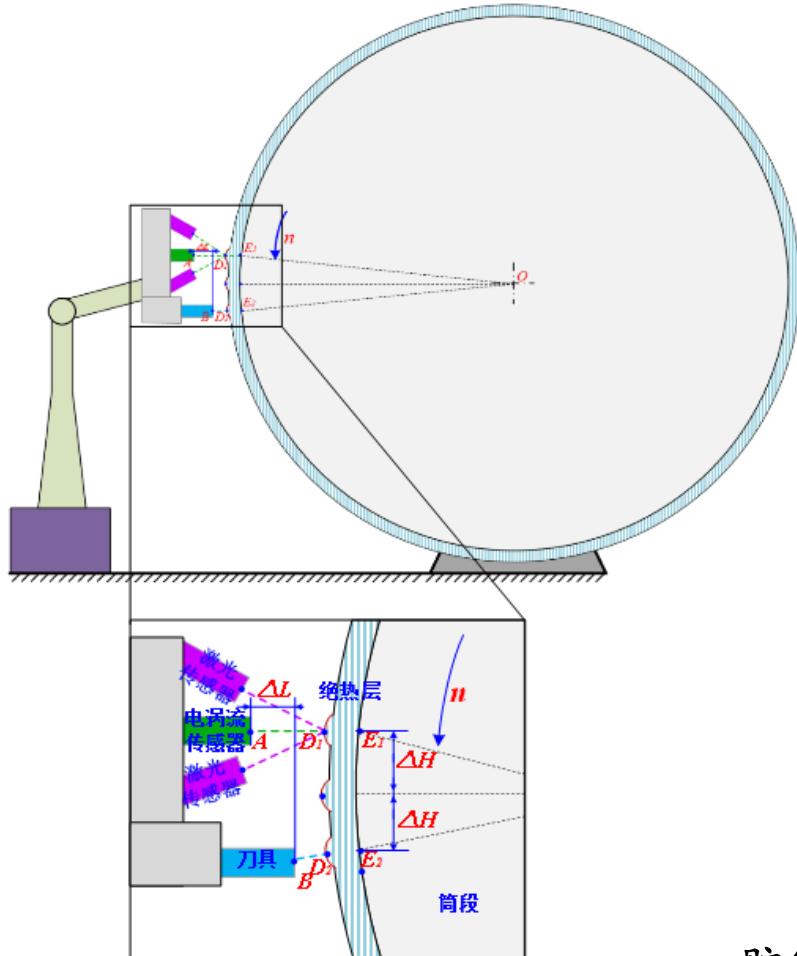
控制系统软件流程图





贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

采用打磨刀具与传感器自动化协同工作的“三点一线”走刀模式：测厚系统、铣磨复合刀具与筒段切线点位于同一直线上，在边测量边打磨的模式下走刀时，刀具轨迹与该直线共线。

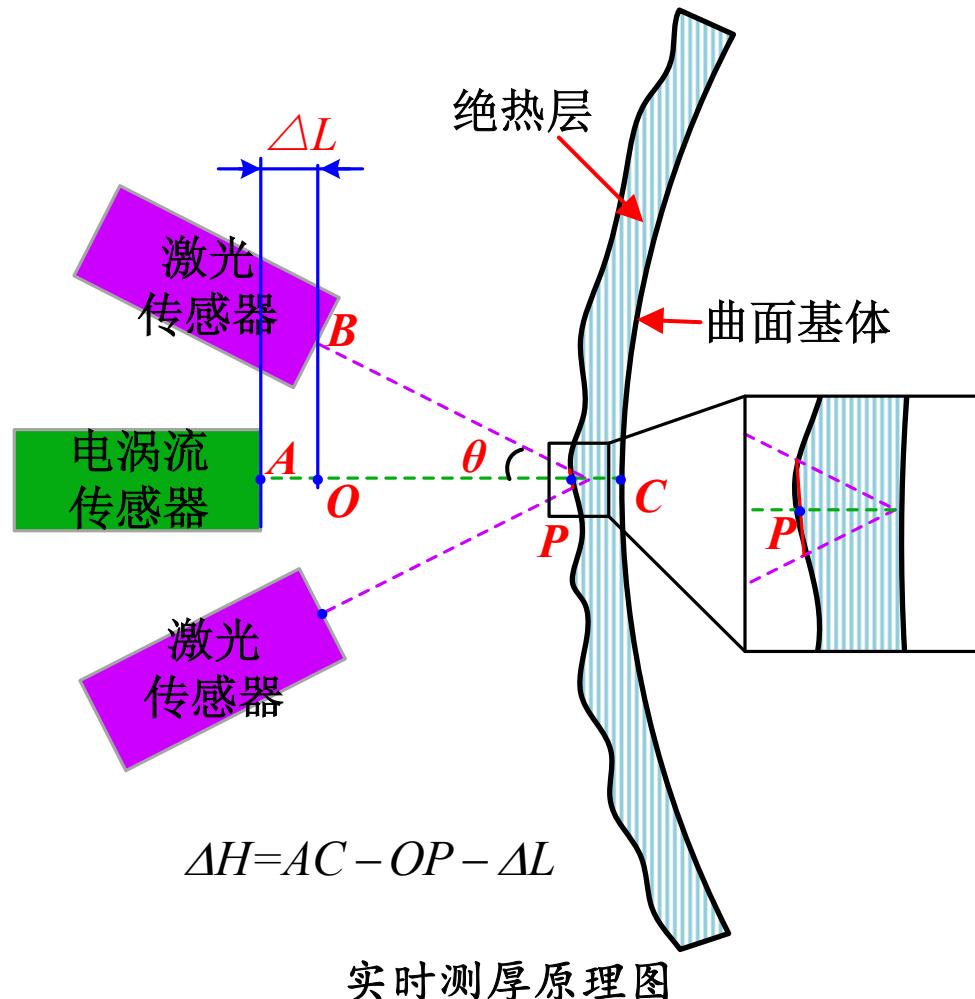


贮箱筒段边测边打磨原理图

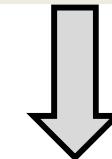


贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

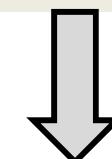
基于电涡流传感器和激光测距传感器测量绝热层厚度的非接触式测量装置及方法（拟实现）



电涡流传感器用于确定金属基体涡流区（金属基体/绝热层界面处）中心点到电涡流探头的距离 AC



激光测距传感器组测量基体涡流区绝热层外表面中心点到平面 π （激光测距传感器组投光点所在平面）距离 AP



平面 π 与电涡流传感器探头端面距离为定值 ΔL

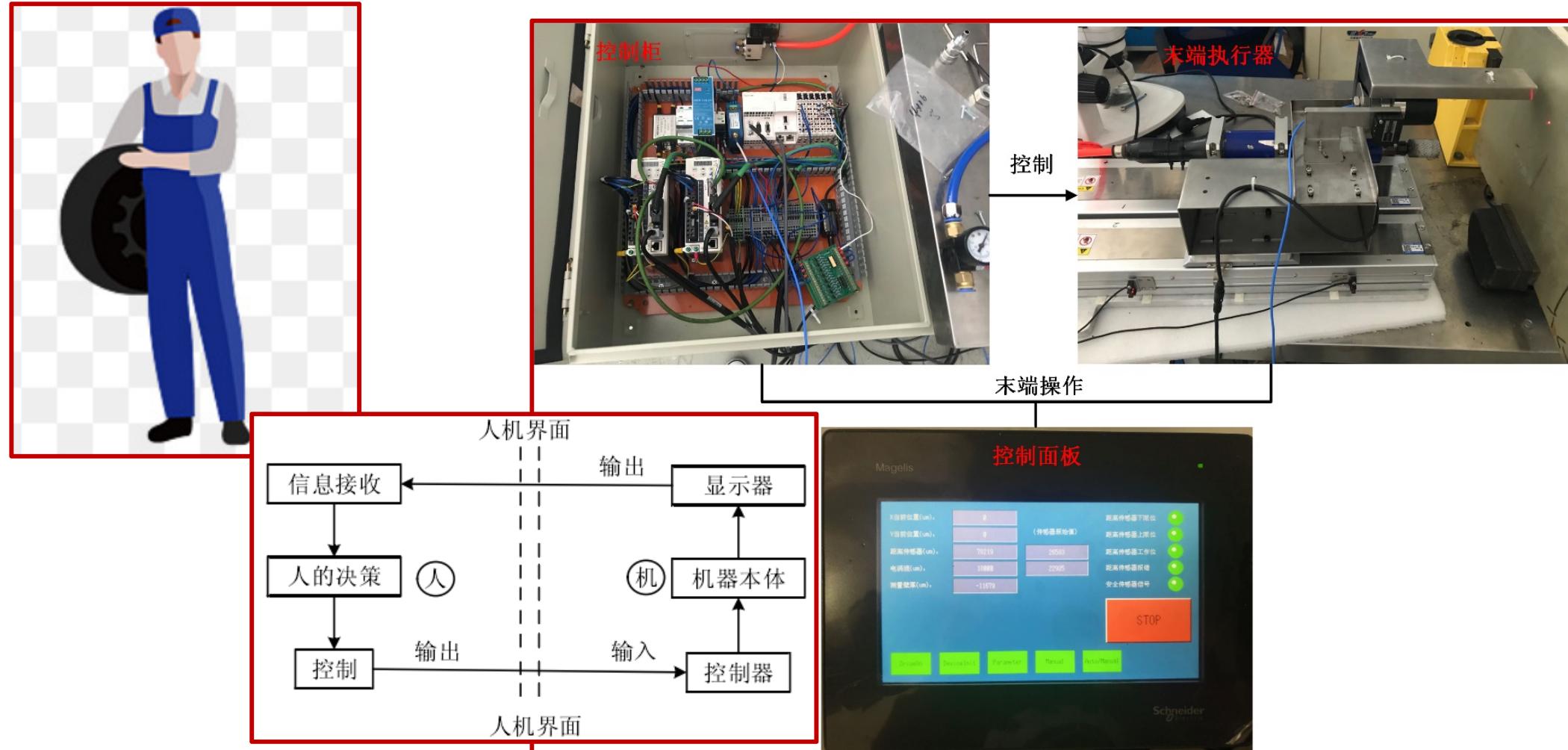


绝热层上正对电涡流探头中心点处厚度为心点处厚度
 $(PC)\Delta H$



贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

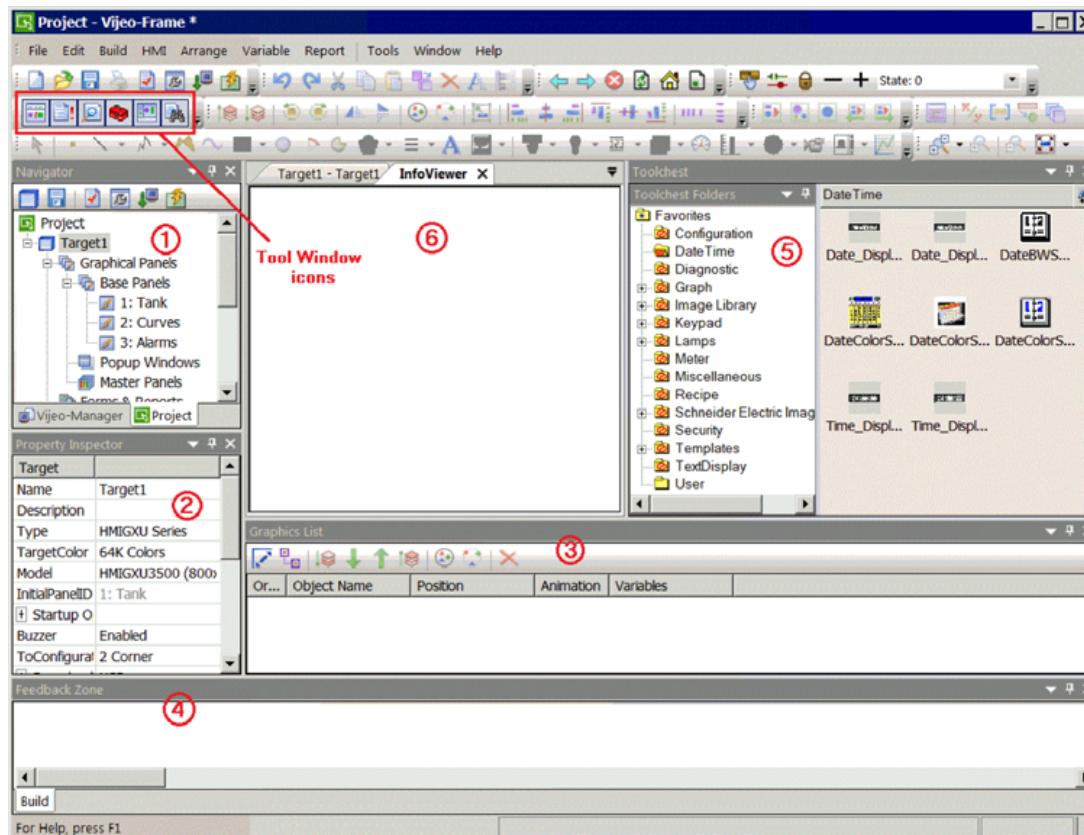
人机交互界面(Human Machine Interface), 简称HMI, 主要用于样机与用户之间的交互关系, 用户通过人机交互界面可以实现与系统的交流, 并进行各种操作控制。





贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

选用编程相对容易，且适合进行界面编写的Vijeo Designer Basic来开发上位机界面。配置Magelis睿易系列HMIGXUVB LCD触摸屏，缩短开发周期、简化开发流程，其中，触摸屏通过ModBus-RTU和运动控制器通讯。

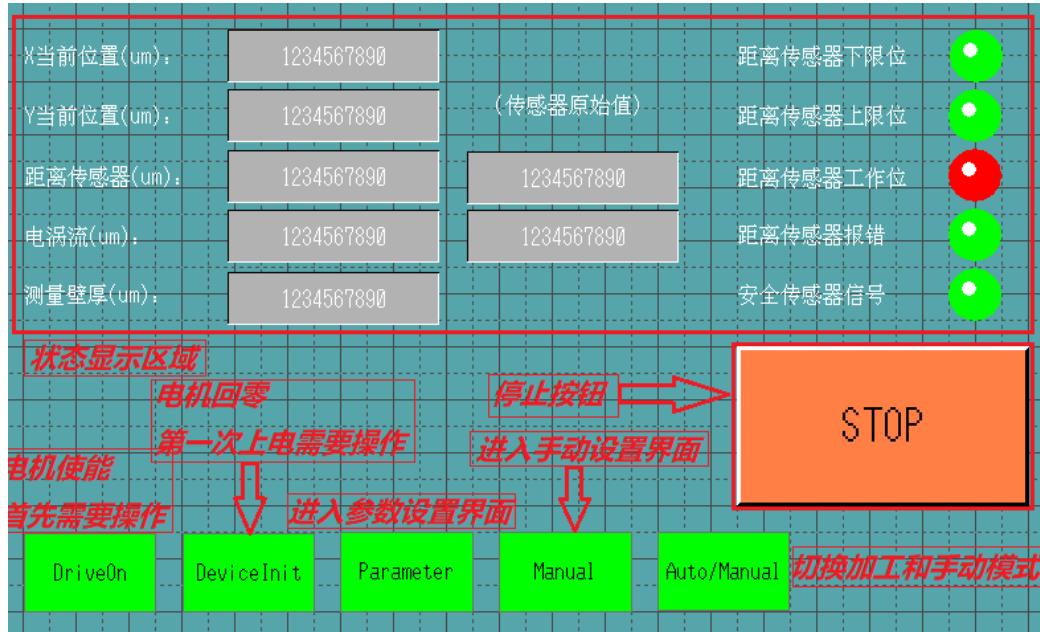


项目	图标名称	描述
1	导航窗口 (N)	用于创建应用程序。每个工程的信息在文档浏览器中依次列出
2	属性栏 (P)	显示所选对象的参数。当选中多个对象时，只显示所有对象的通用参数
3	图形列表	列出所有出现在图形中的对象，并给出它们的：创建顺序、对象名称、位置、动画、其他相关变量
4	反馈区	显示进度和错误检查，编译和加载的结果
5	工具箱	组件库
6	信息浏览器	显示一个报告或网页的内容

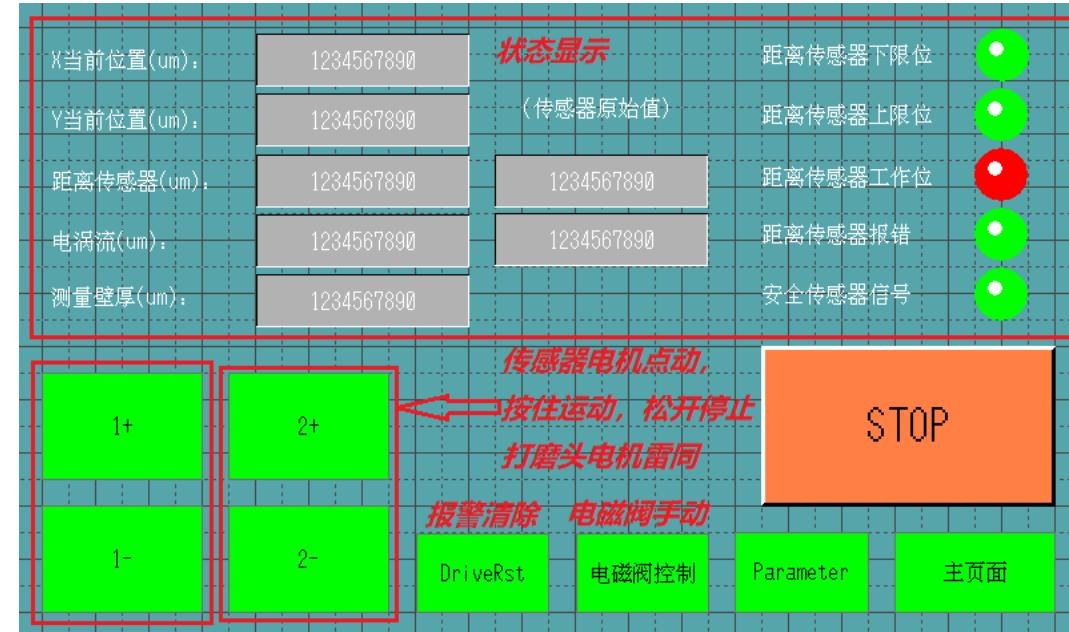


贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

界面功能及操作简介



主界面主要负责整个系统状态监控，并实时显示两直线模组的位置以及绝热层厚度。



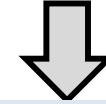
手动界面主要用于初次打磨设置，将打磨模组和测厚模组通过手动模式点动移动到工作位置，确保传感器量程和工况条件匹配。



贮箱筒段打磨自动化工具-控制系统设计

界面功能及操作简介

X待机位:	1 1234567890	距离传感器比例A:	11 1234567890	电涡流传感器比例A:	17 1234567890
Y待机位:	2 1234567890	距离传感器比例B:	12 1234567890	电涡流传感器比例B:	18 1234567890
X工作位:	3 1234567890	距离传感器比例C:	13 1234567890	电涡流传感器比例C:	19 1234567890
Y工作位:	4 1234567890	距离传感器常量D:	14 1234567890	电涡流传感器常量D:	20 1234567890
目标厚度:	5 1234567890	磨头重叠比例:	15 1234567890	距离传感器偏转系数:	21 1234567890
前后偏移:	6 1234567890	传感器偏移:	16 1234567890		
上下偏移:	7 1234567890				
角速度:	8 1234567890				
滚筒直径:	9 1234567890				
磨头直径:	10 1234567890				
位置单位: 微米(μm)					
			Manual	主页面	



参数界面主要为自动打磨模式设置相关参数，

- 1、根据筒段的旋转速度、涡流传感器和打磨头上下偏移距离确定采样频率
- 2、设置磨头重叠比例，确保刀具打磨轨迹部分重合，实现全覆盖打磨

参数说明：

1. 遇到障碍物打磨头模组的待机位置，单位 μm ；
2. 遇到障碍物传感器模组的待机位置，单位 μm ；
3. 自动运行模式打磨头模组的工作位置，单位 μm ；
4. 自动运行模式时传感器模组的工作位置，单位 μm ；
5. 需要保留的绝热层厚度，单位 μm ；
6. 磨头端面与涡流探头端面位置偏差，单位 μm ；
7. 磨头轴心与涡流探头轴心上下位置偏差，单位 μm ；
8. 筒段运动的速度，单位 $\mu\text{m}/\text{s}$ ；
9. 筒段的直径，单位 μm ；
10. 磨头直径，单位 μm ；
- 14、显示程序版本号；
- 15、前后两次采样距离与磨头直径比例，数值范围1~100；
- 16、激光位移传感器与电涡流传感器位置偏差值，单位 μm ；
- 21、激光位移传感器测量距离与涡流探头轴线夹角 θ 余弦值($\cos\theta$)，命名为旋转系数，乘以1000后输入。

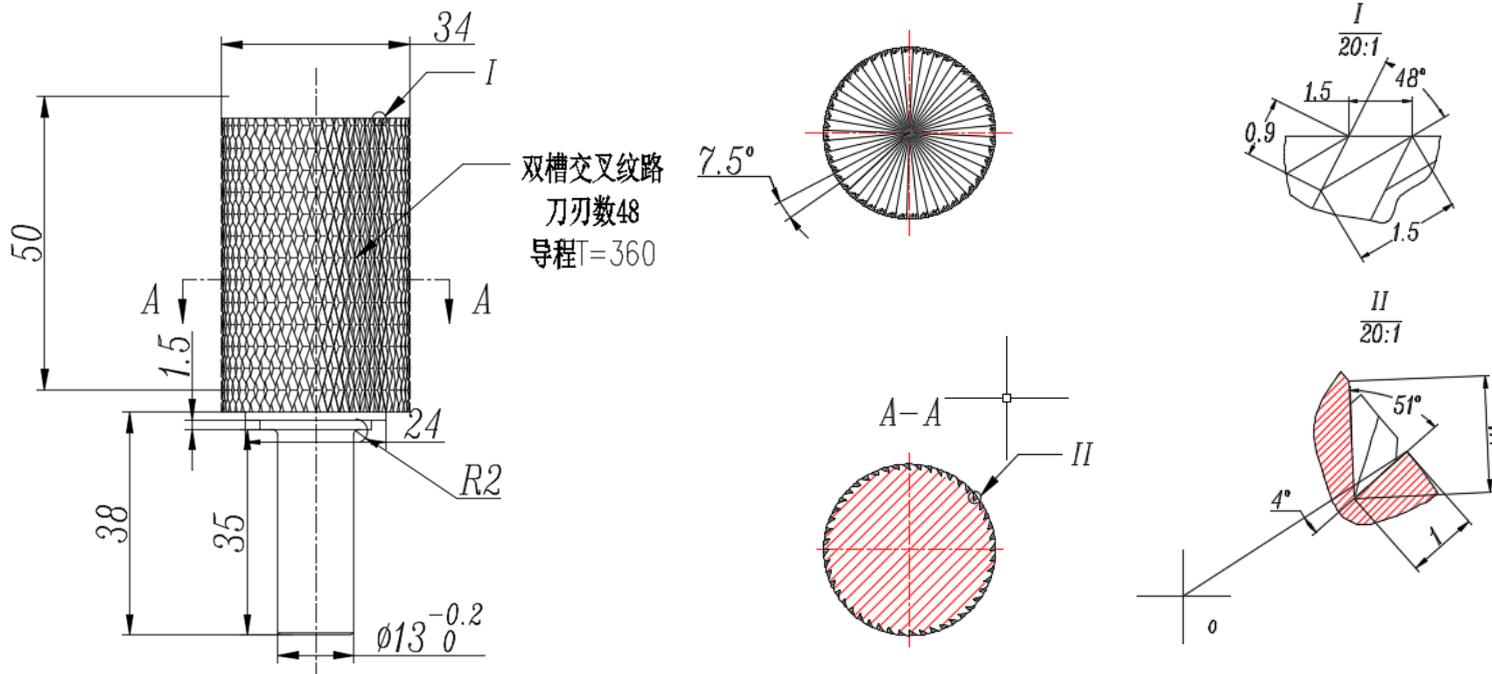


贮箱绝热层打磨刀具设计与工艺规划

火箭贮箱绝热层的主要材质为聚氨酯泡沫复合材料，在切削加工中主要由脆性断裂模式所主导，故切屑形态为粉末状，极易造成刀具排屑槽的堵塞与粘刀现象，为此开发一种可对其大余量粗加工、小余量精加工的多规格系列化粉碎复合铣磨刀具。

铣磨复合刀具参数与结构

直径	齿数	前角	后角	螺旋角	刃口钝圆半径
$\phi 34\text{ mm}$	48	10°	11°	15.6°	0.02 mm



筒段自动化打磨刀具采用双槽交叉纹路，材料选取硬质合金，顶部具有48刃，可对聚氨酯泡沫材料进行有效切除

侧壁的双槽结构有助于增大切削面积，利于排屑

减小刀具前角降低打磨切削力。

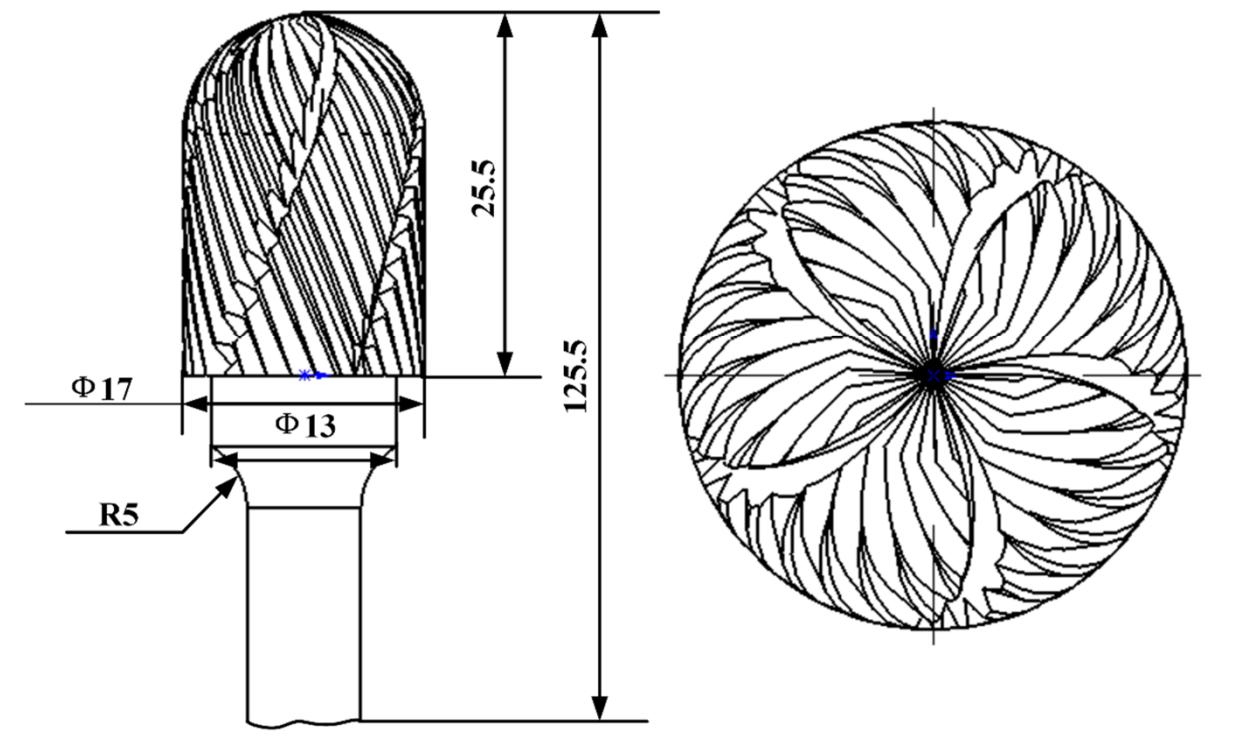


贮箱绝热层打磨刀具设计与工艺规划

设计一种小直径长臂球头铣刀，用于打磨前后底短翘部分

铣磨复合刀具参数与结构

直径	齿数	前角	后角	螺旋角	刃口钝圆半径
$\Phi 17 \text{ mm}$	30	10°	11°	15.6°	0.02 mm



手持打磨工具加工前后底短翘部分，其前端带刃齿，更能深入到聚氨酯泡沫的内部，对其进行高效、高精度的切削加工。

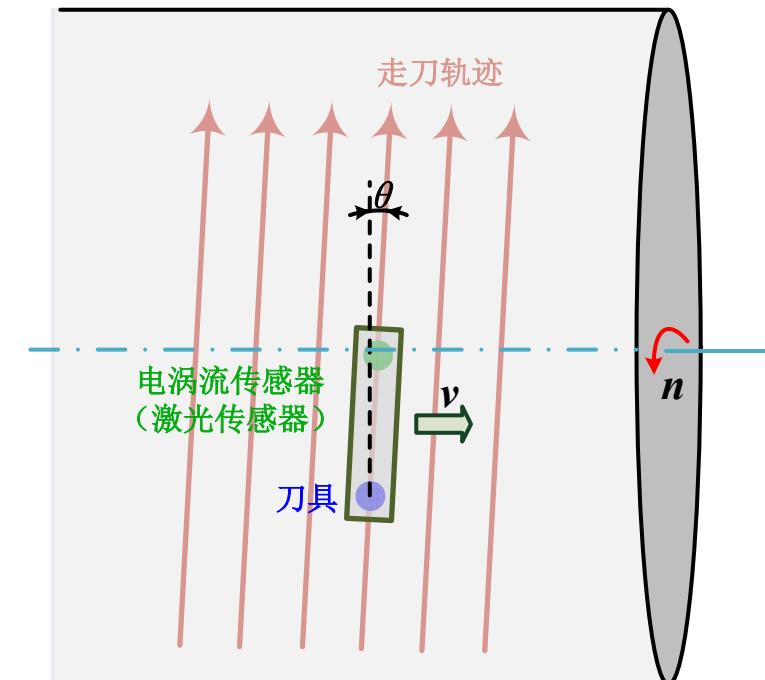
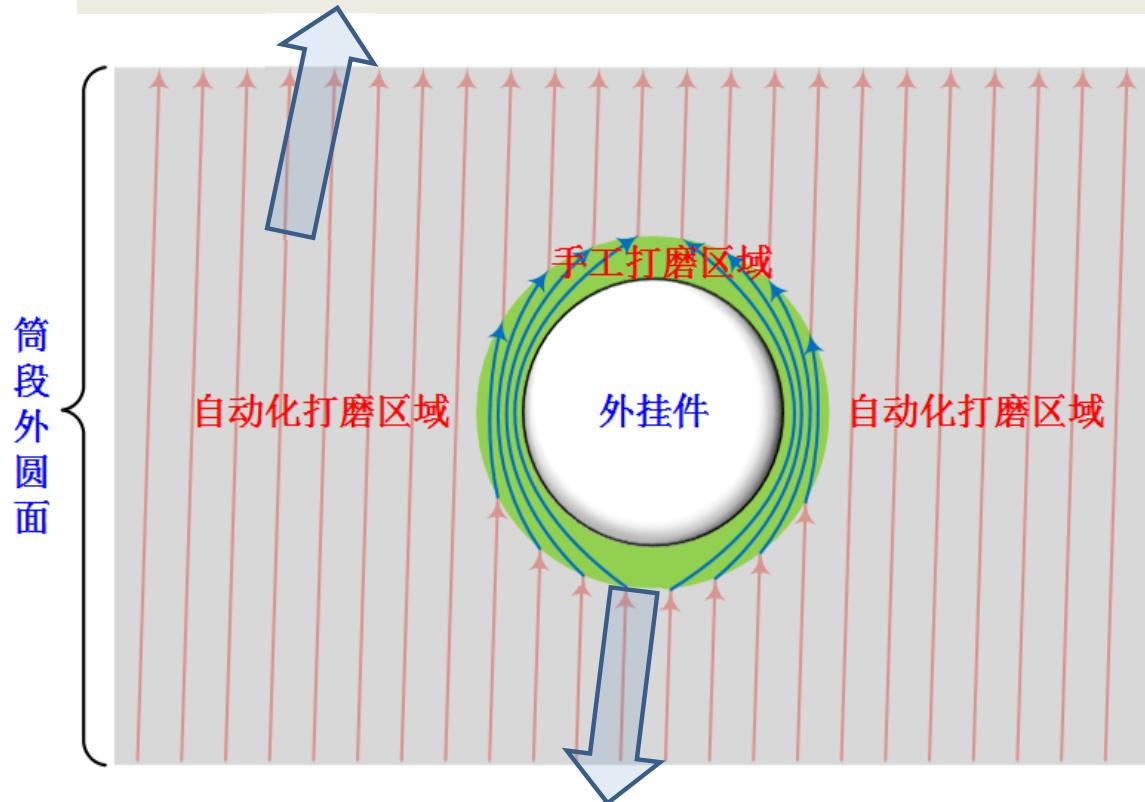
采用双槽结构，可增大材料切削表面，提高切削效率。刀具采用优质硬质合金材料，具有高硬度、耐磨、耐热以及防腐蚀等优异性能。



贮箱绝热层打磨刀具设计与工艺规划

针对绝热层筒段结构特征，其打磨表面主要分为自动化打磨区域和手工打磨区域。末端执行器主要针对自动化打磨区域的切削加工。

对于与外挂件无干涉的区域采用末端执行器同步测量与打磨的自动化加工方式。



对于靠近外挂件的区域内，“两点一线”末端执行器在该处曲线走刀，会使刀具“致盲”，不能准确切削，末端执行器不能有效发挥作用，因此对该范围区域仍采用人工打磨的方式。



谢谢！



陶正瑞

联系地址：上海市闵行区东川路800号机械楼A楼312室，邮编：200240

电话：+86-21-3420-6804；传真：+86-21-3420-6317；邮箱：taozhengrui@sjtu.edu.cn