

揭榜挂帅项目技术路线图

一、风电塔架全自动四丝窄间隙埋弧焊成套技术及装备的研发

1. 研究多丝多层窄间隙埋弧焊焊接参数实时采集技术、焊缝偏差多传感器信息处理及能动态补偿焊件加工误差和热变形的免示教的全自动四丝窄间隙埋弧焊焊缝自动跟踪技术；

2. 研究能实时补偿焊件因材料、表面状态和加工装配误差所导致的焊接参数变化的数学模型，建立工艺参数优化一体化技术；

3. 研究采用视觉和电弧双传感器应用于四丝窄间隙埋弧焊，实现智能化焊接工程化应用。

围绕上述研究内容和目标，本项目研究工作遵循的技术路线如图 1 所示。拟采用多丝窄间隙埋弧焊焊接过程特征信息提取和建模、电弧传感和激光视觉传感复合焊缝跟踪、窄间隙多层埋弧焊跟踪、闭环实时控制等理论分析、仿真计算、实验验证、环境构建、超大型风电塔架实际生产应用以及建设海上超大型高可靠性风电塔架成套装备生产示范线等多环节相结合的方法开展本项目研究工作。

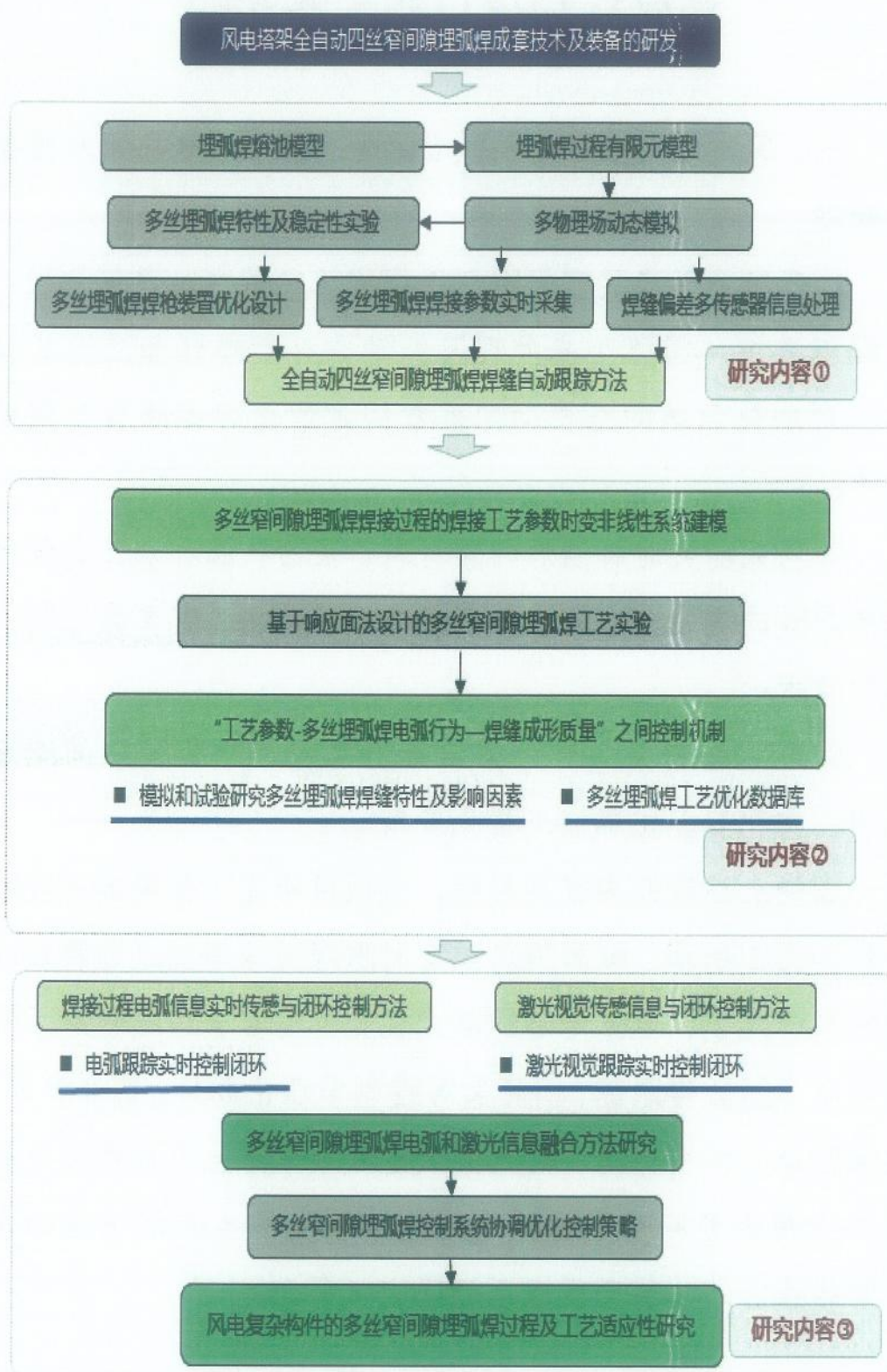


图 1：风电塔架全自动四丝窄间隙埋弧焊成套技术及装备研发的技术路线

二、风电塔架防腐关键技术及自动化喷涂装备研发

1. 针对海上风电塔架长效防护的苛刻要求，采用钛基石墨烯重防腐涂料及其涂层技术，开发一套完整的新型海上风电塔架防护涂层体系与应用流程，新型防腐涂层体系质量检测结果满足或超越国家标准指标 GB/T 33423-2016《沿海及海上风电机组防腐技术规范》的技术要求，提供第三方检测机构出具的产品质量检验报告。

海上风电塔架新型防护涂层体系的设计及实施方案如下：

所述风电塔架，包括风电塔筒和套管架、桩基(大气区、飞溅区及潮差区)及其它附属配套金属构件，见图 2 所示。

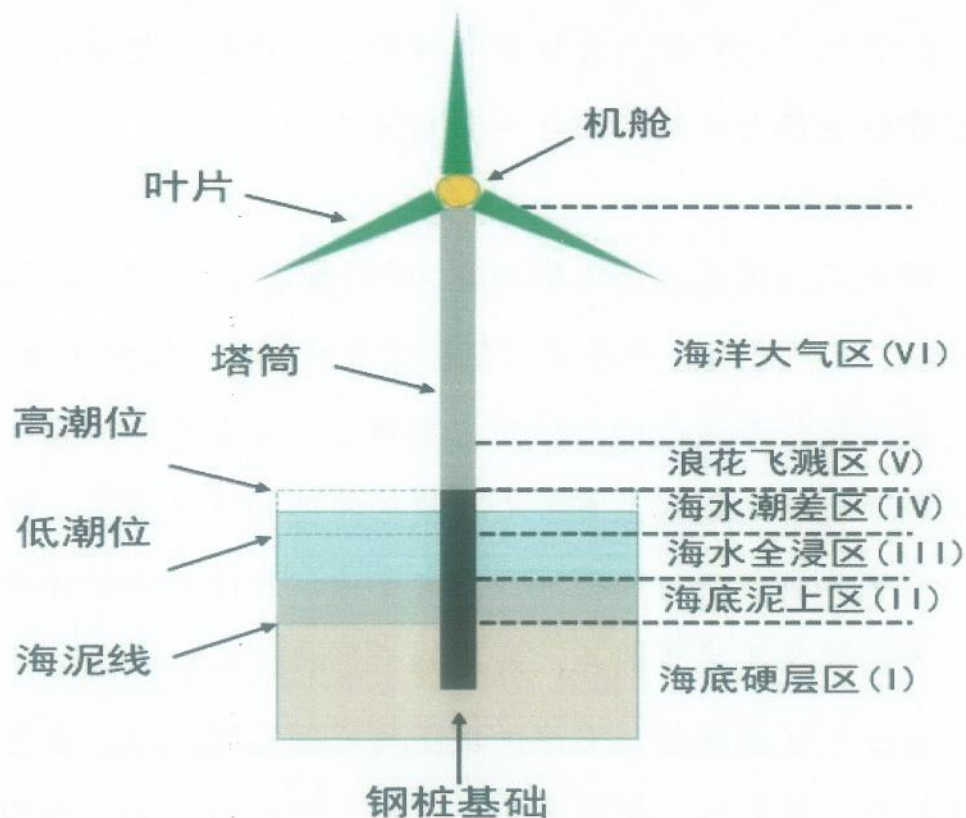


图 2 海上风电机组服役环境结构示意图

防腐设计内容包括钢材的表面处理与技术标准、新型涂料的选用及配套复合涂层体系的设计、不同部位涂层干膜厚度要求、涂层质量技术指标和检验标准，为海上风电塔架新型涂层防护构建体系，完全采用的是新型材料——石墨烯改性钛基纳米重防腐涂料构建的复合涂层体系。

海上风电塔架新型涂层防护体系构建，是基于新型涂层材料的卓越的物理机械性能和抗天候老化以及防腐蚀性能。石墨烯改性钛基纳米重防腐涂料，又称为钛基石墨烯重防腐涂料，它是由主成膜物纳米有机钛聚合物(简称钛基料)、辅助成膜树脂、石墨烯分散浆料、防锈颜料、功能填料、涂料助剂和活性稀释剂组成的高固体份涂料或无溶剂涂料。

2. 研究风电塔架内外壁智能喷涂区域检测与越障技术、智能喷涂机器人区域检测与控制系统技术。

内壁喷涂：

研究不同风电塔筒内壁特征，设计配有喷枪、跨障机构、行走机构、喷枪旋转支撑架的智能喷涂机器人，如图 3 所示。行走机构能沿着风电塔筒轴向方向移动，根据塔筒内径变化自动调节旋转喷枪的回转中心、喷涂角度和喷涂距离，按照喷涂工艺参数要求对内壁进行均匀喷涂。跨障机构能够通过机械臂搭载相机采集图片，采用基于形状的模板匹配方法并结合金字塔搜索算法对喷涂区域障碍进行匹配定位，自动识别支撑架、吊装口、爬梯连接板等障碍物尺寸大小，如图 4 所示，并规划出合理的运行路径，采取避障为主，跨障为辅

运行策略，增大机器人对工作环境的适应性。同时智能喷涂机器人在移动工况下油漆喷雾区域的变化规律，针对不同移动速度下喷涂压力、喷涂角度、喷涂距离对喷涂效果的影响，获得移动工况下风电塔筒内壁喷涂工艺参数。

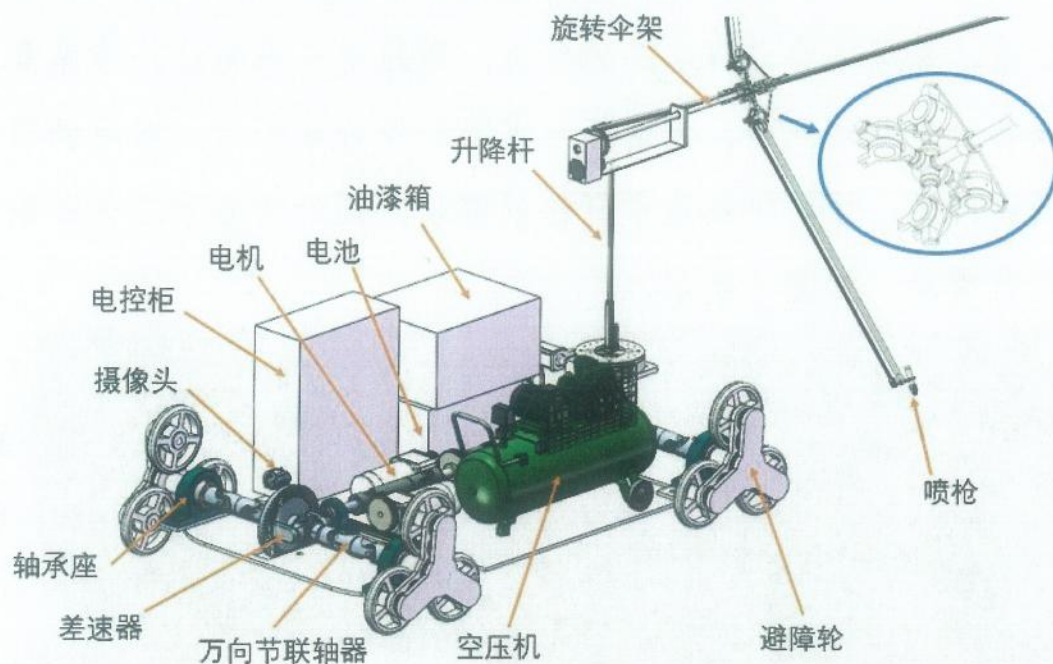


图3 风电塔筒内壁喷涂机器人结构示意图

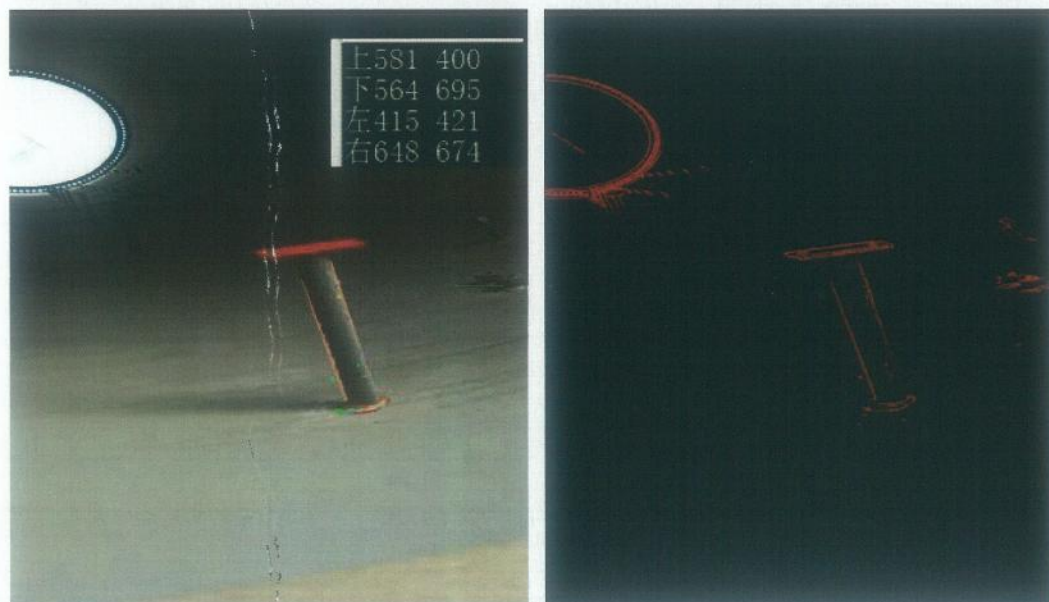


图4 机械视觉障碍物识别

外壁喷涂：

根据风电塔筒直径变化特征，设计适应于外壁智能喷涂设备。该设备由固定底座、调距滑杆、运动喷头及控制系统所组成。固定底座能够使整个设备方便移动，同时自带锁死功能，保证喷涂过程中的稳定性；调距滑杆采用红外传感等设备进行两端测距，使滑杆与塔筒外壁母线平行，同时调节喷涂间距；运动喷头沿滑杆往返移动，同时按喷涂工艺参数进行喷涂，如图 5 所示。

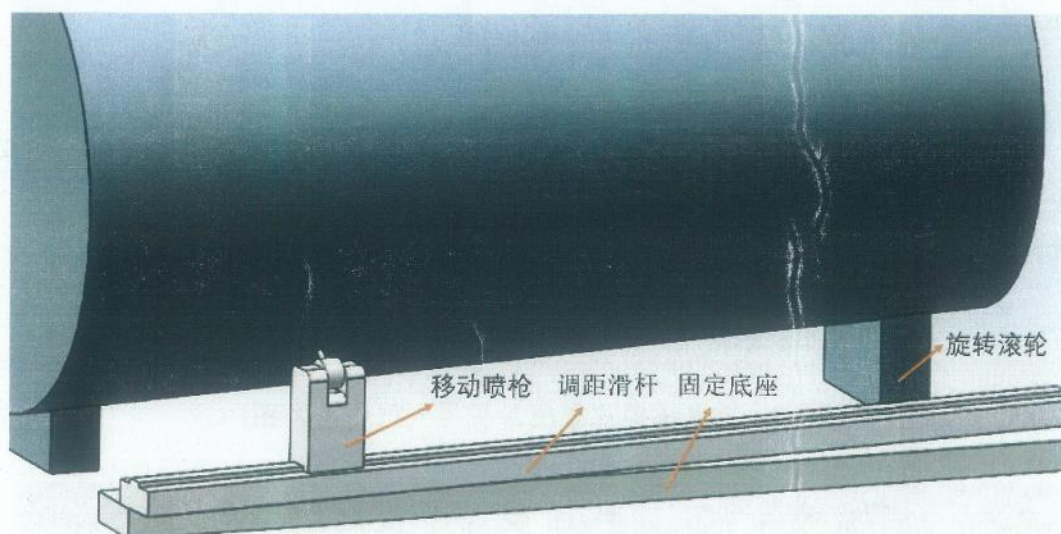


图 5 外壁喷涂机器人示意图

运动控制系统是喷涂方案构建的关键。内壁喷涂设备采用工业相机能精确采集到筒内障碍物、塔筒锥度分布特征，通过将数字特征输入精密运动控制系统，实现精准控制喷涂机器人的运行状态；而外壁喷涂设备采用激光测距等方法保证滑杆与外壁母线平行，保证喷涂距离，并通过精准控制调整喷枪角度。精密运动控制系统采用上下位机形式架构。下

位机采用高精度、高稳定性的 PLC 控制，上位机采用工控机，自主研发系统软件，中间驱动环节采用高精度直线电机或伺服驱动系统、光栅或编码器形成闭环系统，形成良好的内壁喷涂效果。

三、风电塔架法兰平面度智能检测装备的研发

以风电塔架法兰为研究对象，设计一种基于 3D 机器视觉技术和精密运动控制技术相融合的平面度测量装备系统，可实现法兰平面度快速、高效、稳定、安全的测量，也可为其他大型部件平面度等几何测量提供参照。主要攻关方案包括以下三部分内容。

1. 基于精密运动控制系统的高精度 3D 成像技术研究

精密运动控制系统是成像的支撑和关键，线扫激光 3D 工业相机能精确采集到工件数据，依靠的是精密运动控制系统的准确定位。精密运动控制系统采用上下位机形式架构。下位机采用高精度、高稳定性的运动控制卡或 PLC，上位机采用工控机，自主研发上位机系统软件，中间驱动环节采用高精度直线电机或伺服驱动系统、光栅或编码器形成闭环（半闭环）系统，形成良好的位置控制效果。精密运动控制系统结构如图 6 所示。

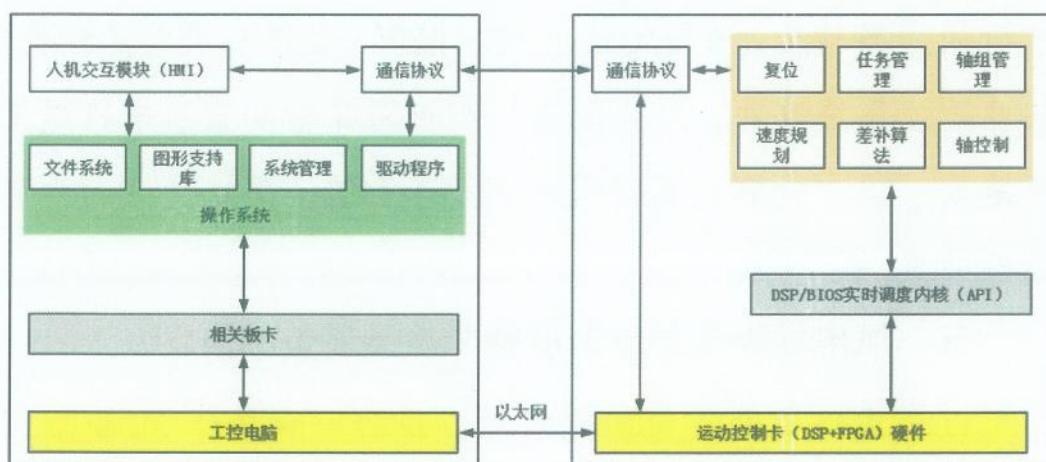


图6 精密运动控制系统架构

采用视觉-激光融合的线激光三角测距方法，配合精密运动控制系统，二者融合来实现高分辨率 3D 成像。精密运动控制系统携带工件高精度运行以进入深度相机视野并触发激光发射器持续发出的激光线，激光投射到工件上形成反射，反射光被镜头捕捉，最后通过镜头反射到感光芯片上，通过纵横向条纹投影扫描生成若干幅 3D 视图序列，再通过图像配准形成高分辨率的 3D 图像，从而获得高分辨率的 3D 成像。

2. 基于海量点云的 3D 测量算法研究

项目将原创核心算法，在满足通用型风电工件的真实、科学测量的基础上，高效进行智能算法设计，准确、高速的得到检测结果。点云处理包括两个阶段，首先是点云预处理，包括点云分割和点云滤波，得到理想点云集后，再进行点云的 3D 测量算法设计，包括平面拟合算法、平面度测量算法。

平面拟合算法是通过对目标点云数据拟合，计算出平面方程的各个系数，为测量平面度奠定基础。平面度测量算法

如图 7 所示。

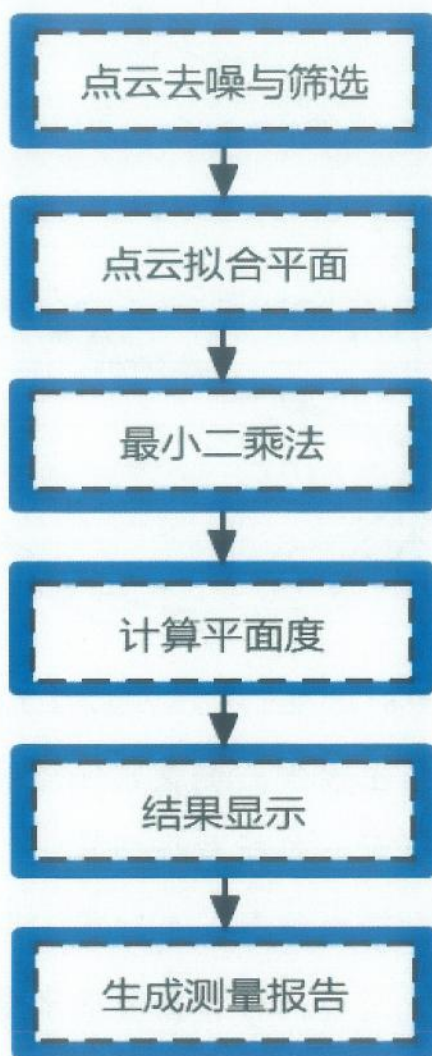


图 7 平面度测量

3. 超大部件平面度检测装备系统及软件研究

装备的主要工作是完成法兰表面点云的采集，在装备调整好位置之后，其采集方式如图 8 所示，法兰面竖立放置，装备位于法兰对立面，以旋转模块为控制基础，旋转臂以旋转轴为旋转中心，通过旋转带动 3D 视觉传感器以线激光扫描的方式，扫描法兰表面以获取完整法兰表面点云，并通过算法获得平面度等结果。

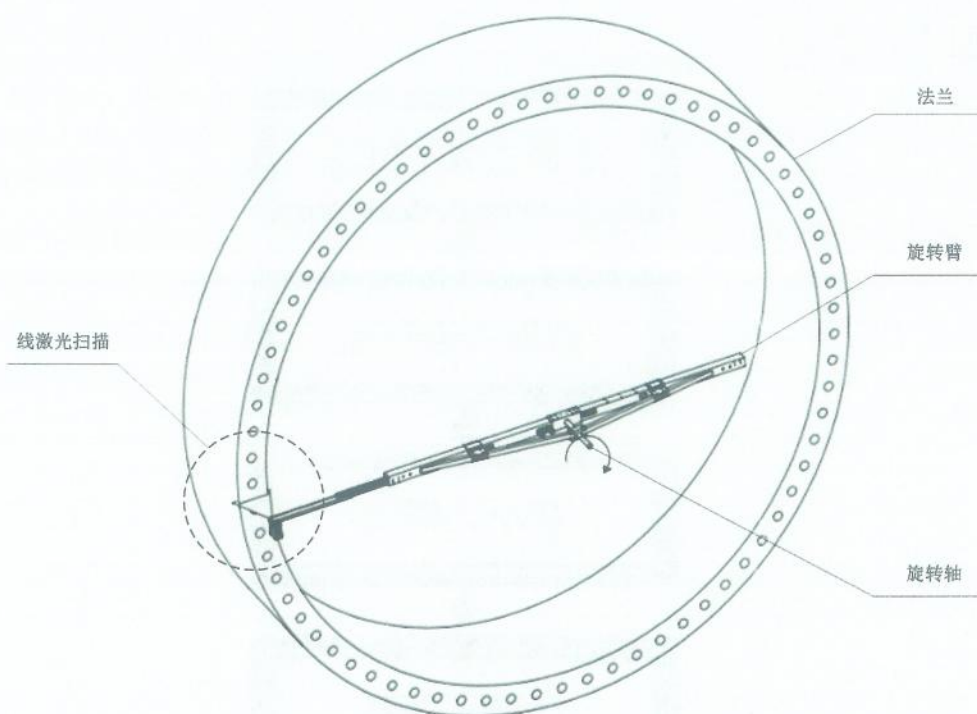


图 8 3D 视觉传感器扫描法兰示意图

测量装备由自主研发的测量软件进行总体控制，总体工作原理图如图 9 所示，包括系统初始化、装备对中、点云采集、平面度计算和输出结果五个过程。系统初始化是完成装备各模块的初始化过程：将装备放置于待测量法兰前的检测位置，启动软件，将装备升降模块、旋转模块、伸缩模块复位完成系统初始化过程。装备对中是将装备旋转臂轴心与法兰圆心对齐的过程：通过自动对中程序，根据法兰圆心位置，装备通过升降模块自动将旋转臂轴心和法兰圆心对齐，通过伸缩模块调整 3D 视觉传感器扫描直径与法兰检测直径一致。点云采集是获取法兰点云的过程：启动检测程序，旋转臂通过旋转带动 3D 视觉传感器以线激光扫描的方式对法兰完整扫描并生成点云数据。平面度计算是对点云进行系列处理后

得到测量结果：视觉算法模块对点云进行滤波、坐标变换、点云分割、基准平面拟合和平面度计算等步骤。输出结果是将自动计算的平面度结果进行显示，与预设的平面度公差进行比较，并显示最终的测量结果，形成测量报告并存取相关数据。

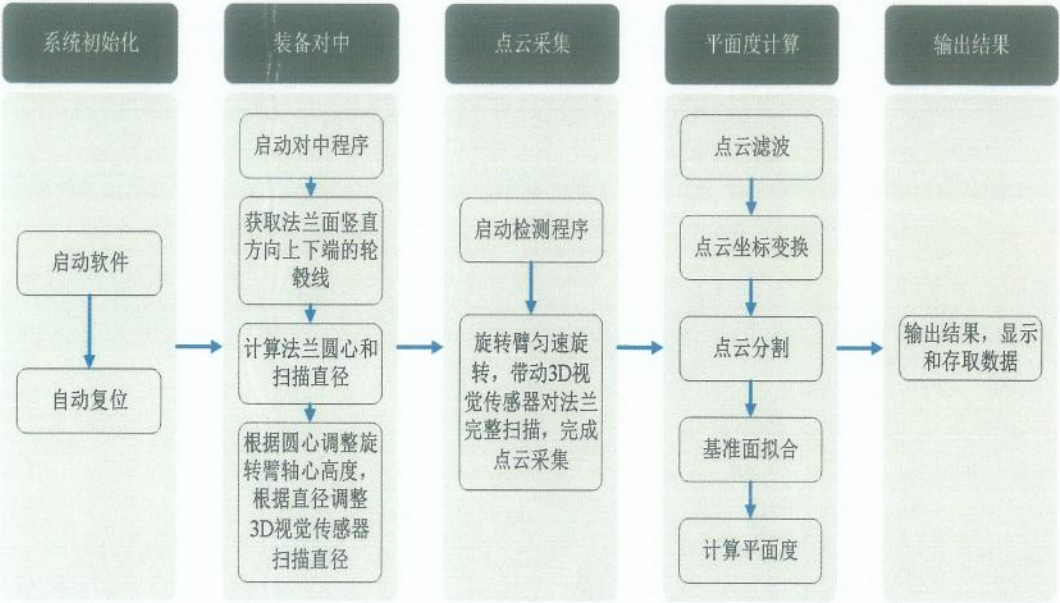


图 9 系统工作原理图

湖南恒岳重钢结构工程有限公司
2025年4月2日