

场采集,评价流程简洁清晰,适配企业实际安全管理能力;最后是闭环性原则,体系包含“风险辨识—等级评估—指标评价—防控优化—持续改进”完整闭环,实现安全管控动态提升。

4.2 评价指标体系与综合评价模型

遵循层次性、系统性、可量化、可采集原则,构建目标层—准则层—指标层三级安全评价指标体系。目标层为甲醇合成工段安全综合评价;准则层依据 HAZOP 分析结果设置工艺运行风险、设备设施风险、安全防护风险、作业管理风险、应急保障风险五大维度;指标层共选取 26 项可量化评价指标,全面覆盖工段安全管控关键要素。

工艺运行风险指标重点关注压力偏差率、温度偏差率、氢碳比达标率、空速稳定性、杂质含量超标频次等,直接反映 HAZOP 识别的核心工艺偏差风险;

设备设施风险指标包括设备完好率、密封泄漏率、腐蚀监测合格率、动设备故障率等,对应设备失效类风险;安全防护风险指标包括联锁投用率、安全附件校验合格率、报警系统完好率、独立保护层配置率等,体现 HAZOP 评估的现有防护效能;作业管理风险指标包括制度完善率、培训合格率、持证上岗率、特殊作业合规率、变更管理执行率等,控制人为管理类致险因素;应急保障风险指标包括应急物资完好率、预案完备率、演练频次、初期事故处置响应时间等,用于评价事故后果减缓能力。

5 安全评价体系实施流程

基于 HAZOP 的甲醇合成工段安全评价体系采用五阶段标准化实施流程,确保体系落地规范、高效、可重复。第一阶段为前期准备阶段,完成 HAZOP 分析资料更新、评价团队组建、指标数据采集、现场核查与基础信息梳理,保证评价基础真实可靠。第二阶段为现场评价阶段,依据指标体系逐项开展现场核查、数据监测、记录核对与安全访谈,

结合 HAZOP 结论复核风险点,完成单项指标打分与风险判定。第三阶段为综合分析阶段,运用评价模型计算安全综合得分,划分安全等级,识别高风险指标与管控短板,形成完整评价报告。第四阶段为防控整改阶段,按照风险等级实施分级管控,重大风险立即停产整改,较大风险限期治理,一般风险纳入常态化管控,建立整改台账并闭环销号。

6 结语

甲醇合成工段具有高温高压、强放热、易燃易爆、系统耦合性强等典型高危特征,是甲醇装置安全风险最集中的关键工段,采用 HAZOP 分析能够实现工艺偏差、致险原因、事故后果与防护短板的系统化、结构化识别,为构建科学适用的安全评价体系提供了核心数据支撑与逻辑基础。本文构建的基于 HAZOP 的甲醇合成工段安全评价体系,以“风险辨识—评估—评价—防控—改进”闭环为架构,采用层次分析法与风险矩阵法耦合评价模型,建立了包含 5 大准则层、26 项量化指标的专用评价指标体系,指标设置、权重分配均紧密贴合 HAZOP 识别的高风险场景,具备较强针对性、科学性与工程可操作性。该体系可实现甲醇合成工段安全状况量化综合评价,精准识别管控短板,推动风险防控由被动处置向主动预防、由经验管理向科学评价转型,能够有效提升工段本质安全水平与过程安全管理能力,可为同类煤化工高危工段安全评价体系构建提供方法参考与范式借鉴。

参考文献

- [1] 陈开彬,赵军.基于HAZOP的煤化工装置安全评价体系构建[J].安全与环境学报,2021,21(05):1987-1992.
- [2] 李丽,王建军.基于HAZOP-风险矩阵的甲醇合成工段安全评价研究[J].化工进展,2022,41(S1):167-173.
- [3] 吴宗之,多英全.化工过程安全管理理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2021.
- [4] 李建军,张宏,王丽.煤制甲醇合成工段HAZOP分析及安全防护优化[J].中国安全生产科学技术,2023,19(04):123-128.

Precision Control of the Curved Surface of the Reflector Antenna and Optimization of the Mechanical Processing Technology

Shirui Yao

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

In response to the increasing sensitivity of reflector antennas in the Ku to Ka frequency bands to the uniformity of aperture phase, an integrated method for error mechanism analysis and process optimization based on the mean square index has been constructed. The cumulative influence of thermal deformation, tool wear, and machine tool error on the shape accuracy has been clarified, and the multi-source errors have been synthesized and incorporated into the aperture efficiency constraint. A processing path adaptive planning based on the curvature field has been proposed, combined with speed anticipation and step size scaling to suppress overcutting and mid-frequency waveforms. A multi-objective optimization of cutting parameters has been established, and a six-point kinematic fixture and constant force support have been designed to achieve precise positioning. Through verification by three-coordinate scanning and Zernike stripping, the RMS of the shape has decreased from 0.15 mm to 0.08 mm, a reduction of 46.7%, and the processing efficiency has increased by 22%. The repeatability of clamping and batch processing has also shown good stability. This method achieves the synergy of accuracy and efficiency, providing a transferable process boundary for large-aperture and material substitution scenarios.

Keywords

reflective surface antenna; shape accuracy; adaptive processing path; multi-objective optimization; kinematic fixture

反射面天线形面精度控制与机械加工工艺优化

姚诗锐

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

面向Ku至Ka频段反射面天线对口径相位均匀性愈发敏感的需求, 构建以均方指标贯穿的误差机理分析与工艺优化一体化方法。阐明热变形、刀具磨损与机床误差对形面精度的叠加影响, 将多源误差均方合成后纳入口径效率约束。提出基于曲率场的加工路径自适应规划, 结合速度前瞻与步距缩放抑制过切与中频波纹; 建立切削参数多目标优化, 设计六点运动学夹具与恒力支承实现精确定位。经三坐标扫描、Zernike剥离等验证, 形面RMS由0.15 mm降至0.08 mm, 下降46.7%, 加工效率提升22%, 重复装夹与批次加工稳定性良好。该方法实现精度与效率协同, 为大口径与材料替换场景提供可迁移工艺边界。

关键词

反射面天线; 形面精度; 加工路径自适应; 多目标优化; 运动学夹具

1 引言

高频段反射面天线对口径相位均匀性的敏感度随频段上移迅速增强, 微小面形误差即可引发峰值增益下降、主瓣展宽与指向漂移。工程实践表明, 热变形、刀具磨损与机床几何及热误差共同决定误差的主导频段与能量分布, 其在口径上的均方累积机制与方向图退化直接相关^[1]。传统工艺往往聚焦单一环节, 难以在抑制中频纹理的同时避免低频形状隆起, 也难以在效率、精度与刀具寿命之间达成稳健平衡。为此, 有必要构建以误差机理为驱动的工艺协同框架, 将路径规划、参数优化与夹具约束整合到统一目标之下, 并通过

计量验证建立可追溯的闭环。本文以自由曲率分布与薄壁大口径特征为对象, 提出基于曲率场的加工路径自适应规划, 将机床插补、加加速度与刚热特性嵌入路径求解; 构建切削速度、进给量与背吃刀量的多目标优化模型, 引入稳定叶瓣图与功率上限形成可行域; 设计六点运动学夹具与恒力支承结合微调补偿, 降低装夹耦合并赋予形面预控能力; 最后以恒温三坐标扫描和不确定度评估进行工程验证。研究目标在于面向增益与方向图约束, 实现面形精度与加工效率的协同优化, 并为后续口径放大与材料替换提供可复用的方法论。

2 反射面天线形面精度的影响机制分析

鉴于Ku至Ka频段反射面天线对口径相位均匀性的敏感度提升, 形面精度的细微偏差会把有效口径与方向图结构推向不利状态。从电磁传播角度来看, 面形误差造成的波前

【作者简介】姚诗锐(1990-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事机械设计与制造方向研究。

相位畸变在口径上按均方根方式累积，均方根即以平方平均表征误差能量的尺度，直接表现为峰值增益下降与主瓣展宽，低阶畸变还会引起指向漂移。工程上把多源误差按均方根合成，并以经验关系表征相位误差对口径效率的衰减。从制造环节审视误差形成机理，材料热变形源于切削区温升与温度梯度，会把局部尺寸推离目标值，冷却回弹重分配低频面形，误差幅度由热膨胀系数与温度场分布共同决定。

3 反射面天线机械加工工艺的优化策略

3.1 加工路径的自适应规划

鉴于反射面天线自由曲面存在主曲率幅值与方向的大范围变化，路径规划被把握为与曲面曲率场同步自适应的加工策略。曲率场指在离散采样点上对两主曲率及其主方向的空间分布进行建模，用来刻画局部几何变化的强弱梯度。结合高曲率区域更易出现过切与欠切的工艺风险，把走刀方向沿主曲率弱轴进行优选，把步距依据局部曲率半径与刀尖几何进行动态缩放，使残留波纹高度在同一加工带内保持近似恒定，并且在曲率跃迁处实现平滑过渡。由此推导，路径求解需同时嵌入机床插补与刚热特性约束，把速度前瞻与加速度限制放入规划环节，去抑制曲率突变区的峰值切削力与中频波纹。

3.2 切削参数的多目标优化

鉴于反射面天线加工同时受形面精度、加工效率以及刀具寿命的约束，本研究把切削速度、进给量、背吃刀量作为决策变量，建立多目标优化模型。模型以口径面形均方误差衡量精度，以总加工时长刻画效率，以寿命折减表征刀具耐用性，并把功率负载、稳定域与热漂移上限设置为可行域边界。从加工机理来看，参数组对相位误差与粗糙度的影响呈强耦合非线性，线性权衡会遗漏高曲率区的风险点，因此选用遗传算法开展全局搜索，借助 Pareto 档案把非劣解集合进行保留，同时把用于描述切削稳定域的稳定叶瓣图筛选嵌入适应度评估来抑制颤振。需重点关注的是，高速大进给会把切削力峰值抬升而诱发中频波纹，低速小背吃刀又会引入热滞导致低频形状偏差，因此在适应度函数中加入材料去除率与磨损速率的联合惩罚。

$$\min F = \omega_1 E(v_c, f, a_p) + \omega_2 T(v_c, f, a_p) + \omega_3 [L(v_c, f, a_p)]^{-1}$$

其中， F 为综合目标函数； E 为形面均方误差（单位：mm）； T 为加工时间（单位：min）； L 为刀具寿命（单位：min）； ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重（单位：无量纲）； v_c 为切削速度（单位：m/s）； f 为进给量（单位：mm/rev）； a_p 为背吃刀量（单位：mm）。

3.3 工装夹具的精度适配设计

立足反射面天线薄壁大口径、自由曲面与非对称筋板共存的结构特性，本研究把夹持约束设计为轻载、低耦合且可定位补偿的工装系统。方案选用六点运动学基座，即以点接触限定六自由度的定位结构，并叠加扇区环形支撑，

把承力路径约束在法向。在每个支点布置可调球面支座与恒力加载单元，用以降低面内约束耦合并抑制夹紧应力；围绕口径基准设置径向定位销与切向导向块，构成重复定位链；在高曲率与薄弱区分布伺服微调楔块和螺旋微调器，把小幅法向补偿与区域预变形耦合到夹具姿态，使工件在加工姿态下趋于目标形面。考虑热漂移与材料膨胀差异，支承部件选用低膨胀合金并配置温度监测，结合在线测头反馈，把补偿量实时闭环到微调执行件。为评估设计的抑变效能，建立覆盖整口径的参数化有限元模型，选取重力、夹紧载荷与温度梯度作为主工况，设置接触非线性与支承自由度约束，计算法向位移分布与等效应力云图；在此基础上开展灵敏度分析，把支点布局、恒力设定与微调行程对口径畸变的影响进行排序，并把结果映射为机构弹性常数与行程窗口的设计准则，使夹具定位补偿功能与路径规划和切削参数约束协同发挥作用^[9]。考虑到大型工件搬运与姿态转换带来的基准漂移，把夹具模块化分区设计并设置可更换基准块，配合机床球杆仪标定的几何误差模型，提前生成补偿值清单用于装夹示教。

4 反射面天线形面精度控制效果的验证与分析

4.1 工艺优化后的形面精度检测

本节围绕工艺优化后的面形误差检测展开，选用蔡司 PRISMO 级三坐标测量机与扫描测头系统，把被测反射面置于恒温 20 ° C 环境并保持梯度小于 0.2 ° C，在夹持姿态复现工装约束后开展连续扫描。测量坐标系以口径基准环为主基准、背部定位块为辅基准建立，依托名义 CAD 面进行迭代收敛配准，以消除刚体位移对误差评估的干扰。鉴于自由曲面曲率分布不均，采样策略基于前述曲率场构造螺旋加扇区的复合路径，在高曲率与薄弱区域提高点密度，在口径边界设置加密带，以提高对中频波纹与边缘畸变的灵敏度。测头配置小球半径红宝石测针并建立多姿态库，以降低遮挡和大倾角区域的漏采风险；扫描节拍采用分区分时策略，先进行稀疏对齐扫测，再开展密集连续扫测，把测头动态漂移与结构热平衡时间对数据稳定性的影响降至可控水平。点云经测头自校与球杆标定后配合温度场漂移补偿进入数据处理，以稳健滤波剔除散点与重复接触印记，随后采用最小二乘法拟合名义母面，并用 Zernike 低阶项剥离整体倾斜与焦距漂移，保留反映制造与装夹综合影响的残余形貌。从工程判读角度出发，把残余点云投影至极坐标口径形成网格化误差场，进一步计算口径 RMS 误差与峰谷指标，并输出径向分段统计与环向波数分布，用于刻画低频形状与中频纹理的能量分配。为保证溯源链条，依据 ISO 10360 评定仪器不确定度并引入蒙特卡洛重采样对 RMS 评估进行扩展不确定度估计，环境记录与参数设定同步归档；同时安排多次独立装夹与不同路径的重复扫描，开展组内一致性分析，以获得满足工艺决策的稳定数据基础。为减轻姿态引起的重力畸变影响，检测姿态复现六点运动学支撑并与机内触发测头在选定剖面进