

图2 齿面数据点拟合

能采取逆向建模的方式实现。

逆向建模的常用方式有两种，一种是采用光学扫描建模，另一种是采用齿面实测数据导入专用建模软件建模。由于光学扫描的数据后期处理的工作量较大，效率不高，一般选择研究齿面实测数据导入专用的建模软件进行建模。

为简化螺旋锥齿轮的建模程序并保证模型的准确性，创新团队在研究过程中充分利用齿轮加工生产过程中保留下来的测量数据，对齿轮进行实体模型的创建，由三坐标数据点拟合齿轮齿面的建模效果如图2所示。

圆弧锥齿轮建模插件在结构设计上主要分为界面及交互模块、模板文件模块、数据结构及主体功能模块。其中，界面交互模块负责用户的输入输出和建模操作；模板文件模块负责存放和管理圆弧锥齿轮的模型文件，并负责将模型文件加载到当前工作环境中；数据结构及主体功能模块主要管理用户输入的设计参数，然后调用UG软件二次开发提供的接口实现相关的功能，并将各项功能按照齿轮建模顺序组合

起来，实现齿廓实体成形功能，最终输出齿轮的实体模型。输出的模型与最终成形齿轮零件之间偏差较小且模型为实体类型，为后续其他特征的创建提供了基础保证与便利。

在线测量

接触式在线测量是指利用机床的数控系统驱动带有测头的主轴运动，使得测头沿给定方向与工件接触，从而获取工件表面接触点的坐标值数据，并将数据转存为数控系统的自动化测量过程。自适应加工过程主要依赖于测量模型与设计模

型之间的偏差计算，测量模型的数据源于测量模块。

为了实现齿轮几何的在线测量，创新团队自主研发了测量模块，通过与机床数控系统的接口控制机床测头，对产品几何实物进行在线测量，其具体功能包括：测量过程定义（通过手工交互定义或者刀路自动定义测量点，按照分组方式创建测量任务）、测量过程控制（通过在线测量系统接口或数控系统接口，将测量指令发送到控制器，自动完成测量过程）、测量结果导入（通过寄存器接口或文件形式导入测量结果数据）和仿真及可视化（通过图形系统显示测量路径，模拟测量过程，并应用标记和标签等方式可视化地显示测量数据）。

软件开发

齿轮实体模型的精准创建问题解决后，需要解决轮齿倒圆倒角刀路轨迹精准控制的难题。为了准确找到零件位置，保证齿顶、齿廓倒圆倒角自动加工的精确性，创新团队利用计算机辅助制造（CAM）软件对建立的轮齿倒角或圆角特征进

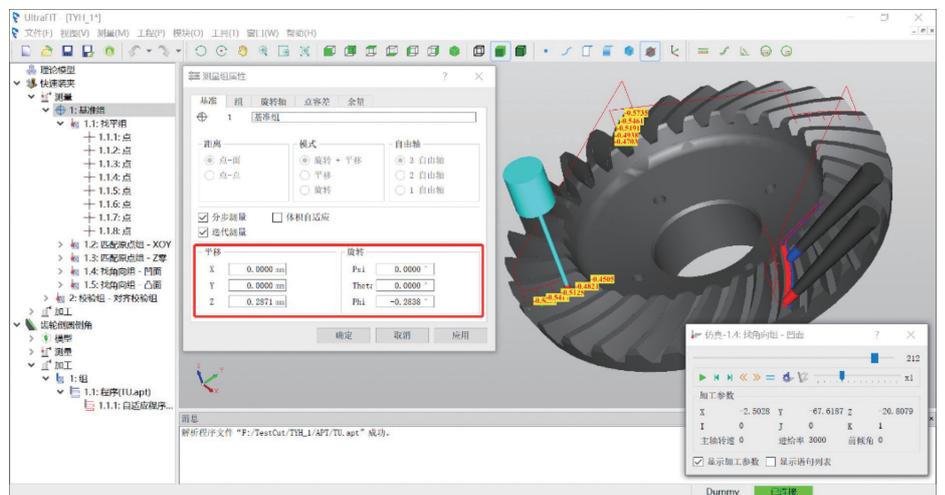


图3 UltraFIT自适应软件示意

行刀路轨迹设计和优化，结合创新团队自主开发的自适应加工软件 UltraFIT (如图 3 所示),将在线测量、误差计算、刀路修正、后置处理进行自动化组合(自动识别、自动运算、自动决策和自动执行),实现一键式智能化加工。

为了补偿由齿轮加工误差和装夹误差引起的倒圆倒角位置偏差,创新团队研究了齿轮倒圆倒角位置自适应最佳拟合算法。该算法基于实际测量结果与设计模型的偏差,对实际齿轮倒圆倒角进行自适应计算,将计算结果应用于理论刀路;对理论刀路进行几何变换,重新优化调整数字控制程序,生成符合实际齿轮形状的新刀路,其过程如图 4 所示,其中蓝色为原始刀路,红色为修正后的刀路。

实践及效果

创新团队利用螺旋锥齿轮齿廓高效高精倒圆倒角技术生产的试验件,通过了大修间隔时间(TBO)试验验证,成功解决了因高强度载荷下齿顶圆角不均等因素造成的齿面擦伤问题。此外,该技术已经完成了



图5 齿轮加工实物

发动机中央传动锥齿轮副与中心传动锥齿轮副的加工验证,实测尺寸离散度在0.1mm以内,解决了手工倒圆倒角加工存在的圆角不规整、尖角、台阶及缺料等问题,加工的齿轮圆角实物效果如图5所示。

为了进一步分析螺旋锥齿轮倒圆倒角自适应加工的质量的一致性和稳定性,创新团队在研究过程中,

对一型齿数为19的螺旋锥齿轮的工作齿面的齿顶棱边圆角进行了全采样检测,尺寸在理论值附近波动,幅度都在0.05mm左右,小于给定的 $\pm 0.1\text{mm}$ 公差范围,具备工程实践应用的可行性。

结束语

螺旋锥齿轮齿廓高效高精倒圆倒角技术在质量上极大地提升了锥齿轮齿顶齿廓倒圆质量的稳定性、一致性,可在其他传动领域进行推广,同时也为传动系统高载荷、长寿命的发展做出了贡献。实际工程的加工试切效果也表明,本项目开展的各项关键技术研究,可以有效地应用在航空发动机核心零部件的制造加工过程中,并具有良好的扩展性和可移植性。

航空动力

(袁邀玮,中国航发中传,工程师,主要从事航空发动机传动零部件加工工艺研究)

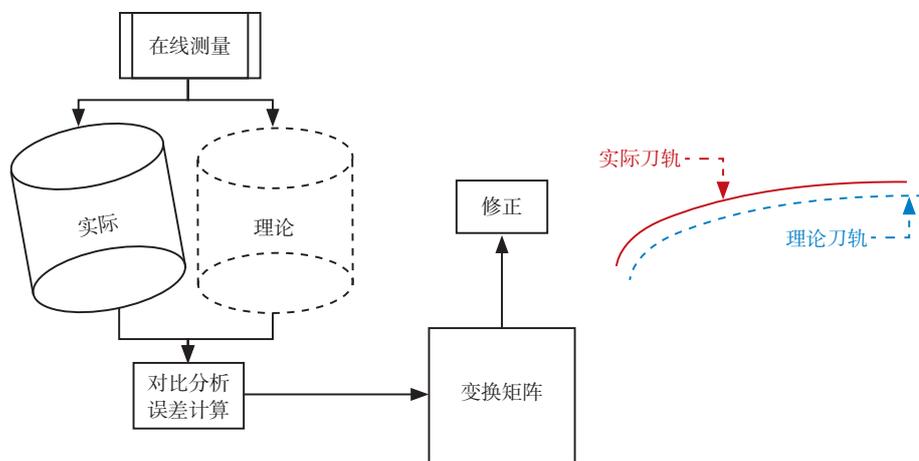


图4 刀路修正示意图