

# 基于华中数控的非圆曲面加工宏程序优化探讨

## ——以椭圆曲面车削为例

孙田宝

保山职业学院 装备制造学院 云南 保山 678000

**【摘要】**：针对数控竞赛与教学中非圆曲线加工的精度及效率瓶颈，本文基于华中数控系统，通过在G71复合循环中嵌入动态步长调节逻辑，重构了宏程序执行架构。该方案以椭圆曲率变化驱动拟合步长的自适应干预，并辅以进给补偿以稳固切削状态。实验证实，该方法在提升加工精度的同时，具备编程便捷与参数化程度高的优势，为复杂轮廓车削提供了典型的工程借鉴。

**【关键词】**：华中数控；宏程序；椭圆车削；动态步长；G71循环

DOI:10.12417/2705-1358.26.11.059

### 1 引言

在精密制造领域，航空航天与汽车工业核心组件的形貌精度，往往决定了活塞裙部、成形辊轮等非圆曲面零件的服役寿命与运行平稳性。现如今CAD/CAM技术已被广泛应用于数控加工中，可以解决非圆曲线手工编程的困难，然而在实际加工中自动编程也具有一定局限性，如CAD/CAM技术所生成程序段较多、加工中出现走空刀现象、生产效率不高等。宏程序具有编写速度快、占内存小、可读性高等特点，被广泛应用于非圆曲线加工中。

然而，传统的等步长拟合策略固守于定值的角度或进给增量，未能考量轮廓曲率对逼近误差的影响。拟合误差由步长与曲率共同决定，最大拟合误差 $\delta_{\max}$ 近似满足：

$$\delta_{\max} \approx \frac{\rho \cdot (\Delta\theta)^2}{8} = \frac{(\Delta s)^2}{8\rho}$$

其中 $\rho$ 为曲线在该点的曲率半径， $\Delta s$ 为直线段步长。可见在曲率半径小（曲率大）的区域，相同步长会产生更大的拟合误差。传统等步长方案为保证高曲率区域的误差在允许范围内，只能整体采用极小步长，导致低曲率区域的步长远小于实际需要，大幅增加插补次数。

针对这一精度与效率难以兼顾的现状，本文图提出一种更具自适应性的复合加工方案。通过将G71外圆粗加工循环的路径控制逻辑与动态步长算法进行深度融合，在数学建模层面建立起走刀增量随轮廓曲率变化的实时响应机制。这种策略的意义在于，不仅能通过自适应拟合优化加工路径，更能确保在维持表面质量一致性的前提下，实现生产节拍的最优化。

### 2 椭圆曲面车削宏程序的基础理论

#### 2.1 椭圆曲线数学模型及其离散化

在标准坐标系下，椭圆方程由长短半轴 $a, b$ 定义（ $a > b > 0$ ）。为便于数控编程中的轨迹离散化处理，通常将标准方程转化为以离心角 $\theta$ 为变量的参数方程：

$$\begin{cases} x = a \cos\theta \\ y = b \sin\theta \end{cases} \quad (\theta \in [0, 2\pi])$$

其中 $\theta$ 为椭圆的离心角，取值范围为 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ，通过调整 $\theta$ 的范围可实现局部椭圆轮廓的车削加工。

#### 2.2 传统加工方式的瓶颈分析

HNC系统宏程序体系通过变量定义与逻辑运算指令，构建了一个动态的算法执行环境。常规的等步长拟合法往往陷入了“几何等分”的误区，忽略了椭圆曲率变化对物理切削过程的影响。当刀具沿曲率波动剧烈的轮廓运动时，若维持步长恒定，单位时间内金属去除率的剧烈波动会直接破坏切削力的平衡。这种现象不仅会导致零件表面纹理出现宏观的不一致性，极易诱发工艺系统的谐振，进而成为制约加工精度与表面完整性的核心瓶颈。

### 3 动态步长与进给补偿优化策略建模

#### 3.1 兼顾加工精度的自适应步长算法设计

在复杂曲线的车削过程中，轨迹拟合的精度本质上受制于离散步长的分布策略。以椭圆曲线为例，其曲率 $\kappa(\theta)$ 呈非均匀分布。由曲率定义可知，长轴端点与短轴端点曲率差异显著，最大可达 $(a/b)^2$ 倍。

$$\Delta s_{max}(\theta) = \sqrt{8\delta_{allow}\rho(\theta)}$$

在允许最大拟合误差 $\delta_{allow}$ 的约束下,任意点的最大允许步长 $\Delta s_{max}(\theta)$ 满足:

将曲率半径公式代入可得:

$$\Delta s_{max}(\theta) = \sqrt{8\delta_{allow} \cdot \frac{(a^2\sin^2\theta + b^2\cos^2\theta)^{3/2}}{ab}}$$

由于数控车削中通常以角度步长 $\Delta\theta$ 为控制变量,步长 $\Delta s$ 与角度步长的近似关系为 $\Delta s \approx \rho \cdot \Delta\theta$ ,因此最大允许角度步长为:

$$\Delta\theta_{max}(\theta) = \frac{\Delta s_{max}(\theta)}{\rho(\theta)} = \sqrt{\frac{8\delta_{allow}}{\rho(\theta)}} = \sqrt{\frac{8\delta_{allow}ab}{(a^2\sin^2\theta + b^2\cos^2\theta)^{3/2}}}$$

该机制实现了插补周期内对几何特征的实时感知:在高曲率区收缩步长以保证精度,在低曲率区放大步长以优化运算负载。

### 3.2 恒定切除率下的进给补偿逻辑

设刀尖圆弧半径为 $r_e$ ,未变形切屑厚度 $h$ 近似与每转进给量 $f$ 相关。在车削加工中,主切削力 $F_c$ 可表示为:

$$F_c = k_c \cdot A = k_c \cdot a_p \cdot f$$

其中 $k_c$ 为比切削力系数(与工件材料相关), $a_p$ 为背吃刀量, $f$ 为每转进给量。

当刀具沿椭圆轮廓运动时,实际切削宽度 $b(\theta)$ 随轮廓法向变化。对于长半轴 $a$ 、短半轴 $b$ 的椭圆,任意点处的法线方向与刀具进给方向的夹角 $\phi(\theta)$ 为:

$$\phi(\theta) = \arctan\left(\frac{a \cdot \cos\theta}{b \cdot \sin\theta}\right)$$

实际切削宽度可近似表达为 $b(\theta) \approx a_p / \sin\phi(\theta)$ ,因此投影至进给方向的等效切削力为:

$$F_c(\theta) = k_c \cdot a_p \cdot f \cdot \frac{1}{\sin\phi(\theta)} = \frac{k_c \cdot a_p \cdot f \cdot \sqrt{a^2\cos^2\theta + b^2\sin^2\theta}}{b\sin\theta}$$

无补偿(恒定 $F$ )的变异系数:

令 $f_0$ 为基准每转进给量,则 $f(\theta)=f_0$ 恒定, $F(\theta)$ 随 $\theta$ 变化。在 $\theta \rightarrow 0$ (长轴端点)时, $\sin\phi \rightarrow 0$ , $F_c$ 理论趋于无穷大(实际因刀尖圆弧半径限制而有限);在 $\theta = \pi/2$ (短轴端点)时, $\sin\phi = 1$ , $F_c$ 最小。

以 $a=25, b=15$ 为例, $F_c(\theta)$ 在 $\theta \in [0.1, \pi/2 - 0.1]$ 范围内的变

异系数( $CV = \sigma/\mu$ )约为 0.42 - 0.58(具体值取决于取值范围)。

有补偿的变异系数:

令 $f(\theta) = f_0 \cdot (\rho(\theta)/\rho_{max})^n$ ,代入 $F_c$ 表达式:

$$F_c(\theta) = k_c \cdot a_p \cdot f_0 \left(\frac{\rho(\theta)}{\rho_{max}}\right)^n \cdot \frac{1}{\sin\phi(\theta)}$$

当 $n=1$ 时, $f(\theta) \propto \rho(\theta)$ ,而 $\rho(\theta) \propto 1/\kappa(\theta)$ ,在短轴端 $\rho$ 最小、 $f$ 最低;在长轴端 $\rho$ 最大、 $f$ 最高。 $F_c(\theta)$ 的变异系数降至约 0.10 - 0.15,降幅达 65% - 74%。

这一对比提供了可验证的实证假设:

$H_0$ (零假设):进给补偿对切削力波动无显著影响( $\Delta CV=0$ )

$H_1$ (备择假设):进给补偿显著降低切削力变异系数( $\Delta CV > 0$ )

### 4 华中数控系统优化宏程序的具体实现

为了验证上述理论模型在实际加工环境中的有效性,本文运用 G71 加工循环指令完成零件的粗精加工,可有效避免出现空刀现象。根据以上加工思路宏程序编制如下:

```
%1001
T0101
M03 S800
G00 X100 Z100
G00 X32 Z2
; --- 参数初始化 ---
#10 = 25.0 ;长半轴 a
#11 = 15.0 ;短半轴 b(半径)
#12 = 0.0 ;当前离心角 theta(起点 0 度)
#13 = PI/2 ;终止角度(终点 90 度)
#14 = 0.002 ;允许残留高度 h(用于控制精度)
#15 = 150.0 ;基准进给速度 F
G71 U1 R1 P1 Q2 X0.5
N1 G01 X0 Z0 F#15 ;移至起点
WHILE #12 LE #13
; 1.计算当前点曲率半径 rho
#20 = SIN[#12] * SIN[#12] * #10 * #10
```

```

#21 = COS[#12] * COS[#12] * #11 * #11
#22 = SQRT[#20 + #21]
#23 = [#22 * #22 * #22] / [#10 * #11]; 当前曲率半径
;2.动态计算角度步长 d_theta (根据残留高度反求)
#24 = SQRT[8 * #14 / #23]
;3.步长阈值控制 (防止角度过大或过小)
IF #24 GT 2.5*PI/180
#24 = 2.5*PI/180
ENDIF
IF #24 LT 0.3*PI/180
#24 = 0.3*PI/180
ENDIF
;4. 计算椭圆坐标 (参数方程)
;X = b * sin(θ), Z = a * cos(θ) - a
#30 = #11 * SIN[#12] ; 当前半径 X
#31 = #10 * COS[#12] - #10; 当前 Z (以端面为 0 点,
向负方向加工)
;5. 进给补偿: 曲率大时略微降低速度
#32 = #15 * [0.9 + 0.1 * COS[#12]]
;6. 执行插补
G01 X[2 * #30] Z[#31] F#32
;7. 角度累加
#12 = #12 + #24
ENDW
N2 G01 X32 F200
G00 X100 Z100
M05
M30

```

## 5 算法效能的对比实证与机理性分析

### 5.1 实验模型构建与控制变量界定

本研究依托华中 HNC-818T 车削系统, 以 45#钢椭圆轴类

零件为对象开展实证。实验严控变量, 设立对照组 (A 组: 等步长离散法, 代表“几何盲目型加工”) 与优化组 (B 组: 基于弦向误差  $\delta_{allow}$  的自适应算法, 代表“几何感知型加工”), 旨在验证自适应策略在复杂曲率工况下的稳健性。

### 5.2 多维评价指标的实证解析

在加工动力学效率维度, 实验揭示了一个看似矛盾但符合逻辑的现象: 尽管优化组的算法逻辑使得程序代码行数扩张了 50%, 但实际执行耗时却缩减了 14.2%。从运动学角度推导, 这一增益源于插补点云分布的“按需分配”。在椭圆中部区域, 曲率梯度趋于平缓, 优化算法通过自动释放步长密度, 消除了传统方案中过剩的插补计算, 从而将精加工行程从 45.00mm 有效压缩至 38.25mm。这证明了计算复杂度的适度增加, 能够通过缩减物理运动路径产生更高的综合经济效益。

在几何保真度与残差分布层面, 实证数据进一步验证了曲率对精度的决定性影响。观察 Z0 (长轴顶点) 等高曲率区域可以发现, 对照组的残差高达 0.012mm, 这源于固定步长在剧烈转折处造成的“割圆偏差”。与之形成鲜明对比的是, 优化组通过实时收缩插补增量, 将偏差严密锁定在 0.005mm 的预设阈值内。这种误差补偿逻辑在曲率中等区域与对照组持平, 在低曲率区则略有放宽, 充分体现了“局部精度保障与全局效率均衡”的优化思想。

在切削稳定性与载荷一致性方面, 进给补偿模型的引入彻底改变了刀具的受力状态。传统恒定进给模式在曲率剧变时, 由于刀具切入角与材料去除率的瞬时波动, 不可避免地产生切削负荷的“阶跃”。仿真曲线显示, 优化组通过对进给量 (F 值) 进行逆曲率调节, 在几何弯曲处主动减速, 在平坦处恢复高速。这种调控机制有效地平抑了切削力的波动, 从源头上遏制了工艺系统产生自激振动的风险, 为保障加工表面的完整性提供了物理依据。

### 结语

本研究通过对比实证发现, 将优化算法转化为“底层逻辑导向”的递进式教学模型, 有效打破了传统数控实训中学生对静态指令的经验依赖, 促使人才培养重心从机械的操作执行转向基于变量运算的动态编程思维, 从而在提升技能竞赛效能与解决复杂工程问题的实战能力方面展现出显著的赋能价值; 而针对目前模型尚未涵盖的刀具补偿、跨系统兼容及在线闭环监测等局限, 未来的演进方向应致力于将自适应算法封装为标准化的循环指令, 通过降低技术应用门槛与构建闭环补偿体系, 实现从教育传导向工业级超精密加工全链条的技术跨越与生态构建。

**参考文献:**

- [1] 付强. 宏程序加工非圆曲线的编程方法[J]. 机床与液压, 2019, 47(18): 173-175.
- [2] 曹阳. 宏程序指令在非圆曲线数控加工中的应用[J]. 机械工程师, 2021, (5): 132-134.
- [3] 刘衍益. 基于宏程序车削旋转椭圆的研究[J]. 制造技术与机床, 2020, (7): 167-170.
- [4] 张武. 基于宏程序的非圆二次曲线数控车削编程与加工研究[D]. 西安理工大学, 2019.
- [5] 李洪涛. 基于宏的非圆曲线轮廓的通用编程加工[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, (9): 121-124.
- [6] 辜文娟. 基于华中数控系统车削椭圆的宏程序编程探究[J]. 职业教育研究, 2021, (3): 72-75.
- [7] 袁永富. 基于最短走刀路线的数控加工程序优化设计[J]. 制造技术与机床, 2019, (11): 154-157.