

# 微型弹簧超精密加工质量控制策略研究

邵乃祥

杭州通用弹簧有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8703

**[摘要]** 本文聚焦微型弹簧超精密加工质量控制难题，针对线径 $\leq 0.1\text{mm}$ 弹簧卷绕回弹变形、螺旋升角偏差15%–20%等问题，系统分析原材料、工艺参数、环境设备三大影响因子。通过 $L9(3^4)$ 正交试验确定最优参数组合，整合原材料精密预处理（表面粗糙度 $R_a \leq 0.1\mu\text{m}$ ）、工艺参数自适应优化、全流程在线检测及恒温恒湿车间管控等技术，构建全流程控制策略。实验验证显示，该策略使螺旋直径误差 $\leq \pm 0.0008\text{mm}$ ，自由高度偏差 $\leq 0.03\text{mm}$ ，弹性刚度变异系数 $\leq 0.025$ ，加工合格率超97%，有效解决精度不稳定、一致性差等痛点。

**[关键词]** 微型弹簧；超精密加工；质量控制；工艺优化；在线检测；正交试验

## Research on Quality Control Strategy for Ultra Precision Machining of Micro Springs

Shao Naixiang

Hangzhou General Spring Co., Ltd.

**[Abstract]** This article focuses on the quality control problem of ultra precision machining of micro springs. In response to the problems of spring winding rebound deformation and spiral angle deviation of 15%–20% for wire diameter  $\leq 0.1\text{mm}$ , the three major influencing factors of raw materials, process parameters, and environmental equipment are systematically analyzed. Determine the optimal parameter combination through  $L9(3^4)$  orthogonal experiment, integrate precision pretreatment of raw materials (surface roughness  $R_a \leq 0.1\mu\text{m}$ ), adaptive optimization of process parameters, full process online detection, and constant temperature and humidity workshop control technologies, and construct a full process control strategy. Experimental verification shows that this strategy achieves a spiral diameter error of  $\leq \pm 0.0008\text{mm}$ , a free height deviation of  $\leq 0.03\text{mm}$ , an elastic stiffness variation coefficient of  $\leq 0.025$ , and a machining pass rate of over 97%, effectively solving pain points such as unstable accuracy and poor consistency.

**[Key words]** micro spring; Ultra precision machining; Quality Control; Process optimization; Online detection; Orthogonal experiment

### 1 引言

在航空航天、微机电系统 (MEMS) 及高端电子制造领域，微型弹簧的应用场景正不断拓展，其功能实现依赖于微米级的加工精度与稳定的力学性能。当前，微型弹簧加工面临线径细化与结构复杂化带来的双重挑战：线径 $\leq 0.1\text{mm}$ 的超细弹簧在卷绕过程中易出现回弹变形，螺旋升角偏差超差率达15%–20%。

同时，加工过程中温度波动、刀具磨损等因素导致的尺寸漂移，进一步加剧了质量控制难度。现有研究多聚焦单一工艺参数优化，缺乏全流程系统性控制方案，且检测技术存在滞后性，难以满足实时质量管控需求<sup>[1]</sup>。基于此，本文通过剖析微型弹簧超精密加工的质量影响因子，设计多因素耦合试验，整合原材料预处理、工艺参数自适应调节、在线检测与反馈补偿等关键

技术，构建全方位质量控制策略，旨在解决加工精度不稳定、一致性差等行业痛点，为微型弹簧加工技术升级提供新路径。

## 2 微型弹簧超精密加工质量影响因子分析

### 2.1 原材料特性影响

微型弹簧常用材料包括琴钢丝 (SWP-B)、不锈钢丝 (SUS304) 及钛合金丝，其力学性能与微观结构直接决定加工可行性与成品质量。实验选取三种典型材料，线径均为 0.08mm，通过拉伸试验与金相分析获取关键参数 (见表 1)。结果显示，琴钢丝的抗拉强度 (1800-2000MPa) 与弹性模量 (205GPa) 最优，但断后伸长率 (4%-6%) 较低，卷绕过程中易产生脆性断裂。不锈钢丝延展性良好 (断后伸长率 15%-18%)，但弹性回复率仅为琴钢丝的 78%，导致尺寸稳定性不足。

钛合金丝兼具高强度与耐腐蚀性，但其屈服强度 (860MPa)

表 1 微型弹簧原材料关键性能参数对比

材料类型	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	断后伸长率 (%)	屈服强度 (MPa)	表面粗糙度 Ra ( $\mu\text{m}$ )
琴钢丝 SWP-B	1920±50	205±3	5.2±0.3	1780±40	0.08±0.01
不锈钢丝 SUS304	1350±30	193±2	16.5±0.8	1200±30	0.09±0.02
钛合金丝 TA2	980±40	110±5	12.8±0.5	860±25	0.10±0.01

表 2 正交试验因素水平表

因素	水平 1	水平 2	水平 3
A: 卷绕速度 (r/min)	800	1200	1600
B: 芯轴直径 (mm)	1.180	1.185	1.190
C: 送丝速度 (mm/s)	15	20	25
D: 热处理温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	420	460	500

正交试验结果经极差分析表明，芯轴直径 (B) 对螺旋直径误差影响最大 (极差  $R=0.0028\text{mm}$ )，其次为卷绕速度 (A,  $R=0.0019\text{mm}$ )；热处理温度 (D) 是影响弹性刚度变异系数的关键因素 ( $R=0.032$ )，送丝速度 (C) 对自由高度偏差影响显著 ( $R=0.045\text{mm}$ )。最优工艺参数组合为 A2B2C2D2，即卷绕速度 1200r/min、芯轴直径 1.185mm、送丝速度 20mm/s、热处理温度 460 $^{\circ}\text{C}$ ，此时  $\Delta D=0.0007\text{mm}$ ， $\Delta H=0.032\text{mm}$ ， $CV=0.021$ ，满足超精密加工要求。

### 2.3 环境与设备因素影响

超精密加工环境的温度、湿度及振动会直接导致尺寸漂移。实验监测显示，环境温度每波动 1 $^{\circ}\text{C}$ ，微型弹簧螺旋直径变化 0.0003-0.0005mm。相对湿度低于 40%时，原材料表面易产生静电吸附粉尘，导致加工缺陷率提升 8%-10%；设备主轴振动加速度  $>0.02\text{g}$  时，会引发卷绕轨迹偏移，螺旋升角偏差超差。此外，数控卷绕机的主轴跳动精度 ( $\leq 0.001\text{mm}$ )、送丝机构的定位误差 ( $\leq \pm 0.0005\text{mm}$ ) 及刀具磨损量 ( $\leq 0.0003\text{mm}$ )

较高，加工过程中需更大成形力，易引发刀具磨损加剧。此外，原材料表面粗糙度  $Ra > 0.2\mu\text{m}$  时，会导致卷绕过程中摩擦力不均匀，螺旋直径偏差增加 0.0015-0.002mm。因此，原材料需经过精密拉拔与退火处理，控制表面粗糙度  $Ra \leq 0.1\mu\text{m}$ ，且保证直径公差  $\leq \pm 0.001\text{mm}$ 。

### 2.2 加工工艺参数影响

微型弹簧超精密加工采用数控卷绕工艺，核心参数包括卷绕速度、芯轴直径、送丝速度及热处理温度。设计 L9 ( $3^4$ ) 正交试验，以螺旋直径误差 ( $\Delta D$ )、自由高度偏差 ( $\Delta H$ ) 及弹性刚度变异系数 (CV) 为评价指标，探究各参数影响显著性 (见表 2)。试验选取琴钢丝 SWP-B (线径 0.08mm)，目标参数：螺旋直径 1.2mm，自由高度 3.0mm，有效圈数 5 圈。

均需严格控制，否则会导致批量加工一致性下降<sup>[2]</sup>。

## 3 微型弹簧超精密加工质量控制策略构建

### 3.1 原材料精密预处理与筛选

建立原材料全检机制：采用激光测径仪 (精度  $\pm 0.0001\text{mm}$ ) 检测线径均匀性，剔除直径波动超  $\pm 0.001\text{mm}$  的原料；通过金相显微镜观察微观组织，确保晶粒尺寸  $\leq 10\mu\text{m}$ ，无氧化夹杂等缺陷；对原材料进行低温退火处理 (300 $^{\circ}\text{C}$ ，保温 2h)，降低内应力，提升加工塑性。针对不同材料特性定制预处理方案：琴钢丝采用磷化处理提升表面润滑性，不锈钢丝进行钝化处理增强耐腐蚀性，钛合金丝通过超声波清洗去除表面氧化膜 (清洗时间 15min，功率 600W)。

### 3.2 加工工艺参数自适应优化

基于正交试验结果，构建工艺参数数据库，采用 BP 神经网络建立质量预测模型，输入参数包括材料类型、线径、卷绕速度、芯轴直径等，输出  $\Delta D$ 、 $\Delta H$  及 CV 值。模型训练样本量为 200 组，测试集平均预测误差  $\leq 3.5\%$ 。在实际加工过程中，

实时采集加工数据(如芯轴温度、送丝张力),通过自适应算法动态调整参数。当检测到螺旋直径偏差 $>0.001\text{mm}$ 时,自动修正芯轴直径(修正步长 $0.0005\text{mm}$ )。当弹性刚度变异系数超限时,调整热处理温度(调整幅度 $\pm 10^\circ\text{C}$ )。同时,引入刀具磨损监测系统,通过振动传感器采集刀具运行信号,当磨损量达到 $0.0003\text{mm}$ 时,触发刀具更换提醒。

### 3.3 全流程在线检测与反馈补偿

构建“三阶段检测”体系:加工前采用机器视觉系统(分辨率 $1\mu\text{m}$ )检测原材料表面质量与线径;加工中通过激光位移传感器(采样频率 $1000\text{Hz}$ )实时监测螺旋直径、自由高度等关键尺寸,数据传输至控制系统进行实时补偿<sup>[3]</sup>;加工后采用显微硬度计(载荷 $10\text{g}$ )检测表面硬度(要求 $\text{HV}\geq 580$ ),通过疲劳试验机测试弹性寿命( $\geq 10^6$ 次循环无失效)。针对检测发现的不合格品,分析缺陷成因(如回弹变形、表面划痕),优化对应控制参数。若因回弹导致尺寸偏差,增加芯轴直径预补偿量(补偿系数 $0.001\text{--}0.002\text{mm}$ )<sup>[4]</sup>。若存在表面划痕,降低卷绕速度并提升润滑油浓度(由 $5\%$ 调整至 $8\%$ )。

### 3.4 加工环境与设备精度控制

搭建恒温恒湿洁净车间,控制温度( $20\pm 0.5$ ) $^\circ\text{C}$ ,相对湿度( $50\pm 5$ )%,空气洁净度 Class1000;采用主动隔振平台(隔振效率 $\geq 95\%$ )减少设备振动影响。定期对数控卷绕机进

行精度校准:每周检测主轴跳动精度,每月校准送丝机构定位误差,每季度进行整机精度调试。建立设备维护档案,记录主轴运行时间、刀具更换频次等数据,通过预防性维护降低设备故障导致的质量波动。

## 4 结果分析

为验证构建的全流程质量控制策略有效性,选取琴钢丝 SWP-B(线径 $0.08\text{mm}$ )与不锈钢丝 SUS304(线径 $0.1\text{mm}$ )为实验材料,各加工 $100$ 件微型弹簧。实验组采用原材料精密预处理、工艺参数自适应优化等全流程策略,对照组用传统固定参数(卷绕速度 $1000\text{r/min}$ )且无在线补偿与严格环境控制。检测尺寸精度、力学性能及合格率,对比验证策略优劣。实验结果如表3所示。

由表可知,实验组尺寸精度显著优于对照组。琴钢丝 SWP-B的 $\Delta D$ 从 $\pm 0.0018\text{mm}$ 缩小至 $\pm 0.0007\text{mm}$ , $\Delta H$ 从 $0.075\text{mm}$ 降至 $0.032\text{mm}$ ;不锈钢丝 SUS304的 $\Delta D$ 从 $\pm 0.0020\text{mm}$ 缩小至 $\pm 0.0008\text{mm}$ , $\Delta H$ 从 $0.082\text{mm}$ 降至 $0.035\text{mm}$ 。原因在于实验组原材料经精密预处理与全检,保证线径均匀和表面质量。基于正交试验的最优参数组合(卷绕速度 $1200\text{r/min}$ 等)精准匹配加工需求<sup>[5-6]</sup>。加工中激光位移传感器实时监测并通过自适应算法补偿误差。且恒温恒湿车间与隔振平台抑制环境和设备振动影响,而对照组缺乏这些管控,导致尺寸偏差大。

表3 尺寸精度对比表

材料类型	检测指标	实验组数据	对照组数据	数据变化量
琴钢丝 SWP-B	螺旋直径误差 $\Delta D$ (mm)	$\pm 0.0007$	$\pm 0.0018$	缩小 $\pm 0.0011$
琴钢丝 SWP-B	自由高度偏差 $\Delta H$ (mm)	$0.032$	$0.075$	降低 $0.043$
不锈钢丝 SUS304	螺旋直径误差 $\Delta D$ (mm)	$\pm 0.0008$	$\pm 0.0020$	缩小 $\pm 0.0012$
不锈钢丝 SUS304	自由高度偏差 $\Delta H$ (mm)	$0.035$	$0.082$	降低 $0.047$

## 5 结论

针对微型弹簧超精密加工质量管控难题,系统剖析原材料、工艺参数、环境设备等关键影响因素,构建全流程质量控制策略。该策略整合原材料精密预处理、工艺参数自适应优化、全流程在线检测与环境设备管控等核心技术,经实验验证,可将螺旋直径误差控制在 $\pm 0.0008\text{mm}$ 内,加工合格率提升至 $97\%$ 以上,显著改善加工精度与一致性,为行业技术升级提供有效支撑。

### [参考文献]

[1]胡辰.环境微振动作用下超精密机床动力学分析及基础隔振技术研究[D].南京理工大学,2020.

[2]武鹏飞,田中旺,宋永强.基于激光多普勒的微型弹簧

振动快速测试方法[J].探测与控制学报,2019,41(06):64-68.

[3]周伟楠,朱海峰,陈雷,等.微型斯特林制冷机用柔性板簧弹性性能分析[J].低温工程,2019,(06):12-18+39.

[4]张勇.微型货车后钢板弹簧断裂原因研究[J].北京汽车,2019,(05):44-46.

[5]张顺国,谷志强,龙剑,等.超精密加工技术的发展状况[J].机械工程师,2006,(11):19-22.

[6]郑德志,卢泽生.超精密加工振动误差源诊断实验研究[J].高技术通讯,2003,(10):61-65.

作者简介:邵乃祥,出生年月:1967-08,男,汉族,籍贯:江西省南昌市,学历:高中,研究方向:弹簧制造、研发。