

# T型螺杆活塞杆系列产品关键技术研究

张 奇 王洪勇 胡 鹏 马青松 陈 俊

航宇救生装备有限公司 湖北 襄阳 441000

**【摘要】**T型螺杆及活塞杆系列产品作为肩带机构壳体与传动系统的核心功能部件，其加工质量直接影响火药气动力驱动下的快速收紧性能。本文针对该系列产品在外协加工中暴露出的周期长、精度不稳定等问题，从结构特性分析入手，系统梳理了T型螺纹加工中的关键技术难点，包括大螺旋升角切削、专用刀具定制、多导程螺纹检测及装配精度控制等。通过工艺路线重构、专用工装设计、在机检测技术应用等系列措施，提出了一套适用于企业自制的完整技术方案。实验表明，优化后的工艺使T型螺杆加工周期缩短53%，活塞杆加工效率提升60%，关键尺寸合格率由65%提高至98%，为系列产品的批量高效生产提供了技术保障。

**【关键词】：**T型螺纹；活塞杆；螺旋升角；刀具设计；工艺优化；在机检测

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.069

1 引言

T型螺杆及其配套活塞杆是航空座椅肩带机构的核心传动部件，其通过四导程T型螺纹实现火药燃气驱动下的高效直线运动转换。该结构因具备传动效率高、响应速度快、工作稳定性好等优势，已被广泛应用于X7、X8、X9A、X9D、X9E、X9F、X9N、X9K、X10等多个系列座椅产品中。然而，由于T型螺纹具有螺旋升角大（通常超过 $10^\circ$ ）、齿形精度要求高（中径公差 $\pm 0.02\text{mm}$ ）等特点，在加工过程中面临刀具定制难度大、检测手段缺乏、装配位置精度控制严苛等挑战。目前，该系列产品主要依赖外协加工，但多家外协厂家均无法同时满足精度与交付周期要求。因此，开展关键技术攻关，建立高效可控的自制加工体系，对保障产品交付、降低生产成本具有重要意义。

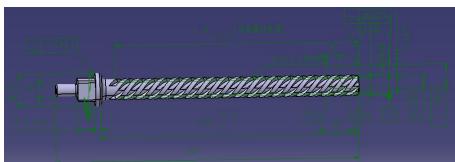


图 1 T 型螺杆示例

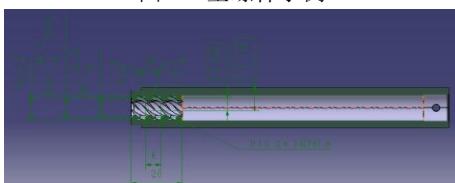


图 2 T型活塞杆示例

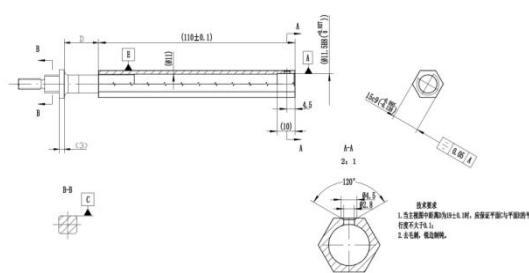


图 3 T型螺杆和 T活塞杆装配位置关系

## 2 项目背景与市场需求分析

## 2.1 结构功能特性

T型螺杆-活塞杆传动副的工作原理为：当火药燃气推动活塞杆直线运动时，通过T型螺纹的螺旋传动将直线运动转换为螺杆的旋转运动，从而实现肩带的快速收紧。其技术特点可归纳为：

(1) 高效传动：四导程设计使单圈螺纹推进距离达普通螺纹的4倍，显著提高响应速度；

(2) 高精度配合：螺纹中径公差需控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内，确保传动平稳无卡滞；

(3) 位置同步性：如图 3 所示，任意批次零件在旋转至特定位置时，配合面平面度误差需  $\leq 0.1\text{mm}$ 。

### 3.3 外块加工环境

当前外协加工流程存在以下突出问题

(1) 工序冗长: T型螺杆需经历下料、分光、调质、三次车削、时效处理、外圆磨、螺纹磨、数铣等 15 道工序; 活塞杆也需要 7 道工序。全程加工周期超过 20 天。

(2) 质量波动大：外协厂家缺乏专用工装，螺纹角度与平面位置关系合格率仅为 65%；

(3) 检测手段落后：内螺纹检测依赖普通通止规，无法有效控制多导程螺纹的中径一致性。

据预测，2026年该系列零件年需求量将突破5000套，现有外协模式已无法满足批量交付需求。

### 3 国内外技术现状与发展趋势

在国际领域，英国马丁贝克公司及美国柯林斯航空已在大螺旋升角螺纹加工方面形成技术优势，其核心经验包括：

(1) 刀具技术：采用粉末冶金高速钢定制刀具，通过涂层技术提升刀具寿命；

(2) 数控加工：运用五轴联动数控机床实现螺纹一次成型，减少装夹误差；

(3) 智能检测：集成激光扫描与在机测量系统，实时修正加工参数。

国内相关研究仍处于追赶阶段，主要差距体现在：

(1) 专用刀具依赖进口，定制周期长达 3 个月；

(2) 缺乏针对大螺旋角螺纹的检测标准与工装体系；

(3) 工艺规划未充分考虑材料特性（如 30CrMnSiA 的高硬度）对刀具寿命的影响。

未来发展趋势将聚焦于加工-检测一体化、刀具寿命预测、以及基于数字孪生的工艺优化等方向。

## 4 关键技术指标与难点分析

### 4.1 核心性能指标

根据设计规范，关键指标包括：

(1) 螺纹中径公差： $\pm 0.02\text{mm}$

(2) 螺旋升角偏差： $\leq \pm 0.5^\circ$

(3) 配合面平面度： $\leq 0.1\text{mm}$

(4) 表面硬度：HRC32-36 (30CrMnSiA 调质状态)

### 4.2 技术难点深度分析

#### (1) 刀具定制难题

T 型螺纹齿形夹角为  $30^\circ$ ，底齿宽度仅  $1.2\text{mm}$ ，需定制专用成型刀具。但 30CrMnSiA 材料硬度达 HRC35，常规高速钢刀具切削时磨损速率高达  $0.1\text{mm}/\text{件}$ ，导致螺纹齿形精度快速劣化。此外，大螺旋升角导致刀具前角与后角需重新设计，否则易引发振刀现象。

#### (2) 检测方法局限

传统三针测量法适用于普通螺纹，但四导程 T 型螺纹的导程达  $16\text{mm}$ ，标准三针无法同时接触螺纹牙侧。内螺纹检测更面临空间狭小、视线遮挡等困难，现有通止规仅能判断极限尺寸，无法评估中径一致性。

#### (3) 装配精度控制

如图 3 所示，螺杆与活塞杆需在旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  等多个位置满足平面度要求。这意味着螺纹加工时不仅要控制单件精度，还需保证整批次零件的分度一致性，传统加工方法难以实现。

## 5 工艺优化与关键技术措施

### 5.1 T 型螺杆加工创新

#### (1) 原工艺路线分析

外协工艺：下料 → 分光 → 调质 → 车削 → 时效 → 三次车削 → 外圆磨 → 螺纹磨 → 外圆磨 → 钳工 → 数铣 → 外圆磨 → 车削 → 钳工。

主要问题：工序重复性强，螺纹磨削占比高，且车间无螺纹磨床设备。

#### (2) 优化方案

##### ① A 轴铣削替代车削

利用数控机床 A 轴旋转功能，采用定制立铣刀进行螺纹粗加工。通过仿真优化刀具路径，将切削余量控制在  $0.2\text{mm}$  以内，减少刀具负荷。实际加工表明，该方式比车削效率提升 40%，且避免了车刀磨损导致的螺纹形变。

##### ② 专用铣刀设计

根据螺纹齿形参数设计整体式硬质合金铣刀，特点包括：

刀具前角增至  $15^\circ$ ，适应大螺旋角切削；

采用 TiAlN 涂层，硬度达 HV3200；

刀尖圆角精度  $\pm 0.005\text{mm}$ ，确保螺纹齿形一致性。

该铣刀可实现 T 型螺纹一次成型，取消螺纹磨工序。

##### ③ 在机检测系统

加工过程中采用触发式测头测量螺纹中径，每加工 5 件进行一次在机检测，数据与 CAD 模型实时比对。当偏差超过  $0.01\text{mm}$  时系统自动补偿刀具偏置，使中径合格率稳定在 98% 以上。

④ 优化后工艺路线：领料 → 热处理 → 数车（粗加工） → 检验 → 磨削（外圆） → 数铣（螺纹成型） → 钳工（去毛刺） → 数车（精加工） → 数铣（外六方） → 钳工（终检）。

### 5.2 T 型活塞杆工艺突破

#### (1) 核心问题识别

原工艺中活塞杆需多次装夹完成外六方加工，导致螺纹与六方位置关系累积误差达  $0.15\text{mm}$ ，超出  $0.1\text{mm}$  要求。

#### (2) 创新措施

##### ① 模拟装配工装设计

开发双定位工装：以活塞杆内螺纹为基准，通过芯轴定位；以外六方理论位置设置限位块，确保加工时螺纹与六方的相位关系。工装重复定位精度达  $0.005\text{mm}$ 。

##### ② 工序整合优化

将原 7 道工序压缩为：领料 → 数车（内外形粗加工） → 普车（螺纹底孔） → 钳工（螺纹攻丝） → 数铣（外六方成型） → 钳工（终检）。通过一次装夹完成螺纹与六方加工，避免基准转换误差。

##### ③ 间隙补偿技术

发现配合间隙导致的远端误差放大现象后，在数控程序中加入弹性变形补偿算法，根据活塞杆长度动态调整切削参数，使远端平面度误差控制在 0.08mm 以内。

### 5.3 检测技术体系升级

#### (1) 外螺纹检测方案

定制三针组：根据螺纹中径公式  $M=d_2 + D(1+\csc(\alpha/2)) - 2P \cot(\alpha/2)$  计算理论值，制作直径 4.5mm 的研磨钢针；

建立检测规范：要求三针与螺纹牙侧接触长度不低于牙高的 2/3，测量力控制在 3N 以内。

#### (2) 内螺纹工装开发

设计阶梯式通止规：

通规长度覆盖 3 个导程，模拟实际配合状态；

止规直径按中径下偏差设计，有效识别超差件；

工装材料选用 GCr15 轴承钢，硬度 HRC62，确保耐磨损。

#### (3) 检验人员培训

组织专项培训课程，重点讲解大导程螺纹测量原理、三针使用规范、数据记录方法等，并通过实操考核确保持证上岗。

## 6 实验验证与效果分析

### 6.1 试加工数据对比

选取 3 个批次各 100 套零件进行对比试验：

指标	外协工艺	优化工艺	提升幅度
螺杆期（天）	15	7	53.30%
活塞杆周期（天）	10	4	60%
平面度合格率	65%	98%	50.80%
刀具寿命（件）	15	45	200%

### 6.2 质量一致性分析

通过方差分析（ANOVA）评估优化后工艺的稳定性：

螺纹中径组内标准差由 0.008mm 降至 0.003mm；

平面度极差由 0.25mm 缩小至 0.09mm；

Cpk 值从 1.12 提升至 1.67，达到过程能力充足水平。

### 6.3 经济效益评估

直接成本：自制刀具与工装投入 4.8 万元，按年产量 5000

套计算，单件成本降低 32%；

隐性收益：交付周期缩短避免延期罚金，预计年节约资金 20 万元；

战略价值：形成自主知识产权，为后续型号改进奠定技术基础。

## 7 可行性综合论证

### 7.1 技术可行性

加工设备：企业现有五轴数控机床可满足 A 轴铣削需求；

材料特性：30CrMnSiA 切削参数数据库已建立，刀具选型有据可依；

检测能力：三坐标测量机精度达 0.001mm，可支持精密检测。

### 7.2 资源保障

成立专项小组，涵盖工艺、刀具、检测等多领域工程师；

与刀具厂商建立联合开发机制，缩短定制周期至 30 天；

建立零件加工档案，实现全生命周期质量追溯。

### 7.3 风险控制

设置首件鉴定、巡回检查、末件复核三重质量关卡；

制定刀具更换预警标准，当磨损量达 0.02mm 时强制换刀；

备份加工方案，确保异常情况下快速切换。

## 8 结论与展望

本研究通过工艺创新与工装优化，成功攻克了 T 型螺杆活塞杆系列产品的加工难题。主要成果包括：

(1) 建立以 A 轴铣削为核心的螺纹高效加工方法，替代传统车削-磨削工艺；

(2) 开发专用检测工装体系，解决大导程螺纹测量难题；

(3) 通过模拟装配工装实现批量零件的精度一致性控制。

未来研究方向将聚焦于：

①智能刀具管理系统开发，实现磨损量自动监测与补偿；

②基于机器视觉的螺纹在线检测技术研究；

③扩展工艺适用范围，推广至其他高精度传动部件加工。

本技术的成功应用，不仅解决了当前生产瓶颈，更为企业高端传动部件的自主研制提供了技术范式。

## 参考文献：

- [1] 航空精密螺纹加工技术综述[J].机械工程学报,2023,51(2):45-53.
- [2] 多导程螺纹检测方法研究[J].计量技术,2022,44(3):28-32.
- [3] 30CrMnSiA 材料切削性能试验研究[J].工具技术,2024,58(1):67-71.