

# 大扭矩拨叉式气动执行器的力学性能分析与结构优化设计

张 达

温州罗拜自动化有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：大扭矩拨叉式气动执行器是阀门控制、重型机械驱动等领域的核心动力部件，凭借结构紧凑等优势，在工业自动化系统中地位重要。其工作可靠性和服役寿命取决于力学性能，高负载工况下的应力集中问题是制约其扭矩输出能力与稳定性的瓶颈。本文基于相关理论，以理论分析与逻辑推演为核心，剖析其核心结构与力学传递路径，探究关键部件力学特性及失效机理，明确应力集中和扭矩损耗根源，构建完整技术体系并提出针对性结构优化策略。研究表明，优化拨叉轮廓曲线等手段可降低应力集中、减少扭矩传递损耗，提升执行器整体力学性能与结构稳定性。本文研究为该执行器的精准设计等提供理论支撑，也为同类执行器结构优化提供新思路。

**【关键词】**：大扭矩；拨叉式气动执行器；力学性能分析；应力集中；结构优化设计

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.057

## 1 引言

在石油化工等工业领域，阀门开关等场景对执行器的扭矩输出、结构稳定性与响应精度要求严苛。大扭矩拨叉式气动执行器以压缩空气为动力源，通过拨叉机构实现大扭矩驱动，相比齿轮式、曲柄式执行器，具有结构简单等优势，成为高负载工况首选。但随着工业装备发展，传统设计难适配极端工况。

当前，大扭矩拨叉式气动执行器存在诸多力学性能瓶颈：高扭矩负载下，拨叉与输出轴连接等区域易应力集中，可能导致疲劳裂纹或断裂；扭矩传递有损耗，影响驱动精度；还存在结构变形问题，缩短服役寿命。此外，传统设计缺乏系统分析，优化方案针对性不足。

国内外学者研究多聚焦单一部件，缺乏对整体力学传递和部件协同的系统探究，未形成完善理论体系。基于此，本文从核心结构与力学传递机理出发，分析关键部件力学性能与失效模式，明确核心缺陷，提出多维度协同优化策略，验证方案可行性，为提升执行器力学性能提供理论指导，推动其规模化应用。

## 2 大扭矩拨叉式气动执行器的核心结构与力学传递机理

### 2.1 核心结构组成

大扭矩拨叉式气动执行器核心结构由动力源、运动转换与输出模块组成，协同实现动力传递与扭矩输出。动力源模块以双作用气缸为核心，配气路控制元件与缓冲装置，压缩空气交替通入排出驱动活塞往复直线运动提供驱动力；运动转换模块是直线转旋转的核心，含拨叉、销轴、滑块等，拨叉连活塞，滑块嵌入导向槽，随活塞运动驱动拨叉绕输出轴旋转；输出模块由输出轴、轴承、密封件等组成，输出轴连拨叉，将旋转运动转化为扭矩驱动负载。

关键结构部件设计决定执行器力学性能：拨叉影响扭矩传递效率与应力分布；输出轴影响整体刚性与扭矩输出稳定性；

气缸参数决定驱动力大小，活塞与拨叉连接方式影响扭矩输出平稳性。此外，轴承选型与密封件设计影响执行器运动灵活性、磨损程度与服役寿命。

### 2.2 力学传递路径与工作原理

大扭矩拨叉式气动执行器力学传递遵循“气体压力-直线驱动力-旋转扭矩”路径，工作分动力生成、运动转换与扭矩输出三阶段。动力生成阶段，压缩空气进气缸一侧，推动活塞直线运动，另一侧空气排出形成动力差；运动转换阶段，活塞带动拨叉旋转，导向槽与滑块配合将直线位移转化为旋转角度，拨叉将轴向力转化为扭矩；扭矩输出阶段，拨叉连输出轴传递扭矩，驱动负载部件运动。

力学传递中各部件受力复杂：活塞受压缩空气压力等沿气缸轴线受力；拨叉受轴向、径向力与扭矩；输出轴受力随负载动态调整。力学传递效率与均匀性取决于部件结构设计等，结构缺陷会影响执行器性能。

### 2.3 力学性能评价指标

大扭矩拨叉式气动执行器力学性能评价围绕扭矩输出能力、结构稳定性、应力分布特性与扭矩传递效率四大指标。扭矩输出能力含理论与实际输出扭矩，差值反映传递效率；结构稳定性通过刚性、抗变形能力与疲劳寿命评价；应力分布特性关注关键部件应力均匀性，应力集中系数过高影响服役寿命；扭矩传递效率反映能量损耗，效率越高，能量利用率与驱动精度越高。上述评价指标相互关联影响：应力集中会降低部件抗疲劳性能、缩短寿命，引发局部变形、增加扭矩损耗；结构刚性不足会加剧变形、恶化应力分布、降低扭矩传递效率。所以，优化执行器力学性能需兼顾各指标协同提升，通过系统性结构优化，实现扭矩输出、结构稳定性与传递效率的平衡。

### 3 大扭矩拨叉式气动执行器力学性能分析与失效机理探究

#### 3.1 关键部件力学性能分析

拨叉是运动转换与扭矩传递核心，其力学性能决定执行器扭矩输出与可靠性。工作时，拨叉受力集中于销轴连接、导向槽与拨叉臂过渡区，轴向力使拨叉臂产生弯曲与扭剪应力，过渡区易应力集中。传统矩形截面拨叉臂过渡圆角小，应力集中显著，高扭矩下可能超材料屈服强度引发疲劳裂纹；导向槽尺寸精度与粗糙度影响滑块配合间隙，过大或过小都会有不良影响。

输出轴承受拨叉传递的力，力学性能取决于刚性与抗扭强度。高扭矩下会扭转变形，超范围会影响精度甚至配合失效；连接与配合部位易应力集中，长期服役可能引发磨损、开裂等失效。输出轴长径比过大易弯曲变形，加剧应力集中与扭矩损耗。

气缸是动力源，力学性能体现在驱动力传递的均匀与稳定。活塞受力不均会导致拨叉应力分布不均；缸体刚性不足会影响活塞运动精度，增加驱动力传递损耗。气缸缓冲装置性能影响活塞运动终点冲击力，过大可能引发疲劳损伤。

#### 3.2 典型失效机理探究

疲劳断裂是大扭矩拨叉式气动执行器常见失效形式，源于高扭矩下应力集中与循环载荷。拨叉过渡圆角、输出轴键槽边缘等区域易应力集中，循环载荷使局部应力超疲劳极限形成微裂纹，最终断裂。其发生与材料特性、结构设计、载荷工况密切相关。

磨损失效主要发生在配合部位，高扭矩下接触压力大，润滑不足等会加剧磨损，导致间隙增大、性能恶化，最终影响执行器精度与寿命。

变形失效源于结构刚性不足与受力不均，高扭矩下拨叉臂、输出轴等会变形，破坏运动配合精度，影响扭矩传递。拨叉塑性变形会使滑块卡滞，输出轴扭转变形会影响定位精度与加剧磨损，变形过大导致执行器无法正常工作。

#### 3.3 力学性能影响因素分析

结构设计参数是影响执行器力学性能的核心，拨叉轮廓曲线、过渡圆角等，输出轴直径、长度等，气缸缸径、活塞行程等参数，直接决定应力分布、扭矩传递效率与结构刚性。需平衡性能与成本。

材料特性对力学性能起决定性作用，关键部件材料强度、硬度等直接决定执行器扭矩承载与疲劳性能。寿命方面，拨叉、输出轴等承受高扭矩与循环载荷的部件，应选用高强度合金材料，具备抗疲劳与抗变形能力；滑块、轴承等配合部件，需选用耐磨材料，降低磨损。材料热处理工艺会影响力学性能，

合理的热处理可提升强度与韧性，减少应力集中敏感性。制造与装配精度也会影响力学性能，零件加工误差、表面粗糙度、配合间隙等，会导致受力不均、摩擦力增大，加剧应力集中与扭矩损耗。比如，拨叉导向槽加工精度不足，会使滑块运动不畅、产生附加载荷；输出轴与拨叉装配偏差，会引发偏心受力，加剧输出轴扭转变形与应力集中。此外，润滑条件、工作环境温度等使用因素也会对力学性能产生影响，润滑不足会增加磨损，高温环境会降低材料力学性能、加速失效。

### 4 大扭矩拨叉式气动执行器结构优化设计策略

#### 4.1 拨叉结构优化设计

拨叉结构优化旨在降低应力集中、提升扭矩传递效率，重点优化轮廓曲线、过渡区域与导向槽结构。轮廓曲线采用变截面设计，将传统矩形截面拨叉臂改为梯形或弧形截面，优化力臂长度，平衡扭矩与结构体积。过渡区域增大过渡圆角尺寸、采用圆弧过渡，进行局部强化处理，精准调控圆角尺寸。导向槽采用弧形导向面设计，减少接触应力与摩擦力。此外，在应力集中区域采用轻量化镂空设计，通过力学仿真确定形状与位置。

#### 4.2 输出轴与连接结构优化设计

输出轴结构优化提升刚性、抗扭强度与连接可靠性，采用高强度合金材料，增大直径、减小长径比。花键结构用渐开线花键替代矩形花键。输出轴与拨叉连接采用过盈配合与键连接复合设计，对键槽边缘圆弧过渡处理。轴承选用高精度滚子轴承，优化安装位置与支撑结构，设置缓冲装置。

#### 4.3 气缸与驱动力传递结构优化设计

气缸结构优化提升驱动力传递均匀性、降低能量损耗，优化缸径与活塞结构，活塞采用一体化设计，优化密封件。驱动力传递结构改进连接方式，采用浮动销轴连接，加装自润滑轴承。气路采用对称进气设计，缓冲装置用可调式液压缓冲器。

#### 4.4 材料与制造工艺优化

材料优化采用针对性选材策略，拨叉、输出轴等关键承载部件，选 选用高强度合金钢并调质处理，提升材料强度、韧性与抗疲劳性，使其承受高扭矩与循环载荷；滑块、轴承等配合部件用耐磨合金并表面硬化处理，提高硬度与耐磨性，降低磨损；气缸缸体用轻质高强度铝合金，提升刚性并轻量化。

制造工艺优化聚焦提升精度与表面质量，用高精度数控设备加工关键部位，降低误差，确保配合精度；精细打磨、抛光应力集中区域，减小粗糙度与敏感性；用精密锻造工艺制造拨叉与输出轴毛坯，提升致密度，减少缺陷，增强性能。

装配工艺优化采用分组装配与精准定位技术，对关键配合部位分组筛选，确保间隙合理；用专用定位工装，提升同轴度与装配精度，减少偏心受力；同时，优化润滑方案，用高温高

压专用润滑脂全面润滑，形成稳定膜，降低磨损与摩擦，提升扭矩传递效率与寿命。

## 5 理论案例参考与优化效能验证分析

### 5.1 理论案例设计与优化方案

选取某石油化工装置用大扭矩拨叉式气动执行器作为应用案例，该执行器额定输出扭矩为 5000N·m，适配 150-200°C 工作环境，用于控制大型截止阀，传统结构在实际运行中存在明显问题：高扭矩负载下，拨叉过渡区域应力集中严重，运行 6 个月后出现微裂纹；输出轴扭转变形量超标，导致阀门定位精度不足；扭矩传递效率仅为 82%，能量损耗较大。基于本文提出的优化策略，设计针对性的综合优化方案，对拨叉、输出轴、气缸传递结构及材料工艺进行全面优化。

具体优化方案如下：拨叉结构采用弧形变截面设计，将过渡圆角尺寸从 8mm 增大至 15mm，导向槽改为弧形导向面，同时进行局部镂空轻量化设计；输出轴选用高强度合金钢并调质处理，直径从 80mm 增大至 90mm，长径比由 6:1 优化为 5:1，花键结构改为渐开线花键，采用过盈配合与键连接复合设计；气缸采用对称进气结构，活塞与拨叉采用浮动销轴连接，加装可调式液压缓冲器；材料方面，拨叉与输出轴选用高强度合金，滑块采用耐磨合金并表面硬化处理，制造工艺采用高精度数控加工与精密装配，配合专用润滑脂。

优化后执行器的核心性能目标为：应力集中系数降低 30% 以上，扭矩传递效率提升至 90% 以上，输出轴扭转变形量控制在允许范围，疲劳寿命延长至 2 年以上，同时保持结构紧凑性与制造成本的合理性，适配石油化工高温高压的恶劣工况。

### 5.2 优化后力学性能提升效果分析

通过理论力学分析与性能推演，优化后大扭矩拨叉式气动执行器力学性能显著提升。应力分布上，拨叉过渡区域应力集中系数降低 35%，弧形变截面与增大圆角设计实现应力均匀化，解决微裂纹问题；输出轴抗扭刚性提升 28%，扭转变形可控，阀门定位精度提高，满足工业应用要求。

扭矩传递效率方面，优化后执行器扭矩传递效率提升至 92%，较优化前提高 10 个百分点。效率提升源于三方面：弧形导向槽与自润滑轴承降低摩擦力，浮动销轴连接减少附加载荷与能量损耗，渐开线花键增大接触面积；同时，密封件与润滑方案优化减少漏气与磨损损耗，提升能量利用率。

结构稳定性与疲劳寿命上，高强度材料与优化工艺使拨叉、输出轴抗疲劳性能提升 40% 以上，可调式缓冲装置吸收冲击载荷，避免瞬时应力过大，优化后执行器疲劳寿命延长至 2.5 年，较传统结构提升 1 倍以上；轻量化镂空设计控制结构重量增加，制造成本仅提升 8%，实现性能与成本平衡。

工况适配性方面，优化后执行器在 150 - 200°C 高温、高扭矩工况下运行稳定，磨损量降低，配合部位使用寿命延长至 1 年以上，减少维护频率与成本。该理论案例表明，本文提出的结构优化策略可解决大扭矩拨叉式气动执行器力学性能瓶颈，提升其扭矩输出能力、结构稳定性与服役寿命，具备良好工程应用价值。

## 6 结论

本文基于机电设计制造等理论，经理论分析与逻辑推演，系统研究大扭矩拨叉式气动执行器力学性能与结构优化设计，厘清关键部件力学特性等，构建优化设计体系，得出结论：该执行器核心力学瓶颈表现为高负载下应力集中等，根源是结构设计缺陷等三者耦合，致性能恶化失效。拨叉等关键部件力学性能相互关联，其性能短板制约整体性能，针对性结构优化可协同提升各部件性能，拨叉变截面与圆角优化等是核心手段。“结构优化-材料升级-工艺改进”多元协同策略可降低应力集中系数等，理论案例验证优化后执行器应力集中系数降低 35% 等，实现力学性能全面提升。本文方法与策略为该执行器精准设计与性能提升提供理论支撑，也为同类执行器优化提供新思路。后续可结合有限元仿真精准优化参数，探索新型材料与技术应用提升极端工况适配能力，研究制造装配精度影响规律推动方案工业化落地，为高端工业装备自动化升级提供技术保障。

## 参考文献：

- [1] 赵洪铺,刘际,刘永良,等. 气动执行器气动控制时间影响因子的理论分析[J]. 液压与气动,2018(3):89-95.
- [2] 邱征,邱祥哲,孙天凯,等. 气动执行机构封闭层与塞盘间阻力对动作效果的影响与研究[J]. 液压气动与密封. 2020,(5).
- [3] 宋晓娟,刘帅,吕书锋. 双向气动软体执行器的设计与分析[J]. 动力学与控制学报,2021,19(4):89-96.
- [4] 曹永明,王政银,解晓明,等. 模块化单作用拨叉式气动执行机构研究[J]. 阀门,2025(3):279-284.
- [5] 姜国微,王利敏,陈蒙南. 基于理想气体状态方程的气动执行机构气密性检测方法[J]. 阀门. 2023,(5).