

驱动轴星型套自动化生产线上料机械手设计

卢春民

宁波凯敏盛机械有限公司 浙江 宁波 315800

【摘要】：驱动轴星型套生产具有批量连续、定位精度要求高和人工上下料劳动强度大的特点，采用上下料机械手能够提升节拍稳定性和安全水平。文章结合星型套零件特征与生产线工艺需求，分析机械手总体布局、自由度配置、末端夹持、本体传动、料仓防错和控制联锁等设计要点，提出以仿真调试、分阶段试运行和运行数据反馈为支撑的优化路径，为同类零件自动化上下料设备设计提供参考。

【关键词】：驱动轴星型套；自动化生产线；上下料机械手；夹持机构；控制系统

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.063

引言

汽车传动部件加工正逐步由单机自动化转向连续生产线协同，驱动轴星型套作为关键零件，其上下料稳定性直接影响加工节拍、夹具寿命和成品一致性。传统人工取放容易受到疲劳、油污和姿态判断影响，难以满足长期稳定生产要求。设计专用上下料机械手，需要把零件结构、料仓整理、机床夹具、动作路径和安全联锁纳入统一方案，不能只停留在搬运设备选型层面。

1 驱动轴星型套上下料需求分析

1.1 零件特征对机械手设计的约束

驱动轴星型套属于等速万向节中的一个核心功能部件，外形尺寸不大，对加工基准、内外表面质量和节拍稳定性要求较高。自动化生产线中，它通常要经过上料、定位、夹紧、加工、清洗或检测等连续环节，人工上下料不仅劳动强度大，也容易因摆放姿态不同造成定位误差。星型套表面存在圆柱面、端面、沟道或倒角等区域，机械手夹持时不能压伤功能面，也不能遮挡后续定位基准。若采用单一夹爪直接抓取，遇到油污、毛刺或姿态偏差时容易打滑；若只依赖料道推送，零件进入夹具前又可能发生滚动和偏转。若采用单一夹爪直接抓取，遇到油污、毛刺或姿态偏差时容易打滑；若只依赖料道推送，零件进入夹具前又可能发生滚动和偏转^[1]。

1.2 生产线节拍、安全和维护要求

上下料机械手的设计目标不是单纯替代人工，而是把机床、料仓、清洗、检测和输送节拍连接起来。星型套生产线一般存在多工序衔接，某一工位等待会影响整线平衡，某一夹持失误又可能损伤刀具或夹具。机械手需要在有限空间内完成取料、姿态调整、避让、放料和退出，动作路径既要短，也要便于安全防护。维护方面，夹爪、导轨、气缸或伺服轴都要便于点检，不能为了压缩空间把关键部件藏在难以拆装的位置。维护方面，夹爪、导轨、气缸或伺服轴都要便于点检，不能为了压缩空间把关键部件藏在难以拆装的位置^[2]。本设计把节拍稳定、安全互锁和维护便利放在同等位置，先确定总体方案，再

细化机械结构和控制逻辑。

2 上下料机械手总体方案

2.1 工艺流程与布局形式选择

星型套自动化生产线可采用料仓供料、姿态整理、机械手取放和工位夹具定位的流程。上料端设置缓存料道，零件经姿态整理后进入待取位置，机械手从固定姿态取件并送入机床夹具；加工完成后，机械手从夹具中取出成品，放入下料输送或检测缓存位。布局形式应结合机床开门方向、主轴中心高度、料仓位置和安全围栏确定。若生产线空间较紧，可采用桁架式机械手跨越机床上方运行，减少地面占用；若需要兼顾多工位或后续扩展，可采用关节机器人配合专用夹具，但控制和防护复杂度会增加。若生产线空间较紧，可采用桁架式机械手跨越机床上方运行，减少地面占用；若需要兼顾多工位或后续扩展，可采用关节机器人配合专用夹具，但控制和防护复杂度会增加^[3]。该方案便于与机床门、夹具和输送线形成固定节拍，也便于后续增加视觉或检测单元。

2.2 自由度配置与动作路径规划

机械手自由度配置应满足抓取位置、机床夹具位置和下料位置之间的姿态转换。对星型套这类相对规则零件，基础搬运可由水平移动、垂直升降和末端旋转组成；若料道姿态整理稳定，末端旋转角度可以减少，只保留必要的夹持方向修正。动作路径规划要把取料等待、夹具开合、机床门动作和安全确认纳入同一时序，避免机械手到位后等待夹具，或夹具打开后等待机械手。路径设计还应考虑异常退出，夹爪未夹紧、工件未放到位、机床报警和安全门开启时，机械手要有明确的停止位和复位路线。对于批量生产，路径不宜过分贴近夹具和机床边缘，留出装配误差、温升变形和维修调整空间更为稳妥。若后续需要节拍提升，可先从并行动作和等待时间压缩入手，而不是盲目提高每个轴的速度。路径确认时还要保留试教余量，防止夹具轻微调整后重新进入大范围示教。

3 关键结构设计方案

3.1 夹持末端与定位补偿设计

末端夹持装置是星型套上下料机械手的核心。夹爪应避免零件功能面，优先夹持外圆非精密区域或端面允许区域，并通过软质衬块减少压痕。考虑零件表面可能带有切削液，夹持结构应具备一定自定心能力，夹紧力既要保证搬运中不滑落，又不能使薄壁或边缘产生变形。可采用双爪对中夹持加端面限位的组合，使零件在抓取瞬间完成粗定位；对姿态偏差较大的上料端，可增加浮动连接或导向锥面，让夹爪在闭合前先把零件引入稳定位置。考虑零件表面可能带有切削液，夹持结构应具备一定自定心能力，夹紧力既要保证搬运中不滑落，又不能使薄壁或边缘产生变形^[4]。为便于维护，夹爪衬块、限位块和检测开关应设计成可快速更换件，并保留调整基准。

末端设计可采用模块化思路。基础夹爪负责主要夹紧，可更换衬块适配不同外径或表面状态，端面限位负责限制轴向窜动，夹紧检测负责确认零件已进入安全搬运状态。定位补偿不宜完全依赖程序偏置，机械结构应先消化小范围姿态误差，再由控制系统完成精细修正。夹爪打开和闭合位置要避免切屑堆积区，并设置便于清洁的排屑空间。换型时，操作者只需更换衬块或限位块并调用对应程序，减少整套末端重新调试的时间。在机械手落地时，该设计点应同步写入装配验收表，重点记录夹爪模块、行程点位、料仓姿态和机床夹具状态。班组按表确认后，可以直接判断异常来自取料姿态、夹紧状态、轴向限位还是机床等待，不必在多个岗位之间反复转述。后续实施时，还应把该设计点写入装配验收和试运行记录，明确检查方法、允许调整范围和复验条件，使结构修改、程序优化和现场维护能够围绕同一标准展开。

3.2 本体传动、导向与刚度设计

机械手本体需要在反复启停中保持定位精度。水平轴可采用齿轮齿条、同步带或丝杠传动，选择时应综合行程、速度、负载和维护成本；垂直轴应重点考虑掉电保护和制动可靠性，防止工件在异常停机时下滑。导向机构要有足够刚度，长行程桁架不宜只追求轻量化，否则高速运行时会产生振动，影响放料精度。星型套单件重量通常不至于让结构承载困难，但末端夹具、拖链、气管和检测元件叠加后会改变惯量，设计时应按实际安装状态校核。导向机构要有足够刚度，长行程桁架不宜只追求轻量化，否则高速运行时会产生振动，影响放料精度^[5]。本体设计应把最大伸出位置作为校核工况，并给常用动作段留出平稳加减速距离。

传动系统还应服务长期稳定运行。水平轴如果追求高速，应同步考虑制动距离和末端摆动；垂直轴如果采用气动或电动结构，都要设置可靠保持措施；导轨和滑块应布置在不易受切削液直接污染的位置。拖链、电缆和气管的运动半径要在最大

行程下校核，避免长期弯折造成隐性故障。结构件设计完成后，可通过空载和带载两种状态比较重复定位误差，若差异明显，说明刚度或惯量配置仍需调整。在机械手落地时，该设计点应同步写入装配验收表，重点记录夹爪模块、行程点位、料仓姿态和机床夹具状态。班组按表确认后，可以直接判断异常来自取料姿态、夹紧状态、轴向限位还是机床等待，不必在多个岗位之间反复转述。后续实施时，还应把该设计点写入装配验收和试运行记录，明确检查方法、允许调整范围和复验条件，使结构修改、程序优化和现场维护能够围绕同一标准展开。

3.3 料仓、输送与防错机构设计

稳定上料离不开料仓和防错机构。星型套如果直接堆放，零件姿态随机，机械手需要承担过多识别和纠偏任务；若采用阶梯料仓、滚道或托盘定位，可把姿态整理前移，减轻末端复杂度。料仓出口应设置单件分离和到位确认，防止重叠件或斜置件进入抓取位。下料侧可以根据后续检测要求选择托盘、输送带或缓存滑道，关键是让零件离开机械手后仍保持可追溯状态。防错机构包括型号识别、方向确认、夹紧确认和空夹检测，特别是在多规格共线时，料仓、夹爪和程序之间必须有对应关系。料仓出口应设置单件分离和到位确认，防止重叠件或斜置件进入抓取位^[6]。防错逻辑越靠前，后续机床碰撞和错装风险越低。

料仓设计要兼顾容量和稳定。容量过小会频繁补料，容量过大又会增加零件挤压和姿态混乱。较好的做法是设置可视化余量提示和单件分离结构，让机械手每次面对同一姿态的零件。输送端要避免零件相互碰撞，必要时采用分隔托盘或软质挡块。防错机构应与生产管理连接，换型时先确认料仓型号、夹爪模块和程序版本，再允许进入自动循环。这样既能降低错料风险，也能让设备状态更容易追溯。在机械手落地时，该设计点应同步写入装配验收表，重点记录夹爪模块、行程点位、料仓姿态和机床夹具状态。班组按表确认后，可以直接判断异常来自取料姿态、夹紧状态、轴向限位还是机床等待，不必在多个岗位之间反复转述。后续实施时，还应把该设计点写入装配验收和试运行记录，明确检查方法、允许调整范围和复验条件，使结构修改、程序优化和现场维护能够围绕同一标准展开。

4 控制系统与验证优化方案

4.1 控制逻辑、传感器与安全联锁

控制系统应围绕动作顺序、状态确认和异常处置建立。机械手与机床之间需要交换开门到位、夹具松开、工件夹紧、加工完成和允许进入等信号；机械手内部需要确认原点、夹紧、负压或压力、行程到位和安全区域状态。传感器布置不宜过多，但关键状态必须可判定，尤其是取料有无、放料到位、夹爪闭合和机床夹具状态。安全联锁应覆盖防护门、急停、光栅或区域扫描，人员进入危险区域时机械手必须停止并保持在安全状

态。控制逻辑还要预留手动调试模式,维修人员可以低速点动各轴,同时系统限制危险动作组合。异常处理要写清楚:空夹时回到取料位重试,放料不到位时停在安全位等待处理,机床报警时退出加工区域并禁止再次进入。这样的逻辑能减少现场靠经验恢复的次数,也便于班组培训。

控制程序应采用状态机思路,把等待取料、取料确认、进入机床、放料确认、退出加工区和下料完成等状态清楚分开。每个状态只允许进入规定的下一状态,异常时回到安全等待位或进入人工处理流程。传感器信号要设置合理延时和复核条件,避免油污、振动或瞬时遮挡造成误报警。安全联锁还应区分自动运行、手动调试和维修模式,不同模式下允许的动作范围不同,人员进入区域后系统只能低速或停止。在机械手落地时,该设计点应同步写入装配验收表,重点记录夹爪模块、行程点位、料仓姿态和机床夹具状态。班组按表确认后,可以直接判断异常来自取料姿态、夹紧状态、轴向限位还是机床等待,不必在多个岗位之间反复转述。备件准备也应围绕夹爪衬块、传感器支架和料仓导向件展开,使常见磨损能够在停线前完成处理。后续实施时,还应把该设计点写入装配验收和试运行记录,明确检查方法、允许调整范围和复验条件,使结构修改、程序优化和现场维护能够围绕同一标准展开。

4.2 仿真调试、试运行与持续优化

设计完成后,应先进行离线仿真和干涉检查,再进入现场安装。仿真重点包括行程覆盖、节拍估算、夹具避让、拖链弯曲和维修空间,不能只展示机械手能够到达目标点。现场调试可分为空载、带假件、单循环、连续低速和稳定生产几个阶段,每一阶段都记录取放成功率、等待时间、报警类型和夹具定位情况。若节拍不足,先查找等待时间和动作重叠空间,再决定是否提高速度;若定位波动,先检查料仓姿态、夹爪磨损和机

床夹具状态,再修改程序点位。后续维护中,班组可根据报警记录优化夹爪衬块、料仓导向和动作顺序。调试人员还应把取料点、过渡点、放料点和安全等待位分别编号,记录每次修改的原因,避免后续维护时无法判断点位变化来源。若试运行中出现短暂停顿,应先区分通信等待、夹具等待和料仓等待,再决定是否调整机械手速度。

持续优化要建立在记录之上。试运行期间,不能只看整线是否能够连续生产,还要记录每次等待、重试、夹持失败和人工干预的原因。若等待集中在机床开门,可优化通信时序;若重试集中在取料端,应回看料仓姿态和夹爪导向;若下料碰撞较多,应调整输送缓存和放料高度。运行稳定后,再把节拍优化和维护周期纳入同一张清单,形成适合星型套生产线的方案。班组按表确认后,可以直接判断异常来自取料姿态、夹紧状态、轴向限位还是机床等待,不必在多个岗位之间反复转述。备件准备也应围绕夹爪衬块、传感器支架和料仓导向件展开,使常见磨损能够在停线前完成处理。后续实施时,还应把该设计点写入装配验收和试运行记录,明确检查方法、允许调整范围和复验条件,使结构修改、程序优化和现场维护能够围绕同一标准展开。这些记录越完整,后续节拍压缩和故障复判越容易落到具体部件。

5 结语

驱动轴星型套自动化生产线上料机械手设计,应以零件姿态稳定、夹持可靠、节拍协调和安全维护便利为核心。通过合理选择布局形式、配置必要自由度、优化夹持末端、完善料仓防错和控制联锁,可以减少人工取放带来的波动。后续在仿真调试和试运行中持续回收报警、等待和定位数据,能够进一步优化动作路径与维护策略,使机械手真正融入星型套连续制造流程。

参考文献:

- [1] 徐帅强,张彦彬,周宗明,等.汽车轮毂洁净制造自动化生产线设计[J].制造技术与机床,2022,(4):32-37.
- [2] 陈运林.自动化生产线机械手设计与仿真[J].机电信息,2022,(4):29-32.
- [3] 单娅丽,孙浩,康鑫涛.基于汽车零部件加工中心的上下料驱控系统总体方案设计[J].农业装备与车辆工程,2024,62(7):122-126.
- [4] 陈奎,张文瑾.基于智能协作机器人的 CNC 上下料系统改造[J].机电工程技术,2024,53(2):154-158.
- [5] 陈奎,陆东明,夏平.“智改数转”背景下机器人-数控机床协作上下料加工系统开发[J].中国仪器仪表,2023,(12):61-65.
- [6] 吴宗庆,沙杰,齐光宇,等.接触网腕臂预配套管零件供料系统设计与研究[J].机械设计与制造工程,2022,51(2):115-120.