

全自动曲轴加工柔性生产线 工艺设计与应用研究

□ 东风雷诺汽车有限公司/周友涛 肖光胜

曲轴作为发动机的核心部件，其加工难度大，产线投资高，建设周期长是行业普遍面临的难题。据此，本文分析了曲轴柔性加工生产线的必要性，对曲轴柔性加工工艺进行了研究，制定了柔性加工工艺流程和路线图，探索了柔性生产的实现方式，涵盖工艺设计到设备安装调试全周期的流程，并将此柔性加工工艺应用于新型涡轮增压发动机曲轴生产线建设中，结果达到了初期设计的各项指标。

前言

曲轴加工工艺集冷加工、热加工和特种工艺加工于一体，是公认的最难加工的发动机零件。传统曲轴生产线由于设备类别多、投资高、项目周期长，一直是各个主机厂面临的难题。一般主机厂都会投资建设缸体缸盖生产线，却不会投资建设曲轴生产线，主要是因为曲轴加工设备精度高，价格贵，一整条曲轴生产线的造价差不多赶上一条缸体和一条缸盖生产线的总和。另外，一条曲轴生产线从立项到量产，行业普遍需要18~24个月，投资金额以亿计。但是限于产品生命周期，一旦产能很小，投资收益甚至出现负值。当有新的产品导入时，又不得不选择改造旧的生产

线，以期适应新产品。往往在改造项目前，都需要做大量产品存储，这个过程又会给生产物流仓储增加成本。因此，建设高柔性、多品种混流生产线是提高投资收益率和缩短项目开发周期的必然要求。

为了提升动力总成竞争力，东风雷诺在引入新增小排量涡轮增压发动机时，总体规划30万产能。按照一次规划、分步实施展开，一期建设15万产能，二期增产至30万。鉴于产能需求，曲轴内制迫在眉睫，为了提高投资收益率，公司要求高标准地建设柔性生产线。本文综合分析了行业中的工艺特点，提出了从产品研发到制造工艺的协同并行的理念，涵盖工艺设计到设备安装调试全周期的流程的工艺设

计，并将该工艺应用于东风雷诺首条曲轴柔性生产线的建设。

柔性生产线工艺设计

1. 加工对象定义

为了尽可能地明确柔性加工对象，需要协同研发资源，从产品定义阶段明确未来可能导入的曲轴，包括产品类型、结构特点和尺寸特点。从公司商品企划和研发层面协同分析，目前公司所规划的乘用车发动机曲轴产品，都是直列三缸或者四缸机型，得到了如图1所示的产品图谱。

2. 柔性工艺方案设计

理论上讲，手动生产线是柔

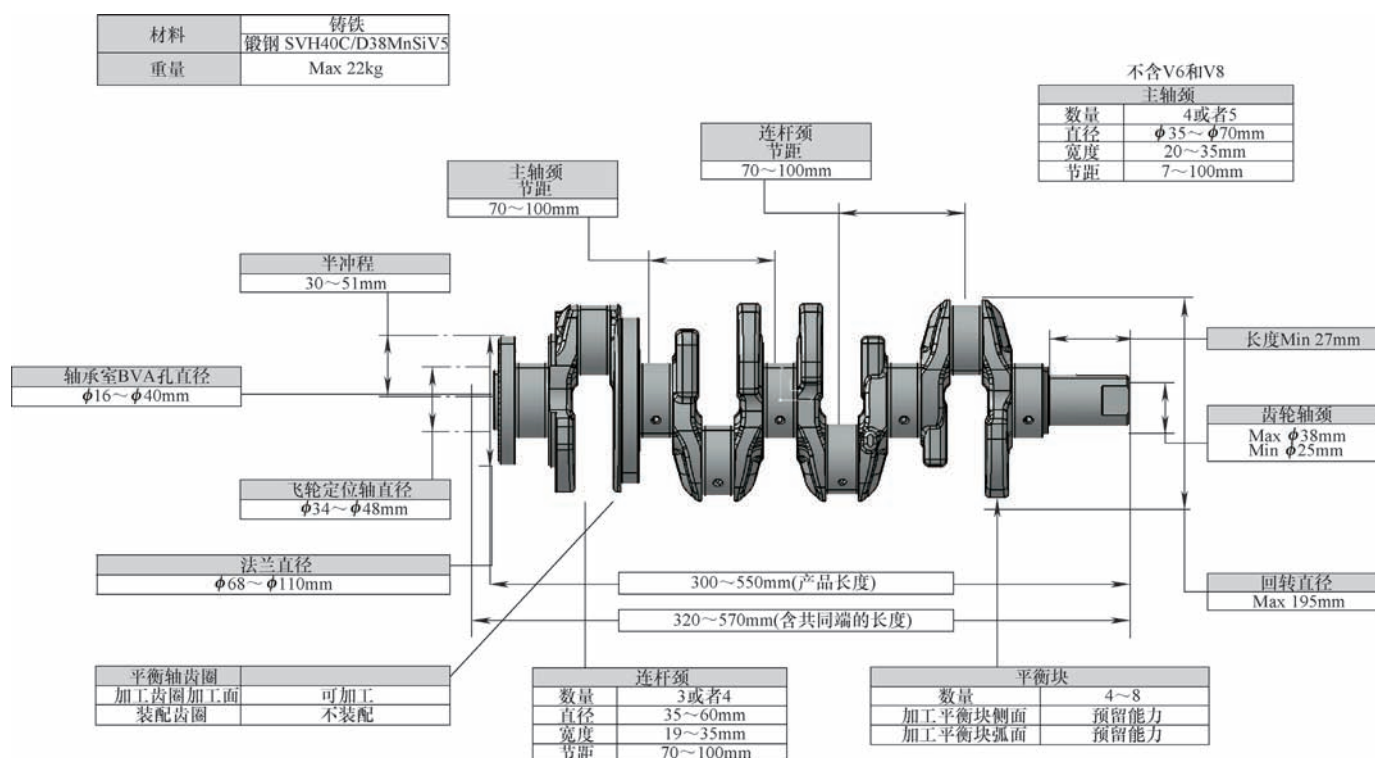


图1 柔性加工曲轴尺寸

性较好的，但是效率低下，不便管理。为了获得曲轴自动生产线的高柔性，世界各大主机厂各有其特点，除了设备本身提高柔性，多数通过优化生产线的布局来实现多品种高柔性生产，奔驰、沃尔沃和大众在布局柔性生产线时，经常采用岛式结构，各个工序建设成加工工序岛，通过自动化的桁架或者机器人来组织各个岛式加工单元实现高柔性。各个工序的柔性加工通过设备保证，需要在产品切换时进行生产线的夹具和刀具切换。这种方法的优势不言而喻，但是布局往往很复杂，占地面积较大。

本方案在设计时吸收了以设备柔性为基础的优点，希望根据定义的加工对象特点，来综合制定工艺，提前预留可能采用的加工工艺和设备布局空间，然后用自动化桁

架机械手来串联加工设备组成生产线，其工艺流程如图2所示。

工艺流程图中，浅蓝色的代表加工工艺，浅咖色代表在线100%测量工艺，浅灰色代表预留工艺。细化到具体的技术路线如图3所示。

(1) 设备柔性方案设计。柔性加工首要要求就是加工设备必须具备加工兼容能力，设备的导轨、电动机、主轴、床身及空间等硬件上必须都要能够兼容，为了保留一定的预留量，统一要求所有的设备能够兼容曲轴的最大长度是600mm，最小长度是300mm，回转直径是200mm。对于电动机功率，统一按照22kg作为基础质量，主轴等硬件严格按照尺寸图来设计。

在编制加工工艺的时候，选用柔性高的设备是实现生产线柔性的基础。在粗加工阶段，各个主机厂

采用的工艺各不相同，总结起来主要有车削、车拉、车车拉、外铣和内铣，其各自的优缺点详见表1。

本方案在设备选型时，综合考虑技术经济性和柔性，主轴颈的粗加工选用了双刀塔数控车床，连杆颈选用了内铣机床，既保证了设备的柔性，又兼顾了投资经济性。半精加工和精加工设备，在设备类型上没有太多差异，磨床和抛光机都是必备设备，设备柔性靠刀具和夹具的柔性来保证。

(2) 刀具柔性方案设计。对于不同加工对象，通用型刀具的柔性可以通过加工程序控制，这个实现柔性的难度不大。对于专用成型刀具，例如钻孔和攻丝刀具，如果产品设计尺寸不一致，是无法实现共用兼容的，但是可以在设备上预留刀位，一旦切换这类产品，直接

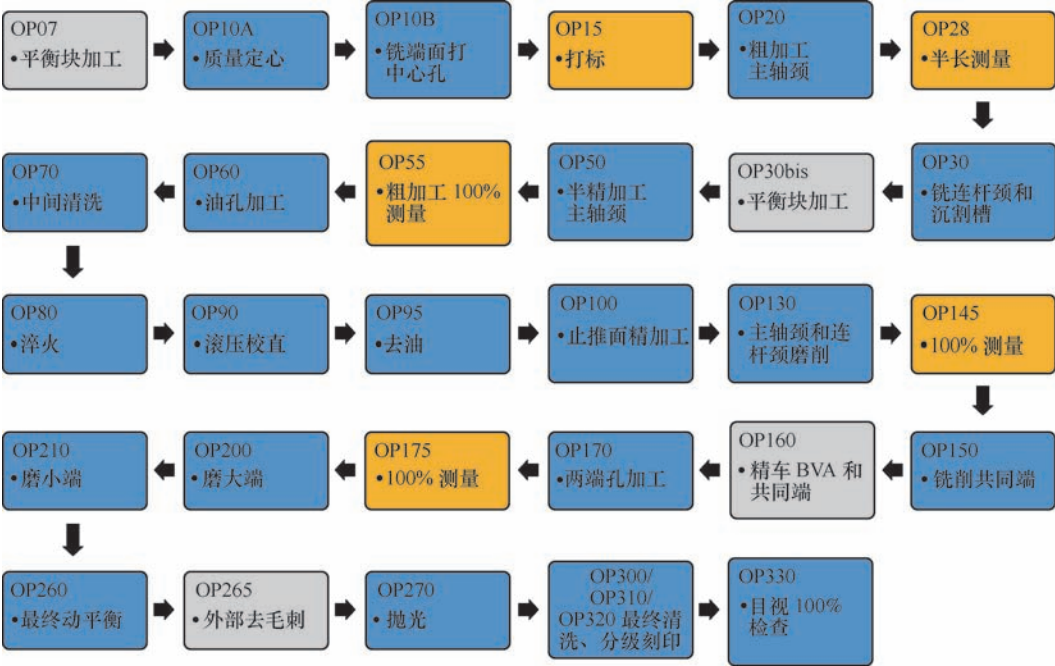


图2 柔性方案工艺流程

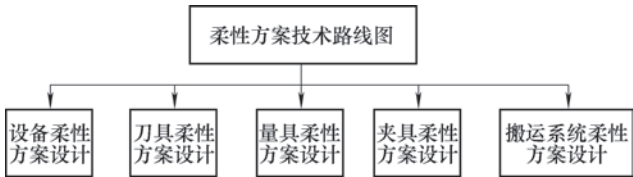


图3 柔性方案技术路线图

表1 粗加工机床对比表

加工方法	传统车床	数控车床	车拉	车车拉	内铣	外铣
加工效率	最低	较高	高	高	最高	高
设备投资	最低	低	较高	较高	最高	较高
刀具准备时间	最低	低	较长	长	较短	较短
刀具费用	最低	较低	较高	低	高	高
加工精度	较低	较高	较高	较高	较高	高
机床柔性	最好	好	较差	较好	好	较好
加工特点	径向力大，易变形	辅助中心架，径向力较大，变形小	径向力较小，适合小余量加工	径向力较小，适合大余量加工	径向力小，适合大余量加工	径向力小，适合小余量加工
加工内容	平衡块外圆、轴肩、圆角、轴颈圆角和轴向沉割槽	主轴颈外圆、圆角、轴肩、径向沉割槽、偏心车亦可加工连杆颈和轴向沉割槽	轴肩、轴颈、圆角、不能加工轴向沉割槽	轴肩、轴颈、圆角、平衡块侧面，各种沉割槽	轴肩、圆角、平衡块侧面，不能加工轴向沉割槽	轴肩、圆角、平衡块侧面，不能加工轴向沉割槽

调用刀具即可，也能实现柔性。

为了方便刀具换型和寿命管理，本方案将刀具RFID技术应用到

整线刀具的管理中，除了在加工中心的刀具上使用了RFID技术，还将RFID技术拓展到特种工艺中的淬火

感应器和滚压头刀具上，以便对机型和寿命进行管理，这在行业中尚属首次，如图4和图5所示。



图4 带RFID芯片的滚压头



图5 带RFID芯片的淬火感应器

(3) 量具柔性方案设计。量具实现柔性完全由产品决定，如果是同系列、同家族的产品，尺寸一致或者相差甚微的情况下是可以实现柔性兼容的。当然，还有一种就是选用光学测量机，德国业纳公司专门针对曲轴开发的CA618AE光学测量机，可测量曲轴的所有的几何量公差项目，具有高效率、高精度、高柔性化及编程简便等多项优点。其测量精度见表2。

鉴于光学机的优点，本方案在

粗加工工序中全部选用了光学机测量，可以很好的满足测量精度、效率和柔性的要求。

(4) 夹具柔性方案设计。夹具的柔性是产品夹持部位的尺寸决定的，曲轴加工过程中用到的夹具主要有顶尖和卡盘。对于顶尖柔性只要中心孔采用同样的尺寸即可，这个很容易实现。要实现卡盘柔性很难，因为高精度卡盘的最大夹持直径和最小夹持直径范围很小，最理想的状态是所有产品能有共同的夹持部位和尺寸，然而产品设计很难做到统一。本方案采用工艺补偿的方法，在工艺上采用同样尺寸的“工艺共同端”，即在毛坯制作的时候就采用同样的尺寸，这样就可以实现卡盘的柔性。据图1可知，曲轴成品齿轮轴颈直径的范围是 $\phi 25 \sim 38\text{mm}$ ，在毛坯制作时将工艺共同端的直径做到 $\phi 44\text{mm}$ ，曲轴成品飞轮定位轴直径的范围是 $\phi 34 \sim 48\text{mm}$ ，在毛坯制作时将工艺共同端的直径做到 $\phi 54\text{mm}$ 。工艺共同端如图6所示。

(5) 搬运系统柔性方案设计。本方案整线采用自动化桁架机械手搬运，桁架机械手由立柱、横梁、导轨、机械手臂、驱动系统和控制系统组成。鉴于机械手在搬运过程中已经存在的柔性，只需要在

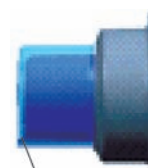
齿轮轴颈工艺共同端 $\phi 44\text{mm}$ 飞轮定位轴颈工艺共同端 $\phi 54\text{mm}$

图6 工艺共同端尺寸图

夹持部分做到柔性即可。在机械手爪的设计过程中，本方案做到了三缸曲轴和四缸曲轴的兼容。其卡爪的设计方案如图7所示。

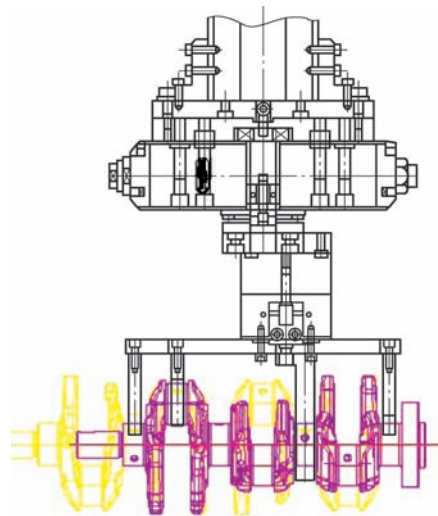


图7 桁架机械手柔性夹持图

3. 生产线布局方案设计

在柔性工艺方案确定后，就可以根据生产线的节拍和工件姿态确定生产线布局。

(1) 生产线节拍设计。工艺节拍的设计来自生产规划的产能，本方案中设计产能30万，年计划生产小时6517h，设备综合效率OEE设定0.85，生产节拍CT的计算见下

表2 CA618AE光学机测量精度

设备技术特点	Opticline CA618AE
直径分辨率/ μm	0.1
长度分辨率/ μm	0.1
角度分辨率($^{\circ}$)	0.0005
长度测量精度/ μm	$(5.0+L[\text{mm}])/100$
直径测量精度/ μm	$(2.0+D[\text{mm}])/100$
长度重复测量精度/ μm	1.2
直径重复测量精度/ μm	0.5

式:

$$CT=6517 \times 60 \times 0.85/300000 \\ =1.1 \text{ (min)}$$

(2) 生产线工件姿态设计。
合理的工件姿态设计是自动化生产线运行的前提, 工件姿态设计必须紧贴柔性设备的工艺方案, 否则不当的工件姿态会影响桁架机械手的运行和投资。对于需要头尾姿态转换的工位, 桁架机械手需要配备旋转B轴。为了清晰的表述工件姿态, 本方案采用如图8所示的图示。

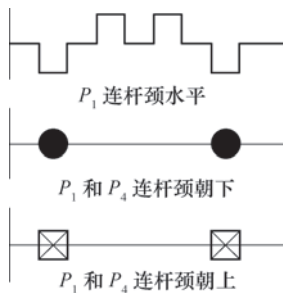


图8 工件姿态图示

(3) 生产线布局设计。生产
线布局设计是整个工艺设计的落
脚点, 本方案采用了简洁的U形布
局, 采用全自动化桁架串联形式,
中间连接采用托盘滚道, 两侧设备
对称式布置。这种布置形式在保证
物流通畅、占地面积小的情况下,
减少了工人的走动时间, 可以做到
一人多机操作, 降低了生产线操作
工人的数量。生产线布置合理、紧

凑, 使得工人劳动效率和作业充实度得到提高。综合工件姿态和设备布置
的布局如图9所示。

本方案中, 采用颜色标示不同规划阶段。灰色区域代表物流区域, 绿色
设备代表一期采购设备, 红色设备代表二期增产设备, 蓝色设备代表产
品升级带来节拍变化的预留设备。在对应的工序号附近同时标注有该工序
的工件姿态, 便于工件输送模拟。

设备选型采购

1.设备选型原则

为了追求技术经济性, 所有的设备在选型时都秉持“公正公开, 技术
优先”的原则, 即在技术要求满足的前提下, 引入同一层次平台的设备供
应商进行招投标, 在合理的价格构成下抉择出设备供应商。项目中选用的
设备候选供应商都是具有全球前十大汽车集团项目经验, 充分降低了项目
执行的风险。招标选择的设备供应商见表3。

表3 曲轴线设备制造商一览表

设备名称	供应商	产地	设备类型
车床	HORIBE	日本	双刀塔数控车床
内铣机床	KOMATUS	日本	双刀盘
线内光学测量机	MARPOSS	意大利	立式绿光
淬火机	EFD	中国	双工位
滚压机	ICMS	美国	滚压校直一体机
轴颈磨床	LANDIS	英国	双砂轮带实时量仪
加工中心	HORKOS	日本	带B轴MQL润滑
端面磨床	NTC	日本	斜切磨
动平衡	COMAU	法国	双工位
抛光机	SUPFINA	德国	三工位
最终测量机	ICD	西班牙	气动自动校准
清洗机等辅机	粤研	中国	高压
桁架机械手	DMT	韩国	低噪声拖链

2.式样规划

为了方便设备后期保养和维护, 设备整体式样统一要求满足雷诺集团

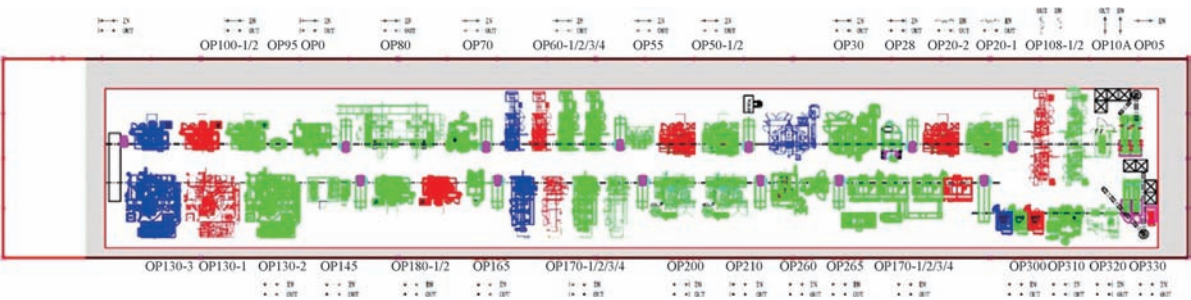


图9 生产线布局图

的基本零部件选型规范，设计规范等通用技术要求。同时严格按照生产线规划的技术功能要求，面积大小和工件流向进行设计。加工设备的加工尺寸能力值要求在CAM2.0和CPK1.6以上，检测设备按照CMC能力值要求。

3.设备制造过程管控

本方案合作的设备供应商来自于9个国家。国别多、分布广，为了很好地进行设备过程管控，引入了项目管理的全流程跟踪方式进行并行工程管理。在技术协议签订之初就和设备供应商制定好可行的计划方案，细化到周管理，每周跟踪设备进度，当某个进度有延迟时，及时进行风险预判和资源协调。

整个项目在执行过程中，除了船期和清关无法进行跟踪外，所有的过程都得到了很好的跟踪和管控，设备都在计划内按期到达。

设备安装调试

1.设备安装顺序

为了保证设备的顺利入场安装，需要综合考虑设备体积和安装

方式。某些设备安装定位需要用到吊车等大型起重设备，就需要提前进行路径规划，制定设备安装顺序，避免作业空间不足等问题。鉴于厂房实际，厂房东西两侧各有一个4.5m的进场入口，本方案在实施过程中，以U形线的中间为安装中点，首先安装桁架立柱，再从中部进入设备，再吊装桁架横梁，逐步往东西两侧延伸。

2.二次动力接驳

整条生产线根据动力统计，一次动力线在厂房建设时铺设，一共布置了3条母线，走空中桥架，两条母排布置在生产线的对称中线上，另一条母排则单独给淬火机供电，避免淬火机大功率对电网产生冲击，两条共用母线分别在对应设备的正上方设置插接箱。一次管网在对应设备上方预留进水阀门和排污阀门。

在所有的设备安装就位，单机进行通电、通气和通水测试后，方可进行二次动力接驳和调试。在二次动力接驳过程中，必须按照逐台接通，逐台调试的原则进行，防止意外发生。

3.自动化联机调试

整线动力接通完成后，可进行桁架机械手的联机调试。联机调试包括单机与桁架的自动化信号和动作调试、工件抓放位置点调试、前后工序间对接信号调试、追溯系统信号调试以及设备维护SMP99系统对接调试。

联机调试时自动化生产线调试周期最长的一项工作，涉及每台设备和桁架的配合与通讯，通常在调试完成后，仍需进行大批量加工验证，防止BUG的存在。

4.能力值考量

联机调试完成后，可以进行设备能力值验证。在此过程中，本方案采用了逐序验证的方式，严格按照技术协议要求的加工项目进行能力值测量和计算。本项目在计算能力值时，引进了QDAS软件，A-2M能力值计算软件，可以高效便捷地计算设备能力值。

结语

本文重点研究了曲轴柔性工艺的实现方式，提出了从工艺设计到设备规划、安装调试全周期的流程的柔性方案，并将该工艺应用于东风雷诺首条曲轴柔性生产线的建设中。目前该生产线已经建成，生产线的各项指标都将接受大批量生产任务的考验。在智能制造2025的趋势下，智能化和信息化将是柔性生产线下一个亟待突破的课题。期待本研究可以抛砖引玉，行业中涌现出更多智能工厂和智能生产线。

AUTO1950

