



三维切割技术在轨道交通装备制造中的应用研究

曾威雄

【摘要】以工业机器人为载体，结合数控切割系统，实现成形零部件的数控三维切割。重点介绍了加工不同类型零部件工业机器人的选取方法；不同切割工艺、除尘方式的优缺点及设计依据；同时列举了三维切割的关键技术，为三维切割应用提供技术参考。

关键词：三维切割；离线编程；示教编程；防碰撞

轨道交通装备制造过程中，成形金属零部件具有尺寸规格跨度较大（范围由1m以内的小零部件到长达14m以上的大型零部件）和材料厚度覆盖范围广（常用的材料厚度从1~80mm）的特点。同时使用的材质种类多样，以铁路货车为例，常用的金属板/型材包括耐候钢、高强钢、不锈钢及铝材等20多种材质。因此，轨道交通装备制造中的三维切割产品类型繁杂，也为制造过程带来困难。

对于平板类产品，切割下料的方式多样，工艺方法比较成熟，一般可采用数控二维切割工艺、剪切工艺及冲裁工艺等。但对于立体成形的产品，尤其是空间三维复杂的产品，利用常规的切割或冲裁工艺难以实现。因此，多利用以火焰及等离子为工艺手段的手工仿形切割方式制造。手工仿形切割受切割速度、切割枪嘴工作高度、切割角度等

因素的影响，存在切线不直、割口不垂直、割纹深等切割质量缺陷；同时切割过程烟尘较大，影响操作者职业健康。

随着工业机器人技术的发展，并逐步应用于焊装、装配、喷涂、物料搬运、上下料、冲压和切割等类型的制造中。近年来，机器人作为智能制造中的关键环节，被广泛地应用在轨道交通装备制造中。同时机器人配合数控切割技术，实现三维的精密切割。

1. 数控三维切割系统组成

数控三维切割系统一般由以下部分组成：工业机器人系统、切割系统、工作台及定位系统、除烟吸尘系统及其他辅助系统。

2. 工业机器人系统

工业机器人主要应用于自动化程度高、技术资金密集型的产业，如汽车行业。而沿海经济发达地区是机器人的主要市场，外

商独资企业、中外合资企业是工业机器人的主要用户。不同种类的机器人，其功能也有所区别，关节式的机器人依靠其可旋转的肩膀、臂围、前臂和手腕等组成，可移动至精确的位置，满足三维切割的技术要求。图1为6轴关节机器人的基本结构。

对于三维切割，机器人关节自由度越多，关节的活动范围越大，同时手臂越长，其切割板幅便越大。对于专用三维切割装备而言，应选择适宜参数的机器人；对于通用的三维切割装备，应选择切割范围较大的机器人。一般6个自由度，适合于几乎任何轨迹或角度的工作。图2为切割范围的示意，图中阴影部位为切割过程臂端可触及的空间范围。6轴机器人的工作范围可由其臂长及相应的旋转角度决定，表1为6轴机器人的参数。

以轴1和轴2之间的转轴点为原点，任意可触点A的坐标为：

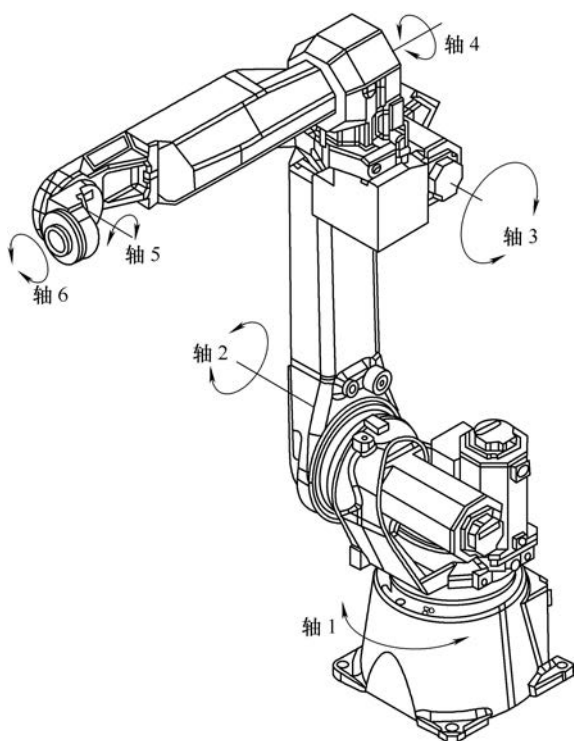


图1 6轴关节式机器人

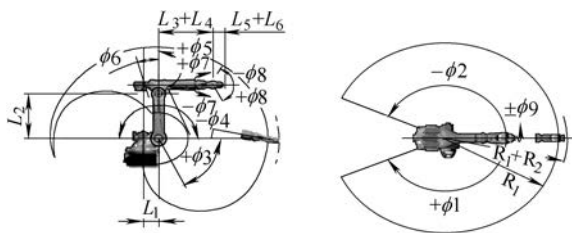


图2 切割范围示意

表1 6轴机器人参数

轴1		轴2		轴3		轴4		轴5		轴6	
角度	臂长	角度	臂长	角度	臂长	角度	臂长	角度	臂长	角度	臂长
$+\phi 1/-\phi 2$	L_1	$+\phi 3/-\phi 4$	L_2	$+\phi 5/\phi 6$	L_3	$+/-\phi 7$	L_4	$+/-3\phi 8$	L_5	$+/-\phi 9$	L_6

$$A_x = L_2 \times \cos \phi 3/4 + (L_3 + L_4) \cos \phi 5/6 + (L_5 + L_6) \cos \phi 8$$

$$A_y = L_2 \times \sin \phi 3/4 + (L_3 + L_4) \sin \phi 5/6 + (L_5 + L_6) \sin \phi 8$$

$$A_z = A_x \times \sin \phi 1/2$$

因此,根据产品的规格,可对机器人的参数进行精确的选择。

3. 切割系统

常见的切割方式主要包括火焰切割、等离子切割、激光切割

及水切割等,各种工艺方法有利有弊,针对常加工的产品,应选择适合的切割工艺方法。

火焰切割:利用气体火焰的热能将工件切割处预热到燃烧温度后,喷出高速切割氧流,使其燃烧并放出热量实施切割的方法。

等离子切割:采用气体放电,形成等离子弧的热能实现切

割的方法。电弧和材料燃烧时产生热量使材料能通过切割氧进行连续燃烧并被切割氧排出,形成切口。

激光切割:采用高功率密度激光束流局部加热,使材料受热部位蒸发实现切割的方法。

高压水切割:利用高压水速实现切割的工艺方法。

各切割工艺的优缺点如表2所示,针对不同规格和不同精度要求的产品,选用不同种的切割方式。

4. 移动机构

对于小型零部件,可通过固定式的工业机器人实现任意部位的切割,而对于长大零部件,固定式的工业机器人(最大切形直径3m左右)无法满足工艺要求,通常需采取附加结构,扩展切割范围。

一是增加移动工作平台,将工作平台设计成移动式或转动式,通过平台的运动补偿机器人的工作空间。二是设计移动工业机器人结构,将机器人放置在行走机构的滑轨上,生产过程实现机械与机构联动。该两种移动结构的优缺点及适用范围如表3所示。

5. 烟尘净化方式

由于切割过程产生铁屑、灰尘对人体的各个器官十分有害;粉尘污染厂房环境和损害设备,因此三维切割过程中的烟尘处理是重点和难点。净化一般采用除烟吸尘处理系统,通过抽风管道连接到吸尘装置。吸尘装置可分为上抽风式、下抽风式、固定密闭间式和移动密闭间式。



表2 不同切割工艺对比

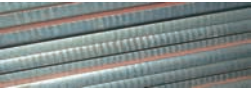
切割类型	优点	缺点	断面类型图
火焰切割	切割厚度大，成本低，厚度超过50mm后效率有明显优势。断面斜度较小（ $<1^{\circ}$ ），维护成本低	效率较低（厚度100mm以内速度80~1000mm/min），只用于低碳钢切割，不能切割高碳钢、不锈钢、铸铁等，热影响区大、厚板变形严重、操作难度大	
等离子切割	在厚度在6~20mm以内的切割效率最高（速度1400~4000mm/min），可切割碳钢、不锈钢、铝材等	切口宽，热影响区较大（0.25mm左右），较明显的工件变形，切割呈现较严重的波折状，污染较大	
激光切割	切割宽度窄、精度高（可达0.01mm）、切割表面粗糙度好，切割速度快（适合薄板材料切割），热影响区微小	装备成本高，适合薄板切割，厚板切割效率明显下降	
高压水切割	精度高，可以切割任意材质，无热影响区，无烟尘	成本高，效率低（厚度100mm以内速度150~300mm/min），只适合于平面切割，不适用于三维切割	—

表3 移动结构对比

结构	优点	缺点	适用范围
移动工作平台结构	机器人为固定结构，有利于原点的设定，切割精度高	占用面积大（切割长度的2倍），对工作台制造精度要求高，投入成本较大，防尘要求高	空间变位结构产品，长度尺寸相对较小的产品
移动工业机器人结构	占用面积小（切割长度），只需带动机器人行走，投入成本较低	机器人移动过程有抖动影响，影响切割精度	长度尺寸较大的产品

（1）上抽风式除尘 上抽风式除尘是将吸尘口布局在工业机器人的上方，如图3所示。其结构简单，但只能吸收上升的烟尘，当切割方向朝侧面或下方向时，飞溅喷射大部分会偏离吸尘范围。切割烟尘捕捉率在40%以下。

（2）下抽风式除尘 下抽风式除尘是抽风口与工作台集成，通过格栅、管道在工作台下

方形成负压，使工作台表面的空气向下流动，从而实现排尘，结构如图4所示。该净化方式技术成熟，多用于平面切割的烟尘净化。对于三维切割，割枪朝下切割的烟尘捕捉效果较好，当切割方向朝侧面时，无法实现烟尘净化。切割烟尘捕捉率在60%以下。

（3）固定密闭间式除尘 固定密闭间式除尘是通过建立一个密闭式的切割间，将机器人、切割设备、工作台及零部件放置于切割间内，并通过除尘设备使切割间形成负压，从而实现烟尘捕捉，结构如图5所示。采用固定密闭式结构，可减少

少噪声，粉尘和眩光；同时捕捉效果好，烟尘基本没有泄漏的现象，烟尘捕捉率可达99%以上。

其缺点在于切割间需要将所有相关的装备都容纳在内，因此受空间的限制，适用于较小规格



图3 上抽风式除尘

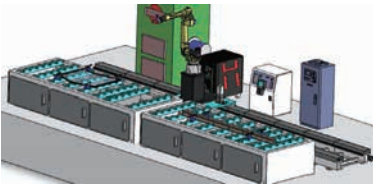


图4 下抽风式除尘

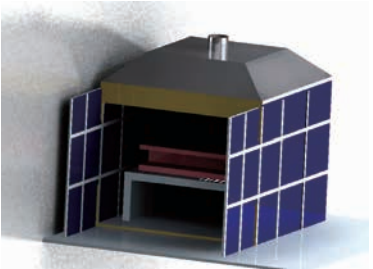


图5 固定密闭间式除尘

的零部件切割，而不适用于长大零部件切割。

(4) 移动密闭间式除尘 移动密闭间式除尘是在固定密闭间的基础上增加轨道，使切割间随机器人一起移动，实现除尘，结构如图6所示。该结构切割间的空间小，且适用性较好，既能满足固定密闭间的工艺要求，又能实现长大零部件的切割除尘。但该结构增加了轨道及相关的联动装置，因此制造成本较高；同时，该类结构需要将工作平台及零部件通过密闭间，因此不能实现完全的密封（可利用软帘增加开口处的密闭性），捕捉效果不如固定式的密闭间。切割烟尘捕捉率可达95%以上。

6. 关键技术

(1) 多功能工作平台 利用格栅及网状结构的分段/组合式工作平台，可实现长大部件及小部件的切割。为了便于定位，工作平台应设计定位柱的插入孔，可插入定位柱和锥形支撑柱等，实现快速定位。为防止切割过程工作的相对串动，可在工作平台侧面设计移动式的气动夹紧装置，来实现零部件的快速夹紧。

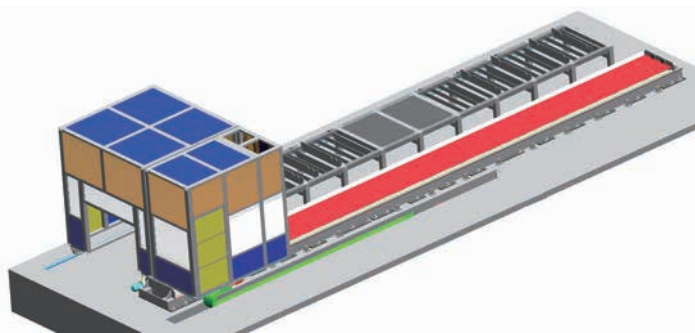


图6 移动密闭间式除尘

(2) 编程模式 编程模式一般分为离线编程和示教编程两种。

离线编程是通过专用软件，进行与实际机器人相同的运行仿真，还可在不干涉机器人工作的情况下，进行系统培训、编程、优化程序等操作。离线编程优点在于编程过程与作业分离，可对复杂任务编程，编程人员可远离危险的作业环境等。而离线编程存在对编程人员的技术水平要求较高、编程软件的投入费用高、不同品牌的机器人和兼容性差等缺点。

示教编程是通过现场示教器，将零部件需要切割的部位进行随形跟踪，实现程序的编制。示教编程过程直观，适应性强，不受系统原点限制。但编程过程占用设备时间，繁琐且效率低下，其精度靠操作者目测决定，同时对于复杂的切断面，编制尤其困难。

因此，对于批量小、品种繁多的生产模式，可通过增加离线编程软件，实现快速制造；而对于批量大、品种单一的生产模式，可直接使用示教编程，以减少资金投入。

(3) 防碰撞功能 由于零部件的制造差异，三维切割过程切割枪头沿设定的轨迹切割过程有可能偏离零件或与零件碰撞，造成切割中断或割枪碰撞损伤。因此三维切割过程的防碰撞功能对切割质量及设备具有保护作用。常用的功能有碰撞停止及弧压调高两种。碰撞停止是当割枪与零件发生碰撞时，将设备强制暂停，该功能只限于保护设备，无法有效地保护切割质量；而弧压调高是通过枪嘴与零件表面距离对应的弧压信号，实现在切割的垂直方向补偿，以维持枪嘴与零件的距离，从而提高切割质量避免割枪碰撞。

7. 结语

三维切割系统的建立，需要以产品类型为前提，要以产品的规格选择机器人的型号和除尘方式；以产品的材料及精度确定切割工艺；以产品的特性配备必要的功能。只有合理地对三维切割技术进行设计应用，才能低成本高效率地进行生产。

参考文献：

- [1]徐场生，阎镜予.机器人技术的新进展[J].集成技术，2012，1：8-12.
- [2]梁桂芳.切割技术手册[M].北京：机械工业出版社，1997.
- [3]罗敬文.三维数控激光切割机[J].激光与光电子学进展，2009，9：29-31.

作者简介：曾威雄，中车齐齐哈尔车辆有限公司。

MW 20160723