

# 高效装夹技术在立卧转换机床上的应用

## Application of High-Efficiency Clamping System in Vertical-Horizontal CNC Machine Tool

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 刘宇

**[摘要]** 高效加工已经成为现代航空制造业发展的重要趋势,而高效装夹也成为影响高效加工的重要决定因素之一。针对立卧转换机床自身特点,通过自主设计的工艺夹具,对不同类型的航空结构件,采用适合的装夹策略,构建出基于立卧转换机床的数控加工高效装夹系统。实践证明,该系统能显著提高设备利用率。

**关键词:** 立卧转换机床 数控加工 高效装夹

**[ABSTRACT]** High-efficient manufacturing has become one of the most significant trends that determine the developing of modern aviation industry. High-efficient clamping system is a key factor that highly influences NC machining efficiency. Based on the characteristics of a vertical-horizontal NC machine tool, two types of high-efficient clamping systems are designed to manufacture different aviation structural parts. It is proved from the result that these systems can significantly improve the manufacturing efficiency.

**Keywords:** Vertical-horizontal CNC machine tool CNC machining High-efficiency clamping

随着现代航空制造业的高速发展,高效加工已经成为飞机制造的重要趋势之一。特别是高档数控机床作为主流加工设备的今天,高效装夹已经成为飞机结构件高效数控加工的重要组成部分。

国外发达国家的航空制造企业高效装夹的应用技术已非常成熟。设备利用率作为判断技术水平的重要标准,得到了广泛应用。特别是排除机床故障及保养时间后的设备利用率,更能客观反映装夹技术水平的高低。

据不完全统计,我国制造业数控机床的利用率和国外先进发达国家的数控机床利用率相差 30%~40%,甚至更大。在正常工作中,有 40%~50%的时间处于停顿、等待和检修之中(有的企业甚至超过 50%的时间)<sup>[1]</sup>。差距非常明显,归结原因及措施,有如下几点:

(1)混线生产的情况比较普遍<sup>[1-2]</sup>。设备科学管理水平低,各种类型产品交叉混线生产现象严重,严重制约了设备利用率的提高。

需要根据生产实际,重新定义设备优先加工的产品类型,如此才能把设备能力特点与产品类型有机结合起来,制定出科学合理的高效加工策略,达到提高设备利用率的目的。

(2)机床设计存在局限性,突出表现在工作平台设计:某些机床只配备单工作平台,工件准备和加工都在同一平台上进行,这种情况下,准备时间必然占用加工时间,阻碍设备利用率的提高。

需要优先选配双工作平台的机床,1台用于产品加工的同时另1台用于生产准备。准备与加工互不干涉,如果可以实现准备时间远小于产品加工时间,就能在计划生产时间内最大化地发挥设备效能,提高设备利用率。

(3)装夹技术应用水平低,突出表现在作为零件与机床平台连接纽带的工艺夹具,数量冗余且通用性差,使用便捷程度低,装夹次数多、耗时长,装夹时间占用大量生产准备时间,直接制约了设备利用率的提高。

因此,以提高设备利用率为主要目标,针对上述制约因素,选取成飞公司某具有双工作台的立卧转换机床,针对在此机床加工的4类主要零件,通过自主设计的工艺夹具,采用合适的高效加工和高效装夹策略,构建出一套高效装夹系统。

### 1 机床特点

立卧转换机床最大的特点是融合了传统的立式加工和卧式加工,关键设备为具有超大摆角行程的旋转主轴(见图1)。一般情况下,主轴装配在机床立柱上,摆角为零时,主轴呈水平卧式加工状态,摆角向下旋转90°时,主轴呈竖直立式加工状态。图1所示的典型立卧转换机床旋转主轴的摆角区间为+60°至-120°,主轴旋转范围达180°<sup>[3]</sup>。

本文以成飞公司一台立卧转换数控机床为平台,开展了高效装夹的应用研究。此机床设置了双工作平台,可实现平台自动交换。加工时,工作台在横向床身上做左右运动(X轴),立柱在纵向床身上做前后运动(Z轴),主轴在立柱上做上下运动(Y轴),旋转主轴绕X轴轴线连续摆动(A摆),旋转工作台绕Y轴轴线做连续回转运

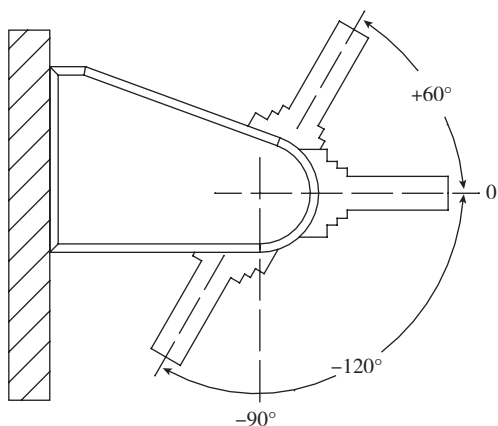


图1 旋转主轴示意图

Fig.1 Diagram of vertical-horizontal spindle

动(B轴)。

另外,此机床还有两个重要的功能特点。

(1)大维度加工能力:相对其他立式机床或者卧式机床,该机床具有立卧转换加工的能力,同时结合机床工作台可以连续转动,大大增强了机床加工的空间维度(见图2)。在合适装夹情况下,除零件底面外,可同时加工零件前、后、左、右及上面,达到5个空间维度。

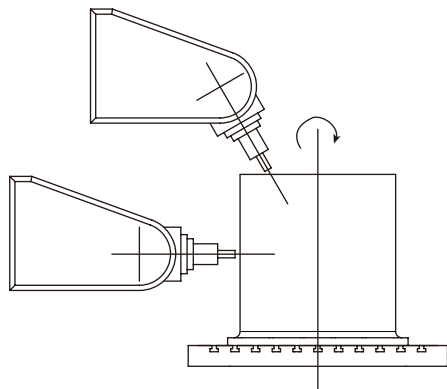


图2 机床大维度加工

Fig.2 Large space latitude machining

(2)双工作台系统:机床配备了2个工作台,可以实现工作台自动交换。当一个工作台在机床内部处于加工状态时,另一个工作台自动交换到机床外部的安全区。工人在安全区进行装夹等生产准备,如果准备时间远小于产品的加工时间,就能实现在理想情况下机床不间断进行加工。

因此,自主设计的工艺夹具必须充分利用机床的这些功能特点,通过减少装夹次数缩短装夹时间等具体措施达到缩短生产准备时间的目的,最终达到提高设备利用率的目标。

## 2 高效装夹的应用研究

结合生产实际与机床特点,4种常见的航空结构件

被确定为机床加工的主要零件类别(见图3)。本文根据各类零件结构特点构建了两种高效加工策略和与之配套的高效装夹工艺夹具,有效提高了装夹效率。

### 2.1 装夹托盘

飞机结构件中应用范围最广的一类零件是平板类零件。采用传统立式机床单件加工此类零件的设备利用率不高,主要原因在于装夹时间占用了太多的零件加工时间。例如加工图3所示平板类零件耗时约260min,其中装夹时间约80min,占比31%。

对此,设计了L形快速装夹托盘,运用成组加工技术,将原来传统立式加工机床的“1次装夹,加工1个零件”优化为“1次装夹,加工4个零件”,同时利用自动换刀、探头自动找正等功能,达到了自动加工4个零件的目标。传统情况下,每次装夹(单件)需15min。在采用L形快速装夹托盘后,每次装夹(成组4件)需35min,虽然单次时间变长,但由于装夹数量增加,所以单件装夹时间反而降低了。另外,由于托盘体积较大,单次工装装夹时间由以前的50min增加至65min。

L形托盘也存在以下缺点:

(1)未能充分利用机床底座可以旋转的特性,装夹一次只能加工一个面,效率不高;

(2)整个托盘装夹系统的重心在机床底座边缘,底座受力不平衡,加速机床老化。

针对其缺点,改良设计出了方箱形快速装夹托盘。它不仅保留了L形托盘的优势,继续保持高效的装夹效率,而且由“1次装夹,自动加工4项零件”发展成为了“1次装夹,自动加工16项零件”,装夹效果提高了4倍。

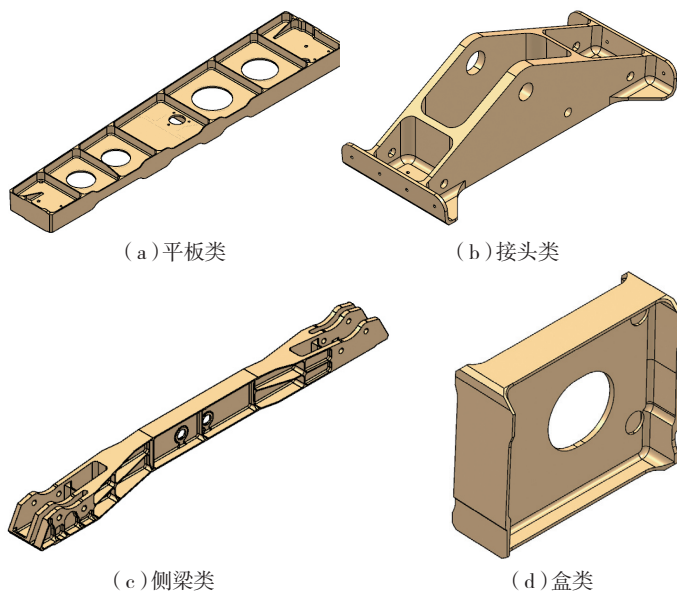


图3 4类典型零件示意图

Fig.3 Diagram of 4 typical parts

另外,配套了与零件匹配的垫板:如果生产需要大批量加工,那么托盘四面安装上同样的垫板,这样就能同时完成 16 项零件的加工。如果生产需要小批量多品种加工,只需换装上不同的垫板,这样就能完成不同零件的装夹和加工,非常适合柔性制造。

另外方箱形托盘不仅充分利用机床底座可以旋转的特性,让机床转盘四面都变成了可加工区域,而且也解决了 L 形托盘重心偏离问题,如图 4 所示。

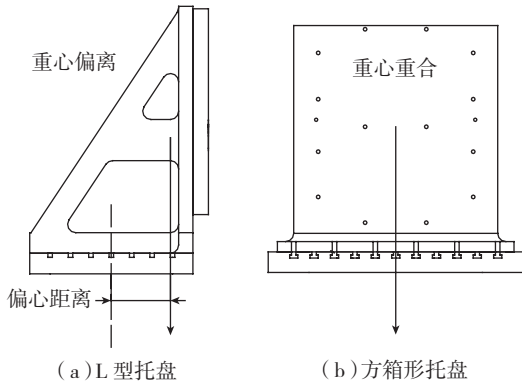


图4 不同托盘的重心  
Fig.4 Center of gravity for different pallets

将机床转动工作台带动托盘旋转运动简化为圆周运动,其受力公式<sup>[4]</sup>为:

$$F = m \cdot a = m \cdot \omega \cdot \omega \cdot r \quad (1)$$

其中  $m$  为负载质量,  $\omega$  为转动角速度,  $r$  为偏心距离。为了使机床平稳运行,转动平台中心受到的力  $F$  越小越好。在生产实践中,由于负载质量并不能无限减少,所以机床平台平稳转动的最优方法就是负载(工装)重心与转动中心轴线重合,或将偏心距离减小趋近于零。其次就是人为控制转动速度,但这样就限制了设备的高效利用,此时需要在设备平稳运行与设备高效利用之间找到平衡点。

通过上述装夹托盘的应用,平板类零件的装夹效率有了明显提高(见表 1)。

从表中可看出,采用 L 形快速装夹托盘和方箱形快

表1 优化前后加工数据

加工方案	工装装夹时间/min	零件装夹时间/min	装夹总时间/min	折合单件装夹时间/min	装夹时间比值/%
传统方案 单件加工	50	30	80	80	100
L形托盘 成组 4 件	65	70	135	34	42
方箱形托盘 成组 16 件	65	280	345	22	27

速装夹托盘的装夹时间分别为原来时间的 42%、27%, 提效十分明显。

## 2.2 通用工装

立卧转换机床的主要加工零件还包括接头类零件,该零件最大的特点就是多面结构,空间各维度均需要加工。

传统的立式机床只能加工一个主维度的面,一个复杂的接头需装夹多次。随着装夹次数增多,装夹误差累积现象越发明显,装夹难度也随之增大,最终表现为装夹耗时长。据统计,采用传统立式机床加工图 5 所示零件,需装夹 4 次,总耗时约 3h,而零件实际加工总时间仅 8h。

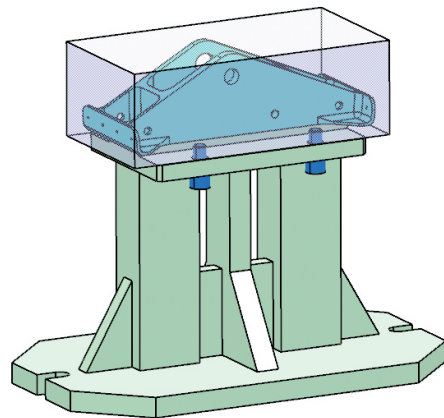


图5 典型反拉装夹示意图  
Fig.5 Diagram of typical pull clamping

为此设计了图 5 所示的反拉工装,该工装通过螺钉反拉压紧的方式将零件底面与工装上表面贴合固定,所有装夹附件都设计在零件底面下方,空出零件四周及上方位置用作机床主轴的活动空间,充分发挥了立卧转换机床大维度加工能力,可以加工除零件底面以外的其他所有维度的面。图 5 所示零件只需 1 次简单装夹,耗时约 20min 就能达到以前 3h 的装夹效果。装夹次数的减少不仅提高了装夹效率,也避免了多次装夹导致的装夹误差累积,降低了装夹难度,提高了装夹质量。

但是这种反拉工装也存在以下缺点:

(1) 通用性差,一种尺寸的工装只能装夹对应尺寸的零件。与传统装夹相比,反拉装夹虽然将单件装夹次数降到了最低,但在多品种加工的情况下,频繁的装夹、拆卸工装也给工人带来了很大的劳动强度,降低了整体装夹系统的效率。

(2) 稳定性差,主要表现为加工时容易出现振动。

为解决上述问题,构建通用工装是一个很好的思路,同时通过研究找到反拉工装稳定性不好的深层次原因。

将反拉装夹系统简化为悬臂梁受力(见图 6),悬臂

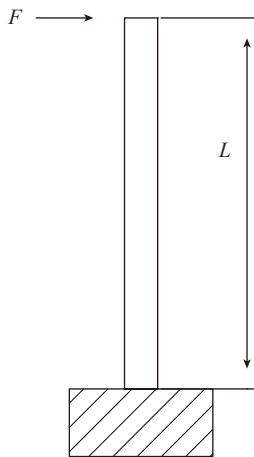


图6 反拉工装受力模型  
Fig.6 Force model of pull clamping

梁一端为固定端,另一端为自由端,在自由端施加侧向力时,其挠度计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$\omega = \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (2)$$

其中  $F$  为作用力,  $L$  为悬臂梁的长度,  $E \times I$  为梁的抗弯强度。

通过公式,挠度与受力大小和悬臂长度正相关,与梁的抗弯刚度反相关。减少挠度可从减小受力、减小悬臂长度、增加梁的抗弯刚度 3 方面考虑。

受力大小主要受加工方案影响,对工装设计方面要求不大,暂不考虑。

悬臂长度对挠度的影响程度远远大于受力大小对挠度的影响程度,所以减少挠度的最优方案便是减小悬臂长度,也就是减小工装的设计高度。但也不能无限减小,须考虑机床主轴距工作台安全距离的限制。

提高梁的抗弯刚度也可减少挠度,一般可以从提高材料的弹性模量和材料的抗弯截面系数入手。在生产中最常见的碳钢、灰铸铁、硬铝合金中,选择弹性模量最好的碳钢作为通用工装的制造材料。提高梁的抗弯截面系数可以通过增加截面积和选用合适的截面形式实现。增加截面积是非常行之有效的办法,但在工程实践中,单纯依靠增加截面积来提高梁的抗弯截面系数并不经济,所以在生产中常见的工字形截面、矩形截面、圆形截面中,选择相同截面积下,抗弯截面系数更好的工字形截面作为钢梁主结构。

另外,充分考虑现有产品类型、数量、尺寸及工装通用化、模块化的设计要求,最终设计出图 7 所示的通用工装。该工装大大增加了装夹稳定性,解决了加工易振动问题。经实践,换装此通用工装后,未出现因

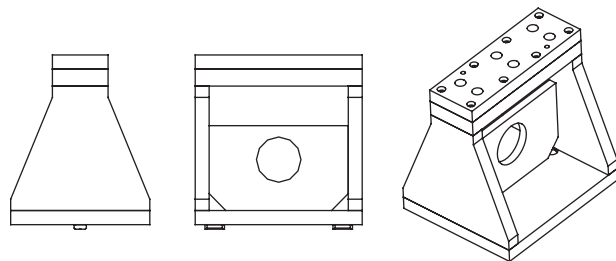


图7 通用工装  
Fig.7 General tooling

工装稳定性差导致的质量问题。

该工装采用螺钉反拉压紧方式,所有装夹附件都设置在工装下部,预留足够空间在工装上表面,满足立卧转换机床大维度加工时的空间需求。在采用大维度加工策略后,不仅图 5 所示接头类可以使用此通用工装,盒类、侧梁类等零件也可使用,同时工装还具有模块化、参数化设计的特点,装夹互换性强,既可单独使用,也可组合使用(见图 8)。

通用工装可以实现绝大多数接头类、侧梁类、盒类零件的通用装夹,不仅显著减少这 3 类零件的工装数

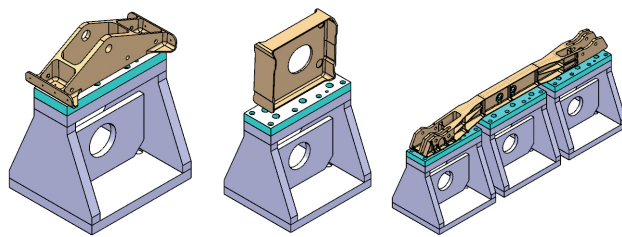


图8 装夹实例图  
Fig.8 Clamping example

表2 不同零件装夹效率

零件类型	优化前 夹具品种	优化前 装夹次数	优化后 夹具品种	优化后 装夹次数	夹具品种 比值 1%	装夹次数 比值 1%
接头类	6	3	1	1	17	33
侧梁类	5	3	1	1	20	33
盒类	3	2	1	1	33	50

表3 不同零件装夹时间

零件类型	优化前			优化后			优化前后 总时间比值 1%
	工装装夹 时间 /min	零件装夹 时间 /min	总时间 /min	工装装夹 时间 /min	零件装夹 时间 /min	总时间 /min	
接头类	300	240	540	35	64	99	18
侧梁类	250	240	490	105	64	169	34
盒类	150	160	310	35	64	99	32

注:生产数量按 4 件 / 批统计。

量而且明显提高了装夹效率(见表2),由之前的单件需2~3次装夹优化为1次装夹。

由于大大减少了工装品种和装夹次数,装夹难度显著降低,工装修夹时间由之前的50min/次缩短为35min/次,零件装夹时间由之前的20min/次缩短为16min/次,整体装夹时间明显缩短(见表3)。

从表中可看出,接头类、侧梁类、盒类的装夹时间分别为原来时间的18%、34%、32%,提效十分明显。

### 2.3 应用效果

针对立卧转换机床加工的4种主要零件类型,自主设计了相应的工艺夹具(见表4),构建了高效装夹系统。配合相应的高效加工策略,能显著缩短装夹时间,达到减少生产准备时间的目的。

如果科学合理地安排好其他诸如生产任务、材料供应、人员安排等加工资源,结合机床平台自动交换功能,在零件加工的同时,进行着装夹准备工作,完全可以实现设备的高效利用。生产实践证明,在高效装夹系统的支持下,设备利用率有了明显提高。

表4 高效装夹系统匹配表

零件类型	平板类	接头类	侧梁类	盒类
工艺夹具	方箱形托盘	通用工装	通用工装	通用工装
高效策略	成组加工	大维度加工	大维度加工	大维度加工

### 3 结束语

在高效加工已成为现代航空制造业的重要趋势的今天,高效装夹作为高效加工技术的重要组成部分,是实现设备高效利用及施行高效加工方案的重要基础。

本文结合本单位生产实际,选取具有典型代表意义的立卧转换数控机床为平台,通过自主设计的工艺夹具,构建了一套高效装夹系统,配合相应的高效加工策略,充分发挥了立卧转换机床的效能,达到了减少装夹时间,提高装夹效率的目的,实现了设备高效利用的目标。相关研究方法及应用经验可推广使用。

#### 参考文献

[1] 张杰. 提高企业数控加工效率的有效方法. 机床与液压, 2011, 39(18):43-45.  
 [2] 田辉, 王俊斌. 航空零件数控加工的特点. 航空制造技术, 2010(19):38-41.  
 [3] 张凯, 刘春时, 李焱, 等. 一种卧式五轴加工中心的结构特点与技术性能. 机械设计与制造, 2011(12):201-204.  
 [4] 梁斌, 虞有康. 普通物理学. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
 [5] 胡益平. 材料力学. 成都: 四川大学出版社, 2010.

(责编 小城)

(上接第55页)

念,不能仅仅考虑基体材料、服役条件、服役环境等要素,应该在材料设计、加工阶段就要系统考虑表面工程技术设计及实现的要求,即应该树立表面工程全寿命周期设计的观点,这样材料才能达到表面加工处理的理想效果。

### 4.5 表面工程工艺装备、控制检测技术水平亟待提高

国内表面工程工艺技术装备制造水平、控制技术、检测技术与世界尚存在较大差距,如爆炸喷涂、超音速喷涂设备基本上还得依赖进口;CVD、PVD等工艺绝大部分都是在真空环境下进行的;国内真空炉的寿命、控制及仿真都无法与国外相比。近年,潘健生院士在真空热处理设备及仿真技术上取得了很大成功,但工程化还有一段距离;激光加工设备也是如此。这些高端工艺设备受到限制也是造成很多先进表面工程技术难以实现应用的因素之一。相信现在国内市场需求增大以及设备制造企业自主创新意识的提高,必将逐渐缩短与世界的差距。

### 5 结论

时代呼唤创新,我国的发展正需要科学技术的创新,作为体现国家制造业水平的航空发动机更需要创新。实践证明,现代表面工程技术及先进工艺在世界最先进航空发动机上作出了极大贡献,国内新一代航空发动机的研制也必将如此,这需要广大的表面工程科研人员、标准化人员、企业表面工程技术人员、产品设计员共同作出艰苦的努力。美国工程院在向美国国会提供的2000年前集中力量加强发展的9项新科学技术中,有关材料方面的仅有材料表面科学与表面技术研究,可见发达国家对表面工程技术的重视。近年来,我国航空也迎来了大发展的时代,相信表面工程在航空制造业中也将迎来大发展的春天。

#### 参考文献

[1] 马清林. 春秋时期镀锡青铜器镀层结构和耐腐蚀机理研究. 兰州大学学报, 1999:67-72.  
 [2] 李金桂. 现代表面工程设计手册. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
 [3] 师昌绪, 徐滨士, 张平, 等. 21世纪表面工程的发展趋势. 中国表面工程, 2001(1):2-7.  
 [4] 徐明德, 刘颖. 金属腐蚀与防护标准手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.  
 [5] 朱立群, 吴俊, 刘亚军, 等. 表面处理膜层憎水处理后耐腐蚀性能研究. 腐蚀科学与技术, 2002(5):302-304.  
 [6] 潘健生. 中国热处理亟待加强自主创新. 机械制造与自动化, 2009, 38(3):1-9.  
 [7] 涂铭旌, 欧忠文. 表面工程的发展及思考. 中国表面工程, 2012(2):1-5.

(责编 叶枫)