

矩阵式数控加工在航空结构件批生产中的应用

Application of Matrix CNC Machining in Mass-Production of Aerospace Structural Part

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 赵中刚 黄果

[摘要] 以大批量数控加工的航空结构件生产为研究对象,运用人工干预环节集中化、数控加工过程自动化的理念,探索利用矩阵式数控加工进行多零件同时生产的应用方案。多零件集中装夹,通过系统自动读入每个零件的加工原点,自动调用零件的加工程序,完成相同(或不同)零件数控加工,在充分利用机床工作台面的同时,解决了批量生产过程中零件频繁装夹、找正、换刀和频繁调用加工程序的难题,达到降低劳动强度,提高生产效率的目的。

关键词: 矩阵式数控加工 加工效率 等距装夹 加工程序

[ABSTRACT] The application of matrix CNC machining for simultaneous multi parts machining by using integrated manual intervention and automated CNC machining process is explored for mass-production of aerospace structural part. Multi parts which are same or not can be machined simultaneously by using technology of multi parts clamping, auto-reading NC origin code and auto-loading NC program of each part. Problems of frequent clamping, centering, tool changing and NC program loading are solved as well as machine tool bench is fully used. As a consequence, the work intensity and the production efficiency are improved remarkably.

Keywords: Matrix CNC machining Machining efficiency Isometric clamping Machining subprogram

世界各国经济的竞争,主要体现在高技术的竞争,先进制造技术是当代国际间科技竞争的重点之一,“柔性”、“高效”、“敏捷”、“智能”和“集成”^[1]是制造设备和系统的主要发展趋势,是实现未来工厂的新奇概念模式,是决定制造企业未来发展前途的具有战略意义的举措。目前柔性制造技术在国外很多知名汽车制造企业、航空企业均有成熟的应用。在国内,特别是在我国的航空航天企业中,它还处于萌芽状态。提高切削用量来达到减少切削时间、提高生产效率依然是主流方向^[2]。

在机械加工行业及制造业,特别是在航空航天零部件大批量生产过程中,零件的装夹、刀具的更换、原点的

设置和加工程序的调用等数控加工辅助时间在整个零件数控生产过程中占很大的比重,有时甚至超过零件实际数控铣削的加工时间。一方面,大量的辅助工作带来设备的占机等待,导致数控设备在进行小型零件数控加工过程中无法发挥其本身的效能,使生产效率处于较低的水平,频繁的辅助工作也增加了操作者的劳动强度;另一方面,使用大型工作台面加工小型零件,对于数控设备工作台面而言也是一种没有充分利用的表现,无法发挥大型设备应有的优势^[3]。

本文从现场操作环节入手,通过对人工干预环节和数控加工环节的有效分割重组,将数控零件积小成大,积少成多,最大限度地减少对数控设备的人工干预,有效地提高了设备主轴利用率,达到提高生产效率的目的。

1 航空结构件批量生产的现状分析

1.1 航空结构件现行批量生产模式

批量生产现行生产模式:相同零件全部单件加工完成后,再进行下一项零件的生产。

批量生产过程中,数控铣削的时间相对较短,操作者人工干预量和劳动强度相对较大,因此加工效率较低。比如,某设备一个班次需要加工 10 个零件,需要装夹 10 次,原点找正 10 次,更换刀具 60 次(零件加工共需 6 把刀具),程序选择调用 60 次(零件共 6 个程序),数控铣削时间仅 25min。零件的装夹、原点的找正、刀具的更换以及程序的调用占总加工时间的 1/2。表 1 为加工时间组成分析。

表1 加工时间组成分析

生产环节	单件使用时间 /min
装夹	6
原点找正	2
换刀(单件 6 把刀具)	1 × 6
程序调用(单件 6 次)	1 × 6
数控加工	25
总计	45

1.2 成组加工在批生产中的瓶颈

对于小型零件而言,在同一毛坯上将同一图号或不同图号的多件零件进行组合加工的成组加工,在材料的节约、生产效率的提升等方面起到了很大作用^[4]。但是成组加工需要:

- (1)重新规划毛坯材料大小;
- (2)重新编制零件的专用程序;
- (3)重新制作成组加工专用的工装;

(4)成组加工中零件的项数和零件数量固定不变,不能够灵活地进行组合,如中止某项零件的加工,或更改某项零件的加工数量变得很困难。

基于上述原因,有些零件不适合使用成组加工,因此需要研究新的生产模式,进行多件零件的同时加工,来解决频繁的人为干预,提高生产效率,摆脱成组加工中工装和程序限制的问题。

2 矩阵式数控加工

2.1 矩阵式数控加工方案的引入

一方面为了能够实现多件零件同时装夹,同时达到降低劳动强度,提高生产效率的目的;另一方面为了摆脱成组加工过程中材料、加工程序、专用工装、单次零件加工数量的限制,本文提出矩阵式数控加工。

2.2 矩阵式数控加工可行性分析

矩阵式数控加工:能够进行相同或不同零件的同时装夹,系统自动调用每个零件对应的加工原点和加工程序,进行多零件同时加工的方法。

矩阵式数控加工的难点在于:每个零件原点坐标值的分配和不同零件间不同程序的调用问题。采用子程序化(宏程序)方案,在加工每件零件前,先由系统子程序自动将本零件的加工原点赋值到G54中,然后使用宏程序对加工程序进行调用,直至完成所有零件的所有加工程序(表2)。

表2 部分指令说明

指令	西门子系统	法那克系统
程序调用指令	EXTCALL (“程序名称”)	M98 P 调用程序号
原点赋值指令(G54中X坐标值)	\$P_UIFR[1, X, TR]= 原点坐标值	#5221= 原点坐标值

2.3 矩阵式数控加工存在的优势

- (1)精益化多件零件的装夹,节约装夹时间。
- (2)减少零件原点找正的时间。
- (3)减少刀具更换的次数,减少次数为同时加工的零件的数量减一,比如同时加工10件零件,即减少9次刀具的更换。
- (4)减少加工程序的调用次数。

(5)使用单件加工时的工装、程序,节约了工装和程序编制成本。

(6)加工中零件的数量和零件的项目可按照生产现场的实际情况进行设置。

3 等距式矩阵加工(矩阵式数控加工在粗加工中的应用)

3.1 等距装夹的实施方案

(1)可调式多工位定位压板(以下简称定位压板)。

结构:整体长方体。该定位压板按结构功能区分,主要分为3个部分:两端面设有与零件相接触用于零件定位的基准面;中间位置设有6个使用定位销与机床键槽相配合的定位精孔;一端面上表面设有区分两定位端面的锥度面,如图1所示。

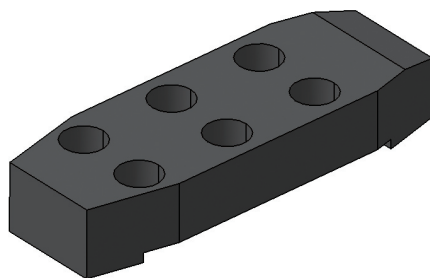


图1 可调式多工位定位压板

Fig.1 Adjustable clamps for multi operations

用途一:3组定位精孔到两端面的距离共形成6组尺寸,根据零件宽度的不同,选择1组定位孔,保证零件在宽度方向的另一侧,便于装夹。使用两组定位压板,可以方便保证零件的直线度要求(否则由于零件的宽度不同,造成零件宽度的另一侧,零件与T型槽腔的距离过远或者过近,都不方便压板的装夹)。

用途二:使用定位压板,配合百分表在机床上的等距移动,来控制多个零件间的距离,可以保证零件在相同方向上的距离相同。

(2)零件在X向的定位依靠定位压板和机床(装有百分表)的等距移动。

第一步,如图2中等距装夹过程图所示,使用定位压板,用两个 $\phi 22$ 的销棒2,分别通过定位压板1上定位孔5和定位孔7,插进机床键槽内,从而保证定位压板1在长度方向上与机床键槽平行,并且Y向固定,然后中间定位孔6使用螺钉或拉杆3将定位压板1进行压紧,将百分表触头接触到定位压板1定位端面4,读取百分表此时的读数,从而固定了第一个定位压板。图3中零件1左侧定位压板,用来固定零件1的X向位置。

第二步,根据零件在X向(或Y向)的间距,将机床连同百分表移动一个X向(或Y向)间距,再次使用一

个定位压板 1,使用两个 $\phi 22$ 的销棒 2,分别通过定位压板 1 上定位孔 5 和定位孔 7,插进机床键槽内,从而保证定位压板 1 在长度方向上与机床键槽平行,并且 Y 向固定,然后中间定位孔 6 使用螺钉或拉杆 3 将定位压板 1 进行压紧,在压紧的同时,调整定位压板 1 在 X 向的位置,保证百分表的读数与记录值相同,来保证 2 个定位压板在 X (或 Y 向) 向的位置相同。根据实际加工中, X 向(或 Y 向)上零件的数量,来设置 X 向(或 Y 向)定位压板的数量。本案例中 X 向设置 5 组, Y 向设置 4 组,共计 20 个定位零件 X 向的定位压板。图 3 中,零件 1~20 左侧定位压板。

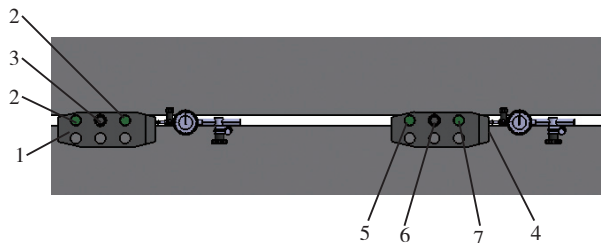


图2 等距装夹过程图
Fig.2 Illustration for isometric clamping

(3) 零件在 Y 向的定位: 依靠定位压板和机床等距的键槽。

20 件零件 Y 向的定位,根据零件的宽度,选择定位压板上适当、方便零件装夹的一组孔,所有定位压板使用相同的一组定位孔。每个零件使用 2 个定位压板,保证 Y 向定位和零件的直线度要求。利用等距的机床键槽和定位压板来保证所有零件在 Y 向上的等距关系。

20 个零件 X 向和 Y 向使用的定位压板如图 3 所示。

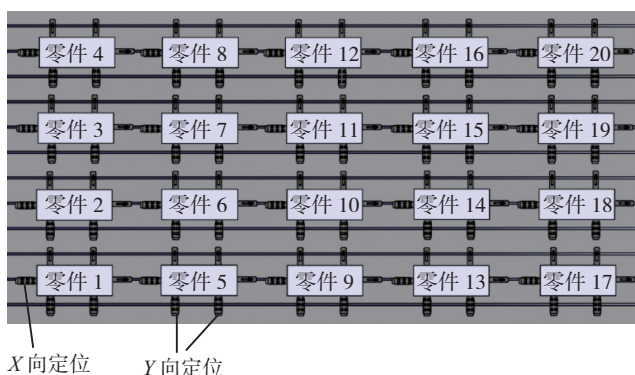


图3 20个零件等距装夹
Fig.3 Isometric clamping for 20 parts

3.2 等距式矩阵加工方案的实施(以法那克系统为例)

本文以某台 3 坐标龙门铣床为例,法那克系统,机床没有刀库,主要解决频繁的装夹、刀具和程序更换。

(1) 等距式矩阵加工加工流程。

零件的装夹: 按照等距式装夹方案,将定位压板装

夹好后,每个零件的 X、Y 向的位置,以及零件的直线度即可满足加工要求,仅仅首次加工时进行定位压板的装夹,依序完成 20 个零件装夹。

主程序的设置: 在主程序中设置第一个零件的原点坐标值, X 向和 Y 向上零件的数量和距离,从哪件零件开始加工等信息如表 3 所示。

表3 20个零件系统设置

指令示范	指令说明
#32=1001	当前主程序需要调用哪个加工程序
#21=521.12	第一个零件的原点坐标 X 值
#22=123.21	第一个零件的原点坐标 Y 值
#23=155.68	第一个零件的原点坐标 Z 值
#24=20	能够进行矩阵式排列的零件数量为 20 个
#25=0	没有不能构成矩阵排列的零件
#28=5	X 向有 5 组零件
#29=1000	X 向每组零件的间距为 1000mm
#26=4	Y 向有 4 组零件
#27=500	Y 向每组零件的间距为 500mm
#31=1	主程序从 X 向第一个零件开始加工
#30=1	主程序从 Y 向第一个零件开始加工

主程序的调用: 主程序依次按照图 3 中零件的顺序调用程序,进行零件的生产。第一个零件加工完成后,自动将原点坐标偏移一个零件的距离加工第二个零件。根据零件的数量,完成多次重复自动调用。

当首批 20 个零件加工完成后,用于零件 X 向和 Y 向定位的 30 个定位压板位置保持不动,仅取下用于压紧固定的其他普通压板,进行零件的快速换装。

(2) 等距式矩阵加工程序参数介绍。

加工程序的设置。对于没有刀库的设备而言,每一个加工程序对应一个主程序,在主程序内将当前加工程序的程序名称输入到参数 #32 中,主程序自动根据零件的加工数量 N,调用 N 次零件的加工程序。

对于拥有刀库的设备而言,仅设置一个主程序,加工过程中仅调用一个主程序即可实现对零件加工程序的多次调用。

原点坐标值的设置。首先将首件零件的加工原点 X、Y、Z 值找出,录入到主程序参数 #21、#22、#23 中。零件加工时,主程序根据首个零件的原点坐标值和零件间 X 向和 Y 向的间距,对每个零件的原点值自动进行等距偏移,完成每个零件原点坐标值的计算和对 G54 的赋值工作。每次调用加工程序前,首先将对应零件的原点值赋值到 G54 中,保证原点值和加工程序的一一对应。

零件的加工数量。根据实际生产中零件的加工数量,分别将零件的加工总数量、 X 向的加工数量和 Y 向的加工数量输入到参数#24、#28、#26中,便于程序加工过程中对每个零件原点坐标值的计算工作。

不能构成矩阵零件的加工数量。当零件加工到最后时,有可能零件的加工数量仅剩余18件,按照 Y 向5个进行计算,只能构成3组,形成 5×3 的矩阵,剩余3个无法构成矩阵,此时需要将剩余的3件输入到参数#25中,系统自动仅仅加工 $5 \times 3 + 3$ 个零件。

零件在 X 向和 Y 向的间距。根据实际生产中零件间的距离,分别将零件在 X 向的距离和 Y 向的距离输入到参数#29、#27中,便于程序加工过程中对每个零件原点坐标值的计算工作。

从哪件零件开始加工。现实的加工过程中,有可能会遇到停电、设备故障等因素造成加工至中途的情况发生,此时再次从首件零件开始加工,有可能会影响零件的尺寸,并耽误大量的加工时间。此时可以将将从哪一件加工的信息输入给#31(X 向)和#30(Y 向)参数。比如零件加工至 X 向第2、 Y 向第3个零件,仅仅输入#31=2、#30=3,运行程序后,程序自动从 X 向第2、 Y 向第3个零件开始加工。

3.3 等距式矩阵加工的优点

等距式矩阵加工优点如表4所示。

表4 20个零件矩阵加工和单件加工时间比较 min

加工环节	单件生产(加工20件)	20件矩阵加工
装夹	6×20	70(节省装夹准备时间)
原点找正	2×20	2
每件原点复查	0	1×20
刀具交换	$1 \times 6 \times 20 = 120$ (未算暂停等待)	$1 \times 6 = 6$ (节省114次刀具交换)
程序调用	$1 \times 6 \times 20 = 120$ (未算暂停等待)	$1 \times 6 = 6$ (节省114次程序调用)
数控铣削	$25 \times 20 = 500$	$25 \times 20 = 500$
合计	900	604

(1)多件零件同时装夹,节约了大量装夹准备的时间,比如吊具、吊车、工具的准备、工具的统一使用。

(2)原点的找正仅找第一个零件,其余19个零件的原点值通过零件间的距离进行等距偏置。

(3)每把刀具交换后,一次性加工20个零件,从而节约大量的刀具交换时间,避免了暂停等待的时间。

(4)每个主程序调用后,可以由主程序自动调用20次零件的加工程序,从而节约了大量程序调用时间,避

免了暂停等待的时间。

3.4 等距式矩阵加工的适用范围

(1)机床工作平台必须满足装夹多零件的要求。

(2)进行大批量生产时尤其适用。

(3)仅适用于粗加工。

(4)没有工装要求的精加工也可以应用此方案,同时加工多个相同零件,但由于加工精度的要求,必须对每个零件进行原点找正,将每个零件的原点存在对应的参数中,加工过程中有系统程序进行调用。

4 非等距式矩阵加工(矩阵式数控加工在精加工中的应用)

等距式矩阵加工非常适用于多件相同零件粗加工的同时生产,但是对于有工装要求的零件,装夹多个意味着需要多套工装,并且对于对原点值的精确度要求较高的精加工,以及不同零件同时加工时,等距式矩阵加工却无法满足不同要求,因此非等距式矩阵加工应运而生。

4.1 非等距式矩阵加工的构思

零件生产过程中经常会有以下情况发生:

(1)参与矩阵加工的零件需要使用专用工装;

(2)当零件进行精加工生产时,每个零件都需要精确的原点坐标值,来保证零件的加工质量;

(3)当零件的加工批量较小时,并且每项零件的加工数量不相同。

上述情况下,等距式矩阵加工显然不能够满足要求,因此需要非等距式矩阵加工具备以下功能。

(1)允许相类似的多个零件同时装夹、同时加工,避免对相同工装的需求。

(2)对每个零件进行原点找正,以保证精加工时零件的质量。

(3)允许小批量或单件零件融入矩阵式数控加工,提高矩阵式数控加工的灵活性。

(4)必须有可靠的程序、刀具、原点等加工过程的自动监控,保证零件在加工过程中质量的稳定性。

4.2 非等距式矩阵加工案例分析

本文以某台5坐标卧式加工中心(简称设备B,西门子系统,设备带有刀库)为例,主要解决零件的频繁装夹和频繁人为干预的问题。

(1)设备B原生产模式。

从装夹到零件原点的找正、数控铣削、镗孔、凸台下断,再到零件的拆卸,基本上零件生产的每个环节都需要人为干预。现场的生产模式为:每项零件逐一完成后,再加工下一项零件,人为干预环节非常频繁,影响生产效率的提升,造成劳动强度较大,如图4所示。

(2)非等距式矩阵加工。

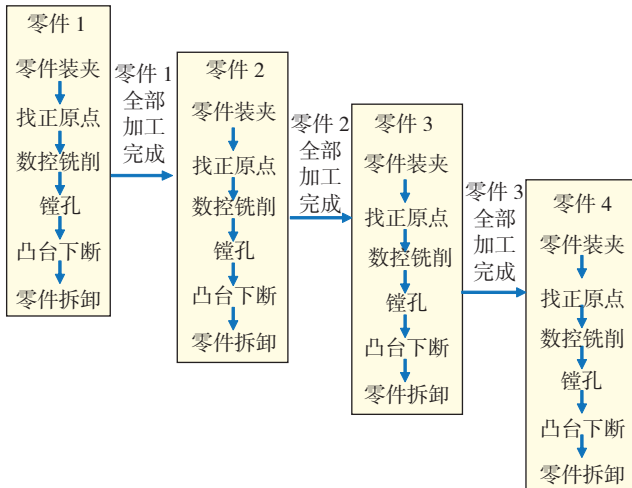


图4 设备B原生产模式

Fig.4 Original production mode of machine B

对系统程序进行编制,使具备以下功能,4项相似零件同时进行装夹、原点找正、数控铣削、镗孔、工艺凸台下段、拆卸零件,如图5所示。

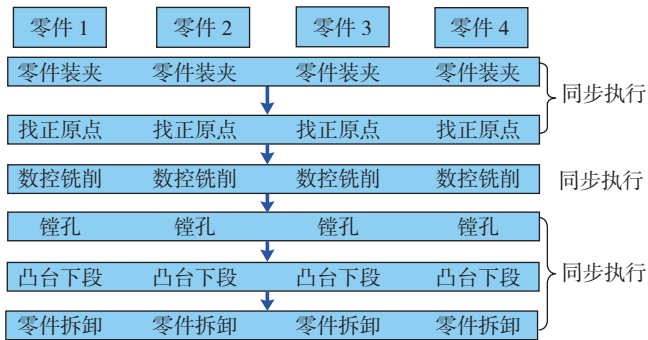


图5 矩阵式数控加工生产模式

Fig.5 Matrix CNC Machining production mode

操作者仅仅调用一个主程序,由主程序控制零件的加工顺序和原点坐标的偏置,依次完成4项零件的生产。

(3)采用矩阵式数控加工后的成效。

此4项零件使用矩阵式数控加工后,绝大部分数控铣削时间在晚上完成,每天早上接班时,数控铣削完成,操作人员进行镗孔、工艺凸台下段、装夹零件、原点找正等,将4项零件的人工干预项集中完成后,便可以进行19h无人工干预数控自动铣削,如图6所示。

4.3 非等距式矩阵数控加工的优势

(1)主程序。现场生产中,仅启动一个主程序即可进入矩阵式数控加工,由设备系统子程序来控制每个零件原点的赋值和零件加工程序的调用顺序,主程序如表5所示。

(2)安全保障体系。为了保障零件数控加工过程

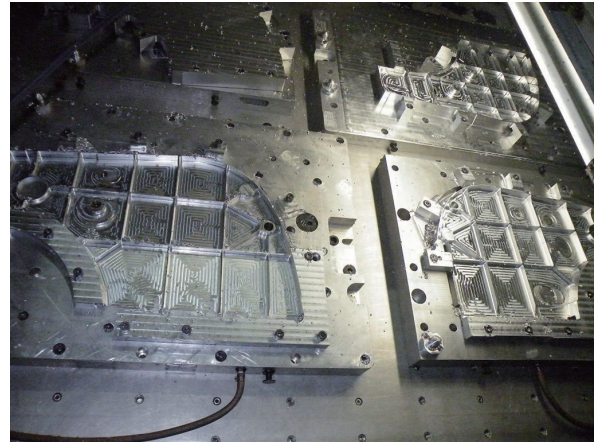


图6 4项零件矩阵式数控加工

Fig.6 Matrix CNC Machining of 4 parts

表5 4项零件加工主程序

主程序	说明
IF T_LIST[9]<>1 BEA_PROG_PAL1="part1" T_LIST[1]=1 PART_TK[1]="K4005W" PART_LAST[1]="K4007W"	1号零件的名称 第一根镗孔程序的程序名称 镗孔后的第一个程序的名称
BEA_PROG_PAL2="part2" T_LIST[2]=1 PART_TK[2]="K4007W" PART_LAST[2]="K4008W"	2号零件参数
BEA_PROG_PAL3="part3" T_LIST[3]=1 PART_TK[3]="K4009W" PART_LAST[3]="K4010W"	3号零件参数 (若没有3号件,引号为空)
BEA_PROG_PAL3="part4" T_LIST[3]=1 PART_TK[3]="K4006W" PART_LAST[3]="K4008W"	4号零件参数
PRO_MARK="" ENDIF FMC_MAIN_TK M02	机床后置子程序, 控制零件的加工顺序

的安全和可靠运行,在系统中设置了程序防调错系统、刀具防错系统、原点防错系统等,系统一旦检查出某一个环节出现问题,便立即停止加工,避免给零件和设备带来隐患。

(3)灵活性保障体系。加工过程中,仅启动如表5所示一个主程序即可进入矩阵式数控加工,每个零件原点的设置和程序的调用顺序由预先编制好的系统程序来保证完成;允许4项、3项或2项零件同时进行矩阵式数控加工;中止某项零件的生产:将需要中止的零件加工数量修改为0后,在保持其余零件加工的同时,便可中止加工此项零件的生产;从中断处开始加工:当设备故障、厂房暂停电等造成停工后,重新开启机床加工,

(下转第67页)

刀深度 8mm,粗加工完成后使用 $\phi 20\text{mm}$ 刃口加长型硬质合金铣刀精加工外形,1.5mm 壁厚强度很低,刀具要足够锋利,一次切深可达 50mm,每一层精加工两遍,转速 3500r/min,进给速度 500mm/min。外形加工完成,用压板压紧外形台阶部分,将零件内外双重固定。铣内腔时同样用 $\phi 14\text{mm}$ 合金波刃粗铣刀去除残料,转速与进给要慢一些,转速 4000r/min,进给速度 600mm/min,吃刀深度 7mm。且一定要精铣完一层深度再铣下一层深度,每一个深度粗精加工往复进行,精铣刀采用 $\phi 10\text{mm}$ 硬质合金铣刀,转速 4000r/min,进给速度 500mm/min,吃刀深度 7.5mm。但是在进行最后一层的深度铣削时,需要特别注意,不能在粗铣时将零件与中心固定台进行铣通分离,因为分离后,零件没有了强度,精铣就无法进行,整个零件就有可能在最后精铣阶段报废,所以留下 0.5mm 厚连接残料,开始进行精铣,这样就保证了精铣时工件有足够的强度,加工得以继续进行(图 5)。最后的 0.5mm 深度决不能使用粗铣刀,要在最后精铣时,在刀具强度允许情况下选择尽量小的精铣刀,下到深度精铣两遍即可,采用 $\phi 8\text{mm}$ 精铣刀将零件的中心固定台与零件进行铣通分离,但走刀和转速不能太快,以防刀具与工件发生共振,转速 3000r/min,进给速度 300mm/min。至此,零件数控加工全部完成,如图 6 所示。

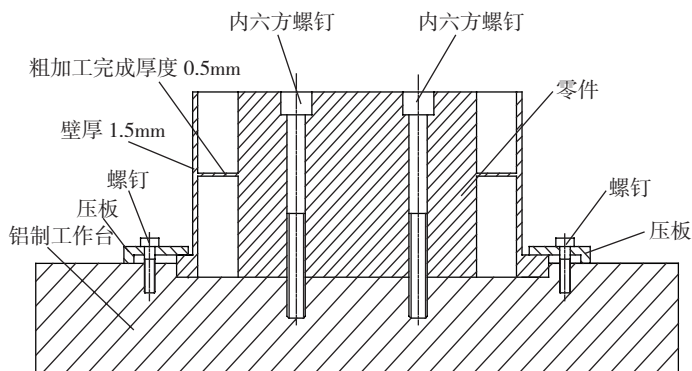


图5 工序2完成后零件二维示意图

Fig.5 Part two-dimension picture after the second procedure

5 结束语

加工整体薄壁通壳体类零件关键技术点是要控制加工过程中零件变形:(1)加工顺序要遵循先主后次、基面先行的原则;(2)综合考虑装夹的方式、位置、方向等,利用零件中间窗口,采用螺栓压紧固定,压紧力垂直于工作台,减少了零件装夹变形;(3)凹槽定位,阴阳相配定位精确,减小加工过程中薄壁颤振;(4)刀具选择上采用合金波刃粗铣刀进行粗加工,降低切削应力,减小零件变形;(5)合理设置切削参数及刀具路径,最后的粗加工完要留有 0.5mm 厚连接残料,使用精铣刀将零件的中心固定台铣通分离;(6)减少零件大余量的切除,

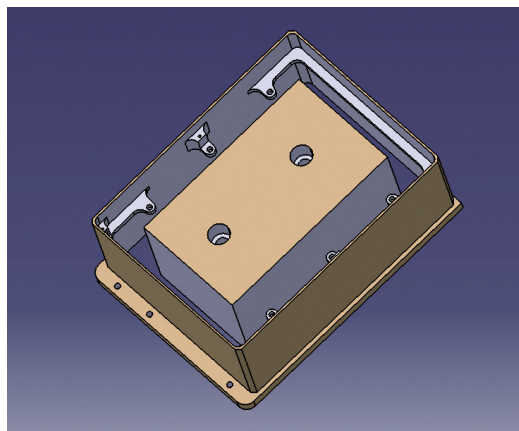


图6 工序2加工完成后零件三维图

Fig.6 Part three-dimension picture after the second procedure

减少应力变形。

此加工方法装夹简便,固定牢靠,定位精确,还大大增强了零件在铣削过程中的强度,有效防止了在加工中产生的颤振和变形,零件的尺寸、外观质量都得到了很好的保证;材料去除量减少,提高了工作效率,中间剩余的一整块残料可以另做他用,节约了成本。以上是在工作中积累的经验并加以总结,仅供参考。(责编 小城)

(上接第 64 页)

此时系统自动记录当前加工的零件和加工的工步程序,复查状态正确后,仅启动当前主程序,由系统自动搜索程序加工的位置,系统自动从中断处开始加工零件;当每个矩阵式加工中的每个零件工步设置与每个工步刀具相同时,矩阵式数控加工方案就可以按照工步优先的原则,将所有零件的同一个工步加工完成后,再加工下一个工步,以便减少刀具的更换次数。

5 结束语

通过多件相同(或不同)零件的集中装夹,系统自动对原点坐标值进行设置,以及自动调用零件加工程序,完成相同(或不同)多个零件的自动加工。在充分利用机床工作台面的同时,节约大量的装夹、找原点、换刀以及调用程序时间,达到降低劳动强度、提高生产效率、增加设备效能的目的。

参考文献

- [1] 林胜. 柔性制造技术及其发展. 航空制造技术, 1999(5):11-24.
- [2] 王世鹏,解艳彩,闫雪峰. 柔性制造单元上下料机构的改进设计. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6):85-90.
- [3] 陈小明. 航空大型数控机床的设计特点. 航空制造技术, 2006(6):50-53.
- [4] 曹运红. 柔性制造系统、柔性制造单元和成组技术的发展和应. 飞航导弹, 2004(5):59-63.

(责编 叶枫)