

提升数控立车效能综合技术应用

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 赵辞 韩德印 贺芳 李家永

该项目针对军工企业现有数控立车应用潜能发挥所存在的共性问题，通过对提高数控加工效能关键技术的研究，如挖掘数控设备潜能、发挥机床的性能、提高现有数控立车的有限切削时间比例、提高产品和检测效率等，给出了对提高数控立车加工效能非常有效的实施方案。

一、引言

目前，军工企业随着技术能力提升和数控设备引进，实现了复杂结构零部件的数控加工。经过多年的探索，在数控加工技术研究与应用方面也取得了较大进步，形成了具有一定数控加工能力的生产体系。但数控加工中程序调整、工装夹具准备、刀具准备及零件检测等占用的时间较多，加工效率偏低。据统计，机床主轴运转占用的时间仅占机床全部活动时间的 40%，无法充分发挥设备能效，制约高效数控加工技术的发展，亟待开展充分发挥数控设备能效的综合技术研究和应用实践工作。

二、研究目标

1. 零件类型及加工现状分析

选取典型批产零件的数控立车工序开展攻关，分析其存在的共性问题：数控程序以手工编制轮廓程序为主，部分零件加工无专用程序，由操作者手工编程；车削效率较低，钛合金加工线速度仅为 40 ~ 50m/min、高温合金加工线速度 30 ~ 40m/min；无专用夹具或夹具装夹过程复杂，装夹效率低；机床冷却条件较差；没有合理应用刀库、自动换刀等功能。

2. 预期达到的技术指标

(1) 数控立车批生产有效加工时间提高到 70%；(2) 效率倍增：在进给倍率 100% 的前提下，有效切削刀路提高

到 90% 以上，总体切削效率提高 30%。

三、技术途径

1. 优化工艺方案

(1) 合理设置粗车加工尺寸公差和余量。

如某零件 No.30 细车一端工序给精车工序预留余量过大，最大的地方达到 5mm。对易变形的薄壁环形件来说，余量越大，后续精加工零件变形可能性就越大，越不利于保证零件的尺寸精度和技术条件。调整零件加工余量，尽可能在粗加工时去除更多的余量，使零件早一些释放应力，减少零件后续加工变形量，如图 1 所示。

(2) 按设备效能最大化原则集中工序。

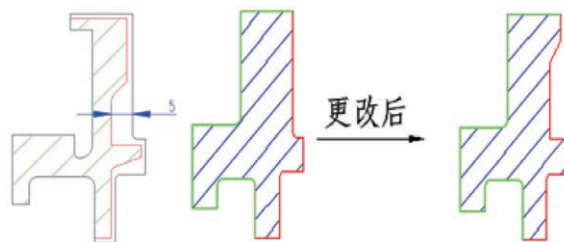


图 1 优化细车工序给精车工序预留余量对比图

如某零件精车工序冗长且分散，存在多次更换夹具、零件多次装夹等问题，批产零件生产准备时间及工序周转时间长。

合并工序，减少工序周转及工序准备时间，缩短加工

周期；改变并统一装夹基准，尽可能使工序集中，将精加工夹具由4套该为2套，节省加工成本，如图2所示。

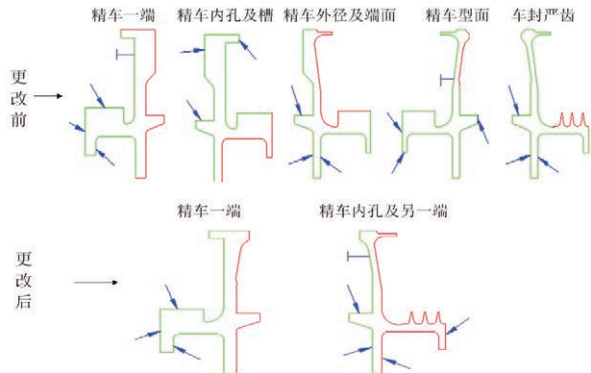


图2 某零件精车工序调整前后对比图

(3) 改进装夹定位结构，提高加工系统刚性。

某零件原精车工序如图3所示，由于压紧位置与加工位置成长悬臂弱刚性状态，加工过程易震颤，吃刀量小，加工效率低，优化后既提高了系统刚性又应用倒锥涨紧结构实现了零件的快速装夹地位，使加工效率、装夹效率显著提高。

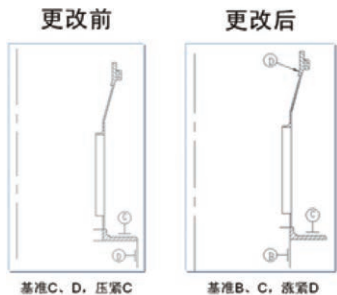


图3 优化装夹定位结构对比图

2. 应用快换工装系统

快换工装是应用工装快速换装技术，采用零点定位系统，通过气动控制，实现工装快速装卸、定位而设计制造的一整套工装系统，使装夹找正时间由30分钟，缩短到5分钟，如图4所示。

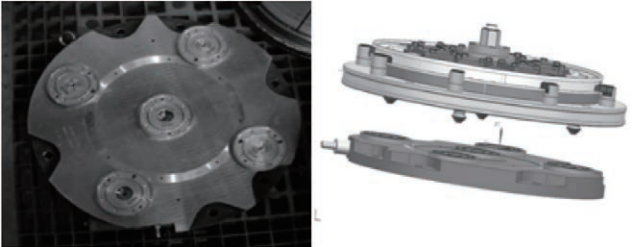


图4 快换工装图及原理图

3. 高效低应力切削试验

应用14组车加工刀具，选取GH4169、GH536和TC4三种材料，通过对不同的切削线速度、切深、进给和冷却方式的调整，完成了32组的切削试验，形成刀具全寿命管理卡片，如表1所示，并总结以下几方面：

- ◎ 硬质合金刀具加工GH4169材料线速度超过60m/min刀具磨损较快，应采用恒线度切削，避免切削过程中线速度的大幅改变。
- ◎ GH4169材料应用硬质合金刀具加工，粗加工线速度40～50m/min、精加工60m/min综合效益更优。
- ◎ 通过采用外冷转内冷技术可以有效降低切削区域温度，从而提高刀具寿命或提高线速度、进给率。
- ◎ 通过提高进给率的方式提高切削效率小于提高切深

表1 刀具全寿命管理卡片

序号	刀杆牌 号	刀片牌 号	涂层	刀具厂 家	刀杆规 格	刀尖半 径	切削深 度 (mm)	切削速 度 (m/min)	主轴转 数 (r/min)	进给量 (mm/r)	加工方 式	零件材 料	冷却方 式	使用寿 命 (min)	去除率 mm ³ /min	材料去 除量 mm ³	注意事项
1	PCLNR2 525M- 12X	CNNX12070 8-M4MV	IC806	伊斯卡	25*25* 120	0.8	1	50	恒线	0.12	粗加工	GH4169	外冷	21.5	6000	129000	
2	PCLNR2 525M- 12X	CNNX12070 8-M4MV	IC806	伊斯卡	25*25* 120	0.8	1	60	恒线	0.12	粗加工	GH4169	外冷转 内冷	20	7200	144000	冷却泵输 出压力 20Bar
3	PCLNR2 525M- 12X	CNNX12070 8-M4MV	IC806	伊斯卡	25*25* 120	0.8	1	50	恒线	0.12	粗加工	GH4169	外冷转 内冷	33	6000	198000	冷却泵输 出压力 20Bar
4	PCLNR2 525M- 12X	CNNX12070 8-M4MV	IC806	伊斯卡	25*25* 120	0.8	1	50	恒线	0.15	粗加工	GH4169	外冷转 内冷	18	7500	135000	冷却泵输 出压力 20Bar
5	PCLNR2 525M- 12X	CNNX12070 8-M4MV	IC806	伊斯卡	25*25* 120	0.8	0.5	50	恒线	0.15	粗加工	GH4169	外冷转 内冷	35	3750	131250	冷却泵输 出压力 20Bar

的成本,可以采用减小切深,增大进给的方式提高切削效率。

4. 研究高效的在线测量技术

(1) 关键尺寸控制代替全尺寸测量。

数控程序多数由 CAM 软件自动生成,刀轨点位根据零件模型计算确定,因此在保证零件模型和程序仿真正确的前提下,在同一程序、同一刀具的加工部位选择轴向和径向各一个关键尺寸,保证这两个尺寸检查合格后,该程序加工的其他尺寸也能满足尺寸精度要求,从而代替加工过程中的全尺寸测量。关键尺寸的选择应尽量选择尺寸精度高且易测量的尺寸。下面列举两种情况下的应用案例。

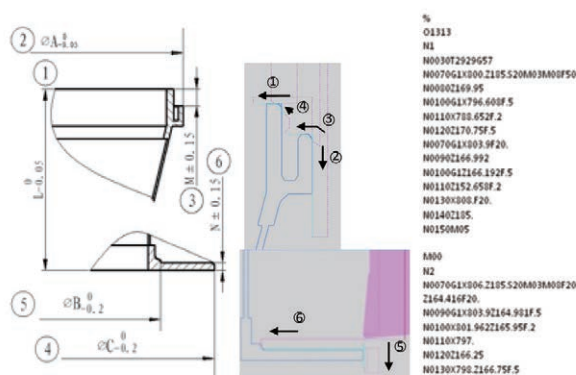


图5 关键尺寸控制代替全尺寸测量应用

该程序主要加工尺寸①②③④⑤⑥及倒角,尺寸①精度要求高且易测量定为轴向关键尺寸,尺寸②在径向尺寸中精度较高且容易测量到定为径向关键尺寸。程序中使用M00暂停加工,测量①②尺寸,在这两个尺寸达到加工要求后,一次完成其他尺寸的加工,减少了加工中的尺寸测量次数,如图5所示。

(2) 车削在线测量自动补偿技术。

在线测量自动补偿技术是应用机床测量切削功能,实现对加工误差或刀具加工让刀情况的测量,并自动补偿加工刀补,避免人为计算刀补值错误造成的加工零件超差或报废。该功能机床运动过程如下:零件加工余量分两次加工完成,例如将零件表面留0.6mm余量,先利用车加工刀具车掉0.3mm余量,然后将刀具还回刀库,通过程序调出测量头,按照测量程序测量被加工零件加工尺寸与程序设定值的偏差,机床自动计算刀具偏差值,将测头还回刀库,再将之前的车刀调出,同时将在线测量计算的刀补值输入被调出刀具磨耗中,利用补偿后的刀具再将余下的0.3mm余量加工

掉,整个加工过程称为在线测量自动补偿切削。

5. 物理仿真均衡切削载荷技术

(1) 基于切削载荷优化走刀轨迹。

根据 PM 分析的切削载荷结果调整每段程序的终点位置,避让拐点的同时去除拐点区域的部分材料,使下层程序段切削余量减少,最终均衡切削载荷分布如图6所示。

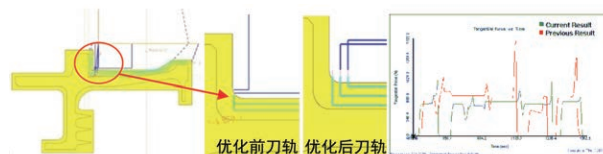


图6 基于切削载荷优化走刀轨迹对比图

(2) 切削试验和均衡切削载荷相结合的优化。

以试验件为原型,对不同切削参数加工的切削载荷进行仿真,切削载荷数据如表2所示。

表2 不同切削参数下的切削载荷统计表

序号	切削速度 m/min	进给率 mm/r	切深 mm	切向力 N	轴向力 N	径向力 N	合力 N	单位长度 载荷 N/mm
1	40	0.12	1	630	190	-380	760	503
2	50	0.12	1	620	180	-375	752	500
3	60	0.12	1	620	184	-370	745	495
4	70	0.12	1	616	181	-366	740	489
5	40	0.12	1.2	749	167.7	-465.8	897.8	524
6	40	0.12	1.5	925.5	136	-579.9	1100	546
7	40	0.12	0.8	436.8	182.1	-262.5	541.3	509.4
8	40	0.12	0.5	256.6	136.1	-103.8	316	411
9	40	0.12	0.3	157	88	-44.5	188.4	336
10	40	0.12	0.1	50.6	29.8	-6.6	59.1	178.3
11	40	0.15	1	763.9	222.4	-434.3	904.4	596
12	40	0.18	1	893.1	254	-481.5	1046	672
13	40	0.12	0.3	188.3	105.9	-51.8	222	287.5
14	40	0.15	0.3	229.8	125.4	-57.4	268	417.9
15	40	0.18	0.3	267	139.4	-59.1	306.9	462.3
16	50	0.15	0.3	227.6	123.1	-56	264.8	413
17	60	0.15	0.3	225.8	121.2	-54.9	262.1	409

注:在 $F=0.1\text{mm}/\text{min}$, $a_p=1\text{mm}$ 的条件下,切削载荷随切削速度变化如图7,可见随着切削速度变化,切削载荷的变化都不大。

在 $v=40\text{mm}/\text{min}$, $F=0.1\text{mm}/\text{r}$ 的条件下,切削载荷随切深变化如图8,可见随着切深增加,切向力、径向力及

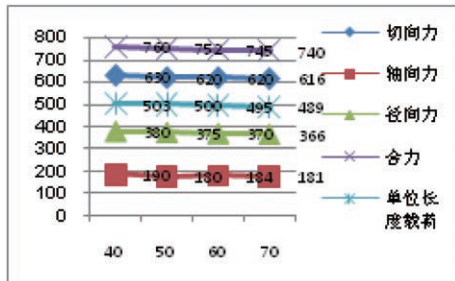


图7 切削载荷随切削速度变化图

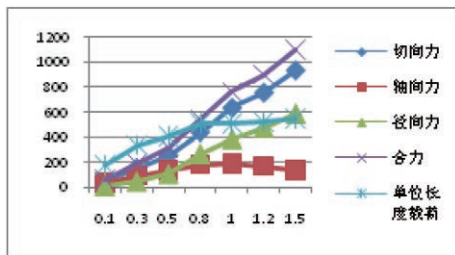


图8 切削载荷随切深变化图

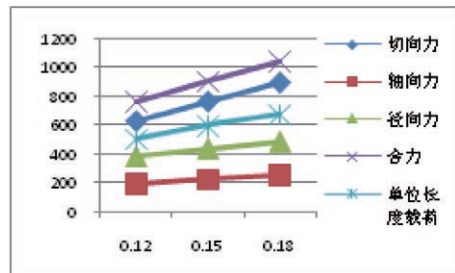


图9 切削载荷随进给变化图

三向合力正比增加,单位长度载荷增长规律与双曲线的一致,而径向力呈抛物线趋势。

在 $v=40\text{mm/min}$, $a_p=1\text{mm}$ 的条件下,切削载荷随进给变化如图9,可见随着进给率的增加,切削力呈线性变化。

根据现场试验件切削结果,粗车的切削载荷的优化目标值取恒线速度 $v=50\text{mm/min}$, $F=0.12\text{mm/r}$, $a_p=1\text{mm}$ 物理仿真的切削力数值,精车的切削载荷的优化目标值取恒线速度 $v=60\text{mm/min}$, $F=0.15\text{mm/r}$, $a_p=0.3\text{mm}$ 物理仿真的切削力数值。

四、优化对比分析

通过对提高数控加工效能的关键技术进行研究,对数控加工过程中各方面效率的综合提升,从实施前后的对比数据表3、表4可以看出,实现加工效率提高30%,设备有效加工时间比例提高到70%。

表3 改善前后效果对比

典型零件数控立车工序	单件加工时间 (min)		单件非切削时间 (min)		单件刀具费用 (元)	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
联动环	559.5	337	224.5	100	743.2	768.6
封严挡板	1409	624.5	547	277	4355	2873
焊接组件	476	222	221	52	757.7	683

表4 改进前后时间对比

	焊接组件		封严挡板		联动环	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
工装调整时间 (min)	59	10	80	8	60	22
工件找正时间 (min)	69	4	20	12	80	12
工件装夹时间 (min)		13	40	38		25
换刀及对刀时间 (min)	36	12	40	36	18	16
程序调整时间 (min)	18	3	88	31	16.5	5
测量时间 (min)	38	10	190	98	50	20
非切削时间 (min)	221	52	458	233	224.5	100
切削时间 (min)	255	170	951	613.5	335	237
总时间 (min)	476	222	1409	846.5	559.5	337
切削时间占总时间比例	47%	76.50%	60%	72.40%	50%	70.30%

五、结语

从实施前后的对比效果可见,数控机床的效率和潜能都大大提高,可以有效解决数控立车设备效能发挥不充分的共性问题。通过快速定位夹具、高效检测等多方面的应用研究,大大地提高了数控设备的利用率和生产效率,保证了数控加工的产品质量,降低了生产成本,缩短了加工周期,探索出的提高数控加工效能的实现模式,对于提高行业内从事数控加工经济效益,具有非常高的实用价值与推广意义。IM