

引文格式: 吕盾, 宋彦宏, 刘艺柱, 等. 速度、加速度及加加速度对 S 形缘条加工时间的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 96-102.
LÜ Dun, SONG Yanhong, LIU Yizhu, et al. Influence of feed velocity, acceleration and jerk on processing time of S-shaped fillet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 96-102.

速度、加速度及加加速度对 S 形缘条加工时间的影响*

吕盾¹, 宋彦宏¹, 刘艺柱², 王大伟³, 赵万华¹

- (1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054;
2. 天津中德应用技术大学, 天津 300350;
3. 科德数控股份有限公司数控应用所, 大连 116000)

[摘要] 在航空结构件的加工中, 除进给速度外, 进给加速度和加加速度同样对加工效率具有重要影响。以 S 形试件 S 形缘条精加工为例, 采用科德 GNC61 数控系统研究了进给速度、加速度及加加速度对加工时间的影响规律, 分析了提高速度、加速度及加加速度对机床误差及 S 形试件加工误差可能产生的影响。结果表明, 速度、加速度及加加速度的提高有效降低了 S 形缘条的加工时间, 进给速度由 1000mm/min 提高到 5000mm/min, 加速度进一步由 0.1m/s² 提高到 1.0m/s², 加速度建立时间进一步由 200ms 缩短到 20ms, S 形缘条的加工时间分别缩短 24.20%、25.38% 和 41.84%。提高速度、加速度及加加速度造成的问题是指令频宽增宽及激励成分增多, 使得机床跟随误差及联动轨迹误差的控制难度增大, 并易于激起机床机械结构振动。

关键词: S 形试件; 加工时间; 进给速度; 进给加速度; 进给加加速度

Influence of Feed Velocity, Acceleration and Jerk on Processing Time of S-Shaped Fillet

LÜ Dun¹, SONG Yanhong¹, LIU Yizhu², WANG Dawei³, ZHAO Wanhua¹

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;
2. Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;
3. Numerical Control Application Institute, Kede Numerical Control Co., Ltd., Dalian 116000, China)

[ABSTRACT] In the processing of aerospace structural parts, in addition to the feed velocity, the feed acceleration and jerk also have an important influence on the processing time. Taking the finishing process of the S-shaped fillet of the S-shaped test piece as an example, the influence of the feed velocity, acceleration and jerk on the processing time was studied using the Kede GNC61 CNC system. The possible effects of increasing velocity, acceleration and jerk on machine tool errors and S-shaped machining errors are analyzed. The results show that the increase of velocity, acceleration and jerk effectively reduces the processing time of S-shaped fillet. The feed velocity is increased from 1000mm/min to 5000mm/min, the acceleration is increased from 0.1m/s² to 1.0m/s², the acceleration establishment time is shortened from 200ms to 20ms, and the processing time of the S-shaped fillet is shortened by 24.20%, 25.38% and 41.84%. The problems caused by increasing speed, acceleration and jerk are increased setpoints bandwidth and increased excitation components. This makes it more difficult to control the tracking error and trajectory error of the machine tool, and it is easy to excite the vibration of the machine tool mechanical structure.

Keywords: S-shaped test piece; Processing time; Feed velocity; Feed acceleration; Jerk

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.09.096

* 基金项目: 国家自然科学基金(51775421); 天津市企业科技特派员项目(19JCTPJC42500)。

随着“中国制造 2025”国家战略及“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项等项目的实施,我国在高档数控机床研制方面取得了很多重大进展,解决了高速、高精、多轴联动等高档数控机床“从无到有”的问题。如何实现“从有到强”,提升高档数控机床的性能,已成为下一步亟须解决的主要问题。当前,实现加工精度与加工效率的统一,即在保证加工精度的前提下提升加工效率,是国产数控机床需要提升的主要性能之一^[1]。

提高加工中的进给速度是缩短加工时间、提高加工效率的重要手段之一。在数控机床的研制和购置中,一般会根据国家/国际标准要求关注快移速度、进给速度等技术指标。除了进给速度外,进给加速度和加加速度同样是影响加工时间的重要技术指标。然而,长期以来,加速度和加加速度指标未能得到广泛地关注。例如,S形试件国际标准规定了1000mm/min、2000mm/min、3000mm/min和5000mm/min 4种速度,单对加速度和加加速度未予明确规定。

提高进给速度、加速度及加加速度在缩短加工时间的同时,会对机床精度及零件加工精度产生不利影响。因此,当前国内在航空结构件加工中,往往设置较低的进给加速度及加加速度来保证加工精度。但是这样的方式既降低了加工效率,又造成了机床价值的浪费。

S形试件^[2]是对机床进行检验和验收的一个标准试件,已得到航空结构件加工行业的广泛认可和应用。本研究以S形试件S形缘条精加工为例,研究速度、加速度及加加速度对加工时间的影响,分析提高速度、加速度及加加速度可能对机床动态误差及S形缘条加工误差可能产生的不利影响,为实现加工精度与加工效率的统一提供依据。

1 S形试件S形缘条精加工时间的确定方法

根据国际标准ISO 10791—7标准^[3]中S形试件建模标准,建立S形试件的三维模型,如图1所示。

基于CAM软件,生成S形缘条精加工刀具路径。再通过后处理,生成科德KMC400五轴立式加工中心用G代码。生成的G代码为连续小线段格式,如图2所示。G代码中,G1表示以编程速度直线插补,G642表示打开高曲率微段样条拟合功能。

科德KMC400五轴立式加工中心的数控系统为科德GNC61,插补周期为1ms。G代码经插补后的指令可通过该数控系统的G237代码采集。具体方法为在要开始采集的G代码行段前插入G237 A47 D64 C2。其中G237表示开始数据采集,A47表示采集X、Y、Z、A和C轴的数据,D64表示采集插补生成的指令位置,C2表示采样周期为2ms。在要结束采集的G代码行段

后插入G238,可停止数据采集。数据采集完成后,科德GNC61数控系统将采集到的数据保存为txt格式文件,如图3所示。设开始数据采集时间为 T_s ,结束数据采集时间为 T_e ,S形缘条加工时间则为结束数据采集时间与开始数据采集时间之差。

2 速度、加速度及加速度建立时间设置方案

GNC61数控系统中,机床参数编辑器可设置多轴联动下的路径速度、加速度及加速度建立时间限制值,也可设置各个轴的速度、加速度及加速度建立时间的限制值。其中前者是指多轴联动下刀具轨迹上的参数值。后者对各个单轴进行限制,避免分配到各轴的参数超出电机的物理限制。

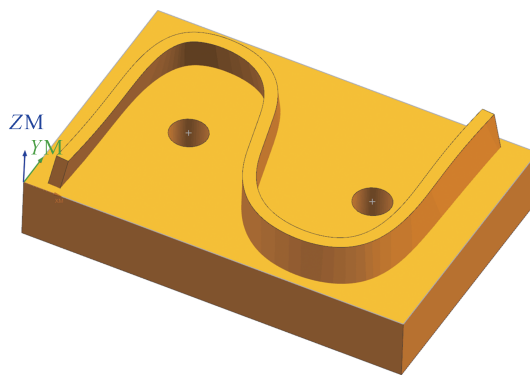


图1 S形试件三维模型

Fig.1 Three dimensional model of S-shaped test piece

```

N1 G40. G17 G90 G21 .....
N4 G642 .....
N7 G203 .....
N11 G1 X37.786 Y-1.104 Z10.256 F5000.
N12 G1 X37.534 Y-3.769 Z8.892 F5000.
N13 G1 X37.305 Y-3.241 Z7.587 F5000.
N14 G1 X37.103 Y-2.53 Z6.366 F5000.
.....
N21 G1 X36.73 Y5.971 Z1.954 C 260 F5000.
N23 G1 X37.147 Y12.716 Z2.028 A-11.703 C266.949 F5000.
N24 G1 X37.518 Y19.357 Z2.096 A-12.099 C267.277 F5000.
N25 G1 X37.851 Y26.064 Z2.158 A-12.463 C267.583 F5000.
N26 G1 X38.143 Y32.765 Z2.214 A-12.79 C267.863 F5000.
N27 G1 X38.392 Y39.465 Z2.262 A-13.074 C268.11 F5000.
N28 G1 X38.604 Y46.183 Z2.304 A-13.32 C268.326 F5000.
N29 G1 X38.773 Y52.804 Z2.337 A-13.515 C268.494 F5000.
N30 G1 X38.908 Y59.598 Z2.363 A-13.665 C268.61 F5000.
N31 G1 X39.009 Y66.288 Z2.378 A-13.76 C268.653 F5000.
N32 G1 X39.083 Y72.987 Z2.385 A-13.797 C268.602 F5000.
N33 G1 X39.14 Y79.77 Z2.38 A-13.771 C268.422 F5000.
.....
N446 G1 X9.242 Y.369 F5000.
N467 G1 X9.608 Y.034 F5000.
N468 G1 X9.989 Y-.283 Z1.96 F5000.
N469 G1 X10.797 Y-.861 Z1.954 F5000.
N470 G1 X11.221 Y-1.12 Z1.949 F5000.
N471 G1 X11.685 Y-1.373 Z1.943 F5000.
N472 G1 X12.105 Y-1.576 Z1.937 F5000.
N473 G1 X12.563 Y-1.771 Z1.93 F5000.
N474 G1 X13.03 Y-1.944 Z1.924 F5000.
N475 G1 X13.506 Y-2.094 Z1.918 F5000.
N476 G1 X14.477 Y-2.324 Z1.907 F5000.
N477 G1 X15.466 Y-2.46 Z1.901 F5000.
N478 G1 X18.85 Y-2.649 Z1.878 A-11.292 C268.867 F5000.
N479 G1 X22.232 Y-2.843 Z1.852 A-11.278 C267.731 F5000.
N480 G1 X25.614 Y-3.042 Z1.824 A-11.268 C266.593 F5000.
N482 G1 X27.035 Y-3.125 Z1.913 F5000.
N483 G1 X28.43 Y-3.208 Z2.205 F5000.
.....
N492 G1 X35.68 Y-3.636 Z11.739 F5000.
N493 G1 X39.563 Y-3.867 Z31.261 F5000.
.....
N497 M30
    
```

图2 S缘条精加工G代码

Fig.2 S-shaped fillet finishing G code

time \ source	运动子系统_通道[1]:调试_数据采集_X_4112	运动子系统_通道[1]:调试_数据采集_Y_4112	运动子系统_通道[1]:调试_数据采集_Z_4112	运动子系统_通道[1]:调试_数据采集_A_4112	运动子系统_通道[1]:调试_数据采集_C_4112
2020-7-9 19:2-49-388	36729.999838	5970.996609	-278045.999800	0.000000	260000.238333
2020-7-9 19:2-49-390	36730.000513	5971.008291	-278045.999909	-0.014385	260000.008542
2020-7-9 19:2-49-392	36730.001238	5971.020030	-278045.999780	-0.034753	260000.020635
2020-7-9 19:2-49-394	36730.001979	5971.032015	-278045.999649	-0.055548	260000.032983
2020-7-9 19:2-49-396	36730.002757	5971.044600	-278045.999511	-0.077384	260000.045949
2020-7-9 19:2-49-398	36730.003604	5971.058297	-278045.999360	-0.101148	260000.060606
2020-7-9 19:3-29-378	197211.352071	1630.631840	-277575.647481	-1.4032	688171.37410.540828
2020-7-9 19:3-29-380	197243.605826	1622.232066	-277575.147289	-1.4035	646203.37423.442330
2020-7-9 19:3-29-382	197275.859581	1613.832291	-277574.647097	-1.4038	604234.37436.343832
2020-7-9 19:3-29-384	197308.113335	1605.432516	-277574.146905	-1.4041	562266.37449.245334

图3 插补指令及数据采集时间

Fig.3 Interpolation instruction and data collection time

为研究速度、加速度及加加速度对加工时间的影响,设计路径速度、加速度及加加速度组合方案,如表 1 和 2 所示。将各个轴的速度、加速度及加加速度建立时间设置较高的限制值,避免各个轴的参数对联动下的路径参数产生约束。

路径速度通过修改 G 代码的 F 值来设置。考虑到 S 形试件标准中规定了 1000mm/min、2000mm/min、3000mm/min 和 5000mm/min 4 组速度值,同时为研究进一步提高路径速度对加工效率的影响,将路径速度分别设为 1000mm/min、2000mm/min、3000mm/min、5000mm/min 和 10000mm/min。

加速度通过调整数控系统机床参数编辑器中路径最大加速度参数来设置。当前,在现场加工中,为满足 S 形试件加工精度要求,加速度通常设置为 0.1m/s^2 左右的一个较低值。此外,为了避免高加速度对机床精度的影响,科德 GNC61 中 G642 的高速率微段样条拟合功能也会将加速度限制到 1m/s^2 以内(加速度建立时间设置为 200ms)。因此,将加速度在 $0.1\sim 1\text{m/s}^2$ 范围内设置了 0.1m/s^2 、 0.3m/s^2 、 0.5m/s^2 、 0.7m/s^2 和 1.0m/s^2 5 组参数。在上述路径速度和加速度下,加速度建立时间均设置为 200ms。

在路径速度为 5000mm/min、路径加速度为 1.0m/s^2 情况下,调整数控系统机床参数编辑器中路径加速度建立时间,将加速度建立时间分别设为 200ms、150ms、100ms、50ms 和 20ms。在现场加工中,为满足 S 形试件加工精度要求,加加速度建立时间通常设置为 400~200ms 的一个较长值。上述 5 组参数在现场参数的基础上逐渐提高,以研究提高加加速度对加工效率的影响。加速度建立时间与加加速度的关系如式(1)所示。

$$\int_0^T J dt \leq a_{\max} \quad (1)$$

$$J \leq \frac{a_{\max}}{T}$$

式中, T 为加速度建立时间; t 为时间; J 为加加速度; a_{\max} 为该情况下对应的最大加速度。

3 速度、加速度及加加速度对加工时间的影响

在设置加速度建立时间参数为 200ms 情况下,按照前文介绍的加工时间获取方法和进给速度、加速度设置方案,得到各个速度和加速度组合下的加工时间,如表 1 和图 4 所示。其中,表 1 中的加速度建立时间为 200ms,达到的最大加加速度为 10m/s^3 。

从图 4 中可以看出,随着速度的提高,加工时间逐渐减少。当速度从 1000mm/min 提升到 2000mm/min 时,在 5 组加速度参数限制下,其加工时间分别减少了

表 1 不同速度和加速度参数下加工时间
Table 1 Processing time under different velocity and acceleration parameters

速度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	加速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	加工时间 / s
1000	0.1	109.106
	0.3	102.414
	0.5	99.572
	0.7	97.850
	1.0	96.264
2000	0.1	86.750
	0.3	77.320
	0.5	73.390
	0.7	70.908
	1.0	68.412
3000	0.1	83.982
	0.3	73.668
	0.5	69.246
	0.7	66.550
	1.0	64.054
5000	0.1	82.698
	0.3	71.660
	0.5	67.070
	0.7	64.360
	1.0	61.706
10000	0.1	82.676
	0.3	71.278
	0.5	66.582
	0.7	63.680
	1.0	61.138

表 2 不同加速度建立时间对应加工时间 ($F=5000\text{mm/min}$, $a=1.0\text{m/s}^2$)

Table 2 Different acceleration establishment time corresponding to processing time ($F=5000\text{mm/min}$, $a=1.0\text{m/s}^2$)

加速度建立时间 / ms	加加速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)	加工时间 / s
200	10	61.706
150	13.33	57.408
100	20	51.670
50	40	43.288
20	100	35.890

22.356s、25.094s、26.182s、26.942s 和 27.852s,5 组数据平均加工时间减少了 25.685s; 当速度从 2000mm/min 提升到 3000mm/min 时,在 5 组加速度参数限制下,其加工时间分别减少了 2.768s、3.652s、4.144s、4.358s 和 4.358s,5 组数据平均加工时间减少了 3.856s; 同样的,在速度从 3000mm/min 提升到 5000mm/min 时,其加工时间分别减少了 1.284s、2.008s、2.176s、2.19s 和 2.348s,平均加工时间减少了 2.001s。由此说明,在速度相对较小时(<2000mm/min),提高速度可以明显降低加工时间,而当速度 >2000mm/min 时,提高速度对加工时间的减少作用不显著。

虽然当速度 >2000mm/min 时,提高速度对降低加工时间的作用不明显,但是提高加速度仍然可以显著减少加工时间。在速度相同的情况下,加速度从 0.1m/s^2 提升到 1.0m/s^2 ,加工时间随着加速度的提升均有所减少,当速度为 1000mm/min 时,由于加速度的提高使加工时间减少了 12.842s; 同样的,当速度为 2000mm/min 时,加工时间减少了 18.338s; 当速度为 3000mm/min 时,加工时间减少了 19.928s; 在速度为 5000mm/min 时,加工时间减少了 20.992s; 速度为 10000mm/min 时,加工时间减少了 21.538s。在速度为 1000mm/min 时,加工时间减少最少,在速度为 10000mm/min 时,加工时间减少最多,即呈现当速度越大时加速度的提升越能有效减少加工时间的规律。

当路径速度为 5000mm/min、加速度为 1.0m/s^2 时,第 2 节各个加速度建立时间设置方案的加工时间如表 2 和图 5 所示。

从图 5 中可以看出,随着加速度建立时间的逐渐减少,加工时间也逐渐减少。在进给速度为 5000mm/min,加速度为 1.0m/s^2 时,速度和加速度都已经较大,加工时间也已经大幅度缩短,而当加速度建立时间从 200ms 减少到 20ms 时,加工时间从 61.706s 减少到 35.890s,减少了 25.816s,减少了约 42%,加工效率提升明显。

当速度由 1000mm/min 提高到 5000mm/min 时,S 形缘条加工时间由 109.106s 缩短到 82.698s。当速度为 5000mm/min 时,加速度由 0.1m/s^2 提高到 1.0m/s^2 ,加工时间进一步由 82.698s 缩短到 61.706s。此时,进一步将加速度建立时间由 200ms 降低到 20ms,即加加速度由 10m/s^3 提高到 100m/s^3 ,加工时间缩短到 35.890s。综上所述,当速度由 1000mm/min 提高到 5000mm/min,加工时间缩短了 24.20%。此时进一步将加速度由 0.1m/s^2 提高到 1.0m/s^2 ,加工时间进一步缩短 25.38%。此时,将加加速度提高至 100m/s^3 ,加工时间进一步缩短 41.84%。提高速度、加速度和加加速度后,加工时间总体缩短 67.11%。

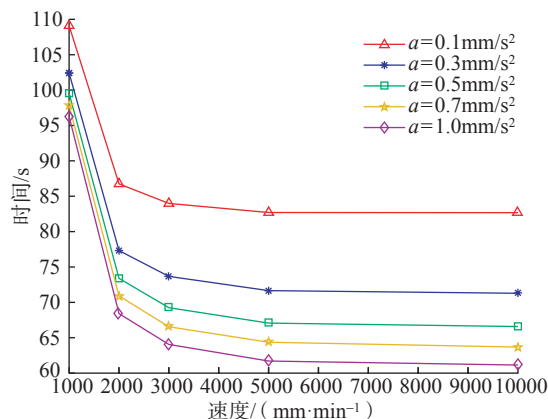


图4 不同速度、加速度参数情况下加工时间折线图
Fig.4 Line chart of processing time on different velocity and accelerations parameters

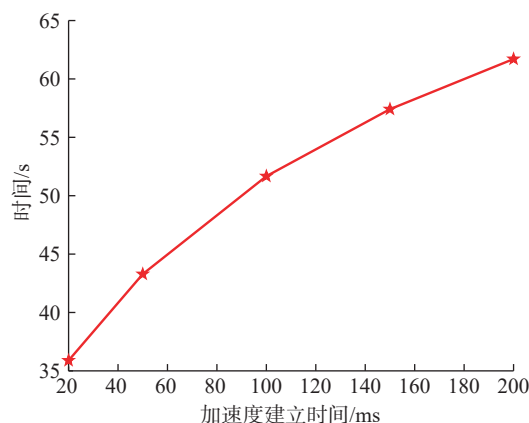


图5 不同加速度建立时间对应加工时间折线图 ($F=5000\text{mm/min}$, $a=1.0\text{m/s}^2$)

Fig.5 Line chart of processing time corresponding to different acceleration establishment time ($F=5000\text{mm/min}$, $a=1.0\text{m/s}^2$)

4 速度、加速度及加加速度提高对插补指令、机床精度及 S 形缘条加工精度的影响

设某 G 代码经过数控系统插补后,得到的指令位置序列为

$$x_k(i) \quad k = 1, 2, \dots, 5 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, x_k 为指令位置序列; k 为数控机床进给轴号; i 为采样点数。

按照式(3)对指令位置序列求差分,可依次得到指令速度序列,加速度序列和加加速度序列。

$$\begin{cases} v_k = \frac{\Delta x_k}{f_s} \\ a_k = \frac{\Delta v_k}{f_s} \\ j_k = \frac{\Delta a_k}{f_s} \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_k 为指令速度序列; a_k 为指令加速度序列; j_k 为指令加加速度序列; Δ 为差分符号; f_s 为采样周期。

数控机床联动合成的轨迹误差与机床的几何误差^[4-8]、各个轴的动态误差^[9]、热误差^[10-11]等因素有关。其中,各个轴的动态误差取决于输入各轴伺服进给系统的插补指令及各轴伺服进给系统自身的伺服特性。

指令速度(单位插补周期的指令位置)是各轴伺服进给系统的输入,指令速度频宽的大小直接决定了各轴跟随误差的大小。指令的频宽越宽,高频成分越多,伺服进给系统对指令高频部分的相位滞后和幅值衰减越严重,造成跟随误差越大^[12-14]。选取4组速度、加速度及加加速度建立时间的组合,如表3所示,对五轴的指令速度和指令加加速度进行傅里叶变换,分析指令频谱的变化,研究对机床动态误差可能造成的影响。

图6为五轴指令速度的频谱。可以看出,对于X、Y、

Z、A和C5个轴随着速度、加速度及加加速度的增加,各轴的指令高频成分均增多,指令频宽变宽。将指令中不再包含明显频率成分所对应的频率设为指令频宽,以X轴为例,a组、b组、c组和d组的指令频宽分别约为

表3 4组速度、加速度及加加速度建立时间的组合

Table 3 Four groups of velocity, acceleration and acceleration establishment time

组号	速度 / (mm·min ⁻¹)	加速度 / (m·s ⁻²)	加速度建立时间 / ms	加加速度 / (m·s ⁻³)	S形缘条加工时间 / s
a	1000	0.1	200	1	109.106
b	5000	0.1	200	1	82.698
c	5000	1.0	200	10	61.706
d	5000	1.0	20	100	35.890

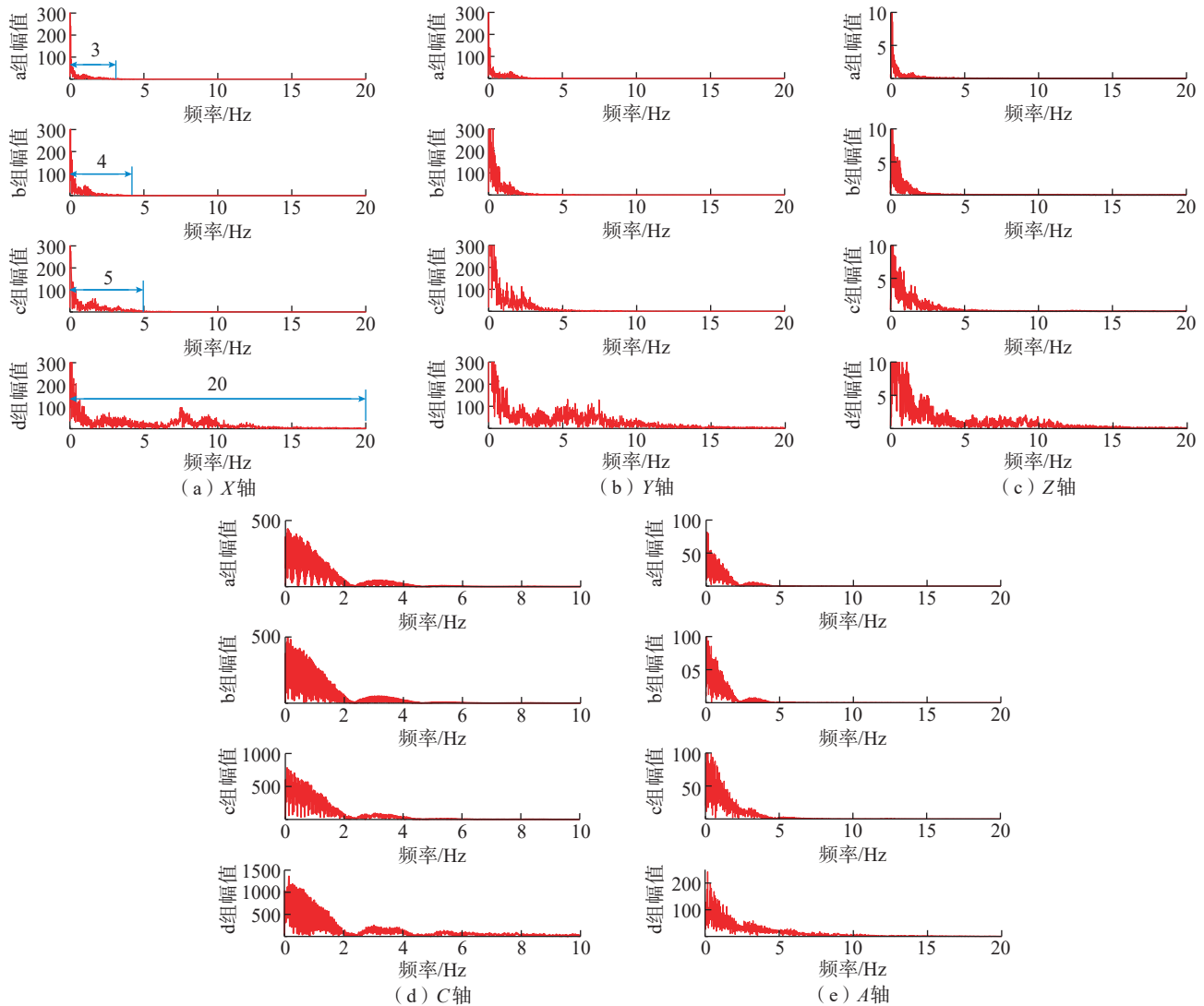


图6 X、Y、Z、A和C轴指令速度幅频图

Fig.6 Amplitude frequency diagram of axis X, Y, Z, A and C setpoints velocity

3Hz、4Hz、5Hz 和 20Hz。

当前,航空结构件加工数控机床各轴伺服进给系统在采用速度前馈及陷波滤波器策略下,位置环带宽能够达到 20~30Hz。就表 3 设置的 4 组参数而言,随着速度、加速度及加加速度的增加,G642 等高曲率微段样条拟合算法可将指令频宽控制到 20Hz 以内。由于指令频宽低于伺服进给系统位置环带宽,因此,各轴指令易于被各轴伺服进给系统响应,各轴跟随精度及合成的联动轨迹精度可以得到保证,不至于引起显著的 S 形缘条轮廓误差和厚度误差等。

从图 6 中可以看出,速度、加速度及加加速度的提高会造成指令频宽的增加。未来,在追求更高加工效率的情况下,随着速度、加速度及加加速度的进一步提高,指令频宽会进一步增加,超出伺服进给系统位置环带宽。此时,各轴跟随误差及联动合成轨迹误差会显著增加,造成 S 形缘条轮廓误差和厚度误差等。

指令加加速度是加速度的变化率,是一种动力学激励源。航空结构件加工数控机床的整机结构件及进给系统传动件存在若干低阶固有频率。当指令激励频率与机床固有频率重合时,会激起机床的机械振动^[15-18],

造成 S 形缘条加工表面呈现振纹等缺陷。对表 3 中 a 组和 d 组的指令加加速度序列进行快速傅里叶变换,如图 7 所示,可以看出, d 组相对于 a 组,加加速度中的指令频率幅值明显增大,这说明随着速度、加速度及加加速度的提高,指令中的激励频率增多,激起机械振动并引起 S 形缘条表面产生振纹的可能性增加。

综上所述,提高速度、加速度及加加速度可以显著缩短 S 形缘条的加工时间,从而大幅提升加工效率。然而,提高速度、加速度及加加速度会导致指令频宽的增加和激励频率的增多。指令频宽的增加会造成机床各轴跟随误差和合成联动轨迹误差控制难度的增大, S 形缘条易于出现轮廓误差和厚度误差等缺陷。激励频率的增多易于激起机床机械振动,造成 S 形缘条表面出现振纹等缺陷。

S 形试件的设计初衷是检验机床动态误差(包括跟随误差及振动等)对加工精度的影响^[3]。但是,由于上述原因,在 S 形试件实际使用中,速度、加速度及加加速度往往设置较低,以满足机床验收与交付要求。过低的速度、加速度及加加速度下,指令频宽低、指令激励频率少,无法暴露机床的动态误差,检测结果仅能反映几何

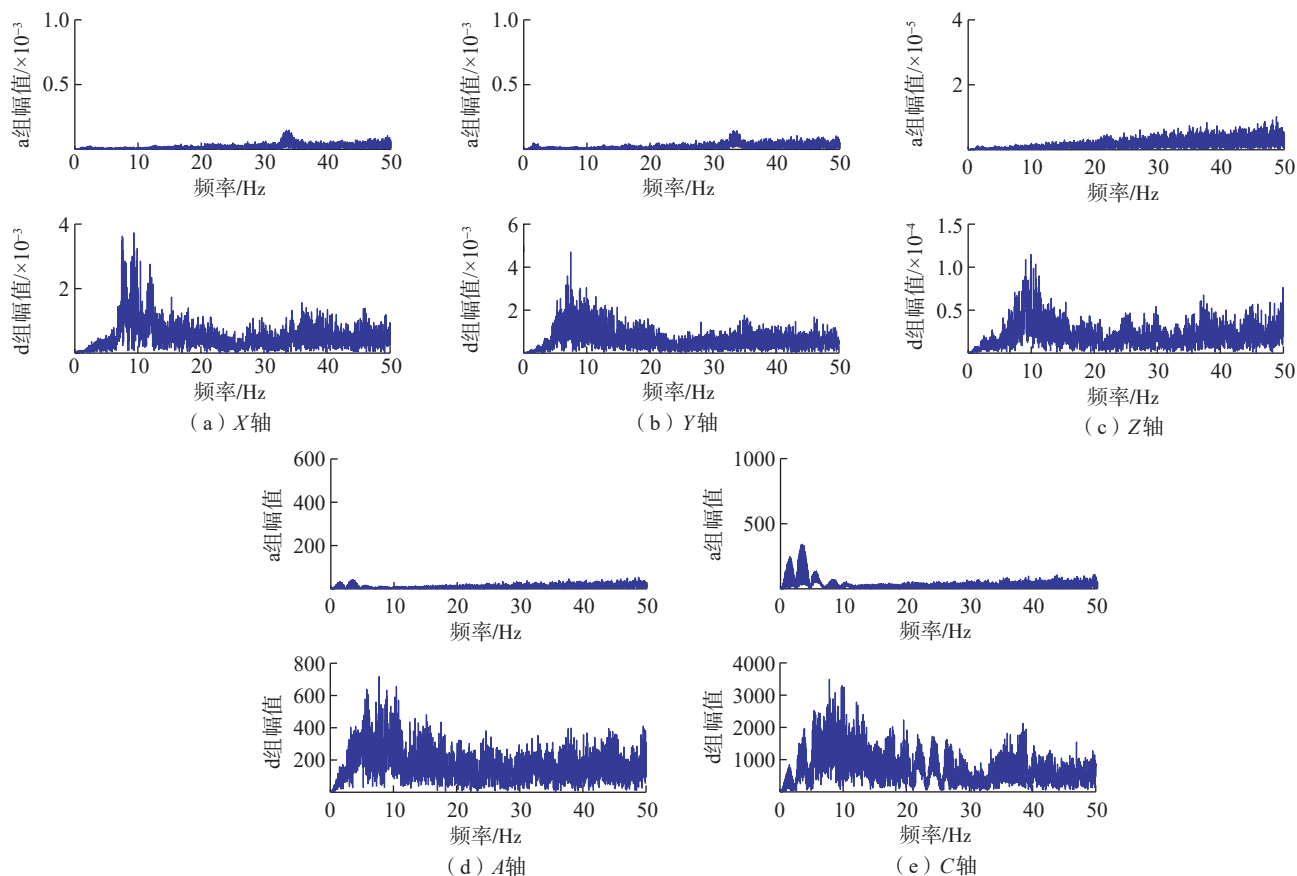


图7 X、Y、Z、A和C轴指令加加速度幅频图

Fig.7 Amplitude frequency diagram of axis X, Y, Z, A and C setpoints jerk

误差等静态 / 准静态误差的影响。未来在 S 形试件标准中可进一步将 S 形缘条精加工时间设为检验指标,以充分检验机床在高速、高加速及高加加速度下对动态误差的控制能力,评估机床动态误差影响及 S 形缘条加工精度约束下能达到的加工效率。

5 结论

(1) 对于 S 形缘条加工,当速度 $<2000\text{mm}/\text{min}$ 时,提高速度可以显著缩短加工时间;当速度 $>2000\text{mm}/\text{min}$ 时,提高速度对缩短加工时间的作用不明显,为缩短加工时间,需要提高加速度及加加速度。

(2) 进给速度由 $1000\text{mm}/\text{min}$ 提高到 $5000\text{mm}/\text{min}$,加速度进一步由 $0.1\text{m}/\text{s}^2$ 提高到 $1.0\text{m}/\text{s}^2$,加速度建立时间进一步由 200ms 缩短到 20ms , S 形缘条的加工时间分别缩短 24.20%、25.38% 和 41.84%。

(3) 提高速度、加速度及加加速度,指令的频宽增大,数控机床各轴跟随误差及合成联动轨迹误差的控制难度增大, S 形缘条的轮廓、厚度等误差的控制难度增大。

(4) 提高速度、加速度及加加速度,指令中的激励成分增多,易于激起机床机械结构的振动, S 形缘条产生振纹等质量缺陷的可能性增大。

(5) S 形试件标准可进一步将 S 形缘条加工时间设为检验指标,以暴露机床的动态误差,评估机床动态误差影响及 S 形缘条加工精度约束下能达到的加工效率。

参考文献

[1] 赵万华, 张星, 吕盾, 等. 国产数控机床的技术现状与对策[J]. 航空制造技术, 2016, 59(9): 16–22.

ZHAO Wanhua, ZHANG Xing, LÜ Dun, et al. Technical status and strategies for domestic CNC machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 16–22.

[2] International Organization for Standardization. ISO 10791-7:2020 Test conditions for machining centres—Part 7: Accuracy of finished test pieces[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.

[3] 边志远, 丁杰雄, 赵旭东, 等. 基于“S”件的五轴数控机床加工性能综合评价方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 86–89.

BIAN Zhiyuan, DING Jiexiong, ZHAO Xudong, et al. Research on comprehensive evaluation of processing properties for five-axis CNC machine tool based on the “S”-shaped test piece[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(2): 86–89.

[4] 项四通. 五轴数控机床空间误差测量、建模与补偿技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

XIANG Sitong. Volumetric error measuring, modeling and compensation technique for five-axis machine tools[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[5] 熊成. 机床旋转轴几何误差测量与补偿技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

XIONG Cheng. Research on geometric error measurement and compensation technology of rotary axis[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[6] ZHU S W, DING G F, QIN S F, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24–29.

[7] IBARAKI S, KNAPP W. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools: A review[J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(2): 110–124.

[8] FU G Q, FU J Z, XU Y T, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: Geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 170–181.

[9] 赵万华, 张俊, 刘辉, 等. 数控机床精度评价新方法[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 93–98.

ZHAO Wanhua, ZHANG Jun, LIU Hui, et al. New evaluation method on the precision of NC machine tools[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 93–98.

[10] 陈晨, 马术文, 丁国富. 五轴数控机床综合热误差建模与空间解耦补偿[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(10): 1–4, 9.

CHEN Chen, MA Shuwen, DING Guofu. Synthesis thermal error modeling and space decoupling compensation for a five-axis CNC machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(10): 1–4, 9.

[11] VENUGOPAL R, BARASH M, SHAW M C. Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools[J]. CIRP Annals, 1986, 35(1): 255–258.

[12] SENCER B, DUMANLI A. Optimal control of flexible drives with load side feedback[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 357–360.

[13] ERKORKMAZ K, KAMALZADEH A. High bandwidth control of ball screw drives[J]. CIRP Annals, 2006, 55(1): 393–398.

[14] LIU H, ZHANG J, ZHAO W H. An intelligent non-collocated control strategy for ball-screw feed drives with dynamic variations[J]. Engineering, 2017, 3(5): 641–647.

[15] ANSOATEGUI I, CAMPA F J, LÓPEZ C, et al. Influence of the machine tool compliance on the dynamic performance of the servo drives[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9–12): 2849–2861.

[16] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design. Part I: Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(9): 1323–1345.

[17] DONG J Y, FERREIRA P M, STORI J A. Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(12–13): 1941–1955.

[18] NAM S H, YANG M Y. A study on a generalized parametric interpolator with real-time jerk-limited acceleration[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(1): 27–36.

通讯作者: 吕盾, 副教授, 主要研究方向为数控机床动态精度。

(责编 古京)