



S 试件加工剖析

中捷机床有限公司 (辽宁 110043) 高长才

S试件用于检验五轴联动数控铣床综合加工精度。该试件看似简单，只是一个S形的曲线，但实际上这个曲线却非常巧妙地将航空零件的若干加工特征集成了起来，所有的加工特征集成在了这个S形的工件上面。目前该样件基本已经被国内的航空厂商所采用，用于检验五轴联动机床的加工性能，特别是国外知名机床厂商也曾多次被该样件难倒。只要五轴机床能够加工合格的S试件，那么该五轴机床就完全可以安全用于加工航空零件，特别是加工一些复杂型面的薄壁零件。因此，S试件可以作为用于检验五轴联动机床（见图1、图2）的检验标

准，对于提升国内五轴机床性能以及对于航空和发电装备零件的加工意义非常重大。

加工分析

合格S件（见图3）的验收要求一般包括四个方面：①外形轮廓尺寸要求，公差为 $\pm 0.05\text{mm}$ （对于铝材料零件来讲，该公差较严格，这里面包含了零件的变形因素）。②S件壁厚要求，厚度为 3mm ，公差要求 $\pm 0.1\text{mm}$ 。③曲面表面粗糙度值要求，为 $R_a=3.2\mu\text{m}$ 。④零件加工效率要求，这一点视机床而定，如果是主轴转速超过 $24\,000\text{r/min}$ 的高速机床一般要求为 15min ，如果主轴转速在 $8\,000\sim 24\,000\text{r/min}$ 的机床一般要求为 25min ，主轴转速小于 $8\,000\text{r/min}$ 的机床一般要求 40min 。这四点要求，一般的五轴机床很难达到，因为这四点要求需要考核的是一个五轴数控机床的所有坐标轴的综合精度与综合性能的匹配特性，而国内对于五轴联动精度的检测仍然存在难点。

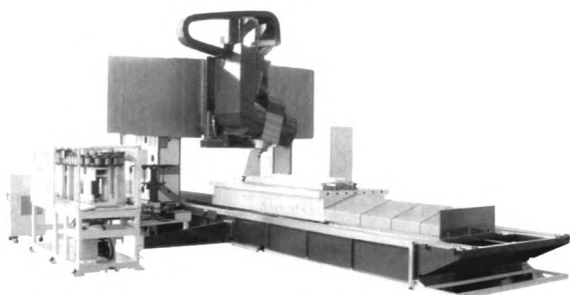


图1 GMC1230U五轴联动加工中心

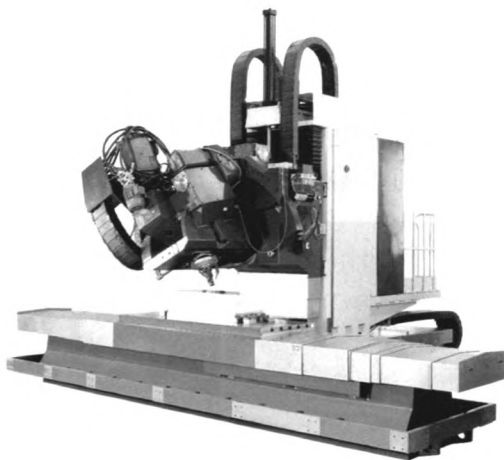


图2 VMC25100U五轴联动加工中心

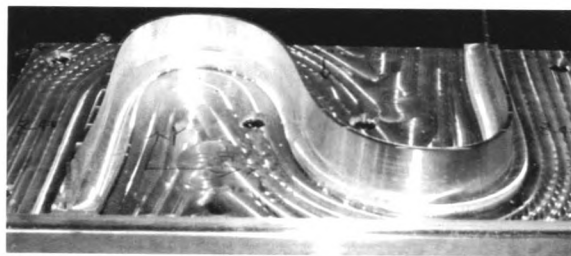


图3 加工后的S件

其实，一个合格的S件需要通过两个范畴的关键的内容：首先是如何加工出合格的S试件，其次是如何检验出合格的S试件。

对于S件的加工，需要对零件的材料、工艺、刀具进行正确的选择。按照传统的工艺方法，由一块毛坯经过粗铣、半精、精铣加工完成。其中



精铣主要体现加工性能的关键环节，在这个环节零件最终被加工为壁厚为3mm、高度为40mm的薄壁型S件。而一般的材料很难加工出这种特征。这种零件一般是由航空铝合金材料加工而成。这种材料必须是已经消除内应力的预拉伸板材，这一点非常关键。普通的铝材很容易造成热变形、刀具排屑困难、表面质量差等问题。因此，专用的材料成为加工出合格S试件的首要条件（见图4、图5）。

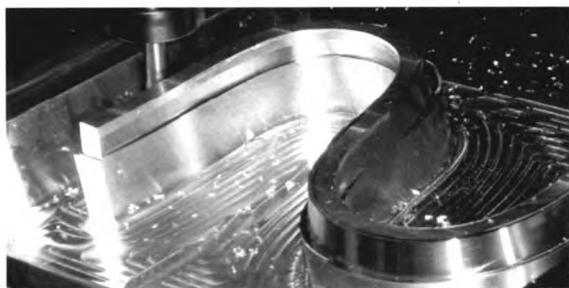


图4 航空铝材加工表面（光亮）

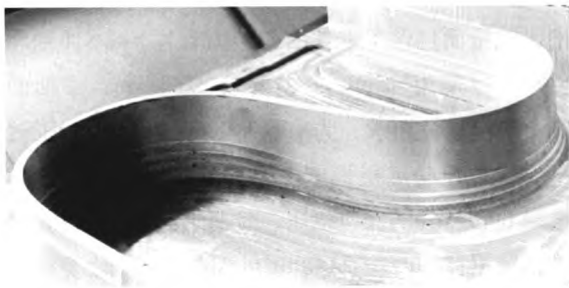


图5 普通铝材加工表面（粗糙）

工艺规划

具备了良好的材料和工具的条件下，需要对零件的工艺程序进行准确的规划，因为这种程序轨迹的规划影响到加工效率、表面粗糙度和轮廓尺寸精度（见图6）。特别是这种薄壁零件，在进行最后3mm的加工时很容易引起颤振，一旦发生振动，那么整个零件的加工将会彻底失败。因此在进行最终的精加工时，尽量采用多余量精加工的方式，例如精加工余量3mm。在进行轨迹规划的时候，由于S件是一个空间的曲面，那么轮廓尺寸也就是由空间曲面上的点构成，从加工的角度需要对三维模型进行分析。这个模型在曲面构成上，接近于直纹面，这种直纹面的加工结合航空零件的加工工艺，会采用端面立铣刀的侧刃进行加工，那么这个铣刀的侧刃必须时刻保持与曲面的相切。这种相切的状态，会时刻让刀具的轴线发生摆动，这种摆动角度以及

插补点精度的高低就影响到了实际的加工零件与理论模型的一致性，也就影响了零件加工最终的精度。

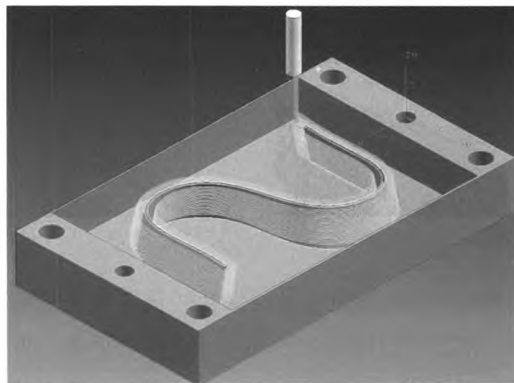


图6 程序轨迹

精良的五轴加工中心

准确的程序轨迹、合理的工艺是加工合格零件的前提，那么具备良好精度的五轴机床就是加工精度合格与否的关键因素。中捷机床经过近8年的努力与实践经验，当前已经完全掌握了五轴联动精度的检测与性能优化方法。同时对于S试件的加工，中捷机床先后进行了近7年的研究，先后向航空企业提供了几十台五轴机床，特别是通过“十一五”重大科技专项的实施（重大专项的验收中关键的一项就是加工出合格S件），针对S件的加工应用进行了更加深入的研究与分析，完全掌握了S件的加工要领。并通过该零件的加工，能够很好地诊断机床存在的不足，并进行针对性的调试和优化，提升五轴机床的动态特性、联动特性和加工特性等。五轴机床的最终精度与整机的几何精度、定位精度、插补精度密不可分。其中两个回转轴的几何精度和定位精度更加关键，回转轴的 0.005° 的误差，按照摆长计算到刀具的刀尖，产生的误差就可能达到0.05mm。因此要达到高的联动精度，必须对回转轴进行分度的精确测量和补偿（见图7）。最终五

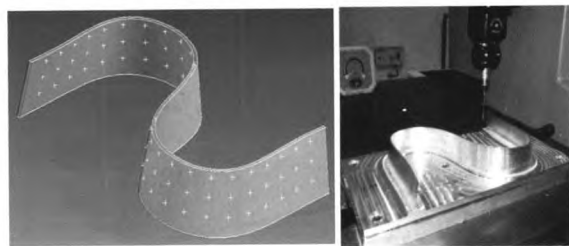


图7 三维模型的轮廓测量点

轴联动的精度在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内，可以勉强保证S件精度的合格。其中所测量的75个点中，就有可能存在1~2个点超出公差范围。中捷机床所提供的五轴机床联动精度可以保证在 $\pm 0.01\text{mm}$ 左右。

即使五轴联动的精度能够满足在合格的范围内，但是S试件的加工精度还是有超差的可能，那就是尺寸精度或表面粗糙度超差。如图8和图9所示。

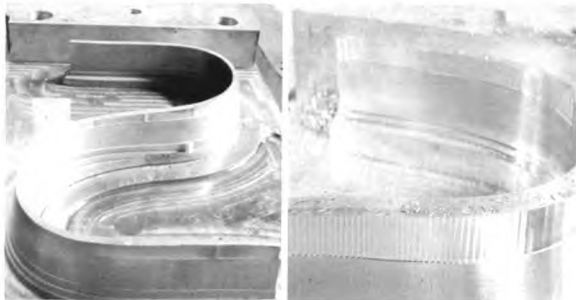


图8 试件拐角处过切 图9 试件拐角处振纹

造成上述后果的直接原因归结为五轴机床联动特性的不佳。这一点，在一般的样件加工过程中是体现不出来的，通过S试件的加工恰恰可以把五轴机床的问题暴露出来，当然这种问题也存在较大的调试难度。三轴样件的加工可以检验五轴机床的三轴精度，五D圆台可以检验五轴联动封闭式加工的联动特性，而这种开式加工的联动特性只有通过S件的加工才能得到验证。这里面与五轴机床的关键功能部件回转轴关系密切，如果回转轴的传动刚性不足，那么就会产生上述存在的问题。而回转轴的传动刚性又是辩证存在的。航空企业一般采用的五轴机床大多是双摆头的结构（见图10、图11），这种结构由于空间上的限制，很难做到大的传动刚性和狭小空间的统一。有些力矩电动机驱动的回转轴可以通过增加电气控制的增益值来提供传动刚性，但是这种增益值的提升势必造成传动的不稳定，容易引起振动问题。而机械结构的双摆头为了达到高的传动刚性需要对传动环节预紧，这样又加大了磨损



图10 A(B)C结构双摆头

图11 AB摆双摆头

导致热量的产生，因此如何保证二者良好的统一需要进行长期的积累和调试。中捷机床有限公司曾先后对A(B)C双摆头的五轴头、AB双摆头的五轴进行了长期的调试积累，总结出一条切实可行的调试方法，并取得了良好的效果。

轮廓精度检测

经过上述环节以后，我们就能够加工出效果较好的试件，如何对该试件的精度进行评估，而最关键的就是轮廓精度的检测。在这里，一般采用的方法是在三维模型中抽取大概75个点，将这些点输入到三坐标测量机，但往往得出的结果却是精度超差。这也是要强调的另一个范畴：如何检验出合格的S试件。由于S试件是复杂的空间曲面，每个点都包含三维坐标值以及三个空间矢量，这三个矢量的方向就决定了三坐标测量时测头的移动方向。如果该矢量出现偏差，那么即使加工样件的精度是合格的，那么检验出的结果仍然是超出误差范围。同时加工后的工件的三维坐标系的建立仍然容易被忽略，工件加工后不能够正确地加工出辅助检测基准。在进行三坐标测量时，测量机不能根据正确的辅助基准来建立检验坐标系，那么检验模型与三维数学模型将产生偏差，这种偏差有可能是平移，也有可能是角度回转，但任何一种错误都会导致最终检测结果超出误差范围。因此如何保证检验模型与三维模型坐标系的统一是加工出合格的S试件的另一个不被重视的关键要素。

结语

中捷机床有限公司在承担“十一五”重大专项的过程中，充分利用专项所提供的便利条件及资金支持，保证了中捷现有的五轴数控机床进行系统的全面的研究，特别是S试件的加工应用。在与成飞、昌飞的合作中，得到了两家合作单位的大力支持，特别是成飞在具体的工艺指导方面给出了非常宝贵的意见，为中捷S件的成功突破创造了优异的条件。中捷机床掌握的五轴联动控制技术，以及为客户提供的卓越性能的五轴机床，为中国航空事业提供全面的解决方案奠定了坚实的基础。MW

（收稿日期：20130821）