提高龙门加工中心模具加工性能研究

■ 中捷机床有限公司　（辽宁沈阳　110142）　严昊明　任瑞明

摘要：分析影响机床的模具加工性能的因素，通过大量的加工测试工作，采取提高机床的机械精度、优化数控系统参数、改善模具加工外部条件以及建立正确的机床使用保养习惯等措施，较大幅度地提高了机床的模具加工性能。

模具是工业生产中极为重要而不可或缺的特殊基础工艺装备，被广泛应用于机械、电子、汽车、信息、航空、航天及军工制造等领域，市场需求量十分巨大。随着科学技术的发展和社会的进步，模具的形状越来越复杂，对其精度和表面质量的要求也在不断提高，这对作为模具加工母机的数控机床也提出了更高的要求。各大机床企业对于模具加工机床这块市场都十分重视，纷纷加大力度提高模具加工机床的研发制造水平，开展提高机床模具加工性能的相关研究，加大产品的营销力度，这使得该领域的竞争日趋激烈。

中捷机床有限公司作为国内大中型高端数控机床的重要制造商，也加入到这场激烈的竞争中，并凭借着自身雄厚的技术制造实力，在2014年初成功研发出全新的高速度台式龙门加工中心。该产品是通过对中捷已有机床优缺点的分析、对该领域市场需求的调研和对主要竞争对手产品的分析后研发而来的，具有轻量化、高刚性、主轴传动损耗小、主轴高转速可持续性好、热稳定性好及能耗小等诸多优点，是一款性价比很高的中大型模具加工产品。在产品成功推向市场后，中捷机床有限公司广泛吸纳市场反馈的意见和建议，积极开展产品的提高改进工作，重点开展提高产品模具加工性能的研究，持续开展各类模具的加工试验。通过大量的加工测试工作，我们发现影响机床模具加工性能的因素有很多，通过采取提高机床的机械精度、优化数控系统参数、改善模具加工外部条件以及建立正确的机床使用保养习惯等措施，可以较大幅度地提高机床的模具加工性能。下面对我们所做的工作予以介绍，希望对其他同类型机床模具加工性能的提高具有参考价值。

1. 提高机床的机械精度

优良的机械精度是保障机床能够加工出高品质工件的基本前提条件。模具加工类机床作为机床领域的高端产品，以加工复杂曲面为主，在加工过程中各进给轴频繁地进行插补联动和换向，这要求机床具有良好的动态性能，因此对机床的机械精度提出了更高的要求。

影响机床机械精度的因素较多，其中主要包括机械部件刚性、机械部件加工精度以及装配工艺等几个方面。我们通过对机械结构的优化和对床身铸件的严格品控，提高了产品的机械部件刚性；通过改进加工工艺，提高了床身部件的加工精度；通过改进装配工艺，建立标准化的装配操作流程，降低了部件装配的难度，提高了装配的合理性和标准化水平。这使得该新型产品的机械精度得到了较大的提高。

模具产品由于其特殊的工艺需求，对于工件表面加工质量的要求很高。通过加工试验发现，进给轴反向间隙的精度水平对于模具表面加工质量的影响最为明显，如果该项精度控制不好，在工件表面进给轴发生换向的位置

会出现一道比较明显的隆起或凹陷。因此我们将增大进给轴反向间隙作为提高模具类加工机床机械精度的重点，并且通过装配环节的改进来实现。

龙门加工中心的进给轴为*X*、*Y*和*Z*三个轴，其中*X*、*Y*两个轴为水平轴，*Z*轴为垂直重力轴。水平轴反向间隙的调整方法相对容易，通过适度增加丝杠的预紧力可以提高反向间隙的精度水平，通过多次试验得出增加4%～6%的丝杠预紧力提升效果比较明显，同时电流值处于较为合理的范围，*X*轴部分测试数据如附表所示，*Y*、*Z*轴数据与*X*轴类似。

垂直重力轴的反向间隙调整要复杂一些，除了提高丝杠预紧力外，还要考虑到液压支撑机构和导轨镶条的影响。液压支撑机构的压力调整到规定值后，保证轴运动时电动机电流平稳即可，若不平稳要对液压管路进行检查，并对压力值适当进行调整。导轨镶条主要起到收紧导轨的作用，通过配刮验点保证导轨各个方向安装的镶条受力均匀即可。通过上述调整，可以实现该型机床水平轴0.005mm以内和垂直重力轴0.015mm以内的反向间隙水平，相较之前的0.01mm和0.03mm大幅提高。

2. 优化数控系统参数

在保证良好机械精度的前提下，通过对数控系统参数的优化设定，能够较大幅度地提高机床的加工性能。我们使用系统自带优化软件和雷尼绍球杆仪作为参数优化设定的工具，对该新型机床开展了大量的优化测试工作，并总结出一套较为有效的系统参数设定方法。下面以西门子系统为例，对主要几类系统参数进行说明。

（1）速度环参数。速度环增益和积分时间的调整主要对电动机运动过程起作用。速度环增益的大小影响电动机响应速度的快慢，速度环积分时间的大小影响电动机工作的稳定性。理论上，在不产生振荡的情况下应尽量提高速度环增益，在不影响稳定性的情况下应尽量减小速度环积分时间，以达到电动机平稳高效的输出。

使用西门子系统自带优化工具对速度环进行优化，对多组不同的速度环比例增益和积分时间进行了测试，通过测试发现，当速度环增益系数P1460提高到默认值2倍、积分时间P1462增大到默认值1.5倍左右时，速度环带宽较宽，跃冲较为合理，系统稳定性较强。虽然通过增加滤波器功能可以继续提高增益系数值，扩展速度环带宽，但这要求机械部件具有极强的稳定性，否则一旦机械特性发生变化，电动机输出就会产生振荡，因此不建议使用滤波器。另外，通过球杆仪测试发现，适度提高速度环增益对减小反向跃冲有一定帮助。

（2）位置环参数。当伺服电动机工作在位置环方式时，位置环增益起作用。伺服电动机在位置环方式下运动时，提高位置环增益能够减小跟随误差；当伺服电动机在位置环方式下停止时，提高位置环增益能够增加伺服电动机的锁定刚性。位置环增益的调整方法比较简单，直接提高位置环增益直至产生系统振荡，然后再逐步回调，直至系统恢复稳定即可。

通过测试发现，位置环增益系数的调整与机械传动刚性和运动惯量大小直接相关。机械传动刚性越好，位置环增益可设值越高；运动惯量越小，位置环增益可设值越高。因此，在保证传动刚性的前提下，运动部件质量越小，机床运动特性越好。另外，光栅尺等直接测量装置对于位置环增益的调整有一定影响，配置光栅尺的机床位置环增益可设定范围要减小。该参数在设定时，要保证各进给轴该参数设定值一致，否则会出现插补不匹配的情况。

（3）加加速功能参数。加加

*X*轴部分测试数据

1号机床测试数据			2号机床测试数据			3号机床测试数据		
预紧力变化率	间隙值/mm	电流值/A	预紧力变化率	间隙值/mm	电流值/A	预紧力变化率	间隙值/mm	电流值/A
正常值	0.009	3.1	正常值	0.010	3.0	正常值	0.009	3.1
+1%	0.008	3.1	+1%	0.009	3.0	+1%	0.009	3.1
+2%	0.007	3.2	+2%	0.008	3.1	+2%	0.007	3.2
+3%	0.005	3.3	+3%	0.006	3.1	+3%	0.006	3.2
+4%	0.004	3.3	+4%	0.005	3.2	+4%	0.005	3.3
+5%	0.003	3.4	+5%	0.005	3.2	+5%	0.005	3.3
+6%	0.003	3.5	+6%	0.004	3.3	+6%	0.004	3.4
+7%	0.003	3.7	+7%	0.004	3.4	+7%	0.004	3.5
+8%	0.003	3.9	+8%	0.004	3.6	+8%	0.004	3.7

速功能参数在不同数控系统中定义的名称有所不同，但控制机理基本是一样的，即在电动机加减速阶段产生S形斜坡，以使加减速过程更加平稳。加加速功能在西门子系统中被叫做轴冲击限制功能，下面对该功能包含的主要参数进行说明。

32400——轴冲击限制功能激活。该参数设为1时，轴冲击限制功能激活，系统会按照轴冲击限制值设定的强度对轴的启停或换向等动作进行控制，同时降低位置环增益的实际计算值。位置环增益实际计算值的减小虽然明显地起到了平稳启停和换向的作用，但也大幅度降低了轴的运动刚性，跟随误差变大，机床加工效率也明显降低，因此不建议激活该功能。另外，设定该参数时要保证各进给轴一致，否则会出现插补不匹配的情况。

32402——轴冲击限制模式。该参数设为1，代表2阶过滤器生效；设为2，代表平均移动过滤器生效；设为3，代表带阻过滤器生效。根据西门子的推荐和实际测试效果，该参数设为2即生效，平均移动过滤器对轴的运动控制效果最为理想。

32410——轴冲击限制过滤器时间常数。该参数设定的是轴冲击限制滤波器作用的时间，该参数和轴冲击限制值最大值共同发挥作用。在测试时发现，当轴冲击限制最大值为标准值时，将该参数设定超过0.01s时，轴冲击过滤器开始起作用；超过0.05s时，对轴的运行控制会起到负面效果。因此根据轴的不同运动特性，建议该参数在0.01～0.05s范围内进行调整，调整原则是在保证控制效果的前提下尽量设较小的数值。

32420——手动和位置模式下的轴冲击限制功能激活。该参数设为1时，手动和位置模式下的轴冲击过滤器功能激活。通过测试，该功能激活时，对于手轮和手动控制时轴运动的平稳性有很好效果，建议激活该功能。

32430——手动和位置模式下的轴冲击限制最大值。该参数设定的是手动和位置模式下的轴冲击限制强度，该参数和轴冲击限制过滤器时间常数共同发挥作用。该参数数值越小，轴冲击过滤强度越大，反之数值越大，轴冲击过滤强度越小。通过测试，该参数设定在20左右时效果较好。

32431——路径移动中的轴冲击限制最大值。该参数设定的是路径移动中的轴冲击限制强度，该参数和轴冲击限制过滤器时间常数共同发挥作用。该参数数值越小，轴冲击过滤强度越大，反之数值越大，轴冲击过滤强度越小。通过测试，该参数设定在20左右时效果较好。

32432——持续路径模式下的轴冲击限制值。该参数设定的是持续路径模式下的轴冲击限制强度，该参数和轴冲击限制过滤器时间常数共同发挥作用。该参数数值越小，轴冲击过滤强度越大，反之数值越大，轴冲击过滤强度越小。通过测试，该参数设定在20左右时效果较好。

20150[20]——soft功能设定参数。该参数设为1时，soft功能需在程序段中输入指令开启；设为2时，soft功能自动开启。该功能对于提高轴高速运动中的稳定性有较大帮助，建议设为自动开启方式。

（4）前馈控制功能参数。前馈控制是一种预测控制，通过对系统当前工作状态的了解，预测出下一阶段系统的运行状况。如果与参考值有偏差，那么就提前给出控制信号，使干扰获得补偿，稳定输出，消除误差。但在实际工作过程中，并不是所有的干扰都是可测的，并不是所有的对象都是可得到精确模型的，而且大多数控制对象在运行的同时自身的结构也在发生变化。所以仅用前馈并不能达到良好的控制品质。这时就需要加入反馈，反馈的特点是根据偏差来决定控制输入，不管对象的模型如何，也不管外界的干扰如何，只要有偏差，就根据偏差进行纠正，可以有效地消除稳态误差，解决前馈不能控制的不可测干扰。前馈反馈综合控制在结合二者的优点后，可以提高系统响应速度。

数控机床控制系统采用的就是这种前馈、反馈相结合的控制方式。在机床运动过程中，反馈控制主要控制机床的稳态精度；前馈控制主要控制机床的动态性能。在西门子数控系统中，前馈控制是通过提高增益系数的计算值来增强电动机的动态性能的。下面对西门子系统的主要前馈控制参数进行说明。

32620——前馈控制模式。西门子系统的前馈控制模式主要包括力矩前馈和速度前馈，通过模具加工测试，在模具加工控制上，速度前馈的效果要更理想一

些。因此对于模具加工类机床，建议该参数设为3。

32630——前馈控制激活方式。该参数设为1，前馈控制开启需在加工程序中输入FFWON指令；该参数设为0，同时将20150[23]设为2，前馈控制不需要输入指令即默认生效。

32810——前馈控制速度回路的等效时间常数。该参数可调节前馈模式开启后增益系数计算值的大小，该参数数值设定越小，增益系数计算值越大，反之则增益系数计算值越小。通过测试发现，调节该参数使得增益系数计算值在20左右时，伺服电动机的响应速度和控制精度平衡性较为理想。

（5）反向跃冲补偿参数。反向跃冲是伺服电动机在进给换向过程中，由于机械误差、传动环节刚性及运动惯量等多种因素共同作用产生的。通过改善机械误差和传动环节刚性，可以大幅度地减小反向跃冲的数值，但不能完全消除，剩余误差还可通过系统参数设定来进一步缩小。下面对西门子系统的反向跃冲补偿参数进行说明。

32450——反向间隙补偿参数。通过前面介绍的机械调整方法，可将进给轴的反向间隙精度提高到较高水平，剩余的误差量可输入到该参数中，由系统进行补偿来进一步缩小反向间隙数值。

32500——摩擦力补偿功能激活。该参数设定为1，摩擦力补偿功能激活，在轴换向时，系统根据设定情况输出一个反向力来减小跃冲量。

32520——摩擦力补偿最大值。该参数要根据球杆仪检出的跃冲情况进行设定，不宜设置过大，否则会在换向点处出现凹陷。

32530——摩擦力补偿最小值。该参数要根据球杆仪检出的跃冲情况进行设定，且和最大值之间保持一定间隔。

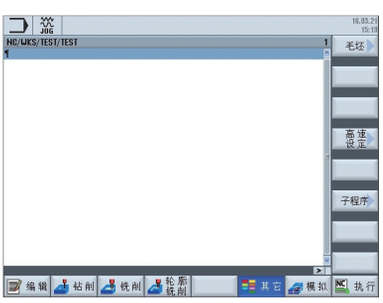
32540——摩擦力补偿时间常数。该参数要根据球杆仪检出的跃冲情况进行设定，不宜设置过大，设置过大会使摩擦力补偿作用时间过长，导致在过换向点后出现凹陷。

（6）加工辅助功能参数。数控机床的控制系统会提供一些有助于提高各类型工件加工质量的辅助功能，西门子系统针对模具类工件提供的标配加工辅助功能是精优曲面功能。精优曲面功能通过系统压缩器将多个密集的点计算成一条平滑的曲线，通过向前看功能在轴换向和拐角处提前进行加减速处理，这样能够保障在模具加工过程中机床运行的平稳和快速，同时还可根据工件要求对控制精度进行设定。下面对该功能的相关参数进行说明。

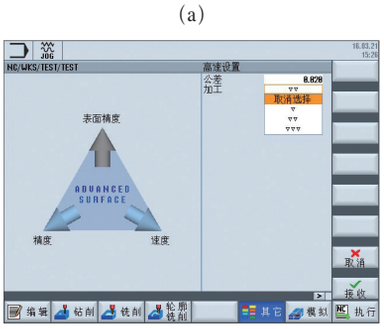
20150[29]——压缩器功能设定参数。该参数设为1，压缩器功能为关闭状态COMPOF，开启压缩器功能时需在加工程序段中输入相关开启指令；设为2，压缩器功能为开启状态COMPON，该功能在速度方面进行稳定控制；设为3，压缩器功能为开启状态COMPCURV曲率稳定多项式，该功能在加速度方面进行稳定控制；设为4，压缩器功能为开启状态COMPCAD优化表面质量，该功能在速度和加速度方面进行优化控制。对于模具加工类机床，该参数设为4，即压缩器功能设定为COMPCAD时加工效果最为理想。

33100——压缩器控制精度设定。该参数的设定要根据工件的具体要求来确定。数值设定越大，加工效率越高，表面粗糙度质量越好，但轮廓尺寸精度会变差；数值设定越小，轮廓尺寸精度水平越高，但加工效率降低，表面粗糙度质量变差。该参数设定过小时，还可能导致机床加工时出现振动。

cycle832——该标准循环功能与上面介绍的两个参数作用相同，打开程序后点击软按键“其它”→“高速设定”便可出现该功能的设定界面，如附图所示。在上下两个空格中，上面空格中设定的是公差，含义同参数33100一致；下面空格中设定的是压缩器功能，含义同参数20150[29]一



(a)



(b)

标准循环功能的设定界面

致。设定好后点击接收，便会在程序中出现cycle832标准循环。

3. 改善模具加工外部条件

对于模具加工质量的影响，除了机床自身的因素外，外部加工条件的正确选择也是十分重要的。影响模具加工质量的外部条件主要包括刀具、加工工艺参数、走刀及冷却方式等，下面分别进行说明。

（1）正确选择刀具。模具加工刀具的选择是在数控编程的人机交互状态下进行的，根据机床的加工能力、工件材料的性能、加工工序及切削量等相关因素正确选用刀具及刀柄。刀具选择总的原则是：安装调整方便，刚性好，寿命和精度高。在满足加工要求的前提下，尽量选择较短的刀柄，以提高刀具加工的刚性。

在进行模具加工时，为保证加工精度，切削行距比较密集，通常选用球头铣刀来进行复杂曲面的加工。模具材料大多为铝和钢，为了保证加工质量和加工效率，同时兼顾经济性，建议在加工铝质材料时选用无涂层的硬质合金刀，保证刀尖锋利，避免因刀具边缘钝化导致的粘连；在加工钢质材料时选用有涂层的硬质合金刀，增强刀具的耐磨损能力，提高刀具寿命。在刀具尺寸选择上要与工件加工程序相匹配，避免出现漏切和复切的情况。在刀具的夹紧方式上，建议使用强力夹冠对刀具进行固定，以便提高刀具的夹紧刚性。

正确的刀具选择虽然会带来刀具硬件成本的增加，但由此带来的加工质量和加工效率的提高，能够创造出更大的经济效益。

（2）正确选定加工工艺参数。加工工艺参数的选定和刀具材料、刀具几何形状、工件材料、走刀方式及主轴转速等因素密切相关。切削测试结果表明，对于铝质材料的模具，采用无涂层的硬质合金刀具，切削速度在2 500～3 500mm/min，每齿进给量0.05～0.20mm时，精加工质量比较理想；对于钢制材料的模具，采用无涂层的硬质合金刀具，切削速度600～1 000mm/min，每齿进给量0.2～0.3mm时，精加工质量比较理想。由于模具材料、刀具材料种类繁多，因此最佳的工艺参数还需根据实际情况测试得出。

（3）正确选择走刀方式。模具的加工程序都是由UG、CATIA等编程软件生成的，编程人员在编程时除了要考虑常规因素外，还应对机床的运动性能有所了解，在确定走刀方式时应尽量避免机床运动性能较弱的轴（如重力轴）频繁参与插补联动，特别是在有接刀和曲面复杂的位置，这样可以获得更加理想的加工效果。

（4）正确选择冷却方式。针对模具这种高速铣削加工方式，主要采用压缩空气冷却和切削液冷却两种冷却方式。这两种冷却方式如何选用更为恰当，则应根据不同的工件材料和加工目的加以权衡，以获得最佳的加工效果。对于模具的粗加工和半精加工，在加工软性材料如铝、软质钢材等时，建议使用切削液冷却方式，因为切削液不仅可以更快地带走加工碎屑、避免产生粘连，同时还能起到刀具润滑的作用；在加工硬质材料如硬质钢、硬质铸件等时，建议使用压缩空气冷却方式。因为切削硬质材料时会产生很多热量，如果采用切削液冷却，可能会使刀具承受间歇性升温－冷却造成的热冲击，温度的剧烈变化容易引起刀具切削刃碎裂，而采用压缩空气冷却，不仅可使刀具温度保持恒定，还可将切屑吹离切削区，避免因高硬度切屑的二次切削作用对刀具造成损坏，延长刀具使用寿命。对于模具的精加工，无论材质如何，都建议使用切削液冷却方式，因为这种冷却方式能够最大程度地带走加工碎屑，减小碎屑在工件表面熔焊现象的发生，同时还可对刀具提供良好的润滑，获得更好的表面加工质量。

4. 建立正确的机床使用保养习惯

调整好的机床在短时间内保证模具加工质量是没有问题的，但要保证机床连续长时间良好的加工效果，就要建立正确的机床使用保养习惯。

在使用方面，由于加工模具的机床在机械调整上偏重于保障机床的高动态响应能力，因此适合进行小切削量的高速加工，不适合用来进行大切削量的重加工，重切削加工时产生的侧向应力和振动对于机床的动态稳定性破坏十分明显，因此应尽量避免机床进行重切削加工。在保养方面，要保障机床运动部件的良好润滑，使用高品质的润滑油品，并做到及时补充；要定期更换液压油和主轴箱润滑油，确保油品清洁，使用可靠；要定期对机床进行清洁，避免切削碎屑进入到防护内部对运动部件造成损坏。

良好的机床使用保养习惯，

薄壁导筒加工变形控制及工艺改进

■ 陕西柴油机重工有限公司 （兴平 713105） 张景娟

摘要：为解决某高精度、多孔、含复杂铸造型腔的薄壁导筒加工变形问题，提高成品合格率，提供了一种新的加工方案，改进定位和装夹方式，有效控制了加工变形，保证了加工精度。

1. 零件结构

某薄壁导筒有复杂型腔，孔槽多，加工变形会影响加工精度和成品合格率。该导筒结构如图1所示，图2所示为其纵向、横向剖视图，其内腔为连续非圆截面形状。

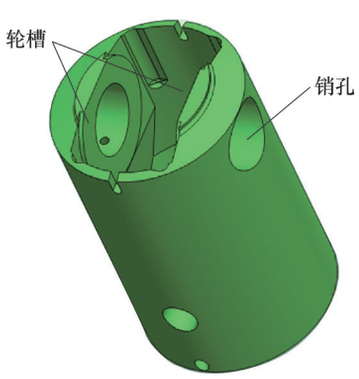
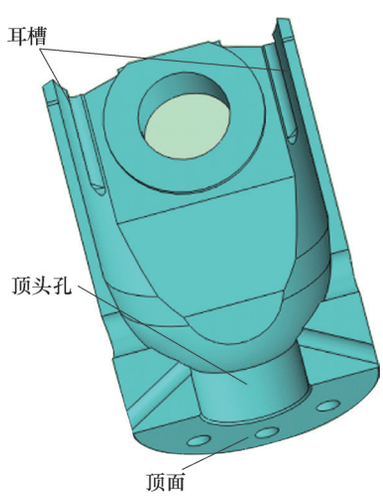


图1 导筒结构图

2. 精度要求

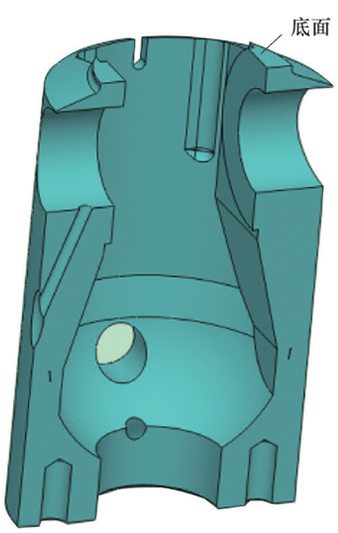
导筒材料是QT500-7，其结构和主要精度要求如图3所示。



(a)

3. 加工难点

导筒为薄壁球铁件，壁厚不均匀，内部常有硬质点，整体工



(b)

图2 导筒纵向、横向剖视图

能够使机床长期处于良好的工作状态，降低机床的故障率，使得机床可以连续稳定地加工出高质量的模具产品。

5. 结语

通过开展本次工作，我们对数控龙门加工中心在模具加工方面的性能有了较为全面深刻的认识，对产品在设计、加工和装配等环节存在的不足之处有了更好的了解，积累了数控系统优化、模具加工外部条件选择等方面的宝贵经验，这为今后研发制造更高水平的模具加工类机床奠定了坚实的基础。

参考文献：

[1] 张宪. 正确选择模具加工刀具策略[J]. 工具展望，2010（4）：23-24.

[2] 麦少荣. 高速切削技术在模具加工中的应用[J]. 机电工程技术，2008，37（8）：51-54.

[3] 曲改玉，周生伟，李敏. 优化840D数控系统参数实现机床的高精度加工[J]. 制造技术与机床，2009（11）：133-136.

MW（收稿日期：20160822）