

车削汽车变速器齿轮轴问题分析与解决

潘艺友

沈阳机床（集团）有限责任公司沈阳第一机床厂 辽宁沈阳 110042

摘要：以车削某汽车变速器齿轮轴为例，从夹具分析、温度影响、刀具磨损、检测与稳定性等角度对数控车床在加工中遇到的问题进行分析，并提出解决方法。通过控制机床精度达到提高产品质量和生产效率的目的。

关键词：变速器；齿轮轴；车削；夹具；温度；影响；刀具；磨损；规律；检测

1 序言

变速器是汽车的核心部件，有着举足轻重的地位。汽车制造商投入大量的人力、物力和财力对其进行研发，对其部件的制造也不断提出更高的要求，对机床的加工性能、效率和稳定性等也提出了更高的挑战。德国某客户订购我厂数控车床用于加工变速器齿轮轴，对于零件重要尺寸要求连续抽取60件样本（一般标准抽取样本数量为50件）进行检测，并且机床加工采用自动生产线上料方式，在不进行人工干预调整的情况下，连续加工使得 $Cmk \geq 1.67$ ，或 $Cm \geq 2$ 。车削范围是除两端面及端面孔外的所有尺寸。

2 零件结构及尺寸

图1为客户提供的零件图样，重要尺寸分为径向和轴向。源于车削工序的特点，若X轴尺寸出现误差，则反映到径向误差就会加倍。本文重点讨论径向尺寸加工时出现的问题和解决方法。

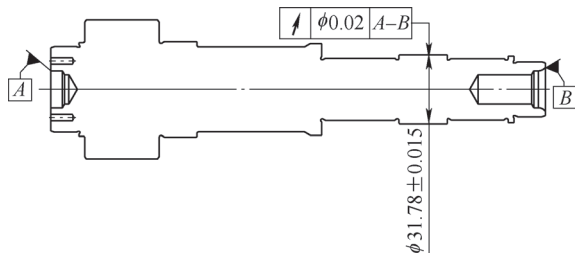


图1 零件图样

3 加工设备及检测需求分析

为满足客户要求，从人、机器设备、材料、方

法、环境和测量六个角度进行考虑。

(1) 机床精度 针对该项目，我厂从加工到装配对零件的精度提高了30%，出厂检验标准在国标基础上再次提高60%左右。

(2) 夹具精度及毛坯一致性 若夹具装夹及定位方式出现误差，则该项目就无法完成。同时由于客户对毛坯也有 Cmk 要求，所以要考虑毛坯一致性问题。加工后的毛坯应力已得到释放，对毛坯进行小批量检测后，发现一致性较好，对加工的影响相对不大。

(3) 刀具 整个切削过程要求采用空气冷却。考虑到加工过程中会出现刀具磨损，必须做出分析应对。

(4) 检测 由于对加工后的零件进行测量需考虑测量环境及人为因素等，故加工后的零件必须放在恒温室20℃静置24h以上，然后安排专人采用专业设备进行检测。

4 夹具选型

该零件除倒角及工艺槽外，要求所有外圆相对两端顶尖孔（A、B基准）的径向圆跳动在 $\phi 0.02\text{mm}$ 以内，所以最后一个工序采用常规液压卡盘进行二次装夹的方式不能满足要求。考虑了三种方案，具体分析如下。

(1) 方案一 前两个工序粗车采用一夹一顶的装夹方式，最后一个工序采用两顶尖方式进行车削在理论上是可行的，但是若采用常规液压卡盘进行装夹，由于刚性定位形式及毛坯料差异等原因，零

件既受卡盘夹紧力,同时又受尾座顶紧力的作用,导致零件轴线和母线产生弯曲,使得第二次装夹因零件变形而产生定位不同心的情况,且加工过程中易产生振动,故该方案不可取。

(2) 方案二 既然刚性定位方式不可取, 则在装夹方式不变的前提下, 可采用顶尖浮动卡盘及后拉卡盘进行粗车, 双顶尖方式进行精车。这两种卡盘均为补偿式卡盘, 顶尖做定心, 卡爪浮动夹紧, 能对尾座产生顶紧力而发生的偏移做一定的“纠正”, 弥补了因刚性定位方式导致零件产生变形的不足。该方案虽然解决了装夹问题, 但是由于客户对零件加工节拍和机床数量不满意, 故不采纳。

(3) 方案三 要解决节拍问题,就要考虑减少因多次装夹而产生的用时问题。采用顶尖驱动卡盘可将传统加工的三道工序合并为一道工序。

顶尖驱动卡盘是在原补偿卡盘的基础上增加驱动顶尖，在一道工序中既能满足去除工件大余量的半精加工，也可满足双顶方式的精加工。配备的液压缸采用双活塞动作及双拉杆形式。当进行半精加工时，顶尖定心同时浮动夹紧工件，此时卡盘有较大的夹紧力，能进行大吃刀量车削；当进行精加工时，卡盘退回驱动顶尖，从顶尖内伸出，实现去除工件较小余量的精加工。通过两次液压缸动作切换（卡盘顶尖位置不变，且始终受尾座顶紧力作用）实现了一次装夹完成齿轮轴所有外圆的加工。顶尖驱动卡盘卡爪夹紧动作（去除大余量加工）如图2所示，驱动卡盘退回及驱动顶尖伸出状态（精加工）如图3所示。

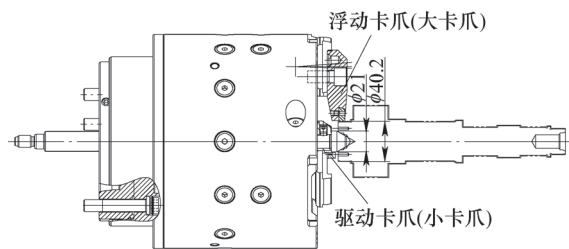


图2 顶尖驱动卡盘卡爪夹紧动作(去除大余量加工)

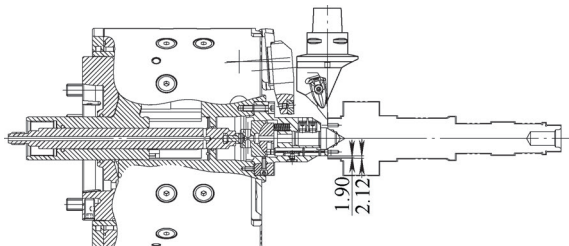


图3 驱动卡盘退回及驱动顶尖伸出状态 (精加工)

通过以上分析可知,采用方案三能够满足装夹、节拍要求。采用德国生产的顶尖驱动卡盘,顶尖端面定位精度在2%,径向圆跳动在1%,可满足加工要求。此夹具结构复杂,成本较高,但从总体上来看,可节省加工时间和场地面积,减少设备和操作人员数量,比较合适。

5 温度影响及补偿

对一批零件进行测试,检测结果显示 C_m 为1.55, C_{mk} 为0.48。零件直径从第12件开始出现异常,第31件后除个别外趋于稳定。12~31号直径尺寸波动明显,且有明显下降趋势,这种趋势不符合刀具磨损的理论规律,必须查找原因。

经分析,产生这种现象的原因是该机床X轴采用单支撑形式,加工过程中因温度影响而产生零点漂移现象。前12件温度上升较慢,对丝杠的影响较小;从第12件开始温度影响增加,导致丝杠“伸长”;在第31件以后由于温度平衡而趋于稳定。前面所提到的X轴误差放大效应,在这里明显体现。

在X轴丝杠轴承座用温度枪量取温度,通过激光干涉仪进行记录。轴承座温度分别在20.0℃、23.1℃和27.8℃时绘制定位精度曲线(见图4)。横坐标为丝杠行程(0mm处为丝杠固定端,150mm处为自由悬伸端),纵坐标为定位误差。取横坐标150mm处为参照,在20.0℃时,定位误差为 $-14.4\text{ }\mu\text{m}$;在23.1℃时,定位误差为 $-9.0\text{ }\mu\text{m}$;在27.8℃时,定位误差为 $-0.7\text{ }\mu\text{m}$ 。可知丝杠定位误差随温度升高而减小。当轴承座温度达到27.8℃后,温度不再上升,说明丝杠机构达到热平衡状态。在27.8℃时,曲线的定位误差最小,说明定位精度在此温度下相对稳定。

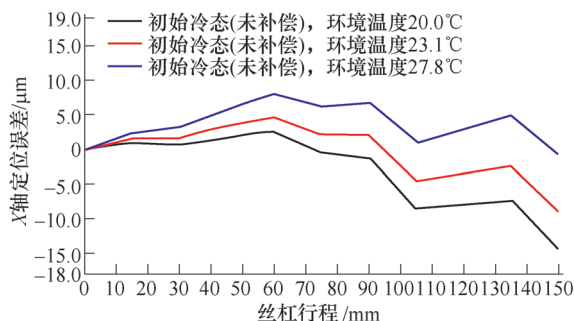


图4 定位精度曲线

在轴承座上放置温度传感器,多次测量定位精度,进一步提取样本数据,绘制行程-定位精度曲

线。将测量的数据与数控系统进行连接，将测试结果输入在软件当中进行模拟分析，模拟出“定位误差补偿”的趋势，对机床进行实时在线补偿。通过大量数据采集，依次进行调整，达到丝杠稳定的最佳状态。

采用这种补偿方法可以减少机床的热机时间，在最短时间内保证机床热平衡精度稳定。通过实施此种补偿方法，对单支撑丝杠结构的机床进行补偿调整，使得X轴丝杠精度得到一定程度的修复，同时也为单支撑丝杠结构因热平衡设计造成的失误提供了一种补救修正方法。

调整完丝杠零点漂移带来的误差后，再次进行一轮车削试验，记录结果并绘制成曲线。此时Cmk取值为1.63，接近要求值。

从趋势报告中可知，由于丝杠温度误差产生零点漂移现象导致的V形曲线已经通过修正进行“抵消”，从而进一步证明之前的分析判断及解决方法是正确的。但曲线整体相对有上升趋势，从外形上看呈现出一条“拟合”的一次函数形状，故可分析刀具磨损规律，采用宏程序进行系统自动补偿，并将向上的平均值向理论平均值处调整。

6 刀具影响分析与解决

由于车床是回转体加工机床，因此当刀具磨损 Δ 时，会使得工件直径尺寸放大到 2Δ 。在消除温度影响的情况下，刀具影响问题逐步显现。

更换新刀片后进行车削，60件样本直径平均值与理论平均值相对发生向上的偏移。从测量结果上看，前11件直径略有波动但总体相对平稳，第11~20件直径波动有“急剧”抬升趋势，第21件后整体平稳，但总体趋势有所上升，该结果的变化符合刀具磨损规律。

对于刀具影响的解决方法如下。

1) 准备阶段。进行自动生产线加工前，使零件毛坯状态尺寸相同，且几何公差达到合格及一致性要求，保证加工时刀具吃刀量一致；使数控车床的运行温度稳定保持在一定的恒温状态下。

2) 在数控车床自动生产线连续稳定加工的情况下，对零件进行分组抽检。对被抽检的零件进行风冷，达到温度环境一致，监控被加工零件尺寸波动情况。当被加工零件尺寸无变化时，只做零件数量

上的序号统计；当被加工零件连续5件出现尺寸变化时，开始记录这5件零件，序号分别为 $M+1$ 、 $M+2$ 、 $M+3$ 、 $M+4$ 和 $M+5$ ；以后加工的零件依次记录序号为 $M+6$ 、 $M+7$ 、 $\dots$ 、 $M+N$ ，其中 M 为连续5件出现变化之前加工零件的数量，即1~ M 号是尺寸平稳的零件， N 为自发生变化起做记录的零件数， $M+N$ 为加工零件的总数。

3) 将尺寸发生变化的这批零件放在20℃的恒温检测室内静置24h，待零件温度符合检测要求后进行检测，记录检测值并绘制“产生变化尺寸的零件序号 N -尺寸”坐标图，X轴为零件尺寸发生变化的序号 N ，Y轴为零件尺寸。

4) 将此组数据分成 S 组，每组样本数量为 P 并保证样本数量的连续性。计算数值变化 Δy ，序号变化 Δx ，计算得出斜率 $k = \Delta y / \Delta x$ 。每组斜率分别为 k_1 、 k_2 、 $\dots$ 、 k_S 。将每组函数拟合出一条总体的函数曲线，函数表达式为 $y = kx + Q = (\Delta y / \Delta x)x + Q$ ，其中 Q 为加工零件尺寸的平均值。

5) 得到拟合函数表达式后，计算出与该函数关于X轴的对称函数，将其变化趋势以宏程序的形式表达出来，加入到数控程序中进行验证。

逻辑控制方案如下。

步骤1：首先开始加工并记录数据。

步骤2：监测零件尺寸是否有变化，若结果为“是”，则开始计数 $M+1$ ；若结果为“否”，回到步骤1。

步骤3：继续加工并确定是否达到零件上限，结果为“是”进行下一步，结果为“否”循环此步骤。

步骤4：确定零件个数是否满足60件以上，结果为“是”进行下一步，结果为“否”分析原因，调整并重新加工，回到步骤1。

步骤5：连续加工 $M+N$ 件并记录，然后停止加工。

步骤6：恒温后测量结果。

步骤7：对数据进行分析及计算函数。

步骤8：得出新函数结果，编辑输入程序。

步骤9：输入新函数后开始加工，系统记数。

步骤10：继续加工，确定是否达到满足加工数量 M ；结果为“是”执行下一步，结果为“否”循环此步骤。

步骤11：自动开始计数 N ，启动宏程序进行补偿。

步骤12：系统记录连续加工 $M+N$ 件。

步骤13：停止加工，恒温后测量结果，得出结论。

宏程序指令如下。

O9800 (ZDBC)

IF[#100 LE #803] GOTO 200; #1=#100-#803;

IF[#100 GT #800] GOTO 100;

M99;

N100;

[#_OFSXW[#802]] = [#_OFSXW[#802]] + #801;

#100=#803;

N200;

M99;

程序解析如下。

第一行：这里O9800（软件名称）为程序名称，（ZDBC）为零件名称。

第二行：如果地址100中的数值（开始加工的零件序号） $\leq$ 地址803（设置的需要修正的序号）中的数值，程序将跳到第八行执行N200（继续加工不进行补偿）。

第三行：如果地址100中的数值 $>$ 地址803中的数值，程序将跳到第五行执行N100（启动宏程序开始对加工零件尺寸进行修正）。

第四行：跳出程序O9800循环（加工结束）。

第五行：执行N100。

第六行：802地址中 X 轴刀补数值=802地址中 X 轴刀补数值+地址801中的数值再赋值给802地址中 X 轴刀补数值。

第七行：地址100中的数值赋值给地址803。

第八行：执行N200。

第九行：跳出程序O9800循环。

这里规定地址800中的数值为每多少件修正一次，即 Δx ；地址801中的数值为每次修正多少，即 Δy ；地址802中的数值为要调整的刀补号地址；地址803中的数值为前几件不启动宏程序修正。

输入以上程序，更换新刀片，在与上次加工条件一致的情况下进行加工，当加工到第 M 件后开始计数 $M+1$ 、 $M+2$ 、 $\dots$ 、 $M+N'$ ，采集到新一批零件数据并记录新结果。

经过计算，60件样本平均数为 $\phi 31.780367\text{mm}$ ，其中最小值为 $\phi 31.773\text{mm}$ ，最大值为 $\phi 31.786\text{mm}$ 。样本平均数符合零件要求的中值 $\phi 31.78\text{mm}$ 并达到“零线值”。

为了进一步体现该组数据的稳定性，对其进行 C_{mk} 计算，得出 $C_m = 1.83$ ， $C_{mk} = 1.76 \geq 1.67$ ，稳定性达标且优秀。

通过以上分析可知，在连续加工60件不进行手动调整、相对公差带较为严格的情况下，即便数控机床及夹具等精度较高，温度和刀具磨损的影响也不容忽视。因原始数据中不仅包含了丝杠定位精度、夹具定位精度和零件毛坯顶尖孔精度，还掺杂了温度、不同批次的刀片性能及磨损情况、加工切屑时产生的变形问题、机械手上下料的微观影响以及其他不可预判的未知因素。经过大量实践与分析后发现，机床精度、温度及刀具磨损规律对 C_{mk} 结果影响最大，其余因素影响相对不明显，但并不代表可以忽略，还应注意结合实际情况进行分析。

7 结束语

本文中每项方案的结果、过程分析与调整都是经过长期摸索才得到了验收结果。要依实际工况研究温度因素对加工精度的影响及刀具磨损规律，从而对机床进行实时在线补偿，这样机床的稳定性才能发挥出来，达到理想的结果。

参考文献：

- [1] 沈阳第一机床厂，中捷友谊厂，沈阳第三机床厂. 机床工人技术手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1989.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 数控车床和车削中心检验条件：GB/T 16462.6—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2007.
- [3] 潘艺友. 丝杠单支撑结构零点漂移修正[J]. 金属加工（冷加工），2017（9）：58-59.
- [4] 潘艺友. 数控车床加工变速器轴的 C_{mk} 报告分析与调整[J]. 汽车工艺师，2017（9）：51-52.
- [5] 王家兴，潘艺友. 变速箱齿轮轴的数控车削[J]. 金属加工（冷加工），2019（3）：63-64.

MW 20210726