

车加工试件表面波纹的消除

沈阳机床（集团）有限责任公司沈一车床厂（辽宁 110142） 刘 萍 陈丽文 陶秀玉 彭丽辉

1. 现象说明

现阶段国内市场上主流的数控机床主轴速度都比较高，由此机床在高速精车外圆及精车端面时，加工工件的表面加工质量都可以达到很好的表面粗糙度。但是在一定的加工条件下，如果对加工表面使用金相砂纸对工件做进给方向上的擦试，就会发现工件表面存在视觉上的瑕疵，具体现象可以参照图1、图2，这种规则的视觉波纹也就是俗称的“竹节纹”。经过对各机床生产厂家的产品进行调研，发现这是一种比较普遍存在的现象。

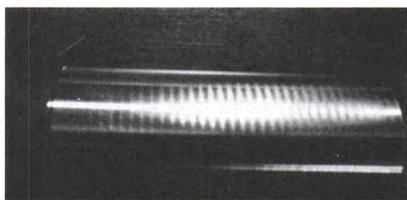


图1 砂纸擦试外圆表面现象

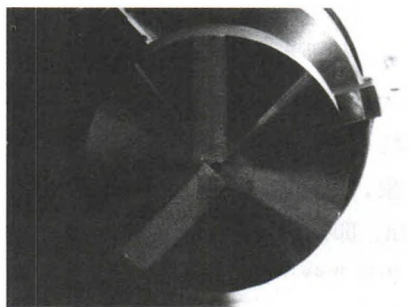


图2 端面竹节纹现象

我们发现，在数控机床高速切削的时候，机床的某些零部件和生产环节存在的问题会充分暴露出来。当加工时出现竹节纹或者是刀花不规则较乱的现象时，就可以断定机床某些部件的装配质量出现了问题。

2. 原因分析

在生产实践过程中，我厂CAK、ETC系列车床有时个别机床会出现上述的现象，在进行高速精车时，加工表面出现竹节纹、刀花乱（表面粗糙度虽能够达到要求，但视觉效果不理想）的现象。针对这种现象我们进行了一系列的研究，对其产生原因做了详细分析并提出了对应的解决方法。

（1）CAK系列车床 CAK系列车床的配置为滑动导轨平床身、平床鞍结构，在精车端面时易产生竹节纹，也就是在整机交检工作精度时，偶尔就会出现一台存在竹节纹现象。

我们对同批次存在问题的机床与正常机床做了细致比较，分析认为主要与运动源主轴箱、X轴运行轨迹、主电动机是否能满足本机床转速要求有直接关系。

（2）ETC系列车床 ETC系列车床的配置为直线导轨平床身、斜床鞍结构，在高速精车外圆时偶尔产生暗影竹节纹。

出现这种现象是机床力学性能指标偏低造成的，我们成立了专项攻关小组，小组成员一致认为和主轴箱是否振动、Z轴运行轨迹是否流畅、X轴（45°斜床鞍）电动机转矩是否适合以及主电动机转动是否平稳有关。

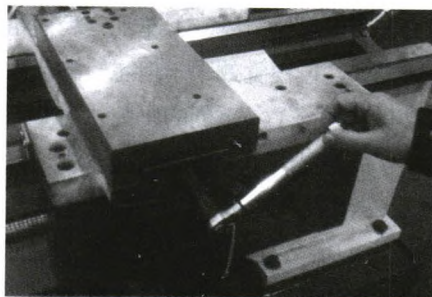
3. 试验测试

（1）CAK系列车床 认定原因后我们利用排除法进行如下试验：

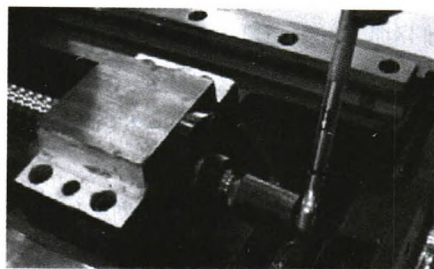
使用便携式动平衡仪对装配卡盘的主轴箱做动平衡，分别在最高转速、75%最高转速和50%最高转速做整机动平衡，平衡后主轴箱前后轴承处的振幅均在0.1mm/s以下。再进行以上3个转速工作精车

作业, 结果在主轴转速为1 000r/min时端面无竹节纹现象, 而在2 000~2 500r/min的高转速下出现了竹节纹现象。

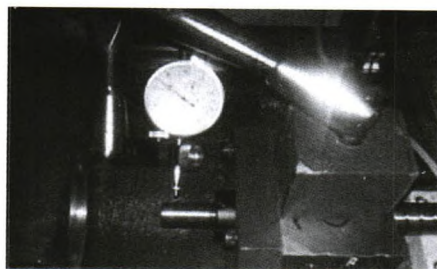
使用千分表对X轴运行时的定位精度及重复定位精度进行检测, 检测结果满足机床合格证要求。又将机床调到手摇脉冲模式, 通过打表检测, 发现X轴的脉冲运行不均匀, 在运行过程中有停顿后突然释放的情况。通过重新装配X轴部件, 对机床滑板燕尾结合面、镶条重新进行刮研, 保证X轴运行流畅, 没有蹿劲和阻滞现象, 用力矩扳手检测调整前后丝杠的空载力矩(见图3a、3b)和丝杠端头的径向跳动(见图3c), 检测结果如表1所示。再次精车端面时, 端面竹节纹消失。



(a) 检测调整前丝杠的空载力矩



(b) 检测调整后丝杠的空载力矩



(c) 检测丝杠端头的径向跳动

图 3

表1 检测结果对比

项目	负载		空载	
	初始状态	调整后	初始状态	调整后
丝杠旋转载矩/N·m	2.6	1.5	1.4	0.5
丝杠端头径跳/mm	0.05	0.015	0.04	0.01

(2) ETC系列车床 ETC系列车床出现竹节纹现象的原因与CAK系列车床不尽相同, 在试验测试的过程中全方位的对问题进行剖析, 我们做了如下常规试验:

对X轴电动机转矩进行分析。X轴电动机在45°斜床鞍的上部, 工作条件下X轴整体依靠电动机自锁来克服自重。经过检测, X轴功率、转矩满足切削要求, 此项排除。

对主轴箱振动情况进行测试。使用便携式动平衡仪测试主轴箱振动情况并进行动平衡, 分别将最高转速、75%最高转速上主轴箱前后轴承处的振幅做到0.3mm/s以内, 之后我们再次在主轴转速为2 500r/min的情况下精车外圆, 此时竹节纹现象有所缓解, 但是仍然存在。

对Z轴运行轨迹进行检测。将Z轴联轴器松开之后, 我们对丝杠端头的跳动进行检测。发现在丝杠螺母与床鞍联接的情况下, 丝杠端头的跳动值为0.04~0.06mm, 当将丝杠螺母松开后再次检测得到端头跳动为0.01mm以内。这说明丝杠螺母与两端轴承支撑不同轴(三支撑不同轴), 现场工艺流程为安装Z轴导轨→安装Z轴丝杠套件→安装床鞍套件→安装床头套件, 后改为: 安装Z轴导轨→安装Z轴丝杠套件→安装床鞍套件, 找正主轴和X轴垂直→丝母座安装端面与Z轴导轨垂直检测→安装床头套件, 保证了丝杠的安装精度。

目的是调整后, 可避免在调整主轴轴线与X轴轴线垂直度时, 床鞍上Z轴丝杠螺母安装面与Z轴导轨的垂直关系发生变化, 防止造成Z轴运行不流畅和蹿劲现象, 从而影响机床精度。

经过以上三项试验检测并改进后, 调整后的机床在主轴转速≤2 300r/min时进行切削, 没有出现竹节纹现象, 但是在主轴加工转速区间为2 300~4 000r/min, 即切削线速度达到400m/min左右时, 就有隐约的竹节纹出现。

4. 数据采集分析

在做完常规试验后, 我们应用B&K公司的7700 Pulse数据采集分析系统, 该系统是世界上首个振动、噪声多分析仪系统, 能够同时进行多通道、实时、FFT、CPB等分析, 与Vibrant Technology公司的ME'scope分析软件相结合, 能够满足用户在数据记录与管理、模态分析、机械故障诊断等多方面的

多种要求。

(1) 锤击模态试验 为全面了解的薄弱环节，获取机床整机模态振型，进行整机锤击法模态试验，各阶模态参数如表2所示。

表2 ETC系列车床各阶模态参数

模态	整机结构	
	频率/Hz	振型
1	14.9	机床整体在地面上沿X轴方向前后晃动
2	24.4	机床整体绕几何竖直中心线（Y轴）在水平面上摆动
3	28.9	机床整体绕几何竖直中心线（Y轴）在水平面上摆动
4	49.7	机床整体及地脚系统沿X轴方向前后晃动

从前四阶次（15Hz、24Hz、29Hz、50Hz）振型来看，都为机床整体运动，各部件之间相对运动不明显，主要由底部振动，导致主轴箱刚性不足引起；第五阶（87.1Hz）振型为轴箱与刀架之间存在较大的相对运动，该阶振型对加工质量影响较大。

从前四阶次振型来看，都为机床整体运动，各部件之间相对运动不明显，主要由底部振动引起；第五阶（87.1Hz）振型为主轴箱与刀架之间存在较大的相对运动，该阶振型对加工质量影响较大。

(2) ODS试验 为获得机床在运作模式下整机的振动变形情况，进行ODS（Operating Deflection Shape）试验，测试机床在2 500r/min空转时，机床的整体变形情况可从振型图（图略）看出。

33Hz时的ODS振型和锤击模态28.9Hz时的振型基本一致，此时主轴和刀架、尾台相对运动很小，对加工精度影响不大；66Hz时的振型是锤击模态49.7Hz和87Hz耦合振型，其中49.7Hz振型影响较大；91Hz时的振型和锤击模态87Hz时的振型基本一致，此时主轴和刀架在XY平面内相对反向运动，同时两者在轴线方向也有相对反向运动，而且振幅较大，对加工精度影响很大。

(3) 切削试验 在同一套系统的监控下，我们进行了外圆切削及切槽试验，无论在上述哪种切削参数下进行极限切削（最大功率、最大转矩）试验，都会激发出机床整机第五阶（87.1Hz）的固有频率。观察该阶振型发现，主轴箱与刀架在XY平面上相对反向摆动，同时还有轴向的相对摆动，切

削时激发该频率的工作振型严重地影响了切削加工精度。

(4) 测试结果分析 锤击试验模态振型前四阶振型主要由于机床地脚约束刚度不足引起，机床整体属于刚体运动，对加工精度影响较小；第五阶（87Hz）振型主轴箱与刀架有明显相对反向运动，该振型对加工精度影响很大。

机床空运转ODS试验在100Hz内有三阶（33Hz、66Hz、91Hz）共振频率，其中前两阶（33Hz、66Hz）为转速的基频和二倍频，第三阶（91Hz）共振频率的模态振型为锤击试验的第五阶（87Hz）振型，说明在空运转情况下就可以激发出机床第五阶（87Hz）固有频率所对应的振型，可以推断出该阶振型对整机影响明显。

进行外圆切削试验，发现以固有频率转速进行切削时，除了所对应阶次的固有频率以外，还会出现第五阶（87Hz）固有频率；进行切槽试验时发生切削颤振，最大振动速度的频率在89Hz，也在第五阶（87Hz）附近；可以推断出切削时机床第五阶（87Hz）固有频率很容易被激发，而该阶振动对加工精度影响很大。

根据试验结果，我们分析振源应该来自主电动机，由于电动机与主轴带轮传动比是1：2，主轴转速在4 000r/min，而主电动机转速8 000r/min时，我们单独对电动机+带轮做了动平衡后再次高速切削，暗影消失。

5. 结语

影响数控机床精车外圆、端面“竹节纹”、暗影问题应该为以下三点：

- (1) 精车端面竹节纹，主要是X轴运行不流畅，存在蹇劲阻滞现象。
- (2) 高速精车外圆有暗影，主电动机导致的整机激振是原因之一，主轴箱主轴套件不平衡导致整机振动是原因之二，Z轴运行不流畅，有蹇劲现象是另外一个原因。

我们进而在装配规程中对两轴的装配进行重点控制，两轴（X、Z）丝杠旋转要松紧一致，轻松自如，主电动机带轮做动平衡检验，同时对机床做高速下的整机动平衡，保证主轴在高速旋转时机床平稳。至此，问题得到解决。MW

（收稿日期：20130124）