



在喷油器体小孔珩磨及配珩中孔机床方面，苏州信能打破了国外的封锁。

——苏州信能精密机械有限公司技术中心主任 左朋

高精度小孔及配珩中孔珩磨机与磨具

□ 苏州信能精密机械有限公司/左朋

小孔珩磨和中孔配珩是喷油器体加工难度最大、精度要求极高的工艺方法，珩磨机是高压共轨喷射系统高精度小孔制造的核心设备。全球高精度数控珩磨机市场主要被德国格林、纳格尔、卡帝亚及美国善能等几家企业凭借其先进的珩磨工艺技术所垄断。

2011年，苏州信能精密机械有限公司承担了无锡油泵油嘴研究所牵头的国家04重大专项“电控共轨柴油喷射系统制造技术与关键装备的研发与应用”中的子课题“高精

度数控小孔珩磨机及配珩中孔珩磨机床与磨具”。该课题需要研制一台高精度数控小孔珩磨机及配珩中孔珩磨机床，并需要研制珩磨所需的配套装备：高精度珩磨夹具、珩磨杆和珩磨油石。旨在掌握高端珩磨装备的成套核心技术。该设备2014年8月通过验收。现将其具体情况介绍如下。

课题指标

机床（见图1）主要参数指标：加工直径范围 $\phi 3 \sim \phi 20\text{mm}$ ；最大珩磨长度150mm；主轴往返速度30m/min；主轴最大行程250mm。

加工精度指标：圆度 $\phi 0.5\mu\text{m}$ ；圆柱度 $1\mu\text{m}$ ；表面粗糙度值 $R_a \leq 0.05\mu\text{m}$ ；配珩加工间隙值可任意设定，设定步距为0.001mm；加工结果散差 $\leq \pm 0.5\mu\text{m}$ 。

知识产权指标：形成8项以上专利技术和专有技术及3项以上技术规范与标准。

技术难点突破

课题的研制成功，主要克服了以下几个技术难点，这些难点也是本课题的主要技术亮点。

(1) 精密驱动进给技术。实现了微米和亚微米级的加工精度，采用伺服电动机以及精密的机械传动机械进行闭环的进给控制，实现了设备定量微进给的模式。操作者可在操作界面上任意设置所需要的进给量，已实现微小进给量达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

(2) 特殊的珩磨工艺研制。积累了大量针对不同形状、不同材料、不同类型的高精度零部件的珩磨工艺，设计研发各种专用配方的珩磨工艺和珩磨油石。

(3) 高精度小孔珩磨抑振技术。采用ANASYS软件，建立了高精度数控小孔珩磨机及配珩中孔珩磨机动态性能分析方法，根据机床结构动力学理论和加工过程动力学，研发高精度数控小孔珩磨及配珩中孔珩磨过程仿真软件，建立了高精度数控小孔珩磨及配珩中孔珩磨抑振技术。

技术亮点

1. 超精密进给技术

(1) 众所周知，珩磨机属于精加工设备，其只有三个运动：主轴的往复运动、主轴的旋转运动及刀具的进给运动。其加工原理是，主轴带动刀具，在往复的同时进行旋转和进给。在珩磨加工中如想实现超精加工，其往复定位精度和进给精度都需很高才能实现，而高精度数控小孔珩磨机及配珩中孔珩磨机主要是针对高压共轨燃油喷射系



图 1

统中的喷油器体设计的，其精度为目前国内珩磨的最高精度。由此可见，如想实现超高精度的珩磨，超精密进给技术的实现是前提。

(2) 超精密进给结构的设计。为了实现微米和亚微米级的加工精度，必须具有超精密进给机构。本机床的设计采用伺服电动机以及精密的机械传动机构进行闭环进给控制，实现了设备定量微进给的模式。操作者可在操作界面上任意设置所需要的进给量，已实现了最小进给量达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

机床的进给系统轴采用伺服电动机带动滚珠丝杠副控制，伺服电动机采用绝对位置控制方式和转矩控制方式，可实现尺寸的微量进给控制和自动补偿功能（油石磨损自动补偿）。进给机构采用运动控制卡与伺服电机驱动系统相连，发出通信信号高精度地控制伺服电动机转动，具备定量微进给功能，最小进给量可到 $0.1\mu\text{m}$ ，能够满足精度要求。另外，根据加工工件的孔径可选择顶端扩涨或低端扩涨。扩涨机构具备安全保护措施：硬件限位和软件限位；具有过转矩堵转预警、报警功能，从而保证珩磨杆过扭矩变形、折断现象。系统具备当前进给尺寸、负载率在线显示。

2. 超精密测量系统

超精密在线气动测量系统，采用CAN总线通信方式，实现超精密测量技术，测量分辨率 $0.1\mu\text{m}$ 。超精密测量技术的引进对珩磨机的发展是一个革命性的进步，工件可以不进检验室就可以知道加工情况，有利于操作人员进行机床参数的调整，加快了加工节拍，有利于工件的实时检测，有利于机床无人化的实现。

超精密测量技术的要求。针对高精度数控小孔珩磨机及配珩中孔珩磨机运动特征和配珩的工艺特殊要求，机床必须配备精密的自动测量技术，通过CNC数控系统并可实现机床的自动检测、自动补偿。其中自动测量的精度可达 $0.1\mu\text{m}$ ，机床的自动反馈精度可达到 $0.1\mu\text{m}$ 。根据市场调研，最终苏州信能公司和HOMMEL公司达成协议，采用HOMMEL公司最新研发的

一款TP200在线测量仪器，并提出以下要求。

测量系统应达到如下要求：测量分辨率 $\leq 0.1\mu\text{m}$ ；测量重复性 $0.1\mu\text{m}$ ；采用“对比法”实现同一孔径的3点和多点检测；与机床程序搭配，可实现在线配磨技术（即：由测量系统测出“轴”的直径，然后由程序与预定配合间隙进行和差运算，并自动分配珩磨加工量对“孔”进行加工，达到“轴”与“孔”的一对一精准配合）。

（1）测量方案。针对配珩的特殊工艺要求，HOMMEL公司制订了一套TP200的使用方案。具体示意图如图2所示。TP200为一套气动精密测量仪器，其测量精度可达 $0.1\mu\text{m}$ ，满足被测件圆度 $0.5\mu\text{m}$ ，圆柱度 $1\mu\text{m}$ 的要求。

（2）测量原理。一种基于气电转换的零件内孔尺寸与形状精度检测方法。该方法采用气动测量原理，利用气电转换方法，把零件内孔的尺寸变换量转化为电信号的变化，通过A/D数据采集技术，获得被测零件的尺寸大小，通过设计的专用测头，一次可测出零件内孔三个位置的内径大小，最后由计算机数据采集软件计算出零件内孔的锥度，并进行质量分析及显示。该方法具有测量精度高，可靠性好，抗干扰能力强，检测效率高，检测直观等优点。

3. 超精密工具和夹具

研制了能满足高精度、高效率加工需求的珩磨工具、珩磨夹具，实现了珩磨高端配套磨具的国产化。

目前国内珩磨界的现状是：高

端珩磨设备缺少，高端的能满足高精度、高效率加工需求的珩磨工具、珩磨夹具也很缺少，苏州信能通过课题的实施，并结合公司20多年的珩磨工具，夹具的设计经验，成功设计并制造出了能满足加工圆度 $0.5\mu\text{m}$ 、圆柱度 $1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a=0.05\mu\text{m}$ 、尺寸分散度 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 的珩磨工具、油石和高精度自动夹具（见图3）。

此珩磨夹具的制造难度在于：零件内孔很小，只有 $\phi 4\text{mm}$ ，需要严格控制夹具浮动量；此夹具为自动锁紧夹具；如何保证12套夹具精度的一致性；热处理工艺复杂；夹具零件加工精度要求非常高。

此珩磨杆（见图4）的制造难度在于：杆体很细，只有 $\phi 4\text{mm}$ ，且很长，有111mm；油石槽存在加工内应力，易淬裂；杆体材料需要具备高强度、高韧性、高耐冲击性；热处理工艺复杂；杆体加工精度要求非常高。

此珩磨油石的制造难度在于：油石配方的选择，油石结合剂的选择，油石成型工艺的选择。

4. 珩磨及配珩程序

（1）配珩是以轴配磨孔的新型加工工艺，主要针对偶件加工。在传统的工艺中，对于偶件的加工，一般都是采用基孔制的加工工艺，即先加工完孔，然后把孔根据不同的公差分为若干个等级，并逐级进行配磨轴的外径。而配珩的工艺恰好相反，是基轴制的加工工艺，根据轴的直径进行配珩孔的直径。

众所周知，轴的加工要比孔的加工容易的多，在高精度机床发展较为迅速的今天， $\pm 1\mu\text{m}$ 轴的公差控制已经不算是一件很难的事情，这样对于偶件中轴的分级就会很少，2~3级就可以。如果根据轴的直径来配磨孔直径的工艺可以实现，那么对于生产偶件的行业将会是一场革命，会大大减少库存，降低成本。正是基于此点考虑，德国KADIA公司率先提出了配珩工艺，并制造出了配珩珩磨机。

（2）配珩零件的特性。目前，配珩工艺主要应用在油泵油嘴、共轨喷

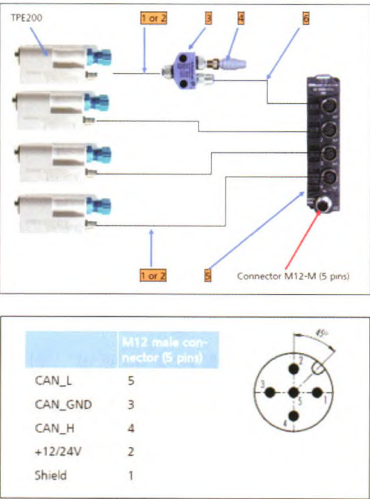


图 2



图 3



图 4

油器体、活门偶件等行业，主要集中在发动机核心部件区域。所需珩磨的零件一般精度要求很高，轴与孔的配合间隙很小（2~4μm），其轴的最后一道工序一般均采用目前较为先进的涂氟等新型加工工艺，处理完之后就是成品，不能再修磨外径。因此必须采用配珩加工此类偶件。

（3）实现配珩的前提条件。要想实现偶件的配珩，首先配珩珩磨机必须具备以下前提条件：具备

高精度的母机；具备精确到0.01mm的珩磨冲程自适应换向技术；具备精确到0.1μm的超精密进给驱动技术；具备精确到0.1μm的超精密测量技术；具备高速的数字控制、处理技术；具备高精度珩磨工具制造工艺技术；具备高精度珩磨夹具制造工艺技术；具备丰富的调试技术。

配珩珩磨机是一款复杂的机床，涉及的技术层面较多，主要涉及到：电控、气动、精密测量、冷却、润滑、高速下的抑振技术、动平衡、温度补偿等等。

5. 数字控制技术研究

采用NUM数控系统为机床工具行业开发的一个全新的CNC平台——NUMFlexium数控系统。

NUMFlexium数控系统的亮点如下：

（1）性能：先进的处理器装备了最新的NC内核（更多的MIPS指令）更多的内存空间（>60MB的NC内存，>1000MBPLC内存）标准化的通信方式（CAN，以太网）。

（2）与AxiumPower和NUMpower兼容：相同的零件程序相似的HMI（基于NUMPASSHMI）开放性（动态操作，特殊的G指令，特殊的M指令等）。

（3）灵活性：系统可以适用于用户的需求（NC选项，HMI选项），可以控制数量巨多的轴（>200）NC轴和PLC轴数量巨多的输入输出点用于多面板和CAD/CAM等的特殊操作系统。

（4）新的PLC使用IEC61131-3

标准编程扩展变量类型和目标编程用于集成和调试的先进的工具。

（5）设定/维修/售后服务先进的新工具软件‘lookandfeel’（替代Settool，WPM....）系统选项须通过网络得到远程诊断。

（6）3D模拟仿真：工具磨床（NUMroto），车削，铣削3D模拟仿真可以有离线和在线两种方式冲突检测。

项目成果

根据项目的目标和研究内容，公司组织人员分别对珩磨及配珩数控系统、超精密进给系统、在线测量系统、自动流水线系统、珩磨工具夹具制造技术、珩磨工艺技术等进行研究，设计开发出了粗珩、半精珩、精珩、超精珩模块化组合的四轴高精度数控立式珩磨机MK4230-4。该设备配备4个珩磨轴、6个测量轴、1个去毛刺轴、1条自动回流水线，共12个工位。

苏州信能借助04重大专项实施过程中掌握的丝杠伺服控制技术、超精密进给技术、超精密测量技术、精密配套工具夹具制造工艺制造技术、珩磨工艺技术等，陆续开发出系列单轴、双轴、三轴的珩磨设备，并销售到电装、本田、BOSCH等国际知名企业，以及国内的船舶、航空航天等领域，丰富了珩磨装备种类。

借助04重大专项，苏州信能掌握了一流的珩磨技术，提升了企业在行业内的影响力，迎来了大量订单，公司目前正加大研发力度，开发先进的珩磨装备，为拓展世界珩磨高端市场奠定了基础。AME