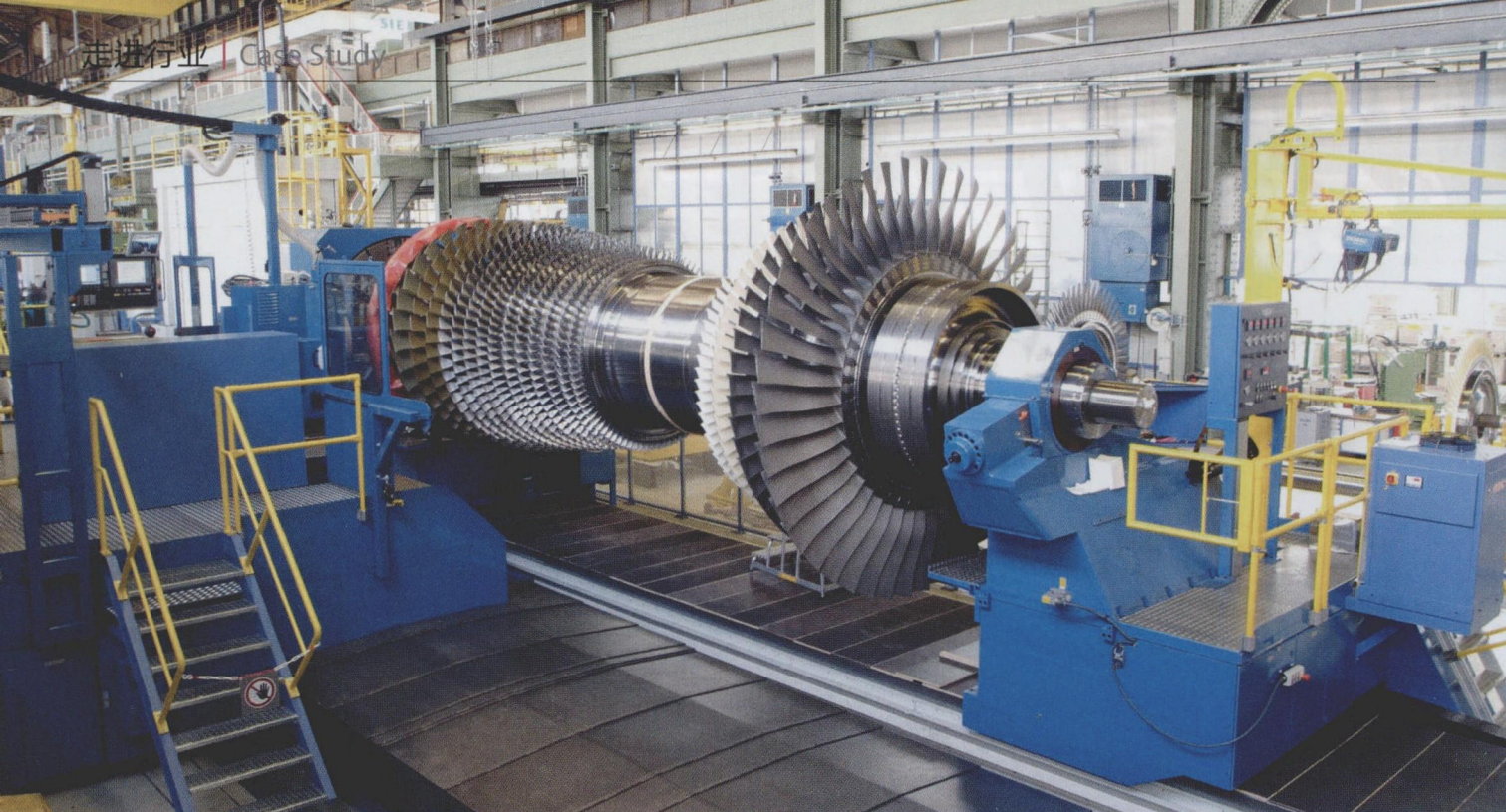




机床

Heinrich Georg 公司的车床设备

大型部件的精密加工

在加工大型部件时，并非公差范围，而是其他干扰因素对加工精度的影响越来越大。如何实现
对大型部件的精密加工，工业企业与 RWTH Aachen 大学机床设备实验室和 Fraunhofer-IPT 机构所
组成的联合工作组提出了这方面的要求。



更多精彩请扫描二维码

文 | Christian Brecher, Robert Schmitt 等

针对大型部件加工的公差范围在低位变动时，达到几个微米。精密加工可以提高诸如涡轮机、船舶和飞机等方面的制造效益，因此也成为发达国家的生产驱动力。对加工精度产生影响的一个主要影响因素便是机床设备和部件的不断变化着的热塑性状态。各种不同的内外热源及其下降都会对机床设备和部件的结构产生影响，例如在加工车间里因新部件送抵而开启车间大门，从而导致机床和部件的温度突降，如果说此类干扰源还可以被规划并可以相当容易地被克服的话，那么诸如加工废热和冷却润滑剂对机床设备和部件外形的影响则更加复杂。此外，大型部件还通常拥有一种“独特生活”的方式，这是

因为其局部的温度和膨胀状态要取决于数周前的加工历史状况。

复杂部件的独有特征 使得加工作业变得具有挑战性

与接受加工的大型部件自身情况相同，重量可达数百吨的大型机床工作台也会存储这种加工历史状态。设计与实际之间的偏差会贯穿于整个生产过程，从对供应厂商的评定、对合规的外购件的采购、企业内部的制造和安装，一直到发货，这是因为大型部件在运输过程中会受到其他环境因素的影响，并会以不同于离开生产工厂时状态的另外一种状态抵达用户那里。

迄今为止尚未有一种系统性的测定

和降低各种误差率的办法。对精密部件的加工需要用到广博的专业学识，而广博的专业知识通常唯有在企业中经过多年的实际工作经验的积累方可获得。而通过工作组方式的联合组织，可以在各个成员单位之间实现针对特定问题的经验交流。此外，通过研究单位与企业之间的紧密合作，可以形成新的对加工设备 and 部件误差的测量与补偿的创新性构想。

必须对重力和温度方面的 影响因素进行测定

从工艺技术角度上看，需要在生产系统的调节线路中增加更多的测量技术装备，以便获得更加全面的生产概观，

特别是对大型结构有着显著影响的重力和温度变化的因素必须得到测定。对此开发出了相应的计算模型，以便从数据中更加准确地评估出环境影响程度并推导出补偿、提前预报或避免发生偏差的对策。

借助于相应的软件技术，可以对部件、生产流程和生产系统之间复杂的物理关联性作出描述，并把这些关联性应用于对生产过程的自动监视和调节。当部件尺寸明显 $> 10\text{ m}$ 时，加工大型部件的现代机床设备即使在热稳定状态下也可能会在一位数的微米范围内出现定位误差。机床设备很少能够处于热稳定状态，这是因为机床设备通常会遭受到环境中很多热源因素的影响。铸件的膨胀系数大约为 $8\text{ }\mu\text{m}/(\text{mK})$ ，这与大型部件大尺寸的有效长度相结合，就会很快导致加工中的巨大位移。当长度为 5 m 时，偏差量就可达到 $40\text{ }\mu\text{m}/\text{C}$ 。

对测量技术进行智能化应用

机床设备的影响（如电机的散热）可以通过巧妙的设计进行被动的阻尼，或通过主动的温度调控而被维持在最低



图3 在旋转台上采用3D测量头对几何外形精度进行快速检测

的水平。但是，设备安装地点则往往更难被测定和被纠正。在这两种场合中，所出现的位移往往与位置有关，因此必需在整个设备系统中对此加以观察。对于可达到的部件质量来说，在各种温度状况条件下，因几何外形误差和位移所导致的机床设备在立体上的精度则是至关重要的。为了能够高效测得涉及到刀具3D位置的立体精度并相应提高控制水准，就需要用到最先进的测量技术。

对此，可以在数小时内对大型机床

设备的加工精度进行检测。例如这种检测可以用来在部件接受最终加工之前确保部件维持在允许的公差范围之内。对此，可以采用较长时间以来，一直应用于坐标测量设备定期监测的两种检测方法：针对长度偏差的沿空间对角线进行的激光测量和设置在机床工作台上的参照体扫描。

跟踪干涉仪自动校正激光光束

在投入使用跟踪干涉仪（激光跟踪仪或称 Laser-Tracer）并可把激光光束自动纠正到测量方向上时，激光测量就变得特别快捷。在数个小时之内，即可对一台体积为 $10\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的三轴机床设备的定位和直角偏差作出高精测定。

如果机床设备设有一个作为第四轴的旋转台的话，则可以在旋转台上方范围对机床设备的精度进行测量。对此，可以检查针对工作台不同角度的两个参照球体的位置偏差。通过采用测定球体位置的无接触3D传感器，此类测量只需不到 30 min 即可完成。

在每次测量时，应该根据当时情况作出考量，看是否中断生产来对设备进行短时间的检测比较经济，还是相反。对于错误加工很容易导致六位数损失的大型部件来说，这种前提条件几乎总是存在着。



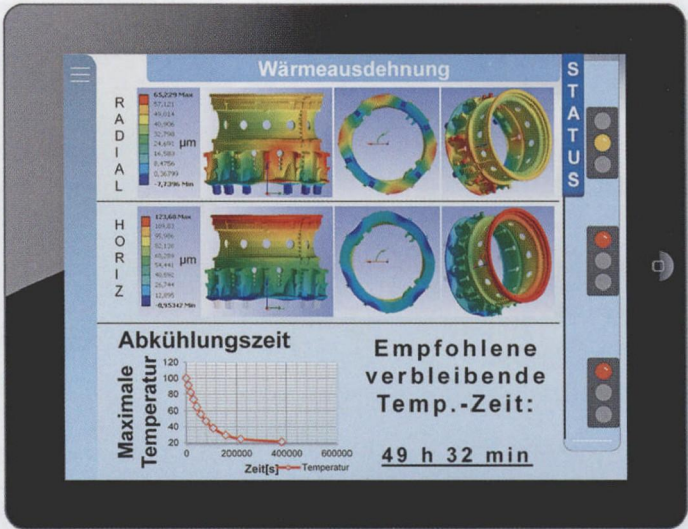
图2 工业企业联合工作小组（2015年）

生产环境中不稳定的温度条件会导致部件几何外形在时间和地点上的不恒定和热弹性方面的变化。由此可以造成明显的加工和测量的误差，特别是在对大尺寸部件的关键特征部位进行精密加工和测量的时候。热膨胀通常与部件的尺寸成正比例关系；但是对于一些特定的公差来说，这种关系并不适用，例如涡轮转子、涡轮机外壳和轮齿等。

对处于不同加工或安装步骤中且几何外形不容易加工的大型部件的测量往往是在一个没有空调的生产环境里进行的，这容易导致工件外形因热而发生变化。如果没有合适大小的空调测量室的话，后一种情况同样也会发生在最终检验过程之中。但是，即使为了测量几何外形而把部件输送到一个温控环境里的话，也需顾及到部件的热弹性特性。如果是一个大型部件的话，与部件几何外形相关、主要由环境变化或所储存的生产热能而导致的温差的调温时间可能需要好几天时间，但往往不为人所知，因此也往往无法被遵守。这在安装过程中可能会产生问题，例如在安装涡轮转子和外壳时，可能会错过本来需要进行返工的机会，或者用户在验收时得出了有问题的测量结果。

在工作小组的框架范围内，针对联合研究项目开发出了一种直观的软件。

图 5 有关温度和温控时间方面的信息



这种软件可以帮助工人们在进行下一个加工步骤或在对几何外形的中间或最终测定之前，对部件的热弹性偏差进行测定和评判。工业企业的合作单位可以在大型部件的加工和检测标准化领域内发挥先锋作用，并为将来规范或标准所将提出的要求作最佳的准备。

用于部件检测的特种测量器械或坐标测量装置的使用在时间和费用方面的成本都是比较高的，在两个生产步骤之间的测量也并非随时都能够可行。同时，现代机床设备通常在轴上都拥有高精线性测量系统。为何不能把机床设备用作坐标测量装置呢？可反馈性是研究的核心要点。唯有通过反馈，测量结果方为有效和具有可对比性，并可通过对测量

误差的归类而被用于对生产流程的定量分析和质量保证。

快速的校准方法促进事态转变

对设备的详尽了解、所使用的扫描系统、环境条件和测量任务等构成了观察工作的基础。对测量误差的确定也需要顾及到此前所述的机床设备的不安全因素、部件和校准方法以及在一个系统性的工艺过程中的评价方法等。通过对机床设备的更加快速和更具创新性的校准方法的开发和对传统坐标测量技术方法的改良，应该可以取得良好的事态转变效果和可行且便于应用的技术解决途径。因此，在工作小组的相关项目工作中，对有关在大型机床设备上反馈测量的规范进行了继续研发，以便可以向用户提供一种实用的技术体系。

规范首先面向精度要求高的大型部件制造厂商，并与其面临的挑战相匹配。要求很高的大型部件是指那些在尺寸上要求加工设备的轴长 > 1 m、相对来说其公差范围较小或小批量或只加工单件的部件。规范应该有助于企业很好地应用工作小组在“机床设备和部件的热性能”和“测定机床设备精度的快速测试”方面的知识，来实现把机床设备用作坐标测量装置的目标，并找到一条迈向 VDI 标准化和规范化的途径。MM



图 4 采用跟踪干涉仪对龙门加工设备的几何外形精度进行快速检测