

# 降低凸轮轴轴颈圆度超差率的有效措施

■ 南京汽车集团有限公司（江苏 210061） 胡劲松

**摘要：**我厂的NSE凸轮轴生产线是目前比较先进的机加工生产线，凸轮轴轴颈的粗、精加工均采用了无心磨技术，新技术的运用有助于生产效率的提高和产品质量的改进。针对凸轮轴轴颈在无心磨后圆度超差的问题，本文通过一个典型的质量攻关案例，介绍了降低凸轮轴轴颈圆度超差率的有效措施。



机加工生产部技术主管 胡劲松

凸轮轴（见图1）是发动机的主要零件之一，其作用是：通过传动机构（链轮、正时链条及挺柱等），准确地按一定时间控制气门的开启与关闭，保证发动机按一定规律进行换气。

## 1. NSE凸轮轴生产线

NSE凸轮轴生产线共有14



图1 凸轮轴

台加工设备，11道加工工序（见图2）。凸轮轴轴颈的粗、精加工均采用德国JUNKER（Jupiter 500）无心磨床，鉴于无心磨的自定心加工特性，磨削时以轴颈外圆作为定位基准。凸轮轴轴颈的粗磨采用电镀CBN砂轮，无需修整，自锐性好；凸轮轴轴颈的精磨采用陶瓷CBN砂轮，加工精度高，加工效率高。凸轮轴凸轮的磨削采用德国JUNKER（6L10S2）双工位双砂轮凸轮磨床，使用国内直径最大的高速CBN砂轮。全线大量采用上下料机械手，自动化程度较高，生产线采用鱼刺型布置，方便后期扩能。设备使用半干式和油冷却加工，清洗机采用油清洗，全线生产只需一种切削液，采用集中过滤的方式。该条生产线工艺规划的产能为25万台/年。

## 2. 无心磨加工工艺

无心磨技术应用在凸轮轴轴颈加工是21世纪初国际上开始流行的一种新技术、新工艺，对于提高凸轮轴加工效率、降低刀具消耗发挥了重要作用。无心磨生产效率高，加工基准与设计基准统一，工艺简化，以磨代车，减少了设备使用台数。无心磨床是不以工件的轴心进行定位的外圆磨床，它主要由砂轮、导轮和托架等3个主要机构组成，砂轮承担对工件的磨削工作，导轮控制工件的旋转和进给。在磨削过程中，工件在导轮和托架之间能够实现自定心（见图3），其中X1表示砂轮架的横向进给；X2表示导轮架的横向进给；SP1表示砂轮旋转；SP2表示导轮旋转；SP3表示金刚石滚修整器旋转；U1表示砂轮修整器的横向进给；W1表示砂轮修整器的纵向进给；U2表示导轮修整器的横向进给；W2表示



图2 NSE凸轮轴生产工艺流程

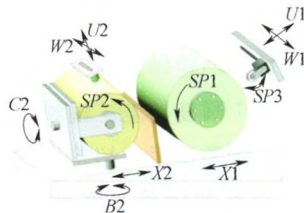


图3 无心磨加工原理

导轮修整器的纵向进给；C2表示导轮架倾斜（手动调整），B2表示导轮架的回转。

与普通外圆磨床相比，无心磨床具有以下特点：①可连续加工，无需退刀，装夹工件时间短，生产率高。②其托架和导轮定位机构比普通外圆磨床顶尖和中心架的定位机构支承刚性好，切削量可以较大，并有利于细长轴类工件的加工，易于实现高速磨削和强力磨削。③其工件靠外圆在定位机构上进行定位，磨削量是工件直径上的余量，故砂轮的磨损、进给机构的补偿和切入机构的重复定位精度误差对零件直径尺寸精度的影响只有普通外圆磨床的一半，不需打中心孔，且易于事先上、下料自动化。④宽砂轮无心磨床可采用加大每次的加工余量，在切入磨时可对复杂型面依次磨削或多砂轮磨削，生产率高，适用范围广。

3. 现状调查与目标设定

2015年1~3月，凸轮轴生产线的工废率一直居高不下，平均达0.55%，超过0.5%的工废指标。对不合格品进行了类别统计，发现轴颈圆度超差的数量占不合格品总数的比例为46.87%，位列工废率首位，如果减少轴颈圆度超差率，就可以大幅度降低整个凸轮轴生产线的工废率，所以选定“降低凸轮轴轴颈圆度超差率”作为攻关课题。

(1) 凸轮轴轴颈圆度超差统计。凸轮轴轴颈圆度超差包括：轴颈Ⅰ圆度超差、轴颈Ⅱ圆度超差、轴颈Ⅲ圆度超差、轴颈Ⅳ圆度超差和轴颈Ⅴ圆度超差。根据统计：2015年1~3月凸轮轴

轴颈圆度超差率的平均值达到0.22%，其中轴颈Ⅰ圆度超差的比例高达87.9%。所以如果解决了轴颈Ⅰ圆度超差问题，就可以大幅降低凸轮轴轴颈圆度超差率。

(2) 凸轮轴轴颈圆度的工艺要求。OP40（精磨轴颈）的工艺规定：五挡轴颈的圆度均小于0.005mm（见图4）。

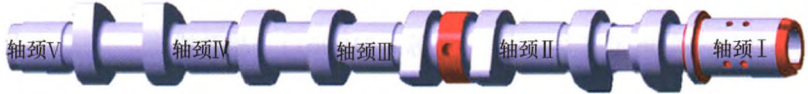


图4 凸轮轴的各挡轴颈

(3) 过程能力分析。Q—DAS软件对轴颈Ⅰ的圆度尺寸进行了过程能力分析，样本数为200，分析结果是：过程能力指数（CPK值）仅为1.02（见图5），不能满足工序能力1.33的要求。

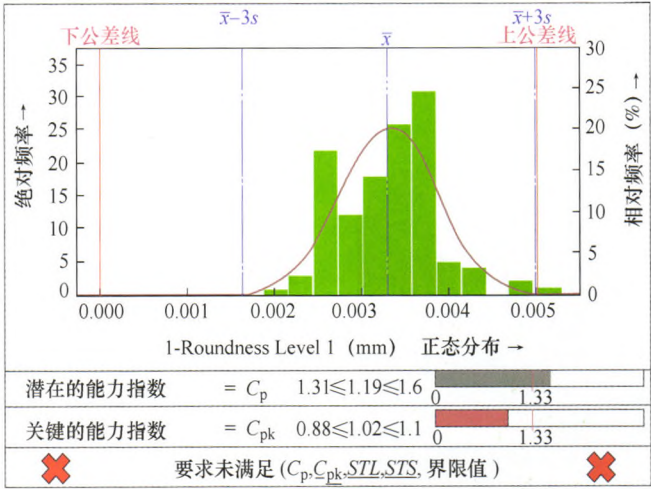


图5 改进前SPC分析

2015年1~3月，轴颈Ⅰ圆度超差的占比为87.9%。如果解决该问题，由计算得知：轴颈圆度超差率可降低到0.026 6%。因此，将本次的攻关目标设定为：凸轮轴轴颈圆度超差率小于0.03%，是可行的。

4. 原因分析与要因确认

通过头脑风暴法，针对轴颈Ⅰ圆度超差的原因进行了讨论，绘制了因果分析的鱼刺图，共列出9条末端因素，制定了要因确认计划表（见表1），具体确认过程如下。

表1 要因确认计划表

| 序号 | 末端因素     | 确认方法   | 确认标准                  | 确认时间  | 确认地点 |
|----|----------|--------|-----------------------|-------|------|
| 1  | 砂轮修整速度慢  | 工艺对比试验 | 轴颈圆度≤0.005mm          | 4月08日 | OP40 |
| 2  | 导轮修整量不足  | 现场检查   | 修整覆盖率：100%            | 4月12日 | OP40 |
| 3  | 砂轮与导轮不平行 | 现场检查   | C2轴具备自动修正功能           | 4月15日 | OP40 |
| 4  | 导轮表面粘切屑  | 工艺对比试验 | 轴颈圆度≤0.005mm          | 4月22日 | OP40 |
| 5  | 切削液压力不足  | 现场检查   | 切削液压力≥0.2MPa          | 4月24日 | OP40 |
| 6  | 托架表面磨损   | 现场检查   | 托架表面无磨损               | 4月26日 | OP40 |
| 7  | 托架安装不到位  | 现场检查   | 安装间隙≤0.02mm           | 4月28日 | OP40 |
| 8  | 轴颈粗磨直径超差 | 现场检查   | 轴颈Ⅰ的粗磨直径φ28.3~φ28.4mm | 5月02日 | OP10 |
| 9  | 前端面垂直度超差 | 现场检查   | 前端面垂直度≤0.10mm         | 5月07日 | OP20 |

(1) 末端因素一（砂轮修整速度慢）的确认过程：在砂轮修整速度为500mm/min（工艺规定）和700mm/min（临时加快）的两种状态下，分别磨削了20根凸轮轴，由测量结果可知，砂轮修整速度提高后，轴颈的圆度未发生显著改善，结论是非要因。

(2) 末端因素二（导轮修整量不足）的确认过程：先用记号笔在导轮表面涂上記号（沿导轮表面的圆周画整圆），然后手动修整导轮，修整完毕后打开机床安全门进行观察：导轮表面无色标，导轮的修整覆盖率为100%，结论是非要因。

(3) 末端因素三（砂轮与导轮不平行）的确认过程：通过HOMMEL在线量仪观察到，当轴颈Ⅰ和轴颈Ⅴ的直径差大于0.005mm时，机床的控制系统根据反馈的直径尺寸自动计算出工件斜度，导轮的B2旋转轴则根据斜度自动完成参数补偿，从而保证了导轮相对砂轮的平行度，结论是非要因。

(4) 末端因素四（导轮表面粘切屑）的确认过程：在导轮表面“无切屑”和“有切屑”的两种状态下，分别磨削了20根凸轮轴，由测量结果可知，导轮表面粘有切屑后，轴颈圆度显著劣化，圆度的平均值增加了2μm，并且出现两根圆度超差件，结论是要因。

(5) 末端因素五（切削液压力不足）的确认过程：检查了切削液的压力监控表，显示值为2.4bar，符合日常的TPM设备点检要求，结论是非要因。

(6) 末端因素六（托架表面

磨损）的确认过程：目视检查了无心磨床的托架表面，与凸轮轴轴颈接触的5个斜面完好如初，无任何磨损痕迹，结论是非要因。

(7) 末端因素七（托架安装不到位）的确认过程：目视检查了托架安装情况，发现托架前端与托架定位槽的侧面有明显间隙，用塞尺测量了安装间隙，达0.1mm，不符合要求，结论是要因。

(8) 末端因素八（轴颈粗磨直径超差）的确认过程：在OP10用专用检具连续检测了100根粗磨轴颈后的凸轮轴，轴颈Ⅰ的直径100%满足工艺要求，结论是非要因。

(9) 末端因素九（前端面垂直度超差）的确认过程：在OP20用专用检具连续检测了100根铣削两端面后的凸轮轴，前端面的垂直度100%满足工艺要求，结论是非要因。

5. 实施改进

最终确认造成轴颈Ⅰ圆度超差率高的主要原因是导轮表面粘切屑和托架安装不到位。针对这两个要因，研究制定了相应的对策（见表2）。

(1) 锁定切屑来源，落实手工去屑手段。①对粘在导轮上的切屑进行了形状甄别，锁定这些伞状的切屑来自于OP30，系钻油孔后的孔口残留翻边，后经OP40上料时的高压油喷淋，冲刷至导轮表面（见图6）。②对OP30工件周转小车进行了改装，通过焊接安装了1把尼龙刷（见图7）。工件加工完毕后，要求操作工将工件的前端孔套在尼龙刷上，通过手工旋转，去除孔内的残留翻边（毛刺）。经现场确认，效果明显。

(2) 锁定托架定位的磨损处，消除安装间隙。①在托架定位槽内

表2 要因对策表

| 序号 | 要因      | 对策          | 目标              | 措施                | 地点   | 完成日期  |
|----|---------|-------------|-----------------|-------------------|------|-------|
| 1  | 导轮表面粘切屑 | 解决导轮表面粘切屑问题 | 导轮表面 100% 无切屑   | 锁定切屑来源，落实手工去屑手段   | OP30 | 5月28日 |
| 2  | 托架安装不到位 | 消除托架安装间隙    | 托架安装间隙 < 0.02mm | 锁定托架定位的磨损处，消除安装间隙 | OP40 | 5月28日 |

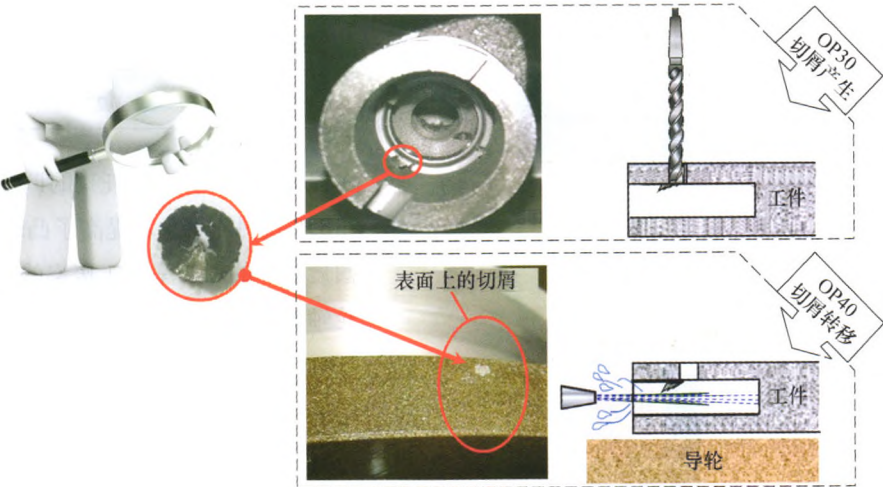


图6 切屑的产生和转移

涂抹红丹粉（见图8）。②手工推动托架沿定位槽作往复运动（见图9）。③发现定位槽侧面有红丹粉印记，该印记就是定位槽的磨损处（见图10）。④检测托架定位槽的磨损量，用等厚度铜皮垫在磨损处（最好是用平面磨床把定位槽侧面重新磨平），达到消除安装间隙的目的（见图11）。

（3）工艺验证。为了验证上述措施的实施效果，组织了一



图7 工件周转小车

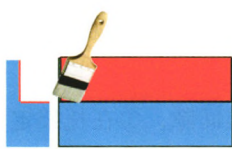


图 8

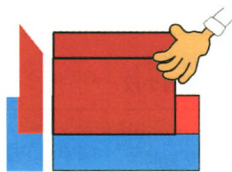


图 9



图 10

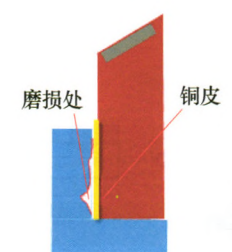


图 11

次过程能力测试，连续检查200根凸轮轴的轴颈 I 圆度，并进行了SPC分析，结论如图12所示：①轴颈圆度100%合格（轴颈圆度 $\leq 0.005\text{mm}$ ）。②轴颈圆度的CPK值为2.21，过程能力满足要求。

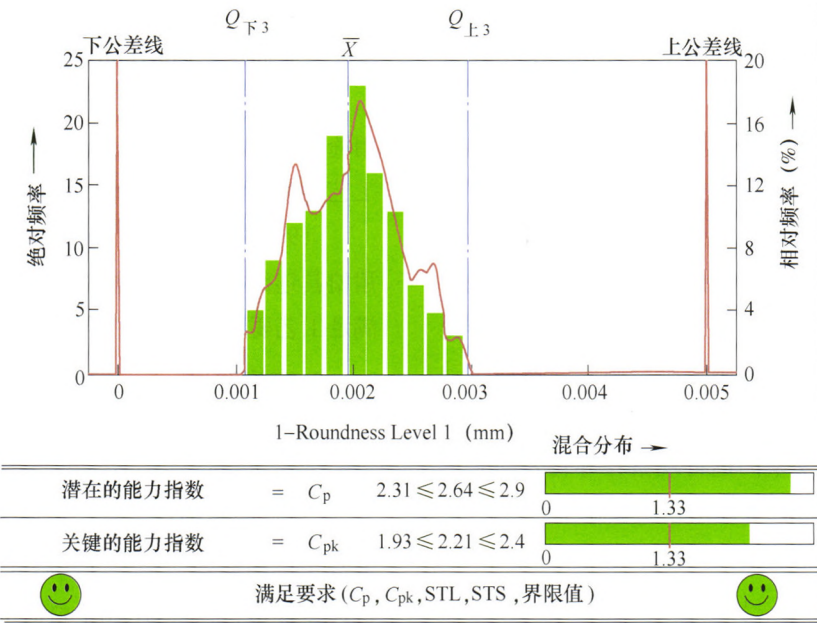


图12 改进后SPC分析

6. 效果检查

根据统计（见表3）得知：凸轮轴轴颈圆度超差率由措施实施前的0.22%（1~3月的平均值）降至措施实施后的0.016%（6~8月的平均值），达到了预期的攻关目标。

表3 2015年1~8月凸轮轴轴颈圆度超差率统计表

| 时间<br>项目 | 措施实施前  |        |        | 措施实施中  |        | 措施实施后  |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 1月     | 2月     | 3月     | 4月     | 5月     | 6月     | 7月     | 8月     |
| 生产数量 / 根 | 22 000 | 24 000 | 25 000 | 23 000 | 24 000 | 22 000 | 23 000 | 25 000 |
| 超差数量 / 根 | 40     | 55     | 62     | 32     | 25     | 4      | 4      | 3      |
| 超差率 (%)  | 0.182  | 0.229  | 0.248  | 0.139  | 0.104  | 0.018  | 0.017  | 0.012  |
| 平均值 (%)  | 0.220  |        |        | 0.122  |        | 0.016  |        |        |

经过改进，换型时托架的调整时间显著下降，OP40的设备综合利用率由83%提升至87%；提高了凸轮轴生产线OP40的工序能力，降低了轴颈圆度超差的工废率；工废率的下降和生产效率的提升，有效地降低了凸轮轴生产线的生产成本。MW

（收稿日期：20151026）