微补偿技术在曲轴轴向圆跳动控制中的应用

王佳伟，朱平
中车资阳机车有限公司　四川资阳　641301

摘要：分析了在重工业曲轴生产中，由于机床行程或精度受限，图样一些部位的加工很难达到图样设计要求，所以对于一些特殊部位的加工，需要花费高昂费用改进机床结构的难点。通过开发微补偿加工技术，可以在不增加成本的基础上，确保产品的制造精度达到图样设计要求。

关键词：微补偿；机械制造；几何公差；轴向圆跳动

1　序言

某柴油机曲轴两端结构如图1所示，曲轴总长4570mm，成品质量2950kg。端面*D*要求对基准*A*和*B*全跳动0.04mm，端面*C*是在磨床上磨削加工，跳动为0.01mm，与端面*D*连接的是一个1000mm长的连接轴。端面*D*的跳动会影响装配在端面*D*上的连接轴外圆的跳动，并直接影响发动机的输出功率、整机动平衡和可靠性。

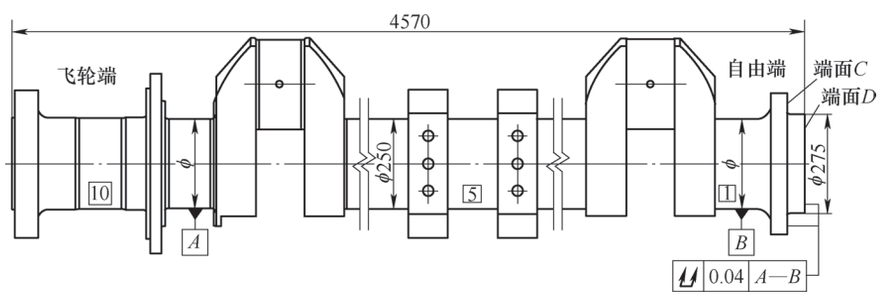

图1　曲轴两端结构

在试制过程中发现，端面*D*受到磨床行程限制，无法在磨床上磨削加工，改造磨床短时间内无法完成，并且改造成本较高。端面*D*在车床上加工时全跳动始终达不到图样设计要求。在车床上对图中ϕ275mm外圆跳动和支撑中心架找正0.02mm，图中端面*C*的跳动最好只能找正在0.06mm。端面*D*车削后跳动最好只能达到0.08mm，与图样要求的0.04mm相比超差一倍，且找正时间较长，无法满足批量生产。

2　曲轴轴向圆跳动超差分析

端面*D*车削时超差的主要原因：①加工基准面*C*无法找正到0.02mm以内。②机床中心架数量较少，曲轴受到重力影响，在车削时出现挠度变形（见图2），无法将曲轴中心轴线找正水平，曲轴端面*D*和曲轴旋转中心线处于不垂直状态。③只有两个中心架，无法做到每个轴颈都支撑并把曲轴实际中心线找水平，而且每个轴颈都做支撑也不符合实际加工要求。由此可见，车床加工端面*D*时如果有足够的中心架和找正时间，将曲轴实际中心轴线找正到理论中心轴线位置，就可以满足图样精度要求，但不满足实际生产制造节拍。为此需要探索新的端面加工方式。

曲轴轴向圆跳动超差，实际就是端面上存在

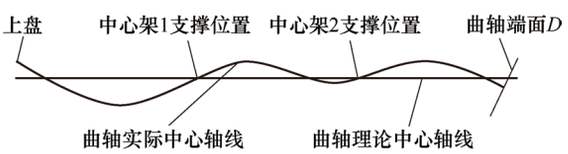

图2　曲轴车削过程挠度变形示意

高点和低点，高点与低点之间落差超过图样设计要求。要保证端面D的跳动要求，一是要找到端面上的高、低点，二是需要消除高点。因此可以通过逐层铣削端面的方式，以端面C为基准，端面D通过补偿铣削高点的方式保证轴向圆跳动要求。

3　曲轴轴向圆跳动控制及微补偿技术开发

3.1　端面铣削加工试验

端面铣削数控加工设备：西班牙镗铣加工中心；设备操作系统：SIEMENS 840D；装夹定位方式：机床3个中心架分别支撑图1中曲轴1、5、10主轴颈，中心架采用液压夹紧。端面C和端面D上有孔系加工，为方便使用机床cycle循环，此处使用坐标系旋转，将垂直于端面D的坐标轴设定为Z轴。

通过多次在镗铣加工中心的铣削加工试验发现，端面铣削高、低点的连线经过圆心，如图3所示。连线HL一端为高点，一端为低点，其中β为任意角度，高点与低点的差值为0.04～0.20mm的随机数值。

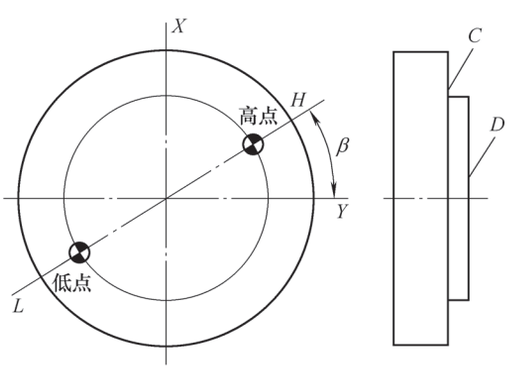

图3　试验加工时曲轴端面铣削结果示意

使用微补偿高点消除法满足轴向圆跳动要求，铣削时刀具每刀铣削宽度范围内高、低点差值不能超过0.04mm。端面D最大外圆为275mm，试验发现端面D铣削最大跳动值为0.2mm，为保证轴向圆跳动在0.04mm以内，需要将0.2mm跳动高点至少分为0.2/0.04=5段逐渐消除，将每段跳动控制在0.04mm以内。刀具最大直径D_{max}=275/5mm=55mm，考虑到D50mm铣刀为车间现有和常见刀具，最终选择D50mm铣刀。

实际加工时，端面精铣分为两步进行。第一步是寻找跳动高、低点。铣削时控制深度坐标轴不变，按照图4中刀路M_1、M_2……M_6进行铣削。铣削后使用深度游标卡尺测量端面C与D之间的高度差，测量P_1、P_2……P_8共8个位置点（每45°一个测量点），测量值分别为H_1、H_2……H_8，记录并找出最大值和最小值。如测量发现P_2点为最高点，数值为H_2，则P_6点为最低点，数值为H_6。

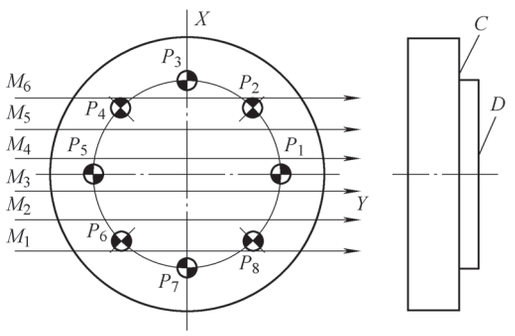

图4　铣削刀路及测量位置示意

第二步是消除高点。铣削时将坐标系的一个坐标轴旋转到高、低点连线方向，控制铣削深度沿坐标轴逐层变化，按照图5中刀路M_1、M_2……M_6进行铣削。M_1刀路铣削时控制深度坐标轴Z=0，M_2刀路控制铣削深度坐标Z=－（H_2－H_6）/5，M_3刀路控制铣削深度坐标Z=－2（H_2－H_6）/5，以此类推，M_6刀路控制铣削深度坐标Z=－（H_2－H_6）。

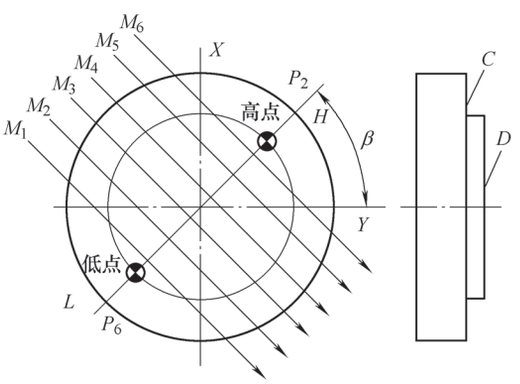

图5　微补偿时曲轴端面铣削示意

按照以上步骤，M_1～M_6每层刀路都将保证端面D与端面C之间的距离控制在相同值，并逐渐将P_2处的高点消除，保证端面C与端面D之间的高度一致，从而保证端面D的跳动值。

试验发现当修正数值比较小时（＜0.08mm），也就是第一次铣削完轴向圆跳动比较小时，容易出现两个高点或两个低点，此种情况下可以任意选择一个高点方向作为修正角度，微补偿后都可以满足图样要求。但如果需要加工更高精度要求的端面时，需要提高测量量具精度并排除测量误差，找到高点和低点，具体操作和以上方法类似。

3.2　端面微补偿铣削数控加工程序设计

在数控加工程序编制时，为保证程序的通用

性，满足所有随机β角度方向的补偿，在编制程序时引入坐标系旋转（在之前钻孔的坐标系旋转之后，再次进行坐标系旋转），并把坐标系旋转值设定为变量R30，在主程序或R参数中通过修改变量值，达到修正铣削高点角度的目的。由于高点H与低点L之间的差值每次都是随机变化的，所以在主程序中将H与L之间的差值设定为变量R2，满足随机高低差值的铣削补偿。数控加工主程序如下。

```
;*** FINISH  MILL  PLANE *******
N10 G54
N20 M115
N30 T41 D1
N40 M6
N50 HEAD_C1(-180)
N60 HEAD_C2(90)
N70 TRANS X-48
N80 AROT Y-90
N90 M114
N100 G0 Z100
;First processing
N110 R1=275; 端面D外圆直径
N120 R2=0 R30=0; 角度和高度差修正值，第一次铣削设定为0
N130 m0
N140 stopre
N150 FINISH_MILL_PLANE;铣削子程序
N160 M0; 测量记录端面高低点差值及角度方向
;Second processing
N170 R2=0 R30=0
N180 M0; 程序运行到此处时，修改机床R参数表中的R2和R30参数
N190 stopre
N200 FINISH_MILL_PLANE; 铣削子程序
N210 trans
N220 M115
N230 M30
```

数控加工子程序内容如下。

```
;FINISH_MILL_PLANE; 子程序内容
N10 R10=2*$P_TOOLR-4; 排除刀片刀尖半径，设定铣削时刀具有效直径
N20 R11=trunc(R1/R10)
N30 if((R1/R10)>R11); 设定刀路铣削次数
N40 R12=R11+1
N50 else
N60 R12=R11
N70 Endif
N80 R13=R1/R12
N90 G0 Z100
N100 Y=0
N110 X=0
N120 G0 Z50
N130 M03 S700 M8
N140 R20=0; 铣削刀路计数器
N150 AROT Z=R30; 根据高低点角度修正端面铣削时坐标系旋转角度
N160 _start_MILL:
N170 g1 Y=-sqrt(pot(R1/2+$P_TOOLR)-pot(R1/2-R13/2-R13*R20))-5 f2000
N180 X=R1/2-R13/2-R13*R20
N190 Z=0-(R2/(R12-1))*R20 F800; 修正铣削深度补偿
N200 Y=sqrt(pot(R1/2+$P_TOOLR)-pot(R1/2-R13/2-R13*R20))+5 f200
N210 Z=5 F800
N220 R20=R20+1
N230 if(R20<R12)
N240 gotoB _start_MILL; 跳转铣削下一层端面
N250 Endif
N260 AROT Z=-R30; 取消端面铣削时的坐标系角度旋转
N270 G0 Z100 M05 M9
N270 M17
```

4　结束语

通过以上方法加工完成后，在卧式车床使用两个百分表同时对端面D和端面C的相同角度位置进行跳动检测。两个百分表相同角度位置指针读数变化在0.02mm以内，磨削表面C跳动在0.01mm以内，最终端面D跳动0.03mm，达到图样要求的全跳动0.04mm。本文所述微补偿端面铣削加工方法，提出了一种新的加工精度控制理念，可以推广应用到其他需要保证精度的类似部位的加工中。

参考文献：

[1] 王先逵．机械制造工艺学[M]．2版．北京：机械工业出版社，2007．

MW 20210202