

# 曲轴定心与动平衡技术的探讨

于 涛<sup>1,2,3</sup> 仲继明<sup>3</sup> 王海峰<sup>4</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2 中国科学院研究生院;  
3.机械工业第九设计研究院 4.哈尔滨东安汽车发动机制造有限公司)

【摘要】对曲轴定心的两种工艺——几何定心和质量定心进行研究,指出不同的定心方式对动平衡工序的影响不同,并对动平衡工序去重量的影响因素进行分析,得出了动平衡工序节拍的计算方法。通过对发动机生产厂家的生产实例以及对国外定心工艺发展趋势进行比较可知,在曲轴毛坯状态较好的情况下,当加工面积比较小时,可采用质量定心工艺,加工面积比较大时,可采用几何定心工艺。

关键词:曲轴 工艺 动平衡

中图分类号:U464.133+.3 文献标识码:A 文章编号:1000-3703(2006)05-0039-04

## The Discussion of Crankshaft Alignment and Dynamic Balance Technology

Yu Tao<sup>1,2,3</sup>, Zhong Jiming<sup>3</sup>, Wang Haifeng<sup>4</sup>

(1.Chinese Academy of Sciences Changchun Optics Precision Machinery and Physics Research Institute;  
2.Chinese Academy of Sciences Postgraduate College 3.Machinery Industry No.9 Design Institute;  
4.Harbin Dong'an Engine Company)

【Abstract】Study two kinds of technologies for crankshaft alignment—geometry alignment and mass alignment, point out that dynamic balance working procedure is affected by different alignment type, and analyze the effect factor of dynamic balance working procedure weight loss, and get the calculation method of dynamic balance working procedure tact. Through the comparisons of actual production in engine manufacturer and of development trend of foreign alignment technology, conclude that in the good condition of crankshaft blank, when the machining surface is small, use mass alignment, when the machining surface is big, use geometry alignment.

Key words: Crankshaft, Technology, Dynamic balance

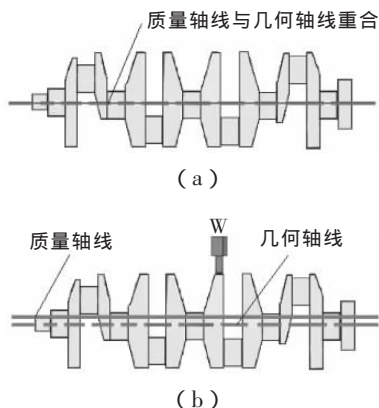
### 1 不平衡量的确定

曲轴是发动机中高速回转部件,而曲轴由于不平衡产生的振动与其转速的平方成正比。振动会导致轴承承受的负载增加、消耗的功率增加并降低轴承的寿命,振动增加工作时的噪声,使零件从总成上松动并产生疲劳失效等。对高速旋转的零件进行动平衡的目的是消除或减小振动。因此,曲轴平衡精度的高低对发动机的振动、运行平稳性及寿命都有很大的影响。

在加工轴颈前,曲轴需要进行端面 and 中心孔的加工。因为中心孔是后续加工工序的主要工艺基准,它的精度对后续工序特别是对动平衡工序和各加工表面余量分布产生很大影响。

几何轴线是由支撑旋转体的两个轴颈的几何中心点所决定的轴线。如图 1a 所示,当旋转体完全对称时,质心将位于其轴线的中点,与几何中心重合,如果旋转体不受轴承限制,将围绕其几何轴线旋转;

如图 1b 所示,在旋转体的中心部位上放置重块 W,质心将发生改变,质量轴线将与几何轴线平行,但径向偏移一个距离,如果旋转体不受轴承约束,将绕质量轴线旋转;如图 1c 所示,如果重块 W 置于旋转体的一端,质心在径向和轴向均会发生偏移,偏移量与重块 W 的质量成比例关系。在自由状态下,旋转体将绕质量轴线旋转(图 1c)。



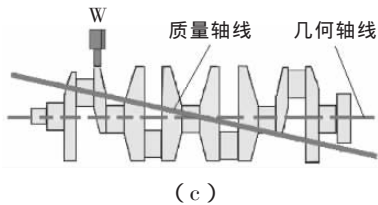


图 1 曲轴的几何轴线和质量轴线

不仅要求曲轴静平衡,而且要求其动平衡。所谓静平衡就是当质量系统旋转时离心力合力等于零,即系统的质心(重心)位于旋转轴线上。但当旋转质量不在同一平面时,静平衡不足以保证运转平稳。只有当系统旋转时的旋转惯性力合力及合力矩均为 0 时才完全平衡,这样的平衡叫动平衡。内燃机旋转质量系统必须保证动平衡,否则将引起很大振动,并使轴承和支承过载。

当曲轴处于不平衡状态时,其质量轴线与旋转轴线不重合。而动平衡工序就是在不平衡的曲轴上,通过去除材料或重新分配质量使其达到平衡状态。

对于一个给定物体的不平衡量,可以用一个给定半径的确定质量来表示。如图 2 所示,设物体的附加重物 W 的质量为 G,它与质量轴线的距离为 R,则不平衡量为:

$$M=GR \tag{1}$$

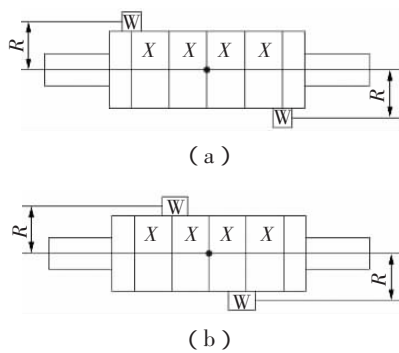


图 2 物体的不平衡量与修正位置的关系

当处理动态不平衡时,必须增加一个限制条件,以便精确地定义平衡极限。

如图 2a 所示,重块 W 置于旋转体上,其重心与旋转体轴线的距离为半径 R,与旋转体中点的距离为 2X。图 2b 中重块与旋转体中点的距离为 X。

在不平衡量为 GR 的情况下,如果仅按式(1),则图 2 所示的两个旋转体对于给定的不平衡条件一致。但是这两个旋转体明显有一个不同的平衡条件,所以必须规定一个进一步的限制条件。在确定动态平衡极限时,有 2 种方式定义限制条件:一是确定修正位置(修正点的轴向位置);二是确定动态不平衡量。

如果所考虑的旋转体不平衡量为 GR,且在距中点 2X 的平面上,则图 2a 所示情况将满足条件,但图 2b 不满足。因此,确定修正平面以及允许的修正极限将完全定义动态不平衡量。

如果动态不平衡量定义为  $GR \cdot 4X$  ( $g \cdot cm^2$ ),则图 2a 所示的旋转体将满足条件,图 2b 将不满足,因为它的动态不平衡量是  $GR \cdot 2X$ 。

如果没有确定专门的修正平面,那么动态不平衡量将精确地定义允许的动态不平衡极限,进行动平衡工序的人员可通过自己的判断在适当的位置进行修正。更为常见的方法是尽可能在零件的两个端头选择两个修正平面,以减小必要的修正量。

## 2 曲轴定心工艺

### 2.1 传统工艺

以曲轴两端主轴颈外圆定位所钻出的中心孔为几何中心孔,形成的轴线为曲轴的几何轴线。如果在动平衡-钻中心孔机床上先找出曲轴的质量轴线,按其所处位置钻出的中心孔则为质量中心孔。曲轴可以分别按照几何中心孔和质量中心孔来定心。

在产品多变的情况下,采用几何定心法可适应多品种生产且机床利用率高、经济性好。采用质量定心加工曲轴的主要优点是:减少曲轴动平衡时的去重量,提高动平衡的合格率等。但是质量定心机床比普通钻几何中心孔机床的价格要高很多。采用哪种定心方法更合理,这必须根据曲轴的形状、加工表面积、毛坯质量、加工要求和可能修正的不平衡量等因素来决定。

曲轴的加工表面积与不平衡量的关系如图 3 所示。一般认为,当曲轴的加工表面积小于 40 % 时采用质量定心法,大于 40 % 时采用几何定心法能够满足要求。

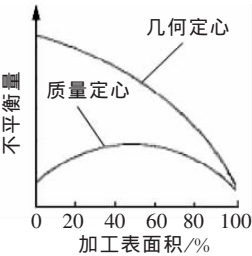


图 3 曲轴加工表面积与不平衡量的关系

### 2.2 曲轴定心工艺的发展状况

最初曲轴采用几何定心方式时,由于毛坯精度、曲轴的结构以及几何中心孔位置精度等原因,使几何轴线偏离质量轴线,造成曲轴在动平衡时去重较

多,废品率较高。随后,质量定心引入到曲轴生产中,动平衡前的不平衡量大大降低,但质量定心机床价格比较昂贵。随着毛坯质量的提高,轴颈加工技术也得到发展,可以在很短的生产节拍内完成曲轴的主轴颈、连杆轴颈、沉割、轴肩及平衡块外圆的加工。又由于曲轴的外表面均需加工,加工表面积不断增大,因此几何定心又得以大量采用。也就是说,毛坯质量的改进和轴颈加工技术的发展带动了产品设计观念的改变及定心技术的发展,曲轴的定心工艺也经历了从几何定心-质量定心-几何定心这样一个过程。

同时,作为辅助手段,在曲轴加工前有3种方式可以控制曲轴动平衡前的初始不平衡量:采用在线质量平衡机;采用离线平衡测量机,采集、统计数据,手动调整中心孔位置;根据最终的动平衡机采集数据,调整中心孔位置。但是,由于最终动平衡工序是在整个曲轴工艺过程的最后,所以采用第3种方法不能及时调整中心孔的位置,容易出现一批工件难于进行动平衡修正,即出现废品现象。

如图4(零件质量约为15 kg,最大半径为240 g·cm)所示,用不平衡分布圆表示不平衡量,即在统计图中采用极坐标形式,以半径表示不平衡量大小(g·cm),以角度表示不平衡量位置,图中每个点代表一个不平衡量测量值。不平衡圆的圆心与原点的距离是一组工件不平衡矢量的平均值。

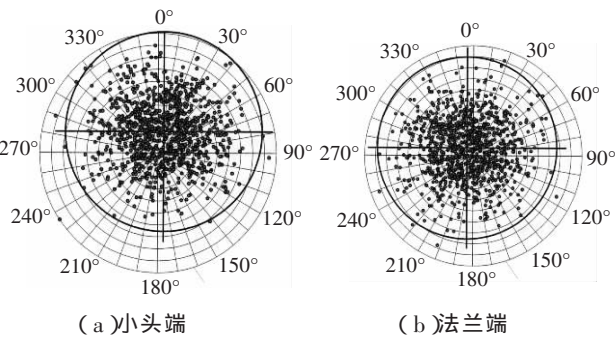


图4 中心孔的位置分布

采用申克公司提供的数据,零件为K13B四缸锻钢曲轴,采用几何定心,在动平衡前的不平衡量统计结果如表1所列。

表1 K13B曲轴打几何中心孔动平衡前  
初始不平衡量统计结果

项目	小头端	法兰端
工件数量	1 000	1 000
分散圆中心位置/g·cm	44.02	20.79
分散圆中心角度/(°)	16.2	321.2
99%分散圆半径/g·cm	199.41	198.52

从以上数据可以看出,两端动平衡前的初始不

平衡量均小于200 g·cm,能够满足一般产品的要求。

### 3 影响动平衡去重量的因素

#### 3.1 钻削深度

在配重(平衡)块上钻孔是一种常用的平衡曲轴的方法。图5所示为钻削深度与不平衡去重量的关系曲线。由图5可知,不平衡去重量随钻削深度的增加而增大,但是线段的曲率越来越小。也就是说,在钻孔的初级阶段,去重量与钻削深度成正比,但当钻削到一定深度时,即钻头接近曲轴的旋转轴线时,去重的效果越来越不明显,此时应考虑钻多个孔。

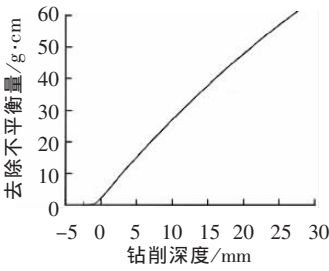


图5 钻削深度与不平衡去重量的关系曲线

#### 3.2 去重方向

利用钻孔去重来修正不平衡量与钻孔点的位置有很大关系。当去重方向与不平衡量方向一致时,修正不平衡量的效果最好;若钻孔方向偏移不平衡方向,则修正效果较差。为了保证工件的强度,在产品图纸上应规定平衡块表面钻孔的深度。因此,为了达到要求的不平衡量,必须在不平衡方向的附近再去重,但修正不平衡量的效果将较差。

#### 3.3 钻孔数量

当不平衡量比较大时,受钻孔深度的限制,必须在不平衡量方向附近钻孔,钻孔数量越多,与不平衡量方向的偏离越大,则修正不平衡量的效果就越差。而且钻孔深度的控制、钻点角度和孔径的误差将由钻孔数量的增多而增大;额外的分度时间也增加了工序的费用。

要在平衡极限内修正零件,修正角应定位在与真实角度(忽略其它误差)一定的范围内。如果修正点与不平衡量间夹角超过此范围,残余不平衡量将大于极限,其所在角度将在修正区域以外。

### 4 平衡孔的数量与生产节拍计算

在动平衡工序,由于零件的不同平衡孔数量不同,导致生产节拍不一致。如K13B曲轴采用几何定心方式,经过统计,其平衡孔的数量如图6所示。

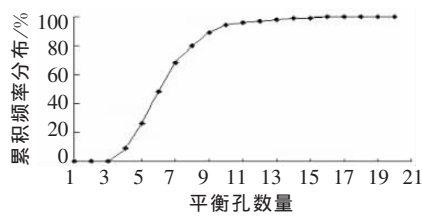


图 6 K13B 曲轴钻削平衡孔数量统计

从图 6 可看出 ,90 %曲轴的平衡孔数量小于 9 个。在曲轴动平衡工序 ,加工时间由于平衡孔的数量不同而不同 ,应根据统计规律按加权平均法计算生产节拍时间。

5 不同定心法生产实例比较

根据式 ( 1 ) ,平衡块外圆对不平衡量的影响最大。因此 ,很多厂家采用与平衡块外圆一起加工连杆轴颈的方法 ,大大减小了动平衡工序前的初始不平衡量。如 4G1 曲轴和 480 曲轴均采用高速外铣加工连杆轴颈及平衡块外圆 ,采用车-车拉加工主轴颈及曲拐侧臂 ,采用几何定心方法时效果较好。但是 ,如果曲轴的平衡块外圆等表面不加工 ,即曲轴的加工表面积比较小 ,如 EA827 的 1.8 L 发动机曲轴 ,则采用质量定心效果较好。

目前 ,以大众公司为代表的生产厂家基本采用质量定心工艺。而随着产品设计以及制造技术的发展 ,多数厂家趋向于采用几何定心工艺。两种定心方法生产实例比较如表 2 所列。

从表 2 可以看出 ,在大批量生产情况下 ,无论采用几何定心还是质量定心 ,只要在动平衡工序前工件初始不平衡量小于一定值 ,则经过动平衡工序 ,均可以达到同样的不平衡量并满足产品要求。

表 2 两种定心方法生产实例比较

定心方法	几何定心		质量定心		备注
产品	4G1	K13B	EA827	EA111	
纲领/万件	15	15	10	27	
零件质量/kg	10~20	10~20	15	13	
节拍/min	1.23	1.23	2.33	1.20	由纲领决定
动平衡前最大初始不平衡量/g·cm	200	240	240	240	
动平衡后不平衡量/g·cm	≤12.5	≤15	≤15	≤15	
校正率/%	99	99	99	99	

6 结束语

当曲轴的加工表面积较小时 ,采用质量定心工艺 ;当加工表面积较大时 ,由于质量定心对动平衡工序前的初始不平衡量无太大改善 ,综合考虑性能价格比因素 ,尽量采用几何定心。

但是应该指出 ,如果一批曲轴的质量是比较稳定的 ,其误差一般为设计误差及模具制造误差 ,其分布是有规律的 ,所以可以采用几何定心找出分布规律 ;如果曲轴存在制造精度及材料均匀性方面的误差 ,其中心分布是离散的 ,那么就无法进行几何孔位置的统计与修正。

参 考 文 献

1 顾永生.现代轿车先进制造工艺.上海 :上海交通大学出版社,1998.  
2 杨连生.内燃机设计.北京 :机械工业出版社,1981.  
3 Balance Engineering Manual.Third Edition General Motors Corporation GM Technical Center,Warren,Michigan 48090.

( 责任编辑 文 楫 )

修改稿收到日期为 2006 年 4 月 15 日。

敬 告 作 者

- 1 本刊以报道汽车及其零部件设计、研究、试验、材料、工艺、使用、维修等方面的应用技术为主 ,兼有理论研究和普及知识。辟有特约专题 综述 产品介绍 设计·计算·研究 试验·测试 材料·工艺·设备 使用·维修 知识讲座 经验·建议 信息等栏目。
- 2 稿件字数最好控制在 6000 字以内 ,切忌用文字、图、表重复表达同一内容 ,应以文字表达为先 ,插图应清晰 ( 扫描即可用于制版 ) 图形尺寸应适中 ,且图中各种标识、符号应符合最新相关标准。
- 3 计量单位必须采用 ( 或换算成 ) 中华人民共和国法定计量单位。
- 4 稿件中外文字母大小写、上下角标应书写正确 ,避免同一符号代表 2 种及以上物理量的情况出现。
- 5 稿件必须附有公开发表的参考文献 ,且在文中应标注文献引用处。参考文献注录项目应齐全 ,包括作者姓名、题名、刊名 ( 或书名 ) 图书应注明出版地与出版社 ) 出版年、卷、期。
- 6 主要作者应提供其简介 ,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等。
- 7 稿件投寄 3 个月未见回音者 ,可自行处理稿件 ,对于未能刊用的稿件不予退稿 ,请作者自留底稿。
- 8 对同时一稿多投者 ,本社将视对本刊声誉、工作上造成的影响程度 ,采取相应的处理措施。