

渐开线内花键线切割返修定位找正实例详解

范良成

浙江务成机械制造有限公司 浙江台州 318017

摘要：通过生产实例，详细介绍了TR50型矿用汽车轮边行星减速器内齿圈（中大型零件）内花键线切割返修自为基准定位的找正过程。

关键词：渐开线；内花键；自为基准；切割；找正；实用技巧

1 序言

中大型零件因其体积大、质量重，在机械加工过程中，精基准通常选用自为基准。对于渐开线内花键这样复杂的形状，如何在线切割机床上以渐开线面为基准进行找正呢？下面用实例进行说明。

图1为TR50型矿用汽车轮边行星减速器内齿圈结构，零件表面经辉光离子渗氮热处理后，渗氮层深 $\geq 0.45\text{mm}$ ，表面硬度 $>600\text{HV}$ （ $\approx 55\text{HRC}$ ），净重 105kg ，属中大型薄壁零件。

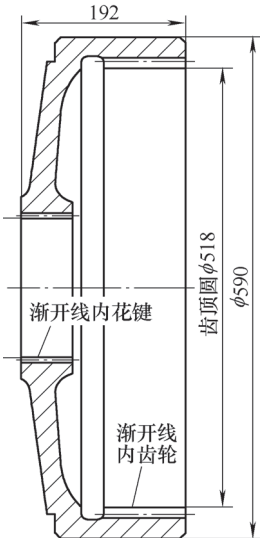


图1 TR50型矿用汽车轮边行星减速器内齿圈结构

在一次质量事故中，操作人员在插削渐开线内花键时，有7件内齿圈未将内花键棒间距 M 值插削至图样要求（见图2，渐开线内花键参数见表1），比

技术要求的最小值 $M_{\min}$ 还小了 $0.2\sim 0.4\text{mm}$ 。离子渗氮后被检出，质量部门要求将花键棒间距 M 值必须返修至图样尺寸，否则以工废品处理。为挽回近20万元的损失，对这批渐开线内花键进行返修。



图2 渐开线内花键图样要求

表1 渐开线内花键参数

项目	技术要求
模数 m/mm	4.2333/2.1167
径节 $D_p/(1/\text{mm})$	6/12
齿数 Z	40
压力角 $\alpha/(\circ)$	30
渐开线终止圆直径 D_{Fe}/mm	173.9
量棒直径 d_p/mm	7.315
棒间距最小值 $M_{\min}/\text{mm}$	158.92

2 返修方案选择与技术难题

工件（内齿圈）经离子渗氮后表面硬度较高，直接重新插齿已不可能。因其他尺寸已加工至成品尺寸且属薄壁零件，若退氮（退氮温度高于渗氮及渗氮前的去应力回火温度），则心部硬度必然有

所降低，且会产生一定的变形，有可能导致彻底报废，所以退氮后再插齿也不可行。内花键渐开线齿面仅剩0.05~0.1mm的金属层未去除。若用线切割加工至图样要求，既能使渐开线齿面保留0.3mm以上的渗氮层，基本满足正常使用条件，又不影响其他质量要求。因此，采用线切割返修是最可行的方案，但工件（内齿圈）属中大型零件，体积大、质量重，花键形状又复杂。如何在线切割机床上进行周向定位找正，使钼丝能均匀地割除多余的金属薄层，成了亟待解决的技术难题。

3 定位找正与线切割

假设工件（内齿圈）内花键已精确找正了周向位置，则其在线切割机床上的钼丝行走轨迹（见图3）可以在“CAXA线切割”软件中设置，图3中穿丝点和退丝点重合，设在内花键中心。钼丝行走轨迹：从花键中心出发，沿齿形逆时针方向行走一圈再回到花键中心。图4为线切割轨迹仿真截图。

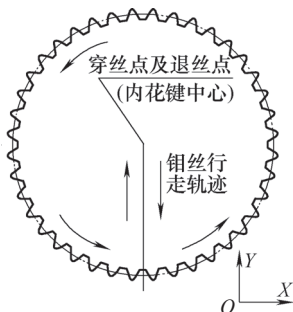


图3 钼丝行走轨迹

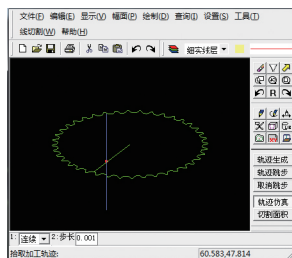


图4 内花键线切割轨迹仿真

那么如何将工件内花键在线切割机床上精确地找正至图3所示的周向位置呢？这是问题的关键。笔者采用如下办法简便且有效地解决了这个问题。

1) 精确地测量出各问题产品内花键棒间距的实际尺寸 $M_{实}$ （测量误差控制在0.02mm以内）。已知 $M_{实}$ 后对渐开线进行反计算，求出下文“渐开线计算及齿形绘制”中笔者所理解的“变位系数”。

2) 利用求得的“变位系数”在“CAXA电子图板”软件中，绘制出一个与工件实际内花键齿面形成轻微过盈配合（过盈量约0.01mm）的外花键薄片，如图5所示。棒间距是工件内花键棒间距的实际尺寸 $M_{实}$ 。该薄片花键是外花键，外花键薄片大径的尺寸等于工件内花键渐开线终止圆的直径，外花键薄片小径比内花键小径略小即可。

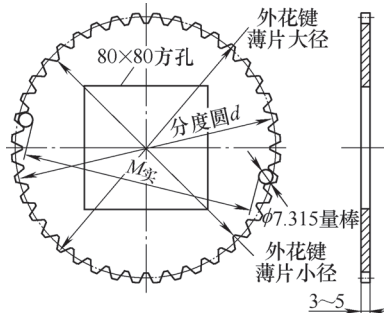


图5 外花键薄片（镶入工件内花键找正用）

3) 将外花键薄片镶入工件的内花键中，在线切割机床上利用80mm×80mm的方孔，分别单独摇动十字工作台，用杠杆百分表找正，此方法非常简便且精度较高。分别在线切割机床的X、Y方向上沿方孔内壁来回移动找正，目的是使方孔内壁与十字导轨平行。周向找正（见图6）后，再用钼丝靠近方孔内壁产生火花确定位置的方法找到方孔中心（即花键中心）。最后取下薄片，按图3所示的方法将工件内花键的齿形割至产品图样尺寸。为使其具备良好的装配性，内花键棒间距割至中上公差为宜。

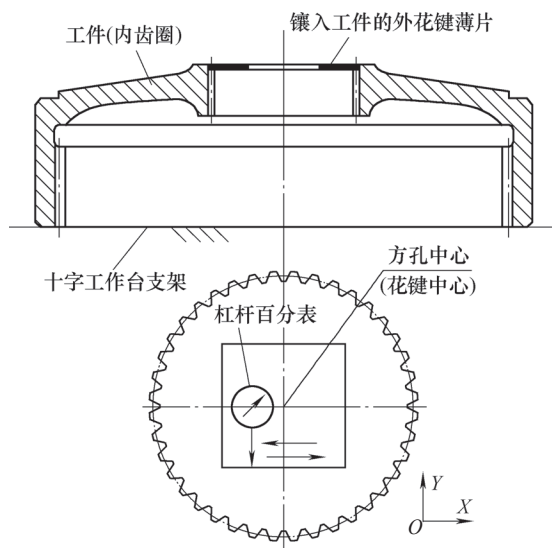


图6 花键的周向找正

4 渐开线计算及齿形绘制

由图7可知,变位系数 x 和齿厚、公法线长度、棒间距等存在一定的关系。若将标准齿轮理解成变位系数 x 为0的变位齿轮,而渐开线花键齿厚的上偏差或下偏差也理解成“变位”,只是这个“ x ”数值较小,则小数点位数应取多些。利用这个变位系数“ x ”按变位齿轮的相关计算公式,就能直接计算出棒间距最大值 $M_{\max}$ 或最小值 $M_{\min}$ 。即只要确定了模数 m 、齿数 Z 、压力角 α 和变位系数 x 这4个参数,渐开线内花键齿形就随之确定了。若再确定量棒直径 d_p ,则棒间距 M 也是确定的。

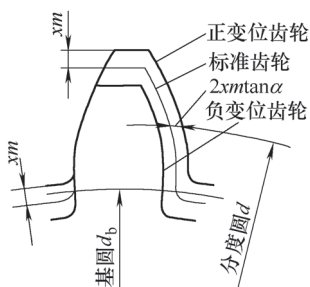


图7 变位齿轮的齿形

(1) “变位系数 x ”的反计算实例 量棒中心所在圆的压力角 α_M 计算公式为

$$\text{inv}\alpha_M = \text{inv}\alpha + d_p / (mZ \cos\alpha) \mp \pi / (2Z) + 2x \tan\alpha / Z \quad (1)$$

偶数齿时,棒间距 M 计算公式为

$$M = mZ \cos\alpha / \cos\alpha_M \pm d_p \quad (2)$$

需要说明的是,式(1)和式(2)中有“ $\pm$ ”或“ $\mp$ ”处,上面的运算符号适用于外齿轮,下面的运算符号适用于内齿轮。

将已知的模数 m 、齿数 Z 、压力角 α 、量棒直径 d_p (见表1)和实际棒间距 $M_{\text{实}}=158.52\text{mm}$ 代入式(1)和式(2),可反计算出笔者所理解的内花键“变位系数 x ” $=-0.0320621748$ 。为提高计算精度,计算过程中小数点后保留尽可能多的位数,建议使用科学型计算器进行计算。

(2) 齿形绘制实例 利用CAXA电子图板里的“齿轮”命令进行渐开线齿形参数的设置,如图8所示。最终线切割出一个外花键薄片(见图5)。

在此应特别说明的是,计算实例中所得的“变位系数 x ”是负值,而图8中输入的 x 却是正值。这是因为文献[2]和CAXA软件对内齿轮变位系数的正负规定相反。感兴趣的读者可以查阅相关文献资料,本文在此不作介绍。工件内花键齿形同样也可以按



图8 外花键薄片齿形参数设置

此方法计算并绘制而得。

5 补充说明

若将图7中的负变位齿轮理解成某标准外齿轮的上偏差齿廓,则此齿廓也可通过线切割软件中“偏移量/补偿值”的设置加工而出,但“偏移量/补偿值”是公法线方向上的尺寸。

棒间距测量相比于公法线长度测量有以下两点优势。

1) 对于同一齿轮,其棒间距公差带宽度约是公法线长度公差带宽度的 $1/\sin\alpha$ 倍。公差带宽度的关系即偏移量与球下沉量的关系,如图9所示。

2) 因花键齿顶高系数 h_a^* 一般是0.5,有的花键公法线测量点(量具卡脚与齿廓切点)会趋近齿顶圆或齿根圆角,导致测量不便,可能产生较大误差。因此内花键采用棒间距测量是更为方便和准确的。

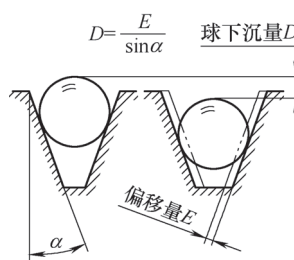


图9 偏移量与球下沉量的关系

6 结束语

本文所讨论的方法是根据实际棒间距 $M_{\text{实}}$ 进行反计算而绘制出的齿形,其精度高,可操作性强。工件(内齿圈)经此方法线切割返修成功,挽回了损失。此方法实为自为基准找正的一个灵活应用。

参考文献:

- [1] 范良成. 渐开线内花键线切割返修定位找正经验一[J]. 矿用汽车, 2020(4): 18-19.
- [2] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.