

圆弧内导体数控加工工艺

■ 中国电子科技集团公司第38研究所（安徽合肥 230088） 白海峰 赵永红

摘要：对圆弧内导体零件加工技术难点进行加工工艺分析和研究，针对该类零件的对称度、圆度和表面粗糙度等加工要求，制定了立铣刀粗加工和球头铣刀精加工内导体的加工方案，对此类零件的加工具有一定的借鉴作用。



利用Mastercam软件对圆弧曲面加工可供选择的加工路径很多，但不同的加工路径对零件的加工效果有着本质的区别，并且直接影响到加工零件的质量。下面针对某圆弧内导体零件进行数控加工工艺分析与研究。

1. 加工难点

图1所示为圆弧内导体的基本几何模型。该圆弧内导体的加工属于单件小批量生产，加工难点是如何保证正反圆弧面对于中性面的对称度0.01mm、圆度和表面粗糙度值 $R_a = 1.6\mu\text{m}$ 。因此在数控

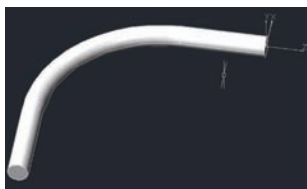


图1 圆弧内导体几何模型

机床上加工需要新的工艺流程来指导。

2. 加工工艺流程

根据内导体结构特征及使用要求，确定基本的加工工艺流程为：①确定正反圆弧面的加工基准。②立铣刀粗加工内导体。③球头铣刀精加工内导体（不能超过中性面位置）。④立铣刀精加工球头铣刀的残余量。

3. 刀具的选择

立铣刀无论在加工质量还是在切削效率方面都优于球头铣刀，因此在保证不过切的情况下，尽量采用立铣刀粗、精加工。但是该圆弧内导体曲率半径较小，在精加工过程中采用立铣刀容易造成过切，所以在精加工时选用球头铣刀进行加工。

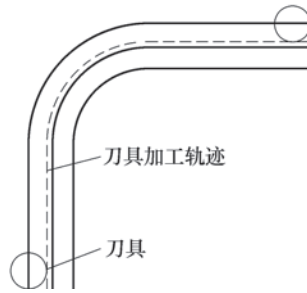
4. 绘制模型确定曲面加工形式

在Mastercam中分别于XY、YZ面绘出曲面模型的轮廓，再使用扫描曲面绘出如图2a所示的曲面模型（曲面误差值0.001mm、曲面型式NURBS）。Mastercam中针对曲面加工有多种方式，该

零件截面为圆弧，因此首先确定铣削方式：①粗铣时从加工效率的角度考虑，使用立铣刀按等高面一层一层往下铣削，选用层切铣削的等高外形加工方式（见图2b），这种铣削方式粗铣后铣削面呈等高的层层台阶状，台阶的高度由粗铣精度设定值决定。②精加工最终加工出理论曲面。针对该零件的加工难点，由于Mastercam曲面精加工中的曲面流线加工能够防止圆弧最大母线处有微小平面，使圆弧圆度得到保证，因此精加工采用此种加工方



(a)



(b)

图2 等高外形加工轨迹

式（见图3）。

5. 铣削参数的确定

该零件批量较大，为保证加工精度，最大程度地减少变形和提高加工效率，使用高速铣削加工中心进行批量生产。在相同加工环境下，加工参数的选择直接影响工件的表面质量和尺寸公差，因此加工中需要确定4个加工参数：①机床转速。②精加工切削方向误差。③进给量。④流线加工截面方向距离。下面通过正交试验法对高速铣床的加工参数

进行具体分析，选出最佳参数。

（1）选位级如见表1所示。

（2）按选用的正交表L9将因素一位级表中的因素顺序上列，位级对号入座，然后进行试验，得出结果如表2所示。

结果分析：①各因素对结果影响的重要程度。极差R最大者，对结果影响程度最大，反之影响最小。因此，因素重要程度的次序是：B、D、A、C。②直接看7、8号试验结果符合要求。其参数条件为：A1B3C1D3或者

A2B3C2D2。③经过计算，从位级之和越小越好可以看出，最好的参数条件是：A1B3C3D2。④综合评定。“直接看”和“计算”所得结果有差异，但其最重要因素B是一致的，为B3。次要因素A在1、2中选取，D在2、3中选取，经过分析，取A1、D2。最次要因素C在1、2、3中选取，因为它决定加工效率，所以选C1。

经评定，最佳参数如表3所示。

表 3

机床转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	切削方 向误差/ mm	进给速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	流线加工 截面距离/ (mm/次)
18 000	0.02	4 300	0.04

6. 消除反面圆弧加工产生的振纹

根据铣刀、球头铣刀精加工机理对圆弧面加工进行分析，球头铣刀在精加工正面时，中性面附近圆弧处的切削量大，容易造成表面粗糙度值增大（见图4），同时在粗加工反面时，当立铣刀的切削深度大于 $(R-r)$ 时，零件已通，切削量也就明显增大，造成内导体圆弧面产生振纹（见图5）。

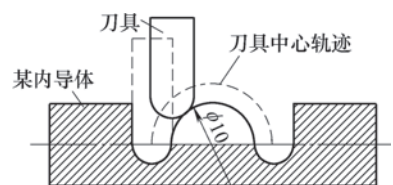


图 4

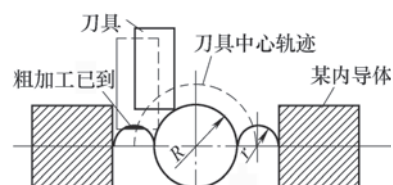


图 5

表 1

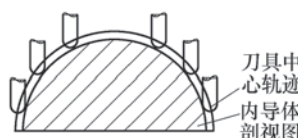
因素 位级	A 机床转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	B 切削方向误差/ mm	C 进给速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	D 流线加工截面距离/ (mm/次)
1	18 000	0.06	4 300	0.06
2	19 000	0.04	4 000	0.04
3	20 000	0.02	3 800	0.02

表 2

因素 列号	A 机床转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	B 切削方向误差/ mm	C 进给速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	D 流线加工截面距离/ (mm/次)	表面粗糙度值 $R_a/\mu\text{m}$
试验号	1	2	3	4	
1	1 (18 000)	1 (0.06)	3 (3 800)	2 (0.04)	3.2
2	2 (19 000)	1	1 (4 000)	1 (0.06)	6.4
3	3 (20 000)	1	2 (4 300)	3 (0.02)	6.4
4	1	2 (0.04)	2	1	3.2
5	2	2	3	3	3.2
6	3	2	1	2	3.2
7	1	3 (0.02)	1	3	1.6★
8	2	3	2	2	1.3★
9	3	3	3	1	3.2
位级 I 结果之和	8	16	11.2	12.8	—
位级 II 结果之和	11.2	9.6	11.2	8	—
位级 III 结果之和	12.8	6.4	9.6	11.2	—
极差R	4.8	9.6	1.6	4.8	—



(a)



(b)

图3 曲面流线加工轨迹

为了解决中性面圆弧处产生振纹的问题，球头铣刀在精加工正面时不能超过中性面，防止切削余量太大，然后利用立铣刀铣球头铣刀在中性面圆弧处剩余的余量（见图6），这样从根本上解决了中性面圆弧处产生振纹和表面粗糙度值大的问题。

7. 曲面加工参数设置

粗加工选用适用于加工直壁或斜度不大的陡峭面的等高外形粗加工。加工面选定后，参数设置方面设定粗加工预留量0.5mm、加工误差设置为0.05mm，每刀Z方向最大进给量为0.5mm，勾选“切削顺序最佳化”选项（刀具将沿工件截面轮廓分层进行切削），如图7所示。另外，为避免精加工时球头铣刀在下刀处产生插刀现象，曲面粗加工完之后，按零件外形（见图8红线处）预留0.5mm，并按球头铣刀直径铣出让位台阶，其深度不小于球头铣刀半径即可。

精加工使用曲面流线加工，刀具选用球头铣刀。球头铣刀加工曲面时，需要注意以下几点：

①球头铣刀加工过程中，刀尖处的理论切削速度是0mm/min，其附近越靠近刀尖，切削速度越低，因此应适当提高主轴转速，并尽量避免刀尖切削。②避免垂直下刀，铣削曲面时，如果球头铣刀像钻头一样在尖料处垂直下刀，容易在下刀处产生较大的振动，影响加工质量。综上所述，曲面流线精加工时，进刀方式选择从45°角斜向进刀并让出进退刀量8mm，如图9所示。两个切削方向参数设置：分别都勾选“距离”选项，切削方向的控制设置为0.05mm，截断方向的控制设为0.03mm，加工误差考虑到精度设置为0.005mm，并使用双向切削减少抬刀次数，如图10所示。

8. 可制造性分析

任何零件都有其可制造性，可制造性决定了零件的质量、成本、效率和生产周期等。针对该内导体，可采用排料套铣加工方式（见图11），从原材料上就节约成本，相应加工的辅助时间也缩短，大大降低了该内导体的制

造成本。

9. 结语

本文针对圆弧内导体零件进行数控加工工艺分析与研究，优选了一些加工参数，初探了批量加工方式，希望能对此类零件的加工起到一些借鉴作用。



图 9



图 10

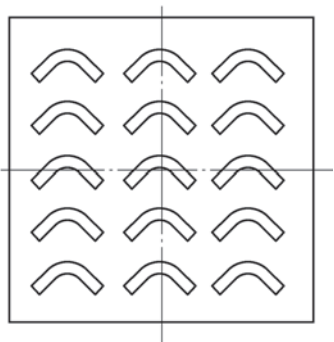


图 11

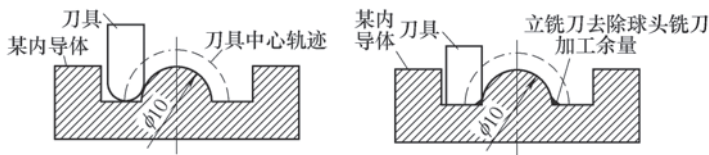


图 6



图 7



图 8

参考文献：

- [1] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
- [2] 孙丽媛. 机械制造工艺[M]. 北京：冶金工业出版社，2007.
- [3] 严烈. Mastercam模具设计[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.

MW (收稿日期：20160701)