

牵引电动机机座深传感器孔加工工艺研究

■ 中车株洲电机有限公司 (湖南 412001) 石江 肖连新 李儒彬 文照辉

摘要：大功率机车牵引电动机的传感器安装孔设计在铁心硅钢片部位，长径比达到26，属高难度的深孔加工，孔的位置度和中心偏斜量的控制，直接影响机座的加工质量与嵌线时的绝缘性能。本文从模型机理分析、加工定位、单边钻削影响、冷却与排屑等方面进行分析，并针对传感器孔偏斜造成铁心槽侧壁破损，制定可行的加工方案。

为准确监测定子铁心的温升情况，大功率机车牵引电动机的传感器安装孔设计在铁心硅钢片的近槽底部位，深度158mm，直径6mm，长径比超过26，有着高难度深孔加工中的所有典型特性（见图1）。

在钻孔过程中，由于钻头需穿过一层一层的硅钢片而产生进给偏斜，导致铁心槽的侧壁常出现破损、松动现象，这将影响着后续嵌线工序中的线圈绝缘性能。

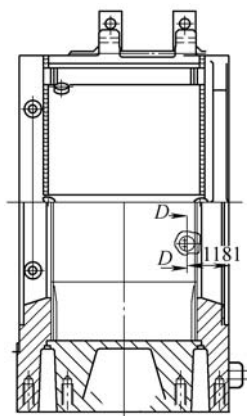


图1 传感器孔结构

1. 传感器孔侧壁破损原因分析

由图1可见，传感器安装孔深入到了铁心的底部，且孔壁到槽壁间的理论尺寸仅1.9mm，致使钻孔过程中槽侧极易出现破损松动现象。其原因分析如下：

(1) 孔心线偏斜。深孔加工中出现孔心线偏斜是一种普遍存在的现象，机理分析如图2所示模型。钻削起始阶段，切削力不对称使钻头产生起始偏移量 q_0 ，且偏斜量随着钻削深度的增加而逐渐增大，钻头轴向轨迹也越来越远离理论钻削轴线，通过对钻削过程的简化，建立钻削入钻阶段力学模型如图3所示。

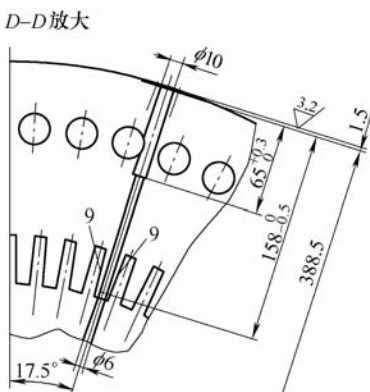


图2 普通钻头孔心偏斜

渐增大，钻头轴向轨迹也越来越远离理论钻削轴线，通过对钻削过程的简化，建立钻削入钻阶段力学模型如图3所示。

设钻削轴向力为 P ，径向力为 R ，在这两种力的作用下，钻尖的中心偏移量为 δ 时处于平衡

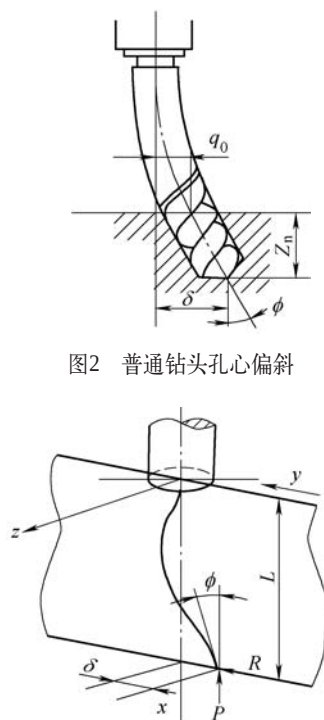


图3 钻削入钻阶段力学模型

状态，得到钻头的偏斜微分方程为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -P(y + \delta) + R(L - x)$$

式中， E 为钻杆材料的弹性模量， I 为截面的惯性矩，假设 $P/EI=k^2$ ，由边界条件 $x=0$ 、 $y=0$ 及 $x=L$ 、 $y=-\delta$ 整理上式得

$$y = (\delta - \frac{RL}{P}) \cos kx - (\delta - \frac{RL}{P}) \cot kL \sin kx - \delta + \frac{R}{P}(L - x)$$

设定刀具的瞬时进给量为 ΔL ，孔深为 Z_n ，则任意位置 Z_n 处的偏斜量为

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \phi_{n-1} \Delta L$$

式中， ϕ_{n-1} 为钻头在 $(Z_n - \Delta L)$ 的偏斜角，由此可计算出钻削长度 Z_n 处的孔轴线偏斜量为

$$\delta_n = e^{\frac{3Z_n}{2L}} q_0$$

从上式中可以看出，在钻杆长度一定的情况下，深孔钻削的孔心偏斜量与初始入钻偏斜量 q_0 、钻削长度 Z_n 有关，其偏斜趋势按照指数趋势变化。

(2) 定位误差的影响。由图1可见，传感器孔为二级阶梯孔，阶梯孔尺寸 $\phi 10\text{mm}/\phi 65\text{mm}$ ，6.5倍长径比，孔边穿过通风孔，二级孔 $\phi 6\text{mm}/\phi 158\text{mm}$ ，达到26倍长径比。孔加工时，以机座传动端端面与止口定位确定 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}, \bar{X}, \bar{Z})$ ，然后通过铁心槽两侧插入的槽样棒，再在非传动端间接找正槽样棒的侧面，以确定传感器孔的中心线位置以确定 $\bar{Y}$ 。该定位找正存在角向位置空间转化的误差累积，它累积了铁心槽与传动端端面的垂直度误差，即增大了传感器孔心的偏差值。

(3) 穿过通风孔的切削力影响。一旦深孔穿过通风孔时，无论工艺上编排先钻 $\phi 6\text{mm}$ 、深158mm孔，再扩阶梯孔 $\phi 10\text{mm}$ 、深65mm孔；还是先钻 $\phi 10\text{mm}$ 、深65mm孔，再钻 $\phi 6\text{mm}$ 、深158mm孔，其均会出现穿过通风孔部位时的钻头斜坡单边切削，造成钻头两侧受力不平衡，在深孔加工时，极易朝向弱侧偏斜（图1孔的左侧偏斜），这样在过通风孔部位时，易形成较大的起始 q_0 值。

(4) 冷却与排屑的影响。在深孔钻削过程中，因钻尖部位埋入深孔内部，切削液无法送达，钻尖部位切削温度较高，刀具磨损加剧，并且切屑排出异常困难，造成切屑在刀具与工件之间的挤压，增大加工转矩与刀杆的单边受力。

对某型号的 $\phi 6\text{mm}$ 高速钢钻头，进行无退刀加工路径与转矩监测的关系试验。

试验条件：转速 $V_c=12\text{m/min}$ ， $f=0.25\text{mm/r}$ ，当监测加工中出现转矩急剧上升点时，钻头退出，待充分冷却后重新继续钻削加工，其统计情况如图4所示。

从图4可知，孔在初始加工中，钻头在连续加工深度约8倍直

径时，其转矩急剧上升，接着继续往深处钻时，其转矩急速上升的行程缩小，降低到约4倍直径、3倍直径，且越降越小。

2. 解决措施与方法

传感器孔加工轴心线偏斜的解决措施。根据深孔钻削轴心线偏斜量的推论公式，为减少孔加工过程中轴心线的偏移量 δ ，可行的方式有：减少钻孔深度 Z_n ，减少入钻偏离量 q_0 ，加强钻头的刚性，具体如下：

(1) 减少入钻偏离量 q_0 。为减少钻孔过程中的入钻偏离量，钻头选型时，摒弃了此前的 118° 标准钻尖角麻花钻，改用了 140° 钻尖角的自定心合金钻，这样在加工毛坯面、铁心通风孔时有更好的自定心功能，同时因钻尖角从 118° 调整到 140° ，减少了钻削加工过程中约 $1/3$ 的径向力，从而减少钻削加工中的轴向偏移量 q_0 。钻尖角的变化对径向力的影响如图5所示。

(2) 增加刀具的刚性。为使刀具刚性更好，在保证加工深度的同时，尽可能选用短的、截面刚性更好的钻头，使用 TITEX 的 UFL 形钻头替换 N 形钻头，其

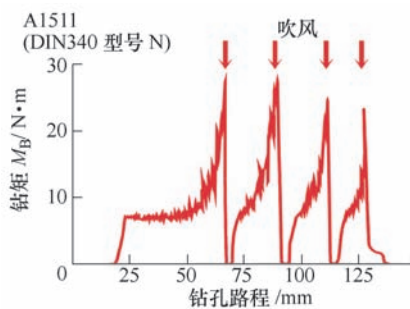


图4 无退刀加工路程与转矩变化

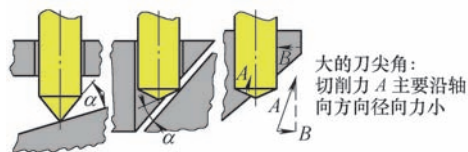


图5 钻尖角对径向力的影响

刚性提升了20%以上。两种钻头截面钻心对比如图6所示。

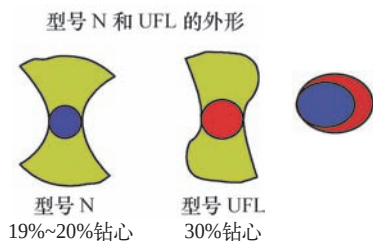


图6 N形和UFL形钻头截面

(3) 减少定位误差。为减少空间基准转换误差，在定位夹具中增加了角向定位系统，角向以定位键定位，通过键与冲片槽的配合定位（间隙控制在0.02~0.05mm），确定角向，这样既减少了空间基准转换的垂直度误差导入，同时减少了目视测量的偏差，定位更加精准可靠。

加工中冷却与排屑方式优化。为改善加工中的冷却效果，同时避免转矩急剧上升，加工

$\phi 6\text{mm}$ 孔时采取了以下措施：

一是加工流程优化。针对两种典型加工方案：①先用 $\phi 10\text{mm}$ 钻头加工深65mm的孔，再利用 $\phi 6\text{mm}$ 钻头完成全部深度158mm的加工。②先用 $\phi 6\text{mm}$ 钻头钻出158mm的深孔，再扩 $\phi 10\text{mm}$ 、深65mm孔。为减少孔心线偏斜，根据深孔加工孔心线偏斜的机理推导式，可通过减少孔加工深度实现，为此，规定采用加工方案①。

二是走刀路径优化。为改善加工中刀具的冷却，切屑的排出，避免转矩的突变，在加工中，走刀方式从慢进给一次到位方式加工，调整为深孔啄钻方式进退刀加工，进退刀路径如附表所示。

3. 改善后的效果

通过深孔轴线偏斜影响 q_0 的控制，刀具的选型改进，定位方

式的优化、走刀路径的优化等的实施，并经批量产品验证，再未发生因加工工艺原因造成的传感器孔侧壁破损现象。

4. 结语

大功率机车牵引电动机传感器孔加工轴线偏斜量的控制，是铁心传感器孔加工后槽壁的完整无破损的关键。

该传感器孔加工问题的解决，为类似深孔加工的精度保证提供了有力参照。

参考文献：

- [1] 高本河，等. 深孔钻削中孔轴线偏斜的纠偏理论与方法研究[J]. 兵工学报，2003，24（2）：234-235.
- [2] 胡凤兰，刘军安，魏华等. 深孔钻削中的孔轴线偏斜机理与控制方法[J]. 现代制造工程，2011（7）：73-77.

$\phi 6\text{mm}$ 孔加工程序路径设定

钻削进刀示意图	每次钻削深度/mm	退刀点
	30	退到安全平面
	12	退到安全平面
	12	退到安全平面
	6	退到安全平面
	6	退到安全平面
	6	退到安全平面
	6	退到安全平面

MW（收稿日期：20160607）