

# 螺旋轨迹制孔技术在航空制造中的应用

Application of Spiral Trajectory Drilling Technology on Aviation Manufacturing

中航工业北京航空制造工程研究所 张云志 刘华东 邹方  
中国商飞上海飞机制造有限公司 陈磊



张云志

工学博士,高级工程师,JSME会员。就职于中航工业北京航空制造工程研究所,曾长期从事船用机器人应用环境及自动控制研究,现任数字化柔性装配技术研究室柔性装配研发部部长。

随着航空产品不断的升级换代,轻质、高强度材料在产品结构上的应用比重不断加大,且已成为衡量航空产品结构先进性的重要标志之一。

这些新材料的应用,虽然满足了飞行器零部件的高刚性、高强度、轻量化等要求,但同时也给后续的零件加工及装配制孔带来了新的难

题。特别是对钛合金及复合材料(CFRP)等难加工材料的大径制孔,已成为业界关注的热点。如何很好地解决难加工材料制孔过程中存在的刀具过热失效,有效地抑制CFRP层间分离和孔口毛边,避免切屑划伤制孔内表,提高制孔效率,满足制孔精度和光洁度以及长寿命连接要求,已成为航空产品装配技术领域不可回避的问题。

题。特别是对钛合金及复合材料(CFRP)等难加工材料的大径制孔,已成为业界关注的热点。如何很好地解决难加工材料制孔过程中存在的刀具过热失效,有效地抑制CFRP层间分离和孔口毛边,避免切屑划伤制孔内表,提高制孔效率,满足制孔精度和光洁度以及长寿命连接要求,已成为航空产品装配技术领域不可回避的问题。

迄今,国内很多学者在此方面做了大量研究,提供了一些实用方法,如采用CBN刀具、金刚石刀具、陶瓷刀具<sup>[1]</sup>等并结合啄式进给方式,在难加工材料的制孔方面取得

了一定的成果。但从制孔综合方面,并未完全解决诸如CFRP层间分离和孔口毛边、切屑划伤等根本性问题。关于螺旋轨迹制孔技术,国内除了对Novator产品的概念性介绍和对螺旋铣孔动力学<sup>[2]</sup>研究外,尚未见有关深层报道。本文借鉴国内外螺旋轨迹制孔技术的研究经验,在国内率先研制出螺旋轨迹制孔装置,该装置具有如下特征:

(1)在线调整刀具中心(Tool Center Point, TCP)径向变位,以适应不同孔径加工要求;

(2)具有曲面法向测量功能,可搭载机器人在自由曲面上沿制孔点

位的法矢实施螺旋轨迹制孔；

(3) 压紧力可调, 以对应 CFRP 和混合叠层材料制孔对压紧力的要求；

(4) 真空排屑功能, 将制孔过程中产生的粉末状切屑及时从制孔区域排除。

### 螺旋轨迹制孔技术的比较优势

螺旋轨迹制孔在切削机理上与传统的钻削制孔有着本质差别。图 1、图 2 分别描述了传统钻削制孔和螺旋轨迹制孔的特性和区别。

传统钻削制孔是一个连续切削过程<sup>[3]</sup>。制孔过程中, 刀具中心即为孔的中心, 孔径大小取决于制孔刀具直径, 两者呈强线性对应关系。

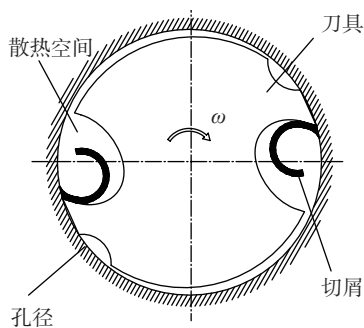


图1 传统制孔钻削模型

如图 1 所示, 制孔切屑成连续卷曲状从导屑槽和孔壁形成的空间 (也称散热空间) 向孔外旋转排出。实践证明, 采用啄式进给断屑, 只是在不同程度上减小了切屑长度, 依然无法避免切屑卷曲、刮蹭孔壁, 也难以解决 CFRP 材料的层间分离和孔口劈裂、剥离等问题。

螺旋轨迹制孔过程与传统钻削制孔不同, 是一个非连续铣削过程, 通过无级调整 TCP 变位参数  $e$ , 用同一种规格的刀具加工多种直径的孔。

如图 2 所示, 根据制孔孔径要求, 让刀具回转中心相对制孔中心产生径向变位, 刀具以  $\omega_1$  自转的同时以  $\omega_2$  公转, 这种非连续铣削方式不仅有利于刀具的散热, 降低了传

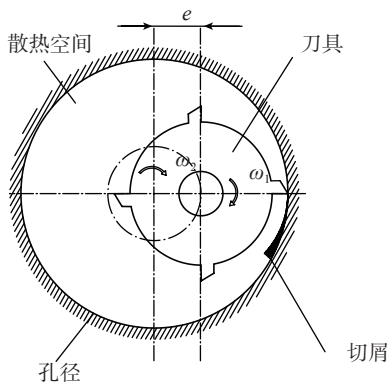


图2 螺旋轨迹制孔切削模型

统制孔中刀具因温度累积而造成的刀具过热磨损, 而且也因其切削力相对较小, 有效抑制 CFRP 层间分离和孔口劈裂、剥离等现象的发生。因此, 该装置可作为机器人末端器, 对航空难加工材料实施自动化制孔作业。整个制孔过程中产生的粉末状切屑, 易于真空吸屑管道排除, 避免了孔内表面的划伤, 有利于提高孔内的粗糙度。

### TCP 径向变位运动解析

螺旋轨迹制孔装置研制的核心在于如何精确控制 TCP 径向变位参数以及切削动力传递。笔者在此采用了双调整套偏心调整原理, 建立 TCP 径向变位运动学模型, 如图 3 所示。

图 3 中,  $R$  为制孔半径;  $h$  为 TCP 径向变位;  $e_1$  为外调整套偏心距;  $e_2$  为内调整套偏心距;  $d$  为刀具直径;  $\theta$  为内外调整套相对转角;  $O_h$

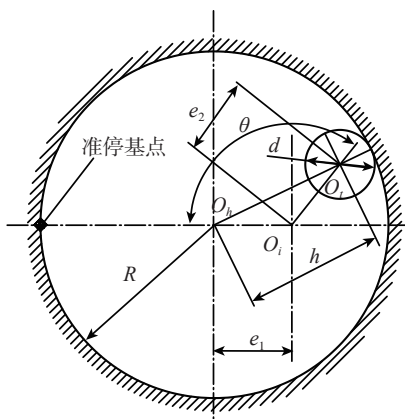


图3 TCP径向变位运动学模型

为外调整套回转中心, 也是制孔中心;  $O_i$  为内调整套回转中心;  $O_t$  为刀具中心。

根据图 3 所示, 制孔的几何参数、刀具直径和描述刀具 TCP 的位置参数存在如下关系:

$$2R = 2h + d = D \quad (1)$$

式中,  $D$  为制孔直径。

刀具中心点的位置  $h$  与内外调整套偏心距有如下关系式成立:

$$h = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 - 2e_1e_2 \cos \theta} \quad (2)$$

式(2)反映了 TCP 径向变位与调整套运动参数之间的联系, 也称螺旋轨迹制孔装置 TCP 径向变位运动学方程。

联立式(1)和式(2), 得到下式:

$$\theta = a \cos \left[ \frac{4e_1^2 + 4e_2^2 - (D - d)^2}{8e_1 \cdot e_2} \right] \quad (3)$$

式中, 由于  $e_1$  和  $e_2$  为已知的结构参数,  $d$  为刀径, 一旦制孔的孔径得到确定, 就可以根据所选刀具, 利用式(3)得到内外调整套相对转角。为了方便校准零位, 使制孔结束后内外调整套均止于准停位, 该制孔装置在技术设计时, 考虑了  $e_1=e_2=e$ , 代入式(3)可简化如下:

$$\theta = a \cos \left[ 1 - \frac{(D - d)^2}{8e^2} \right] \quad (4)$$

式(4)变形, 可写成如下形式:

$$D = d + 2e \cdot \sqrt{2 - 2 \cos \theta} \quad (5)$$

由此可见, 制孔孔径仅与刀具直径、调整套偏心距和转角这 3 个参数有关。

根据式(5), 在调整套偏心距一定的情况下, 对装置制孔能力进行数值仿真, 结果如图 4 所示。

随刀具直径增大, 制孔能力曲线上移, 当刀具规格一定时, 随内外调整套相对调整套转角  $\theta$  的增大, 制孔能力呈非线性递增。

根据式(2), 可得到图 5 所示的 TCP 径向变位  $h$  与内、外调整套相对转角  $\theta$  关系曲线。

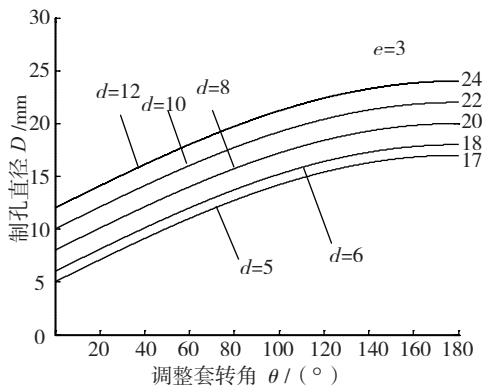


图4 制孔能力数值仿真

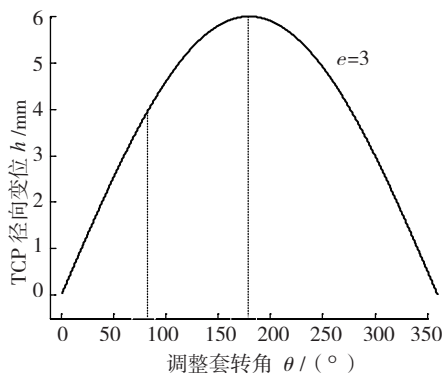


图5 TCP变位与转角 $\theta$ 关系曲线

随着调整套转角的增大, TCP 变位增大, 在最初的  $90^\circ$  范围内转角呈线性, 然后递增减缓, 到  $180^\circ$  达到最大, 随后尽管调整套转角继续增大, TCP 变位将逐步递减。

### 螺旋轨迹制孔装置的设计

根据航空常用难加工材料的制孔工艺需求, 并参考国外公开的部分技术指标, 制定制孔装置指标如表 1 所示。

根据以上指标, 利用图 4 给出的结论, 首先确定刀具及调整套偏心距 (即 TCP 变位) 范围, 因篇幅所限, 本论仅就螺旋轨迹制孔装置的关键部件及总体构成要素予以介绍。

#### 1 主轴径向变位及线缆防绕机构设计

该机构是螺旋轨迹制孔装置关键部件, 主要功能是使电主轴输出轴径向变位及线缆防绕, 机构组成要素如图 6 所示。

表1 螺旋轨迹制孔装置技术指标

螺旋轨迹制孔装置运动轴数		3.5	
技术指标	Z 向进给能力 /mm	150	
	TCP 最大变位 /mm	6	
	刀具装卡形式	ER20	
	公转调范围 / (r·min <sup>-1</sup> )	80~150	
	孔壁粗糙度 / $\mu\text{m}$	1.6	
	制孔精度	H8	
	主机重量 /kg	120	
	制孔径范围 /mm	10.5~20	
铣削电主轴主要指标	型号	额定功率 /kW	额定转速 / (r·min <sup>-1</sup> )
	ZYS-80	2.2	12000

由外部伺服电机驱动内、外调整套带轮相对旋转, 电主轴输出轴开始径向变位, 一旦变位到达设定值, 两带轮作同步运转, 即可实现螺旋轨迹制孔装置关键动作——刀具的自转与公转。同时, 在线缆引导管、摇杆、凸轮导轮的联合作用下, 规避了电主轴供电线缆及冷却液导管的缠绕问题。

#### 2 螺旋轨迹制孔装置结构设计

综上所述, 并考虑航空制造中对难加工材料制孔的各种辅助要

求, 如压紧、吸屑、法向测量等, 螺旋轨迹制孔装置总体结构设计见图 7。

如图 7 所示, 受进给工作台轴向牵连运动影响, 刀具中心点沿螺旋线运动, 进给工作台的速度决定了螺旋线导程大小, 即轴向切削速度, 内外调整套的公转速度决定了周向切削速度, 刀具转速及上述速度综合决定了制孔内壁粗糙度。

#### 3 螺旋轨迹制孔控制系统设计

根据螺旋轨迹制孔装置结构设

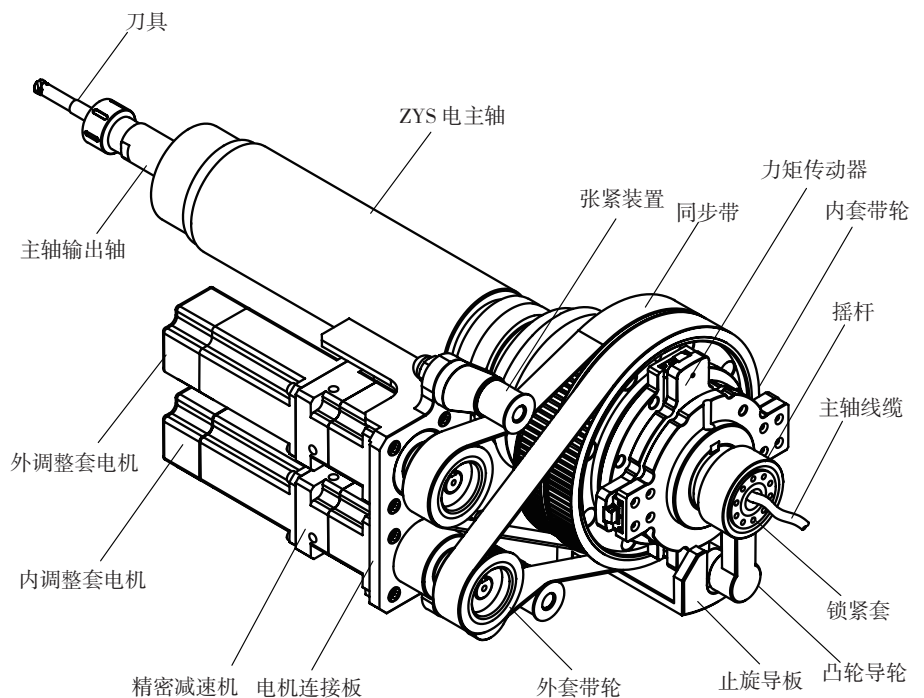


图6 主轴径向变位及线缆防绕机构

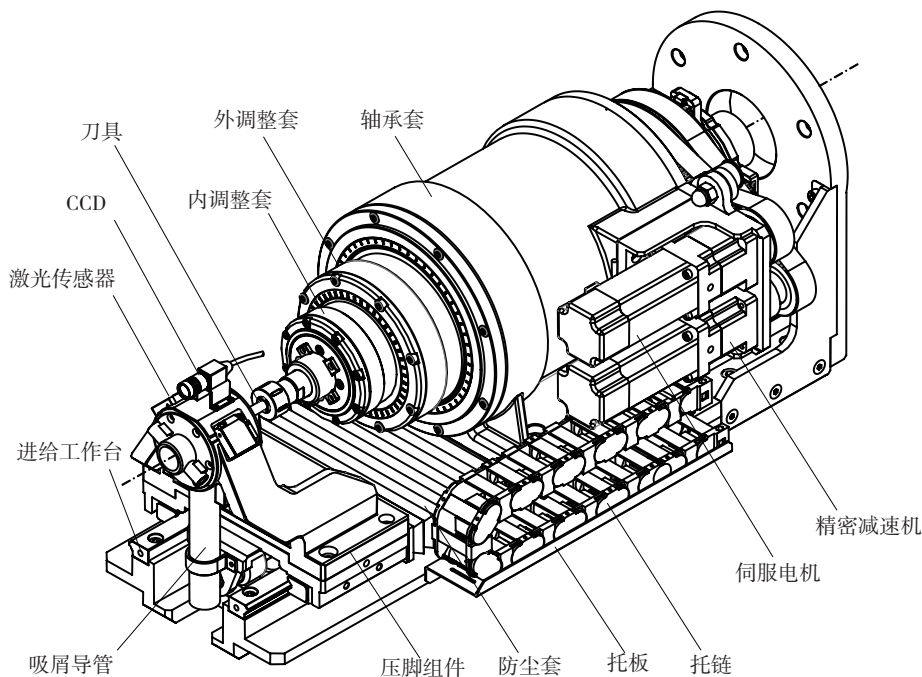


图7 螺旋轨迹制孔装置总体结构

主控计算机根据制孔对象的材料属性(如材料种类、层数、层厚等)及刀具规格、制孔大小,计算出TCP变位、进给速度、主轴转速、公转速度等制孔参数,并将这些数据分别发送给PMAC和变频器,同时根据激光测距传感器测量数据,计算出曲面上制孔点位的法矢数据并传送给机器人控制器,机器人将综合安全距离和制孔点位的法矢数据,对螺旋轨迹制孔装置实施位姿调整。当确认位姿调整完成后,发出制孔指令,执行压紧、TCP变位、真空及冷却液开启、主轴启动、公转开始、进给等一系列制孔程序。

如图11所示,为螺旋轨迹制孔装置控制程序操作界面。

计要求,刀具中心点变位到达设定值,两电机须作同步运转<sup>[4]</sup>,这也是本装置控制系统设计之关键,本论采取如图8所示的控制策略。

图8中, $G_1$ 、 $G_2$ 分别为电机 $M_1$ 、 $M_2$ 电流反馈传递函数; $G_3$ 为差速反馈传递函数。

图8所示,保留电机 $M_1$ 速度环,断开电机 $M_2$ 速度环<sup>[5]</sup>,每个驱动器输入信号是基本电流给定信号与差速信号的叠加,两个驱动器差速信号大小相等、极性相反。若两个电机不同步,差速信号经放大、滤波处理后分别反馈到两电机的电流环,因电流环的响应比速度环要快,有效抑制了两电机的不同步<sup>[6-7]</sup>。

本制孔装置是一个多轴伺服系统,需要同时处理多路输入输出信号,一般的多轴运动控制卡在数据容量、处理的速度上难以满足要求。本论用Delta Tau多轴运动控制卡PMAC2A-PC/104,如图9所示。

该多轴运动控制卡以CPU主频为80MHz及24位运算能力的DSP为核心,其具有体积小、扩展自由和PVT插补功能及多种通信方式,是一个开放性良好、功能强大的轴控制

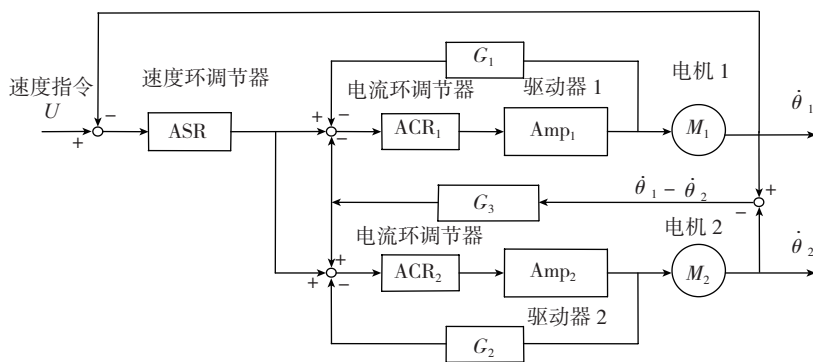


图8 双伺服同步控制原理图

器。

螺旋轨迹制孔装置控制系统硬件构成如图10所示。

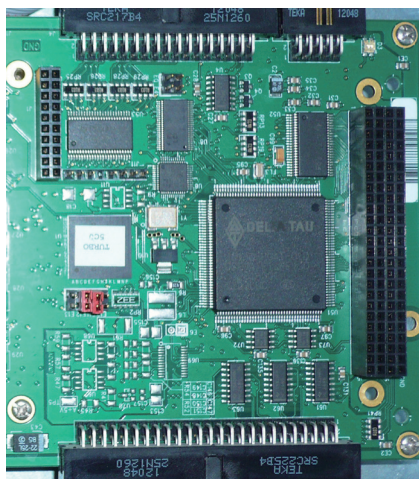


图9 PMAC2A-PC/104多轴运动控制卡

### 螺旋轨迹制孔装置的研制

为了证明螺旋轨迹制孔装置结构设计方法的合理性及其控制方法的有效性,同时也为了考察、验证螺旋轨迹制孔技术在航空制造中对难加工材料如TC4、CFRP、7系列铝合金制孔的比较优势,根据本论前述方法,研制了螺旋轨迹制孔装置样机,如图12所示。

图12为搭载工业机器人的螺旋轨迹制孔装置实机,该机具有制孔、压紧、吸屑、法向测量、照相、断刀检测等功能,总重量约110kg。零件国产化率达到90%以上,电源为普通的AC220V单相电源。

螺旋轨迹制孔技术研究及相关

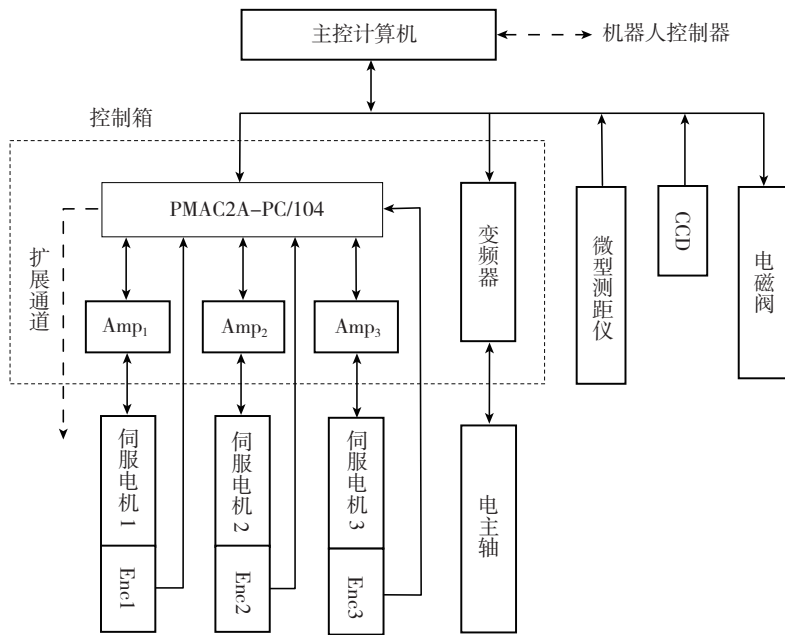


图10 螺旋轨迹制孔控制系统硬件构成



图11 螺旋轨迹制孔控制操作界面



图12 螺旋轨迹制孔装置实机

设备研制的目的是面向航空制造的工程化应用。围绕这一目的,笔者利用所研制的螺旋轨迹制孔装置,结合国产刀具,使刀具在无冷却的情况下,对航空制造中常见的难加工材料,如钛合金及复合材料实施制孔工艺探索和验证。

### 螺旋轨迹制孔验证

对航空制造中常见的难加工材料,在同一种 CFRP 板材料(厚 12mm)进行传统钻孔和螺旋轨迹制孔对比,图 13 为制孔对比实验结果。图 13 中,标记  $h_1 \sim h_4$  的孔为传统钻孔效果,标记  $H_1 \sim H_3$  的孔为螺旋轨迹制孔效果。由此可见  $h_1 \sim h_4$  孔口周边存在不同程度的劈裂和毛边。

图 14 为对钛合金 TC4 板材料(厚 12mm)进行的螺旋轨迹制孔情况。

钛合金的制孔试验结果显示,上、下孔口整齐,毛边高度低于 0.1mm,孔内壁光洁,未见切屑划伤内壁现象,螺旋轨迹制孔所产生的钛合金切屑如图 15 所示。

通过试验证明,螺旋轨迹制孔所产生的为粉末状切屑,不仅避免了划伤制孔表面,也有利于真空排屑。另外发现,切屑颗粒大小仅与刀具运动参数有关,与刀具几何参数和制孔大小几乎无关。同时,对钛合金 TC4 板材的制孔进行锥度、圆度、偏差值的测定,由于篇幅所限,表 2 所示仅为部分制孔精度的测定结果。

表 2 中,直径  $_U$  为上孔口直径,直径  $_D$  为下孔口直径,圆度  $_U$  为上孔口圆度,圆度  $_D$  为下孔口圆度。从所测定的偏差值可知,制孔基本达到预期,能够满足航空制造中难加工材料的制孔要求。

### 结论

本文通过对传统钻孔和螺旋轨

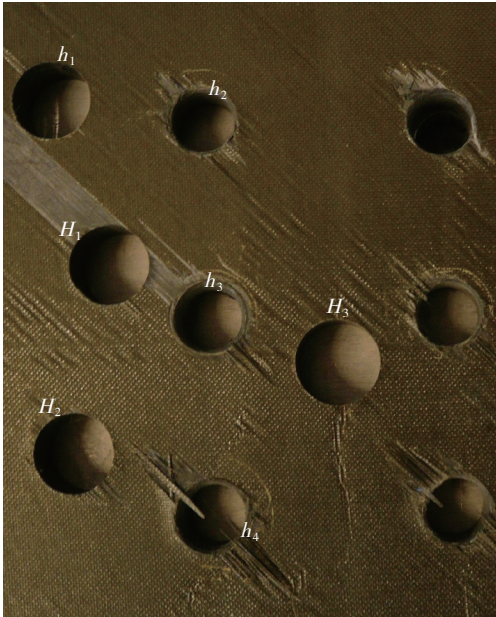


图13 传统钻孔与螺旋轨迹制孔对比



图14 钛合金TC4制孔结果

表2 制孔精度测量结果

mm

编号	名称	类型	实测值	名义值	偏差值
1	直径_U	D	10.9737	11.0000	0.0263
	直径_D	D	10.9736	11.0000	0.0264
	圆度_U	GDT Roun	0.0134	0.0000	0.0134
	圆度_D	GDT Roun	0.0163	0.0000	0.0163
2	直径_U	D	12.0088	12.0000	0.0088
	直径_D	D	12.0246	12.0000	0.0246
	圆度_U	GDT Roun	0.0134	0.0000	0.0134
3	圆度_D	GDT Roun	0.0163	0.0000	0.0163
	直径_U	D	13.9835	14.0000	0.0165
	直径_D	D	13.9768	14.0000	0.0232
4	圆度_U	GDT Roun	0.0134	0.0000	0.0134
	圆度_D	GDT Roun	0.0190	0.0000	0.0190
	直径_U	D	16.0109	16.0000	0.0109
4	直径_D	D	16.0053	16.0000	0.0053
	圆度_U	GDT Roun	0.0180	0.0000	0.0180
	圆度_D	GDT Roun	0.0178	0.0000	0.0178



图15 螺旋轨迹制孔产生的切屑

迹制孔的切削机理分析,建立了螺旋轨迹制孔TCP变位运动学模型,推导出TCP变位运动学方程,在结构参数一定的情况下,对螺旋轨迹制孔装置的制孔能力进行分析。面向航空制造中的难加工材料,研制了一种集制孔、压紧、吸屑、法向测量功能于一体的螺旋轨迹制孔装置,并在以Delta Tau多轴运动控制器PMAC2A-PC/104为核心的控制系统上,实现了该制孔装置在线无级调整制孔孔径,适应混合叠层材料的制孔要求。笔者以机器人为载体,利用国产刀具,在所研制的实机上完成了对钛合金、CFRP等难加工材料的制孔验证,制孔精度、孔内表面粗糙度等均达预期,证明了螺旋

轨迹制孔装置设计、控制方法的合理性和有效性,使一种刀具加工多种直径的孔成为现实。

### 参考文献

[1] 杨金发,张军. 航空难加工材料加工技术研究. 金属加工,2012(21):18-20.  
 [2] 秦旭达,陈仕茂,刘伟成,等. 螺旋铣孔技术在航空装配业中的发展应用. 航空制造技术,2009(6):58-60.  
 [3] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航

空制造技术,2005(9):28-32.

[4] 本田昭,城谷聪美. サーボ制御の理論と実践. 东京:日刊工業新聞社,2001(5):82-90.

[5] 陈先锋. 伺服系统控制技术. 北京:人民邮电出版社,2010(1):152-153.

[6] 伊藤俊久. 自動機制御システム設計の実際. 三和工機(株)第一技術部,2003(6):61-70.

[7] 王学刚,袁军. 双电机同步联动伺服控制系统研究[D]. 成都:成都电子科技大学,2011(5):23-25.

(责编 深蓝)