

基于工业智能相机的自动化电磁铆接对中定位技术研究

仇继伟¹, 曹增强²

(1. 西安爱生技术集团公司, 西安 710072;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

[摘要] 针对手工电磁铆接存在的对中性问题, 设计了基于工业智能相机的三坐标电磁铆接托架系统, 利用工业智能相机对铆接孔进行拍照, 并经过图像处理快速计算出孔位中心坐标, 最终根据坐标变换转化到装配坐标系中。详细阐述了三坐标铆接托架系统组成、工作原理、控制系统的硬件与软件设计。通过西门子 Smart PLC 的运动控制功能实现三坐标定位控制, 通过 WinCC 触摸屏建立人机交互界面。进行实际的实施过程, 试验结果验证了其系统的定位功能及对中精度的有效性。

关键词: 电磁铆接; 工业智能相机; 对中性; PLC; 运动控制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.15.049



仇继伟

硕士, 助理工程师, 主要从事电磁铆接电气控制系统设计及自动化电磁铆接托架自动对中定位技术研究, 近年来重点开展了电磁铆接托架三坐标定位技术、视觉找正技术研究, 荣获陕西省科技进步一等奖。

电磁铆接能形成均匀的干涉量, 可有效满足飞机壁板、运载火箭筒体高质量连接要求。铆接过程中铆接末端执行器轴线与铆接孔对中性直接影响着铆接质量, 波音公司曾做过相关测试得出: 当紧固件沿外载荷作用方向倾斜大于 2° 时, 疲劳寿命约降低 47%; 当倾斜大于 5° 时, 疲劳寿命约降低 95%^[1]。铆接过程铆钉轴线、铆枪轴线及铆接孔轴线的重合, 容易造成铆钉膨胀偏斜, 严重影响铆接质量, 因此需要在铆接前对铆接孔位对中性进行校准^[2-3]。

传统人工铆接由两个工人分别手持电磁铆枪与顶铁进行对钉、顶持、铆接, 由于人工目视观测铆接孔位的误差, 造成铆接对中的低准确度, 从而无法保证铆接质量的一致性^[4]; 产品理论数模与实际装配坐

标系存在误差, 目前自动钻铆机及铆接装配机械手多采用工业相机完成壁板初始孔位的校准, 从而获得装配坐标系与产品数模之间的坐标偏移量, 之后孔位坐标根据已知数模与该偏移量进行叠加。但此方法仅在产品数模已知的条件下适用, 对未知数模产品无法完成所有孔位铆接, 并且由于铆接过程是一个动态加载的过程, 加载应力引起的壁板变形、铆接后坐力引起的振动及机械传动误差等不可避免, 均会影响孔位的对中精度。本文以三坐标平板型壁板电磁铆接为对象, 通过工业智能相机建立产品数模与装配坐标系之间的相对变换, 在铆接过程中对产品铆接孔坐标逐个进行采集, 并通过闭环伺服系统对铆接末端执行器进行定位, 从而减小铆接对中过程的误差^[5-6]。

工作原理

三坐标电磁铆接托架系统由龙门架、回形框架、末端执行器、工业智能相机、伺服系统、控制柜等组成,其中末端执行器(两个)分别主要由电磁铆枪和顶铁组成。系统组成如图1所示。

三坐标电磁铆接托架系统通过龙门架与回形框架作为末端执行器的支撑,伺服系统实现末端执行器在空间坐标 X 、坐标 Z 方向的位置定位,其中 Y 坐标方向为电磁铆枪与顶铁的轴线方向, X 、 Z 轴方向对中定位完成后,电磁铆枪与顶铁只需要沿 Y 轴方向直线进给运动,对铆钉施加顶持力,铆接放电后电磁铆枪与顶铁后退至原位置。因此沿 Y 坐标方向不需要精确的位移控制,采用气缸控制末端执行器的前进与后退。工业智能相机跟随末端执行器同步移动,铆接前工业智能相机对铆接孔进行测量并完成孔位坐标采集,将采集的孔位坐标传送给控制柜中的PLC控制器,由PLC的Q点发送脉冲指令至驱动器从而控制 X 、 Z 坐标的定位。

系统包括空间 X 、 Y 、 Z 3个坐标轴,其中 X 轴与 Z 轴分别由闭环电机控制,可实现空间 X 与 Z 两个方

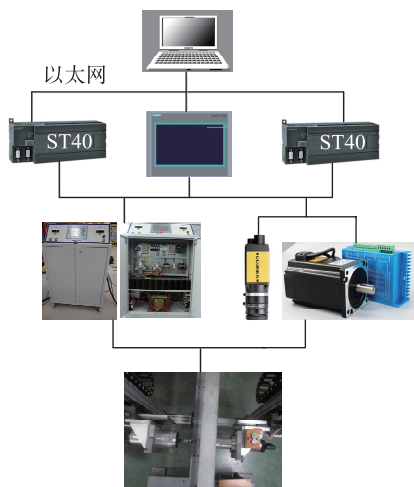


图1 系统集成
Fig.1 System integration

向的坐标定位,由于 Y 轴与末端执行器轴线方向平行,实际铆接时不需要进行位移控制。 X 与 Z 电机轴都有对应的零点行程开关,在对未知壁板工件装配孔位坐标测量前,先触发 X 与 Z 电机轴回原点操作,触碰到零点开关位置即作为电机轴原点位置,从而建立托架空间绝对坐标系。工业相机安装于末端执行器前端,对铆接孔位进行拍照,计算出孔位中心坐标,通过托架坐标系与相机坐标系之间的坐标变换(在相机校准过程实现)得到测量孔中心在托架坐标系中的坐标位置。

控制系统设计

控制系统由硬件和软件两部分组成。

1 控制系统硬件设计

控制系统硬件主要由可编程控制器模块、人机交互模块、伺服控制模块、视觉采集模块、气动控制模块组成,系统结构组成如图2所示。

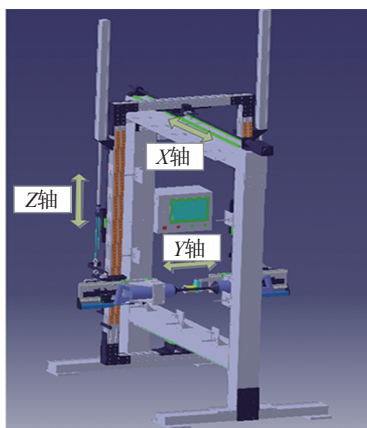


图2 系统结构组成
Fig.2 System structure composition

可编程控制器采用西门子S7-200 Smart PLC,其中控制伺服模块采用可以产生脉冲的ST40CPU,控制气动模块采用SR40CPU;人机交互模块采用WinCC触摸屏设计人机交互界面。伺服控制模块采用步进电机、驱动器及滚珠丝杆共同组成驱动装置,各电机轴参数如表1所示。通过编码器计算电机轴接收到的脉冲数实现电机轴的位移控制;通过设置脉冲频率实现电机轴的速度控制;通过调节驱动器的细分数实现电机轴的位置精度控制。伺服系统如图3所示,其中 X 轴驱动电机控制回形框架沿 X 轴方向的定位, Z_1 、 Z_2 轴驱动电机分别控制铆枪与顶铁在 Z 轴方向定位。

气动控制模块控制原理如图4所示,通过采用费斯托精密调压气缸,对 Z 轴方向的重力进行平衡;同时采用一对紧凑式推进气缸控制末端执行器沿 Y 轴方向的进给运动;并通过刹车气缸实现末端执行器夹具控制。

为保证测量精度,视觉控制模块采用IS8200M康耐视视觉相机进行孔位信息采集,该型相机测量精度可达到0.18mm,支持TCP/IP通讯协议,通过以太网与PLC的TCP_connect模块建立通信连接。相机触发模式为电机运行到位(指示灯亮)一触发相机拍照一数据存储;数据输出:数据以字符串形式进行传送,在视觉检测软件IN-sight中选择所需的坐标数据,并设定数据类型及结束字符。相机参数如表2所示,当相机安装位置距壁板

表1 伺服参数

Table 1 Servo parameters

坐标轴	控制方式	最大行程/mm	最大转速/($r \cdot \min^{-1}$)	定位精度/mm
X	电机	1200	1500	0.6
Y	气缸	200	—	—
Z	电机	1000	1500	1.0

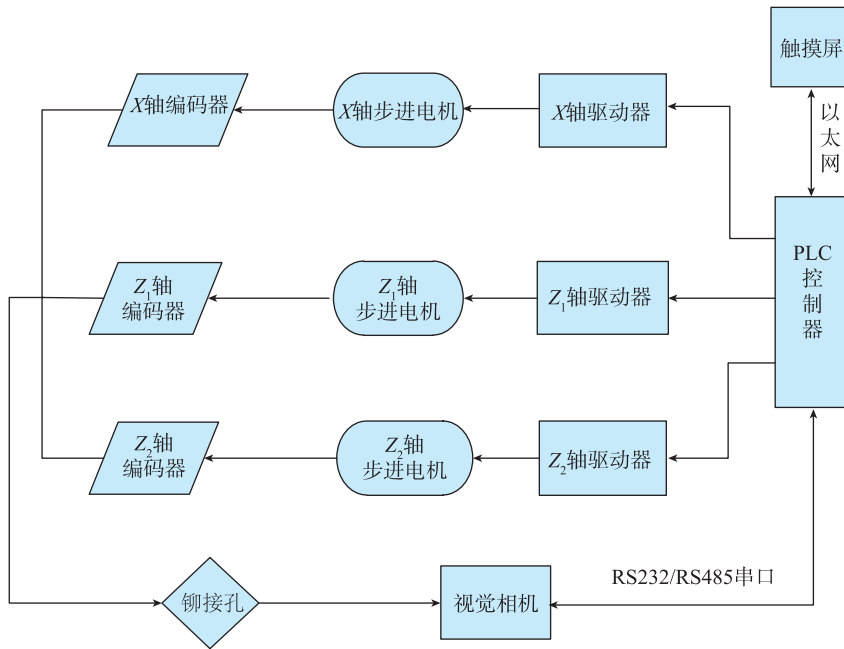


图3 伺服系统
Fig.3 Servo system

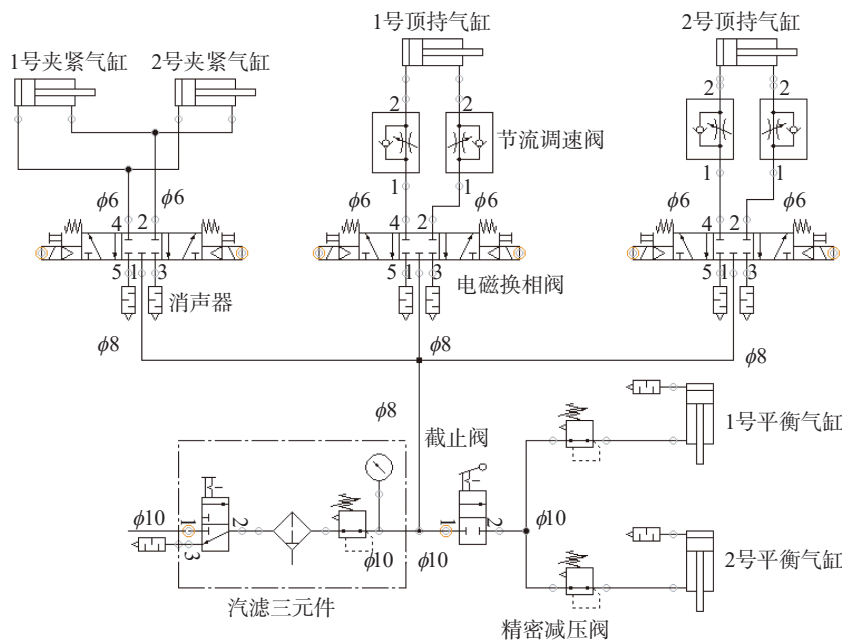


图4 气动系统
Fig.4 Air system

表2 相机参数
Table 2 Camera parameters

识别精度/mm	视野范围/mm ²	采集速度/(帧·s ⁻¹)	相机焦距/mm	像素
0.18	40 × 30	60	16	640 × 480

表面距离 200mm 时, 视野范围为 40mm × 30mm, 在此视野内可以实现每次只测量到一个完整铆接孔。安装位置如图 5 末端执行器所示, 通过调整焦距可以实现孔像的清晰度调节, 便于精确测量。

此外还有供电模块: 开关电源为 PLC 和触摸屏提供 24V 电压, 通过交流变压器为电机驱动器提供 36 V 交流电。

2 控制系统软件设计

控制系统软件设计主要完成伺服模块、气动模块、视觉相机之间的功能集成, 其工作流程如图 6 所示。

2.1 伺服控制模块软件功能设计

伺服模块采用两个 S7-200 Smart PLC, 如图 7 所示, PLC₁ 控制 X 轴电机, PLC₂ 控制 Z 轴两个电机。通过 step7 中的运动控制向导进行各轴运动参数设置, 分别生成初始化模块、电机轴使能模块、回位置参考点模块、绝对定位模块及相对定位模块等^[7], 并通过 WinCC 软件在触摸屏上设置相应的控制按钮、输入输出 IO 域、指示灯等, 从而实现与 PLC 间的人机交互控制。

2.2 视觉相机软件功能设计

通过 Insight 软件建立相机校准与数据采集电子表格, 通过对比相机坐标系的基准孔位坐标与铆枪轴线末端在实际装配坐标系的坐标, 得出两个坐标系的偏移量; 通过 gv_x 与 gv_z 函数获得实时拍照孔位的中心坐标 X 与坐标 Z。

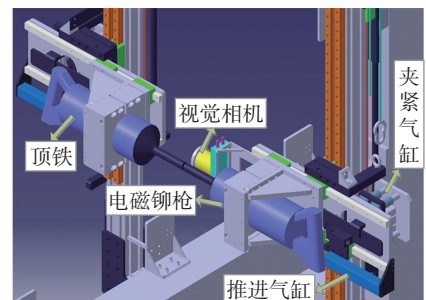


图5 末端执行器
Fig.5 End effector

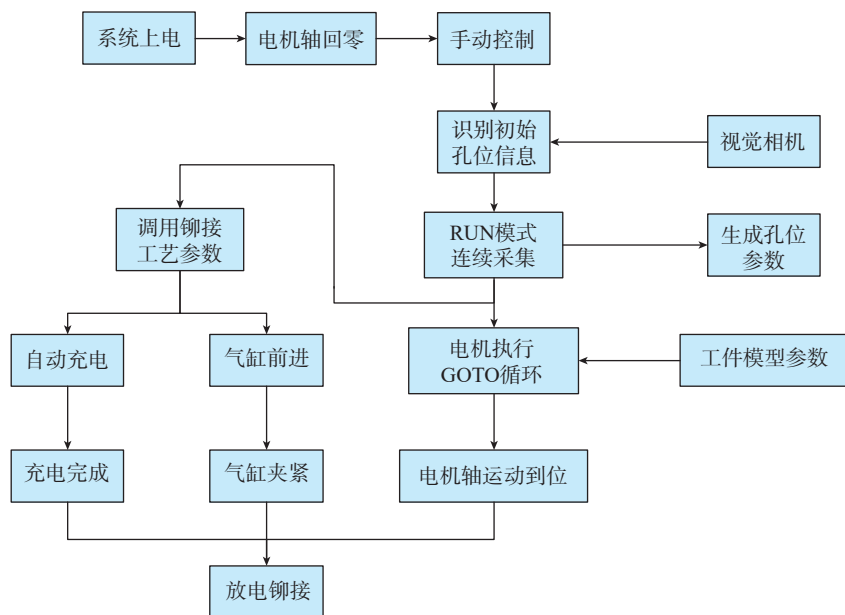


图6 系统工作流程图
Fig.6 System working process

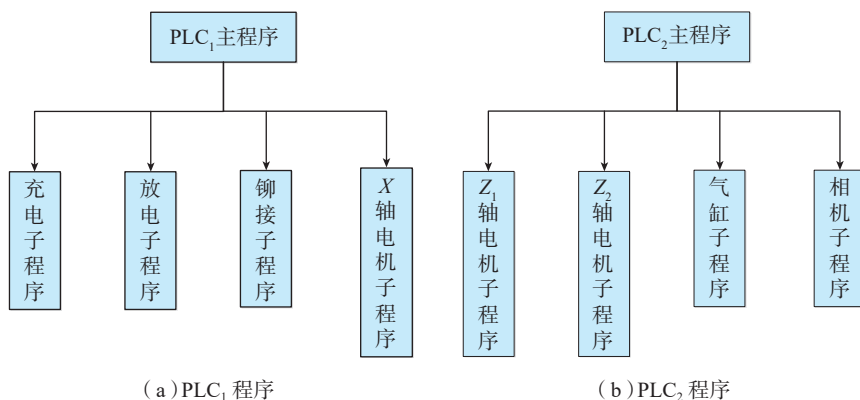


图7 PLC程序
Fig.7 PLC procedure

2.3 通信控制设计

工业智能相机与 Smart PLC 之间通过工业以太网采用 TCP/IP 协议建立通信,通过自由通信 (OUC) 模块中的 TCP_Connect 指令控制与相机之间的通信端口连接,通过 TCP_Send 指令实现 PLC 向智能相机的数据发送控制,通过 TCP_Receive 指令实现 PLC 接收智能相机输出的数据,最终进行数据转换与处理获得孔位坐标^[8]。

2.4 人机界面设计

为便于设备操作人员可视化使

用,通过 WinCC 触摸屏组态人机交互界面,包括主界面、气缸控制界面、伺服控制界面、相机参数界面,如图 8 所示。

实施过程

具体实施过程为首先打开气源阀门,在触摸屏上触发各个电机轴回零,各电机轴零点作为对应坐标轴的测量原点。根据具体铆接工件在触摸屏上设定 X 轴、Z 轴方向孔位间距增量,从而完成伺服参数初始化设置。通过相机校准,确定相机坐标系与装

配坐标系之间的相对位置,相机校准仅进行一次,之后可直接测量^[9]。相机校准完成后建立电子表格,与 PLC 进行数据通讯。手动模式下使相机移动到第一个铆接孔附近,触发 X 轴连续移动,相机会沿 X 轴方向对该排的铆接孔逐个进行拍照,并通过实时图像处理求得每个铆接孔位坐标,存储到 PLC 寄存器中。该排孔位中心采集完成后,移动 Z 轴采集下一排孔位坐标,直至所有孔位采集完成。

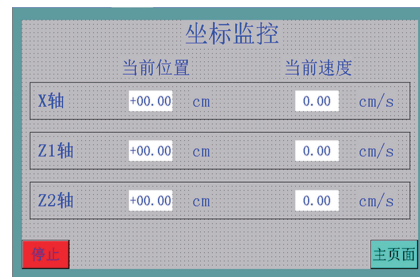
调用离线坐标,按测得的孔位顺序逐个进行对中,在对中过程中,触摸屏上设定铆接电压值,调用充电子程序对脉冲电容器进行充电;中对完成后调用气缸子程序完成末端执行器对铆钉的顶持夹紧作用,最后触发放电按钮使铆钉镦粗成型。整个过程中只需要单个操作人员完成人机界面控制及手工装钉操作,相比较手持式电磁铆接,大大减轻了劳动强度。

1 相机校准

在壁板进行铆接前,先对智能相机进行校准,校准过程是先对 X、Z 轴进行回原点操作,控制工业智能



(a) 手动控制界面



(b) 坐标监控界面

图8 人机交互界面

Fig.8 Man-machine interface

相机移动至事先做好的校准板,微调相机位置,使校准板4个小孔同时出现在相机视野内,触发相机拍照,在相机坐标系下测量得到4组圆心坐标。同时记录下此时的系统坐标(X_0, Z_0),通过电机驱动末端执行器使其轴线与圆孔中心线重合,并依次记录对应的系统坐标(X_1, Z_1)、(X_2, Z_2)、(X_3, Z_3)、(X_4, Z_4),并将4个点的坐标输入相机校准界面对应的小孔中,至此即完成建立相机坐标系与系统坐标系之间的相对关系。将末端执行器移动至任一孔视野中,若当前系统坐标为(X, Z),则系统坐标轴需要移动的坐标增量为($X-X_0, Z-Z_0$)。针对不同壁板的铆接,首先通过相机对壁板小孔中心坐标进行测量,并将坐标测量值传送给PLC进行记录,采集完成后再进行循环铆接^[10]。

2 铆接测试

为验证系统的自动定位功能及对中精度,采用300mm×600mm×4mm平板型壁板为试验工件,按随机间隔钻两列直径为5mm的铆接孔。将工件安装至托架上进行铆接试验,铆接顺序如图9所示,首先在铆接程序中设定横向增量 ΔX 、纵向增量 ΔZ ,通过相机实时拍照画面调整 ΔX 值大小,使得电机单步进给到位时,仅有一个完整的铆接孔在相机视野内,获得正确的测量结果。当完成该排所有铆接孔的测量后,启动Z轴坐标控制电机,使末端执行器移动至下一排铆接孔,依次循环完成整块壁板测量。

3 结果分析

孔位坐标采集过程中,采取沿X轴方向每隔4mm步进量拍照一次,每排孔数量为30个,两列孔间隔为10mm。相机拍摄计算得到的孔位坐标与对应的托架系统坐标如表3所示。相机坐标系与托架系统坐标系之间的相对位置为 $X_0=5.72\text{mm}$ 、 $Z_0=3.03\text{mm}$,经PLC计算得出相机所拍摄的孔位在托架系统中的坐标。

该系统定位方式是通过工业相

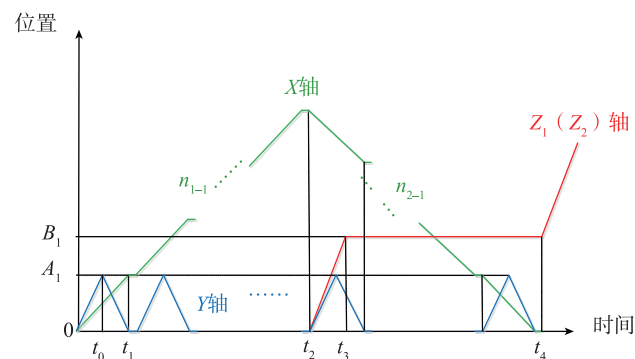
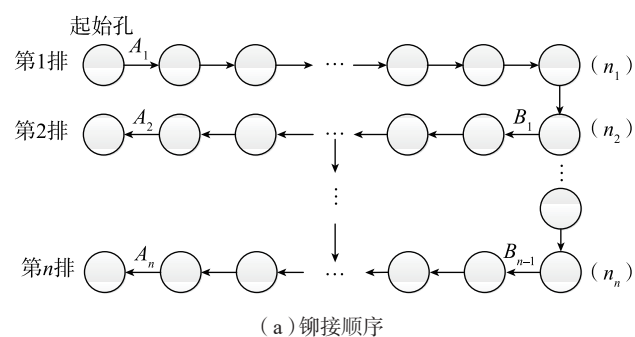
机对铆接孔位拍照获得铆接孔坐标,然后将此坐标通过“坐标变换”转化到托架坐标系中。这里的坐标变换其实是在相机校准过程完成的,即通过4个校准孔建立相机坐标系与托架坐标系对应的坐标偏移量。因此相机定位精度0.18mm是包含在顶铁、铆枪移动的电机定位精度内的, X 、 Z 轴定位误差为对应电机轴定位误差:即 X 轴方向定位最大误差为0.6mm, Z 轴方向定位最大误差为1.0mm,此时铆枪轴线与铆钉孔轴线存在大约1.2mm的偏移量。电磁铆接工艺经常采用的铆模包含平头铆模与窝头铆模,一般铆模直径会比对应的铆钉直径大。对于平头铆模由于其端头为平面,1.2mm的偏移量对铆接质量影响不大;对于窝头铆模,当铆钉直径较小时定位误差引起的偏移量对铆接质量影响比较明显。

如表4所示,随着铆钉直径的增大,其窝头模直径也随之增大,铆模对铆钉的包含范围越大,定位误差对

铆接质量影响也就随之减小。另外考虑到托架在铆接过程中受到不同峰值的铆接应力冲击所引起托架变形,以及运动过程的传动误差、测量误差会对部分孔位对中精度有一定的影响。实际操作中可根据铆接需求,对定位误差较大的孔位进行单独拍照测量,将得到的结果替代连续采集的孔位坐标,从而补偿误差累计影响定位的精度。

三坐标向五坐标转化

此系统以平板型壁板自动化铆接为对象,对于锥形及单曲率壁板铆接,需要对末端执行器增加一个旋转自由度。通过旋转轴A或B驱动末端执行器旋转一定角度,使末端执行器轴线与锥面或单曲率壁板表面垂直,再进行对中操作。对于双曲率型壁板可增加末端执行器的A轴与C轴两个旋转轴方向的自由度,通过激光位移传感器对铆接孔周围曲面进行法相测量校准,得出A轴与C轴



(b) 坐标轴动作时序

图9 铆接测试
Fig.9 Riveting test

所需要的摆动角度,从而实现空间五坐标定位,具体见图 10。

图 10 中 A 轴绕 X 轴方向转动,可以通过在铆枪与顶铁两侧安装绕 X 轴方向转动的电机轴,使铆枪和顶铁绕 X 轴运动。由于摆动过程中会产生 Z 轴方向的位移偏差,需要对 Z 轴方向进行位移补偿实现绕 A 轴方向的最终定位。C 轴为绕 Z 轴方向的转动,以顶铁轴线为基准,使铆枪沿同心的弧形导轨同步运动,实现 C 轴方向的定位。进行 C 轴定位时会引起 X 轴方向的坐标变化,完成 C 轴定位后需要进行末端执行器 X 方向坐标补偿。

表 3 孔位测量值
Table 3 Hole measure result

孔号	坐标 X		坐标 Z	
	相机	托架	相机	托架
1	7.33	13.05	4.24	7.27
2	9.46	15.18	4.45	7.48
3	11.78	17.60	4.83	7.86
4	14.76	20.48	4.25	7.28
5	18.39	24.11	4.31	7.34
6	21.82	27.54	4.16	7.19
7	24.16	29.88	4.25	7.28
8	28.74	34.46	4.64	7.67
9	31.53	37.25	4.57	7.6
10	35.60	41.32	4.30	7.33

表 4 窝头铆模偏移量对比

Table 4 Hole head rivet offset contrast mm

序号	铆钉直径	窝头铆模直径	半径差值	比较结果
1	2	3.79	0.9	<1.2
2	2.5	4.69	1.1	<1.2
3	3	5.59	1.3	>1.2
4	3.5	6.49	1.5	>1.2
5	4	7.39	1.7	>1.2
6	5	9.19	2.1	>1.2
7	6	11	2.5	>1.2
8	8	14.6	3.3	>1.2

结论

(1) 通过视觉相机检测与伺服控制系统实现了电磁铆接托架自动对中定位功能。

(2) 与手工电磁铆接相比,此铆接方式只需要装钉人员,不需要铆枪与顶铁顶持操作人员,可实现电磁铆接的单人化操作。

(3) 电容器自动充电过程同时移动末端执行器进行对中、顶持、夹紧操作,充电完成后自动触发线圈放电铆接。工序紧凑,缩短铆接时间。

(4) 对中过程由气缸控制末端执行器对铆钉的顶持与夹紧,无需人工参与,有效降低了劳动强度。

参考文献

[1] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 84-87.
YUAN Hongxuan. Manufacturing technology for connecting holes of aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(1): 84-87.

[2] 秦现生, 汪文旦, 楼阿莉, 等. 大型壁板数控钻铆的三点快速调平算法[J]. 航空学报, 2007, 28(26): 1455-1460.
QIN Xiansheng, WANG Wendan, LOU Ali, et al. Three-point bracket regulation algorithm for drilling and riveting of aerofoil[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(26): 1455-1460.

[3] BLANCHOT V, DAIDIE A. Riveted assembly modelling: study and numerical

characterisation of a riveting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1/3): 201-209.

[4] 刘平, 张开富, 李原. 壁板自动钻铆夹持点布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7): 20-29.

LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Optimization method of dynamic location layout for sheet metal ADR assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2014, 20(7): 20-29.

[5] 张开富, 曾佩杰, 栾超, 等. 空间多姿态下自动钻铆托架变形分析与调平方法[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(1): 129-137.

ZHANG Kaifu, ZENG Peijie, LUAN Chao, et al. An effective deformation analysis and leveling method for work positioning of automatic riveting system in multi-pose space[J]. Journal of Northwest Polytechnical University, 2012, 30(1): 129-137.

[6] LYER K, RUBIN C A, HAHN G T. Influence of interference and clamping on fretting fatigue in single rivet-row lap joints[J]. Journal of Tribology, 2001, 4(4): 686-698.

[7] 张开富. 飞机装配过程数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 34-40.

ZHANG Kaifu. Digital measurement technology of aircraft assembly process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 34-40.

[8] 董曼鸽. 基于 PLC 的五轴注塑机械手控制系统的实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

DONG Mange. The realization of five-axis in jecton manipulator control system based on PLC[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2012.

[9] 樊战亭, 曹增强, 葛剑锋. 基于 PLC 的电磁铆接设备控制系统[J]. 机床与液压, 2005(11): 108-110.

FAN Zhanting, CAO Zengqiang, GE Jianfeng. Electromagnetic riveting device control system based on PLC[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(11): 108-110.

[10] 樊战亭. 低电压电磁铆接设备控制系统的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005

FAN Zhanting. Research on the control system of low voltage electromagnetic riveting equipment[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2005

通讯作者: 仇继伟, E-mail: qiu5101321@126.com.

(下转第 62 页)

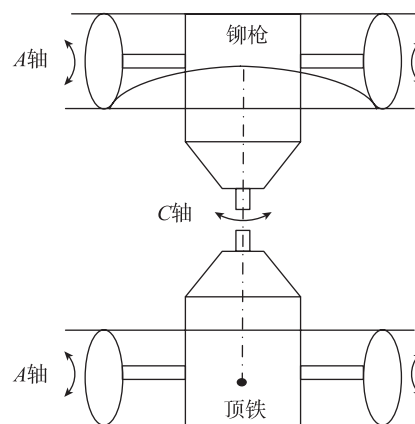


图 10 A、C 转轴图

Fig.10 A&C axis rotation paragraph

Research on Aircraft Composite Components' Assembly Gap Compensation

CAI Yuebo¹, AN Luling¹, YUE Xuande¹, YE Xin¹, XIAO Ruiheng²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd, Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] Because of composite materials' excellent mechanical properties, they are widely used in aircraft manufacturing. Due to the large manufacturing deviation, there may be large gaps or interferences in the assembly of composite components. In addition, the brittleness of composite materials is large, and forced assembly may cause local damage between layers. Therefore, compared with metal materials, the assembly process of composites is more complex and the assembly demands are higher. Assembly gaps can be eliminated by measurement and compensation process, but the mechanical properties of shims are different from those of composite materials, and the gap compensation process lacks a unified standard, which may affect the assembly and service properties of composite components. This paper describes and summarizes the worldwide research progress about composites assembly, providing reference for future composites assembly.

Keywords: Composite components; Assembly gap; Gap measurement; Gap compensation process; Mechanical properties
(责编 长青)

(上接第54页)

Research on Centering Location Technology in Automatic Electromagnetic Riveting Based on Industrial Intelligent Camera

QIU Jiwei¹, CAO Zengqiang²

(1. Xi'an ASN Technology Group Co., Ltd., Xi'an 710072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Aiming at the neutral problem of manual electromagnetic riveting, a three-coordinate electromagnetic riveting bracket system based on industrial intelligent camera is designed. The riveting holes are photographed by using industrial intelligent camera, and the center coordinates of the holes are rapidly calculated by image processing, finally the result is converted into the assembly coordinate system according to the coordinate transformation. In this paper, the composition, working principle, hardware and software design of the three-coordinate riveting bracket system are described in detail. Siemens Smart PLC motion control function can achieve three coordinate positioning control, and human-computer interaction interface is established by WinCC touch screen. With the actual implementation process, experimental results verify the effectiveness of the positioning function and alignment accuracy of the system.

Keywords: Electromagnetic riveting; Industrial intelligent camera; Centring degree; PLC; Motion control
(责编 长青)