

# 钢针矩阵自动排布装置机械系统设计

邓振领, 罗福源

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**为提高三维编织过程中的排针效率和质量,通过对现有机机械结构分析,对钢针矩阵自动排布装置机械结构进行研究,设计其出针结构、取针结构、推针结构以及二维移动工作台等关键部件;对工作原理进行阐述;对丝杠螺母进行详细设计。

**关键词:**碳纤维;三维织物制作;钢针矩阵排布

**中图分类号:**TH122   **文献标志码:**B   **文章编号:**1671-5276(2023)02-0051-04

## Mechanical Structure Design of Automatic Distribution Arrangement Device of Steel Needle Matrix

DENG Zhenling, LUO Fuyuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and quality of the needle row in three-dimensional weaving process, the mechanical structure of the automatic distribution device is studied based on the existing mechanical structure analysis. The key components such as needle out structure, needle extraction structure, push needle structure and 2D mobile workbench are designed; the working principle is elaborated; and the wire screw nut is designed in detail.

**Keywords:** carbon fiber; 3-dimensional fabric production; steel needle matrix arrangement

### 0 引言

复合材料由于其具有质量轻、强度高以及耐化学腐蚀等优异的性能,在航空航天、深海探索、国防工业、精密机械以及医疗卫生等领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>,现代高科技的发展离不开复合材料。而复合材料中纤维增强复合材料应用最广。碳纤维增强复合材料是以碳纤维或碳纤维织物为增强体,以树脂、陶瓷、金属、水泥、碳质或橡胶等为基体所形成的复合材料,是火箭、导弹以及高速飞行器等行业争相使用的一种先进材料。统计显示,目前,碳纤维复合材料在小型商务飞机和直升飞机上的使用量已占 70%~80%,在大型客机上占 15%~50%,在军用飞机上占 30%~40%。美国五代战斗机 F-22 战斗机,采用了约 26%的碳纤维复合材料,其中机翼复合材料使用率高达 95%。

碳纤维三维织物增强体是由碳纤维布平面方向均匀铺设叠层增强,垂直方向由碳纤维连续纤维,通过特殊编织工艺,整体贯穿成一体所构成的三维立体织物。目前,碳纤维三维织物增强体的成型主要采用碳布整体穿刺工艺来完成,其碳布整体穿刺工艺过程如图 1 所示。首先进行钢针矩阵的排布,其次将碳布置于  $z$  向钢针矩阵上端,在穿刺模板的推动下,与  $z$  向钢针矩阵整体穿刺,最后并

沿钢针下移、加压密实。重复以上过程至设定的高度后,再由碳纤维逐一替代  $z$  向钢针,制成碳布整体穿刺预成型体<sup>[3]</sup>。

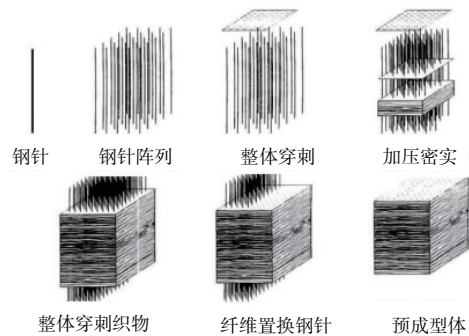


图 1 整体穿刺工艺流程

碳纤维三维织物增强体在航空航天、精密机械以及导弹等尖端领域发挥着极其重要的作用。然而,目前碳布整体穿刺工艺中钢针矩阵排布还无法实现自动化,存在着生产效率低下和生产成本高的问题。为了提高三维编织过程中的排针效率和质量,同时降低劳动成本,提高我国在应用碳纤维三维织物方面的机器装备产量与技术水平,因此设计钢针矩阵自动排布装置是十分必要的。

第一作者简介:邓振领(1995—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为基于机器视觉的位置伺服控制。

## 1 自动排布装置机械结构设计

### 1.1 主要技术指标

钢针矩阵排布就是将钢针依次穿过 3 层钢板排列成矩阵形状,以便后续完成碳布整体穿刺工艺。在实际生产过程中,碳纤维三维织物的规格和形状随着生产需求的变化而变化,根据织物尺寸规格的不同,钢针矩阵的尺寸也应不同,以便制造出不同尺寸规格的碳纤维三维织物增强体。经过向相关企业调研得知,在这几种常见的碳纤维三维织物规格中,织物的截面尺寸最大为 450 mm×450 mm,厚度在 120~230 mm 内变化。所以钢针矩阵自动排布装置应该至少能完成满足上述规格织物要求的钢针矩阵的排布。经综合考虑后,设定装置所能排布钢针矩阵尺寸为 600 mm×600 mm×600 mm,其主要技术指标如表 1 所示,钢板结构示意图如图 2 所示。

表 1 主要技术指标 单位:mm

钢针直径	钢针长度	钢针间距	矩阵尺寸
1.1	600	2.4	600×600

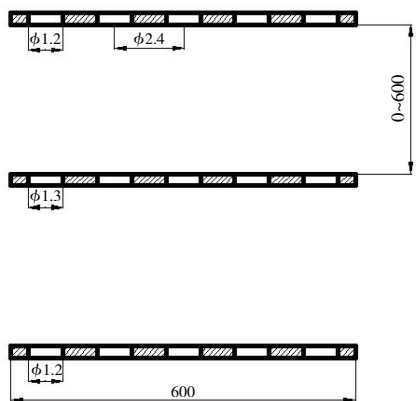


图 2 钢板结构示意图

### 1.2 机械机构设计

本自动化装置需要实现自动出针、取针、推针和二维移动工作平台精准定位 4 个功能。根据相关机械结构设计<sup>[4]</sup>和机械设计手册,完成钢针矩阵自动化排布装置的结构设计,针板上的孔是按行列矩阵有规律分布的,针孔间距较小,且数量非常多,钢针矩阵自动排布装置需要避免执行机构运行一段距离后产生累积误差的影响,每一次都要精准地捕捉到针孔位置。因此本文选择精度较高的伺服电机,以便达到较高的定位精度和重复定位精度。

出针机构要保证每一次都能可靠地出针,既要考虑钢针在排出过程中发生掉落的情况,还要考虑钢针在排出过程中出现卡住的现象。本机构模仿市场上自动牙签盒的结构而设计,市场上智能感应牙签盒采用高敏红外感应收发器接收信号,电动推出出签。本设计采用气缸作为执行元件,压缩空气通过电磁阀控制气缸作机械运动来完成自

动排针,其出针机构如图 3 所示。钢针预先放入储针盒中,钢针依靠重力滑出储针盒,储针盒开口每次仅能滑出一根钢针,气缸推动出针板将钢针举出,等待取针机构将钢针取走,最后气缸带动出针板落下,即完成一次出针过程。为解决钢针在排出过程中可能出现卡住的问题,在出针机构中增加了激振器,激振器通过振动储针盒以使卡住的钢针排出。为解决出针板将钢针举出的过程中可能会掉落的问题,可以采用充磁器对出针板充磁以产生磁力来固定钢针,防止举出的过程中掉落。

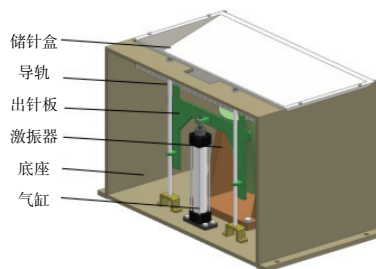


图 3 出针机构三维建模图

取针机构是钢针矩阵自动排布的第二步,要完成夹持钢针、旋转 90°、放进针槽 3 个过程。在执行的过程中要保证有足够的夹持力以避免钢针晃动脱落的现象,也要在旋转后保持一定的竖直精度。取针机构主要包括夹针机构、旋转工作平台、驱动旋转工作平台工作的直流电机、滑动平台和驱动滑动平台工作的元件。本文设计的取针机构的方案有两种,第一种是采用伺服电机作为驱动滑动平台的动力元件,第二种是采用气缸作为驱动滑动平台的动力元件。伺服电机实现了位置、速度和力矩的闭环控制,具有较高的精度和低速平稳运行的优点,但是伺服电机以滚珠丝杠作为传动元件驱动滑动平台与气缸驱动滑动平台相比运行速度慢,显然无法达到高效工作的目标,且本机构滑动平台定位数量少,滑动平台做直线往复运动。为了达到精确定位的目的,设计了微调机构以保证精确定位的目的,夹针机构采用电磁铁作为驱动元件,以保证足够的夹持力,故经综合考虑,采用第二种方案。其三维结构图如图 4 所示。

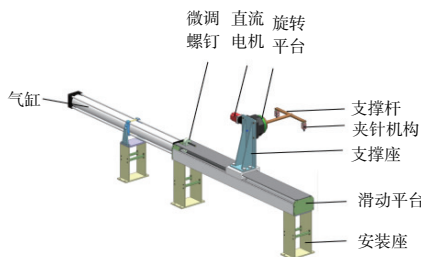


图 4 取针机构三维建模图

夹针机构的设计主要采用连杆机构完成夹针,以电磁铁线圈的通电与断电来控制连杆机构的闭合与断开。当电磁铁线圈通电时产生电磁吸力使得连杆机构闭合,当电磁铁线圈断电时,电磁铁吸力消失,连杆机构在弹簧的拉力下复位。夹针机构如图 5 所示。

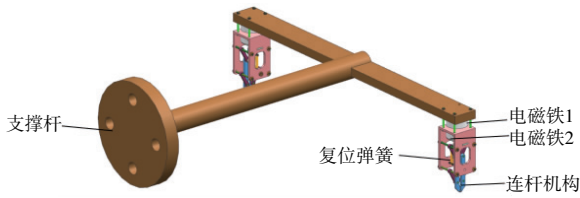


图5 夹针机构三维建模图

推针机构是钢针矩阵自动排布的第三步,要把针槽里的钢针推到针板里,这就有可能在执行的过程遇到较大的阻力,导致钢针弯曲。当发生这种情况的时候,要及时地停止推针过程,并启动报警器报警。推针机构采用曲柄滑块机构,以气缸为动力完成推针片的展开与收缩来完成将钢针推进针板系统,其推针机构如图6所示。

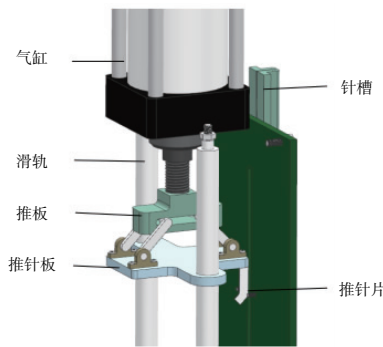


图6 推针机构三维建模图

经综合考虑后,绘制出该装置的三维装配图如图7所示。

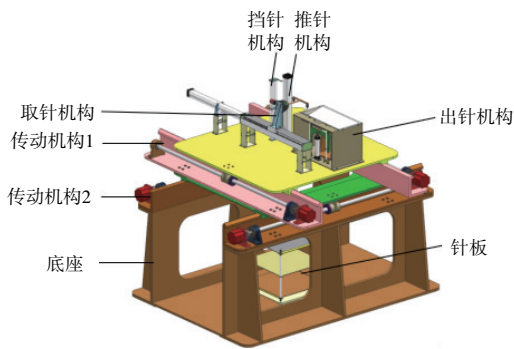


图7 三维装配图

### 1.3 工作原理

钢针矩阵自动排布装置的工作流程简述如下:将机器初始化之后,二维工作移动平台在伺服电机的驱动下首先将针槽孔移动到钢板针孔的正上方,出针板在出针气缸推动下将钢针举出,出针机构排出钢针。在取针气缸的推动下,直线滑动平台的工作台右移,此时旋转工作平台旋转至水平,当移到出针机构的正上方后,取针机构安装的光电传感器检测有无钢针排出,若无钢针排出,出针机构需要重新排出钢针;若有钢针排出,夹针机构在两个电磁铁

通断电的作用下完成将夹针机构下放、上移、夹头的张开和闭合4个动作,将钢针取出后,在取针气缸驱动下直线滑动平台的工作台左移,此时旋转工作台将钢针旋转至竖直,钢针被送到推针机构的针槽内。安装在针槽上的光电传感器检测是否有钢针放入,若不能检测到钢针,则应重复取针步骤。钢针放入针槽后,推针机构推动钢针放入针板中,即完成一次钢针排布,各机构复位,重复以上过程直到完成所有钢针的排布,其工作流程图如图8所示。该装置中的传感器、伺服电机、电磁铁以及气缸等采用PLC控制器按照一定的顺序完成。

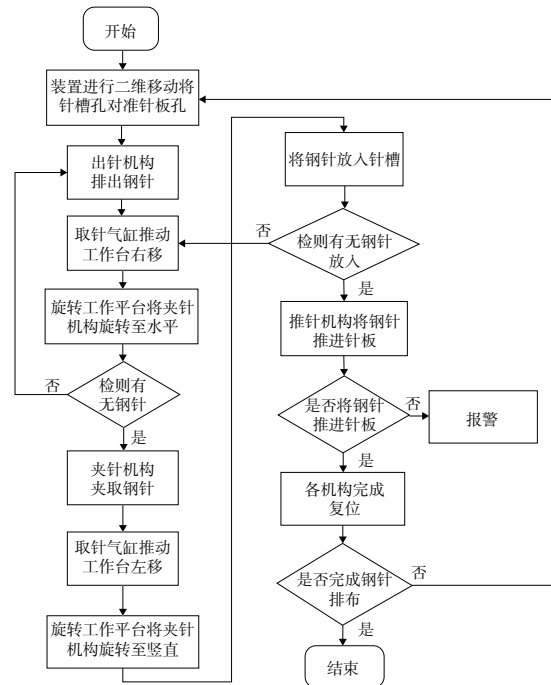


图8 钢针矩阵自动排布装置工作流程图

## 2 丝杠螺母副的设计

### 2.1 丝杠轴向载荷的计算

滚珠丝杠和滑动丝杠相比具有摩擦小、传动效率高、传动灵敏不易产生爬行、定位精度高等优点。缺点是:不能自锁,用于升降传动时需另加自锁机构,结构复杂成本高<sup>[5]</sup>。本设计中滚珠丝杠并不用于升降传动,而选择滚珠丝杠作为传动机构。在该装置工作运行中,可以将丝杠所受轴向载荷分为加速、匀速、减速和停止4个不同的阶段,其所受轴向载荷分别为:

$$F_1 = 0.5(m_T g \mu + m_T a + F_f) = 1\,042.5 \text{ (N)} \quad (1)$$

$$F_2 = 0.5(m_T g \mu + F_f) = 375 \text{ (N)} \quad (2)$$

$$F_3 = 0.5(-m_T g \mu + m_T a - F_f) = 292.5 \text{ (N)} \quad (3)$$

$$F_4 = 0 \quad (4)$$

式中:工作台质量 $m_T$ 约为500 kg;矩形导轨摩擦因数 $\mu$ 为0.15;工作台加速度 $a$ 为 $2.67 \text{ m/s}^2$ ;  $F_f$ 为无载荷时直线导轨副的运动阻力,取为15 N。

## 2.2 滚珠丝杠螺母副选型计算

1) 确定滚珠丝杠动载荷  $C'_a$

确定丝杠导程,其中,工作台最大速度  $n_{\text{spmax}}$  为 1 000 r/min,丝杠最大转速  $V_{\text{tmax}}$  为 10 200 mm/min,则计算丝杠导程为

$$P_h \leq \frac{V_{\text{tmax}}}{n_{\text{spmax}}} = 10.2 \text{ (mm)} \quad (5)$$

故选择导程为 10 mm。

确定当量载荷,其中轴向载荷由式(1)~式(4)计算得出, $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 分别为加速阶段、匀速阶段、减速阶段和停止阶段丝杠所受轴向载荷时间占比,分别为 3/35、9/35、3/35 和 4/7,则

$$F_m = \frac{F_1 t_1 + F_2 t_2 + F_3 t_3 + F_4 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = 210.9 \text{ (N)} \quad (6)$$

确定当量转速,其中,滚珠丝杠工作台的匀速阶段为  $0.04 \text{ m/s}^2$ , $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ 分别为加速阶段、匀速阶段、减速阶段和停止阶段丝杠的平均转速,通过计算分别为 120 r/min、240 r/min、120 r/min 和 0,则

$$n_m = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + n_3 t_3 + n_4 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = 82 \text{ (r/min)} \quad (7)$$

取滚珠丝杠寿命  $L_h$  为 20 000 h,载荷系数  $f_w$  为 2,由式(6)和式(7)可以算出该滚珠丝杠的动载荷为

$$C'_a = \sqrt[3]{60 n_m L_h} \frac{F_m f_w}{100} = 1 947 \text{ (N)} \quad (8)$$

2) 确定静载荷,其中静态安全系数  $f_d$  取为 1,最大轴向力  $F_{\text{max}}$  近似取为  $F_1$ ,则

$$C'_{\text{oa}} = f_d F_{\text{max}} = 1 042.5 \text{ (N)} \quad (9)$$

3) 根据轴向压力选取丝杠直径,其中轴向压力  $F_a$  为 1 042.5 N, $m$  为临界载荷系数取为 15.1,则

$$d_{\text{sp}} = \sqrt[4]{\frac{F_a L^2}{m \times 10^4}} = 13.5 \text{ (mm)} \quad (10)$$

4) 转速限制,其中  $n_{\text{max}}$  为丝杠最大转速; $A$  通常取 50 000~70 000,本文取为 60 000; $L$  为丝杠跨距取为 2 169 mm,则

$$d'_{\text{sp}} \leq \frac{A}{n_{\text{max}}} = 60 \text{ (mm)} \quad (11)$$

$$d''_{\text{sp}} = \frac{n_c L^2}{f \times 10^7} \geq \frac{n_{\text{max}} L^2}{f \times 10^7} = 32 \text{ (mm)} \quad (12)$$

5) 选择丝杠直径,由上面计算结果得  $C'_a \geq 1 947 \text{ N}$ ,  $C'_{\text{oa}} \geq 1 042.5 \text{ N}$ ,  $d_{\text{sp}} \geq 13.5 \text{ mm}$ ,  $d'_{\text{sp}} \leq 60 \text{ mm}$ ,  $d''_{\text{sp}} \geq 32 \text{ mm}$ ,则可选择丝杠直径为 40 mm。

## 3 结语

为早日实现钢针矩阵排布自动化,提高钢针矩阵排布的效率,促进碳纤维复合材料的发展,根据生产实际要求,本文对钢针矩阵自动排布装置机械结构部分进行了分析设计,并对滚珠丝杠进行了设计校核。该装置不仅能实现自动出针、取针和推针功能,而且结构简单,传动精度高,对钢针矩阵自动化排布装置的开发应用具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 邓文波,习小斌,冯万喜. 复合材料主要应用领域现状与发展趋势[J]. 黑龙江科技信息,2017(7):84.
- [2] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术,2017,60(19):78-85.
- [3] 朱建勋. 整体穿刺工艺碳布运动力学行为解析[C]//第十六届全国复合材料学术年会(NCCM-16).长沙:中国复合材料学会,2010:570-574.
- [4] 刘新颖,金守峰. 方形商标自动钉缝装置的结构设计与力学分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(4):17-19.
- [5] 王爱玲. 现代数控机床[M]. 2版.北京:国防工业出版社,2009.

收稿日期:2021-10-25

(上接第30页)

- [11] XU Z Z, LIU X J, KIM H K, et al. Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(7/8):605-611.
- [12] 张国. 滚珠丝杠副热变形问题研究与对策[J]. 现代制造技术与装备,2019(11):41-43.
- [13] 何震. 机床滚珠丝杠系统热特性分析及其热变形补偿[D]. 成都:西南交通大学,2009.

- [14] 钟名东. 高速高精数控车床滚珠丝杠进给系统热态特性研究[D]. 南昌:华东交通大学,2011.
- [15] 张耀满,暴风旭,齐培宁. 滚珠丝杠螺母副热态特性建模方法[J]. 中国机械工程,2020,31(20):2486-2490,2496.
- [16] 郑卉,钱宏亮,金晓飞,等. 钢构件对流换热系数计算方法综述[C]. 第十五届空间结构学术会议论文集.上海:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会,2014.

收稿日期:2021-10-13