

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 1 月 20 日 (20.01.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/011845 A1

(51) 国际专利分类号:
C21D 7/06 (2006.01) *B21D 22/14* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/119152

(22) 国际申请日: 2020 年 9 月 30 日 (30.09.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010682850.X 2020 年 7 月 15 日 (15.07.2020) CN

(71) 申请人: 华东理工大学(EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 中国航空制造技术研究院 (AVIC MANUFACTURING TECHNOLOGY

INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市朝阳区八里桥北东军庄 1 号, Beijing 100024 (CN)。

(72) 发明人: 张显程 (ZHANG, Xiancheng); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 李志强 (LI, Zhiqiang); 中国北京市朝阳区八里桥北东军庄 1 号, Beijing 100024 (CN)。 刘爽 (LIU, Shuang); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 韩晓宁 (HAN, Xiaoning); 中国北京市朝阳区八里桥北东军庄 1 号, Beijing 100024 (CN)。 姚树磊 (YAO, Shulei); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 龚从扬 (GONG, Congyang); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 朱林 (ZHU, Lin); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 张开明 (ZHANG, Kaiming); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237

(54) Title: AIRCRAFT ENGINE BLADE ULTRASONIC ROLLING REINFORCEMENT ROBOT PROCESSING SYSTEM AND CONTROL METHOD

(54) 发明名称: 航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法

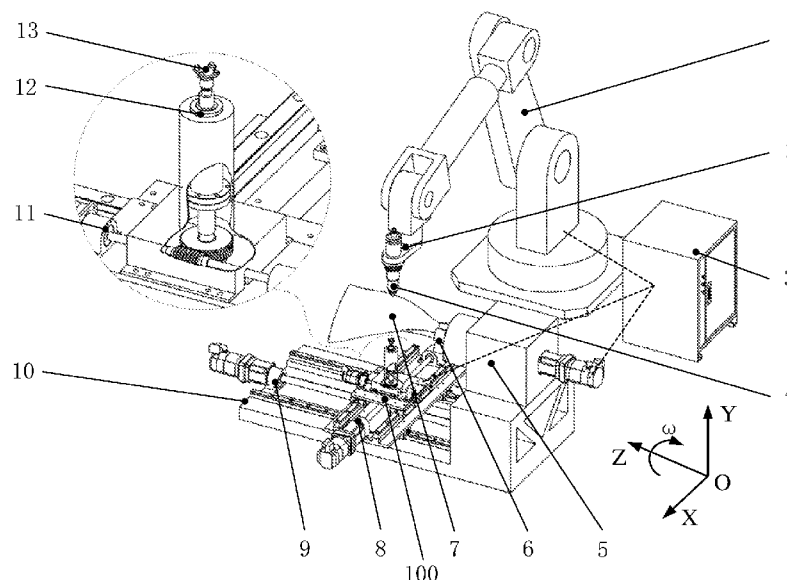


图 1

(57) Abstract: The present invention relates to an aircraft engine blade ultrasonic rolling reinforcement robot processing system and a control method. The ultrasonic rolling reinforcement robot processing system comprises a robot, wherein an ultrasonic rolling reinforcement apparatus is fixed on the robot, and the robot drives the ultrasonic rolling reinforcement apparatus to move; a base, wherein the base is provided with a main shaft rotary table and a three-dimensional moving lifting apparatus, the main shaft rotary table is provided with a rotatable blade clamp, and a flexible follow-up supporting head is fixed on the three-dimensional moving lifting apparatus; and a control system, wherein the control system is separately in electrical connection or communication connection with the robot,



WO 2022/011845 A1

(CN)。涂善东(TU, Shandong); 中国上海市徐汇区梅陇路130号, Shanghai 200237 (CN)。

(74) 代理人: 上海智信专利代理有限公司(SHANGHAI ZHI XIN PATENT AGENT LTD.); 中国上海市徐汇区斜土路1223号之俊大厦26楼, Shanghai 200032 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))
- 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。
- 包括经修改的权利要求及声明(条约第19条(1))。

the main shaft rotary table and the three-dimensional moving lifting apparatus. According to the aircraft engine blade ultrasonic rolling reinforcement robot processing system and the control method, the robot is used to assist with clamping the ultrasonic rolling apparatus and is combined with the three-dimensional moving lifting apparatus and the flexible follow-up supporting head, and the three are cooperatively controlled, such that the accurate ultrasonic rolling reinforcement of an aircraft engine blade is realized.

(57) 摘要: 本发明涉及一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法, 该超声滚压强化机器人加工系统包括: 机器人, 其上固定有一超声滚压强化装置并带动该超声滚压强化装置移动; 底座, 其上安装有主轴转台和三维移动升降装置, 所述主轴转台上设置有可旋转的叶片夹具, 三维移动升降装置上则固定一柔性随动支撑头; 控制系统, 分别与所述机器人、主轴转台和三维移动升降装置电连接或通讯连接。本发明的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法, 采用机器人辅助夹持超声滚压装置, 配合三维移动升降装置以及柔性随动支撑头, 并通过对三者进行协同控制, 实现航空发动机叶片的精确超声滚压强化。

航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及航空发动机加工领域，更具体地涉及一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法。

背景技术

[0002] 叶片作为航空发动机中最核心的部件之一，长期服役于高温高压高速等极端环境下，是典型的限寿命部件。超声滚压强化加工是一种将超声喷丸与低塑性抛光相结合的新型表面改性技术，通过超声辅助振动使球型工具头高频高幅撞击金属表面，从而使被加工表面产生一定的塑性变形层，进而降低金属表面粗糙度、提高金属表层硬度以及对材料内部引入有益残余压应力，最终达到提高材料使用寿命的目的。研究表明，超声滚压强化技术对于提升航空发动机叶片的服役寿命具有较大的潜在应用价值。目前，超声滚压强化加工的研究对象大多是平板或圆棒等试验件，强化加工设备大多是根据数控车床或铣床通过更换刀具的方式进行改装而成。航空发动机叶片具有复杂曲面、薄壁特征，传统的数控加工方式难以实现航空发动机叶片精确有效的超声滚压强化。

[0003] 随着工业机器人技术的发展，关节机器人以其较高的自由度和可达性、良好的精度，在加工复杂曲面工件方面的应用具有较大的优势。机器人通过夹持强化工具，可以实现沿叶片表面法向进行强化加工。然而，在对航空发动机叶片的表面强化研究中发现，一方面，具有高幅高频超声振动的强化工具作用于叶片上会引起叶片的颤振，另一方面，强化工具对叶片施加的冲击力会造成叶片较大的形变，这将严重影响叶片超声滚压强化的表面改性效果和强化加工的几何精度。

[0004] 因此，在对航空发动机叶片进行超声滚压强化加工时，如何设置相应的辅助支撑系统，以使施加于叶片上的力尽可能相同，来抵消叶片因单侧受力过大而造成形变，同时减小叶片在超声滚压强化加工过程中产生的颤振是本领域技术人员亟待解决的技术问题。

发明内容

[0005] 本发明提供一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法，通过控制超声滚压强化装置和柔性随动支撑头施加在航空发动机叶片表面的力尽可能相同，以抑制航空发动机叶片在超声滚压强化过程中产生的形变和颤振，最终实现对航空发动机叶片精确的超声滚压强化加工。

[0006] 本发明一方面提供一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，包括：

[0007] 机器人，其上固定有一超声滚压强化装置并带动该超声滚压强化装置移动；

[0008] 底座，其上安装有主轴转台和三维移动升降装置，所述主轴转台上设置有可旋转的叶片夹具，三维移动升降装置上则固定一柔性随动支撑头；

[0009] 控制系统，分别与所述机器人、主轴转台和三维移动升降装置电连接或通讯连接。

[0010] 进一步地，所述机器人为五轴或六轴机器人。

[0011] 进一步地，所述主轴转台包括伺服电机、减速器、转台基座、旋转主轴、过渡盘和旋转编码器，所述减速器固定在所述转台基座上，所述伺服电机与所述减速器的输入轴相连，所述旋转主轴与所述减速器的输出轴相连，所述过渡盘与旋转主轴相连，所述叶片夹具设于所述过渡盘上，所述旋转编码器内置于所述伺服电机中，所述控制系统分别与所述伺服电机、旋转编码器电连接。

[0012] 进一步地，所述三维移动升降装置包括升降支撑杆、X 向移动驱动装置、Y 向升降驱动装置、Z 向移动驱动装置；所述 Z 向移动驱动装置设于所述底座上，所述 X 向移动驱动装置与所述 Z 向移动驱动装置相连，所述 Y 向移动驱动装置与所述 X 向移动驱动装置相连，所述升降支撑杆与所述柔性随动支撑头相连。

[0013] 进一步地，所述 Z 向移动驱动装置包括第一驱动件、第一滚珠丝杠、第一丝杠螺母，所述滚珠丝杠沿 Z 向设置在所述底座上，所述第一驱动件与所述滚珠丝杠相连，所述滚珠丝杠与穿过所述第一丝杠螺母且与所述第一丝杠螺母传动配合。

[0014] 进一步地，所述 X 向移动驱动装置包括安装板、第二驱动件、第二滚珠丝杠、第二丝杠螺母，所述安装板固定在所述第一丝杠螺母上，所述第二滚珠丝杠沿 X 向设置在所述安装板上，所述第二驱动件与所述第二滚珠丝杠相连，所述第二滚珠丝杠与穿过所述第二丝杠螺母且与所述第二丝杠螺母传动配合。

[0015] 进一步地，所述 Y 向升降驱动装置包括升降底板以及设置在所述升降底板上的第三驱动件、涡轮、蜗杆、第三滚珠丝杠和第三丝杠螺母，所述第三滚珠丝杠沿 Y 向设置，所述第三驱动件与所述蜗杆相连，所述涡轮分别与所述蜗杆和第三滚珠丝杠相啮合，第三滚珠丝杠穿过所述第三丝杠螺母且与所述第三丝杠螺母传动配合，所述升降支撑杆与所述第三丝杠螺母相连。

[0016] 进一步地，所述叶片夹具包括上压块、下压块、左抱块和右抱块。

[0017] 进一步地，还包括控制柜，所述控制系统设于所述控制柜中。

[0018] 本发明另一方面提供一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，至少包括：

[0019] 步骤 S1：提供一种如上所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，使所述叶片夹具夹住叶片的榫根部位，并使叶片的待加工面朝向所述超声滚压强化装置，所述柔性随动支撑头则支撑所述待加工面的对立面；

[0020] 步骤 S2：根据叶片的模型按照等截面法生成超声滚压强化装置的“之”字形加工轨迹；

[0021] 步骤 S3：根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹生成升降支撑杆的移动轨迹；

[0022] 步骤 S4：控制系统根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹和所述升降支撑杆的移动轨迹控制超声滚压强化装置和升降支撑杆的移动，以完成叶片待加工面的强化加工。

[0023] 进一步地，所述步骤 S4 还包括：

[0024] 控制系统控制所述主轴转台不断旋转，以使所述叶片的待加工面的对立面的截面轮廓线与所述升降支撑杆的轴线保持垂直、所述超声滚压强化装置与所述叶片的待加工面的接触点在所述升降支撑杆的轴线上、所述超声滚压强化装置的方向始终沿所述叶片的待加工面的法线方向。

[0025] 本发明的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统及控制方法，采用机器人辅助夹持超声滚压装置，配合三维移动升降装置以及柔性随动支撑头，并通过对机器人、主轴转台和三维移动升降装置进行协同控制，实现航空发动机叶片的精确超声滚压强化。一方面，利用机器人自由度高、可达性强、精度好的优点，实现沿航空发动机叶片表面法线方向进行超声滚压强化；另一方面，通过柔性随动支撑头有效解决航空发动机叶片在超声滚压强化过程中由于高频高幅超声振动滚压强化产生的形变和颤振问题；经过超声滚压强化能够有效降低航空发动机叶片表面的粗糙度、提高叶片表层的硬度，并向叶片内部引入有益的残余压应力，最终有望提高航空发动机服役寿命。

附图说明

[0026] 图 1 为本发明一实施例提供的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统的结构示意图；

[0027] 图 2 为本发明一实施例提供的主轴转台的结构示意图；

[0028] 图 3 为本发明一实施例提供的叶片夹具的结构示意图；

[0029] 图 4 为本发明一实施例提供的三维移动升降装置的俯视图；

[0030] 图 5 为图 4 的 A-A 剖视图；

[0031] 图 6 为图 5 的 I 部放大图；

[0032] 图 7 为图 5 的 II 部放大图；

[0033] 图 8 为图 5 的 III 部放大图；

[0034] 图 9 为本发明另一实施例提供的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法的流程示意图；

[0035] 图 10 为本发明另一实施例提供的航空发动机叶片的加工轨迹示意图；

[0036] 图 11 为本发明另一实施例提供的航空发动机叶片的加工过程示意图。

具体实施方式

[0037] 下面结合附图，给出本发明的较佳实施例，并予以详细描述。

[0038] 应当注意的是，为了便于描述，本发明定义了如图 1 所示的坐标系 O-XYZ， ω 为绕 Z 轴旋转的方向。

[0039] 实施例一

[0040] 如图 1 所示, 本发明实施例提供一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统, 包括机器人 1、底座 10 和控制柜 3。其中, 机器人 1 上固定有一超声滚压强化装置 4 并带动该超声滚压强化装置 4 移动; 底座 10 上安装有主轴转台 5 和三维移动升降装置 100, 所述主轴转台 5 上设置有叶片夹具 6, 用于夹持待加工的航空发动机叶片 7, 该夹具 6 可以绕着 Z 方向进行旋转, 从而带动叶片 7 绕着 Z 方向旋转; 三维移动升降装置 100 上则固定一柔性随动支撑头 13 并带动该支撑头 13 完成 X、Y、Z 三个方向的移动; 控制柜 3 中设置控制系统, 所述控制系统分别与机器人 1、主轴转台 5 和三维移动升降装置 100 电连接或通讯连接, 三者协同运动, 图 1 中的虚线表示电连接或通讯连接。

[0041] 在加工过程中, 超声滚压强化装置 4 位于柔性随动支撑头 13 的上方, 且两者分别位于叶片 7 的上下两侧, 柔性随动支撑头 13 对叶片起支撑作用, 超声滚压强化装置 4 则用于对叶片 7 表面进行超声滚压强化加工; 控制柜 3 中的控制系统则控制机器人 1 的运动——即控制超声滚压强化装置 4 的运动轨迹、主轴转台 5 的旋转——即叶片 7 的旋转和三维移动升降装置 100 的移动——即柔性随动支撑头 13 的移动, 通过这三部分的配合, 完成对叶片 7 表面的超声滚压强化加工。

[0042] 所述机器人 1 可以为多自由度的关节机器人, 例如为五轴或六轴的关节机器人, 以满足对叶片 7 的曲面表面的加工要求。

[0043] 超声滚压强化装置 4 可以通过连接装置 2 与机器人 1 相连, 并固定在机器人 1 的末端执行器上, 这样超声滚压强化装置 4 即可在机器人 1 的控制下沿叶片 7 表面的法线方向进行强化加工。

[0044] 具体地, 连接装置 2 可以为现有技术中的常规工具连接装置, 例如法兰, 螺栓、卡扣等等, 本发明对此不做限定。

[0045] 超声滚压强化装置 4 可以采用现有技术中的任意一种强化装置, 一般包括依次相连的超声发生器、力传感器、弹簧、超声换能器、超声变幅杆、滚压小球以及必要的固定装置, 超声换能器将超声发生器的高频电信号转换为振动信号, 经过超声变幅杆的传递和放大, 最终通过滚压小球作用到被加工工件表面, 从而完成超声滚压强化加工。

[0046] 如图 2 所示, 主轴转台 5 可以包括旋转编码器 17、伺服电机 18、减速器 19、减速器安装板 20、联轴器 21、旋转主轴 22、转台基座 23、锁紧螺母 24、轴承隔环 25、圆锥滚子轴承 26、轴承端盖 27、过渡盘 28, 其中, 伺服电机 18 与减速器 19 的输入轴相连, 减速器 19 通过减速器安装板 20 固定于转台基座 23 上, 旋转主轴 22 通过联轴器 21 与减速器 19 的输出轴相连, 两对圆锥滚子轴承 26 置于转台基座 23 内用以支撑旋转主轴 22, 轴承隔环 25 将两对圆锥滚子轴承 26 隔开, 锁紧螺母 24 与轴承端盖 27 用于固定两对圆锥滚子轴承 26, 过渡盘 28 与旋转主轴 22 输出端相连。叶片夹具 6 设置于过渡盘 28 上, 这样, 通过伺服电机的驱动, 可以使叶片夹具 6 发生旋转; 伺服电机 18 内置旋转编码器 17, 用于测量转速并实现快速调速; 控制系统分别与伺服电机和旋转编码器电连接, 通过对伺服电机和旋转编码器进行控制, 从而控制叶片 7 实现精确角度的旋转。

[0047] 如图 3 所示, 叶片夹具 6 是按照航空发动机的叶片 7 在航空涡轮盘上的安装方式, 根据叶片榫根部位 29 采用“倒模”的方式进行设计并制造。具体地, 叶片夹具 6 包括上压块 31、下压块 33、左抱块 30 和右抱块 32, 通过这四部分对叶片 6 榫根部位进行夹持。

[0048] 如图 1 和图 4 所示, 三维移动升降装置包括 X 向移动驱动装置 8、Y 向升降驱动装置 11、Z 向移动驱动装置 9 和升降支撑杆 12, X 向移动驱动装置 8、Y 向升降驱动装置 11 和 Z 向移动驱动装置 9 共同实现升降支撑杆 12 的三维运动。Z 向移动驱动装置 9 设于底座 10 上, X 向移动驱动装置 8 与 Z 向移动驱动装置 9 相连, Y 向升降驱动装置 11 则与 X 向移动驱动装置 8 相连, 升降支撑杆 12 与 Y 向升降驱动装置 11 相连, Z 向移动驱动装置 8 可以带动 X 向移动驱动装置 8 进行 Z 向移动, 而 X 向移动驱动装置 8 可以带动 Y 向升降驱动装置 11 进行 X 向移动, Y 向升降驱动装置 11 则可以带动升降支撑杆 12 进行 Y 向移动, 这样, 在三者的配合下, 升降支撑杆 12 可以实现三维移动。

[0049] 具体地, 如图 4-图 7 所示, Z 向移动驱动装置 9 为滚珠丝杠传动结构, 包括沿 Z 向设置的伺服电机 34 (即第一驱动件)、减速器 35、平键 36、第一滚珠丝杠 37、减速器安装座 38、轴承端盖 39、锁紧螺母 40、轴承座 41、径向滚珠轴承 42、套筒 43、激光位移传感器 44、光栅尺 45、丝杠螺母副 46、丝杠螺母座 47, 丝杠螺母副 46 和丝杠螺母座 47 即为第一丝杠螺母, 减速器

安装座 38 和轴承座 41 分别固定在底座 10 的两端，伺服电机 34 固定在减速器 50 的输出端，第一滚珠丝杠 37 的两端分别通过双径向滚珠轴承 42 安装于轴承座 41 中，其中双径向滚珠轴承 42 通过轴承端盖 39、锁紧螺母 40、套筒 43 进行固定，锁紧螺母 40 和套筒 43 用于固定径向滚珠轴承 42 的内圈，轴承端盖 39 用于固定径向滚珠轴承 42 的外圈，轴承端盖 39 穿过滚珠丝杠 37 固定在轴承座 41 上，第一滚珠丝杠 37 的一端通过平键 36 与减速器 50 的输出轴相连，另一端则固定在轴承座 41 上，滚珠丝杠 37 穿过丝杠螺母座 47，两者形成丝杠螺母副 36，这样可以将滚珠丝杠 37 的转动转化为丝杠螺母座 47 的移动，从而使丝杠螺母座 47 可以在 Z 向自由运动，激光位移传感器 44 固定在底座 10 上用于检测 Z 向移动驱动装置的直线位移，光栅尺 45 由标尺光栅 45-1 和光栅读数头 45-2 两部分组成，其中标尺光栅 45-1 固定于底座 10 上，光栅读数头 45-2 安装于安装板 64 的底部，标尺光栅 45-1 与光栅读数头 45-2 配合实时反馈 Z 向移动位置。

[0050] X 向移动驱动装置 8 与 Z 向移动驱动装置 9 结构相同，均为滚珠丝杠传动结构，与 Z 向移动驱动装置 9 相比，X 向移动驱动装置多了安装板 64，其中，安装板 64 固定在 Z 向移动驱动装置 9 的丝杠螺母座 47 上，而 X 向移动驱动装置的伺服电机（即第二驱动件）、第二滚珠丝杠、丝杠螺母座和丝杠螺母副（即第二丝杠螺母）、减速器等其他部件则设置在安装板 64 上，从而使 X 向移动驱动装置 8 能够在 Z 向自由移动，安装方式与 Z 向移动驱动装置 9 相同，此处不再赘述。

[0051] 具体地，还可以在底座 10 上沿 Z 向设置导轨 48，安装板 64 上则设置与导轨 48 相配合的滑槽，从而使 X 向移动驱动装置 8 可以在导轨 48 上滑动。

[0052] 如图 4、图 5 和图 8 所示，Y 向升降驱动装置 11 包括伺服电机 49（即第三驱动件）、减速器 50、减速器安装座 51、蜗杆轴承座 52、升降底板 53、锁紧螺母 54、丝杠轴承座 55、径向滚珠轴承 56、轴承隔环 57、止推轴承 58、涡轮 59、蜗杆 60、滚珠丝杠 61（即第三滚珠丝杠）、丝杠螺母副 62（即第三丝杠螺母）、升降装置外壳 63，其中，升降底板 53 固定在 X 向移动驱动装置 8 的丝杠螺母座 47（即第二丝杠螺母）上，从而使升降底板 53 可以在 Z 向自由移动；减速器安装座 51、蜗杆轴承座 52、丝杠轴承座 55 均固定在升降底板 53 上，减速器 50 安装在减速器安装座 51 上，伺服电机 49 与减速器 50 的

输入轴相连，蜗杆 60 的两端均安装在轴承座 52 上，且其中一端与减速器 50 的输出轴相连，滚珠丝杠 61 沿 Y 向设置，且一端固定在丝杠轴承座 55 上，滚珠丝杠 61 穿过丝杠螺母副 62 且与其传动配合，升降支撑杆 12 与丝杠螺母副 62 相连并且在升降装置外壳 63 内滑动；涡轮 59 则安装在升降底板 53 上且分别与蜗杆 60 和滚珠丝杠 61 相啮合，这样，在伺服电机 49 的作用下，带动蜗杆 60 转动，蜗杆 60 再带动涡轮 59 转动，涡轮 59 再带动滚珠丝杠 61 转动，从而使丝杠螺母副 62 沿 Y 向运动，从而实现升降支撑杆 12 的 Y 向移动，止推轴承 58、轴承隔环 57、径向滚珠轴承 56、锁紧螺母 54 依次安装在滚珠丝杠 61 的下端，径向滚珠轴承 56 和止推轴承 58 的半部分固定在丝杠轴承座 55 内，径向滚珠轴承 56 用于保证滚珠丝杠 61 的正常转动，止推轴承 58 用于保证涡轮 59 的正常转动，轴承隔环 57 用于将径向滚珠轴承层 56 和止推轴承 58 隔开，锁紧螺母 54 与滚珠丝杠 61 螺纹连接用于固定径向滚珠轴承 61 的内圈，在升降装置外壳 63 固定在升降底板 53 上。

[0053] 由于柔性随动支撑头 13 与升降支撑杆 12 相连，因此，柔性随动支撑头 13 也可以实现三维移动。

[0054] 柔性随动支撑头 13 可以采用现有技术中的任意一种柔性随动支撑装置，一般包括多个滚珠、滚珠支撑杆、力传感器、弹簧等零部件，滚珠支撑杆和弹簧相连形成柔性支撑件，用于支撑滚珠，滚珠与滚珠支撑杆相连，力传感器与弹簧相连，用于实时监控支撑力的大小，在使用时，多个滚珠与叶片 7 接触，从而起到柔性支撑的作用。

[0055] 在一个可行的实施方式中，本发明的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统的控制柜 3 还可由控制台替换，计算机或 PLC 等控制装置置于其上，以对机器人 1、主轴转台 5、三维移动升降装置 100 的协调控制，实现对叶片 7 的精确超声滚压强化加工。

[0056] 本发明实施例提供的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，采用机器人辅助夹持超声滚压装置，配合三维移动升降装置以及柔性随动支撑头，并通过对机器人、主轴转台和三维移动升降装置进行协同控制，实现航空发动机叶片的精确超声滚压强化。一方面，利用机器人自由度高、可达性强、精度好的优点，实现沿航空发动机叶片表面法线方向进行超声滚压强化；另一方面，通过柔性随动支撑头有效解决航空发动机叶片在超声滚压强

化过程中由于高频高幅超声振动滚压强化产生的形变和颤振问题；经过超声滚压强化能够有效降低航空发动机叶片表面的粗糙度、提高叶片表层的硬度，并向叶片内部引入有益的残余压应力，最终有望提高航空发动机服役寿命。

[0057] 实施例二

[0058] 如图 9 所示，本实施例提供一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，其至少包括：

[0059] 步骤 S1：提供一种如实施例一所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，使叶片夹具 6 夹住叶片 7 的榫根部位，使叶片 7 的待加工面朝向超声滚压强化装置 4，柔性随动支撑头 13 则支撑所述待加工面的对立面。

[0060] 步骤 S2：根据叶片的模型按照等截面法生成超声滚压强化装置的“之”字形加工轨迹。

[0061] 具体地，根据叶片 7 的 CAD 模型按照等截面法生成超声滚压强化装置 4 的加工轨迹，等截面法是加工轨迹规划方法的一种，即在生成轨迹的时候用多个等距的平行平面与叶片的交线作为加工轨迹。如图 10 所示，图中箭头方向即为超声强化装置 4 的加工轨迹，呈“之字形”，之字形加工轨迹的加工效率更高，生成的加工轨迹输入控制系统中，由控制系统控制机器人 1，再由机器人 1 带动超声滚压强化装置 4 沿着生成的加工轨迹对叶片 7 进行加工。

[0062] 步骤 S3：根据所述超声滚压强化装置 4 的加工轨迹生成升降支撑杆的移动轨迹。

[0063] 具体地，由于柔性随动支撑头 13 在加工过程中需要对叶片 7 起到支撑作用，因此，柔性随动支撑头 13 需要跟随超声滚压强化装置 4 的加工轨迹一起移动，而柔性随动支撑头 13 的移动轨迹是由升降支撑杆 12 的移动确定的，超声滚压强化装置 4 的加工轨迹生成后，即可计算出升降支撑杆 12 的移动轨迹，该移动轨迹也输入控制系统中，由控制系统控制三维移动升降装置，再由三维移动升降装置带动升降支撑杆 12 和柔性随动支撑头 13 按照生成的移动轨迹移动。

[0064] 步骤 S4：控制系统根据所述超声滚压强化装置 4 的加工轨迹和所述升降支撑杆 12 的移动轨迹控制超声滚压强化装置 4 和升降支撑杆 12 的移动，以完成叶片待加工面的强化加工。

[0065] 具体地，控制系统同时控制超声滚压强化装置 4 和升降支撑杆 12 的移动，同时控制主轴旋转台 5 不断旋转，以使叶片 7 的待加工面的对立面的截面轮廓线与升降支撑杆 12 的轴线保持垂直、超声滚压强化装置 4 与叶片 7 的待加工面的接触点在升降支撑杆的轴线上、超声滚压强化装置 4 的方向始终沿叶片 7 的待加工面的法线方向。

[0066] 如图 11 所示，以叶片 7 某一被加工截面 14 为例具体介绍该航空发动机叶片超声滚压强化加工控制方法，将该被加工截面 14 的轮廓线按照叶片型面的命名方式，分为截面轮廓线的压力面 15 和截面轮廓线的吸力面 16。若对叶片 7 的被加工截面 14 的压力面 15 进行超声滚压强化加工，则柔性随动支撑头支撑在截面轮廓线的吸力面 16。首先，根据叶片 CAD 模型按照等截面法生成超声滚压强化装置 4 的“之”字形加工轨迹，如图 10 所示；然后根据该加工轨迹生成柔性随动支撑头 13 和升降支撑杆 12 的移动轨迹；控制系统控制超声滚压强化装置 4 和柔性随动支撑头 13 分别按照加工轨迹和移动轨迹移动，从而完成对叶片 7 待加工面的强化加工。

[0067] 如图 11 所示，图中箭头方向为对被加工面 14 进行加工的加工方向，在加工过程中，叶片 7 通过不断旋转使吸力面 16 与升降支撑杆的轴线保持垂直，超声滚压强化装置 4 与压力面 15 的接触点在升降支撑杆 12 的轴线上，超声滚压强化装置 4 的方向始终沿接触点所在叶片表面的法线方向，确保超声滚压强化装置与叶片表面始终保持垂直，使得超声滚压能量最大限度引入到航空发动机的叶片 7 中。

[0068] 本实施例提供的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法通过对机器人、主轴转台和三维移动升降装置进行协同控制，实现了航空发动机叶片的精确超声滚压强化。

[0069] 以上所述的，仅为本发明的较佳实施例，并非用以限定本发明的范围，本发明的上述实施例还可以做出各种变化。即凡是依据本发明申请的权利要求书及说明书内容所作的简单、等效变化与修饰，皆落入本发明专利的权利要求保护范围。本发明未详尽描述的均为常规技术内容。

权利要求书

1、一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，包括：机器人，其上固定有一超声滚压强化装置并带动该超声滚压强化装置移动；底座，其上安装有主轴转台和三维移动升降装置，所述主轴转台上设置有可旋转的叶片夹具，三维移动升降装置上则固定一柔性随动支撑头；控制系统，分别与所述机器人、主轴转台和三维移动升降装置电连接或通讯连接。

2、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述机器人为五轴或六轴机器人。

3、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述主轴转台包括伺服电机、减速器、转台基座、旋转主轴、过渡盘和旋转编码器，所述减速器固定在所述转台基座上，所述伺服电机与所述减速器的输入轴相连，所述旋转主轴与所述减速器的输出轴相连，所述过渡盘与旋转主轴相连，所述叶片夹具设于所述过渡盘上，所述旋转编码器内置于所述伺服电机中，所述控制系统分别与所述伺服电机、旋转编码器电连接。

4、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述三维移动升降装置包括升降支撑杆、X 向移动驱动装置、Y 向升降驱动装置、Z 向移动驱动装置；所述 Z 向移动驱动装置设于所述底座上，所述 X 向移动驱动装置与所述 Z 向移动驱动装置相连，所述 Y 向移动驱动装置与所述 X 向移动驱动装置相连，所述升降支撑杆与所述柔性随动支撑头相连。

5、根据权利要求 4 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述 Z 向移动驱动装置包括第一驱动件、第一滚珠丝杠、第一丝杠螺母，所述第一滚珠丝杠沿 Z 向设置在所述底座上，所述第一驱动件与所述第一滚珠丝杠相连，所述第一滚珠丝杠与穿过所述第一丝杠螺母且与所述第一丝杠螺母传动配合。

6、根据权利要求 5 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述 X 向移动驱动装置包括安装板、第二驱动件、第二滚珠丝杠、第二丝杠螺母，所述安装板固定在所述第一丝杠螺母上，所述第二滚珠丝杠沿 X 向设置在所述安装板上，所述第二驱动件与所述第二滚珠丝杠相连，所述第二滚珠丝杠与穿过所述第二丝杠螺母且与所述第二丝杠螺母传动配合。

7、根据权利要求 6 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，

其特征在于，所述 Y 向升降驱动装置包括升降底板以及设置在所述升降底板上的第三驱动件、涡轮、蜗杆、第三滚珠丝杠和第三丝杠螺母，所述第三滚珠丝杠沿 Y 向设置，所述第三驱动件与所述蜗杆相连，所述涡轮分别与所述蜗杆和第三滚珠丝杠相啮合，第三滚珠丝杠穿过所述第三丝杠螺母且与所述第三丝杠螺母传动配合，所述升降支撑杆与所述第三丝杠螺母相连。

8、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述叶片夹具包括上压块、下压块、左抱块和右抱块。

9、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，还包括控制柜，所述控制系统设于所述控制柜中。

10、一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，其特征在于，至少包括：

步骤 S1：提供一种如权利要求 1-9 任一项所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，使所述叶片夹具夹住叶片的榫根部位，并使叶片的待加工面朝向所述超声滚压强化装置，所述柔性随动支撑头则支撑所述待加工面的对立面；

步骤 S2：根据叶片的模型按照等截面法生成超声滚压强化装置的“之”字形加工轨迹；

步骤 S3：根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹生成升降支撑杆的移动轨迹；

步骤 S4：控制系统根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹和所述升降支撑杆的移动轨迹控制超声滚压强化装置和升降支撑杆的移动，以完成叶片待加工面的强化加工。

11、根据权利要求 10 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，其特征在于，所述步骤 S4 还包括：

控制系统控制所述主轴转台不断旋转，以使所述叶片的待加工面的对立面的截面轮廓线与所述升降支撑杆的轴线保持垂直、所述超声滚压强化装置与所述叶片的待加工面的接触点在所述升降支撑杆的轴线上、所述超声滚压强化装置的方向始终沿所述叶片的待加工面的法线方向。

经修改的权利要求

国际局收到日：2021年06月08日（08.06.2021）

- 1、一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，包括：
机器人，其上固定有一超声滚压强化装置并带动该超声滚压强化装置移动；
底座，其上安装有主轴转台和三维移动升降装置，所述主轴转台上设置有可旋转的叶片夹具，三维移动升降装置上则固定一柔性随动支撑头；
控制系统，分别与所述机器人、主轴转台和三维移动升降装置电连接或通讯连接。
- 2、根据权利要求1所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述机器人为五轴或六轴机器人。
- 3、根据权利要求1所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述主轴转台包括伺服电机、减速器、转台基座、旋转主轴、过渡盘和旋转编码器，所述减速器固定在所述转台基座上，所述伺服电机与所述减速器的输入轴相连，所述旋转主轴与所述减速器的输出轴相连，所述过渡盘与旋转主轴相连，所述叶片夹具设于所述过渡盘上，所述旋转编码器内置于所述伺服电机中，所述控制系统分别与所述伺服电机、旋转编码器电连接。
- 4、根据权利要求1所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述三维移动升降装置包括升降支撑杆、X向移动驱动装置、Y向升降驱动装置、Z向移动驱动装置；所述Z向移动驱动装置设于所述底座上，所述X向移动驱动装置与所述Z向移动驱动装置相连，所述Y向升降驱动装置与所述X向移动驱动装置相连，所述升降支撑杆与所述柔性随动支撑头相连。
- 5、根据权利要求4所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述Z向移动驱动装置包括第一驱动件、第一滚珠丝杠、第一丝杠螺母，所述第一滚珠丝杠沿Z向设置在所述底座上，所述第一驱动件与所述第一滚珠丝杠相连，所述第一滚珠丝杠穿过所述第一丝杠螺母且与所述第一丝杠螺母传动配合。
- 6、根据权利要求5所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述X向移动驱动装置包括安装板、第二驱动件、第二滚珠丝杠、第二丝杠螺母，所述安装板固定在所述第一丝杠螺母上，所述第二滚珠丝杠沿X向设置在所述安装板上，所述第二驱动件与所述第二滚珠丝杠相连，所述第二滚珠丝杠穿过所述第二丝杠螺母且与所述第二丝杠螺母传动配合。
- 7、根据权利要求6所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述Y向升降驱动装置包括升降底板以及设置在所述升降底板上的第三驱动件、涡轮、

蜗杆、第三滚珠丝杠和第三丝杠螺母，所述第三滚珠丝杠沿 Y 向设置，所述第三驱动件与所述蜗杆相连，所述涡轮分别与所述蜗杆和第三滚珠丝杠相啮合，第三滚珠丝杠穿过所述第三丝杠螺母且与所述第三丝杠螺母传动配合，所述升降支撑杆与所述第三丝杠螺母相连。

8、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，所述叶片夹具包括上压块、下压块、左抱块和右抱块。

9、根据权利要求 1 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，其特征在于，还包括控制柜，所述控制系统设于所述控制柜中。

10、一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，其特征在于，至少包括：

步骤 S1：提供一种如权利要求 1-9 任一项所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统，使所述叶片夹具夹住叶片的榫根部位，并使叶片的待加工面朝向所述超声滚压强化装置，所述柔性随动支撑头则支撑所述待加工面的对立面；

步骤 S2：根据叶片的模型按照等截面法生成超声滚压强化装置的“之”字形加工轨迹；

步骤 S3：根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹生成升降支撑杆的移动轨迹；

步骤 S4：控制系统根据所述超声滚压强化装置的加工轨迹和所述升降支撑杆的移动轨迹控制超声滚压强化装置和升降支撑杆的移动，以完成叶片待加工面的强化加工。

11、根据权利要求 10 所述的航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工控制方法，其特征在于，所述步骤 S4 还包括：

控制系统控制所述主轴转台不断旋转，以使所述叶片的待加工面的对立面的截面轮廓线与所述升降支撑杆的轴线保持垂直、所述超声滚压强化装置与所述叶片的待加工面的接触点在所述升降支撑杆的轴线上、所述超声滚压强化装置的方向始终沿所述叶片的待加工面的法线方向。

条约第19条第(1)款的声明

修改后的权利要求 4-6 分别要求保护一种航空发动机叶片超声滚压强化机器人加工系统。修改后的权利要求 4-6 意思表示更清楚。

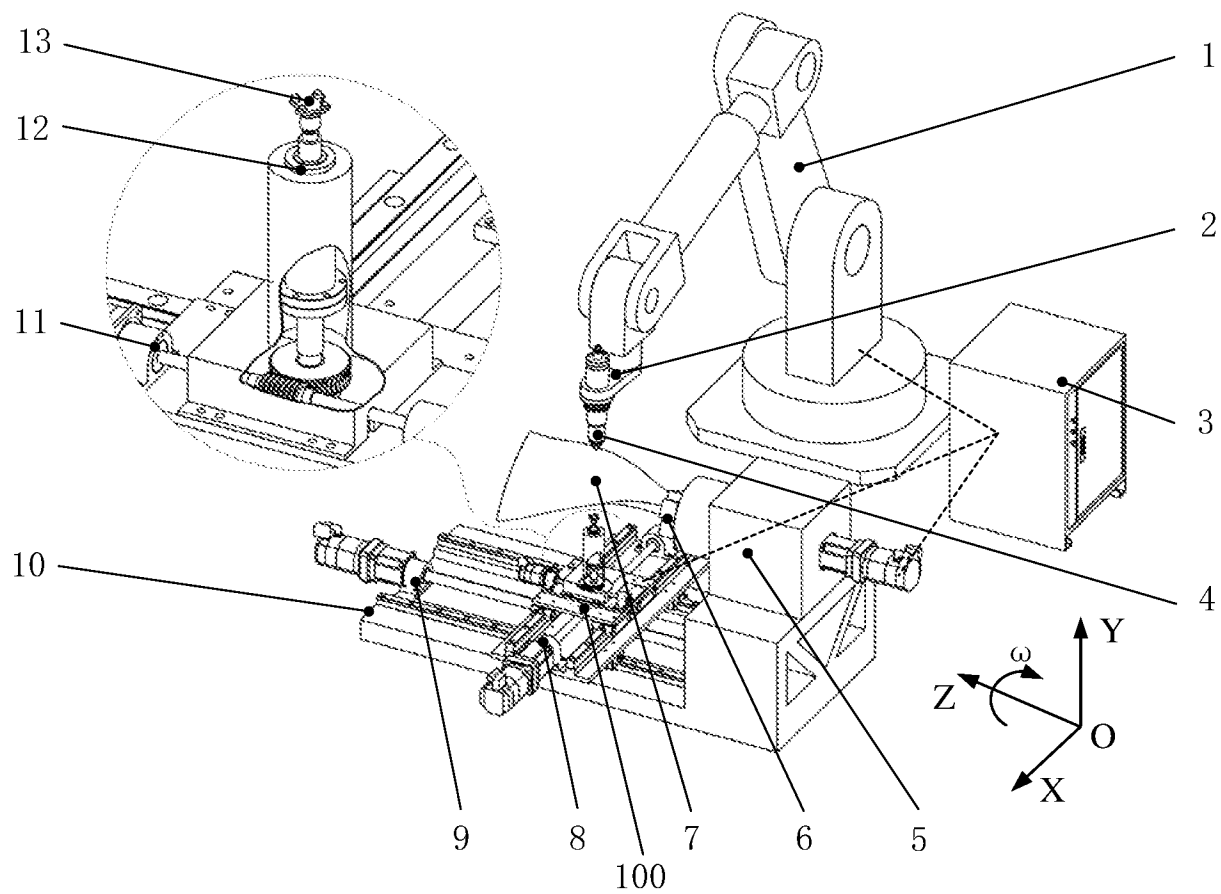


图 1

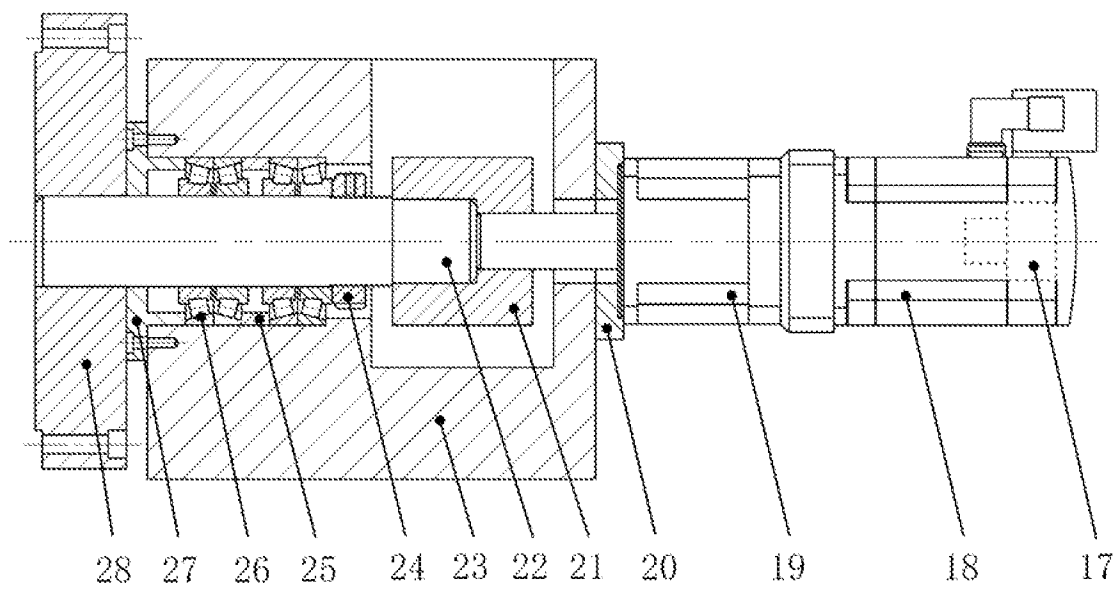


图 2

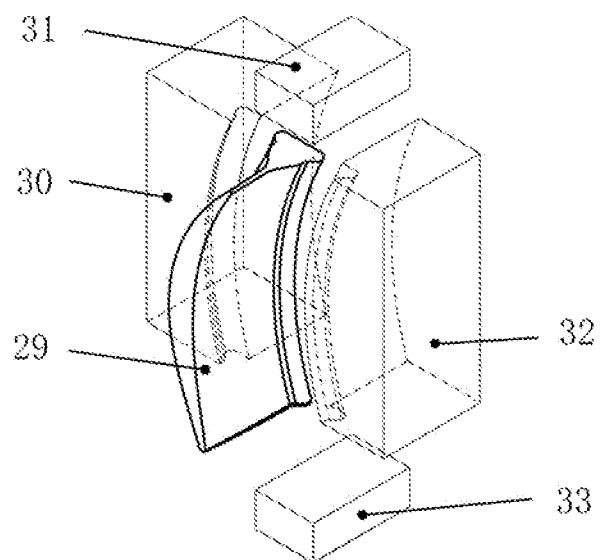


图 3

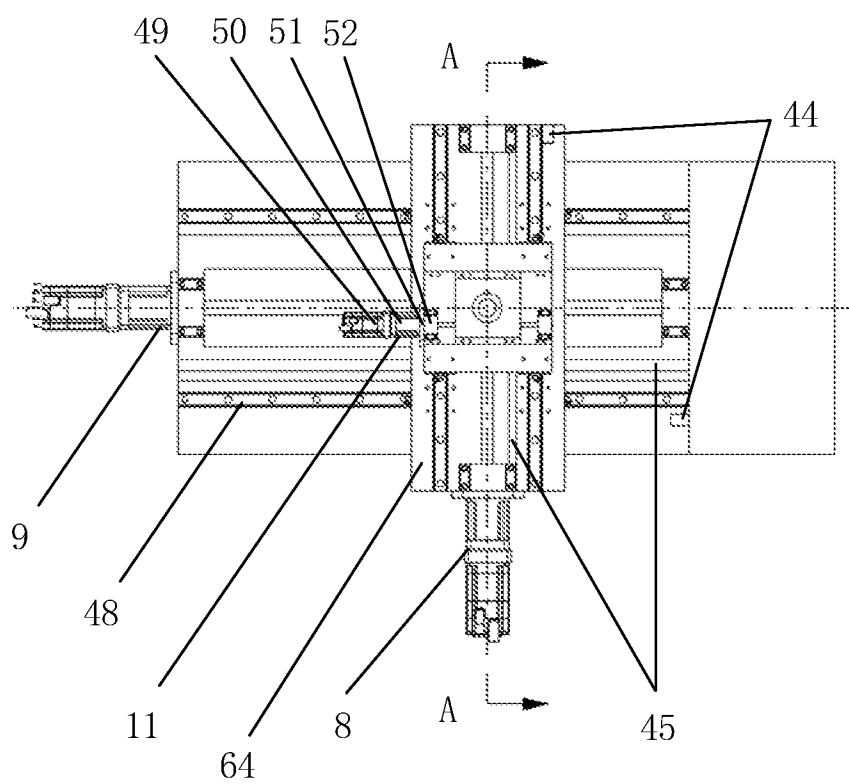


图 4

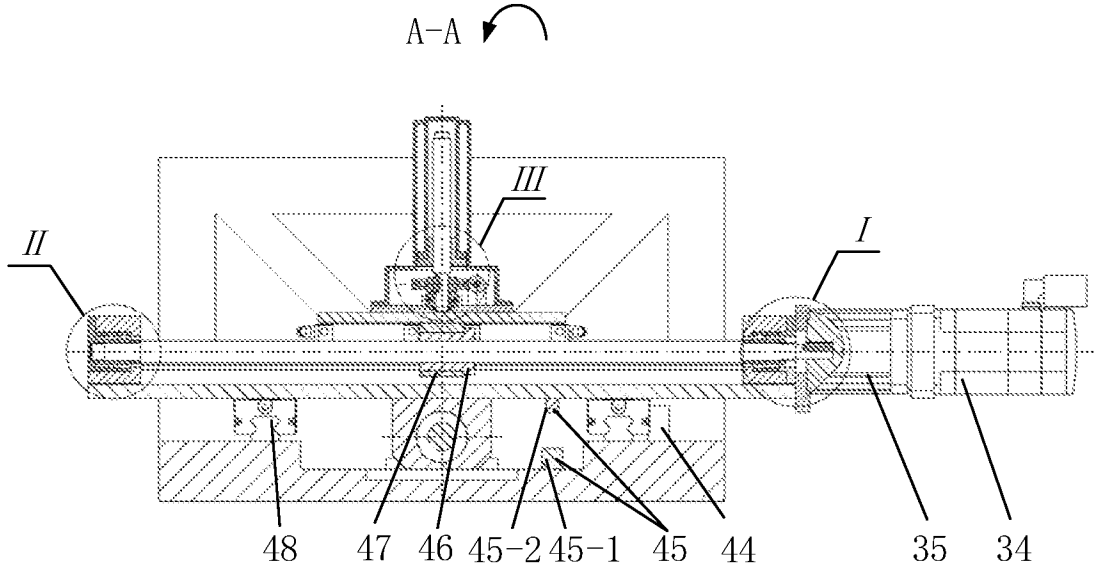


图 5

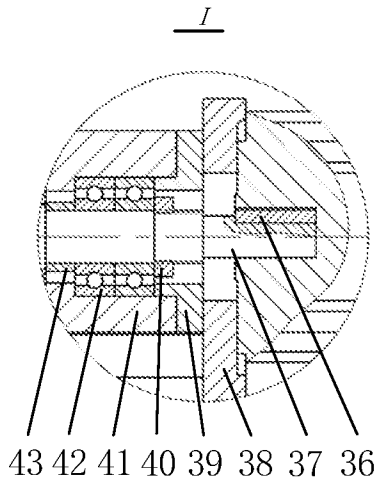


图 6

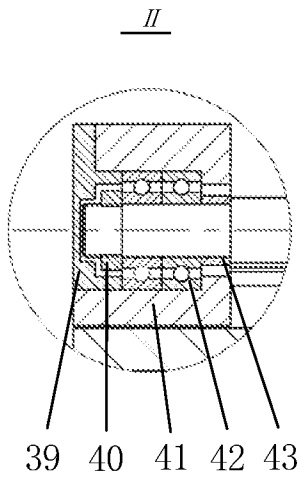


图 7

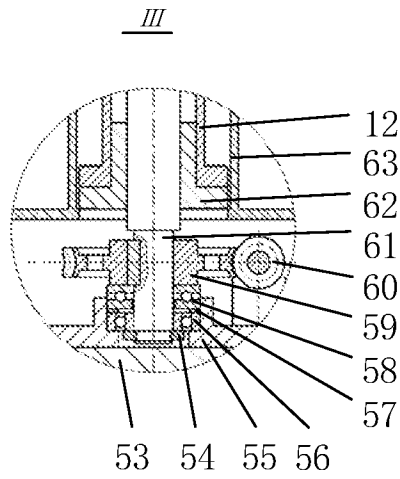


图 8

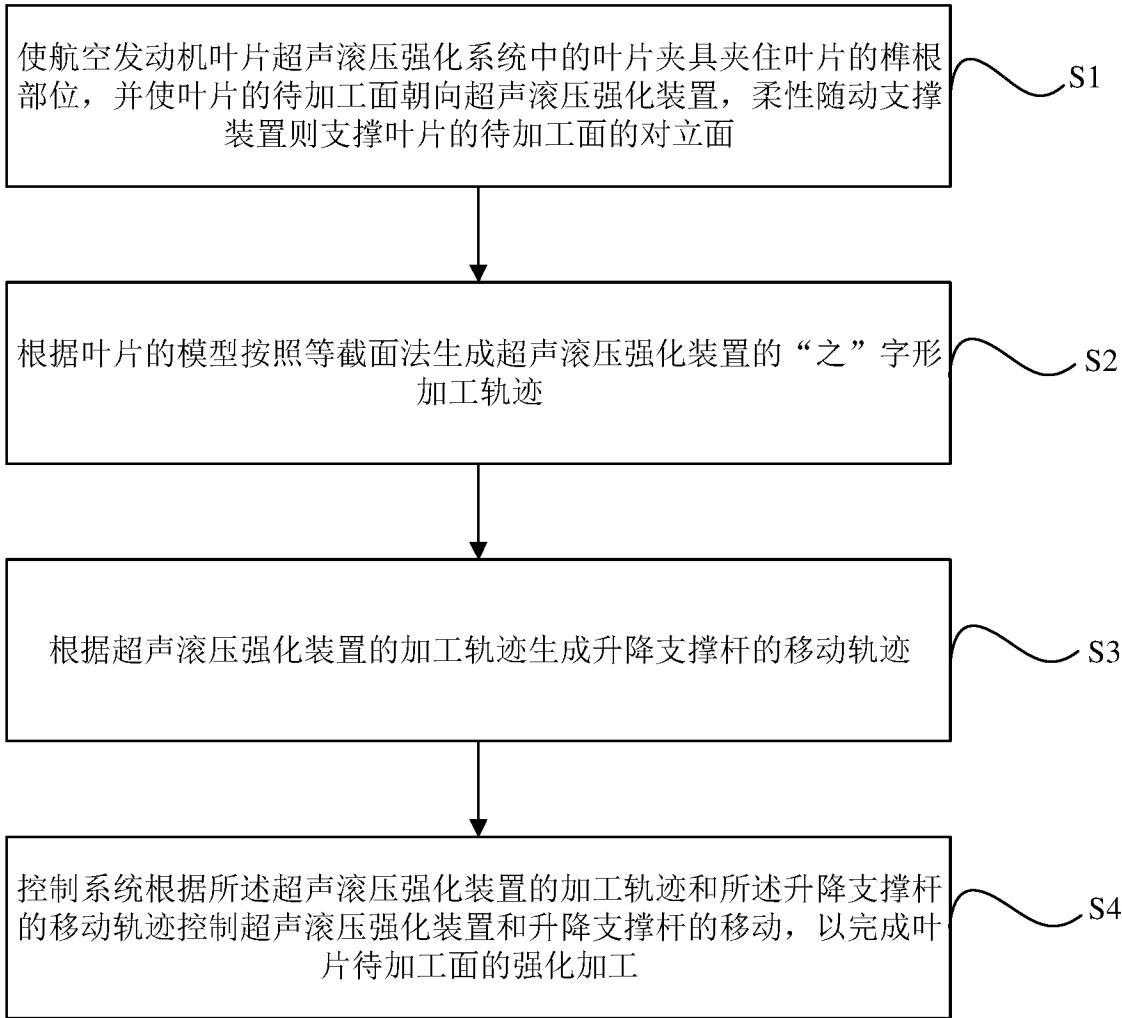


图 9

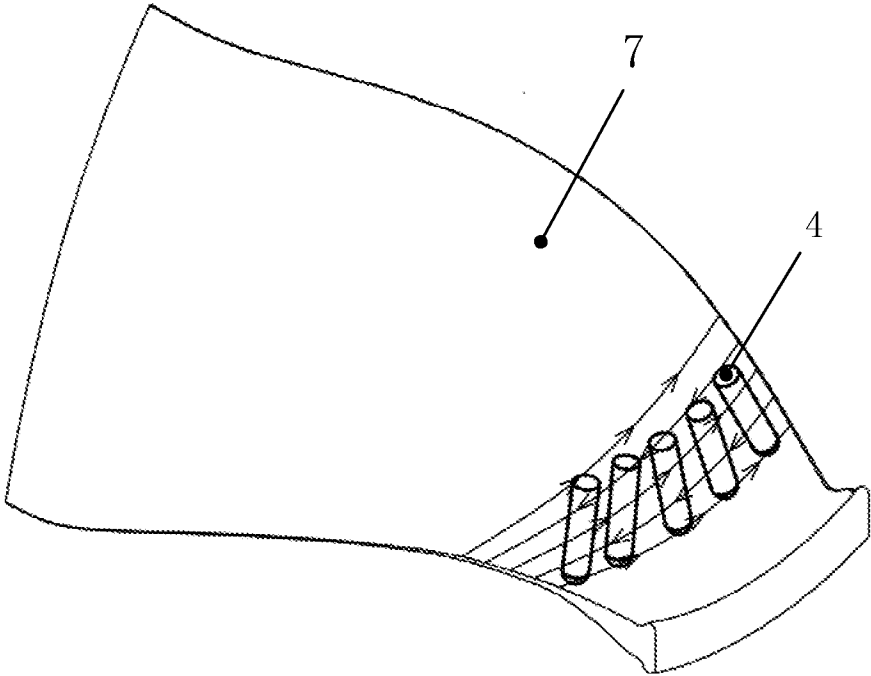


图 10

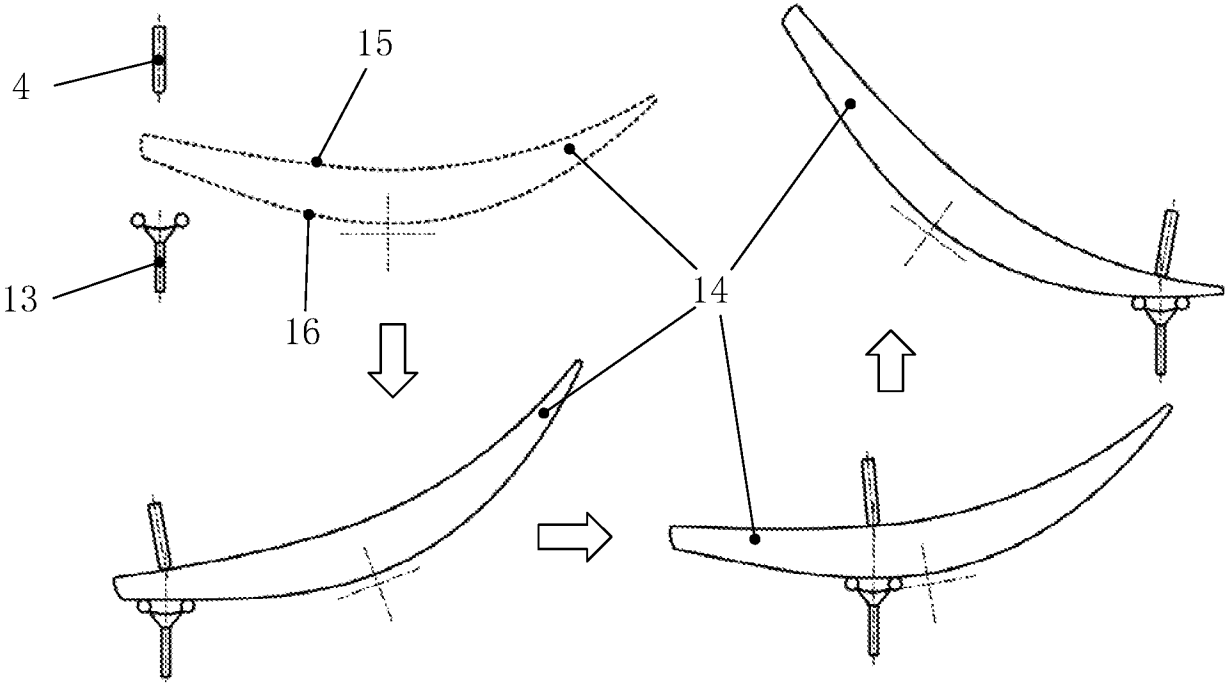


图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/119152

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

C21D 7/06(2006.01)i; B21D 22/14(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

C21D; B21D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CNKI: 叶片, 超声, 滚压, 机械臂, 移动臂, 机械手, 机器人, 支撑, 支承, 旋转, 转动; VEN, USTXT, EPTXT, WOTXT: blade, ultrasonic rolling, hand, arm, finger, manipulator, robot, support, rotate, index, spring, elastic.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 110560533 A (WUHAN TEXTILE UNIVERSITY et al.) 13 December 2019 (2019-12-13) description, paragraphs 25-36, figures 1-2	1-11
A	CN 110788182 A (WUHAN TEXTILE UNIVERSITY et al.) 14 February 2020 (2020-02-14) description, paragraphs 33-46, figure 1	1-11
A	TW M401529 U1 (JINGHUA ULTRASONIC CO., LTD.) 11 April 2011 (2011-04-11) entire document	1-11
A	RU 2209427 C1 (GRIGOREV G V et al.) 27 July 2003 (2003-07-27) entire document	1-11



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

02 March 2021

Date of mailing of the international search report

22 April 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/119152

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	110560533	A	13 December 2019	None	
CN	110788182	A	14 February 2020	None	
TW	M401529	U1	11 April 2011	None	
RU	2209427	C1	27 July 2003	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/119152

A. 主题的分类

C21D 7/06 (2006.01) i; B21D 22/14 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

C21D; B21D

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNABS, CNTXT, CNKI: 叶片, 超声, 滚压, 机械臂, 移动臂, 机械手, 机器人, 支撑, 支承, 旋转, 转动; VEN, USTXT, EPTXT, WOTXT: blade, ultrasonic rolling, hand, arm, finger, manipulator, robot, support, rotate, index, spring, elastic.

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 110560533 A (武汉纺织大学 等) 2019年 12月 13日 (2019 - 12 - 13) 说明书第25-36段、附图1-2	1-11
A	CN 110788182 A (武汉纺织大学 等) 2020年 2月 14日 (2020 - 02 - 14) 说明书第33-46段、附图1	1-11
A	TW M401529 U1 (京华超音波股份有限公司) 2011年 4月 11日 (2011 - 04 - 11) 全文	1-11
A	RU 2209427 C1 (GRIGOREV G V 等) 2003年 7月 27日 (2003 - 07 - 27) 全文	1-11

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2021年 3月 2日

国际检索报告邮寄日期

2021年 4月 22日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

张恩君

电话号码 86-(20)-28950688

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/119152

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110560533	A	2019年 12月 13日	无	
CN	110788182	A	2020年 2月 14日	无	
TW	M401529	U1	2011年 4月 11日	无	
RU	2209427	C1	2003年 7月 27日	无	