

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206035

薄壁装配单元并联结构设计及性能分析*

王红军^{1,2,3} 黄维轩¹ 毛向向¹ 张明亮⁴ 刘国庆¹

(1. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192; 2. 高端装备智能感知与控制北京市国际科技合作基地 北京 100192;
3. 现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192; 4. 北京无线电测量研究所 北京 100854)

摘 要:薄壁件由于结构复杂刚性差且精度要求高,薄壁件装配主要由人工完成。存在自动化程度低、产品良率低、效率差、严重依赖工人的技术水平的问题。为了提高产品质量和生产效率,急需采用自动化装配设备。薄壁件的装配单元需要根据在线测量数据分类匹配装配,采用传统的工业机器人,占用较大的工作空间,并联机器人结构柔性,占用空间小,本文设计提出一种薄壁件自动化分拣装配单元设计方案,来代替传统人工分拣与装配的生产方式。首先根据薄壁件分类装配功能需求,设计了并联结构,建立了并联结构的动力学模型和运动学模型;分析了并联结构快速运动时速度及加速度的变化规律,3条主动臂和中间支链的角度数据曲线变化平稳,没有发生突变,角速度和角加速度相对平稳,保证了测量相机工作精度,并联机构的稳定性满足设计要求;动平台的位移曲线与预定轨迹重合,结果显示所设计的机构可以满足功能要求。该结构工作空间小,可以实现薄壁件装配的自动化,保证了产品的质量。

关键词: 并联机器人;测量;高速稳定;动力学

中图分类号: TN06;TH113.2⁺5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420

Parallel structure design and performance analysis of thin-walled assembly unit

Wang Hongjun^{1,2,3} Huang Weixuan¹ Mao Xiangxiang¹ Zhang Mingliang⁴ Liu Guoqing¹

(1. School of Mechanical Electrical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. High-End Equipment Intelligent Perception and Control Beijing International Science and Technology Cooperation Base, Beijing 100192, China; 3. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China; 4. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: Due to the complex structure, poor rigidity and high accuracy requirements of thin-walled parts, the assembly of thin-walled parts is mainly completed manually. There are problems such as low degree of automation, low product yield, poor efficiency and heavy reliance on the technical level of workers. In order to improve product quality and production efficiency, automatic assembly equipment is urgently needed. The assembly unit of thin-walled parts needs to be classified and matched according to the online measurement data. The traditional industrial robot takes up a large working space. The parallel robot has a flexible structure and takes up a small space. In this paper, a design scheme of thin-walled parts automatic sorting assembly unit is designed to replace the traditional manual sorting and assembly production mode. Firstly, according to the functional requirements of thin-walled parts classified assembly, the parallel structure is designed, and the dynamic model and kinematic model of the parallel structure are established. The change law of velocity and acceleration of parallel structure during rapid movement is analyzed. The angle data curve of three active arms and intermediate branch chain changes smoothly without sudden change. The angular velocity and angular acceleration are relatively stable, which ensures the working accuracy of the measuring camera. The stability of parallel mechanism meets the design requirements. The displacement curve of the moving platform coincides with the predetermined trajectory, and the results show that the designed mechanism can meet the functional requirements. The structure has small working space, can realize the automation of thin-walled parts assembly, and ensure the

quality of products.

Keywords: parallel robot; measurement; high speed stability; dynamics

0 引言

随着国内制造业在高精尖技术方面的不断探索与发展,薄壁件在各种应用场景中发挥着越来越显著的作用。组合型精密薄壁件甚至由众多薄壁件装配组合而成,其中任何一个薄壁件的内外轮廓尺寸误差过大都会导致整体功能下降甚至丧失,在装配之前必须对其轮廓边缘特征尺寸进行测量,检验其是否合格。目前,薄壁件由于结构复杂刚性差且精度要求高,目前薄壁件装配主要由人工完成,存在自动化程度低、产品良率低、效率差、严重依赖工人的技术水平的问题,测量时间长,准确率低,严重制约了薄壁件制造效率的提升和生产质量的改善。因此,如何提高装配线上薄壁件的精确测量的速度和质量,实现薄壁件的高精度分类装配成为薄壁件生产企业转型升级的重中之重。为了提高产品质量和生产效率,急需采用自动化装配设备。

1965年,德国人发明了六自由度并联机构并用对飞行员进行各项实践训练^[1]。1978年,澳大利亚首次提出机器人可用六自由度并联机构来实现的设计方法^[2]。1985年瑞士设计了一种三自由度空间平移并联机构,并提出了3种机构变异形式^[3],具有速度快、刚度大、易组装、成本低等优点。国内的相关研究是从两个自由度的并联机构开始研究探索的。天津大学^[4]成功研制出了末端加速度最高可达10 g的平面二自由度并联机器人。2016年,北京卫星环境工程研究所^[5]设计了一种可以在狭窄工况条件下完成对航天器中大部件的装配的六自由度并联机器人;2018年,刘洋等^[6]设计了针对于大型风机的六自由度并联装配平台,提高了大型风机的装配效率和装配质量;2020年,马光等^[7]设计了一种用于水平对接的六自由度并联装配平台,该机构自动化程度较高、适应性强。

薄壁件的装配单元需要根据在线测量数据分类匹配装配,采用传统的工业机器人,占用较大的工作空间,并联机器人结构柔性,占用空间小,本文设计提出一种薄壁件自动化分拣装配单元设计方案,来代替传统人工分拣与装配的生产方式。首先根据薄壁件分类装配功能需求,设计了并联结构,建立了并联结构的动力学模型和运动学模型;分析了并联结构快速运动时速度及加速度的变化规律,3条主动臂和中间支链的角度数据曲线变化平稳,没有发生突变,角速度和角加速度相对平稳,保证了测量相机工作精度,并联机构的稳定性满足设计要求;动平台的位移曲线与预定轨迹重合,结果显示所设计的

机构可以满足功能要求。本文的研究成果对于自动化装配单元的设计具有参考价值。

1 并联机器人方案及分析

针对薄壁件测量分类装配单元非接触性、高重复定位精度、快速尺寸测量、高稳定性、节约空间的需求,以实现装配单元对薄壁件进行尺寸测量与分类装配为目的,基于并联机构提出满足功能要求的装配单元整体方案设计,整个装配单元主要包括并联机构、控制系统、抓取装置、视觉系统等,如图1所示。

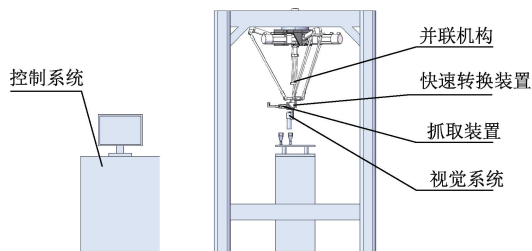


图1 装配单元系统

Fig. 1 Assembly unit system

装配单元工作流程为:在控制柜中的工控机上利用Twincat软件进行并联机构系统的参数设置和路径规划,并将视觉系统与控制系统相连,然后对需要进行轮廓信息测量的薄壁件进行信息的采集,在整个装配单元运转的过程中,当薄壁件托盘上的薄壁件到位之后,视觉系统便会薄壁件进行拍照,将薄壁件的位置坐标及轮廓信息递给控制系统,然后控制系统会根据信息进行路径轨迹的规划,控制并联机构运动到薄壁件的上方并对薄壁件进行侧壁轮廓特征信息的精密测量并判断薄壁件是否合格,之后通过快速转换装置使得抓取装置与视觉系统完成坐标位置转换,抓取装置将检测合格的薄壁件抓取并移动到另一侧的托盘中,将检测不合格的薄壁件抓取并放置到一旁的薄壁件回收桶中,并联机构回到初始位置,快速转换装置再次旋转使得抓取装置与视觉系统完成坐标位置互换^[8],至此,整个装配单元完成工作的一个周期。装配单元可以依次对薄壁件进行单个测量及抓取-放置,也可以同时对多个薄壁件进行测量并依次抓取-放置,可以根据任务要求的不同选择不同的测量方式。

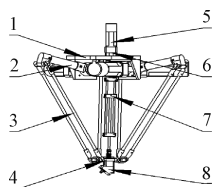
1.1 装配单元方案设计

并联机构的结构种类有很多,结构不同功能不同,本次设计的装配单元结构主要是针对薄壁件的尺寸测量与

分类抓取-放置操作,具有结构紧凑,易于安装,稳定性强,重复定位精度高等特点,极具开发价值^[9]。实现装配单元运动功能的并联机构动平台有 x, y, z 3 个方向上的移动自由度,实现动平台在工作空间内的快速移动,快速转换装置应该具有一个旋转自由度,实现抓取装置与视觉系统坐标位置的快速互换。针对此并联机构的结构特点和功能要求,设计时给出如下两种设计方案。

1) 方案 A

如图 2 所示,方案 A 所设计的并联机构为三平动一旋转型的并联机构,其主要由静平台、主动臂、从动臂、中间支链、动平台、万向铰机构等组成。此并联机构通过 3 个对称分布的横置伺服电机的作用,可以实现动平台在 x, y, z 3 个方向上的移动,通过中间竖置伺服电机带动中间作用支链的旋转,通过快速转换装置内的万向铰机构可以实现抓取装置与视觉系统的坐标位置快速转换。



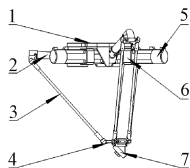
1. 静平台;2. 主动臂;3. 从动臂;4. 动平台;5. 伺服电机;
6. 减速器;7. 中间支链;8. 万向铰机构

图 2 方案 A 简图

Fig. 2 Schematic diagram of scheme A

2) 方案 B

如图 3 所示,方案 B 设计的并联机构与方案 A 的不同之处在于快速转换装置换成了旋转气缸,其他的构件未发生改变,通过 3 个伺服电机的作用,实现动平台在 x, y, z 3 个方向上的移动,通过动平台上安装的旋转气缸旋转 180° 可以实现抓取装置与视觉系统的坐标位置快速转换。



1. 静平台;2. 主动臂;3. 从动臂;4. 动平台;
5. 伺服电机;6. 减速器;7. 快旋转气缸

图 3 方案 B 简图

Fig. 3 Schematic diagram of scheme B

3) 方案的分析和选择

上述两种设计方案中,并联机构动平台在 x, y, z 3 个方向上的平移运动均由伺服电机 2 驱动对称分布的 3 条支链产生,不同方案的快速转换装置的旋转自由度来源不同,方案 B 是将旋转气缸直接安装在动平台上控制抓

取装置与视觉系统的坐标位置快速转换,结构简单,但加大了动平台的负载,并且将旋转带来的转矩也加到了动平台上,降低了并联机构运行的稳定性;

方案 A 则是将一个驱动伺服电机安装在静平台上,通过万向铰机构连接中间支链支链,中间支链支链再通过万向铰机构来连接末端执行机构,通过电机的旋转实现抓取装置与视觉系统的坐标位置快速转换。这样的布置虽然加大了静平台安装的空间需求和连接的复杂性,但却大大降低了动平台的负载,同时快速转换装置的转矩也由顶部的驱动伺服电机提供,满足设计要求,增强了机构的稳定性和灵活性。最终选择方案 A。

1.2 装配体设计

根据企业薄壁件尺寸测量与分类的需求,设计快速高精度装配单元,其运动机构需满足 x, y, z 3 个方向的平移运动及末端执行装置固定轴向的旋转运动,以实现薄壁件的测量与分类功能。

装配单元的总装配图如图 4 所示。该机构由支撑框架、静平台、主动臂、从动臂、中间支链、动平台及末端执行装置等组成。支撑框架直接固定在大地上,为整个机构提供支撑作用。静平台采用风扇对称结构,静平台中心圆孔周围及 3 个扇叶上均设有连接孔,通过螺栓将 3 个横置电机支架与静平台的 3 个扇叶底部相连,竖置电机支架与静平台中心位置的顶部相连。伺服电机及减速器通过螺钉分别连接在 4 个电机支架上。3 条主动臂分别固定在 3 个横置减速器末端,构成并联机构的平移驱动部分。从动臂采用平行四边形结构,通过球铰副进行连接。中间支链通过万向铰结构将竖置电机的旋转运动直接传递到动平台底部的测量装置,实现测量装置轴向的旋转运动,从而完成整个测量分类过程的 4 个自由度的运动要求。

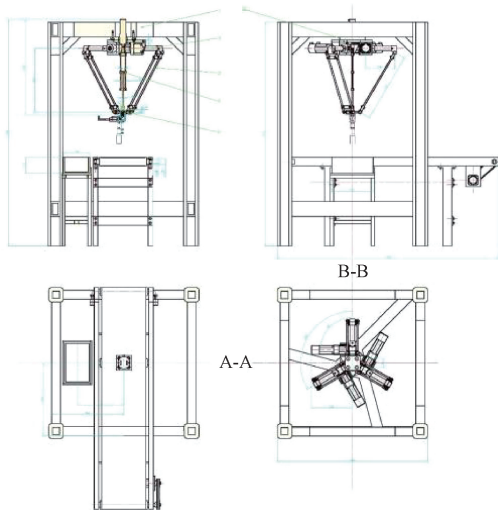


图 4 装配单元总装配图

Fig. 4 General assembly drawing of assembly unit

2 运动学与动力学模型

2.1 装配单元坐标系建立

简化后的装配单元通过 3 个支链连接两个平台,主动臂旋转驱动动平台做一定规律的平移运动。以静平台中心为原点建立坐标系,根据构造结构推导静平台中心坐标位置与主动臂旋转角度之间的关系。

首先将装配单元进行结构简化和参数定义,如表 1 所示。

表 1 装配单元各项参数

Table 1 Parameters of assembly unit

名称	含义
O	静平台几何中心
R	静平台中心到伺服电机的距离
A_1, A_2, A_3	主动臂与静平台连接点
L	主动臂长度
B_1, B_2, B_3	主动臂与从动臂连接点
M	从动臂长度
C_1, C_2, C_3	从动臂与动平台连接点
r	动平台中心到从动臂末端的距离
O'	动平台几何中心

以静平台几何中心 O 为原点、 OA_1 为 X 轴,建立笛卡尔坐标系 $O-XY$, 装配单元第 i 条主动臂相对于静平台的中心点 O 分布相等的角度为 $\alpha_i (\alpha_{1,2,3} = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ)$, 主动臂与静平台的夹角为 $\theta_i (i = 1, 2, 3)$, 则动平台中心的坐标为 (x, y, z) , 如图 5 所示。

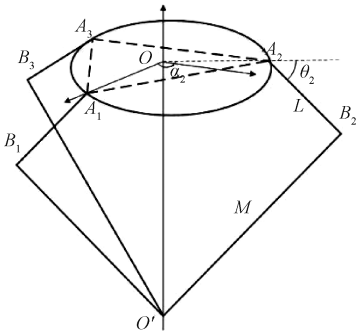


图 5 装配单元运动机构坐标系

Fig. 5 Assembly unit motion mechanism coordinate system

由装配单元各个支链中的几何关系得式(1):

$$\vec{OO'} = \vec{OA_i} + \vec{A_iB_i} + \vec{B_iO'} \quad (1)$$

点 A_i 的坐标可以表示为:

$$\vec{A_i} = \begin{bmatrix} (R-r) \cdot \cos\alpha_i \\ (R-r) \cdot \sin\alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

点 B_i 的坐标可以表示为:

$$\vec{B_i} = \begin{bmatrix} (R-r+L\cos\theta_i) \cos\alpha_i \\ (R-r+L\cos\theta_i) \sin\alpha_i \\ L\sin\theta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

令点 O' 输入坐标为 $O' = [x, y, z]^T$ 。

根据装配单元的结构,知 $|\vec{B_iC_i}| = M$, 根据两点间的距离公式^[10], 可以得到:

$$[(R-r+L\cos\theta_i) \cos\alpha_i - x]^2 + [(R-r+L\cos\theta_i) \sin\alpha_i - y]^2 + (L\sin\theta_i - z)^2 = M^2 \quad (4)$$

式中: $\alpha_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 。

利用三角变换公式对上述公式进行变形得:

$$\sin(\theta_i + \theta) = \frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (5)$$

其中, $\theta = \arctan\left(\frac{a_i}{b_i}\right)$ 。因 $|\sin(\theta_i + \theta)| \leq 1$, 可以得到以下不等式:

$$\frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \leq 1 \Rightarrow c_i^2 - (a_i^2 + b_i^2) \leq 0 \quad (6)$$

令其展开式表示为函数 $Q(x, y, z)$, 展开结果为:

$$Q(x, y, z) = [L^2 - M^2 - x^2 - y^2 - z^2 + (R-r)^2 + 2(R-r)(x\cos\alpha_i + y\sin\alpha_i)]^2 - [2L(R-r) - 2xL\cos\alpha_i - 2yL\sin\alpha_i]^2 - 4z^2L^2 = [(x\cos\alpha_i + y\sin\alpha_i - R + r)^2 + (-x\sin\alpha_i + y\cos\alpha_i)^2 + z^2 + L^2 - M^2]^2 - 4L^2[(x\cos\alpha_i + y\sin\alpha_i - R + r)^2 + z^2] \leq 0 \quad (7)$$

以上不等式即为装配单元固定平面动平台的运动范围。

2.2 装配单元运动学建模

装配单元的运动学主要是探索各部件特征点之间的变化关系^[11], 即驱动关节与执行末端的位移、速度和角速度之间的关系, 是建立动力学求解的基础^[12]。

对式(5)进行数学变换得:

$$[2L(R-r) - 2xL\cos\alpha_i - 2yL\sin\alpha_i] \cos\theta_i - 2zL\sin\theta_i - [M^2 - L^2 - x^2 - y^2 - z^2 - (R-r)^2 + 2(R-r)(x\cos\alpha_i + y\sin\alpha_i)] = 0 \quad (8)$$

化简为如下形式:

$$a_i \cos\theta_i + b_i \sin\theta_i - c_i = 0 \quad (9)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} a_i = 2L(R-r) - 2xL\cos\alpha_i - 2yL\sin\alpha_i \\ b_i = -2zL \\ c_i = M^2 - L^2 - x^2 - y^2 - z^2 - (R-r)^2 + 2(R-r)(x\cos\alpha_i + y\sin\alpha_i) \end{cases}$$

利用三角函数对式(9)进行变形得:

$$a_i \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}} + b_i \frac{2 \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}} - c_i = 0 \quad (10)$$

对式(2)~(10)进行化简得:

$$-a_i - c_i \tan^2 \frac{\theta}{2} + 2b_i \tan^2 \frac{\theta}{2} + a_i - c_i = 0 \quad (11)$$

故:

$$\theta_i = 2 \arctan \left(\frac{-b_i \pm \sqrt{b_i^2 + a_i^2 - c_i^2}}{-c_i - a_i} \right) \quad (12)$$

根据装配单元的结构关系,最终可以确定 θ_i 的最终表达式:

$$\theta_i = 2 \arctan \left(\frac{-b_i - \sqrt{b_i^2 + a_i^2 - c_i^2}}{-c_i - a_i} \right) \quad (13)$$

至此,动平台中心每一个坐标位置 (x, y, z) 都对应一组角度数据 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, 完成装配单元的逆向求解。

装配单元的正运动学一般采用解析解和数值解的方法进行求解^[13]。解析解是依据机构自身结构形式列出方程组,然后求解,运算量极大。数值解则是选择恰当的初始坐标位置代入方程组求解,由于减少了未知参数的数量,运算量得以显著降低,但是会导致部分数据点丢失^[14]。根据装配单元自身结构的特点,采用数值解的方法对动平台中心的坐标进行求解,通过几何学的方法简化主动臂旋转角度与动平台中心之间的数学关系。

如图 6 所示为简化的装配单元模型,主动臂和从动臂的 3 个球面副等效链接点为 B_1, B_2, B_3, D 为线段 B_1B_2 的中点。以动平台几何中心 O' 为顶点、三角形 $B_1B_2B_3$ 为底面构成三棱锥 $O' - B_1B_2B_3$ 。即将动平台质心的位置问题等效为三棱锥底面顶点坐标 O' 的求解问题^[15]。

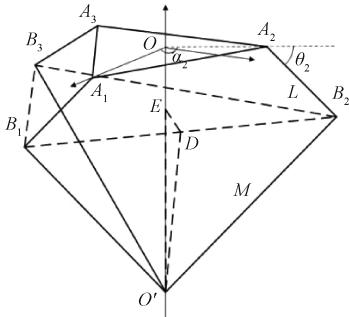


图 6 简化的装配单元模型

Fig. 6 Simplified assembly unit model

在装配单元模型中,三棱锥 $O' - B_1B_2B_3$ 的外心即为顶点 O' 的垂足。假设 E 为三棱锥底面的外心,则 $ED \perp B_1B_2$ 。根据等腰三角形的性质及定理可知 $O'D \perp B_1B_2$, $B_1B_2 \perp$ 平面 $EO'D$, 则 $EO' \perp B_1B_2$, 同理可证, $EO' \perp B_1B_3$ 。根据直线与平面垂直判定定理可知 $EO' \perp \triangle B_1B_2B_3$ 。然后求解顶点 O' 的位置关系:

$$OO' = OE + EO' \quad (14)$$

$$OE = OD + DE \quad (15)$$

$$OD = \frac{1}{2}(OB_1 + OB_2) \quad (16)$$

$$DE = |DE| \cdot n_{DE} \quad (17)$$

式中: $|DE|$ 为向量的模, n_{DE} 为方向向量。

$$|DE| = \sqrt{|B_1E|^2 - |B_1D|^2} \quad (18)$$

$$n_{DE} = \frac{B_1B_3 \cdot B_3B_2 \cdot B_1B_3}{|B_1B_3| |B_3B_2| |B_1B_3|} \quad (19)$$

式中: $|B_1E|$ 为底面三角形 $B_1B_2B_3$ 的外接圆半径。

$$|B_1E| = \frac{abc}{4S} \quad (20)$$

式中: S 为底面三角形 $B_1B_2B_3$ 的面积

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (21)$$

式中: a, b, c 为底面三角形 $B_1B_2B_3$ 的 3 条边, p 为底面三角形 $B_1B_2B_3$ 三条边 a, b, c 和的 $1/2$ 。

$$p = \frac{a+b+c}{2} \quad (22)$$

同理可得:

$$EO' = |EO'| \cdot n_{EO'} \quad (23)$$

式中: $|EO'|$ 为向量的模, $n_{EO'}$ 为单位方向向量。

$$|EO'| = \sqrt{|O'B_1|^2 - B_1E^2} \quad (24)$$

$$n_{EO'} = \frac{B_1B_2 \cdot B_1B_3}{|B_1B_2| |B_1B_3|} \quad (25)$$

$$OO' = OE + EO' \quad (26)$$

至此,得到了装配单元在主动臂旋转角度确定时动平台中心 O' 的坐标点,即运动学正解^[16]。

2.3 联装配单元动力学建模

动力学的主要目的是探究物体受力与物体运动之间的关系^[17]。它描述了物体为什么运动和怎样运动这样一种现象。在装配单元中,动力学主要是分析各部件在添加材料、密度等参数后,动平台即驱动关节的运动规律是否发生突变,驱动关节施加力或力矩的变化是否平缓^[18]。

1) 装配单元简化模型的质量分配

因此需要对其进行质量分配来进一步简化模型。

某一刚体 i 的动能:

$$T_i = \frac{1}{2} [m_i v_i^T v_i + w_i^T I_i w_i] \quad (27)$$

式中: m_i 为刚体的质量, v_i 为刚体的质心径向速度, w_i 为刚体运动时的角速度, I_i 为刚体的旋转惯量。

通过雅可比矩阵,每个刚体的速度均可表示为 ϑ 的函数:

$$v_i = J_{v,i} \vartheta \quad (28)$$

$$w_i = J_{w,i} \vartheta \quad (29)$$

式中: $J_{v,i}, J_{w,i}$ 为刚体径向平动雅可比矩阵和切向旋转雅可比矩阵。

刚体 i 的动能:

$$T_i = \frac{1}{2} \theta^T \left[\sum_{i=1}^N m_i J_{v,i}^T J_{v,i} + J_{w,i}^T I_i J_{w,i} \right] \theta \quad (30)$$

由此可以得到系统的总惯性矩阵:

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N m_i J_{v,i}^T J_{v,i} + J_{w,i}^T I_i J_{w,i} \quad (31)$$

对于装配单元而言其质量惯性矩阵可表示为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_r + \mathbf{M}_m + \mathbf{M}_L \quad (32)$$

式中: $\mathbf{M}_r$ 为动平台质量, $\mathbf{M}_m$ 为从动臂质量, $\mathbf{M}_L$ 为主动臂质量。

从动臂的运动包括旋转和平动,求解质量惯性矩阵的过程较为复杂,但是由于其旋转相对平动变化缓慢,因此可以将旋转惯量看作是0,只考虑平动惯量^[19]。

速度可以描述为:

$$\mathbf{V}_x = \left(1 - \frac{x}{M}\right) \mathbf{V}_b + \frac{x}{M} \mathbf{V}_a \quad (33)$$

式中: $\mathbf{V}_a$ 为动平台几何中心的速度, $\mathbf{V}_b$ 为主动臂末端的速度。

根据高等数学中微分原理,假设从动臂中的某一基本单元:

$$d_x = \frac{1}{2} V^2 \rho S dx \quad (34)$$

式中: ρ 为从动臂的密度, S 为从动臂的横截面积。

对从动臂的质量进行积分,得到从动臂的总动能:

$$T = \int dT = \frac{1}{2} \rho S \int_0^1 V_{(x)}^2 dx = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} M (V_b^2 + V_{ab}^2 + V_a^2) \right] \quad (35)$$

对从动臂的总动能公式进行近似分析可得:

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} M (V_b^2 + V_{ab}^2 + V_a^2) \right] \quad (36)$$

由此,可以将从动臂的质量等分为上中下3段,上段的质量附加到主动臂末端,下段的质量附加到动平台,中段的质量附加到主动臂的末端,即将单个从动臂质量的2/3分别附加到3条主动臂的末端,全部从动臂质量的1/3附加到动平台^[20]。由于动平台只有在 x, y, z 这3条坐标轴方向上的平动而无旋转,故动平台的等效质量为:

$$m_n = m_r + m_f + 6 \times \left(\frac{1}{3} m_m \right) \quad (37)$$

式中: m_n 为动平台等效质量, m_r 为动平台质量, m_f 为负载质量, $6 \times \left(\frac{1}{3} m_m \right)$ 为6条从动臂等效到动平台上的质量。

装配单元的主动臂通过减速器与伺服电机连接,只能旋转而不能平移,因此其质心位置可以表示为:

$$L' = L \frac{\frac{1}{2} m_L + \frac{2}{3} m_M}{m_L + \frac{2}{3} m_M} \quad (38)$$

式中: m_L 为主动臂质量, $\frac{2}{3} m_M$ 为从动臂等效到主动臂的质量。

装配单元中每条主动臂的惯量等于减速机的惯量 I_m 与自身惯量 I_L 相加:

$$I_a = I_m + I_L \quad (39)$$

其中:

$$I_L = I_L^2 \left(\frac{m_L}{3} + \frac{2}{3} m_M \right) \quad (40)$$

至此,装配单元的动力学模型可以看作由静平台、主动臂及动平台3部分构成。

2) 装配单元简化动力学模型

根据虚功原理,在理想条件下作用在物体上的全部力在任意虚位移中所做的虚功之和为0^[21]。

$$\sum_{i=1}^n F_i \cdot \delta x_i = 0 \quad (41)$$

将其变换为:

$$\sum_{i=1}^n \tau_L + \sum_{i=1}^n \tau_M + \tau_r = 0 \quad (42)$$

式中: τ_L 为主动臂输出的力或力矩, τ_M 为从动臂的力或力矩, τ_r 为动平台的力或力矩。

由上文对装配单元模型的质量分配可知,需要质量分析的构件由静平台、主动臂、从动臂及动平台4个刚体缩减为静平台、主动臂及动平台3个刚体,式(2)可简化为:

$$\sum_{i=1}^n \tau_L + \tau_r = 0 \quad (43)$$

假设机构在理想条件下,则动平台的重力 G_n 及惯性力 F_n 所做虚功为0。

$$\mathbf{G}_n = m_n [0 \quad 0 \quad -g]^T \quad (44)$$

$$\mathbf{F}_n = m_n \mathbf{X}_{nt} \quad (45)$$

重力及惯性力分别乘以雅可比矩阵的转置 $\mathbf{J}^T$, 即可得到驱动关节的输出力矩^[22]。

$$\tau_{G_r} = \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n = \mathbf{J}^T m_n [0 \quad 0 \quad -g]^T \quad (46)$$

$$\tau_n = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_n = \mathbf{J}^T \mathbf{X}_{nt} m_n \quad (47)$$

由上文可知:

$$\mathbf{I}_L \ddot{\mathbf{q}} - \tau_{G_r} - \tau + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_n - \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n = 0 \quad (48)$$

$$\tau = \mathbf{I}_L \ddot{\mathbf{q}} - \tau_{G_r} - \tau + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_n - \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n \quad (49)$$

$$\tau = \mathbf{I}_L \ddot{\mathbf{q}} - \tau_{G_r} + \mathbf{J}^T m_n (\mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n \quad (50)$$

式中: τ 为电机所要输出的力矩, τ_{G_r} 为动平台重力施加在主动臂上的力矩, $\mathbf{I}_L$ 为主动臂的惯量矩阵。

$$\mathbf{I}_{La1} = \mathbf{I}_{La2} = \mathbf{I}_{La3} \quad (51)$$

$$\tau_{G_r} = m_L \mathbf{r}_{G_r} \mathbf{g} [\cos \theta_1 \quad \cos \theta_2 \quad \cos \theta_3]^T \quad (52)$$

$$\mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{La1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{La2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{La3} \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}_n = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (54)$$

式中: r_{c_r} 为动平台的质心位置, g 为重力加速度, 代入式 (10) 得装配单元输出力矩:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{I}_L\ddot{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\tau}_{c_p} + \mathbf{J}^T \mathbf{m}_n (\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{J}^T \mathbf{G}_n \quad (55)$$

装配单元的各项参数确定之后, 即可根据公式计算电机的输出力矩, 至此完成了装配单元的动力学模型。

3 并联单元稳定性分析

为了保证测量相机工作精度, 对并联机构的稳定性进行分析。

3.1 并联机器人运动学仿真分析

Adams 运动学仿真通过定义模型中各个部件的运动副连接方式, 分析模型的位置、速度及加速度的变化规律^[23]。因为动平台的速度和加速度与驱动关节的速度和加速度具有一定的数学关系, 因此可以通过位置正逆解得到动平台预定运动轨迹^[24]。进行运动学仿真时, 首先在定义一标记点附加到动平台的几何中心并对标记点施加点驱动, 对动平台中心的旋转轴施加旋转驱动, 通过逆解运动方程, 可得到 4 个驱动关节的旋转角度变化数据, 将数据弧度化处理后保存为 4 条样条曲线, 通过样条函数读取样条曲线的数据并以此为基础驱动 4 个驱动关节, 通过正解运动方程即可得到标记点的位置、速度及加速度的变化规律, 求解过程如图 7 所示。

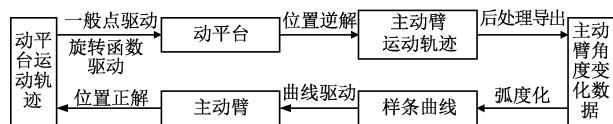


图 7 动平台运动轨迹求解过程

Fig. 7 Solution process of moving platform trajectory

动平台标记点上设置的驱动为一般点驱动, 其位移与时间的运动函数如下所示:

X 向平移: $disp(time) = 150 \cdot \sin(time)$;

Y 向平移: $disp(time) = 150 \cdot \cos(time)$;

Z 向平移: $disp(time) = -10 \cdot time$;

绕 X 旋转: 自由;

绕 Y 旋转: 自由;

绕 Z 旋转: 自由;

在动平台几何中心的旋转副添加驱动, 给出 JOINT 的旋转角度与时间的函数:

$STEP(time, 4, 0d, 7.5, 90d) + STEP(time, 11.5, 0d, 15, 90d)$

通过运动仿真可以看到装配单元的动平台做螺旋下降运动, 如图 8 所示。

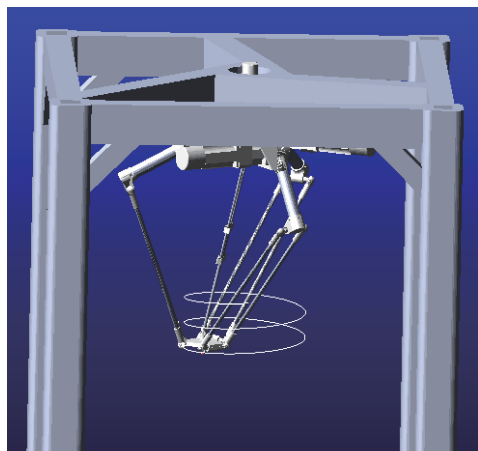


图 8 动平台运动轨迹图

Fig. 8 Moving track of moving platform

对装配单元进行 15 s 1 000 步仿真, 利用 Adams/PostProcessor 中的曲线处理工具可以得到 4 个驱动关节的旋转角度、角速度、角加速度等变化曲线图, 如图 9~11 所示。

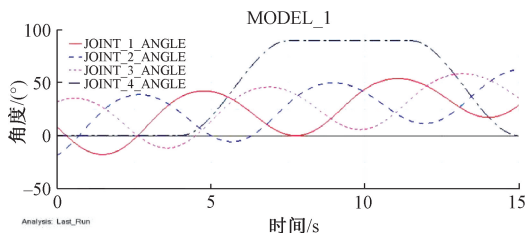
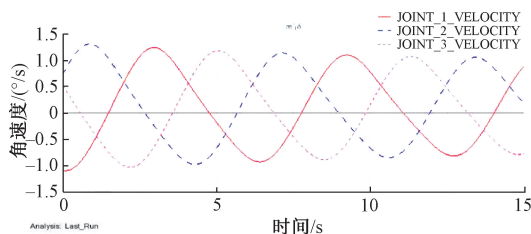


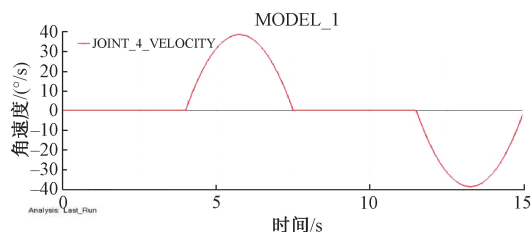
图 9 3 条主动臂及中间支链角度变化曲线

Fig. 9 Angle change curve of three driving arms and intermediate branch chain



(a) 3 条主动臂角速度变化曲线

(a) Three angular velocity change curves of active arms

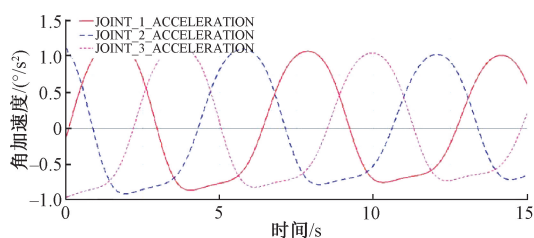


(b) 中间支链角速度变化曲线

(b) Angular velocity change curve of intermediate branch chain

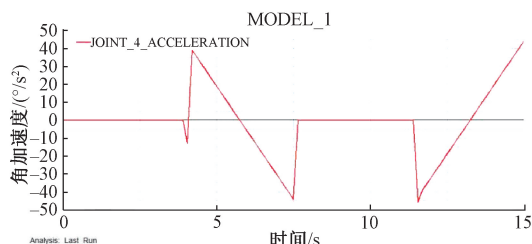
图 10 3 条主动臂及中间支链角速度变化曲线

Fig. 10 Angular velocity variation curve of three active arms and middle branch chain



(a) 3条主动臂角加速度变化曲线

(a) Change curve of angular acceleration of three active arms



(b) 中间支链角加速度变化曲线

(b) Change curve of angular acceleration of intermediate branch chain

图 11 3 条主动臂及中间支链角加速度变化曲线

Fig. 11 Angular acceleration variation curve of three active arms and middle branch chain

由以上变化曲线图可知 3 条主动臂和中间支链的角度数据曲线变化平稳,没有发生突变情况,同时其角速度和角加速度的数据变化曲线也相对平稳,符合预期的目标。

3.2 并联装配单元动力学仿真分析

Adams 软件的动力学仿真分析模块,能够将模型的仿真结果通过可视化的方式显示出来,同时可以根据得出的曲线数据获取模型的参数信息,高效的解决模型中存在的问题^[25]。

通过动力学仿真分析模块,可以对装配单元进行实际工作工况模拟仿真:装配单元对薄壁件的测量及抓取分类。工作时,安装在动平台上的末端执行装置的运动对整个装配单元的运动不产生影响,故在仿真过程中用一个恒定的力来对其进行等效替代^[26]。

模拟装配单元测量及抓取-放置一个薄壁件,即装配单元末端作门字形轨迹运动,具体轨迹为“1→2(测量)→1(末端旋转)→2(抓取)→1→3→4(放置)→3(末端旋转)→1”,“1”为一个运动周期内的开始点,“4”为一个运动周期内的结束点,如图 12 所示。



图 12 测量用装配单元末端运动轨迹

Fig. 12 Movement track of end of assembly unit for measurement

通过动力学仿真分析模块能够显示动平台 x 、 y 、 z 轴的位移变化曲线,经后处理分析能够得到驱动关节 1、2、3、4 的旋转角度、角速度、角加速度、力及力矩变化规律,如图 13~18 所示。

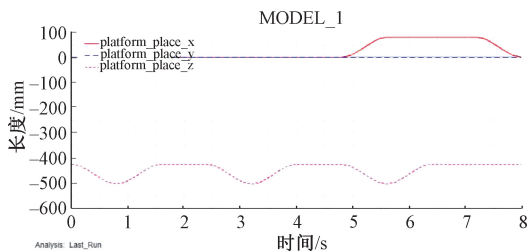
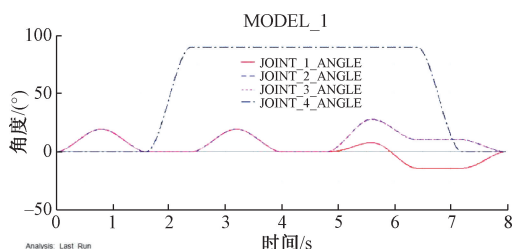
图 13 动平台 x 、 y 、 z 轴位移变化曲线Fig. 13 Displacement curves of x -axis, y -axis and z -axis of moving platform

图 14 驱动关节旋转角度变化曲线

Fig. 14 Rotation angle change curve of driving joint

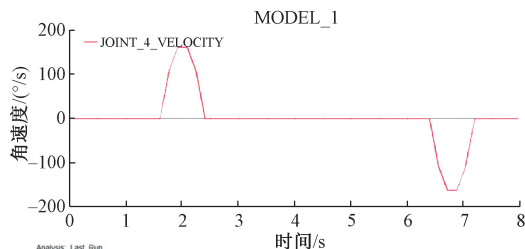
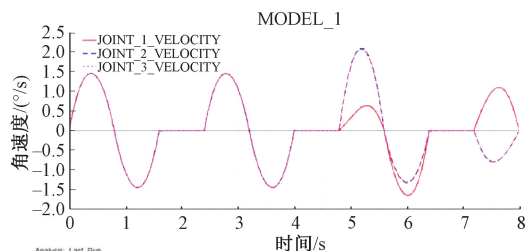


图 15 驱动关节旋转角速度变化曲线

Fig. 15 Variation curve of rotation angular velocity of driving joint

通过图 13 中动平台 x 、 y 、 z 轴位移变化曲线可以发现动平台在 y 轴方向上维持在零点处稳定不变, x 轴方向上从零点处平滑的上升到 80 mm,维持一段时间后再平滑的下降至零点处,整个运动过程呈近似梯形曲线, x 轴

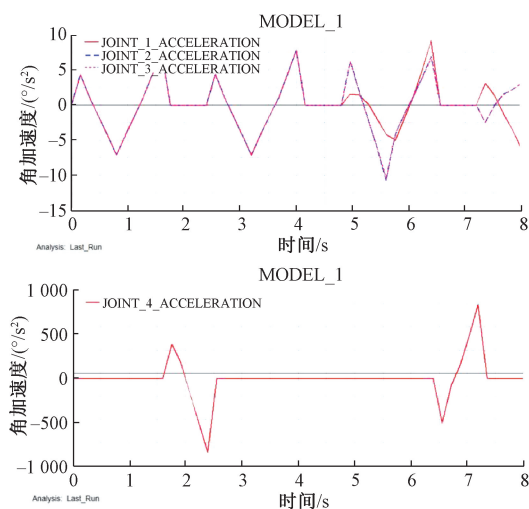


图 16 驱动关节旋转角加速度变化曲线

Fig. 16 Variation curve of rotation angular acceleration of driving joint

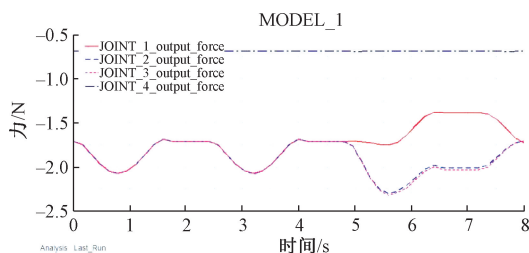


图 17 驱动关节输出力变化曲线

Fig. 17 Variation curve of output force of driving joint

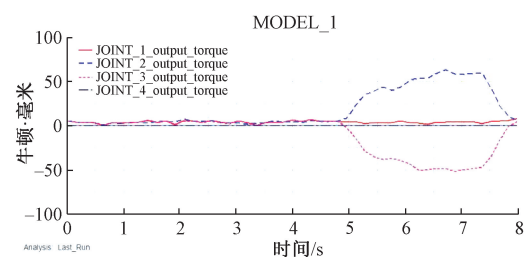


图 18 驱动关节输出力矩变化曲线

Fig. 18 Variation curve of output torque of driving joint

方向上从-420 mm 处平滑的下降到-500 mm 处,再平滑的上升到-420 mm 处,整个运动过程共出现 3 次相同的近似梯形变化曲线, x, y, z 3 个坐标轴方向上的运动曲线均与规划轨迹一致。4 个驱动关节的旋转角度变化曲线连续,在运动状态变化点过渡平滑;3 条主动臂的角速度变化曲线呈正弦函数形,中间支链的角速度变化曲线呈近似梯形,变化平稳;角加速度变化曲线呈锯齿形,运动过程中角速度达到极值或减速至零时,角加速度会出现极值变化;驱动关节输出力和输出力矩的变化平稳,未出

现突变的情况。

从各项数据变化曲线中可以看出在设备运行过程中 4 个驱动关节的旋转角度、角速度和角加速度均变化平稳,未出现任何突变情况,动平台的位移曲线与预定轨迹基本重合,可用该运动仿真分析为以后的设备运动路线规划做理论支撑。

4 结 论

目前薄壁件的测量及分类装配还主要依靠人工,其缺点主要体现在自动化程度差、合格率低、效率差、对工人依赖性强等^[27]。针对薄壁件测量分类设计了一种薄壁件测量分类装配单元并联机构,并对机构的运动空间进行了仿真,对其稳定性进行了分析。取得的成果如下:

1) 设计了一种薄壁件测量分类装配单元的并联机构结构,通过引入并联运动机构提高了机构运动的速度和稳定性,节约了工作空间。

2) 建立了并联机构的运动学与动力学模型,根据构件的运动方式对装配单元的机构进行了简化,降低了运动方程的求解难度。利用虚功原理的方法建立了装配单元的动力学模型,并通过质量重新分配的方法对动力学模型进行了简化,显著提高了动力学模型分析的效率。

3) 对装配单元并联机构进行了仿真分析,利用 Adams 软件对装配单元进行了稳定性分析(运动学、动力学),分析结果表明:装配单元在运动过程中动平台的各项参数变化平稳,稳定性较高,满足设计要求。

参考文献

- [1] 苗圩. 大力实施中国制造 2025 加快推进制造强国建设[J]. 时事报告(党委中心组学习), 2015(3): 72-84.
MIAO W. Vigorously implement made in China 2025 and accelerate the construction of a manufacturing power [J]. Current Affairs Report (Study by the Central Group of the Party Committee), 2015(3): 72-84.
- [2] 张璐. “中国制造 2025”背景下制造业转型升级路径选择[J]. 中国集体经济, 2021(4): 9-10.
ZHANG L. Path selection of manufacturing transformation and upgrading under the background of “Made in China 2025” [J]. China's Collective Economy, 2021(4): 9-10.
- [3] 何玉安, 夏明火. 基于“工业 4.0”的大规模个性化生产模式研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 25-29.
HE Y AN, XIA M H. Research on large-scale personalized production mode based on “Industry 4.0” [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 25-29.
- [4] 李雪亚, 郎丽华, 褚婷婷. 国内市场需求与我国制造业出口相关性研究——基于中国制造业 23 个行业面板

- 数据的分析[J]. 经济问题探索, 2021(1): 147-154, 180.
- LI X Y, LANG L H, CHU T T. Research on the correlation between domestic market demand and China's manufacturing export - Based on the panel data of 23 industries of China's manufacturing industry [J]. Exploration of Economic Issues, 2021 (1): 147-154, 180.
- [5] 周凯. 飞行器大型薄壁件制造的柔性工装技术[J]. 航空制造技术, 2012(3): 34-39.
- ZHOU K. Flexible tooling technology for manufacturing large thin-walled parts of aircraft [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012 (3): 34-39.
- [6] 刘洋, 李春晓. 面向大型舱段装配的六自由度平台轨迹规划及奇异性研究[J]. 建设机械技术与管理, 2018, 31(10): 46-49.
- LIU Y, LI CH X. Research on trajectory planning and singularity of six degrees of freedom platform for large segment assembly [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2018, 31 (10): 46-49.
- [7] 马光, 周万勇, 汪杰, 等. 六自由度并联平台多轴运动控制系统设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 1-5.
- MA G, ZHOU W Y, WANG J, et al. Design of multi axis motion control system for six degrees of freedom parallel platform [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48 (5): 1-5.
- [8] 杨元, 王仲奇, 杨勃, 等. 基于 SVR 的航空薄壁件夹具布局优化预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1302-1309.
- YANG Y, WANG ZH Q, YANG B, et al. Optimization prediction model of fixture layout of aviation thin-walled parts based on SVR [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23 (6): 1302-1309.
- [9] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.
- LIU J H, SUN Q CH, CHENG H, et al. Research status, technical connotation and development trend of product assembly technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (11): 2-28.
- [10] 孙立琴, 丛明, 赵强, 等. 汽车发动机和变速箱自动化装配技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(3): 59-62.
- SUN L Q, CONG M, ZHAO Q, et al. Automatic assembly technology of automobile engine and gearbox [J]. Modular Machine Tools and Automatic Machining Technology, 2009 (3): 59-62.
- [11] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [12] 刘广帅, 李白林. 基于逆向工程图像的最优轮廓优势点的提取[J]. 应用力学与材料, 2013, 2746: 2570-2575.
- LIU G SH, LI B L. Extraction of optimal contour dominant points based on ICT images in reverse engineering [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2746: 2570-2575.
- [13] 魏本征, 赵志敏, 华晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 838-844.
- WEI B ZH, ZHAO ZH M, HUA J. Subpixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31 (4): 838-844.
- [14] MANNO-KOVACS A. Direction selective contour detection for salient objects[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 29(2): 375-389.
- [15] FABIJANSKA A. Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges [C]. 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. IEEE, 2014: 641-650.
- [16] JIN D, ZHU S, SUN X, et al. Fusing Canny operator with vibe algorithm for target detection[C]. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2016: 119-123.
- [17] AI K, CAO Z, LIU X, et al. A contour detection approach for mobile robot [C]. Intelligent Robotics and Applications: 7th International Conference, ICIRA 2014, Guangzhou, China, December 17 - 20, 2014, Proceedings, Part II 7. Springer International Publishing, 2014: 265-272.
- [18] 许鑫杰, 王秀锋, 鲁文其. 基于边缘检测的零件轮廓识别系统开发[J]. 机电工程, 2019, 36(2): 201-205.
- XU X J, WANG X F, LU W Q. Development of part contour recognition system based on edge detection [J]. Electromechanical Engineering, 2019, 36 (2): 201-205.
- [19] 梁学军, 洪迈生, 贾文焕. 螺纹紧固件的自动检测技术[J]. 计量技术, 2000(2): 14-17.
- LIANG X J, HONG M SH, JIA W H. Automatic detection technology of threaded fasteners [J]. Metrology Technology, 2000 (2): 14-17.
- [20] 张少军, 苟中魁, 李庆利. 利用数字图像处理技术测量直齿圆柱齿轮几何尺寸[J]. 光学精密工程, 2004(6): 619-625.

- ZHANG SH J, GOU ZH K, LI Q L. Using digital image processing technology to measure the geometric dimension of spur gear [J]. Optical Precision Engineering, 2004 (6): 619-625.
- [21] LI J, YAOJIE S. The detection and sorting system design of three-dimensional size [C]. 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI). IEEE, 2016: 539-542.
- [22] 冯昊天,王红军,常城,等. 基于数字孪生的柔性生产线状态感知[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 17-24.
- FENG H T, WANG H J, CHANG CH, et al. State perception of flexible production line based on digital twin[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (2): 17-24.
- [23] 唐竞鹏,王红军. 基于 WDCNN-SVM 深度迁移学习的燃气轮机转子故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 115-123.
- TANG J P, WANG H J. Gas turbine rotor fault diagnosis method based on WDCNN-SVM deep transfer learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (11): 115-123.
- [24] 王红军,汪亮. 基于多域空间状态特征的高端装备运行可靠性评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 812-818.
- WANG H J, WANG L. Operational reliability evaluation of high-end equipment based on multi domain spatial state characteristics [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (4): 812-818.
- [25] STEWART D. A platform with 6 degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(1): 371-386.
- [26] 郑魁敬,王连峰. 双目主动视觉监测平台设计[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 710-716.
- ZHENG K J, WANG L F. Design of binocular active vision monitoring platform [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16 (4): 710-716.
- [27] 毛向向,王红军. 薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 137-143.
- MAO X X, WANG H J. Contour feature recognition of thin-walled parts under complex illumination[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (3): 137-143.

作者简介



王红军(通信作者), 2005 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授、博导, 主要研究方向为高端装备智能感知与控制、故障诊断与维护。

E-mail: wanghj86@163.com

Wang Hongjun (Corresponding author)

received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. Now she is a professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include high end equipment intelligent perception and control, fault diagnosis and maintenance.