

多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人设计*

李 菊¹ 赵德安¹ 沈惠平² 邓嘉鸣² 蒋益兴² 徐 伟³

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 常州大学机械工程学院, 常州 213016;
3. 浙江龙游新迪高分子有限公司, 衢州 324400)

【摘要】 针对大型扁平型立方体工件的喷涂工艺特点,将并联机构应用于喷涂工艺,设计了一种控制解耦性很好的五轴混联喷涂机器人,阐述了这种喷涂机器人的机构设计、工作原理、运动学分析、驱动方式、控制系统硬件组成及其控制方式。该机器人具有结构紧凑、喷涂效率高、涂层厚度均匀和操作简便等特点,具有较好的应用前景。

关键词: 机器人 喷涂 混联机构 设计

中图分类号: TP242; TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0216-05

Design of 5-axes Hybrid Robot with Several Spray Guns for Collaborative Spraying

Li Ju¹ Zhao Dean¹ Shen Huiping² Deng Jiaming² Jiang Yixing² Xu Wei³
(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China
3. Zhejiang Longyou County Xindi Polymeric Material Co., Ltd., Quzhou 324400, China)

Abstract

A parallel mechanism was used in spray painting equipment for large and flat cube workpiece. A 5-axes decoupling hybrid spraying robot was designed. The mechanism design, working principle, kinematical analysis, drive mode, hardware composition and control method of control system for the spraying robot were expounded. The robot had compact structure, high spraying efficiency, uniform coating thickness, simple operation, and good prospect.

Key words Robot, Spraying, Hybrid mechanism, Design

引言

目前表面喷涂设备主要有水平往复自动喷涂机、垂直往复自动喷涂机、旋转喷涂机、多轴顶喷机和喷涂机器人等^[1~3]。其中,各种喷涂机由于只能完成一些简单的往复直线运动,而被涂工件表面的多样性及复杂性使得喷涂机的使用受到一定限制。相对于喷涂机,喷涂机器人具有轨迹灵活、控制精度高、柔性大、工作范围大、易操作和维护、设备利用率高的优点,是高质量表面涂装的首选设备。目前,学

术界对喷涂机器人的研究主要集中于喷枪运动轨迹优化^[4~5]、离线编程技术、喷漆质量^[6]以及对环境的影响等方面,而对喷涂机器人的机构研究^[7]较少,且几乎都为串联机器人。少自由度并联机构相对于串联机构,因定位精度高、适合于高速、制造容易等优点,已在先进制造加工、机器人操作手等领域获得了较好的应用,目前对并联机器人的研究已取得不少进展,主要用于实现高精度测量及加工。本文针对大型平面型立方体工件的高效喷涂特点,将并联机构应用于喷涂工艺,设计一种控制解耦性很好的

收稿日期: 2011-03-16 修回日期: 2011-04-25
* 国家自然科学基金资助项目(60875052)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发(2011)6号)
作者简介: 李菊,博士生,主要从事微机智能控制、机器人控制研究,E-mail: wangju0209@163.com
通讯作者: 赵德安,教授,博士生导师,主要从事智能自动化与网络控制研究,E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

五轴混联喷涂机器人。

1 机构设计及工作原理

多喷枪协同式喷涂混联机器人的概念是在单喷枪喷涂概念的基础上提出来的,作者先前研制的五轴喷涂混联机器人^[8],由2自由度并联机构的输出连杆上固接一个垂直于其运动平面的直线运动结构,又在其输出滑块上固定一个2自由度转动喷枪安装座,由于喷枪安装座自身的质量,在高速直线喷涂中出现了明显的颤动,为此,改变设计思想,合理分配5个自由度,采用了用于主喷大平面的3自由度混联结构,附加用于辅喷两纵向侧面、两横向侧面(共4个侧面)的2自由度正交式串联结构,构成五轴解耦混联高速喷涂机器人^[9],机构原理图如图1所示。这种结构不仅消除了高速运行中的颤动现象,而且大大提高喷涂效率。

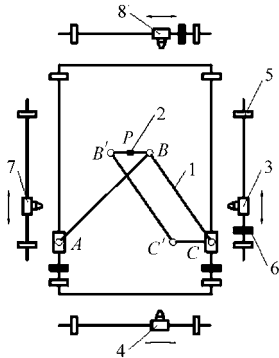


图1 机构原理图

Fig.1 Elementary diagram of mechanism

1.2自由度平面并联机构 2.Z方向直线机构 3、7.纵向喷涂机构 4、8.横向喷涂机构 5.限位开关 6.原点开关

1.1 主喷大平面的3自由度混联机构

3自由度混联机构位于机架上,用于主喷工件上表面,其机构简图如图2所示。它由位于两平行导轨上的2自由度滑块驱动平面并联机构连杆上,固定串接一个垂直于其运动平面的Z方向单自由度机构组成,是一种PRRRP+P型混联机构,主喷枪固定在作Z方向直线运动的滑座上。当两滑块沿导轨作往复直线移动时,可使主喷枪在两导轨内侧的平面上作任意平面曲线运动;而Z方向单自由度机构控制主喷枪的上、下直线运动,从而满足工件上表面不同距离的喷涂要求。

该机构适用于高速、大平面喷涂等工艺操作。另外,两平行导轨两端和主喷枪上、下运动两端分别装有助于定位的原点开关和用于保护的限位开关。

1.2 纵(横)向侧面喷涂机构

2个纵(横)向侧面机构,通过固定在同步带上的辅喷枪3及3'(4及4')沿工件长度(宽度)方向

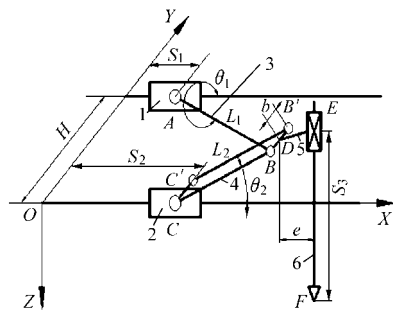


图2 3自由度混联机构简图

Fig.2 Sketch of 3-DOF hybrid mechanism

1.滑块1 2.滑块2 3.连杆1 4.连杆2 5.连杆3 6.Z方向直线机构

作往复直线移动,负责工件长度(宽度)方向两纵(横)向侧面的喷涂。纵(横)向侧面喷枪运动的导轨两端装有助于喷枪定位的原点开关和用于保护的限位开关。

纵向侧面喷涂机构和横向侧面喷涂机构相互垂直,构成2自由度正交式串联结构,位于主喷大平面的3自由度混联机构的下方。

2 运动学分析

由于该机器人的纵(横)向侧面喷涂机构运动较简单,因此,该五轴混联机器人的运动学分析可简化为主喷大平面的3自由度混联机构的运动学分析。

如图2所示,两滑块位于相距H的两平行导轨上,在操作点D上串接一个垂直于XOY平面的单自由度Z方向上下直线运动的喷枪。其中S₁、S₂分别表示滑块1、滑块2在导轨上的沿X轴位移;L₁、L₂分别为连杆1(AB)、连杆2(BC)的杆长;θ₁、θ₂分别表示连杆AB、BC与X轴正向夹角;D为BB'的中点,b为DB杆长,e为连杆3(DE)杆长,S₃表示喷枪Z方向的位移。

2.1 运动学正解

已知S₁、S₂、S₃,求F点位置(x_F,y_F,z_F)。

由矢量法,机构位移方程为

$$H + S_1 + L_1 = S_2 + L_2$$

$$\begin{cases} S_1 + L_1 \cos \theta_1 = S_2 + L_2 \cos \theta_2 \\ H + L_1 \sin \theta_1 = L_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

消去式(1)中θ₁,并化简解得

$$\theta_2 = 2 \arctan \left(\frac{M \pm \sqrt{M^2 + N^2 - Q^2}}{N - Q} \right)$$

其中 $M = 2HL_2$ $N = 2L_2(S_1 - S_2)$

$$Q = 2S_1S_2 + L_1^2 - H^2 - S_1^2 - S_2^2 - L_2^2$$

同样,由式(1)有

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{L_2 \sin \theta_2 - H}{L_1} \right)$$

于是 B 点位置为

$$\begin{cases} x_B = S_2 + L_2 \cos \theta_2 \\ y_B = L_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

则 E 点位置为

$$\begin{cases} x_E = S_2 + L_2 \cos \theta_2 + e \\ y_E = L_2 \sin \theta_2 + b \end{cases}$$

于是,末端执行点 F 的位置为

$$\begin{cases} x_F = S_2 + L_2 \cos \theta_2 + e \\ y_F = L_2 \sin \theta_2 + b \\ z_F = S_3 \\ \theta_1 = \arcsin((L_2 \sin \theta_2 - H)/L_1) \\ \theta_2 = 2 \arctan\left(\frac{M \pm \sqrt{M^2 + N^2 - Q^2}}{N - Q}\right) \end{cases} \quad (3)$$

2.2 运动学反解

已知 F 点位置 (x_F, y_F, z_F) , 求 S_1, S_2, S_3 。

由式(2)得

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{y_B}{L_2}\right)$$
$$S_2 = x_B - L_2 \cos \theta_2$$

由式(1)得

$$\theta_1 = 2\pi - \arcsin\left(\frac{H - y_B}{L_1}\right)$$
$$S_1 = S_2 + L_2 \cos \theta_2 - L_1 \cos \theta_1$$

于是,位置反解为

$$\begin{cases} S_1 = x_F - e - L_1 \cos \theta_1 \\ S_2 = x_F - e - L_2 \cos \theta_2 \\ S_3 = z_F \\ \theta_1 = 2\pi - \arcsin((H - y_F + b)/L_1) \\ \theta_2 = \arcsin((y_F - b)/L_2) \end{cases} \quad (4)$$

上述位置反解方程(4)可转换为不含三角函数的表达式

$$\begin{cases} S_1 = x_F - e - Z_1 \\ S_2 = x_F - e - Z_2 \\ S_3 = z_F \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$Z_1 = \sqrt{L_1^2 - (H - y_F + b)^2}$$
$$Z_2 = \sqrt{L_2^2 - (y_F - b)^2}$$

3 驱动设计

由于该喷涂机器人所承载中等(主要是喷枪及上、下运动的滑座的质量),但动作较复杂,运动轨迹严格,所以,机器人 5 个自由度都采用了电力驱动。

2 自由度滑块驱动的平面并联机构,由行星减速器及同步带传动装置将电动机转动转换成两滑块

直线往复移动。两滑块皆采用 2.3 kW 交流伺服电动机(SM130-150-15LFB 型)及其驱动器(SA3L10B 型)构成的交流伺服系统驱动,其控制系统采用开环控制。

Z 方向单自由度直线机构,由滚珠丝杠传动装置将电动机转动转换成直线运动。 Z 方向机构采用步进电动机(57H54H-1004A2 型)驱动,其控制系统采用开环控制。

纵、横向侧面喷涂机构,由同步带传动装置将电动机转动转换成辅喷枪作直线往复移动。四侧面机构皆采用 400 W 交流伺服电动机(SM60-013-30LFB 型)及其驱动器(SA3L04C 型)构成的交流伺服系统驱动,其控制系统采用开环控制。

4 控制系统设计

4.1 喷枪运动及其编程思想

该五轴混联喷涂机器人配有 5 把喷枪,按最优顺序直接工作,省去了原先单喷枪喷涂须改变喷枪姿态以满足立方体工件 5 个面作业所需的辅助时间,大大提高了喷涂效率。

该机器人运行分为自动和手动两种方式,其中,手动方式为根据外部按钮输入情况进行相应的喷涂操作,运行过程较为简单。以扁平型立体大工件单件喷涂为例,说明喷枪的自动运行及其编程思想:

①根据工件高度及喷涂要求,调节主喷枪的高度。

②将主喷枪和两纵向侧面喷枪移动到起喷位置后,打开主喷枪和两纵向侧面喷枪,令大平面主喷和两纵向侧面侧喷同时开始(此时两横向侧面喷枪关闭并静止处于中间停靠位置)。其中,两纵向侧面喷枪沿工件长度方向往复喷涂 N 次即可,而主喷枪沿 X 轴往复喷涂 N 次(即一道)后,沿 Y 轴移动一个喷涂间距 S ,即进到下一道喷涂位置,再沿 X 轴往复喷涂 N 次,直至喷完 M 道,完成整个上表面的喷涂,其中,往复次数 N 、喷涂间距 S 和道数 M 都是根据喷涂要求预先设定的。

③两纵向侧面喷涂结束,关闭该两把喷枪并使其回到中间停靠位置。

④将两横向侧面喷枪移动到起喷位置后,打开两横向侧面喷枪,开始喷涂两横向侧面,两横向侧面喷枪沿工件宽度方向往复喷涂 N 次即可。

⑤两横向侧面喷涂结束,关闭该两把喷枪并使其回到中间停靠位置。

⑥大平面主喷涂结束,关闭主喷枪并使其返回起喷位置,等待下一个循环。

4.2 控制系统设计

喷涂机器人的控制系统硬件组成如图 3 所示,主系统采用了模块式可编程控制器(PLC)控制^[10],执行参数的输入采用了触摸屏输入,设计程序采用

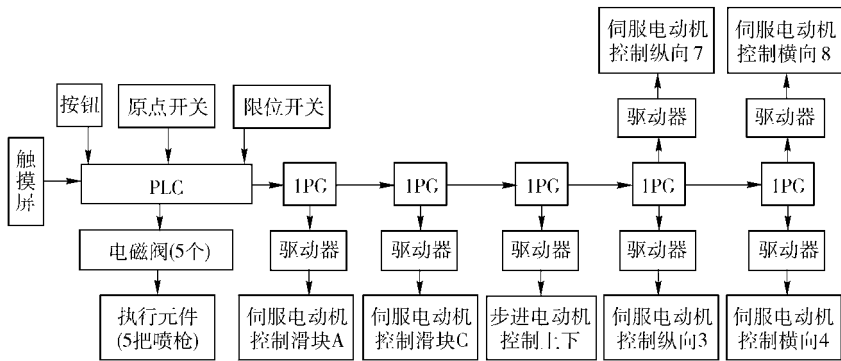


图 3 控制系统硬件组成
Fig. 3 Hardware composition of control system

组态软件,这样,设计和更改都较容易,二次开发也简单,进一步提高了产品的适应性。

首先,在触摸屏里编写程序,保证把工艺参数、运动参数等输入到 PLC 里,同时把当前运行的坐标值显示在触摸屏上,这里采用的是配方数据传递,能保证数据更新的速度。

然后,把编写好的控制程序下载到 PLC 中。PLC 中的程序一方面协同触摸屏进行参数传递,另一方面,根据外部开关和按钮的输入情况,控制 6 个交流伺服电动机和 1 个步进电动机的运动,因各个电动机对运动和位置的精度有一定要求,因此,采用了 5 个三菱 FX_{2N}-1PG 模块来控制。FX_{2N}-1PG 模块是作为三菱 FX_{2N} 系列可编程控制器的扩展部分配置的脉冲发生器单元,其通过向伺服或步进马达的驱动放大器提供指定数量的脉冲来实现一个独立轴的简单定位。为节约成本,其中纵向侧面机构中的 2 个交流伺服电动机共用 1 个 FX_{2N}-1PG 模块控制,横向侧面机构中的 2 个交流伺服电动机也共用 1 个 FX_{2N}-1PG 模块控制,而主喷大平面的 3 自由度混联机构中的 2 个交流伺服电动机和 1 个步进电动机各由一个 FX_{2N}-1PG 模块控制。

采用 FX_{2N}-1PG 模块首先利用原点开关进行原点复位,保证同一点每次的坐标值相同;在运动时通过设置加速和减速的时间来保证运动的平稳性,及在运动方向突然改变时保证不丢步,从而减少振动,保证喷涂质量。实践已证明这样的控制系统和方式可靠性好、精度高。

研制完成的上述五轴解耦混联喷涂机器人,如图 4 所示,已应用于实际生产中,其性能参数为:最

大喷涂速度:1 m/s;定位精度:±1 mm;涂层厚度误差:≤30%;喷涂尺寸:900 mm×400 mm×50 mm。

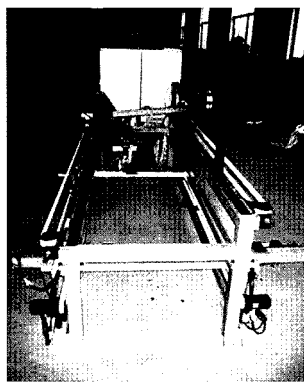


图 4 五轴解耦混联喷涂机器人实物图
Fig. 4 Photo of 5-axes decoupling hybrid spraying robot

5 结论

(1)设计的五轴联动喷涂机器人由主喷大表面的 3 自由度混联机构、纵向侧面喷涂机构、横向侧面喷涂机构 3 个主要机械部分及其控制系统组成,其中的 3 自由度混联机构,由 2 自由度滑块驱动平面并联机构,串接一个垂直于其运动平面的单自由度直线运动机构组成。

(2)机器人 5 个自由度都采用了电力驱动,其中 Z 方向单自由度机构采用步进电动机机构成开环控制系统,并选用滚珠丝杠螺母传动,而其他自由度的机构采用交流伺服电动机机构成开环控制系统,并选用同步带传动。

(3)控制系统采用了由触摸屏、PLC、FX_{2N}-1PG、驱动器和电动机组成的控制系统,实现了高效自动喷涂并保证品质的稳定。

参 考 文 献

- 1 梁治齐,熊楚才. 涂料喷涂工艺与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- 2 王铸. 往复式自动喷涂机计算机控制系统软件研究[J]. 制造业自动化,2002,24(8):77~79.
Wang Zhu. Software research on computer control system for reciprocating automatic spraying machine[J]. Manufacturing Automation, 2002, 24(8): 77~79. (in Chinese)

- 3 陆海波,邓海涛,朱延松. 往复式电脑控制喷涂机设计的几个要点[J]. 苏盐科技,2000,3(1):31~33.
Lu Haibo, Deng Haitao, Zhu Yansong. Several design points of reciprocating spraying machine [J]. Jiangsu Salt Science & Technology, 2000, 3(1): 31~33. (in Chinese)
 - 4 李发忠,赵德安,张超,等. 基于CAD的喷涂机器人轨迹优化[J]. 农业机械学报,2010,41(5):213~217.
Li Fazhong, Zhao Dean, Zhang Chao, et al. Trajectory optimization of spray painting robot based on CAD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):213~217. (in Chinese)
 - 5 陈伟,赵德安,汤养. 自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化[J]. 农业机械学报,2008,39(1):147~150.
Chen Wei, Zhao Dean, Tang Yang. Trajectory optimization on robotic spray painting of free-form surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):147~150. (in Chinese)
 - 6 马晓伟,魏学业. 喷涂厚度自动控制系统的研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
Ma Xiaowei, Wei Xueye. Research on the automatic control system for coating thickness [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
 - 7 邢东升,张大卫. 六自由度喷涂机器人结构设计及控制[D]. 天津:天津大学,2008.
Xing Dongsheng, Zhang Dawei. Mechanical design and control for 6-DOF spraying robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
 - 8 沈惠平,邓嘉鸣,蒋益兴,等. 一种单喷枪喷涂五轴混联机器人:中国,2011100428260[P]. 2011-02-23.
Shen Huiping, Deng Jiaming, Jiang Yixing, et al. 5-DOF hybrid robot with one spray gun: CN, 2011100428260[P]. 2011-02-23. (in Chinese)
 - 9 邓嘉鸣,沈惠平,蒋益兴,等. 一种多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人:中国,2011100428311[P]. 2011-02-23.
Deng Jiaming, Shen Huiping, Jiang Yixing, et al. 5-DOF hybrid robot with several spray guns for collaborative spraying: CN, 2011100428311[P]. 2011-02-23. (in Chinese)
 - 10 廖常初. 可编程序控制器应用技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
-

(上接第 224 页)

- 7 Liu Wei, Chang Siqin. Modeling and simulation for a novel 6-DOF parallel manipulator[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Modeling and Simulation, Manchester, England: World Academic Press, 2009,2:451~456.
- 8 Murray R M, Li Z X, Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Florida: CRC Press, 1994.
- 9 王洪波,黄真. 六自由度并联式机器人拉格朗日动力方程[J]. 机器人,1990,12(1):23~26.
Wang Hongbo, Huang Zhen. Langrange's dynamic equation of six-DOF parallel multi-loop robot manipulator[J]. Robot, 1990, 12(1):23~26. (in Chinese)
- 10 钟美鹏,郑水英,潘晓弘. 基于遗传算法的压缩机参数优化[J]. 农业机械学报,2009,40(8):198~202.
Zhong Meipeng, Zheng Shuiying, Pan Xiaohong. Parameter optimization of compressor based on genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):198~202. (in Chinese)
- 11 杨文柱,李道亮,魏新华,等. 基于改进遗传算法的棉花异性纤维目标特征选择[J]. 农业机械学报,2010,41(4):173~178.
Yang Wenzhu, Li Daoliang, Wei Xinhua, et al. Feature selection for cotton foreign fiber objects based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):173~178. (in Chinese)
- 12 刘洪,彭增雄,荆崇波. 轴向柱塞泵滑靴油膜形状的遗传算法数值分析[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(1):75~79.
Liu Hong, Peng Zengxiong, Jing Chongbo. Numerical analysis of slipper bearing's film shape in axial piston pump using genetic algorithms[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(1):75~79. (in Chinese)