

铬酸酐物料桶自动紧箍封盖机设计

向科峰, 毛森, 罗于杰

(西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: **目的** 针对铬酸酐有腐蚀性与有毒有害性, 及其手动封装环境给人身体带来安全隐患的问题, 迫切需要设计一种安全、高效的铬酸酐物料桶封装工艺。**方法** 提出一种基于三坐标桁架的自动封装系统, 其中机械臂实现自动抓取桶盖完成桶盖自动上料的工序, 螺杆和螺母供料器由重力效应完成螺杆和螺母顺序供料的工序, 螺栓封盖机构完成螺栓紧固物料桶桶盖的工序, 从而实现三坐标桁架封装系统的自动封装功能, 并通过数字模拟和试验的方式验证封装工艺的合理性。**结果** 在封装环节, 精密设计的螺栓封盖机构实现了自动供货和高负载精确的螺栓封装工艺。设计的自动封装系统的封装速度高达 1.2 个/min, 试验阶段封装成功率高达 100%。**结论** 该设备结构合理, 在保证铬酸酐物料封装质量的前提下, 合理规避了人工生产带来的安全隐患, 推动了化工企业的自动化进程, 为桶的自动封装提供了一种解决方案。

关键词: 铬酸酐; 物料桶; 自动送料; 螺栓封盖

中图分类号: TB486⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)15-0161-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.021

Design of Automatic Cover Bolting and Packaging Machine for Chromic Anhydride Material Drums

XIANG Ke-feng, MAO Sen, LUO Yu-jie

(School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Sichuan Mianyang 621010, China)

ABSTRACT: The work aims to design a safe and efficient packaging process for chromic anhydride material drums to address the corrosive and toxic nature of chromic anhydride, as well as the safety hazards it poses to human health in the manual packaging environment. An automatic packaging system based on three-coordinate truss was proposed, in which the mechanical arm automatically grabbed the drum cover to complete the automatic charging process of the drum cover, the screw and nut feeder completed the sequence feeding process of the screw and nut by gravity effect, and the bolt capping mechanism completed the bolting of the material drum cover, so as to realize automatic packaging of the three-coordinate quilted packaging system. The rationality of the packaging technology was verified by digital simulation and experiment. In the packaging, the bolt capping mechanism of precision design realized automatic supply and high load accurate bolt packaging process. The designed automated encapsulation system achieved a packaging speed of up to 1.2 units per minute, with a 100% success rate during the experimental phase. The equipment structure is reasonable. Under the premise of ensuring the quality of chromic anhydride material packaging, it reasonably avoids the safety risks caused by artificial production, promotes the process of automation in chemical enterprises, and provides a solution for

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 工信部绿色制造系统集成项目 (17zg0102)

作者简介: 向科峰 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为绿色制造、图像检测技术等。

automatic packaging drums.

KEY WORDS: chromic anhydride; material drum; automatic feeding; bolt capping

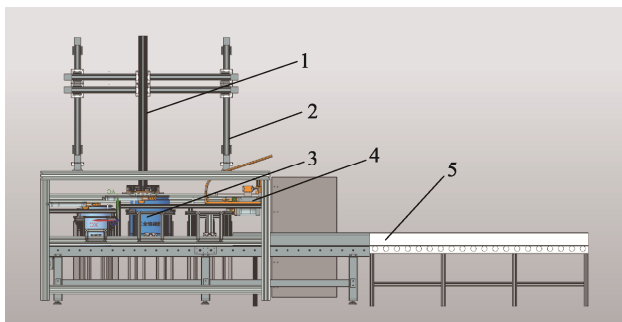
随着社会生产效率的提高,企业对铬酸酐原材料的需求不断增加。铬酸酐的毒性、氧化性等特性,对从事生产线相关工作的工人自身安全性构成了安全隐患^[1-2]。如铬酸酐所具有的腐蚀性会对工人皮肤、呼吸道系统产生损害甚至有致癌的风险,且铬酸酐的生产环境温度较高、空气干燥,不适宜工人长时间在生产线上工作。随着用工荒的逐渐显现,研发一款智能封盖系统代替人工成为摆在企业面前亟待解决的难题^[3-5]。

在螺栓封装工艺中,卫道柱^[6]设计了固定式二轴螺栓拧紧机,在拧紧螺栓时可以实现纵向方向的拧紧工作,但其只能针对螺距相对固定的一种螺钉进行拧紧封装。夏政诚^[7]和缪冬梅等^[8]在分析传统铁桶封装方式基础上实现了半自动控制。王刚等^[9]提出了一种水平拧螺钉机构,实现了力矩控制自动封装。

在铬酸酐封盖工艺中螺杆与螺帽动作空间有限,且封箍具有一定的机械刚性。目前,国内外针对铬酸酐物料桶的自动封盖工艺尚处空白。文中按螺栓封工艺要求,结合工作环境特点,设计一套基于三坐标桁架结构控制机械臂自动取料、放盖、压箍和螺栓封盖的工艺和系统。

1 原理方案设计

1) 设计要求。铬酸酐物料桶(以下简称物料桶)在灌装完成后由传送带输送到封盖机处,在物料桶机械精确定位基础上进行物料桶封盖处理。根据现场安装情况,位于桁架结构上的机械臂在抓取桶盖后要实现较高的放盖定位精度,需要具备修正沿桁架移动时产生部分偏差的能力。螺栓封盖机构满足紧箍力,螺杆与螺帽需设计自动送料机构,且具有自动拧螺栓功能。物料桶封盖示意图见图 1。



1.机械臂; 2.桁架结构; 3.物料桶; 4.螺栓封盖机构;
5.传送带。

图 1 物料桶封盖示意图

Fig.1 Schematic diagram for capping operation of material drums

2) 主要技术参数。文中对灌装完后的物料桶进行自动封盖包装机设计,所用材料为工业级铁桶,主要技术参数:材质为钢材的螺栓封装物料桶,容量为 50 kg;不锈钢材质的外六角螺栓,尺寸为 $M8\text{ mm} \times 70\text{ mm}$;螺栓对物料桶的紧箍力要求载荷为 600 N;设备对物料桶封装速度要求不低于 1 个/min。

3) 布局方式。考虑封装流水线作业需求,以桁架机械臂为封装机构主体系统对取盖、放盖、压箍和螺栓封盖等动作流程进行设计。

4) 封装方式。机器的封装方式可分为定位与拧紧 2 个动作,定位方式为桁架机械臂通过系统给出的 x 、 y 、 z 3 轴信息精准取盖,并准确定位到物料桶上方,完成放盖、压箍等动作;最后由螺栓封盖机构实施紧箍、螺杆螺帽的上料与拧紧动作,完成整个封装过程。

5) 封装工艺路线。在铬酸酐物料封装生产线中,工艺流程主要分为物料桶机械定位夹紧工艺、桶盖定位与压箍工艺、螺栓封装工艺等 3 部分。首先,物料桶在完成铬酸酐的装料与定温冷却后,经传送带运送至系统夹紧区域,检测到来桶后,机构对桶进行夹紧定位,同时,桁架控制云台完成定点取盖和放盖;然后,桁架控制机械臂完成正心和压箍动作;最后,螺栓封装机构控制气动机构紧箍,在螺杆与螺帽送料到位后,启动马达力矩模式实现对铬酸酐桶的螺栓拧紧密封。具体工艺路线见图 2。

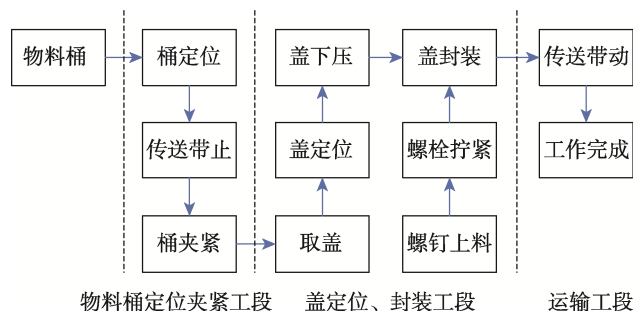


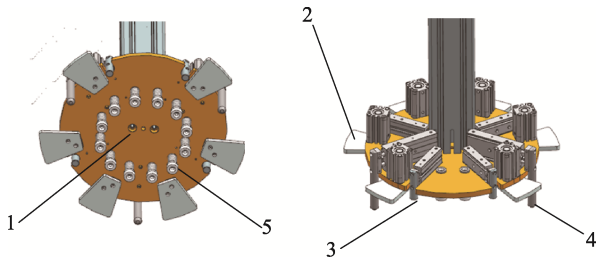
图 2 物料桶自动封装流程工艺

Fig.2 Automatic packaging process of material drum

2 各功能模块结构设计

2.1 自动取盖机构和压紧装置

在现有工业机械手的抓取方式^[8-9]基础上,需考虑对盖与箍的抓取、定位与置放需求。设计的机械臂取盖机构由机械臂与前端机械手组成,机械臂固定于云台 z 轴,具体机构模型如图 3 所示。



1.接近开关; 2.封装压板; 3.内撑短爪;
4.箍紧长爪; 5.永磁铁。

图 3 机械臂结构

Fig.3 Structure of manipulator

针对铬酸酐桶盖薄且表面压字不平的特点, 本机械臂前段取盖装置采用均布磁铁吸盘来实现对铬酸酐桶盖的抓取。抓取系统运动到指定位置后, 磁铁吸起桶盖。经计算及试验验证, 磁铁吸力远大于桶盖重量, 根据永磁铁磁力密度和永磁铁的有效面积, 永磁铁磁力计算见式 (1)。

$$F = K_p \times \frac{12\mu_0}{4S + \left(\frac{H}{\delta}\right)^2} \quad (1)$$

式中: K_p 为安全系数; μ_0 为真空磁导率; S 为永磁体表面积; H 为永磁体磁动势; δ 为气隙。

考虑铬酸酐桶盖呈圆盘形, 为使得取盖机构能抓稳铬酸酐桶盖, 且使得铬酸酐桶盖中心与取盖机构中心一致, 在取盖机构上设计了气缸驱动的 3 支间隔均分的箍紧长爪和 4 支间隔均布的内撑短爪, 实现抓取铬酸酐桶盖与箍的功能, 以及实现内撑箍的功能。箍紧长爪在磁铁吸起桶盖后, 收缩抓住桶盖与箍, 并在取盖运输中保持桶盖与箍的位置。在放下桶盖时, 内撑短爪撑开箍圈以便压紧装置压紧。箍紧力的计算见式 (2)。

$$F = K_p \times 3(p \times S - F_f) \quad (2)$$

式中: K_p 为安全系数; p 为气缸压力; S 为气缸推杆横截面积; F_f 为推杆与气缸间摩擦阻力。

在取盖运动时, 机械臂向下直线运动, 在吸力范围内, 永磁铁吸力作用于铁质桶盖, 触发接近开关, 使机械臂停止下移, 完成桶盖抓取。同时保持桶盖与箍在取盖机构上的位置, 随机械臂送盖与箍至桶上方, 完成取盖。机械臂取盖和箍方式如图 4 所示。

在机械手前端设置有 6 个气缸驱动梯形压板的压紧装置, 以向下按压金属箍圈, 使其套在桶盖与桶口外边缘。下压力计算见式 (3)。

$$F = K_p \times 6 \times (p \times S - F_f) > F_{\text{磁}} + F_{\text{箍}} \quad (3)$$

式中: K_p 为安全系数; p 为气缸压力; S 为气缸推杆横截面积; F_f 为推杆与气缸间摩擦阻力; $F_{\text{磁}}$ 为永磁铁产生的磁力; $F_{\text{箍}}$ 为压板向下运动将金属箍套住桶盖时需克服的阻力。图 5 为压紧板的受力分析。

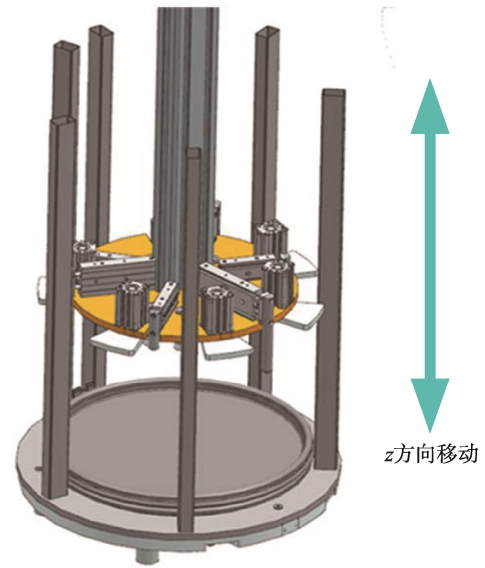


图 4 机械臂取盖方式

Fig.4 Removal method of manipulator

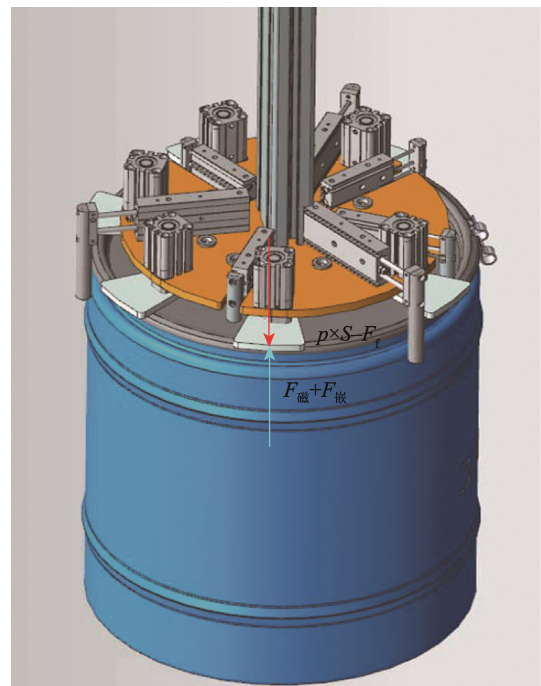


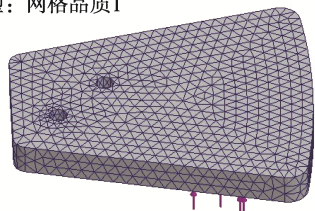
图 5 压紧板受力分析

Fig.5 Force analysis of compression plate

针对压紧装置向下运动, 将金属箍正确套入桶沿时存在较大受力的问题, 为避免压紧装置发生结构失效, 需进行压紧装置受力分析。由于对压紧装置的载荷为气缸气体的推力 $p \times S$ 、压板向下运动将金属箍套住桶盖时需克服的阻力 $F_{\text{箍}}$ 和克服永磁铁吸力产生的阻力 $F_{\text{磁}}$, 主动载荷仅为气缸推力, 无其他主动载荷, 故无需考虑气缸的受力问题, 在文中仅针对关键件压板进行受力分析^[10-12]。在 SolidWorks Simulation 分析软件中建立压板模型, 压板材料为铝合金材料, 它的牌号为 X6030, 对压板施加相应的约束, 以四面

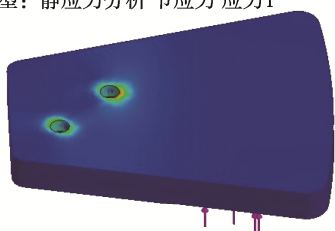
体单元划分网格, 网格尺寸设置为 2 mm, 共得个 31 944 网格单元, 25 554 个节点。压板一侧施加相应的纵向载荷, 可得相应的模拟计算结果, 网格模型图和静应力分析如图 6 所示。经分析压块在与气缸推杆连接的孔位置较其他位置受力大, 为最大受力处, 但最大受力远小于材料屈服力, 压块无结构失效现象, 故压紧装置运行状态正常, 设计合理。

模型名称: 压板
算例名称: 静应力分析1 (-默认-)
图解类型: 网格品质1



a 压板网格

模型名称: 压板
算例名称: 静应力分析1 (-默认-)
图解类型: 静应力分析 节应力 应力1



静应力/(N·m⁻²)

6.495E+07
5.845E+07
5.196E+07
4.546E+07
3.897E+07
3.247E+07
2.598E+07
1.948E+07
1.299E+07
6.496E+06
1.548E+03

→ 屈服力: 5.050E+08

b 静应力分析

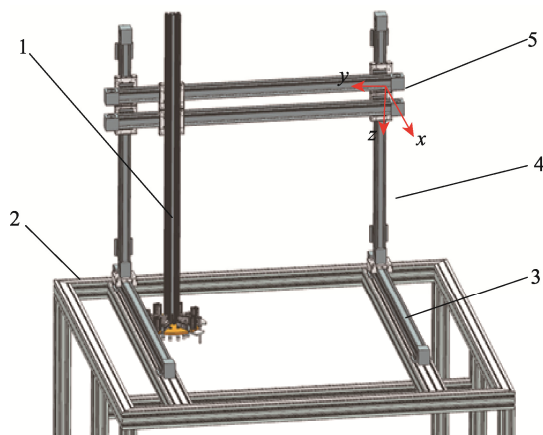
图 6 压板应力分析

Fig.6 Stress analysis of compression plate

2.2 桶盖定位机构

桶盖取运定位机构由同步带直线模组、铝合金支架、机械臂等组成, 见图 7。机械传动方式常用的有丝杆导轨传动、同步带传动、同步带直线模组传动等, 考虑到本装置在能够对物料桶盖进行取、运的同时还要尽可能地简便、易于在不同场合下进行组装。本课题选用了同步带直线模组, 确保装置的反应速度与稳定性, 并且在组装上采用双轨传动。

如图 7 所示, 坐标参考系位于图右上角, 双轨直线模组 1 号通过螺栓连接安装在底部支架上, 此结构可以实现机械臂 x 方向的运动。双轨直线模组 2 号方向垂直于地面并且与直线模组 1 号通过螺栓连接, 此结构可以实现机械臂 z 方向的运动。直线模组 3 号方向平行于地面并且与直线模组 2 号通过螺栓连接, 此结构可以实现机械臂 y 方向的运动。机械臂通过螺栓与直线模组 3 号上的滑块连接完成桶盖抓取、运送、封装等一系列动作。



1.机械臂; 2.支架; 3.1 号双轨直线模组; 4.2 号双轨直线模组; 5.3 号双轨直线模组。

图 7 桶盖取运定位机构装配

Fig.7 Assembly of drum cover pick-up and positioning mechanism

机械进行定位时, 机械臂通过 3 个直线模组步进电机的控制输出可以实现 x 、 y 、 z 3 个方向的运动, 以实现在不同场景下机械臂对桶盖的抓取与运输, 整体布局方式见图 8。

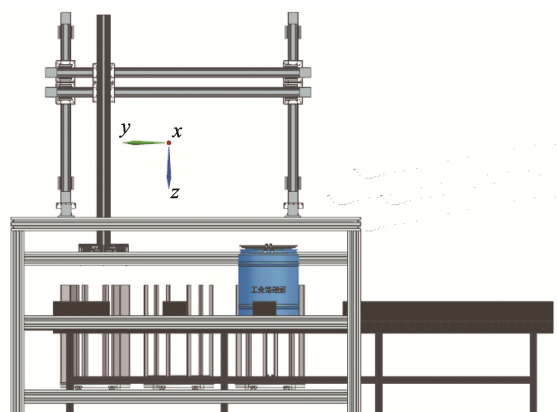


图 8 桶盖定位机构布局方式

Fig.8 Layout of drum cover positioning mechanism

2.3 螺栓封盖机构

常用的开口铁桶的密封方式有鸭舌封盖、螺栓封盖等。本文选用螺栓封盖的方式, 其螺栓连接有着加工、选用简单、连接紧密、价格低廉等优点。螺栓在物料桶上的装配位置如图 9 箭头所指位置。

螺栓封盖机构由螺杆供料器、夹持机构、旋转气缸、螺母供料器、磁耦式气缸、气动风批、螺栓放置平台、磁吸拧紧套筒等组成, 构造见图 10。螺栓放置平台部分固定在底板前方; 拧紧机固定在底板上方, 其拧紧端轴线与螺栓放置托板轴线共线; 螺杆传送机构固定在拧紧机的左段, 由夹持气缸、旋转气缸、磁偶式无杆气缸组成; 气缸之间由金属连接件进行连



图 9 螺栓在物料桶上的装配位置
Fig.9 Fastening position of bolts on the material drum

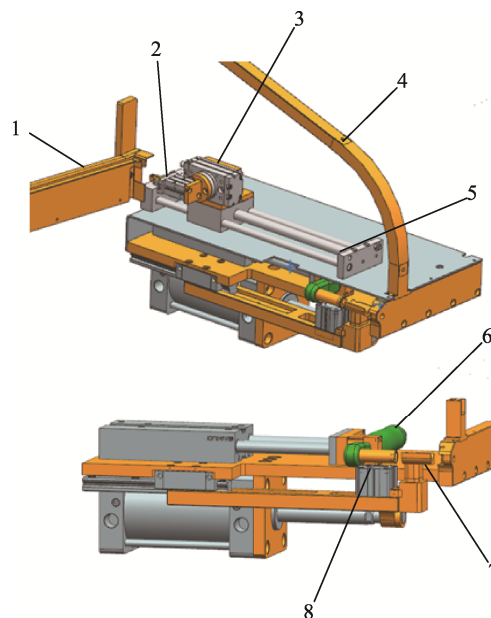
接。螺杆与螺母传送机构位于整体结构的两端进行原料供给。机械工作时各部件位于如图 10 所示的初始位置, 当机械手运盖到位并将箍圈压紧后, 夹持机构进行取料动作, 之后磁偶式无杆气缸运动到指定位置, 旋转气缸旋转 90°将螺栓放入放置平台。拧紧机构通过气缸推进逐渐靠近螺杆, 靠近后磁吸套筒将整个螺帽吸入拧紧机端口内腔, 便于螺杆在拧紧过程中不滑落。至此完成铬酸酐桶的螺栓封盖操作。

此螺栓联接不受工作载荷, 但会受到预紧力 F 的作用。由第四强度理论可得预紧力的计算式见式 (5)。

$$F < \frac{\pi d^2 \sigma}{4} \quad (5)$$

式中: d 为螺栓小径; σ 为螺栓许用应力。

螺栓自动装夹机构由滑动导轨、旋转气缸、手指式气缸、螺杆、螺帽自动供料器组成。滑动导轨控制装夹机构水平运动; 通过旋转气缸和手指式气缸控制螺杆的装夹动作; 螺杆、螺帽自动供料器则通过电机振动及重力效应完成自动供给。



1. 螺杆供料器; 2. 夹持机构; 3. 旋转气缸; 4. 螺母供料器;
5. 磁偶式气缸; 6. 气动风批; 7. 螺栓放置平台;
8. 磁吸拧紧套筒。

图 10 螺栓封装机构

Fig.10 Bolt encapsulation mechanism

封盖机构经过夹持、运送、封装等一系列运动实现机器对物料桶的螺栓封装, 如图 11 所示。

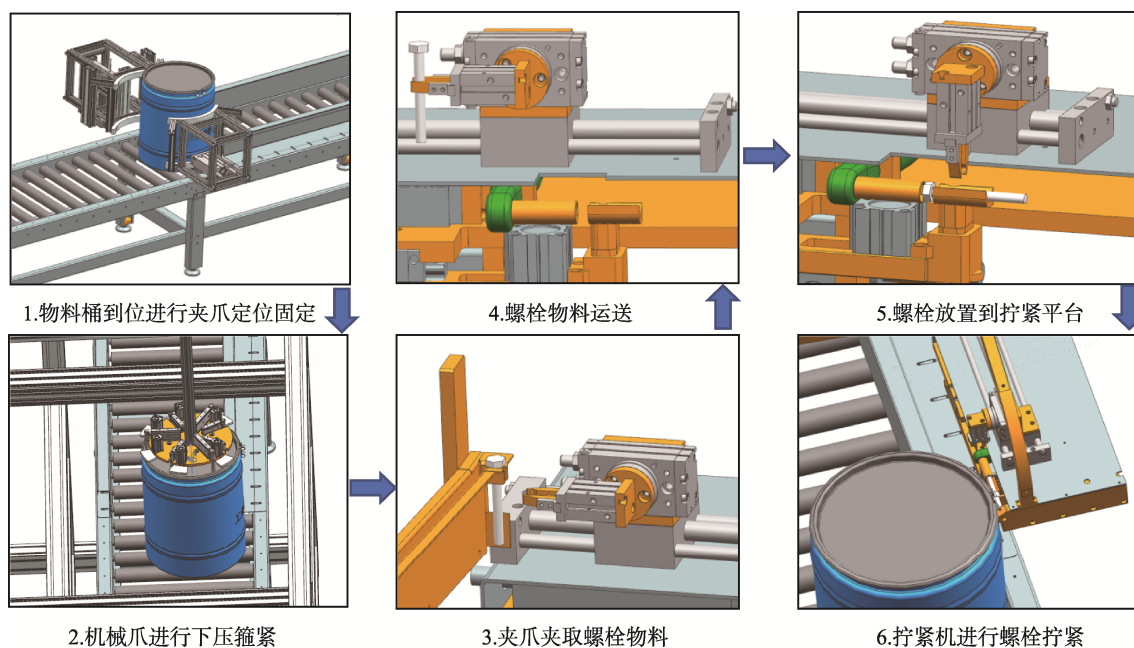
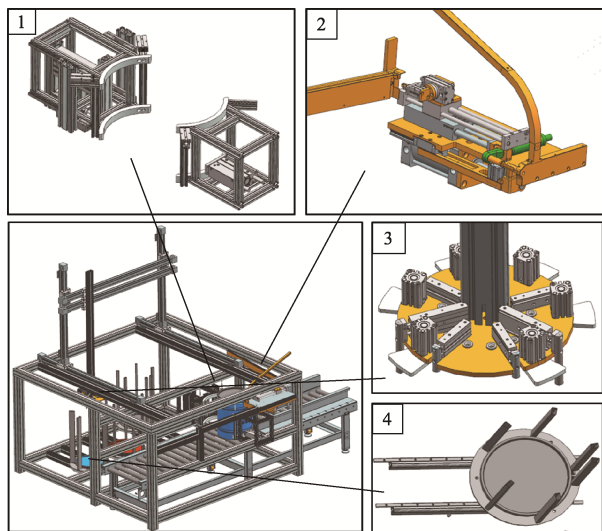


图 11 螺栓封装过程

Fig.11 Bolt encapsulation process

3 虚拟装配及仿真

在自动取盖机构、桶盖定位机构、螺栓封盖机构设计完成以后,对三大机构进行数字化建模,总体装配见图12。通过对自动紧箍封盖机的各个零部件进行虚拟装配,在此基础上对所设计的自动紧箍封盖机设备的组装合理性进行了分析和论证,根据设计的封盖动作流程,对该流程的封装进行运动仿真试验^[13-14]。试验证明,各个部分运行正常,不存在相互干涉的情况,各个部分的连接也很好,能够有效地实现对铬酸酐原料桶的取盖、运输、定位、封装等功能。



1.桶盖定位机构; 2.螺栓封盖机构; 3.固定夹爪机构;
4.自动取盖机构。

图12 自动封装包装机总体装配

Fig.12 Overall assembly of automatic packaging machine

铬酸酐自动紧箍封盖机的运行效率 Q 的校核由运行周期 t_p 确定^[15],运行周期 t_p 需考虑2个部分:一个是基本工艺时间 t_k ,另一个是辅助时间 t_f 。辅助时间 t_f 又可以分为2个部分,分别是空行程时间 t_d ,停顿时间 t_0 ,即:

$$t_p = t_k + t_d + t_0 \quad (6)$$

理论生产率:

$$Q = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_k + t_d + t_0} \quad (7)$$

式中: t_k 由包装过程的相关工艺参数确定; t_d 根据执行机构的运动规律确定,可以通过高速而平稳的运动规律来缩短; t_0 通过工艺合理的运动循环图设计。经计算可知此封盖机效率不小于1.2个/min,符合企业生产要求。

4 结语

针对铬酸酐物料在生产、运输过程中可能出现的

包装破损、环境污染等问题,依据最低环境污染和最可靠性设计理念提出桁架式机械臂物料桶封装的解决方法。针对物料封装制定了集物料封装、运输为一体的铬酸酐物料自动封装工艺和各功能模块机械系统设计,并通过数字模拟仿真验证工艺的合理性,设计了一种铬酸酐自动封装包装工艺方法。该方法的优点主要包括:

1)自动化的程度高。桶身的运送与桶盖的封装过程完全由机器实现,可以实现对50 kg物料桶的自动封盖,只需人工进行桶盖的装填,设备可按照设定的程序进行更改调试。

2)设备的设计可靠、紧凑。在确保运动机构运动空间的前提下,对各机构间的装配位置进行了布局优化,尤其是在考虑误操作的情况下,对因动作顺序颠倒而产生的干涉部分进行优化处理,提高了设备的可靠性。

3)实现高效、精准的控制。采用传感器对桶身、桶盖、桶箍进行了精准定位,有效检测物料桶与机械臂的位置,利用步进电机精确控制直线模组上滑台的运动。

参考文献:

- [1] 余婷,刘轶,李倩,等.某铬酸盐制造企业职工职业健康检查结果分析[J].工业卫生与职业病,2022,48(5):360-363.
YU Ting, LIU Yi, LI Qian, et al. Analysis of Occupational Health Examination Results of Employees in a Chromate Manufacturing Enterprise[J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2022, 48(5): 360-363.
- [2] 贾光,李阳,于善法,等.职业人群铬酸盐危害新证据及其健康监护建议[C]//中国毒理学会,广东省疾病预防控制中心,中国毒理学会第六届全国毒理学会大会论文摘要,2013:1.
JIA Guang, LI Yang, YU Shan-fa, et al. New Evidence of Chromate Hazards in Occupational Population and Suggestions for Health Care[C]// Chinese Society of Toxicology, Guangdong Center for Disease Control and Prevention. Abstract of the 6th National Toxicology Conference of Chinese Society of Toxicology, 2013: 1.
- [3] WAHAM J N. Safety Using yield Method[J]. Machine Design, 1990, 4(3): 16-22.
- [4] ABUZALATA M K. A Practical Applications of Virtual PLC Using Lab VIEW Software[J]. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2013, 5(24): 5677-5682.
- [5] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-13.

- WANG Tian-miao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [6] 卫道柱. 螺纹自动拧紧机的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- WEI Dao-zhu. Development of Automatic Thread Tightening Machine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
- [7] 夏政诚. 大型电动螺栓定扭矩拧紧扳手控制系统的研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- XIA Zheng-cheng. Research on Control System of Large Electric Bolt Fixed Torque Tightening Wrench[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [8] 缪冬梅, 周德鹏. 一种差动式压盖机的设计及应用[J]. 润滑油, 2009, 24(4): 18-21.
- MIAO Dong-mei, ZHOU De-peng. The Design and Application of a Differential Capper[J]. Lubricating Oil, 2009, 24(4): 18-21.
- [9] 王刚, 吴广顺, 张传英. 自动水平拧螺钉机[J]. 机械设计, 1999, 16(11): 26-27.
- WANG Gang, WU Guang-shun, ZHANG Chuan-ying. Automatic Horizontal Screw Screwing Machine[J]. Machine Meter, 1999, 16(11): 26-27.
- [10] 闫金萍. 一种新型转盘式纺丝组件机械手的设计[J]. 机械管理开发, 2023, 38(3): 74-77.
- Yan Jin-ping. Design of a New Rotating Disc Type Spinning Assembly Manipulator[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(3): 74-77.
- [11] 王建国, 任建刚. 基于 Pro/E 的板式过滤机压紧装置横梁臂有限元分析[J]. 煤炭技术, 2016, 35(9): 200-202.
- WANG Jian-guo, REN Jian-gang. Finite Element Analysis of Plate Filter Beam Arm Based on Pro/E[J]. Coal Technology, 2016, 35(9): 200-202.
- [12] 宛加雄. 纸桶包装生产线中自动压底设备的结构与仿真[D]. 襄阳: 湖北文理学院, 2022.
- WAN Jia-xiong. Structure Design and Simulation of Automatic Bottom Pressing Equipment in Paper Drum Packaging Production Line[D]. Xiangyang: Hubei University of Arts and Sciences, 2022.
- [13] 陈斌. 虚拟装配关键技术研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- CHEN Bin. Research and Implementation of Key Technologies of Virtual Assembly[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [14] 程邦. 暂停式特种供送螺杆建模及其奇异演化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- CHENG Bang. Study on Modeling and Singular Evolution of Paused Special Feed Screw[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [15] 杨露霞, 温怀凤, 钱依祎, 等. 基于工业物联网的设备综合效率监测系统的设计[J]. 自动化仪表, 2021, 42(3): 94-97.
- YANG Lu-xia, WEN Huai-feng, QIAN Yi-yi, et al. Design of Equipment Comprehensive Efficiency Monitoring System Based on Industrial Internet of Things[J]. Automation Instrumentation, 2021, 42(3): 94-97.

责任编辑: 曾钰婵