

置模机械手的设计

王宏哲

(广东碧品居建筑工业化有限公司 广东 佛山 528000)

摘要：本文主要针对 PC 预制叠合板生产过程中边模的置放和安装提出了一款置模机械手。该置模机械手采用桁架结构，X 轴、Y 轴、Z 轴采用伺服电机加 V 型导轨的结构形式。MES 系统将订单信息传达给置模机械手，置模机械手 R 轴末端安装的点胶枪按照 MES 系统传递的运动轨迹进行划线，划线完成后，置模机械手通过 R 轴前端安装的夹爪气缸夹取边模，并按照划线的轨迹进行边模的安装，置模精度可达到 $\pm 1\text{mm}$ 。置模机械手主要实现了自动划线，边模的夹取、移动、旋转、定位、摆放等功能。置模机械手能够按照订单自动排模，精准定位，减少人工成本，改善生产环境，实现全自动无人化生产。

关键词：建筑；预制构件；PC；桁架机械手；边模；夹爪气缸；伺服电机

0 引言

近年来，随着我国对建筑工业化的大力倡导和不断推进，在可持续发展战略的大背景下，装配式建筑的发展成必然趋势^[1]。置模机械手在装配式建筑预制构件生产中是不可或缺的设备。置模机械手可有效地提高边模的周转率，减少边模在搬运过程中的损坏。置模机械手由桁架结构加上末端夹爪结构组成，执行末端采用双气动平行抓手，夹持力可以达到 3770N，夹爪的行程为 8mm。传统生产模式由操作人员进行搬运、定位、摆放、安装，工作量和强度极大，辅助时间长，生产效率低，需要 3 人完成一张模台的边模安装。针对以上劣势，本文设计并制作了一款置模机械手，实现了边模的自动安装，有效地解决了上述诸多问题。

1 总体结构

置模机械手的设计主要分为两部分，第一部分是桁架结构，第二部分是机械手。桁架结构主要由立柱和横梁组成。机械手主要由驱动部分、执行机构等组成。置模机械手的整体结构如图 1 所示。

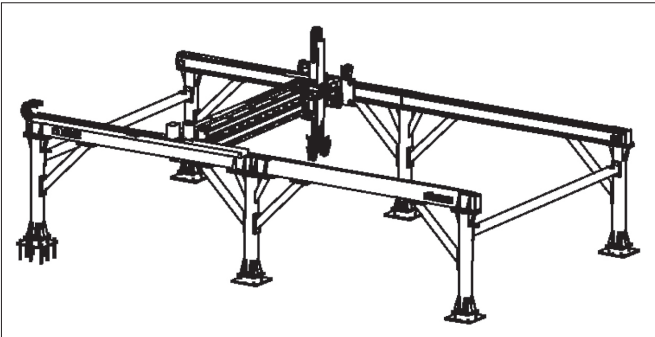


图 1 置模机械手总体结构示意图

1.1 桁架结构

1.1.1 立柱部分

立柱部分主要采用方钢管焊接而成，在整个桁架中起到支撑作用，立柱的数量根据横梁的长度决定，置模机械手采用两侧各三根立柱支撑，可以使桁架整体更加稳固，保证机械手运行的准确性、可靠性。

1.1.2 横梁部分

横梁部分主要采用整根方钢管焊接而成，尽量避免使用两根方钢管拼接或者搭接，横梁与立柱连接处要做到 4 个方向可调，如图 2 所示，方便在安装过程中可以调整水平。置模机械手两个横梁之间的对接采用定位销，如图 3 所示。

1.2 机械手结构

1.2.1 X 轴双梁机构

X 轴采用 V 型导轨与 V 型滚轮结构，驱动部分采

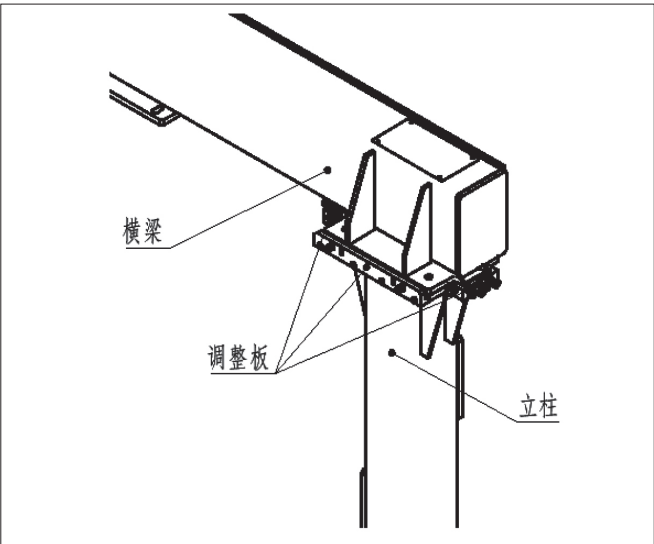


图 2 横梁与立柱连接示意图

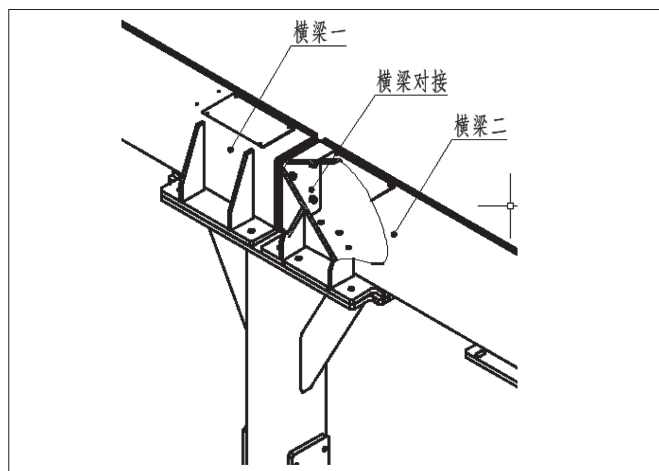


图3 横梁与横梁对接示意图

用伺服电机，传动部分采用齿轮齿条作为直线运动机构。X轴两端带限位防撞机构，机构上带感应器限位及机械限位。

1.2.2 Y轴单梁机构

Y轴采用V型导轨与V型滚轮结构，驱动部分采用伺服电机，传动部分采用齿轮齿条作为直线运动机构。Y轴两端带限位防撞机构，机构上带感应器限位及机械限位。

1.2.3 Z轴升降机构

如图4所示，置模机械手Z轴升降结构采用的是传

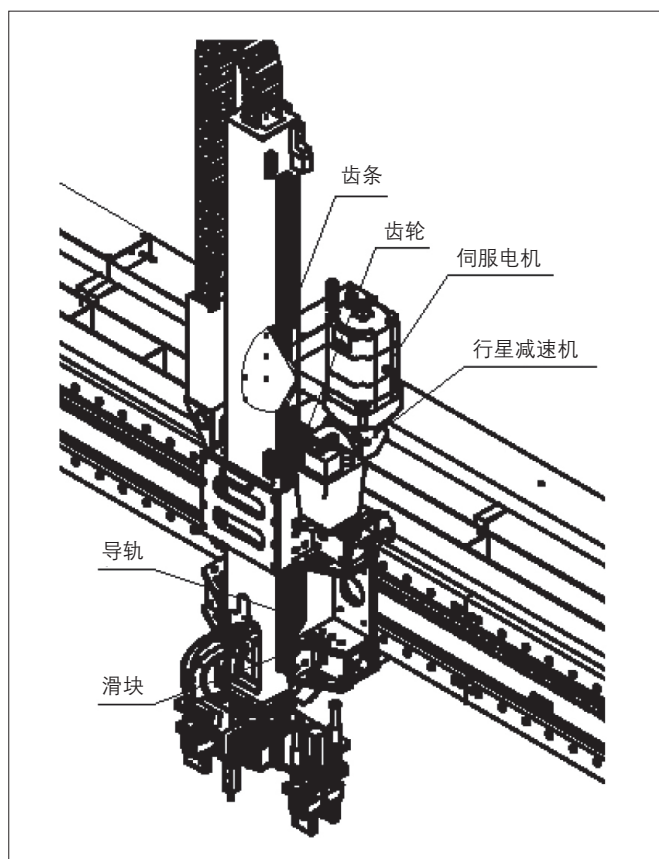


图4 置模机械手Z轴示意图

统的悬挂形式，由伺服电机和行星减速机提供驱动力，采用导轨作为导向，采用齿轮、齿条作为传动。置模机械手Z轴主要完成边模安装时给执行末端提供上升和下降的驱动力。

1.2.3.1 Z轴设计参数分析

升降速度 $v_t=60\text{m/min}$ ，升降距离 $S=1.5\text{m}$ ，加速度 $a=1\text{m/s}^2$ ，斜齿轮齿数 $Z=20$ ，斜齿轮模数 $m=3$ ，斜齿轮分度圆直径 $D=79.58\text{mm}$ 。

根据速度时间图象，如图5所示，运动过程分为均加速阶段、匀速阶段和匀减速阶段，根据各个阶段的运动要求，可以计算出各阶段的运动距离和时间。

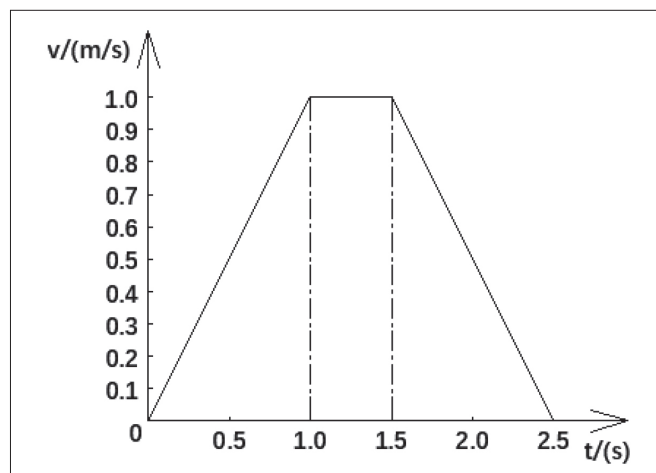


图5 速度时间图象

加速时间 $t_{\text{加速}}$ 的计算：

$$t_{\text{加速}} = \frac{v_t - v_0}{a} = \frac{1-0}{1} = 1(\text{s})^{[3]}$$

加速距离 $S_{\text{加速}}$ 的计算：

$$S_{\text{加速}} = \frac{1}{2} a t_{\text{加速}}^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 1^2 = 0.5(\text{m})$$

在通常的设计计算中，减速时间等同于加速时间，减速距离等同于加速距离。所以可以得出：

$$t_{\text{减速}} = t_{\text{加速}} = 1\text{s}$$

$$S_{\text{减速}} = S_{\text{加速}} = 0.5\text{m}$$

匀速阶段距离 $S_{\text{匀速}}$ ：

$$S_{\text{匀速}} = S - S_{\text{加速}} - S_{\text{减速}} = 1.5 - 0.5 - 0.5 = 0.5(\text{m})$$

匀速阶段时间 $t_{\text{匀速}}$ ：

$$t_{\text{匀速}} = \frac{S_{\text{匀速}}}{v_t} = \frac{0.5}{1} = 0.5(\text{s})$$

通过以上的设计计算，可以清晰地看出各个阶段的运动状态。

1.2.3.2 Z轴减速机选型的计算

根据速度和角速度关系： $V=\omega r$ （ ω 代表角速度， r 为斜齿轮半径），角速度与转速的关系： $\omega=2\pi n$ （ n 代表转速）^[4]，可以计算输出转速 n 的大小：

$$n = \frac{v_t}{2\pi r} = \frac{v_t}{\pi D} = \frac{60 \times 1000}{3.14 \times 79.58} = 240.1 \text{ (r/min)}$$

电机的额定输出转速假定 $n_{\text{电机}}=2000\text{r/min}$ ，可以计算出减速机的减速比 i 的大小：

$$i = \frac{n_{\text{电机}}}{n} = \frac{2000}{240.1} = 8.32$$

1.2.3.3 Z 轴输出转矩计算

Z 轴负载总质量 $m_{\text{总}}=300\text{kg}$ (Z 轴自重 210kg, R 轴质量 50kg, 边模质量 40kg), 机构的总传动效率 $\eta=80\%$ 。

负载稳态拉力 F_a 的计算：

$$F_a = m_{\text{总}} g = 300 \times 9.8 = 2940 \text{ (N)}$$

式中： g —重力加速度，取值 $g=9.8\text{N/kg}$ 。

负载动态拉力 F_b 的计算：

$$F_b = m_{\text{总}} a = 300 \times 1 = 300 \text{ (N)}$$

负载稳态转矩 M_a 的计算：

$$M_a = F_a \times r = F_a \times \frac{D}{2} = 2940 \times \frac{79.58}{2 \times 1000} = 116.98 \text{ (Nm)}$$

负载动态转矩 M_b 的计算：

$$M_b = F_b \times r = F_b \times \frac{D}{2} = 300 \times \frac{79.58}{2 \times 1000} = 11.94 \text{ (Nm)}$$

考虑到悬臂弯矩，本文折算效率约降低 10%，再考虑到减速器和齿轮齿条的效率各为 5%，总体机构的效率 $\eta=80\%$ ，另外 24h 连续运行，为了保持足够的齿轮余量，选择安全系数 $K=1.2$ 。所以总的转矩 $M_{\text{总}}$ 计算是：

$$M_{\text{总}} = K \times \frac{M_a + M_b}{\eta} = 1.2 \times \frac{116.8 + 11.94}{0.8} = 193.38 \text{ (Nm)}$$

1.2.3.4 Z 轴减速机选择

按照设计需求，减速机选择某品牌，型号 160ZDF8-3000 (减速比 $i=8$ ，额定转矩 122.12 Nm，瞬时最大输出转矩 366.36Nm，最大转速 3000r/min)。

瞬时最大输出转矩 $366.36\text{Nm} > 193.38\text{Nm}$ ，满足设计需求。

1.2.3.5 Z 轴电机选择

电机端输出转矩 M_c 的计算：

$$M_c = \frac{M_{\text{总}}}{i} = \frac{193.38}{8} = 24.17 \text{ (Nm)}$$

因为伺服电机和普通电机不一样，过载能力强，但是通常提升场合并不推荐电机过载过多，连续工作或发热状态容易引起失速，且过热时影响伺服电机的寿命。所以本文将过载控制在 150% 以内。

所以电机输出转矩 M_d ：

$$M_d = \frac{M_c}{1.5} = \frac{24.17}{1.5} = 16.11 \text{ (Nm)}$$

电机功率 P ：

$$P = \frac{T \times n}{9550} = \frac{16.11 \times 2000}{9550} = 3.37 \text{ (kW)}$$

式中： T —电机端输出转矩，取 $T=16.11\text{Nm}$ ；

n —电机额定输出转速，取 $n=2000\text{r/min}$ 。

负载端转动惯量 J_a ：

$$J_a = M_{\text{总}} \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 300 \times \left(\frac{79.58}{2 \times 1000}\right)^2 = 0.47 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

折算到电机端转动惯量 J_b ：

$$J_b = \frac{J_a}{i^2} = \frac{0.47}{8^2} = 73.44 \times 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}^{[5]}$$

电机端转动惯量 J_c ：

$$J_c = \frac{J_b}{i_2} = \frac{73.44 \times 10^{-4}}{5} = 14.69 \times 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

式中： i_2 —惯量比，取 $i_2=5$ 。

根据以上计算，电机选择型号：1F6092-1AC61-2LB1 (电机功率 3.5kW，额定转矩 16.7Nm，额定转速 2000r/min，惯量 $69.1 \times 10^{-4}\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。

1.2.4 R 轴旋转机构

如图 6 所示，置模机械手 R 轴主要完成边模的旋转，R 轴可实现 360° 旋转，为了保护线管不受较大弯曲，在实际中 R 轴控制在 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 中旋转。R 轴旋转部位选用 RD 减速机，旋转动力采用伺服电机。

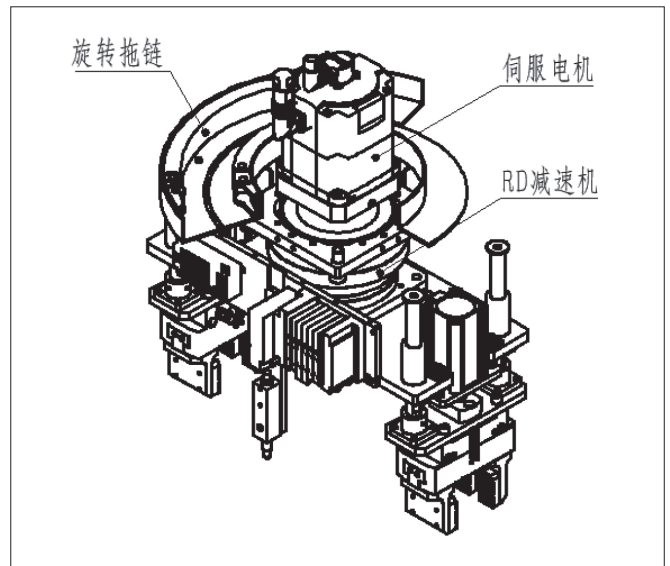


图 6 置模机械手 R 轴示意图

1.2.4.1 R 轴减速机的选型计算

R 轴执行末端质量 $M_a=50\text{kg}$ ，边模最大质量 $M_b=40\text{kg}$ ，R 轴旋转角度 $\theta=90^\circ$ ，加速时间 $t_1=0.5\text{s}$ ，匀速时间 $t_2=1\text{s}$ ，减速时间 $t_3=0.5\text{s}$ ，总用时 $t_{\text{总}}$ ：

$$t_{\text{总}} = t_1 + t_2 + t_3 = 0.5 + 1 + 0.5 = 2 \text{ (s)}$$

减速机角速度 ω ：

$$\omega = \frac{2\pi\theta}{360 \times t_{\text{总}}} = \frac{2 \times 3.14 \times 90}{360 \times 2} = 0.785\text{rad/s}$$

减速机角加速度 a_1 ：

$$a_1 = \frac{\omega}{t_1} = \frac{0.785}{0.5} = 1.57 \text{ (rad/s}^2\text{)}$$

减速机输出转速 n :

$$n = \frac{\omega}{2 \times \pi} \times 60 = \frac{0.785}{2 \times 3.14} \times 60 = 7.5 \text{ (r/min)}$$

减速比 i :

$$i = \frac{n_{\text{电机}}}{n} = \frac{2000}{7.5} = 266.7$$

根据细棒转动惯量公式计算 J :

$$J = \frac{m \times (L^2 + B^2)}{12} = \frac{(M_a + M_b) \times (L^2 + B^2)}{12} = 60.967 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

式中: L — 边模长度, 取 $L=2.85\text{m}$;

B — 边模宽度, 取 $B=0.08\text{m}$ 。

负载转矩 T_a :

$$T_a = J \times a_1 = 60.967 \times 1.57 = 95.718 \text{ (Nm)}$$

减速机初步选型: ZKRD-40E-80-A-B (减速比 105, 0.4kW 时输出转矩 572Nm, 0.65kW 时输出转矩 465Nm)。

1.2.4.2 R 轴伺服电机的选择计算

根据减速机初步选型选取减速比 $i=105$, 负载转矩 95.718Nm。折算到电机轴上的惯量 J_a :

$$J_a = \frac{J}{i^2} = \frac{60.967}{105^2} = 0.00553 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

电机端选择惯量 J_c 计算:

$$J_c = \frac{J_a}{i_a} = \frac{0.00553}{5} = 11.06 \times 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

式中: i_a — 惯量比, 取 $i_a=5$ 。

电机轴上的转矩 T_b :

$$T_b = \frac{K \times T_a}{i \times \eta} = \frac{1.5 \times 95.718}{105 \times 0.7} = 1.953 \text{ (Nm)}$$

式中: η — 传动效率, 取 $\eta=0.7$;

K — 安全系数, 取 $K=1.5$ 。

选择西门子伺服电机: 型号 1FL6064-1AC61-2LA1^[6], 额定转矩 7.16Nm, 额定转速 3000r/min, 电机惯量 $15.3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 电机功率 1.5kW。

1.2.5 执行末端夹爪机构

如图 7 所示, 置模机械手执行末端夹持机构由两个气动夹爪组成, 双夹持位可以更加稳固地抓取边模, 保证置模的精度。

1.2.5.1 气动平行抓手夹持力矩计算

夹持力矩大小主要考虑构件生产中最长的边模质量, 按照最长尺寸边模 $L=2850\text{mm}$ 计算。最长的边模总质量 $M=40\text{kg}$, 重力加速度 $g=9.8\text{N/kg}$ 。计算边模所受重力是:

$$G = M_g = 40 \times 9.8 = 392 \text{ (N)}$$

根据夹爪的使用情况分析, 边模与夹爪之间存在静

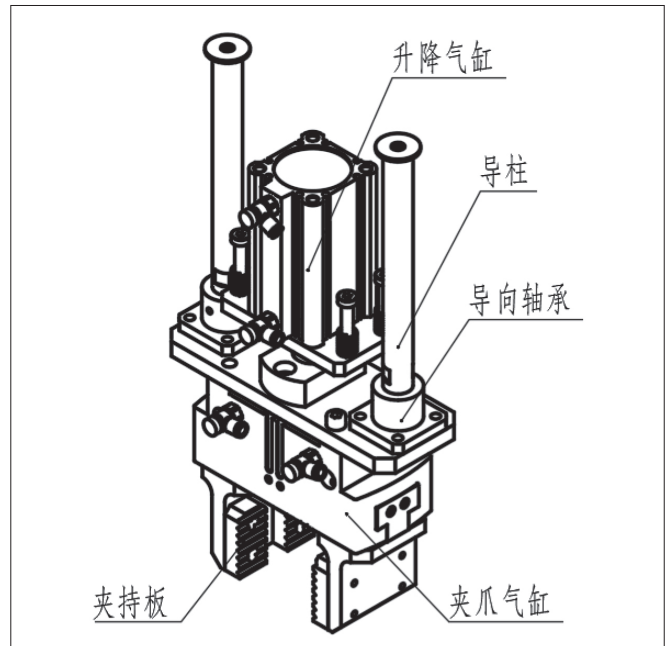


图 7 置模机械手抓手示意图

摩擦力 f , 由共点力平衡条件 $2f=G$, 根据 $f=\mu N$ 可以计算出启动抓手的夹持力矩 N :

$$N = \frac{f}{\mu} = \frac{G}{2 \times \mu} = 245 \text{ (N)}$$

式中: μ — 边模与夹爪之间的摩擦系数, 取 $\mu=0.8$;^[7]

f — 边模与夹爪之间静摩擦力。

考虑到设备 24h 连续运行, 为了保持足够夹持力, 选择安全系数 $K=3$ 。所以总的夹持力矩 $N_{\text{总}}$:

$$N_{\text{总}} = K \times N = 735 \text{ (N)}$$

所以气动抓手的夹持力矩 $N_{\text{总}} \geq 735\text{N}$ 就能满足要求。

1.2.5.2 气动抓手的选择

根据气动抓手的结构判断, 抓手在夹紧边模时是通过两个活塞动作, 每一个活塞由一个双曲柄与气动夹爪相连, 行成一个特殊的驱动单元, 实现气动夹爪的轴向对心运动, 每个夹爪是不能单独移动的。气动夹爪在夹紧时使用的气缸的推力。根据气缸输出的夹紧力 (气缸推力) 公式:

$$F = P \times \left(\pi \times \frac{D^2}{4} \right) \times \eta^{[8]}$$

式中: F — 理论气缸输出夹紧力 (N), 取 $F=735\text{N}$;

P — 空气压力 (N/cm²), 取 $P=0.5$;

η — 气缸的传递效率, 取 $\eta=0.85$ ^[9]。

计算得出气缸直径 $D \approx 46.936\text{mm}$, 考虑到工厂提供的压缩空气压力不稳定或因为边模自身的变形等因素影响, 因此气动抓手需要更大的夹紧力。为了设备的稳定运行, 选择直径为 63mm 的气缸。

当缸径选取 63mm, 夹爪的抓取力 $F_{\text{出}}=1324\text{N}$ 大于实际需要夹紧力 $F=735\text{N}$ 。

根据 FESTO 平行夹爪样本手册选择型号: HGPT-63-A-B-F。

2 结语

置模机械手通过桁架与执行末端的结构组合,在 PC 预制构件生产领域实现了预制构件在生产时按照订单自动划线、自动排模、边模自动安装的功能。置模精度达到 $\pm 1\text{mm}$, 满足生产出来的成品构件的质量要求。置模机械手的运行速度快,边模安装时间短,有效地减少了操作者的辅助安装时间,提高了生产效率,减少了操作者的劳动强度。同时在以后的生产中,不断地进行设备的优化,肯定能成为预制构件生产中最实用、最可靠、最有价值的设备。

参考文献:

- [1] 费俊杰. 装配式建筑 PC 构件配送车辆调度优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [2] 王雪, 刘大敏. 机床机械桁架机械手的设计与结构

分析[J]. 中国新技术新产品, 2017(07): 33-34.

[3] 胡宪委. 桁架机械手伺服电机选型[J]. 自动化应用, 2018(02): 135-136.

[4] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[5] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 第 5 卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[6] SIMOTION、SINAMICS S120 和 SIMOTICS 生产机械设备[Z].

[7] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

[8] 徐灏. 新编机械设计师手册: 下册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

[9] 徐炳辉. 气动手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.

作者简介: 王宏哲(1989.04-), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑机器人。

严正声明

近期, 本刊编辑部收到作者反映, 一些不法分子盗用我刊名义, 自建非法网站或钓鱼网页 (<http://www.zgixzz.cn>、<http://mach-china.toug.com.cn> 等), 或以《中国机械》杂志社编辑部“编辑”“责任编辑”等名义, 向广大作者征收稿件, 并收取所谓的“版面费”、“审稿费”等, 严重侵犯、影响了我刊声誉和广大作者的权益。在此, 我刊严正声明如下:

1. 《中国机械》杂志社于 1982 年创刊, 是国家新闻出版署批准登记的国家级机械工程类学术期刊(旬刊), 目前尚未创建独立的“官方网站”, 浏览本刊电子版需从中国工业新闻网 (<http://www.cinn.cn>) 下方链接进入, 链接地址 http://www.cinn.cn/zgixzz/index_348.shtml, 或通过万方数据知识服务平台 (<https://www.wanfangdata.com.cn/>) 的官方网页搜索本刊进行查询, 链接地址 <https://sns.wanfangdata.com.cn/perio/zgix> 查询全文;

2. 《中国机械》杂志为旬刊, 请广大作者认准, 凡标记“半月刊”“月刊”的网络征稿平台, 均为非法网站, 欢迎联系本刊编辑部进行举报;

3. 《中国机械》杂志社唯一投稿邮箱: jxzzs@cinn.cn;

4. 《中国机械》杂志社《录用通知书》加盖“中国机械编辑部”公章, 凡加盖“《中国机械》杂志社编辑部”或使用已作废公章(防伪码为 1101081749266 的总编室公章、防伪码为 1101081491290 的原编辑部公章), 均为假冒录用通知书;

5. 《中国机械》杂志社从未委托任何机构、网站或个人代理本刊的组稿、审稿等相关事宜, 编辑部一直严格遵守“三审三校”规定, 追求杂志整体质量的提升, 将期刊的社会效益放在首位, 对于盗用《中国机械》杂志社名义发布虚假信息、实施非法征稿等行为, 本刊将依法追究其法律责任;

6. 本刊编辑部唯一联系电话: 010-67410664。

敬请广大作者和读者注意辨别, 提高警惕, 谨防上当!

《中国机械》杂志社
2022 年 10 月