• 装备技术 Equipment Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.013

工业机器人末端智能浇注臂结构研究

张新建[1],杨卫红[1],何俊伟[1],毕 艳[1],林曦晨[1],鲁艳茗[1],杨家军[1,2]
(1. 文华学院 机械与电气工程学部,湖北 武汉 430074;2. 华中科技大学 机械工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:传统连续浇注机的浇注臂采用垂直向下舀取铝液的方式,无法有效探测铝液高度,导致舀取铝液的量不均匀,甚至无法舀取铝液,或舀取到铝液表面氧化层,这将导致铝铸品的品质严重下降,工作效率低。在理论计算的基础上,设计了基于工业机器人末端操作浇注臂结构。结果表明,工业机器人臂带动浇包浇注,可以实现多角度、大范围任意动作的设置,灵活度高,适应性强。链条的闭合用花篮螺丝连接,拉紧方便可靠,能满足回转精度要求。

关键词:浇注臂;压铸机;末端操作器

中图分类号:TG233 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)03-0257-06

Study on Structure of End Intelligent Pouring Arm of Industrial Robot

ZHANG Xinjian[1], YANG Weihong[1], HE Junwei[1], BI Yan[1], LIN Xichen[1], LU Yanming[1], YANG Jiajun[1,2]
(1. Mechanical and Electrical Engineering Department, Wenhua College, Wuhan 430074, China; 2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The casting pouring arm of the traditional continuous pouring machine adopted the method of vertical downward scooping molten aluminum, which was unable to effectively detect the height of molten aluminum, resulting in uneven scooping of aluminum liquid, or even scooping of molten aluminum, or scooping to the surface oxide layer of aluminum liquid, which would lead to a serious decline in the quality of aluminum casting and low working efficiency. On the basis of theoretical calculation, a casting arm structure based on end operation of industrial robot was designed. The results show that the industrial robot arm drives the casting ladle, which can realize the setting of multi-angle and large range of arbitrary actions with high flexibility and strong adaptability. The closure of the chain is connected with the basket screw, the tension is convenient and reliable, and it can meet the requirements of turning accuracy.

Key words: casting pouring arm; die casting machine; end-effector

1 引言

1.1 国内压铸基本情况

国内汽车铝制产品如铝合金缸盖罩、油底壳、机油泵等普遍采用铸造业中较先进的有色合金精密成型技术——压铸工艺来生产毛坯。压铸周边自动化设备有辅助三手:取件机械手、给汤机械手、喷雾机械手。给汤机械手主要与压铸周边设备配套,目的是让“机器换人”成为企业发展中的新常态,替代人工给汤过程,减少给汤过程中对人工的危害,并且为现场生产管理带来便捷。因此,开展基于工业机器人末端操作器浇注臂(给汤)结构设计及相关分析具有重要的研究意义[1]。

作为压铸工艺中主要生产设备的压铸机,结构上压室与保温炉是分体的,其工作原理是:通过汤勺给汤的方式将熔化的金属液定量倒入压射室(入料筒),然后用注射活塞(冲锤头)将金属液体高速推入模具中,在保持一定压力情况下冷却凝固而得到成品,如图1所示。这样生产的成品尺寸精度高,内外表面光洁度较好,加工余量较小,比较经济。因此,压铸机在铸造行业广泛应用。

但在传统的压铸工艺中浇注即送汤工序是人工完成,属于重体力高风险(易烫伤)的工种,导致人力大量耗损,人工成本极高,所以进行机器换人的智能化车间改造,用自动化的机械手臂取代危险人工操作成为潮流[2-4]。

1.2 工业机器人末端操作器浇注臂特性与环境

(1)给汤机械手特性 给汤机械手将已经熔化的金属液通过浇注臂汤勺从保温炉中舀起,转运

收稿日期:2019-11-05
基金项目:国家重大科技专项项目(2013ZX04008-031)资助
作者简介:张新建(1980-),河南正阳人,副教授.研究方向:电力电子、自动控制、工业机器人等.E-mail:zxjchn@126.com
通讯作者:杨卫红(1974-),女,天津蓟州人,工学博士,讲师.研究方向:激光技术、智能制造、金属材料学等.电话:13367241786,E-mail:rose7636@163.com

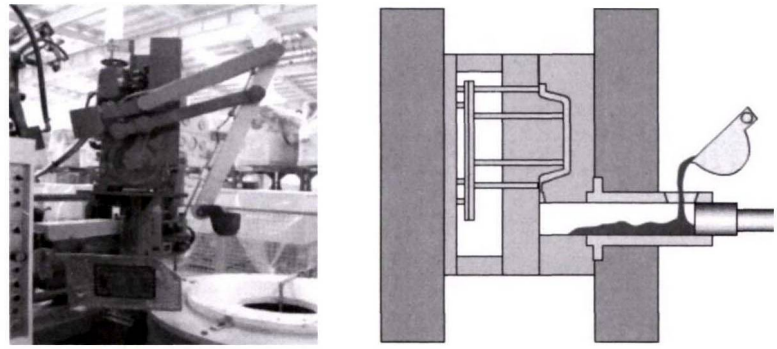


图 1 浇注臂 3D 效果图与动作示意图
Fig.1 3D schematic diagram of casting pouring arm

至压铸机入料口，由工业机器人第七轴驱动控制浇注臂汤勺旋转，将金属液倾倒入模具成型腔料筒内。相关特性设计要求：操作方便，工业机器人精准控制，金属液的汤量稳定精准；注汤位置，停止精度高；且注汤动作快；通过工业机器人多轴联动控制实现金属液的快速平稳运输；且浇铸时的速度可随汤量进行变化，注汤效率高。

(2)给汤机械手动作流程　将手动-自动切换开关打到手动位置。见图 2 动作流程；①手臂手动动作：在注汤工位中，浇注臂汤勺的勺口呈水平状，往前进方向压出，手臂前进至注汤位置停止。通过工业机器人手臂移至汤面检出的位置，假设检出棒断线或者检出时，那么浇注臂汤勺的勺口前进或者后退都会被停止；②手动注汤：浇注臂汤勺注汤时，浇注臂汤勺的勺口方向向下压时，勺口倾斜到汤液流出的角度后先缓后快加大角度，将汤液倒入料口；③手动取汤：取汤时浇注臂汤勺的勺口方向向下压时，浇注臂汤勺倾斜到需要角度，进入汤锅斜舀汤。将浇注臂汤勺水平后，低速，退回至汤面检出位置。

过去传统的重力浇注机中通常采用人工将熔化的铝液倒入模具中，待冷却后形成特定的形状，效率极低，已被连续浇注取代。在连续铸造工艺中采用浇注臂从坩埚中舀取铝液，倒入模具中。传统的连续浇注机的浇注臂在垂直向下舀取铝液的过程中无法有效探测铝液的高度，从而存在舀取铝液的量不均匀，甚至是无法舀取铝液。同时，由于铝液的温度非常高，从而导致在铝液的表面漂浮一层氧化层。氧化层如果被倒入模具中，会导致铝铸品的品质严重下降，导致铝铸品的力学性能大大下降。有鉴于此，有必要对现有技术中的应用于连续浇注机的浇注臂予以改进，以解决上述问题。

铸造给汤机械手包括浇包和驱动结构以及固定架，给汤杯下端设有用于熔液进出的通孔，给汤杯中设有与通孔相适配的堵塞杆，堵塞杆通过连杆与用于驱动堵塞杆相对通孔运动的驱动结构相连，驱动结构设在固定架上，固定架与给汤杯之间通过套筒相连，连杆设在套筒中。该机械手通过浇注臂取液，浇注臂可深入到氧化层下方的熔液中进行取液，取出的浇注铝液纯度高；并且浇注臂转移过程中为密闭状态，不会有高温熔液洒出，避免安全事故发生，工作稳定可靠。

依据工业机器人浇注覆盖区域进行平面布置，见图 3 工业机器人浇注平面布置图。根据保温坩埚炉剖视图见图 4，针对工业机器人末端与舀汤机构联接，结合沉入保温坩埚炉的深度实际需要，进一步设计生成的智能浇注臂，见图 5 浇注臂 3D 效果图。

2 参数理论计算过程

2.1 初始参数

设计链传动时，已知链传动处于高温作业工作条件(铝液融化温度一般 680~760 ℃，压铸浇注温度一般控制在 610~700 ℃)，汤勺 30 kg，铝液 18 kg，传动位置与总体尺寸限制在，所需传递的功率 P，主动链轮转速 n_1，从动链轮转速 n_2 或传动比 i，考虑到实际使用要求，链传动功能替代旋转标准件，做远程旋

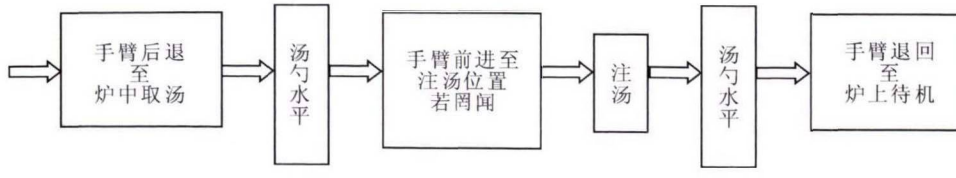


图 2 给汤机械手动作流程
Fig.2 Flow chart of soup manipulator action

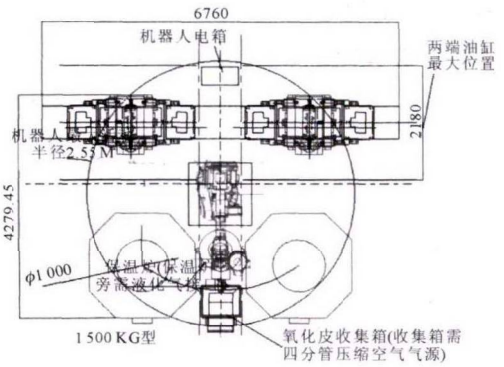


图 3 工业机器人浇注平面布置图

Fig.3 Layout chart of industrial robot casting

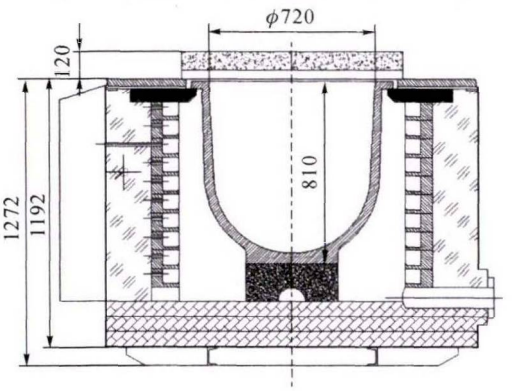
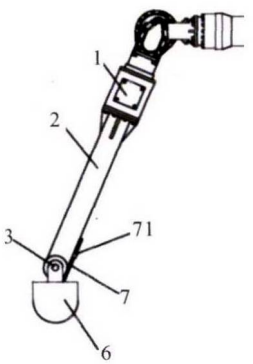


图 4 保温坩埚炉剖视图

Fig.4 Section view of aluminum insulated crucible furnace



1- 电机防尘板；2- 浇注臂本体；3- 舀汤转轴；4- 舀汤包
5- 从动齿轮高温挡板

图 5 浇注臂 3D 效果图

Fig.5 Casting cast arm 3D renderings

转功能应用。传动比采用 $n_1:n_2=1:1$，见时序节拍表 1：

链传动机构由链条和主、从动链轮组成。链条由刚性链节组成，采用应用最广的套筒滚子链。通过具有特定齿形的链轮齿和链的链节啮合来传递运动和动力。如图 6 所示[5]。

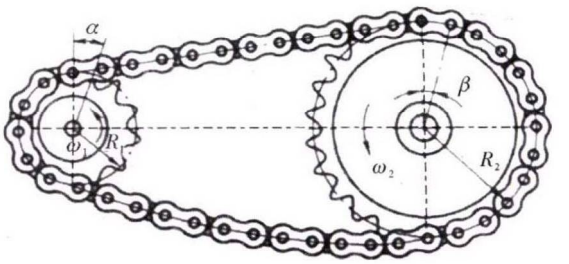


图 6 链传动机构示意图

Fig.6 Schematic diagram of chain drive mechanism

平均传动比为定值：

$$i_{12}=\frac{n_1}{n_2}=\frac{z_2}{z_1} \tag{1}$$

瞬时传动比呈周期性变化：

$$i_{12}=\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{R_2\cos\beta}{R_1\cos\alpha} \tag{2}$$

α、β 角随链节啮合位置变化。

2.2 计算

适用于低速、重载，恶劣的工作环境(如高温、多尘、腐蚀性场合)。而本文的方案运用于旋转重物。

(1)线速度 ν

根据时序表计算取液、浇灌线速度 ν_1、ν_2，得出：

$$\nu_1=R\times\omega_1=R\times\omega_1 d\times\pi/180$$
$$T_1=2\times\pi/\omega_1=360/\omega_1 d=2\times\pi\times R/\nu$$
$$\nu_2=R\times\omega_2=R\times\omega_2 d\times\pi/180 \tag{3}$$
$$T_2=2\times\pi/\omega_2=360/\omega_2 d=2\times\pi\times R/\nu$$

式中，ν 线速度为(米 /s)；ω 角速度为(弧度 /s)=wd(度 /s)；T 周期(s)；R 回转半径(m)。

舀汤注模温度的控制决定浇注臂浇注速度，也就是链条传动速度，链条传动速度为 18 m/min，电机采用减速机电机，主、从链轮为 14 齿，减速比

表 1 初定动作时序节拍表

Tab.1 Initial action timing table

序	工序	时间节拍	总计
1	移至锅炉		3
2	沉炉		11
3	取液		9
4	提取		11
5	位移		19
6	浇灌		18
7	覆灰		14
8	复位		18
			103
		合计时间(min)	1.72

i=1∶1 初选链轮分度圆直径为 85 mm，旋转轴直径 20 mm：

链轮转速为：

$$w_1=\frac{v_1}{r},\ n_1=\frac{w_1}{2\pi} \tag{4}$$

$$w_2=\frac{v_2}{r},\ n_2=\frac{w_2}{2\pi}$$

$$G_1=m_1g \tag{5}$$

选用 12B 精密滚子链作为提升机构。12B 精密滚子链：节距 p=19.05 mm、滚子直径 d_1=12.07 mm、内节内宽 b_1=11.68 mm、销轴直径 d_2=5.72 mm、链板高度 H_2=16.00 mm，重 q=1.15 kg/m。通过 Solidworks 三维软件模拟确定以 650 mm 中心距进行链条传动。链条总长 1 645 mm。

$$G_2=m_2g \tag{6}$$

采用深沟球轴承进行支撑传动轴，摩擦系统为 η，所以链传动旋转时需要克服的摩擦力为：

$$F_r=mg\eta \tag{7}$$

启动所需的拉力：

$$F=G_1+G_2+F_r \tag{8}$$

扭矩：

$$M=F\times r \tag{9}$$

(2)减速机的选型

速比的确定，由初选电机的额定转速为 n_d，得出

$$i_1=\frac{n_d}{n_1},\ i_2=\frac{n_d}{n_2} \tag{10}$$

依选型手册中选定初选减速机的速比 i，减速器的输出扭矩为 T

(3)电机的选型

电机减速机直驱链轮，链轮与链条传动，初定效率为 η

求得扭矩：

$$T_d=\frac{M}{i\eta} \tag{11}$$

初选 ABB 伺服电机，1 650 r/min，额定扭矩为 19 N·m，功率 2.7 kW，转子转动惯量 2.71×10^{-4} kg·m^2，带刹车功能，APEX 减速器速比为 50，额定扭矩为 650 N·m[6]。

(4)惯量匹配

负载的转运惯量为：

$$I=\sum_i m_i r_i^2\ (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{12}$$

$$J_e=mr^2$$

转换到电机轴转动惯量、惯量比：

$$J=\frac{J_e}{i^2}\quad \lambda=\frac{J_1}{J_d} \tag{13}$$

实际应用中负载惯量应限制在 2.5 倍的电机惯量内，而通过加大电机轴长可增加惯量，加大电机大小可增大力矩。

(5)电机

考虑到现场高温因素，将效率 η 计入

$$P=\frac{M\times n}{9\ 550\eta} \tag{14}$$

电机选用 2.7 kW。减速机扭矩 M：ABB 伺服电机 MU30，具体技术参数见表 2、表 3、图 7[7]：

表 2 ABB 伺服电机 MU30 参数表
Tab.2 ABB servo motor MU30 parameters list

额定转速	3 300 r/min(345,57 rad/s)
最大扭矩	30 N·m
最大电流	72.5 Arms
扭矩电流	16.1 Arms
扭矩	0.69 Nm/arms
电压	0.398
R 相位	0.058 ohm
L 相位	1.28 mH
刹车扭矩	0.002 13 kg·m^2
极对数	3
电机重量	23.5 kg
适用范围	+5°~+45 ℃
输出范围	2.7 kW
防护等级	IP 67

表 3 ABB 伺服电机 MU30 制动
Tab.3 ABB servo motor MU30 brake

最小扭矩	21 N·m
最大扭矩	33.6 N·m
电压	24±10% VDC
20 ℃时的功耗	28 W

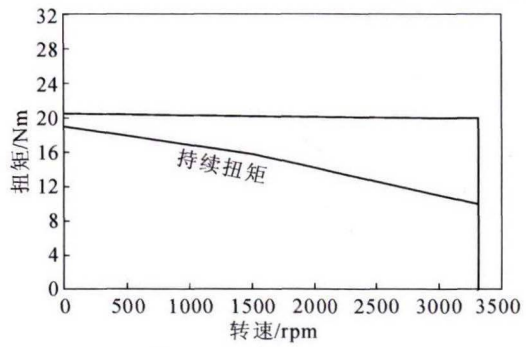


图 7 MU30 T 扭矩曲线
Fig.7 Torque curve of MU30 T

3 浇注臂(给汤)三维设计

3.1 浇注臂设计

浇注臂(给汤)3D 效果，如图 8 所示(剖视图如图 9)。自动浇注臂(给汤)，包括驱动装置、连接臂、拾取部以及探针装置，连接臂内置有驱动拾取部实现 90

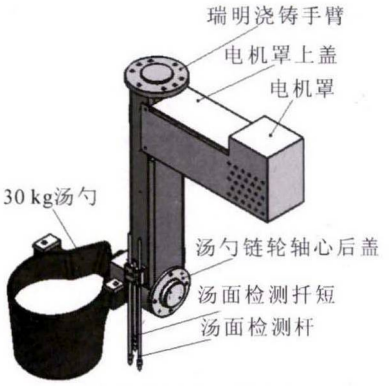


图 8 浇注臂 3D 效果图
Fig.8 Casting cast arm 3D renderings

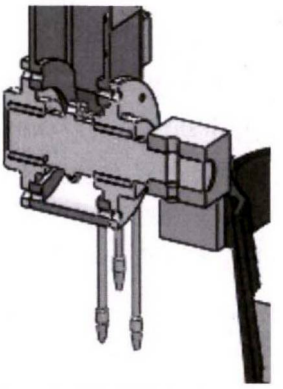


图 9 从动轴联接组件剖视图
Fig.9 Sectional view of the driven shaft coupling assembly

度翻转的链条，拾取部包括：呈敞口的壳体，壳体的边缘形成浇注引流口，并在对向浇注引流口的另一侧形成弧形凸起部；探针装置由 3 个液位探测器组成，并通过至少一个夹持块与连接臂固定连接；驱动装置包括通过第一转轴依次轴向装配的伺服电机、减速器、主动链轮及第一飞轮；拾取部通过第二转轴依次轴向装配从动链轮及第二飞轮；主动链轮及从动链轮与链条连接。实现了对铝液高度的精确探测及定位，提高拾取部舀取铝液量的精确度，实现了对在舀取铝液的过程中去除漂浮在铝液表面的氧化层的较好效果。

浇注手臂内部的两个轴承分别位于手臂下部的两端部且与弹性档圈抵接，这样有效降低臂体的负担，让工作更加稳定。

3.2 浇注臂(给汤)有限元分析

在有限元分析中，首先定义各个部件的材料参数和单元类型，浇注手臂和汤勺固定块材料均为碳钢，其密度为 7 800 kg/m^3，屈服强度为 500 MPa；为了近似模拟浇注臂和舀汤的实际情况，选择 Solid 185 单元模拟实体。图 10 的受热温度与受力分析，对浇注臂施加约束条件和载荷，检查后进行求解。图 11 为浇注臂汤勺热载荷分析。

ANSYS 软件具有强大的求解功能，由于网格划

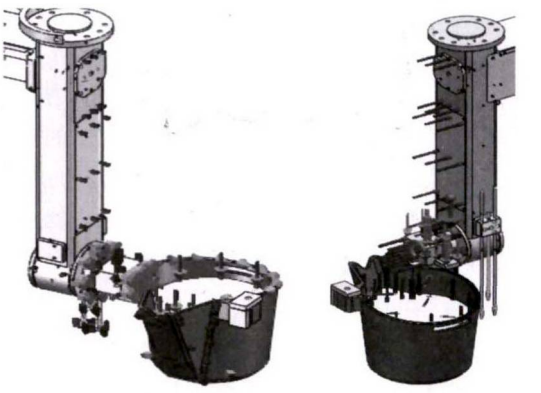


图 10 浇注臂热载荷分析
Fig.10 Casting arm thermal load analysis

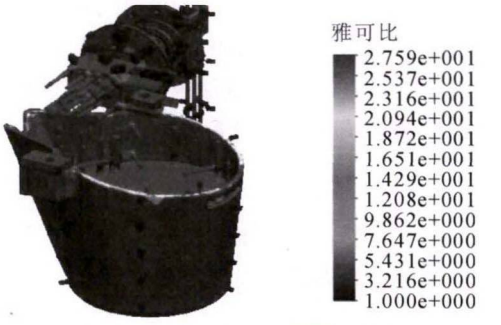


图 11 浇注臂汤勺热载荷分析
Fig.11 Casting arm thermal soup load analysis

分能力较弱，由于浇注臂(给汤)的结构复杂，ANSYS 对其网格划分难以控制，精度不足，因此，采用 HyperMesh 进行网格划分，生成网格品质图解，网格划分结果如图 12 所示。在 HyperMesh 中设置边界条件、接触模型和受力情况，生成 cdb 模型后，导入 ANSYS 进行分析求解。ANSYS 求解的结果如表 4

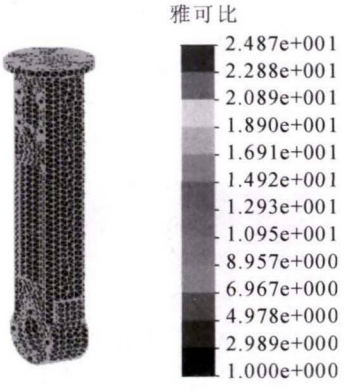


图 12 浇注臂热载荷分析
Fig.12 Casting arm thermal load analysis

表4 有限元分析结果
Tab.4 The results of finite element analysis

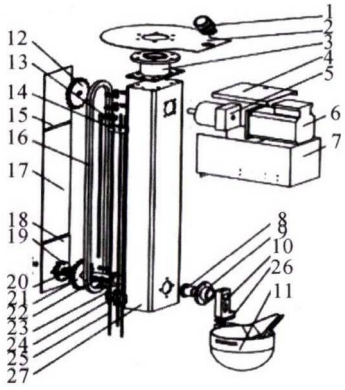
计算变量	计算结果
活塞最大等效应力 /MPa	453
活塞最大变形量 /mm	0.274
液压缸最大等效应力 /MPa	303
液压缸最大变形量 /mm	0.311
最大接触应力 /MPa	141

所示。

根据表 4 的结果，撑靴液压缸在 TBM 正常工作的情况下，缸体和活塞缸的最大等效应力均未超过 45 钢的屈服应力，可以保证撑靴液压缸的正常工作。但是，液压缸的 O 形圈出现了断裂的情况，因此，需要单独分析 O 形圈局部受力情况。

3.3 浇注臂(给汤)装配爆炸图与实物

浇注臂(给汤)装配爆炸图，见图 13 与图 14 所示分别为浇注臂 3D 图及浇注臂实物图。设计第七轴驱动结构时，考虑到高温恶劣环境下使用。通过伺服电机通过链条传动机构，远距离驱动回转轴方式，工业机器人通过将第七轴延伸臂转运移至坩埚炉内金属液正上方，启动伺服电机进行动力驱动，通过回转轴角度转动，达到浇注臂汤勺的勺口与浇注臂之间产生需要角度，通过控制角度在 120~150°之间，缓慢降低高度，浇注臂汤勺浸入汤液中，通过热传导感应探针浸入金属液后，反馈信号，工业机器人浇注臂收到信号，停止动作，同时启动浇注臂伺服电机反向驱动，工业机器人缓慢提升的同时，浇注臂汤勺旋转至水平，即完成舀取金属液动作，最后工业机器人将浇注臂汤勺移动至模具料筒的位置处完成浇注。



1- 感应器；2- 末端感应器安装板；3- 法兰连接块；4- 伺服电机盖板
5- 减速机；6- 伺服电机；7- 电机防护板；8- 套轴；9- 齿轮转轴
10- 汤连接板块；11- 舀汤浇包；12- 主动链轮；13- 短热导上固定块
14- 长热导上固定块；15- 上链轮挡板；16- 链条；17- 浇臂本体改盖
18- 下链轮挡板；19- 下链轮固定压块；20- 下转轴；21- 下链轮
22- 过渡轴；23- 短热导下固定块；24- 长热导下压板；25- 长热导
26- 浇包固定板块；27- 浇注臂本体

图 13 浇注臂爆炸图
Fig.13 Exploded view

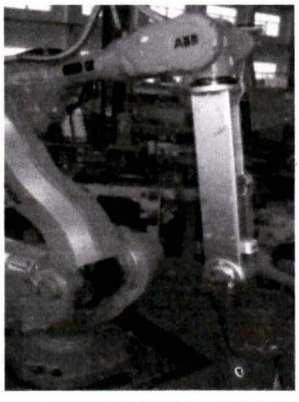


图 14 浇注臂实物图
Fig.14 Natural pattern view

4 结论

浇注臂汤勺的舀取动作通过汤勺回转轴进行回转，当汤勺回转轴处于水平位置时，舀取效率最高。工业机器人第七轴即浇注臂的设计，在缓慢下降的过程中，一般保持垂直状态，当汤勺回转轴与伺服电机的驱动轴处于平行设置，有利于简化传动机构。当减速器的输出轴与主动链轮为一体时，汤勺回转轴专设从动链轮，通过链条将主动轮与从动轮连接，达到伺服电机驱动链条，底部汤勺回转轴同步旋转角度的功能。通过减速机与汤勺回转轴之间的传动，使传动比准确，稳定可靠，工作效率高，并且能够在高温、恶劣环境下工作。伺服电机与浇注臂汤勺分别位于延伸臂的两侧设置。伺服电机与浇包为位于工业机器人第七轴的两侧布置，保证浇注臂汤勺的正上方没有遮挡物，同时规避了本设计浇注时与模具设备产生干涉的问题。通过工业机器人第七轴驱动浇注臂汤勺浇注，实现多角度，大范围任意动作的设置，达到灵活度高，适应性强的特点；而且链条的闭合进行高温热隔设计，确保链条的拉紧受力不变形，且螺丝端盖，维护方便可靠，能满足回转精度要求。

参考文献：

[1] 范娟，张新建，杨家军. 基于发动机缸体压铸工业机器人末端操作器的设计[J]. 机电工程，2018, 35(3): 256-260.

[2] 陈宇华，石小康，丁文金，等. 一种工业机器人浇注手臂，中国，CN207615648U[P]. 2018-07-17.

[3] 胡玲. 一种浇注机器人: 中国, CN107377955A[P]. 2017-11-24.

[4] 何鑫，何礼平. 一种浇注机器人: 中国, CN208529561U[P]. 2019-02-22.

[5] 侯珍秀. 机械系统设计 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.

[6] 陈国强. 工业自动化中的驱动与控制 [M]. 北京: 机械工业出版版社, 2016.

[7] 王立威. 高精度伺服控制系统[M]. 北京：知识产权出版社，2016.