

浇注模定量倾倒机构的分段变脉冲积分化控制

赖永波^{1,2}, 卢俊^{1,2}, 李华荣³

(1. 江苏信息职业技术学院 智能工程学院, 江苏 无锡 214153;

2. 无锡精智模具技术有限公司, 江苏 无锡 214153;

3. 荣晟物联技术有限公司, 江苏 无锡 214059)

摘要:针对小型模具快速定量倾倒浇注生产中的过冲与涌溅问题,对一种自动倾倒熔桶机构在分析其工艺流程和控制特点下,提出将倾倒过程分三阶段控制设计,在不依赖于系统的具体模型条件下,采用可编程控制器(PLC)的高速脉冲输出功能来实时控制伺服电机推拉倾倒熔桶浇注生产。该定量倾倒浇注控制在快浇注阶段解决了涌溅,在精确浇注阶段设计匀速递减可变脉冲来无限逼近积分控制过程,解决了过冲达到定量浇注。仿真与实验表明,倒桶浇注中的控制干扰和机构的振颤现象被有效抑制。与传统的熔桶倾倒定量浇注控制应用相比,该设计控制整定参数少、过冲与涌溅量小,且设计更便于采用PLC来编程实现。

关键词: 倾倒机构; 自动定量浇注; 分段变脉冲; 积分化控制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24087

Piecewise Varying Impulse Integral Control for Casting Mould Quantitative Pouring Device

LAI Yongbo^{1,2}, LU Jun^{1,2}, LI Huarong³

(1. School of Intelligent Engineering, Jiangsu College of Information Technology, Wuxi 214153,

Jiangsu, China; 2. Wuxi Presize Intelligent Mould Limited Company, Wuxi 214153,

Jiangsu, China; 3. Rongsheng Technical Internet of Things Limited Company, Wuxi 214059, Jiangsu, China)

Abstract: To deal with the mould quantitative casting over-pouring and spillage, based on the analysis of the technological process and the control characteristics for a kind of auto molten bucket casting mechanism, under the condition without depending on system concrete models, a three stages casting was proposed to real-time control servo motor push-pull molten bucket casting production by the programmable logic controller (PLC) high-speed pulse output function. The control solves the spillage in the fast pouring stage, designs the uniform decreasing variable pulse to infinitely approximate the integral control process to solve the over-pouring and reach the quantitative casting pouring in the precise pouring stage. Simulation and experiment show that the control method effectively attenuate the disturbance and the pouring mechanism vibration phenomenon. Compared with the traditional control application of the molten bucket pouring, the designed control system have few adjusting parameters less over-pouring and spillage, and more convenient to be realized by the PLC.

Key words: pouring device; automatic quantitative pouring; piecewise variable impulse; integral control

冶金浇注是铸造生产中的重要环节,对浇注设备的设计与控制应用历来是浇注成型中的研究热点^[1-3]。定量浇注是冶金浇注生产中的一种工艺要求,目前浇注研究与应用中的主要方法有:质量定量法、电极控制定量法、容积定量法、时间定量法、示教再现控制定量法、图像处理控制定量法等^[4-7]。随着工程设计软件技术的发展,

有学者采用 Moldex3D 嵌件对注射成型浇注系统进行了优化分析^[8]。在小型模具浇注生产上,文献[9]中设计了一种气压式定量浇注系统,并对其进行了软件模拟应用研究。近年来,在高端浇注制造领域,基于计算机控制软件优化技术的浇注系统设计与模拟分析得到深入的研究和应用^[10-11]。

需要指出的是,上述浇注装置的设计应用中

基金项目:江苏省高校优秀科技创新团队基金(2019SJK07);江苏省高等学校自然科学基金(17KJB510019)

作者简介:赖永波(1975—),男,硕士,副教授,高级工程师,Email: yongbo100@sina.com

总体上自动化程度不高,在小型模具浇注的批量化生产中其效率有待提升。上述浇注装置的控制设计与优化一般是建立在系统建模和仿真基础上给出的研究与应用成果。在实践应用中对于浇注系统通常是采用简化的近似建模^[12-13],忽略了系统的非线性和不确定以及控制干扰因素,使得浇注操作中的定量性误差大,存在熔液过冲浇注和速度不稳定导致的熔液涌溅现象,后续加工时模型产品的切削余量大,批量化浇注生产的工效也有待进一步提高。

本文针对一种自动倒桶浇注机构装置,在分析其工作过程和浇注控制特点下,采用PLC控制器设计分段可变脉冲积分化控制功能应用于自动浇注生产,以降低上述定量倾倒浇注中存在的问题。

1 倾倒浇注系统分析

1.1 浇注机构

为满足小型模具浇注企业自动浇注生产要求,一种可实现自动倒桶浇注机构被设计应用,其简化的结构示意图如图1所示。

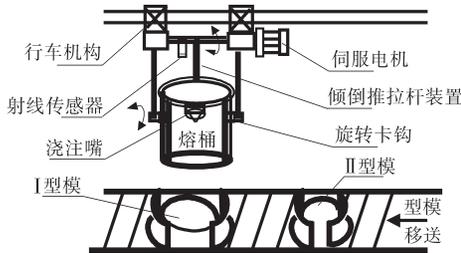


图1 倒桶浇注机构

Fig.1 Structure of casting and pouring device

倒桶浇注机构由行车机构、伺服电机及传动杆、倾倒推拉杆装置、保温熔桶、浇注嘴、浇注模具型腔深度检测射线传感器和模具型腔移送带机构等组成。其设计机构中的浇注嘴有别于传统的漏斗型与管型嘴,漏斗型与管型嘴虽易于控制流速,但在浇注结束瞬间时刻型嘴中的剩余熔液在重力作用下飞落模腔中,使得控制过冲量较大。

1.2 倾倒浇注过程

倾倒浇注生产时,图1机构控制执行动作流程为:PLC控制行车载着熔桶机构移动到工作位置,模具腔移送到浇注位置,根据不同模具腔的深度值和传感器实时深度测量反馈值,控制伺服电机正反转速度转动倒桶推拉杆装置,控制熔桶倾倒浇注生产。当实时深度测量反馈值达到设定浇注值时刻,控制伺服电机进行正桶(即熔桶竖直)工作,并等待下一个模具腔移送到浇注位

置,执行自动循环浇注工作,其倾倒过程示意图如图2所示。

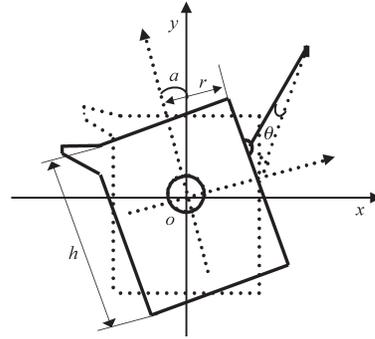


图2 倾倒示意图

Fig.2 Pouring schematic diagram

假设交流伺服电机输出推拉力矩 T_L 沿熔桶壁纵向方向,系统以 o 点旋转运动近似建模^[14]为

$$\begin{cases} J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = T_L r - mgr \sin \alpha \\ J_m \frac{d\theta}{dt} = \frac{3}{2} p_m \Psi i_q - T_L \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$J = mr^2$$

式中: J 为熔桶转动惯量; m 为熔桶质量; α 为桶转角度; r 为熔桶半径; J_m 为电机转动惯量; θ 为角速度; p_m 为电机极对数; Ψ 为磁链常数; i_q 为电机 q 轴电流。

1.3 倾倒熔体与转角的关系

由图2可知熔桶转角范围是 $0 < \alpha < \pi/2$, 假设某浇注时刻熔桶转过角度 α , 熔桶内熔液的体积 V , 桶高度 h , 其熔液液面位置变化如图3所示。

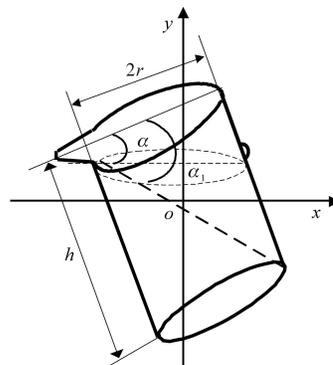


图3 倾倒熔桶液面示意图

Fig.3 Schematic of pouring molten bucket liquid level

浇注过程中其桶内熔液体积 V 与 α 的关系为

$$\begin{cases} V = \pi r^2 (h - r \tan \alpha) & 0 < \alpha < \alpha_1 \\ V = \frac{\pi}{2} r^2 h - \frac{\pi r^3}{2 \cot \alpha} + \frac{r^2 (h \cot \alpha - r)}{\cot \alpha} \\ \arcsin \frac{h \cot \alpha - r}{r} + \frac{h^2 \cot^2 \alpha - 2hr \cot \alpha + 3r^3}{3 \cot \alpha} \\ \sqrt{2hr \cot \alpha - h^2 \cot^2 \alpha} & \alpha_1 \leq \alpha < \pi/2 \end{cases} \quad (2)$$

其浇注嘴熔液流量为

$$f(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

在熔桶不同半径与高度的参数下,浇注过程中熔液体积 V 与转角 α 的变化关系如图4所示。

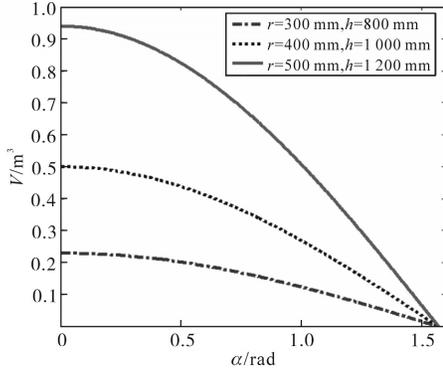


图4 倾倒熔桶液体体积变化图

Fig.4 Diagram of pouring molten bucket tank liquid volume changing

在 $r=300\text{ mm}, h=800\text{ mm}$ 的参数下其流量变化过程如图5所示。随着转角 α 的增大,浇注嘴的熔液流量呈非线性急速变化,最大值出现在图3所示的熔桶中熔液截面形状从梯形向三角形转折处。其熔液流量变化的非线性特征,导致流量(式(3))控制不但精确建模困难,而且在定量浇注中存在难以克服的静态误差、动态载荷与执行机构振动引起的动态误差、以及控制信号因高温环境与温度影响引起的浇注误差等。为此寻求不依赖于式(1)~式(3)的系统数学模型,从控制方法和软件设计方面来有效降低上述影响因素是高性能控制浇注需要解决的关键问题。

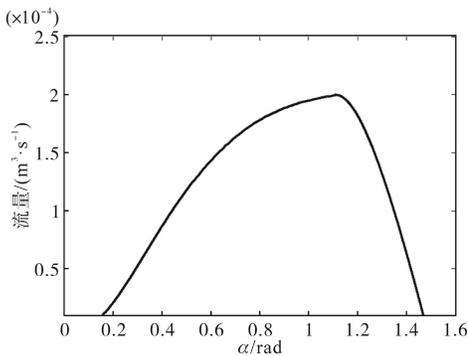


图5 熔体流量与转角 α 的变化关系图

Fig.5 Diagram of melt flow changing with angle α

2 分段变脉冲积分化控制

2.1 分段倾倒浇注方法

为实现快速自动倒桶精准定量浇注,将倾倒过程分启浇段、快浇段和精浇段来实施,采用PLC的高速脉冲输出功能来实时控制伺服电机推拉

倾倒熔桶浇注生产,设计快速浇注完成80%的设定浇注熔液高度值后进入精浇段。分段脉冲起始频率为 f_2 ; 最高快浇段为 f_3 ; 精浇段是匀速递减脉冲,截止频率为 f_1 。分段脉冲输出控制过程如图6所示。

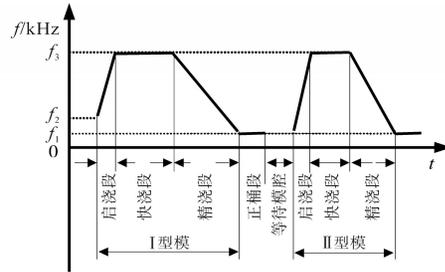


图6 分段高速脉冲

Fig.6 Piecewise high-speed pulse

2.2 积分控制

传统的PID控制中积分功能为消除稳态误差,其增量式表示为

$$\int_0^t e(t)dt = \sum_{j=0}^k e(j)\Delta t \quad (4)$$

式中: Δt 为控制采样周期; $e(j)$ 为第 j 次采样时的控制偏差值。

假设模腔深度为 l , 在倒桶浇注第 j 次采样时刻后模腔中熔液高度为总高度的80%, 即 $l(j)$ 为 $80\%l$, 并假设从第 j 次后每次采样控制模腔中的熔液高度递增量为 $\Delta l_m (m=1, 2, \dots, k)$, 则第 $j+1$ 次后熔液总高度为 $l(j)+\Delta l_1$, 第 $j+2$ 次后为 $l(j)+\Delta l_1+\Delta l_2$, 若到达第 k 次时浇注结束, 则有:

$$l = l(j) + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_k \quad (5)$$

按上述浇注控制规律, 其理想精准定量倒桶浇注即为

$$\begin{cases} \sum_{i=j}^k \Delta l(i) = 20\%l \\ \lim_{i=k} \Delta l(i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 脉冲控制实现

设计两种型号模具精浇注段脉冲工作过程如图7所示。图中, T_I 为 I 型模具精浇注起发控制驱动脉宽(文中脉宽特指由连续单个脉冲组成, 下同), ΔT_I 为其递减脉宽; T_{II} 为 II 型模具精浇注起发控制驱动脉宽, ΔT_{II} 为其递减脉宽。

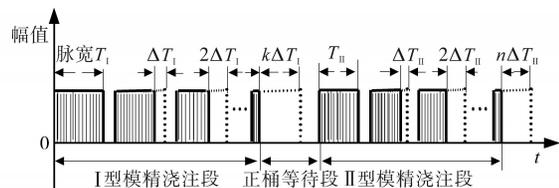


图7 脉冲工作原理过程

Fig.7 Pulse working principle process

由图6和图7的控制设计过程可得:在一个倾倒浇注 Δt 采样时间内,以 I 型模浇注为例,精浇注段起发控制输出脉冲个数 N 为

$$N = \Delta t \div \frac{1}{f_3} = T_1 \quad (7)$$

精浇注段结束前一个采样时刻输出脉冲数 n 为

$$n = \Delta t \div \frac{1}{f_1} \quad (8)$$

若采样控制到第 k 次时倾倒浇注结束,则每个采样周期内,脉冲平均递减数为(等效递减驱动脉宽 ΔT ,取整数)

$$\text{Mod}(M) = (N - n) / k = \Delta T \quad (9)$$

在上述脉冲控制驱动下,伺服电机带动推杆装置推动熔桶倾倒浇注工作,每次浇注采样后模腔中的熔液高度增加值变化如图8所示。将图8中的变化值沿着时间轴线反向累加即是式(5)结果,实现了标准的积分控制功能。

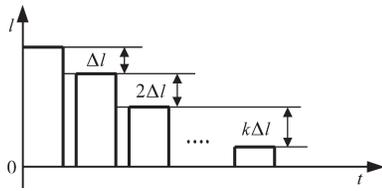


图8 采样浇注增加值
Fig.8 Sampling and pouring increased value

3 仿真与实验

仿真与实验中的伺服电机选择安川 SGM5H 型 2 kW 三相电机,伺服器选择安川 SGD72BAEB 型伺服器。实验中,伺服驱动器脉冲变比参数设定为每转 8 000 个,由西门子 S7-Smart 控制器的高速脉冲输出口控制驱动;传感器选德国 NI10-G18-AN 型射线传感器,其信号经模拟量模块 EMAE 04 输入。

3.1 仿真

系统仿真参数: $J_m = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J = 2.0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $r = 400 \text{ mm}$, $h = 1\ 000 \text{ mm}$, 模腔深度为 50 mm。仿真系统采用以太网连接 PLC 控制器与组态上位机构成。针对系统简化的模型,分别给定 600 r/min 与 400 r/min 的方波控制信号,利用控制器开发工具 Indra works Engineering 观测读取伺服电机的速度值和浇注流量变化值,并将数据导入 Matlab 绘制其波形图。

该分段可变脉冲积分化控制伺服电机转速仿真如图9所示,近似描述了两种型号模具浇注中的电机转速变化,其中的正桶和等待时间共设

定 10 s。仿真表明,与文献[13]中的 PID 控制方法相比,采用分段变脉冲积分化控制频率由 f_2 加速到 f_3 恒定段后,克服了振荡且无超调量,系统的稳定性高且动态响应速度快。

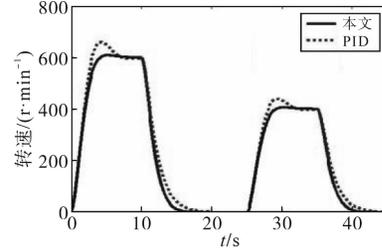


图9 方波信号下的转速变化
Fig.9 Speed change under square wave signal

进一步,在启动倒桶浇铸工作阶段跃信号作用 10 s 时刻,突加 +1.5 V 电压的控制干扰信号,其作用如图10所示。从图中看出,本控制设计抗干扰性强,电机转速平稳,浇注机构振颤现象小。

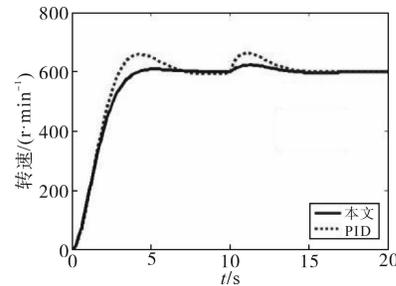


图10 干扰作用下的转速变化
Fig.10 Speed variation under disturbance

浇注过程中倒出熔液流量仿真如图11所示,其峰值出现在从快浇注段向精浇注段变化时刻。

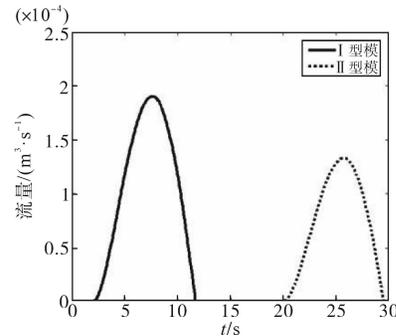


图11 熔体流量变化图
Fig.11 Diagram of melt flow changing

按照分段变脉冲控制设计,启浇注段控制伺服电机不断加速至快浇注段达最大转速并保持,直至模腔中浇注熔液高度到达控制值的 80%,此时倾倒熔液达最大流量易产生冲涌溅现象,由于 80% 的控制值,此阶段模腔空间可容余量较大,使得冲涌溅得到解决。剩余的 20% 浇注量在精浇段完成,由高速递减脉冲控制伺服电机快速减小倾倒转角来控制流量,逐渐逼近式(6),达到快

速定量浇注目标。

3.2 实验

实验对象为质量2.0 t的保温合金熔桶,控制操作在西门子MP270触摸屏上完成。系统参数同仿真参数,控制系统组态如图12所示。

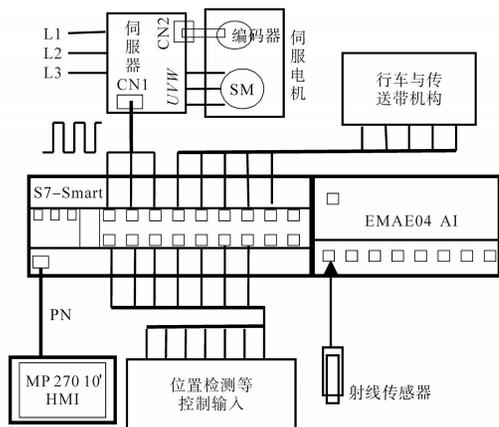


图12 控制系统示意图

Fig.12 Diagram of control system

实验系统的精浇段截止频率 f_1 可采用调试整定,也可根据深度检测射线传感器分辨率联合式(7)~式(9)求解得到。实验时 f_1 取1 kHz, f_2 取2 kHz, f_3 取100 kHz。

为实现与PID控制实验比较,在上位机中启动PLC编程软件自带的PID调节功能进行控制对比实验。在定量浇注过程中,以I型模浇注为例,其模具腔中熔液深度变化实验如图13所示。

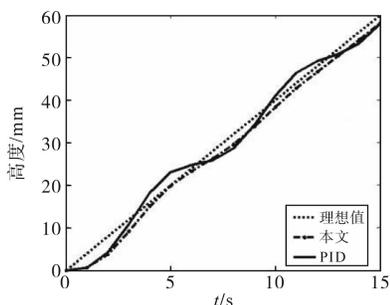


图13 浇注模腔深度跟踪

Fig.13 Casting mould depth control tracking

从图13看出,与文献[13]中PID方法相比,本文设计控制响应快,振荡与定量误差更小。该控制对不同模型腔浇注实验结果对比数据如表1所示。

表1 浇注数据

Tab.1 casting data

控制方法	给定值/mm	实际值/mm
本文控制	35	36
PID控制	35	37
本文控制	45	47
PID控制	45	48

表1数据表明,本文控制设计的最大误差为2 mm,而PID的最大误差为3 mm,使得后续加工中的切削耗材与耗能更多。

仿真与实验表明,变脉冲积分化控制策略与文献[9,12-13]中的控制相比,具有不依赖于倒桶机构的控制数学模型和参数调整少的实时控制优越性,且易于采用PLC控制梯形图编程软件实现。

4 结论

本文根据模具浇注生产需求,对设计的一种自动倒桶浇注机构,采用PLC控制器设计分段可变脉冲信号驱动伺服电机推动倾倒浇注工作,其控制设计仿真与实验表明:1)自动倒桶浇注中的干扰和伺服电机与倒桶机构的振颤现象得到有效抑制;2)过冲量小,降低了倒桶定量浇注误差;3)与传统的倒桶浇注控制应用相比,该控制设计整定参数少且精准定量浇注时间短,安全可靠自动化程度较高,具有一定的推广实用价值。

参考文献

- [1] SAMA S R, WANG J, MANOGHARAN G. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34(5): 4876-4882.
- [2] 廉振文, 郭全领. V型气缸体铸造浇注系统设计分析及改善[J]. 铸造工程, 2021, 45(6): 28-34.
LIAN Zhenwen, GUO Quanling. Design analysis and improvement of V-type cylinder block gating system[J]. Foundry Engineering, 2021, 45(6): 28-34.
- [3] OBZINA Tomáš, MERTA Václav, FOLTA Martin, et al. Technological and quality aspects of the use of innovative inorganic binders in the production of castings[J]. Metals, 2021, 11(11): 3508-3513.
- [4] 刘永胜, 杨尚平, 汪泽波. 定点倾转式定量浇注装置研发[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(11): 1043-1045.
LIU Yongsheng, YANG Shangping, WANG Zebo. Research and development of fixed-point tilting type quantitative pouring device[J]. Special Casting and Non-ferrous Alloys, 2011, 31(11): 1043-1045.
- [5] 雷先华, 朱石沙, 刘金刚. 半自动定点倾转式浇注工作台的设计[J]. 铸造, 2014, 63(8): 809-811.
LEI Xianhua, ZHU Shisha, LIU Jingang. Design of semi-automatic fixed point tilting casting table[J]. Foundry, 2014, 63(8): 809-811.
- [6] 李从发, 李晓明, 张江波. 静压线生产球墨铸铁管件浇注系统设计体会[J]. 铸造设备与工艺, 2018, 5(4): 11-13.
LI Congfa, LI Xiaoming, ZHANG Jiangbo. Experience in the design of pouring system for ductile iron pipe fittings produced by static pressure line[J]. Casting Equipment and Technology,

2018,5(4):11-13.

[7] 曹琪. 铝合金挤压铸造定量输送浇注装置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2012.
CAO Qi. Research on quantitative conveying and pouring device for aluminum alloy extrusion casting[D]. Harbin: Harbin Technology University, 2012.

[8] 曹继平,刘苗苗,谢鹏程. 基于Moldex3D的嵌件注射成型浇注系统优化分析[J]. 中国塑料,2016,30(10):75-78.
CAO Jiping, LIU Miaomiao, XIE Pengcheng. Optimization analysis of injection molding casting system for insert based on Moldex3D [J]. China Plastics, 2016, 30 (10): 75-78.

[9] 成炼. 气压式定量浇注系统模拟优化研究[D]. 太原: 中北大学,2014.
CHENG Lian. Research on simulating optimization of pneumatic quantitative pouring system [D]. Taiyuan: North China University. 2014.

[10] WU Huaichao, YANG Xuan, CAO Gang, et al. Design and optimization of die casting process for heavy-duty automatic transmission oil circuit board[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2021, 34(2) :6470-6477.

收稿日期:2021-11-15
修改稿日期:2021-12-22

>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

(上接第90页)

系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSG-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21) :5741-5749.

[10] 余修勇,肖立业. 直流配电网故障识别和定位技术研究综述[J]. 电工电能新技术,2019,38(7):56-66.
YU Xiuyong, XIAO Liye. An overview of fault identification and location technology for DC distribution networks[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(7) :56-66.

[11] 齐晓轩,都丽,张国山. 小波包近似熵特征的机动车声识别方法[J]. 南京理工大学学报,2020,44(1):67-73,79.
QI Xiaoxuan, DU Li, ZHANG Guoshan. Vehicle type recognition by acoustic signal based on wavelet packet decomposition and approximate entropy[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(1) :67-73, 79.

[12] 何巨龙,王根平,刘丹,等. 基于提升小波和改进BP神经网络的配电网系统电能质量扰动定位与识别[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(10):69-76.
HE Julong, WANG Genping, LIU Dan, et al. Localization and identification of power quality disturbance in distribution network system based on lifting wavelet and improved BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (10) :69-76.

[13] 于海. VSC-HVDC系统故障定位和故障诊断技术研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.
YU Hai. Research on fault location and diagnosis technology of VSC-HVDC[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.

收稿日期:2022-05-19
修改稿日期:2022-06-21