

# 刚性约束下的退役汽车自动化拆解生产线 多目标优化方法

王婷,刘杜娟

(西安航空职业技术学院 汽车工程学院,陕西 西安 710089)

**摘要:**为提高退役汽车自动化拆解效率、节约企业成本,在刚性约束下提出退役汽车自动化拆解生产线多目标优化方法。明确退役汽车自动化拆解关系的复杂性大小,综合汽车拆解的刚性约束得出多目标优化数学模型,规划各项工序得出模型的六大约束条件,通过遗传算法的染色体基因编码对生产线作业元素排序,求解数学模型目标函数,将目标函数结果视为种群,计算种群的适应度值,在种群交叉和变异的帮助下得出种群的最终优化结果,实现生产线多目标优化。实验结果表明:所提方法的生产节拍收敛性快,优化效果好,拆解生产线平衡率高。

**关键词:**退役汽车;刚性约束;多目标优化;自动化拆解;生产线;数学模型

**中图分类号:**TP202<sup>\*</sup>.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0184-05

## Multi-objective Optimization Method for Automated Dismantling Production Line of Retired Automobiles under Rigid Constraints

WHANG Ting, LIU Dujuan

(School of Car Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of automatic disassembly of retired vehicles and save the cost of enterprises, a multi-objective optimization method of automatic disassembly production line of retired vehicles is proposed under rigid constraints. The complexity of the automatic disassembly relationship of retired vehicles is clarified, the rigid constraints of vehicle disassembly are integrated to obtain the multi-objective optimization mathematical model, and each process is planned to obtain the six constraints of the model. By the chromosome gene coding of genetic algorithm, the operation elements of the production line are sorted, and the objective function of the mathematical model is solved. The objective function result is regarded as the population to calculate its fitness value, and with the help of population crossover and mutation, the final optimization result of the population is obtained to realize the multi-objective optimization of the production line. The experimental results show that the proposed method has fast convergence of production beat, good optimization effect and high balance rate of disassembly production line.

**Keywords:** retired cars; rigid restraint; multi-objective optimization; automatic disassembly; production lines; mathematical models

## 0 引言

退役汽车自动化拆解生产线属于装配式生产线的一种<sup>[1]</sup>,是现代化工业的主要表现形式,可以最大程度降低生产成本的同时提高生产力。完整的装配式生产线带有大量连续工位,所有任务均是在一个生产节拍<sup>[2]</sup>内完成,为了保证装配式生产线平衡性达到最好水准,设置一定约束条件对其中多个目标进行优化,以此保证退役汽车自动化拆解生产线状态达到最优。但汽车之类的自动化拆解生产线通常将各个工位精细规划,每个工位带有不同的功能,极大地限制了生产线工作能力的柔性,造成生产线中出现工序刚性约束<sup>[3]</sup>。为了更好地提高生产力,现对刚性约束下的生产线目标进行优化。

邓超等<sup>[4]</sup>通过分析装配式生产线的特点得出该生产

线的目的,在匈牙利算法的帮助下明确工位分配结果,通过生产节拍等参数为优化目标生成拆解生产线平衡优化模型,利用多目标鲸鱼优化算法完成模型求解,实现多目标装配线平衡优化。蒙凯等<sup>[5]</sup>根据正常工作的节拍最小化等多个优化目标建立装配线平衡集成优化模型,利用向多目标优化的改进灰狼算法对集成优化模型进行求解,实现装配线平衡与预防维护集成优化。以上两种方法在对生产线多目标进行优化过程中,受生产线各工序之间关系复杂度的影响,存在生产节拍收敛性差、优化效果差以及拆解生产线平衡率低的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,在优先约束等六大刚性约束条件下,提出了退役汽车自动化拆解生产线多目标优化方法,以在节约企业成本的同时,进一步提高退役汽车自动化拆解效率。

基金项目:2021年西安航空职业技术学院校级自然科学一般项目(21XHZK-11)

第一作者简介:王婷(1992—),女,陕西西安人,讲师,硕士,研究方向为汽车技术服务与营销。

# 1 汽车自动化拆解多目标优化数学模型构建

## 1.1 退役汽车自动化拆解关系复杂度分析

退役汽车自动化拆解关系的复杂性大小,主要是由生产线中各项任务的数量和工位顺序决定的,复杂度详细结果对多目标优化起到决定性作用<sup>[6]</sup>,根据结果进行优化可大大提高优化效率,首先定义出复杂度的特征值。

假设汽车拆解作业的作业元素集合为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (1)$$

式中: $x$ 代表退役汽车自动化拆解生产线的各项作业元素; $N$ 代表作业元素数量。其中各个作业元素的对应位置属性集合为

$$D = \{D_1, D_2, D_3\} \quad (2)$$

式中 $D_1$ 、 $D_2$ 和 $D_3$ 分别代表汽车拆解作业元素的优先关系中属于前序的数量、后序的数量以及并行的数量。

根据熵的特性可知<sup>[7]</sup>,熵的结果与系统复杂度成正比,熵值越高拆解复杂度越高,其中带有的信息量越大,基于熵的属性即可描述汽车自动化拆解复杂度。

汽车拆解过程中每种作业元素的位置状态特征值相应比例的表达式为

$$p_N = \frac{x_N}{D_1 + D_2 + D_3} \quad (3)$$

则汽车拆解生产线作业元素的装配式关系复杂性的计算公式为

$$G_i = - \sum_{j=1}^N p_j \lg p_j \quad (4)$$

式中: $G_i$ 代表汽车拆解生产线中第 $i$ 个作业元素的装配式关系复杂度; $j$ 代表工序; $p_j$ 代表工序 $j$ 的特征值所占比例。

## 1.2 多目标优化数学模型的构建

通过计算汽车拆解生产线各个元素的复杂度,结合刚性约束装配线的特点,构建退役汽车自动化拆解生产线多目标优化的数学模型。

### a) 目标函数的构建

生产节拍是根据退役汽车拆解随需求数量而变化的<sup>[8-9]</sup>,所以退役汽车自动化拆解生产线的节拍实际上是根据工序作业的时间决定的,可利用瓶颈工序的工作时间进行表述,由此得出退役汽车自动化拆解生产线多目标优化数学模型的其中一个目标函数<sup>[10-11]</sup>,即最小化生产节拍,此节拍表达式为

$$\min D_T = \max \left[ \left( \frac{t_i}{p_{e_i}} \mid x \in X \right) \cup t_b \right] \quad (5)$$

式中: $D_T$ 代表退役汽车自动化拆解生产线的生产节拍; $t_i$ 代表汽车拆解生产线中第 $i$ 个作业元素在单个设备运行下的工作时间; $p_{e_i}$ 代表汽车拆解生产线中第 $i$ 个作业元素的并行度; $t_b$ 代表分流或合流单元的作业时间。

加强生产线作业效率通常会通过加强生产线工序并行度的方式,但这种方法的缺点是提高了生产成本,进而降低利润。基于设备成本以及分流单元成本的要求得出

多目标优化的另一个目标函数,即最小化拆解生产线成本,其表达式为

$$\min B = \sum_{i=1}^N B_i p_{e_i} + \sum_{j=2}^N B_b C_j \quad (6)$$

式中: $B$ 代表退役汽车自动化拆解生产的成本; $B_i$ 代表汽车拆解生产线中第 $i$ 个作业元素在单个设备运行下所需的单元成本; $B_b$ 代表退役汽车自动化拆解生产线单个合流或是分流设施的成本; $C_j$ 代表评判生产线中两个工序之间是否需要合流或分流的0~1变量,其中变量 $C_j$ 的计算公式为

$$C_j = \begin{cases} 1, & p_s(s_{q_{j-1}}) \neq p_s(s_{q_j}) \\ 0, & p_s(s_{q_{j-1}}) = p_s(s_{q_j}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $p_s(s_{q_j})$ 和 $p_s(s_{q_{j-1}})$ 分别代表工序 $j$ 和工序 $j-1$ 作业元素的并行度。

### b) 模型的刚性约束条件

对退役汽车自动化拆解生产线的各项工序进行规划时需要设定大量的约束条件,经过分析总结出汽车自动化拆解生产线多目标优化数学模型的六大约束条件如下。

#### 1) 优先约束

将优先关系矩阵标记为 $Q$ , $Q$ 对退役汽车自动化拆解生产线各项工序约束关系的表达式为

$$S_N(s) < S_N(r), \forall s, r \in X \wedge Q_{r,s} = 1 \quad (8)$$

式中: $S_N(s)$ 代表汽车拆解生产线工作元素 $s$ 在生产序列中的序号; $S_N(r)$ 代表汽车拆解生产线工作元素 $r$ 在生产序列中的序号。

#### 2) 直接优先约束

将直接优先关系约束标记为 $F$ ,利用 $F$ 展示数学模型的直接优先约束关系,其表达式为

$$S_N(s) = 1 + S_N(r), \forall r, s \in X \wedge F_{r,s} = 1 \quad (9)$$

#### 3) 完全分配约束

退役汽车自动化拆解生产线中,每个工位均对应一个作业元素,在拆解作业过程中每个作业元素均只能得到一次分配,基于此要求得到下列约束公式:

$$s_{q_{j_1}} - s_{q_{j_2}} \neq 0, \forall j_1, j_2 \in [1, N] \wedge j_1 - j_2 \neq 0 \quad (10)$$

式中 $s_{q_{j_1}}$ 代表工序 $j_1$ 的作业元素。

则每种作业元素得到相应分配的表达式为

$$s_{q_j} \in [1, N], \forall j \in [1, N] \quad (11)$$

#### 4) 节拍约束

针对自动化的装配式生产线,基于拆解生产线的最大节拍要求,对节拍进行约束,其表达式为

$$D_T < V_{F_D} \quad (12)$$

式中 $V_{F_D}$ 代表退役汽车自动化拆解生产线节拍的最大限度。

#### 5) 成本约束

根据企业对效益的要求,退役车辆拆解生产线的最大成本约束为

$$B < V_{F_B} \quad (13)$$

式中 $V_{F_B}$ 代表退役汽车自动化拆解生产线成本的最大界限。

#### 6) 并行度约束

根据车间大小和设备体积的限制,对生产线的作业元素进行约束,其表达式为

$$1 \leq p_{e_i} \leq O_i, \forall i \in X \quad (14)$$

式中  $O_i$  代表作业元素  $i$  的并行度上限。

## 2 模型优化求解

选用遗传算法对数学模型进行求解<sup>[12-13]</sup>,为了更好地求解出结果,在遗传算法的基础上对其进行设计。

根据染色体基因编码进行作业元素的排序,假设基因编码矩阵为  $A$ ,生产线各个作业元素所用时间的加权平均值向量为  $t'$ ,第  $m$  个需要拆解的汽车每个作业任务的工作时间向量为  $t'_m$ ,则各个工位的作业完成平均时间向量为

$$T' = At' \quad (15)$$

第  $m$  个需要拆解的汽车在每个工位的单件作业时间向量为

$$T'_m = At'_m \quad (16)$$

利用式(15)和式(16)即可计算出式(5)和式(6)的结果,即目标函数值的结果。

因为针对多目标优化问题建立的数学模型实质上是对其最小值的求解,进而得出其适应度函数为

$$f(J) = 1 - \frac{j}{\alpha} \quad (17)$$

式中: $J$ 代表目标函数; $\alpha$ 代表大于目标函数最大值的常数项。

对种群个体的选取首先利用精英选择选取这一代多个精英个体复制到下一代,同时利用轮盘对剩余个体进行选择,进而保证个体的优良性和多样性。

在遗传算法中,通过交叉和变异生成新的个体,个体交叉和变异均是根据其概率作为依据进行转换的,其中个体的自适应变异概率为

$$p_k = \begin{cases} \frac{p_{kmax} - p_{kmin}}{1 + \exp\left(c \frac{f - f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}}\right)} + p_{kmin}, & f \geq f_{avg} \\ \frac{p_{kmax} - p_{kmin}}{1 + \exp\left(-c \frac{f - f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}}\right)} + p_{kmin}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (18)$$

个体自适应交叉的概率为

$$p_1 = \begin{cases} \frac{p_{lmax} - p_{lmin}}{1 + \exp\left(c \frac{f' - f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}}\right)} + p_{lmin}, & f' \geq f_{avg} \\ p_{lmin}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $p_1$ 代表个体的自适应交叉概率; $p_{lmax}$ 代表个体的自适应交叉最大概率; $p_{lmin}$ 代表个体的自适应交叉最小概率; $f'$ 代表两染色体之间最大染色体的适应度值; $f_{avg}$ 代表种群的平均适应度值; $f_{max}$ 代表种群的最大适应度值; $c$ 代表常数; $p_k$ 代表个体的自适应变异概率; $p_{kmax}$ 代表个体的自适应变异最大概率; $p_{kmin}$ 代表个体的自适应变异最小概率; $f$ 代表目前染色体的适应度值。

对新个体进行检验,当被检验的个体满足作业元素的排序约束条件式(8)时,即可证明新个体有效,否则重新

进行选择,提取出前  $M$  个适应度个体视为进化结果,并进行下一次进化,直到适应度函数值不再变化,则终止进化,得出目标的最终优化结果。

## 3 实验结果与分析

为了验证刚性约束下的退役汽车自动化拆解生产线多目标优化方法的整体有效性,现对本文方法、多目标装配线优化方法和灰狼算法优化方法,进行生产节拍收敛性、优化效果以及拆解生产线平衡率的测试。

### 3.1 实验设置

为实现退役汽车环保、高效拆解,在实验前明确了退役汽车的拆解工艺流程:检查和登记—拆前安全环保预处理—整车解体—深度拆解—分类储存。根据拆解工艺流程,通过在 Plant Simulation 中建立拆解线仿真模型,利用其中的拆解设备单元以及统计分析和优化工具,评价退役汽车拆解线的各项指标,如生产节拍收敛性、拆解生产线平衡率等,以达到消除拆解线瓶颈,提高拆解效率的目的。图1为某型号退役汽车拆解线仿真模型。

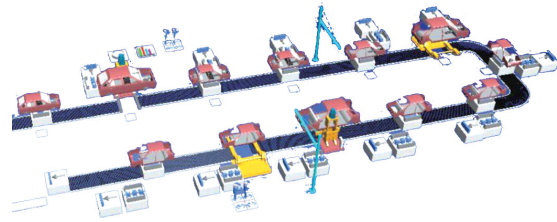


图1 退役汽车拆解线仿真模型

在图1所示的仿真模型中,设定模型仿真时间为7d,按照单班8h的工作制运行仿真,利用本文方法、多目标装配线优化方法和灰狼算法优化方法3种方法进行对比测试。

### 3.2 结果与分析

#### 1) 生产节拍收敛性

退役汽车自动化拆解的生产节拍是随着产品的需求进行变化的,每当生产周期或是产品数量发生变化,生产节拍也会发生改变,否则会出现设备闲置或是生产过剩的情况,所以在对退役汽车自动化拆解多目标优化过程中,对生产节拍的收敛性也必须加强。

现选取某柴油发动机企业的汽车拆解生产线为实验对象,利用3种方法对其生产目标进行优化。现已知需要拆解的实验对象的生产节拍为500次/s,判断经过优化后的3种方法得到生产节拍的收敛性,实验结果如图2所示。

根据实验结果可知,3种方法的初始收敛速度均不同,本文方法的生产节拍初始值最高,但经过多次迭代,本文方法迅速得到收敛,在迭代100次时,本文方法已经收敛到500次/s,多目标装配线多目标优化方法的收敛速度虽然与本文方法较近,但在迭代150次时收敛到500次/s,而灰狼算法的多目标优化方法在迭代250次时完成收敛。

因此证明本文方法的收敛性高。这是因为本文方法在对退役汽车自动化拆解生产线多目标优化过程中提前对拆解关系的复杂性大小进行分析,提高了优化效率,加快生产节拍收敛速度。

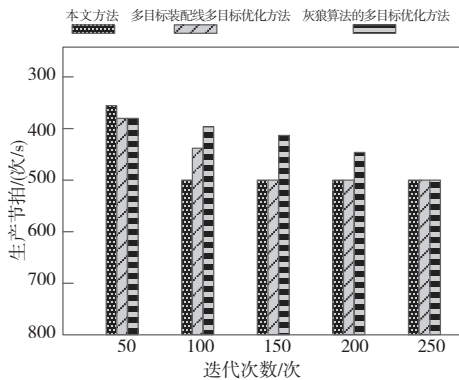


图2 3种方法的生产节拍收敛性

## 2) 方法优化前后对比

汽车自动化拆解生产线多目标优化的目的是平衡生产线各工序的作业时间,把握好生产节拍,避免出现生产节拍大于或小于生产周期的情况。随机选取15组不同要求的拆解项目进行实验,每组项目中的生产周期、拆解数量、工序以及机床配置均不相同,将每个项目进行编号,分别为实验编号1-15,每个项目的生产节拍均有允许范围,在该范围内的生产节拍越低说明优化后的生产效率越高,实验结果如表1所示。

表1 本文方法优化前后的生产节拍对比 单位:s

实验编号	优化前生产节拍	优化后生产节拍	生产节拍允许范围
1	639.5	610.8	609.2~641.1
2	678.9	656.9	655.7~679.3
3	657.7	634.8	632.1~659.5
4	643.9	621.8	619.5~644.1
5	668.9	649.9	646.8~670.1
6	659.3	632.6	631.2~662.2
7	692.5	675.3	672.1~695.9
8	704.7	691.8	689.8~710.2
9	739.0	710.5	708.1~743.2
10	729.1	699.9	698.0~731.2
11	721.8	703.2	700.5~723.8
12	737.8	721.2	719.2~739.5
13	731.9	709.8	704.1~735.0
14	743.2	722.6	719.0~746.1
15	752.4	731.4	728.1~754.9

根据实验结果可知,本文方法在优化前每组实验的生

产节拍均在允许范围之内,但每组实验的生产节拍都比较接近生产节拍的最大值,导致生产效率较低。经优化后,本文方法的生产节拍都接近允许范围的最小值,提高了拆解生产线的生产效率。

## 3) 拆解生产线平衡率

退役汽车自动化拆解生产线是由多个工序组合完成作业的,因此要求各个工序的作用均不相同,但临近工序必须无缝衔接作业,这就要求生产线的平衡率较高,对生产线优化的目的也是提升生产线的平衡率。仍在某柴油发动机企业的拆解生产线中选取5个不同要求的拆解项目,利用3种方法对其平衡率进行优化,并将3种方法的结果与优化前结果进行对比,实验结果如图3所示。

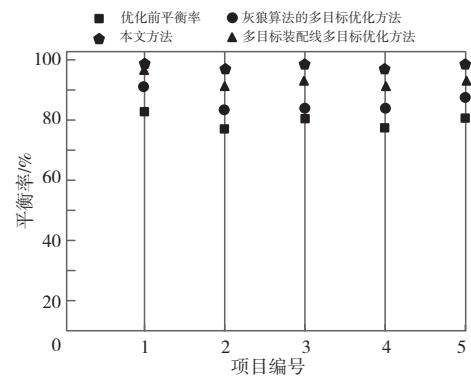


图3 3种方法的平衡率优化结果

根据实验结果可知,3种方法的平衡率经过优化均有所提升,其中优化效果最明显的是本文方法,该方法的平衡率是3种方法最高的,由此验证本文方法是最优目标优化方法。

## 4 结语

自动化生产线是现代工业的基础,为了降低刚性约束带来的影响,提出刚性约束下的退役汽车自动化拆解生产线多目标优化方法。该方法首先计算工序间关系的复杂度,其次构建数学模型,最后在遗传算法的帮助下进行模型求解,实现退役汽车自动化拆解生产线多目标优化,解决了生产节拍收敛性差、优化效果差以及拆解生产线平衡率低的问题,提高了自动化设备的效率和能力。

### 参考文献:

- [1] 周冲,黄轶群,郑义,等. 装配式建筑预制混凝土构件循环生产线工艺布局设计[J]. 施工技术,2020,49(5):49-52,59.
- [2] 陆志强,王浩宇. 资源受限的飞机总装脉动生产线节拍转换调度建模[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(12):1761-1770.
- [3] 王世俊,同长虹,罗冠伟. 含多刚性约束的两自由度振动系统的动力学特性分析[J]. 振动与冲击,2021,40(6):11-22,78.
- [4] 邓超,胡瑞飞,蒋捷峰,等. 考虑工人分配的多目标装配线平衡优化[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(6):116-121,126.
- [5] 蒙凯,唐秋华,张子凯,等. 基于改进多目标灰狼算法的装配线平衡与预防维护集成优化[J]. 计算机集成制造系统,



- 2020,26(12):3302-3312.
- [6] 汤兆平,余时钧,宫素萍,等. 基于优先权的铁路多事故点应急资源调度多目标优化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(1):29-37.
- [7] 孙子文,叶乔. 利用震荡环频率特性提取多位可靠信息熵的物理不可克隆函数研究[J]. 电子与信息学报,2021,43(1):234-241.
- [8] 刘剑锋,孙力帆,普杰信,等. 基于刚性约束的双移动机器人协同定位[J]. 电子学报,2020,48(9):1777-1785.
- [9] 刘香香,孙凤. 基于蚁群算法的装配式建筑施工工序多目标优化模型[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(3):113-118.
- [10] 张飞,石琴,陈一错,等. 基于敏感性分析的悬架多目标优化函数构建方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):14-19,25.
- [11] 高源,方丽,薛贵香. 建筑生命周期碳排放评价函数多目标优化算法[J]. 计算机仿真,2021,38(2):240-243,405.
- [12] 冯芬玲,石昕. 基于 Heston 模型和遗传算法优化的铁路货运期权定价模型[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(5):1295-1301.
- [13] 杨练兵,郑宏伟,罗格平,等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的土壤盐渍化反演[J]. 地理与地理信息科学,2021,37(2):12-21,37.

收稿日期:2022-04-08

(上接第 165 页)

表 4 系统适用性和稳定性测试表

测试项目	测试内容	测试结果
底盘通过性能	分别以 0.1 m/s、0.4 m/s、0.7 m/s 速度测试底盘通过性;通过性包括底盘爬坡、跨越、越障等能力	底盘通过性满足现场要求
狭小空间通过性	按正常巡检速度巡检,记录现场 0.7 m~0.8 m 宽度处车身与障碍的间距	间距保持 35 mm 以上
电池续航	将电池充满电后测试续航,测试 3 次取平均值	续航 9 h
工作空间	在各检测点利用六轴机械臂和摄像机配合,检测目标	满足高度 0.5 m~2.8 m 目标的检测
视觉算法	检测视觉图片 9 650 张	准确率 95.2%
监控中心功能	测试监控中心各功能	满足使用要求

## 4 结语

本文根据变电站现场特点,设计了轮式底盘加六轴机械臂的结构形式,增加了检测机构的运动空间和姿态调节角度,有效地解决了现场狭小空间的检测问题;设计了基于任务的运动控制策略并配套增量式 PID 控制算法,保证了运动控制的精度;提出了激光自主导航加二维码导航的复合导航方式,在特定位置使用二维码导航,其他位置使用激光自主导航,充分利用了二维码导航的精度,并有效地减少了大量贴码的工作量和二维码被移动风险;进一步地进行视觉系统设计,实现对检测对象的分类识别;进行远程监控中心设计,通过实时与巡检机器人信息交互,保障了整个系统的稳定运行。

通过现场的实际测试应用,结果表明:系统各项指标符合预期,可有效地对现场特有环境进行智能巡检,提高了变电站的巡检效率、巡检质量和智能化水平,具有良好应用推广前景。

## 参考文献:

- [1] 彭向阳,金亮,王锐,等. 变电站机器人智能巡检技术及应用效果[J]. 高压电器,2019,55(4):223-232.
- [2] 黄山,吴振升,任志刚,等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(2):26-38.
- [3] 姚楚阳,刘爽. 一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2021,47(1):116-122.
- [4] 李新海,徐宝军,肖星,等. 变电站挂轨机器人智能巡检系统技术研究[J]. 电气传动,2021,51(19):43-49.
- [5] 李荣,栾贻青,王海鹏,等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计[J]. 机床与液压,2020,48(8):112-116.
- [6] 朱嵘涛,武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器,2017(7):121-126.
- [7] 张柯,朱永宏,陆进宇,等. 一种基于机器视觉的水表检定装置的研制[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):225-228.
- [8] 李记花,李鹤喜,李威龙. 一种改进的卷积神经网络的数显仪表识别方法[J]. 计算机科学与应用,2021(2):257-265.

收稿日期:2022-04-13