

# 混凝土布料机输送量影响因素研究

周鹏<sup>1,2</sup>, 郭菁菁<sup>1</sup>, 李冬<sup>3</sup>, 邹德芳<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学科学技术研究院, 辽宁 沈阳 110168;  
3. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究混凝土布料机螺旋输送量影响因素, 为人工神经网络输送量智能预报模型的输入量确定提供合理依据。方法 从混凝土布料机的布料机理出发, 推导布料机输送量的计算公式; 采用单一变量分析方法, 使用 MATLAB 以及离散元软件进行数值仿真, 研究螺旋输送量影响因素对输送量的影响效果。结果 随着螺旋叶片直径、填充系数的增加, 布料机输送量增加; 随着螺旋叶片的摩擦系数、螺旋轴直径增加, 布料机输送量减小; 螺旋升角与螺旋转速都存在一个最佳值, 使得输送量最大; 影响因素对输送量的影响灵敏度从大到小为螺旋升角 1.32 t/h、螺旋转速 1.1 t/h、螺旋叶片直径 0.99 t/h、填充系数 0.91 t/h、摩擦系数 0.59 t/h、螺旋轴直径 0.382 t/h。**结论** 影响因素中的螺旋叶片直径、螺旋升角、螺旋转速、填充系数及摩擦系数更适合作为神经网络输送量智能预报模型的输入量。

**关键词** 混凝土布料机; 螺旋输送量; 影响因素; 数值仿真

中图分类号 TU274.7 文献标志码 A

## Research on the Influencing Factors of the Conveying Capacity of Concrete Distributor

ZHOU Peng<sup>1,2</sup>, GUO Jingjing<sup>1</sup>, LI Dong<sup>3</sup>, ZOU Defang<sup>3</sup>

(1. School of Traffic Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Science and Technology, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The influencing factors of screw conveying capacity of concrete distributor are investigated to provide the basis for the determine the input layer of artificial neural network model for prediction the conveying capacity. The distribution mechanism of the concrete distributor and the formula for calculating the conveying capacity of the distributor were derived, and the single variable analysis method was used to study effect of the influence factors on the conveying capacity by simulation with MATLAB and discrete element software. The results showed that the conveying ca-

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0704003); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(20180551119); 辽宁省教育厅基金项目(LJZ2017031); 沈阳建筑大学计划基金项目(2017016)

作者简介: 周鹏(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代建筑产业技术装备方面研究。

capacity was increased with the increasing of screw blade diameter and filling coefficient, and decreased with increasing the friction coefficient and screw shaft diameter increase. There is an optimal value for spiral lift angle and spiral speed to maximize the conveying capacity. The sensitivity of influence factors to conveying capacity from large to small is spiral lift angle(1.32 t/h), screw blade diameter(0.99 t/h), filling coefficient(0.91 t/h), friction coefficient(0.59 t/h), screw shaft diameter(0.382 t/h). The screw blade diameter, spiral lift angle, screw spiral speed, filling coefficient and friction coefficient are the main influencing factors of the conveying capacity, which can be used as the input of the neural network intelligent prediction model.

**Key words:** concrete distributor; conveying capacity of spiral; influencing factors; numerical simulation

混凝土布料机是混凝土预制构件生产的重要设备,目前主要采用人工控制方式进行布料生产<sup>[1-2]</sup>.面对预制混凝土构件生产方式的变革,原有混凝土布料机的人工控制方式已经无法满足产业发展需求,急需向自动化、信息化甚至智能化方向转变<sup>[3-4]</sup>.

混凝土布料机螺旋输送量模型是实现自动化布料的重要模型,主要用于给出布料重量控制目标值,其计算精度直接决定布料重量控制系统的稳定性,也影响最终布料生产的构件重量精度.传统混凝土布料机螺旋输送量计算模型的很多参数均依靠经验确定,如螺旋转速、填充系数等,导致现有模型输送量计算精度低,无法用于布料重量控制目标值的设定,进而也限制了产业升级进程.

人工神经网络方法可以高精度的逼近任意非线性函数,被广泛应用于模型预报<sup>[5-7]</sup>,并被证实是提高模型预报精度的有效手段<sup>[8-9]</sup>.但在混凝土布料机螺旋输送量预报方面尚未有应用,更缺少输送量神经网络智能预报模型输入量确定方面的研究.

目前,大多数专家学者致力于各式螺旋输送机的机理及结构优化方面的研究.梅潇等<sup>[10]</sup>利用单质点法对大倾角螺旋输送机中物料颗粒的运动特性进行研究,优化了机器性能;毛广卿等<sup>[11]</sup>基于水平圆管螺旋输送机,运用散体力学分析了机内物料的受力情况并建立了力学模型;杨健等<sup>[12]</sup>基于挤出式奶油输送机,采用分析力学方法,建立了影响等直径变螺距因素的力学特性模型并进行了

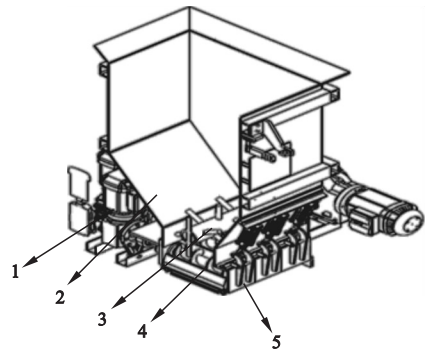
静力学仿真、模态分析和优化设计.

基于此,笔者从混凝土布料机的布料机理出发,推导布料机输送量的计算公式,仿真研究螺旋输送量影响因素对输送量的影响效果,分析各影响因素对输送量影响的灵敏度,为人工神经网络输送量智能预报模型的输入量确定提供合理依据.

## 1 布料机输送机理分析

### 1.1 混凝土布料的工艺过程分析

预制混凝土构件生产主要采用混凝土布料机进行生产,混凝土布料机主要有摊铺式和螺旋式两种.螺旋布料机因布料更加精细而被广泛使用<sup>[13]</sup>,其结构如图1所示.笔者主要研究螺旋混凝土布料机输送量模型影响因素对输送量的影响效果.



1.螺杆电机;2.布料机料斗;3.打散棒;4.螺杆;5.出料口。

图1 布料机结构图

Fig. 1 The structure of distributor

布料机的料斗用来存储布料生产用的混凝土.在布料生产过程中,打散棒一直旋转用于搅拌混凝土,防止混凝土离析导致输送困

难,甚至造成堵塞.混凝土经过打散棒搅拌落在螺杆上,每根螺杆由电机单独驱动旋转,旋转时螺旋叶片与混凝土相互作用,实现螺旋输送物料,具体效果如下:螺旋叶片不停地推拨混凝土,使混凝土随着螺旋叶片滚动上升,在到达一定位置时向下塌落;同时混凝土还会对螺旋叶片之间的空隙进行填充,并随着螺旋叶片的旋转沿轴向布料口方向运动.因此,混凝土在输送过程中并非是单纯的直线运动,而是轴向和径向运动复合而成的一种复杂空间运动<sup>[14-15]</sup>.

### 1.2 混凝土输送的运动状态分析

由布料工艺过程可知,混凝土在螺旋输送过程中是一种空间运动,将混凝土离散化后,其颗粒受力情况及对应运动速度方向分别如图2、图3所示<sup>[16-17]</sup>.

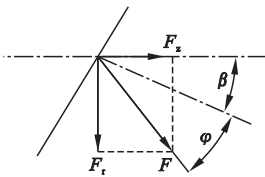


图2 混凝土颗粒受力分析

Fig. 2 Free body diagram of concrete particle

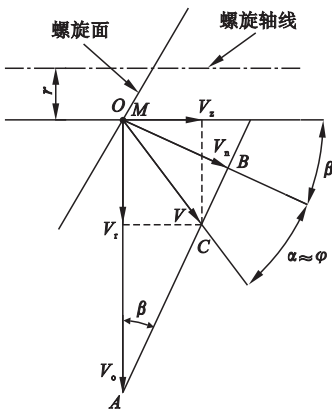


图3 混凝土颗粒速度分析

Fig. 3 Velocity analysis of concrete particle

图2中, $F_z$ 为轴向力; $F_r$ 为切向力; $F$ 为合力; $\varphi$ 为外摩擦角, $\varphi = \arctan \mu$ , $\mu$ 为物料与螺旋面的摩擦系数; $\beta$ 为螺旋升角, $\beta = \arctan [s / (\pi D)]$ ; $s$ 为螺距.图3中, $r$ 为混凝土颗粒到螺旋轴线的距离; $V_z$ 为轴向速度;

$V_r$ 为切向速度; $V$ 为合速度也是颗粒运动的实际速度; $V_n$ 为颗粒相对于螺旋面的速度; $V_0$ 为牵连速度即叶片上O点的线速度; $\alpha$ 为颗粒受切向力作用使合力偏离螺旋面法线的角度.

结合图2和图3可知,混凝土被输送过程中,主要受两个方向力,其一是轴向力 $F_z$ ,使混凝土沿轴向运动,产生轴向运动速度 $V_z$ ;其二是切向力 $F_r$ ,使混凝土随着螺旋叶片旋转,产生切向运动速度 $V_r$ .这两个方向的合力为 $F$ ,使混凝土产生合速度 $V$ ,也是颗粒运动的实际速度.结合螺杆几何尺寸参数,可得混凝土所受轴向力和切向力计算式:

$$F_z = F \cos(\beta + \varphi), \tag{1}$$

$$F_r = F \sin(\beta + \varphi). \tag{2}$$

为方便分析速度对输送量的影响,下面结合螺杆几何尺寸,推导切向速度 $V_r$ 和轴向速度 $V_z$ 的计算式,过程如下.

在 $\triangle OAB$ 和 $\triangle OCB$ 中,可得合速度 $V$ 与牵连速度 $V_0$ 的关系为

$$V \cos \varphi = V_0 \sin \beta. \tag{3}$$

将牵连速度 $V_0$ 与螺旋叶片直径 $D$ 的关系式 $V_0 = \frac{\pi D n}{60}$ 代入式(3)可得合速度为

$$V = \frac{\pi D n}{60} \frac{\sin \beta}{\cos \varphi}. \tag{4}$$

合速度 $V$ 与轴向速度 $V_z$ 以及切向速度 $V_r$ 的关系为

$$V_r = V \sin(\varphi + \beta), \tag{5}$$

$$V_z = V \cos(\varphi + \beta). \tag{6}$$

将式(4)代入式(5)和式(6)可得:

$$V_r = \frac{\pi D n}{60} \frac{\sin \beta \sin(\varphi + \beta)}{\cos \varphi}, \tag{7}$$

$$V_z = \frac{\pi D n}{60} \frac{\sin \beta \cos(\varphi + \beta)}{\cos \varphi}. \tag{8}$$

$\mu = \tan \varphi$ ,将其代入式(7)和式(8)可得:

$$V_r = \frac{\pi D n}{60} \sin \beta (\sin \beta + \mu \cos \beta), \tag{9}$$

$$V_z = \frac{\pi D n}{60} \sin \beta (\cos \beta - \mu \sin \beta). \tag{10}$$

## 2 输送量影响因素研究

### 2.1 布料机输送量影响因素的归类分析

根据螺杆横截面的混凝土流量求出布料机4根螺杆总的输送量计算式如下:

$$Q = 3\ 600 \times 4 \times A \rho V_z. \quad (11)$$

式中: $Q$ 为输送量, $t/h$ ;  $A$ 为混凝土在布料口截面的填充面积, $m^2$ ;  $\rho$ 为混凝土的堆积密度, $t/m^3$ .

$$A = \Psi c \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}. \quad (12)$$

式中: $D$ 为螺旋叶片直径, $m$ ;  $d$ 为螺旋轴直径, $m$ ;  $\Psi$ 为填充系数;  $c$ 为倾斜修正系数.

将式(10)和式(12)代入式(11)得:

$$Q = 592n(D^3 - Dd^2) \times \psi c \rho \sin\beta (\cos\beta - \mu \sin\beta). \quad (13)$$

由式(13)可知,影响输送量的因素有螺旋转速、螺旋叶片直径、螺旋轴直径、填充系数、倾斜修正系数、被输送物料的堆积密度、螺旋升角和摩擦系数.综合分析考虑上述影响因素,可将它们归类整理为影响螺旋输送量的结构因素和工艺因素.

#### (1) 结构因素

结构因素是与螺杆结构尺寸相关的参数,包括螺旋叶片直径、螺旋轴直径、倾斜修正系数、螺旋升角.因混凝土布料机螺杆是水平安装的,螺杆轴与水平面的倾斜角为 $0^\circ$ ,所以一般取常数1<sup>[18]</sup>.而其他因素都为变量,需要进一步进行研究,所以影响布料机输送量的结构因素可归结为螺旋叶片直径、螺旋轴直径、螺旋升角.

参考我校布料机实验台结构尺寸参数,当研究其中某一个因素变量时,将其余结构因素取值固定:螺旋叶片直径取75 mm,螺旋轴直径取32 mm,螺旋升角取 $13^\circ$ .

#### (2) 工艺因素

工艺因素是与混凝土输送工艺状态相关的参数,包括螺旋转速、填充系数、被输送物料的堆积密度和摩擦系数.

一般情况下混凝土的堆积密度取值为 $2\ 500\ kg/m^3$ .而其余因素都为变量,所以影响布料机输送量的工艺因素可归结为螺旋转速、填充系数和摩擦系数.

参考布料机实验台设备工艺参数,当研究其中某一个因素变化时,将其余工艺因素的取值固定:螺旋转速取 $30\ r/min$ ,填充系数取0.3,摩擦系数取0.4.

### 2.2 各因素对输送量影响效果的仿真分析

基于推导的输送量计算式(13),利用数值仿真软件,采用单一变量法,仿真分析结构因素和工艺因素中螺旋输送量影响因素对输送量的影响效果.仿真中用到的螺杆结构参数,主要结合我校试验台可装配螺杆结构参数范围,以便后期实验数据比较验证.

#### 2.2.1 结构因素影响效果分析

##### (1) 螺旋叶片直径

螺旋叶片直径用于描述螺杆截面最大直径,对布料机输送量有直接影响.对于螺旋叶片直径的取值主要参考实验布料机尺寸,仿真螺旋叶片直径范围确定为 $50 \sim 80\ mm$ .为尽可能全面反映螺旋叶片直径对输送量的影响,依据上述参数,设置螺旋叶片直径从区间下限 $50\ mm$ 开始到区间上限 $80\ mm$ 结束,步长 $5\ mm$ ;其他参数值固定为2.1节中的值,仿真曲线如图4所示.

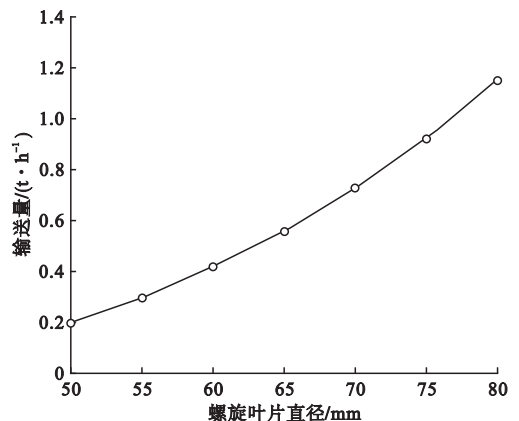


图4 螺旋叶片直径对输送量的影响效果

Fig. 4 Effect of spiral blade diameter on conveying capacity

由图4可知,螺旋叶片直径与输送量为单调递增关系,即随着螺旋叶片直径增加输送量也增加,输送量变化范围为0.2~1.19 t/h,变化跨度为0.99 t/h。综上,螺旋叶片直径越大,输送量越大。

### (2) 螺旋轴直径

螺旋轴直径是影响螺旋叶片内承载混凝土多少的参数,因此其对输送量也有直接影响。对于螺旋轴直径的取值主要参考实验布料机尺寸,仿真螺旋轴直径范围确定为17~47 mm。为尽可能全面反映螺旋轴直径对输送量的影响,依据上述参数,设置螺旋轴直径从区间下限17 mm开始到区间上限47 mm结束,步长5 mm,其他参数值固定为2.1节中的值,仿真曲线如图5所示。

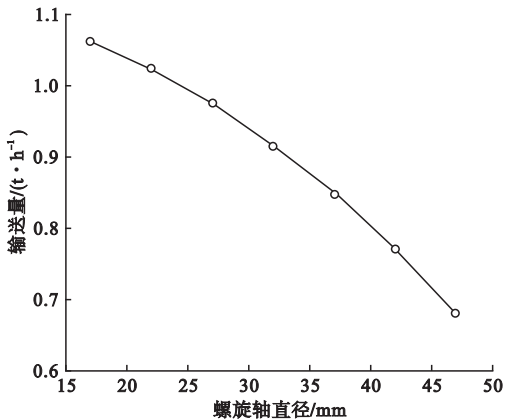


图5 螺旋轴直径对输送量的影响效果

Fig. 5 Effect of spiral shaft diameter on conveying capacity

由图5可知,螺旋轴直径与输送量为单调递减关系,即随着螺旋轴直径的增加输送量减小,输送量变化范围为0.679~1.061 t/h,变化跨度为0.382 t/h。综上,螺旋轴直径越大,输送量越小。

### (3) 螺旋升角

螺旋升角是螺纹的中径展开的圆周线与螺旋线的夹角。对于螺旋升角的取值主要参考实验布料机尺寸,仿真螺旋升角范围确定为3~63°,为尽可能全面反映螺旋升角对输送量的影响,依据上述参数,设置螺旋升角从

区间下限3°开始到区间上限63°结束,步长10°,其他参数值固定为2.1节中的值,仿真曲线如图6所示。

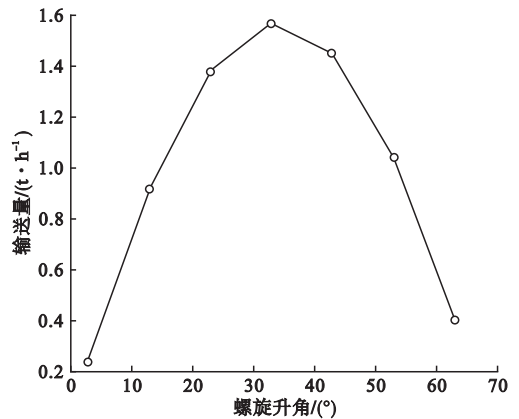


图6 螺旋升角对输送量的影响效果

Fig. 6 Effect of spiral rising angle on conveying capacity

由图6可知,输送量先随螺旋升角单调递增,而后单调递减,存在极大值点。输送量最大变化范围为0.235~1.555 t/h,最大跨度为1.32 t/h。且在33°左右时达到最大。综上,螺旋升角存在一个临界值,使输送量达到最大。

### 2.2.2 工艺因素影响效果分析

#### (1) 螺旋转速

螺旋转速用于描述螺杆旋转速度的快慢,式(13)只是通过螺杆横截面的混凝土体积流量计算的,只考虑了轴向速度,并没有反映出输送过程中混凝土实际运动轨迹,所以无法通过式(13)真实反映输送量变化规律。而离散元软件可以反映出混凝土的真实运动轨迹。所以下面将基于标定的混凝土模型,使用离散元软件辅助仿真分析螺旋转速对输送量的影响效果。

对于螺旋升角的取值主要参考实验布料机的设置。仿真螺旋转速范围确定为20~60 r/min。为尽可能全面反映螺旋转速对输送量的影响,参考以上参数,设置螺旋转速的值为20,30,40,45,50,55,60 r/min,其他参数值固定为2.1节中的值,进行离散元仿真(见图

7). 仿真结果如表 1 所示,为了更直观看出影响效果,将表 1 中数据仿真为曲线(见图 8).

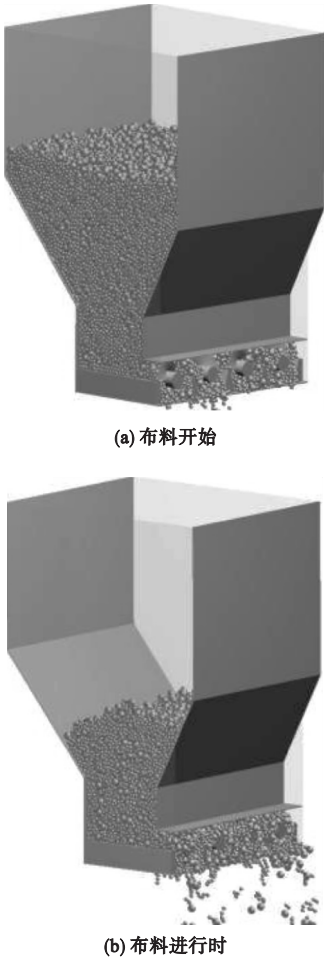


图 7 布料机输送量模拟仿真

Fig. 7 Conveying capacity simulation of distributor

表 1 不同螺旋转速下的输送量

Table 1 Conveying capacity at different rotational speeds

螺旋转速/(r·min <sup>-1</sup> )	输送量/(t·h <sup>-1</sup> )
20	0.90
30	0.97
40	1.17
45	1.41
50	1.52
55	2.00
60	1.62

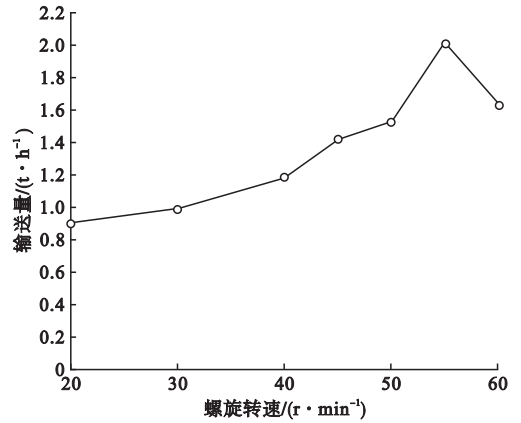


图 8 螺旋转速对输送量的影响效果

Fig. 8 Effect of spiral speed on conveying capacity

由图 8 可知,输送量随螺旋转速先单调递增,到达最大值后又减小. 输送量变化范围为 0.9~2 t/h,变化跨度为 1.1 t/h. 综上,螺旋转速存在一个最大值,使输送量达到最大.

(2) 填充系数

填充系数是指混凝土输送过程中,混凝土横截面积所占螺杆横截面积的比值. 对于填充系数的取值主要参考物料填充系数表格<sup>[19]</sup>,仿真填充系数范围确定为 0.2~0.5. 为尽可能全面反映填充系数对输送量的影响,依据上述参数,设置填充系数从区间下限 0.2 开始到区间上限 0.5 结束,步长 0.05;其他参数值固定为 2.1 节中的值,仿真曲线如图 9 所示.

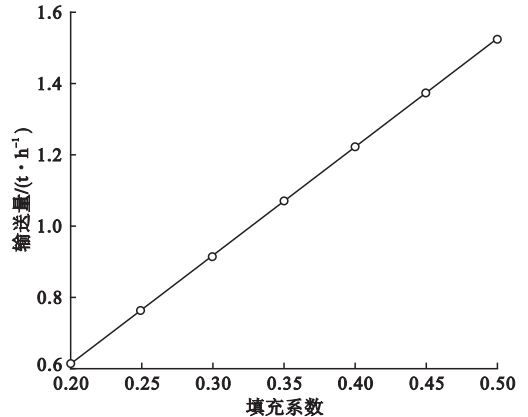


图 9 填充系数对输送量的影响效果

Fig. 9 Effect of fill coefficient on conveying capacity

由图9可知,输送量随填充系数单调递增,即填充系数越大输送量越大.输送量变化范围为0.61~1.524 t/h,变化跨度0.914 4 t/h.综上,输送量随填充系数的增加而增大.

### (3) 摩擦系数

笔者研究的摩擦系数是指混凝土与螺旋叶片间的摩擦.摩擦取值主要参考经验数值<sup>[20]</sup>:仿真摩擦系数范围确定为0.2~0.8.为尽可能全面反映摩擦系数对输送量的影响,依据上述参数,设置摩擦系数从区间下限0.2开始到区间上限0.8结束,步长0.1,其他参数值固定为2.1节和2.2节中的值,仿真曲线如图10所示.

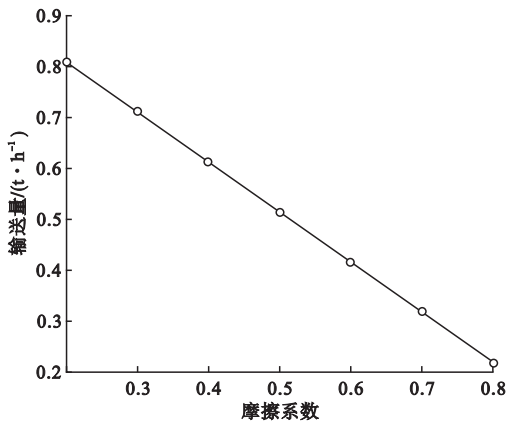


图10 摩擦系数对输送量的影响效果

Fig. 10 Effect of friction coefficient on conveying capacity

由图10可知,输送量随摩擦系数单调递减,即随着摩擦系数增大输送量减小.输送量变化范围为0.81~0.217 t/h,变化跨度为0.593 t/h.综上,输送量随摩擦系数的增大而减小.

## 3 影响因素的灵敏度分析

将过多不重要的影响因素确定为神经网络输入量,将使神经网络过于复杂,影响神经网络输送量智能预报模型的计算效果,所以接下来通过灵敏度分析来筛选神经网络输送量智能预报模型的输入量.

由2.2节得出各因素对输送量的影响效果及输送量最大变化范围.各因素对输送量影响的灵敏度如图11所示.

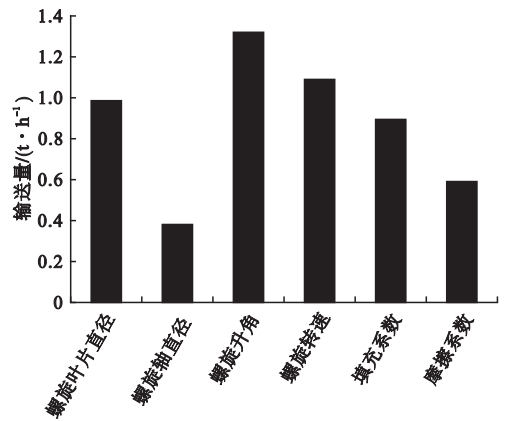


图11 各因素对输送量影响的灵敏度

Fig. 11 Sensitivity of the influence factors on the conveying capacity

由图11可知,影响因素对输送量的影响灵敏度从大到小依次为螺旋升角、螺旋转速、螺旋叶片直径、填充系数、摩擦系数、螺旋轴直径.所以将螺旋叶片直径、螺旋升角、螺旋转速、填充系数及摩擦系数五个影响因素作为神经网络输送量智能预报模型的输入量比较合理.

## 4 结论

(1) 归类螺旋输送量主要影响因素,并仿真分析出它们与输送量之间的关系:随着螺旋叶片直径、填充系数的增加,布料机输送量增加;随着螺旋叶片的摩擦系数、螺旋轴直径增加,布料机输送量减小;螺旋升角与螺旋转速都存在一个最佳值,使得输送量最大.

(2) 基于各因素对输送量的影响效果研究,分析各因素对输送量影响的灵敏度,得出主要影响因素中的螺旋叶片直径、螺旋升角、螺旋转速、填充系数及摩擦系数更适合作为神经网络输送量智能预报模型的输入量.

### 参考文献

- [1] 江勇. 小型混凝土预制构件数控生产线技术研究与应用[J]. 物流工程与管理, 2015, 37

- (8):116-117.  
(JIANG Yong. Research and application on small precast concrete production line of CNC technology[J]. Logistics engineering and management,2015,37(8):116-117.)
- [2] LI D, ZHOU P, FAN L, et al. Research on multi-agent control system for concrete distribution[C]. Romania: IOP conference series-materials science and engineering,2018.
- [3] 孙红,孙健,吴玉厚,等.大型智能PC构件自动化生产线简介[J].混凝土与水泥制品,2015(3):35-38.  
(SUN Hong, SUN Jian, WU Yuhou, et al. Introduction to large intelligent PC component automation production line[J]. China concrete and cement products,2015(3):35-38.)
- [4] 于明,任霞,刘兴刚,等.混凝土预制构件关键技术研究及成套装备开发[J].科技创新导报,2015,12(30):67-68.  
(YU Ming, REN Xia, LIU Xinggang, et al. Research on key technology of concrete prefabricated components and development of complete sets of equipment[J]. Science and technology innovation guide,2015,12(30):67-68.)
- [5] DADHICH S, SANDIN F, BODIN U, et al. Field test of neural-network based automatic bucket-filling algorithm for wheel-loaders[J]. Automation in construction,2019,97:1-12.
- [6] YU S, ZHU K, DIAO F. A dynamic all parameters adaptive BP neural networks model and its application on oil reservoir prediction[J]. Applied mathematics and computation,2008,195(1):66-75.
- [7] ISLAM B, BAHARUDIN Z, NALLAGOWNDEN P. Development of chaotically improved meta-heuristics and modified BP neural network-based model for electrical energy demand prediction in smart grid[J]. Neural computing and applications,2017,28(S1):811-891.
- [8] AHAMAD K U, RAJ P, BARBHUIYA N H, et al. Surface water quality modeling by regression analysis and artificial neural network[C]//Advances in waste management. Singapore: Springer,2019:215-230.
- [9] MENACER F, DIBI Z, KADRI A. Modeling a new acetone sensor based on carbon nanotubes using finite elements and neural network[J]. The European physical journal plus,2018,133(6):238-254.
- [10] 梅潇,王伟,刘海洋,等.大倾角螺旋输送机中物料颗粒的运动特性研究[J].机械设计与制造,2018(增刊2):19-22.  
(MEI Xiao, WANG Wei, LIU Haiyang, et al. Research on kinematic characteristic of particles in steeply inclined screw conveyor[J]. Machinery design & manufacture,2018(S2):19-22.)
- [11] 毛广卿,王志山,关二旗.全充填的水平圆管螺旋输送机物料运动分析及输送量计算[J].河南工业大学学报(自然科学版),2018,39(6):94-98.  
(MAO Guangqing, WANG Zhishan, GUAN Erqi. Material movement analysis and conveying amount calculation of fully filled horizontal pipe spiral conveyor[J]. Journal of Henan university of technology (natural science edition),2018,39(6):94-98.)
- [12] 杨健,李新闻,柳伟兵.挤出式奶油输送机特性分析及优化设计[J].食品与机械,2018(7):78-82.  
(YANG Jian, LI Xinwen, LIU Weibing. Characteristic analysis and optimization design of extrusion cream conveyor[J]. Food & machinery,2018(7):78-82)
- [13] 陶贤伟,谢卫国.浅谈滑模式水泥混凝土摊铺机螺旋布料器的设计[J].建设机械技术与管理,2007,20(2):86-88.  
(TAO Xianwei, XIE Weiguo. The design of spiral dumper of slip mode cement concrete pavers[J]. Construction machinery technology & management,2007,20(2):86-88.)
- [14] 李民孝.沥青混合料摊铺机螺旋分料器设计计算及参数分析[J].筑路机械与施工机械化,2000,17(4):2-4.  
(LI Minxiao. Design calculation and parameter analysis of screw separator of asphalt mixture paver[J]. Road construction machinery and construction mechanization,2000,17(4):2-4.)
- [15] 邱文东,游小平,朱奇,等.沥青砼摊铺机螺旋分料器输送机理及参数改进[J].公路与汽运,2008(1):143-147.  
(QIU Wendong, YOU Xiaoping, ZHU Qi, et al. Transport mechanism and parameter improvement of spiral separator in asphalt concrete paver[J]. Highway and transportation,2008(1):143-147.)
- [16] ZHANG P, JIANG Y, LI Y, et al. Experimental and simulative failure analysis of AISI 316L stainless steel screw shaft[J]. Journal of failure analysis and prevention,2018(18):799-808.
- [17] GAIVORONSKII V F, POSTORONKO A I. Effect of geometric parameters on the productivity of a screw conveyor vacuum-press when molding ceramic green mixes[J]. Glass & ceramics,2010,67(1/2):56-58.
- [18] 王仁标. L型螺旋卸船机水平螺旋输送机机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.  
(WANG Renbiao. Study on the mechanism of horizontal spiral conveyor of L-type spiral ship unloader[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2013.)
- [19] 向冬枝,徐余伟.螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].水泥技术,2010(1):29-33.  
(XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Selection and determination of design parameters of spiral conveyor[J]. Cement technology,2010(1):29-33.)
- [20] 贾宏禹,吴帮雄,孙文斌.水平螺旋输送机输送规律及摩擦系数的影响研究[J].机械设计与制造,2017(9):236-239.  
(JIA Hongyu, WU Bangxiang, SUN Wenbin. Study on the transport law and friction coefficient of horizontal spiral conveyor[J]. Machinery design & manufacture,2017(9):236-239.