

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.04.006

卷接设备工艺风力系统动态特性仿真研究

陈飞虎^{1,2}, 龚光彩¹, 廖曙光², 戴石良³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410081; 2. 长沙麦融高科股份有限公司, 湖南 长沙 410000;
3. 湖南核三力技术工程有限公司, 湖南 衡阳 421001)

摘要:建立了卷接设备集中工艺风力系统的模型。首先根据动力源和阻力部件等的耦合关系建立了系统的数学模型;然后根据 MATLAB/SIMULINK 仿真软件的特点,采用子系统封装等方法建立了系统的仿真模型;并以实测值验证并修改仿真模型,使其达到工程精度。该模型可以对系统的不同工况进行分析,计算系统能耗,并用直观的图形输出显示节能效果,从而为工程人员设计及优化调度提供参考。

关键词:卷接设备;集中工艺风力系统;MATLAB/SIMULINK 仿真软件;管网系统;优化调度

中图分类号:TS43 文献标志码:B 文章编号:1673-0062(2019)04-0060-07

Simulation Study on Dynamic Characteristics of Wind Power System of Rolling Equipment

CHEN Feihu^{1,2}, GONG Guangcai¹, LIAO Shuguang², DAI Shiliang³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410081, China;
2. Changsha Maxxom high-Tech Co. Ltd., Changsha, Hunan 410000, China;
3. Hunan Sunny Technology Engineering Co. Ltd., Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: A wind power system model of the centralized process is established. Firstly, the mathematical model of the system is established according to the coupling relationship between the power source and the resistance components, and then the simulation model is established by means of subsystem encapsulation according to the characteristics of the SIMULINK simulation software. The model can analyze the different working conditions of the system, calculate the energy consumption of the system, and display the energy-saving effect with intuitive graphical output, so as to provide a reference for engineers to design and optimize scheduling.

收稿日期:2018-07-11

基金项目:湖南省重点研发计划项目(S2017GXHYFGY0543)

作者简介:陈飞虎(1982-),男,工程师,博士,主要从事数据中心高效冷却方面的研究。E-mail: maxxom121@163.com

key words: coiling equipment; centralized process wind system; SIMULINK simulation software; pipe network system; optimal scheduling

0 引言

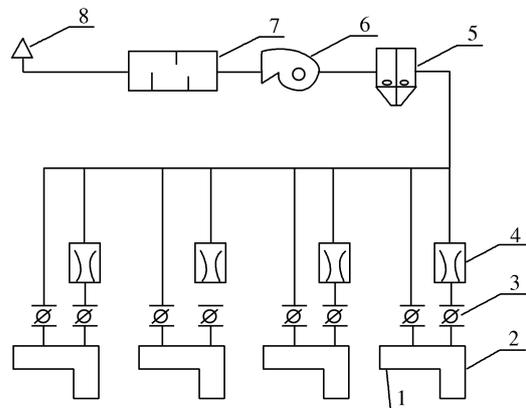
卷接机组集中工艺风力供给技术已在我国大多数卷烟厂应用,主要用于卷接机组的工艺风力供给与除尘^[1]。由于卷烟工艺(特别是单支卷烟重量偏差)的要求对集中工艺风力供给系统的稳定性要求越来越高,目前主要通过理论分析,结合数值方法及实验测试的方法,对卷接机组集中工艺风力系统运行的稳定性及控制方法进行了研究。由于管网结构在系统建立时已确定,卷烟机与滤嘴接装机所需风力参数不等而相互干扰对系统稳定性的影响已设置有风压平衡器控制^[2]。已有文献主要通过两个方面研究卷接机组集中工艺风力系统运行稳定性的控制:1)除尘器脉冲喷吹造成系统压力波动的控制^[3];2)卷接机组的随机停、开对系统稳定性影响的控制^[4-5]。除尘器内压力波动对系统稳定性影响的研究,主要是对除尘器近风机端压力值进行监测并分析其监测数据,结合除尘器脉冲喷吹的PLC控制程序进行对比,查找出造成除尘器压力波动过大的主要原因。针对脉冲喷吹产生的系统管道压力波动提出并安装了除尘器负压补风装置,使得除尘器在满足清灰能力要求下压力波动从高达704 Pa控制在170 Pa之内,满足了生产工艺的要求^[6]。卷接机组的随机停、开对系统稳定性影响的控制研究,工程实际中卷接机组停机有生产计划安排停机、故障临时停机。针对停机原因采用两种调节方式:阀门开度控制调节、变频控制调节。对实际工程中阀门类型的选择进行实验测量,利用MATLAB软件对阀门的局部阻力系数进行拟合,验证百分比型阀门选择的正确性。变频器在系统中主要作用是节能,主要对变频器变频控制的安全范围进行分析。

目前卷烟厂常规的集中工艺风力系统,其设计的最大供给能力与所有机组生产时所需最大工艺风力相匹配^[7]。当烟机出现断支、跑条等故障时,吸丝带上无烟丝,烟机阻力减小,系统负压减小,所在支路风量加大;烟机检修时阀门关闭,则某一支路风量为零,这样就造成了系统总风量的富余。本系统采用的是风机的变频调节实现恒压控制,在保证风机运转平稳的同时实现风机的节能。本文将研究卷烟厂集中工艺风力系统在不同

工况下,如开机台数的不同、离风机远近不同的烟机停机对系统风量、压降、稳定性和能耗的影响。寻找系统的最优设计方案、最佳工况和控制方案。

1 卷接设备集中工艺风力系统的物理模型

针对卷烟厂较常用的卷接机组,以4台PAS-SIM机组为仿真对象。系统设计风量为11 000 m³/h;总阻力15 000 Pa。选用DLMC2/4/15滤袋式除尘器;风机为10-19-8D离心风机;选F4A消声器;卷烟机支管130 mm;接装机支管159 mm;设计风速15 m/s;本系统采用的是恒压控制,测点设定压力值:-11 000 Pa。图1为集中工艺风力系统示意图。



1—卷烟机;2—接装机;3—蝶阀;4—风压平衡器;5—除尘器;6—风机;7—消声器;8—风帽。

图1 集中工艺风力系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concentrated process wind system

2 集中工艺风力系统的数学模型

根据质量守恒定律,流体网络中每个压力节点的流量之和为0^①:

$$\sum_{i=1}^m q_{mi} = 0 \quad (1)$$

式中, q_{mi} 为第*i*个支路流入节点的流量。

① ZHANG Z. Cigarette Making and End Joining Machine's central wind craft and power system investigation. The sixth nucleus industry research institute, 2007: 135-141.

根据流体运动动量方程

$$p_1 - p_2 = R \cdot q^2 \quad (2)$$

式中, R 为管道的阻力系数; p_1, p_2 为管道的进、出口压力, Pa。

将其线性化, 得到网络节点计算方程。

计算过程中, 做以下假设:

- 1) 支路具有固定的截面积;
- 2) 与外界没有热量交换;
- 3) 节点内的工质没有压缩性;
- 4) 支路的导流系数可变, 它是流体的压力、流量、阀门开度等参数的函数。

2.1 管道的数学模型

管道阻力损失相比系统总阻力很小, 对其建模, 并使其与风机、阀门等数学模型统一^[9]。

根据动量方程:

$$p_1 - p_2 = R \cdot q^2 \quad (3)$$

由于动量方程中含平方项, SIMULINK 软件不能直接求解, 对其线性化:

$$q = \frac{1}{\sqrt{R}} \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \quad (4)$$

2.2 风机的数学模型

风机的运行工况是由风机的性能曲线和与他们相连的管路特性所决定的, 风机的性能曲线是指在不同的动页角度下, 流量与压头的关系。根据厂家提供的实验性能曲线, 建立风机的数学模型, 并将其线性化^[10]:

$$p_2 - p_1 = a_0 \cdot N^2 + a_1 \cdot N \cdot q + a_2 \cdot q^2 \quad (5)$$

式中, a_0, a_1, a_2 为风机的特性系数, 与动页角度、工质密度有关; N 为风机的规格化转速。

整理得:

$$q = -0.5 \cdot C_2 \cdot N + \sqrt{0.25 \cdot (C_2 \cdot N)^2 - (C_1 \cdot N^2 - C_3 \cdot \Delta P)} \quad (6)$$

其中, C_1 等于 $\frac{a_0}{a_2}$; C_2 等于 $\frac{a_1}{a_2}$; C_3 等于 $\frac{1}{a_2}$ 。

对其线性化, 得到风机特性的线性化模型。

$$q = A'_{10} + A_{10} \cdot (p_2 - p_1) \quad (7)$$

其中, A'_{10} 等于 $-0.5 \cdot C_2 \cdot N$; A_{10} 等于

$$\sqrt{\frac{0.25(C_2 \cdot N)^2 - C_1 \cdot N^2}{\Delta P_0^2} + C_3 \cdot \Delta P_0}$$

2.3 阀门的数学模型

系统应用的蝶阀其流量特性为等百分比特性, 由于系统负荷的变化, 导致个支路流量也随之变化, 这就要求对管网进行调节以实现这种改变了的流量分配, 根据动量方程:

$$p_1 - p_2 = R \cdot q^2 \quad (8)$$

及:

$$P_1 - P_2 = \varepsilon \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

其中, ε 为局部阻力系数, V 为流速, m/s。

可以推出:

$$p_1 - p_2 = \frac{8\varepsilon}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} q^2 \quad (10)$$

式中, d 为管径。

将其线性化, 可以得到阀门的数学模型:

$$q = A \cdot (P_1 - P_2) \quad (11)$$

其中, A 为线性化导流系数, 等于

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{8\varepsilon}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} (P_1 - P_2)_0}}$$

2.4 风压平衡器的数学模型

由于卷接机组中接装机要求的风力与卷烟机的风力差异较大(根据不同机型的不同风压相差 1 000 Pa ~ 3 000 Pa, 且风量也有较大差异), 为了保证卷烟烟丝的均匀性和松紧程度, 机组要求风力系统提供的风力具有相对的稳定性, 卷烟厂卷接设备工艺风力要求压力调节范围较宽, 而流量调节的范围相对较小。现有的蝶阀等调节阀均是用来调节流量的, 满足不了风力平衡调节的要求。配套开发的中间文丘里管带旁路风压平衡器采用不对称的分支路。根据文丘里管的结构特点和阻力特性, 可满足风量变化小风压变化大的特定要求, 结构见图 2^[11]。

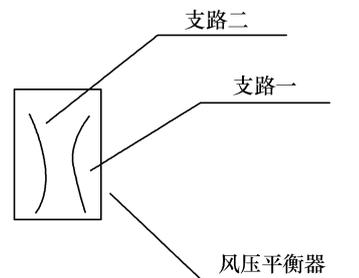


图 2 风压平衡器结构即支路示意图

Fig.2 Schematic diagram of wind pressure balancer structure

为推出风压平衡器阻力系数与开度的关系, 先对其定义: 设文丘里管调到最左端时, 风量全部经过文氏管, 此时风压平衡器阻力系数最大, 定义此时风压平衡器开度为 1; 相应地调到最右端时

开度为0。另外,定义风流经文氏管外侧的支路为支路一,流经文氏管内的支路为支路二(如图2)。

对于支路一,其流量调节特性可定义为:

$$\frac{q_1}{q_{1,max}} = 1 - K \quad (12)$$

对于支路二,其流量调节特性可定义为:

$$\frac{q_2}{q_{2,max}} = K(1 - n) + n \quad (13)$$

式中:

$$n = \frac{q_2}{q_{2,max}} \quad (14)$$

设文氏管阻力系数为常数:

$$S_2 = \text{const} \quad (15)$$

根据测试结果,文丘里管全开时下限阻力为400 Pa,能满足卷接机组的要求。根据测得的烟机风量与风压值,当卷烟机压力为9 858 Pa,接装机的压力为8 943 Pa,压差为915 Pa,卷烟机流量为0.17 m³/s,求得K为0.72,在运行时为一定值。

2.5 烟机、袋式除尘器、消声器及风帽的数学模型

1) 烟机

对于卷烟厂卷接设备工艺风力系统而言,系统内的设备往往要求同时对其流量和压力进行调节。事实上,工艺设备的阻力系数是变化的,如烟丝的松紧程度会导致烟机设备阻力系数的变化。烟机阻力不是一定值,不是风量越大就阻力越大,跟烟机的工艺状况有关。同时,系统运行时,烟机有风量的漏入,据经验值约10%^[12]。目前没有成型的烟机数学模型。本论文仿真中将烟机阻力看作定值。

2) 滤袋式除尘器

除尘器的阻力是呈周期性变化的,反吹清灰时对集中工艺风力系统的压力有影响,不过时间很短,只有不到一秒,本模型不考虑其瞬时影响,除尘器阻力取定值,为1 000 Pa^[13]。

3) 消声器

消声器的阻力取250 Pa。

4) 风帽

风帽的阻力取70 Pa。

3 集中工艺风力系统的仿真模型

3.1 管道的仿真模型

根据管道的数学模型 $q = \frac{1}{\sqrt{R}} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$, 阻力

系数R查管道阻力系数表,并用最小二乘拟合得到。1#机组管道的仿真模型:常数模块C乘以管道的位置矩阵(K₁),然后平方,乘以二次项的系数,加上一次项K(733)和常数项C₁(285)。将和乘以上次计算的结果(P₂-P₁)₀,乘以位置矩阵(-P₁₁矩阵)、值得矩阵(-P₁₁)及系数(A₂),可以得到1#机组管道的SIMULINK仿真模型,如图3^[14]。其他2#、3#及4#管道的计算方法类似。

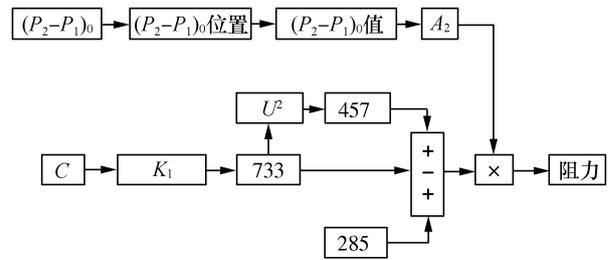


图3 管道的仿真模型

Fig. 3 The simulation model of pipeline

3.2 风机的仿真模型

根据风机所在支路模块: $A'_{10} + A_{10} \cdot (p_2 - p_1)$, 其中, A'_{10} 等于 $-0.5 \cdot C_2 \cdot N$; A_{10} 等于 $\sqrt{\frac{0.25(C_2 \cdot N)^2 - C_1 \cdot N^2}{\Delta P_0^2} + C_3 \cdot \Delta P_0}$ 。输入的数据为:对应风机的型号,风机转速N,上一步计算结果 $(P_2 - P_1)_0$ ^[15]。

如图4, C_2 与N经乘法模块得到 $C_2 \cdot N$,再用MATH平方模块SQUARE得到 $(C_2 \cdot N)^2$,结果与常数模块0.25相乘,得到 $0.25(C_2 \cdot N)^2$,所得值减去 $C_1 \cdot N^2$,将差除以 ΔP_0^2 ,然后将结果加上 $C_3 \cdot \Delta P_0$,得到 $\frac{0.25(C_2 \cdot N)^2 - C_1 \cdot N^2}{\Delta P_0^2} + C_3 \cdot \Delta P_0$,再将与进行开方,得到 A_{10} 。与风机所对应的管道的位置矩阵相乘,见图4。

3.3 阀门的仿真模型

根据蝶阀导流系数A,其中阀门开度K值为系统仿真的调节参数。根据局部阻力系数与开度的关系,经MATLAB/SIMULINK模块运算得到蝶阀的阻力系数,然后乘以蝶阀开度在系数矩阵A中的位置模块,得到蝶阀的阻力系数。同理将卷接机组的4个蝶阀相加,得到卷烟机蝶阀的阻力系数模块;同时,由上一周期算得的流量与压力值经过矩阵运算得到卷烟机蝶阀的前后压差,如蝶阀1#前后压差 $(P_{11} - P_{12})_0$,乘以所对应的位置矩阵,见图5。

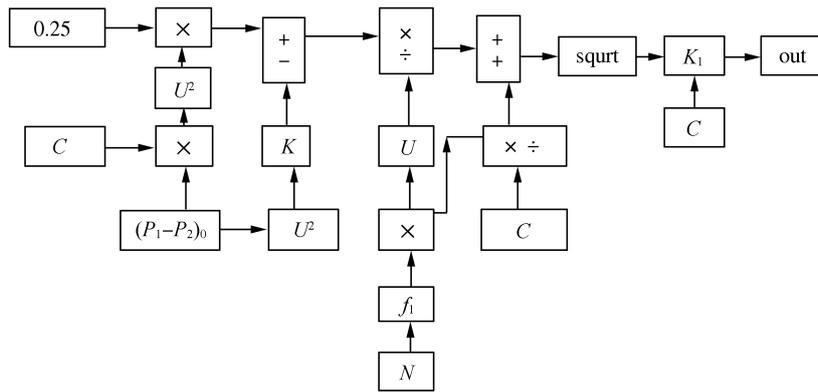


图4 风机的仿真模型图

Fig. 4 The simulation model of fan

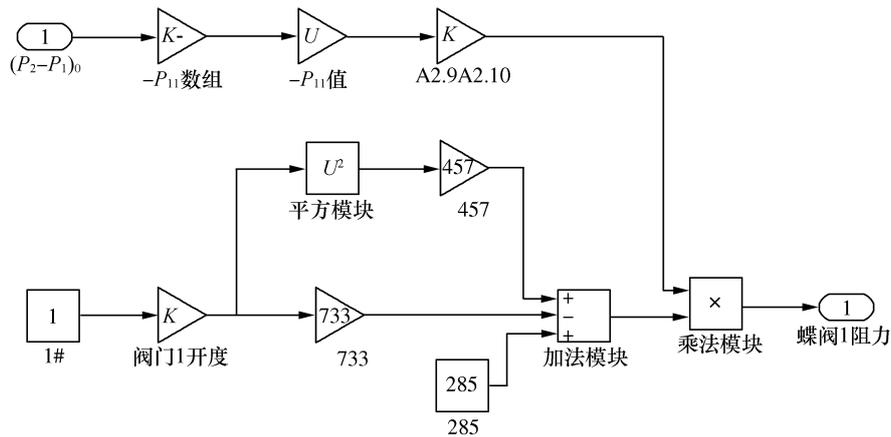


图5 蝶阀1阻力模块的仿真模型

Fig. 5 The simulation model of butterfly valve 1 resistance module

其他压降类似,乘以阀门阻力模块,再开方,

得到 $\frac{8\varepsilon}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} (P_1 - P_2)_0$, 将他被常数模块 1 除,

得到 $\frac{1}{\sqrt{\frac{8\varepsilon}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} (P_1 - P_2)_0}}$, 即 A, 见图 6。

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{8\varepsilon}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} (P_1 - P_2)_0}}$$

3.4 风压平衡器仿真模型

根据风压平衡器的数学模型,将风压平衡器的开度乘以相对的常数模块。

3.5 烟机、袋式除尘器、消声器及风帽的仿真模型

烟机、除尘器、消声器、出口等组成及计算矩阵的 B 项,其实现过程见图 6。

3.6 系统的仿真模型

将阀门 (value1, value2)、风压平衡器 (balancevalue)、管道 (pipe)、风机 (fan) 作为除数。烟机、袋式除尘器、消声器及风帽的仿真模型 (B) 作为被除数 (caculator), 将风机的转速 (frequencychangeunit) 作为输入参数。并根据经验值输入一组初始数据 (IC), 即可得出计算结果 (scope)。

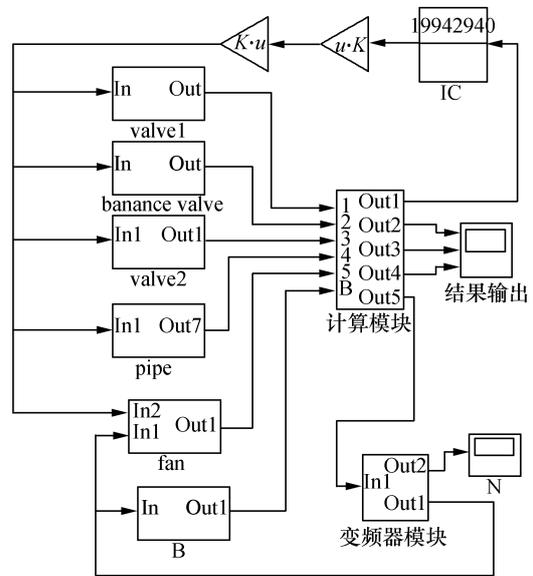


图6 卷接设备集中工艺风力系统仿真模型

Fig. 6 The simulation model of centralized process wind power system for reel equipment

4 计算结果及讨论

因为两台烟机同时停机的故障比较小,模拟了一台烟机停机时,即支路1的阀门从开始关闭到全部关闭时,系统其他支路的流量,如图7。离烟机支路越近,支路流量的变化影响越大。

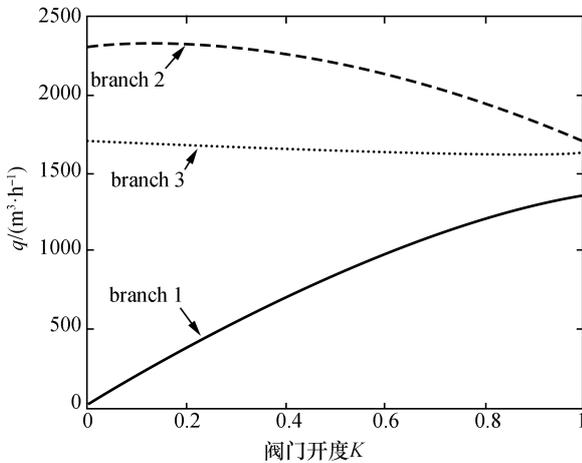


图7 支路流量与调节阀1的开度关系
Fig. 7 Relationship between branch flow and opening of regulating valve 1

图8显示了节点压力随阀门1从开始关闭到全部关闭时的变化曲线。

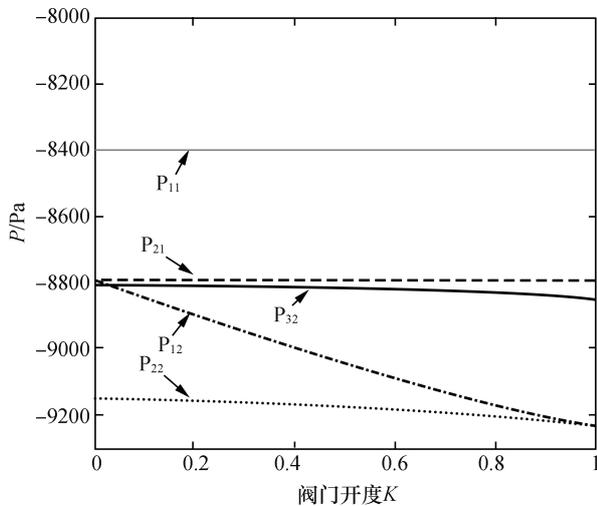


图8 压力与调节阀开度的关系
Fig. 8 The relationship between pressure and control valve opening degree

图9显示了风机转速随变频器开启时间的关系,可以看出风机在较短的时间内,约0.5 min,转速从2 950 r/min降到了2 550 r/min左右。通过

变频器可使系统节能18%左右。

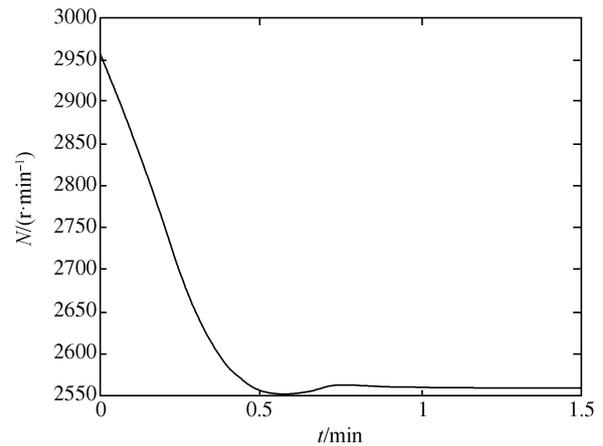


图9 风机转速与变频器运行时间的关系
Fig. 9 The relationship between fan speed and inverter running time

图10显示了支路1缺丝时各支路的流量变化曲线。

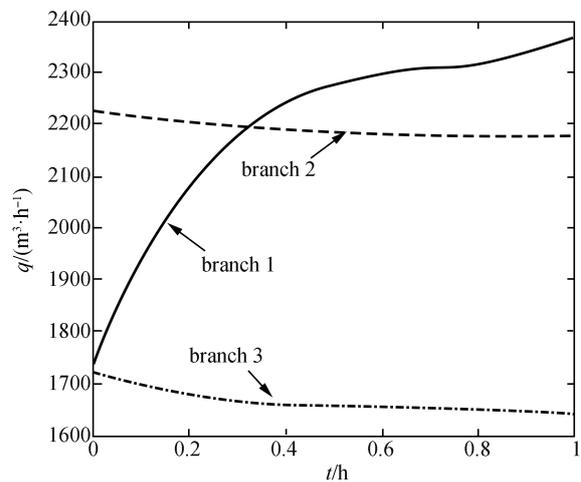


图10 支路流量与运行时间的关系
Fig. 10 The relationship between branch flow and running time

图11显示了1#烟机缺丝时风机输入功率与时间的变化曲线。

5 结论

利用 SIMULINK 建立的仿真模型,可以仿真不同工况下系统的运行状况。仿真模型能较准确的计算出所需流量、压力、风机功率等。可以预测、验证设计的合理性。对寻找系统的最佳工况和控制方案提供依据。

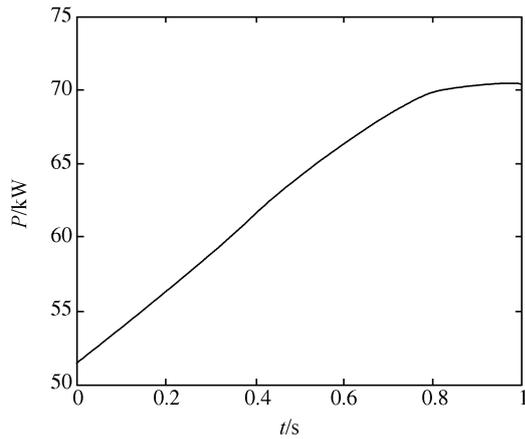


图 11 1#烟机缺丝时风机输入功率与时间的变化曲线

Fig. 11 The curves of input power VS. time of fan in 1# flue gaslacking wire

参考文献:

- [1] JOHNSON F, LARSSON G, LECKNER B. Pressure and flow fluctuations in a fluidized bed-interaction with the air-feed system[J]. *Chemical engineering science*, 2002, 57(8):1379-1392.
- [2] SWAFFIELD J A, CAMPBELL D P. The simulation of air pressure propagation in building drainage and vent systems[J]. *Building and environment*, 1995, 30(1):115-127.
- [3] WU Z, MELNIK R V N, BORUP F. Model-based analysis and simulation of airflow control systems of ventilation units in building environments[J]. *Building and environment*, 2007, 42(1):203-217.
- [4] XIE Z L, LI M, ZHANG Z. Numerical simulation of horizontal pneumatic conveying[J]. *Journal of chemical engineering chinese university*, 2006, 20(3):331-337.
- [5] 吴磊, 胡天群, 杜国峰, 等. 烟丝气力输送特性试验与仿真[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(1):123-128.
- [6] NAFEH A E S A, FARGALI H M, FAHMY F H, et al. Novel temperature control technique for a medicinal herb system powered by a photovoltaic array[J]. *International journal of green energy*, 2005, 2(1):147-156.
- [7] 李志华, 吴帅芝, 徐中洲, 等. 用 MATLAB 神经网络预测气力输送过程物料破碎率[J]. *硫磷设计与粉体工程*, 2008(4):5-8.
- [8] GORDON J M, NG K C, CHUA H T, et al. How varying condenser coolant flow rate affects chiller performance: Thermodynamic modeling and experimental confirmation[J]. *Applied thermal engineering*, 2000, 20(13):1149-1159.
- [9] ZAHEER M, ZING G R. A dynamic model of multimode vapour system for control analysis[J]. *ASHRAE transactions*, 1994, 100(1):219-228.
- [10] FOK S C, ATTA E H, EICHER L. Simulate investigation on dynamics pressure in glide angel control[J]. *Advances of engineering software*, 1995, 23(1):1-6.
- [11] ABULLOUGH W A, KINSELLA J R, PEEL D J, et al. Computational fluid dynamics modelling of electro-structured flows[J]. *International journal of modern physics B*, 2008, 15(6/7):731-740.
- [12] 陈飞虎. 卷接设备集中工艺风力系统动态仿真研究[D]. 衡阳:南华大学, 2006.
- [13] 陈飞虎, 廖曙光, 柴宁, 等. 单元式水冷多联热管系统有限时间热力学分析与能效评价[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(1):46-52.
- [14] LING L, ZHANG Q, YU Y B, et al. Simulation of a micro channel separate heat pipe (MCSHP) under low heat flux and low mass flux[J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 119(5):25-33.

(责任编辑:周泉)