

基于 CFD 的气流式皮清机内部流场

董全成¹, 冯显英¹, 张成梁²

(1. 山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061; 2. 济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022)

摘 要: 利用基于 CFD (computational fluid dynamics) 的数值分析方式, 对进口风速、排杂槽口宽度等参数改变引起的气流式皮清机内部速度场和压力场变化进行了仿真分析. 采用速度矢量分析了进口风速的影响; 进口风速为 15 m/s 时最佳, 风速过低或者过高都易于引起堵塞; 采用了压力云图及压力分布分析了排杂槽口宽度的影响; 排杂槽口宽度为 20 mm, 进口风速为 15 m/s 时无向外排风现象, 且向内补风风速最低, 清杂及落棉的综合效果最佳. 数值分析结果与试验验证结果相同, 表明用 CFD 数值分析的方式可以为气流式皮清机的运行参数调节提供优化分析.

关 键 词: 棉花; 皮棉清理; 速度场; 压力场; 计算流体力学

中图分类号: S 226.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)04-0537-05

Internal Flow Field of Flow-Through Air Lint Cleaner Based on CFD

DONG Quan-cheng¹, FENG Xian-ying¹, ZHANG Cheng-liang²

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China. Corresponding author: FENG Xian-ying, E-mail: fxing@sdu.edu.cn)

Abstract: The effects of inlet airflow velocity and notch width on the velocity field and lint cleaner pressure field were simulated using the CFD (computational fluid dynamics). The velocity vector was applied to analyze the effect of inlet airflow velocity. The lint cleaner can run normally with velocity of 15 m/s, which is easy blocked at higher and lower velocity. The pressure field contour and pressure distribution analysis were used to study the effect of notch width. Under 20 mm notch width and 15 m/s inlet airflow, no exhaust air phenomenon in lint cleaner while it has the lowest supplement air velocity, the best cleaning rate and loss lint rate. The CFD simulation results are consist to that of the experiment, indicating that the CFD analysis can optimize the operating parameters for the flow-through air lint cleaner.

Key words: cotton; lint cleaning; velocity field; pressure field; computational fluid dynamics

目前机采棉的比重越来越高,但机采棉含杂率较高,在进行多次籽棉清理后,轧出的皮棉中依然含有较多杂质,包括不孕籽、破籽、棉结等重杂,这些杂质会严重影响皮棉的轧工质量. 因此棉花加工企业一般在轧花之后,还需对皮棉进行清理,主要采取气流式皮清和锯齿式皮清. 锯齿式皮清清杂效率较高,但其通过机械旋转勾拉的方式清杂会对棉纤维产生较重的损伤,造成短绒率过高.

目前国内外对锯齿式皮清机的性能改善研究主要在锯齿辊筒转速和排杂刀数量的调节上,机械勾拉的方式并未改变^[1-6]. 气流式皮清机只是通过惯性离心力作用将皮棉中的重杂排出,没有任何机械部件对棉纤维进行勾拉,所以不会产生任何损伤,但其清杂效率较低. 研究气流式皮清机的内部流场,对其清杂机理进行分析,有助于提高其清杂效率. 文献[7-8]用气流式罗拉对锯齿式皮清

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405194,51305164); 科技支疆专项计划项目(2011AB017); 济南“泉城学者”建设工程资助项目(201109).

作者简介: 董全成(1980-),男,河北献县人,山东大学博士研究生; 冯显英(1965-),男,山东济宁人,山东大学教授,博士生导师.

机喂棉进行了研究,减少了部分机械部件对纤维的损伤。气力清杂由于其简单且不造成棉纤维损伤的清理方式,对其研究逐渐增多,会成为未来清杂的发展趋势,气流式皮清机的内部流场分析也会为气力清杂研究提供参考和依据。目前,国内外还未有用 CFD 数值分析的方式对气流式皮清机进行研究,但其他基于 CFD 的棉机加工设备分析为本文提供了借鉴。文献[9]用 Fluent 对采棉机的气力输送系统进行了模拟,找出了射流口高度与压力场和速度场之间的变化规律。文献[10]用 CFD 的方式对机采籽棉残膜分离机进行了分析,对进口风速等参数进行了优化。

1 模型建立

1.1 模型及网格划分

气流式皮清机由皮棉进口、皮棉出口、排杂槽口及输棉管道等部件组成。气流式皮清机一般安装于轧花机之后,由于轧花机毛刷或外加风机的作用,由轧花机加工出的皮棉会以一定的速度从皮棉进口进入,然后沿着输棉管道前进,随着管道越来越窄,皮棉的行进速度也越来越快。在管道最窄处有一个向上的弯曲,皮棉由于质量较轻,会跟随气流上升,从皮棉出口排出,而不孕籽、破籽和棉结等重杂由于质量较大,所产生的惯性离心力较大,会从弯曲处的排杂槽口排出。

模型的建立以山东天鹅棉机的 MQPQ-3300 气流式皮清机为参考,皮棉进口高 116 mm,宽 300 mm,皮棉出口高 106 mm,宽 300 mm,排杂槽口宽度可通过调节手柄手动调节,模型建立的排杂槽口宽度分别为 10, 15, 20, 25 和 30 mm。从皮棉进口进入后的水平输棉管道上壁倾角为 3°,下壁倾角为 9°,最窄处高度为 52 mm,弯曲角度内角为 48°,外角为 55°,弯曲之后的输棉管道为垂直上升。利用 Fluent 的前置处理软件 Gambit 对气流式皮清机进行体网格划分,网格共计划分 128 992 个,原始模型结构简图及网格示意图如图 1 所示。

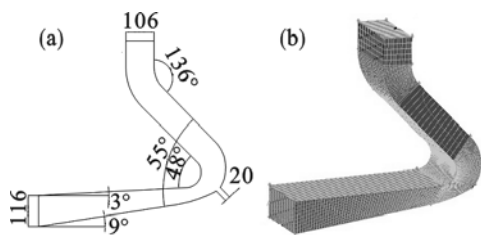


图 1 原始模型结构简图及其网格示意图

Fig. 1 Sketch and grid of flow-through air lint cleaner

(a)—结构简图; (b)—网格示意图。

1.2 控制方程

气流式皮清机中,气体流速较低,所以假设气体为不可压缩。采用拉格朗日方法,将气体相作为连续相,用 N-S 方程描述气相的流动。

气相连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

气相动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i. \quad (2)$$

式中: u_i, u_j 是气流速度在 x_i, x_j 方向的分量, m/s, x_i, x_j 代表坐标方向(直角坐标系), $i, j = 1, 2, 3$; ρ 是气体密度, kg/m³; p 是压强, N/m²; τ_{ij} 是牛顿流体黏性应力; f_i 是质量力强度。

由于皮清机中输棉管道有较大的弯曲,所以采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型使控制方程组封闭,气体湍流动能 κ 和扩散率 ε 的公式为

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + u_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \frac{u_{\text{eff}}}{\rho} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(a_\varepsilon \frac{\mu_{\text{eff}}}{\rho} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \left(C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{\kappa \rho} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right). \quad (4)$$

式中: $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$,

$$\eta = (2E_{ij} \times E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}, E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right);$$

ε 为湍动能耗散率, m²/s³; k 为湍动能, m²/s²; a_ε 和 a_k 分别为 ε 和 k 的普朗特数, $a_\varepsilon = 1.3$, $a_k = 1.0$; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为湍流模型系数,按照经验及参考,分别设定 $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, 系数 $\eta_0 = 4.34$, $\beta = 0.015$ 。

1.3 边界条件设置

进口条件:进口为速度进口,进口速度方向与进口垂直,进口速度分别为 5, 10, 15, 20, 25 和 30 m/s。

出口条件:出口分为皮棉出口和排杂槽口,均为压力出口,皮棉出口压力设为 -500 Pa,排杂槽口压力设为 0 Pa,操作压力为标准大气压。

壁面条件:壁面无滑移,粗糙度系数为 0.5。

2 结果与分析

2.1 进口风速分析

图 2 为气流式皮清机在进口风速为 5 m/s,出口压力为 -500 Pa,排杂槽口宽度为 10 mm 时内部流场的速度矢量与流线图。由图 2a 可知,气流

速度从入口开始,随着输棉管道变窄速度逐渐增加,在图中1处速度达到最大,达26 m/s,而排杂槽口处也存在较高的风速,达22 m/s。由图2b的气体流线图可以看出,排杂槽口处的气体流向为向内补风,且在槽口右上方,即图中2处出现一个涡流。

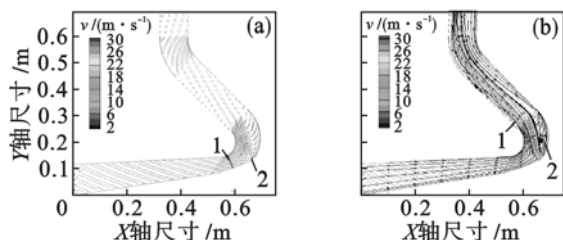


图2 速度矢量与流线图

Fig. 2 Velocity vector and streamline of airflow
(a)—速度矢量图; (b)—流线图。

气流式皮清机管道弯曲处速度如果过低,不但会使不孕籽、破籽等重杂无法排出,而且还可能导致管道堵塞。排杂槽口处出现向内补风的现象,这是由于皮棉出口处负压的存在和皮棉进口风速过低共同导致的,如果向内补风风速过高,不但会导致杂质无法排出,还可能将槽口外部的杂质回吸进入输棉管道。槽口上方的涡流是由于槽口的补风风速过高和进口风速过低共同导致,涡流的存在会使皮棉在管道翻腾旋转,而不会跟随气流上升从皮棉出口排出,极易造成气流式皮清机的堵塞。提高进口风速可以改变输棉管道弯曲处的最高速度,同时,进口风速的改变也会对涡流和补风风速产生影响。

针对进口风速为5 m/s时出现的补风、涡流等现象,分别对进口风速为10, 15, 20, 25 m/s进行了内部流场分析,其他参数与进口风速为5 m/s时一致。图3中标注1处和2处均为易产生涡流的区域。由图3a可以明显看出,在2处产生了一个涡流,而在1处未产生涡流。由图3b可以看出,在1处和2处均未产生涡流。由图3c可以看出,在1处产生了一个涡流,而在2处未产生涡流。由图3d可以看出,在1处也产生了一个涡流,且涡流区域比图3c还要大,而在2处未产生涡流。由此可见,进口风速的改变,对涡流的产生及涡流区域的大小有着直接的影响。进口风速过低,会在2处产生涡流,而且风速越低,产生的涡流区域越大。而进口风速过高,则会在1处产生涡流,风速越高,涡流区域越大,当进口风速为15 m/s时则不会产生任何涡流,可以认为此风速为较适宜的进口皮棉传送风速。

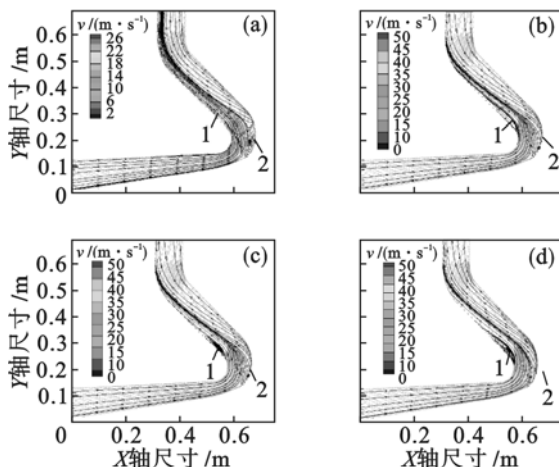


图3 不同进口风速下的速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector at different inlet airflow velocity
(a)—10 m/s; (b)—15 m/s; (c)—20 m/s; (d)—25 m/s。

皮棉出口处的负压由离心风机提供,当风机转速一定时,风机的吸风风量值及负压值是固定不变的。总风量由皮棉进口和排杂槽口的补风提供。出风量与补风量的关系式为

$$Q = v_1 t S_1 + v_2 t S_2 \quad (5)$$

式中: Q 为皮棉出口排风量, m^3 ; v_1 为皮棉进口风速, m/s ; t 为工作时间, s ; S_1 为皮棉进口面积, m^2 ; v_2 为排杂槽口补风风速, m/s ; S_2 为排杂槽口面积, m^2 。

由式(5)可知,当进口风速逐渐升高时,由于皮棉出口的总风量不变,所以排杂槽口风速会逐渐降低。排杂槽口风速降低,会减弱对杂质离心惯性力的影响,有利于杂质的顺利排出。在皮清风机内部不会产生涡流现象且满足传送速度要求的情况下,提高进口风速有利于杂质的顺利排出。

2.2 排杂槽口分析

排杂槽口的宽度对清杂、落棉均有着重要影响。槽口宽度越大,清杂效果越好,能够提高皮棉等级,但会造成落棉率升高,损失皮棉纤维,衣亏增加。为减小衣亏,对排杂槽口处进行了压力大小和压力分布分析,以期优化皮棉清理时的排杂槽口工作宽度。

槽口宽度分别为10, 15, 20, 25和30 mm,进口风速为15 m/s,出口压力为-500 Pa时,槽口处的压力云图及压力分布图如图4所示。通过压力云图可以看出槽口的上部和下部压力有所不同,借助压力分布图可以看出压力值的分布区域。

由图4a可以看出,槽口上部压力明显小于槽口下部压力,压力值均分布在负压区。槽口处直接和外部大气相通,所以负压的存在,会造成槽口向内补风。由于压力不同,槽口的下部补风速度要低于上部。补风速度低处有利于清杂,所以低压区域

面积越大清杂效果越好。

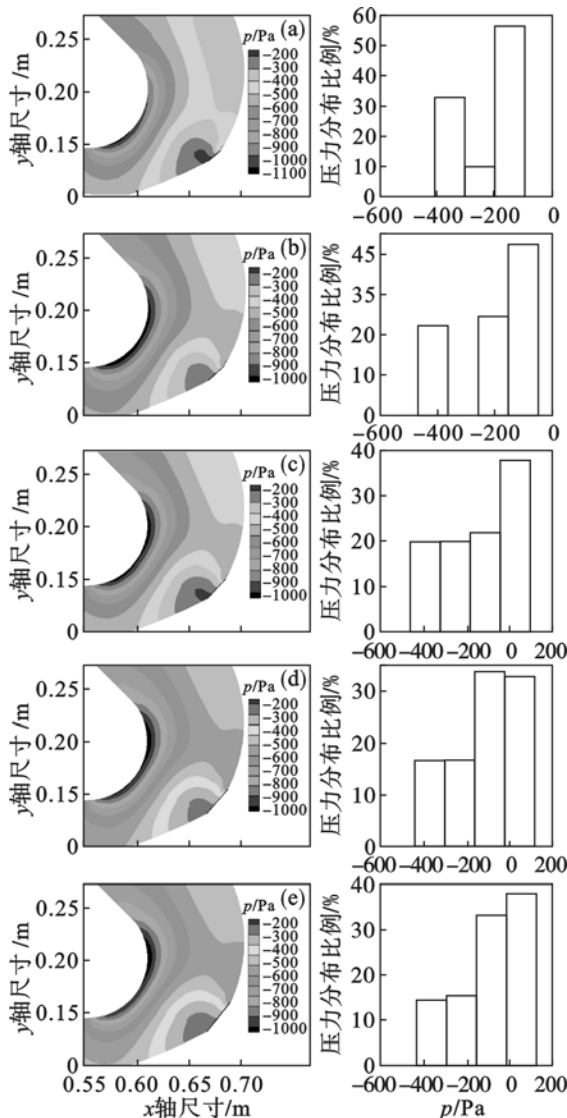


图 4 槽口压力云图及压力分布图

Fig. 4 Pressure field contour and distribution

(a)—10 mm; (b)—15 mm; (c)—20 mm;
(d)—25 mm; (e)—30 mm.

由图 4b 和图 4c 同样可以看出,排杂槽口上部压力要小于下部压力,且压力值分布均在负压区,但槽口宽度越大,排杂槽口下部压力值就越大,压力值的增加有利于降低补风速度,提高清杂效率。

由图 4d 和图 4e 可以看出,排杂槽口的上部压力小于下部压力,随着槽口宽度增加,下部压力值继续升高,而且下部压力值有一部分分布于正压区。正压区的存在会导致向外排风,虽然向外排风有利于清杂,但会导致部分棉纤维跟随气流从槽口排出,造成过多棉纤维损失,落棉率升高,从而影响整体经济效益。

综合以上分析可得,进口风速为 15 m/s 时,皮清机不易发生堵塞。进口风速为 15 m/s,排杂

槽口宽度为 20 mm 时,不会产生向外排风现象,且补风速度最低,气流式皮清机清杂和落棉的综合效果最佳。

3 试验验证

试验在新疆 149 团棉花加工二厂进行,设备采用 MQPQ-3300 型气流式皮清机。加工棉花为同一批次,含杂率及回潮率相近。三次采样籽棉的平均含杂率为 2.09%,平均回潮率为 9.47%。由于试验对棉花正常加工有较大影响,且发生堵塞后难于清理,故对进口风速只进行了 5, 15 和 25 m/s 三次试验。对排杂槽口宽度进行了 10, 20 和 30 mm 三次试验,进口风速为 15 m/s,出口压力为 -500 Pa,每次试验时间设为 60 min。

试验时,籽棉经籽棉清理和轧花后成为皮棉,进入气流式皮清机,经气流式皮清机清理后的皮棉再经过两道锯齿式皮清机清理后进入集棉风道,皮棉样本从集棉风道中采集。试验时,对气流式皮清机进行了参数调节,其他设备加工参数均保持不变,所以集棉风道中采集到的皮棉样本性状变化能够反映出气流式皮清机的参数影响。

当进口风速为 5 m/s 时,棉纤维输送速度较慢,且不能升腾,当进行 3 min 时即在气流式皮清机的水平输送棉道发生堵塞;当进口风速为 15 m/s 时能够顺畅输送棉纤维,60 min 内未发生堵塞;当进口风速为 25 m/s 时,由于风速较快,输送棉纤维量较大,而皮棉出口负压恒定,试验进行到 34 min 时,在弯曲最窄处发生堵塞。排杂槽口宽度试验中,随着槽口宽度的增加,排出的杂质中棉纤维含量逐渐增加,表明槽口宽度过大,所产生的向外排风现象会导致棉纤维大量排出,造成纤维损失过大,落棉率高。表 1 为采集到的皮棉样本及气流式皮清机排出杂质的数据。

表 1 皮棉及杂质数据

Table 1 Data of lint and foreign matter

出口 压力 Pa	进口 风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	槽口 宽度 mm	含杂率 %	杂质 数量	排杂 质量 kg
-500	15	10	0.33	32	1.83
-500	15	20	0.24	43	2.62
-500	15	30	0.19	37	2.91
-500	5	10	0.38	25	—
-500	15	10	0.33	32	1.83
-500	25	10	0.21	28	—

由表 1 可以看出,随着进口风速的提高和排

杂槽口宽度的增加,皮棉样本含杂率均呈现逐渐降低趋势,表明适当调节排杂槽口宽度和进口风速有助于提高清杂效率。在杂质数量上,进口风速和排杂槽口宽度两个参数影响均不明显。从排出杂质的质量来看,随着槽口宽度的增加,杂质质量逐渐增加。一方面是由于清杂效率的提高,另一方面则是由于排出了较多的皮棉纤维;进口风速为5和25 m/s时由于发生堵塞无有效排杂质量数据。

根据试验现象及所得数据结果可以看出,所进行的进口风速和排杂槽口宽度对气流式皮清机影响的验证,试验结果与CFD数值分析结果相同。

4 结 论

1) 当风速为15 m/s时,皮清机不易发生堵塞,为较适宜风速。风速过低,达不到皮棉传送的最低风速要求,易发生堵塞;风速过高,进棉量过大,皮棉出口负压恒定,也易造成堵塞。

2) 槽口宽度为20 mm时,清杂和落棉的综合效果最优。槽口宽度过小,虽然棉纤维损失较低,但清杂效果差;槽口宽度过大,清杂效果好,但会造成大量的棉纤维损失。

3) CFD数值分析方式可以优化气流式皮清机的加工参数。

参考文献:

[1] Delhom C D, Boykin J C, Martin V, et al. Approaches to characterize lint removed during processing [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(4): 198–206.

[2] Baker K D, Hughs E, Foulk J. Cotton quality as affected by changes in spindle speed [J]. *Journal of the Textile Institute*, 2013, 104(7): 731–744.

[3] Patil P G, Padole P M, Agrawal J F, et al. Effect of roller speed and moisture content of cotton on ginning rate, lint quality and electric energy consumption in double roller gins [J]. *Textile Research Journal*, 2007, 77(9): 635–644.

[4] Mourad K. Cotton fiber length distribution modality alteration in ginning and mill processing [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(3): 363–369.

[5] Armijo C B, Gillum M N. Modifying the stationary knife on a roller gin stand to gin upland cotton [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(5): 777–785.

[6] Gillum M N, Armijo C B. Optimizing the frequency of the rotary knife on a roller gin stands [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2000, 43(4): 809–817.

[7] Gino J M, Anthony W S. Field evaluations of air and saw lint cleaning systems [J]. *The Journal of Cotton Science*, 1998(3): 53–61.

[8] Sui R X, Byler R K. Air-bar cotton lint cleaner [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012, 28(2): 173–177.

[9] 田虎楠, 王春耀, 王学农, 等. 采棉机气力输棉系统内部流场的数值模拟研究 [J]. *农机化研究*, 2011(12): 28–31. (Tian Hu-nan, Wang Chun-yao, Wang Xue-nong, et al. Cotton-picking machine pneumatic conveyance cotton system of internal flow field numerical simulation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011(12): 28–31.)

[10] 坎杂, 郭文松, 张若宇, 等. 网状滚筒式机采籽棉残膜分离机的设计 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 95–99, 401. (Kan Za, Guo Wen-song, Zhang Ruo-yu, et al. Design of mesh roller-type separator for machine-harvested seed cotton and film remnant [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 95–99, 401.)

(上接第531页)

[5] 刘宏志. TBM及盾构机设备状态监测与故障诊断实用技术综述 [J]. *隧道建设*, 2007, 27(6): 86–89. (Liu Hong-zhi. Practical technology for status monitoring and malfunction diagnosis of equipment of TBM and shield machines [J]. *Tunnel Construction*, 2007, 27(6): 86–89.)

[6] 贾林. 数据挖掘技术及应用的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005. (Jia Lin. Research on data mining technology and application [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2005.)

[7] 刘继清, 黄金花. 基于改进决策树算法的设备故障智能诊断模型 [J]. *制造业自动化*, 2010, 33(4): 30–33.

(Liu Ji-qing, Huang Jin-hua. Intelligent fault diagnosis method for equipments based on improved decision tree algorithm [J]. *Manufacturing Automation*, 2010, 33(4): 30–33.)

[8] 张天瑞, 代沅兴, 赵海峰, 等. 全断面掘进机关键部件特征参数预处理研究 [J]. *中国工程机械学报*, 2013, 11(6): 474–479. (Zhang Tian-rui, Dai Yuan-xing, Zhao Hai-feng, et al. Research on preprocessing of characteristic parameters of key components of tunnel boring machine [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2013, 11(6): 474–479.)