

钻削参数对皮质骨钻削力的影响及预测

顾春玉, 钱 炜

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

✉875192225@qq.com; qyc0510@163.com



摘 要: 为探索皮质骨钻削工艺参数对钻削轴向力的影响, 防止临床手术过程中因钻削力过大造成骨损伤, 基于专业金属切削软件Advantage对麻花钻钻削皮质骨进行了有限元分析, 并通过皮质骨钻削实验验证了有限元分析的准确性。此外, 在仿真数据的基础上, 通过多元线性回归得到了皮质骨钻削力的预测数学模型。结果表明: 随着钻头直径和进给速度的增大, 钻削力增大; 随着转速的增加, 钻削力减小。因此, 在骨钻孔过程中应选取较小的钻头直径与进给速度, 并适当提高转速, 以提高钻骨手术的质量。

关键词: Advantage; 皮质骨; 钻削力; 预测模型

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Influence and Prediction of Drilling Parameters on Cortical Bone Drilling Force

GU Chunyu, QIAN Wei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

✉875192225@qq.com; qyc0510@163.com

Abstract: In order to explore the influence of cortical bone drilling process parameters on the axial force of drilling, and to prevent bone damage caused by excessive drilling force during clinical surgery, this paper proposes a finite element analysis of twist drill drilling cortical bone based on Advantage—professional metal cutting software. The accuracy of the finite element analysis is verified by the cortical bone drilling experiment. In addition, on the basis of simulation data, a predictive mathematical model of cortical bone drilling force is obtained through multiple linear regression. Results show that the drilling force increases with the increase of drill diameter and feed rate. With the increase of rotating speed, the drilling force decreases. Therefore, in the process of bone drilling, smaller diameter and feed speed should be selected, and the rotating speed should be increased appropriately to improve the quality of bone drilling surgery.

Keywords: Advantage; cortical bone; drilling force; prediction model

1 引言(Introduction)

在传统的骨科手术中, 通常对骨材料进行钻孔、铣削和锯切等类似于工业制造应用的操作^[1-2]。而在这些加工操作中, 往往都要求骨材料在加工过程中具有低损伤、最小侵入时间和时间成本等要求^[3]。其中, 钻孔在骨科手术过程中十分常见, 钻削力过高会对钻孔周围组织造成损伤, 同时也会导致钻削温度升高, 因此对骨骼钻孔过程钻削力的研究有着十

分重要的意义。

很多学者在这方面进行了研究。杨毅欣等人^[4]通过改变普通麻花钻的顶角与螺旋角, 降低了在相同工艺参数下的猪胫骨钻削轴向力和钻削温度; 白小帆等人^[5]通过低频轴向振动的辅助方式辅助骨钻削加工, 降低了传统骨钻削的钻削轴向力和钻削温度; 娄德钰^[6]通过对传统克氏针进行分屑槽设计改变, 设计了具有分屑槽和前角的新式克氏针, 并研究了设计

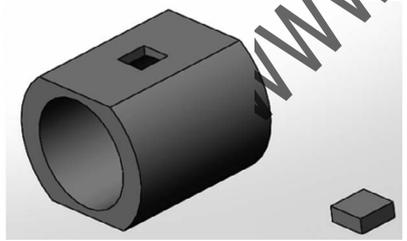
参数对克氏针钻削皮质骨的力热影响；ALAM等人^[7]通过有限元分析仿真了皮质骨平面切割力，并进行了相应的实验与数值分析，同时对骨材料切屑进行了观测。

在这些研究分析中，他们大多着重优化骨钻孔的钻削刀具参数和辅助加工方式，从而提高钻骨质量，并没有对工艺参数的影响进行深入研究。本文通过专业切削软件Advantage进行皮质骨钻削仿真，分析工艺参数对轴向力的影响，并通过实验验证模型准确性，在正交仿真实验数据的基础上，通过多元线性回归模型建立了皮质骨钻削力的预测数学模型，为骨钻孔手术提供一定的理论指导。

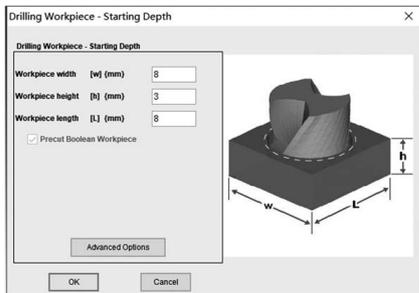
2 Advantage三维皮质骨钻削模型(3-D model of cortical bone drilling quality based on Advantage)

2.1 钻削三维模型的建立

Advantage切削仿真分为2D与3D两大类，由于钻削加工垂直方向上的进给运动，因此只能选用3D分析。在模型建立的开始，要求设定钻削状态，主要分为Entrance、Starting Depth、Exit，分别表示从外部钻入工件、一定深度内的钻孔和钻出工件三种钻削状态。本文主要研究麻花钻头钻入骨骼表层后，在钻削稳定状态下的钻削力和钻削温度状况。由于钻尖的顶角具有一定的长度，钻头需要在一定进给后才能完全钻入工件，因此选用Starting Depth分析模式，使钻头在钻削开始时即没入工件，切削刃与工件完全接触，如图1(a)所示。由于人的股骨形状并非规则圆柱，可假定从其内部取一个规则小块进行分析，如图1(b)所示，因此工件设定为规则长方体，长宽均为8 mm，高度为3 mm。



(a)Starting Depth模式



(b)皮质骨块模型的建立

图1 骨骼模型的建立

Fig.1 Establishment of the bone model

2.2 皮质骨钻削材料参数

皮质骨是一种天然复合材料，从横观来看它具有各向同性的特点，从正交方向上来看它又有各向异性的特点。本文将皮质骨作为各向同性材料进行研究，钻头采用通用医疗麻花钻，其材料参数如表1所示。

表1 钻头和皮质骨材料属性

Tab.1 Material properties of drill and cortical bone

材料	钻头	皮质骨
密度/kg/m ³	7,840	1,700
杨氏模量/Gpa	210	13.8
屈服强度/Mpa	608	85
比热/J/kg·℃	490	1,260
泊松比	0.3	0.35
导热系数/W/m·℃	47.7	0.38

材料的宏观本质结构运动关系主要反映了一定微观变形速度条件下的各种宏观摩擦应力随着微观应变的速度变化而发生变化的运动规律，而这些变化规律又直接受到微观应变、应变运动速率、温度、时间、摩擦应力系数等各种因素的直接影响，因此选用合适的本构模型对于有限元仿真有着十分重要的意义^[8]。Advantage软件自带有Power Law(幂指数材料模型)、Drucker Prager和用户自定义三种材料本构模型设置。Johnson-Cook本构模型是一种描述材料在高温应变、大尺度变形等多种情况下温度比较理想的温度本体结构仿真模型，它不仅可以直接反映三维材料应变率硬化特性和应变硬化特性，也可以直接表现三维材料的应变温度本体特点，在三维材料切削过程仿真中应用较广，所以本文主要选用Johnson-Cook本构模型作为皮质骨骼类材料的温度本体结构仿真模型。该模型的应力流动量和应力系数表达式结构如式(1)所示，皮质骨的Johnson-Cook模型参数如表2所示。

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中：

- A——屈服应力(MPa)；
- B——加工硬化模量(Mpa)；
- C——应变敏感系数；
- n——硬化系数；
- T_m——材料熔点(℃)；
- T_r——室内温度(℃)；
- ε——应变；
- ε₀——参考应变。

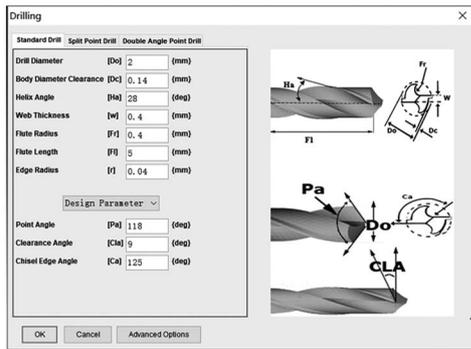
表2 Johnson-Cook模型参数

Tab.2 Parameters of Johnson-Cook model

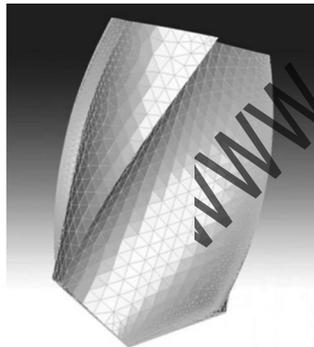
A	B	C	n	m	ϵ	T_m	T_r
50	101	0.03	0.08	1.0	0.001	1,573	293

2.3 钻头模型的建立

通用国际标准麻花钻的钻芯几何形状一般都是固定的，我国有关国家标准和国际有关工业刀具机械设计使用手册一般都要给出六个几何形状描述性的参数：直径、钻芯厚度、顶角、螺旋角、外缘后角以及横刃倾角^[9]。Advantage软件在钻削仿真中可以通过设定标注麻花钻参数自动生成麻花钻头。本文选用的钻头直径为2—4 mm，螺旋角28°，横刃倾角125°，顶角118°，如图2(a)所示；自动生成的标准麻花钻头如图2(b)所示。其余默认设置不变。



(a)标准麻花钻头设计参数



(b)标准麻花钻头模型

图2 麻花钻头

Fig.2 Twist drill

2.4 钻削工艺参数的选定

临床手术中对骨骼的钻削大多采用手持电钻进行钻孔，通常对骨骼进行钻削的手持电钻主轴转速在空载状态下不超过3,000 r/min^[10]。对于钻骨的进给速度，由于是手术操作者人为对手持电钻施加压力进行进给，过高的进给速度会增加手持电钻进行手术的难度，且对骨骼造成较大的损伤，因此钻骨手术中的进给速度不宜过高。综合这些因素，参照其

他学者对骨骼进行钻削实验研究过程中选用的切削速度和进给速度，在本文实验过程中设定的切削参数如表3所示。在Advantage中，需要将进给速度转变为每齿进给量，并设置初始深度与工件初始温度。由于该分析是在一定深度下进行的，因此只需观察钻削的某一瞬间即可，不需要长时间钻削，经过调试在旋转90°之后轴向力趋于稳定，并可在一定程度上节省分析时间。

表3 实验因素表

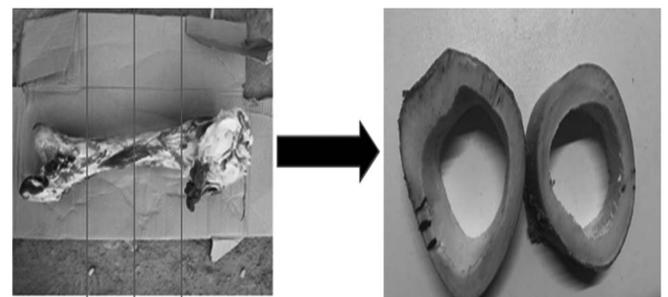
Tab.3 Test factor table

序号	实验因素		
	钻头直径/mm	进给速度/mm/min	转速/rpm
1	2	30	600
2	3	50	900
3	4	70	1,200
4	90		1,500

3 皮质骨钻削实验(Experiments on cortical bone drilling)

3.1 实验试样的制备

本文试样选取牛股骨，因为牛骨的力学性能与人骨的性能最为相似。将牛股骨表面及内部软组织清洗干净，选取中间段圆柱部分，通过电锯进行切段，确保断面水平光滑，如图3所示，以方便夹具夹持。



新鲜牛大骨

皮质骨试样

图3 皮质骨试样制备图

Fig.3 Diagram of cortical bone sample preparation

3.2 实验仪器及实验设计

主要实验仪器如表4所示。在多功能钻床上通过压板固定Kistler测力仪，在测力仪上安装夹具，夹持皮质骨试样。采用2 mm直径钻头钻通皮质骨，分别在定转速为600 rpm与进给速度为60 mm/min的条件下进行测力实验，每组重复进行三次，通过电脑采集钻削力的变化情况。实验设备和实验流程如图4所示。

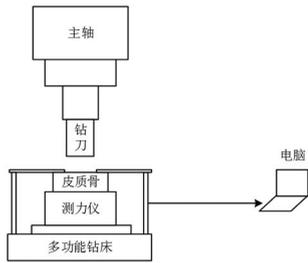
表4 实验仪器

Tab.4 Instrument for the experiments

主要设备	设备型号
机床	多功能钻床Robot Drill
测力仪	Kistler 9347C
刀具	标准麻花钻



(a)实验设备图



(b)实验流程图

图4 实验设备和实验流程图

Fig.4 Experimental equipment and experimental flow chart

4 仿真与实验结果分析(Analysis of simulation and experimental results)

图5为皮质骨钻削的三维有限元仿真图，骨钻在一定深度内按预定工艺参数钻削，获得皮质骨钻削动态瞬时钻削力，图6、图7为仿真结果。图6表明在转速不变的情况下，皮质骨钻削轴向力随着进给速度的增大而增大，大小为20—50 N；图7表明在进给速度不变的情况下，皮质骨钻削力随着转速的增大而减小，大小为20—40 N。对比皮质骨钻削实验数据，如表5所示，皮质骨钻削力的仿真值与实际实验值相差在5 N之内，仿真误差在10%以内，具有可靠性。

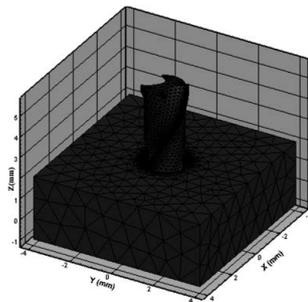


图5 皮质骨钻削仿真三维图

Fig.5 Three-dimensional simulation diagram of cortical bone drilling

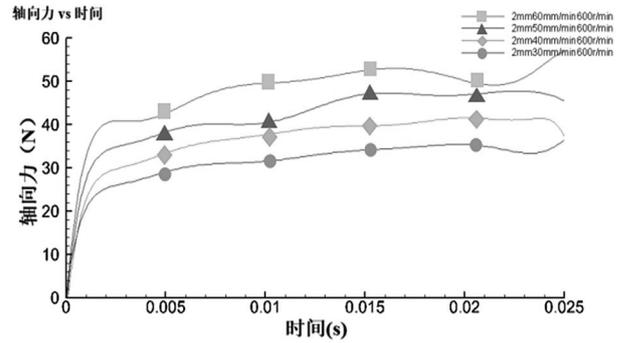


图6 不同进给速度下的轴向力图

Fig.6 Axial force diagram at different feed speeds

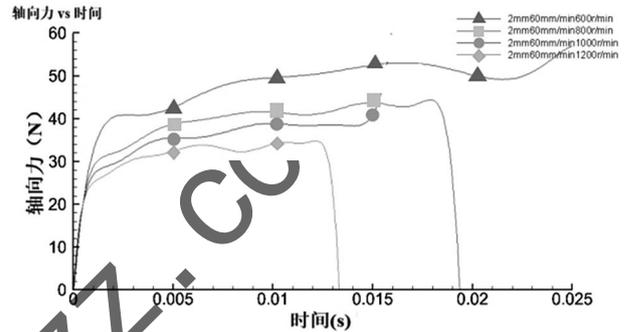


图7 不同转速下的轴向力图

Fig.7 Axial force diagram at different rotation speeds

表5 仿真实验值对比表

Tab.5 Comparison table of simulated and experimental values

进给速度/mm/min	转速/rpm	实验轴向力/N	仿真轴向力/N	误差/%
30	600	30.86	30.14	2.3
40	600	39.02	36.65	6.1
50	600	46.27	49.05	6.0
60	600	47.36	51.92	9.6
60	800	39.02	41.17	5.5
60	1,000	34.47	35.35	2.6
60	1,200	28.49	29.04	1.9

5 皮质骨钻削力预测模型的建立(Establishment of a prediction model for cortical bone drilling force)

5.1 正交仿真实验设计

正交实验设计是研究多因素多水平的一种设计方法，它是根据正交性从全面实验中挑选出部分有代表性的组合进行实验，这些具有代表性的实验具备“均匀分散，齐整可比”的特点。正交实验设计是分式析因设计的主要方法，是一种高效率、快速、经济的实验设计方法^[11]。通过数据分析软件SPSS，根据上文中选取的工艺参数水平，设计正交实验如表6所示，并根据实验号进行仿真实验，结果如下。

表6 正交仿真实验表

Tab.6 Orthogonal simulation test table

实验号	直径/mm	进给速度/mm/min	转速/rpm	轴向力/N
1	3	40	1,200	38.56
2	3	30	800	36.21
3	2	30	1,200	24.50
4	4	40	600	56.38
5	4	30	1,000	40.13
6	2	50	1,200	31.46
7	2	30	600	30.14
8	2	60	800	41.17
9	4	60	1,200	65.34
10	2	40	1,000	27.61
11	2	40	800	27.93
12	2	60	1,000	35.35
13	3	60	600	54.41
14	4	50	800	61.25
15	2	50	600	49.05
16	3	50	1,000	48.33

5.2 多元线性回归模型的建立

回归分析用来评估变量之间关系的统计过程，解释自变量X与因变量Y的关系，这里采用一般多元线性回归模型^[12]将正交实验的数据通过MATLAB进行多元线性回归分析，得到轴向力预测模型为：

$$F = 30.41 + 0.72 \times D + 0.89 \times f - 0.07 \times n + 0.19 \times D^2 - 0.01 \times f^2 + 2.92e^{-5} \times n^2 + 0.13 \times D \times f + 0.004 \times D \times n - 2.89e^{-4} \times f \times n \quad (2)$$

其中，F为轴向力，D为钻头直径，f为钻削进给速度，n为主轴转速。表7为该预测数学模型的模型统计量表，其中包括R²统计量、F统计量及其P值，以及误差方差的估计值。R²值为0.97，表明该模型可以拟合97%的实验数据，且P值小于0.05，拟合效果显著。

表7 模型统计量表

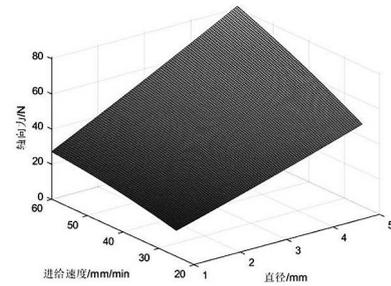
Tab.7 Model statistics table

R ²	F	P	K
0.97	21.11	7.09e ⁻⁴	12.02

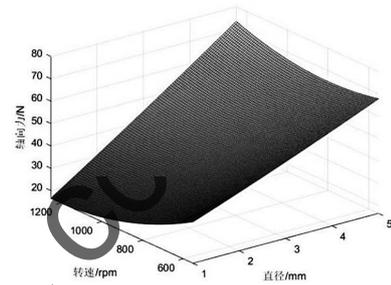
5.3 结果分析

图8为钻削力与钻头直径、钻削进给速度以及钻头转速之间的回归曲面图，从图8(a)、图8(b)、图8(c)中可以看出，对钻削力影响最大的参数是钻头直径，其次是进给速度，最后是转速，并且直径与进给速度和转速之间的交互影响同时影响着钻削力的大小。这是因为钻削力主要是由钻头的横刃与

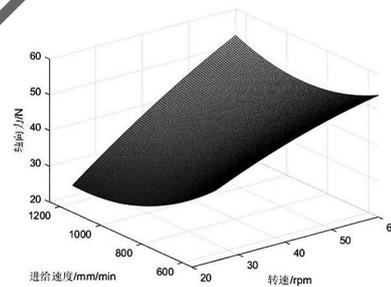
切削刃产生的，钻头直径的增大直接影响了横刃与切削刃的大小，从而导致钻削力的增大。而相对于转速，进给速度的快慢在非高转速的情况下对钻削力的影响更大。



(a)直径与进给速度对钻削力的影响



(b)直径与转速对钻削力的影响



(c)进给速度与转速对钻削力的影响

图8 钻削参数对钻削力的影响

Fig.8 Influence of drilling parameters on drilling force

6 结论(Conclusion)

本文基于专业切削软件Advantage建立了皮质骨钻削的三维有限元模型，仿真皮质骨钻削轴向力的大小，并设计皮质骨钻削实验对模型进行了验证。通过正交仿真实验获得的皮质骨钻削力数据，对其进行多元线性回归，获得了皮质骨钻削轴向力的预测数学模型。结果表明：皮质骨钻削轴向力随着直径与进给速度的增加而增大，随着转速的增加而减小；同时对于钻削力影响最大的是钻头直径，其次是进给速度，最后是钻头转速。因此，在医疗手术过程中，应尽可能地选取较小直径的钻头与进给速度，并在此基础上采用较高的转速，从而达到降低手术过程中骨钻孔的轴向力的效果。

参考文献(References)

[1] 王成勇,陈志桦,陈华伟,等.生物骨材料切除理论研究综述[J].

- 机械工程学报,2021,57(11):2-32.
- [2] 柏伟,潘鹏飞,舒利明,等.骨组织超声辅助切削切屑形成与裂纹扩展机理[J].机械工程学报,2021,57(11):69-77.
- [3] SINGH G, BABBAR A, JAIN V, et al. Comparative statement for diametric delamination in drilling of cortical bone with conventional and ultrasonic assisted drilling techniques[J]. Journal of Orthopaedics, 2021, 25:53-58.
- [4] 杨毅欣,王成勇,秦哲,等.医疗钻头钻削力和钻削温度的试验研究[J].机械设计与制造,2010,11:118-120.
- [5] 白小帆,侯书军,李慨,等.轴向低频振动辅助皮质骨钻削的钻削力和温升[J].中国机械工程,2021,32(03):321-330.
- [6] 姜德钰.克氏针结构优化及骨钻削实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [7] ALAM K, MUHAMMAD R, SILBERSCHMIDT V. In vitro experimental and numerical analysis of forces in plane cutting of cortical bone[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 799/800:509-514.
- [8] 冷慧杰,王晓渡.基于单向拉伸累进加载实验的皮质骨后屈服本构模型[J].医用生物力学,2009,24(S1):101-102.
- [9] 康德纯,ARMAREGO E J A.通用标准麻花钻几何形状与参数的数学描述[J].工具技术,1998,08:9-13.
- [10] 施勤,张文.骨科常用实验技术方法[M].苏州:苏州大学出版社,2017:85.
- [11] 黄晓玉,王兰会.SPSS 24.0统计分析[M].北京:中国人民大学出版社,2021:138.
- [12] 刘海旭,武庆东,曹潇俊,等.基于响应曲面法的304不锈钢化学机械抛光工艺参数优化[J].金刚石与磨料磨具工程,2021,41(2):89-95.

作者简介:

顾春玉(1997-),男,硕士生.研究领域:机械设计理论,生物制造.
钱 炜(1964-),男,硕士,副教授.研究领域:机械设计理论,机器人机构学.

(上接第44页)

流失率,为银行积累固定客户。

5 结论(Conclusion)

大数据时代给各行各业提供了更多利用数据的机会,在信贷业务中存在诸多不确定因素,银行应及时综合多方面因素,根据形势调整信贷策略。本文针对银行向中小微企业发放贷款问题,依据熵权法、K均值聚类和BP神经网络对信贷策略问题进行模型求解,以123家有信贷记录企业和302家无信贷记录企业的财务数据为样本进行实证检验,从人脉占有率、市场流通率、市场稳定率、企业盈利率四个影响因素对有信贷记录企业和无信贷记录企业的相关数据集进行分析,最终给出合适的信贷策略选择方案。

信贷数据是信贷业务中的重要部分,为了实现精准分析数据的目标,在分析信贷风险时,银行需要对数据进行深入统计和挖掘,可通过对多种算法模型进行组合,综合分析企业实力、供求关系等方面信息,建立信贷授权额度模型,优化信贷资源整体配置效率,加强信贷风控系统的控制和管理。模型中分析问题、解决问题的一些综合性的方法,以及信贷风险量化分析的一些思想,对于其他的数学问题仍可使用,可推广到各行业的实力评价与决策等应用中。

参考文献(References)

- [1] 李美玲.H商业银行信贷业务全面风险管理体系研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [2] 唐恬.商业银行中小企业信贷风险策略研究[J].经营与管理,2021(04):154-158.
- [3] 李越洋.基于熵权-TOPSIS的PPP项目融资风险评价[J].价值工程,2019,38(05):69-72.
- [4] 朱文雅.熵权法在银行经营绩效评价中的应用[J].中国乡镇企业会计,2019(02):150-151.
- [5] OOSTERLEE C W, GRZELAK L A. Mathematical modeling and computation in finance with exercises and Python and MATLAB computer codes[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2019:3-15.
- [6] 李钰博,裴宇恒,高晓亮.中小微企业的信贷决策问题研究[J].营销界,2020(29):163-165.
- [7] 杨君岐,任瑞,阚立娜,等.基于BP神经网络模型的商业银行风险评估研究[J].会计之友,2021(05):113-119.
- [8] XU M L, XIONG D P, YANG M Y. Risk recognition and risk classification diagnosis of bank outlets based on information entropy and BP neural network[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2020, 38(2):1531-1538.

作者简介:

王沼翔(1999-),男,本科生.研究领域:大数据分析.
葛 琳(1978-),女,博士,讲师.研究领域:网络信息安全,大数据分析,区块链.