

基于神经网络的聚四氟乙烯复合材料 摩擦系数实时识别

任华新

(辽宁对外经贸学院,大连 116033)

摘 要 基于神经网络,对聚四氟乙烯(PTFE)复合材料摩擦系数实时识别进行了研究,在此阶段中,可以对材料的物理性质进行实时监控,通过人工神经网络模型结构来对 PTFE 复合材料的摩擦系数进行实时识别,从而为后续复合材料的加工工艺提供实时监控的理论依据和支撑。采用 BP 算法训练的神经网络均可进行任意精度逼近,但在实际网络训练中,非线性作用函数类型、训练样本数量等均可能降低网络模型精度。采用非线性函数最小二乘曲线拟合的线性算法表明,该线性化处理方法是正确的,为已知材料性能时,快速识别摩擦系数提供了一种有效的手段。

关键词 摩擦系数,聚四氟乙烯复合材料,BP 算法,实时识别

Real-time identification of friction coefficient of PTFE composite based on neural network

Ren Huaxin

(Liaoning University of International Business,Dalian 116033)

Abstract Based on neural network,the real-time identification of friction coefficient of PTFE composites was studied.Through on-line monitoring of physical parameters,the real-time identification of friction coefficient of PTFE can be realized by using artificial neural network model,which provided basic support for real-time control and real-time prediction of intelligent deep drawing.Neural networks trained by BP algorithm can be approximated with arbitrary accuracy,but in actual network training,the type of non-linear function and the number of training samples may reduce the accuracy of network model.The linear algorithm of least squares curve fitting with non-linear function shown that the linearization method was correct and provided an effective means for fast identification of friction coefficient when material properties were known.

Key words friction coefficient,PTFE composite material,BP algorithm,real-time identification

聚四氟乙烯(PTFE)属于一种具有广泛应用的
热塑性塑料^[1-3],其化学稳定性非常强,可连续在
-190~260℃条件下使用,自润滑性非常优异,且在
塑料中,其静摩擦系数最低,PTFE 具有独特的全氟
碳结构,化学稳定性优异,具有不黏性,且能耐高低
温,在纺织印染、石油化工和航空航天等领域具有广
泛的应用,但由于其耐磨性差,使其适用范围受到一
定限制^[4]。因此,通过填充合适材料对 PTFE 进行
改性,从而提高其耐磨性受到科研工作者的广泛关
注。聚合物基润滑材料的特点是动静密封性能好、
轻质、减震抗噪效果较好^[5],其中在航动密封结
构中,PTFE 基自润滑材料应用广泛^[6]。神经网络属

于一门交叉学科,发展非常迅速^[7]。采用神经网络
研究 PTFE 复合材料的摩擦性能,能更好地实现材
料在拉伸成形中的智能化。基于此,笔者基于神经
网络,对 PTFE 复合材料摩擦系数实时识别进行了
研究。

1 实验部分

1.1 参数实时识别建模

1.1.1 神经网络模型的建立

在轴对称件拉伸成形智能化系统中,对参数实
时识别是其主要组成部分,实时识别时间长短及精
度高低会对轴对称件拉伸成形智能化造成直接影

基金项目:2018 年度辽宁省普通高等学校本科教学改革研究项目(10841625)

作者简介:任华新(1977-),女,硕士,副教授,主要研究方向为计算机应用。

响^[8]。当研究材料加工工艺参数时,需选择具有极高精准识别度的识别模型,这样可对材料各成分进行识别,将其转化为非线性参数曲线计算求解,当模型无法对材料实时识别时,需将其识别模式改为在线识别,可通过使用 BP 神经网络模型对材料构成进行识别。在本研究中,基于神经网络建立适合于轴对称件拉伸成形智能化控制模型,对所需材料性能参数及摩擦系数进行实时识别和预测。

1.1.2 参数识别解析算法模型

通过解析模拟拉伸的轴对称件,而后参照其轴向力处于平衡状态的原理,并基于基本能量守恒原理,对加工凹模圆角形变区域和材料法兰接触摩擦应变力的形变区域等进行近似分布,从而对于材料加工工艺中的拉伸过程及拉伸力与运动轨迹进行方程解析,具体见式(1)。

$$P = \frac{C(\alpha)}{1 - \mu k_1(\alpha)} [\mu Q F(\alpha) + 2\omega I(\alpha) + J(\sigma)] \quad (1)$$

式中, $C(\alpha)$ 、 $F(\alpha)$ 、 $I(\alpha)$ 、 $J(\alpha)$ 、 $K_1(\alpha)$ 为系数表达式,其抽象表达式见公式(2)。

$$P = f(h, Q, \mu, n, B, r) \quad (2)$$

式中, P 为拉伸力,kN; h 为拉伸高度,mm; n 为硬化指数; Q 为压边力,kg/m; r 为厚向异性系数; B 为强度指数; μ 为摩擦系数。 n 、 P 、 Q 为在线监测量已知情况下,在线识别问题具体化表达式(2),对一组合适的参数 n 、 B 、 r 、 μ 进行确定,并通过式(2)计算,从而得到拉伸与拉伸高度之间的关系曲线,即 $p-h$ 曲线,该曲线与模型在线监测材料所得到的拉伸力和运动轨道基本一致。在式(2)中, n 、 B 、 r 、 μ 属于非线性,在这一个过程中智能化拉伸控制系统仅是非线性函数的最小二乘法拟合处理问题。在此基础上可将材料的各项性能指标和摩擦系数的数学问题转化为一个现实中出现的实测数据 $(h_k, P_k, Q_k) k=1, 2, \dots, N$,并且对式(2)中的非线性参数进行确定,见式(3)。

$$\bar{B} = (\mu, n, B, r) \quad (3)$$

同时,使目标函数具有最小值,见式(4):

$$F_{obj}(\bar{B}) = \sum_{k=1}^N [P_k - f(h_k, Q_k, \bar{B})]^2 \quad (4)$$

在计算数学中,使用式(1)对于材料相关参数指标和摩擦系数进行计算求解的时候,具有较高的难度,所以,可使用直接方法中的坐标轮换法达到在线识别目的,通过计算得到 n 、 B 、 r 、 μ ,在进行在线识别得到 n 、 B 、 r 、 μ 后,按照单向拉伸失稳理论,可通过式(5)获得抗拉强度 σ_b 。

$$\sigma_b = B(n/e)^n \quad (5)$$

式中, e 为自然对数的底,采用解析法将计算所得解作为神经网络模型中的学习样本数据组。

1.1.3 参数识别 BP 网络模型与算法

多层前馈网络(MFNN)的反向传播(BP)算法是目前针对于网络计算方法中应用范围最广、应用最多的一种基于神经网络模型的算法。神经网络算法是梯度下降法在多层前馈网络中的应用,在拉伸成形过程的参数识别部分能应用这种模型。通过分析拉伸过程变量可获得参数识别模型。摩擦系数识别模型见图1。

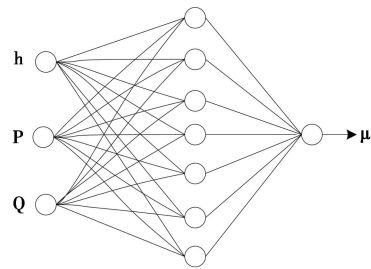


图1 摩擦系数识别模型图

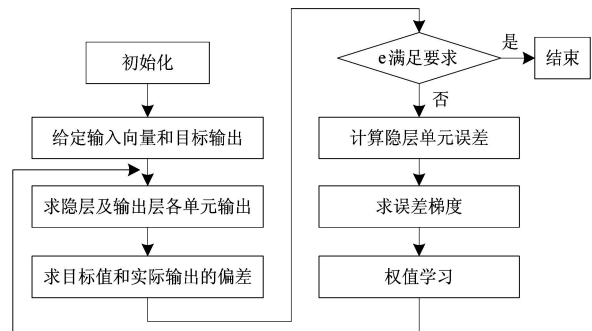


图2 BP 算法框图

图2为BP算法框图。BP算法的网络程序步骤共包括6步:第一步是进行整体模型的初始化,将各个权值、阈值等数值全部进行初始化处理,结果均为0;第二步是给定了输入向量后进行隐单元和输出层的输出进行计算,见式(6)。

$$O_j = f_j \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i - \theta_j \right) \quad (6)$$

第三步是对隐层、输出层的误差进行计算,见式(7)。

$$\delta y(i) = y(i)[1 - y(i)] \cdot [T(i) - y(i)],$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中, $T(i)$ 为第 i 个输出单元的样本值隐层误差; $y(i)$ 为第 i 个输出单元的实际输出; $\delta(i)$ 为隐单元输出; $W_{ji}(i, j)$ 为第 i 个隐单元与第 j 个输出单元间的权值,根据式(6)进行计算; $\delta y(i)$ 为第 j 个输出单元的误差。

第四步是修改权值,引入一个动量因子 α ,这样可防止振荡和加速收敛,见式(8)和式(9)。

$$\begin{aligned} Who(i, j) &= \\ Who(i, j) + \eta \sum_{k=1}^N \delta y(k, i) \cdot Oth(k, i) + \alpha \Delta Who \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Who(i, j) &= \\ Wih(i, j) + \eta \sum_{k=1}^N \delta(k, i) \cdot indata(k, i) + \alpha \Delta Wih \end{aligned} \quad (9)$$

式中, η 为学习步长; N 为样本数; α 为动量因子。

第五步是修改阈值,在学习过程中,输出层和隐层的权值及阈值相同,要进行修改,从而将整个网络学习的速度、收敛性提高,具体见式(10)和(11)。

$$\theta_0(i) = \theta_0(i) + \eta \sum_{k=1}^N \delta y(k, i) \quad (10)$$

$$\theta_k(i) = \theta_k(i) + \eta \sum_{k=1}^N \delta(k, i) \quad (11)$$

式中, $\theta_k(i)$ 为隐层第 i 个单元的阈值; $\theta_0(i)$ 为输出层第 i 个输出的阈值; N 为样本数; $\delta y(k, i)$ 为输出层第 k 组样本学习时的误差; $\delta(k, i)$ 为隐层第 k 组样本学习时的误差。

第六步是对 ΔE 进行计算,见式(12),收敛条件见式(13)。

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{ON} [T(i) - y(i)]^2; \\ \Delta E &= E(n_0) - E(n_0 - 1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\left| \frac{T(i) - y(i)}{T(i)} \right|^2 < \epsilon \quad (13)$$

式中, $T(i)$ 为第 i 个输出单元样本值; N 为输出单元数; ϵ 为给定的精度要求; $y(i)$ 为第 i 个输出单元实际输出;前一次循环用 $n_0 - 1$ 表示,当前循环为 n_0 。

1.2 数据样本采集

在基于 BP 神经网络模型结构的材料摩擦系数识别实验中,建立相关模型,通过大量样本数据进行学习训练,寻找最适合该网络模型的参数指标,经计算后得到该模型权值和阈值,而后输入到模型中,进行学习。样本数据包含了模型输入值、拉伸力 P 、拉伸高度 h 、压边力 Q 数据、毛坯相对厚 t_0/D_0 ;以及模型输出值,即强度指数 B 、硬化指数 n 、厚向异性系数 r 、摩擦系数 μ 。在进行 BP 神经网络模型数据样本采集过程中,因样本数据选择不当或精度过低,对摩擦系数识别性能会产生不利影响,降低识别精度^[9]。因而,实现材料摩擦系数实时识别的重要前提是获得高精度的数据样本。

2 结果与讨论

2.1 基于 BP 神经网络模型的摩擦系数识别实验

2.1.1 学习样本的获得

由于 BP 神经网络模型的计算算法是有教师在其中学习,因而需要对其进行学习训练。而对于学习样本的组成成分,包含了材料的摩擦系数、材料的各项参数指标,当已知材料性能参数时,在式(1)中,未知的待识别参数仅为摩擦系数 μ ,此时拉伸力公式为式(14)。

$$P = \frac{\mu QS(h) + T(h)}{1 - \mu K_1(h)} \quad (14)$$

通过上述的一系列数据处理操作,可将样本数据所得到的非线性曲线拟合问题转化为线性问题处理,从而得到关于材料在线识别摩擦系数的计算方程,见式(15)。

$$\mu = \frac{\sum_i [P_i - T(h_i)][P_i o K_1(h_i) - Q_i ST(h_i)]}{\sum_i [P_i o K_1(h_i) - Q_i o T(h_i)]^2} \quad (15)$$

2.1.2 数据处理

在本实验中材料分为冷轧钢板和铝合金板两种,而其中冷轧钢板的规格为 SPCC1/0.6mm、SPCC2/0.8mm、SPCC3/1.0mm,铝合金板的规格为 5754M,表 1 为实验材料及规格,表 2 为铝合金板的化学成分,表 3 为冷轧钢板的化学成分。

表 1 实验材料及规格

名称	铝合金板	深拉深 钢板 1	深拉深 钢板 2	深拉深 钢板 3
牌号	5774M	SPCC1	SPCC2	SPCC3
厚度/mm	0.9	0.6	0.8	1.0
直径/mm	258	—	—	—

表 2 5754M 铝合金板的化学成分

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
含量/%	0.41	0.41	0.11	0.50	2.61~3.62
成分	Cr	Zn	Ti	Al	
含量/%	0.31	0.22	0.16	Bal	

表 3 SPCC 钢板的化学成分

牌号	Si	C	P	Mn
SPCC	—	≤0.122	≤0.041	≤0.122
牌号	S	Cr	Cu	Ni
SPCC	≤0.046	—	—	—

分别在材料压边不同和润滑材料不同的情况下,对于上述材料进行摩擦系数识别实验。在实验中针对润滑条件的差异、使用的润滑材料为黄油、机油和 PTFE。当不同材料在其润滑条件不一致时,也会产生不同的摩擦系数^[10]。在针对材料摩擦系数的识别实验中,假设润滑条件一定,研究不同材料所产生的摩擦系数,结果见表 4。并且由于每种材料的拉伸性能存在差异,因而材料的压边情况也不同。在本实验中,所用冷轧钢板 SPCC 采用的压边力分别为 85kN、105kN 和 125kN;铝合金板 5754M 压边力分别为 65kN、85kN 和 105kN。图 3 为黄油润滑压边力为 105kN 的 SPCC3/1.0mm 冷轧钢板实验结果。

表 4 板材在不同润滑材料下的摩擦系数

牌号	机油	黄油	聚四氟乙烯薄膜
5754M	0.1836	0.0968	0.0635
SPCC	0.1990	0.1173	0.0878

表 5 板材的性能参数结果

板材牌号	取样方向	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	均匀伸长率 δ_u /%	强度系数 B /MPa	硬化指数 n	厚向异性系数 r
SPCC1 0.6mm	0°	212.314	368.310	22.460	632.25	0.2136	1.289
	45°	235.665	370.350	21.709	617.62	0.1954	0.905
	90°	225.012	351.828	22.556	589.09	0.1979	1.169
	平均值	224.330	363.496	22.242	612.97	0.202	1.121
SPCC2 0.8mm	0°	213.937	282.209	28.923	502.98	0.2391	2.413
	45°	226.814	297.259	18.977	536.64	0.2480	1.674
	90°	220.312	290.948	28.546	521.07	0.2412	2.100
	平均值	220.354	290.139	25.482	520.23	0.243	2.062
SPCC3 1.0mm	0°	206.298	278.763	25.853	486.03	0.2241	2.398
	45°	217.693	293.036	26.579	508.67	0.2210	1.509
	90°	216.704	284.540	27.921	500.56	0.2302	2.154
	平均值	213.565	285.446	26.784	498.42	0.225	2.020
5754M	0°	113.42	213.75	23.472	409.07	0.2481	0.759
	45°	110.42	216.74	25.356	416.96	0.2790	0.856
	90°	110.05	214.48	25.268	425.72	0.2741	0.805
	平均值	111.30	214.99	24.699	417.25	0.267	0.807

2.3 摩擦性能分析

选用的实验材料分别为普通冷轧板(15)、铝合金(5754M)、深拉深钢板(SPCC),润滑剂分别为猪油、机油、聚四氟乙烯、黄油。图 4 显示了基于 3 种材料的 4 种润滑剂摩擦系数识别值与真实值的对比情况。图 5 显示了基于 SPCC 材料的摩擦系数识别值与真实值的对比情况。

由图 4 和图 5 可知,由于材料的摩擦系数识别

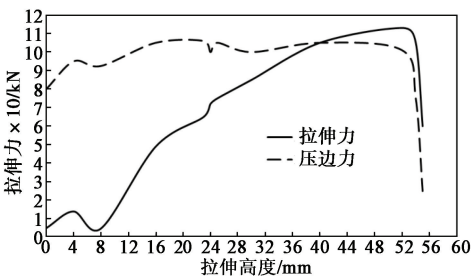


图 3 SPCC3/1.0mm 黄油润滑拉伸实验结果图

2.2 板材单向拉伸实验数据处理

对于材料从亚心梗进行检验的时候可以采用简洁实验法和直接实验法。直接实验法可以取得较高精度的结果;间接实验法的结果只能对板材充压性能进行研究。本实验材料为铝合板和冷轧钢板,将两种不同材料与轧制方向成 0°、45°、90°方向分别切取 3 组试件,对材料所得性能参数进行计算,结果见表 5。

起来较为发散,因而只能选择经过解析法计算后所得结果的平均值作为样本数据,其计算结果基本满足实验要求。为了最大化保障材料最终可成形,需要假设该材料面板在厚度上存在差异性,在板面内各向同性,这些因素均会造成样本不精确,产生较大误差。另外需要建立三层网络模型,这是因为理论上只需要神经网络模型函数满足对收敛点的需求,针对于任意非线性系统,均可使用 BP 神经网络模

型,但在实际网络训练中,非线性作用函数类型、训练样本数量等均可造成网络模型精度降低,而神经元隐层单元数、隐层数目是根据实验方法或经验进行确定,也会造成材料参数识别存在误差。

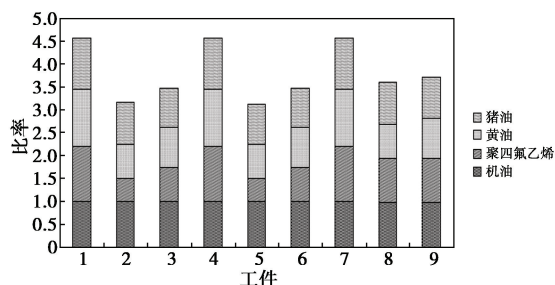


图 4 基于 3 种材料的 4 种润滑剂摩擦系数识别值与真实值的对比情况图

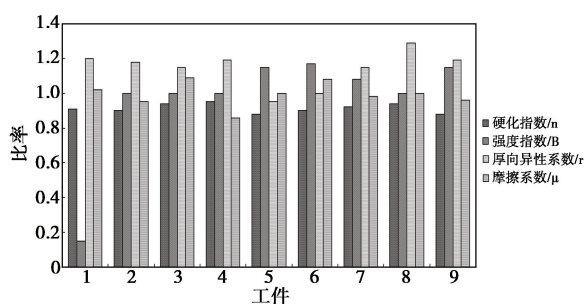


图 5 基于 SPCC 材料的摩擦系数识别值与真实值的对比情况图

3 结论

本研究基于神经网络,考察了 PTFE 复合材料的摩擦系数实时识别,结果发现:

(1)在此阶段中,可以对材料的物理性质进行实时监控,通过人工神经网络模型结构来对 PTFE 复合材料的摩擦系数进行实时识别,从而为后续复合

材料的加工工艺提供实时监控的理论依据和支撑。

(2)采用 BP 算法训练的神经网络均可进行任意精度逼近,但在实际网络训练中,非线性作用函数类型、训练样本数量等均可降低网络模型精度。

(3)采用非线性函数最小二乘曲线拟合的线性算法表明,该线性化处理方法是正确的,为已知材料性能时快速识别摩擦系数提供了一种有效的手段。

参考文献

- [1] 钱知勉.聚四氟乙烯塑料的实用性[J].有机氟工业,2013(1):11-17.
- [2] 肖帮.PTFE 基复合材料摩擦起电规律及其对摩擦学特性影响的研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [3] 王建吉,刘涛.聚酰亚胺填充 PTFE 复合材料摩擦学性能的研究[J].功能材料,2018,49(9):9072-9078.
- [4] 范招军,陈晓萌,王文.复合材料摩擦磨损试验[J].计量与测试技术,2017,44(12):25-28.
- [5] 李朋辉,侯根良,毕松,等.碳纳米管改性 PTFE 复合材料摩擦磨损性能[J].工程塑料应用,2018,46(5):108-113.
- [6] 林启权,毛波,董文正,等.二硫化钼与二硫化钨填充改性聚四氟乙烯的摩擦学性能[J].高分子材料科学与工程,2016,32(11):51-57.
- [7] 胡章芳,张力,黄丽嘉,等.基于时频域的卷积神经网络运动想象脑电信号识别方法[J].计算机应用,2019(4):1-6.
- [8] Bhardwaj A, Gupta A, Jain P, et al. Classification of human emotions from EEG signals using SVM and LDA classifiers[J]. Signal Processing and Integrated Networks, 2015, 27(4): 180-185.
- [9] Li H L, Yin Z W, Jiang D, et al. A study of the tribological behavior of transfer films of PTFE composites formed under different load, speeds and morphologies of the counterface[J]. Wear, 2015, 328-329: 17-27.
- [10] 王文东,张超,杜鸣杰,等.水/油润滑条件下 PTFE 复合材料的摩擦学性能[J].理化检验,2016,52(10):717-721.

收稿日期:2019-05-08

(上接第 129 页)

- [8] 贾丽萍.石墨烯基复合材料的制备及其在电化学分析中的应用[D].苏州:苏州大学,2013.
- [9] 陈莹莹,宓一鸣,阮勤超,等.石墨烯的制备及应用的研究进展[J].硅酸盐通报,2015,34(3):755-763.
- [10] 黄海平,朱俊杰.新型碳材料—石墨烯的制备及其在电化学中的应用[J].分析化学,2011,39(7):963-971.
- [11] 陈建丽.氧化石墨烯的功能化及其衍生物、复合物的制备与性能研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [12] 毕朝刚.氧化石墨烯及其复合物的制备与表征[D].大连:大连理工大学,2014.
- [13] 蒋登辉.微纳米空心结构的微乳两相法制备及其性能研究[D].上海:上海交通大学,2012.

- [14] Xu C H, Wang P K, Shen S P, et al. Highly ordered Pd nanowire arrays as effective electrocatalysts for ethanol oxidation in direct alcohol fuel cells[J]. Advanced Materials, 2007, 19(23):4256-4259.
- [15] 谷小虎.贵金属纳米结构的设计、合成与应用[D].济南:山东大学,2013.
- [16] 李琰.氧化石墨烯的合成、表征及其对 U(VI)、Th(IV)、Eu(III)的吸附研究[D].兰州:兰州大学,2012.
- [17] 王彦.石墨烯的制备及其在聚合物复合材料中的应用[D].上海:上海交通大学,2012.
- [18] 赵永霞.石墨烯/稀土氧化物的制备及其性能研究[D].兰州:西北师范大学,2012.

收稿日期:2018-06-11

修稿日期:2019-09-12