

基于 ANFIS 的 CFRP 轴向钻削力预测^{*}

Modeling of Thrust Force in Drilling of CFRP Based on ANFIS

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 唐宁 张军 李原 孟庆勋

[摘要] 本文基于 CFRP 轴向钻削力试验研究, 获得 ANFIS 样本数据。通过对 ANFIS 的训练, 建立钻头转速、进给量与轴向钻削力之间的映射关系, 并进行验证试验, 结果表明了该预测方法的有效性。

关键词: 碳纤维复合材料 自适应神经模糊推理系统 轴向钻削力

[ABSTRACT] Drilling experiments are carried out using twist drills that serve as input-output patterns for ANFIS training. The relationships of thrust force and drilling process parameters are modeled by using ANFIS. The ANFIS model so developed is validated by new checking input patterns and a good correlation is found between the actual data and the predicted data.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic Adaptive neuro fuzzy inference system Thrust force

钻削加工是碳纤维复合材料最主要的切削加工形式之一, 占总切削加工量的一半以上^[1]。轴向钻削力是钻削加工过程中产生的最重要现象之一, 其大小与钻头转速、进给量等钻削参数密切相关。如果参数选择不恰当, 可能导致轴向钻削力过大, 进而使材料产生分层、撕裂、劈裂、起毛等缺陷^[2]。因此, 亟需建立与钻头转速、进给量相关的轴向钻削力预测模型, 用于选择合适的钻削参数。

学者 Jang Roger 提出了基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS), 该系统通过自身的训练和学习过程, 在已建立的模糊规则基础上不断自动调整变量隶属度函数图形参数, 使之适应模糊推理系统输入、输出关系的最佳拟合^[3]。近期, 许多学者致力基于 ANFIS 的试验结果预测。Murad S Samhouri 等^[4] 针对磨削过程, 采用 ANFIS 分析了表面粗糙度。Abhay Kumar Dubey 等^[5] 基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS), 实现了电化学珩磨的多性能优化控制。颜振萍等^[6] 结合某型飞机在飞机包线内电传增稳飞控系统的增益调参问题, 利用 ANFIS 进行学习, 得到一个满足要求的 Sugeno 型模糊

推理系统。

本文针对 CFRP 轴向钻削力的预测问题, 通过轴向钻削力试验获得了轴向钻削力的样本数据, 借助自适应神经模糊推理系统(ANFIS)实现了轴向钻削力的预测, 并通过验证试验证明了该预测方法的正确性。

1 轴向钻削力测定试验

试验中, 采用的刀具为 $\phi 6$ 硬质合金麻花钻, 其刃长为 28mm, 钻头长度 66mm。材料为 C423200 碳纤维/增强复合材料, 其铺层形式为 $[0^\circ/90^\circ]$, 纤维体积含量为 50%, 厚度 4mm。

试验在数控铣床上进行, 其型号为 XKN713, 主轴功率 3.7kW, 主轴最高转速 4500r/min。钻头钻削时, 产生一个向下的轴向力, Kistler 测力仪将力信号转换成电信号, 电信号经 Kistler 电荷放大器放大后, 由数据采集器和专用测力软件 3010DEWE 在计算机上形成动态轴向力曲线图。制孔试验设备见图 1。



(a) 数控铣床

(2) Kistler 测力仪

图1 制孔试验设备

Fig.1 Experimental setup

钻头转速范围为 1500~2000r/min, 取 3 个转速值进行试验; 进给量为 0.05~0.13mm/r, 取 3 个进给量值进行试验。表 1 给出了轴向钻削力测定试验的钻削参数以及经仪器测得的钻削力。

2 自适应神经模糊推理系统

ANFIS 采用 Takagi-Sugeno 推理计算方法, 其中

* 国家自然科学基金(50905146)资助。

表1 试验钻削参数及测量结果

序号	钻头转速 / (r · min ⁻¹)	进给量 / (mm · r ⁻¹)	轴向钻削力 /N
1	1500	0.05	74
2	1500	0.09	96
3	1500	0.13	112
4	1750	0.05	68
5	1750	0.09	92
6	1750	0.13	108
7	2000	0.05	67
8	2000	0.09	86
9	2000	0.13	106

Sugeno 结构为一阶规则,即规则的输出是输入变量的线性组合。如果以两输入一输出的网络描述 Takagi-Sugeno 数学结构形式,其表达式为^[3]:

$$\textcircled{1} \text{ If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1, \quad (1)$$

$$\textcircled{2} \text{ If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 = p_2x + q_2y + r_2, \quad (2)$$

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2. \quad (3)$$

按 Takagi-Sugeno 通式 $f_i = p_i x + q_i y + r_i$ 形式,可将上式写为:

$$f = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2. \quad (4)$$

ANFIS 的典型结构如图 2 所示^[7]。

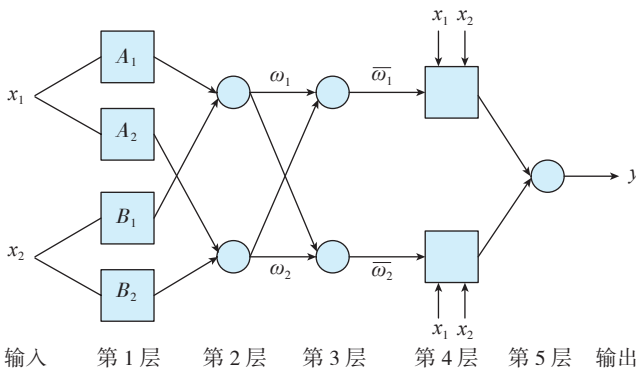


图2 典型ANFIS系统结构
Fig.2 Typical ANFIS architecture

其中, x_1 、 x_2 是系统的输入, y 是推理系统的输出,均为可提供的数据对;网络同一层的每个节点具有相似的功能,用 O_{1i} 表示第一层第 i 个节点的输出,依此类推。

第 1 层节点将输入信号模糊化:

$$O_{1i} = \mu_{A_i}(x_1), (i=1, 2), \quad (5)$$

$$O_{1j} = \mu_{B_{j-2}}(x_2), (j=3, 4), \quad (6)$$

其中, A_i 或 B_{j-2} 是模糊集,如“多”,“少”等; $\mu_{A_i}(x_1)$ 是模糊集的隶属函数,默认值为钟型函数。

第 2 层节点用于计算各条规则的适用度,即将各输入信号的隶属度相乘,并将乘积作为本规则的适用度:

$$O_{2i} = \omega_i = \mu_{A_i}(x_1) \mu_{B_i}(x_2), (i=1, 2). \quad (7)$$

第 3 层节点进行各条规则适用度的归一化计算,即计算第 i 条规则的 ω_i 与全部规则适用度之和 $\sum \omega_i$ 的比值:

$$O_{3i} = \bar{\omega}_i = \omega_i / (\omega_1 + \omega_2), (i=1, 2). \quad (8)$$

第 4 层节点用于计算各条规则的输出:

$$O_{4i} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), (i=1, 2), \quad (9)$$

其中, f_i 为 Sugeno 型模糊系统的后项(结论)输出函数,当其为线性函数则称为“一阶系统”;若为常量则称为“0 阶系统”。

第 5 层为单节点,用于计算系统的总输出:

$$O_{5i} = y = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i}, (i=1, 2). \quad (10)$$

本系统常采用误差反传算法或与最小二乘相结合的混合算法来训练相关参数,使系统能够很好地模拟给定的样本数据。系统中模糊隶属度函数以及模糊规则的建立是通过对大量已知数据的学习后得到的,这对于那些特性还不被人们所完全了解或者特性非常复杂的系统是尤为重要的。

3 ANFIS 系统仿真与试验验证

3.1 ANFIS 训练与系统仿真

以钻头转速 n 和进给量 f 作为输入数据,轴向钻削力作为输出数据训练 Sugeno 型模糊系统。每个输入都采用 2 个隶属度函数(gbellmf),输出采用一阶线性隶属度函数(linear),该模糊系统结构如图 3 所示。

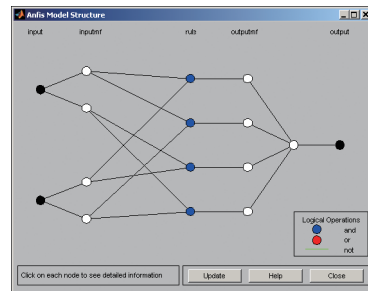


图3 基于Sugeno型模糊推理的ANFIS结构
Fig.3 ANFIS structure based on Sugeno inference

根据表 1 中 9 组钻削参数及其对应的轴向钻削力作为训练数据进行训练,训练优化方法采用收敛快且误差小的混合最小二乘估计的反向传播算法 (hybrid)。训练后,可得到最优的模糊隶属度函数及模糊规则的参数。模糊系统最终的输出误差收敛于 $2.0048 \times 10^{-2}N$,如图 4 所示。

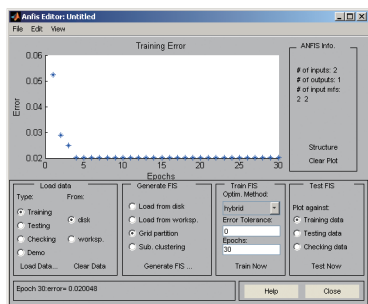


图4 模糊推理系统的训练误差
Fig.4 Training error of chosen FIS model

图 5 为系统原训练数据与训练后系统模拟数据的对比结果,图中○符号为原训练数据图示点,* 为训练后系统模拟数据图示点。

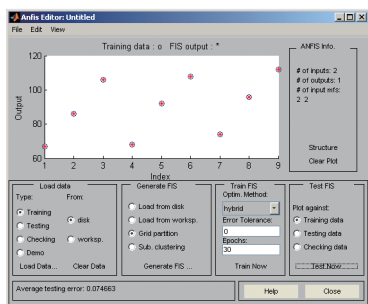


图5 系统原训练数据与训练后系统模拟数据对比结果
Fig.5 Comparison of ANFIS predicted and experimental values

由训练好的模糊系统可以得到轴向钻削力随钻头转速 n 和进给量 f 变化的网格细化结果即预测曲面,如图 6 所示。由图 6 可知,自适应神经网络模糊系统具有非线性泛化能力,可泛化出各训练点间的参数取值,同

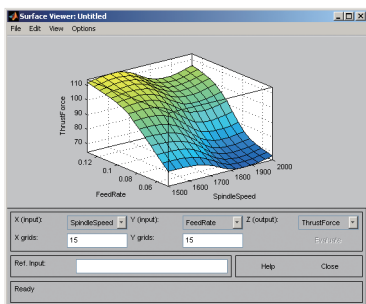


图6 轴向钻削力预测曲面
Fig.6 Surface view for thrust force

时保证在各训练点上的取值与原设计点上的参数相同。

通过选择图 6 中 X、Y 选项的输出变量,可以得到主轴转速或者进给量确定下的轴向钻削力预测曲线。以主轴转速固定为例, X 选取 FeedRate, Y 选取 none, 即可得到相应主轴转速下的轴向钻削力预测曲线,此曲线表征的是进给量与轴向钻削力之间的关系,如图 7 所示。通过点击 View → Rule, 设置进给量值,得到该钻削参数下的轴向钻削力模拟值为 76.4N,如图 8 所示。

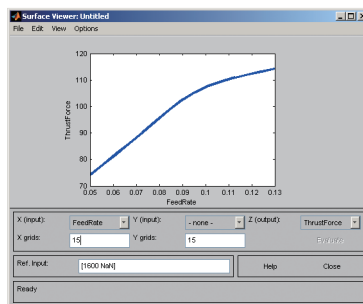


图7 轴向钻削力预测曲线 ($n=1600r/min$)
Fig.7 Predicted curve for thrust force ($n=1600r/min$)

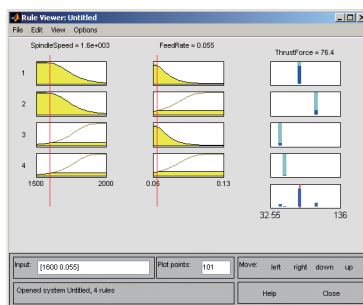


图8 轴向钻削力模拟值 ($n=1600r/min, f=0.055mm/r$)
Fig.8 Predicted value for thrust force ($n=1600r/min, f=0.055mm/r$)

3.2 试验验证

通过两组试验数据,检验训练后的模糊系统,表 2 给出了模拟数据和检验数据的结果对比。经模拟数据和检测数据对比,发现两者间有较好的一致性,较大的轴向钻削力,误差仅为 2.68%,从而证明该预测方法的有效性。

表2 模拟数据和检验数据的结果对比

序号	钻头转速 ($r \cdot \min^{-1}$)	进给量 ($mm \cdot r^{-1}$)	轴向钻削力		相对误差 /%
			试验值 /N	模拟值 /N	
1	1600	0.055	75	76.4	1.87
2	1800	0.105	97	94.4	2.68

4 总结

针对 CFRP 制孔,开展轴向钻削力测定试验,提出
(下转第 78 页)

表1 某台设备按照传统排产的任务计划

零件品种	数量 / 件	单件工时 / h	准结工时 / h	完成时间 / 周															
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	50	4	12	→															
B	50	3	8					→											
C	50	5	10									→							

表2 改进后排产

零件品种	根据拉动需要每周为后道工序完成任务 / 件
A	5
B	3
C	2

的高柔性,正好可以解决变换和调整的及时性问题。

例,某台设备按照传统排产的任务计划如表1所示,改进后排产如表2所示。

完成5件A零件的加工后,快速换装成B零件,进行3件的加工,再快速换装成C零件,进行2件的加工,周期为一周。

原来3种零件要到第10周后才能开始齐套装配;改进排产后,第2周即可开始装配,均衡化生产水平得以大大提升。

(2)用以消除生产中的等待时间。

现有生产形式中,零件的首件检验等待、程序调整后确认的等待都是制约生产效率提高的因素,实现可插入制造后,完全可以利用这种等待时间去完成后续其他零件的加工。如有需要,还可以倒班的方式,由同种设备、不同人员完成追加订单任务,提高设备利用率。

(3)促进工艺的不断改进。

产品定型后,如果进行技术改进,须完成足够的工艺试验,证实改进有效且无不良影响,方可采纳。但在现有状况下,工艺改进试验受制约,通常不能被安排。如果实现可插入式制造,就能促进持续改进活动的开展。

(4)为新产品的研发试制提供保障。

生产计划一经制定,产品的交付任务就面临严峻的形势,不要说新产品研制的插入,就是计划任务本身,总是处于“抢”的状态。航天企业对于这点,认识颇深,而引入可插入式制造,一切就变得简单了。在不打乱正常计划的前提下,只要安排适当的加班,通过可插入式制造,新产品研发的任务就很容易得以解决。

4 结束语

精益生产方式是航空航天领域多品种小批量制造

企业可参照并且可以立见成效的生产组织方式,可插入制造是践行精益生产方式的准时化生产的重要手段。通过精益生产所倡导的永无止境的自我完善、自我改进,我们的企业在激烈的市场竞争中就将永远立于不败之地。

参考文献

- [1] 樊明喜,徐道峰,黄阿兰,等.多品种小批量条件下的生产管理初探.航天工业管理,2009(5):31-35.
- [2] 胡燕海,叶飞帆.基于成组技术的精益生产方式及实例.宁波大学学报(理工版),2002,15(4):59-61. (责编 亦非)

(上接第69页)

基于ANFIS的轴向钻削力预测方法。以钻头转速和进给量为输入,轴向钻削力为输出,通过9组试验数据训练ANFIS系统,实现轴向钻削力的系统仿真,并通过2组检验数据验证了该预测方法的有效性。

参考文献

- [1] 张厚江,樊锐,陈五一,等.高速钻削碳纤维复合材料钻削力的研究.航空制造技术,2006(12):76-79.
- [2] 张厚江.碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D].北京:北京航空航天大学,1998.
- [3] 陈继光.MATLAB与自适应神经网络模糊推理系统.济南:山东省地图出版社,2002:161-175.
- [4] Samhouri M S, Surgenor B W. Surface roughness in grinding: on-line prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system. Transactions of NAMRI/SME, 2005, 33: 57-64.
- [5] Dubey A K. Performance optimization control of ECH using fuzzy inference application. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2009, 3(1): 22-34.
- [6] 颜振萍,艾剑良. ANFIS在飞机稳定控制系统中的应用.复旦学报(自然科学版),2010,49(4):532-534.
- [7] 吴晓莉,林哲辉. MATLAB辅助模糊系统设计.西安:西安电子科技大学出版社,2002:130-150. (责编 深蓝)

(上接第75页)

空空导弹弹体结构三防设计是一项系统工程,需要多方面密切配合。恰当的三防定位、合理的电气设计、良好的结构形式、先进的三防工艺、有效的管理方式,是达到三防设计目标、提高导弹三防性能的根本保证。

参考文献

- [1] (德)H·E·毕勒,(德)D·维斯腾贝格.合理的防腐蚀设计.北京:化学工业出版社,1990.
- [2] 陈克忠.金属表面防腐蚀工艺.北京:化学工业出版社,2011.
- [3] 龚光福.雷达产品三防设计初探.现代电子,2001(1):54-62. (责编 夏宛)