

## 航空发动机叶片数控加工工时估算方法研究\*

## Research on Numerical Human-Hour Estimation for Aero-Engine Blade

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 熊伟 孙根正 陈冰 李山

**[摘要]** 为了快速合理地估算航空发动机叶片数控加工工时,在分析影响零件工时的主要因素(特征参数)的基础上,提出了基于 SLFM 神经网络模型的计算工时定额的思路。以影响零件工时的特征参数作为网络输入、以匹配的相似零件集作为训练样本,采用 C++ 语言构建了定额计算网络模型。与 BP 网络对比试验表明,这种方法具有计算速度快,估算准确的优点。

**关键词:** 工时估算 神经网络 特征参数 航空发动机叶片

**[ABSTRACT]** In order to estimate the numerical human-hour of aero-engine blade rapidly and reasonably, an approach for estimating man-hour using a SLFM ANN model is proposed on the basis of analyzing the main influencing factors of man-hour. By using C++ program, the man-hour calculation model is constructed with characteristic parameters of determinant of man-hour as the input and matched similar parts as the train set. It is indicated that the method calculates faster and estimates more accurately by comparison with BP neural network.

**Keywords:** Human-hour estimation ANN Characteristic parameters Aero-engine blade

航空产品生产制造工时是企业进行计划管理、生产进度调控、经济核算、成本控制、产品报价的重要依据,也是企业进行科学管理、优化加工结构、提高劳动生产率的基础和重要前提<sup>[1]</sup>。随着我国航空工业的快速发展,航空产品不断更新换代,航空企业大量引进先进的数控加工设备。如何高效地利用好这些先进设备,使得企业在国内外同行业竞争中处于领先地位,快速地获得相对准确的零件加工工时是其中的关键。

国内工时定额制定的传统方法是人工查表法,效率较低。随着计算机技术和先进制造技术的不断发展和应用,计算机查表法、数学模型法、神经网络法和混合法等方法相继出现。然而,计算机查表法存在定额数据存储量大、数据库维护和操作不便的缺点;数学模型法则存在

数学模型建立困难的弊端;而在已有文献中大量使用的 BP 网络模型,具有学习过程收敛速度慢、网络性能差、容易陷入局部最小的局限性<sup>[2-3]</sup>。

本文在分析影响零件工时的主要因素(特征参数)的基础上,提出了基于 SLFM 神经网络模型的计算工时定额的思路。以影响零件工时的特征参数作为网络输入、以匹配的相似零件集作为训练样本,采用 C++ 语言构建了定额计算网络模型,同时对网络模型的输入数据采用归一化处理,最终确定了比较准确的工时定额数据,为工时定额制定与管理的信息化工提供了新的思路。

## 1 SLFM 网络

SLFM 网络是一种新型的神经网络,它综合了 BP 网络的可监督性和 SOM 网络算法简单的优点,在解决多变量、非线性系统的映射问题中具有独特的优越性,具有学习速度快、精度高、扩展能力较强的优点<sup>[4]</sup>。

### 1.1 SLFM 网络的拓扑结构

SLFM 网络是一种二层前馈网络,其拓扑结构如图 1 所示,输入层有  $n$  个节点,对应于  $n$  维的输入模式向量  $X(X_k)=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ ,输出层有  $p$  个节点,采用线性分度方式,分度值为  $\Delta$ ,每个节点都对应于模拟量(如工时)的某一离散值,即

$$Y_j = a + (j - 1) \times \Delta, \quad j = 1, 2, \dots, p, \quad (1)$$

式中,  $a$  为输出起点值,为常量。

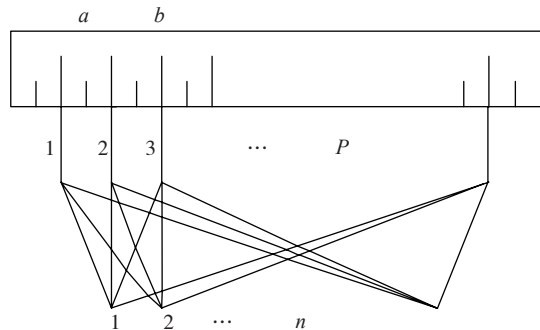


图1 SLFM的网络结构  
Fig.1 Structure of SLFM

### 1.2 SLFM 的学习算法

SLFM 网络采用奖惩式有监督学习,输入模式的特征数(输入层节点数)为  $n$ ,输出层线性分度数(输出层节点

\* 国家 863 高科技研究发展计划项目(2009AA04Z122)资助。

数)为  $p$ , 训练样本数为  $m$ , 其学习过程如下<sup>[4]</sup>:

- (1) 随机给定网络的初始权向量  $W_j$   
 $(W_j = [w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}], j = 1, 2, \dots, p; w_{ij} \in (0, 1))$ 。

- (2) 输入一个训练样本向量  $X_K$   
 $(X_K = [x_{1K}, x_{2K}, \dots, x_{nK}]; K=1, 2, \dots, m)$ 。

(3) 计算  $X_K$  与所有输出节点权向量的欧式距离  $d_{kj}(t)$ ,  $t$  为迭代次数; 并选择与  $X_K$  距离最近的输出节点作为网络获胜节点  $g$ 。

(4) 调整网络权值。如果网络获胜节点  $g$  和期望获胜节点  $d$  相符, 则对  $g$  点实行奖励, 使其权向量向该训练样本靠近; 反之, 则对  $g$  点惩罚, 使其权向量远离该训练样本, 同时对期望获胜节点  $d$  进行奖励。权向量的修正过程不仅对网络获胜节点  $g$  和期望获胜节点  $d$  (即样本的真实输出模拟量对应的输出节点) 进行, 还应包括其修正邻域内的其他节点, 权向量修正公式为:

$$\Delta w_{ij} = \begin{cases} \beta \cdot \alpha(t) [x_{ki}(t) - w_{ij}(t)] & j \in N_d \\ -\beta \cdot \alpha(t) [x_{ki}(t) - w_{ij}(t)] & j \in N_g, g \neq d \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\beta$  为奖惩系数,  $0 < \beta \leq 1$ ;  $\alpha(t)$  为权向量修正函数, 是迭代循环数的单调减函数, 可按式(3)取值;  $N_d$ 、 $N_g$  分别表示期望获胜节点  $d$  和获胜节点  $g$  的权值修正域半径, 可按式(4)、(5)取值。

$$\alpha(t) = k_\alpha (1 - t/t_m) \quad (3)$$

式中,  $k_\alpha$  为权向量修正函数的系数,  $t_m$  为最大迭代次数。

$$N_e(t) = \begin{cases} c \times (1 - t/t_m) & t \leq 0.5t_m \\ \frac{c}{2} (7 - 10t/t_m) & 0.5t_m < t \leq 0.7t_m \\ 0 & 0.7t_m < t \leq t_m \end{cases} \quad (4)$$

$$N_d = N_g = \begin{cases} N_e(t) & |d - g| > 2N_e(t) \\ 0.5 |d - g| & |d - g| \leq 2N_e(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $c$  为初始修正域节点数, 可按输出节点数的一半左右取值。

(5) 输入下一个样本  $X_{k+1}$  进行学习, 当所有的样本学习一遍后, 网络完成迭代一次, 这时网络可以转入下一次的迭代, 如此循环, 直到网络学习的输出精度达到满意或训练达到最大迭代次数  $t_m$  为止, 此时网络完成学习过程。

网络完成学习过程后, 即可输入模式向量求其映射值。与模式向量欧式距离最近的输出节点, 即网络获胜节点  $g$ , 其对应的值就是模式向量的映射值  $O_g$ ,  $O_g = a + g \times \Delta$ 。

## 2 工时估算的方法与模型建模

### 2.1 工时估算的方法

航空产品的零件具有数量种类繁多、零件复杂程度高的特点, 不同机种各类数控加工结构件的应用功能、结构形状、材料毛坯、尺寸大小和加工方法等都具有不同的特征。但是, 根据数控零件功能、结构特征和加工工艺方面的共性, 可以采用成组技术将数控加工零件按照相似性原则进行划分。在同类零件中, 提取并筛选影响零件数控加工工时的各种代表因素作为特征参数, 并利用已知数控加工工时的相似数控加工零件的特征信息与工时信息, 通过一定的特征信息模型估算待计算零件的数控加工工时。

工时估算的流程如图2所示。在同类零件中, 提取并筛选影响零件数控加工工时的特征参数, 并以这些特征参数作为输入、工时作为输出, 建立工时估算网络模型。当要估算待计算零件工时, 首先识别该零件的特征参数, 然后从数控加工典型零件数据库中匹配该零件的相似零件集作为训练样本来训练网络模型, 最后根据训练好的网络模型估算该零件的工时。

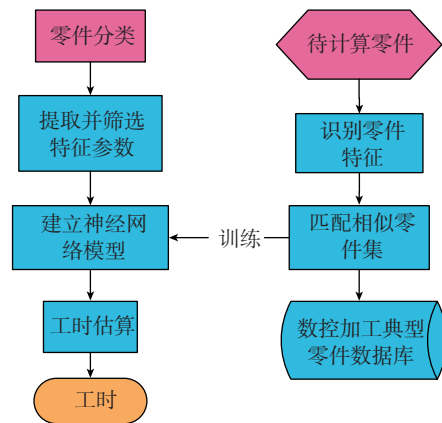


图2 工时估算流程图

Fig.2 Flow chat of human-hour estimation

### 2.2 工时影响因素体系的建立

在工时估算中, 要选取影响零件工时的主要因素作为特征参数(也称特征基), 建立工时影响因素体系。

根据已有典型叶片零件的外形参数、结构参数和加工工艺参数, 把影响航空发动机叶片数控加工工时的各种因素进行综合归纳加以提取, 可以简化为叶片种类、叶片截面形状、减震结构形状、尖部形状、根部形状、叶片尺寸、材料种类、毛坯型式和加工设备组合方式共9个特征信息, 以这9个特征参数建立航空发动机叶片的工时影响因素体系。

叶片种类表示叶片的分类特征, 不同种类的叶片结构功用差别较大。发动机叶片截面型式有等截面、变截面以及由坐标点组成的空间曲面等, 与数控加工工时关系极大。结构形状表示加工面的形状和复杂程度, 如减

震结构有阻尼台、加强筋,尖部形状有叶尖、叶冠等,根部形状有燕尾形、枞树形、T形等。叶片材料有不锈钢、钛合金、高温合金等,将对切削加工性能带来显著的影响。叶片毛坯有精锻、模锻,对零件加工工艺和工序安排的复杂程度均会产生极大的影响。叶片尺寸为叶片最大尺寸,对工时的影响也是显著的。不同的加工设备组合加工相同叶片会产生不同的效果,对数控加工工时也会带来较大的影响<sup>[5]</sup>。

### 2.3 相似零件的检索匹配

相似零件的检索关键是如何确定零件的相似性,即相似特征的提取和相似特征的相似性度量。

一般来说同类叶片具有相似的加工特征,因而检索相似叶片时,首先选取叶片种类相同的典型叶片,然后对叶片截面形状、减震结构形状、尖部形状、根部形状、叶片尺寸、材料种类、毛坯型式、加工设备组合方式8个因素进行匹配,并进行相似度计算,从而得到相似度值。将相似度值按降序排序,输出得分最高的20个叶片作为网络的训练样本。

相似度是待计算零件与已知典型数控零件的特征值一致程度的度量值,根据发动机叶片特征参数信息既有离散型,又有数值型,提出如下的相似度计算公式为<sup>[6-7]</sup>:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i f(i) \quad (6)$$

式中, $S$ 为相似度; $n$ 为实例的特征信息数目, $i=1,2,\dots,n$ ; $W_i$ 为分配给每个特征信息的权重,且满足 $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ ; $f(i)$

满足 $0 \leq f(i) \leq 1$ 。计算方法如下:如果特征信息为离散型,则完全匹配时, $f(i)=1$ ,否则 $f(i)=0$ ;如果特征信息为数值型,则 $f(i) = \exp\left(-\frac{|X_i - Y_i|}{X_i}\right)$ ,其中 $X_i$ 为待计算零件的特征信息数值,为已知典型数控零件的特征信息数值。

在相似度的计算过程中设定一个阈值,如果相似度小于该值,则该典型数控零件可剔除。同时,如果典型数控零件库比较小,可放宽相似度的计算条件;如果典型数控零件库比较大,则要限制相似度的计算条件。

### 2.4 网络的结构与精度分析

现以某低压静子压气机叶片的工时估算过程为例具体分析SLFM网络的结构与精度,并与BP网络作对比实验。该叶片的特征信息如表1所示。

网络输入节点数为8,分别为压气机叶片的截面形

表1 叶片特征信息

截面形状	减震结构形状	尖部形状	根部形状	零件尺寸/mm	材料种类	毛坯型式	加工设备组合
等截面	无	叶尖	方形	400	钛合金	精锻	组合0

状、减震结构形状、尖部形状、根部形状、叶片尺寸、材料种类、毛坯型式、加工设备组合方式。对于离散型的变量进行编码作为数值输入,材料种类的编码表如表2所示。同样对截面形状、减震结构形状、尖部形状、根部形状、毛坯型式、加工设备组合方式也建立这样的编码表。而叶片尺寸本身就是一个数值变量,可以直接作为输入量。然后,各数值经归一化后(归一化后的数值处于0和1之间)作为网络的输入。

表2 材料种类编码表

材料	编码
铝合金	0
不锈钢	1
钛合金	2
高温合金	3

输出节点数为500,用以表示工时范围在(100~600min)内的工时估计值,分度值 $\Delta$ 为1min。分度值过大,则难以正确反映出网络精度;过小则受到学习样本实际工时值测量精度的限制。网络权向量修正公式中的奖惩系数和修正函数经试验确定,取 $\beta=0.2$ , $\alpha(t) = 0.3(1 - t/t_m)$ ,这里选取 $t_m=3000$ 。

网络精度用均方根误差 $E_{rms}$ 和最大误差 $E_{max}$ 评定:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\bar{t}_i - t_i)^2} \quad (7)$$

$$E_{max} = \max |\bar{t}_i - t_i| \quad (8)$$

式中, $\bar{t}_i$ 为获胜节点对应的工时估计值, $t_i$ 为样本实际工时。学习过程采用均方根误差 $E_{rms}$ 和最大误差 $E_{max}$ 作为迭代结束判据。当 $E_{rms} \leq 0.5$ 、 $E_{max} \leq 0.5$ 时,学习结束。

为了与BP网络对比,用同样的学习样本对BP网络训练。BP网络的结构为8-12-1,即网络具有8个输入节点、12个隐层节点和1个输出节点;网络输入8个特征参数,输出为工时估计值。BP网络的学习误差限为1min,学习过程和对比结果如表3所示。然后再将待计算零件的特征参数输入网络,得到工时估计值,并与待计算零件实际工时比较以评价网络精度,结果如表4所示。

由表3和表4可知,SLFM网络的学习速度和估计精度都明显优于BP网络。虽然SLFM网络的学习误差限

表3 SLFM网络与BP网络比较

	SLFM网络	BP网络
迭代次数	455	4983
$E_{rms}$ /min	0.25	0.5
$E_{max}$ /min	0.5	1.0

表4 估算结果

实际值 /min	SLFM 网络	BP 网络
	估计值 / 相对误差	估计值 / 相对误差
205	200 / 2.4%	221.7 / 8.1%

小于 BP 网络的误差限,而学习迭代次数却仅为 BP 网络的 1/11,同时网络的估算结果也远精确于 BP 网络。

### 3 网络参数对学习速度和精度的影响

图 3 为奖惩系数  $\beta$  对迭代次数的影响。当  $\beta=0.1\sim 0.2$  时,迭代次数最少;均方根误差和最大误差均为 0。图 4 为权向量修正函数的系数  $k_\alpha$  对迭代次数的影响。当  $k_\alpha$  取不同数值时,迭代次数变化很大。 $k_\alpha$  值过大,则迭代次数急剧增加。 $k_\alpha$  值的最佳取值范围为 0.2~0.3。

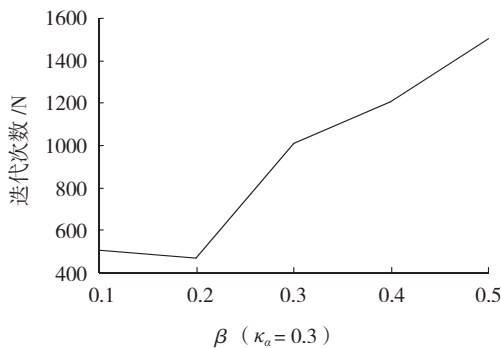


图3 奖惩系数  $\beta$  对网络性能的影响

Fig.3 The impact of  $\beta$  against network performance

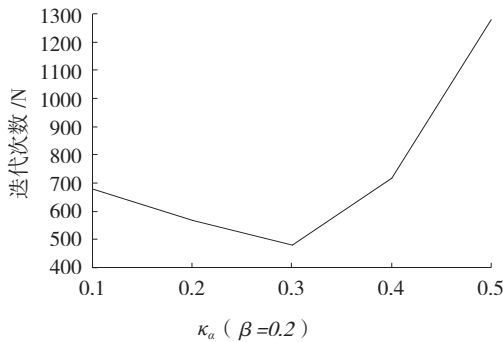


图4 系数  $k_\alpha$  对网络性能的影响

Fig.4 The impact of  $k_\alpha$  against network performance

### 4 结论

本文针对航空发动机叶片建立了工时估算影响因素体系,给出了匹配相似零件集的检索规则和算法,并应用有监督线性特征映射网络(SLFM)模型估算零件工时。研究了网络参数对网络性能的影响,确定了网络参数的最佳取值范围。与 BP 网络对比试验表明,该方法具有计算速度快、估算准确的优点,为解决零件工时的估算问题提供了新的思路。在这个方法中,对网络参数、输入变量

等的最优点和边界条件可作更深入的研究。

### 参考文献

- [1] 朱历新,周竞涛,高俊杰,等.基于神经网络的工时定额技术研究.机械科学与技术,2004,24(6):702-705.
- [2] 牛永亮,杭文,何杰,等.基于无师 GFMM 神经网络的公路工程工时定额测算方法研究.公路交通科技,2007,24(2):155-158.
- [3] 余本国.BP 神经网络局限性及其改进的研究.山西农业大学学报(自然科学版),2009,29(1):89-93.
- [4] 朱名铨,蔡永霞.有监督线性特征映射(SLFM)网络及刀具磨损量实时估计.西北工业大学学报,1997,15(1):1-6.
- [5] 王波,刘列勋.数控加工零件工时估算的神经网络方法研究.信息技术,2007,(9):97-102.
- [6] 赵爱侠,张振明,田锡天,等.基于典型工艺的航空发动机轴类零件工艺设计方法研究.中国制造业信息化,2007,36(5):42-46.
- [7] 杨青海,祁国宁,黄哲人,等.基于案例推理和事物特性表的零件工时估算方法.机械工程学报,2007,43(5):99-105.

(责编 亦非)

(上接第 51 页)

### 5 结论

本文提出采用 4 类标准伺服驱动组件作为柔性工装的驱动部件构建柔性工装的方法,简化了柔性工装的开发和制造,实现了柔性工装设计和制造的模块化。开发了适用于柔性工装控制的数控系统,数控系统软件由 IEC 61131-3 标准规定编程语言编写,使系统软件具有开放性;其提供的轴配置、表格式数控代码等功能便于柔性工装的应用;伺服装置采用一体化伺服驱动单元技术,使柔性工装控制系统结构简单、便于维护。相关控制技术已在实际柔性工装的研发中获得应用。

### 参考文献

- [1] 范玉青.现代飞机制造技术.北京:北京航空航天大学出版社,2001:102-112.
- [2] 王巍,贺平,万良辉.飞机柔性装配技术研究.机械设计与制造,2006(11):88-90.
- [3] Huan J, Jin Y, Xiao W L. CNC system for flexible fixture in aircraft component manufacturing and assembly. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2012,29(N1),1-8.
- [4] 王亮,李东升,罗宏宇.飞机装配数控柔性多点工装技术及应用.北京航空航天大学学报,2010,36(N5):540-544.
- [5] Modig. Universal holding fixture for skins[EB/OL]. [2009-09-10]. <http://www.modig.se/products/uhf-skin>.
- [6] Jeff A T, Micheal D A, John L H, et al. Flexible high speed riveting machine. Society of Automotive Engineers (SAE) International Journals, 2003, 112(1):362-371.
- [7] 郇极,靳阳,肖文磊.基于工业控制编程语言 IEC 61131-3 的数控系统软件设计.北京:北京航空航天大学出版社,2011.

(责编 深蓝)