

压力机下死点定位精度的检测及评价方法研究

姚秋水, 李国平*, 宋恭杰, 贺 勇

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 设计一种粗-细二级调节相结合的装置来动态地测量压力机的下死点, 可以方便准确地测量不同工作冲程时的下死点位置。针对所测数据, 结合模糊判断法和层次分析法构造压力机下死点精度的综合评价指标, 来对压力机下死点定位精度进行分析与评价。评价步骤通过选择评价因素和构建评价集, 确定比较矩阵并计算各影响因素权重, 以确立模糊评价矩阵, 并通过综合评价模型判断下死点精度等级。结果表明, 该评价方法可有效地评价压力机的定位精度。

关键词: 下死点; 层次分析法; 压力机; 模糊评价矩阵

中图分类号: TG315.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 01-0122-05

由于压力机工作过程中不可避免地出现机身振动, 以及机床本身固有的加工误差、配合间隙和环境温度改变, 都会导致压力机下死点动态精度的降低, 而下死点精度又直接决定了工件精度和模具使用寿命^[1-4]。压力机下死点重复定位精度是评估冲压产品技术水平与加工质量的一项关键性能指标^[5], 对企业产品质量和生产成本具有重要的影响。近年来, 企业对冲压制品的质量要求越来越高, 这就要求压力机的各项技术指标特别是下死点精度也因此不断提升^[6]。因此, 对冲床下死点精度进行检测时, 要求测量装置具有较高的可靠性; 同时采用测试数据对下死点精度进行评价时, 还要求评价方法具有客观性与合理性。

目前对压力机下死点精度的评价尚无一个公认的参数和指标, 相关学者通常是根据以往的实践经验对压力机性能指标进行定性评价。由于下死点精度的检测准确性关系到下死点定位精度的评价与分析, 为了确保测量数据的可靠性, 笔者采用自行设计的粗-细二级调节装置来测量冲床的下死点位置。在选择评价方法上, 采用模糊层次分析法构建了下死点评价指标, 用来对下死点定位精度进行评价。

1 压力机下死点精度检测系统设计

1.1 传感器位置调节机构设计

为能够方便地调节传感器的测头位置从而测出冲床下死点的准确位置, 笔者设计了一种粗-细二级调节装置(图 1), 该装置支撑底座采用磁性座主体, 通过旋转磁性开关来完成装置的固定, 达到安装与拆卸的方便性。且该装置依靠强大磁力吸附于压力机工作台上, 可以有效避免因压力机工作时振动而引起测量装置的自振。下死点的宏观

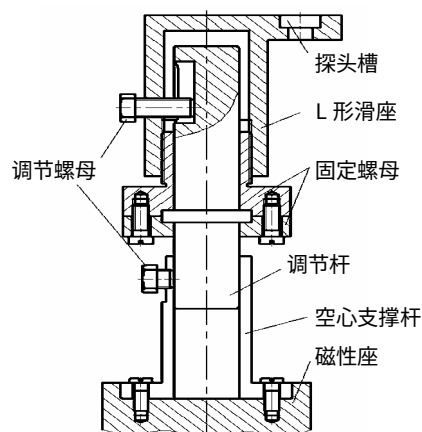


图1 粗-细二级调节装置

收稿日期: 2014-06-15.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省科技厅公益技术项目(2013C31017); 宁波市镇海区重大科技计划项目(201202)。

第一作者: 姚秋水(1989—), 男, 浙江衢州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机电测控。E-mail: yqs870893482@126.com

*通信作者: 李国平(1963—), 男, 湖北武穴人, 博士/教授, 主要研究方向: 振动控制技术。E-mail: liguoping@nbu.edu.cn

位移调节主要通过空心支撑杆和调节杆的相对运动来实现。测量前, 先调节两杆位置来控制滑块与传感器探头的距离。确定粗调后, 再进行微观调节, 而微观调节是整个机构的关键。其调节螺母和 L 形滑座的结合部分采用细牙螺纹连接, 并且对螺母刻度进行标定, 标定的最小角度值为 2° , 在螺母微调过程中, 每转过 1 个最小角度, L 形滑座高度变化 $10 \mu\text{m}$, 可以满足冲床下死点对传感器探头与滑块微距离调节的要求。

1.2 下死点精度检测系统设计

在完成传感器位置调节机构设计基础上, 笔者开发了冲床下死点精度检测系统(图 2), 可以实现对冲床下死点波动值进行动态实时检测。该检测系统由粗-细二级调节机械装置、位置传感器、PCI7422 数据采集卡、计算机及显示器等。

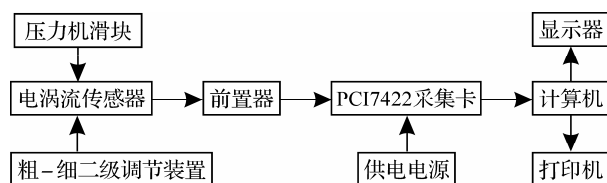


图 2 下死点定位精度检测系统

测试前, 将电涡流传感器安装在粗-细二级机械调节装置的探头槽里, 完成位置安装和高度调节。图 2 中的箭头表示检测系统各单元工作的流程顺序, 滑块运动到最低点即为下死点位置, 因此通过测量滑块位置值来表示下死点值。在压力机工作后, 启动检测系统, 传感器开始采集数据, 通过前置器将采集到的下死点机械位置对应的模拟电压信号进行放大, 通过数据采集卡将模拟信号转化为数字信号, 并传送到计算机软件中, 进行分析、计算、显示, 实现下死点数值实时采集与检测。

2 基于层次分析法的下死点评价指标

20 世纪 70 年代中期, 美国匹兹堡大学教授 Saaty 提出了层次分析法的概念, 其主要思想是将复杂的问题分解成若干个组成因素, 按支配关系把这些因素分成有序的递阶层次结构, 通过综合判断诸因素的相对权重, 以达到对目标元素的分析与评价^[7]。因此, 文中将采用模糊层次分析法对压力机下死点定位精度进行分析与评估。

为了构建压力机下死点定位精度评估分析系

统, 首先需要准确测得下死点精度的相关数据。采用前述的传感器位置调节机构和下死点精度测试系统, 实验测得下死点动态位置如图 3 所示。

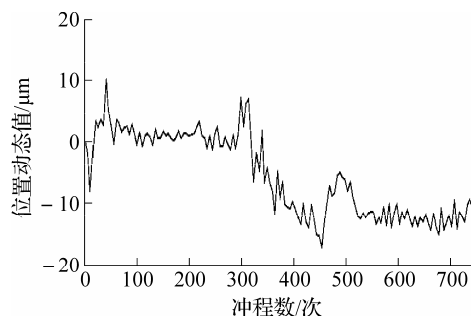


图 3 不同冲程时的下死点动态位移

根据图 3 对下死点定位精度检测时所得到的相关数据, 可以求得测试过程中的下死点样本均值 μ 、下死点微观不平度十点高度 R_z 、下死点样本标准差 σ 和下死点波动极差 Y 参数。

下死点样本均值是在规定测量时间内, 采集所有压力机下死点相对于标准下死点的平均值,

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(t_i), \quad (1)$$

式中, $y(t_i)$ 为在测量区间内第 i 个下死点值。

下死点微观不平度十点高度表示在取样长度内, 选取 5 个最高点(峰)和 5 个最低点(谷), 作 1 条平行于轮廓中线的测量基准线, 并以此基准线计算 5 个峰高的平均值和 5 个谷深的平均值之和,

$$Q_{Rz} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (y_{pi} + y_{vi}), \quad (2)$$

式中, y_{pi} 为在取样长度内第 i 个下死点峰值, y_{vi} 为在取样长度内第 i 个下死点谷值。

下死点样本标准差为在规定的测量时间内, 采集到所有压力机下死点位置值与其平均数离差平方的算术平均值的平方根, 其反映了压力机重复运行过程中下死点的稳定性,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(t_i) - \mu]^2}. \quad (3)$$

下死点波动极差为在取样长度内下死点最大波峰值和最大波谷值之间的差距, 它反映了压力机下死点的离散度,

$$Y = y_p - y_v, \quad (4)$$

式中, y_p 为在取样长度内下死点最大波峰值, y_v 为在取样长度内下死点最大波谷值。

由图 3 分析得 $\mu = -5.66$, $Q_{Rz} = -2.49$, $\sigma = 6.71$, $Y = -7.83$. 鉴于压力机在实际工作过程中, 下死点还受到温升、转速、环境等诸多不确定因素的影响, 因此为更客观地评价下死点定位精度情况, 还需对评价体系建立一般准则: (1)下死点评价指标的设计要能够全面地反映下死点定位精度的性质; (2)能够在机床实际工作过程中反映压力机的特性, 对评价机床精度具有一定理论依据; (3)评价体系中各参数的选择必须保持相对独立性, 避免较大的关联度引起评价过程中的误差.

在对下死点精度等级评价时, 由于单个评价参数不能稳定地反映下死点的波动性, 因此采用 4 个基本参数的组合可以避免评价过程中的片面性, 提高评价目标的准确性.

由于实验条件下温度和转速参数较易控制, 2 个参数通过组合可以形成恒温恒速、恒温增速和升温增速 3 种典型工况. 以压力机处于不同工况下的实验为基础, 建立如图 4 所示的递阶层次结构, 图中的同一层次元素对下一层次的某些元素起支配作用, 同时又受上一层次元素的支配.

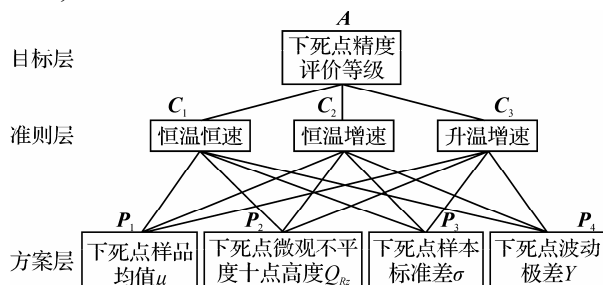


图 4 下死点精度评价等级层次

在确定由方案层、准则层和目标层组成的评价体系后, 还要寻找一种评价方法和与之对应的评价因素集. 模糊综合评价法是基于模糊数学理论的综合评价方法, 是用模糊数学对受多种因素制约的对象作出一个总体评价, 而模糊理论概念由 Zadeh 提出, 用于表达一些事物的不确定性^[8]. 该方法的本质是根据模糊数学里的隶属度理论将定性的评价转化为定量的评价过程, 可以表达不易量化的模糊问题, 因此可以恰当地对压力机下死点定位精度进行评价. 根据图 4 所示的评价体系, 影响下死点精度评价等级各因素所组成的集合构成下死点精度评价体系的因素集可表示为 $C = [C_1, C_2, C_3]$, $P = [P_1, P_2, P_3]$.

该评价集反映评价因素在下死点精度评价过程中的优劣程度. 评价集确定后, 根据评价因素权重程度, 下死点精度评价等级可表示为 $M = [\text{一等}, \text{二等}, \text{三等}, \text{四等}, \text{五等}]$. 综合评价时为计算方便, 根据中位数原则规定 $M = [90, 70, 50, 30, 10]$.

3 下死点精度评价方案的实现

在确定评价因素与评价集后, 通过检验比较判断矩阵的一致性比例、计算系统的总权重、确立模糊评价矩阵, 经综合评价模型实现下死点精度等级的评价.

3.1 构造比较判断矩阵

递阶层次结构建立后, 上下层次元素间的隶属关系便得到确定. 对于多层次评价体系, 根据层次分析法原理, 需要完成如下步骤:

(1)整体判断. 以上一层次元素为准则, 对下一层次元素按相互间的重要性赋予相应的权重.

(2)定性判断. 即采用 1~5 标度法^[7](表 1)进行判断, 比较同层次中的每个元素对于上一层次中同个元素的相对重要性, 从而构成判断矩阵.

表 1 影响因素标度的含义

标度	定义及说明
1	代表 2 个元素相比具有同等重要性
3	代表 2 个元素相比, 其中 1 个比另 1 个稍微重要
5	代表 2 个元素相比, 其中 1 个比另 1 个明显重要

(3)确定各因素权重. 根据构建判断矩阵 A 采用特征根算法计算各因素权重: ①各元素判断矩阵中将每行的数相乘, 再将所得乘积分别开 n 次方 (n 为矩阵列数), 得到各分量值 $\bar{w}_i$; ②将得到的各分量按 $\bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i$ 进行归一化处理, 得到排序权重向量 $\bar{w}$; ③按公式 $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (A\bar{w})_i / n\bar{w}_i$ 得到最大特征根.

(4)检验各矩阵一致性, 即通过上述计算得到矩阵特征向量和最大特征根, 运用一致性指标 CI 和一致性比例 CR 检验矩阵的合理性. 公式如下:

$$\text{①一致性指标: } Q_{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (5)$$

$$\text{②一致性比例: } Q_{CR} = Q_{CI} / Q_{RI}, \quad (6)$$

式中, Q_{RI} 是平均随机一次性指标, 其具体数值由经验所得(表 2)^[7]. 当计算结果 $Q_{CR} < 0.1$ 时, 可以接受判断矩阵的一致性^[9-10]; 否则, 需重新构建判断矩阵, 直到计算结果满足要求为止.

表2 平均随机一致性指标 Q_{RI} 值

项目	维数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Q_{RI}	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41

按照如上步骤先对目标层 A 下 C_i 的 3 个因素建立表 3 的判断矩阵。

表3 ($A \sim C_i$)判断矩阵

项目	$A \sim C_i$		
	C_1	C_2	C_3
C_1	1	1/3	1/5
C_2	3	1	1/3
C_3	5	3	1

表 3 中各参数为 C_i 元素间的相对重要性, 如参数 5 表示 C_3 比 C_1 明显重要, 则 C_1 相对 C_5 的重要性为 1/5, 其他参数赋值按表 1 的标度进行综合判断选择。根据表 3 求出矩阵特征向量 $W_0 = [0.150\ 6, 0.371\ 5, 0.916\ 1]$, 其对应的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.038\ 5$, 计算一致性指标和一致性比例, 得 $Q_{CI} = 0.019\ 3$, $Q_{CR} = 0.037\ 0 < 0.1$, 因此, 构建的判断矩阵满足一致性要求。

同理可计算出 P 层的各个元素对 C 层每个元素相对权重(表 4), 其参数取值方法与表 3 相同。

表4 ($C_i \sim P_j$)判断矩阵

项目	$C_1 \sim P_j$				$C_2 \sim P_j$				$C_3 \sim P_j$			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
P_1	1	1/3	1/2	1/4	1	3	1/3	3	1	2	1/2	3
P_2	3	1	2	2	1/3	1	1/5	2	1/3	1	1/3	1/2
P_3	2	1/2	1	1/4	3	5	1	5	2	3	1	2
P_4	4	1/2	4	1	1/3	1/2	1/5	1	1/3	2	1/2	1

分别计算特征向量及特征值, 可以得到:

$$\begin{aligned} W_1 &= [0.163\ 0, 0.702\ 8, 0.260\ 4, 0.635\ 7], \lambda_{1,\max} = 4.226\ 1, Q_{1,CI} = 0.073\ 9, Q_{1,CR} = 0.083\ 0 < 0.1; \\ W_2 &= [0.398\ 2, 0.183\ 6, 0.889\ 3, 0.129\ 6], \lambda_{2,\max} = 4.104\ 2, Q_{2,CI} = 0.034\ 7, Q_{2,CR} = 0.039\ 0 < 0.1; \\ W_3 &= [0.548\ 2, 0.214\ 1, 0.746\ 2, 0.311\ 1], \lambda_{3,\max} = 4.164\ 9, Q_{3,CI} = 0.055\ 0, Q_{3,CR} = 0.0618 < 0.1. \end{aligned}$$

可以看出 Q_{CR} 都小于 0.1, 说明表 4 的判断矩阵满足一致性要求。

3.2 计算总权重

系统总权重是依据某一层次所有元素对决策目标相对重要性的权值, 在图 4 所示层次结构中,

就是确定 P 层 4 个基本参数 μ, Q_{Rz}, σ, Y 对下死点精度评价等级的总权重 $W = [W_\mu, W_R, W_\sigma, W_Y]$ 。根据前面单一目标计算结果, 建立总权重矩阵(表 5)。

表5 总权重矩阵

项目	C_1 (0.150 6)	C_2 (0.371 5)	C_3 (0.916 1)	P 层元素 (组合权重)
P_1	0.398 2	0.1630	0.548 2	W_μ
P_2	0.183 6	0.702 8	0.214 3	W_R
P_3	0.889 3	0.260 4	0.746 2	W_σ
P_4	0.129 6	0.636 7	0.311 1	W_Y

在总权重计算过程中, 采用 C 项权重与 P 项对应权重相乘并求和, 即:

$$D_i = \sum_{k=1}^4 c_k p_i^k, \quad (7)$$

式中, $i = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3$ 。因此, 可计算出 P 层元素相对于决策目标的总权重为 $W = [0.622\ 7, 0.485\ 1, 0.914\ 3, 0.541\ 1]$ 。

一致性指标公式如下:

$$Q_{CR} = Q_{CI} / Q_{RI} = \sum_{k=1}^3 b_k Q_{CI,k} / \sum_{k=1}^3 b_k Q_{RI,k} \cdot (8)$$

将表 5 数据代入(8)式, 得 $Q_{CR} = 0.058\ 1 < 0.1$, 符合对比矩阵的一致性要求。

3.3 构建模糊评价矩阵

评价时从 P 层因素集的单个因素出发, 确定评价目标对因素集中各元素的隶属程度。即 μ, Q_{Rz}, σ, Y 分别对下死点精度评价等级进行评价。

据图 3 实验结果, 在对单一评价因素 μ 运用数理统计方法确定该因素对下死点精度评价等级的影响程度。操作过程: 在下死点定位精度的检测数据报告中, 人为规定采样区间为 1 000 个点(为评价精确性可酌情增减采样区间内点数), 将采样过程设为 n 个小区间, 每个小区间用评价集 $M = [一等, 二等, 三等, 四等, 五等]$ 对下死点精度进行评价。

结合冲压零件的精度要求, 规定 μ 在 $[-5, 5]$ 微米为“一等”, $[-10, -5 \cup (5, 10])$ 微米为“二等”, $[-20, -10 \cup (10, 20])$ 微米为“三等”, $[-30, -20 \cup (20, 30])$ 微米为“四等”, 其余为“五等”。在采样区间内的 1 000 个点中, 假设 5 个等级中对应点的个数分别为 186, 407, 235, 127, 45, 则用向量:

$$T_1 = [0.186, 0.407, 0.235, 0.127, 0.045],$$

表示 μ 评价结果。同理, 可得到 P 层其他因素 Q_{Rz}, σ, Y 的评价向量 T_2, T_3, T_4 。

$$T_2 = [0.192, 0.387, 0.241, 0.115, 0.065],$$

$$T_3 = [0.212, 0.416, 0.197, 0.138, 0.037],$$

$$T_4 = [0.232, 0.382, 0.217, 0.126, 0.043],$$

因此总的评价矩阵 $T = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T$.

在结合下死点精度评价等级的总权重 W 和总评价矩阵 T 的基础上, 采用模糊变换对下死点定位精度做出综合评价, 其数学模型为:

$$A = WT. \quad (9)$$

将 A 的数据进行归一化处理得 A' , 并与 M 相乘得到综合评价模型, 即:

$$Z = A'M^T. \quad (10)$$

计算得到压力机下死点定位精度的分值, 并与评价集 $M=[90, 70, 50, 30, 10]$ 中数值相比较, 求出下死点定位精度评价等级. 通过上述求得 $Z = 61.85$, 表示本次下死点精度为三等, 接近二等, 与图 3 压力机工作时下死点值在 $(5, 10]$ 和 $[-20, 10)$ 区间波动结果吻合.

4 结语

鉴于压力机运动过程中下死点位置一直处于变化状态, 设计了一种粗-细二级调节装置采集下死点波动值. 同时, 为避免评价下死点定位精度等级的主观性影响, 结合模糊判断法与层次分析法对其进行评价. 该方法体现了人们决策思维的基本特征, 即分解、判断、综合, 具有一定的客观性与合理性. 该评价方法是一个多层次、多参数、多

指标型的评价体系, 为压力机精度评价等级提供了科学合理的参考依据.

参考文献:

- [1] WANG L, XU F Y, WANG X S. Analysis of thermally induced machine tool errors of a crank press[J]. Journal of engineering manufacture, 2012, 226(9):1465-1478.
- [2] 何敏, 孙智. 基于接触理论的高速精密压力机预紧力研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11):165-167.
- [3] 郑安俊. 伺服压力机冲压力、下死点及振动的检测与分析[D]. 江苏: 东南大学, 2008.
- [4] 柯尊芒, 鹿新建, 闵建成, 等. 基于灰色关联度的高速压力机下死点影响因素分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2009, 44(6):38-40.
- [5] 王军领. 高速压力机下死点重复精度分析与控制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [6] 王保领, 宗昕, 冯朝军, 等. 300kN 数控冲模回转头压力机床身有限元分析与优选设计[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(3):20-23.
- [7] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998:6-13.
- [8] 章卫果, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999:25-47.
- [9] 杜之韩, 汪懋明. 判断矩阵一致性的统计检验法[J]. 系统工程, 1997, 15(3):46-49.
- [10] 杜之韩. 判断矩阵一致性检验的新途径[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(6):102-104.

Research on Evaluation Method of Bottom Dead Center Positioning Accuracy in Press Machine

YAO Qiu-shui, LI Guo-ping*, SOGN Gong-jie, HE Yong

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: This paper designed a kind of coarse-fine combination of secondary regulation device to dynamically measuring the BDC of press, it can be easily and accurately measured the BDC under different working stroke. According to the measured data, fuzzy judgment method and analytic hierarchy process(AHP) comprehensive evaluation index of the BDC accuracy is constructed to analyze and evaluate the positioning of the BDC accuracy. Evaluation step is by selecting evaluation factors and building evaluation set to determine the comparison matrix and calculate the weight of each factor, to establish fuzzy evaluation matrix, and through comprehensive evaluation model to judge the BDC accuracy level. Experiments show that this evaluation method can effectively evaluate the accuracy of press.

Key words: bottom dead center; analytic hierarchy process; press; fuzzy evaluation matrix

(责任编辑 章践立)