第11卷 第2期　郑州工学院学报　Vol.11 No.2
1990年 6 月　Journal of ZhengZhou Institute of Technology　Jun. 1990

利用优化理论建立较宽切削用量范围的耐用度方程*

张德贤　沈沛如

(郑州工学院机械系)

摘　要：本文利用优化理论，提出了建立较宽切削用量范围内耐用度方程的新方法．利用这种方法，根据有限组实验数据所建立的方程减少了预测值和实验值之间的误差，从而提高了方程的预测精度．这种方法也适合于建立较小切削用量范围的耐用度方程．同时，本文还提出了在较宽切削用量范围内，确定切削用量各因素对耐用度影响程度的计算公式．

关键词：优化理论，切削用量，耐用度方程，预测精度

在切削实验研究中，传统的方法是按下式建立切削用量与刀具耐用度间的关系．

$$T=\frac{C_T}{V^{\frac{1}{m}}f^{\frac{1}{n}}a_P^{\frac{1}{P}}} \tag{1}$$

(1)式中的系数 C_T、m、n、P 一般是根据有限组实验数据，利用多元非线性回归的方法而获得．这种方法建立的耐用度方程，对于一般的金属材料，在小切削用量范围内能较理想地逼近实验点．使(1)式成立的一个基本条件是耐用度和切削用量在双对数坐标中成线性关系．但实验结果表明：在较宽范围内切削用量和耐用度在双对数坐标中一般不成线性关系[1]．特别对于一些难加工材料，即使在小切削用量范围内，此线性关系也不成立．最近在陶瓷材料切削实验中就明显地发现这种情况．这就影响了(1)式的使用范围和预测精度．因此有必要建立在较宽切削用量范围内具有高预测精度的耐用度方程．资料[1]提出了在双对数坐标中成单调、非线性关系的耐用度方程如下：

$$T=a_P^{\frac{1}{P}}\exp\left[-\frac{w_1}{q}V^q-\frac{u_1}{r}f^r+C\right] \tag{2}$$

从理论上讲，(2)式能在较宽切削用量范围内较理想地逼近实验点，因此有助于一些难加工材料的耐用度方程的建立．本文根据优化理论及数理统计理论，提出了建立(2)式所示的较宽切削用量范围耐用度方程的新方法，并提出了在较宽切削用量范围内，确定切削用量各因素对耐用度影响程度的计算公式、实例计算结果表明：本文所提出的方法准确可靠．

* 收稿日期：1989.03.17

1 建立耐用度方程的具体方法

根据耐用度与切削用量在双对数坐标中成单调、非线性关系，以及此关系的斜率与切削用量在双对数坐标系中近似成线性关系的实验结果，可以推出如下式所示的耐用度方程[1]。

$$T = \exp\left(-\frac{w_1}{q}V^q - \frac{u_1}{r}f^r - \frac{z_1}{p}a_p^p + C\right) \tag{3}$$

(3)式可简化为下列方程形式。

$$T = \exp(C_1 + C_2V^q + C_3f^r + C_4a_p^p) \tag{4}$$

现在的主要问题是如何确定出(4)式中的各个系数。事实上，由于实验数据的波动性，不可能求出方程中各系数的真值。因此如何根据有限组实验数据，确定出(4)式中各个系数的最优估计值是要解决的根本问题。

在数理统计理论中，通常用残差平方和 Q 来估计实验值和经验公式间的接近程度。残差平方和 Q 的计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n}(T_i - \hat{T}_i)^2 \tag{5}$$

在(5)式中，n 是实验数据的个数，T_i 是实验值，$\hat{T}_i$ 是经验公式在相应点的预测值。残差平方和 Q 越小，则经验公式的预测精度越高。

在(4)式中各系数的估计值仍用 C_1，C_2，C_3，C_4，q，r，p 表示，则此时残差平方和 Q 可表示为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n}[T_i - \exp(C_1 + C_2V_i^q + C_3f_i^r + C_4a_{pi}^p)]^2 \tag{6}$$

从(6)式可以看出，在实验数据给定的情况下，残差平方和 Q 就仅是 C_1，C_2，C_3，C_4，q，r，p 的函数，一旦这些系数被确定，则残差平方和 Q 的值就被确定。

对(4)式两边同时取对数，则得:

$$\ln T = C_1 + C_2V^q + C_3f^r + C_4a_p^p \tag{7}$$

由(7)式，若已知 q，r，p 的估计值，即可以根据有限组实验数据，利用多元非线性回归的方法，确定出相应的 C_1，C_2，C_3，C_4 各个系数的估计值。因此，建立较宽切削量范围的耐用度方程(4)式的主要问题，就是如何确定 q，r，p 各指数的最佳估计值。

根据上述，可认为(6)式所示的残差平方和 Q 仅是 q，r，p 的函数，即 Q＝Q(q，r，p)。根据数理统计理论，本文认为，能使 Q(q，r，p)达到最小的 q，r，p 值，就是方程(4)式中 q，r，p 的最佳估计值，从而确定 q，r，p 最佳估计值的问题，就变成以(6)式为目标函数的求优问题。

从形式上看，求 q，r，p 最佳估计值是以(6)式为目标函数的无约束非线性优化问题。但在实际计算中，由于电子计算机对实数范围有一定的规定，因此为了使计算中所有实数均不超过所规定的范围，则应对 q，r，p 的值进行限制，故对 q，r，p 估计值的选取就变为如下的有约束非线性优化问题:

$$\min Q(q,\ r,\ p)=\sum_{i=1}^{n}[T_i-\exp(C_1+C_2V_i^q+C_3f_i^r+C_4a_{pi}^p)]^2$$

$$\&\quad g_1(q,\ r,\ p)=q_1-|q|\geqslant 0$$

$$g_2(q,\ r,\ p)=r_1-|r|\geqslant 0$$

$$g_3(q,\ r,\ p)=P_1-|P|\geqslant 0 \qquad (8)$$

针对(8)式所示的优化问题，在实际计算中，可化(8)式所示的有约束的优化成为无约束优化问题。具体方法是：首先用无约束优化方法进行优化，当迭代点达到某一变量的约束边界时，就把这个变量的值固定在这个边界上，而对其它变量仍按无约束优化方法进行优化，直止最后达到最优解。经过实际运算，证明这个方法效果良好。

在实际优化计算时，所采用的无约束优化方法是目前广泛使用的 DFP 法。DFP 法具有良好的可靠性及有效性。

具体程序设计流程图如图 1 所示。

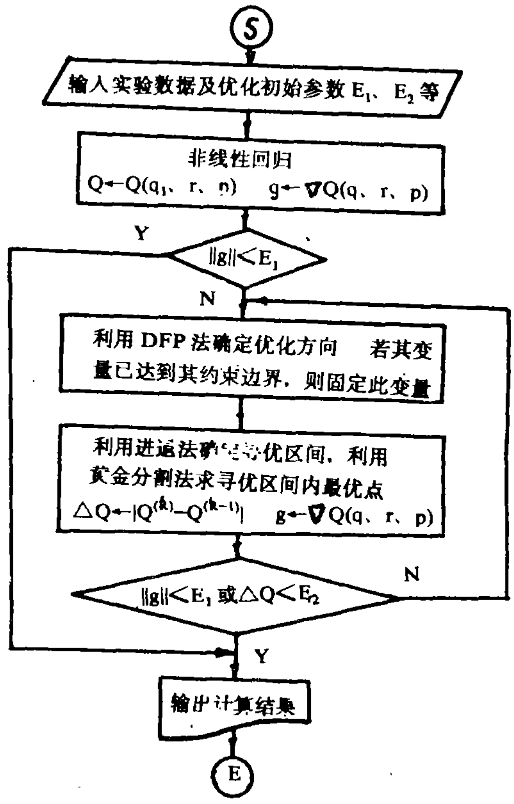

图 1　建立耐用度方程的程序设计流程图

2　切削用量各因素对耐用度影响程度的确定

在较宽切削用量范围内，切削用量各因素与耐用度在双对数坐标中关系曲线的斜率可用(9)式表示[1]。

$$\begin{cases} W=-w_1V^q \\ U=-u_1f^r \\ Z=-z_1a_p^p \end{cases} \qquad (9)$$

(9)式中，W 是 lgV 与 lgT 曲线的斜率，U 是 lgf 与 lgT 曲线的斜率，Z 是 $\lg a_p$ 与 lgT 曲线的斜率。w_1，u_1，z_1，q，r，p 是(3)式中的系数。

由(9)式可以看出，由于斜率 w，u，z 的大小随切削用量的大小而改变，可以认为切削用量各因素对耐用度的作用大小也是随着切削用量各因素的大小而改变，因此在较宽切削用量范围内，切削用量各因素对耐用度作用大小的比较，也只能在一定的切削用量范围内进行，在不同的切削用量范围内比较将会有不同的结果。

在较宽切削用量范围内，切削用量各因素对耐用度影响大小，可用切削用量各因素与耐用度在双对数坐标系中的曲线斜率在给定切削用量范围内的平均值来表示。

假设取切削速度的范围为（v_1, v_2），进给量的范围为（f_1, f_2），切削深度的范围为（a_{p1}, a_{p2}），并令 m_1，n_1，k_1 分别表示 v，f，a_p 对耐用度的作用大小，则有：

$$m_1=\frac{\int_{v_1}^{v_2} w d(\lg V)}{\int_{v_1}^{v_2} d(\lg V)} \tag{10}$$

将(9)式代入(10)式得：

$$m_1=\frac{\int_{v_1}^{v_2}(-w_1 V^q)d(\lg V)}{\int_{v_1}^{v_2} d(\lg V)}=-\frac{w_1(V_2^q-V_1^q)}{q\ln(V_2/V_1)} \tag{11}$$

由(4)式，则(11)式可化为：$m_1=\dfrac{C_2(V_2^q-V_1^q)}{\ln(V_2/V_1)}$ (12)

同样可得：$n_1=\dfrac{C_3(f_2^r-f_1^r)}{\ln(f_2/f_1)}$ (13)

$$k_1=\frac{C_4(a_{p2}^p-a_{p1}^p)}{\ln(a_{p2}/a_{p1})} \tag{14}$$

(12)，(13)，(14)式就是确定在较宽切削用量范围内，切削用量各因素对耐用度作用大小的计算公式。

经选用几组耐用度试验数据进行计算，结果表明，在试验所取的切削用量范围内，用(12)，(13)，(14)式所计算出的 m_1，n_1，k_1 的值，分别与按传统方法建立起的耐用度方程(1)式中的系数 1／m，1／n，1／p 的值非常接近。由此可见，(1)式本质上是将切削用量与刀具耐用度在双对数坐标系中的曲线关系简化为直线关系而建立起来的，此直线的斜率为曲线斜率在试验所取的切削用量范围内的平均值。

3 计算实例

例 1：用硬质合金刀具切削加工陶瓷材料的实验研究中，有表 1 所示的一组耐用度实验数据。两种处理方法的比较如表 1 及表 2 所示。

表 1 耐用度试验数据及各公式计算值的比较

序号	a_p (mm)	f (mm／r)	V (m／min)	耐用度实验值 (min)	新方法公式计算值 (min)	传统方法公式计算值 (min)
1	0.8	0.2	25	55	52.4	55.12
2	0.8	0.3	35	31	33.08	33.37
3	0.8	0.41	45	19	21.39	22.97
4	1.2	0.2	35	28	27.12	20.72
5	1.2	0.3	45	18	15.18	14.55
6	1.2	0.41	25	49	49.9	43.1
7	1.6	0.2	45	8	8.82	10.1
8	1.6	0.3	25	23	25.1	30.58
9	1.6	0.41	35	21	18.3	18.17

表2　两种处理方法耐用度方程的比较

	耐用度方程	残差平方和Q	回归相关系数R
传统方法	$T=16674.3a_p^{-0.9700631}f^{0.2056591}V^{-1.738988}$	191.22	0.94642
新方法	$T=\exp[4.557106-0.1159281a_p^{4.067192}+41679.99f^{1.407285}-0.001641336V^{1.807242}]$	38.7	0.98939

利用(12)，(13)，(14)式计算的 m_1，n_1，k_1 值分别为 1.776356，0.2063709，−1.063764。

例2：为了充分验证新方法的效果，又选用资料[2]中的耐用度实验数据进行处理。两种处理方法的比较如表3及表4所示。

表3　耐用度试验数据及各公式计算值的比较

序号	a_p (mm)	f (mm／r)	V (m／min)	耐用度实验值 (min)	新方法公式计算值 (min)	传统方法公式计算值 (min)
1	0.5	0.14	30	102.7	102.9	108.1
2	0.8	0.21	30	30	30.9	33.3
3	1.3	0.3	30	12	10.5	10.94
4	0.8	0.14	38	33	32.63	28.3
5	1.3	0.21	38	8.5	8.97	8.59
6	0.5	0.3	38	13.3	15.1	13.5
7	1.3	0.14	48	6.8	7.1	7.37
8	0.5	0.21	48	11.5	9.7	10.7
9	0.8	0.3	48	3.4	3.59	3.58

表4　两种处理方法耐用度方程的比较

	耐用度方程	残差平方和Q	回归相关系数R
传统方法	$T=297768V^{-3.499356}f^{-1.640846}a_p^{-1.08841}$	63.53	0.99586
新方法	$T=\exp[5.85959-0.00746168V^{1.561192}+1.180867f^{-0.5626317}-4.008902a_p^{0.287348}]$	10.2	0.99934

利用(12)，(13)，(14)式计算的 m_1，n_1，k_1 值分别为−3.478551，−1.633154，−1.086221。

从上面两个例子可以看出，用新方法所建立的耐用度方程的残差平方和Q值明显小于按传统方法建立的耐用度方程的残差平方和Q值。用(12)，(13)，(14)式计算的 m_1，n_1，k_1 值非常接近于按传统方法所建立的耐用度方程中的V，f，a_p 的指数值。由此可以得出：用新方法建立的耐用度方程的预测精度明显地比按传统方法建立的耐用度方程高，利用(12)，(13)，(14)式确定较宽切削用量范围内切削用量各因素对耐用度的影响大小准

确可靠。

4 主要结论

根据上述分析讨论，可以得出以下几点结论。

4.1 利用本文提出的方法建立的耐用度方程的预测精度明显比按传统方法建立的耐用度方程高，且适用于较宽的切削用量范围。

4.2 本文所提出的建立较宽切削用量范围耐用度方程的方法可以完全利用计算机程序实现，因而使用方便。

4.3 计算结果表明：在较宽切削用量范围内，切削用量各因素对耐用度影响大小的计算公式准确可靠。

4.4 本文所提出的建立耐用度方程的方法，也适合于建立其它性质相似的数学模型。

参考文献

〔1〕南京工学院，无锡轻工学院主编．金属切削原理．福建科学技术出版社，1984

〔2〕陆治．新型硬质合金加工淬硬轴承钢的研究．天津大学硕士研究生论文

〔3〕江萍，侯慕英编著．机械优化设计．武汉地质学院出版社，1986

〔4〕张德贤．陶瓷材料切削机理的研究．郑州工学院硕士研究生毕业论文，1988

Establishment of Cutting Tool Life Equation Utilizing Optimization Theory

Zhang Dexian Shen Peiru
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, a new method for establishing cutting tool life equation in wider cutting regime range is presented utilizing optimization theory. According to a few experimental data, the cutting tool life equation established by this method has less error between calculating value and experimental value than that by traditional method. Therefore, the calculating precision of the cutting tool life equation is improved. This method can also be used to establish cutting tool life equation for smaller cutting regime range. The formulate to determine the affecting level of each cutting parametor in wider range is also proposed.

Keywords: optimization theory, wider cutting regime range, cutting life equation, calculating precision