

应用机器视觉技术研究刀具磨损与耐用度

梅安华 王菁蕙

摘要 本研究采用光电摄像器件(TV摄像机或CCD)显微镜与IBM-PC计算构成的机器视觉系统,使用图像处理与模式识别技术分析和处理切削刀具后刀面上磨损带的显微影像信息,分别采用联机 and 脱机的方法检测、计算刀具的磨损量和损坏形态,并以此作为监测制造过程的依据,以刀具耐用度应最高、生产成本应最低为约束条件,优化了切削参数(切削速度 V ,进给量 f)。经实验验证,理论分析计算与实测结果相吻合,为高精度识别和控制制造过程提供了一种实用方法。

关键词 机器视觉;刀具磨损;刀具的耐用度;图像处理;模式识别

1 引言

切削加工过程是机械制造最基本的过程。识别和控制制造过程的目的是为了以最低的加工成本和最高的生产率加工出符合精度和表面质量要求的机械零件。加工成本、生产率是衡量制造过程技术优劣的标准。在影响加工成本和生产率的众多工艺因素中,刀具耐用度是识别和控制制造过程的主要依据和重要经济因素。刀具磨损到一定程度即等于和低于耐用度标准临界值时,就不能继续使用,否则会降低工件的加工精度(尺寸和表面质量)。刀具耐用度选择得过高或过低均会增加成本。在经济加工条件下,刀具后刀面磨损量是影响刀具耐用度的主要因素,在研究单级制造系统的刀具耐用度问题时,一般都选择后刀面磨损值 VB 作为确定刀具耐用度的依据。因此,检测刀具磨损量和磨损形态,计算刀具耐用度成为研究制造系统、识别制造过程的关键技术。本文研究用机器视觉系统检测刀具磨损量、判断刀具磨损状态、估算刀具耐用度的原理和方法,为制造过程的识别和优化控制提供了一种高精度方法。同时也为建立金属切削数据库提供了技术手段。

2 刀具后刀面磨损带显微影像的获取及预处理

笔者在文献[1]给出了由显微镜、摄像机和计算机构成的机器视觉装置的简图。用该系统获取的后刀面磨损带显微图像如图1所示(图中亮带为磨损带)。

由于光源和显微摄像系统噪声的影响,使得图像质量降低,并且给图像二值化带来困难。为消除噪声信号的干扰,本研究采用了窗口为 3×3 象元的平滑滤波,对原始图像进行了预处理。

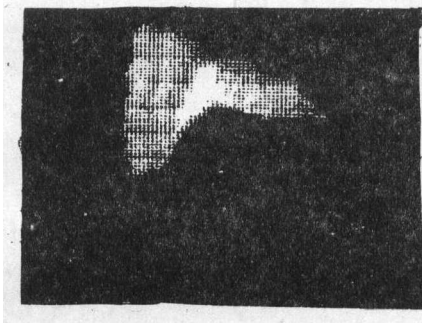


图 1

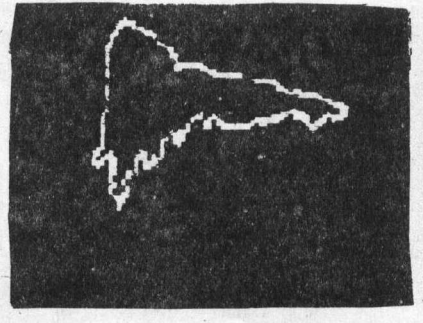


图 2

对预处理后的磨损带图像进一步作二值化、提取磨损带边界及其细化处理,处理结果如图 2 所示。对磨损带的几何量是对边缘进行测量的,这样可以方便处理,提高测量精度。

3 测量坐标系的建立

刀具切削部份的几何结构——切削角度、切削刃的空间位置是在刀具参考坐标系(空间三维坐标系)中确定的。本研究检测磨损带在平面上投影的几何量,根据刀具的纵横剖面参考

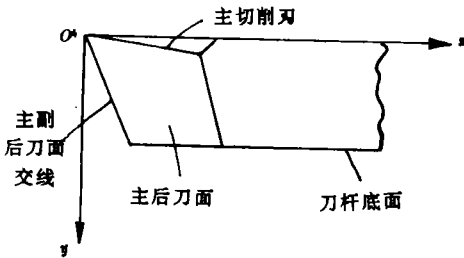


图 3

系建立图 3 所示的刀具测量坐标系 $x'o'y$ 。 o' 是刀尖点,在 $x'o'y$ 内,它由主切削刃和主副后刀面交线之交点确定,显然, $x'o'y$ 与刀具几何状态相关联。

在测试系统中,摄像机以行扫描工作方式获取图像,由此在显微镜视场中确定了一个坐标系 ioj , oi 为行扫描方向(水平方向), oj 与 oi 垂直, o 点为第一个象素点位置。定义 ioj 为测试系统的绝对坐标系, $x'o'y$ 为相对坐标系,两个坐标系在测试中应当保持平行,才能保证磨损带几何量的量测精度。在实测过程中,由于被测刀具有夹持原因,

刀尖附近刃区在显微镜视场中的位置不确定,使得 $x'o'y$ 与 ioj 不平行。因此在检测前,首先当根据刀具的前后刀面和刀尖的状态及位置建立相对坐标系 $x'o'y$,然后旋转 $x'o'y$,经坐标变换,使其与 ioj 处于所要求的相对位置。

图 4 表示一刃倾角为零($\lambda=0$)的车刀在显微镜视场中的情况。

为建立 $x'o'y$ 坐标系,首先应当求出主切削刃在 ioj 中的投影线 l_1 和主副后刀面交线在 ioj 中的投影线 l_2 , l_1 与 l_2 的交点即是刀尖点 o' 。刀具为理想状态时(未磨损), l_1 与 l_2 是直线,但被测刀具是切削加工一段时间后送检的,在刀尖附近,各刀面都有一定程度的磨损,切削刃和主副刀面交线在 ioj 中的投影为不规则的曲线,此时刀尖也被钝化偏离理想刀尖位置。本研究用回归方法,由上述的投影曲线求出 l_1 和 l_2 ,进而确定 o' ,建立 $x'o'y$ 坐标系。

本研究首先求出钝化后的刀尖圆弧上曲率最大点,以此为起始点分别对主切削刃和主副后刀面交线的投影曲线进行回归。按线性回归置信区间,选择 99.5% 置信水平判断回归是否成功。

设后刀面表面受损的象素点坐标为 (x_i, y_i) ,选取一组独立的象素点,得到一样本 $((x_i, y_i)$,

($i=1, 2, \dots, n$), 依据数理统计方法, 可以求得投影曲线的回归方程为

$$\hat{y} = a + bx$$

\hat{a} 和 \hat{b} 为估值。用回归方程近似地表示理想投影线 l_1 和 l_2 , 可得:

$$l_1: y = a_1 + b_1x \quad (1)$$

$$l_2: y = a_2 + b_2x \quad (2)$$

(式中: $a_1 = \hat{a}_1, b_1 = \hat{b}_1, a_2 = \hat{a}_2, b_2 = \hat{b}_2$)

联立求解 l_1 与 l_2 , 可得交点 o' :

$$x_0 = \frac{a_2 - a_1}{b_1 - b_2} \quad (3)$$

$$y_0 = a_1 + b_1 \left(\frac{a_2 - a_1}{b_2 - b_1} \right) \quad (4)$$

以此交点 (x_0, y_0) 为中心, 旋转刀具磨损带图像使 l_1 成为水平, 此时取 l_1 为 $o'x$ 轴, 再作与 $o'x$ 垂直的坐标 $o'y$ 轴, 从而建立起相对坐标系 $x'o'y$ 。(如图 5 所示。)

对于刃倾角 $\lambda \neq 0$ 的刀具, 在建立上述 $x'o'y$ 后, 还必须将刀具磨损带图像作相对于 o' 旋转 $-\lambda$ 角度, 使其处于检测所需的正确位置。

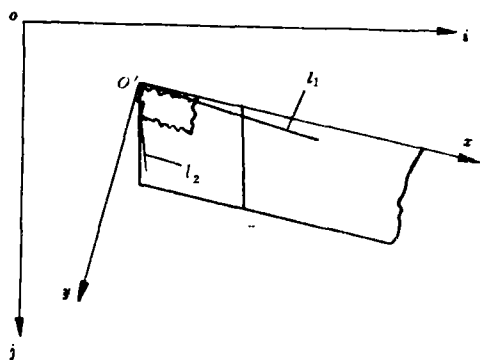


图 4

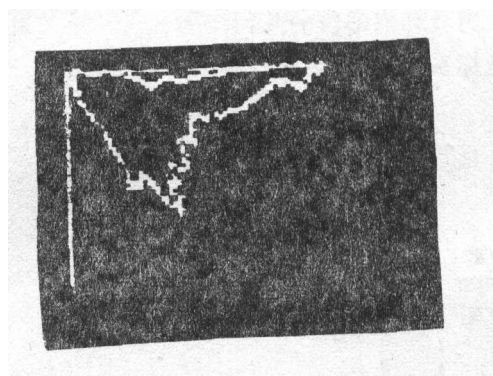


图 5

4 磨损状态几何特征量与磨损值 VB 的测量

笔者已在文献[1]中介绍, 刀具主后刀面磨损状态可分为正常磨损与非正常磨损两大类, 各个大类又分若干不同的情况, 根据磨损带几何边界的不同形态为刀具磨损状态识别建立了模型, 选择如下几何量为特征量:

$$x_i = \frac{x_p}{x_{max}} \quad (5)$$

$$y_i = \frac{y_{max}}{y_{ave}} \quad (6)$$

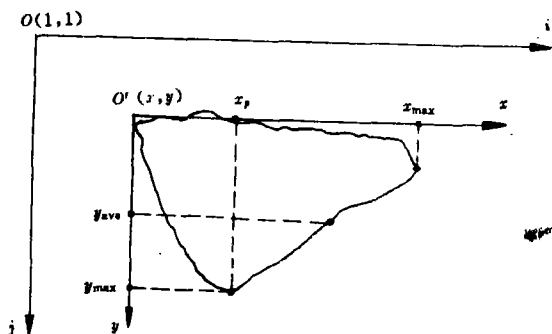


图 6

y_{max}, y_{ave} (平均磨损值)、 x 的几何意义如图 6 所示。根据 x_i 与 y_i , 可由判别模型判别对应的磨损类型。

刀具磨损形态反映出不同的刀具材料与工件材料相组合的切削加工特点, 表明

了被加工零件的加工性能和刀具的切削性能,对零件加工工艺有着重要指导意义。

在金属切削理论中, VB 定义为刀具主后刀面上的平均磨损量,对应于本文中的 y_{ave} ,本研究采用对磨损带边界图像进行扫描从而确定磨损带下边缘各点坐标 (x, y) ,进而求取 y_{ave} 。

5 切削刀具耐用度计算

刀具耐用度是指一次刃磨后,从刀具开始切削至磨损量达到磨钝标准 VB_{max} 为止的总切削时间。刀具耐用度的计算方法主要有两种:一种是通过联机测量刀具后刀面磨损值 VB 来估算;一种是利用理论公式的脱机计算。在机器视觉系统支持下,联机测量方法可迅速地对刀具进行在线检测。脱机计算方法的主要特点是对加工系统进行优化控制,但该方法所依据的理论公式需预先确定参数,必须要有金属切削数据库的支持才能实用,我国目前还未建立起金属切削数据库,极大地限制了脱机方法的应用。本研究在进行联机测算的同时,可计算出脱机计算所需参数(如泰勒公式和 Depierevx 公式的指数)并以数据文件方式存储起来以供脱机计算使用。为此,本研究建立了图 7 所示的图像处理系统。

5.1 联机计算耐用度

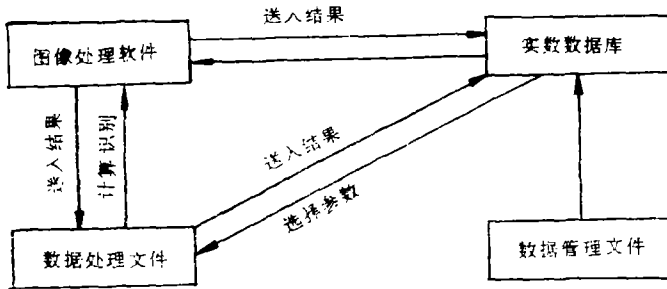


图 7

对(7)式两边取对数,可得

$$\ln VB = b_1 \ln t + b_2 \ln f + b_3 \ln V + \ln A \quad (8)$$

在双对数坐标系中,(8)式表示一条直线,即 $\ln VB$ 与 $\ln t$ 为线性关系。对该直线,可由实验确定其上两点,以确定该直线方程从而推算 VB 及达到 VB_{max} 的刀具耐用度。图 8 所示为某切削条件下,由测得的不同时间 t_1 和 t_2 以及与其相对应的磨钝值 VB_1, VB_2 所确定的 VB 与 t 在对数系中的关系曲线。

设任意时刻 t 的磨损值为 VB ,可得到

$$\frac{\ln VB - \ln VB_1}{\ln VB_2 - \ln VB_1} = \frac{\ln t - \ln t_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad (9)$$

可整理为

$$t = t_1 \cdot \left(\frac{VB}{VB_1} \right)^{\frac{\ln(t_2/t_1)}{\ln(VB_2/VB_1)}} \quad (10)$$

依据切削理论中的泰勒公式

$$VB = A \cdot t^{b_1} \cdot f^{b_2} \cdot V^{b_3} \quad (7)$$

其中 VB 为刀具主后刀面平均磨损量(mm), t 为耐用度(min), f 为进给量(mm/min), V 为切削速度(m/min), A, b_1, b_2, b_3 为常数。

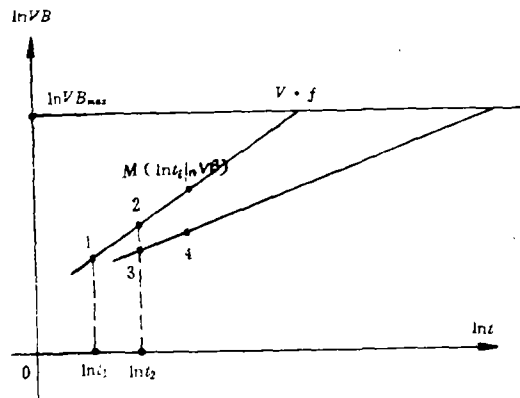


图 8

在(10)中,令 $VB=VB_{\max}$ (VB_{\max} 可从标准中查得),可计算实验条件下的耐用度 T 。

本文所推导的公式(10)具有一般意义,由它可求出不同的实验切削条件下刀具耐用度。实验证明,该公式计算结果精度较高,能满足实用要求。

5.2 脱机计算耐用度

本文主要研究以 Depiervex 公式为依据的耐用度计算。该公式是在实验基础上建立起来的计算公式,其计算结果与实际情况很接近因而被广泛地使用。目前西欧国家已经用 Depiervex 公式的计算参数更换了以往由泰勒公式建立的金属切削数据库数据。Depiervex 公式的形式为

$$T = e \left[-\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_1^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_1^n + a_c \right] \quad (11)$$

T 是耐用度, $a, a_{KV}, a_m, a_{fj}, a_c$ 是与刀具材料和工件材料有关的常数。

为使用(11)式,首先要确定公式中的五个常数。在切削过程中测取五组数据: $(T_1, V_1, f_1), (T_2, V_1, f_2), (T_3, V_1, f_3), (T_4, V_2, f_3), (T_5, V_3, f_3)$, 将它们代入对数形式的 Depiervex 公式

$$\ln T = -\frac{a_{KV}}{a_m} V_1^m - \frac{a_{fj}}{a_s} f_1^n + a_c \quad (12)$$

得到一个方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln T_1 = -\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_1^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_1^n + a_c \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln T_2 = -\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_1^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_2^n + a_c \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln T_3 = -\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_1^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_3^n + a_c \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln T_4 = -\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_2^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_3^n + a_c \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln T_5 = -\frac{a_{KV}}{a_m} \cdot V_3^m - \frac{a_{fj}}{a_s} \cdot f_3^n + a_c \end{array} \right. \quad (17)$$

由(14)-(13)可得

$$\ln T_2 - \ln T_1 = \frac{a_{fj}}{a_s} (f_1^n - f_2^n) \quad (18)$$

由(15)-(13)可得

$$\ln T_3 - \ln T_1 = \frac{a_{fj}}{a_s} (f_1^n - f_3^n) \quad (19)$$

再由(19)除(18)可得

$$\frac{\ln T_2 - \ln T_1}{\ln T_3 - \ln T_1} = \frac{f_1^n - f_2^n}{f_1^n - f_3^n}$$

令 $A=f_2/f_1, B=f_3/f_1, C=\frac{\ln T_2 - \ln T_1}{\ln T_3 - \ln T_1}$, 上式可整理为

$$C \cdot B^m = A^m - 1 + C \quad (20)$$

显然 $a_m \neq 0$. 当 $A > 1, B < 1$ 或 $A < 1, B > 1$ 时, 方程(20)有非零解, 用数值计算方法可求出 a_m 。

同理可由(15)-(14)除(17)-(14)得到:

$$\frac{1 - G^m}{1 - D^m} = E \quad (21)$$

式中: $G=V_2/V_1, D=V_3/V_1, E=\frac{\ln T_4 - \ln T_5}{\ln T_3 - \ln T_5}$ 。

用迭代法求出(21)式中的 a_m 。求出 a_m 和 a_n 后,可解出 a_{ij}, a_{kv}, a_e 。将这五个参数的值代入(11)就可以求出在相应的切削条件(V, f)下,刀具的耐用度 T 。

6 切削过程的优化控制

加工质量、加工成本和生产率是切削加工过程控制的三个基本控制量。在保证加工质量前提下,成本与生产率相互制约,难于同时得到低成本和高效率。在经济加工条件下,切削过程的优化是以生产每个零件的最低成本为目标而进行的。当刀具耐用度 T 一定时,优化的实质是求定最优的切削参数(f, V)。零件的切削加工成本公式为

$$K = A_1 + B_1 + \frac{C_1}{f \cdot V} + \frac{D_1}{f \cdot V \cdot T} \quad (22)$$

公式中 A_1, B_1, C_1, D_1 为常数与工艺经济因素和工人的工资有关,可查阅工艺手册。 K 是加工成本。

将(11)式代入(22)式且令 $\alpha = \frac{a_{kv}}{a_m} \cdot V^m + \frac{a_{ij}}{a_n} \cdot f^n - a_e$, 可得到

$$K = A_1 + B_1 + \frac{C_1}{f \cdot V} + \frac{D_1}{f \cdot V} e^\alpha \quad (23)$$

对(23)求 f, V 的偏导且令其为零,可得到

$$\begin{cases} e^\alpha (a_{kv} \cdot V^m - 1) = \frac{C_1}{D_1} & (24) \\ e^\alpha (a_{ij} \cdot f^n - 1) = \frac{C_1}{D_1} & (25) \end{cases}$$

因为 $\frac{C_1}{D_1} > 0, e^\alpha > 0$, 由(24), (25)可推出

$$\begin{cases} a_{kv} \cdot V^m > 1 \\ a_{ij} \cdot f^n > 1 \end{cases}$$

分别对(24)、(25)取对数且联立求解,可得

$$V^m \cdot \left(\frac{a_{kv}}{a_m} + \frac{a_{kv}}{a_n} \right) - \left(\ln \frac{C_1}{D_1} + a_e \right) = - \ln(a_{kv} \cdot V^m - 1)$$

令 $a_{kv} \cdot V^m = x, \ln \frac{C_1}{D_1} + a_e = R, \frac{1}{a_m} + \frac{1}{a_n} = S$, 上式为

$$Sx - R = - \ln(x - 1) \quad (26)$$

采用迭代方法可求解(26),得到

$$V = \left(\frac{x}{a_{kv}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (27)$$

将(27)式代入(23)式的对数形式中得

$$f = \sqrt[n]{\left[\ln \frac{C_1}{D_1} + a_e - \frac{a_{kv}}{a_m} V^m - \ln(V^m \cdot a_{kv} - 1) \right] \frac{a_n}{a_{ij}}} \quad (28)$$

至此,求得了最佳切削速度 V 和最佳进给量 f 。将此 f 和 V 代入(11)式就可求出最佳耐用度 T_0 ,再根据(22)式可求得最低加工成本 K_0 。

7 测试系统精度分析

本系统的误差主要来源于两个方面：一是系统硬件部份的误差，主要是摄像机镜头的光学误差和图像采集卡的电学误差。另一方面是图像处理方法和图像坐标变换等软件处理带来的误差。

本系统使用工业电视摄像机，摄像机镜头的光学误差主要是镜头的畸变误差，近年来国内外学者对此进行了许多研究(文献[3])。研究表明，光学镜头的径向畸变误差对像质和测量精度影响较大并且在一幅图像上分布不一样，在影像中心(视场中心60%范围内)径向畸变差一般为0.2~0.3象元，在影像周边此项误差可1个象元。本研究所获取的刀具磨损带图像处于视场中心，磨损带面积不大，畸变差可取为 $\Delta_1=0.3$ 象元。

图像采集卡的电学误差主要表现为行同步误差，场同步误差和象素采样这三项误差。其影响表现为影像的非规则抖动，影响象素的几何位置和象素的灰度值。据有关研究，抖动误差可达0.2~0.4象元。本系统取此项误差为 $\Delta_2=0.4$ 象元。

根据本研究所用的图像处理技术方法，综合考虑对图像施加的平滑处理、提取边缘和图像旋转变换，误差为1个象元，即 $\Delta_3=1$ 象元。

按总误差合成原理，上述各项误差合成为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{0.3^2 + 0.4^2 + 1^2} = 1.18(\text{象元})$$

经测定，本系统的象元尺寸为：4.5 μm ×3.6(μm)，可得本系统在 x 方向上的误差为5 μm ，在 y 方向上的误差为4 μm 。

8 实验及结论

8.1 实验条件及实验结果

机床：C46132；工件： $\varnothing 12$ 圆钢(45号调质钢)；
 转速： $n=950$ (转/分)；进给量： $f=0.05$ (毫米/转)
 切削深度： $a_p=0.5$ (毫米)；磨钝标准： $VB_{\max}=1.75$ (毫米)
 刀具：(1)高速钢外圆车刀。

(2)硬质合金外圆车刀。(两刀具角度不相等)。

实验结果见表1。

表 1

刀具材料	联机计算	脱机计算
	刀具耐用度 T	刀具耐用度 T
高速钢	205(分钟)	203(分钟)
硬质合金	145(分钟)	142(分钟)

8.2 结论

在上述实验条件下，使用高速钢刀具，切削到 $t=210$ 分钟时，测得 $VB=1.77$ 毫米。若取磨钝标准为 $VB_{\max}=1.75$ 毫米，由线性插值法可知， $VB=VB_{\max}$ 时，实际切削时间应当为： $T' = \frac{1.75}{1.77}$

×210=208分钟。可见联机测量的相对误差为

$$\frac{|T' - T|}{T} \times 100\% = \frac{|208 - 205|}{208} \times 100\% = 1.4\%$$

实验表明,使用机器视觉技术能高精度地检测刀具磨损,优化切削过程。但由于切削过程中的一些限制条件(如冷却液,切屑等),仅仅使用机器视觉系统对切削刀具进行实时的直接检测还难于实现。然而,近年来兴起的神经网络测试技术和方法,使得机器视觉系统用于监控刀具和切削加工过程成为可能^[4]。

参 考 文 献

- 1 梅安华,王菁蕙. 机器视觉检测刀具磨损状态初探. 武测科技,1991(2),52~56
- 2 George E. Kane. Modern Trends in Cutting Tools. Society of Manufacturing Engineers, 1982.
- 3 Fryer, J G. Repis Lens Calibration of a Vidco Camera. PE&RS, 1989, 55(4)
- 4 Michael , Buffa G. Neural-Network Systym will Make Machine Vision Applications Economically Justifiable, Vision 89 ,Chicago, Illinois. 1989, 24~27
- 5 [日]田村秀行等著,赫荣威等编译. 计算机图象处理技术. 北京师范大学出版社,1989.
- 6 南京航空学院航空制造系等编译. 机械制造系统. 上海科学技术出版社,1984.

Study on the Wear and Life of Cutting Tool by the Use of Machine Vision

Mei Anhua Wang Jinghui

Abstract This paper presents a method of applying a system which consists of an optoelectronic scanner (TV camera or CCD), a microscope and an IBM-PC computer to obtain the micrograph information from the worn region on the flank of the cutting part of the tool and analyze and process the picture by means of image processing and mode recognizing technology. The on-line and off-line methods are used respectively to calculate accurately the worn value, recognize the form of wearing. Base on these, the manufacturing process could be recognized and controled. At the last, the optimum values of cutting velocity and feed are given, which meet the principle of the lowest cost and longest tool life. It is proved by experiments that the conclusion of the theoretical analysys and calculation agrees with the practical tests. The article provides a practical and precise way of recognizing and controlling manufacturing process on line.

Key words machine vision; cutting tool life; cutting wear; Image processing; model recognizing