

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G05B 19/41

G05B 19/4099



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 98813256.7

[43] 授权公告日 2003 年 6 月 4 日

[11] 授权公告号 CN 1110730C

[22] 申请日 1998.12.8 [21] 申请号 98813256.7

[30] 优先权

[32] 1997.12.22 [33] CH [31] 2944/1997

[86] 国际申请 PCT/IB98/01949 1998.12.8

[87] 国际公布 WO99/32949 德 1999.7.1

[85] 进入国家阶段日期 2000.7.21

[71] 专利权人 斯塔拉格公司

地址 瑞士罗尔沙赫尔贝格

[72] 发明人 马克斯·恩格利

约尔格·瓦尔德弗格尔

托马斯·施尼德

[56] 参考文献

CN1155337A 1997.07.23 G05B19/4103

EP0798616A2 1997.10.01 G05B19/18

US5033005A 1991.07.16 G06F15/46

US5363309A 1994.11.08 G06F15/46

审查员 裴素英

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所

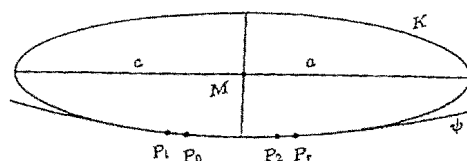
代理人 孙 征

权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 6 页

[54] 发明名称 工件切削加工方法

[57] 摘要

本发明涉及一种用刀具为工件切削加工的方法，刀具沿路线在工件上导引。在每个点按这样的方式选择偏角和外倾角，即，使公差区的宽度是最佳的，在公差区范围内刀具的作用区(K)处于工件所要求的额定表面(Psi)的公差范围内。此外，两点(P₁、P_r)之间的距离最大，这两点表明了公差区最靠外的点。由此可以通过少量路线制造出高精度的表面。



1. 用刀具为工件表面切削加工的方法，其中，刀具沿路线(B)在工件上导引并与此同时去除工件上处于刀具作用区(τ)内的材料，以制造所要求的额定表面(ψ)，其特征为：沿其路线重复调整不仅外倾角而且偏角，以便使一个公差区最大化，该公差区被称为一个连续区，在该连续区内，在额定表面与刀具作用区之间的距离在一个预定的公差范围内，为此，通过使作用区(τ)按计算在两点(P_0 、 P_2)与工件的额定表面(ψ)接触，然后改变至少一个点的位置，确定外倾角和偏角，其中，对所述公差区进行最大化的方式是，或者通过至少改变两个点(P_0 、 P_2)之一，直至两点之间的距离最大，或者通过至少改变两个点(P_0 、 P_2)之一，直至所述公差区的宽度最大。

2. 按照权利要求1所述的方法，其特征为：按这样的方式调整外倾角和偏角，即，使刀具始终处于额定表面的上方。

3. 按照前列诸权利要求之一所述的方法，其特征为：至少改变两个点(P_0 、 P_2)之一，直至两点之间的距离最大。

4. 按照权利要求1或2所述的方法，其特征为：至少改变两个点(P_0 、 P_2)之一，直至所述公差区的宽度最大。

5. 按照权利要求1或2所述的方法，其特征为：固定两个点之一和改变另一个。

6. 按照权利要求1或2所述的方法，其特征为：为在额定表面上的许多点确定最大宽度的公差区；为每个点确定一个方向，该方向与所述公差区的一个最大直径相对应；以及，路线(B)选择为基本上垂直于这些方向。

7. 按照权利要求1或2所述的方法，其特征为：路线的间隔根据公差区的宽度选择。

8. 用刀具为工件表面切削加工的方法，其中，刀具沿路线(B)在工件上导引并与此同时去除工件上处于刀具作用区(τ)内的材料，以制造所要求的额定表面(ψ)，其特征为：沿其路线按这样的方式重复调整

不仅外倾角而且偏角，即，通过改变外倾角和偏角的数值使一个公差区宽度最大，该公差区被称为一个连续区，在该连续区内，在额定表面与刀具作用区之间的距离处于预定的公差范围内。

9. 用刀具为工件表面切削加工的方法，其中，刀具沿路线(B)在工件上导引并与此同时去除在刀具作用区(τ)内的材料，以制造所要求的额定表面(ψ)，其特征为：沿其路线按这样的方式重复调整不仅外倾角而且偏角，即，为路线上许多点的每个点确定一条位于额定表面内的贴合曲线($c(t)$)，该贴合曲线是通过它在该点的曲率、曲率导数和第二曲率与一条作用曲线的那些曲率、曲率导数和第二曲率相等来确定的，其中，此作用曲线是刀具作用区(τ)上离额定表面(ψ)有最小距离的那些点的集合。

10. 按照权利要求9所述的方法，其特征为：作用曲线是一个圆。

工件切削加工方法

本申请要求瑞士专利申请 2944/97 的优先权，它于 1997 年 12 月 22 日提交以及其公开的全部内容经参照吸收在本申请中。

技术领域

本发明涉及一种工件表面的切削加工方法。

背景技术

这种方法例如用于生成在 CAD (计算机辅助设计) /CAM (计算机辅助制造) 系统中的五轴刀具加工路线以加工有所需任意表面的工件。

所有已知的贴合方法都从刀具在工件上预先确定的接触路线开始。有不同的方法确定接触路线上所选点的位置和方位，亦即外倾角（沿刀具运动方向的刀具轴线与所需表面法线之间的夹角）和偏角（刀具轴线沿垂直于刀具运动方向的方向时的倾斜角）。目前最好的方法（Jean-Pierre Kruth and Paul Klewais, Optimization and Dynamic Adaptation of the Cutter Inclination during Five-Axis Milling of Sculptured Surfaces, Annals of the CIRP, 1994）是基于工件和刀具的二次近似投影确定外倾角和偏角。对于恒定的偏角推导出一个用于计算临界外倾角（在近似时正好不出现潜挖的外倾角）的二次方程。这种方法尽管精度有限（有冲突的危险）但加工越来越复杂。

发明内容

因此，本发明的目的是提供一种前言所述类型的方法，这种方法至少部分克服已知方法的缺点。尤其是应允许快速并因而经济地加工。

根据本发明，提出一种用刀具为工件表面切削加工的方法，其中，刀具沿路线 B 在工件上导引并与此同时去除工件上处于刀具作用区 τ 内的材料，以制造所要求的额定表面 ψ ，其特征为：沿其路线重复调整不仅外倾角而且偏角，以便使一个公差区最大化，该公差区被称为一个连

续区,在该连续区内,在额定表面与刀具作用区之间的距离在一个预定的公差范围内,为此,通过使作用区 τ 按计算在两点 P_0 、 P_2 与工件的额定表面 ψ 接触,然后改变至少一个点的位置,确定外倾角和偏角,其中,对所述公差区进行最大化的方式是,或者通过至少改变两个点 P_0 、 P_2 之一,直至两点之间的距离最大,或者通过至少改变两个点 P_0 、 P_2 之一,直至所述公差区的宽度最大。

根据本发明,还提出一种用刀具为工件表面切削加工的方法,其中,刀具沿路线 B 在工件上导引并与此同时去除工件上处于刀具作用区 τ 内的材料,以制造所要求的额定表面 ψ ,其特征为:沿其路线按这样的方式重复调整不仅外倾角而且偏角,即,通过改变外倾角和偏角的数值使一个公差区宽度最大,该公差区被称为一个连续区,在该连续区内,在额定表面与刀具作用区之间的距离处于预定的公差范围内。

根据本发明,还提出一种用刀具为工件表面切削加工的方法,其中,刀具沿路线 B 在工件上导引并与此同时去除在刀具作用区 τ 内的材料,以制造所要求的额定表面 ψ ,其特征为:沿其路线按这样的方式重复调整不仅外倾角而且偏角,即,为路线上许多点的每个点确定一条位于额定表面内的贴合曲线 $c(t)$,该贴合曲线是通过它在该点的曲率、曲率导数和第二曲率与一条作用曲线的那些曲率、曲率导数和第二曲率相等来确定的,其中,此作用曲线是刀具作用区 τ 上离额定表面 ψ 有最小距离的那些点的集合。

也就是说与已知的方法不同,不是在接触点区域内进行局部适配,而是实施公差区尺寸例如宽度的非局部优化,因此减少了加工路线的数量以及加工可以合理化。

优选地按这样的方式选择外偏角和偏角,即,使刀具始终处于额定表面的上方。因此可通过手挖修整使表面更好地调整到其规定的形状。在已知的 Kruth 和 Klewais 的方法中,借助于准确描述刀具和工件表面可以证明,刀具可能伤害工件(尤其在使用大型刀具时)。

按另一种优选的实施形式,加工路线选择为,为额定表面上的每个点确定公差区和公差区最大直径的方向。加工路线选择为基本上垂直于

此直径，由此可以减少加工路线的数量。

在本发明的另一种实施形式中，为在额定表面上为一个点确定一条贴合曲线。它在给定点的导数，尤其是其曲率、曲率的导数和第二曲率，与描述刀具作用范围的作用曲线（由与额定表面有最小距离的所有点构成）一致。如在下面所指出的那样，采用这种方法可在计算方法简便的情况下确定刀具良好适配的位置。

可采用本方法的加工技术例如五轴铣、磨、腐蚀、车。作为工件则例如用于飞机、汽车或轮船的外蒙皮、流体机械零件如涡轮叶片、设计零件（Designerteile）等。

附图说明

由下面借助于图所作的说明中给出本发明其他优点和应用。其中：

图 1 带环面段的旋转对称刀具，环面段作用在工件上（环面中心圆 K 的半径为 a ，小环面半径为 b ）；

图 2 不同刀具举例：圆柱形刀具（A）、环面刀具（B）、球面刀具（C）；

图 3 Hermite 法：圆 $\tilde{K}$ 应绕 e_2 转 θ 角，所以切向矢量 $\tilde{t}_0$ 垂直于法线 n_0 ，解是圆 K ；

图 4a Hermite 法：有两个贴合点 P_0 和 P_2 、贴合的环面中心圆 K 有给定的长半轴 a 的所需表面 ψ ；

图 4b 图 4a 贴合点之间的距离函数曲线；

图 5a Hermite-Chebyshev 法：有两个贴合点 P_0 和 P_2 、贴合的环面中心圆 K 、以及超过 $Stol$ 的点 P_l 和 P_r 的任意表面 ψ ；

图 5b 图 5a 的装置的距离函数曲线；

图 6a Taylor 法： τ 局部优化贴合在 ψ 上等效于 K 局部优化贴合在 ψ 上；

图 6b 图 6a 的距离函数曲线，到超过 $Stol$ 的点 P_l 和 P_r 为止；

图 7 Taylor 法：有表面曲线 c 的所需表面 ψ ，它在贴合点 $P_0=c_0$ 的泰勒级数前三项与圆的泰勒级数一致；

图 8 环面上双曲线（左）和椭圆（右）点的四重解（在右边的四

重解中第四个解被环面覆盖)；

图 9 用于环面刀具有贴合矢量场 A 的所需表面 ψ ，短的线段起始于在 ψ 上的接触点，沿法向延伸以及终止于在 ${}_0\psi$ 上的接触点，长的线段起始于在 ${}_0\psi$ 上的接触点以及终止于环面中心；

图 10 图 9 的贴合矢量场 A 在 ψ 上的间隔场 D ；

图 11 有接触路线 $B(s) := \psi(u(s), v(s))$ 、沿 B 的贴合矢量场 A 和沿 B 的间隔矢量场 D 的所需表面 ψ ；

图 12 在编制有局部优化贴合的刀具工艺规程时计算过程的两种不同的可能性（使用缩写 WKS 表示工具坐标系，MKS 表示机器坐标系；在 CAM 系统以及在控制器内都可以采用优化贴合的算法）；以及

图 13 在构成平行面的同时环面缩减至其中心圆上。

具体实施方式

在下面的讨论中所提出的本问题首先从数学的观点来处理。然后介绍按本发明方法的不同实施例。

刀具

研究如图 1 所示的旋转对称刀具，其中一个环面段 τ 作用在工件上。在这里，环面段 τ 表示刀具的作用区，亦即其中工件的材料被去除的那个区域。

对于刀具，在这里可涉及任何用于切削加工的刀具，例如旋转的铣刀头或用于电腐蚀加工的设备的刀具电极。

环面 τ 的大半径用 a 表示，小半径用 b 表示，以及环面中心圆用 K 表示。

环面的一种可能的参数化为

$$\tau(t, s) := \begin{bmatrix} (a + b * \cos(t)) * \cos(s) \\ (a + b * \cos(t)) * \sin(s) \\ b * \sin(t) \end{bmatrix}$$

图 2 表示一些典型的例子：圆柱刀具 ($a > 0, b = 0$)、环面刀具 ($a > b > 0$) 以及球面刀具 ($a = 0, b > 0$)。

采用球面刀具不能改善当地的贴合质量, 因为少了一个自由度。因此在这里不必对它作进一步讨论。

工件

用标记符号 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示欧几里得标积, $\|\cdot\|$ 表示欧几里得范数, $\cdot X \cdot$ 表示矢量积, 以及 $d(P, Q) := \|P - Q\|$ 表示两个点 P, Q 的欧几里得距离。令 $\psi(u, v) \in C^4([0, 1]^2, \mathbb{R}^3)$ 是工件所需的表面, 亦即加工后期望的额定表面。例如实际使用的所需表面的数学表达式是 Bézier 表面、有理的 Bézier 表面、B-样条和 NURBS (Non uniform rational B-splines)。对于偏导数使用符号 ψ_{σ} 和 $\sigma \in \{u, v, uu, uv, vv, uuu, uuv, uvv, vvv\}$ 。借助于法向矢量 $n := \psi_u \times \psi_v$ 可以描述 d -偏离面和 d -平行面:

$$d\psi := \psi + d \frac{n}{\|n\|}$$

最佳贴合

下面讨论刀具应如何在每一点相对于工件定向, 以达到尽可能好地贴合所需表面 (额定表面)。

上述方式的刀具局部优化贴合所需表面可用非线性方程组表达。在这方面这里称为 Taylor 法、Hermite 法和 Hermite-Chebyshev 法的三种贴合方法是不同的。用 Hermite-Chebyshev 法可达到理论上尽可能好地贴合。尽可能好地贴合指的是, 当给定垂直于所需表面方向的公差带 (公差范围) (通常公差带全部位于所需表面上方) 时, Hermite-Chebyshev 法提供此表面上不超出公差带的最大区域。Hermite 法得出约窄 30% 的路线。计算工作量较小的 Taylor 法与 Hermite 法有大约同样宽度的路线并可用于为 Hermite 法提供初值。

在所有三种贴合法中, 用方程组表示圆柱形刀具。若环面向环面中心圆收缩并与此同时计算与所需表面的平行面, 则得出在环面 (极限值为环面中心圆) 与平行面之间始终相同的距离关系 (见图 13)。

通过数学表达将一个圆按不同准则局部优化地定位在所需表面上。对于 $b > 0$ 的刀具使用 b -平行面 $b\psi$ 和 $-b\psi$, 以及环面中心圆 K

借助用于圆柱形刀具的方法来贴合。

图 6a 以 Taylor 法为例图解说明, 从 τ 到 ψ 的局部优化贴合等效于从 K 到平行面 ${}_b\psi$ 和 ${}_{-b}\psi$ 的局部优化贴合。这一事实适用于所有的三种贴合法。这尤其意味着, 所有三种贴合法的每一种在 τ 与 ψ 之间和在 K 与 ${}_b\psi$ (或 ${}_{-b}\psi$) 之间的贴合质量完全相同。这一陈述被利用来达到非常迅速地评估刀具的公差区 (在此区内刀具偏离工件表面小于预定的量 $stol$)。

Hermite 法

在 Hermite 法中用两个相近的贴合点 P_0 和 P_2 , 在这些点处刀具应接触所需表面 ψ (图 4a、4b)。在这里的情况下针对圆柱形刀具, 亦即针对一个圆来解 Hermite 贴合问题。(也可以取代圆而取一任意曲线, 例如椭圆, 此时表达式 (1) - (4) 必须相应修改)。此圆应在两个贴合点 P_0 和 P_2 与所需表面接触。

为了导出方程组, 观察两个相邻点 $P_0 := \psi(u_0, v_0)$, $P_2 := \psi(u_2, v_2)$ 。相关的法线用 n_0, n_2 表示, 连接矢量 $P_2 - P_0$ 用 v 表示, 它的长度用 $2c$ 表示 (图 3)。矢量 n_0, n_2 和 v 通常不在同一个平面内, 而且 n_0 和 n_2 不垂直于 v 。

为求解 Hermite 贴合问题, 引入有下列基本矢量的坐标系

$$e_2 := v / \|v\|, \quad e_1 := \frac{e_2 \times n_0}{\|e_2 \times n_0\|} \quad \text{和} \quad e_3 := e_1 \times e_2$$

基本思想是, 绕 e_2 旋转一个在 e_2, e_3 平面内通过 P_0 和 P_2 的有给定直径 $2a$ 的圆 $\tilde{K}$, 直至在点 P_0 切向矢量 $\tilde{t}_0$ 垂直于 n_0 为止。切向矢量 $\tilde{t}_0$ 在 e_1, e_2, e_3 坐标系内有分量 $(0, -h, c)^T$, 其中 $h := \sqrt{a^2 - c^2}$ 和 n_0 有坐标 $(0, \langle n_0, e_2 \rangle, \langle n_0, e_3 \rangle)^T$ 。方程

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -h \\ c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ \langle n_0, e_2 \rangle \\ \langle n_0, e_3 \rangle \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

现在确定旋转角 θ 的余弦

$$\cos(\theta) = \frac{h \langle n_0, e_2 \rangle}{c \langle n_0, e_3 \rangle} \quad (2)$$

和 K 在 P_0 及 P_2 的切向矢量

$$t_0 = -c \sin(\theta) e_1 - h e_2 + c \cos(\theta) e_3 \quad (3)$$

$$t_2 = -c \sin(\theta) e_1 + h e_2 + c \cos(\theta) e_3 \quad (4)$$

于是, 由 P_0 、 P_2 和 n_0 可确定圆 K 的位置。通常, 圆 K 不垂直于 n_2 : $\langle n_2, t_2 \rangle \neq 0$ 。

因此, 问题在于按 Hermite 法不可能借助于两个任选点完成贴合。 P_0 、 P_2 与在这些点的法向矢量 n_0 、 n_2 之间的相对位置, 对于解是否存在是决定性的。下面推荐一种可以找到这种有解点对的方法。

令 $P_0 := \psi(u_0, v_0)$ 是 ψ 上的一个点。在 P_0 的周围找出按 Hermite 法存在贴合的点 $P_2 := \psi(u_0 + \Delta u, v_0 + \Delta v)$ 。这一次任选此周围区。例如在参数平面内以 (u_0, v_0) 为中心的圆

$$\Delta u^2 + \Delta v^2 = r^2 \quad (5)$$

按上述构思计算对于 P_0 、 P_2 和 n_0 的贴合圆位置并因而切线 t_2 。要求切线 t_2 垂直于 n_2 :

$$\langle n_2(\Delta u, \Delta v), t_2(\Delta u, \Delta v) \rangle = 0 \quad (6)$$

因此用 (5) 和 (6) 表示了用于寻找 P_2 点的方程组。此方程组最好这样求解, 即将圆 (5) 参数化并代入 (6) 中。得出的方程可借助虚位置法求解。于是 τ 相对于 ψ 定位:

$$\Omega \tau(t, s) + v,$$

其中 Ω 是方向, v 是位置。在这里得出四重解 (两个解用于加工外表面, 另两个解用于加工内表面)。对于环面这种特殊情况能非常好地解出 (参见例如 Taylor 法, 图 8)。

在按 Hermite 法贴合的刀具中, 在贴合点 $P_0 = \tau(t_0, s_0)$ 和 $P_2 = \tau(t_2, s_0)$ 的范围内, τ 与 ψ 之间的距离函数表示为方程 (见图 4b)

$$d(t) = k \left[\left[t - t_0 - \frac{t_2 - t_0}{2} \right]^2 - \left[\frac{t_2 - t_0}{2} \right]^2 \right]^2 + O(t^5) \quad (7)$$

此函数满足 $d(t_0) = d'(t_0) = d(t_2) = d'(t_2) = 0$ 以及假定在 $(t_2 + t_0)/2$ 有最大值:

$$k \left[\frac{t_2 - t_0}{2} \right]^4 \quad (8)$$

为了以 P_0 为出发点找到 ψ 上的那个点 P_2 , 即在 P_0 与 P_2 以内距离最大值等于 $stol$ 的点, 迭代地重复下列步骤, 直至达到期望的精度:

按上面的说明确定 P_2 。为了测量距离, 使用在 τ 上与 ψ 的接触圆 $C(t) := \Omega\tau(t, s_0) + v$ 。在 C 与 ψ 之间的最大距离通过求解

$$d^* = \max_{t,u,v} d(C(t), \psi(u, v)) \quad (9)$$

得出。按有关贴合质量的说明可计算常数 k :

$$k = \frac{d^*}{(t^* - t_0)^4} \quad (10)$$

由此确定距离约等于 $stol$ 的参数 $\hat{t}_2$:

$$\hat{t}_2 = t_0 + 2 \left[\frac{stol}{k} \right]^{1/4} \quad (11)$$

系数 $f := [\hat{t}_2 - t_0] / (t_2 - t_0)$ 应用于在 (5) 内的半径 r 处,

$$\Delta u^2 + \Delta v^2 = (fr)^2 \quad (12)$$

以及此问题用 (12)、(6) 求解。整个过程反复迭代, 直至达到要求的精度。

Hermite-Chebyshev 法

Hermite-Chebyshev 法利用 Hermite 法所用的优化贴合的计算方法。这意味着, 距离函数也是完全相同的。但可扩大刀具的使用宽度, 因为尚未超过 $stol$ 的区域 (下方从 P_0 至 P_1 和上方从 P_2 至 P_r , 见图 5a、5b) 增大。简短的计算表明, 在接近位置

$$t_1 = t_0 - (\sqrt{2} - 1) \frac{t_2 - t_0}{2} \quad (13)$$

$$t_r = t_2 + (\sqrt{2} - 1) \frac{t_2 - t_0}{2} \quad (14)$$

处, $d(t)$ 有在 P_0 与 P_2 范围内假定的最大值 $k((t_2 - t_0)/2)^4$ 。因此, 与 Hermite 方法相比, Hermite-Chebyshev 方法的使用宽度大约增大 $\sqrt{2}$ 倍, 也就是说刀具路线的数量约减少 30%。在 Hermite 方法和 Hermite/Chebyshev 方法中, 接触点附近发生冲突的危险比 Taylor 法小。

为了更准确地计算还可设想, 对每个接触点对 P_0 、 P_2 直接在数值上确定点 P_1 和 P_r 的位置, 也就是说不通过近似式(13)和(14)。由此可计算 P_1 和 P_r 之间的距离, 然后优化。

Taylor 法

与前两种贴合法不同, 在 Taylor 法中只研究贴合点 $P_0=c_0:=\psi(u_0, v_0)$ 。在 P_0 , 一个圆应按 Taylor 法局部优化地置于表面上。求解此问题的基本思想是, 找到一条通过 P_0 延伸并包含在 ψ 内的贴合曲线的泰勒级数 $c(t):=\psi(u(t), v(t))$, 它在展开点 c_0 尽可能近似于圆(见图7)。在这里, 此圆至少局部描述了刀具的工作区并称为工作曲线。

因此, 在 c_0 处按弧长参数化的泰勒级数(15) - (17)在那里应有与此圆相同的曲率(18)、曲率导数(19)和第二曲率(20)(用方程组(15) - (20)可以贴合具有给定的当地第二曲率和曲率导数的任意作用曲线; 例如在预定的贴合点一个椭圆贴合在此椭圆上):

$$\langle \dot{c}_0, \dot{c}_0 \rangle = 1 \quad (15)$$

$$\langle \dot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 0 \quad (16)$$

$$\langle \dot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle + \langle \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 0 \quad (17)$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 1/a^2 \quad (18)$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 0 \quad (19)$$

$$\langle \dot{c}_0 \times \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 0 \quad (20)$$

对于此圆, 可用窍门将有 6 个方程和未知数的(15) - (20)减少到有 4 个方程和未知数的非线性方程组。为了简化, 从现在起 $\psi_\sigma(u_0, v_0)$ 用符合 ψ_σ 表示。从(17)、(19)和(20)出发, c_0 必须反向平行于 $\dot{c}_0$ 。因为 $\dot{c}_0$ 是 ψ_u 和 ψ_v 的线性组合以及 $n_0:=n(u_0, v_0)$ 垂直于这两个矢量, 所以 $\ddot{c}_0$ 也必须垂直于 n_0 。研究在 c_0 按弧长参数化的泰勒级数

$$\dot{c}_0 = \psi_u \dot{u} + \psi_v \dot{v}$$

$$\ddot{c}_0 = \psi_u \ddot{u} + \psi_v \ddot{v} + \psi_{uu} \dot{u}^2 + 2\psi_{uv} \dot{u} \dot{v} + \psi_{vv} \dot{v}^2$$

$$\begin{aligned}\ddot{c}_0 = & \Psi_u \ddot{u} + \Psi_v \ddot{v} + 3\Psi_{uu} \dot{u} \dot{u} + 3\Psi_{uv} (\dot{u} \dot{v} + \dot{u} \dot{v}) + 3\Psi_{vv} \dot{v} \dot{v} + \\ & \Psi_{uuu} \dot{u}^3 + 3\Psi_{uuv} \dot{u}^2 \dot{v} + 3\Psi_{uvv} \dot{u} \dot{v}^2 + \Psi_{vvv} \dot{v}^3\end{aligned}$$

表明，在简化后的方程组

$$\langle \dot{c}_0, \dot{c}_0 \rangle = 1 \quad (21)$$

$$\langle \dot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 0 \quad (22)$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = 1/a^2 \quad (23)$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{n}_0 \rangle = 0 \quad (24)$$

中，在(24)中消去了有 $\ddot{u}$ 和 $\ddot{v}$ 的项。这意味着，通过计算在 (u, v) 参数平面内找到的曲线参数化的系数 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\ddot{u}$ 、 $\ddot{v}$ ，确定最佳贴合圆的位置和方向。

利用简写 $g_{\sigma, \mu} = (\Psi_{\sigma}, \Psi_{\mu})$ ，可全部列出方程组如下：

$$\langle \dot{c}_0, \dot{c}_0 \rangle = g_{u,u} \dot{u}^2 + 2g_{u,v} \dot{u} \dot{v} + g_{v,v} \dot{v}^2 \quad (25)$$

$$\langle \dot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = g_{u,uu} \dot{u}^3 + (2g_{u,uv} + g_{v,uu}) \dot{u}^2 \dot{v} + (2g_{v,uv} + g_{u,vv}) \dot{u} \dot{v}^2 + g_{v,vv} \dot{v}^3$$

$$g_{u,u} \dot{u} \ddot{u} + g_{u,v} \dot{u} \ddot{v} + g_{u,v} \ddot{u} \dot{v} + g_{v,v} \dot{v} \ddot{v}$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{c}_0 \rangle = g_{uu,uu} \dot{u}^4 + 4g_{uu,uv} \dot{u}^3 \dot{v} + 2(g_{uu,vv} + 2g_{uv,uv}) \dot{u}^2 \dot{v}^2 + 4g_{uv,vv} \dot{u} \dot{v}^3$$

$$+ g_{vv,vv} \dot{v}^4 + 2g_{u,uu} \dot{u}^2 \ddot{u} + 4g_{u,uv} \dot{u} \ddot{v} + 2g_{u,vv} \dot{v}^2 \ddot{u} + 2g_{v,uu} \dot{u}^2 \ddot{v}$$

$$+ 4g_{v,uv} \dot{u} \ddot{v} + 2g_{v,vv} \dot{v}^2 \ddot{v} + g_{u,u} \ddot{u}^2 + 2g_{u,v} \ddot{u} \ddot{v} + g_{v,v} \ddot{v}^2$$

$$\langle \ddot{c}_0, \ddot{n}_0 \rangle = g_{uuu,n} \dot{u}^3 + 3g_{uuv,n} \dot{u}^2 \dot{v} + 3g_{uvv,n} \dot{u} \dot{v}^2 + g_{vvv,n} \dot{v}^3$$

$$3g_{uu,n} \dot{u} \ddot{u} + 3g_{uv,n} \dot{u} \ddot{v} + 3g_{uv,n} \ddot{u} \dot{v} + 3g_{vv,n} \dot{v} \ddot{v}$$

此用于未知数 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\ddot{u}$ 和 $\ddot{v}$ 的非线性代数方程组可利用牛顿法求解。在这里仍得出四重解。局部近似所需表面 ψ 的环面可利用来为方程组(25)求解确定初值。

对于按Taylor法贴合的刀具，在贴合点 $P_0 = \tau(t_0, s_0)$ 附近 τ 与 ψ 之间的距离函数 d 表示为(见图6b)：

$$d(t) = k(t-t_0)^4 + O(t^5) \quad (26)$$

为了计算刀具的一侧使用宽度，对于环面的一个位于 P_0 附近的小圆 $C(s) := \Omega \tau(t^*, s) + v$ ，在 ψ 上的距离 d^* 通过求解

$$d^* = \max_{t,u,v} d(C(t), \psi(u, v))$$

确定。按照有关贴合质量的陈述，可计算常数 k ：

$$k = \frac{d^*}{(t^* - t_0)^4}$$

由此确定距离近似等于 $stol$ 的位置

$$t_r = t_0 + \left[\frac{stol}{k} \right]^{1/4}$$

这一方法也进行迭代，直至达到要求的精度。 t_l 的确定完全一样进行。尤其应注意到在一般的情况下左侧和右侧的使用宽度大小不同。

在所有三种上面所说明的贴合方法中得出在 ψ 上刀具位置和方向的不同矢量场 (vf) 解 (贴合的矢量场 A ，参见图 9)。为了说明路线的间隔使用间隔场 D (见图 10)。它由在 ψ 上的方向、到左方的间距和到右方的间距组成。方向是最大路线宽度的方向，以及间隔说明在给定 $stol$ 的情况下沿此方向的路线有多宽。

其他方法

如已提及的那样，上述 Hermite-Chebyshev 法是确定所需表面上在一个网络的任何点刀具最佳定位的当前优选的方法。在此方法中为每个点确定刀具在点 P_l 和 P_r 之间距离至少接近最大时的那个外倾角和偏角。为此求解方程 (5)、(6) 和 (9)，这便于以非常有效的方法获得所期望的结果。

但若提供足够的计算能力，还可以设想其他许多比较复杂的求解途径。例如可对每个点确定最佳的外倾角和偏角，为此在数值上改变这两个角并针对每个角度对计算刀具处于正确位置时公差区有多宽，亦即刀具与所需表面之间的距离保持在 $stol$ 以内的区域有多宽。使此宽度为最大值的那个角度对离最佳值最近。

路线选择

在选择 A 后 (应利用四个解中那一个?) 可用 D 作为在参数平面内的 B -Splines ($u(s)$, $v(s)$) 确定刀具在工件上的接触路线。为了获得尽可能大的路线宽度， B 应在表面上尽可能垂直于路线间隔方向。为了在控制器中进行处理有两种可能的方法 (见图 12)：

1. 在 CAM 系统内沿刀具移动途径逐点计算刀具的位置和方向及其导数。通过这些点选择第三或更高阶的样条。这为刀具在工件坐标系 (WKS) 内的位置和方向得出至少 C_2 连续的路线。在后信息处理机内将这些样条转换成轴向值样条。这些轴向值样条被传输给控制器。

2. 将表面连同在此表面上的接触路线以及选择哪一个解的信息传输给控制器。在控制器内逐点计算刀具最佳位置和方向。它们逐点转换为轴向值和轴向值的导数。通过这些点选择第三或更高阶的多项式。得出至少 C_2 连续的轴向值多项式, 它们在控制器内进行处理。

在本申请中说明了本发明优选的实施例, 但显然应当指出, 本发明不受此限制并可在下列权利要求范围内以不同的方式实施。

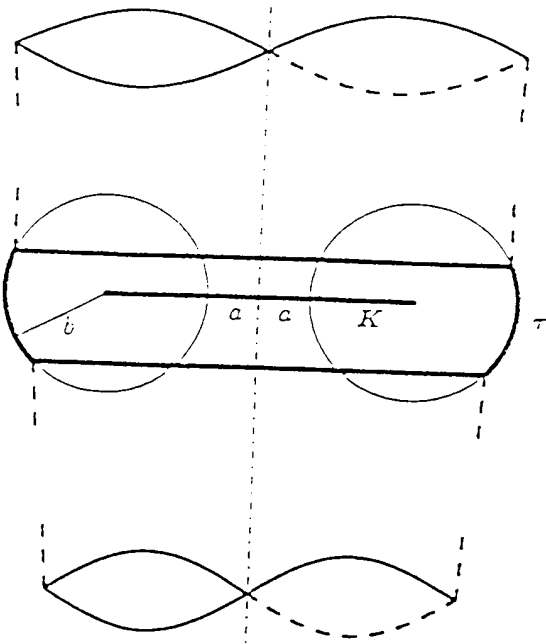


图 1

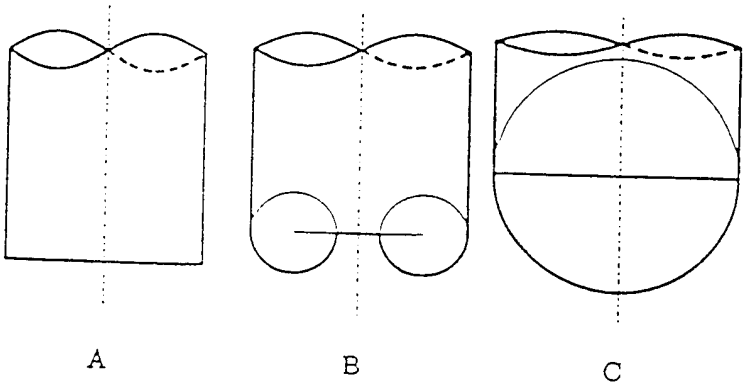


图 2

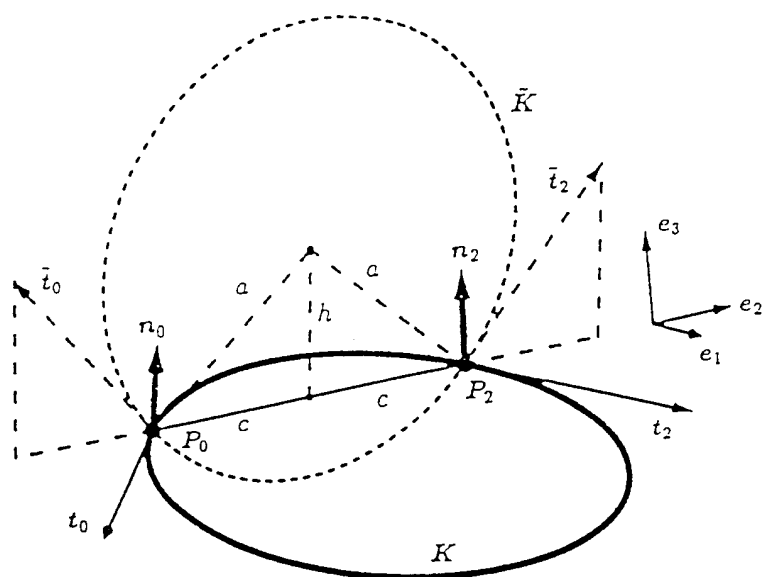


图 3

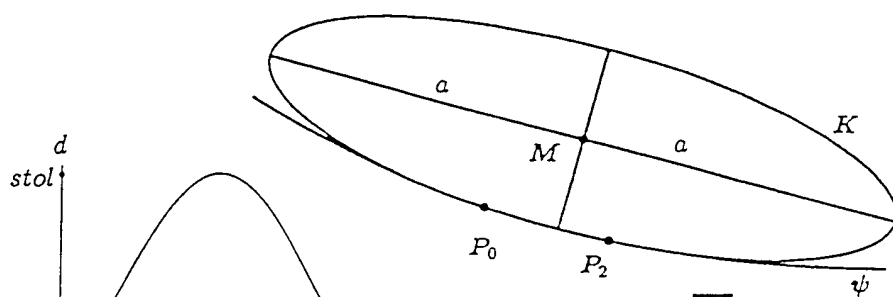


图 4a



图 4b

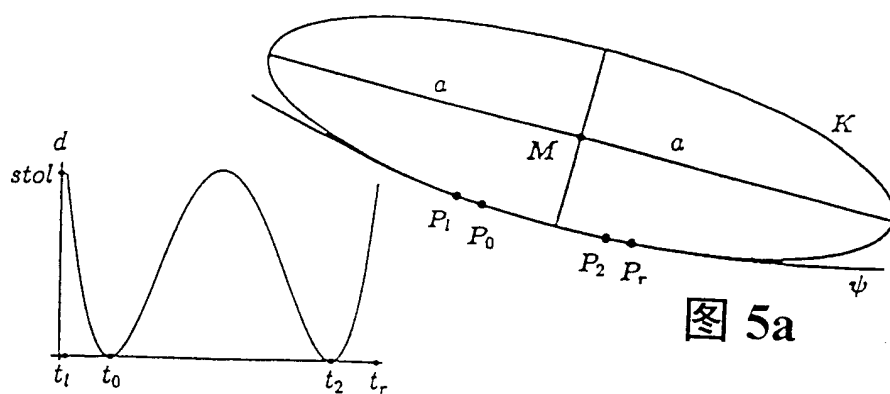
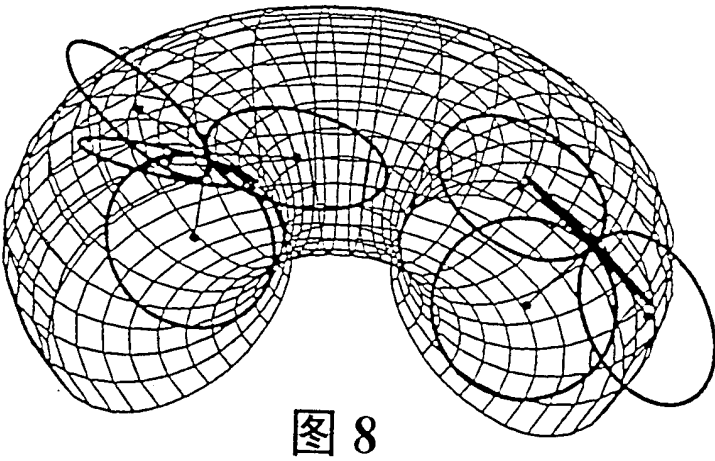
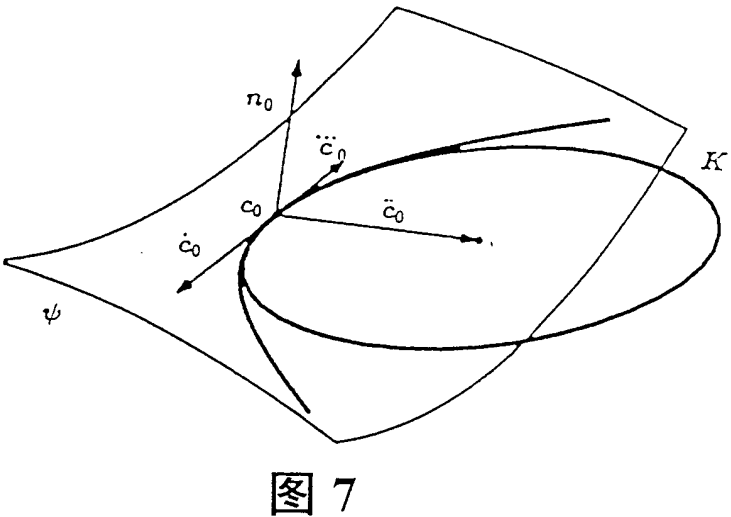
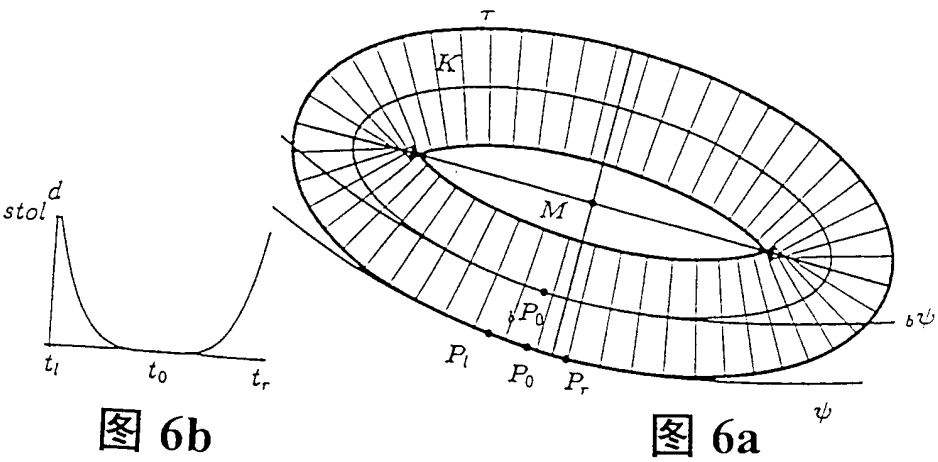


图 5a

图 5b



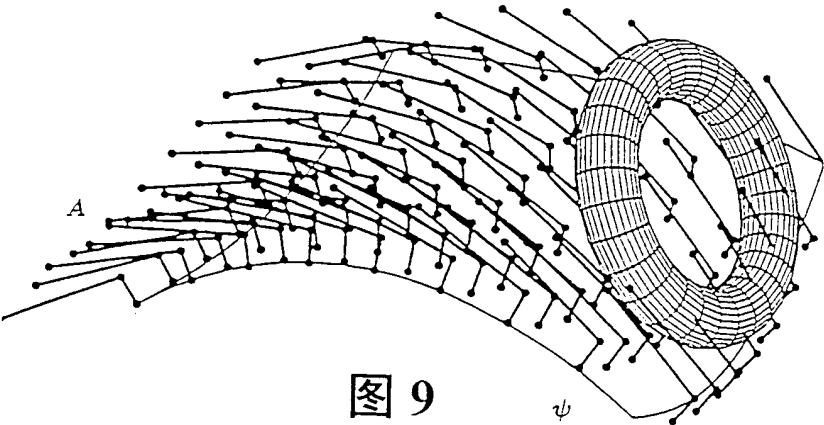


图 9

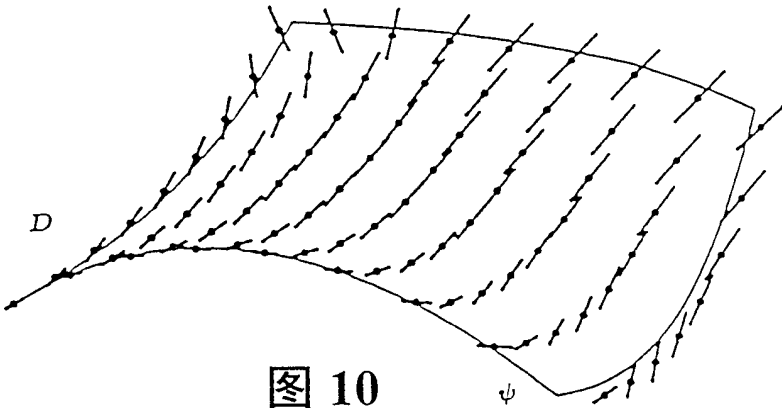


图 10

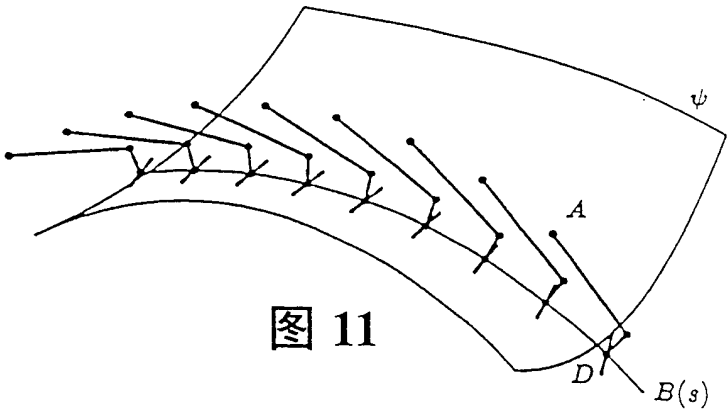


图 11

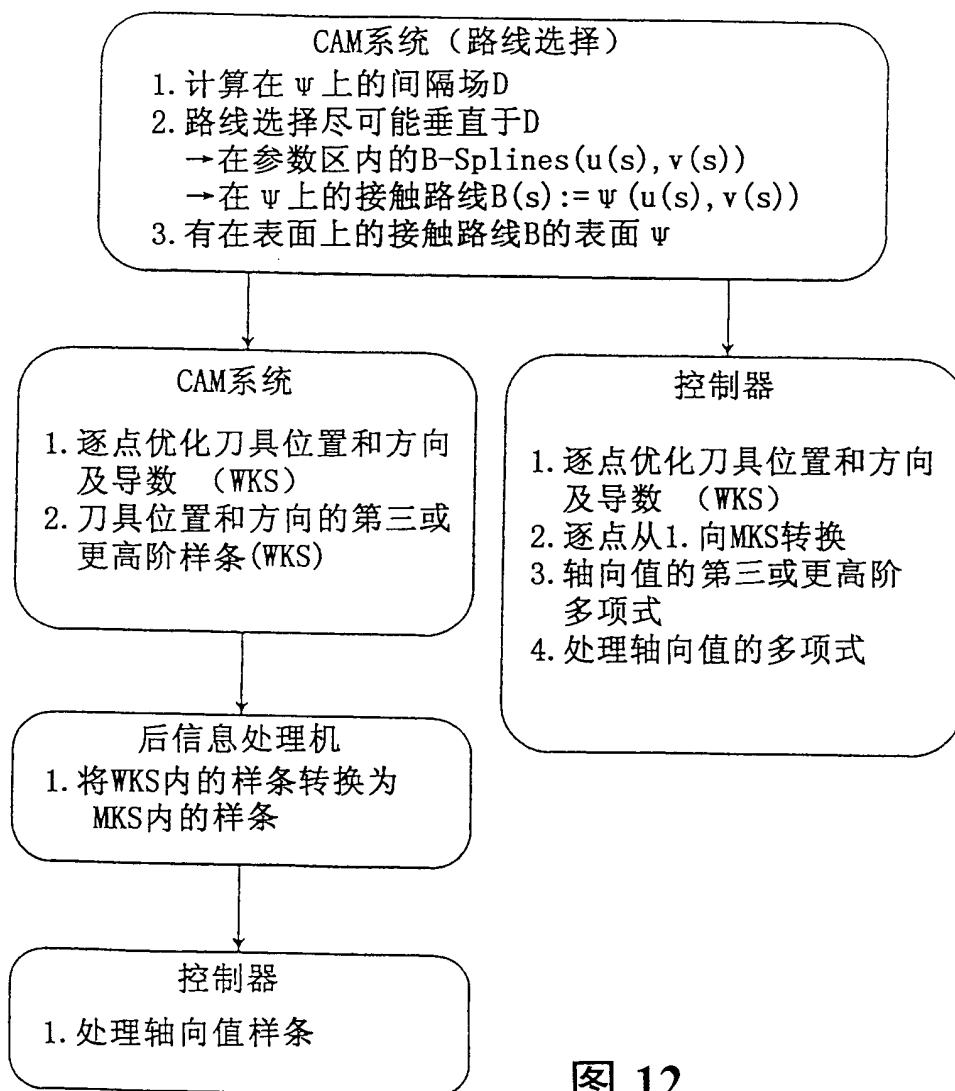


图 12

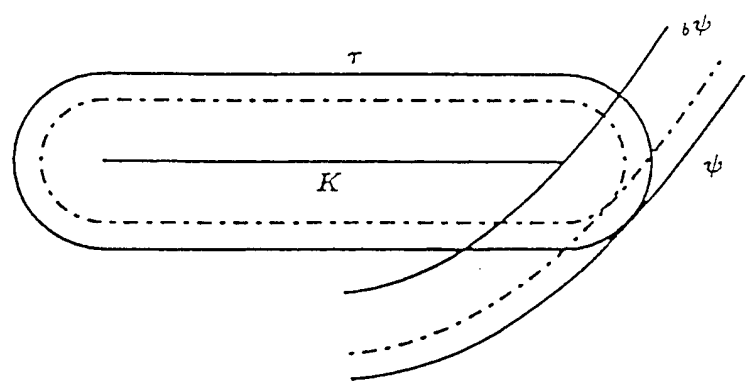


图 13