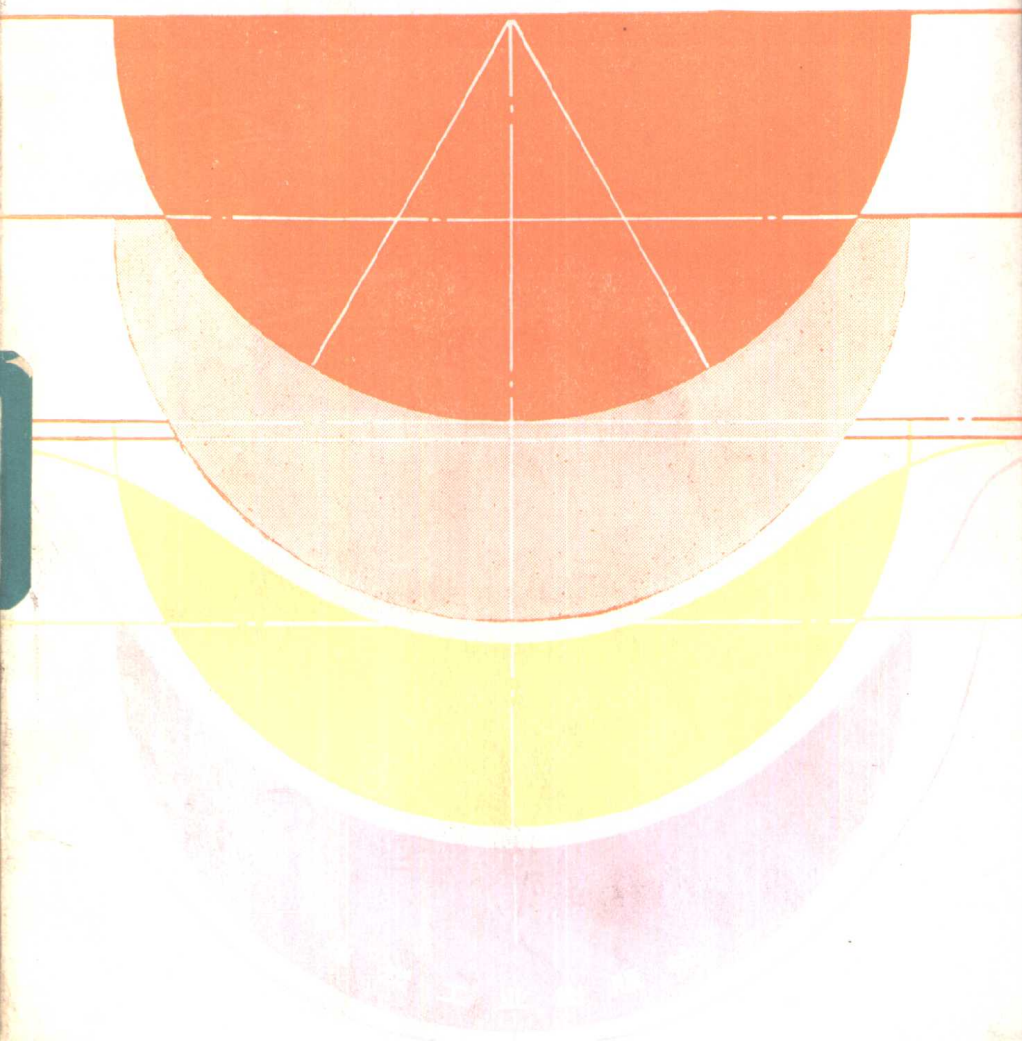


# 电解加工的 成型规律 及阴极设计



# 电 解 加 工 的 成 型 规 律 及 阴 极 设 计

张 文 绍 编 著

煤 炭 工 业 出 版 社

## 内 容 简 介

本书所介绍的电解加工的成型规律理论及工具阴极设计计算方法,可直接较精确地设计计算阴极。此法与以往的经验估计方法相比,其优越性在于经济、方便、可靠。

本书内容包括成型规律的基础理论,平衡状态下的成型规律和运动状态下的成型规律。并介绍了工具阴极设计的计算方法、工艺参数的选择与计算、电解加工的精度问题以及应用设计举例等。为了达到能对实际生产起到明显促进作用的目的,书中附有大量计算数表,可供技术人员在设计中直接查用。

本书是为从事电解加工技术的工程技术人员撰写的。也可作为高等院校学生学习特种工艺课程时的参考书。

责任编辑: 向 云 霞

## 电解加工的成型规律及阴极设计

张 文 绍 编 著

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$

印张 9

字数196千字

印数1—1, 520

1987年4月第1版

1987年4月第1次印刷

书号15035·2850 定价1.50元

## 前 言

本书是为从事电解加工技术的工程技术人员撰写的。侧重于应用，对于理论分析过程作了简化。书中附有较多的计算数表，可给设计者在应用时提供方便。

本书是作者从事电解加工二十多年中对成型规律探讨和分析的结果。在分析过程中，中国科学院秦元勋教授、内蒙古大学刘世泽教授、北京大学韩厚德副教授等给予大力帮助并参与了数学计算和推导工作。书中所介绍的计算公式和设计方法已在生产实践中应用多年。六十年代，作者在内蒙古工作时，在生产中对书中所述的计算公式和设计方法作了验证和部分的应用。1980年起，在张家口煤矿机械厂得到了广泛的应用。目前，在该厂几乎全部阴极的设计中均采用了本书中的计算方法。

本书在编写过程中曾得到张家口煤机厂姜汗杰高级工程师的大力支持。内蒙二机厂朱荣超高级工程师、北京大学数学系韩厚德、吴兰成、叶其孝副教授、丁同仁教授，内蒙古大学数学系刘世泽教授、中国科学院数学研究所秦元勋教授等均给予很大的帮助。并参与了公式推导和数值计算工作，特此表示衷心地感谢！

由于作者水平有限，书中有何缺点和错误，希望读者给予批评指正。

# 目 录

## 绪 论

## 第一篇 电解加工的成型规律

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 第一章 成型规律的基础理论.....                      | 4  |
| § 1-1 基本概念 .....                        | 4  |
| § 1-2 成型规律的基本微分方程与电解速度规律 .....          | 8  |
| § 1-3 运动状态下成型规律的基本微分方程 .....            | 15 |
| 第二章 平衡状态下的成型规律(一) .....                 | 21 |
| (已知工具阴极, 求工件的成型曲线)                      |    |
| § 2-1 基本概念 .....                        | 21 |
| § 2-2 尖角函数 .....                        | 23 |
| § 2-3 抛物线规律 .....                       | 29 |
| § 2-4 阴极表面为斜面时的平衡间隙 .....               | 30 |
| § 2-5 工具阴极为球面时的平衡间隙 .....               | 33 |
| § 2-6 尖角过渡函数 .....                      | 36 |
| § 2-7 抛物线规律的普遍形式 .....                  | 37 |
| § 2-8 斜面加工成型规律的一般形式 .....               | 38 |
| § 2-9 过渡圆弧加工的成型规律 .....                 | 40 |
| 第三章 平衡状态下的成型规律(二) .....                 | 42 |
| (已知工件外形, 求解工具阴极的外形曲线)                   |    |
| § 3-1 工件表面与进给方向平行时工<br>具阴极外形曲线的计算 ..... | 42 |
| § 3-2 工件外形为任意斜面时, 工具阴极的设计 .....         | 43 |
| § 3-3 工件外形为圆弧面时, 工具阴极的设计 .....          | 43 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| § 3-4 工件外形为渐开线时工具阴极的计算 .....          | 46 |
| 第四章 运动状态下的成型规律 .....                  | 50 |
| § 4-1 恒定间隙的加工 .....                   | 50 |
| § 4-2 固定阴极加工的成型规律 .....               | 51 |
| § 4-3 加工间隙不等于初始间隙时的成型规律 .....         | 51 |
| § 4-4 阴极侧面平行于进给方向时工件侧面<br>的成型规律 ..... | 53 |
| § 4-5 斜面阴极的侧向成型规律 .....               | 54 |
| § 4-6 台阶加工的成型规律 .....                 | 55 |
| § 4-7 工件表面的整平 .....                   | 56 |
| § 4-8 球面加工的成型规律 .....                 | 59 |

## 第二篇 阴极设计与计算

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第五章 工艺性设计和实用计算 .....        | 69 |
| § 5-1 模锻斜度部位的设计 .....       | 69 |
| § 5-2 斜面工件的阴极设计 .....       | 71 |
| § 5-3 工件为圆弧面时, 阴极的设计 .....  | 73 |
| § 5-4 水平方向上阴极外形的计算与设计 ..... | 77 |
| § 5-5 三点圆常用计算公式 .....       | 78 |
| 第六章 工艺参数的选择与计算 .....        | 82 |
| § 6-1 电流的选择 .....           | 83 |
| § 6-2 电压的选择 .....           | 84 |
| § 6-3 间隙的选择与计算 .....        | 85 |
| § 6-4 电解液流速的计算 .....        | 88 |
| § 6-5 电解液压力的确定 .....        | 89 |
| § 6-6 电解液的电导率 .....         | 90 |
| § 6-7 进给速度的计算 .....         | 90 |
| 第七章 精度问题 .....              | 92 |
| § 7-1 阴极设计与制造误差 .....       | 92 |
| § 7-2 工艺参数的测量与控制精度 .....    | 95 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| §7-3 短路问题 .....        | 97  |
| §7-4 流场设计 .....        | 99  |
| 第八章 应用设计举例 .....       | 110 |
| 一、锻模型腔阴极的设计与计算 .....   | 110 |
| 二、花键孔阴极的计算 .....       | 120 |
| 附    录                 |     |
| 表1 斜面间隙表 .....         | 130 |
| 表2 圆弧(球面)间隙表 .....     | 176 |
| 表3 台阶加工尺寸 .....        | 256 |
| 表4 指数函数 .....          | 257 |
| 表5 NaCl电解液的电导率 .....   | 258 |
| 表6 无进给整平 $h$ 数值表 ..... | 278 |
| 参考文献 .....             | 279 |

---

## 绪 论

成型规律和阴极设计在电解加工技术的全部理论中占有重要的位置。它直接影响着产品制造的周期、效率、成本和质量。本书介绍在NaCl电解液中电解加工成型规律的基本理论和阴极设计的一般方法。

电解加工是根据法拉第电解定律对工件进行加工的。它是五十年代发展起来的一项新工艺。在许多方面，它比机械加工有着明显的优越性，主要表现在：

(1) 生产效率高。电解加工对复杂的型腔、型面可以一次加工成形；加工锻模型腔时，它比机械加工方法的效率要高出5至10倍以上。

(2) 光洁度好。在通常情况下被加工的工件表面能获得 $\nabla 6 \sim \nabla 8$ 的光洁度。

(3) 不受被加工工件机械性能的限制，可顺利地加工淬火钢、不锈钢、硬质合金等高强度、高硬度的各种材料。

(4) 工具损耗少、成本低。加工内孔花键时，电解加工的阴极约为机械拉刀成本的 $1/10 \sim 1/5$ 。

由于电解加工有上述优点，所以得到了人们的重视。近三十年来在国内外均有很大的发展。目前已广泛地应用于兵器、航空、汽车、拖拉机、煤矿机械等机械制造行业中。但是，电解加工也存在着一些缺点，其中主要一个问题是加工规律比较复杂，不易掌握。因而不能正确地设计阴极，以至于在生产实践中需要做多次试验和反复地修改工具阴极。目

前, 解决这个问题, 有两个途径。一个是采用所谓“非线性”电解液 ( $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaClO}_3$ 等), 或者在电解液中充气, 以提高成型精度。但是这些方法有成本高和生产率低的缺点。另外一个途径就是在应用 $\text{NaCl}$ 电解液的情况下, 研究电解加工的成型规律, 以提高工具阴极的设计水平, 保证加工精度。近十年来国内外不少学者对成型规律作了比较深入的研究, 已取得了积极的成果。

本书是为生产实践的需要撰写的。书中的理论部分——成型规律也是以适应生产实践的需要来论述的, 所以在理论推导过程中力求简化, 以便在满足生产需要的前提下, 尽量给使用者提供方便。

第一篇讲述成型规律的基本理论。重点是介绍平衡状态下的成型规律。在通常的情况下, 它可以满足阴极设计和生产实践的需要。这是阴极设计的基本理论。本书将较系统地给予介绍。运动状态下的成型规律只作一些比较简单的叙述。

第二篇论述阴极设计。阴极设计是成型规律理论的直接应用——根据成型规律的理论, 计算工具阴极成型部分的全部几何形状与尺寸。但是阴极设计又包含着更广泛的内容。比如工艺性设计、工艺参数的选择与计算, 加工精度, 流场问题、阴极的结构、阴极材料的选择等问题。本书将重点介绍前二者。为了使读者能较快地熟悉阴极设计的方法, 在第八章中介绍几种典型阴极的设计例子。其中包括型腔模具阴极和花键孔阴极的设计。

用理论计算方法设计阴极, 一般地来说计算工作量是很大的, 同时, 还容易发生错误。为此在附录中提供了比较详细的计算数表。在设计过程中可以直接查阅数表。能够免去部份复杂的计算工作, 达到缩短设计周期的目的。

---

## 第一篇 电解加工的成型规律

电解加工的生产实践中，首要的问题是工具阴极的设计。被加工零件合格与否，阴极设计起着关键性的作用。工具阴极的正确设计必须有可靠的理论作指导，这个理论的核心部分通常称为“电解加工的成型规律”。它是将电解加工的实际成型过程抽象化并转变成为适当的数学模型的理论。其中反映成型过程普遍规律的部分被称为“成型规律的基础理论”。它是成型规律理论分析中的重要组成部分。在此基础上进一步分析：

(1) 不同的加工状态。即平衡状态和运动状态下的成型过程。

(2) 工具阴极形状尺寸确定后，求解工件的成型规律；已知工件形状尺寸后，计算工具阴极的外形曲线。

(3) 根据工件（或工具阴极）的各种几何形状，分析和计算相应的工具阴极（或工件）的几何形状的成型规律。

(4) 进一步考虑和分析各种因素的影响。

综合上述，就是电解加工成型规律的全部内容。

## 第一章 成型规律的基础理论

本章论述成型规律的基础理论,即从电解加工成型过程的物理概念到导出该过程一般规律的数学方程,主要包括以下三个部分:

- (1) 基本概念;
- (2) 平衡状态下成型规律的基础理论;
- (3) 运动状态下成型规律的基本微分方程。

由于近年来,国内外不少学者对成型规律进行了比较深入的研究,使许多学术上的论点逐步明确和一致起来。国内从事电解加工的工程技术人员对成型规律也比较熟悉了,其它一些书中也有介绍。因此本章中的基本概念一节只作一些结论性的归纳和简单的论述。

### § 1-1 基 本 概 念

#### 1. 影响成型规律的因素及主要因素

用数学方法解决自然科学和工程技术实际中的问题已成为科研工作中的一种常用手段。但是,在实践中的物理过程通常是复杂的。因此必须在分析影响该过程各个因素的基础上找出其中最主要的因素,再根据这个主要因素建立反映该物理过程普遍规律的数学物理方程,进一步按具体情况下的定解条件对该方程进行求解。分析电解加工成型规律的理论也遵循这个方法。

影响电解加工成型规律的因素主要有:

- (1) 电流电场;

(2) 电解液的流场、温度场及化学成分;

(3) 电极过程及极化现象;

(4) 金属材料的化学成分、金相组织等。

这些因素中, 电流电场是起决定作用的因素。因为成型规律的本质问题是: 求出加工过程中工件(阳极)表面上任一点、任一瞬间的电解速度(在电解速度方向上单位时间内工件金属被电解的厚度或长度)。如能建立起工件表面上的电解速度对时间的微分方程, 那么积分求解的结果就应该是成型曲线(面)。电解加工是按照法拉第电解定律对工件进行加工的。工件表面的电解速度与电流密度成正比(参看 § 1-2), 而电流密度在工件与阴极间的分布状况是电流电场的理论问题。通常在分析中又把与时间无关的稳态场称为平衡状态; 把随时间变化的非稳态场称为运动状态。本章的任务就是以电流电场为主要因素导出成型过程普遍规律的数学方程。

## 2. 间隙的物理概念及间隙计算问题

成型规律的主要因素是电流电场。假定电场中沿着电流线方向的电位梯度不变, 那么工件加工表面与工具阴极表面之间的“间隙”的物理意义就是电流线的长度, 所以间隙的计算就归结为电流线长度的计算问题。

1) 在二面角电场中电流线为一圆系, 而等位线则为通过二面角顶点之直线族。其电流线(即间隙)的长度(如图1-1所示),

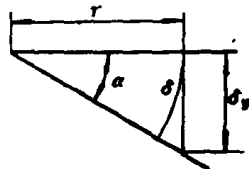


图 1-1 二面角电场中初始间隙的计算

$$\delta = \alpha \cdot r$$

(1-1)

式中  $\alpha$ ——二面角电场的夹角；

$r$ ——电流线之曲率半径。

若以直线 $\delta$ 表示间隙时，其值为：

$$\delta_y = r \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

所产生之误差为：

$$d\delta = \frac{r \cdot \operatorname{tg} \alpha - r \cdot \alpha}{r \cdot \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \alpha}{\alpha} \quad (1-2)$$

上式中， $\operatorname{tg} \alpha > \alpha$ ，所以上式为单调增函数。 $\alpha$ 的值愈小， $d\delta$ 值亦愈小；当 $\alpha$ 值增大时， $d\delta$ 值逐渐增大；当 $\alpha = 30^\circ$ 时， $d\delta$ 值约为10.3%。所以当 $\alpha > 30^\circ$ 时，采用直线段代替弧长，将产生较大的误差。

2) 球面电场中电流线为不同心不同半径的圆弧，其圆心在平面工件的表面上。

由图1-2中可知，电流线圆的半径 $r$ 为：

$$\begin{aligned} r &= \frac{y}{\sin \alpha} = \frac{h - r_0 \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{r_0 + \Delta - r_0 \cos \alpha}{\sin \alpha} \\ &= \frac{\Delta + r_0 (1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} \end{aligned}$$

则电流线长度（间隙）为：

$$\delta = \alpha \cdot r = \frac{\Delta + r_0 (1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha} \cdot \alpha \quad (1-3)$$

式中  $r_0$ ——电极圆的半径；

$r$ ——电流线圆的半径。

3) 基本假设与间隙的近似计算

从生产实践的观点出发，对电解加工过程作如下假设：

(1) 工件被加工表面比加工间隙大得多，而且工件表

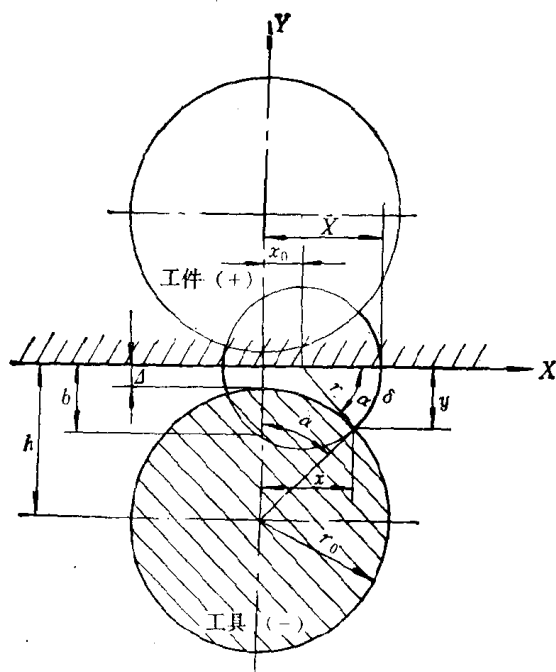


图 1-2 球面电场中初始间隙的计算

面的曲率不太大。

(2) 在平衡状态下，工件与工具阴极表面之间的夹角比较小。

在上述假设的条件下，可以得到以下的近似：

(1) 沿着电流线的方向上，电位梯度不变，即电流密度不变。所以间隙的计算可归结为电流线长度的计算。

(2) 在平衡状态下，由于间隙比较小，工件与阴极表面之间的夹角不太大。所以电场中的电流线长度可以用垂直工件或工具阴极表面的直线段来近似。

在上述假设和近似的条件下，可以使成型规律的理论分

析过程大为简化。经生产实践证明在上述假设和近似的条件下，所得出理论结果可以满足生产实际的需要。

## § 1-2 成型规律的基本微分方程 与电解速度规律

### 1. 双曲线规律

从电场理论中可知：电场中电流密度  $j$  等于电导率  $\kappa$  乘以电场强度  $E$ 。即：

$$j = \kappa E \quad (1-4)$$

在电场中，任意一点的电场强度等于电位  $u$  的负梯度即：

$$E = -\text{grad}u \quad (1-5)$$

在电解加工过程中，工件与阴极表面之间的间隙通常都是很小的，工件与阴极表面之间的夹角也不大，因此可以认为沿着电流线方向上的电位梯度不变。因此将电位梯度近似为端电压  $U$  除以电流线的长度  $\Delta$ 。即：

$$\text{grad}u = \frac{U}{\Delta} \quad (1-6)$$

即 
$$E = -\text{grad}u = \left| \frac{U}{\Delta} \right|$$

将上式代入 (1-4) 式得：

$$j = \kappa \frac{U}{\Delta} \quad (1-7)$$

由法拉第定律

$$V = \omega It \quad (1-8)$$

式中  $V$ ——被电解的金属体积， $\text{mm}^3$ ；

$I$ ——所通过之电流， $A$ ；

$\omega$ ——体积电化当量,  $\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$ ,

$t$ ——时间,  $\text{min}$ 。

在电解加工中, 工件表面某点周围的面积为  $\Delta S$ , 若电解速度为  $v_a$  (在电解速度方向上, 单位时间内金属被电解的厚度或长度) 则经过时间  $t$  后, 被电解下来的金属体积为:

$$V = v_a \Delta S t \quad (1-9)$$

所通过之电流  $I$  等于面积  $\Delta S$  与电流密度  $j$  的乘积, 即:

$$I = \Delta S \cdot j \quad (1-10)$$

将 (1-9) 及 (1-10) 代入 (1-8) 中得:

$$v_a \Delta S t = \omega \Delta S j t$$

$$\text{则} \quad v_a = \omega j \quad (1-11)$$

将方程 (1-7) 代入方程 (1-11) 得:

$$v_a = \frac{\kappa \omega U}{\Delta} \quad (1-12)$$

$$\text{令} \quad A = \kappa \omega U \quad (1-13)$$

则方程 (1-12) 可写为:

$$v_a = \frac{A}{\Delta} \quad (1-12a)$$

在电解加工过程中, 工件表面是电场中的一个等位面, 所以通常认为  $A$  为常数。因此电解速度  $v_a$  与间隙  $\Delta$  的乘积为一常数。方程 (1-12a) 称为双曲线规律, 是成型规律分析中的基本定律。  $A$  称为双曲线常数。

若工件与阴极的面积相等为  $S$ , 并且为平行平面, 平面间的间隙为  $\Delta$ 。则方程 (1-10) 可写为:

$$I = S j \quad (1-10a)$$

将方程 (1-7) 代入 (1-10a) 得:

$$I = \frac{\kappa US}{\Delta} \quad (1-14)$$

## 2. 平衡状态下的电解速度规律

所谓“平衡状态”系指工件形状不再随时间而改变的状态。因此，其加工过程相当于理论力学中的刚体运动。由此可得：

**工件表面任意一点的电解速度等于该点法线同进给方向夹角的余弦与进给速度的相乘积。**

即

$$v_a = v \cos \psi \quad (1-15)$$

式中  $\psi$ ——工件法线与工具进给方向之间的夹角（见图 1-3）。

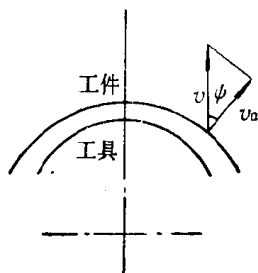


图 1-3 平衡状态下的  
电解速度

当工件法线与工具进给速度方向一致时，即  $\psi = 0$  时，得：

$$v_a = v$$

并代入 (1-12a) 中得：

$$v = \frac{A}{\Delta} \quad (1-16)$$

式中  $\Delta$ ——工件法线方向与工具阴极进给速度方向一致时的间隙（常数）。

在成型规律的理论分析中，用  $A/\Delta$  来表示阴极进给速度  $v$  是很方便的。

将 (1-16) 代入 (1-15) 中，得：

$$v_a = A/\Delta \cdot \cos \psi \quad (1-15a)$$

将方程 (1-15a) 代入方程 (1-12a) 中：