

# 借助运动合成创造的新加工法

SOME NEW MACHINING METHODS WITH THE AID OF  
COMPOUND MOTIONS

梁 锡 昌

Liang Xichang

(机械工程系)

**摘 要** 本文提出了一套利用圆和直线运动组合的方法来加工成形零件的新理论。针对我国机械制造发展中出现的新问题,在本理论的指导下,发明了五项新工艺专利,多数已在工厂投产。

**关键词** 加工方法;成形零件;特形零件

**ABSTRACT** The paper describes a new theory and methods for designing hyperbola, degenerate circles, involute and roulette curves which have been applied in grinding convex involute gears, cutting special profiles on a gear shaper, grinding the race-way of ball thrust bearings, form grinding and grinding cyclo-cycloidal gears with an abrasive belt. All these applications have been used in industry with considerable benefits.

The curves are produced by different combinations of straight line and circle motions. Given the curve parameters of the workpieces to be machined, the best approximate curve can be obtained from a computer program designed for this purpose.

**KEY WORDS** Machining method; special profile; form part

实现圆和直线运动机构最简单,所以,现有的各种机械加工方法都是圆和直线运动组合而成。在特形零件加工研究中,我们发现用圆和直线运动,可以组合出各种形状的曲线,循此途径找到了一套加工特形零件的新理论。

## 一、运动合成理论

运动合成理论主要研究曲面形成的数学基础,研究多个运动存在时,点的运动方程和几何特征。运动合成方式很多,从运动种类分,有圆与圆,圆与直线组合等;从空间位置分,

本文于1988年4月14日收到

\* 图7的新工艺是唐捷根据本理论提出的。参加本文各工艺研究的还有徐发仁、王序进、张建军等。

如同为圆与直线运动，可组合出平面螺旋族、锥面螺旋族、双曲线族等；从相对速度分，由于速比不同，虽同为直线与直线组合，形成直角坐标上的各种曲线，已属数控范围。本文主要探讨前两类中的部份组合，以期寻求一些新的工艺方案。

### 1. 两个圆运动合成扁圆曲线族

如图1, a所示，当点  $p$  绕轴线  $o_1$  转动时，其轨迹为  $p$  圆。设此圆再绕轴线  $o_2$  转动，则形成一个绕  $o_2$  的环面。此环面在通过  $o_2$  平面中截形为扁圆（图1, b）。以金刚笔修砂轮为例，金刚笔尖的轨迹为  $p$  圆，砂轮绕  $o_2$  轴转动，修出砂轮截形为扁圆。其方程为

$$(\sqrt{x^2 - (a - (y - c)\operatorname{tg}\tau)^2 - b^2} + (y - c) \div \cos^2\tau - r^2 = 0, \quad (1)$$

由图1看出，当方程中的金刚笔位置参数  $a, b, c, \tau, r$  变化时，曲线形状可由正圆，变为卵形圆，全不对称扁圆，凹形扁圆等，当金刚笔半径  $r$  变化时，扁圆大小跟着变化。由此看出，一个方程式，可以产生各种形状曲线组成的曲线族（图1, b）。

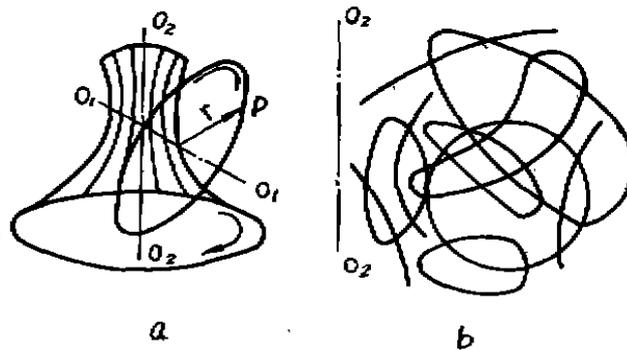


图1

### 2. 一个圆运动和一个直线运动合成双曲线族

如图2, a所示，当  $p$  点作直线运动，并设此直线再绕轴线  $o_2$  转动时，形成一个回转双曲面。此双曲面的轴向截形为双曲线（图2, b）。其方程为

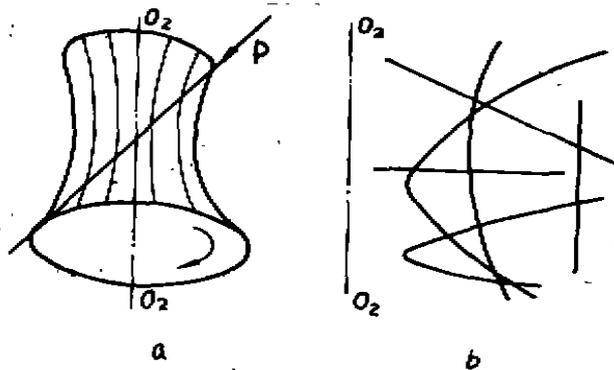


图2

$$y - a \sin \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{a}{b - x \operatorname{ctg} r} \right) - x \operatorname{ctg} r \cos \left( \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{b - x \operatorname{ctg} r} \right) = 0, \quad (2)$$

随着位置参数  $a, b, r$  的变化，得到一个双曲线族（图 2, b）。

### 3. 直线在圆上滚动形成渐开线族

如图 3, a 所示，当直线在圆上滚动时， $p$  点的轨迹为渐开线。其方程为

$$\sin \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{r^2}} - 1 - \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{r^2}} - 1 \cos \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{r^2}} - 1 - \frac{x}{r} = 0 \quad (3)$$

当基圆  $r$  改变时，或起点位置改变时，或固连点  $p'$  在直线外时，得到一个渐开线族（图 3, b）。

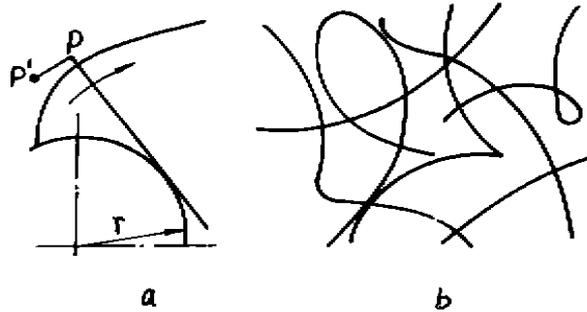


图 3

### 4. 圆在圆上滚动形成摆线族

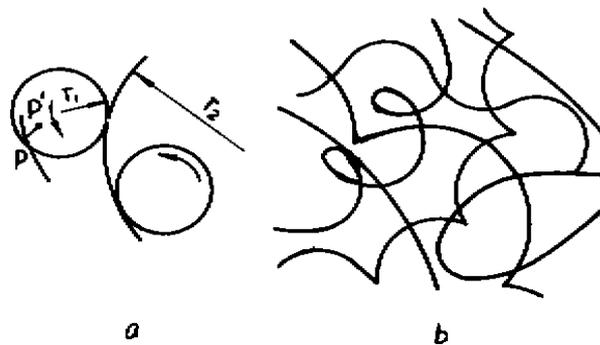


图 4

如图 4, a 所示，当滚圆在基圆上滚动时，滚圆上  $p$  点的轨迹为摆线。其方程为

$$\begin{aligned} x &= (r_1 + r_2) \cos r - r_2 \cos \frac{r_1 + r_2}{r_2} r \\ y &= (r_1 + r_2) \sin r - r_2 \sin \frac{r_1 + r_2}{r_2} r \end{aligned} \quad (4)$$

当滚圆半径  $r_1$ ，或基圆半径  $r_2$ ，或内滚，或外滚，或  $p'$  点不在滚圆上，得到一个摆线族（图 4, b）。

## 二、曲线逼近理论

曲线逼近理论包括曲线的单元化, 曲线段形状和函数的分离性, 曲线段的相互逼近性, 逼近数学模型及优化寻查, 曲线库等处理方法。

**曲线单元化。** 机器零件的特形曲线往往只用到某数学方程的一段, 如齿轮上的渐开线段。利用有限的概念, 把零件曲线看作曲线元(段)。而在加工时, 只关心曲线段的几何形状。从工艺观点讲, 可以将曲线段看作是曲率半径随其长度改变的线段。则所谓曲线段间的不同, 即是其曲率的大小和曲率变化速率不同。

**曲线段形状与函数的分离性。** 既然意在解决曲线段的形状加工问题, 而无需考虑此曲线段系何种方程算出。故可将设计方程分离, 抛弃。只留下曲线的几何形状特性。

**曲线段的相互逼近性。** 当只剩下曲线段的几何形状特性后, 就可从其它很多方程中找到与其相近的曲线段。如某齿轮的渐开线段给定后, 可从双曲线, 椭圆, 抛物线, 对数曲线等中找到相近的一段。甚至可从其它渐开线中, 如另一尺寸基圆渐开线中找到相近的一段。由此可知, 一段曲线可能有很多种代替方案。推广来讲, 各种方程的曲线段常常存在相互代替的线段, 即存在相互逼近性。而且, 有时候用逼近方案反而比精确方案好, 如齿数大于100以上的齿轮渐开线宜用圆弧, 齿数大于200以上的齿轮宜用直线代替。在选择代用曲线时, 主要以误差满足公差要求, 而又容易加工为准。

**逼近数学模型及优化寻查。** 利用最小二乘法规则, 先将零件曲线段化为坐标数组 $(x_i, y_i)$ 。设若这些点接近上述某曲线, 则将数组代入上述方程的剩余的平方和将很小。由此建立起代替误差 $\varepsilon$ 的目标函数

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^n (f(x_j, y_j, a, b, c, \alpha, \beta, \gamma, \dots)) ^2 \quad (5)$$

在计算机上, 利用优化方法进行寻查, 找出上述方程的解 $\varepsilon$ , 就找到了利用该方程曲线代替的误差 $\varepsilon$ , 以及相应的代替线段参数 $a', b', c', \alpha', \beta', \gamma' \dots$ 等。也就是机械加工时, 设备的参数。

**曲线库。** 如果将前述方程存入计算机中, 也就将各种简单机构组合可能产生的各种曲线段存入了计算机, 形成曲线段库, 它几乎包括了各种形状的曲线段, 供生产调用。曲线库即公式库。

## 三、理论的生产应用

作为第一步, 我们研制出了上述四种运动合成装置, 并用它解决了下列生产问题。

### 1. 特形插齿新工艺

采用图1, b的扁圆, 逼近特形插齿刀的曲线刀刃, 解决了插齿刀的磨齿精度问题。进而采用扁圆柱面, 逼近插齿刀的后刀面, 解决了插齿刀重磨精度问题。从而发展了一类特形插齿刀新品种, 如矩形花键轴插齿刀(图5, a), 矩形花键孔插齿刀(b), 三角花键插齿刀(c), 梯

形花键插齿刀(d)，棘轮插齿刀(e)，滚子链轮插齿刀(f)，谐波齿轮插齿刀(g)，超越离合器孔插齿刀(h)，行星摆线齿轮插齿刀(i)、方孔二齿插齿刀(j)等共数十种。并联带产生了一套特形插齿新工艺，解决了一批生产难题。

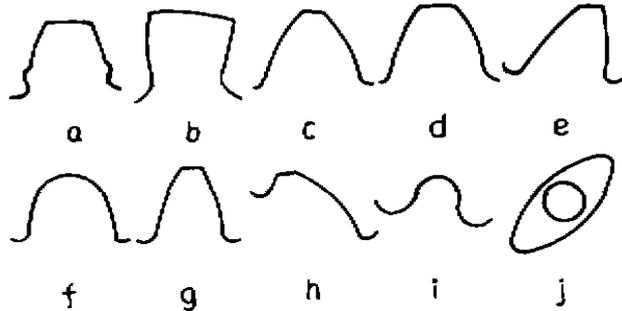


图5

### 2. 止推滚子轴承滚道磨削新工艺

目前工厂使用的滚道磨法如图6,a所示。为防止砂轮磨伤挡边，砂轮直径很小，工效很低。

在图1,b中，当两个圆在空间的位置恰当时，扁圆上有一段直线，其不直度仅数微米。由此发展出的新磨法如图6,b。采用较大直径桶形砂轮端面上的外圆使滚道成形，两者的接触线为ab。

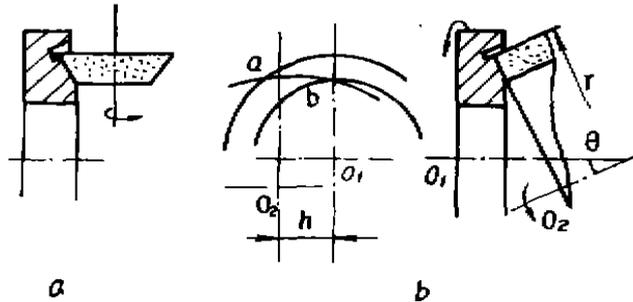


图6

触线为ab。砂轮半径r，夹角 $\theta$ 及移距h由工装调出。新工艺的砂轮加大后，可提高工效数倍，此外，本磨法用砂轮内面作粗磨，由外圆成形，故在砂轮整个使用过程中，不修砂轮。

### 3. 止推球轴承滚道磨削新工艺

目前工厂使用的圆环形滚道磨法如图7,a。为保证环面在轴承轴向平面（即纸面）成形，砂轮直径很小，工效很低。

利用图1,b中扁圆小端的近似圆弧逼近滚道，其圆度误差仅数微米。由此发展出的新磨法如图7,b。亦采用较大直径的桶形砂轮端面上的外圆成形，两者的接触线为abc。砂轮半径r，夹角 $\theta$ 及移距h由软件优化求得。

新工艺的直径加大后，工效可提高10倍。此外，亦由砂轮内部粗磨，外圆成形，在砂轮

使用过程中, 无需修整。

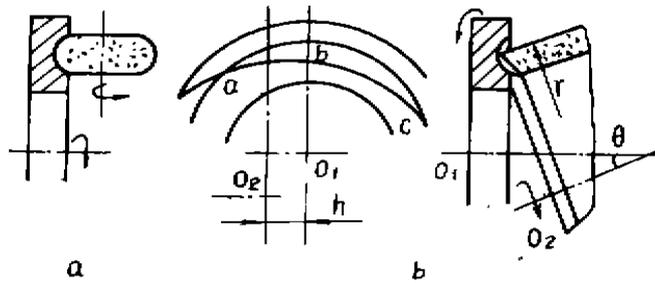


图7

#### 4. 在锥面砂轮磨齿机上磨削修缘齿轮的新工艺

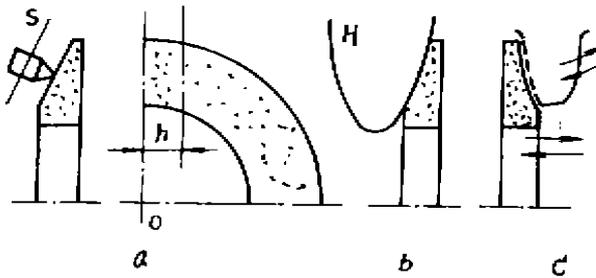


图8

应用图2的原理, 将锥面砂轮磨齿机修整器上的金刚笔移距  $h$  (图8,a)。则金刚笔作直线运动时, 可将砂轮修成双曲线  $H$  的一部份 (图8,b)。砂轮中凹后, 磨齿机以砂轮的齿条, 展成磨出的齿轮, 即具有中凸要求的修缘齿 (图8,c)。

#### 5. 渐开线成形砂轮新修整法

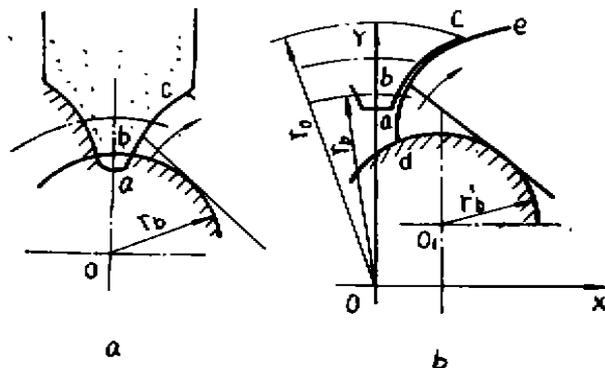


图9

成形磨齿具有机床简单, 工效高的优点。目前工厂使用的成形砂轮修整器 (图8,a), 滚动尺只能修出齿轮基圆  $r_b$  以上的渐开线部份  $bc$ , 不能修基圆以下的  $ab$  部份, 阻碍了成形磨齿

的应用。

利用图 3 及逼近理论，若用比齿轮基圆半径  $r_0$  小的圆盘  $r_0'$  作基圆(图 9, b)，由它产生的渐开线  $de$  逼近砂轮曲线  $abc$ ，可以同时修出渐开线和非渐开线部份，逼近误差仅数微米。再经过改进修整器结构，作到同时修砂轮左、右两个齿面。解决了砂轮修整问题。新发展的成形磨齿工艺，工效较锥面砂轮磨齿机高数倍。

#### 6. 行星摆线齿轮磨齿新工艺

应用图 4 的原理，使行星摆线齿轮节圆  $r_0$  在针轮节圆  $r_1$  上滚动，针轮圆柱面将包络出行星摆线齿轮面。利用摆线轮绕自身中心  $O_1$  转动，再以一定速比绕针轮中心  $O_2$  (即机床工作台中心) 公转，模拟出上述滚动。以通过滚针表面运动的砂带作磨具，发展出摆线齿轮砂带磨法。

新磨法较现有的砂轮磨法，工效提高数倍。较现有的成形磨法简单，工效亦较高。

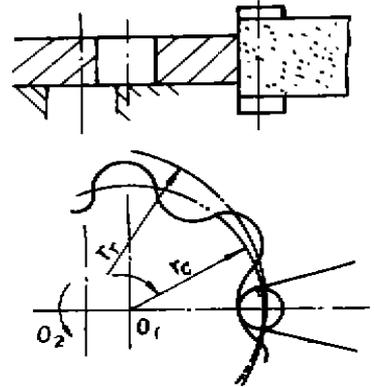


图 10

## 四、结 论

本文发展了一套利用简单运动组合加工特形零件的新理论，并以之为指导，发展了 5 项新工艺专利。这些新工艺的特点是简化了机床，不需要每台机床配备一台计算机，操作简单，易于掌握。适合于大量生产较简单的特形零件。

运动合成方案很多，限于篇幅，只介绍了其中 4 种。运动合成理论指出了加工各种特形零件的数学可能性，开拓了视野。

在机械制造中，面对具体的工件，可由上述理论找出数种方案。但还需通过模拟分析、设备研制和工艺研究后，才能筛选出技术经济较好的工艺方案。

这条思路，为工艺人员指出了一种发展新工艺的模式。我们还加工过高速电机转子，螺杆泵铣刀，特形拉刀等零件。有一工厂在磨一段  $r = 2m$  的圆弧时，由于不可能作那么大的圆弧修整器，采用图 2 的直线夹具修出双曲线，解决了生产问题，另有一工厂在磨一段  $r = 1.5m$  的圆弧时，也由于不可能作那么大的圆弧夹具，用图 1 的小圆弧夹具，搬一个角度，磨出了要求的工件。

## 参 考 文 献

- 〔1〕 梁锡昌：曲线零件的新制造法，《发明与专利》，1981年，第 4 期