



机械工人进修丛书

齿 轮

丁 爵 曾 編



安徽人民出版社

齒 輪

丁 爵 曾 編

安徽人民出版社出版(合肥市金路寨)

安徽省書刊出版業營業許可證出字第2號

安徽印刷厂印刷 安徽省新华書店發行

開本：787×1092毫米 1/32 印張：3 字數：67,000

1960年4月第1版

1960年4月合肥第1次印刷

印數：1—2,000冊

統一書號：15102·64

定 价：(7) 0.28元

內 容 介 紹

齒輪是最重要的機械零件，應用非常廣泛，任何機器都非有齒輪不可。本書以流暢的文字，淺顯的道理介紹了齒輪傳動的原理，漸開綫齒輪的画法、計算和製造，輪齒破壞的原因，對各種齒輪的特點和齒輪系的應用也作了講述。本書適合廣大機械工人閱讀。

“机械工人进修丛书”例言

在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下，机械工业正在一日千里地发展着。广大机械工人意气奋发，干劲冲天，掀起了大搞技术革命的群众运动。他们迫切要求提高操作技术，掌握先进操作方法。这一套丛书的出版，正是为了帮助他们提高操作技术和有关理论知识，推动技术革命。

这一套丛书的特点是实际操作方法多，而且介绍了一些先进的操作方法和经验，并从理论上加以说明；理论知识的介绍，简明扼要，通俗易懂，因此，适合有一些基本知识的工人同志阅读。

这一套丛书，包括机械工业的各个方面，以后将继续出版。

目 录

第一节	开头的話	1
第二节	怎样完成齿輪傳动	3
第三节	怎样形成漸开綫齿形	9
第四节	齿輪的种类	12
第五节	齿輪各部分的名称和标准的漸开綫齿輪	15
第六节	漸开綫齿輪的嚙合特性	19
第七节	怎样画漸开綫齿輪	24
第八节	怎样制造漸开綫齿輪	34
第九节	修正的漸开綫齿輪	43
第十节	圓柱斜齿輪的特点	53
第十一节	圓錐直齿輪的特点	62
第十二节	蝸輪傳动的特点	67
第十三节	齿輪系的用途和計算	73
第十四节	齿輪的牙齿是怎样破坏的	84
第十五节	輪齿强度計算簡述	88
第十六节	齿形的新发展	93

第一节 开头的話

齒輪是应用最广的一种傳动机构，差不多所有的現代机器中都有齒輪。金属切削机床、飞机、汽車、軋鋼机、汽輪机、卷揚机、电鍍、起重吊車、电动計算机、钟表、千分表和很多其他机器或仪器中都非有齒輪傳动不行。

齒輪的主要用途是把旋轉的运动从一个軸(主动軸)傳送到另外一个軸(从动軸)上；如果是齒輪和齿条的傳动，那么就可以把旋轉运动变为往复运动。这种齒輪和齿条的傳动，应用也相当广泛，例如机床变速箱中滑动齒輪的移动、工具机床的纵向进刀机构、測量仪器和显微镜中光学鏡頭位置的調整，都需要应用。

齒輪的发展已經有了两千多年历史，我国汉朝时代所发明的指南車和晋朝以前所发明的記里鼓車^①中都应用了整套的齒輪。古代的齒輪是用木材制造的，直到現在，我們还能在老式的水車上看到，在木輪的周圍装上一些木梢，就成为木制齒輪的牙齿。但是木制齒輪磨損得很快，不能傳动較大的动力，牙齿的形状也是随意制成的，因此在傳遞运动时很不平穩。

随着冶金工业的发展，到 18 世紀，在軋鋼机架开始应用鑄造的齒輪。鑄造齒輪的牙齿部分是和輪子同时鑄成的，不再經過任何加工，所以只能用在一些粗糙的机器上。

1709~1712 年著名的俄罗斯机械师納尔托夫制造的第一

^① 指南車上有木人，不論車子怎样变换方向，它的手臂始終指着南方。記里鼓車上有两个木人，每人执一木槌，車行一里，一人击鼓；車行 10 里，另一人击鼓。

台金属切削机床,采用了经过加工的齿轮。牙齿经过加工以后,齿轮的质量大大提高了。同时,为了减小齿轮的尺寸,开始采用强度较高的材料——钢来制造齿轮,于是传动更为紧凑了。

随着机器制造工业的不断发展,机器变得动力更大和速度更快,对于齿轮传动的要求也不断提高了。例如,海船上的汽轮机,在上一世纪末期,齿轮传动的动力已经超过 10000 马力,齿轮的圆周速度已经达到 12 米/秒。

在现代机器中,齿轮传动应用范围之广,可以用下面的数字来表明:齿轮传动的动力从 0.01 到 50000 马力;齿轮的圆周速度从 0.03 到 140 米/秒;齿轮的直径从 3~4 毫米到 12 米;模数是表示牙齿大小比例的一个数值,有些齿轮的模数只有 0.07 毫米,而在重型大动力的机器中,齿轮的模数可以大到 50~70 毫米。

齿轮传动的应用所以如此广泛,是由于它具有下面所述的显著优点:

(1) 主动轴与从动轴的转数之比(这个比值叫做传动比)能保持固定不变。这是一个很重要的优点,因为很多机器都有这样的要求。

(2) 齿轮的体积小,寿命长,传动效率比较高。加工精度很高的齿轮,效率可以达到 99%。

(3) 齿轮传动使用方便,平时的管理和维护也很简单。

在本书中,我们将讨论齿轮啮合的基本原理、制造圆柱齿轮的现代方法、齿轮传动的基本设计与计算等问题。

第二节 怎样完成齿輪傳动

圓柱齒輪傳動的起源，可以从两个光滑的圓柱体靠摩擦力来相互轉动談起。图 1 的两个光滑圓柱体表面相接触的地方，是很窄的平面，理論上只是一条直綫。在这种情形下，不容易产生足够的摩擦力来傳遞即使很小的动力，所以主动圓柱免不了要沿着从动圓柱的表面打滑，而它們的傳动比也不可能是固定的。为了消除这种現象，在圓柱表面上做一些正确地依次排列的凸块，于是形成了牙齿和齿間槽。工作的时候，一个齿輪的牙齿插入另一个齿輪的齿間槽，靠着主动輪牙齿的側面将压力加在从动輪牙齿的側面上来傳遞旋轉运动。这样傳遞运动的輪子就叫做齿輪，如图 2。

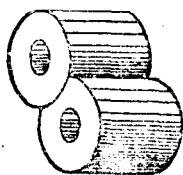


图 1

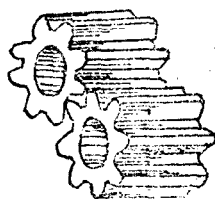


图 2

齿輪是一种旋轉物体，它均匀地等速旋轉着。虽然它的旋轉速度不变，但是齿輪上离开中心距离不同的各个点，将要以不同的直綫速度移动，离开中心距离愈远的点，直綫速度愈快。就象整齐游行行列轉弯一样，把每一排的一端当做回轉中心，这一端的人在轉弯时几乎站在原地不动，可是在这一排另外一端的人，为了保持行列的整齐 必須要加大步伐，加快速度。齿輪的

轉動也是一樣，它的中心的速度等於零，而牙齒頂部的直線速度要比牙齒底部大一些。

根據上面所說，旋轉物體上各點的直線速度与這個物體的旋轉速度之間的關係，可以用下面的公式來表明：

$$V_A = R_A \omega \quad (1)$$

式中： V_A 旋轉物體上 A 點的直線速度

R_A A 點到旋轉物體中心的距離（半徑）

ω 旋轉物體的旋轉速度

從這個公式可以很清楚地看出，旋轉物體上某一點的半徑越大，它的直線速度就越快。

直線速度的方向應該與半徑垂直。

齒輪傳動的傳動比是固定不變的。設想有一對齒輪，主動齒輪有 10 個牙齒，從動齒輪有 30 個牙齒，因為主動齒輪轉過一個牙齒，從動齒輪也同樣的轉過一個牙齒，所以主動齒輪轉三圈，轉過了 30 個牙齒，從動齒輪也要轉過 30 個牙齒，恰好轉一圈，它們的傳動比等於 3，是固定不變的。

齒輪的傳動比用 i 來代表，那末，齒輪傳動的傳動比是：

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (2)$$

式中： n_1 主動齒輪每分鐘的轉數

z_1 主動齒輪的齒數

n_2 從動齒輪每分鐘的轉數

z_2 從動齒輪的齒數

公式(2)表明：一對齒輪傳動時，轉數與齒數成反比。

可是要正確地完成齒輪傳動，牙齒必須有嚴格規定的齒形。我們想象一下，假使齒輪的牙齒是任意形狀的，如圖 3 所示，主動齒輪和從動齒輪的牙齒側面是成直線的，那麼，它們將怎樣工

作呢？

图 3 表示齿輪啮合在三个不同位置的一刹那的情形。在第一个位置，主动齿輪的牙齿侧面压在从动輪的齿尖上，把旋轉运动傳給从动齿輪，牙齿的接触点沿着主动齿輪的牙齿侧面向着牙齿底部的 A 点移动，这时，主动齿輪的有效半徑渐渐减小，所以从动齿輪的旋轉速度不断减低。在第二个位置，两个齿輪的牙齿侧面重合，在这一刹那，接触点从主动齿輪牙齿底部的 A 点移到頂部的 B 点，这时主动齿輪的有效半徑很快加大，因而从动齿輪的旋轉速度就突然加快。到第三个位置时，主动齿輪的齿尖沿着从动齿輪牙齿侧面向外移动，它的有效半徑又渐渐减小，于是从动齿輪的旋轉速度又不断减低。

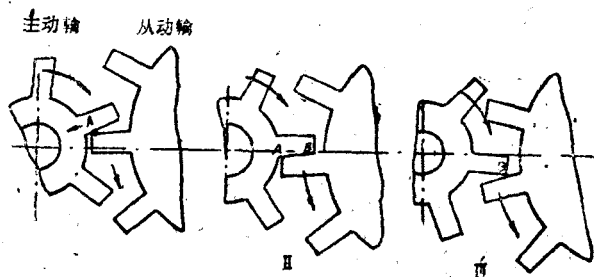


图 3

从上面的討論可以看出，采用这种任意齿形的齿輪，虽然就齿数的关系來說，它們在一定時間內，傳动比还是固定的，但是在傳动过程的每一刹那間，从动齿輪的速度却在起伏波动的变化着。这种不均匀的轉动是机器所不允許的。車床上要是采用这种齿輪來傳动，車头一定轉得快慢不勻，一会儿进刀多，一会儿进刀少，这样做出来的产品，准是个廢品。所以要使齿輪傳动均匀，齿形就不能隨隨便便，它必須合乎一定的規律才行。

为了說明齿輪的側面齿形應該符合什么样的規律，我們必

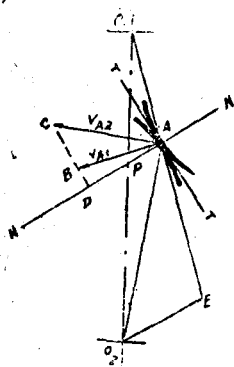


图 4

須从两个齒輪旋轉速度之間的关系、轉数之間的关系談起。

假設两个齒輪的牙齒側面接觸在 A 点, 如图 4。經過 A 点画一条直綫 $T-T$, 它与两个牙齒側面只接触在 A 点, 而没有其他任何的点再与牙齒側面接触, 这样的直綫叫做牙齒側面的公切綫。再从 A 点画一条与公切綫 $T-T$ 垂直的直綫 $N-N$, 这样的直綫叫做牙齒側面的公法綫^①, 它就是主动齒輪 1 推动从动齒輪

2 的压力綫。

因为 A 点是两个齒輪的牙齒接点, 所以 A 点既在齒輪 1 上, 又在齒輪 2 上。如果把 A 点看做是在齒輪 1 上, 那么这点的直綫速度, 根据公式(1), 应当是:

$$V_{A_1} = O_1A \cdot \omega_1$$

式中: V_{A_1} 齒輪 1 上 A 点的直綫速度

O_1A 齒輪 1 上 A 点的半徑

ω_1 齒輪 1 的旋轉速度

V_{A_1} 的方向應該与半徑 O_1A 垂直。

假如把 A 点看做是在齒輪 2 上, 那么这点的直綫速度应当是:

$$V_{A_2} = O_2A \cdot \omega_2$$

式中: V_{A_2} 齒輪 2 上 A 点的直綫速度

O_2A 齒輪 2 上 A 点的半徑

ω_2 齒輪 2 的旋轉速度

① 与切綫垂直的直綫, 叫做法綫, 与公切綫垂直的直綫叫做公法綫。

V_{A_1} 的方向應該与半徑 O_2A 垂直。

从上面的两个公式, 可知两个齒輪的旋轉速度之比是:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{V_{A_1}}{V_{A_2}} \cdot \frac{O_2A}{O_1A} \quad (3)$$

因为旋轉速度之比就是两个齒輪的轉数之比, 即傳动比, 所以公式(3)也可以写成:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{V_{A_1}}{V_{A_2}} \cdot \frac{O_2A}{O_1A} \quad (3')$$

从速度 V_{A_1} 的端点 B 画一条与公法綫 $N-N$ 垂直的直綫 BD , 那么 AD 就是 V_{A_1} 在公法綫方向上的分速度。再从 V_{A_2} 的端点 C 画一条与公法綫 $N-N$ 垂直的直綫 CD , 那么 AD 就是 V_{A_2} 在公法綫方向上的分速度。因为两个牙齒在傳动时总是保持着接触的关系, 所以 V_{A_1} 和 V_{A_2} 在公法綫(或压力綫)方向上的分速度應該是相等的, 都等于 AD 。可以設想, 如果它們不相等, 那么两个牙齒的側面就要互相卡住(如果 V_{A_1} 的分速度大于 V_{A_2} 的分速度时)或者互相分离(如果 V_{A_1} 的分速度小于 V_{A_2} 的分速度时)。

再从 O_2 点画一条与 $N-N$ 平行的直綫, 与 O_1A 的延長綫相交在 E 点。按照几何学的关系:

因为 $\angle CAO_2 = \angle BAE = 90^\circ$

所以 $\angle BAC = \angle O_2AE$

因为 $\angle DCA + \angle CAD = \angle CAD + \angle DAO_2 = 90^\circ$

$O_2E \parallel N-N$

所以 $\angle DCA = \angle DAO_2 = \angle AO_2E$

$\triangle ABC \sim \triangle AO_2E$

于是

$$\frac{V_{A_1}}{V_{A_2}} = \frac{AE}{O_2A}$$

把上式的关系代入公式(3'), 就得到:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{AE}{O_2A} \times \frac{O_2A}{O_1A} = \frac{AE}{O_1A} \quad (4)$$

因为 $\overline{O_2E}$ 是与 $N-N$ 平行的, 并且直线 $N-N$ 与 $\overline{O_1O_2}$ 相交在 P 点, 所以:

$$\frac{AE}{O_1A} = \frac{O_2P}{O_1P}$$

把这个关系代入公式(4), 就得出:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{O_2P}{O_1P} \quad (5)$$

公式(5)的意思就是一对齿轮的转数与 P 点所分连心线的两段成反比。 P 点叫做节点, 它是连心线上固定的一点。

现在我们来说明齿轮侧面齿形的规律。如果要想一对齿轮在传动过程的任意时刻, 它们的传动比都是固定不变的, 那末, 两个牙齿侧面在任何点接触时, 经过接触点所画的牙齿侧面的公法线, 必须通过节点。

符合齿轮侧面齿形的规律, 并且曾经广泛应用在齿轮上的齿形有两种, 一种是摆线齿形, 另一种是渐开线齿形。摆线齿形最先得到广泛的应用, 但是现在已经淘汰, 差不多完全被渐开线齿形所代替了。摆线齿轮被淘汰的原因是由于它制造起来比较复杂, 安装要求很准确, 假如安装得不准确, 齿轮的传动比就要改变。而渐开线齿形则制造比较容易, 精度比较高, 安装时允许齿轮的中心距有一些误差, 而并不影响它们的传动比。

第三节 怎样形成渐开线齿形

渐开线是一种数学上的复杂曲线，它的形状可以用简单的实验方法画出。如图 5，圆柱 A 能绕着中心旋转，柱上绕一条绳子，并经过滑轮 B ，在绳子上任意一点 T 拴一支铅笔，在圆柱 A 下面装一块平板能跟着 A 一起转。如果沿着滑轮把绳子象图上所示，从圆柱上拉下时，笔尖就在旋转着的平板上画出一条曲线 aT 来， aT 就叫做渐开线。相反的，当绳子往圆柱上绕的时候，也就是当圆柱照虚线的方向旋转时，笔尖就画出曲线 Ta 来，它也是一条同样的渐开线。这个圆柱体在平板上的底圆，叫做这条渐开线的基圆。

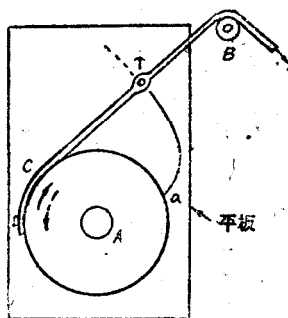


图 5

现在我们已明白，绕在圆柱上的线，引直伸开的时候，线头所画出的曲线，叫做渐开线。

从图 5 可以看出，渐开线有下面的几个特点：

(1) 渐开线上任何点的法线总是和基圆相切的。如 cT 与基圆相切，它就是渐开线上 T 点的法线。

(2) 只在基圆的外面才有渐开线，基圆的里面是没有渐开线的。

(3) 渐开线的形状是随着基圆的大小而不同的，基圆越小，渐开线越弯曲，基圆越大，渐开线越平直。

(4) 法线上的一段直线长度 cT 和基圆上相应的一段圆弧

长度 ca 相等。因为 cT 这段直线本来是围绕在基圆上的。

用渐开线作齿形的齿轮，叫做渐开线齿轮。渐开线齿形为什么能符合传动比固定不变的规律呢？可以由下面的例子来说明。

如果已经知道两个齿轮的中心距离 O_1O_2 和它们的传动比 i ，于是，可以写出下面的方程式：

$$\begin{cases} O_1P + O_2P = O_1O_2 \\ i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{O_2P}{O_1P} \end{cases}$$

解上面的联立方程式，可以求出 O_1P 和 O_2P 的大小，于是联心线上节点 P 的位置就可以决定了，如图 6 所示。

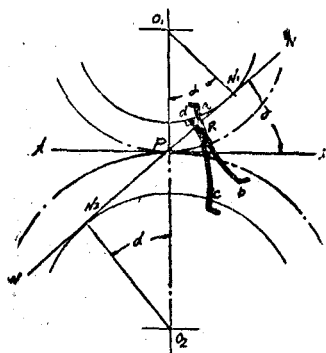


图 6

经过节点画一条与联心线 O_1O_2 垂直的直线 $t-t$ ，再从节点画一条与 $t-t$ 倾斜成 α 角的直线 $N-N$ 。从 O_1 点画一条与 $N-N$ 垂直的直线 O_1N_1 ，再从 O_2 点画一条与 $N-N$ 垂直的直线 O_2N_2 。以 O_1 为圆心， O_1N_1 为半径，画一个圆，再以 O_2 为圆心， O_2N_2 为半径，画另一个圆。把这两个圆做为基圆，在

它们的外面画出两条渐开线 ab 和 cd 来。

如果用这两条渐开线做为齿轮的牙齿侧面，那么从渐开线的第一个特点可以知道，这两个牙齿侧面在传动过程中，接触在 R 点时，经过接触点 R 的公法线就是两个基圆的公切线 N_1N_2 。当它们接触在另一点时，经过接触点的公法线还是那两个基圆的公切线 N_1N_2 。因此我们可以得出结论，两条渐开线无论在那

一点接触时，经过接触点的公法线总归和两个基圆的公切线重合，也就是说公法线总是通过联心线上的节点 P ，因此我们说，渐开线齿形是符合传动比固定不变的规律的。

在图 6 中，分别以 O_1 和 O_2 为圆心， O_1P 和 O_2P 为半径画出两个圆来，这两个圆叫做渐开线齿轮的节圆。

从公式(3)和(5)，可以知道：

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2P}{O_1P}$$

所以 $\omega_1 \cdot O_1P = \omega_2 \cdot O_2P$

由公式(1)知道， $\omega_1 \cdot O_1P$ 就是齿轮 1 上 P 点的直线速度， $\omega_2 \cdot O_2P$ 就是齿轮 2 上 P 点的直线速度，因此，上式的意思就是：在两个齿轮的节圆圆周上，切点的直线速度是相等的。同时，一对齿轮的转数，是和它们的节圆半径成反比的。这就是节圆的特点。也可以说，节圆相当于图 1 所示的两个光滑圆柱体，它们在沒有牙齿时，从理论上说，切点的直线速度是相等的。

从图 6 可以看出，齿轮的节圆半径与基圆半径有下面的三角函数关系：

$$\cos \alpha = \frac{O_1N_1}{O_1P} = \frac{O_2N_2}{O_2P} \quad (6)$$

于是可知一对齿轮的转数，也与它们的基圆半径成反比。

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{O_2P}{O_1P} = \frac{O_2N_2}{O_1N_1} \quad (7)$$

直线 $t-t$ 是两个节圆的公切线，直线 N_1N_2 是两个基圆的公切线，也是两个渐开线牙齿侧面相互作用的压力线，所以它们的交角 α 叫做节圆压力角，又叫做啮合角。



根据上面的讨论，两个渐开线齿形侧面的接触点总是在直线 N_1N_2 上，也就是说直线 N_1N_2 是渐开线齿形接触点的轨迹，我们称这条直线为啮合线。

图 7 渐开线齿轮的真实齿形是由两条互相对称的渐开线组成的，如图 7 所示。

第四节 齿轮的种类

齿轮的种类很多，可以按照不同的方法分类。

按照齿轮的齿形，它可以分成：

1. 摆线齿轮。
2. 渐开线齿轮。

上面说过，现在摆线齿轮的应用已经很少，所以本书只讨论渐开线齿轮。

最常用的分类方法，是按照齿轮传动中主动轴与从动轴的相互位置来分类：

1. 主动轴与从动轴平行。在这样的两根轴之间应用的齿轮叫做圆柱齿轮，因为，在这种情况下，齿轮是个圆柱体。

圆柱齿轮又可以按照牙齿的方向分成两种：

- (1) 圆柱直齿轮，它的牙齿方向和齿轮的轴是平行的，如图 8。

- (2) 圆柱斜齿轮，它的牙齿方向和齿轮的轴是倾斜的，如图 9a。人字齿轮，是圆柱斜齿轮的一种，每一个入字齿轮就象是由两个对称的斜齿轮合在一起，如图 9b。