

仪表元件丛书



仪表齿轮

本书由浅入深地论述了各种仪表齿轮的传动原理、设计方法以及加工检验等基本知识；对传动质量进行了较详细地分析；对当代有关新技术、新成果也做了梗概介绍。

本书经哈工大李华敏教授和雷映辉副教授审阅。

本书可供从事仪器仪表齿轮设计与制造的工程技术人员和有关院校师生阅读。

仪 表 齿 轮

王文义 王丕增 孙昌秀 刘法权 高延新 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{1}{2}$ · 字数 230 千字

1982 年 6 月北京第一版 · 1982 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—6,000 · 定价 1.10 元

*

统一书号：15033 · 5194

出版者的话

仪器仪表是实现四个现代化必不可少的技术装备，而仪器仪表元件（简称仪表元件）是仪器仪表中具有独立功能的最基本的单元，它是仪器仪表的基础，能完成信号的检测、传递、转换、放大、贮存、运算、控制和显示等功能。仪表元件的品种和质量直接影响着仪器仪表的性能。

目前，仪器仪表已广泛应用于国民经济各部门。为了适应仪器仪表工业发展的需要，进一步做好仪表元件基础知识的普及工作，在国家仪器仪表工业总局的直接关怀下，我们编辑出版了这套《仪表元件丛书》。

本丛书预定为十一分册，分别为《热敏电阻器》、《集成电路在仪器仪表中的应用》、《半导体光电器件》、《宝石支承》、《仪表齿轮》、《金刚石压头》、《数据采集系统中的放大器》、《磁电转换元件》、《自动平衡仪表放大器》、《自动平衡仪表电机》、《集成运算放大器》等，将陆续出版。

本丛书以介绍各类仪表元件的结构原理、特性、设计计算为主，对制造工艺、性能测试、应用知识也作了简单的阐述。在写法上，力求通俗易懂，深入浅出，从基础概念出发，对仪表元件的有关问题进行论述。

值此《仪表元件丛书》出版之际，我们向为丛书的编写做了大量组织、指导工作的沈阳仪器仪表工艺研究所的领导及从事具体工作的王崇光、董世章等同志表示深切的谢意，并向大力支持丛书编写的各有关单位领导及编者，表示衷心的感谢。

本书常用符号表

- a — 中心距或椭圆长轴
 a' — 角度变位中心距
 c — 齿侧间隙
 c^* — 径向间隙系数
 $d(r)$ — 分度圆直径 (半径)
 $d'(r')$ — 节圆直径 (半径)
 $d_o(r_o)$ — 齿顶圆直径 (半径)
 $d_b(r_b)$ — 基圆直径 (半径)
 $d_f(r_f)$ — 齿根圆直径 (半径)
 e — 分度圆齿间
 h — 全齿高
 h_a — 齿顶高
 h_a^* — 齿顶高系数
 h_f — 齿根高
 i — 传动比
 m — 模数
 M — 力矩
 n — 转速、波数
 p — 分度圆齿距 (周节)
 p_b — 基圆齿距 (基节)
 p_x — 螺旋线导程
 q — 蜗杆特性系数
 R — 锥顶距或柔轮代号
 s — 分度圆齿厚
-

VI

v —线速度

w —公法线长度

x —变位系数

y —分离系数

z —齿数

z_v —当量齿数

α —分度圆压力角（齿形角）、齿厚半角、线胀系数

α' —节圆压力角（啮合角）

β —斜齿轮螺旋角

γ —蜗杆螺旋升角

δ —分锥角、柔轮变形量

ε —重合度

η —效率

ρ —圆弧半径（曲率半径）

Σ —轴交角

τ —齿距角

ω —角速度

目 录

出版者的话

本书常用符号表

第一章 绪 论	1
第一节 仪表齿轮的应用和分类	1
一、仪表齿轮的应用	1
二、仪表齿轮传动的分类	5
第二节 仪表齿轮传动的特点	5
第三节 仪表齿轮的材料	6
第二章 仪表齿轮的传动原理与设计	8
第一节 轮齿啮合基本定律	8
第二节 渐开线齿轮传动原理与设计	11
一、渐开线与渐开线齿轮传动的特点	11
二、几何参数的确定和计算	15
三、仪表齿轮传动的质量指标	26
第三节 变位齿轮的设计	32
一、变位齿轮的形成和特点	33
二、变位齿轮的设计与计算	39
第四节 斜齿、锥齿和蜗杆传动	49
一、斜齿轮的应用和参数计算	49
二、螺旋齿轮的应用和传动特点	52
三、圆锥齿轮的应用和参数计算	55
四、蜗杆传动的应用和计算	60
第五节 修正摆线齿轮的传动原理与设计	64
一、摆线齿轮的形成和特点	66
二、钟表齿轮的传动原理与设计	70
三、双圆弧修正摆线齿轮	88
四、摆线销轮传动	99
第六节 谐波齿轮传动原理与设计	103
一、谐波齿轮传动的工作原理	103

二、谐波齿轮传动的特点和主要结构型式	106
三、谐波齿轮的齿形和几何参数计算	111
四、谐波齿轮的材料和传动结构示例	116
第七节 仪表齿轮的简化与特殊啮合	116
一、传递相交与交叉轴运动的简化啮合	116
二、球柱齿和尖齿的啮合传动	121
三、非圆齿轮传动	122
第三章 仪表齿轮传动的质量分析	127
第一节 提高仪表齿轮传动精度的措施	127
第二节 仪表齿轮的传动效率和卡滞	129
一、仪表齿轮的传动效率分析	130
二、几种实用的仪表齿轮的传动分析	152
第三节 仪表齿轮传动的振动和噪音	162
第四节 仪表齿轮传动的回差	166
一、产生回差的原因	167
二、减小回差的办法	171
第四章 仪表齿轮的加工	175
第一节 仪表齿轮的展成法加工	175
一、仪表齿轮的滚齿加工	175
二、仪表齿轮的插齿加工	188
三、仪表齿轮的磨齿加工	192
四、小模数直齿圆锥齿轮的刨齿加工	19 ⁵
第二节 仪表齿轮的对滚法加工	196
一、仪表齿轮的剃齿加工	196
二、仪表齿轮的冷轧齿	198
三、仪表齿轮的珩齿、研齿和抛齿	202
第三节 仪表齿轮的仿形法加工	204
一、仪表齿轮的分度铣齿	204
二、仪表齿轮的成形滚齿	205

第四节 仪表齿轮的模压法加工	207
一、仪表齿轮的冲齿加工	208
二、仪表齿轮的注塑法加工	208
第五章 仪表齿轮的公差与检验	210
第一节 仪表齿轮的精度要求和公差标准	210
一、新国标的适用范围	210
二、新国标中规定的检验参数	211
三、齿轮精度	215
四、齿轮侧隙	215
五、图纸标注	217
六、检验项目	218
第二节 仪表齿轮质量指标的单项测量与检验	218
一、周节测量	218
二、齿圈径向跳动的测量	234
三、公法线长度的测量	236
四、齿形的测量	239
五、齿向误差的测量	261
六、 M 值的测量	266
第三节 仪表齿轮的综合测量	269
一、双面啮合综合测量	270
二、单面啮合综合测量	272
三、齿轮整体误差测量	278
第六章 仪表齿轮的测绘	293
第一节 渐开线圆柱齿轮的测绘	295
一、直齿圆柱齿轮的测绘方法和步骤	296
二、斜齿圆柱齿轮的测绘方法和步骤	306
第二节 修正摆线齿轮的测绘	309
一、修正摆线齿轮的测绘步骤和方法	309
二、修正摆线齿轮测绘实例	320
参考文献	327

第一章 绪 论

在仪器仪表中，广泛应用着各类齿轮。这些齿轮的尺寸都比较小，模数大多小于1。它们主要用来传递运动，有一些也用来传递力和功率。但是，它们所传递的力和功率都很小，以致于与机器中的齿轮传递的力和功率相比较，小得可以忽略不计。我们就把这样一些齿轮称为仪器仪表齿轮，简称为仪表齿轮。

第一节 仪表齿轮的应用和分类

一、仪表齿轮的应用

仪表齿轮的应用很广，主要用于以下几个方面。

1. 用于钟表和时间控制机构中

在钟表中，齿轮把发条力矩传到摆轮游丝振荡系统中，使其维持等时振荡。同时，借助于轮系中各齿轮间一定的传动比关系，用齿轮轴带动指针来指示时间。在手表中，上弦、拨针也由齿轮传动来完成。在所谓第三代电子手表中，用步进马达带动轮系，借以指示时间。

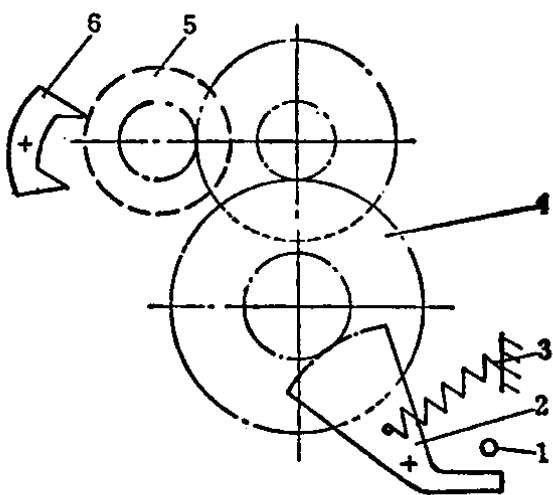


图1-1 时间继电器中的机械延时机构示意图

1—限动销 2—扇形齿轮 3—弹簧
4—中间轮系 5—棘轮 6—掣子

有很多时间控制机构是应用齿轮传动的。例如，时间继电器中的机械延时机构（见图1-1），跳伞员用的开伞器，定时炸弹中的定时机构，照相机快门及自拍机构等。

图 1-1 为时间继电器中的延时机构。

在图 1-1 中，当逆时针转动扇形齿轮 2 的拨柄到限动销钉 1 时，弹簧 3 被拉伸。当松开拨柄时，弹簧力使扇形齿轮转动；经中间轮系传动，使棘轮 5、掣子 6 组成的无固有周期调速器工作。而拨柄则慢慢向原来位置运动。拨柄回到原来位置所需要的时间，取决于弹簧的拉力、轮系的传动比以及调速器的特性。在拨柄返回时，可接通电路中的触点，以控制时间。

对于钟表及时间控制机构中用的齿轮传动，最重要的要求是传动灵活，不发生卡滞现象，否则，仪器会失效，甚至发生事故。

2. 用于示数分度机构中

在一些测量仪表及分度机构中，往往用齿轮来传递线位移或角位移。

图 1-2 是千分表传动系统示意图。图中，1 既为测杆，又是齿条；游丝

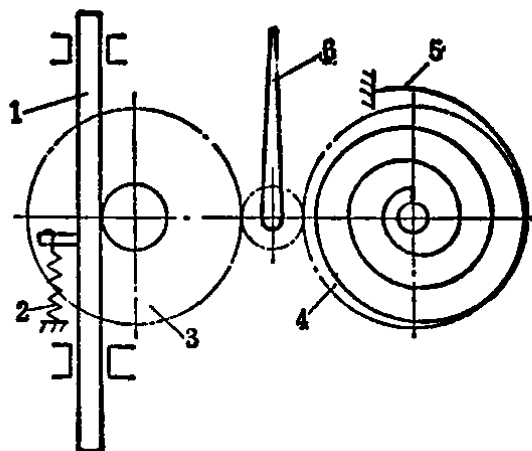


图1-2 千分表传动系统示意图

1—测杆 2—测力弹簧 3—主动轮系
4—辅助齿轮 5—游丝 6—指针

5 的内端固定在 4 上，其外端固定在机体上；6 固定于主轮系最后一个小齿轮的转轴上。测量时，测杆移动量通过轮系放大，用指针及刻度盘读出。辅助齿轮和游丝 5 用来消除由主传动链中的间隙而产生的回差。

由上面例子可以看到，对示数分度机构中的齿轮传动精度要求高，否则会造成示值误差。

3. 用于伺服机构中

伺服机构中的齿轮传动，用来按指定的要求移动或转动仪器的零件、部件。很多伺服电机本身还带有齿轮减速器。

图 1-3 是测量工件表面光洁度的大型轮廓仪的驱动箱传动示意图。

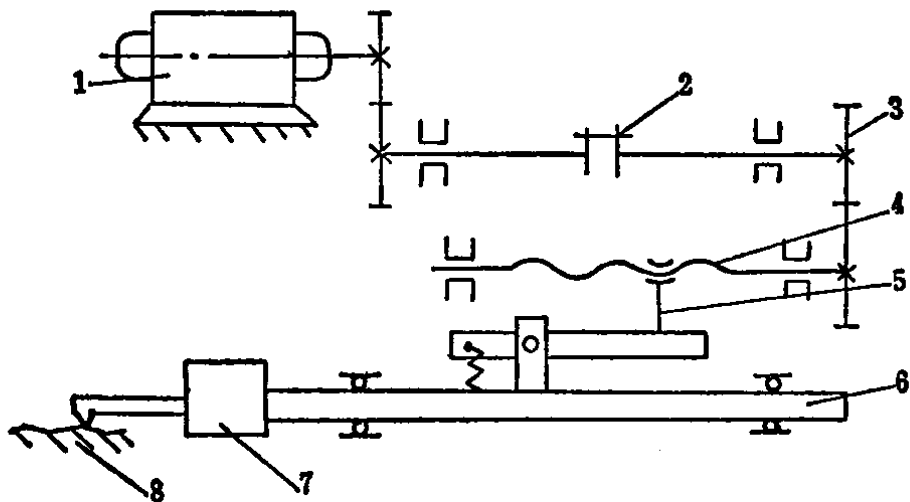


图1-3 轮廓仪驱动箱传动示意图

1—电动机 2—泡沫塑料联轴节 3—齿轮轮系 4—丝杆 5—螺母
6—导轨 7—测量光洁度的传感器 8—被测工件

测量时，传感器上的触针由电动机通过传动机构带动而在工件表面上滑过。由于工件表面粗糙不平，使触针上下运动，引起传感器发出电信号，经适当处理后，即可读得表面光洁度。

在此仪器中，要求齿轮传动比恒定，触针移动速度均匀。此外，要求传动平稳、振动小，否则，会造成测量误差。

4. 用于调整与校准机构中

在仪器仪表中，经常通过齿轮传动将仪器的零部件调到一定的位置。

例如，在光学仪器中，常常借助于齿轮传动调整镜头的位置。

以上所说的是仪表齿轮应用的几个主要方面。由于齿轮的应用是多种多样的，故很难完全概括。

随着科学技术的飞跃发展，仪表齿轮的应用也愈来愈广。

由于仪器仪表性能的不断改善和对精度的要求不断提高，对仪表齿轮的要求也越来越高。这促使了仪表齿轮的发展。许多新型齿轮（如谐波齿轮，非圆齿轮等）得到了广泛应用，齿轮设计方法不断革新，齿轮加工、检验技术也得到飞快发展。

近年来，电子技术的飞快发展，促进了仪器仪表的不断革新。在某些仪表中，由于总体设计的改革，原来应用齿轮传动的，现在不用了。例如，在被称为第四代的电子手表中，已经没有齿轮传动机构了。但是，机械手表有其独特优点，故它不会完全被电子手表所代替。另一方面，为了提高精度，有些仪器又增添了齿轮传动。轮廓仪就是典型的例子。最早的轮廓仪没有驱动箱，而是用手握住带触针的测头，在工件表面上移动。这时，测头移动不平稳，移动速度不均匀，都会产生测量误差。经过改进增添了齿轮传动驱动箱，大大地提高了测量精度。

应当指出，与电子元件相比较，机械元件具有自己的特点，例如结构简单、工作可靠、容易维修等。这也是在某些仪器中电子装置不能完全取代机械装置的重要原因。

以时间控制仪器为例。现代，人们已经能用电子技术相当准确地控制时间，其准确性之高，是机械时间控制机构无法达到的。但是，在某些情况下，还必须用机械时间控制装

置。例如，定时炸弹的定时装置，到现在为止，机械式的还占主要地位，有的虽用上了电器装置，但同时还安有机械装置作为双保险。原因是，电子器件可靠性不如机械元件，它容易受电磁场、温度、湿度等各种外界条件的影响而改变性能。特别是久放以后，用时很容易出故障。

二、仪表齿轮传动的分类

为了研究方便，常常将仪表齿轮进行分类，下面简单介绍仪表齿轮传动的分类法。

1. 按使用对象，仪表齿轮传动可分为：钟表及时间控制机构用齿轮传动；示数、分度机构用齿轮传动；伺服机构用齿轮传动；调整、校准用齿轮传动。

2. 按啮合原理，可分为：渐开线齿轮传动；修正摆线齿轮传动；简化啮合齿轮传动。

渐开线齿轮传动的应用最广泛。它的制造、检验都比较方便，故容易得到较高的精度，修正摆线齿轮传动通常用于钟表及时间控制机构中，它包括通常所说的钟表齿轮传动及双圆弧齿轮传动。其主要优点是传动灵活，最小齿数少，缺点是加工不如渐开线齿轮方便。简化啮合齿轮加工方便，成本低，精度低，一般用于不重要的机构中。

3. 按齿轮传动轴的相互位置关系，可分为：传递平行轴运动的齿轮传动，如圆柱直齿轮传动、圆柱斜齿轮传动、非圆齿轮传动以及谐波齿轮传动等；传递相交轴运动的齿轮传动，如圆锥齿轮传动、端面齿轮传动；传递交叉轴运动的齿轮传动，如螺旋齿轮传动、蜗轮蜗杆传动等等。

第二节 仪表齿轮传动的特点

与机械制造中的齿轮传动相比，仪表齿轮传动有如下一

些特点:

1. 仪表齿轮的模数较小,大多数都小于1。而且,齿轮传递的力矩也都很小。齿轮的模数常常不是由强度条件决定的,而是由精度要求、工艺条件和结构设计决定的。经验证明,在仪器仪表中,齿轮模数以0.3~0.8为较好。

2. 最小齿数少,单级传动比大。为了减小体积,减少轮系的级数,常常取最小齿数为6~10,单级传动比为8~10。

3. 仪器仪表中,除了采用减速传动外,还常常采用增速传动。例如机械式钟表中的齿轮传动就是增速传动。

4. 仪表齿轮的啮合种类较多,除常用的渐开线齿轮啮合外,还采用修正摆线啮合和各种简化啮合。

5. 仪器仪表齿轮抗外界干扰能力差。因为它传递的力矩很小,振动、冲击、灰尘、磁力以及油垢等都可能影响它们的正常工作。

6. 仪表齿轮传动的侧隙和径向间隙与模数相比较较大。尺寸公差值与模数相比也较大。

7. 仪表齿轮常常工作在润滑不良的条件下,一般的都没有润滑系统,往往是定期加油或清洗时加油,有的齿轮还经常工作在半干摩擦状态,因此容易磨损。

8. 在分度装置及示数传动中,要考虑消除回差问题。

第三节 仪表齿轮的材料

制造仪表齿轮的材料较多,除了选用钢材外,还大量采用有色金属及非金属。选择仪表齿轮材料时,应当注意以下几点:

1. 材料便于加工;

2. 可以得到较高的表面光洁度;
3. 材料的稳定性好,不易受化学物质侵蚀;
4. 在某些使用情况下,要考虑一定的强度要求,特别是要容易获得较高的表面层强度。

常用的仪表齿轮材料有如下一些:

碳钢: 有15、20、30、40、50等牌号, 其中15、20、30号碳钢用于性能要求不高、传动速度较低的齿轮传动; 40、45、50号碳钢用于制造性能要求较高的齿轮传动。

优质碳素工具钢: T8A、T10A, 常用于制造轴齿轮和蜗杆。

易切削钢: Y12A, 用于制造一般齿轮。

不锈钢: 2Cr13Ni2、1Cr18Ni9Ti, 用于制造防锈、防腐的齿轮。

合金钢: 15Cr、20Cr、40Cr, 用于制造齿轮和蜗杆。15Cr、20Cr经渗碳淬火后, 可获得表面层硬而中心韧的材料组织, 抗磨抗冲击性能好。

硬铝和超硬铝: LY12, LC4, 用于制造要求重量轻的齿轮。

锡青铜: QSn6.5~0.1, 用于制造具有高抗磨性能的重要齿轮及蜗轮。

铝青铜: QAl₉₋₂, QAl₉₋₄, 用于制造抗磨但不很重要的齿轮。

铅黄铜: HPb59-1、HPb59-3 和黄铜H62用于制造普通齿轮和蜗轮。

常用的非金属仪表齿轮材料有夹布胶木、卡普隆、尼龙以及G聚碳酸酯等。它们的优点是抗振动冲击性能好, 噪音小。缺点是加工时变形大, 几何形状不稳定。

第二章 仪表齿轮的传动 原理与设计

仪表齿轮主要是用来传递运动的。对其基本要求是：准确、平稳、可靠和灵活地传递运动。如何保证这几点要求，这是在传动原理和结构设计中首先要解决的问题。

第一节 轮齿啮合基本定律

任何齿轮传动，都是靠一对轮齿互相啮合传递运动的。所谓传动准确和平稳，即指一对轮齿啮合过程中传动比（亦称速比 $i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ ）保持不变。否则，当主动轮以等角速度转动时，从动轮的角速度就要发生变化。这不仅不能准确地传递角位移，而且还将产生加速度、冲击和振动等，从而造成传动的不平稳。那么，怎样的运动条件，怎样的齿形才能使传动比稳定不变呢？这是轮齿啮合基本定律首先要说明的问题，也是研究分析和设计齿轮的一个理论基础。

图 2-1 为任意齿廓的一对轮齿啮合示意图。齿轮 1 和齿轮 2 的齿廓于某瞬时在 K 点相接触。设两轮的角速度分别为 ω_1 和 ω_2 ，它们在 K 点的速度分别为 V_{K1} 和 V_{K2} ，过 K 点作两齿廓的公法线 NN ，由于两齿廓在传动中是密切贴合连续接触的（既不离开也不嵌入），所以在 K 点的两速度在其公法线方向的投影必然相等。即：

$$V_{K1} \cos \alpha_{K1} = V_{K2} \cos \alpha_{K2}$$

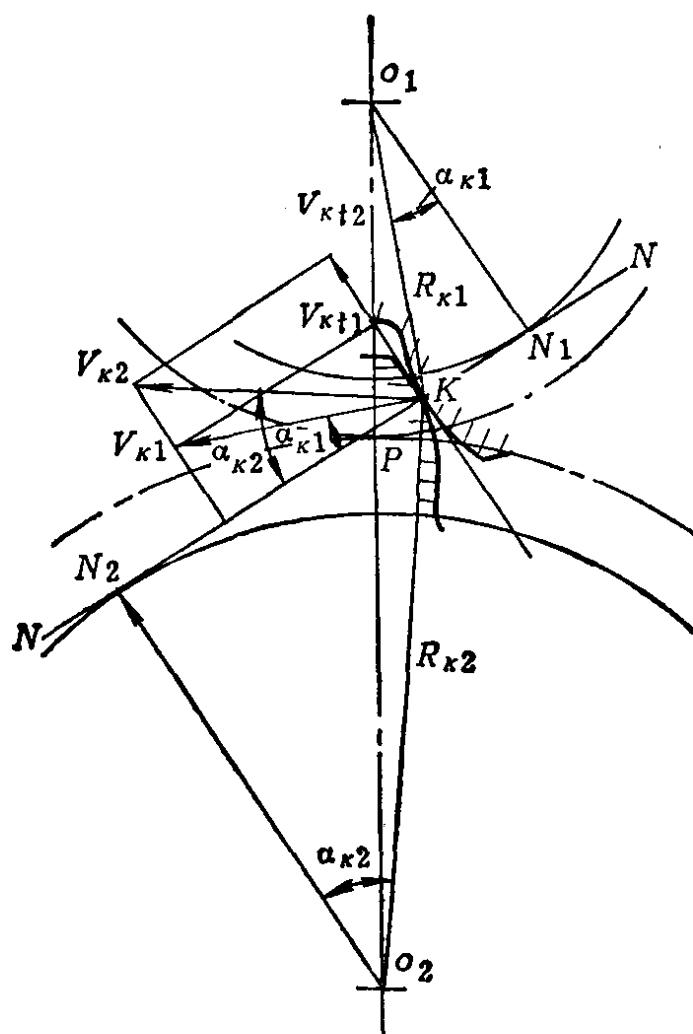


图2-1 轮齿啮合示意图

式中 α_{k1} 、 α_{k2} ——两速度与公法线的夹角。

令啮合点 K 到两轮中心 O_1 、 O_2 的距离为 R_{k1} 、 R_{k2} ，则两速度又可写为： $V_{k1} = R_{k1}\omega_1$ ， $V_{k2} = R_{k2}\omega_2$ ，代入上式可得：

$$R_{k1}\omega_1\cos\alpha_{k1} = R_{k2}\omega_2\cos\alpha_{k2}$$

由此得传动比为：

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_{k2}\cos\alpha_{k2}}{R_{k1}\cos\alpha_{k1}}$$

由两轮中心 O_1 、 O_2 向公法线作垂线 $\overline{O_1N_1}$ 和 $\overline{O_2N_2}$ ，则由图示关系得： $\overline{O_1N_1} = R_{k1}\cos\alpha_{k1}$ ， $\overline{O_2N_2} = R_{k2}\cos\alpha_{k2}$ ，于是传动