



第9章 轮系

第1节 概述

第2节 定轴轮系及其传动比计算

第3节 周转轮系及其传动比计算

第4节 轮系的功用



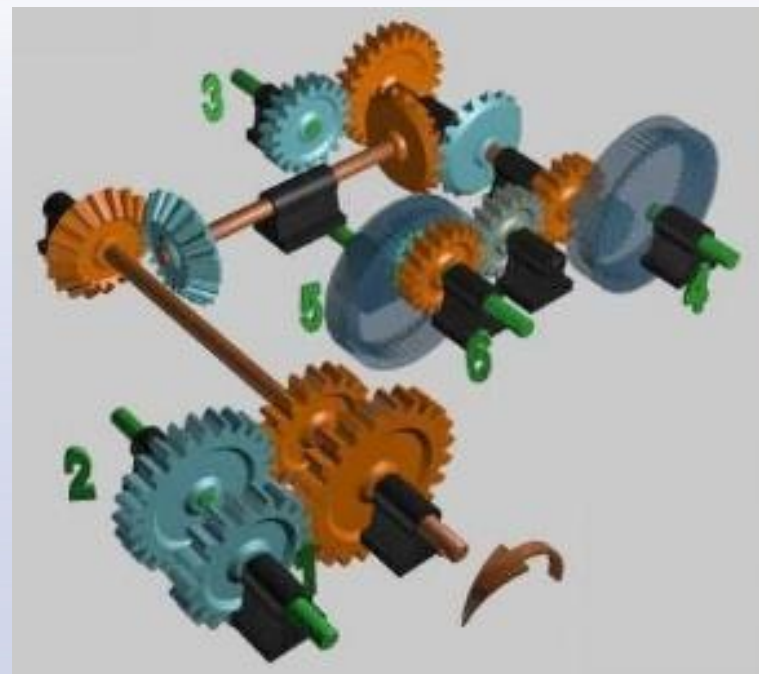
第1节 概述

一、轮系的概念与分类

轮系：由一系列相互啮合的齿轮（包括蜗杆蜗轮）组成的传动系统。

轮系的**传动比**：主动轴与从动轴的角速度之比或转速之比，即

$$i_{\text{主从}} = \frac{\omega_{\text{主}}}{\omega_{\text{从}}} = \frac{n_{\text{主}}}{n_{\text{从}}}$$



汽车变速箱轮系

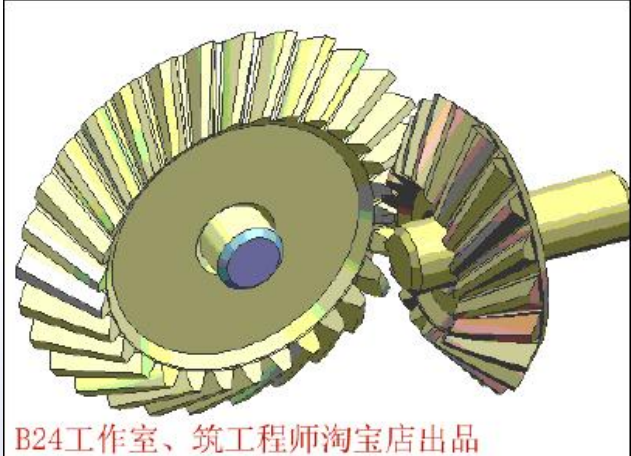
分类：定轴轮系、周转轮系、混合轮系。



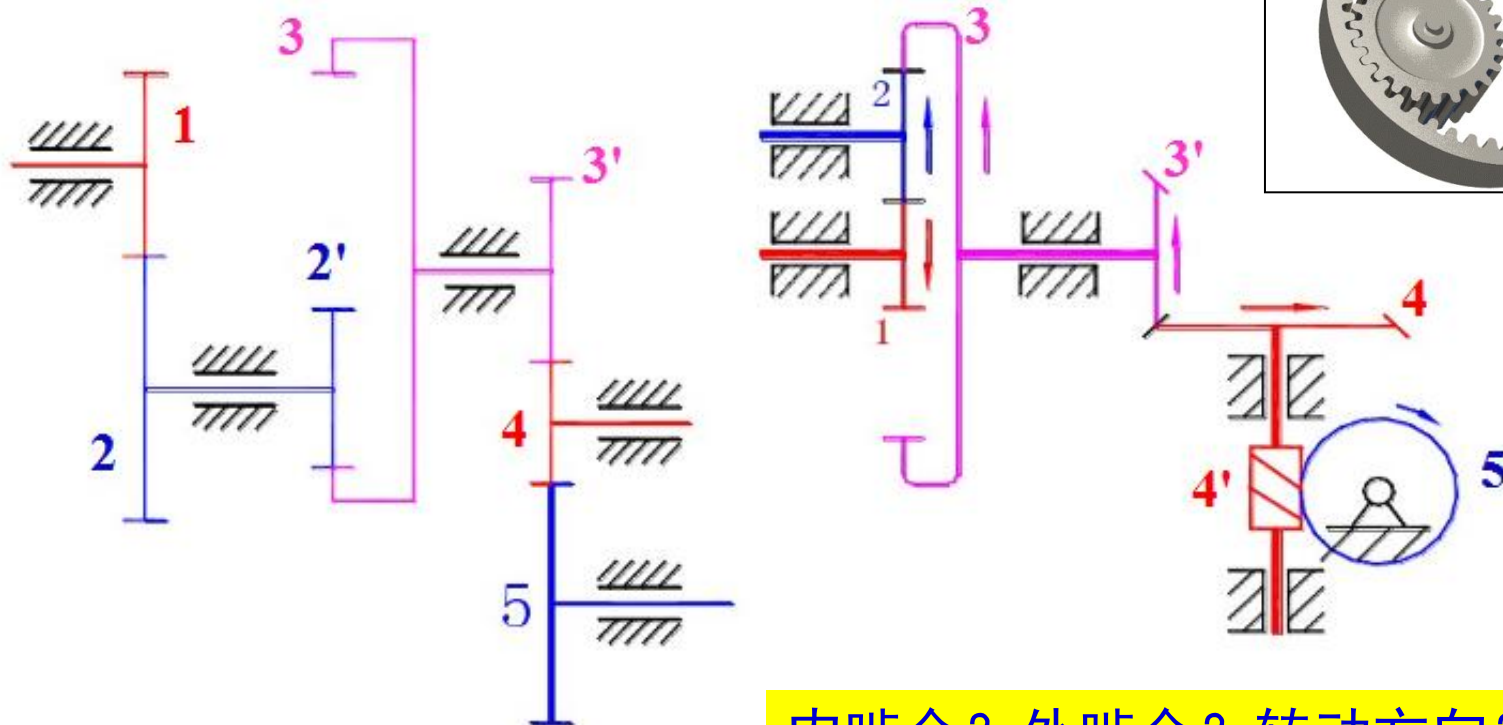
第1节 概述

定轴轮系

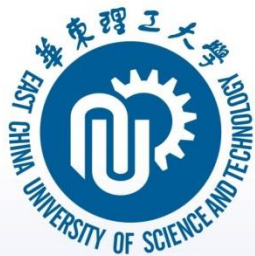
在轮系传动过程中，**每个齿轮的几何轴线位置都是固定不变的**，称为定轴轮系。



齿轮传动侧视图表示



内啮合？外啮合？转动方向？

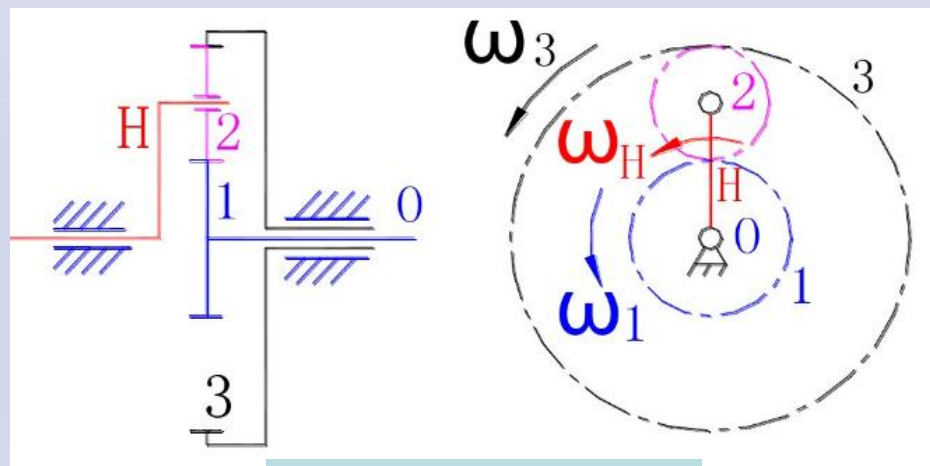


第1节 概述

周转轮系

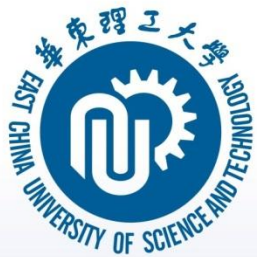
在轮系传动过程中，至少有一个齿轮的几何轴线是绕位置固定的另一齿轮几何轴线在转动，这种轮系称为周转轮系。

轴线位置固定的齿轮称为**中心轮**或**太阳轮**（齿轮1和齿轮3），轴线位置变动的齿轮称为**行星轮**（齿轮2，既有自转，又有公转），支持行星轮自转的构件H称为**转臂**（或**行星架**）。



行星齿轮传动

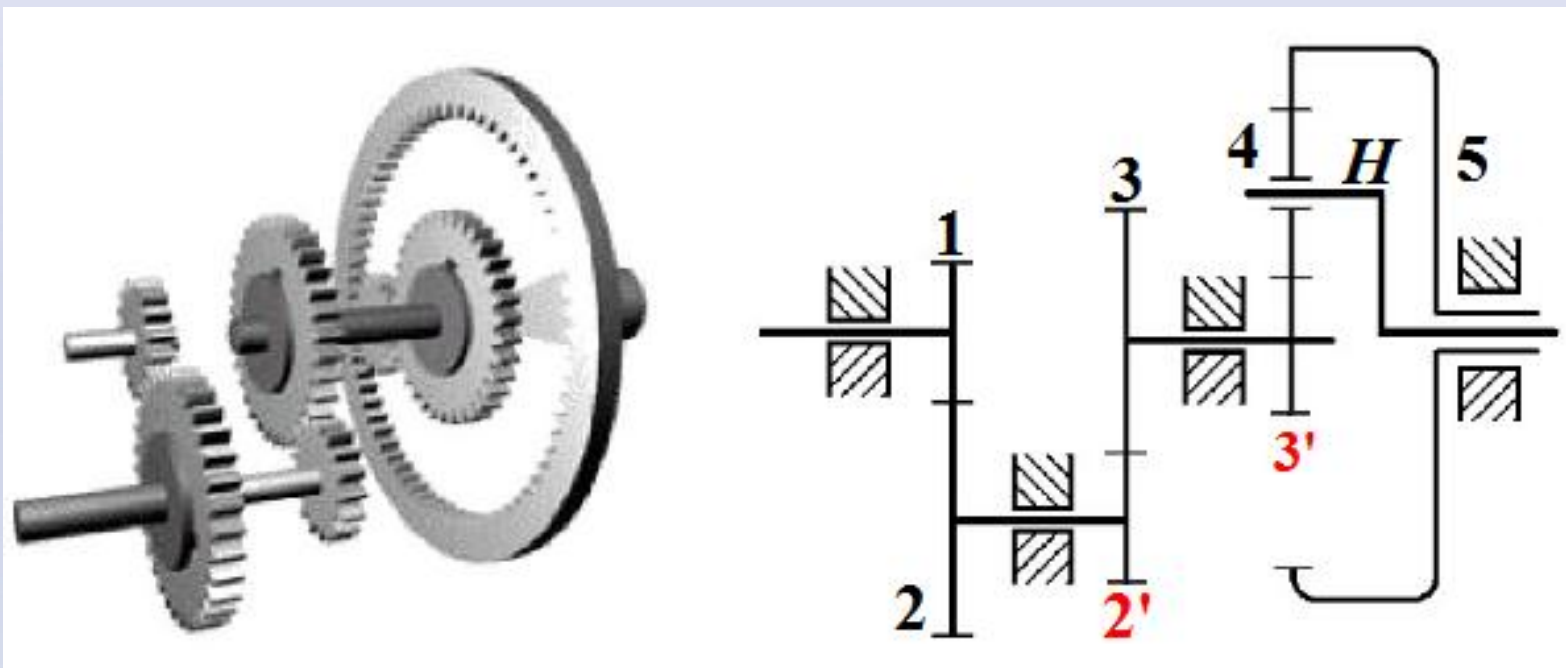
轮系中有无行星轮是判断周转轮系的主要标志。



第1节 概述

混合轮系

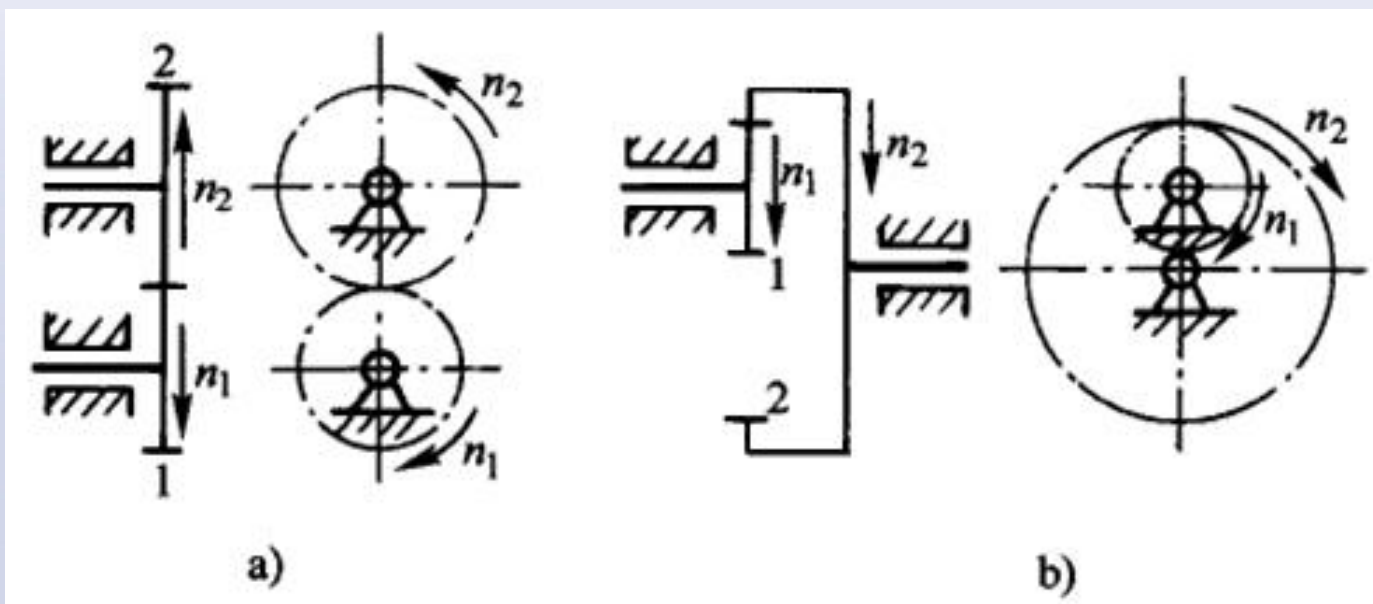
轮系中既有定轴轮系，又有周转轮系，称为混合轮系。





第2节 定轴轮系及其传动比计算

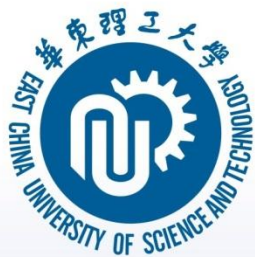
一、单级传动的传动比



外啮合齿轮传动

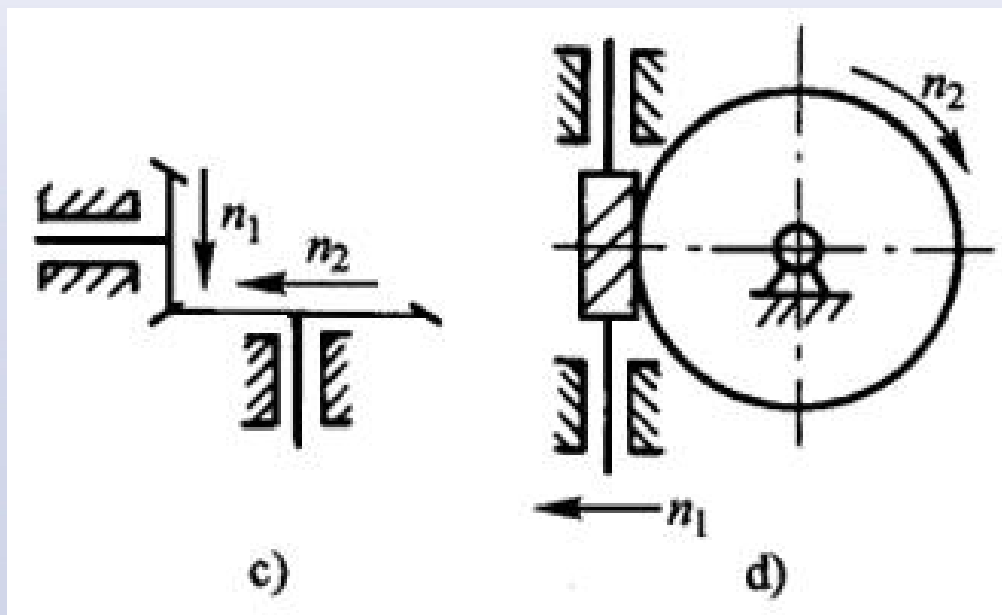
内啮合齿轮传动

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$



第2节 定轴轮系及其传动比计算

一、单级传动的传动比



锥齿轮传动

蜗杆蜗轮传动

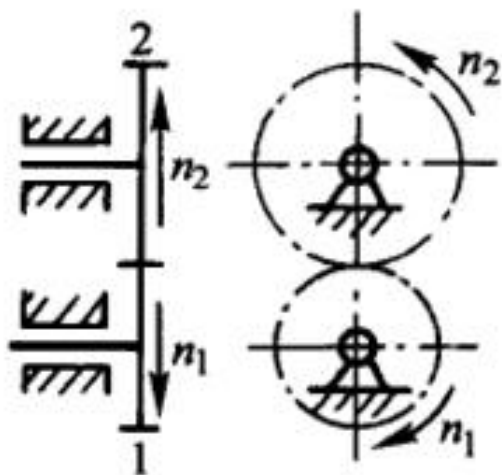
$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

第2节 定轴轮系及其传动比计算

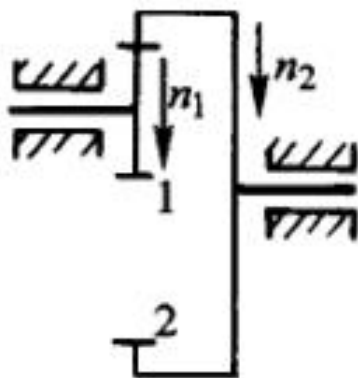
两轴间的转向关系的确定

如果两轴平行，既可用图示的**箭头法**来表示两轴间的转向关系，也可用**符号法**来表示两轴间的转向关系。

箭头表示**可见侧**圆周速度方向



a)

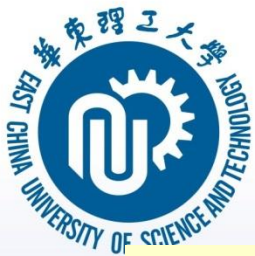


b)

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \pm \frac{z_2}{z_1}$$

“+”表示内啮合，转向相同；

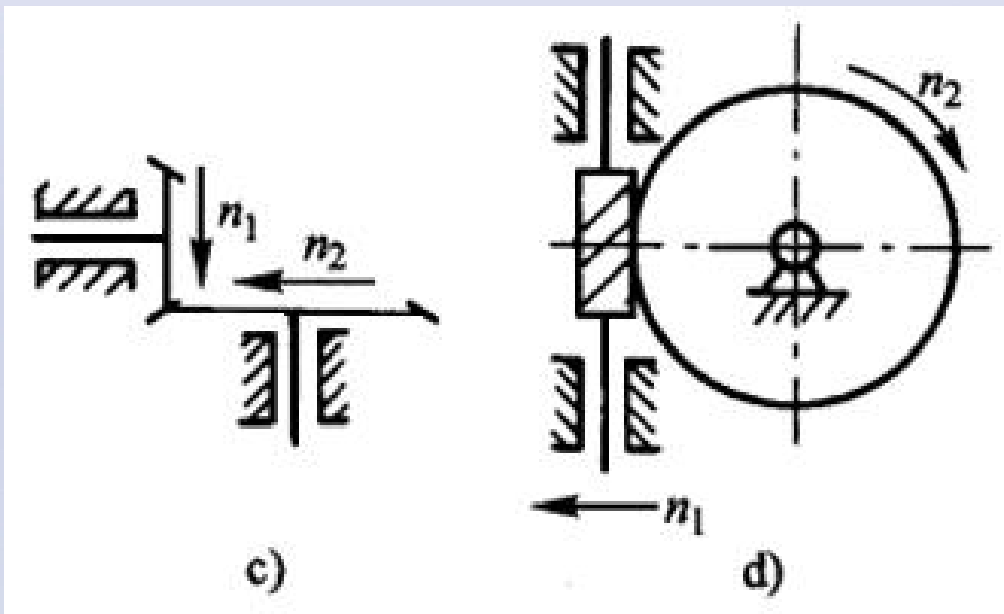
“-”表示外啮合，转向相反。



第2节 定轴轮系及其传动比计算

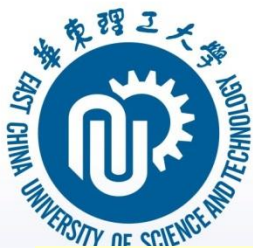
两轴间的转向关系的确定

如果两轴不平行，两轴间的转向关系**只能用箭头法**表示。



锥齿轮传动的箭头画法，要注意**箭头对箭头**或**箭尾对箭尾**；

蜗杆传动的箭头画法，按**左右手定则**确定蜗轮的转动方向。



第2节 定轴轮系及其传动比计算

二、定轴轮系的传动比

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2} = -\frac{z_2}{z_1}$$

$$i_{2'3} = \frac{n_2'}{n_3} = \frac{z_3}{z_2'}$$

$$i_{3'4} = \frac{n_3'}{n_4} = -\frac{z_4}{z_3'}$$

$$i_{45} = \frac{n_4}{n_5} = -\frac{z_5}{z_4}$$

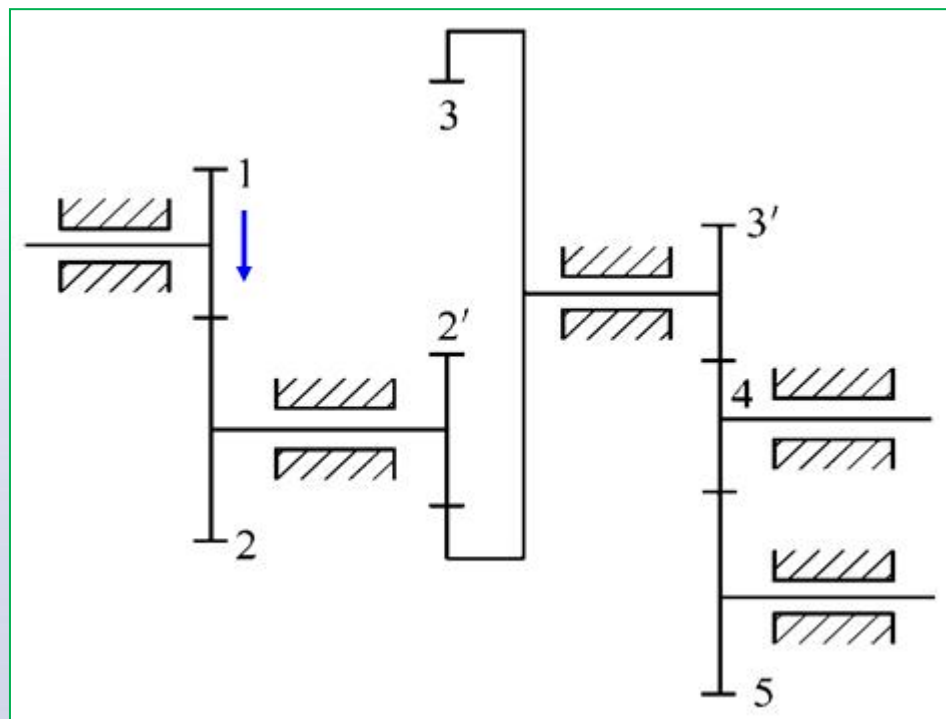
其中, $n_2 = n_2'$, $n_3 = n_3'$

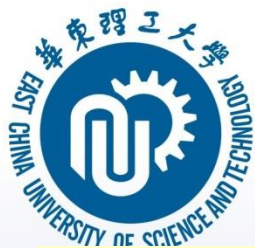
将前面各式两边连乘, 得

$$i_{12} i_{2'3} i_{3'4} i_{45} = \frac{n_1 n_2' n_3' n_4}{n_2 n_3 n_4 n_5} = (-1)^3 \frac{z_2 z_3 z_4 z_5}{z_1 z_2' z_3' z_4}$$

因此,

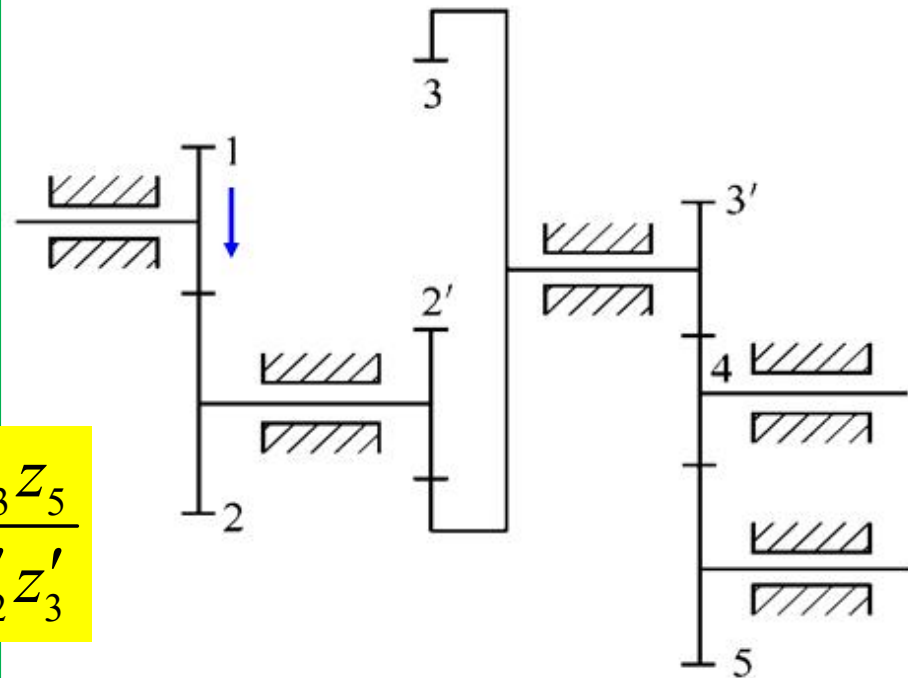
$$i_{15} = \frac{n_1}{n_5} = i_{12} i_{2'3} i_{3'4} i_{45} = (-1)^3 \frac{z_2 z_3 z_5}{z_1 z_2' z_3'}$$





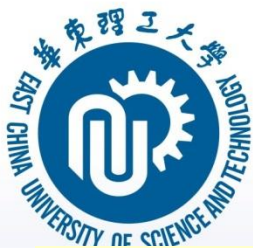
二、定轴轮系的传动比

$$i_{15} = \frac{n_1}{n_5} = i_{12} i_{2'3} i_{3'4} i_{45} = (-1)^3 \frac{z_2 z_3 z_5}{z_1 z_2' z_3'}$$



- 1) 定轴轮系的**传动比**等于组成轮系的各对齿轮**传动比的连乘积**，也等于**从动轮齿数的连乘积与主动轮齿数的连乘积之比**。
- 2) 定轴轮系，主动轮与从动轮的**转向关系**，可以用箭头法判定，还可以用**符号法**，方法是在齿数比前加 $(-1)^m$ ， m 为外啮合次数。

$$i_{MB} = \frac{\omega_M}{\omega_B} = \frac{n_M}{n_B} = (-1)^m \frac{\text{轮系中各对齿轮从动轮齿数的连乘积}}{\text{轮系中各对齿轮主动轮齿数的连乘积}}$$

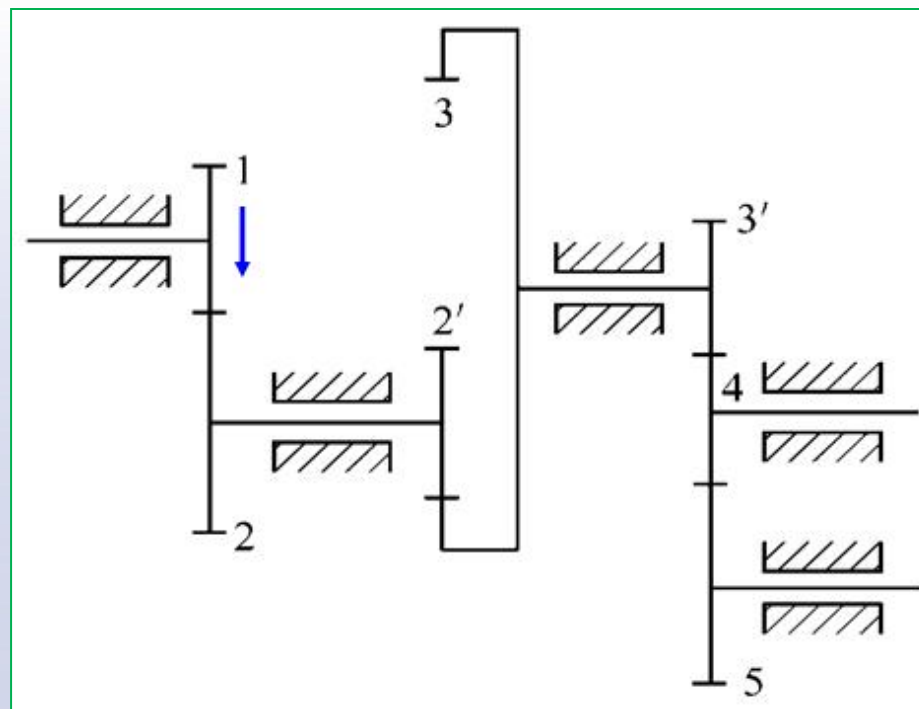


第2节 定轴轮系及其传动比计算

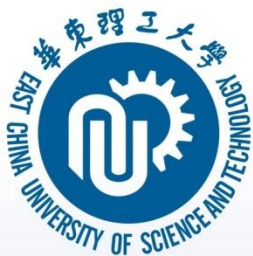
二、定轴轮系的传动比

注意：

1) 齿轮4即是从动轮又是主动轮，它对传动比的大小没影响，其作用是改变方向，称为**过轮**、**惰轮**或**中间轮**。



2) 2—2'，3—3' 是同轴上的两个轮，转速相同，而不是一级传动。



第2节 定轴轮系及其传动比计算

【例 5-1】如图所示轮系，已知 $z_1=z_2=z_3'=z_4=20$ ，齿轮1、3，3'和5同轴线，各齿轮均为标准齿轮。已知轮1的转速 $n_1=1440\text{r/min}$ ，求齿轮5的转速 n_5 和转向。

【解】该齿轮系为一平面定轴轮系，**齿轮2和齿轮4为惰轮**，齿轮系中有两对外啮合齿轮，根据公式计算

$$i_{15} = \frac{n_1}{n_5} = (-1)^2 \frac{z_3 z_5}{z_1 z_3'}$$

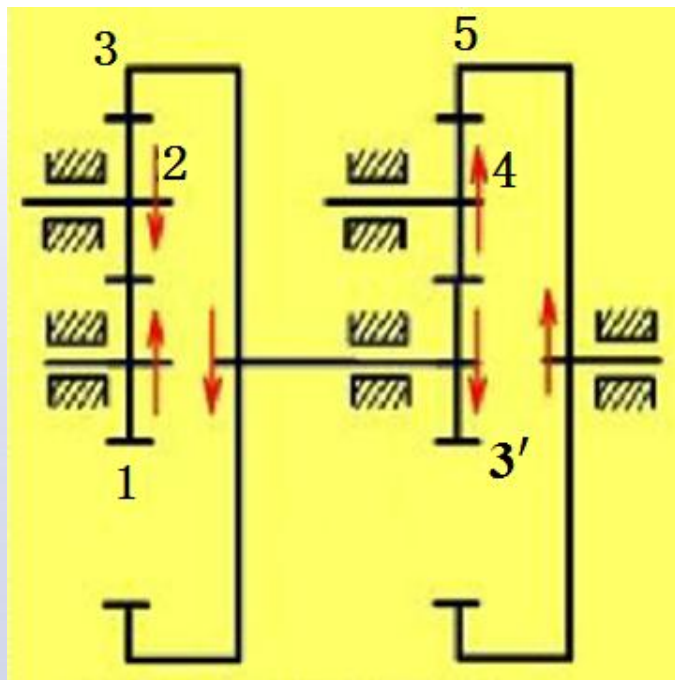
内啮合中心距？

因**齿轮1、2、3的模数相等（？）**，故他们之间的中心距关系为：

$$\frac{m}{2}(z_1 + z_2) = \frac{m}{2}(z_3 - z_2) \quad \text{即}$$

$$z_1 + z_2 = z_3 - z_2$$

$$z_3 = z_1 + 2z_2 = 20 + 2 \times 20 = 60$$





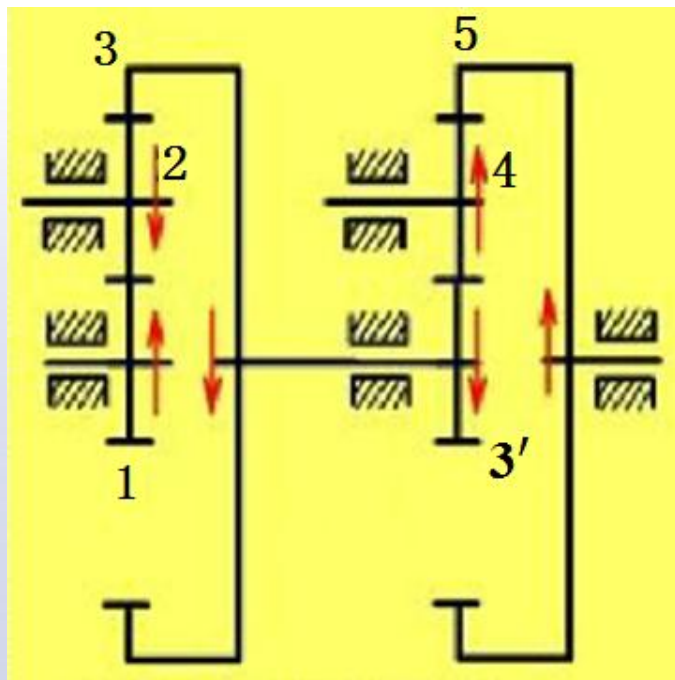
第2节 定轴轮系及其传动比计算

【解】同理 $z_5 = z_3' + 2z_4 = 20 + 2 \times 20 = 60$

所以

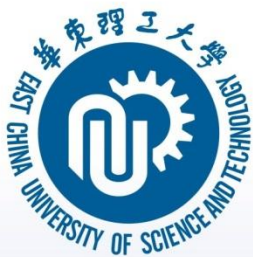
$$n_5 = n_1 (-1)^2 \frac{z_1 z_3'}{z_3 z_5} = 1440 \times \frac{20 \times 20}{60 \times 60} = 160 r / \min$$

n_5 为正值，说明齿轮5转向与齿轮1转向相同。



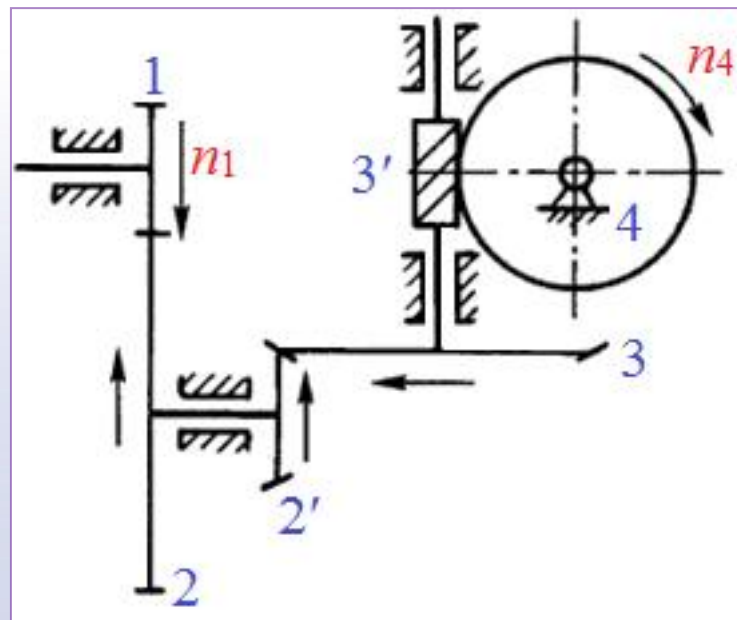
※ 定轴轮系传动比计算：

- 1) 分析传动路线，确定每对齿轮传动中的主动轮、从动轮
- 2) 找出惰轮，既在传动中即是主动轮，又是从动轮的齿轮
- 3) 去掉惰轮，代入公式计算。



第2节 定轴轮系及其传动比计算

【例5-2】如图定轴轮系，已知 $z_1=18$ ， $z_2=54$ ， $z_{2'}=16$ ， $z_3=32$ ， $z_{3'}=2$ ， $z_4=40$ ，齿轮1为主动轮，其转速 $n_1=3000\text{r/min}$ ，转向如图所示。已知各齿轮的齿数，求蜗轮的转速 n_4 ，并判断其转动方向。



【解】这是一个含有锥齿轮传动和蜗杆传动的定轴轮系，主动轮与从动轮间的转向关系只能用**箭头法**判定，如图所示。

轮系的传动比为

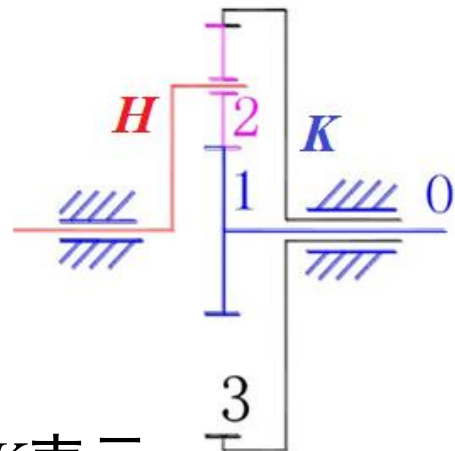
$$i_{14} = \frac{n_1}{n_4} = \frac{z_2 z_3 z_4}{z_1 z_{2'} z_{3'}} = \frac{54 \times 32 \times 40}{18 \times 16 \times 2} = 120$$

蜗轮的转速为

$$n_4 = \frac{n_1}{i_{14}} = \frac{3000}{120} \text{ r/min} = 25 \text{ r/min} \quad (\text{顺时针方向转动})$$



第3节 周转轮系及其传动比计算



一、周转轮系的组成

太阳轮（中心轮）：轴线位置固定的齿轮，用 K 表示；

行星轮：既作自转又作公转的齿轮；

行星架：支持行星轮的构件，又称**转臂**，**系杆**，用 H 表示。

周转轮系中，太阳轮和行星架均绕固定轴线转动，所以一般以太阳轮和行星架作为运动或动力的输入或输出构件，称为**基本构件**。

二、周转轮系的分类

按照自由度数目的不同，将周转轮系分为两类：

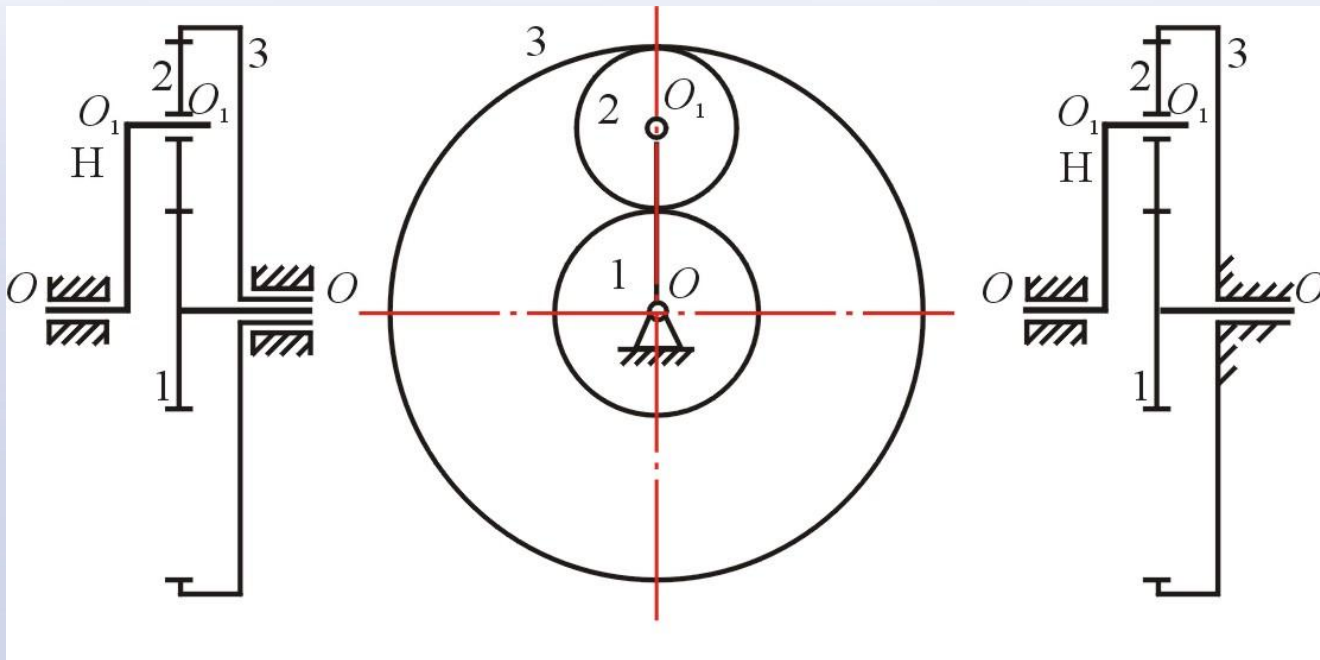
- 行星轮系：自由度为1
- 差动轮系：自由度为2



第3节 周转轮系及其传动比计算

差动轮系：自由度为2

行星轮系：自由度为1

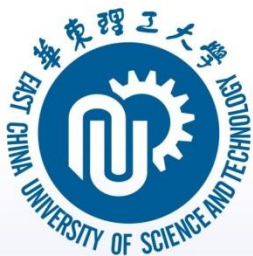


活动构件数 $n=4$ ，低副 $P_L=4$ ，
高副 $P_H=2$ ，机构自由度为：

$$F = 3 \times 4 - 2 \times 4 - 2 = 2$$

活动构件数 $n=3$ ，低副 $P_L=3$ ，
高副 $P_H=2$ ，机构自由度为：

$$F = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$$

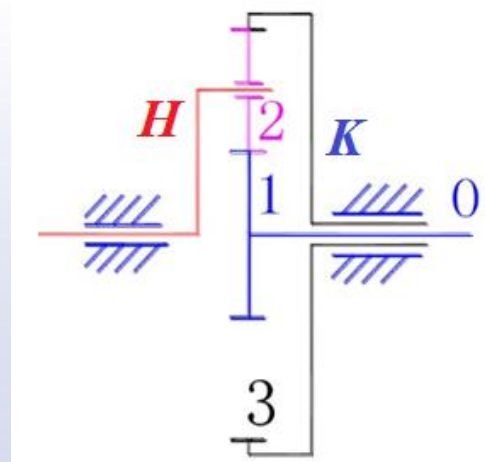


第3节 周转轮系及其传动比计算

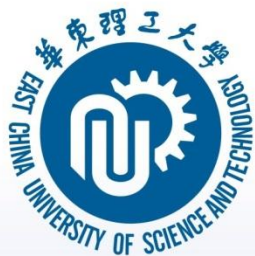
三、周转轮系的传动比

思路：采用**反转法**使周转轮系转化为**假想的定轴轮系**，这时便可应用定轴轮系传动比的计算方法，进而求出原周转轮系的传动比。

反转法：给周转轮系中的每一个构件都加上一个附加的公共转动（转速“ $-n_H$ ”）后，不会改变轮系中各构件之间的相对运动，但原周转轮系将转化成为一个假想的定轴轮系，称为**周转轮系的转化轮系**。

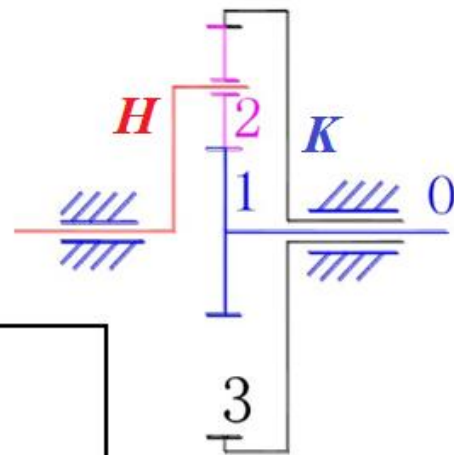


- 1) 系杆 → 机架；
- 2) 原周转轮系 → 定轴轮系



第3节 周转轮系及其传动比计算

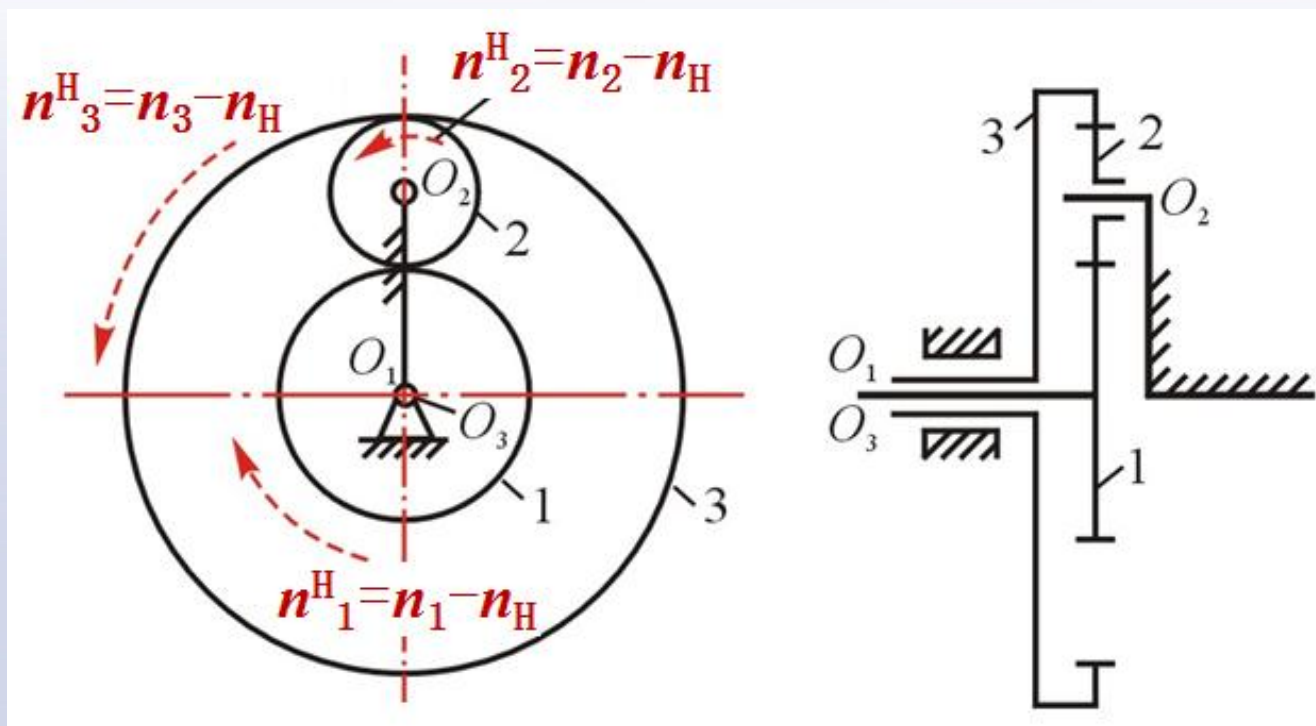
各构件转化前后的转速如表所示。



构件号	原周转轮系中 各构件的转速	转化轮系中 各构件的转速
1	n_1	$n_1^H = n_1 - n_H$
2	n_2	$n_2^H = n_2 - n_H$
3	n_3	$n_3^H = n_3 - n_H$
H	n_H	$n_H^H = n_H - n_H = 0$

转化轮系中各构件的转速都带有上标H，表示这些转速是各构件对系杆H的相对转速。

第3节 周转轮系及其传动比计算



原周转轮系的转化轮系的传动比

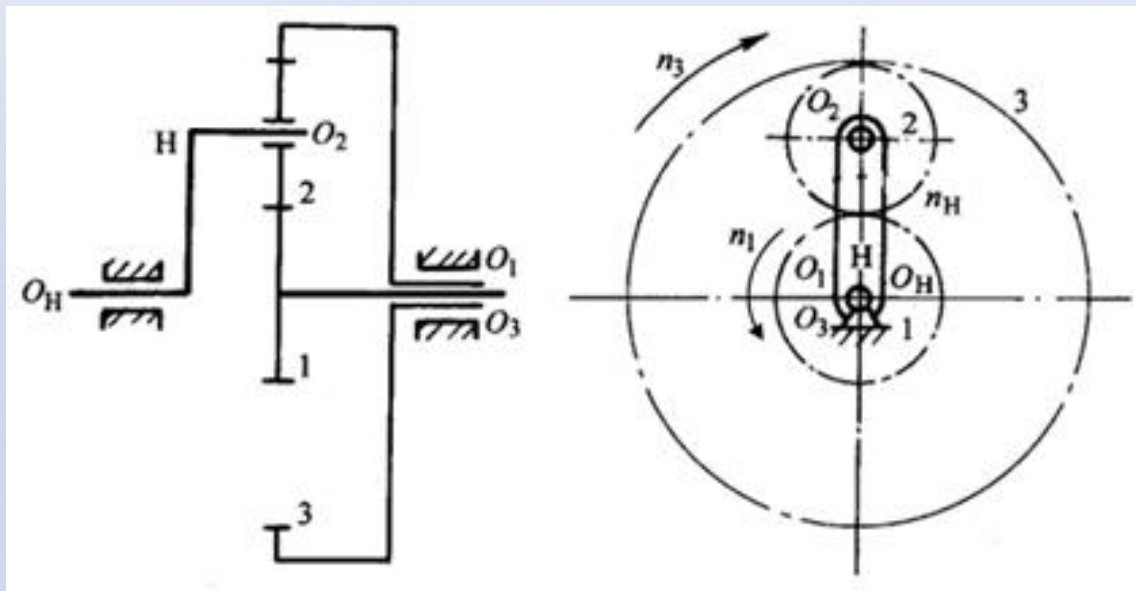
$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = (-1)' \cdot \frac{z_3}{z_1}$$

上式 “-” 说明在转化轮系中 n_1^H 与 n_3^H 方向相反。

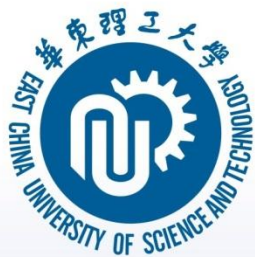


第3节 周转轮系及其传动比计算

【例5-3】如图周转轮系， $z_1=20$ ， $z_2=30$ ， $z_3=80$ ，齿轮1和齿轮3的转速为 $n_1=n_3=10\text{r/min}$ ，两轮转向相反。求系杆的转速 n_H 和传动比 i_{H1} 。



【解】) 由于采用反转法时给整个机构加上了一个公共转速“ $-n_H$ ”，因此转化轮系的传动比计算属于代数运算。计算时，应将各轮转速的符号一并代入，齿数比前也要根据齿轮的转向关系，冠以正负号。



第3节 周转轮系及其传动比计算

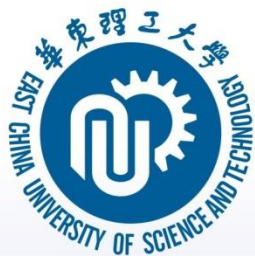
【解】 设齿轮1的转动方向为正，即 $n_1=10\text{r/min}$ ，则 $n_3=-10\text{r/min}$ 。
转化轮系的传动比为

$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = (-1)^1 \frac{z_2 z_3}{z_1 z_2} = -\frac{z_3}{z_1} \quad \longrightarrow \quad \frac{10 - n_H}{-10 - n_H} = -\frac{80}{20}$$

则 $n_H = -6\text{r/min}$ 式中负号表示系杆H与齿轮1的转动方向相反

$$i_{H1} = \frac{n_H}{n_1} = \frac{-6}{10} = -0.6$$

式中，传动比为负值，也说明系杆H与齿轮1的转动方向相反。



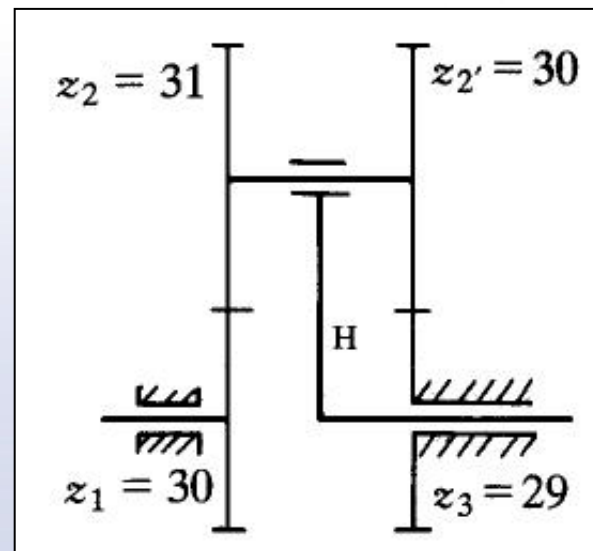
第3节 周转轮系及其传动比计算

【例5-4】如图所示的轮系，已知各齿轮的齿数，求传动比 i_{H1}

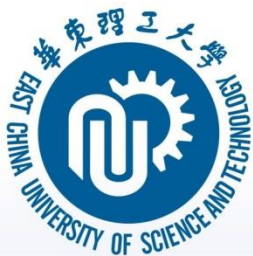
【解】 齿轮3与机架固定在一起，故 $n_3=0$ 。这是一个机构自由度为1的行星轮系。由

$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = (-1)^2 \frac{z_2 z_3}{z_1 z_{2'}}$$

$$\longrightarrow \frac{n_1 - n_H}{0 - n_H} = \frac{31 \times 29}{30 \times 30} \longrightarrow i_{H1} = \frac{n_H}{n_1} = 900$$

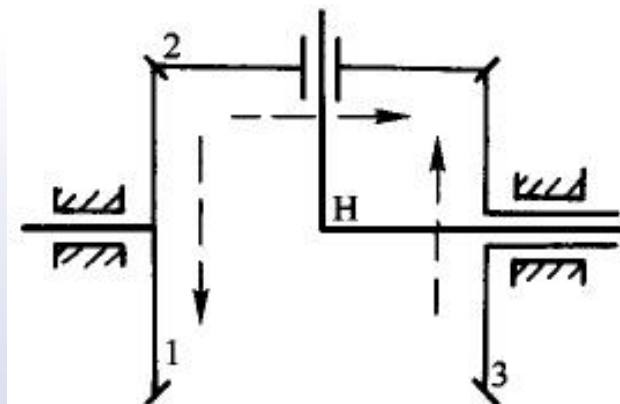


这个周转轮系的4个齿轮的齿数都不多，齿数差也很少，但获得的传动比却很大，这在定轴轮系中是难以实现的。但传动比越大，效率越低，故只适用于传递运动，而不适用于传递动力。



第3节 周转轮系及其传动比计算

【例5-5】如图所示差动轮系，已知 $z_1=z_3$ 。
若 n_1 和 n_H 转动方向相反，且都等于 10r/min ，
求齿轮3的转速 n_3 并判断其转动方向。



【解】齿轮1、3和系杆H的转动轴线平行，可以应用反转法。设齿轮1的转动方向为正，即 $n_1=10\text{r/min}$ ，则 $n_H=-10\text{r/min}$ ，在转化轮系中，

$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = \frac{10 - (-10)}{n_3 - (-10)} = -\frac{z_3}{z_1} = -1 \quad \longrightarrow \quad n_3 = -30\text{r/min}$$

结果为负值，表示轮3的转动方向与轮1相反。

本例中，若 n_1 和 n_H 转动方向相同，且都等于 10r/min ，则 $n_3=10\text{r/min}$ ，结果为正值，即 n_3 与 n_1 转动方向相同。由此说明，图中的虚线箭头并不代表实际构件的转动方向。



第3节 混合轮系及其传动比计算

混合轮系

在实际工程中，有时在一个轮系中包含几个基本的周转轮系，或在一个轮系中同时包含定轴轮系和周转轮系。这种轮系称为**混合轮系**。

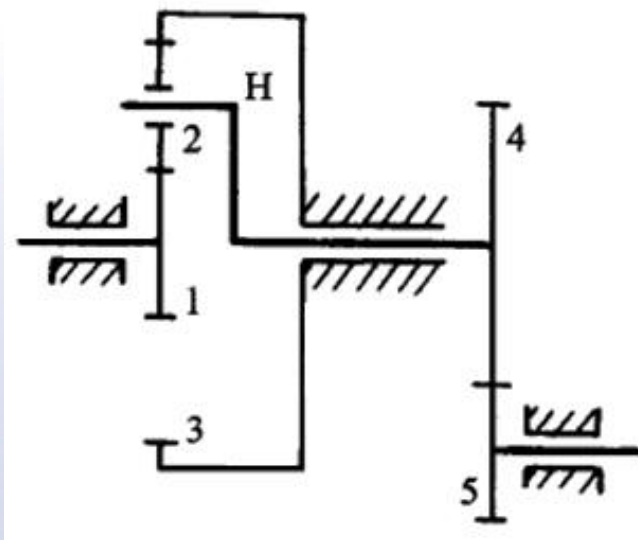
混合轮系不可能转化成一个单一的定轴轮系，故不能一次求解，而必须先**将各个基本的轮系区分开来**，然后对每一个基本轮系分别进行计算，最后根据各个基本轮系间的连接关系求出所需要的结果。



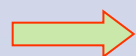
第3节 混合轮系及其传动比计算

【例5-6】如图轮系，已知 $z_1=20$ ， $z_2=30$ ， $z_3=80$ ， $z_4=40$ ， $z_5=20$ 。求传动比 i_{15} 。

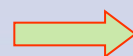
【解】此轮系由定轴轮系（系杆H、4和5）与周转轮系（1、2、3和系杆H）组成，系杆H与齿轮4固联在一起，具有相同的转速，即 $n_H=n_4$ 。



$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{z_3}{z_1}$$

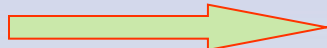


$$\frac{n_1 - n_4}{0 - n_4} = -\frac{80}{20}$$

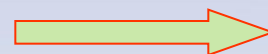


$$n_1 = 5n_4$$

$$i_{H5} = \frac{n_4}{n_5} = -\frac{z_5}{z_4}$$



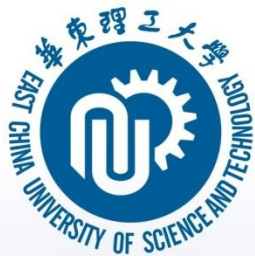
$$\frac{n_4}{n_5} = -\frac{20}{40}$$



$$n_5 = -2n_4$$

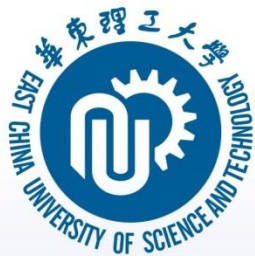
$$i_{15} = \frac{n_1}{n_5} = -\frac{5}{2} = -2.5$$

式中负号表示齿轮1与齿轮5的转向相反。



第4节 轮系的功用

1. 获得较大的传动比
2. 获得中心距较大的传动
3. 改变从动轴的转速和转向
4. 实现分路传动
5. 实现运动的分解与合成
6. 减速器

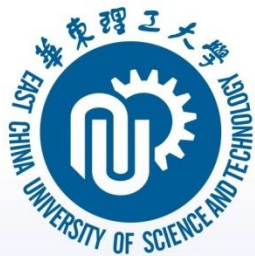


第4节 轮系的功用

1. 获得较大的传动比

一对齿轮传动，为了避免由于齿数过于悬殊而使之易于发生齿根干涉和小齿轮易于损坏等问题，一般取 $i_{\max}=5\sim7$ 。当需要两轴之间的传动比较大时，可以采用轮系传动，通过一系列互相啮合的齿轮或蜗杆蜗轮，将主动轴与从动轴联接起来，既可以获得较大的传动比，又不致使传动的外廓尺寸过大。当要求传动比很大时，可采用行星轮系传动。

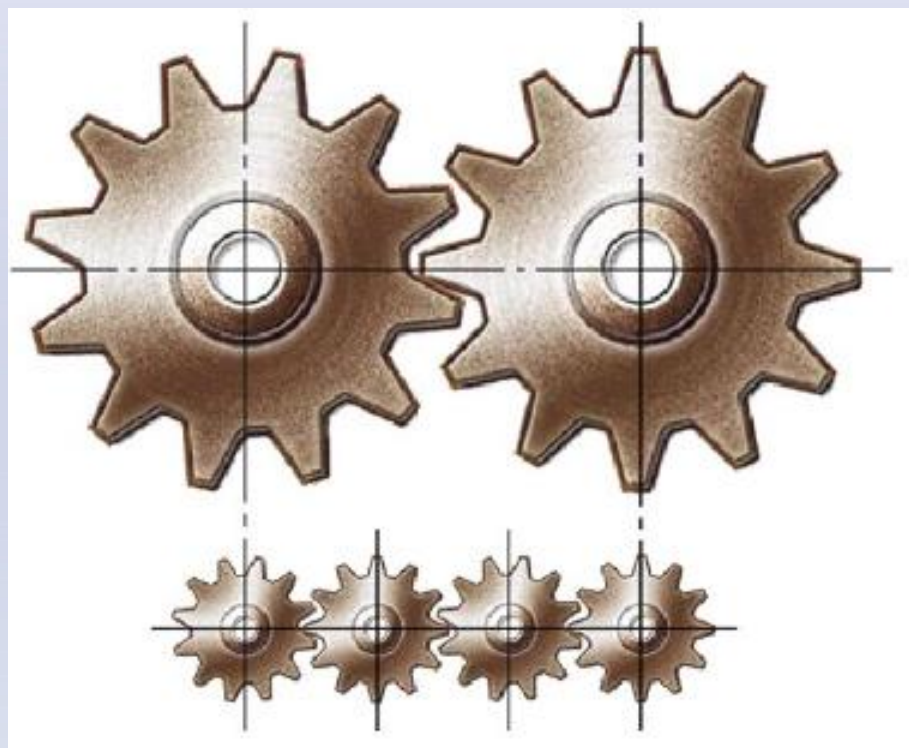




第4节 轮系的功用

2. 获得中心距较大的传动

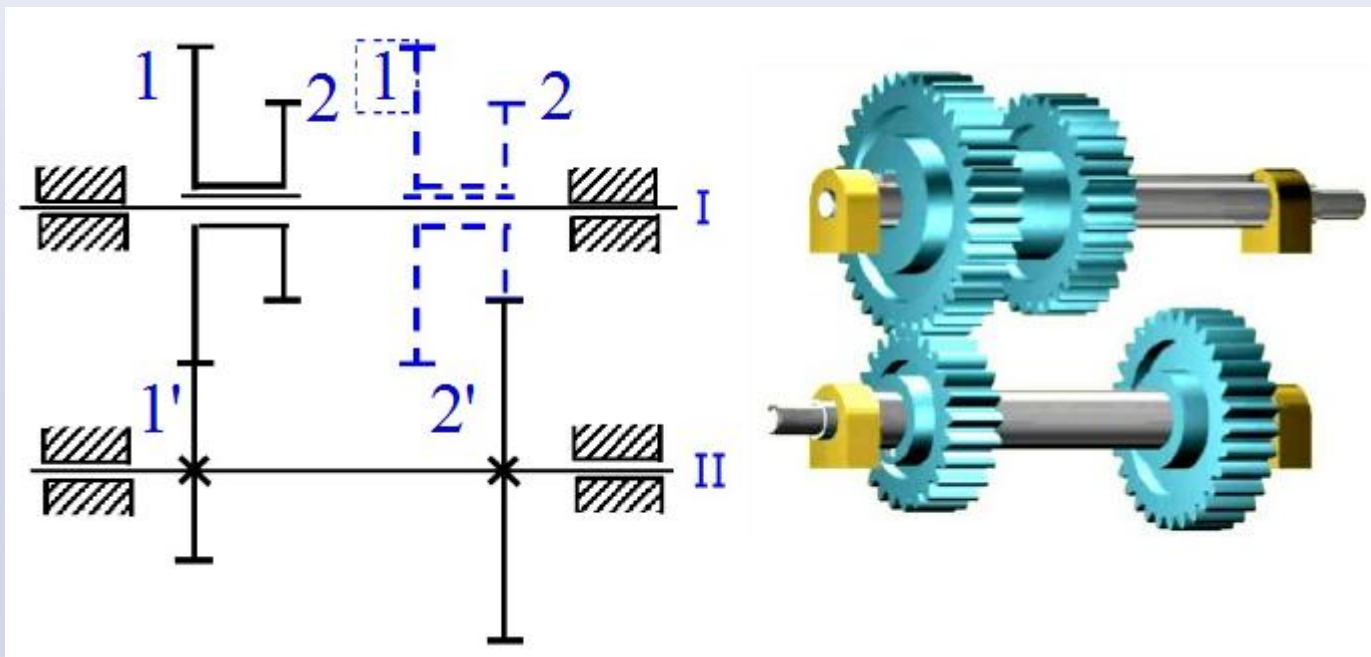
两轴之间的距离较远时，如采用一对齿轮传动，则两轮的轮廓尺寸必然很大。如果采用轮系传动，总的轮廓尺寸就小很多，从而可以节省材料，减轻重量，降低成本所占空间。





第4节 轮系的功用

3. 改变从动轴的转速和转向



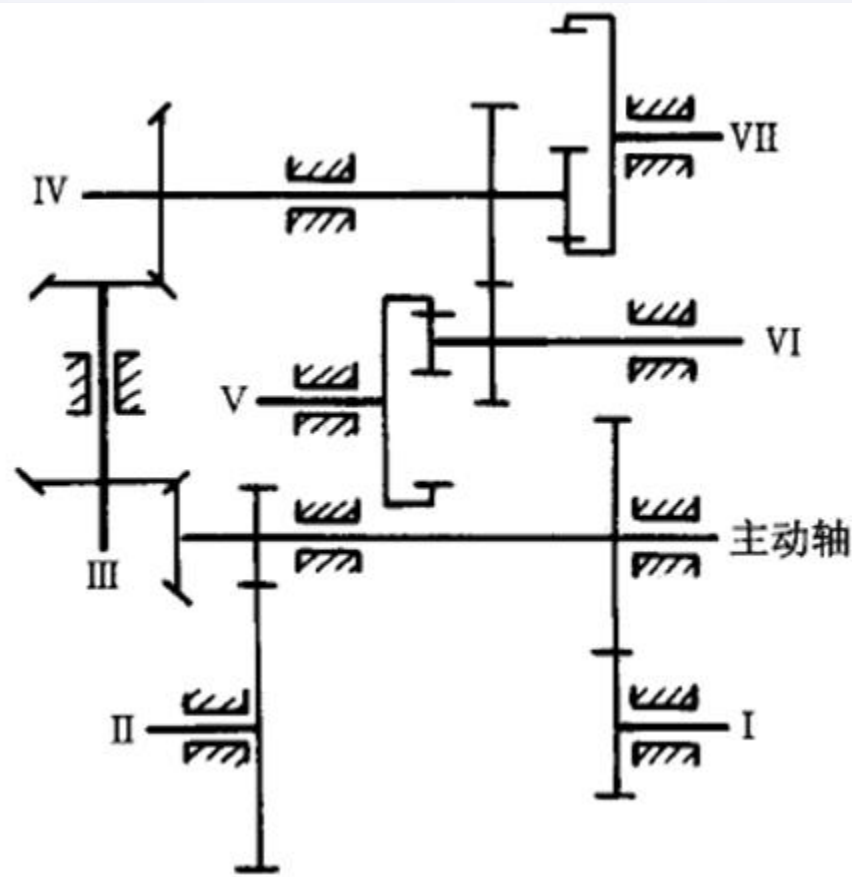
滑动齿轮变速机构：主动轴转速、转向不变，利用滑动键，齿轮1与1'，2与2'分别啮合，可获得两种不同的传动比，实现两级变速。

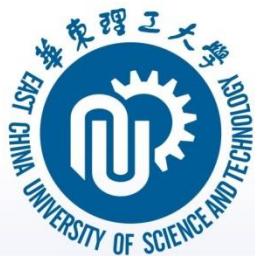


第4节 轮系的功用

4. 实现分路传动

利用轮系可以使一个主动轴带动若干个从动轴同时转动。如图所示的轮系，可把主动轴的转动分成7路传出。

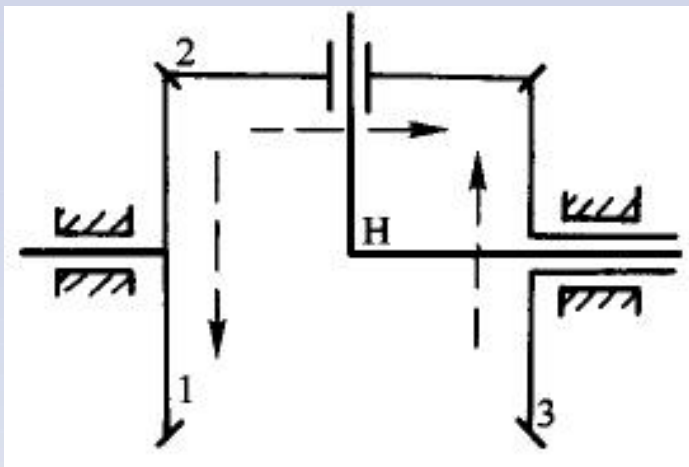




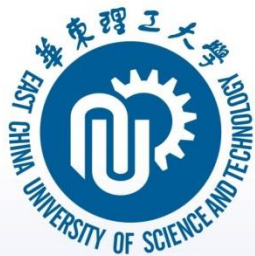
第4节 轮系的功用

5. 实现运动的分解与合成

利用差动轮系，可以把一个原动件的运动按给定条件分解成两个从动件的运动；也可以把两个原动件的运动合成为一个从动件的运动。轮系的这种性能在汽车后桥、机床以及其他机械中都得到了广泛的应用。如图所示的轮系就是一个典型的差动轮系。



$$i_{13}^H = \frac{n_1^H}{n_3^H} = \frac{n_1 - n_H}{n_3 - n_H} = -\frac{z_3}{z_1}$$



第4节 轮系的功用

6. 减速器

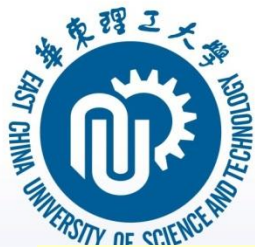
减速器是由封闭在刚性壳体內的齿轮传动或蜗杆传动所组成的独立部件，也是轮系应用的常见形式。通常安装在原动机和工作机之间，起降低转速和增大转矩的作用。



减速器具有结构紧凑、效率高、使用和维护简单等特点，所以应用广泛。它的主要参数已经标准化，并由专业厂家进行生产。一般情况下，按工作要求，根据传动比 i 、输入轴转速 n 和功率 P 等，选用标准减速器，必要时也可以自行设计与制造。

减速器按传动原理分为两类：

- 普通减速器
- 行星减速器



第4节 轮系的功用

普通减速器

全部由定轴轮系组成的减速器称为普通减速器。在没有特别说明的情况下，减速器指的都是普通减速器。

减速器的分类：

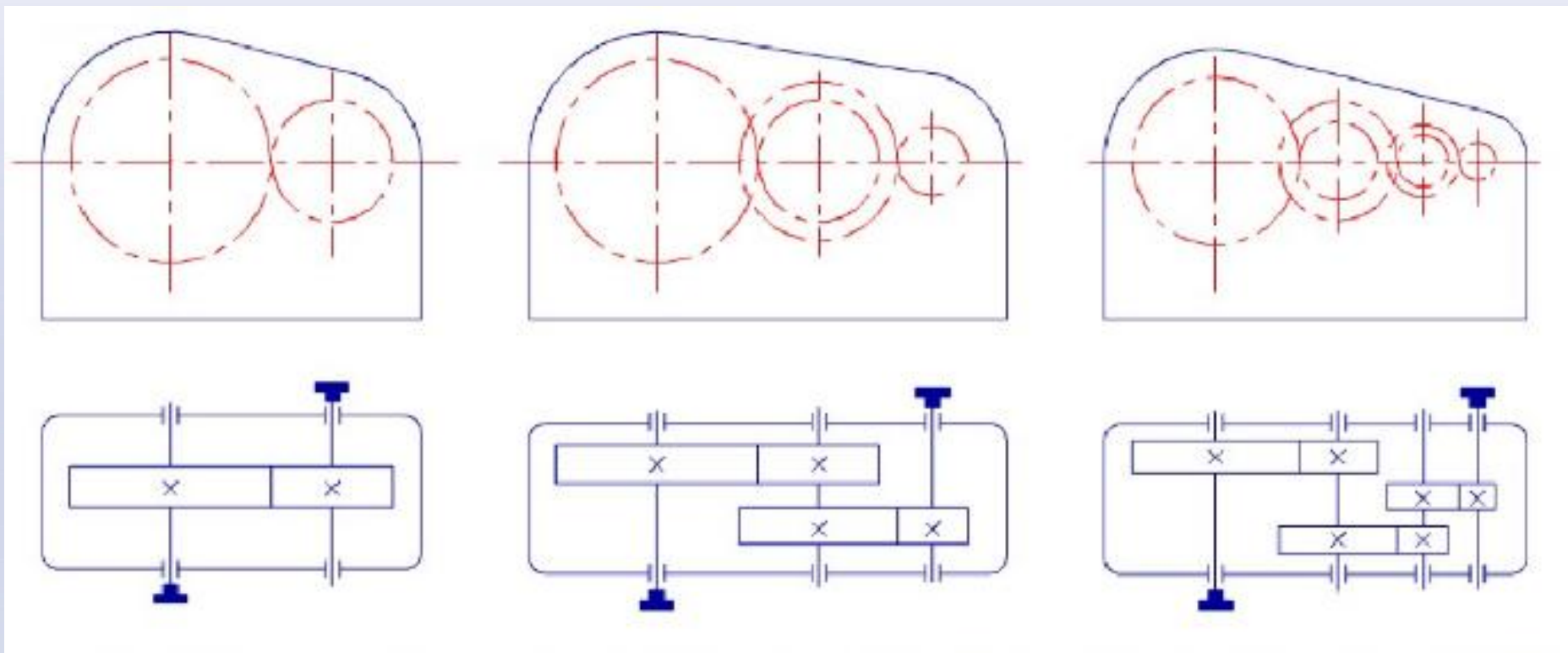
- 1、按传动的类型，可分为圆柱齿轮减速器、锥齿轮减速器、蜗杆减速器、锥齿轮—圆柱齿轮减速器和蜗杆—圆柱齿轮减速器等。
- 2、按传动的级数，可分为一级、二级、三级和多级减速器。
- 3、两级和两级以上的圆柱齿轮减速器，按布置形式又分为展开式、分流式和同轴式等。

尽管减速器有多种形式，但它们在结构上没有本质的差别，都是由齿轮、蜗杆和蜗轮、轴、轴承、箱体等基本零件配置而成，都需考虑润滑、密封、调整等问题。



第4节 轮系的功用

减速器的分类：



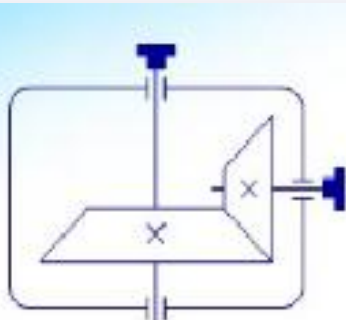
单级圆柱齿轮减速器

展开式二级圆柱齿轮减速器

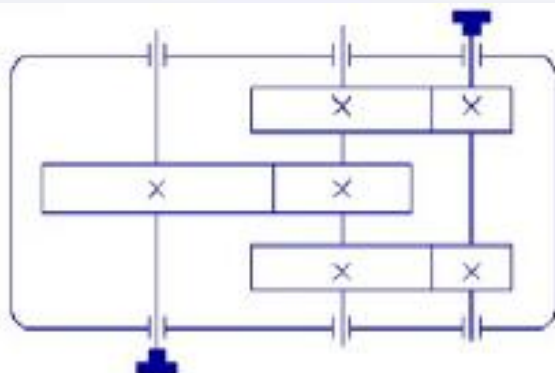
展开式三级圆柱齿轮减速器

第4节 轮系的功用

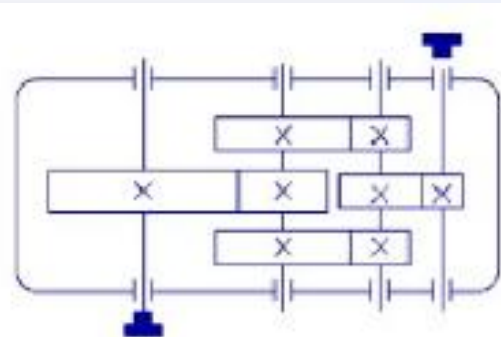
减速器的分类：



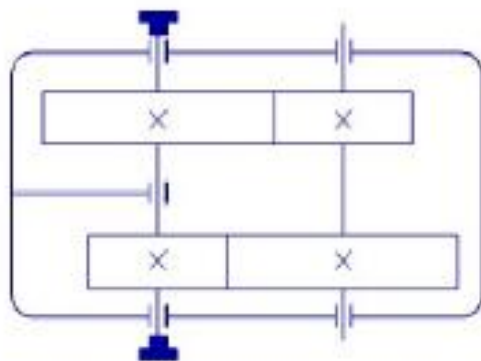
单级圆锥齿轮减速器



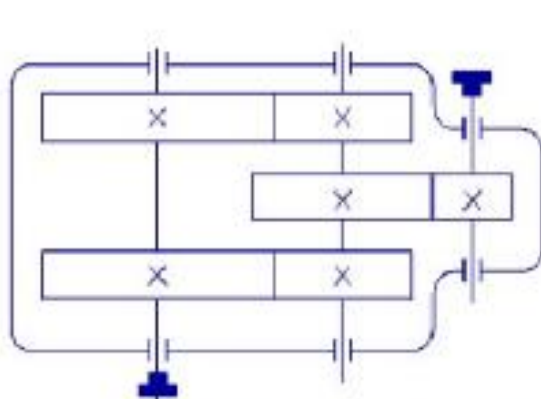
分流式双级圆柱齿轮减速器



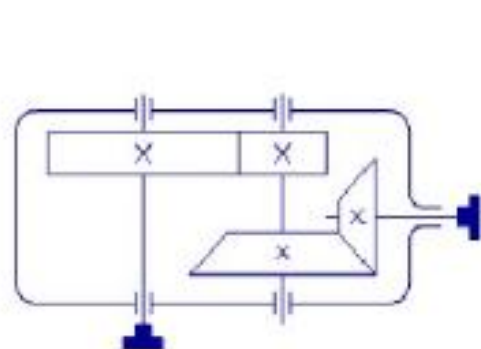
分流式三级圆柱齿轮减速器



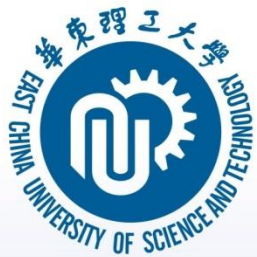
同轴式双级圆柱齿轮减速器



分流式双级圆柱齿轮减速器

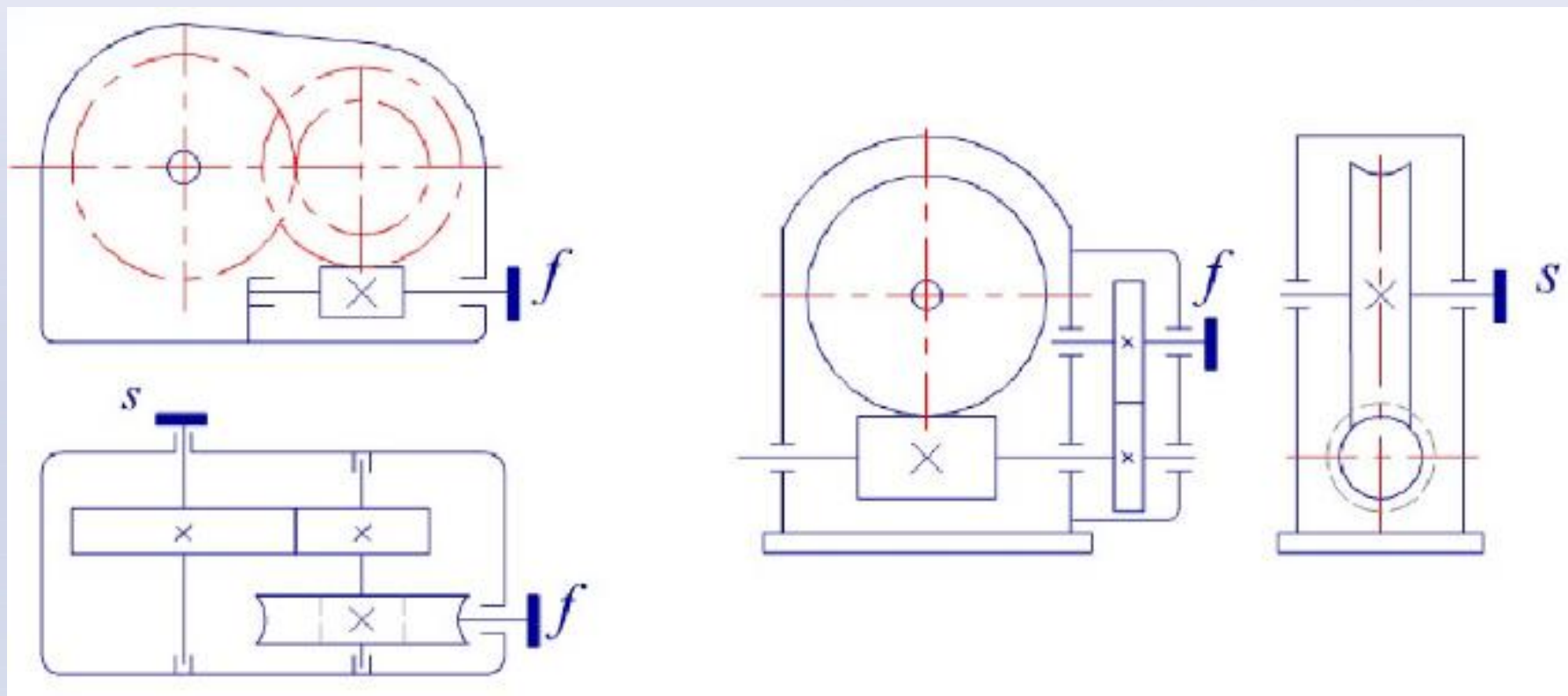


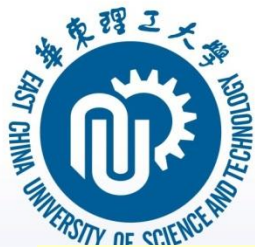
两级圆锥-圆柱齿轮减速器



第4节 轮系的功用

齿轮-蜗杆减速器





第4节 轮系的功用

行星减速器

主要由周转轮系组成的减速器称为**行星减速器**。

特点：传动效率高，传动比范围广，传递功率可以从几 W 到几十万 kW ，而体积和质量却比普通齿轮、蜗杆减速器小得多；结构比较复杂，对制造精度要求较高。

类型：渐开线齿轮减速器、摆线针轮减速器和谐波齿轮减速器等。

选择：考虑结构尺寸、传动比范围、传动的功率和效率等因素。一般，转化轮系传动比为负的周转轮系总比转化轮系传动比为正的周转轮系效率高。当传动功率较大时，需要优先考虑传动效率。



本章小结

- 定轴轮系传动比的计算
- 周转轮系传动比的计算（选讲）
- 轮系中从动轮转动方向的判定