

机械零件及原理

清华大学建工系

1975.9.

目 录.

緒论	1
第一章 传动及传动零件	6
第一节 传动知识	6
第二节 皮带传动	16
第三节 齿輪传动	30
第四节 蜗輪传动	54
第五节 鏈传动	65
第二章 通用零件	69
第一节 軸和軸承	69
第二节 联軸器	80
第三节 潤滑装置	85
第四节 联接零件	89
第三章 零件材料及技术条件	97
第一节 鋼鉄材料	97
第二节 热处理	105
第三节 公差与配合	109
附 录 典型零件图	123
第四章 机构原理	131
第五章 起重机械另件	150
第一节 繩索	150
一、鋼絲繩	150
二、麻繩	154
第二节 滑輪和滑輪組	154
一、滑輪的类型和构造	154
二、滑輪和滑輪組效率	156
第三节 卷揚机	159
一、卷揚机的类型与构造	159
二、卷揚机的选择与使用	161
附 录 木扒捍计算例题	162
第六章 液压传动的基本知识	164
第一节 液压传动的基本原理	164
一、液压传动应用举例	165

二、液压传动的组成	166
第二节 液压传动的基本概念	167
一、水静压力 p	167
二、总压力 P	167
三、静压传递原理	168
四、液体流动时的主要参数和液流连续性原理	168
五、液体流动时的压力及其传递	169
六、大气压力, 相对压力	170
第三节 油泵 (油马达)	171
一、油泵的工作原理	171
二、齿轮泵	171
三、叶片泵	172
四、柱塞泵	173
五、油马达	174
六、泵 (油马达) 的职能符号	174
七、泵的使用	174
第四节 控制阀	174
一、压力控制阀 (溢流阀, 减压阀)	175
二、方向控制阀 (单向阀, 单向闭锁阀、电磁换向阀、液动换向阀、电液换向阀、手动换向阀)	177
三、流量控制阀 (节流阀)	184
第五节 油缸	185
一、油缸的型式	185
二、油缸的计算	186
三、油缸结构设计中的几个问题	189
四、油缸的材料	190
第六节 液压系统的辅助装置	191
一、过滤装置	191
二、密封装置	191
三、管道	195
四、油箱	196
五、压力表和压力表开关	197
六、液压传动用油	198
第七节 液压系统的使用维护与故障排除	198
一、液压系统的使用与维护	198
二、控制阀的使用与维护	199
三、液压元件的故障及排除方法	200

第八节 液压系统计算.....	203
一、液压系统主要参数 (F 、 Q 、 N) 的计算.....	203
二、液压系统计算的内容及步骤.....	205
附录(一) 液压系统图形符号.....	210
附录(二) 液压翻板机的液压系统.....	211
附录(三) 液压起重机的液压系统.....	212
附录(四) 滑升模板液压提升系统.....	213

绪 论

一本课任务

为了加快社会主义建设速度、在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国的房屋建筑施工机械化和构件生产工厂化的水平得到越来越大的发展，逐步改变了解放前基本依靠手工劳动的落后局面。无产阶级文化大革命以来，工人阶级登上了上层建筑的政治舞台、坚决贯彻“鞍钢宪法”，开展“全国工业学大庆运动”，技术革命和技术革新的群众运动也广泛开展。因此，房屋建筑专业人员，特别是施工人员必须掌握一定的机械基本原理和实践能力，以适应下列工作要求：

1. 为了掌握建筑机械性能，作到正确使用，应该了解机械工作原理，基本构造和有关图紙说明等。这是基本要求。

2. 为实现施工机械化，在领导、工人、技术人员三结合的形式下研究、试制、改装一些简单的机械。（部分人员可能长期从事机械化、工厂化的任务，即技术革新、技术革命任务。）。

《机械零件及原理》就是培养正确运用机械，进行机械化技术革新这二个能力的一门基础课程。

二、机械基本矛盾及本课内容

怎样认识一台机械？我们联系机械是怎样组成的，它又是怎样工作（运动）的这两个方面进行分析。

下面结合常用的混凝土搅拌机进行说明。

混凝土搅拌机有一个搅拌筒（图一），在它转动时，筒内叶片把原料带到一定的高

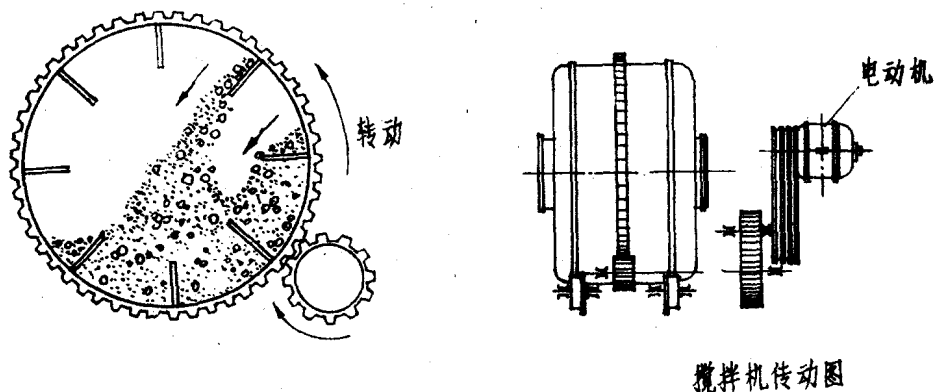


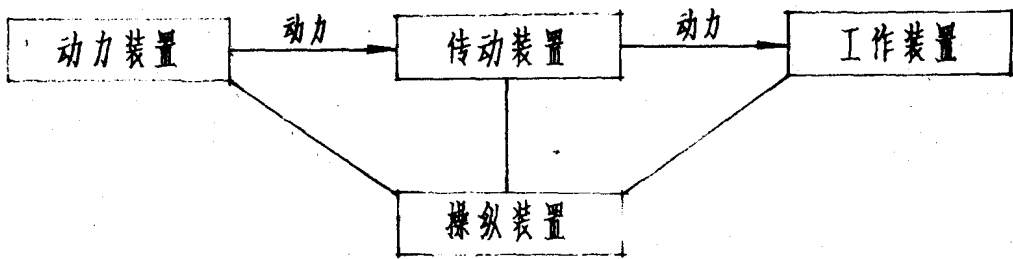
图 1 自落式混凝土搅拌机

度后顺叶片滑落，连续多次滑落混合后起到搅拌作用。这是搅拌机的工作原理。

搅拌机由四部分组成：

1. 工作装置——即搅拌筒。它的搅拌作用反映了这种机械的“特性”。
2. 动力装置——即电动机。供应动力（功率）是它的主要任务。
3. 传动装置——由于搅拌筒转速低等等原因使得电动机不能直接带动它，必须通过皮带、齿轮等零件搭桥。这些起搭桥作用的零件叫传动装置。皮带齿轮等零件不反映“搅拌机”的特性，各种机械都能使用它们。
4. 操纵装置——电动机的控制设备、送料、加水等等操纵设备。

以上四部分实际反映一般机械的组成，可示意如下：



其次，机械的工作原理可以从本门课程的角度概括为三个要素：

1. 运动形式——工作装置的运动可以是转动，直线往复运动或摆动等多种形式。搅拌机是把翻拌原材料的动作转化为转动的形式工作。
2. 速度——一台机械往往只有一个或几种合适的速度，如搅拌筒只适于在 10—22 转/分左右工作，如果转得更快，原材料将因离心力太大而贴在筒壁上不向下滑落。
3. 力的大小——可以表现为圆周力、转矩等多种形式，它们的大小是有具体要求的。如搅拌筒的转矩不够大，则不能带动原材料一起转动。卷扬机的卷筒受到一定的圆周力方能卷动钢丝绳吊起重物等。

一台机械的工作原理与它的四个组成部分有什么内在联系呢？原来机械的工作装置与动力装置之间有几个基本矛盾。机械由前述四部分组成是为了解决这些矛盾。

首先了解一下现代建筑机械常用的动力装置，它们共有三种：

- | | | |
|-------------|---|---|
| 电动机
(马达) | { | 交流电动机——应用最普遍、最经济。但不太适用于经常行走又没有固定轨道的机械（因拖带电线）。 |
| | | 直流电动机——如内燃机的起动电机，电瓶车的电动机等。在建筑机械中直流电一般由蓄电池供应，由于蓄电池的电能储藏有限，所以这种电动机只适用于局部范围。 |
| | | 内燃机——根据燃料的不同分为汽油机、柴油机等。适用于大型自行式的机械，如履带式起重机等。 |

三种常用原动机有三个基本特点：

1. 它们的轴只能作“转动”这一种运动。
2. 它们只有固定的高转速——如常用交流电动机的转速 2850 转/分、1450 转/分、960 转/分左右。柴油机的工作转速约在 800—1800 转/分中的某一个较小的范围内。
3. 在高转速的条件下转矩很小——从物理学公式可知

$$\text{功率} = \text{转矩 (扭矩)} \times \text{转速}$$

一台原动机功率是一定的，转速高则转矩必然小。

由于这三个特点，用原动机直接带动搅拌筒或其他工作置必然要产生几个基本矛盾：

1. 运动形式不一定互相适应——搅拌筒将翻拌转化为转动使原动机与工艺要求相适应了，这是一种典型。但也有些机械必须采用转动以外的形式，如图 2 常见的自卸汽车或蛤蟆夯等都是如此。

2. 转速不适应——常见的机械转速都不高，搅拌机是这样，蛤蟆夯的转锤也只适于 140~150 转/分才能工作，也说明这个问题。

3. 力的大小不适应——由前面功率公式可以说明。象常见搅拌筒可用干 2.8 千瓦的电动机带动，但电动机的转矩却只有 2.4 kg-m 左右，直接转动搅拌筒则只有约 2 公斤的圆周力，根本无法利用电动机直接带动。

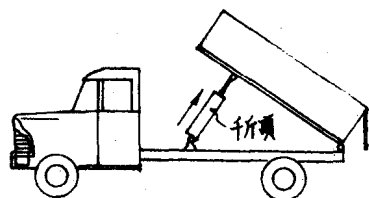


图 2

此外还有一些矛盾，例如自卸汽车的行走，卸车二个运动要申一个内燃机带动，有分配动力的矛盾；汽车需要几种速度，内燃机的转速变化范围很小，有变化速度的矛盾等等。

解决这些矛盾的办法主要有三方面：

1. 利用传动装置调整转速、力的关系——如搅拌机常用 1450 转/分的电动机，用皮带、齿轮进行降速。也可以同时调整得到足够的转矩。
2. 利用传动装置也可以变换速度和分配动力——例如汽车司机换挡变速就是变换司机座下齿轮箱中各齿轮的位置，将动力传到顶车厢的千斤顶也在这个齿轮箱中解决。
3. 利用特殊的“机构”，或某些传动零件改变运动形式——例如自卸汽车采用的千斤顶属于一种液压机构（图 3）。图 4 单斗挖土机挖土时向前下方伸出土斗是用齿轮与齿条这二种传动零件解决的。

从以上的分析可以说明这门课程的内容，主要有：

1. 传动及传动另件原理——常用传动零件有皮带，齿轮、蜗轮、链等零件组成，液压机构可以进行传动，也可以作为操纵装置。
2. 机构原理——上述油压千斤顶，齿轮与齿条都是一种机构。凡是二个以上的零

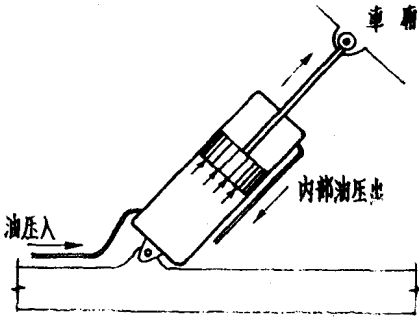


图 3 液压千斤顶示意图

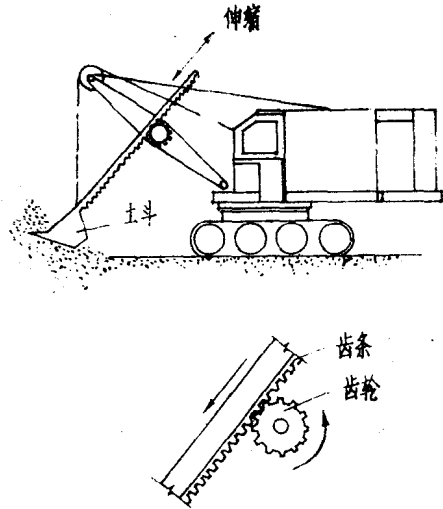


图 4 单斗挖土机斗柄伸缩

件，其中主动零件运动时，从动零件都对它进行确定的运动时，这些零件就组成一个机构。图 4 的主动零件——小齿轮转动时，齿条肯定会对它进行直线运动就是一个例子。又如图 5 的螺母与丝杠主动零件如果是丝杠，它作转动时如果螺母不能转动（图 5）则

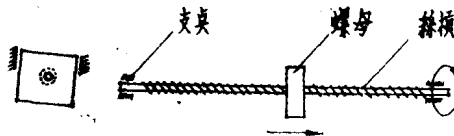


图 5

螺母必须作直线运动。这二个例子都是主动零件转动，从动件直线移动。另外还有各种其他可以转变运动形式的机构，需要研究它们的运动规律、解决工作装置需要的运动形式问题。（注）

3. 通用零件——各种传动零件、机构都离不开轴、轴的支点——轴承、联接零件（如螺栓）等等。二个轴联接时又需要联轴器等等，这些零件我们叫作通用零件，很常用。

4. 零件的技术条件——设计零件必须确定所用材料，某些零件的热处理方法，尺寸的公差等等条件，这些技术条件是画零件图的必要内容。

操纵装置在一般机械中主要是一般电器开关、杠杆等。这里不作专门介绍。

注：一对齿轮或皮带与皮带轮也是一种机构，但它们都作圆周运动，是常用的传动零件，所以前面另作一类零件说明。

三、学习方法

着重说明四点。

1. 从房屋建筑专业要求出发，我们着重从认识机械，正确使用机械出发。对技术革新中的简单机械设计问题，主要学些基础知识。
2. 机械零件及机构种类非常多，我们要广泛注意学习，但更重要的是抓住主要的、常用的，加以深入、处理好“面”和“点”的关系。
3. 联系实际进行学习的方法非常重要。
4. 由于通用性的零件比较多，因而有各种标准零件，要注意了解掌握有关国家标准、零件典型构造，这些内容除面向实际学习之外，要学会利用各种“机械零件手册”。

思 考 题

结合一台常用建筑机械，参观后分析它的组成，认识一些传动零件、通用零件。说明从动力装置到工作装置运动形式和速度是否变化。

第一章 传动及传动零件

第一节 传动知识

观察一台机器，我们经常发现，从马达开始各零件的转速是逐个降低的，而一根根轴随着逐个加粗，零件逐个变得粗大；有时比较二台机械，马达功率相同而工作装置速度不同时，有的机械“力量”会大一些，对于这些现象，可以用什么规律性的“共同点”说明它？就是这一章要说明的问题、具体来说可分三方面：

1. 采用各种传动零件时机械速度如何变化。
2. 动力传递过程中速度与力量的相互变化关系。
3. 动力传递过程中的损失。

我们顺序研究这三个问题。

一、传动比（或速比）与转速变化

皮带传动的转速（转/分为单位，后同）变化与皮带轮直径变化成反比：即（图 1-1）

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (1-1)$$

这里规定 $\frac{n_1}{n_2} = i_{12} = \text{传动比}$ (1-2)

i_{12} 的意义是 1 轴（1 轮）与 2 轴（2 轮）的转速增减“倍数”， i 的角码“12”表示主动轮是 1，从动轮是 2，在数值上，

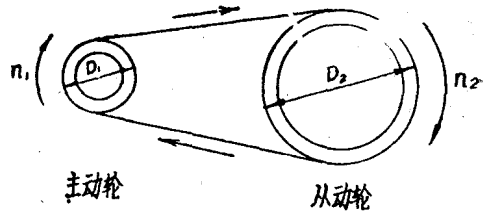


图 1-1 图皮带传动

当 $\frac{n_1}{n_2} = i_{12} > 1$ 时.....表示传动过程中减速，

$0 < i_{12} < 1$ 时.....表示传动过程中增速。

i 的用途结合后面内容逐步说明。

常用的齿轮传动中（图 1-2）转速与齿轮齿数关系是

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1-3)$$

式中 z_1, z_2 分别是主动轮、从动轮（或称被动轮）的齿数。（1-3）公式很容易

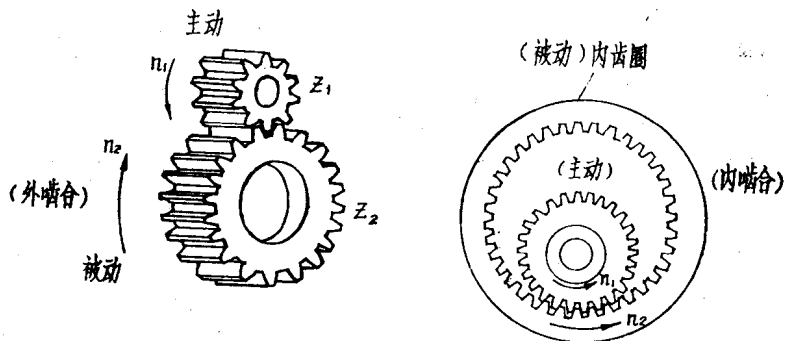


图 1-2 齿轮转动

证明：如果 $z_1=20$ 、 $z_2=40$ ，那么主动轮 I 转一圈只能拨从动轮转过 20 个齿，即只转过半圈，比主动轮慢了 $\frac{40}{20} = \frac{z_2}{z_1} = 2$ 倍，即 $i_{12} = 2 = \frac{n_1}{n_2}$ 。

(1-3) 公式的关系同样也可以用在链传动上 (图 1-3)，读者自己说明。

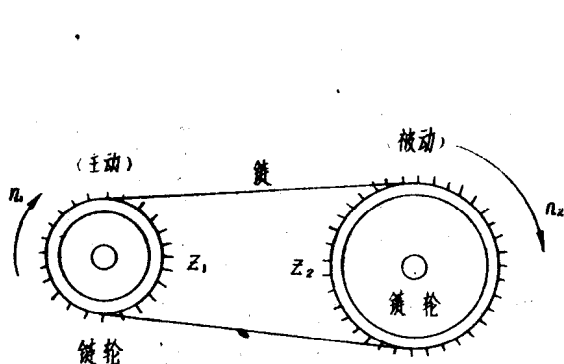


图 1-3 链转动

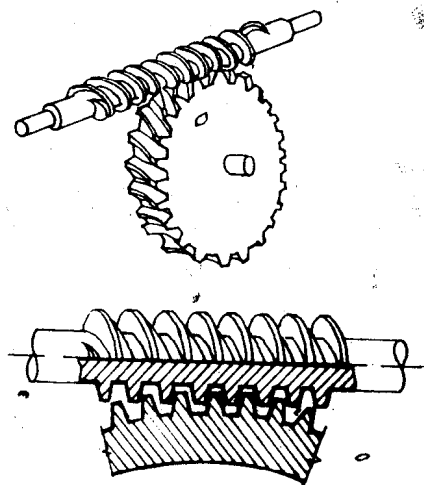


图 1-4

另一种比较常用的传动零件是蜗轮蜗杆(图 1-4)。其中蜗杆一般是主动的，蜗轮从动。它们的轴线既不平行又不相交，在空间互成直角。蜗杆可以看成是一个螺旋，如果它的“螺旋”是一条螺旋线构成的，那什蜗杆每转一圈，就推动轮转过一个齿。如果蜗杆由二条螺旋构成，那么它每转一圈，将推动蜗轮二个齿。它们的传动比是用下式表示的。

式中， z_1 的意义是蜗杆螺旋线的根数或称“头数”。

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1-4)$$

已知上述常用各传动零件的传动比，实际上整台机械的速度问题已经很容易分析了，先看下卷扬机的例子。

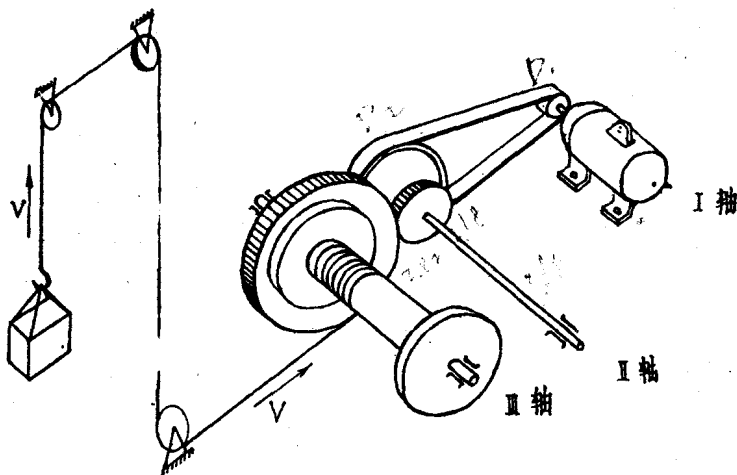
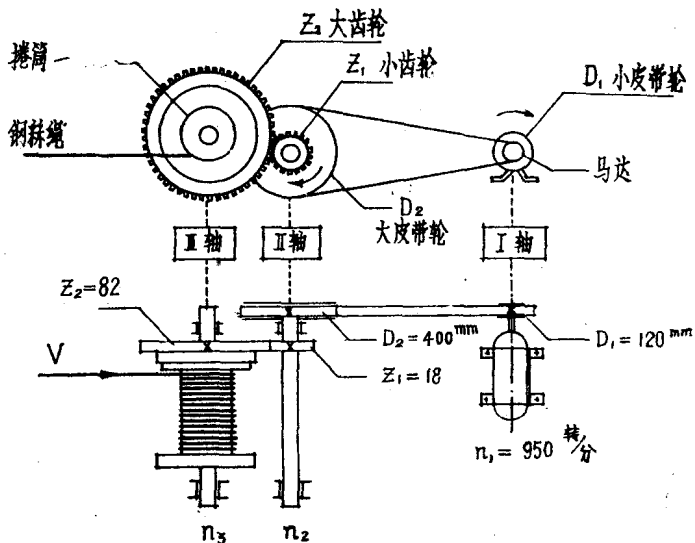


图 1-5 卷扬机示意图

例. 某卷扬机为二级传动, (图 1-5) 第一级皮带传动中, 小皮带轮 $D_1=120$ mm, 大皮带轮 $D_2=400$ mm。第二级齿轮传动中, 小齿轮 $z_1=18$, 大齿轮 $z_2=82$ 。马达转速 $n_1=950$ 转/分, 卷筒直径 $D=200$ mm, 钢丝绳直径 $d=9.3$ mm, 求 (1) III 轴的转速, (2) 重物上升速度。

解。小皮带轮与马达同轴，大皮带轮与小齿轮同轴，所以 I 轴与 II 轴的传动比是：

$$i_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

即

$$\frac{950}{n_2} = \frac{400}{120} = 3.33 = i_{12},$$

$$n_2 = \frac{950}{3.33} = 285 \text{ 转/分} = \text{II 轴 (大皮带轮小齿轮) 的转速,}$$

同理

$$i_{23} = \frac{n_2}{n_3} = \frac{z_2}{z_1}$$

即

$$\frac{285}{n_3} = \frac{82}{18} = 4.55 = i_{23}$$

$$n_3 = \frac{285}{4.55} = 62.6 \text{ 转/分} = \text{III 轴 (大齿轮卷筒) 转速,}$$

上述结果列表如下，各零件转动方向自己分析。

轴	轴上零件	转速 (转/分)	传动比	转 向
I	马达, 小皮带轮	950	$i_{12} = 3.33$	↻
II	大皮带轮, 小齿轮	285		↻
III	大齿轮, 卷筒	62.6	$i_{23} = 4.55$	↻

重物上升速度 V ，即钢丝绳在卷筒上的圆周速度：

$$V = \frac{\pi(D+d)n_3}{1000} = \frac{3.14(200+9.3)62.6}{1000} = 41.1 \text{ 转/分}$$

$$= 0.686 \text{ 转/分.}$$

不难看出，以上 III 轴各零件的速度可用一个式子换出，

因为由 $i_{23} = \frac{n_2}{n_3}$ ，可写出：

$$n_3 = \frac{n_2}{i_{23}} = \frac{\frac{n_1}{i_{12}}}{i_{23}} = \frac{n_1}{i_{12} \times i_{23}} = \frac{n_1}{\frac{D_2}{D_1} \times \frac{z_2}{z_1}},$$

再改写成

$$\frac{n_1}{n_3} = \boxed{i_{12} \times i_{23} = \text{总传动比 } i_{\text{总}}} = \frac{D_2}{D_1} \times \frac{z_2}{z_1},$$

上式说明二个问题：

- 1) 计算最末一根轴的零件转速，可用各零件 D_1, D_2, Z_1, Z_2 直接计算。
- 2) 把 $i_{\text{总}}$ 的计算可推广到任意机械上。

$$i_{\text{总}} = i_{12} \times i_{23} \times i_{34} \cdots \cdots \times i_{(n-1)n} \quad (1-5)$$

以上说明从动力装置转速 n_1 如何变换到各转动零件（或各轴）成为 $n_2, n_3 \cdots$ ，以及转速的总变换如何用 $i_{\text{总}}$ 进行计算。

二、功率，转速，转矩的关系

动力都以功率计算它的大小。传递过程中都用传动零件所能产生的扭矩（或称转矩） M 和转速 n 转/分反映功率的数值，或用零件所能产生的力 F 和圆周速 V 反映。

它们的关系共有二种：

$$N = FV = \text{力} \times \text{圆周速度},$$

$$N = MW = \text{扭矩} \times \text{角速度},$$

具体用机械常用单位代入，上二式变为：

（读者自己推导，见思考题）

$$N = \frac{FV}{75} \quad (1-6)$$

F ——公斤力（注：以后“公斤力”一律用工程上习惯的“公斤”代替）

V ——米/秒

N ——马力

及

$$N = \frac{M \cdot n}{71620} \quad (1-7)$$

M ——公斤—厘米

n ——转/分，或称“转数”

马力与千瓦（或瓩）的关系是

$$1 \text{ 马力} = 0.735 \text{ 瓩} = 75 \text{ 公斤—米/秒}$$

$$1 \text{ 瓩} = 1.36 \text{ 马力} = 102 \text{ 公斤—米/秒}$$

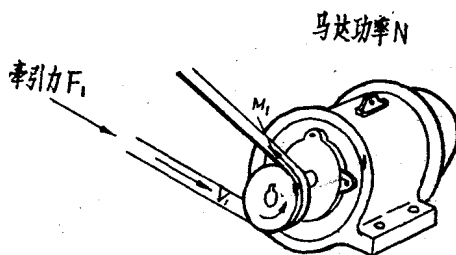
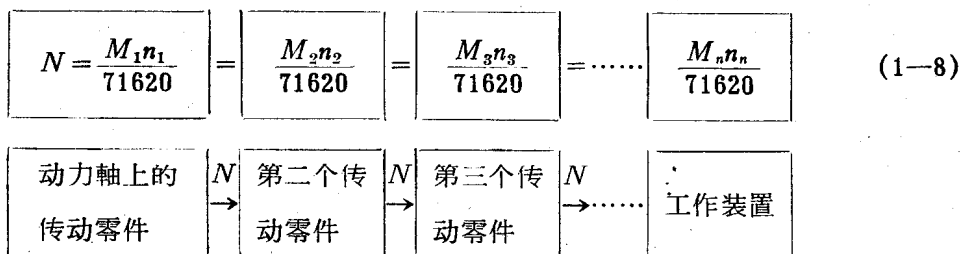


图 1-6

在不考虑功率损失的情况下，利用前面公式可以把功率传递的过程用下图表示：
(1-7 公式比较常用，用它来说明)。



这个关系能说明什么实际问题呢？我们首先分析图 1-5 卷扬机中转矩、转数（转速的另一说法）变化关系。

例. 题同前，已知卷扬机马达功率

$$N = 2.8KW, i_{12} = 3.33, i_{23} = 4.55$$

$D_{筒} = 200mm$ 及各轴转速，求各轴及各传动零件的转矩 M ，钢丝绳拉力。

解：从小皮带轮传出去的功率就是马达功率，因此小皮带轮的转矩用马达功率求出，由 1-7 公式

$$M_1 = \frac{N}{n_1} \times 71620 = \frac{2.8 \times 1.36}{950} \times 71620 = 288kg\text{-cm}.$$

由 1-8 式知 $M_1 n_1 = M_2 n_2$ ，即大皮带轮的转矩 M_2 为

$$M_2 = \frac{n_1}{n_2} M_1 = i_{12} M_1 = 3.33 \times 288 = 960kg\text{-cm}.$$

M_2 经 I 轴传给小齿轮，由转矩平衡关系知道传递过程中数值不变。或用转数不变，因而转矩不变的原理也可以。

大小齿轮之间仍符合 $M_2 n_2 = M_3 n_3$ 的关系，也可写成

$$M_3 = \frac{n_2}{n_3} \cdot M_2 = i_{23} M_2 = 4.55 \times 960 = 4370kg\text{-cm}.$$

M_3 即大齿轮的转矩，结果列表如下：

轴 线	传 力 零 件	N 转/分	M kg-cm	传动比
I 轴	马达轴，小皮带轮	950	288	3.33
II 轴	大皮带轮，I 轴，小齿轮	285	960	
III 轴	大齿轮，卷筒	62.6	4370	4.55

鋼絲繩拉力 $F = \frac{N}{V} = \frac{2.8 \times 102}{0.686} = 416$ 公斤;

由以上结果和 (1-8) 式可以得出几点结论:

1. 转速逐渐降低的机械可以产生逐渐增大的扭矩。(这个減速增“力”的效果在多数机械上都要应用。)
 2. 扭矩的增大可用传动比计算。有时很方便。
 3. 減速的机械必然要求轴径逐渐加大, 齿輪的齿等(零件传力部分)逐渐加大。
 4. 大皮帶輪, I 軸, 小齿輪的扭矩数值相同, 但注意小齿輪的计算直径小, 因此可产生比皮帶輪更大的圆周力。即同軸上扭矩相同的零件圆周力不一定相同。
- 这几个结果在计算中是经常遇到的, 也可在分析机械一些现象时作参考。
以上分析沒有考虑功率传递过程中的损失, 实际一定要考虑到效率这一因素。

三、效率

零件之间的摩擦是不可避免的, 在传动过程中必然要对摩擦力作功而损失一部分功率, 因此无论对于一部机械或者一对传动零件都要考虑效率问题, 都用一个式子反映功率变化的关系:

$$\eta = \frac{N_{\text{有效}}}{N_{\text{输入}}} = \frac{N_{\text{输出}}}{N_{\text{输入}}}$$

常见传动零件和其他零件效率见下表

表 1-1

零件名称		效率	零件名称		效率
圆柱齿輪	精密齿輪, 潤滑良好	0.98~0.99	套筒滾子鏈		0.94~0.98
	粗糙齿輪, 潤滑不好	0.90~0.93	滑动軸承	潤滑良好	0.98~0.99
圆錐齿輪	精密齿輪, 潤滑良好	0.97~0.98		潤滑不好	0.94
	粗糙齿輪, 潤滑不好	0.88~0.92	滾动軸承	滾珠軸承(稀油潤滑)	0.99
蝸輪传动	单头蝸杆	0.5~0.9		滾柱軸承(稀油潤滑)	0.98
	双头蝸杆	0.7~0.95	滑輪組	用滑动軸承	0.95~0.96
	三头、四头蝸杆	0.75~0.66		用滾动軸承	0.97~0.98
三角皮帶传动		0.96		絲杠传动	0.3~0.6
平皮帶传动		0.97			

$N_{\text{输入}}$ ——名义上传递的功率，

$N_{\text{输出}}$ ——去掉损失后实际传递的功率，

η ——效率、是“折扣”的意思，没有单位。

对于几对零件或整个机械，效率问题可以这样推算：

$$N_2 = N_1 \eta_{12}$$

式中， N_1 ——1轴（马达轴）上零件输入功率，

N_2 ——2轴上零件输出功率，

η_{12} ——1, 2轴之间的效率（“折扣”）。

以下的符号意义类推，

$$N_3 = N_2 \times \eta_{23} = N_1 \eta_{12} \times \eta_{23},$$

$$N_4 = N_3 \times \eta_{34} = N_1 \eta_{12} \eta_{23} \times \eta_{34},$$

⋮

$$N_n = N_1 \eta_{12} \eta_{23} \eta_{34} \cdots \eta_{(n-1)n}.$$

可见，总效率 $\eta_{\text{总}} = \frac{N_n}{N_1} = \frac{\text{输出功率}}{\text{总输入功率}} = \eta_{12} \eta_{23} \eta_{34} \cdots \eta_{(n-1)n}$ 。

计算效率时应注意几个问题：

1. 表 1—1 中传动零件的效率已包括支持它的轴承的效率在内。

2. 功率的损失具体表现在扭矩或力的减少中，转速是由传动零件的型式决定的，不会损失。即

$$M_2 = M_1 i_{12} \times \eta_{12}$$

而

$$n_2 = \frac{n_1}{i_{12}} \text{ 的公式没有变化。}$$

例：在考虑效率的条件下，试求前题卷筒的输出功率、扭矩和钢丝绳拉力。

解：由图 1—5，可知卷扬机的效率只计算皮带传动、齿轮传动的效率，由表 1—1 查得平皮带效率 $\eta_{12} = 0.97$ ，齿轮因露天使用，润滑不理想，卷扬机的齿轮又不属于精密齿轮，所以取 $\eta_{23} = 0.94$ ，

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{12} \eta_{23} = 0.97 \times 0.94 = 0.91$$

$$N_{\text{输出}} = N_{\text{马达}} \times \eta_{\text{总}} = 2.8 \times 0.91 = 2.55 \text{ KW}$$

对比前面不计效率的计算功率损失 $(1 - 0.91) = 0.09$ 约 1/10。

又
$$M_3 = M_1 i_{\text{总}} \eta_{\text{总}} = \left(\frac{N_1}{n_1} 71720 \right) \times (i_{12} \times i_{23}) \times \eta_{\text{总}}$$