

乐高机械结构设计概述

乐高已经有将近百年的历史，早期主要用于制造砖块类的零件。从 20 世纪 70 年代开始，乐高开始设计和制造科技类零件，迄今已有四十多年。

四十多年来乐高研发出了种类众多的科技类零件，从科技砖到科技梁，从齿轮到交叉块，总共有数百种之多。

乐高科技零件虽然是塑料质地，但是其制造精度和品质极高，不亚于金属零件。成千上万个零件组装成的机器依然可以灵活运转，毫无滞涩之感，堪称玩具界中的奇迹！无怪乎乐高在全世界拥有如此之多的粉丝，不仅孩子们爱玩，很多成人玩家也乐此不疲，爱不释手。如图 1-1 所示为乐高科技零件构建的机器鸟。



图 1-1

乐高科技零件模数统一、尺寸一致，可以极为方便地组装和拆解。用这些科技零件几乎可以组装成任何类型的机械结构，为研究、学习机械结构和机械的可行性分析提供了极为便利的条件。如图 1-2 所示为 2000 多个零件构建的乐高纺织机器人。

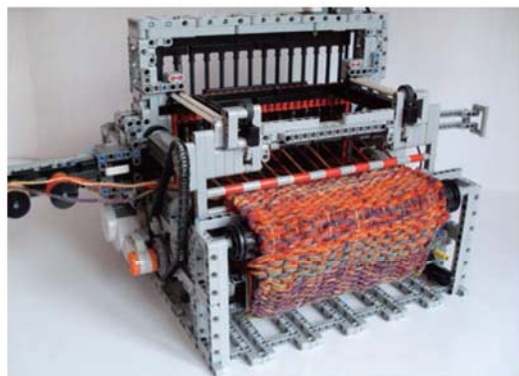


图 1-2

1.1 乐高中的科技零件

1.1.1 乐高中的梁

梁（英文 TECHNIC BEAM）是乐高中搭建结构的重要零件。乐高的梁具有较高的刚性，几乎任何结构的设计都离不开梁，梁

的作用相当于钢结构中的各种型材。通过各种梁的连接可以形成稳固的框架结构，如图 1-3 所示为乐高梁搭建的电梯框架。

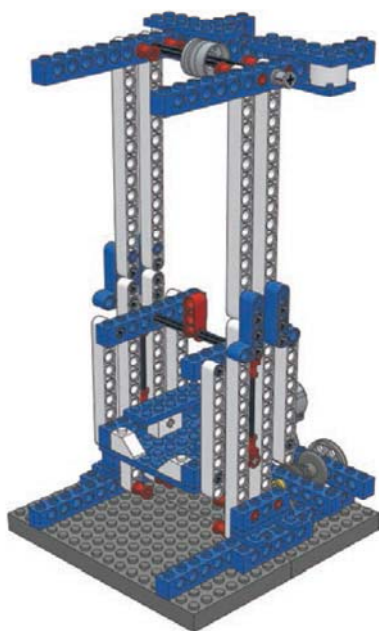


图 1-3

梁的外形

梁的典型外形是两端为半圆形的长方体，中间带有直径 5mm 的圆孔，圆孔的中心距为 8mm。梁的横截面为 7.8mm × 7.4mm 的长方形。以 5 孔梁为例，具体尺寸如图 1-4 所示。



图 1-4

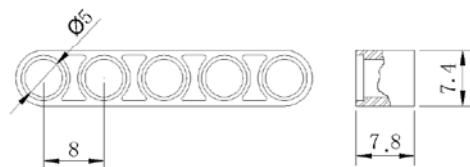


图 1-4 (续)

梁的分类

乐高中的梁按照形状可分为如下几种：

- 直梁；
- 角梁；
- 弯梁；
- 方框梁；
- T 形梁。

直梁共有八种，从 2 孔到 15 孔，除 2 孔之外，全部是单数。直梁有多种颜色可选，如图 1-5 所示。

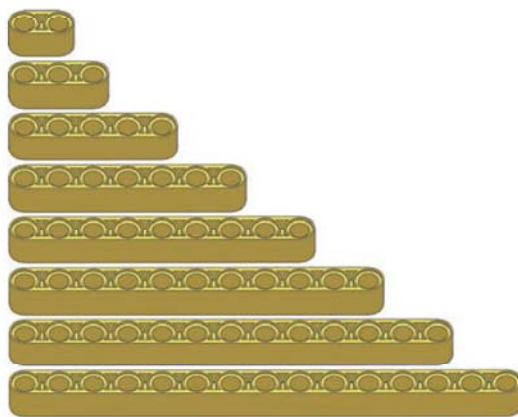


图 1-5

角梁（英文 TECHNIC ANG BEAM）

也称直角梁，是一种带有 90° 角的梁，形似曲尺。乐高中有两种直角梁，分别为 2×4 和 3×5 角梁，如图 1-6 所示。

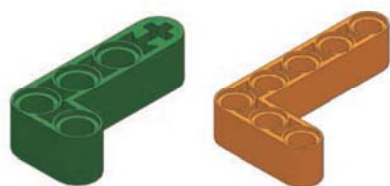


图 1-6

弯梁（英文 TECHNIC ANGULAR BEAM）是带有 127.5° 角的梁，图 1-7 所示为 4×6 弯梁的外形尺寸和角度。

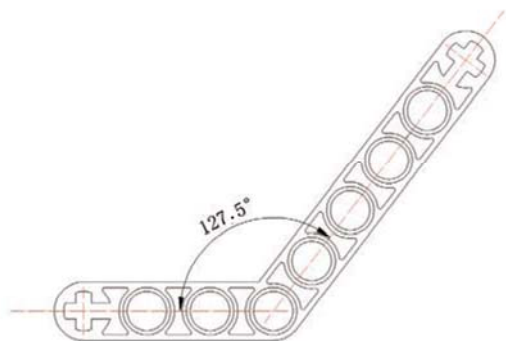


图 1-7

乐高共有四种弯梁，如图 1-8 所示，从左至右依次为 4×4 、 4×6 、 3×7 和 1×11.5 弯梁，其中最右侧的梁也被称为“双弯梁”或“大弯梁”，其折角为 135° 。



图 1-8

方框梁（英文 BEAM FRAME）外形呈长方形的框，上面包含很多圆孔。方框梁有三种，分别是 5×7 、 5×11 和 7×11 。方框梁通常为浅灰色，如图 1-9 所示。



图 1-9

T 形梁（英文 T-BEAM）的外形是一个大写的英文字母 T，有多种颜色可选，常见的是浅灰色，如图 1-10 所示。

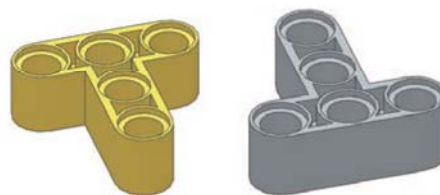


图 1-10

1.1.2 乐高中的齿轮

在很多人的印象中，齿轮几乎就是机械

的代名词，可见齿轮在机械设计中具有举足轻重的作用。

乐高中的齿轮也是一个庞大的零件家族，历史上曾经出现过的乐高齿轮有五六十种之多，目前仍在生产的齿轮还有 20 多种。图 1-11 所示为部分乐高齿轮三维模型。



图 1-11

表 1-1 为乐高主要规格齿轮信息一览表。

表 1-1

齿数	类型	半径	发布时间
8	直齿轮	0.5	1977
12	双面齿轮	0.75	1999
16	直齿轮	1	1979
20	双面齿轮	1.25	1999
24	直齿轮	1.5	1977
28	双面齿轮	1.75	2019
36	双面齿轮	2.25	2002
40	直齿轮	2.5	1977

齿轮的分类

齿轮的分类有多种方法，一般可以按照齿数来分，也可按照形状来分。

如果按齿数来分，乐高常用齿轮的齿数

从 1 齿蜗杆到 40 齿齿轮，共有 9 种齿数 16 个种类，如图 1-12 所示。

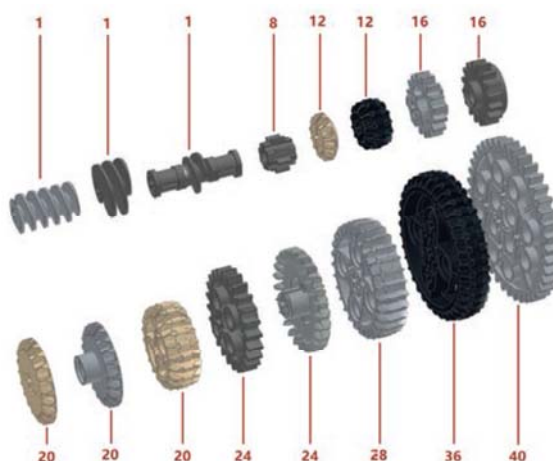


图 1-12

如果按形状分类，可分为直齿轮、双面齿轮、锥形齿轮、齿条、蜗杆等。

- 直齿轮的轮齿形状都是呈直线的，常见的是 8、16、24 和 40 齿齿轮。常见的颜色是深灰和浅灰色，如图 1-13 所示。



图 1-13

- 双面齿轮的轮齿形状是梯形的，常见的是 12、20、28 和 36 齿齿轮，如图 1-14 所示。



图 1-14

- 锥形齿轮的外形呈现一个锥形，常见的有 12、20 齿（十字孔）和 20 齿（圆孔）三个种类，如图 1-15 所示。

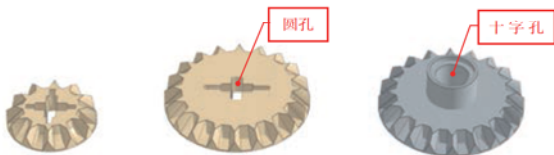


图 1-15

- 齿条是呈直线的齿轮，相当于一个直径无限大的齿轮。按长度可分为 2、4、7、8、10、12 和 14 单位等几种规格，基本是浅灰色和黑色，如图 1-16 所示。



图 1-16

- 蜗杆是螺旋形的齿轮，相当于 1 个齿的齿轮。常见的蜗杆有 3 种，长度分别是 1、2 和 3 个乐高单位，常见的颜色是深灰和浅灰色，如图 1-17 所示。



图 1-17

特殊齿轮

除了上述类型的齿轮之外，还有以下几种特殊的齿轮。

- 离合器齿轮,其外形是一个24齿齿轮,主体是白色的,中心轴孔在扭矩达到一定程度的时候会打滑,用于保护马达或机械机构不受损坏,如图1-18所示。

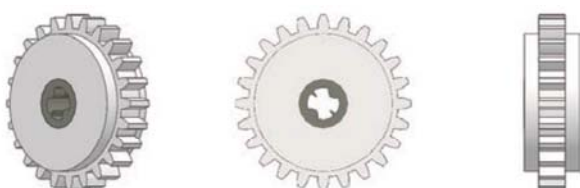


图 1-18

- 冠状齿轮,其外形也是一个24齿齿轮,但是在径向有突出的尖角,可用于垂直轴之间的动力传输,常见的颜色是浅灰色,如图1-19所示。

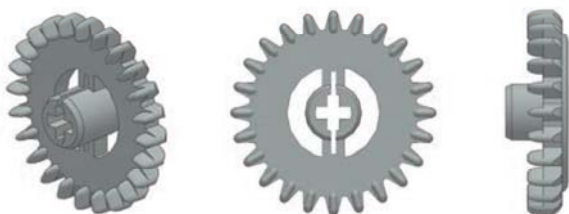


图 1-19

- 差速器,这个零件是搭建各种车辆必不可少的,它可以使两侧车轮产生不同的转速。目前有两种差速器,如图1-20所示,左侧为新款,右侧为老款。常见的颜色是深灰色。

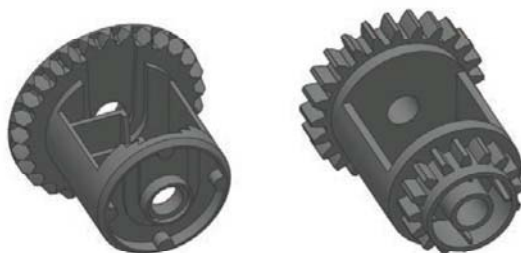


图 1-20

- 球形齿轮,这个零件严格来说不算是齿轮,但是却起到齿轮的作用,通常用于垂直轴之间的动力传输,其特点是非常结实耐用,常见的颜色为黑色或黄色,如图1-21所示。



图 1-21

- 转盘,乐高目前在产的转盘有三种,如图1-22所示,其中上方两款被称为“大转盘”。左侧的大转盘外圈带有56个齿,右侧的大转盘外圈带有60个齿。下方的转盘被称为“小转盘”,外圈上带有28个齿。

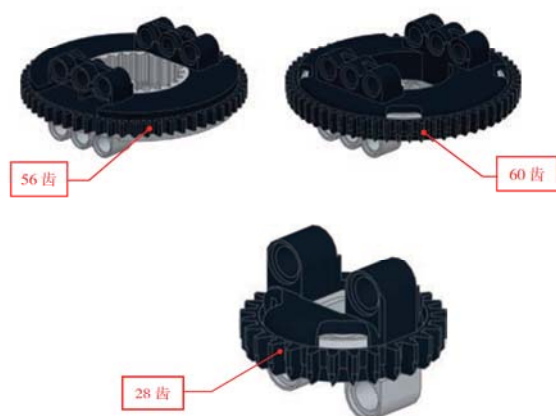


图 1-22

轴的特征是其横截面是十字形的，这样在与带有十字孔的零件连接时不会产生打滑现象，可以进行稳定的动力传输，如图 1-23 所示。



图 1-23

1.1.3 乐高中的轴和销

轴和销是乐高中重要的连接和传动零件，相当于机械结构中的螺丝钉、铆钉和转轴。乐高的轴、销类零件种类众多，使用极为广泛。

轴的分类

轴主要按纵向长度进行分类。乐高的轴从最短的 2 号轴到最长的 32 号轴，共有 13 个规格，如图 1-24 所示。

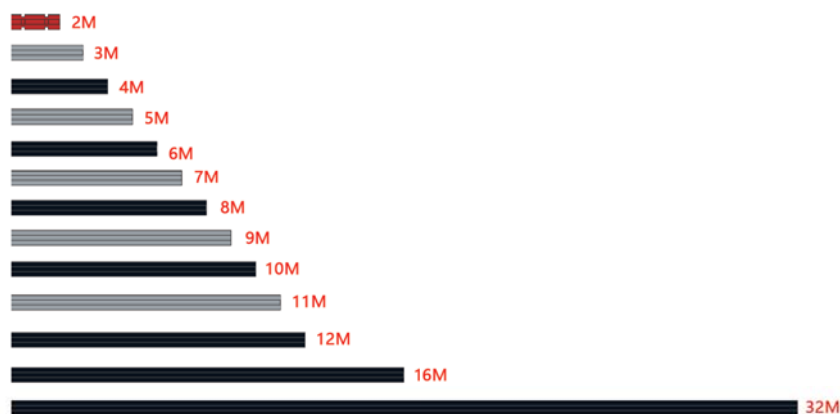


图 1-24

从图 1-24 中可以看出，从 2 号到 12 号轴，每个单位都有一种规格。12 号以上只有 16 和 32 两种规格。

轴的颜色

早期的乐高轴只有偶数长度的，而且都是黑色的。后来随着科技类零件的出现，乐高逐渐开发出了奇数长度的轴。

特殊的轴

除了直线类型的轴，乐高还有一些特殊形状的轴。例如钉头轴，其一端带有一个类似钉头的帽子，这种轴可以防止轴向移动，在特定场合下很有用，如图 1-25 所示。

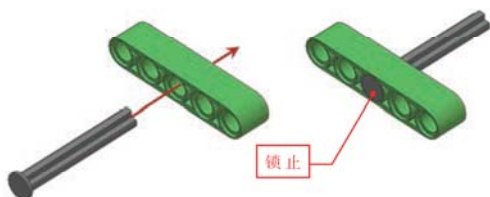


图 1-25

- 钉头轴主要有 3 号、4 号、5 号和 8 号等几种规格。其中，3 号钉头轴还有一种带有空心凸点的，这个凸点可以插入到销孔中，利用摩擦力进行固定，如图 1-26 所示。

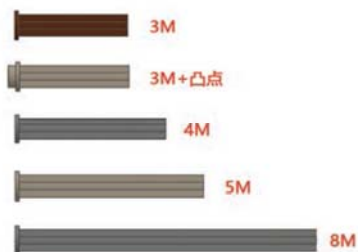


图 1-26

- 中间带有堵头的 5.5 号轴，这种轴分为两个部分，一端是 4.5 单位，另一端是 1 个单位，两者之间有一个堵头，主要是深灰色的。这个轴在安装车轮和差速器的时候很有用，如图 1-27 所示。
- 4 号是中间截止轴，轴上有一部分是没有沟槽的，这种设计是为了防止零件在轴上滑动，如图 1-28 所示。



图 1-27

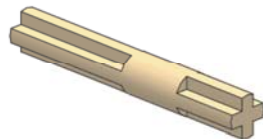


图 1-28

销的分类

销的分类有多种方式，可以按照长度、形状和摩擦力等特性来分。

按照长度，销可以分为 $1\frac{1}{4}$ 单位、 $1\frac{1}{2}$ 单位、2 单位和 3 单位等四类，如图 1-29 所示。



图 1-29

按照形状，销可以分为“圆柱销”和“轴销”两大类。圆柱销的横截面全部为圆形。轴销是十字轴和圆柱销的结合体，如图 1-30 所示。



图 1-30

按照摩擦力，销可以分为“摩擦销”和“光滑销”两大类，如图 1-31 所示。



图 1-31

以 2 单位的销为例，光滑销（左侧）和摩擦销（右侧）外形完全一致，但是摩擦销的柱面上带有很多小凸起，如图 1-32 所示。



图 1-32

这个设计可以防止摩擦销同与之相连接的零件产生转动，通常用于静态连接。光滑销没有小凸起，摩擦阻力极小，通常用于可转动部件。

1.1.4 乐高中的交叉块

交叉块的英文是 CROSS BLOCK。交叉块是乐高科技和机器人器材中特有的组成部分，其形状各异，种类繁多，如图 1-33 所示为部分交叉块。

为什么这类零件被称为“交叉块”？这个问题没有任何官方的解释，笔者试着用自己的理解来解释一下。

第一个方面，交叉块的外形。观察所有的交叉块会发现一个共同的特征，这些零件上都有在空间中相互交叉的轴孔或销孔，而且大多数都呈直角或平行关系。

图 1-34 列举了几个典型的交叉块，为了方便观察，将两个方向的轴孔和销孔的轴心线用红色和绿色虚线标记出来。可以看出，

两个方向的轴心线在空间中呈不共面的直角交叉。



图 1-33

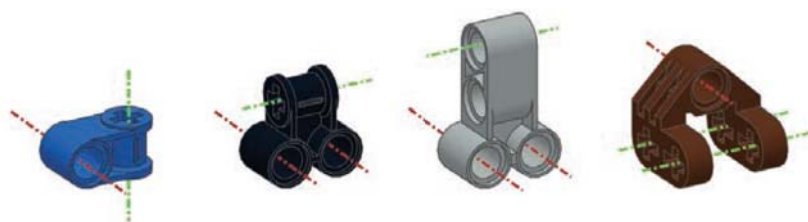


图 1-34

第二方面，交叉块的用途。由于交叉块具有空间交叉的轴孔和销孔，因此这类零件的主要功用就是各类科技零件在空间中的交叉组合。如果没有交叉块，很难想象科技零件将如何进行搭建组合。图 1-35 所示为五十川大师的几款科技作品，可以看到其中使用了大量的交叉块。

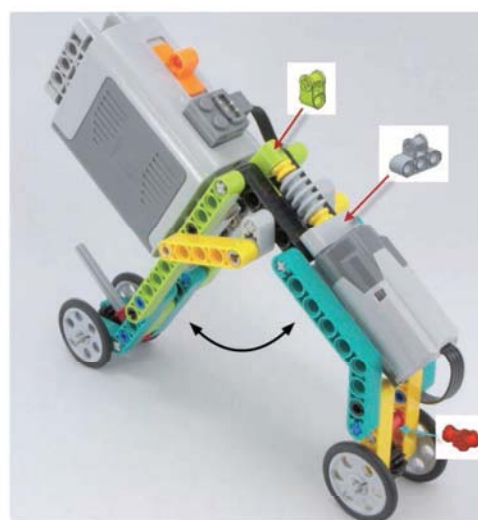


图 1-35



图 1-35 (续)

1.2 乐高的模数

乐高中所有零件外形尺寸采用统一的模数，这样才使零件之间可以进行任意组合，不会出现干涉或无法安装的情况。乐高零件之间的组合带来无限的可能性和极大的便利。如图 1-36 所示为乐高搭建的皮卡模型。

乐高零件的尺寸模数，最关键的两个数据是 8mm 和 5mm。乐高所有的零件外形都是基于这两个尺寸进行设计的。以 2×4 科技梁为例，相邻两个销孔的中心距均为 8mm，销孔的直径均为 5mm，如图 1-37 所示。



图 1-36

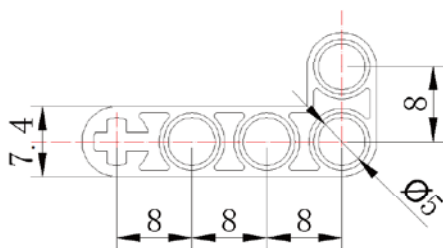


图 1-37

梁的横截面尺寸稍小于 8mm，这个设计是为了两根以上的梁装配在一起的时候能留有活动间隙。

再比如最常见的乐高科技砖的外形尺寸，如图 1-38 所示。其宽度和长度都是标准模数的整数倍，高度为标准模数的 1.2 倍。其侧面的销孔直径是 5mm，砖块上圆柱形凸点的直径也是 5mm。

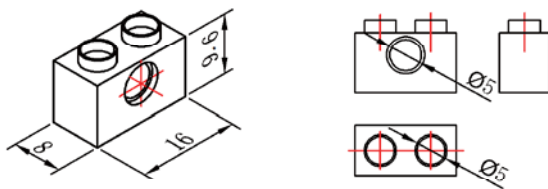


图 1-38

乐高中所有零件的外形、长度、孔径和孔距等参数都是基于标准模数进行设计制造的，大多数都是模数的整数倍。尺寸公差和形位公差也是统一的，再加上乐高零件极高的制造精度，使乐高零件具有极高的一致性和互换性。

1.3 结构设计的基本原则

所有的机器设计，都需要遵循一些基本的原理。首先，任何机器都需要一个稳固的框架或支架进行支撑。有了坚固的框架，其他的零件才能获得一个稳定、可靠的运行环境，从而产生设计者所需要的各种运行结果。

有了一个稳定框架之后，需要做一些优化处理，在满足需要的前提下，尽量将机器设计得更小巧、紧凑，零件的使用应尽可能减少。还可以进一步考虑优化机器的外观，使其更加精致、美观。因此，机器的结构设计有以下几条重要的原则：

- 坚固性原则；
- 轻量化原则；
- 美观原则。

图 1-39 所示为乐高鸣禽八音盒模型，它下方的底座就是一个典型的框架结构，其中安装了两个马达，同时也为上方的所有结构提供了一个稳固的基础。鸣禽的外形设计也尽量做到美观、形象和细节丰富。



图 1-39

1.3.1 坚固性原则

框架结构的设计，最重要的一点就是框架的稳定性和坚固性。组装好的框架不能轻易变形、解体。

例如，为最简单的两个梁做直线连接，如果只是把梁端点的销孔连接起来，是不稳固的，此时至少要有两个以上的销孔重叠才能保证不变形，如图 1-40 所示。

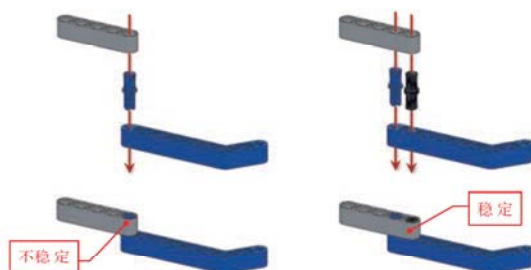


图 1-40

又如，要用两根科技梁构建一个直角形的结构，如果仅仅使用黑色摩擦销把两个端

点的销孔连接起来，尽管摩擦销有较大的阻尼，但是这个结构依然是极不稳固的，因为两根梁很容易绕黑色销转动，如图 1-41 所示。

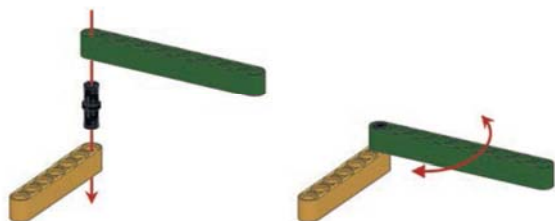


图 1-41

这种情况下，比较理想的加固方案是采用角梁，把两根梁安装在角梁的两个直角边上，利用角梁稳固的直角来加固这个结构，如图 1-42 所示。



图 1-42

如果遇到两根销孔互相垂直的梁需要直角固定的情况，可以参考图 1-43 所示的加固方案。这里用到的直角形零件是 3×3 直角梁，又被称为“5 美金”。

还可以利用方框梁形成稳定的直角结构，如图 1-44 所示。方框梁本身就是一种非常坚固的直角零件。

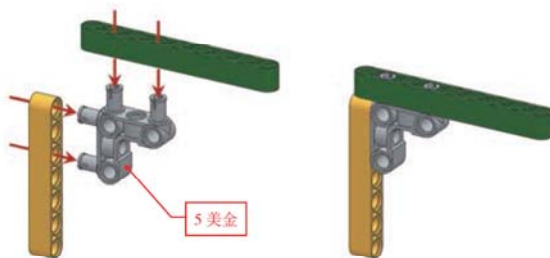


图 1-43



图 1-44

1.3.2 轻量化原则

一般而言，在满足强度的前提下，机器的结构越简单、零件用得越少越好。零件少，质量就相应减小，由此可以提高机器的工作效率，减少能量消耗。

例如，要获得一个 T 字形的稳定结构，在如图 1-45 所示的几种方案中，采用 3×5 角梁的方案最为坚固，T 形梁次之， 2×4 角梁再次之。但是 3×5 角梁方案所占空间较大，质量也是最大的。相对而言，T 形梁方案各方面较为均衡。那么，具体到每个机器中，采用哪种方案要依周围的结构而定。

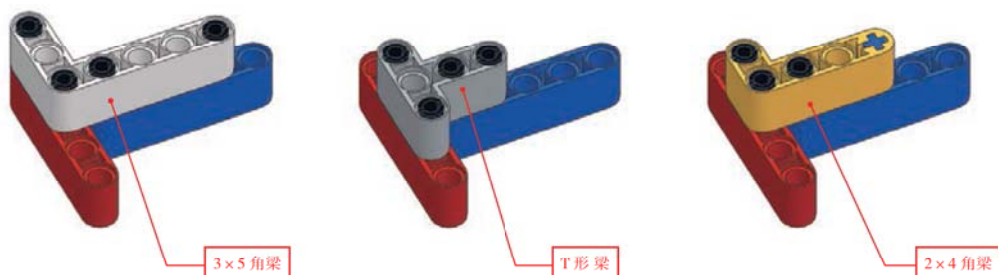


图 1-45

在另一个角度，乐高零件中的某些零件有的会有不同的厚度。例如有几种规格的梁就有厚度为 8mm 的标准梁和厚度为 4mm 的薄壁梁。如图 1-46 所示为两种不同厚度的 7 孔梁外形对比。

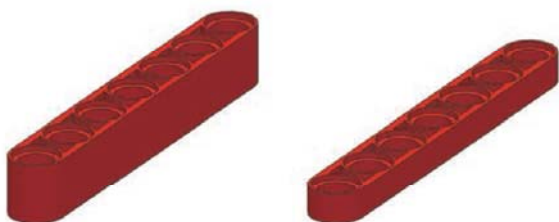


图 1-46

如图 1-47 所示为一款小巧的六足机器人。连杆和腿部机构使用了多种薄壁零件，整个机器人一共使用了 36 个薄壁零件。这个作品如果不使用大量薄壁零件，其体积将大幅度增加，模型会非常庞大臃肿。

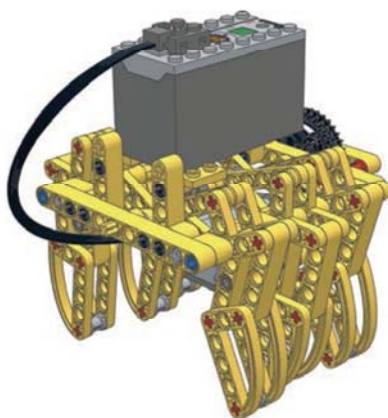


图 1-47

1.3.3 美观原则

在满足了坚固和轻量化的前提下，机器外形的美观也是需要考虑的一个方面。

我们可以通过观察一些高手的作品，来对比分析一下美观原则在作品中的具体表现。

如图 1-48 所示为加拿大乐高大师 jason 的两款活动雕塑作品——奔马。上图为 2016 年创作，下图为 2020 年创作。

通过对比，很容易发现 2020 年的作品明显要比 2016 年的作品美观了很多。2016

版本中马的头部和躯干大量采用了平直的科技梁进行构建，躯体上有很多空隙，造型相对比较简单。2020 版本马的头部和躯干大量采用弧面砖、板进行装饰，马的造型更加圆润、饱满，几乎没有不必要的空隙存在，更加接近真实的马。



2016 年版



2020 年版

图 1-48

再来看看乐高官方科技套装作品的对比。如图 1-49 上图所示为乐高 2016 年发布的

42056 保时捷 911 跑车，下图为真车外形。



图 1-49

42056 因为其大比例车身尺寸和复杂的结构成为经典套装，但是其外观设计还是被很多爱好者所诟病——车身上的缝隙太多，和原作流线型造型的车身相比，还是有很大差距。

如图 1-50 所示是 2020 年发布的 42096 保时捷 911 RSR 赛车。相比于四年前的 42056，这款作品外形设计上有了提升，尤其是前保险杠部分，大量使用了圆弧形的零件，造型已经非常接近原车了。



图 1-50

1.4 连杆机构设计概述

用乐高科技零件设计连杆类机构非常方便，只要确定好各连杆的长度，即可用乐高中的科技梁等零件加以表现。

连杆机构的表现，最常用的零件是各种规格的科技梁、科技砖、轴和各种规格的销。

尤其要注意的是，两根梁之间如果有相对旋转动作，它们之间的连接件一定要用灰色的光滑销。

以下列举一些常见连杆机构利用乐高零件的表现方法，请注意其中零件的选用。

1.4.1 瓦特连杆

瓦特连杆可以用 9 孔梁、5 孔梁和灰色光滑销等零件构建而成。如图 1-51 所示为一种瓦特连杆的搭建方案。

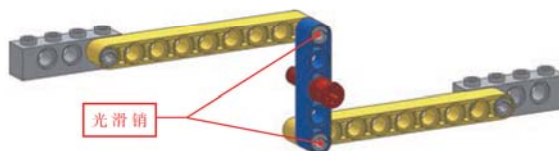


图 1-51

1.4.2 波塞利连杆

波塞利连杆可以用 5 孔梁、7 孔梁、11 孔梁和各种规格的销构建。如图 1-52 所示为波塞利连杆的一种搭建方案。

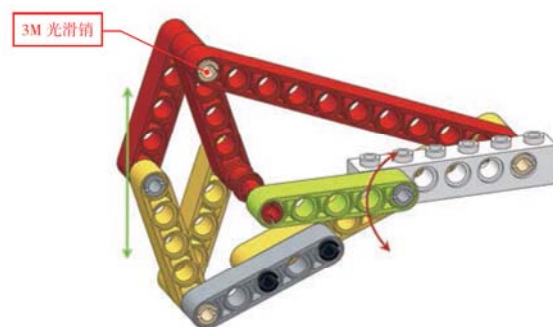


图 1-52

1.4.3 侯肯连杆

侯肯连杆可以采用 11 孔梁、6 孔薄壁梁和 3M 曲柄等零件构建。如图 1-53 所示为侯肯连杆的一种搭建方案。



图 1-53

1.4.5 萨吕连杆

萨吕连杆机构可以采用 4×6 板、1×2 科技砖、7 孔梁和光滑销构建。如图 1-55 所示为一种萨吕连杆机构搭建方案。

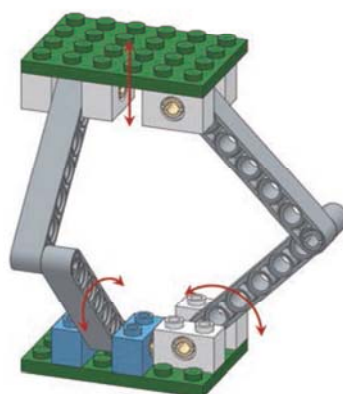


图 1-55

1.4.4 剪式连杆

剪式连杆机构可以采用 5 孔梁、4×10 板、10M 轴、1×2 科技砖和光滑销等零件构建。如图 1-54 所示为一种剪式连杆机构的搭建方案。

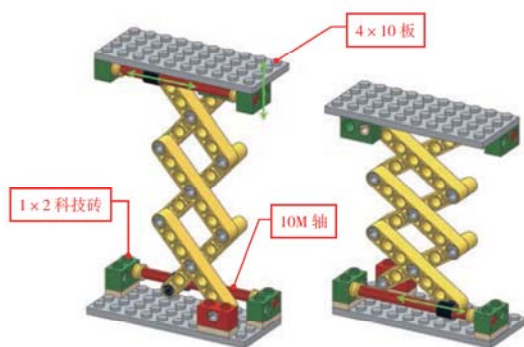


图 1-54

1.4.6 切比雪夫连杆

切比雪夫连杆机构可以采用 9 孔梁、5 孔梁和光滑销构建。如图 1-56 所示为一种切比雪夫连杆机构的搭建方案。

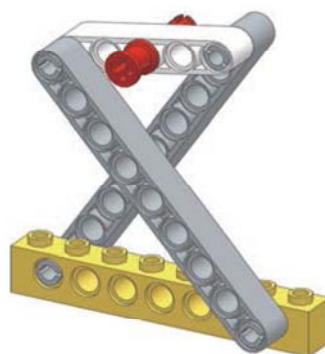


图 1-56

1.5 齿轮传动设计概述

齿轮作为一个传动部件，对于机械结构设计至关重要。齿轮可以将动力单元（电动马达、橡筋动力、发条马达、手动等）的动力传递到机械上，使机械运行起来。

同时，齿轮传动更重要的一个功能是输出我们所需要的动力属性，动力传输只是这个过程中的一个副产品。

以最常见的乐高电动马达（以下简称马达）为例，马达的输出动力是稳定、可测量的。每种马达都有其固定的转速和扭矩，不能随意改变。有时，我们需要更快的转速；有时，我们需要更大的扭矩。调节和控制机械的转速和扭矩，就需要用到齿轮了。

1.5.1 齿轮传动重要法则

齿轮最基本的用途是传递动力，其中最重要的法则如下：

- 用小齿轮带动大齿轮，扭矩增大，但是转速降低；
- 用大齿轮带动小齿轮，扭矩减小，但是转速增加。

齿轮的转速和扭矩成反比，例如，如果转速降低一半，则扭矩将相应增大一倍。反之，转速增大一倍，扭矩就会减小一半，其余情况以此类推。如图 1-57 所示为 8T 齿轮和 24T 齿轮传动的两种情况对比。

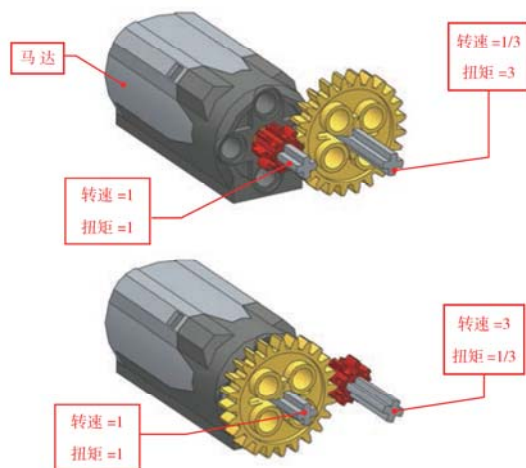


图 1-57

1.5.2 效率和齿轮

齿轮在工作过程中会产生摩擦力，长时间工作轮齿也会产生磨损，因此要提高系统的工作效率，有如下两条法则：

- 齿轮用得越少效率越高；
- 齿轮用得越小效率越高。

例如，要设计一种三个单位轴心距、反向转动、转速为 1 : 1 的动力传输结构，可以采用两种方案：第一种是四个 8T 齿轮接力传动；第二种是两个 24T 齿轮传动，如图 1-58 所示。



图 1-58

如无特殊情况(比如周围的空间狭小等),应优先考虑两个 24T 齿轮的传动方案。这个方案使用了尽可能少的齿轮,减少了齿轮之间摩擦所造成的动力损耗,更加高效。

1.5.3 齿轮比

齿轮比也叫齿比,指的是两个互相咬合的齿轮之间的齿数比例关系。例如用一个 8 齿与 40 齿进行传动,齿轮比为 8 : 40,简化后为 1 : 5,如图 1-59 所示。

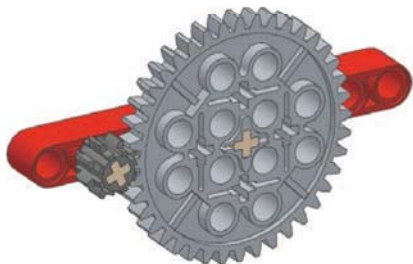


图 1-59

如果是多级齿轮传动,可以按照如下公式计算齿轮比:

齿轮比 = 主动齿轮齿数乘积 / 从动齿轮齿数乘积

以本书第 7 章中的机械钟的齿轮传动为例,时针的动力传输路径如图 1-60 中所示的绿色线条。如果从通往秒针的 10M 轴开始算起,整个传输路径中共有 7 个主动齿轮,都是 8T 齿轮,从动齿轮有 3 个 16T 齿轮、2 个 24T 齿轮和 1 个 40T 齿轮。这套传动系

统轮比算式如下:

$$8^7 / (16^4 \times 24^2 \times 40) = 2097152 / 1509949440 = 1 / 720$$

这个齿轮比恰好等于秒针和时针的转速比。

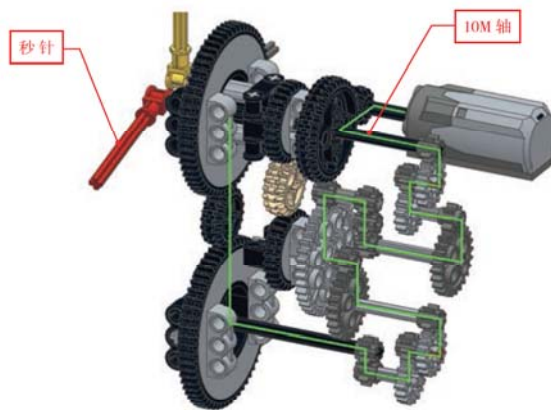


图 1-60

1.5.4 齿轮啮合的“16T”原则

在乐高的齿轮系统中,能在直梁上进行正确装配的一对齿轮,其齿数之和必须是 16 的整数倍。实际上就是二者的轴心距必须是 8mm (标准模数) 的整数倍。

例如,8T 与 24T 齿轮可以在直梁上正确装配,因为二者的齿数之和为 32,是 16 的整数倍。同时,二者的轴心距是 16mm,是标准模数的 2 倍。

因为 44 无法整除 16,所以 20T 和 24T 齿轮就无法正确啮合,如图 1-61 所示。



图 1-61

如果任意两个齿轮的行和列的交点为整数，表示这两个齿轮的轴心距是模数的整数倍，可以在直梁上正确啮合。

例如，20T 齿轮所在的行有两个整数，分别对应的是 12T 齿轮和 28T 齿轮。也就是说，20T 齿轮与这两款齿轮可以在直梁上正确啮合。

表 1-2 所示为乐高齿轮轴心距速查表，

表 1-2

齿数	半径							
	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2.25	2.5
8	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.75	3
12	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	3	3.25
16	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3.25	3.5
20	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.5	3.75
24	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.75	4
28	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	4	4.25
36	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.5	4.75
40	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.75	5

注：凡是上面表格中非整数的单元格所对应的齿轮，都是无法在直梁上正确啮合的。

1.5.5 “非标” 齿轮装配

这里的“非标”是针对“16T”原则来讲的。虽然不符合“16T”原则的齿轮无法在直梁上装配，但是可以利用角梁、弯梁、交叉块或科技砖的几何特点，改变齿轮中心的距离来进行装配。

下面列举一些“非标”装配的例子，如图 1-62 (a) ~ (f) 所示。

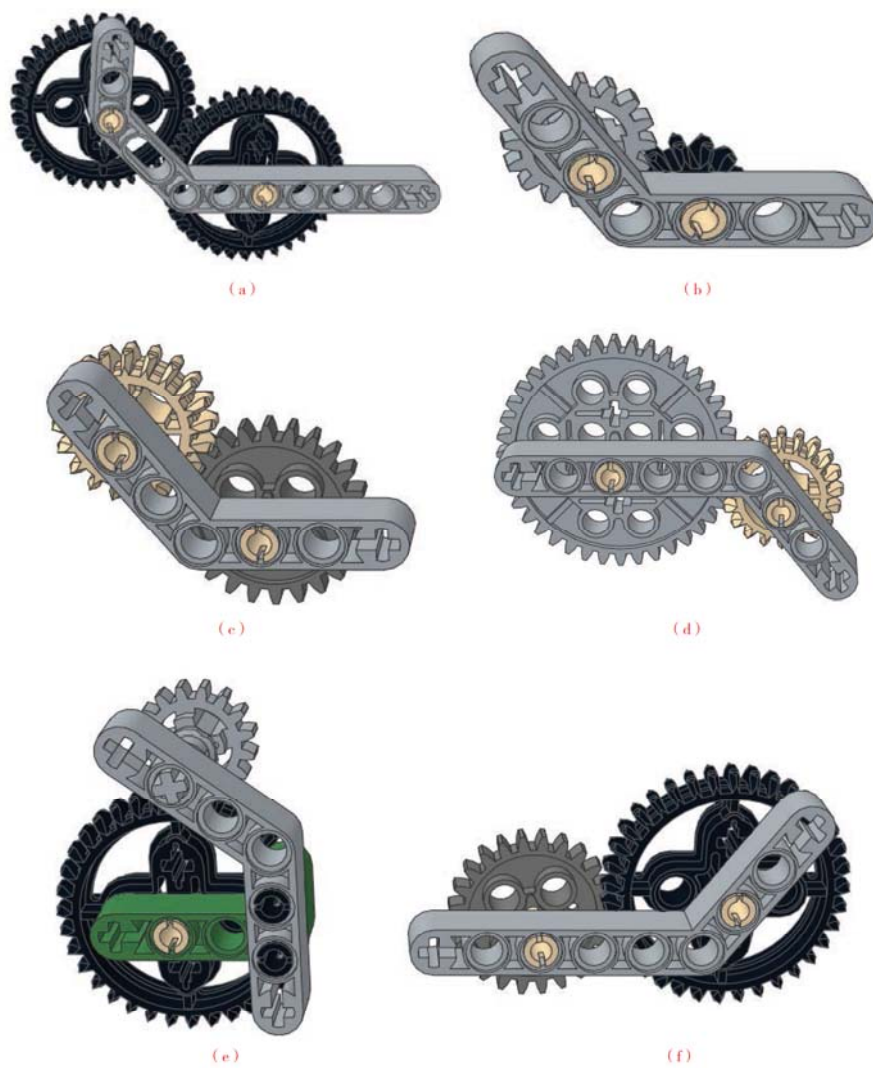


图 1-62