

# 乐高设计的艺术

Fred G. Martin

对初级和中级的乐高搭建者来说，都需要更好的搭建资源。乐高公司的搭建图很好的显示了如何搭建一些特别的模型，但对教导如何按照自己的想法来设计，并不是很好。在 MIT（麻省理工学院）的媒体实验室里，我们在进行一个项目，我们称它为“LEGO Constructopedia”，这些为乐高搭建者准备的超媒体资源包括了乐高搭建图，设计原理，文字说明，非常生动。这个项目才刚刚开始，这篇文章是我尝试使用传统的形式介绍“LEGO Constructopedia”的一些我们的想法。

这篇文章开头部分分析了乐高系统的结构原理，然后讨论传动装置、齿轮减速、齿轮传递，最后，给出了多种搭建窍门形象的分类。中间穿插着大量的图解和例子模型来表达这些概念。我希望从初学者到专家级的乐高迷都能从这里学到一些东西。

## 结构

### 垂直方向关系：

现在让我们仔细研究一下乐高积木块（LEGO Brick）。大多数人都知道乐高积木块并不是以立方型为基础。积木块的高度远大于长度和宽度（假设积木块的凸点朝上），但是很少人知道这三维之间所隐藏的关系：垂直方向的单位正好是水平方向的  $\frac{6}{5}$ ，换句话说，五个乐高积木块堆起来的正好等于六个凸点乐高粱（six-stud LEGO beam）的长度。

这种不明显关系的来源仍然很神秘，但它有实际的价值：通过搭建垂直高度等于水平长度的结构，可以令用梁来支撑乐高结构成为可能。使用三分之一高的积木板（one-third-height plate）让这种技巧更容易实现。这样的话，就可以形成不同的垂直间距。

这里给出一个常用的窍门，为了使用垂直坐标来建造两个水平单位，可以通过两根梁夹住两个板来实现（如图 1）。在这里，垂直量  $1\frac{2}{3}$  是水平量的两倍，因为  $1\frac{2}{3}$  是  $\frac{6}{5}$  倒数的 2

倍。另一个常用的数是  $3\frac{1}{3}$  个垂直单位（例如，两根梁被两根积木块和一个乐高板分开），它正好等于 4 个水平单位（参看图 2）。

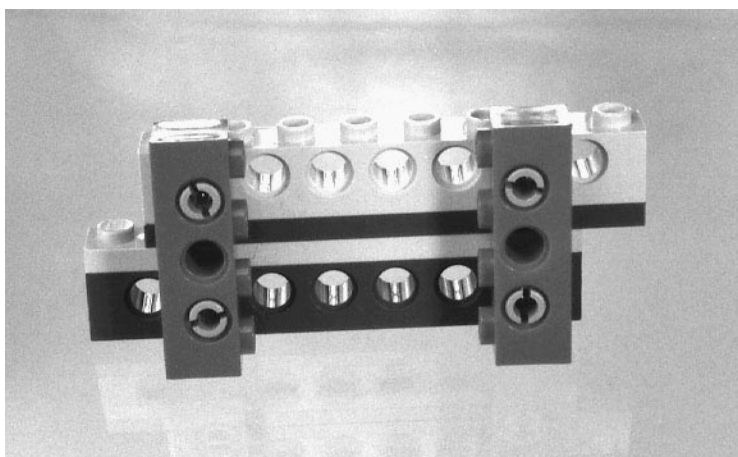


图 1：使用  $1\frac{2}{3}$  垂直间距关系来锁定两根梁

两根梁被两个三分之一高的乐高板分开，形成  $1\frac{2}{3}$  单位的间隔，正好等于 2 个水平单位。因此，两根梁可以使用正交梁（cross-beam）和联结销子（connector peg）来锁定——这样可以使结构更牢固。

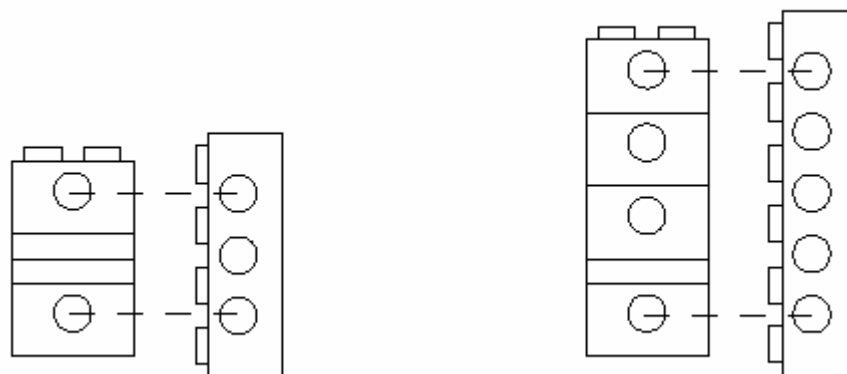


图 2：使用两个单位或四个单位的水平量可以形成不同垂直的间距

另外，为了搭建更完美的垂直间距，也可以使用斜的支柱。可以使用勾股定理来计算。也有一些近似完美的间距只需要足够的接近。通过试验或花一些时间考虑需要的间距量。

图 1 给出了坐标关系的实际应用：两根梁可以使用正交梁和联结销子来锁定。你可以使用这些窍门达到两个目的。第一，使用梁和联结销子（在图 3 中有更多联结销子的介绍）可以在乐高模型中固定垂直的机构；第二，建立恰好的间距来让齿轮正好的啮合（下面有更多的介绍）。要设计坚固、耐用的乐高模型，还有很长的路。



图 3：黑色和灰色的联结销子

黑色和灰色的联结销子：它们有什么不一样？答案是黑色的销子更粗。所以它可以很紧地插到梁的孔里，而比较小的灰色销子可以在孔里自由旋转。在需要将机构组合在一起时使用黑色销子。在铰链联结上使用灰色销子。

## 传动装置

打开小型直流马达，例如普遍的乐高马达，你看到什么？轴旋转得很快，但扭矩（转动的力）很小。你可以轻易地用手抓紧轴，让它停止旋转。

通过齿轮减速的魔力，这种快速但没力的转动可以转变为强有力但速度慢的转动，适合为轮子、抓手、肘关节和其它机构提供动力。伴随着结构问题，建造有效的传动成为了建造乐高机器挑战的另一部分。

## 计算齿轮齿数

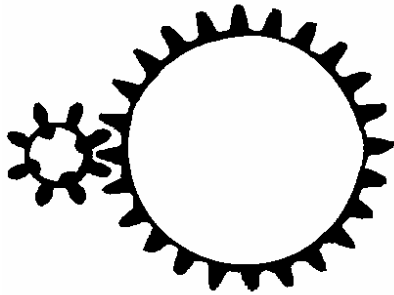
通过齿兼容的两个不同尺寸并相互啮合的齿轮来实现传动减速。图 4 显示了一个 8 齿和 24 齿齿轮啮合的效果。当 8 齿的齿轮旋转 3 次，24 齿的齿轮旋转 1 次，这是因为它们的齿数比为 3:1。

更大的减速传动可以使用两个齿数差别更大的两个齿轮来实现。使用乐高 8 齿的齿轮

和一个乐高 40 齿的齿轮可以实现 5 比 1 的减速。但更常用的方法是使用多个齿轮组，图 5 显示了使用两个 3 比 1 来实现 9 比 1 的传动，这里使用一根轴安装了 24 齿的齿轮作为输入齿轮和一个 8 齿的齿轮作为输出齿轮。

齿轮组的概念是齿轮传动的基础。图 6 给出一个乐高齿轮传动模型，从马达到输出轴产生 243 比 1 的传动比。但这样的传动比有点过大——它产生的最后输出速度对一般的机器人驱动来讲太慢。在这里它只是表明了这种概念。

如果你发现小孩比较难理解上面的概念，或者他们仅仅知道速度会变慢，但不能理解扭矩为什么会变大，你可以用“能量守恒”来解释，也可以让他们用手来感受一下轴力量的变化。



当 8 齿的齿轮旋转 3 圈，它让与它吻合的齿轮共转过 24 个齿，因为与它吻合的齿轮正好有 24 个齿，所以它正好旋转一圈。这个结构就产生了 3 比 1 的传动：输入齿轮转动三圈，输出齿轮转动一圈。

3 转转过  
24 个齿

1 转转过 24  
个齿

图 4 3 比 1 的减速齿轮传递

通过将两个 3 比 1 的齿轮传动组合在一起，可以得到一个 9 比 1 的传动比。这里的关键是使用一根轴安装了一个大的输入齿轮（例如一个 24 齿的齿轮）和一个小的输出齿轮（例如一个 8 齿的齿轮）。

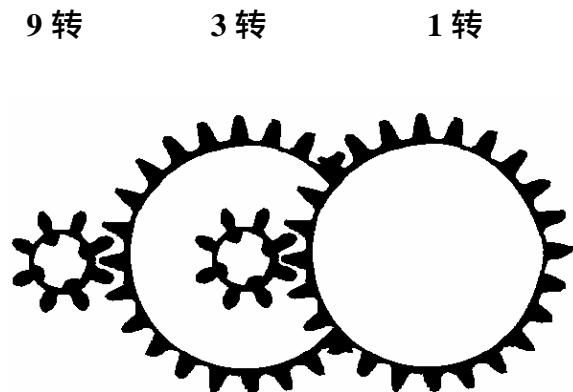
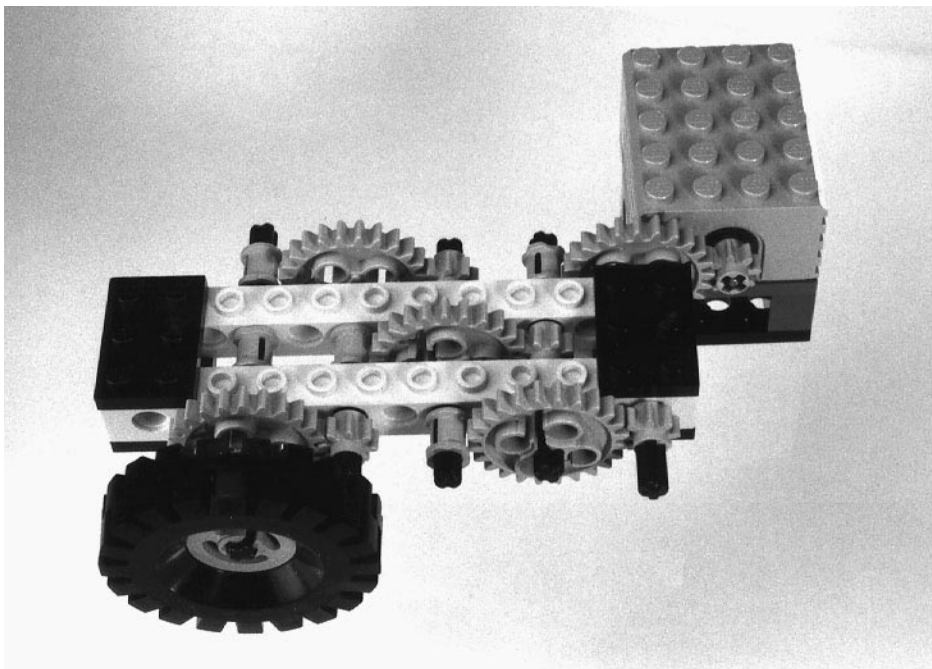


图 5 使用组合来产生 9 比 1 的齿轮减速传动



使用 8 和 24 齿齿轮的五级传动产生了 243 比 1 的传动。注意,这里需要三根平行的轴来防止齿轮间互相干扰。四个  $2 \times 3$  乐高板来让梁保持平行,防止轴被卡死。

图 6 简单的乐高传动系统

## 蜗杆

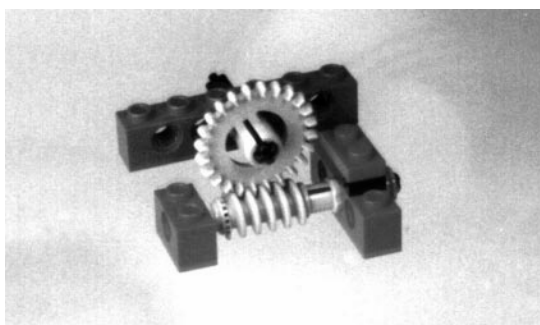
蜗杆是一项非常迷人的发明,在齿轮世界里是属于莫比乌斯圈一类。当它与相应的蜗轮相啮合时,蜗轮形成一个  $n$  比 1 的减速:蜗杆每转动一圈,驱动相应的齿轮仅仅转动一个齿。所以,例如,蜗杆旋转 24 圈,驱动 24 齿的齿轮转动一圈。这是很紧凑的减速装置——它相当于 3 个 3 比 1 个齿轮组,其产生 27 比 1 的关系,只需要一个蜗杆和 24 齿的蜗轮相啮合就可以实现。

然而,在这里有一个缺点,蜗杆主要使用滑动摩擦力来驱动蜗轮的齿。虽然当蜗轮相互啮合时,设计蜗轮通常将滑动作用最小化,但是,当蜗轮与蜗杆啮合时,不可避免出现问题。

蜗杆比圆柱齿轮有更多的摩擦损失。在很高的扭矩作用下,可能导致传动停止。假如你的机器人太重,蜗杆驱动可能没有主驱动工作的那样好。

蜗杆还有一个有趣的特性:它们不能反向驱动(即自锁)。也就是说,假如你使用蜗轮来驱动蜗杆,你只能让蜗杆沿轴前后移动,而不能让蜗轮转动。可以利用这种特性的有利的一面,例如,假如你使用蜗杆来提升重物,当马达停转时,重物不会掉下来。

图 7 显示了蜗轮蜗杆如何啮合在一起。图 8 显示了将两个蜗杆安装在同一根轴上。



蜗杆是很有用的,因为它可用作单个齿的齿轮:当蜗轮旋转一圈时,它驱动蜗杆转动一个齿。所以当它与 24 齿的齿轮吻合时,产生 24 比 1 的减速。然而,由于蜗杆在摩擦上损失大量能量,所以我不适合作为高性能的主驱动等应用。

图 7 使用蜗杆驱动



图中给出了蜗杆的排列，在最下面的是最基本的蜗杆，长度为两个水平乐高单位。最上面的是在一根轴上安装两个蜗杆不成功的例子，中间的是成功的例子。当在同一根轴上安装多个蜗杆时，尝试四种可能的方向来找出可以工作的一个方向。

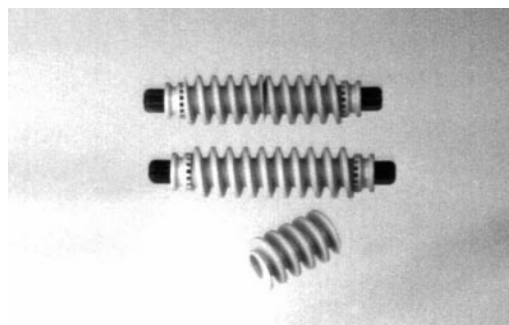


图 8 在一根轴上安装多个蜗杆

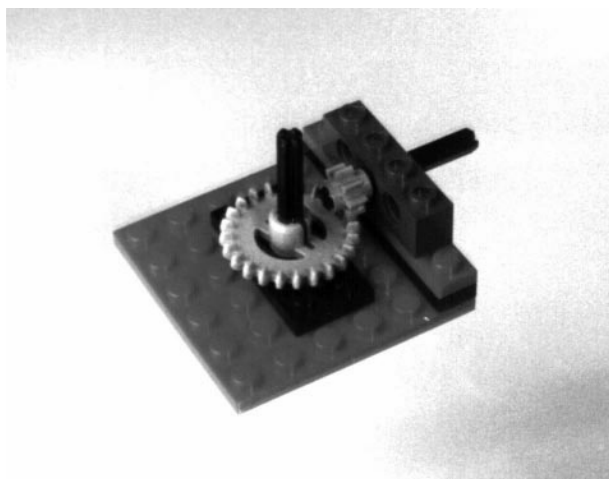
## 改变旋转的轴

在传动中如果只使用圆柱齿轮，那么所有的轴必须平行。使用了蜗杆传动，输出圆柱齿轮的轴与蜗杆成直角。其他的两种齿轮，乐高部件中的冠齿轮和斜齿轮可以在传动中改变旋转轴的方向。

### 冠齿轮

冠齿轮是圆柱齿轮的一种，它设计成与标准的圆柱齿轮成直角啮合（参图 9）。在图中，冠齿轮与一个 8 齿的齿轮啮合。当然，也可以与 24 齿、40 齿的齿轮相互啮合，只不过，使用 8 齿的齿轮来驱动 24 齿的齿轮是一种在改变旋转轴的方向同时进行了减速的有效方法。

24 齿的冠齿轮与标准的圆柱齿轮大小一样，所以在部件缺乏时，可以代替它。



8 齿的齿轮与 24 齿的冠齿轮吻合在一起，用来改变齿轮传动系统中旋转轴的方向。

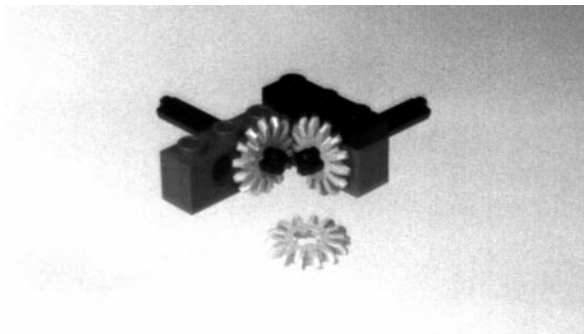
在这个例子中，产生了垂直的输出。当然也可以产生一个水平的输出。

图 8 8 齿的齿轮与冠齿轮啮合

## 斜齿轮

斜齿轮成对使用，提供类似于冠齿轮的功能，但是不能提供减速的能力。有两种类型的斜齿轮：老类型（图 10），这种齿轮相当平，另一种为新类型，它具有相同的直径，但更厚。老类型比较脆弱，损耗较大，不适合传递大扭矩。新的则有很大的提高。

老类型的斜齿轮可以很好地用作轴套（图 15）。



斜齿轮用于改变旋转轴的方向，其传动比为 1 比 1。在这个例子中，它们用于在水平面上改变轴的方向。

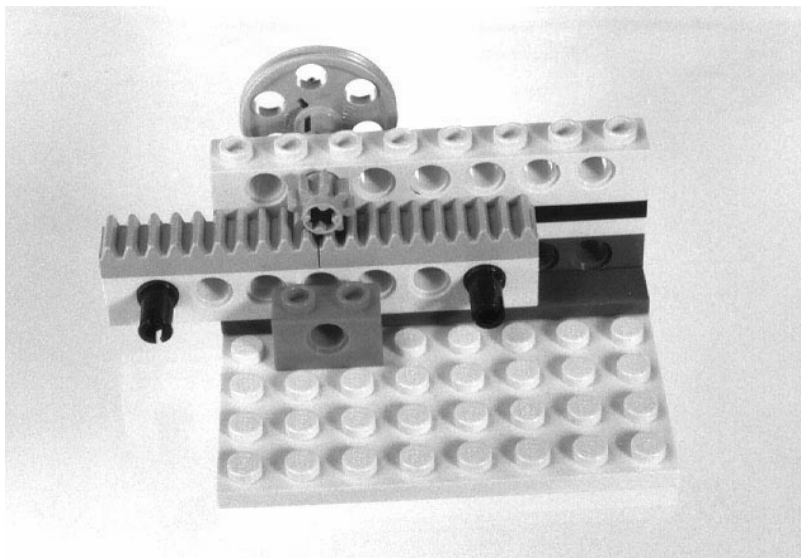
这种图片给出了老类型的斜齿轮，由于它们相互间有很高的摩擦力以及它们不够坚固，所以在应用上有很多限制。新类型的斜齿轮更厚，性能也更好。

图 10 斜齿轮

## 齿条

齿条像一个展开成直线的圆柱齿轮。当它被一个圆柱齿轮（通常使用一个 8 齿的齿轮最好）驱动时，它作前后直线运动（图 11）。

齿条可以一个接一个安装来增加运动的长度。在使用齿条驱动的梁下面，使用乐高平板（无凸点的板）作为表面，这样可以让它移动得更平滑。



驱动齿条的齿轮在齿条传动机构中通常称为小齿轮。8 齿的齿轮是驱动齿条的一个很好的选择，因为它的减速效果好——齿轮旋转一圈，齿条只移动 8 个齿，这样较容易控制。

图 11 齿条的使用

## 实用提示

在这齿轮部分的结尾，我给出了几个提示以帮助你设计齿轮传递。

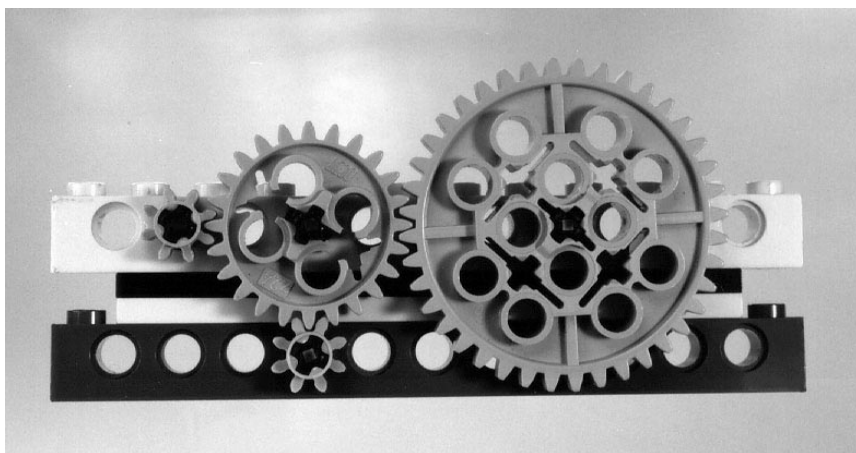
## 齿轮大小

了解标准齿轮的大小是很有帮助的，这些与前面关于乐高坐标关系部分有联系——使用垂直坐标来建造一个水平的间距不但可以用来锁定机构，而且可以让齿轮合适地啮合上面或下面的齿轮。

四个圆柱齿轮中，其中三个——8 齿、24 齿和 40 齿的齿轮的半径分别为整数个水平单位加上半个水平单位。在传动系统中啮合在一起时，它们的半径之和为整数个水平单位。

例如，8 齿的齿轮半径为 0.5 个单位，24 齿的齿轮为 1.5 个单位，当它们啮合时，圆心之间正好是 2 个水平单位。在乐高粱中很容易得到两个水平单位的间隔，或者，也可以像前面所讨论的使用  $\frac{2}{3}$  垂直距离关系得到。图 12 所示为三个齿轮与另外一个齿轮啮合的情况。

另一方面，16 齿的齿轮的半径正好是一个乐高单位，所以它只能与自己啮合（在标准的水平间距情况下）。一对 16 齿的齿轮圆心之间的距离恰好是两个乐高单位，正好等于 8 齿的齿轮和 24 齿的齿轮圆心之间的距离。所以这两组齿轮很容易相互替换：一个有用的技巧，可用来调整已做好的齿轮传动系统的性能，而无需进行大变动（图 13）。



8 齿、24 齿和 40 齿的齿轮可以在水平梁上啮合得很好，因为它们是“半单位”的半径。例如，8 齿的齿轮半径是 0.5 个乐高单位，24 齿的齿轮半径为 1.5 个乐高单位，它们啮合时，圆心之间的距离是 2 个水平乐高单位。

这个例子表明了 8 齿和 24 齿的齿轮以两个水平单位啮合，使用  $\frac{2}{3}$  垂直距离关系也可以得

到。（这是一个常用，也是很有用的技巧）

图 12 多个齿轮啮合

16 齿的齿轮的半径正好是一个乐高单位，一对 16 齿的齿轮圆心之间的距离恰好是两个乐高单位，由于 8 齿的齿轮和 24 齿的齿轮圆心之间的距离也是两个单位，所以这两组齿轮很容易相互替换：一个有用的技巧，可用来调整已做好的齿轮传动系统的性能，而无需进行大变动。

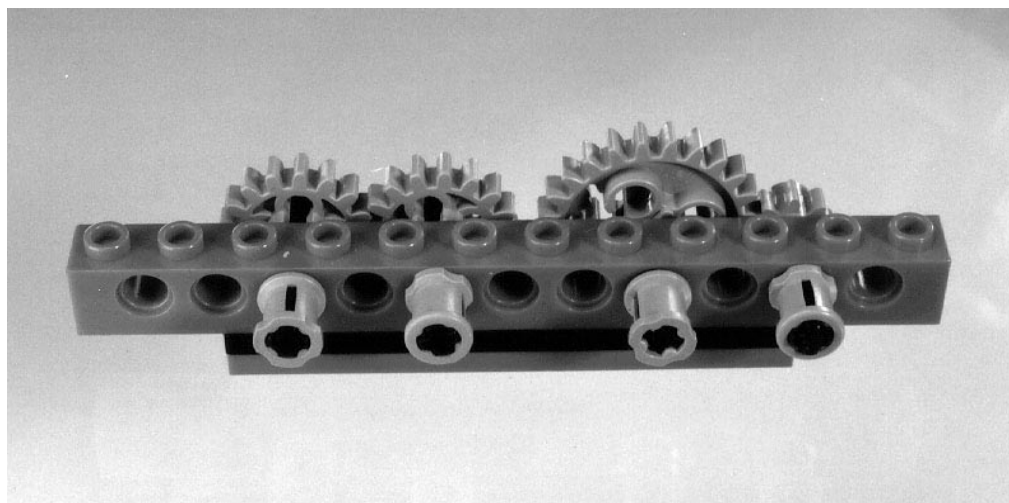


图 13 16 齿的齿轮

## 奇数齿轮间距

使用斜的安装梁，可以实现奇数的齿轮间距。一般来讲，齿轮在啮合较松时比较紧时工作得更好，过分紧会导致它们卡死。

当使用斜的间距，很多组合就成为可能，一些还会工作得很好。例如，8 齿和 16 齿安装在一个水平单位和一个垂直单位的斜线上也可以工作。

## 轴的支撑

在一个齿轮传动系统中，保证轴有良好的支撑是非常重要的。实际上，这意味着至少用两根梁来支撑轴。更重要的一点，所有支撑轴的梁必须保持方形。假如没有保持方形的话，轴将被卡死。

图 14 所示，使用双排板，而不是单排板来保证梁在正确的位置。图 6 中的简单齿轮传动系统，使用 2×3 板来使梁保持方形。

当使用梁来支撑一般的轴时，使用双排板来使梁保持平行是非常重要的。假如梁不能保持方形，轴将被卡死。

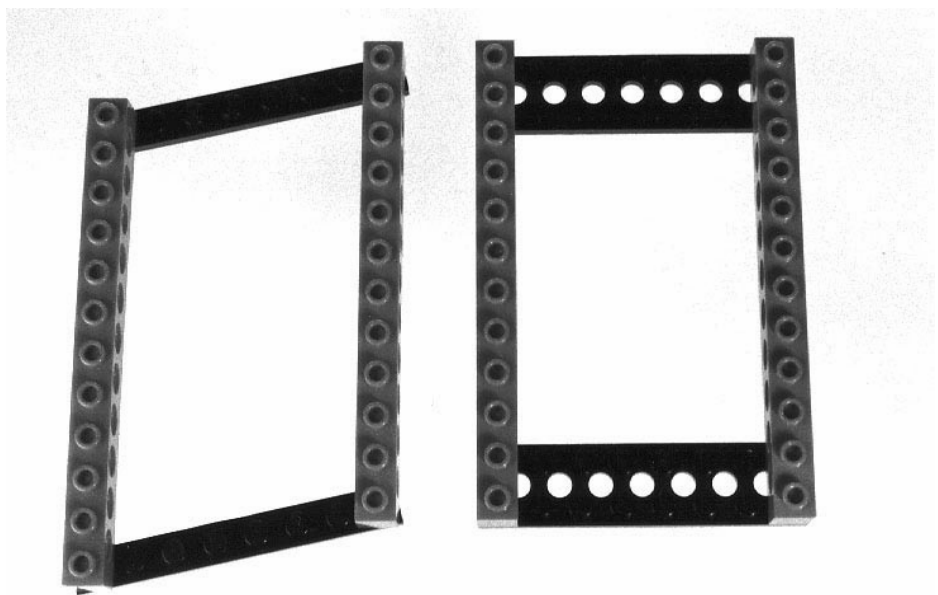
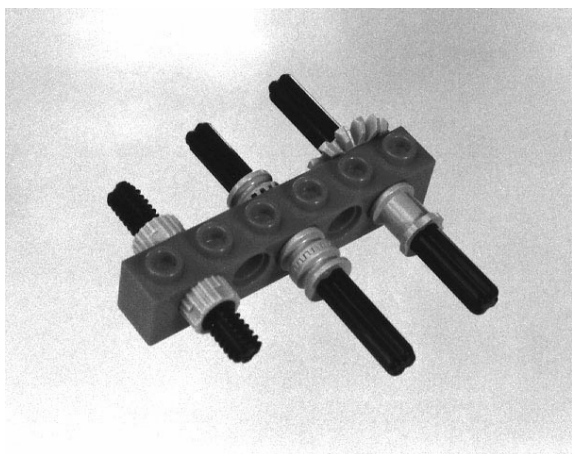


图 14 使用双排板，而不是单排板来保证平行梁在正确的位置

## 轴套的使用

轴套是用来防止轴在安装位置前后滑动。除了标准的全尺寸的轴套，小的滑轮和斜齿轮也可以用来实现这个功能（图 15）。





不只是一个乐高单位长的标准轴套（见上面轴，前面）可以用作轴套。使用小的滑轮（见中间轴）可以作为半尺寸的轴套——也可以将两个安装在一起，成为全尺寸的轴套。在必要时候，斜齿轮（见上面轴，后面）可成为大轴套。最后，一个螺钉螺栓（见下面轴）也可以成为一个紧的连接键。

图 15 轴套和其它替代部件

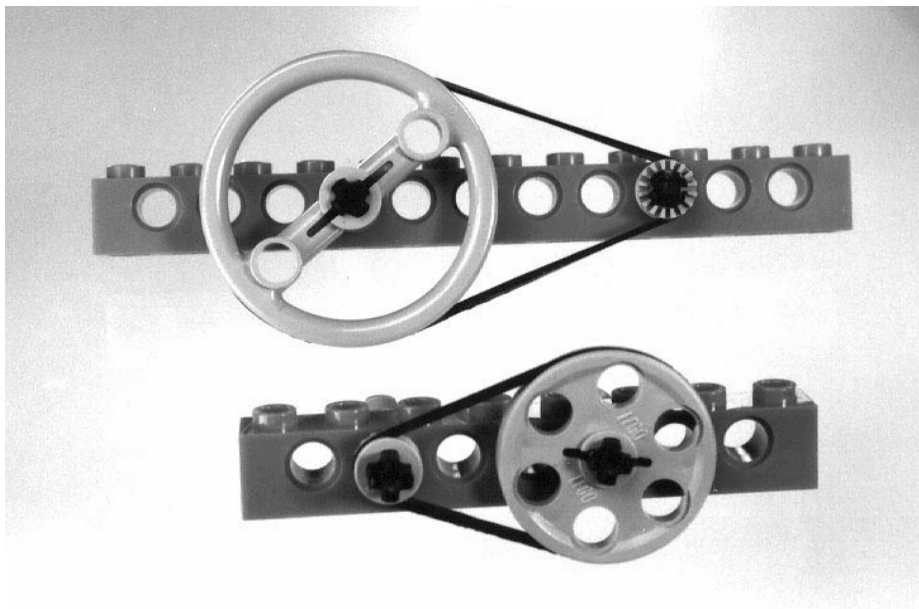
## 使用滑轮来降低噪声

有时候一个齿轮传动系统会非常吵。通常大部分的噪声来源于马达输出轴上的第一对啮合齿轮。这里是使用滑轮驱动非常理想的地方（图 16）。

在马达轴上使用小的滑轮，在驱动轴上使用中等或大的滑轮。两个滑轮的周长比就像一对啮合齿轮的齿数比一样产生了减速。

乐高滑轮皮带——细的橡皮筋——是很适合用在高速、低扭矩的条件下，因为它们不能传递很大的力，所以传动的第一级最适合使用滑轮驱动。

小心，在相反的条件下使用滑轮，会导致橡皮筋断开或滑落。



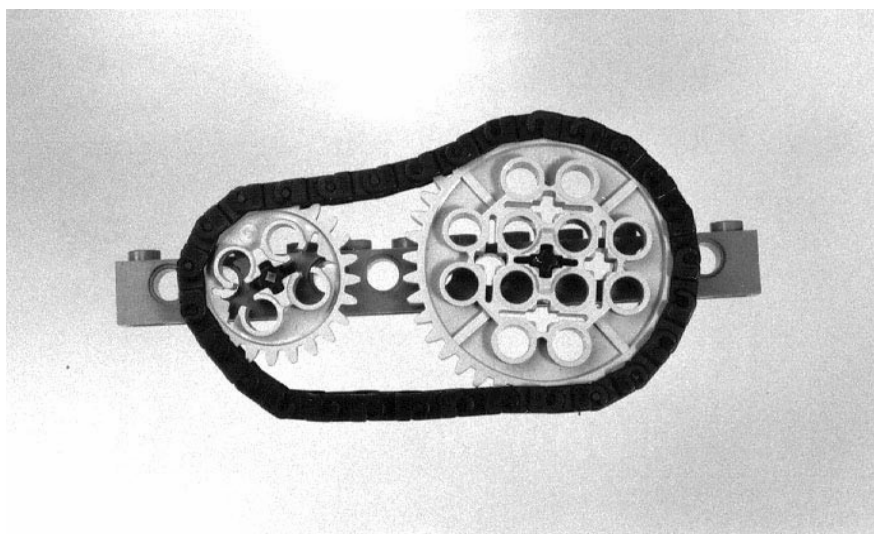
有三种尺寸的滑轮：最小的一种，两个合起来是一个轴套。中等大的一种，两个合起来是一个轮毂。最大的一种常用作轮子。

图 16 滑轮驱动的使用

## 链条驱动

链条驱动非常适合用在传动中最后的一级——例如，将能量传递到装有轮子的轴上。这是因为它可以轻易地传递足够的扭矩，并且，在旋转速度很慢时，它的摩擦损失最小。

获得正确的链条长度是很需要技巧的。通常较松的链条工作得更好——链条太紧会导致卡死，但是太松的话，也会导致链条打滑。



在传动的最后一级中，链条驱动是用于传递大扭矩的有效方法，如果有必要，也可以提供减速。

链条传动在齿轮传动中较慢的级中，并且比较松的情况下工作得非常好。使用大的齿轮——8 齿的齿轮不能很好工作。

图 17 链条驱动

## 设计策略

在为模型设计一个新的传动系统时，我发现最好的方法是从最后一级来倒推前面的传动，而不是从马达开始。这是因为通常马达的安装位置选择有较大的余地，而驱动轮或关节安装的余地较小。

所以，从安装最好的驱动轴开始，接着在它上面安装轮子或齿轮，然后开始倒推，安装足够的齿轮，最后将马达安装在适当的位置上。

当你设计一辆车，不要忘记轮胎决定了输出轴的旋转速度跟车辆的线速度之间的关系。使用小轮胎代替大轮胎如同齿轮减速所达到的作用，而这些将影响到所需的齿轮数量，尝试一下！

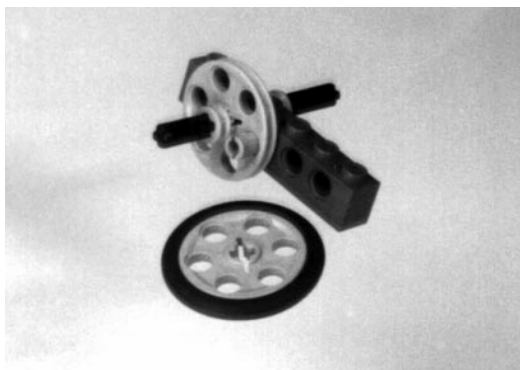
如果传动系统表现很糟糕，需要检查几个地方。确信轴套没有装得太紧——留出一点空间让轴在安装位置上能前后移动。检查所有的装有轴的梁是否保持方形。让传动系统表现很差的一个常见原因是梁没有保持方形（这样会让轴卡死，译者注）。

为了测试传动系统，可以尝试一下从后面来驱动。移去马达，然后轻轻地转动最后的驱动轮或轴。如果不是有太大的摩擦，在传动系统中的所有的齿轮将会转动，安装马达的轴将快速旋转。如果你的系统能逆向驱动的话，可以肯定它的性能不错。（如果你的系统中使用了蜗杆驱动，那么这种方法将不能使用。译者注）

## 乐高设计的“陈腔滥调”

这一部分使用图片的方式给出了各种各样的设计思想。我喜欢将这些设计思想成为“陈腔滥调”，因为我希望这些变成很普通，每天都会用到的知识，而不是掌握在少数的高专家手中。当我与小孩一起工作时，我应用了这些技巧一次又一次，帮助它们完成设计。我写这篇文章的一部分目的是收集这些技巧，与大家一起分享。

看完这些技巧，也现在你自己的乐高设计中会有一个或个更多的技巧很有用处。



有时需要将轴锁定在梁上。这张图显示如何使用一个中等的滑轮来紧密地将轴固定在梁上。

图 18 使用滑轮来作轴套固定轴

这个特殊的齿轮固定部件是一边是轴，另一边是松的销子。在齿轮传动中它可以用来固定惰轮——用于简单传递运动或改变旋转的方向。

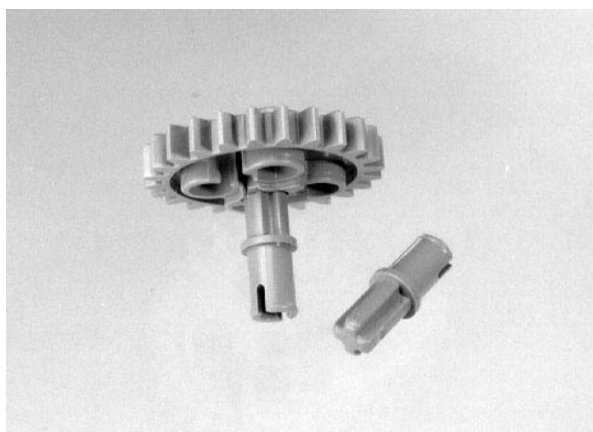
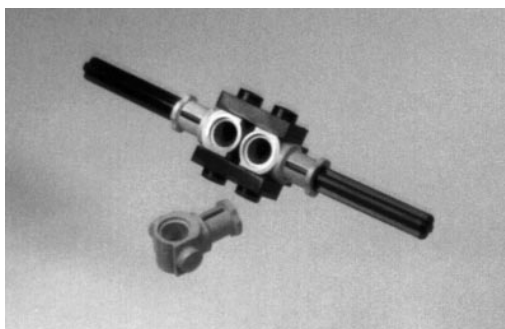


图 19 齿轮固定部件



这个部件的结构可用作一个紧凑的轴联器。虽然乐高现在已专为此目的生产出新部件，但是它可以替代这个部件，这是一个很有用的技巧。

图 20 轴联器

为了从垂直的墙上的轴孔中扩展出来，一个小的梁可以通过将它上面的凸点压入垂直梁的孔中来实现。在乐高提供的模型图中你会发现没有这种结构，这是因为上面的凸点对孔来讲有点大，并且，如果让模型处于这种状态下会逐渐变形，就像受压的塑性材料会延展一样。虽然乐高给出的方案是使用带凸点的联接种（参看图 22），但是这种方法却非常结实（除非乐高部件变形。）



图 21 从垂直的墙上扩展出来的一种方法

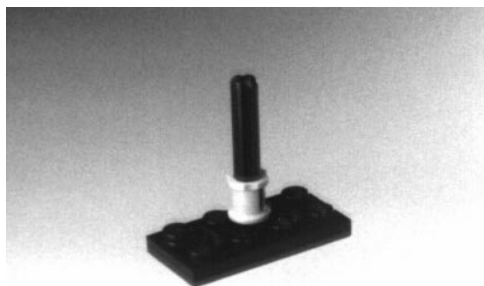


从垂直的梁上扩展出来的推荐方法使用带凸点的联结销，这个部件的一边是松的联结销，另一边是一个凸点。

这种方法没有简单地将梁的凸点压入孔中（图 22）那样牢靠，但是这不会造成塑料变形。



图 22 带凸点的联结销



全尺寸的轴套可以用来在单方向上将轴固定在平板的孔中（另一个方向是锁死轴的，图 25），让轴能自由旋转。在图 24 中，附加的平板用来限制轴，但允许它自由旋转。

图 23 使用轴套来保持轴

通过在两块平板之间使用轴套来固定轴，轻易地安装垂直的轴。根据轴套的安装方向，它可以锁定轴或让轴自由旋转。在这个图中，轴可以自由旋转。

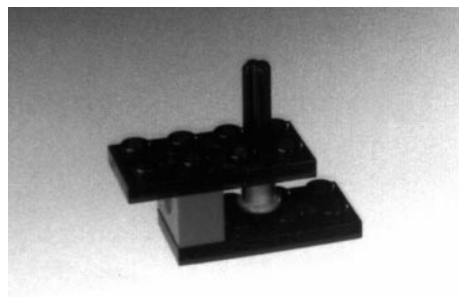
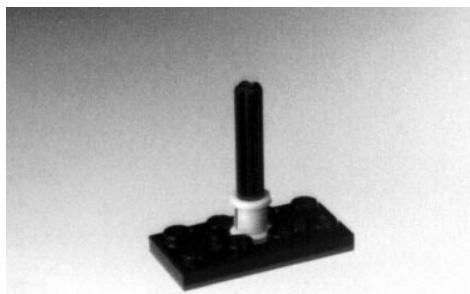


图 24 在两块平板之间使用轴套来固定轴



在轴套的另一个方向，可以被板上面的四个凸点锁死，其中心正好在平板的孔中心。这就可以使用轴套来将轴锁死在平板上

图 25 使用轴套来将轴锁死在平板上



“肘关节”可以用来以某一特定角度锁定两根轴。图中两端安装了轴套的较短的轴用来让肘关节固定在一起。

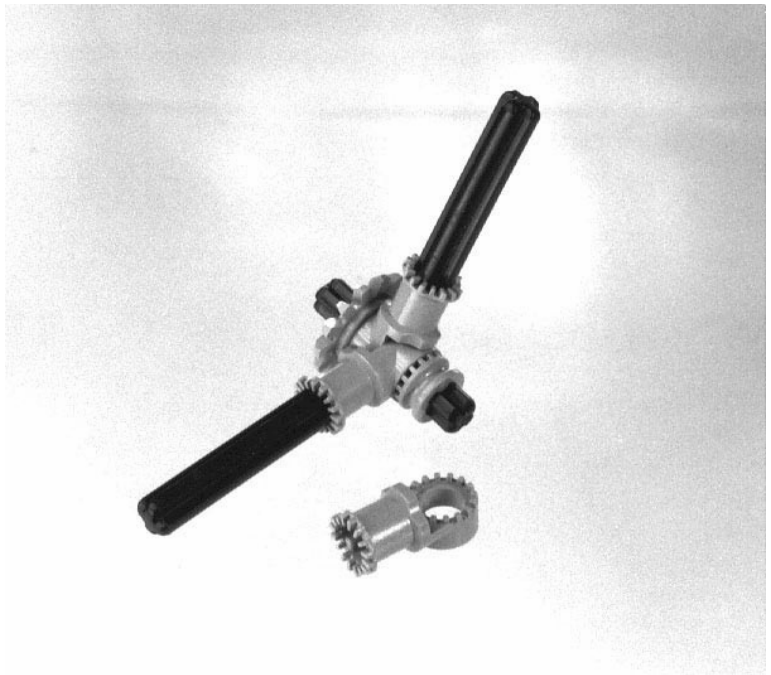
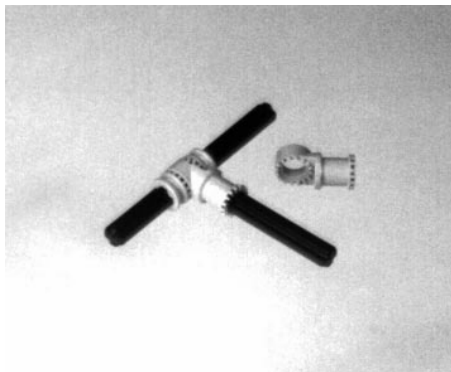
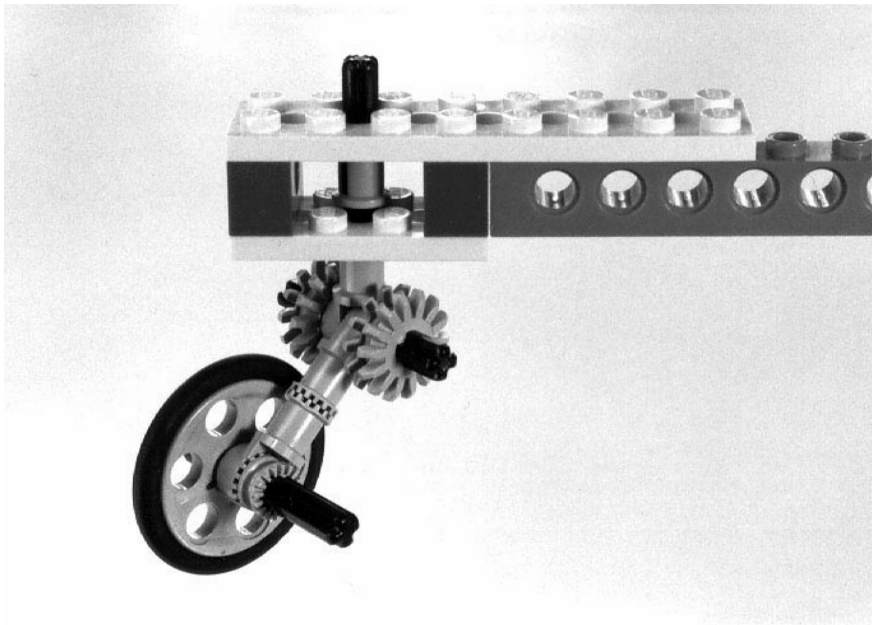


图 26 两个肘关节



这里肘关节使用来将两根轴以直角联接。图中装在通过肘关节的轴上面的小滑轮可以让轴锁死，也可以让它自由旋转。

图 27 带自由轴或锁定轴的肘关节



在搭建这个脚轮时使用了多个技巧。垂直的轴时固定在两个平板中,但可以自由旋转,使用了图 24 给出的技巧。连接轮子的带一定角度的联接是应用图 26 所示的肘关节联接。最后安装轮子是使用图 27 给出的肘关节联接技巧

图 28 脚轮的设计

“活塞杆”部件(图中左下角所示)在每个机构中使用两次,来搭建这只乐高腿。通过使用链条或齿轮连接来让腿同步,就可以设计一个多腿机器人。

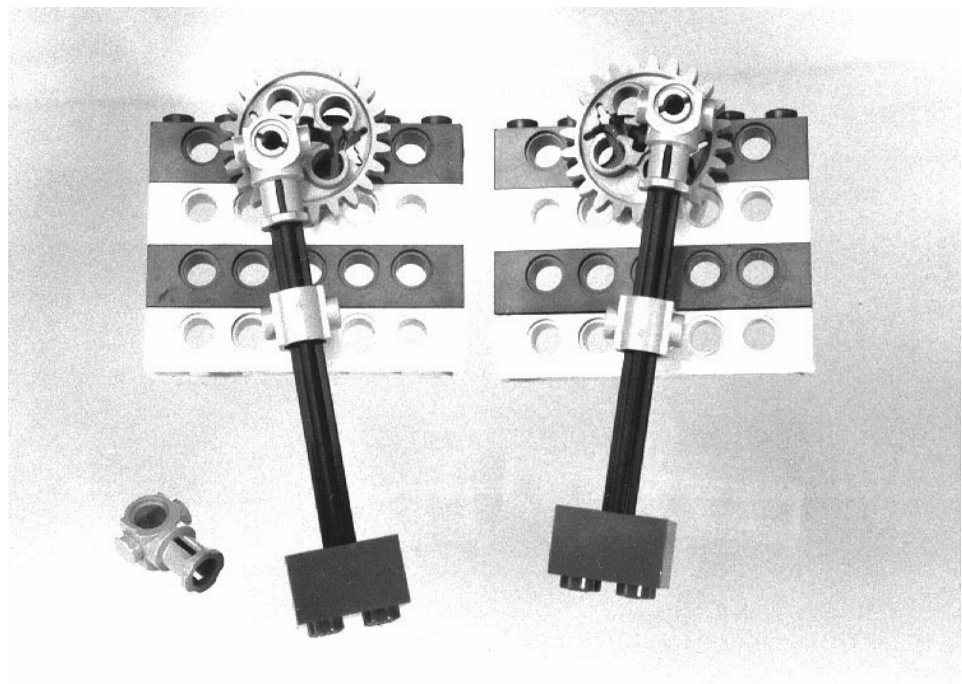
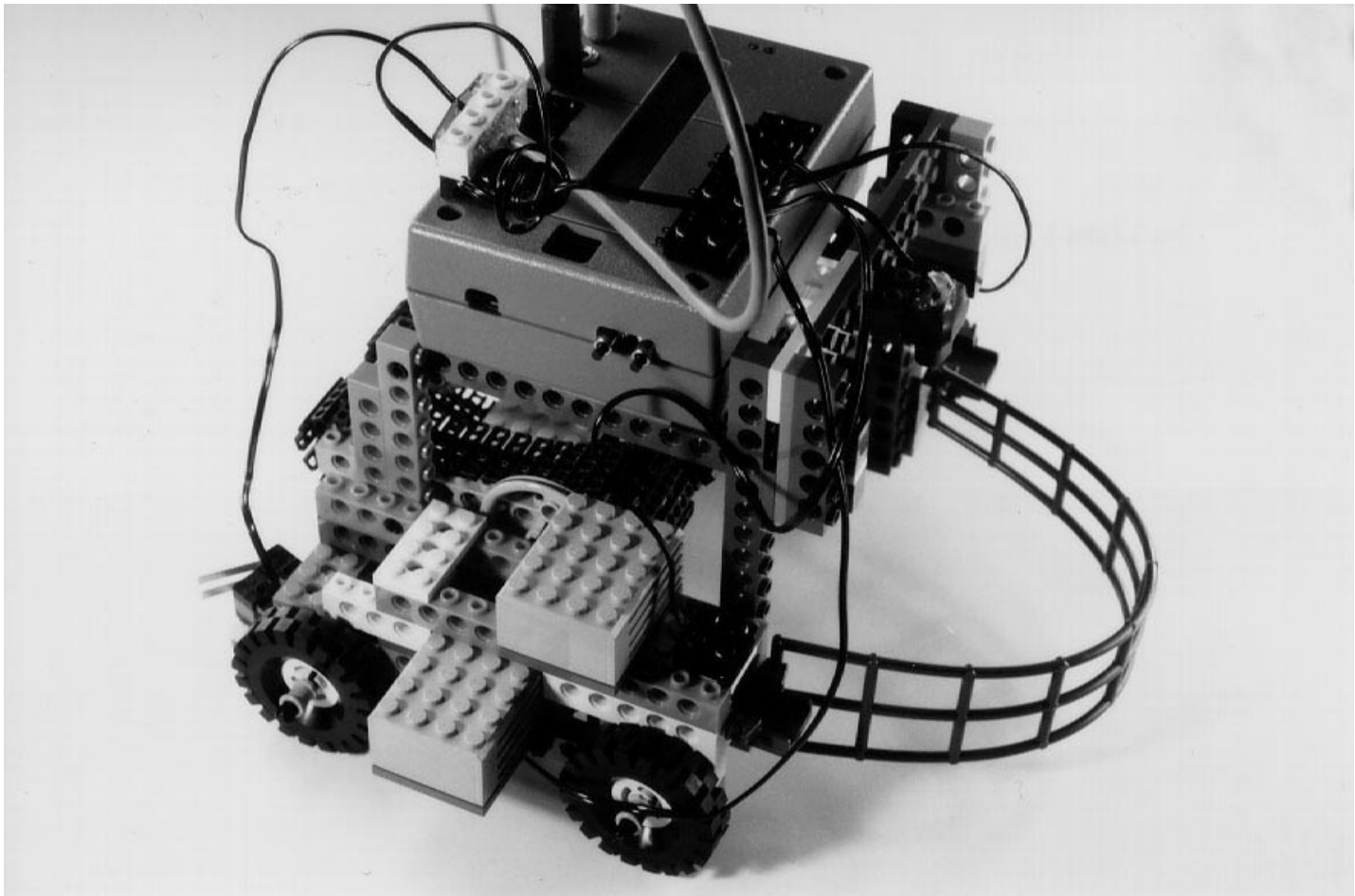


图 29 乐高腿



在这个机器人中，你可以找出多少个设计技巧？特别留意使用了垂直间距技巧来建立稳固的机器人结构。

这个乒乓球收集机器人是由 Brian Silverman 设计的。在它的上面安装了可编程的积木（就是 RCX 的原型，后来发展成乐高的 RCX，译者注），这是机器人的控制中心，它由作者和他的同事在麻省理工媒体实验室开发的。

图 30 乐高乒乓球收集机器人

## 结束

我希望这篇文章能激发其他人奉献出他们在乐高设计中得到的技巧，从而为乐高爱好者提供大量的资源。在互联网上我们将为你提供一些超文本格式的搭建思想。

<http://el.www.media.mit.edu/groups/el/Projects/constructopedia>

## 关于作者

Fred Martin 从 1986 年就在麻省理工媒体实验室开发教育用的机器人技术，他也是麻省理工乐高设计竞赛的其中一个创立者。

我觉得这是一篇写的非常好的文章，希望能为你带来不少搭建灵感。正如作者所说，我也很希望大家能将自己的搭建技巧公布出来，与大家一起分享。

西觅亚公司([www.semia.com](http://www.semia.com))

机器人社区[www.robotdiy.com](http://www.robotdiy.com)

邓润洪 [Dengrunhong@semia.com](mailto:Dengrunhong@semia.com)