

的电压，任何的物质都是可以导电的。

铜具有很低的阻抗，但实际上或多或少仍然会存在一点。导线越长，它的阻抗就越高。如果你用几英里长的导线来为自制手电筒布线的话，导线所产生的阻抗将变得很高，以至于手电筒将无法正常工作。

导线越粗，它的阻抗就越低。这可能有些违背我们的直观感觉。你可能会想，粗一些的导线需要更多的电流来“填满它”。但是实际上粗一些的导线可以使更多的电子顺畅地通过线路。

前面我多次提到了电压，但是却还没有定义它。一个电池有 1.5 伏的电压，这意味着什么呢？实际上，电压——因亚历山大·伏特（Alessandro Volta，1745–1827）伯爵的名字而得名，他于 1800 年发明出第一枚电池——在初等电学中是最难理解的概念之一。电压表征了电流做功的“势”（potential），也就是电势能的大小。不管电池是否被连接到电路中，电压都是存在的。

想象一块砖，当它在地板上时，这块砖只有很少的势能。把它从地面上举到离地板四英尺的高度，现在这块砖就会有比较多的势能。如果你了解所谓“势能”到底是多少，把砖扔掉就可以了。当我们拿着砖跑到一座高楼的楼顶时，它的势能会更多。在这三个场景中，你只是拿着这块砖，它并没有做什么，但是这块砖的势能却差别迥异。

电学中还有一个比较简单的概念是电流（current）。电流与流经电路的电子数有关。它的计量单位是安培，这得名于安德烈·玛丽·安培（André Marie Ampère，1775–1836），不过大家一般简称这个单位为“安”，例如“10 安的保险丝”。假如要获得 1 安的电流，你就需要保证每秒有 6,240,000,000,000,000 个电子通过电路中的某一点。

“水和水管”的这个比喻现在可以帮你理解这些概念：电流可以看成是水管中流水的量。电压可以看做是水压。阻抗有些类似水管的宽度——水管越细，阻抗越大。所以水压越大，流经管子水也就越多。水管越细，水管里流动的水也就越少。水管中流水的量（相当于电流）与水压（相当于电压）成正比，与水管的纤细程度（相当于电阻）成反比。

在电学中，如果你知道了电压和电阻，就可以计算出电路中的电流是多少。电阻——一般来说物质都倾向于阻拦电子的通过——的单位是欧姆，它得名于乔治·西蒙·欧姆（George Simon Ohm，1789–1854）。著名的欧姆定律就是由他提出的。该定律可以表示为：

$$I = E / R$$

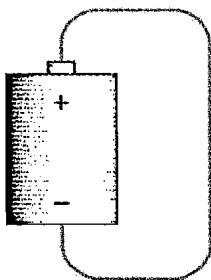
其中, I 用来表示电路中的电流, E 用来表示电压 (它代表电动势), R 表示电阻。

例如, 下面这节电池是单独放置的, 没有连接任何设备。



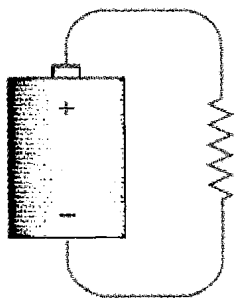
它的电压 E 是 1.5 伏。它代表做功的势能, 但是因为正负极通过空气也有连通, 所以电阻 (R 所代表的物理量) 非常非常大, 也就是说, 电流 (I) 等于 1.5 伏的电压除以一个极大的数。因而电流在这里几乎是 0。

现在我们用一小段铜线把正负极连接起来 (从现在开始, 我们不再在示意图上画导线的绝缘层)。



这种情形被称为“短路”。电压仍然是 1.5 伏, 但是现在的电阻非常非常小。现在的电流等于 1.5 伏的电压除以一个非常小的电阻值。也就是说电流将变得非常非常大。大量的电子流经导线。在现实情况下, 电流会因为电池的型号大小而受到限制。电池或许无法导通如此大的电流, 且实际电压也将低于 1.5 伏。如果电池足够大的话, 导线将会发热, 因为电能被转化成了热能。如果导线继续变得很热, 它将会发光甚至熔化。

大部分的电路都介于这两种极端情况之间。我们可以把它们统一表述为如下图所示。



上图中的那段折线对于电气工程师来说是表示电阻的符号。这里我们用它来表示电路中的电阻既不很小也不很大。

如果导线电阻较低的话，它将变热并且发光。这就是白炽灯发光的原理。通常，白炽灯泡公认的发明者是美国著名发明家，托马斯·阿尔瓦·爱迪生（Thomas Alva Edison, 1847-1931），但是这种观点是在他取得灯泡的专利之后（1879）被广为传播的，实际上在这个领域很多科学家都有过研究。

灯泡里面有一根很细的金属丝，我们称它为灯丝，一般情况下灯丝是用钨制作的。灯丝的一端连在灯泡底座的凸起上，另一端连到金属底座上，金属底座与凸起之间被绝缘层隔开。金属丝的电阻使它开始发热。如果暴露在空气中，钨丝将达到燃点并开始燃烧，但是在灯泡的真空泡室内，钨丝就会发出光亮。

大多数普通手电筒都用 2 节电池串联成一组，总的电压是 3 伏。手电筒中一般使用电阻为 4 欧的灯泡。因此，电流的大小等于 3 伏除以 4 欧，也就是 0.75 安，也可以写成 750 毫安。这意味着每秒钟有 4,680,000,000,000,000,000 个电子流经灯泡（如果使用欧姆表对手电筒灯泡的电阻进行实际测量，你将得到一个远远小于 4 欧的读数。这是因为钨的阻抗与它的温度有关，当灯泡温度升高并开始发光时，钨丝的阻抗也随之增加）。

你或许已经发现，买回家的灯泡上都标有一个固定的瓦特数。瓦特这个单位得名于詹姆斯·瓦特（James Watt, 1736-1819），他以对蒸汽机的研究而广为人知。瓦特是功率（ P ）的计量单位，它的计算公式如下：

$$P = E \times I$$

我们的手电筒是 3 伏，0.75 安的，这表明灯泡的功率应该是 2.25 瓦特。

你家里或许在使用 100 瓦的灯泡。它们被设计成能在 120 伏的电压下工作。因此，流经它们的电流的大小等于 100 瓦除以 120 伏，也就是 0.83 安。所以 100 瓦灯泡的电阻是 120 伏除以 0.83 安，即 144 欧姆。

好了，现在我们貌似已经把手电筒里里外外都分析了一遍——电池，导线还有灯泡。但是，我们还忘记了最重要的一部分！

是的，那就是开关。开关控制电路中电流是否接通。当开关被设置成允许电流通过时，我们称它的状态为“开”，或者“闭合”。当处在“关”或者“断开”状态时，开关不允许电流通过。（“闭合”和“断开”这两个词，在用来描述开关时，其含义与用来描述房门时恰好是相反的。一扇闭合的门会阻止所有试图穿过它的东西；一个闭合的开关却可以使电流导通。）

开关只能是闭合状态或断开状态。电流只能是有或者无。灯泡也只能是发光或不发光。就像莫尔斯和布莱叶发明的二进制码一样，这个简单的手电筒要么是开着的，要么是关着的。没有介于二者之间的状态。在后面的章节中，二进制码与电气电路之间的这种相似性将起到很大作用。

5

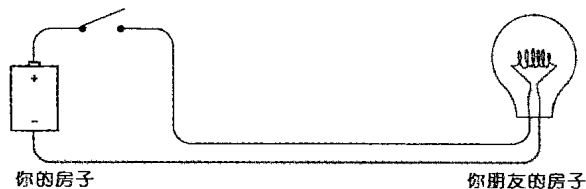
绕过拐角的通信

你 12 岁了。在一个伤感的日子，你最好的朋友跟随家人搬到别的镇子。从此以后你只能通过电话同他交谈了。但是电话交谈和深夜里用手电筒以莫尔斯码方法会谈是无法相比的。你另外的一个好朋友，也就是你的邻居，现在成了你新的密友。是时候该教给他一些莫尔斯码，让深夜的手电筒再次为你们闪烁了。

可是问题是，这位新朋友的卧室窗户和你卧室的窗户不是对着的。尽管两栋房子挨着，但是卧室窗户是朝向同一个方向的。除非你能想个办法，在室外摆上一面镜子，不然手电筒就不能用来夜谈了。

怎么办？

也许现在你已经懂得一些关于电学的知识了，所以你打算用电池、灯泡、开关和导线来自制一个“手电筒”。在第一次尝试中，你把电池还有开关在卧室中接好，然后从窗户引出两根导线，绕过围墙，接到你朋友的卧室里，在那里把它们接到一个灯泡上。



尽管图中只画了一节电池，不过实际应用中你也许要用两个。在以后的示意图中，下面的标志表示一个“关”状态（也称断开状态）的开关。



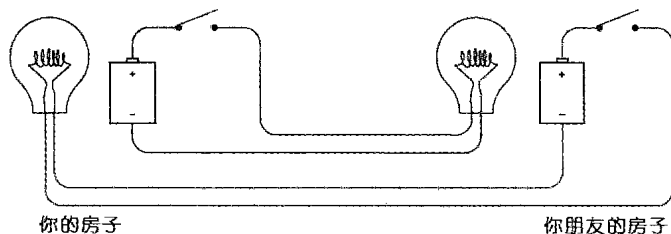
下图则表示开关是“开”的（也称作闭合状态）。



本章手电筒跟上一章中的手电筒的工作方式一样，尽管本章的手电筒中用来连接各个部件的导线比原来长了不少。当你把自己房间那端的开关闭合时，你朋友那儿的灯泡就会被点亮。

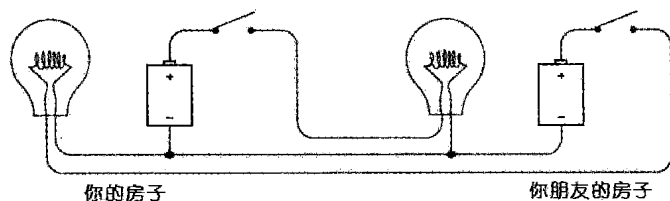


现在，你可以用莫尔斯码来发信息了。既然你已经成功地安装了这个“手电筒”，你就可以照样再安装另一套这样的“远距离”设备，好让你的朋友也能够给你发信息。



恭喜你！你已经架设好了一套双向电报系统！你可能注意到了，这个系统包含了两个相互独立但又完全相同的电路。理论上来说，在你给朋友发送信息的同时，他也可以给你发信息（不过同时阅读和发送电码对你的大脑来说或许是个挑战）。

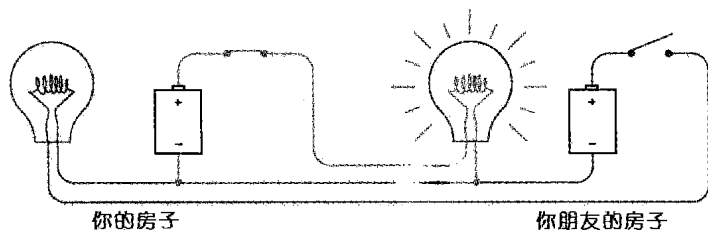
聪明的你也许可以采用如下方式把这套系统加以改进，这样可以节省 25%的导线。



注意，现在这两个电池的负极被连在一起。但是这两个回路（电池到开关到灯泡再到电池）依然是相互独立的，尽管现在它们看起来像连体婴儿一样。

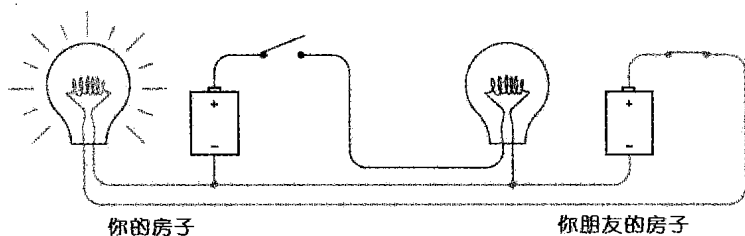
这种接线方式被称为公用连接（common）。这个电路的公用部分，从最左端的灯泡和电池的连接点开始，到最右端的灯泡与电池的连接处结束。我们在图中用两个小圆点把这部分连线标示了出来。

我们来进一步检查一下这个电路，以确保使用时不会有意外发生。首先，当你在自己这端闭合开关的时候，你朋友屋里的灯泡就会点亮。红色的线表示出了电路中电流流动的路径。

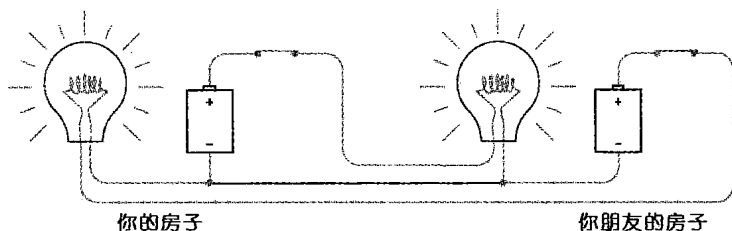


电路的其余部分没有电流通过，因为没有完整路径可以让电子构成回路。

当你没有发送信息，而你的朋友正在发送时，他房间里的开关控制了你房间里灯泡的亮灭。下图的红线仍然表示电流流经的路径。



当你和你的朋友同时发送信息时，有时两个开关都断开了，有时一个闭合而另一个断开，也有可能两个开关同时闭合。最后一种情况下，电路中电流的示意图如下图所示。



电路的公用部分没有电流通过。

我们通过公用线路把两个电路合成了一条电路。通过这种方式，把连通两栋房子所需的导线从 4 根减少到了 3 根，节约了 25% 的导线。

如果整个系统必须铺设很长的线路，可能还得绞尽脑汁再削减一根导线以进一步节约开支。遗憾的是，对于眼前这套使用 1.5 伏干电池和小灯泡的系统来说，这是不可行的。但如果我们把它们换成 100 伏的电池和大得多的灯泡，问题就迎刃而解了。

以下就是解决的思路：你不必非得用导线来完成电路的共用部分，你可以用其他的东西来代替导线。恰巧我们这儿有一个现成的大球，你可以用它来代替。这个大球直径近 7900 英里，由金属、岩石、水，以及有机质（其中大部分是没有生命的）组成。我们称这个巨大球体为“地球”。

上一章里，在讲导体的时候提到了银、铜和金，但没有提过岩石层和覆盖层。实际上，泥土并不是一个很好的导体，尽管有一些泥土（例如沼泽）的导电性比其他的（例如干沙）要好一些。但是我们知道导体有一条性质：截面越大导电性越好。一条很粗的导线，其导电性要远远好于一条细导线。这就是地球所拥有的优势。它实在是太大了。

要想用地球充当导体，可不是随便在西红柿地里插根线那么简单。你必须使用跟地球有充分接触的物体，也就是有很大表面积的导体。这儿有个不错的解决方案，即使用一个至少 8 英尺长、1/2 英寸粗的铜柱电极。它提供了与地球 150 平方英寸的接触面积。你可以用一个大锤子把这个电极砸进地里，然后在上面接上一根导线。或者，如果你家的水管是用铜做的，并且是从屋外的地下接过来的，那么你可以在水管上接上导线。

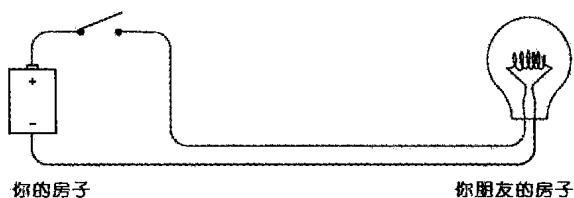
关于电流的接地，在英国人们称其为“earth”，在美国叫“ground”。“ground”这个词的含义有一些含混不清，因为它也经常用来表示我们前文中所说的“公用电路”。在本章中，除非特别指明，“ground”都表示物理接地。

在电路图中，人们用以下符号表示接地。

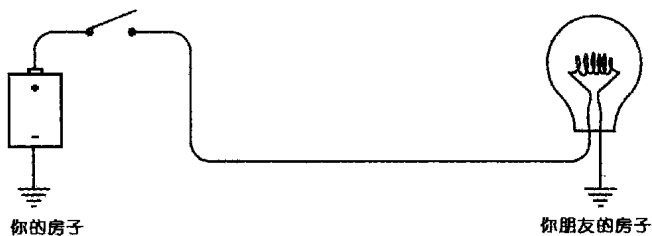


电气工程师们一般都会使用这个符号，因为他们不喜欢花时间去描画一个被埋在地下的 8 英尺长的铜柱。

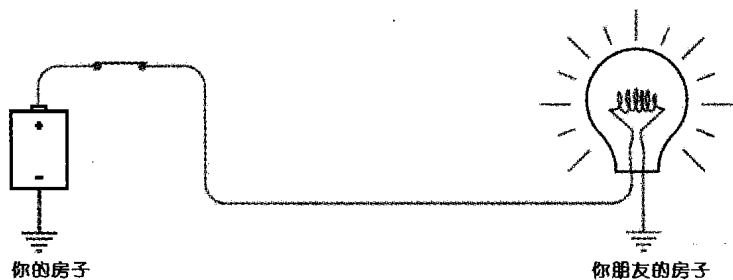
我们来看看新的电路是如何工作的。先从一个单向的电路开始分析。



如果你使用的是高压电池和大灯泡，你只需要在你和你朋友的房子之间接一根导线，因为可以把地球当成一条导线。



当你闭合开关时，电流就会按下图流动。



电子从你朋友房子的地下出发，经过灯泡、导线和你房间的开关，最后回到电池的正极。而电子最初是从电池的负极传入地下的。

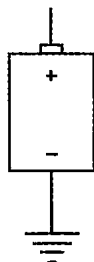
你或许还真的很想看到电子从埋在你家后院的 8 英尺长的铜柱进入地下，然后飞速通过大地到达埋在你朋友家后院的铜柱的情景。

然而每时每刻地球都在充当着全世界成千上万条电路的导线，想到这些，你可能会感到迷茫：电子怎么知道它要去什么地方？其实它们不知道。换一种描述地球的模式或许更恰当些。

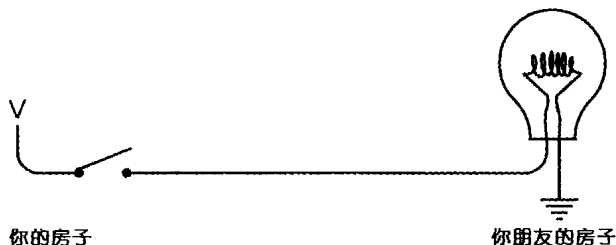
没错，地球是一个巨大的导体，但是我们也可以把它看做是电子的来源和储藏库。地球之于电子就恰如海洋之于水滴。地球是一个近乎无尽电子之源，同时也是一个无比庞大的电子池。

不过地球还是有一定的电阻的。所以当我们使用 1.5 伏干电池和小灯泡时，不能通过接地来节约我们所需的线路开支。对于低电压电池而言，地球的电阻实在是太高了。

你可能注意到，前面两幅图中所画的电池，其负极都接地了，如下图所示。



以后，我将不再画这个图例了。我将用大写字母“V”（表示电压）来代替它。因此单向的灯泡电报系统的电路示意图就变成了如下这个样子。

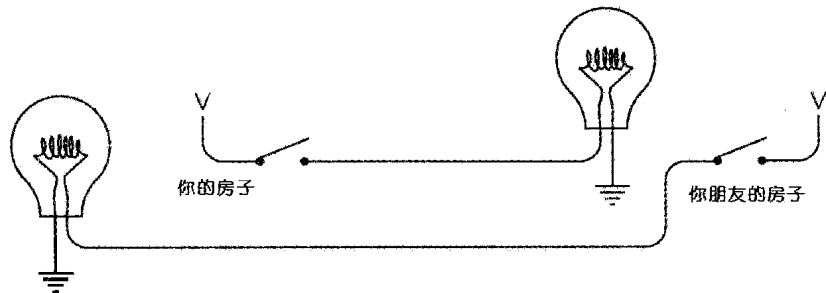


字母 V 是电压的意思，但是它也有吸尘器的意思。我们把 V 想象成一个电子吸尘器，然后把地面想象成电子的海洋。电子吸尘器通过电路把电子从地下拉出来，让它们沿设计好的线路开始工作（例如点亮灯泡）。

大地有时也被认为是零电势（zero potential）点。也就是说现在没有电压。电压——正如我之前介绍的——是电能做功的势，这与悬在空中的砖所潜藏的势能是类似的。零电势就像放置在地面上的砖一样——已经没有空间可以让它下落了。

在第 4 章中，我们最初注意到的几个问题之一便是电路是一条回路。不过我们的新电路看起来可不像条回路。实际上，它仍然是。你可以使用负极接地的电池来替换掉字母 V，然后把所有接地标志用线连起来。最后就会得到一张与本章开始处一模一样的电路图。

因此，在一对铜柱电极（或者自来水管）的帮助下，我们只用了两根导线，就冲破了你与你朋友家之间围墙的阻隔，构建了一个双向的莫尔斯码发送系统。



这条电路在功能上与之前的那个电路是完全一样的，而在之前那条电路中，我们使用了 3 条导线来穿越房子之间的围墙。

在本章中，我们已在通信的演变中迈出了重要一步。之前我们使用莫尔斯码交流时，必须要在视线直视的范围里，并且要保证在手电筒光线可以传播的距离之内。

但是使用导线，我们不仅可以构建出一个可以绕过拐角的、能够在视线之外的发报系统，而且我们自己再也无需受距离的限制。我们可以跨越成百上千英里来进行通信，只需要铺设足够长的线路即可。

不过还有个问题。尽管铜是很好的导体，但是它也不是完美的。线路越长，它们的电阻也就越大。电阻越大，线路中的电流就越少。电流越少，灯泡就越暗。

那么到底我们可以做出多长的导线呢？这要依实际情况而定。假如我们现在使用的是原来的 4 条导线的双向电路，而没有使用接地和公用电路，并且还用手电筒电池和小

灯泡。为了节约成本，也许你先从无线电室（Radio Shack，美国出售电器的连锁店）购买了一些 20 号规格的电话线，花费为每 100 英尺 9.99 美元。电话线一般是用来把扬声器连接到立体声音响系统上的。它有两个接头，因而对我们的电报系统来说，也是个不错的选择。如果你和你朋友的卧室之间的距离小于 50 英尺，这卷电话线就足够了。

导线的粗细使用美国线径标准（American Wire Gauge, AWG）进行度量。AWG 数值越小，导线越粗，电阻也就越小。你买的 20 号规格的电话线，其直径大约是 0.032 英寸，大约每 1000 英尺有 10 欧的电阻，也就是说在你们卧室间的往返距离——100 英尺左右，大约有 1 欧的电阻。

情况其实不错，但是如果我们需要铺设一英里的线路呢？导线的电阻将大于 100 欧。记得在上一章中提到过，我们的小灯泡电阻只有 4 欧姆。根据欧姆定律，可以很容易计算出电路中的电流已经不再是 0.75 安了（3 伏除以 4 欧），现在它将变得比 0.03 安还要小（3 伏除以 100 欧以上）。几乎可以肯定，这点电流不足以点亮灯泡。

使用粗一点的导线是一个不错的解决方案，但是那会比较昂贵。10 号规格线（无线电室用来作为汽车耦合线出售，其价格为每 35 英尺 11.99 美元，你需要两倍的长度，因为这种导线只有 1 个接口）大约有 0.1 英寸粗，不过它每 1000 英尺只有 1 欧的阻抗，也就是每英里 5 欧。

另一种解决方案是增加电压，使用更大电阻的灯泡。例如，一个能够照亮房间的 100 瓦灯泡，是设计成在 120 伏电压下工作的（美国市电电压），大约有 144 欧的电阻。导线的电阻对整个电路的影响将变得小许多。

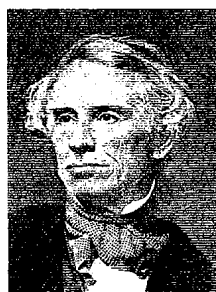
在 150 年前，人们在铺设第一个跨越美洲和欧洲的电报系统时，这些都是面临的问题。如果忽视了线路直径还有高电压的因素，电报线路将完全无法持续工作。根据设计方案，系统距离跨度的极限是 200 英里。这个长度与纽约和加利福尼亚间数千英里的距离相比，还是有很大差距的。

这个难题的解决方案——不是给手电筒的，而是给“滴滴答答”的近代电报系统的——尽管它只不过是是个很简陋的装置，但是正是基于这个装置，整个计算机系统才被构建出来。

6

电报机与继电器

萨缪尔·芬利·布里斯·莫尔斯 (Samuel Finley Breese Morse) 1791 年出生于马萨诸塞州的查尔斯顿镇。这座小镇曾是邦克山战役打响的地方，位于波士顿的东北部。莫尔斯出生那年，距美国宪法制定刚过两年，而当时乔治·华盛顿正处在他的第一个总统任期内；叶卡捷琳娜大帝正统治着俄国；路易十六和玛莉·安托瓦内特将在 2 年后的法国大革命中人头落地。然后在 1791 年，莫扎特完成了他最后一部歌剧——《魔笛》(The Magic Flute)，不久后在 35 岁时与世长辞。



莫尔斯在耶鲁大学深造，并在伦敦学习艺术。后来他成为了一名成功的画家。他的作品《拉法耶特将军》(General Lafayette, 1852 年)，现在还悬挂在纽约市政大厅。1836 年，他以独立候选人的身份参与竞选纽约市市长，并获得了 5.7% 的选票。他还是一个早期的摄影爱好者。莫尔斯接受路易斯·达盖尔 (Louis Daguerre) 的亲自指点，学习银板照相术，并且拍摄了美国最早的一些银板照片。在 1840 年，他把这项技术传授给了 17 岁的马修·布雷迪 (Mathew Brady)，而布雷迪后来与同事一起，完成了一组非常有纪念意义的关于美国内战、亚伯拉罕·林肯 (Abraham Lincoln)，还有萨缪尔·莫尔斯本人等的摄影作品。

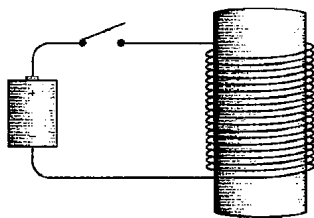
但是，这些只是他兼收并蓄职业生涯中的点缀而已。萨缪尔·莫尔斯之所以被现在的人们所熟知，还是因为他发明的电报机，以及以他名字命名的电码。

全球性即时通信对于我们来说已经司空见惯了，这项技术其实是在近代才得到发展的。回溯到 19 世纪早期，你也可以进行即时通信或者远距离通信，但是不能同时做到这两点。即时通信受声音传播距离的限制（没有扩音器可以用），或者受视野的限制（或许可以使用望远镜作为辅助工具）。使用信件可以进行更远距离的通信，但是寄信耗费的时间太多，并且需要马匹、火车或轮船。

莫尔斯的发明问世前的几十年里，人们为了提高远距离通信的速度，做过很多尝试。技术上比较简单的方法是，雇用一些人站在山上，作为中继系统，挥旗发出旗语。而在技术上稍复杂的解决方案是，使用带有机械臂的大型装置，代替人做挥旗的工作。

“电报”（telegraph，字面意思就是“远距离书写”）这个想法在 19 世纪早期就出现了，而且在萨缪尔·莫尔斯 1832 年开始实验之前，其他的发明家就已经开始研究它了。理论上说来，电报机的原理是很简单的：在线路的这一端采取一些措施，使线路的另一端发生某种变化。这恰好与我们上一章中用手电筒远距离发送信息所用到的方法很一致。不过呢，莫尔斯先生不会用灯泡作为他的信号发生装置了，因为最早的可使用的电灯泡到 1879 年才被发明出来。作为替代手段，莫尔斯利用了电磁（electromagnetism）现象。

如果你手头有一根铁棒，那么在上面用细导线绕几百圈，然后在导线上接通电流，铁棒就变成了一块磁铁。现在它可以吸引其他的铁块和钢块（电磁铁上缠绕足够多的细导线，会产生足够强的电阻，能防止电磁铁产生短路现象）。断开电流，铁棒将丧失磁性。



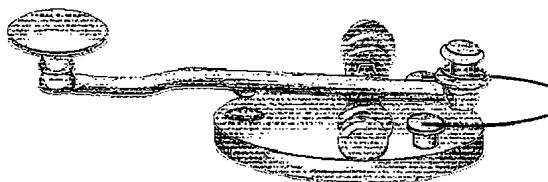
电磁铁是电报机的基础。在线路的一端闭合或断开开关，可以使线路另一端的电磁铁有所动作。

实际上，莫尔斯的第一个电报机比后来演化出的版本要复杂。莫尔斯认为，发报系

统应该确实能在纸上写出些什么东西，或者就像计算机用户后来描述的那样，“输出一份硬拷贝。”当然，电报机输出的不一定非得是单词，因为那样做就太过复杂了。但是不管是杂乱无章的线条还是点和划，在纸上总应该写些东西。注意，莫尔斯现在一头扎进了一个需要纸张和阅读的模式，这很像瓦伦丁·霍伊（Valentin Haüy）的观点——盲人用的书应该印有凸起的字母。

尽管萨缪尔·莫尔斯在 1836 年通知过专利局，他成功发明了电报机，但是直到 1843 年，他才说服美国国会，为其创建了一个公共基金。1844 年 5 月 24 日，这是历史性的一天，当华盛顿特区和马里兰州巴尔迪摩市之间的电报线路架设完成时，一条信息被成功地传递，内容是圣经中的句子：“What hath God wrought!”

传统电报机中用来发送信息的电键，其外形如下图所示。



它虽然外表奇特，其实只是一个被设计成有“最大开闭速度”的开关而已。如果需要长时间使用电键，最舒适的方法是，用拇指，食指和中指握住手柄，轻击它使其上下移动。保持电键的按下状态一小段时间，就会产生一个“点”的莫尔斯码。按下状态保持的时间更长一些就会产生一个“划”的莫尔斯码。

线路的另一端是一个接收器，它主要是由一块电磁铁拉动一根金属杆构成的。最初，电磁铁控制的是一只钢笔。有一个装置通过使用一个压紧的弹簧来拉动一卷纸经过设备，与电磁铁连接着的钢笔就会弹起或落下，在纸上画出点和划。能读懂莫尔斯电码的人员就可以把这些“点”和“划”译成字母和单词了。

当然，我们人类是个懒惰的物种，电报操作员们很快发现，他们可以很容易地通过听钢笔弹起和落下的声音来翻译电码。在传统电报机中的“发声器”的帮助下，钢笔最终被废弃，整个装置看起来如下图所示。