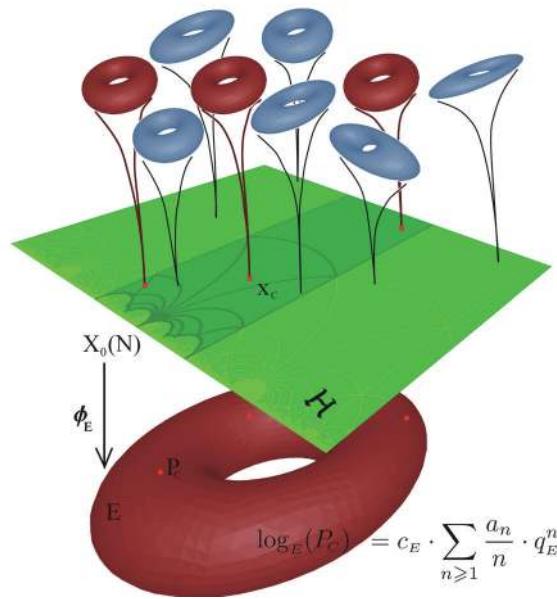


# 浅说椭圆曲线

陆俊



## 一、费马先生的金蛋：椭圆曲线

在所有律师里面数学最好的是谁？毫无疑问是法国的费马（Pierre de Fermat）——一位充满传奇色彩的业余数学家。他在数学领域做了许多重要的开创性工作，足以媲美任何同时代的数学家。至今，我们还常常能在数学课本中见到他的名字。

比如说到解析几何，很多人只知道笛卡尔的大名，殊不知费马也是解析几何的创始人。他早就用坐标方法（即方程）去研究几何图形的性质。费马首先指出一次方程。

$$ax+by+c=0.$$

可以表示直线。接着，他注意到二次方程可以表示圆锥曲线（即椭圆、双曲线和抛物线），并且知道如何用坐标变换研究它们的一般形式，这正是中学时代经常折磨我们的玩意儿。



费马 (1601-1665)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (\text{椭圆})$$

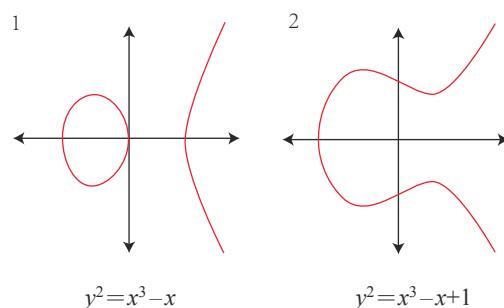
$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (\text{双曲线})$$

$$y^2 = ax \quad (\text{抛物线})$$

如果你是费马，有了这些发现之后，很自然会去思考三次方程定义的曲线，对不对？费马当然也会这么想。首先，在一个合适的坐标变换后，大多数三次方程可以写成标准形式

$$y^2 = x^3 + ax + b,$$

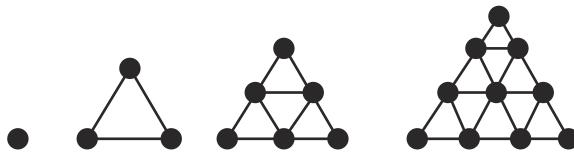
其中系数  $a, b$  满足  $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ ，这个方程描绘出来的曲线就叫做椭圆曲线。后面我们再介绍不满足这个条件的曲线。下面的两张图都是椭圆曲线



费马的许多研究都围绕着椭圆曲线。让我们循着费马的轨迹，一起来欣赏一下这些有趣的工作（有兴趣的读者可以参看加藤和也等人写的《数论 I：Fermat 的梦想和类域论》）。

### (A) 立方数与三角数

所谓三角数，就是下面这类等边三角形上的格点个数：  
1, 3, 6, 10, 15, ……。



你很容易猜出三角数的一般公式是  $n(n+1)/2$ 。

费马叙述了以下几个有趣的结果：

(1) 除了 1 之外，任何三角数都不可能是立方数。用方程的语言，就是说

$$\frac{y(y+1)}{2} = x^3$$

除了  $(x, y) = (1, 1)$  之外没有其他正整数解。上面这个方程描绘的曲线是椭圆曲线——当然你需要做一些坐标变换才能变成标准型。

(2) 一个立方数减去 2 不可能是平方数，除非是以下特例： $5^2 = 3^3 - 2$ . 写成方程的话，就是

$$y^2 = x^3 - 2$$

仅有组正整数解  $(x, y) = (3, 5)$ 。这方程描绘的曲线当然还是椭圆曲线。

(3) 一个立方数减去 4 不可能是平方数，除非是以下特例： $2^2 = 2^3 - 4, 11^2 = 5^3 - 4$ 。也就是说方程

$$y^2 = x^3 - 4$$

仅有两个整数解  $(x, y) = (2, 2)$  和  $(5, 11)$ 。上面的方程仍然描绘了椭圆曲线。

### (B) 直角三角形与同余数

所谓的同余数，来自于以下经典的数学问题。

(同余数问题) 给定正整数  $n$ ，是否存在直角三角形，使得三条边都是有理数，并且面积恰好是  $n$ ? 如果存在这样的三角形，就称  $n$  是同余数。

费马在丢番图《数论》的空白处做的批注中叙述了这样的结果：

$n = 1, 2$  不可能是同余数。

同余数问题由来已久，至今仍未彻底解决。目前我们已知的最前面的同余数是

5, 6, 7, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 30, 31, 34,  
37, 38, 39, 41, 45, 46, 47

同余数问题等价于求解正有理数  $(a, b, c)$  满足：

$$a^2 + b^2 = c^2, \quad n = \frac{ab}{2}.$$

如果我们令

$$x = \frac{n(a+c)}{b}, \quad y = \frac{2n^2(a+b)}{b^2},$$

则得

$$y^2 = x^3 - n^2 x.$$

这个方程再一次向我们呈现了椭圆曲线！显然  $(x, y) = (0, 0)$ ,  $(n, 0)$ ,  $(-n, 0)$  是它的有理数解。正整数  $n$  是否是同余数，取决于上面的方程还有没有其他有理数解。

费马的另一个结论说：

假如  $n$  是同余数，那么上面的椭圆曲线方程应该还有无限多个有理数解。

例如，因为 5 是同余数，所以椭圆曲线方程  $y^2 = x^3 - 25x$  就有无限多个有理数解。

一般说来，判断一条椭圆曲线的方程是否有无限多个有理数解，是一个困难的问题。这个问题涉及到数学上最著名的猜想之一——BSD 猜想。这个重要的猜想曾作为千禧年七大数学猜想为世人所知，吸引了许多数学家为之奋斗。它将数学中很多深刻的理论分支都联系在一起。如果能解决它，那么数学的发展必将会飞跃一大步。

### (C) 费马大定理

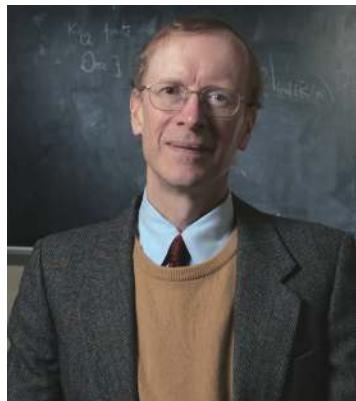
费马曾经在丢番图的书的批注中提出如下的“结论”（称为费马猜想、费马的最后定理、费马大定理）：

以下方程

$$X^n + Y^n = Z^n \quad (n > 2), \quad XYZ \neq 0$$

没有整数解  $(X, Y, Z)$ .

费马自己证明了  $n = 4$  的情形，并声称找到了一种巧妙的方法能够解决一般情形。但是他并没有告诉人们一般情形



怀尔斯 (1953-)

证明是怎样的。此后的几百年，有许许多多优秀的数学家致力于证明这个结论，但他们的努力都失败了。直到 1995 年前后，才由数学家怀尔斯 (Andrew Wiles) 彻底解决。

虽然许多人证明费马猜想的努力都未获成功，但是他们的工作却在很大程度上促进了各个数学分支的发展，极大地丰富了数学世界的内容。因此有人把费马猜想比喻作“一只会生金蛋的鸡”，实在是非常地准确。

如今回过头来看，我们不得不问：对于如此之难的数学问题，为何费马会声称自己找到了证明？到底是费马跟我们开了玩笑，还是上帝跟费马开了玩笑？这里不做探讨了。我们想要告诉大家的是，费马猜想和椭圆曲线的关系是极为密切的。从某个方面说，椭圆曲线是不折不扣的“金蛋”！

让我们来看几个具体的例子。

例 1： $X^3 + Y^3 = Z^3$ .

这个特殊情形由高斯和欧拉分别解决。欧拉的证明极为繁琐，相比之下高斯的方法不但简洁，而且极富启发性。我们这里不打算介绍证明，有兴趣的读者可以参看 H. 德里《100 个著名初等数学问题》一书。

让我们做这样的初等变换：

$$x = \frac{12Z}{X+Y}, \quad y = \frac{36(X-Y)}{X+Y}.$$

将上式代入费马方程即得

$$y^3 = x^3 - 432.$$

瞧，这又是椭圆曲线！因为我们现在已经知道原来的方程没有非平凡解（所谓平凡解，就是允许  $X, Y, Z$  其中一个数是零），所以这相当于说上面的椭圆曲线方程只有显然的有理数解  $(12, 36)$  和  $(12, -36)$ 。

例 2： $X^4 + Y^4 = Z^4$ .

费马利用无穷递降法证明其无平凡解。它也可以通过以下初等变换变成椭圆曲线：

$$x = \frac{2(Y^2 + Z^2)}{X^2}, \quad y = \frac{4Y(Y^2 + Z^2)}{X^3}.$$

代入原方程即得一条椭圆曲线

$$y^2 = x^3 - 4x.$$

它仅有  $(0,0), (2,0)$  和  $(-2,0)$  三个有理数解。我们也可以用另一种方法得到椭圆曲线。令  $x = Z^2 / Y^2, y = X^2Z / Y^3$ ，这就得到新的椭圆曲线

$$y^2 = x^3 - x.$$

例 3： $X^n + Y^n = Z^n, n$  是素数（所谓素数，就是指不能分解成两个更小的正整数的乘积的正整数）。

假设  $(X, Y, Z) = (a, b, c)$  是一组非平凡解。此时人们构造了椭圆曲线（它不是标准方程）

$$y^2 = x(x+a^n)(x-b^n).$$

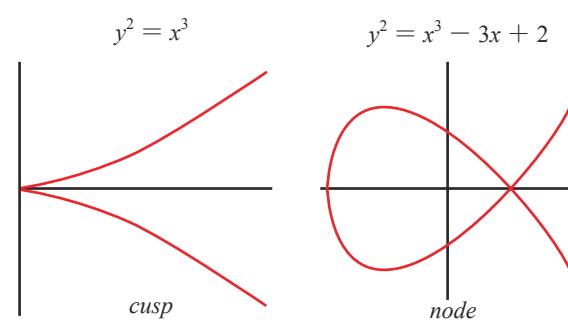
这条椭圆曲线称作弗雷曲线 (Frey Curve)。里贝特 (Kenneth Alan Ribet) 于 1986 年证明该曲线不能是模曲线（这里我们不解释此概念）。而另一方面怀尔斯于 1995 年证明谷山 - 志村猜想 (Taniyama-Shimura conjecture)，即任何椭圆曲线都是模曲线，这就等于证明费马方程无非平凡解。

如果  $n$  是大于 4 的合数，上面的几类例子可以很容易地推出：此时的费马方程也无非平凡解。限于篇幅，我们不再详细介绍。有兴趣的读者可以参看辛格所著的《费马大定理》或其他相关的科普书籍。

## 二、退化的椭圆曲线

上面我们定义的椭圆曲线方程  $y^2 = x^3 + ax + b$  要求系数满足  $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ 。

那么假如  $4a^3 + 27b^2 = 0$ ，我们会得到什么样的三次方程的曲线呢？



(1) 带结点的有理曲线 ( $a, b$  不全为零) 此时图形如上图图右。

大家可以看到，曲线上有一个自交点。在这个交点附近看曲线类似于一个十字架，因此我们称之为结点 (node)。这里“有理曲线”一词可以粗略理解为指直线或圆锥曲线的意思。上述曲线图形可以差不多看成是这条有理曲线打了一个结——后面我们会解释这一点。

(2) 带尖点的有理曲线 ( $a=b=0$ ) 此时图形示意图如上图左。

这条曲线有一个尖锐的点，称作尖点 (cusp)。顾名思义，这条曲线就好比是有理曲线上捏出一个尖点。

除了以上两种曲线，我们还把以下几类曲线都统称为退化的椭圆曲线：

(3) 三条直线的并集（即三条一次曲线的并集），

(4) 一条圆锥曲线和一条直线的并集（即一条二次曲线和一条一次曲线的并集）。

从这个泛化概念上看，我们可以把直线和圆锥曲线也看作是椭圆曲线的一个部分。因此，可以预见，圆锥曲线的很多美妙性质应该都来自于椭圆曲线。事实正是如此。

### 三、名不副实：为什么叫“椭圆曲线”？

椭圆曲线的图形和椭圆显然没什么关系（见前面的图）那为什么我们要称之为“椭圆曲线”呢？

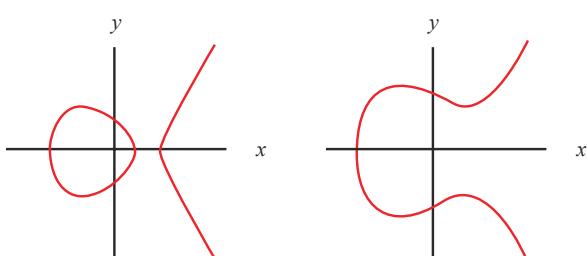
原来，当初人们想用微积分计算椭圆的周长（圆的周长大家都会求）。通过一定的积分技巧，最终要求出以下类型的积分：

$$\int_a^b \frac{dx}{\sqrt{x^3 + ax + b}}$$

其中分母的函数项  $y = \sqrt{x^3 + ax + b}$  两边平方一下恰好就是椭圆曲线的方程。这就是为什么椭圆曲线的名字里包含“椭圆”二字。顺便说一下，上述积分是无法用初等函数的表达式计算出来的；而其本质原因和椭圆曲线的几何性质密切相关。

### 四、海底冰山：椭圆曲线隐藏的部分

回顾一下，椭圆曲线的两个例子

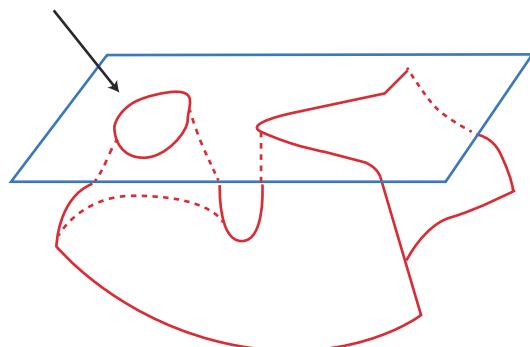


从第一张图，我们可以看到椭圆曲线的图形似乎可以分离成两个不相交的分支，第二张图则只有一个分支。是否还有许多其他的类型呢？确实如此。牛顿曾经对椭圆曲线做了很细致的分类，将它们分成了数十种类型。

为什么直线和圆锥曲线只有区区几种类型，而椭圆曲线种类一下子增加很多呢？让我们先想象一个情景：在宽阔的海平面上露出一处礁石。如果海平面降低的话，本来的一座小山可能会变成许多座互不相连的小山；随着海平面下降，小山们变成了一座座小岛，有些本来不相连的岛甚至可能会连接起来。假如我们抽干所有的水，那么你会发现所有的岛其实只不过是同一块陆地的不同部分。

其实我们要解释的问题和上述比喻完全一样。因为通常考虑的曲线上的点  $(x, y)$  都是实数点，即  $x, y$  是实数。假如我们允许  $x, y$  取复数，那么椭圆曲线上就多出了许许多多复数点。想象一下，实数坐标平面好比我们的海平面，包括全部复数点和实数点的椭圆曲线好比是陆地，其中露在海平面上的部分只是实数点（见以下示意图）。

实平面上看到的曲线图形



隐藏在实平面外的部分

这样一来，你看到的椭圆曲线实图形其实只是整个椭圆曲线中的很少一部分，大部分都隐藏在实坐标平面背后。海面上的岛屿千差万别，但实际上无非是同一块陆地的不同部分。这就是我们所要的答案——有点类似于“盲人摸象”的典故。

上面的讨论告诉我们，如果仅考虑实数情形的话，我们其实损失掉了很多有用的几何信息。仅考虑实数平面图形显然是一个不必要的思维枷锁。因此我们完全可以放弃掉这一假设，即允许  $x, y$  取复数。这样一来我们得到的椭圆曲线要比原来的丰富了许多！当然，为了以后画图方便，人们仍然习惯于用实数平面的图形作为椭圆曲线的示意图——上一节的几张图都是这样。以后我们谈到椭圆曲线就默认它是在复数坐标上的。

接下去的问题就来了：这样的椭圆曲线的图形到底是什么呢？它当然不再是我们前面看到的实曲线的样子了。事实上，它是四维空间里的一个环面！所谓环面，就是指如下的救生圈：



首先我们说明，为什么它是四维空间里的。因为此时  $x$  和  $y$  是复数，所以我们可以写成实虚部表达式

$$x = s + t\sqrt{-1}, \quad y = u + v\sqrt{-1},$$

这样，原来的复坐标  $(x, y)$  就可以替换成四维空间坐标  $(s, t, u, v)$ 。因此椭圆曲线上点的轨迹肯定在这四维空间里。那么为什么它是曲面而不是曲线呢？这是因为将  $x, y$  的实虚部表达式代入方程

$$y^2 = x^3 + ax + b,$$

整理后方程可以写成实部和虚部两部分

$$U(s, t, u, v) + V(s, t, u, v)\sqrt{-1} = 0.$$

这相当于说， $s, t, u, v$  要满足两个方程

$$U = V = 0.$$

四个变量满足两个方程，这就意味着其中有两个变量是独立的，它们可以表达出剩下的两个变量。从几何上说，这就是指椭圆曲线的图形是个曲面。

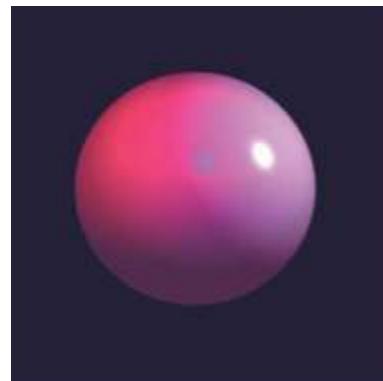
至于为什么它是环面，这可不是三言两语能说清楚的。它涉及到复变函数和拓扑学的一些简单技巧，我们这里不再详细解释了。有兴趣的读者可以参看伏·巴尔佳斯基写的一本极有趣味的科普书——《拓扑学奇趣》。

尽管扩充到复数域上的椭圆曲线是环面，但是我们仍然称呼它为“曲线”，毕竟它在实数坐标平面上的图形仍然是曲线——示意图仍以实图形为标准。我们也可以把它想象成是复数坐标下的“曲线”，即复一维图形。

## 五、举一反三：退化的椭圆曲线是什么图形

好奇的读者可能会问：按照上面的办法，我们也能够把直线和圆锥曲线扩充到复数情形，那么它们是四维空间中的

什么图形呢？答案是：它们都是球面。（作者按：它们是球面的原因来自于所谓的球极投影，以后将撰文介绍，这里不再详细解释了）

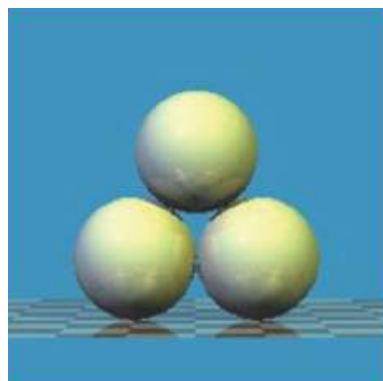


既然如此，直线和圆锥曲线岂不是一样了？事实正是如此！我们平时之所以看着它们觉得不一样，除了上面说的原因之外，还有一个原因，就是我们没有把曲线上的无穷远处的点放进曲线——射影几何中这样的无穷远点都是作为通常的点来看待的。一旦我们把这些所谓的“虚无飘渺”的无穷远处的点加进去，你就会发现它们完全是一样的。事实上，上一节的讨论中，我们也默认了这一点。

很显然，球面和环面有着本质的差别，环面中间有一个洞眼而球面却没有——这种洞眼数学上叫做亏格。因此椭圆曲线要比圆锥曲线及直线复杂得多。前面我们讲的椭圆周长积分——实际上可以看成环面上的积分。这里插一句，我们古典的数学分析实际上都是在平直的空间上（直线、平面……）建立微积分的理论。因此我们当然也可以在弯曲的空间（环面）上建立微积分。

聪明的读者一定也会想到，退化的椭圆曲线扩充到复数情形，又是什么图形呢？比如

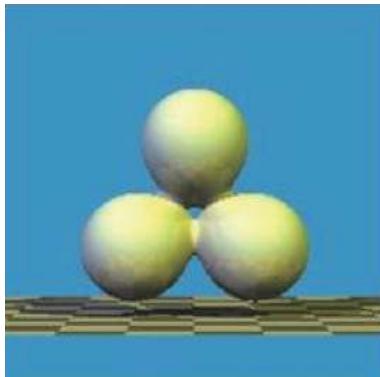
(1) 三条直线的并集（如图）



因为每条直线相当于球面，所以三条直线相当于三个球。

又因为我们把无穷远处的点考虑进来了，因此任何两条直线都要相交，这样就得到上图的样子。（作者按：其实还有三条直线交于一点的情形，这里我们没有画出来）

为什么我们说这样的图形是退化的椭圆曲线呢？我们将上面的三个球相切点替换成很细小的管子，将这三个球内部连通起来，



然后对这个容器内充气，这就膨胀成一个环面咯！



你把这个过程倒过来放，就是我们通常说的退化了：从环面退化成三个球。

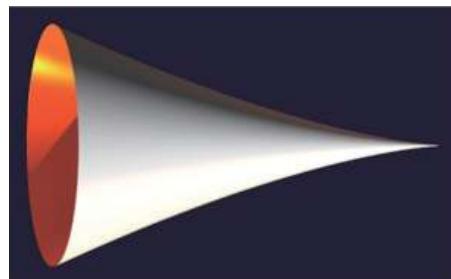
(2) 带结点的有理曲线



这看上去就像香蕉，只不过两头接在一起——接触点

就是我们说的结点。显然，当你弹开这个结点，并对香蕉充气，就得到球面了——也就是有理曲线。

(3) 带尖点的有理曲线（下图为尖点附近的局部图）



## 六、遗传基因：椭圆曲线的 j 不变量

前面我们给的椭圆曲线方程，是所谓的魏尔斯特拉斯标准方程（这就类似于椭圆、双曲线、抛物线的标准方程） $y^2 = x^3 + ax + b$ 。

如果一条椭圆曲线能够在坐标变换下，变成另一条椭圆曲线（即方程在坐标变换下可以从一个变到另一个），我们就认为这两条椭圆曲线是相同的——这就类似于平面几何中两个三角形相似。

一个有趣的问题是：我们如何能够从方程直接判断出两条椭圆曲线是否相同呢？答案出乎意料地简单。为此我们引进一个数值，这个数值就好比椭圆曲线的基因，它完全确定了椭圆曲线的性状。

考虑椭圆曲线 E 的魏尔斯特拉斯标准方程如上，我们定义该椭圆曲线的 j- 不变量

$$j(E) = \frac{4a^3}{4a^3 + 27b^2}.$$

因为椭圆曲线的定义中就要求上述分母  $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ ，所以上面式子是有意义的。

我们现在给出上述问题的回答：

两条椭圆曲线相同的充分必要条件就是它们的 j 不变量相等。

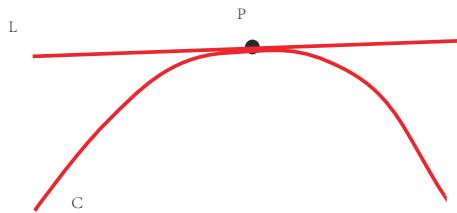
有了这个结论，你可以轻松判断任何两个椭圆曲线是否相同，不妨找几个例子试试吧。

## 七、椭圆曲线的拐点

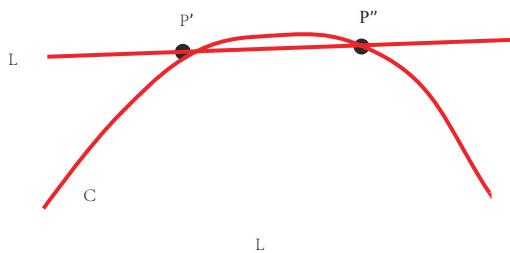
在古典解析几何中，人们关心曲线上每个点的切线，比如圆的切线等等。我们首先想要知道如何说明切线和曲线相

切的密切程度。这里有个很简单的直观方法。

考虑下图曲线  $C$  在点  $p$  处的切线  $L$



现在我们稍稍扰动一下切线  $L$ ，此时  $L$  不再和  $C$  相切，而是相交若干个交点，这些交点当然彼此靠得很近（见下面的示意图）。这些交点的个数，我们称之为切线与  $C$  在  $p$  处的相切数。这个数值是和  $L$  的扰动方式没有关系的（比如下图的相切数是 2）。



因此切点好比是这样的一些交点彼此趋近最终重合到一起得到的。具体言之，假设  $p$  处的相切数是  $n$ ，我们有时就说切线  $L$  与  $C$  在  $p$  处的切点是由  $n$  个重合点构成的。

一条曲线上的大部分点的相切数都是 2，但是有一部分点的相切数至少是 3。这样的点我们称其为拐点。

椭圆曲线上有且仅有 9 个拐点！并且这些拐点相切数恰好都是 3。

还有更有趣的结论：

存在 12 条直线过这 9 个拐点，并且每条直线经过其中 3 个拐点。

此外，任何两个拐点的连线必定经过第三个拐点。

请注意：圆锥曲线不存在拐点。

## 八、椭圆曲线的交点

上面所有的讨论都集中在一条椭圆曲线上。现在让我们考虑两条椭圆曲线  $E, E'$ 。我们问  $E$  和  $E'$  一共有多少个交

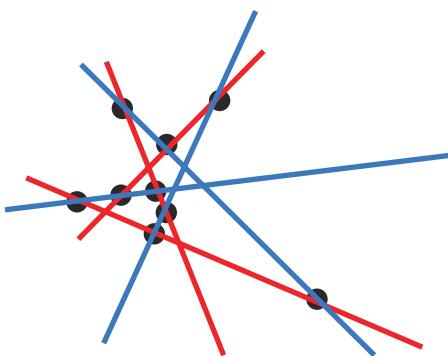
点？（切点作为重合点来重复计算）

在平面几何中，两条直线相交一个点（平行线相交在无穷远点）。两条圆锥曲线相交四个点（在复数坐标意义下）。

两条椭圆曲线  $E$  和  $E'$  总共相交 9 个点！

请注意，这个结论是和椭圆曲线的形状、位置完全无关的。

我们可以用一种直观的方式来说明这件看似神奇的事。前面我们说到，椭圆曲线——也就是环面——可以退化成三条直线的并集——也就是三个两两相切的球。现在让我们想象一下  $E$  和  $E'$  分别慢慢地各自退化成 3 条直线（示意图中的蓝线和红线分别表示  $E, E'$  的退化直线）。



在这个退化过程中，交点个数是不变的——因为你可以假设退化的地方没有碰到交点。这样一来，为了计算  $E$  和  $E'$  的交点个数，我们只需要数一数上图中蓝线和红线的交点个数就行了。

这个证明很有启发性。假如你想考虑任何两条曲线（方程次数可以超过三）的交点个数，用类似方法很容易得到一个优美的答案——这就是著名的贝祖定理（Bézout's theorem）。有兴趣的读者可以自己试着寻找一下答案是什么。

这里我们罗列几条这样的结论：

- (1) 一条椭圆曲线和一条圆锥曲线相交 6 个点。
- (2) 一条椭圆曲线和一条直线相交 3 个点。特别地，这就是为什么椭圆曲线拐点处的切线有相切数 3。

再来一个更神奇的结论——夏莱定理（Chasles' theorem）

假设第三条椭圆曲线经过椭圆曲线  $E$  和  $E'$  的其中 8 个交点，那么它必定也穿过剩下的第九个点！

这个定理异常地彪悍，因为它能推出许许多多平面射影几何中有关共点共线的著名定理。

我们下一节再来展示它的这一系列应用。

证明夏莱定理可没上面的贝祖定理那么简单了——尽管证明也是初等的。事实上，这个定理只不过是诺特定理（Noether's theorem）的一个特殊情形而已。这里的诺特可不是女数学家艾米·诺特（Emmy Noether），而是她的父亲，代数几何古典学派的重要奠基人之一——马克思·诺特（Max Noether）。



马克思·诺特 (1844-1921)



艾米·诺特 (1882-1935)

这里请允许我再多说两句：一条曲线是否通过另外两条曲线的交点这类性质称作凯莱-巴卡洛克性质（Cayley-Bacharach Theorem）性质，这种性质在平面几何中就是我们说的共点共线问题。这些性质背后隐藏着很深刻数学背景，和许多重要的数学理论密切关联。

## 九、夏莱定理的威力

其实夏莱定理很少在平面几何中被提及。这是因为平面几何主要关心直线和圆锥曲线的问题，不会涉及椭圆曲

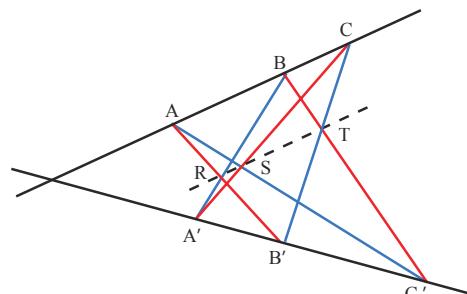
线。但是我们知道，椭圆曲线可以退化到直线和圆锥曲线。这种退化不会影响上一节的所有结论，因此我们可以将这个定理改头换面与射影几何对偶原则配合，由此演变出许多著名的平面几何定理。这里试举几例。

### 巴布斯定理 ( Pappus's theorem )

设  $A, B, C$  三点共线， $A', B', C'$  也三点共线。考虑以下各交点

$$R = \overline{BA'} \cap \overline{B'A}, \quad S = \overline{AC'} \cap \overline{A'C}, \\ T = \overline{CB'} \cap \overline{C'B},$$

则  $R, S, T$  三点共线。



事实上，我们只需要将夏莱定理直接应用到如下 3 条退化三次曲线上（它们各自由 3 条直线构成）即得出结论：

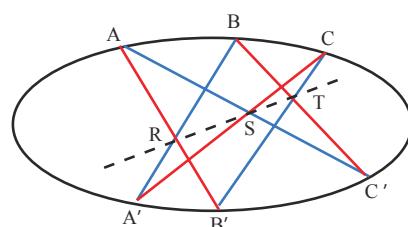
$$C = \overline{CA'} + \overline{AB} + \overline{BC'}, \quad D = \overline{BA'} + \overline{AC} + \overline{CB'}, \\ H = \overline{AC} + \overline{A'C'} + \overline{RS}.$$

### 帕斯卡定理 ( Pascal's theorem )

设  $A, B, C$  及  $A', B', C'$  在同一椭圆  $W$  上。考虑以下个交点

$$R = \overline{BA'} \cap \overline{B'A}, \quad S = \overline{AC'} \cap \overline{A'C}, \\ T = \overline{CB'} \cap \overline{C'B},$$

则  $R, S, T$  三点共线。



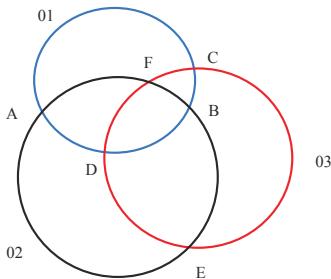
同样地，我们考虑 3 条退化的椭圆曲线：

$$C = \overline{CA'} + \overline{AB} + \overline{BC'}, \quad D = \overline{BA'} + \overline{AC} + \overline{CB'}, \\ H = W + \overline{RS},$$

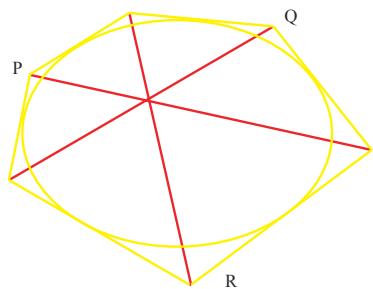
并应用夏莱定理即可证明该结论。

### 三弦共点定理

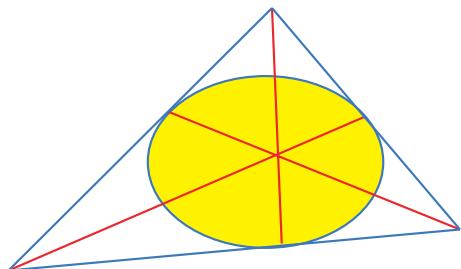
设三个圆  $O_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 两两相交，彼此之间的公共弦分别记为  $\overline{AB}, \overline{CD}, \overline{EF}$ ，那么这三条弦必交于一点。



**布列安桑定理 (Brianchon's theorem)** 椭圆的外切六边形的三条对角线共点。

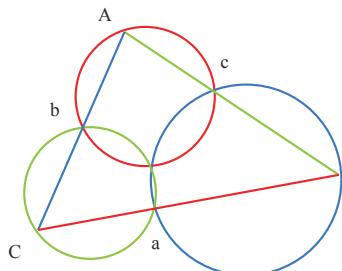


以下是它的退化情形（将顶角  $P, Q, R$  退化成 180 度）



### 密克定理 (Miquel's theorem)

三角形  $ABC$  三边各取一点  $a, b, c$ ，分别作圆  $Abc, Bac, Cab$ ，则这三个圆相交于一点。这个点称作密克点。)



### 十、结束语

我们这篇文章就写到这里。这些有趣的性质只不过刚刚揭开了椭圆曲线的冰山一角。它们只是整个椭圆曲线理论中的序曲罢了。将来有机会，我将继续介绍椭圆曲线的其他有趣内容。我在这里首先感谢谈胜利教授曾经提供的椭圆曲线演讲稿和硕士生基础课《代数几何基础》讲义草稿——许多图片和素材都取自于它们。其次要感谢洪渊老师、梁科老师和顾琦老师的指点与鼓励。在这里，我还要特别感谢洪渊老师。他在百忙之中抽空与我详细耐心地讨论，提出了很多重要的修改建议，使我对科普写作有了更多的理解和认识。



作者简介：陆俊，华东师范大学数学系讲师，代数几何方向，师从谈胜利及陈志杰教授。