

29

Bézier curve

贝塞尔曲线

计算机图形学中特别重要的参数曲线



我要扼住命运的喉咙。

I shall seize fate by the throat.

—— 路德维希·范·贝多芬 (Ludwig van Beethoven) | 德意志作曲家、钢琴演奏家 | 1770 ~ 1827



- ◀ `math.factorial()` 计算给定整数的阶乘
- ◀ `numpy.column_stack()` 将两个矩阵按列合并
- ◀ `numpy.interp()` 给定的一维数组上进行线性插值
- ◀ `numpy.random.rand()` 用于生成指定形状的随机数组，随机数服从 0 到 1 之间的均匀分布
- ◀ `random.random()` 生成一个介于 0 到 1 之间的随机浮点数，包括 0 但不包括 1
- ◀ `scipy.interpolate.interp1d()` 一维插值
- ◀ `scipy.interpolate.interp2d()` 二维插值

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

29.1 贝塞尔曲线

贝塞尔曲线 (Bézier curve) 是一种常用于计算机图形学中的数学曲线。它由法国工程师皮埃尔·贝塞尔 (Pierre Bézier) 在 19 世纪中叶发明。

贝塞尔曲线最初是为了描述船只的水线曲线。后来，贝塞尔曲线被广泛应用于计算机图形学中，用于绘制平滑曲线，如字体、二维图形和三维模型等。多数矢量图形都离不开贝塞尔曲线。

贝塞尔曲线是由一组控制点和一个阶数确定的曲线。控制点是定义曲线形状的关键点，阶数是定义贝塞尔曲线逼近实际曲线的程度的参数。通常情况下，阶数等于控制点的数量减 1。

贝塞尔曲线的特点是它们具有局部控制性，这意味着通过调整单个控制点的位置，可以轻松地改变曲线的形状。此外，它们也具有平滑的曲线形状和良好的数学性质。Adobe Photoshop、Illustrator 中的钢笔曲线绘图工具实际上使用的便是贝塞尔曲线。

本质上来讲，贝塞尔曲线就是一种插值方法。贝塞尔曲线可以是一阶曲线、二阶曲线、三阶曲线等，其阶数决定了曲线的平滑程度。下面首先介绍一阶贝塞尔曲线原理。

29.2 一阶

一阶曲线由两个控制点组成，形成一条直线。如图 1 所示，简单来说一阶贝塞尔曲线就是两点之间连线。图中 t 代表权重，取值范围为 $[0, 1]$ 。 t 越大，点 $B(t)$ 距离 P_0 越近，如图中暖色 \times ，相当于 P_0 对 $B(t)$ 影响越大。相反， t 越小，点 $B(t)$ 距离 P_1 越近，如图中冷色 \times ，相当于 P_1 对 $B(t)$ 影响大。

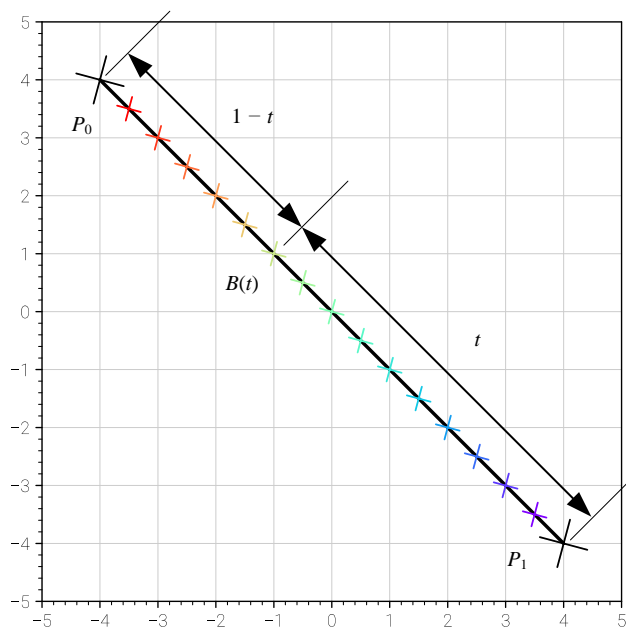


图 1. 一阶贝塞尔曲线原理

29.3 二阶

二阶贝塞尔曲线由三个控制点组成，形成一条弯曲的曲线。如图 2 所示， P_0 和 P_2 点控制了曲线 (黑色线) 的两个端点，而 P_1 则决定的曲线的弯曲行为。实际上图 2 中黑色二阶贝塞尔曲线上的每一个点都经历了两组线性插值得到。如图 3 所示，设定 $t = 13/16$ ，通过第一组线性插值，我们分别得到了 P_0P_1 线段上的 A_0 ，以及 P_1P_2 线段上的 A_1 。然后通过第二组线性插值，我们便得到 A_0A_1 线段上的 $B(13/16)$ 。当 t 在 $[0, 1]$ 之间连续取值时，我们便得到了二阶贝塞尔曲线上的一系列的点。

图 5 给出几个不同的贝塞尔曲线， P_1 点坐标为随机生成。大家可能已经发现，贝塞尔曲线一般不会经过 P_1 点，除非 P_0 、 P_1 、 P_2 三点在同一条直线上。

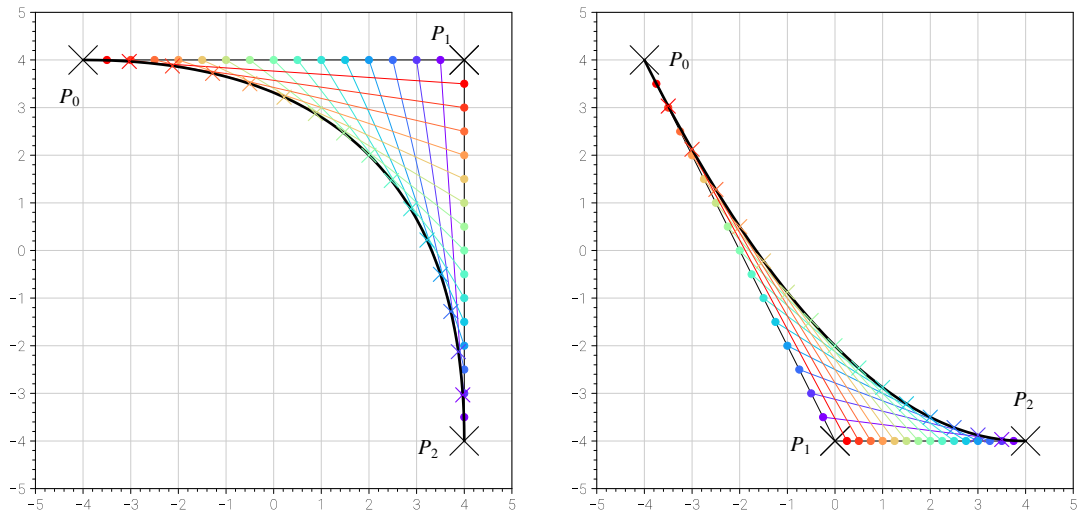


图 2. 二阶贝塞尔曲线原理

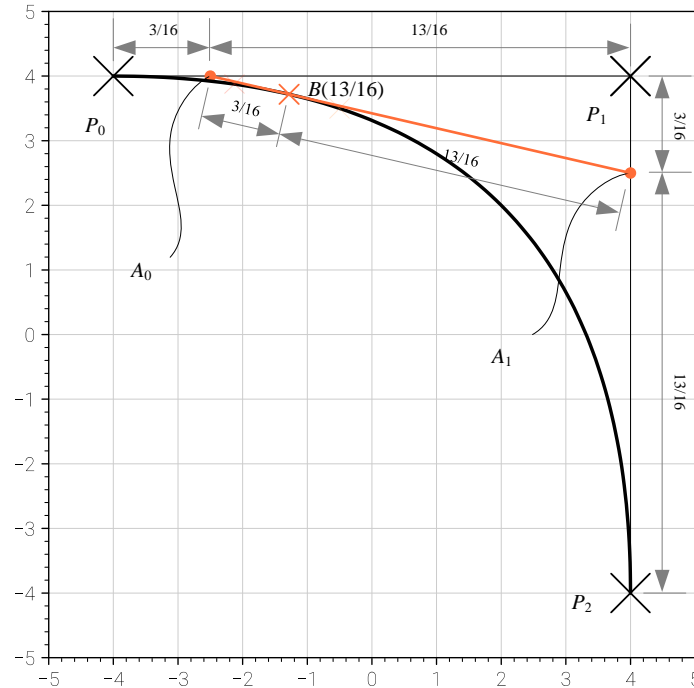


图 3. 二阶贝塞尔曲线原理，以 $B(13/16)$ 为例

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

29.4 三阶

图 4 比较一阶、二阶、三阶贝塞尔曲线。三阶贝塞尔曲线由四个控制点组成，形成更加复杂的曲线。如图 4 (c) 所示， P_0 和 P_3 点同样控制了曲线的两个端点，而 P_1 和 P_2 两点决定的曲线的弯曲行为。图 6 所示为一系列三阶贝塞尔曲线， P_1 和 P_2 为随机数。

图 7 所示为一组四阶贝塞尔曲线，曲线的弯曲行为更加复杂。

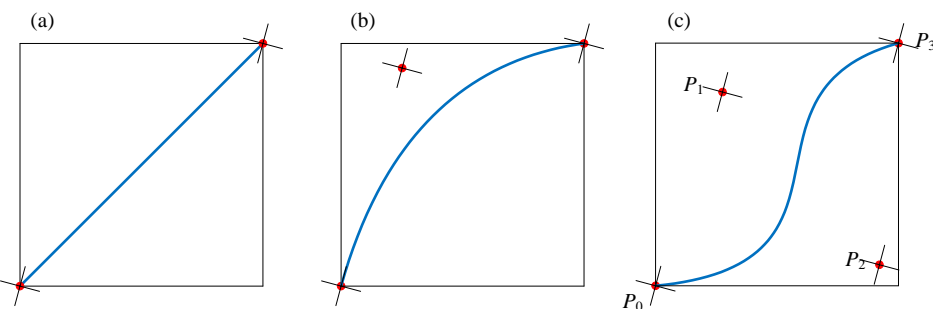


图 4. 贝塞尔曲线原理，比较一阶、二阶、三阶

图 8 则是采用 Python 复刻的用贝塞尔曲线创作的“鸢尾花曲线”。“鸢尾花曲线”来自于 Oliver Brotherhood 的开源设计创意。

29.5 三维空间

上述贝塞尔曲线还都仅限于平面，贝塞尔曲线也可以很容易扩展到三维空间。为了可视化贝塞尔曲线，我们把它放在 RGB 色彩空间中。

图 9 所示为 RGB 色彩空间中 1 ~ 6 阶贝塞尔曲线。图中控制点的表示为 \times ，控制点之间的顺序连线为划线。图 9 中这些贝塞尔曲线有一个共同特点，它们的首尾两个控制点分别是黑色 (0, 0, 0)、白色 (1, 1, 1)。其他控制点则均由随机数发生器生成。

图 10 所示 8 阶贝塞尔曲线的 9 个控制点都是随机数发生器生成。

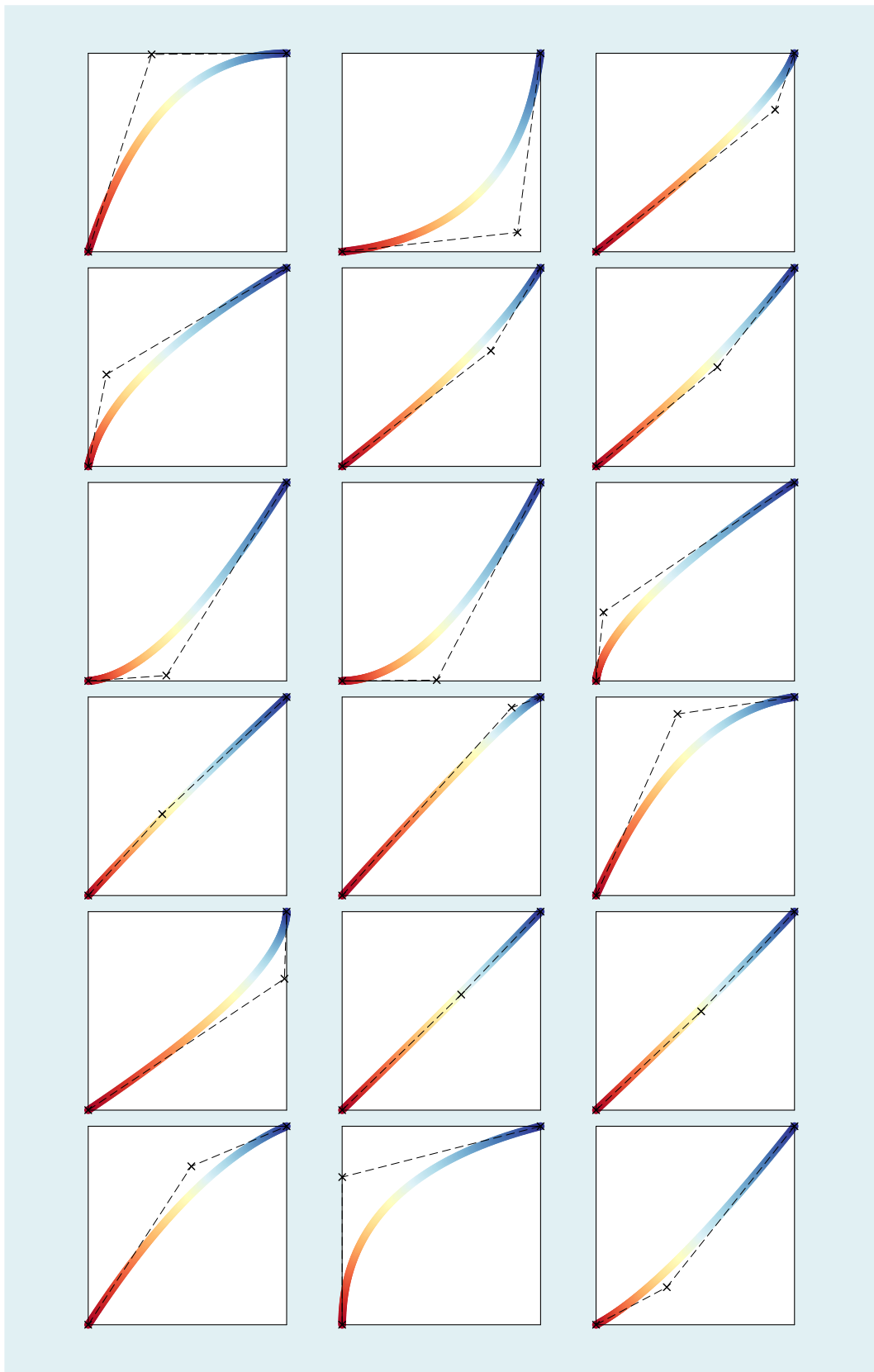


图 5. 二阶贝塞尔曲线

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

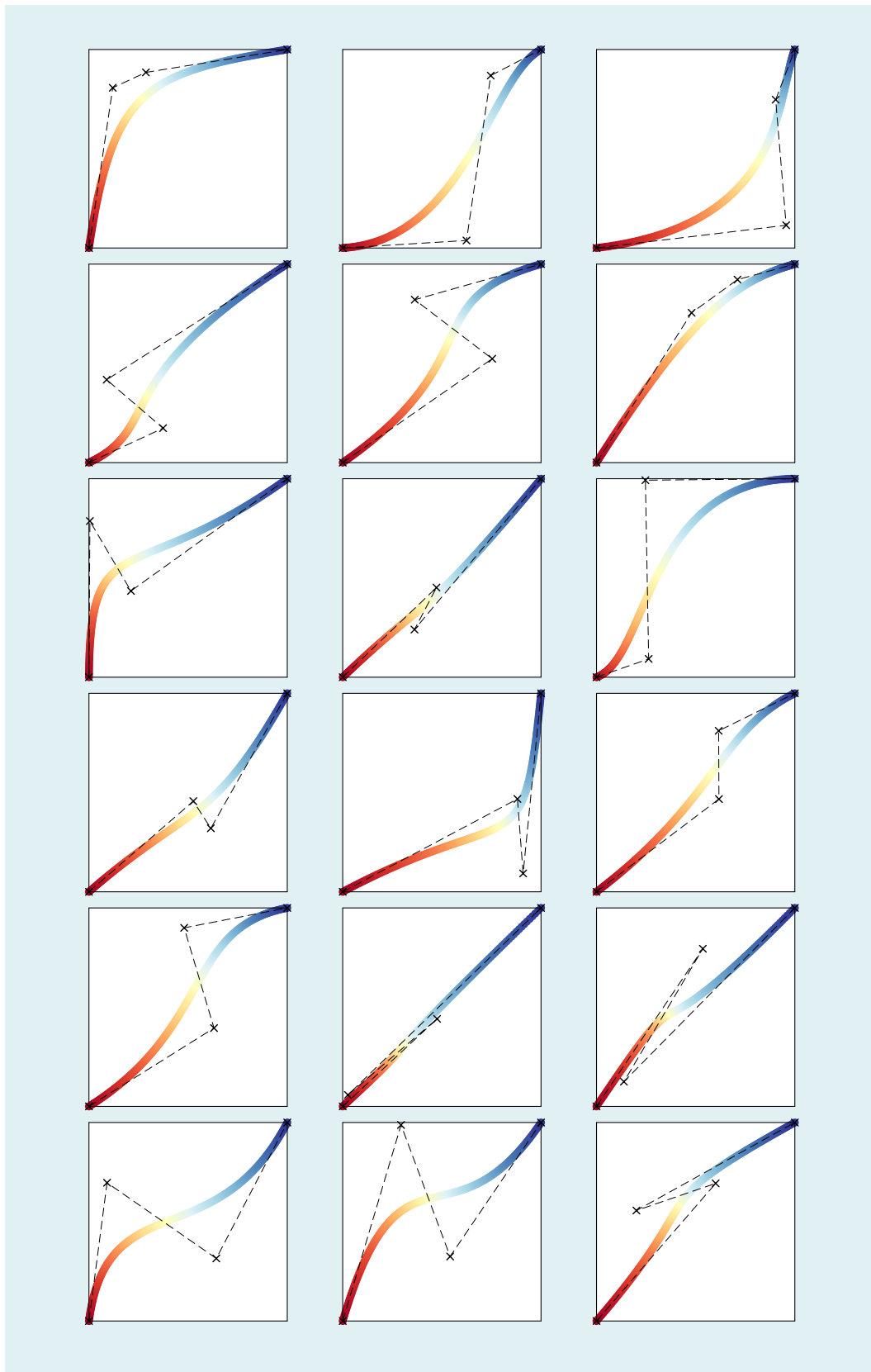


图 6. 三阶贝塞尔曲线

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

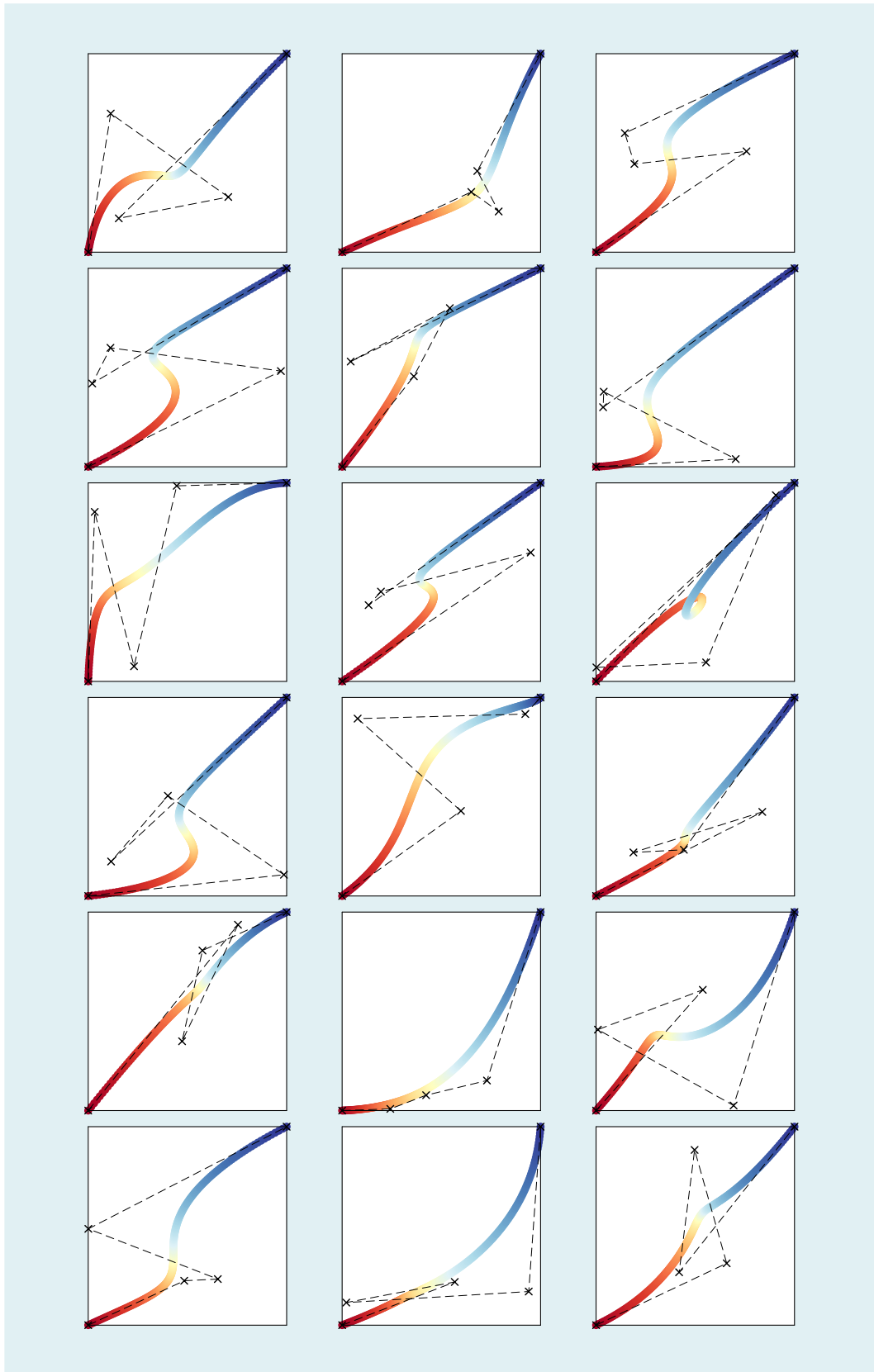


图 7. 四阶贝塞尔曲线

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

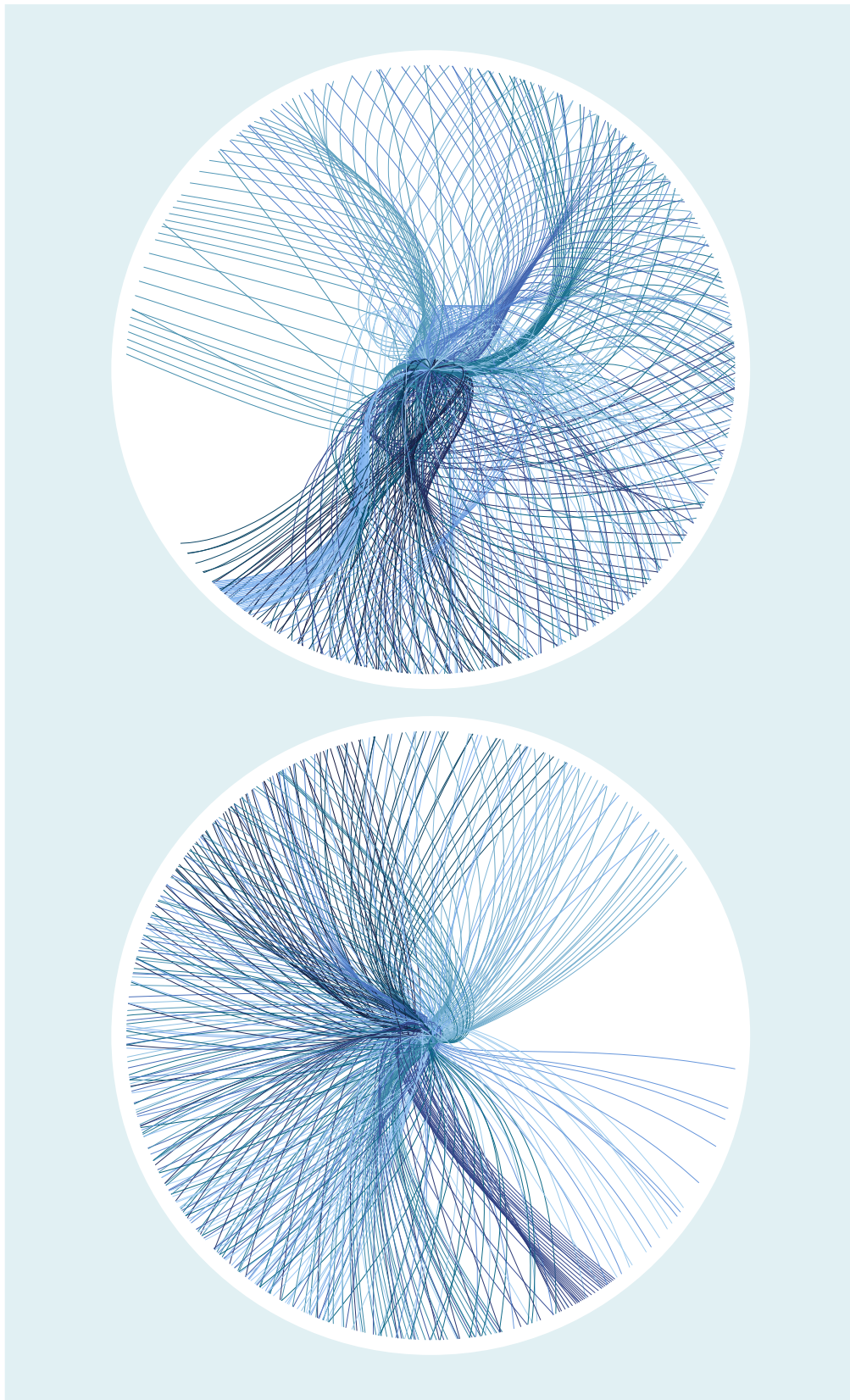


图 8. 用贝塞尔曲线绘制的“鸢尾花曲线”

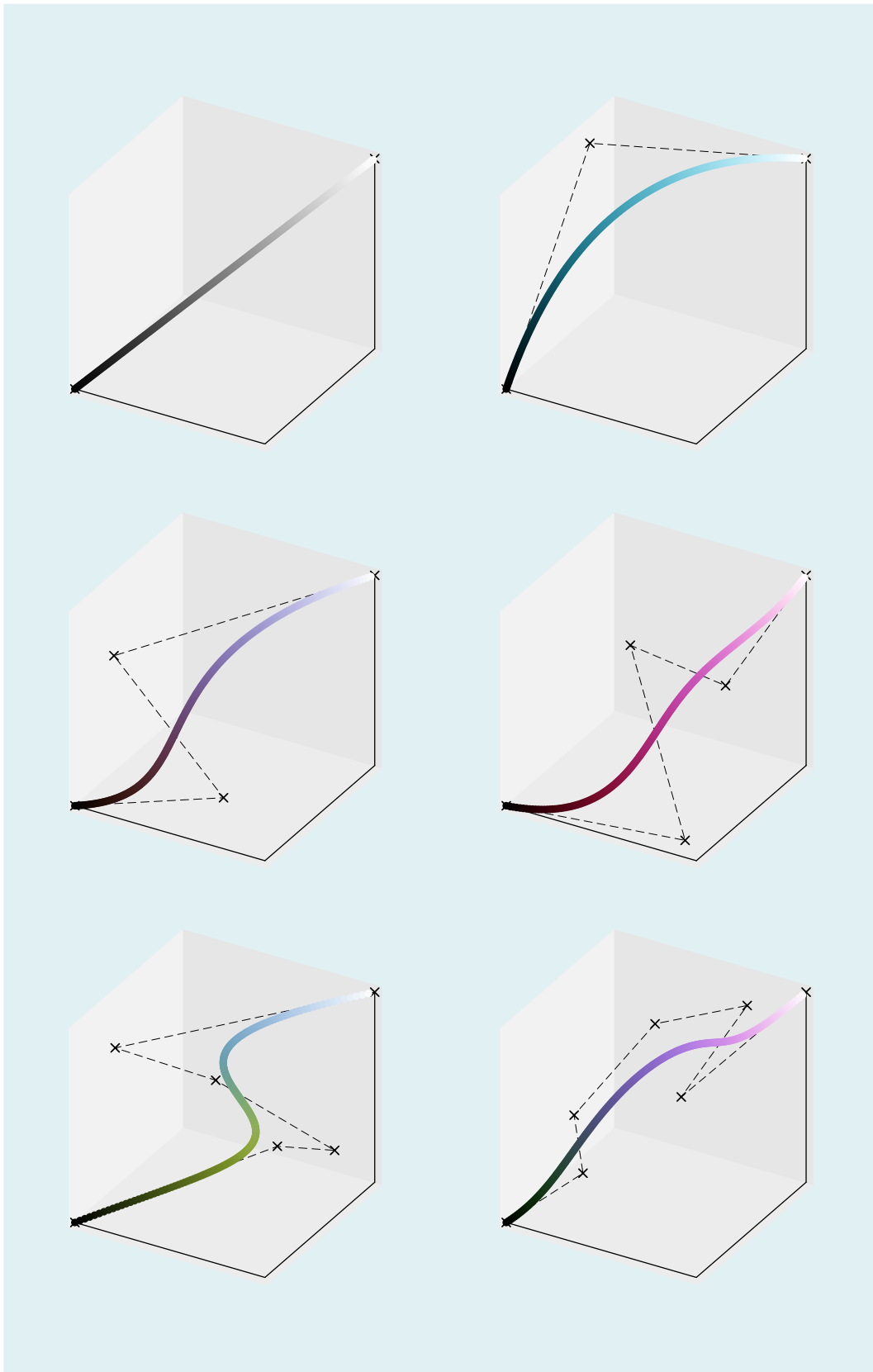


图 9. RGB 色彩空间中的 1 ~ 6 阶贝塞尔曲线

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

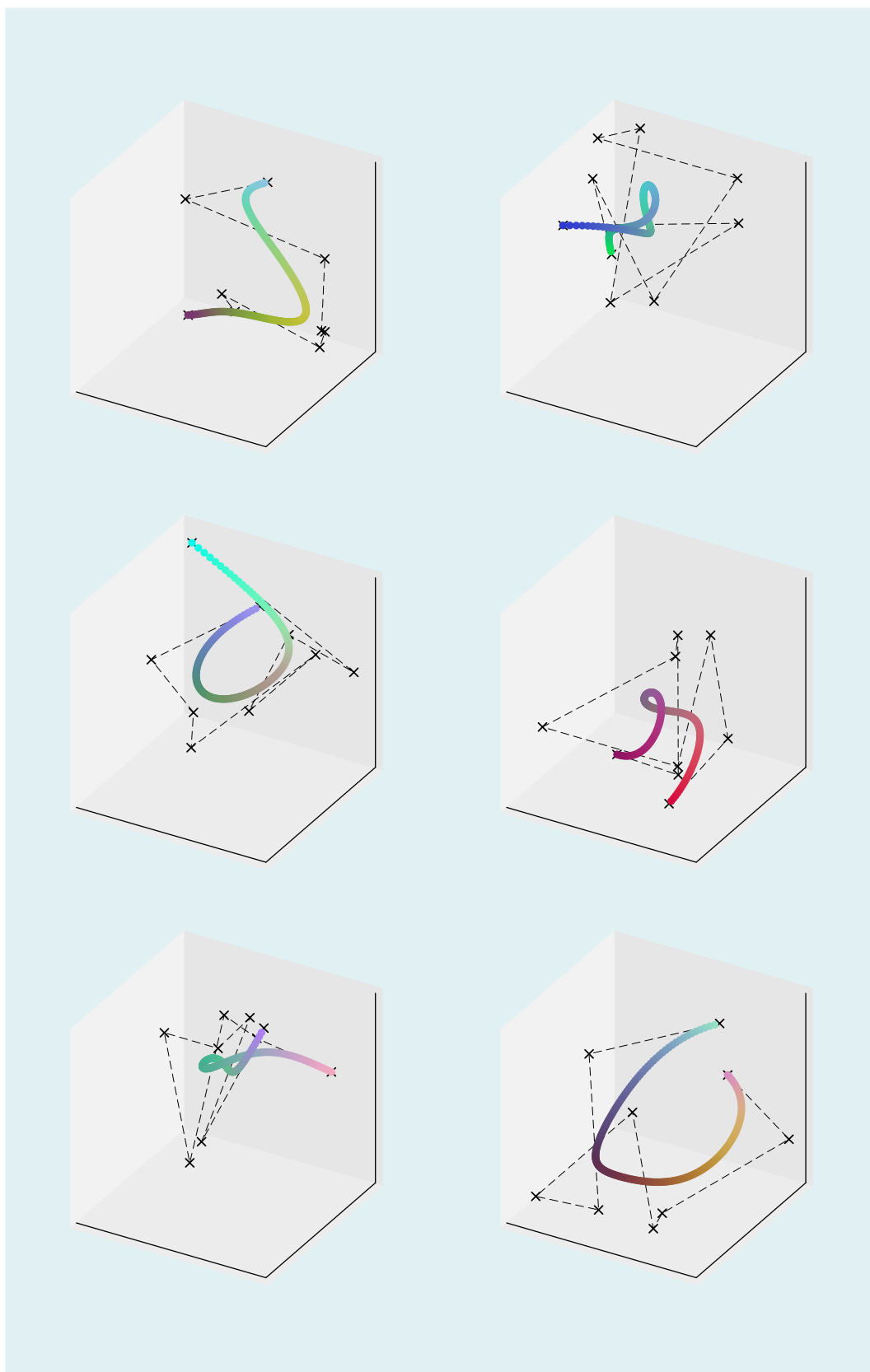


图 10. RGB 色彩空间中的几个 8 阶贝塞尔曲线，9 个控制点均由随机数发生器生成

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com