



教育部产学合作协同育人项目资助  
2022年北京交通大学《深度学习》课程

# 实验3 卷积神经网络实验

主讲教师：丛润民  
助教：盛荣晖





# 目录

## 1. 卷积神经网络

- 卷积基本操作
- 手动实现卷积层
- 图像分类示例

## 2. 空洞卷积

- 空洞卷积的概念
- 优点与适用性
- 缺点与解决方法
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 3. 残差网络

- 解决的问题
- 网络结构
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 4. 实验要求

- 数据集介绍
- 卷积实验
- 空洞卷积实验
- 残差网络实验



# 卷积神经网络

## 卷积神经网络 (CNN)

- **一维卷积**

用于时序数据

- **二维卷积**

用于网格数据 (如图片)

- **三维卷积**

用于时空数据

## 卷积神经网络基本概念

- **卷积运算**

- **填充**

- **步幅**

- **多通道输入和输出**

- **池化**



# 卷积运算

输入			核		输出			
0	1	2	*	0	1	=	19	25
3	4	5		2	3		37	43
6	7	8						

$$0 \times 0 + 1 \times 1 + 3 \times 2 + 4 \times 3 = 19,$$

$$1 \times 0 + 2 \times 1 + 4 \times 2 + 5 \times 3 = 25,$$

$$3 \times 0 + 4 \times 1 + 6 \times 2 + 7 \times 3 = 37,$$

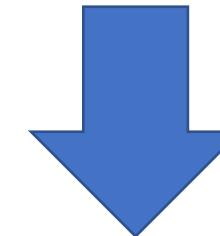
$$4 \times 0 + 5 \times 1 + 7 \times 2 + 8 \times 3 = 43.$$

原始输入维度( $H, W$ ) = (3,3)

卷积核维度( $k_h, k_w$ ) = (2,2)

输出维度( $y_h, y_w$ ) = (2,2)

步长为1



$$y_h = H - k_h + 1$$

$$y_w = W - k_w + 1$$

卷积层的输出形状与输入形状、卷积核窗口有关



# 卷积运算

## 定义卷积运算

```

1 import torch
2 from torch import nn
executed in 5ms, finished 22:17:04 2020-06-16

▼ 1 def corr2d(X,K):
    """
    X: 输入, shape (H,W)
    K: 卷积核, shape (k_h,k_w)
    """
    H, W = X.shape
    k_h, k_w = K.shape
    # 初始化结果矩阵
    Y = torch.zeros((H - k_h + 1, W - k_w + 1))
    for i in range(Y.shape[0]):
        for j in range(Y.shape[1]):
            Y[i, j] = (X[i:i + k_h, j:j + k_w] * K).sum()
    return Y

```

$$y_h = H - k_h + 1$$

$$y_w = W - k_w + 1$$

## 示例

```

1 #验证卷积操作
2 X = torch.tensor([[0, 1, 2], [3, 4, 5], [6, 7, 8]])
3 K = torch.tensor([[0, 1], [2, 3]])
4 corr2d(X, K)
executed in 7ms, finished 22:18:39 2020-06-16

```

```

tensor([[19., 25.],
       [37., 43.]])

```

输入	核	输出																	
<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>6</td><td>7</td><td>8</td></tr> </table>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	*	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td></tr> </table> = <table border="1"> <tr><td>19</td><td>25</td></tr> <tr><td>37</td><td>43</td></tr> </table>	0	1	2	3	19	25	37	43
0	1	2																	
3	4	5																	
6	7	8																	
0	1																		
2	3																		
19	25																		
37	43																		



# 构造卷积层

## 将卷积运算封装成卷积层

- 卷积层参数：卷积核、偏差（随机初始化）

```
1  class Conv2D(nn.Module):  
2      def __init__(self, kernel_size):  
3          super(Conv2D, self).__init__()  
4          # 初始化卷积层的2个参数：卷积核、偏差  
5          self.weight = nn.Parameter(torch.randn(kernel_size))  
6          self.bias = nn.Parameter(torch.randn(1))  
7  
8      def forward(self, x):  
9          return corr2d(x, self.weight) + self.bias
```

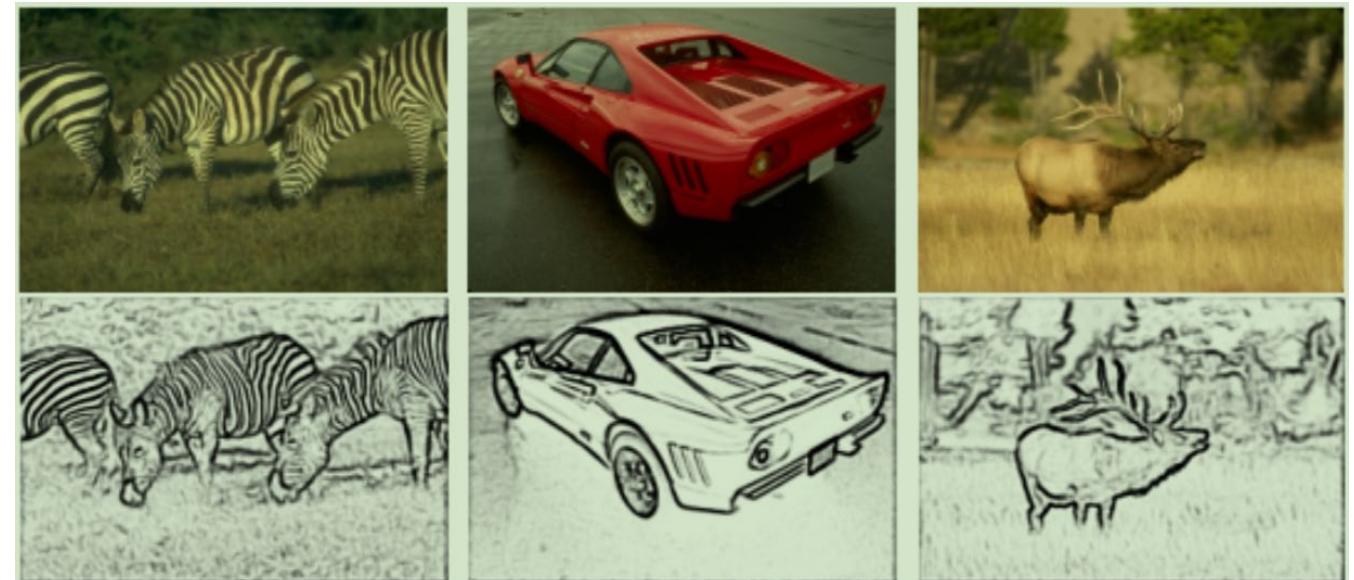


# 卷积的应用

## 卷积用来边缘检测

- 给定一个 $6 \times 8$ 的图像 $X$ , 中间4列为黑 (0) , 其余为白 (1)

```
1 X = torch.ones(6, 8)
2 X[:, 2:6] = 0
3 X
executed in 9ms, finished 12:16:18 2020-06-17
tensor([[1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.],
        [1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.],
        [1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.],
        [1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.],
        [1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.],
        [1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1.]])
```



- 给定卷积核 $K = (1, -1)$

```
1 K = torch.tensor([[1, -1]])
```

executed in 4ms, finished 12:20:37 2020-06-17

```
1 Y = corr2d(X, K)
2 Y
executed in 10ms, finished 12:20:43 2020-06-17
tensor([[ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],
        [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],
        [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],
        [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],
        [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],
        [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.]])
```

检测出边缘的颜色变化



## 反向传播训练卷积核

## 卷积用来边缘检测

- 给定一个 $6 \times 8$ 的图像  $X$ ，  
中间4列为黑 (0)，其余为白 (1)

```
1 X = torch.ones(6, 8)
2 X[:, 2:6] = 0
3 X
```

```
tensor([[1., 1., 0., 0., 0., 0.],
       [1., 1., 0., 0., 0., 0.],
       [1., 1., 0., 0., 0., 0.],
       [1., 1., 0., 0., 0., 0.],
       [1., 1., 0., 0., 0., 0.],
       [1., 1., 0., 0., 0., 0.]])
```

- 给定卷积核  $K = (1, -1)$

```
1 K = torch.tensor([[1, -1]])
```

```
1 Y = corr2d(X, K)
2 Y
```

```
tensor([[ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],  
       [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],  
       [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],  
       [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],  
       [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.],  
       [ 0.,  1.,  0.,  0.,  0., -1.,  0.]])
```

## 反向传播学习卷积核

已知输入 $X$ 和真实输出 $Y$

通过**反向传播**可以学习卷积核和偏差

- ```
1 # 构造一个核数组形状是(1, 2)的二维卷积层
2 conv2d = Conv2D(kernel_size=(1, 2))
3
4 step = 20
5 lr = 0.01
6
7     for i in range(step):
8         t = conv2d(X)
9         ((Y_hat - Y) ** 2).sum()
10        backward()
11
12        # 损失度下降
13        lr = lr * conv2d.weight.grad
14        lr = lr * conv2d.bias.grad
15
16        # 清零梯度
17        conv2d.weight.grad.fill_(0)
18        conv2d.bias.grad.fill_(0)
19        if (i + 1) % 5 == 0:
20            print('Step %d, loss %.3f' % (i + 1, l.item()))
```

- ```
Step 5, loss 0.118  
Step 10, loss 0.030  
Step 15, loss 0.008  
Step 20, loss 0.001
```

- 学习得到的卷积核

```
1 print("weight: ", conv2d.weight.data)
2 print("bias: ", conv2d.bias.data)
```

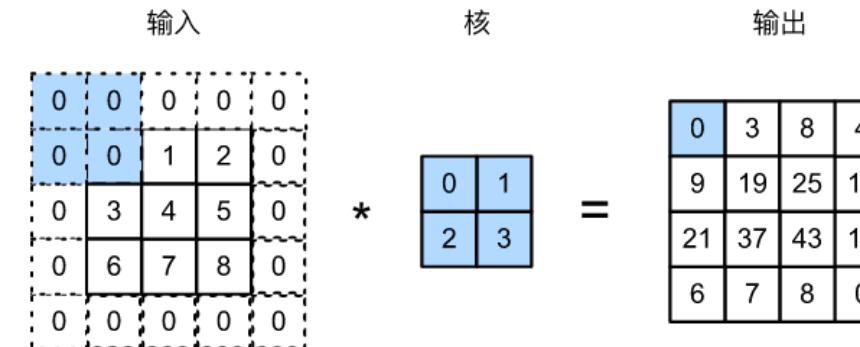
```
weight: tensor([[ 1.0110, -1.0125]])
```



# 填充和步幅

## 卷积层的2个超参数：填充、步幅

- 填充：通常用“0”填充
- 步幅：通常用来减少输出的高和宽



## 实现填充和步幅

```
1 # 定义一个函数来计算卷积层。它对输入和输出做相应的升维和降维
2 def comp_conv2d(conv2d, X):
3     # (1, 1) 代表批量大小和通道数均为1
4     X = X.view((1, 1) + X.shape)
5     Y = conv2d(X)
6     return Y.view(Y.shape[2:]) # 排除不关心的前两维：批量和通道
7
8 # 注意这里是两侧分别填充1行或列，所以在两侧一共填充2行或列
9 conv2d = nn.Conv2d(in_channels=1, out_channels=1, kernel_size=3, padding=1,stride=2)
10
11 X = torch.rand(8, 8)
12 comp_conv2d(conv2d, X).shape
```

executed in 93ms, finished 15:09:39 2020-06-17

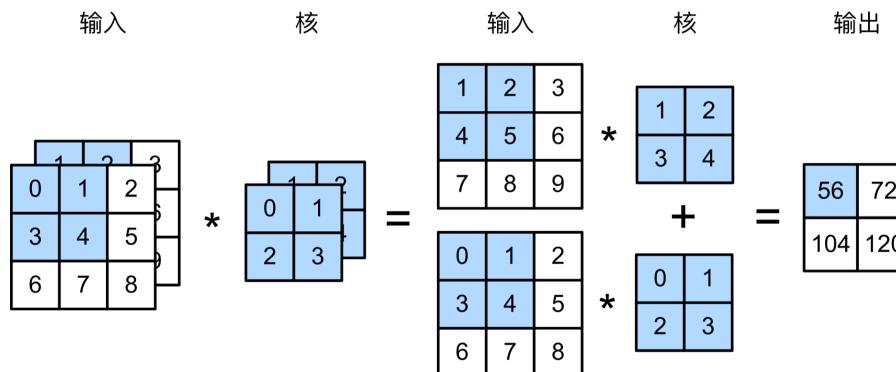
torch.Size([4, 4])



# 多通道

## 多输入通道

例如：彩色图片有红、绿、蓝3个通道，用 $3 \times H \times W$ 表示



输入维度：(2, H, W)

卷积核维度：(2,  $k_h$ ,  $k_w$ )

## 实现多输入通道

遍历每个通道做卷积运算，再将不同通道的值相加

```

1 def corr2d_multi_in(X, K):
2     # 输入X: 维度(C_in,H,W)
3     # 卷积核K: 维度(C_in,k_h,k_w)
4     res = corr2d(X[0, :, :], K[0, :, :])
5     for i in range(1, X.shape[0]):
6         # 按通道相加
7         res += corr2d(X[i, :, :], K[i, :, :])
8     return res
executed in 4ms, finished 15:45:14 2020-06-17

```

```

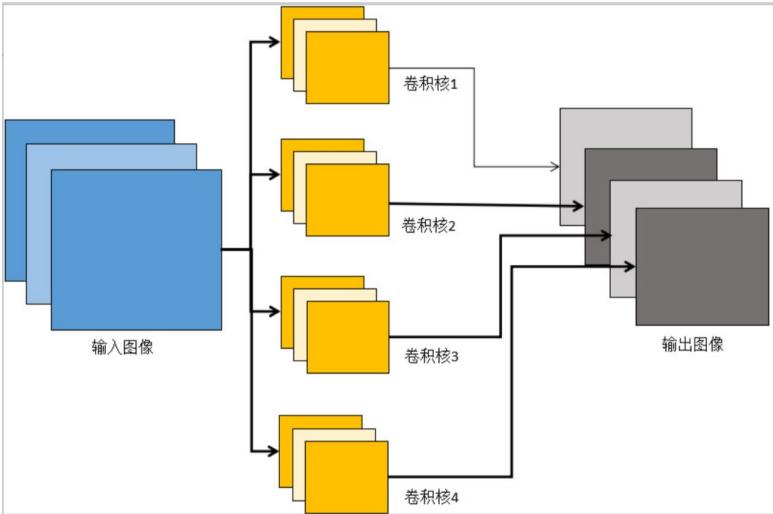
1 X = torch.tensor([[[0, 1, 2], [3, 4, 5], [6, 7, 8]],
2                   [[1, 2, 3], [4, 5, 6], [7, 8, 9]]])
3 K = torch.tensor([[ [0, 1], [2, 3]], [[1, 2], [3, 4]]])
4 corr2d_multi_in(X, K)
5
executed in 11ms, finished 15:45:14 2020-06-17
tensor([[ 56.,  72.],
       [104., 120.]])

```

# 卷积核通道数 = 输入通道数

# 多通道

## 多输出通道



输入维度:  $(3, H, W)$

卷积核维度:  $(4, 3, k_h, k_w)$ --表示有4个卷积核, 每个卷积核有3个通道

输出维度:  $(4, H_{out}, W_{out})$

## 实现多输出通道

```
1 def corr2d_multi_in_out(X, K):
2     # 对K的第0维遍历, 每次同输入X做互相关计算。
3     #所有结果使用stack函数合并在一起
4     return torch.stack([corr2d_multi_in(X, k) for k in K])
5 #X shape:(C_in,H,W)
6 X = torch.arange(192, dtype=torch.float).view((3, 8, 8))
7 #K shape:(C_out,C_in,k_h,k_w)
8 K = torch.arange(108, dtype=torch.float).view((4, 3, 3, 3))
9 print("kernel shape:", K.shape)
10
11 Y = corr2d_multi_in_out(X, K)
12 print("Y shape:", Y.shape)
```

executed in 30ms, finished 17:09:43 2020-06-17

kernel shape: torch.Size([4, 3, 3, 3])  
Y shape: torch.Size([4, 6, 6])

**输出通道数 = 卷积核个数**



池化层

## 最大池化、平均池化

- 减少输出的高和宽
  - 缓解卷积层对位置的过度敏感性

## 输入

0	1	2
3	4	5
6	7	8

输出

4	5
7	8

$2 \times 2$  最  
大池化层

自定义池化

```
1 def pool2d(X, pool_size, mode='max'):
2     X = X.float()
3     p_h, p_w = pool_size
4     Y = torch.zeros(X.shape[0] - p_h + 1, X.shape[1] - p_w + 1)
5     for i in range(Y.shape[0]):
6         for j in range(Y.shape[1]):
7             if mode == 'max':
8                 Y[i, j] = X[i: i + p_h, j: j + p_w].max()
9             elif mode == 'avg':
10                 Y[i, j] = X[i: i + p_h, j: j + p_w].mean()
11
12 return Y
```

executed in 10ms, finished 17:24:32 2020-06-17

```
1 X = torch.tensor([[0, 1, 2], [3, 4, 5], [6, 7, 8]])
2
3 print("最大池化")
4 print(pool2d(X, (2, 2)))
5
6 print("平均池化")
7 print(pool2d(X, (2, 2), 'avg'))
```

executed in 9ms finished 17:24:32 2020-06-17

最大池化  
tensor([[4., 5.],  
 [7., 8.]])

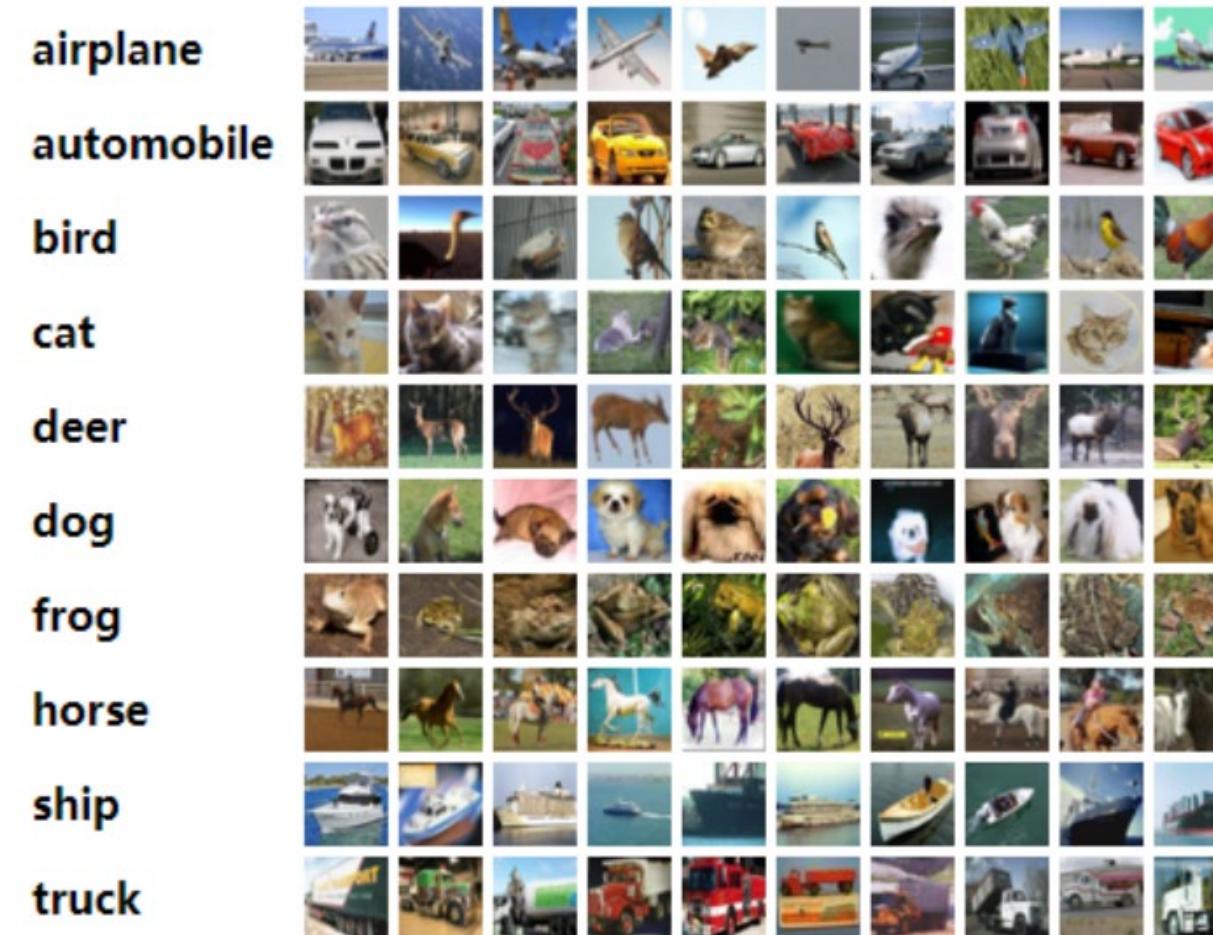
```
平均池化  
tensor([[2., 3.],  
       [5., 6.]])
```



# CIFAR-10数据集

包含60,000张32\*32的彩色图像，维度 (3, 32, 32)

一共有10类，每类有6,000个图像=5,000个训练集+1,000个测试集

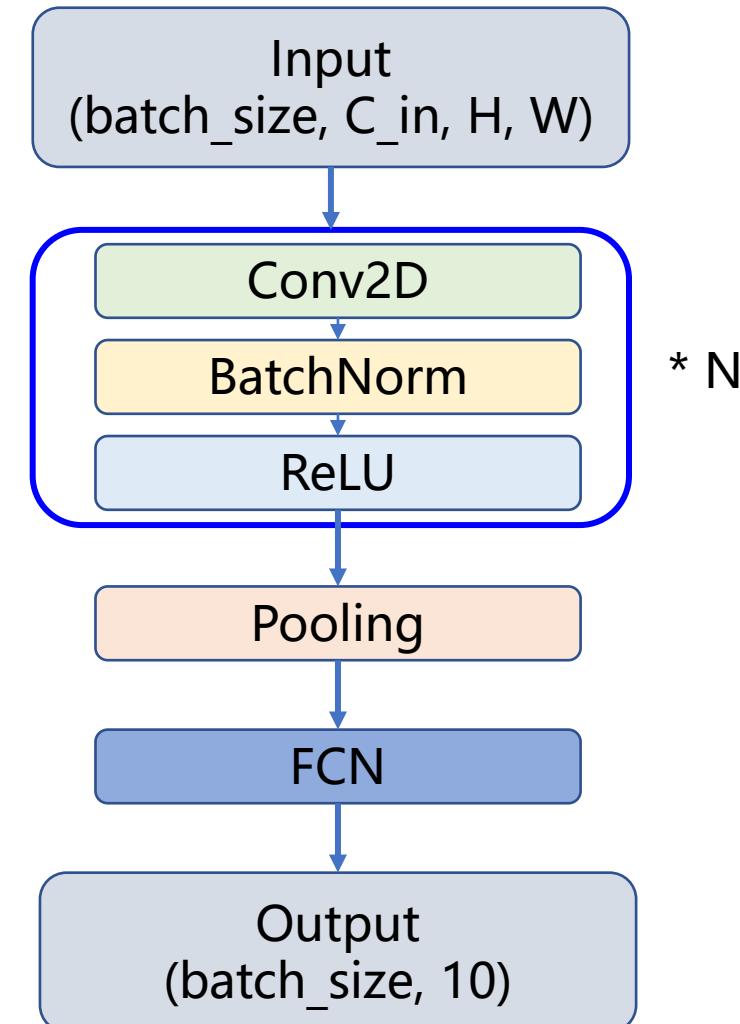




# 模型介绍

- 用以下2种方式实现卷积神经网络模型，实现CIFAR-10图像分类任务

- 自定义的卷积层 ( $N=1$ )
- PyTorch已封装的卷积层 ( $N=3$ )





# 自定义卷积层

```
1 def corr2d(X,K):
2     """
3     X: 输入, shape (batch_size,H,W)
4     K: 卷积核, shape (k_h,k_w)
5     单通道
6     """
7     batch_size,H, W = X.shape
8     k_h, k_w = K.shape
9     #初始化结果矩阵
10    Y = torch.zeros((batch_size,H - k_h + 1,W - k_w + 1)).to(device)
11    for i in range(Y.shape[1]):
12        for j in range(Y.shape[2]):
13            Y[:,i, j] = (X[:,i:i + k_h, j:j + k_w] * K).sum()
14    return Y
15
16 def corr2d_multi_in(X, K):
17     #输入X: 维度(batch_size,C_in,H,W)
18     #卷积核K: 维度(C_in,k_h,k_w)
19     #输出: 维度(batch_size,H_out,W_out)
20     res = corr2d(X[:,0, :, :], K[0, :, :])
21     for i in range(1, X.shape[1]):
22         #按通道相加
23         res += corr2d(X[:,i, :, :], K[i, :, :])
24     return res
25
26 def corr2d_multi_in_out(X, K):
27     # X: shape (batch_size,C_in,H,W)
28     # K: shape (C_out,C_in,h,w)
29     #Y: shape(batch_size,C_out,H_out,W_out)
30     return torch.stack([corr2d_multi_in(X, k) for k in K],dim=1)
```

```
1 class MyConv2D(nn.Module):
2     def __init__(self, in_channels, out_channels, kernel_size):
3         super(MyConv2D, self).__init__()
4         #初始化卷积层的2个参数: 卷积核、偏差
5         if isinstance(kernel_size,int):
6             kernel_size = (kernel_size,kernel_size)
7         self.weight = nn.Parameter(torch.randn((out_channels,in_channels)+kernel_size))
8         self.bias = nn.Parameter(torch.randn(out_channels,1,1))
9
10    def forward(self, x):
11        """
12        x: 输入图片, 维度(batch_size,C_in,H,W)
13        """
14        return corr2d_multi_in_out(x, self.weight) + self.bias
```

自定义多通道卷积操作

封装

自定义卷积层MyConv2D



# torch.nn.Conv2d

**CLASS** torch.nn.Conv2d(*in\_channels*, *out\_channels*, *kernel\_size*, *stride*=1, *padding*=0, *dilation*=1, *groups*=1, *bias*=True, *padding\_mode*=*'zeros'*)

## 参数

	名称	含义	类型
必填	<i>in_channels</i>	输入通道数	int
	<i>out_channels</i>	输出通道数	int
	<i>kernel_size</i>	卷积核大小	int或tuple
可选	<i>stride</i>	步长, 默认1	int或tuple
	<i>padding</i>	填充, 默认0	int或tuple
	<i>dilation</i>	空洞率, 默认1	int或tuple
	<i>group</i>	输入和输出通道分组数, 默认1	int
	<i>bias</i>	是否添加偏值, 默认True	bool
	<i>padding_mode</i>	填充模式, 默认zero	str

## 输入和输出

**input:** 维度 (*batch\_size*, *C<sub>in</sub>*, *H<sub>in</sub>*, *W<sub>in</sub>*)

**output:** 维度 (*batch\_size*, *C<sub>out</sub>*, *H<sub>out</sub>*, *W<sub>out</sub>*)

- 例如：输入为CIFAR数据，*batch\_size*=64  
则输入维度为 (64, 3, 32, 32)



# 2种方案实现

## 自定义卷积层

```
1 class MyConvModule(nn.Module):
2     def __init__(self):
3         super(MyConvModule, self).__init__()
4         # 定义三层卷积
5         self.conv = nn.Sequential(
6             MyConv2D(in_channels=3, out_channels=32,kernel_size=3),
7             nn.BatchNorm2d(32),
8             nn.ReLU(inplace=True)
9         )
10        # 输出层, 将通道数变为分类数量
11        self.fc = nn.Linear(32, num_classes)
12
13    def forward(self, X):
14        # 图片先经过三层卷积, 输出维度(batch_size,C_out,H,W)
15        out = self.conv(X)
16        # 使用平均池化层将图片的大小变为1x1
17        out = F.avg_pool2d(out, 30)
18        # 将张量out从shape batch x 32 x 1 x 1 变为 batch x 32
19        out = out.squeeze()
20        # 输入到全连接层将输出的维度变为10
21        out = self.fc(out)
22        return out
```

## PyTorch封装卷积层

```
1 class ConvModule(nn.Module):
2     def __init__(self):
3         super(ConvModule, self).__init__()
4         # 定义一个三层卷积
5         self.conv = nn.Sequential(
6             nn.Conv2d(in_channels=3, out_channels=32,
7                 kernel_size=3, stride=1, padding=0),
8             nn.BatchNorm2d(32),
9             nn.ReLU(inplace=True),
10            nn.Conv2d(in_channels=32, out_channels=64,
11                  kernel_size=3, stride=1,padding=0),
12            nn.BatchNorm2d(64),
13            nn.ReLU(inplace=True),
14            nn.Conv2d(in_channels=64, out_channels=128,
15                  kernel_size=3, stride=1, padding=0),
16            nn.BatchNorm2d(128),
17            nn.ReLU(inplace=True)
18        )
19        # 输出层, 将通道数变为分类数量
20        self.fc = nn.Linear(128, num_classes)
21
22    def forward(self, X):
23        # 图片先经过三层卷积, 输出维度(batch_size,C_out,H,W)
24        out = self.conv(X)
25        # 使用平均池化层将图片的大小变为1x1
26        out = F.avg_pool2d(out, 26)
27        # 将张量out从shape batch x 128 x 1 x 1 变为 batch x 128
28        out = out.squeeze()
29        # 输入到全连接层将输出的维度变为10
30        out = self.fc(out)
31        return out
```



# 定义训练和测试函数

## 训练函数

```

1 def train_epoch(net, data_loader, device):
2
3     net.train() # 指定当前为训练模式
4     train_batch_num = len(data_loader) # 记录共有多少个batch
5     total_loss = 0 # 记录Loss
6     correct = 0 # 记录共有多少个样本被正确分类
7     sample_num = 0 # 记录样本总数
8
9     # 遍历每个batch进行训练
10    for batch_idx, (data, target) in enumerate(data_loader):
11        # 将图片放入指定的device中
12        data = data.to(device).float()
13        # 将图片标签放入指定的device中
14        target = target.to(device).long()
15        # 将当前梯度清零
16        optimizer.zero_grad() 模型训练
17        # 使用模型计算出结果 反向传播更新参数
18        output = net(data)
19        # 计算损失
20        loss = criterion(output, target)
21        # 进行反向传播
22        loss.backward()
23        optimizer.step()
24        # 累加Loss
25        total_loss += loss.item()
26        # 找出每个样本值最大的idx, 即代表预测此图片属于哪个类别
27        prediction = torch.argmax(output, 1)
28        # 统计预测正确的类别数量
29        correct += (prediction == target).sum().item()
30        # 累加当前的样本总数
31        sample_num += len(prediction)
32        # 计算平均的loss与准确率
33        loss = total_loss / train_batch_num
34        acc = correct / sample_num 计算Loss和Acc
35        return loss, acc

```

## 测试函数

```

1 def test_epoch(net, data_loader, device):
2     net.eval() # 指定当前模式为测试模式
3     test_batch_num = len(data_loader)
4     total_loss = 0
5     correct = 0
6     sample_num = 0
7     # 指定不进行梯度变化
8     with torch.no_grad():
9         for batch_idx, (data, target) in enumerate(data_loader):
10            data = data.to(device).float()
11            target = target.to(device).long()
12            output = net(data)
13            loss = criterion(output, target)
14            total_loss += loss.item()
15            prediction = torch.argmax(output, 1)
16            correct += (prediction == target).sum().item()
17            sample_num += len(prediction)
18            loss = total_loss / test_batch_num
19            acc = correct / sample_num
20            return loss, acc

```

在测试集上验证，计算Loss和Acc



# 读取数据

```
1 data_dir = './data' # 指定数据的位置
2 # 定义一个transform操作, 用户将torch中的数据转换为可以输入到我们模型的形式
3 transform = transforms.Compose(
4     [transforms.ToTensor(), # 首先将数据转换为Tensor
5      transforms.Normalize((0.5, 0.5, 0.5), (0.5, 0.5, 0.5))]) # 将数据进行归一化, 前一个参数代表mean, 后一个
6 # 获取cifar-10数据集并进行transform
7 cifar_train = torchvision.datasets.CIFAR10(root=data_dir, train=True, download=True, transform=transform)
8 cifar_test = torchvision.datasets.CIFAR10(root=data_dir, train=False, download=True, transform=transform)
9 # print(len(cifar_train))
10 # cifar-10数据集对应的10个类别
11 classes = ('plane', 'car', 'bird', 'cat',
12             'deer', 'dog', 'frog', 'horse', 'ship', 'truck')
13 num_classes = 10 # 共十类
14 epochs = 100 # 训练多少轮
15 lr = 0.001 # 学习率
16 batch_size = 512 # batch大小
17 device = torch.device("cuda:1") # 指定device为0号GPU, 若使用cpu则填写 "cpu"
18 # 生成dataloader
19 cifar_trainloader = torch.utils.data.DataLoader(cifar_train, batch_size=batch_size,
20                                                 shuffle=True, num_workers=0)
21 cifar_testloader = torch.utils.data.DataLoader(cifar_test, batch_size=512,
22                                                 shuffle=True, num_workers=0)
23 print(len(cifar_trainloader))
24 # 初始化模型
25
26 # net = MyConvModule().to(device)
27 net = ConvModule().to(device)
28
29 # 使用多元交叉熵损失
30 criterion = nn.CrossEntropyLoss()
31 # 使用Adam优化器
32 optimizer = optim.Adam(net.parameters(), lr=lr)
```

使用2种方式定义模型

## 读取CIFAR-10数据

## 设置模型参数

- 学习率
- Batch\_size
- 训练轮数
- 优化器
- 损失函数



# 自定义卷积实验结果

## 模型训练并验证

```
1 # 存储每一个epoch的Loss与acc的变化，便于后面可视化
2 train_loss_list = []
3 train_acc_list = []
4 test_loss_list = []
5 test_acc_list = []
6
7 # 进行训练
8 for epoch in range(epochs):
9     # 在训练集上训练
10    train_loss, train_acc = train_epoch(net, data_loader=cifar_trainloader, device=device)
11    # 在测试集上验证
12    test_loss, test_acc = test_epoch(net, data_loader=cifar_testloader, device=device)
13    # 保存各个指标
14    train_loss_list.append(train_loss)
15    train_acc_list.append(train_acc)
16    test_loss_list.append(test_loss)
17    test_acc_list.append(test_acc)
18    print(f"epoch:{epoch}\t train_loss:{train_loss:.4f} \t"
19          f"train_acc:{train_acc} \t"
20          f"test_loss:{test_loss:.4f} \t test_acc:{test_acc}")
```

execution queued 22:21:21 2020-06-18

```
epoch-batch:0-0  train_loss:2.3689      train_acc:0.0000
epoch-batch:0-1  train_loss:2.3378      train_acc:0.1000
epoch-batch:0-2  train_loss:2.3240      train_acc:0.1333
epoch-batch:0-3  train_loss:2.2734      train_acc:0.2500
epoch-batch:0-4  train_loss:2.2889      train_acc:0.2400
```

## 耗时原因分析

```
def corr2d(X,K):
    """
    X: 输入, shape (batch_size,H,W)
    K: 卷积核, shape (k_h,k_w)
    单通道
    """
    batch_size,H, W = X.shape
    k_h, k_w = K.shape
    # 初始化结果矩阵
    Y = torch.zeros((batch_size,H - k_h + 1,W - k_w + 1)).to(device)
    for i in range(Y.shape[1]):
        for j in range(Y.shape[2]):
            Y[:,i,j] = (X[:,i:i + k_h, j:j + k_w] * K).sum()
    return Y
```

- 耗时太长，1轮耗时>5h
- 分析原因：卷积操作使用for循环实现，而不是矩阵操作



# PyTorch封装卷积实验结果

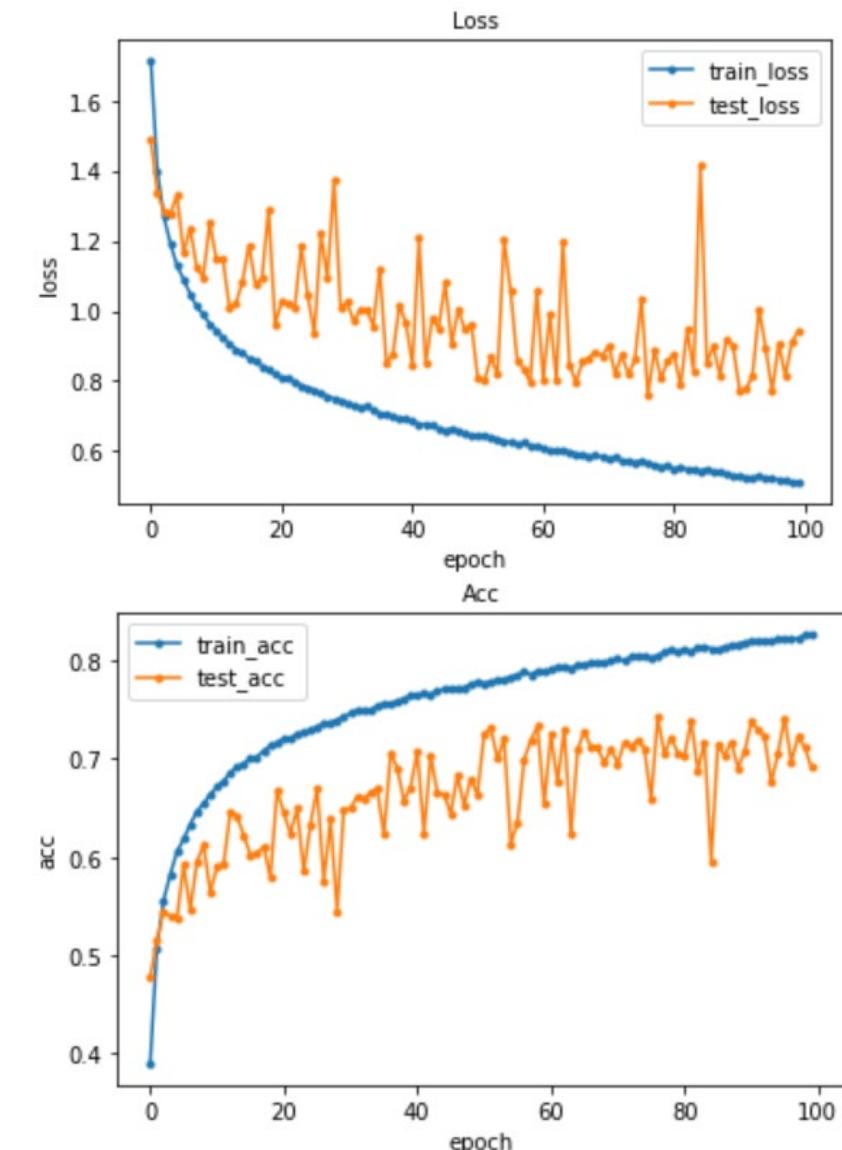
## 模型训练并验证

```
1 # 存储每一个epoch的loss与acc的变化，便于后面可视化
2 train_loss_list = []
3 train_acc_list = []
4 test_loss_list = []
5 test_acc_list = []
6
7 # 进行训练
8 for epoch in range(epochs):
9     # 在训练集上训练
10    train_loss, train_acc = train_epoch(net, data_loader=cifar_trainloader, device=device)
11    # 在测试集上验证
12    test_loss, test_acc = test_epoch(net, data_loader=cifar_testloader, device=device)
13    # 保存各个指标
14    train_loss_list.append(train_loss)
15    train_acc_list.append(train_acc)
16    test_loss_list.append(test_loss)
17    test_acc_list.append(test_acc)
18    print(f"epoch:{epoch}\t train_loss:{train_loss:.4f} \t"
19          f"train_acc:{train_acc} \t"
20          f"test_loss:{test_loss:.4f} \t test_acc:{test_acc}")
```

executed in 1h 7m 5s, finished 16:30:17 2020-06-18

epoch:0	train_loss:1.7119	train_acc:0.38988	test_loss:1.4879	test_acc:0.4774
epoch:1	train_loss:1.3972	train_acc:0.50722	test_loss:1.3381	test_acc:0.5147
epoch:2	train_loss:1.2678	train_acc:0.55578	test_loss:1.2836	test_acc:0.5444
epoch:3	train_loss:1.1904	train_acc:0.58214	test_loss:1.2779	test_acc:0.5396
epoch:4	train_loss:1.1289	train_acc:0.60496	test_loss:1.3294	test_acc:0.5369
epoch:5	train_loss:1.0899	train_acc:0.6181	test_loss:1.1660	test_acc:0.592

100轮耗时：1h





# 目录

## 1. 卷积神经网络

- 卷积基本操作
- 手动实现卷积层
- 图像分类示例

## 2. 空洞卷积

- 空洞卷积的概念
- 优点与适用性
- 缺点与解决方法
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 3. 残差网络

- 解决的问题
- 网络结构
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 4. 实验要求

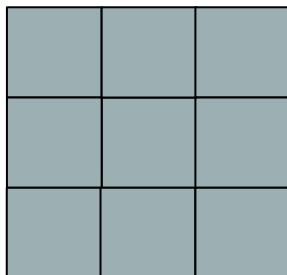
- 数据集介绍
- 卷积实验
- 空洞卷积实验
- 残差网络实验



# 空洞卷积(dilated convolution)

普通卷积

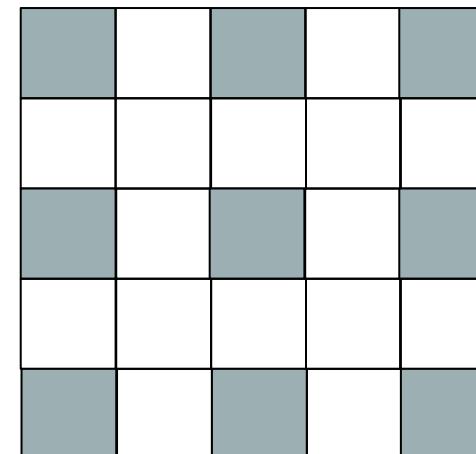
$3 \times 3$



VS

空洞卷积

$3 \times 3$ , dilation=2

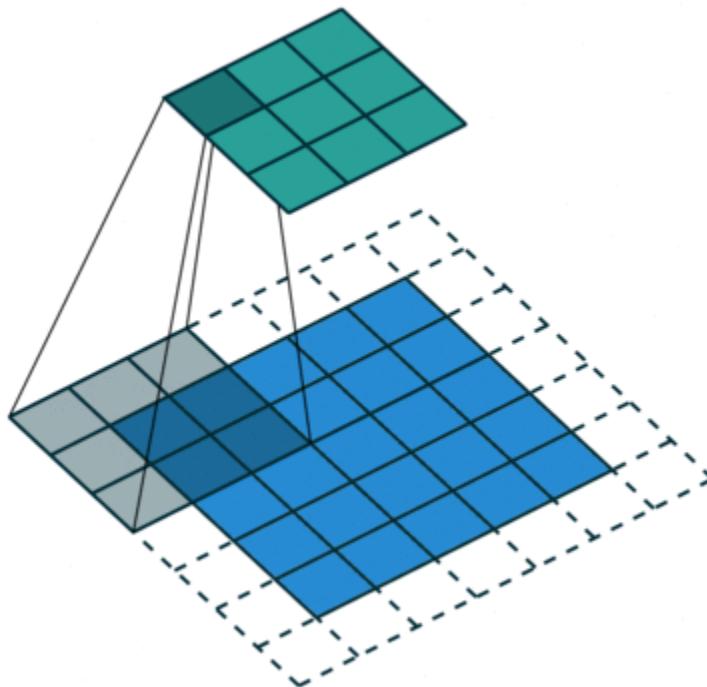


- 灰色部分为卷积核权重，与左侧相同；白色部分为空，值为0
- dilation rate: 空洞率，空洞卷积权重值的间隔为dilation rate - 1
- 当空洞率为1时，退化为普通卷积

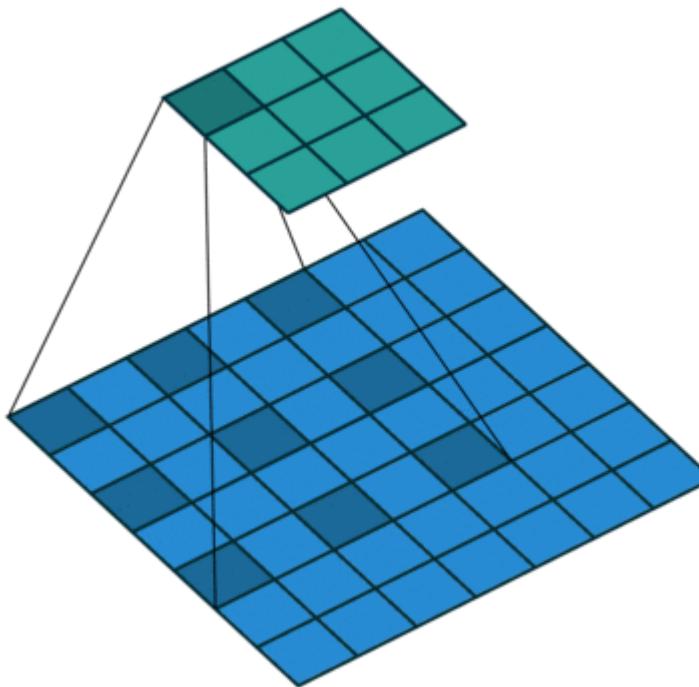


# 空洞卷积(dilated convolution)

普通卷积



空洞卷积



- 空洞后的卷积核的空间(感受野)大小:

$$k = (n - 1) \times d + 1$$

n = 原卷积核大小

d = dilation rate

- 卷积后图片大小计算公式:

$$O = \left\lfloor \frac{(I-k+2P)}{S} \right\rfloor + 1$$

I = 输入图片大小

P = 填充大小

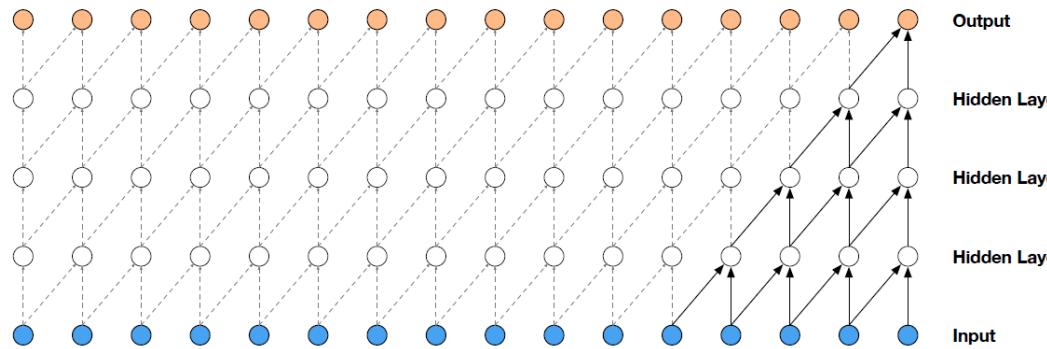
S = 步长

图片出处: [https://github.com/vdumoulin/conv\\_arithmetic](https://github.com/vdumoulin/conv_arithmetic)

# 空洞卷积(dilated convolution)

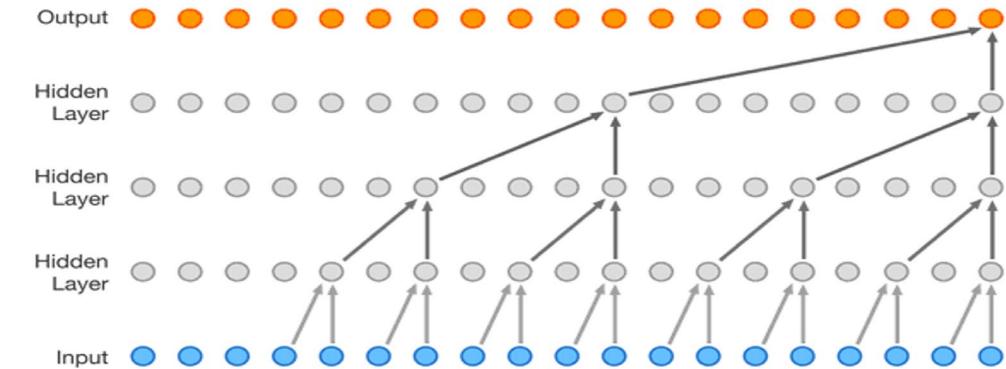
## 优点与适用性

- 在不增加参数的情况下**增大感受野**, 适用于图片size较大, 或需要快速感受全局信息的情况



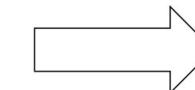
多层普通卷积

卷积核为大小2, 四层卷积, 普通卷积可以覆盖**5个**像素点, 而使用空洞卷积可以覆盖**16个**像素点



多层空洞卷积

- 通过设置不同的dilation rate捕获**多尺度**上下文信息, 适用于需要捕获图片的多层次的情况, 如语义分割等。

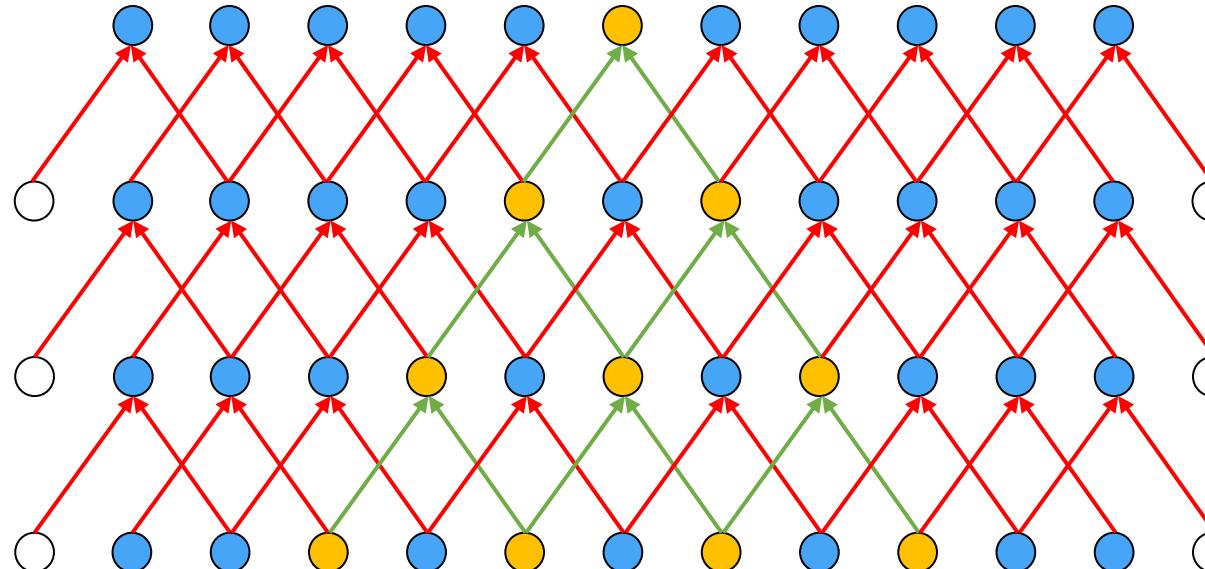




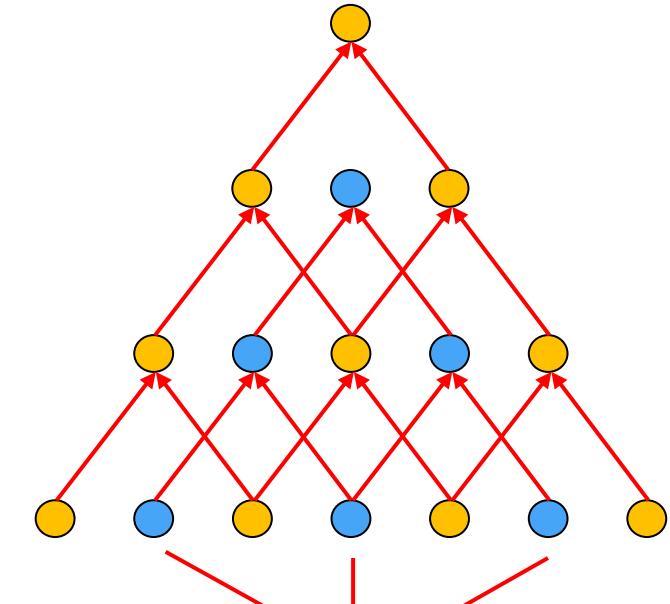
# 空洞卷积(dilated convolution)

## 存在的问题

空洞卷积存在网格效应



三层空洞卷积  
dilation=2



堆叠后漏掉了三个点的信息

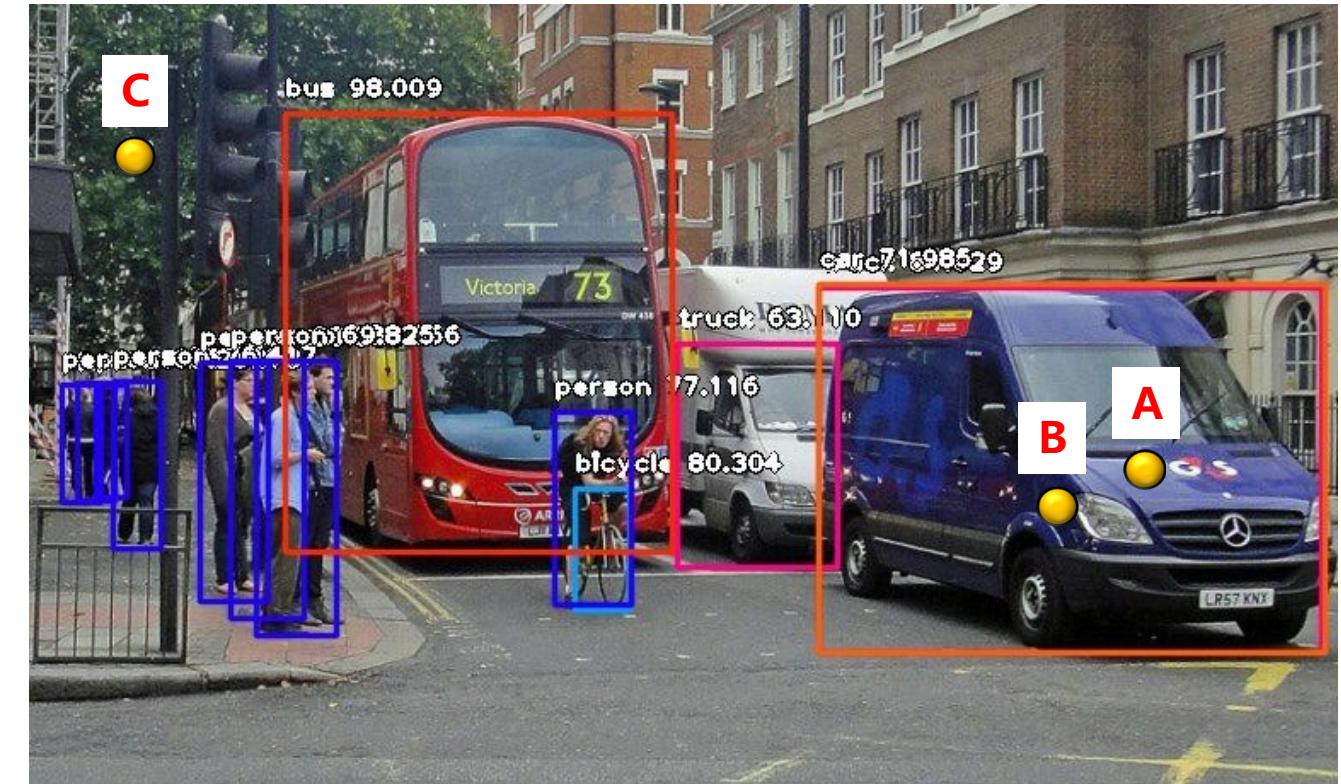


# 空洞卷积(dilated convolution)

## 存在的问题

远距离的点之间的信息可能不相关

空洞卷积虽然是被设计用来捕获更远距离的信息的，但是这样一味的使用大的 dilation 就会忽略掉近距离的信息，如何能同时处理远距离信息和临近区域的信息是设计好空洞卷积的关键之一。



点B明显与近距离的点A更相关，与左上角的点C关系不大，如果dilation过大则容易忽略点A的信息而降低模型效果



# 空洞卷积(dilated convolution)

## 解决方法

### Hybrid Dilated Convolution (HDC)

一、叠加卷积的 **dilation rate** 不能有大于1的公约数。比如 [2, 4, 6] 则不是一个好的三层卷积，依然会出现 gridding effect。 **解决网格效应**

二、我们将 dilation rate 设计成**锯齿状结构**，例如 [1, 2, 5, 1, 2, 5] 循环结构。

**同时捕获远近信息**

三、满足

$$M_i = \max[M_{i+1} - 2r_i, M_{i+1} - 2(M_{i+1} - r_i), r_i]$$

$$M_2 \leq k$$

$$M_i = \max[M_{i+1} - 2r_i, M_{i+1} - 2(M_{i+1} - r_i), r_i]$$

目标:  $M_2 \leq k$

$r_i$  指第*i*层的dilation rate

$M_i$ 指的是第*i*层的dilation rate的最大值

默认最后一层的 $M_n = r_n$

$k$  = kernel size

**dilation rate [1, 2, 5] with  $3 \times 3$  kernel**

$$M_3 = r_3 = 5$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \max\{M_3 - 2r_2, M_3 - 2(M_3 - r_2), r_2\} \\ &= \max\{1, -1, 2\} = 2 \leq k = 3 \end{aligned}$$

**满足条件**



# 空洞卷积(dilated convolution)

## 使用PyTorch实现空洞卷积

Conv2d

直接使用torch.nn.Conv2d，选择不同的dilation即可

```
CLASS torch.nn.Conv2d(in_channels, out_channels, kernel_size, stride=1, padding=0,  
    dilation=1, groups=1, bias=True, padding_mode= 'zeros ')
```

[SOURCE]

Applies a 2D convolution over an input signal composed of several input planes.

In the simplest case, the output value of the layer with input size  $(N, C_{\text{in}}, H, W)$  and output  $(N, C_{\text{out}}, H_{\text{out}}, W_{\text{out}})$  can be precisely described as:

$$\text{out}(N_i, C_{\text{out}_j}) = \text{bias}(C_{\text{out}_j}) + \sum_{k=0}^{C_{\text{in}}-1} \text{weight}(C_{\text{out}_j}, k) \star \text{input}(N_i, k)$$

where  $\star$  is the valid 2D cross-correlation operator,  $N$  is a batch size,  $C$  denotes a number of channels,  $H$  is a height of input planes in pixels, and  $W$  is width in pixels.



# 空洞卷积(dilated convolution)

## 空洞卷积的实现

实现dilation为1,2,5的三层空洞卷积

```
class DilatedConvModule(nn.Module):
    def __init__(self):
        super(DilatedConvModule, self).__init__()
        # 定义一个空洞率为1,2,5的三层空洞卷积
        self.conv = nn.Sequential(
            nn.Conv2d(in_channels=3, out_channels=32,
                      kernel_size=3, stride=1,
                      padding=0, dilation=1),
            nn.BatchNorm2d(32),
            nn.ReLU(inplace=True),
            nn.Conv2d(in_channels=32, out_channels=64,
                      kernel_size=3, stride=1,
                      padding=0, dilation=2),
            nn.BatchNorm2d(64),
            nn.ReLU(inplace=True),
            nn.Conv2d(in_channels=64, out_channels=128,
                      kernel_size=3, stride=1,
                      padding=0, dilation=5),
            nn.BatchNorm2d(128),
            nn.ReLU(inplace=True)
        )
        # 输出层，将通道数变为分类数量
        self.fc = nn.Linear(128, num_classes)
```

只需改变dilation参数，其他与Conv2d相同

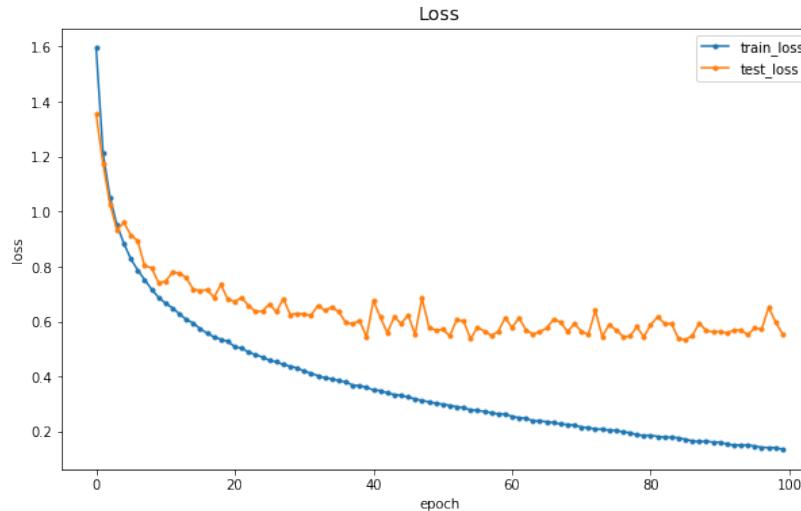
```
def forward(self, X):
    # 图片先经过三层空洞卷积
    out = self.conv(X)
    # 使用平均池化层将图片的大小变为1x1
    out = F.avg_pool2d(out, 16)
    # 将张量out从shape batch x 128 x 1 x 1 变为 batch x 128
    out = out.squeeze()
    # 输入到全连接层将输出的维度变为10
    out = self.fc(out)
    return out
```

- 图片大小的变化:  $32 \rightarrow 30 \rightarrow 26 \rightarrow 16 \rightarrow 1$
- 池化层为了将图片大小变为1
- 输出层将维度变为类别数，后续经过处理变为每个类别的概率



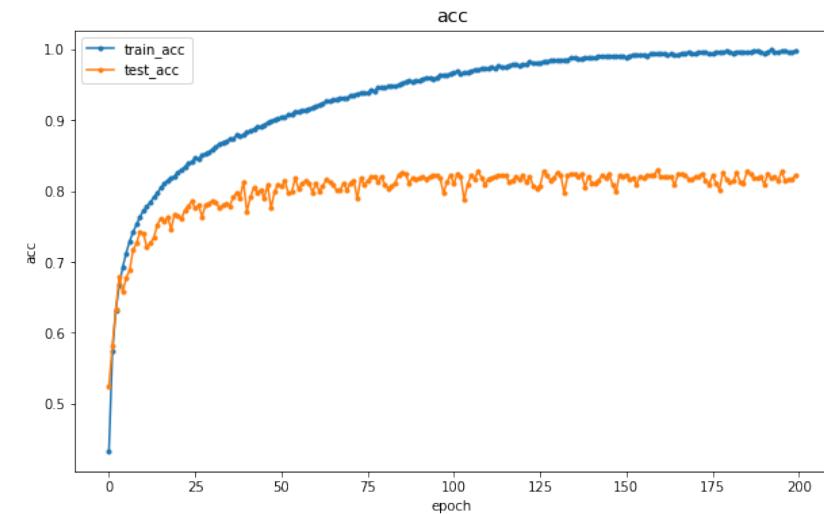
# 空洞卷积(dilated convolution)

## 空洞卷积实验结果



Loss的变化

batchsize=512  
lr=0.001  
epochs=100



平均准确率的变化

- 模型在训练集上可以达到一个较低的loss和较高的准确率
- 在大约40轮后测试集的Loss基本趋向于收敛
- 测试集的平均准确率达到了82.92%，说明当前模型在cifar-10上进行分类的效果良好



# 目录

## 1. 卷积神经网络

- 卷积基本操作
- 手动实现卷积层
- 图像分类示例

## 2. 空洞卷积

- 空洞卷积的概念
- 优点与适用性
- 缺点与解决方法
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 3. 残差网络

- 解决的问题
- 网络结构
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 4. 实验要求

- 数据集介绍
- 卷积实验
- 空洞卷积实验
- 残差网络实验



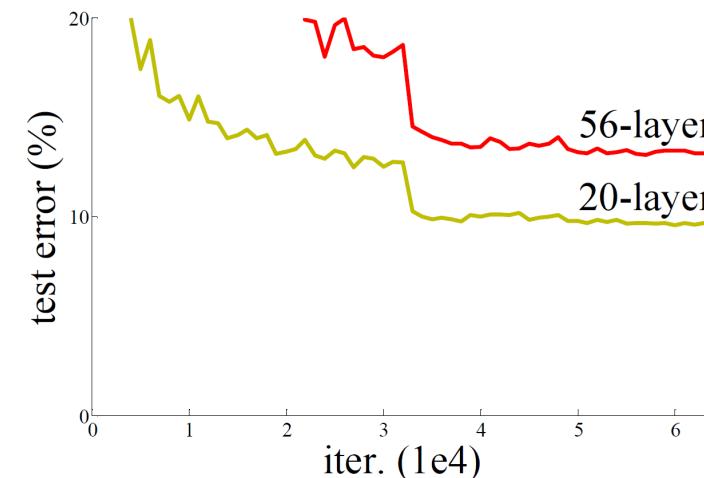
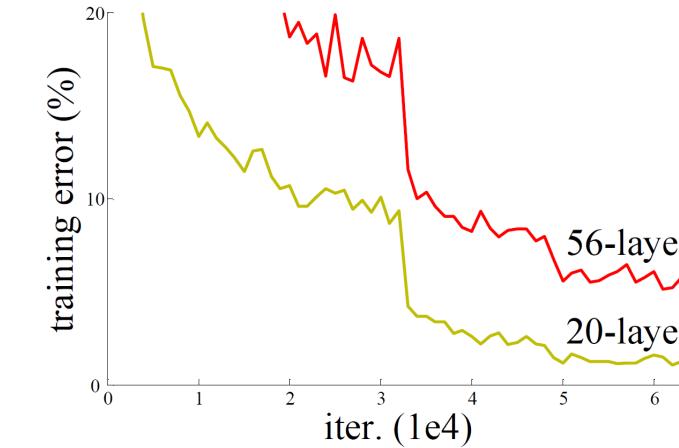
# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 堆叠多层卷积

理论上，深层的网络效果不会比浅层网络差，因为深层网络的前几层理论可以学习到一个输入等于输出的映射，然后后几层等于浅层网络，则效果至少相同

右侧的实验结果表明实际上深层的网络效果反而更差，且训练集的效果也很差，说明不是过拟合

反向传播路径太长，训练难度增加



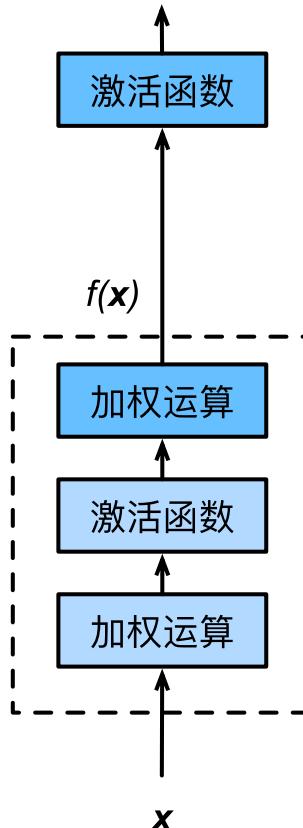
使用20层和56层卷积在CIFAR10数据集上的实验结果



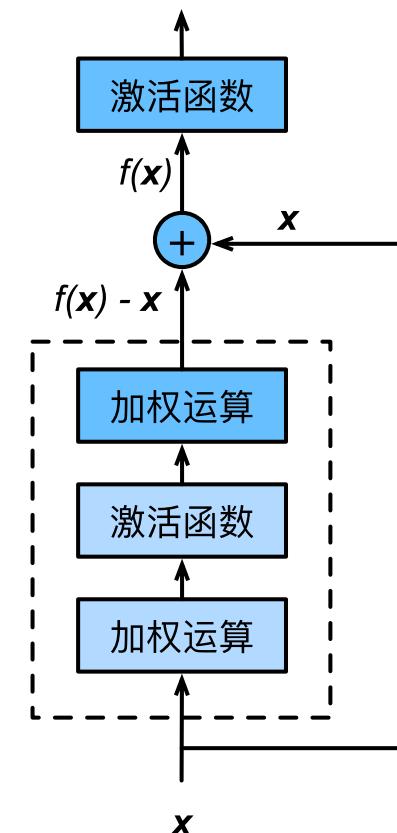
# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 残差网络结构

用来解决深层网络训练难度过大的问题



普通网络结构



残差网络结构

```
def forward(self, X):
    Y = F.relu(self.conv1(X))
    Y = self.conv2(Y)
    return F.relu(Y)
```

两层卷积代码

```
def forward(self, X):
    Y = F.relu(self.conv1(X))
    Y = self.conv2(Y)
    return F.relu(Y + X)
```

加入残差结构后

$X$   
↓  
卷积  
↓  
激活  
↓  
卷积  
↓  
激活

$X$   
↓  
卷积  
↓  
激活  
↓  
卷积  
↓  
激活  
↓  
残差连接  
↓  
激活



# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 残差网络的实现

```
class ResidualBlock(nn.Module):
    def __init__(self, inchannel, outchannel, stride=1):
        super(ResidualBlock, self). init_()
        # 正常卷积部分，堆叠了两层卷积
        self.left = nn.Sequential(
            nn.Conv2d(inchannel, outchannel,
                      kernel_size=3, stride=stride,
                      padding=1, bias=False),
            nn.BatchNorm2d(outchannel),
            nn.ReLU(inplace=True),
            nn.Conv2d(outchannel, outchannel,
                      kernel_size=3, stride=1,
                      padding=1, bias=False),
            nn.BatchNorm2d(outchannel)
        )
```

```
# 如果上方卷积没有改变size和channel
# 则不需要对输入进行变化，故 shortcut为空
self.shortcut = nn.Sequential()
# 如果上方卷积改变了size或channel
# 则使用1x1卷积改变输入的size或channel，使其保持一致
if stride != 1 or inchannel != outchannel:
    self.shortcut = nn.Sequential(
        nn.Conv2d(inchannel, outchannel,
                  kernel_size=1, stride=stride,
                  bias=False),
        nn.BatchNorm2d(outchannel)
    )
```

正常的卷积堆叠

实现残差

```
def forward(self, x):
    # 正常使用卷积操作
    out = self.left(x)
    # 将输入/变换shape后的输入与卷积的输出相加
    out += self.shortcut(x)
    # 经过激活函数后输出
    out = F.relu(out)
    return out
```

注意先相加再激活

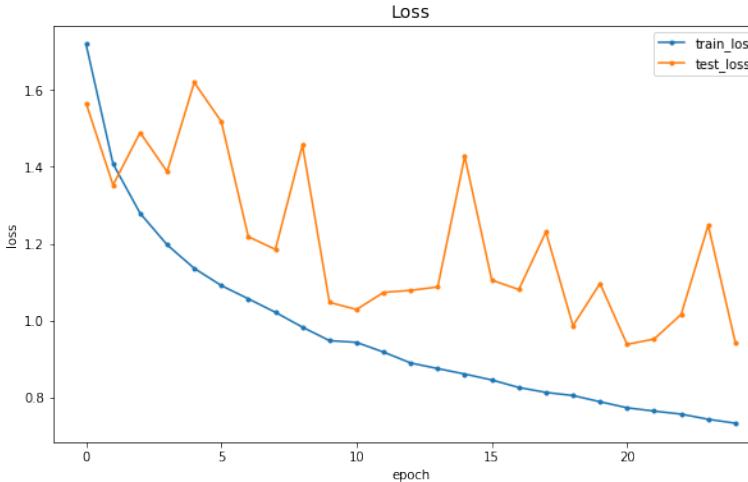
解决不能直接相加的问题

- 若卷积后的结果与输入X的shape不同，则不能直接相加
- 当步长不为1，图片大小发生变化（padding不随步长改变的情况）
- 当通道数与输入通道不同，图片通道数发生变化
- 使用一个1x1的卷积核来改变X的shape使得能与卷积后的结果shape相匹配



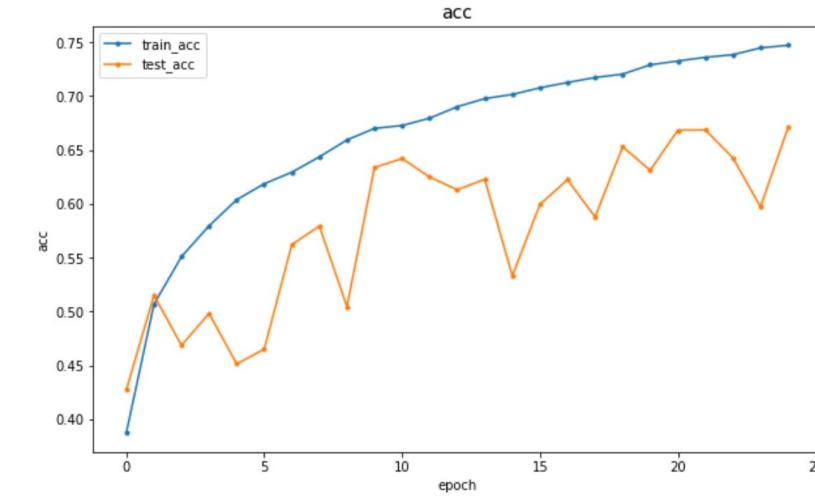
# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 残差模型实验结果



Loss的变化

batchsize=512  
lr=0.001  
epochs=25



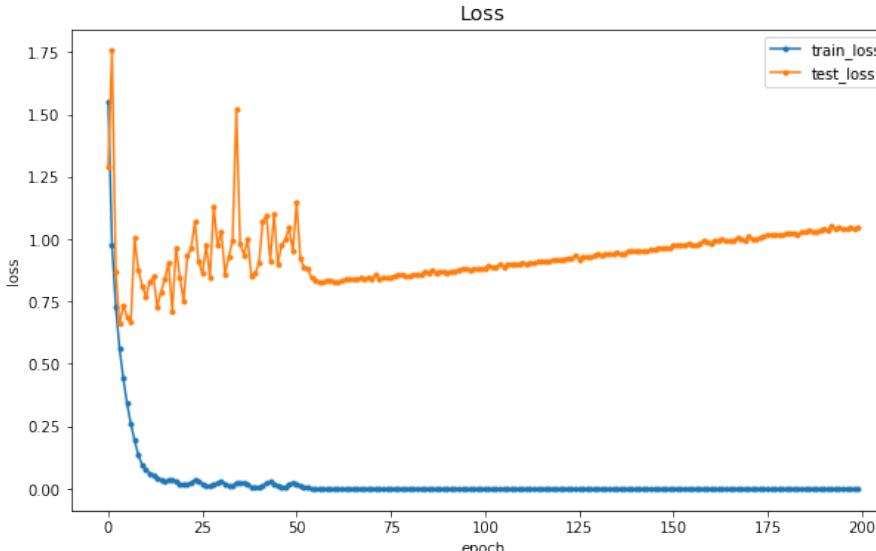
平均准确率的变化

- 在训练集上Loss持续下降，准确率持续上升，说明模型有一定的学习能力
- 在测试集上的效果较差，且波动明显，可能是lr过大，或者模型泛化能力差
- 由于当前卷积只有三层，只是残差操作的一个演示，所以效果并不理想，实际上在浅层网络上一般也不直接使用残差网络



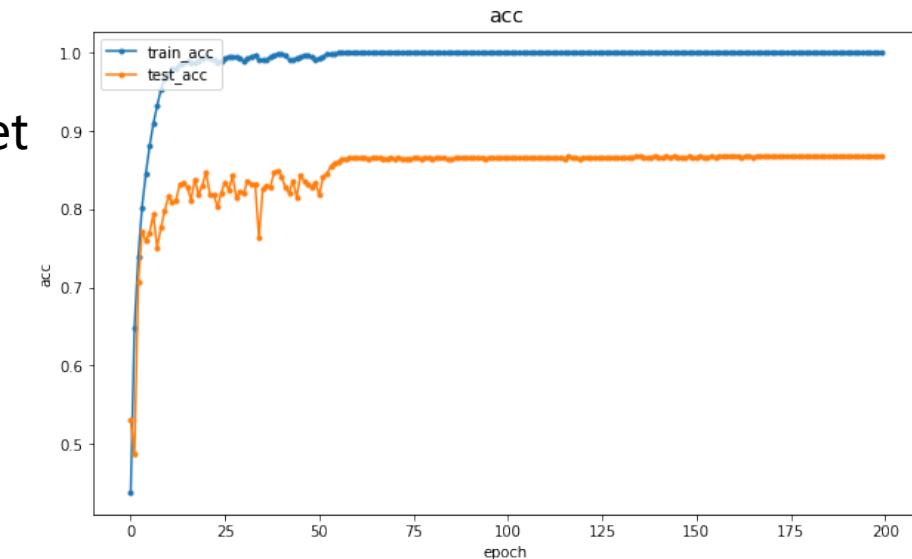
# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 残差模型实验结果



Loss的变化

18层Conv的ResNet  
batchsize=512  
lr=0.001  
epochs=200



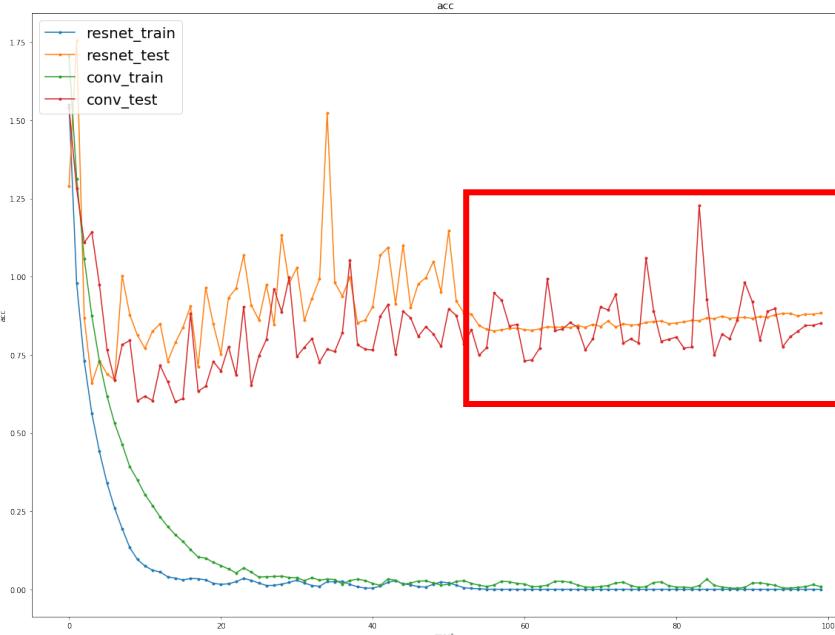
平均准确率的变化

- 模型在训练集上持续训练损失最终降到接近0，准确率也达到了100%，说明模型的容量是足够的
- 在测试集上，Loss在第50轮附近持续上升，而此时训练集的Loss还在持续下降，说明发生了过拟合现象
- 最终在此参数下ResNet-18在测试集上能达到的平均准确率为86.85%



# 残差网络 (Residual Networks, ResNets)

## 残差模型与同等深度卷积的对比



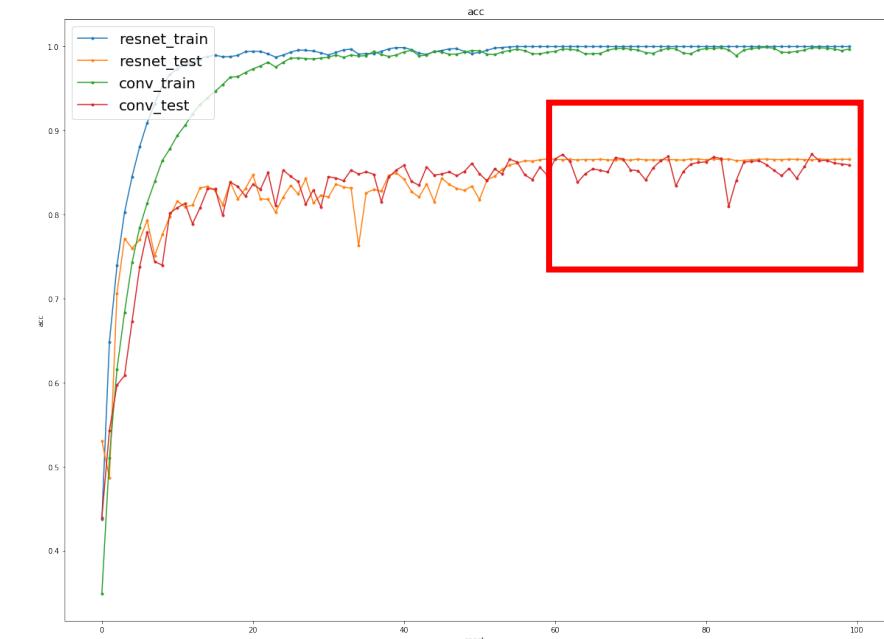
Loss的变化

batchsize=512

lr=0.001

epochs=100

共堆叠18层



平均准确率的变化

- 卷积为红色与绿色曲线，残差为黄色和蓝色曲线
- 可以看到在深层模型下，无论是Loss还是准确率，普通卷积的曲线（红色）比残差的曲线（黄色）在训练后期的波动更大，说明残差网络的加入确实可以帮助模型更好的训练



# 目录

## 1. 卷积神经网络

- 卷积基本操作
- 手动实现卷积层
- 图像分类示例

## 2. 空洞卷积

- 空洞卷积的概念
- 优点与适用性
- 缺点与解决方法
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 3. 残差网络

- 解决的问题
- 网络结构
- 使用PyTorch实现与实验结果

## 4. 实验要求

- 数据集介绍
- 卷积实验
- 空洞卷积实验
- 残差网络实验



# 实验要求

## 数据集——车辆分类数据

- 输入图片，输出对应的类别
- 共1358张车辆图片
- 分别属于汽车、客车和货车三类
- 汽车：779张
- 客车：218张
- 货车：360张
- 每个类别的后20-30%当作测试集
- 各图片的大小不一，需要将图片拉伸到相同大小

### 分类问题



汽车



客车



货车



# 实验要求

## 数据集——照片去雾数据

- 输入带雾图片，输出去雾图片
- 共520张图片
- 后20%的图片当作测试集
- 各图片的**大小不一**，需要将图片拉伸到**相同大小**
- 实验分析需要有多张照片的原图、模型输出图、数据集中不带雾图的对比

回归问题



原图（带雾）



输出（去雾）

# 实验要求

## 数据基本处理

```
# 导入相关的包
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
```

```
# 读取并展示图片
file = Path("D:\MyFile\深度学习数据集\去雾数据集\去雾图片\\001.jpg")
img = Image.open(file)
plt.imshow(img)
plt.axis('off')
plt.show()
```



```
# 对图片进行变形
img = img.resize((200,100),Image.ANTIALIAS)
img
```



```
# 将图片转成numpy矩阵形式
img = np.array(img)
print(img.shape)
```

(100, 200, 3)

```
# 归一化
img = img / 255
```



# 实验要求

## 二维卷积实验

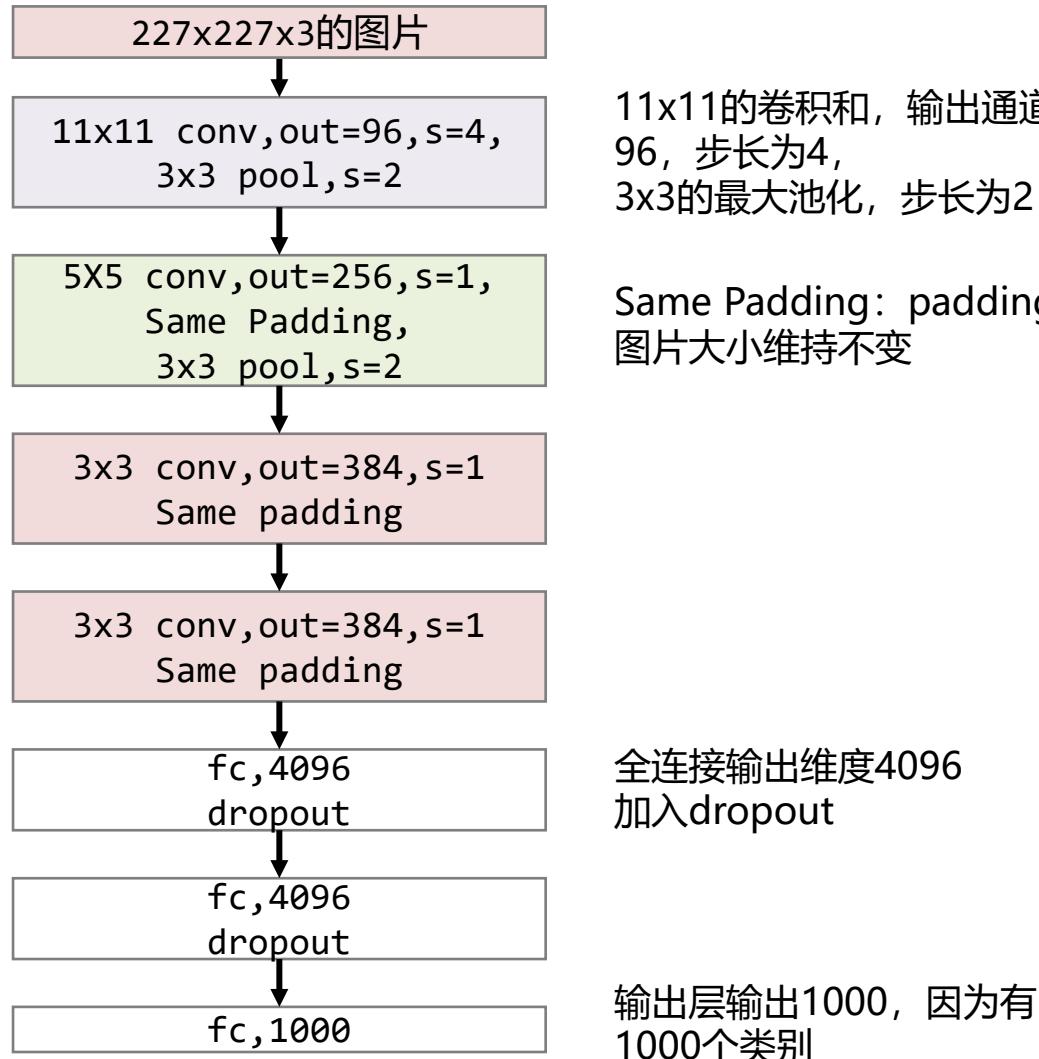
- 手写二维卷积的实现，并在至少一个数据集上进行实验，从训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析实验结果（最好使用图表展示）
- 使用torch.nn实现二维卷积，并在至少一个数据集上进行实验，从训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析实验结果（最好使用图表展示）
- 不同超参数的对比分析（包括卷积层数、卷积核大小、batchsize、lr等）选其中至少1-2个进行分析
- 使用PyTorch实现经典模型AlexNet并在至少一个数据集进行试验分析（无GPU环境则至少实现模型）
- 使用实验2中的前馈神经网络模型在本次给定数据集上进行实验，并将实验结果与卷积模型结果进行对比分析（选做）



# 实验要求

## AlexNet

激活函数皆为Relu



11x11的卷积和，输出通道为96，步长为4，  
3x3的最大池化，步长为2

Same Padding: padding后  
图片大小维持不变

全连接输出维度4096  
加入dropout

输出层输出1000，因为有  
1000个类别

- 可根据实际数据情况灵活改动各层的步长、卷积核大小、池化等
- 根据最终分类的类别改动输出层的size
- 完整的AlexNet参数约6000万个，若无GPU环境则可以适当将减少参数模型，或者用少量数据能跑通模型即可。
- 关于AlexNet进一步的内容可以参照网上各种文章或者左下角的论文



# 实验要求

## 空洞卷积实验

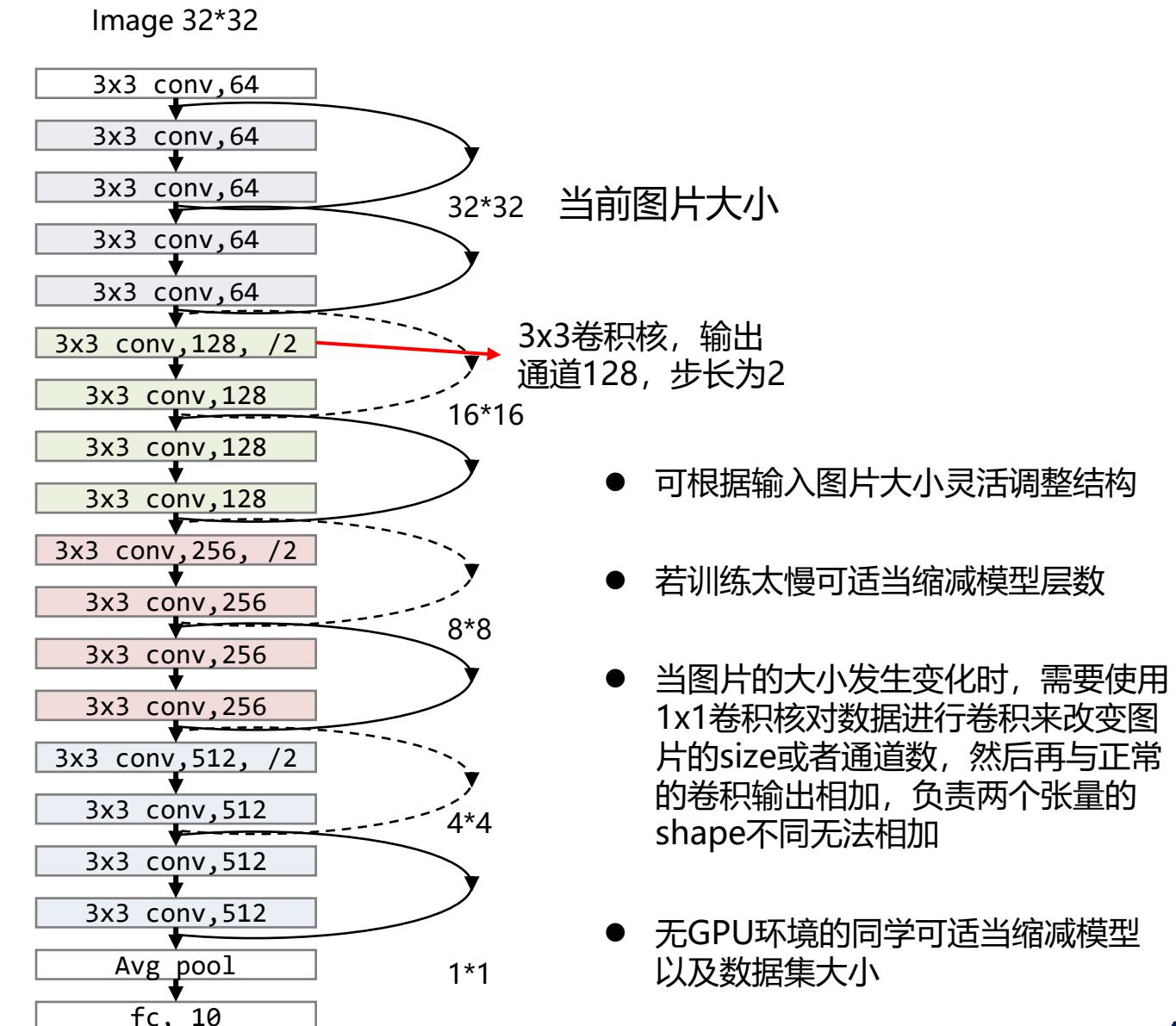
- 使用`torch.nn`实现空洞卷积，要求`dilation`满足HDC条件（如1,2,5）且要堆叠多层并在至少一个数据集上进行实验，从训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析实验结果（最好使用图表展示）
- 将空洞卷积模型的实验结果与卷积模型的结果进行分析比对，训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析
- 不同超参数的对比分析（包括卷积层数、卷积核大小、不同`dilation`的选择, `batchsize`、`lr`等）选其中至少1-2个进行分析（选做）



# 实验讲解

## 残差网络实验

- 实现给定结构的残差网络，在至少一个数据集上进行实验，从训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析实验结果（最好使用图表展示）
- 将残差网络与空洞卷积相结合，在至少一个数据集上进行实验，从训练时间、预测精度、Loss变化等角度分析实验结果（最好使用图表展示）（选做）





# 实验提交要求

## ■ 实验报告

- 需要完成之前的任务要求，写清楚实验结果，对实验结果的分析和相关实验参数设置

## ■ 实验报告中涉及的代码

- 完整代码，包括处理数据的代码

## ■ 所有文件放到一个文件夹内压缩

- 名称例如： 20120332\_张三\_实验1.zip