

计算方法实验（实验 1）

2022 年 4 月 23 日

数据显示结果已保留 4 位小数。

1 实验题目 1：拉格朗日（Lagrange）插值

1.1 问题分析

准确描述并总结出实验题目（摘要），并准确分析原题的目的和意义。

1.1.1 方法概要

给定平面上 $n+1$ 个不同的数据点 $(x_k, f(x_k)), k=0, 1, \dots, n, x_i \neq x_j, i \neq j$ 则满足条件

$$P_n(x_k) = f(x_k), k=0, 1, \dots, n$$

的 n 次拉格朗日插值多项式

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) l_k(x)$$

是存在唯一的。若 $x_k \in [a, b], k=0, 1, \dots, n$ ，且函数 $f(x)$ 充分光滑，则当 $x \in [a, b]$ 时，有误差估计式

$$f(x) - P_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x-x_0)(x-x_1) \cdots (x-x_n), \xi \in [a, b]$$

1.1.2 实验目的

利用拉格朗日插值多项式 $P_n(x)$ 求 $f(x)$ 的近似值。

输入： $n+1$ 个数据点 $x_k, f(x_k), k=0, 1, \dots, n$ 、插值点 x

输出: $f(x)$ 在插值点 x 的近似值 $P_n(x)$

1.2 数学原理

数学原理表达清晰且书写准确。

1.2.1 证明 $P_n(x)$ 存在且唯一

证明: 使用归纳法证明。

当 $n = 0$, 一定存在 $P_0(x) = C = f_0(x)$ 满足要求。

假设当 $n = k - 1$ 时, 存在满足要求的 $P_{k-1}(x)$, 则当 $n = k$, 有

$$P_k(x) = P_{k-1}(x) + c(x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_{k-1})(x - x_k), \text{ } c \text{ 为系数}$$

则 $\because P_n(x_n) = f(x_n), \therefore$ 参数 c 是可求的, 故 $P_n(x)$ 是存在的。

由多项式基本定理, $\because P_n(x)$ 的次数 $\leq n, \therefore P_n(x)$ 是唯一存在的。

1.2.2 计算方法

对平面上 $n + 1$ 个点 $(x_k, f(x_k)), k = 0, 1, \cdots, n, x_i \neq x_j, i \neq j$ 定义 n 次多项式:

$$L_k(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \cdots (x - x_{k-1})(x - x_{k+1}) \cdots (x - x_n)}{(x_k - x_0)(x_k - x_1) \cdots (x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1}) \cdots (x_k - x_n)}$$

则 $L_k(x_k) = 1, L_k(x_m) = 0, m \neq k$ 。

定义:

$$P_n(x) = f(x_0)L_0(x) + f(x_1)L_1(x) + \cdots + f(x_n)L_n(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k)L_k(x)$$

为 $f(x)$ 的 n 次拉格朗日插值多项式。

1.3 程序设计流程

编译通过, 根据输入能得到正确输出。

```
[1]: # 引入需要的包
import numpy as np
```

```
from pandas import DataFrame
from matplotlib import pyplot as plt
```

```
[2]: #  $L_k(x)$ 
def L(k, x_list: np.ndarray):
    def l(x: float):
        x_k = x_list[k]
        slice = np.array([*x_list[:k], *x_list[k+1:]])
        repeat = np.array([x, ] * (len(x_list) - 1))
        repeat_k = np.array([x_k, ] * (len(x_list) - 1))
        return np.prod(repeat - slice) / np.prod(repeat_k - slice)
    return l

# 拉格朗日多项式  $P_n(x)$ 
def P(f, x_list: np.ndarray, x: float):
    return np.sum([f(x_list[k]) * L(k, x_list)(x) for k in range(len(x_list))])

# 获得  $x\_list$ 
def linspace(r: int, n: int):
    return [-r + k * (2 * r / n) for k in range(0, n + 1)]
```

1.3.1 问题一

```
[3]: def problem1():
    print("问题 1: 拉格朗日插值多项式的次数 n 越大越好吗? ")

    def sub(targets_x, targets_n, solve):
        return DataFrame({n: {x: solve(n, x) for x in targets_x} for n in
        ↪ targets_n}).round(4)

    print("(1) 考虑  $f(x) = 1 / (1 + x^2)$  in  $[-5, 5]$ ")
    targets_x_1 = [0.75, 1.75, 2.75, 3.75, 4.75]
    targets_n = [5, 10, 20]
    print(sub(
        targets_x=targets_x_1,
        targets_n=targets_n,
```

```

        solve=lambda n_i, x: P(
            lambda x_i: 1 / (1 + x_i ** 2), linspace(5, n_i), x
        )
    ))
print("差值: ")
print(sub(
    targets_x=targets_x_1,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: ((1 / (1 + x ** 2)) - P(
        lambda x_i: 1 / (1 + x_i ** 2), linspace(5, n_i), x
    ))
))

print("(2) 考虑  $f(x) = e^x$  in  $[-1, 1]$ ")
targets_x_2 = [-0.95, -0.05, 0.05, 0.95]
print(sub(
    targets_x=targets_x_2,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: P(lambda x_i: np.e ** x_i,
        linspace(5, n_i), x)
))
print("差值: ")
print(sub(
    targets_x=targets_x_2,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: (np.e ** x - P(lambda x_i: np.e ** x_i,
        linspace(5, n_i), x))
))
print("画出两个函数以及其拉格朗日多项式的图像: ")
slice_fluent_size = 1000
x_linespace_2 = np.linspace(-1, 1, slice_fluent_size)
x_linespace_10 = np.linspace(-5, 5, slice_fluent_size)
y1 = 1 / (1 + x_linespace_10**2)
# Ls1 = {n_i: np.array([P(lambda x_i: np.e ** x_i, linspace(5, n_i), x)
#                       for x in x_linespace_10]) for n_i in targets_n}
Ls1 = {n_i: np.array([P(lambda x_i: 1 / (1 + x_i**2), linspace(5, n_i), x)

```

```

        for x in x_linespace_10]) for n_i in targets_n}

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(1) Consider  $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ ")
plt.legend(handles=plt.plot(x_linespace_10, y1, label=" $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ "), loc='best')

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(1) Consider  $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ , select n")
plt.legend(handles=[plt.plot(x_linespace_10, y1, label=" $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ ")[0],
                    * [plt.plot(x_linespace_10, Ls1[n_i],
label=f" $P_n(x), n={n_i}$ ") [0] for n_i in Ls1]], loc='best')

y2 = np.exp(x_linespace_2)
Ls2 = {n_i: np.array([P(lambda x_i: np.exp(x_i), linspace(5, n_i), x)
                      for x in x_linespace_2]) for n_i in targets_n}

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(2) Consider  $f(x) = e^x$ ")
plt.legend(handles=plt.plot(x_linespace_2, y2, label=" $f(x) = e^x$ "), loc='best')

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(2) Consider  $f(x) = e^x$ , select n")
plt.legend(handles=[plt.plot(x_linespace_2, y2, label=" $f(x) = e^x$ ") [0],
                    * [plt.plot(x_linespace_2, Ls2[n_i],
label=f" $P_n(x), n={n_i}$ ") [0] for n_i in Ls2]], loc='best')

problem1()

```

问题 1: 拉格朗日插值多项式的次数 n 越大越好吗?

(1) 考虑 $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ in $[-5, 5]$

	5	10	20
0.75	0.5290	0.6790	0.6368
1.75	0.3733	0.1906	0.2384
2.75	0.1537	0.2156	0.0807
3.75	-0.0260	-0.2315	-0.4471
4.75	-0.0157	1.9236	-39.9524

差值:

	5	10	20
0.75	0.1110	-0.0390	0.0032
1.75	-0.1272	0.0556	0.0077
2.75	-0.0369	-0.0988	0.0361
3.75	0.0923	0.2979	0.5134
4.75	0.0582	-1.8812	39.9949

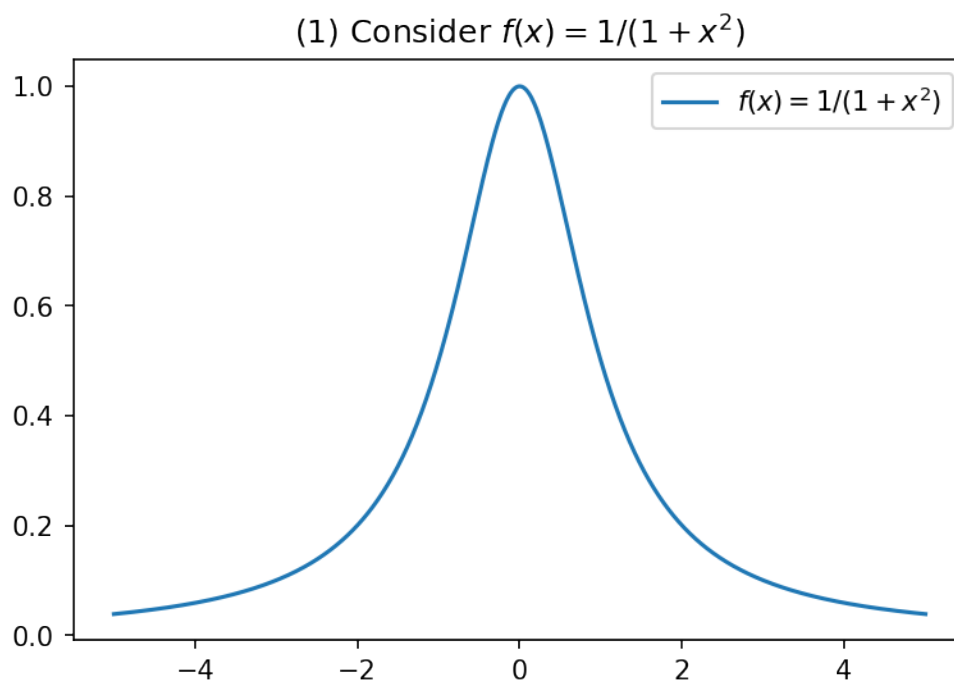
(2) 考虑 $f(x) = e^x$ in $[-1, 1]$

	5	10	20
-0.95	0.4306	0.3867	0.3867
-0.05	1.5272	0.9512	0.9512
0.05	1.6345	1.0513	1.0513
0.95	2.6414	2.5857	2.5857

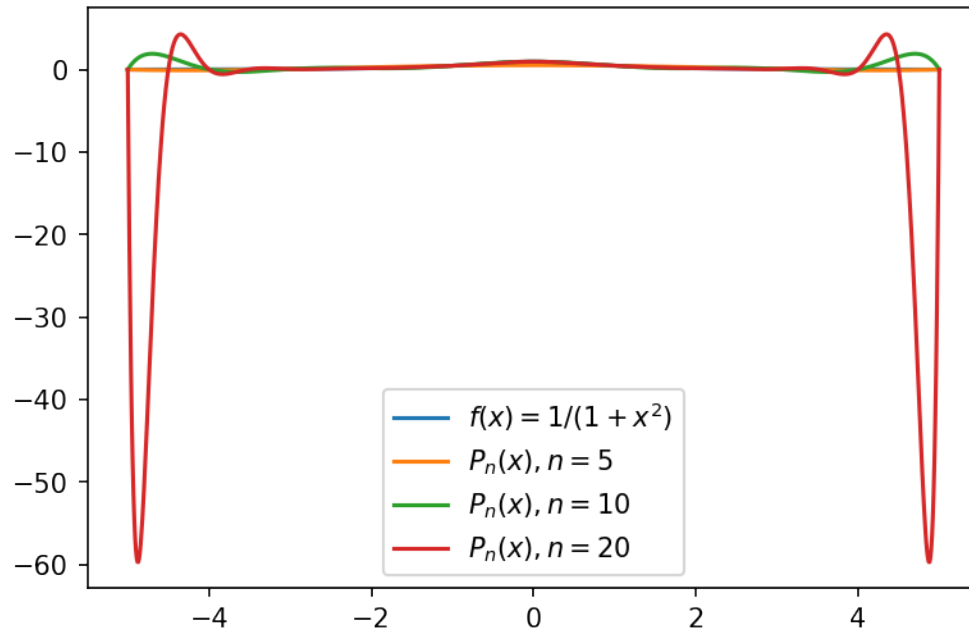
差值:

	5	10	20
-0.95	-0.0439	0.0	0.0
-0.05	-0.5760	0.0	-0.0
0.05	-0.5832	-0.0	0.0
0.95	-0.0557	-0.0	-0.0

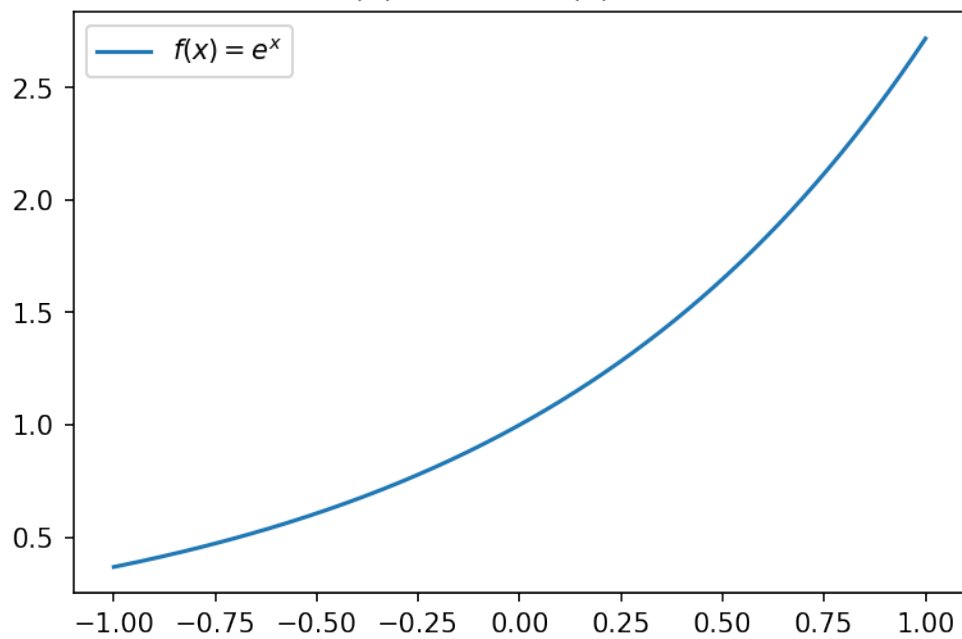
画出两个函数以及其拉格朗日多项式的图像:



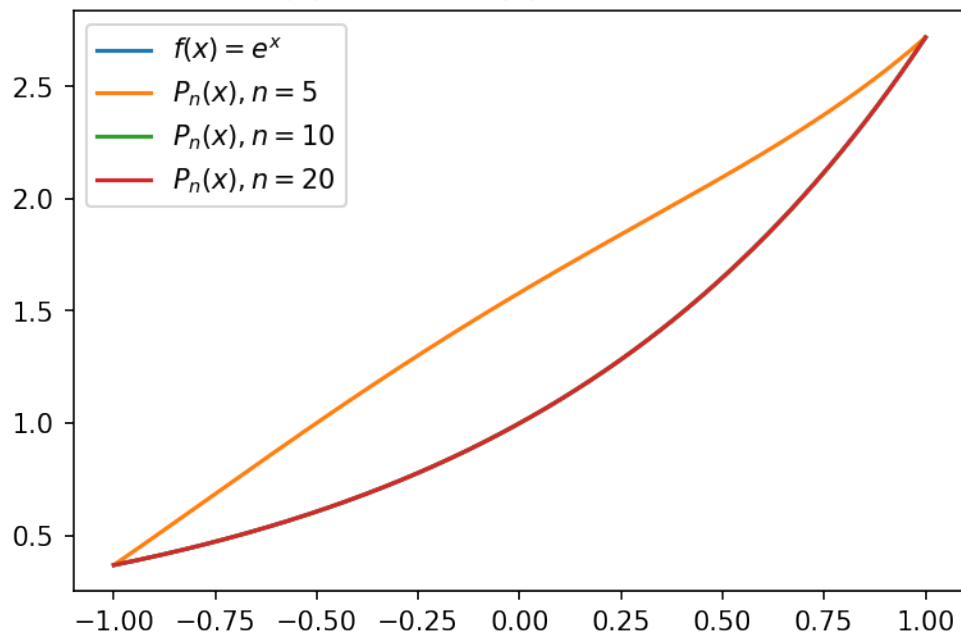
(1) Consider $f(x) = 1/(1 + x^2)$, select n



(2) Consider $f(x) = e^x$



(2) Consider $f(x) = e^x$, select n



1.3.2 问题二

```
[4]: def problem2():
    print("问题 2: 插值区间越小越好吗? ")

    def sub(targets_x, targets_n, solve):
        return DataFrame({n: {x: solve(n, x) for x in targets_x} for n in
        ↪targets_n}).round(4)

    print("(1) 考虑  $f(x) = 1 / (1 + x^2)$  in  $[-1, 1]$ ")
    targets_x_1 = [-0.95, -0.05, 0.05, 0.95]
    targets_n = [5, 10, 20]
    print(sub(
        targets_x=targets_x_1,
        targets_n=targets_n,
        solve=lambda n_i, x: P(
```



```

        lambda x_i: 1 / (1 + x_i ** 2), linspace(1, n_i), x
    )
))
print("差值: ")
print(sub(
    targets_x=targets_x_1,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: ((1 / (1 + x ** 2)) - P(
        lambda x_i: 1 / (1 + x_i ** 2), linspace(1, n_i), x
    ))
))

print("(2) 考虑  $f(x) = e^x$  in  $[-5, 5]$ ")
targets_x_2 = [0.75, 1.75, 2.75, 3.75, 4.75]
print(sub(
    targets_x=targets_x_2,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: P(lambda x_i: np.e ** x_i,
        linspace(5, n_i), x)
))
print("差值: ")
print(sub(
    targets_x=targets_x_2,
    targets_n=targets_n,
    solve=lambda n_i, x: (np.e ** x - P(lambda x_i: np.e ** x_i,
        linspace(5, n_i), x))
))

print("画出两个函数以及其拉格朗日多项式的图像: ")
slice_fluent_size = 1000
x_linespace_2 = np.linspace(-1, 1, slice_fluent_size)
x_linespace_10 = np.linspace(-5, 5, slice_fluent_size)
y1 = 1 / (1 + x_linespace_2**2)
Ls1 = {n_i: np.array([P(lambda x_i: 1 / (1 + x_i**2), linspace(5, n_i), x)
    for x in x_linespace_2]) for n_i in targets_n}
plt.figure(dpi=150)
plt.title("(1) Consider  $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ ")

```

```

plt.legend(handles=plt.plot(x_linespace_2, y1, label="$f(x) = 1 / (1 + \u221ax^2)$"), loc='best')

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(1) Consider $f(x) = 1 / (1 + x^2)$, select n")
plt.legend(handles=[plt.plot(x_linespace_2, y1, label="$f(x) = 1 / (1 + \u221ax^2)$")[0],

                    *[plt.plot(x_linespace_2, Ls1[n_i], \u221a
\u2192label=f"$P_n(x), n=\{n_i\}$") [0] for n_i in Ls1]], loc='best')

y2 = np.exp(x_linespace_10)
Ls2 = {n_i: np.array([P(lambda x_i: np.exp(x_i), linspace(5, n_i), x)
                      for x in x_linespace_10]) for n_i in targets_n}

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(2) Consider $f(x) = e^x$")
plt.legend(handles=plt.plot(x_linespace_10, y2, label="$f(x) = e^x$"), \u221a
\u2192loc='best')

plt.figure(dpi=150)
plt.title("(2) Consider $f(x) = e^x$, select n")
plt.legend(handles=[plt.plot(x_linespace_10, y2, label="$f(x) = e^x$")[0],

                    *[plt.plot(x_linespace_10, Ls2[n_i], \u221a
\u2192label=f"$P_n(x), n=\{n_i\}$") [0] for n_i in Ls2]], loc='best')

problem2()

```

问题 2: 插值区间越小越好吗?

(1) 考虑 $f(x) = 1 / (1 + x^2)$ in $[-1, 1]$

	5	10	20
-0.95	0.5171	0.5264	0.5256
-0.05	0.9928	0.9975	0.9975
0.05	0.9928	0.9975	0.9975
0.95	0.5171	0.5264	0.5256

差值:

	5	10	20
-0.95	0.0085	-0.0008	0.0
-0.05	0.0047	-0.0000	-0.0

0.05 0.0047 -0.0000 -0.0
 0.95 0.0085 -0.0008 0.0

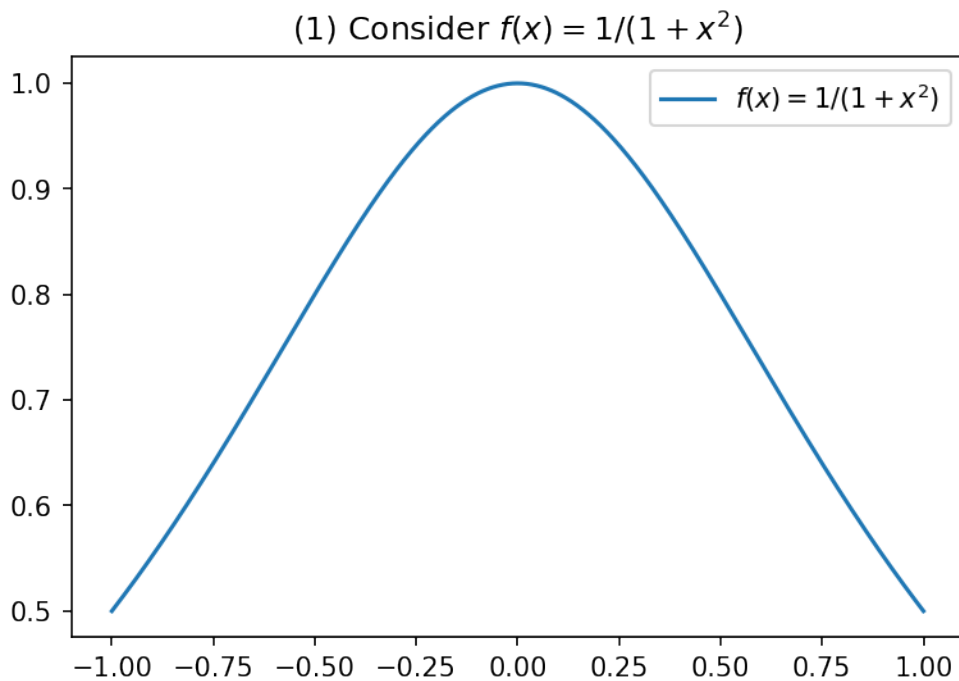
(2) 考虑 $f(x) = e^x$ in $[-5, 5]$

	5	10	20
0.75	2.3740	2.1171	2.1170
1.75	4.8716	5.7544	5.7546
2.75	15.0081	15.6432	15.6426
3.75	45.8623	42.5184	42.5211
4.75	119.6210	115.6074	115.5843

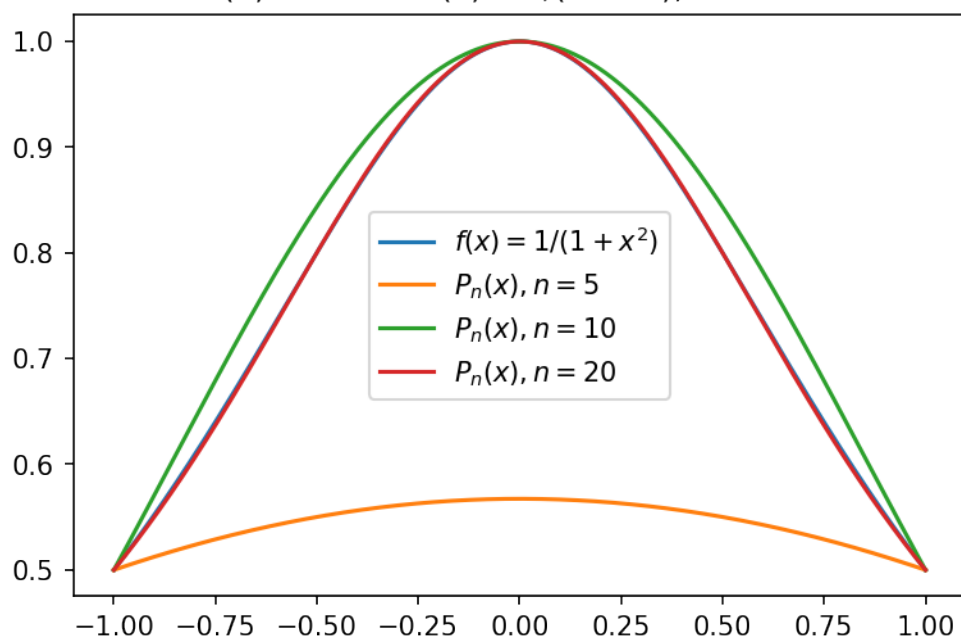
差值:

	5	10	20
0.75	-0.2570	-0.0001	-0.0
1.75	0.8830	0.0002	-0.0
2.75	0.6346	-0.0006	-0.0
3.75	-3.3412	0.0027	-0.0
4.75	-4.0367	-0.0231	-0.0

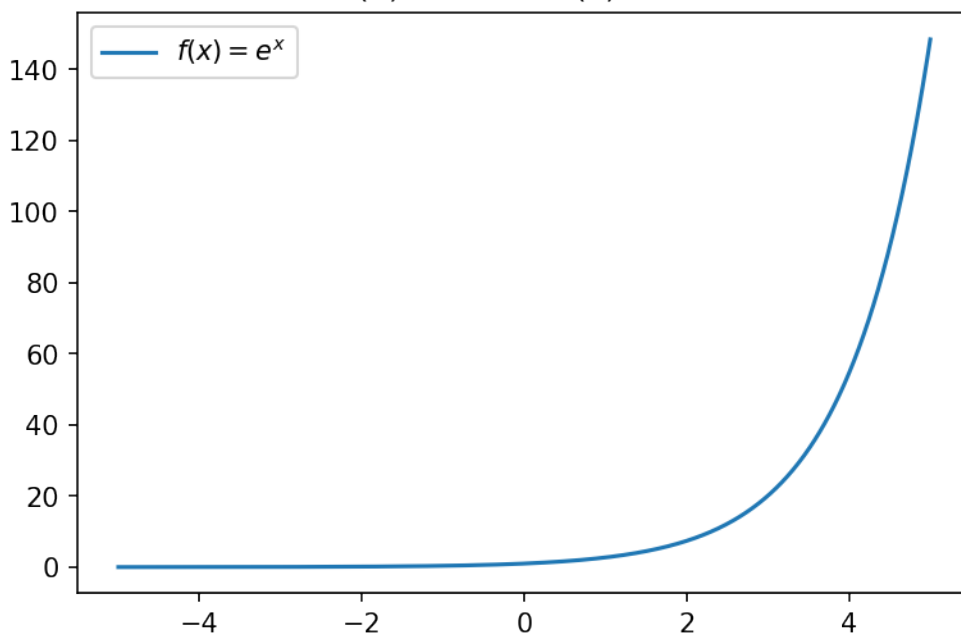
画出两个函数以及其拉格朗日多项式的图像:



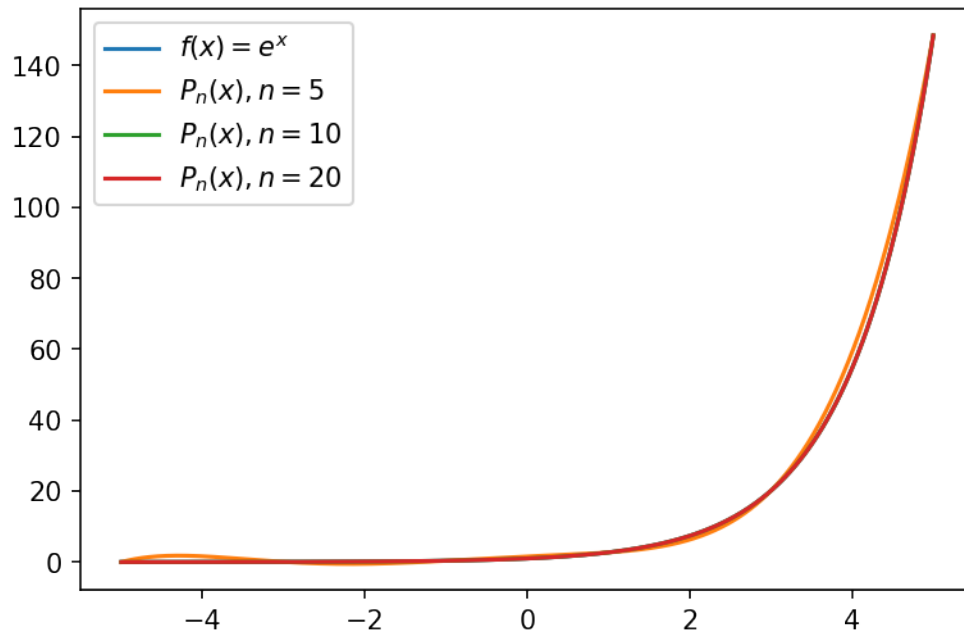
(1) Consider $f(x) = 1/(1 + x^2)$, select n



(2) Consider $f(x) = e^x$



(2) Consider $f(x) = e^x$, select n



1.3.3 问题四

```
[5]: def problem4():
    print("问题 4: 考虑拉格朗日插值问题, 内插比外推更可靠吗? ")

    def f(x: float):
        return np.sqrt(x)

    target_x = [5, 50, 115, 185]

    print("考虑函数  $f(x) = \text{sqrt}(x)$ ")

    def do_by_node(index: int, nodes: list):
        print(f"({index}) 考虑以", ", ".join(
            [f"x_{i} = {nodes[i]}" for i in range(3)]), "为节点的拉格朗日插值多项式  $P_2(x)$ ")
        print(DataFrame({
            "函数值": {x: P(f, nodes, x) for x in target_x},
```

```

        "f(x)": {x: f(x) for x in target_x},
        "差值": {x: f(x) - P(f, nodes, x) for x in target_x}
    }).round(4))
mean = np.mean([f(x) - P(f, nodes, x) for x in target_x])
print(f"平均差值: {mean:.4f}")
return mean

nodes_data = [
    [(i + 1) ** 2 for i in range(3)],
    [(i + 5) ** 2 for i in range(3)],
    [(i + 9) ** 2 for i in range(3)],
    [(i + 12) ** 2 for i in range(3)]
]
means = [do_by_node(i + 1, nodes=nodes_data[i])
          for i in range(len(nodes_data))]
return DataFrame({
    "x_0,x_1,x_2": [", ".join([str(n) for n in nodes_data[i]]) for i in
↪range(len(nodes_data))],
    "平均差值": [means[i] for i in range(len(nodes_data))]
}).round(4)

problem4()

```

问题 4: 考虑拉格朗日插值问题, 内插比外推更可靠吗?

考虑函数 $f(x) = \sqrt{x}$

(1) 考虑以 $x_0 = 1$, $x_1 = 4$, $x_2 = 9$ 为节点的拉格朗日插值多项式 $P_2(x)$

	函数值	$f(x)$	差值
5	2.2667	2.2361	-0.0306
50	-20.2333	7.0711	27.3044
115	-171.9000	10.7238	182.6238
185	-492.7333	13.6015	506.3348

平均差值: 179.0581

(2) 考虑以 $x_0 = 25$, $x_1 = 36$, $x_2 = 49$ 为节点的拉格朗日插值多项式 $P_2(x)$

	函数值	$f(x)$	差值
5	2.8205	2.2361	-0.5844

50	7.0688	7.0711	0.0023
115	9.0385	10.7238	1.6853
185	5.6527	13.6015	7.9488

平均差值: 2.2630

(3) 考虑以 $x_0 = 81$, $x_1 = 100$, $x_2 = 121$ 为节点的拉格朗日插值多项式 $P_2(x)$

	函数值	$f(x)$	差值
5	4.0952	2.2361	-1.8592
50	7.1742	7.0711	-0.1031
115	10.7256	10.7238	-0.0018
185	13.3659	13.6015	0.2356

平均差值: -0.4321

(4) 考虑以 $x_0 = 144$, $x_1 = 169$, $x_2 = 196$ 为节点的拉格朗日插值多项式 $P_2(x)$

	函数值	$f(x)$	差值
5	5.1411	2.2361	-2.9050
50	7.6026	7.0711	-0.5316
115	10.7508	10.7238	-0.0270
185	13.6026	13.6015	-0.0012

平均差值: -0.8662

[5]:

	x_0, x_1, x_2	平均差值
0	1, 4, 9	179.0581
1	25, 36, 49	2.2630
2	81, 100, 121	-0.4321
3	144, 169, 196	-0.8662

1.4 实验结果

准确规范地给出各个实验题目的结果, 并对相应的思考题给出正确合理的回答与说明。

由题目(1)代码、数据和图像可知:

1. 对 $f(x) = 1/(1+x^2)$ 函数而言, 在 $[-5, 5]$ 范围内, 并不是 n 越大越好, n 越大反而误差增大。
2. 对 $f(x) = e^x$ 函数而言, 在 $[-1, 1]$ 范围内, n 越大拟合效果越好。

所以不是 n 越大越好, 需要结合具体函数考虑。

由题目(2)代码、数据和图像, 并且结合题目(1)的数据可知:

1. 对 $f(x) = 1/(1+x^2)$ 函数而言, $[-1, 1]$ 差值区间效果要比 $[-5, 5]$ 好。
2. 对 $f(x) = e^x$ 函数而言, $[-5, 5]$ 差值区间效果要比 $[-1, 1]$ 好。

所以不是差值区间越小越好，需要结合具体函数考虑。

由题目（4）代码、数据和图像，对函数 $f(x) = \sqrt{x}$ ，内插确实比外推可靠。

思考题

对问题一存在的问题，应该如何解决？

问题一中， $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ 在 $[-5, 5]$ 的差值区间、 $n \in \{10, 20\}$ 的情况下拟合效果并不好， $n = 10, n = 20$ 的时候多项式在 x 较大的时候明显偏大。

由实验数据可知不应选择过大的插值多项式次数， n 应该 < 10 。

对问题二中存在的问题的回答，试加以说明。

插值区间不是越小越好，如这两个函数： $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ 和 $f(x) = e^x$ ，前者在 $[-1, 1]$ 上插值效果较好而在 $[-5, 5]$ 上效果不好；后者在 $[-1, 1]$ 上效果不好而在 $[-5, 5]$ 上效果较好。

如何理解插值问题中的内插和外推？

内插即只对已知数据集内部范围的点的插值运算，外推即对已知数据集外部范围的点进行插值运算。

内插运算比外推更可靠，偏差更小的原因是内插能够更加有效地利用已知数据集的限制条件，尽量利用已知的信息进行计算推测，故更加可靠。