第五节 连续函数

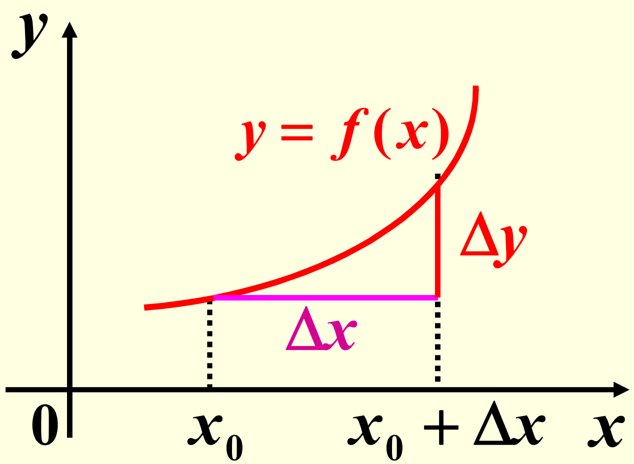
一、函数的连续性

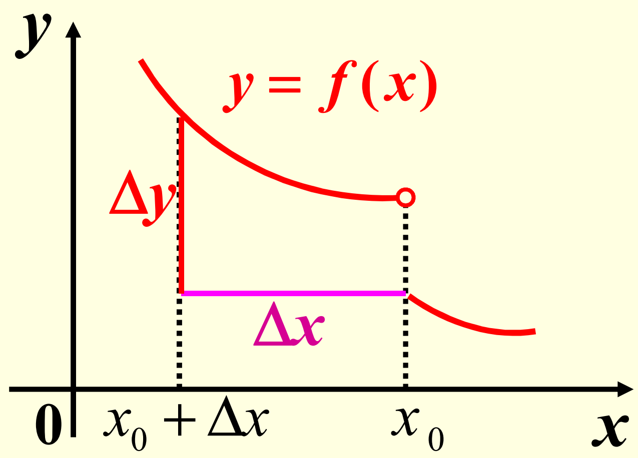
1.函数的增量

设函数 $f(x)$在$U_\delta(x_0)$内有定义, $\forall\ x \in U_\delta(x_0)$,

$\Delta x = x - x_0$, 称为自变量在点 x_0的增量.

$\Delta y = f(x) - f(x_0)$,称为函数 $f(x)$相应于Δx的增量.





2.连续的定义

定义 5. 1 设函数 $f(x)$ 在 $U_\delta(x_0)$ 内有定义,如果当自变量的增量 Δx 趋向于零时, 对应的函数的增量 Δy 也趋向于零, 即 $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \Delta y = 0$ 或 $\lim\limits_{\Delta x \to 0}[f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)] = 0$, 那末就称函数 $f(x)$ 在点 x_0 连续, x_0 称为 $f(x)$ 的连续点.

设 $x = x_0 + \Delta x$, $\qquad \Delta y = f(x) - f(x_0)$,

$\Delta x \to 0$ 就是 $x \to x_0$, $\Delta y \to 0$ 就是 $f(x) \to f(x_0)$.

定义 2　设函数$f(x)$在$U_\delta(x_0)$内有定义, 如果函数$f(x)$当$x \to x_0$时的极限存在, 且等于它在点x_0处的函数值$f(x_0)$, 即 $\lim\limits_{x \to x_0} f(x) = f(x_0)$

那末就称函数$f(x)$在点x_0连续.

"$\varepsilon - \delta$"定义:

$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0,$ 使当$|x - x_0| < \delta$时,

恒有$|f(x) - f(x_0)| < \varepsilon.$

例1 试证函数 $f(x)=\begin{cases} x\sin\dfrac{1}{x}, & x\neq 0, \\ 0, & x=0, \end{cases}$ 在$x=0$

处连续.

证 $\because \lim\limits_{x\to 0} x\sin\dfrac{1}{x}=0,$

又 $f(0)=0,\quad \lim\limits_{x\to 0} f(x)=f(0),$

由定义2知

函数 $f(x)$在$x=0$处连续.

3.单侧连续

若函数$f(x)$在$(a,x_0]$内有定义,且$f(x_0-0)=f(x_0)$,则称$f(x)$在点x_0处左连续;

若函数$f(x)$在$[x_0,b)$内有定义,且$f(x_0+0)=f(x_0)$,则称$f(x)$在点x_0处右连续.

定理 函数$f(x)$在x_0处连续$\Leftrightarrow$是函数$f(x)$在x_0处既左连续又右连续.

例2 讨论函数 $f(x)=\begin{cases} x+2, & x\geq 0, \\ x-2, & x<0, \end{cases}$ 在 $x=0$ 处的连续性.

解 $\lim\limits_{x\to 0^+} f(x)=\lim\limits_{x\to 0^+}(x+2)=2=f(0),$

$\lim\limits_{x\to 0^-} f(x)=\lim\limits_{x\to 0^-}(x-2)=-2\neq f(0),$

右连续但不左连续,

故函数 $f(x)$ 在点 $x=0$ 处不连续.

4.连续函数与连续区间

在区间上每一点都连续的函数,叫做在该区间上的连续函数,或者说函数在该区间上连续.

如果函数在开区间 (a,b) 内连续，并且在左端点 $x=a$ 处右连续，在右端点 $x=b$ 处左连续，则称函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a,b]$ 上连续.

连续函数的图形是一条连续而不间断的曲线.

例如,有理函数在区间 $(-\infty,+\infty)$ 内是连续的.

例5.1 证明：幂函数$x^n \in C(-\infty,+\infty), n\in N_+$.

例3 证明函数 $y = \sin x$ 在区间 $(-\infty, +\infty)$ 内连续.

证 任取 $x \in (-\infty, +\infty)$,

$$\Delta y = \sin(x + \Delta x) - \sin x = 2\sin\frac{\Delta x}{2} \cdot \cos(x + \frac{\Delta x}{2})$$

$$\because \left|\cos(x + \frac{\Delta x}{2})\right| \le 1, \quad 则 \ |\Delta y| \le 2\left|\sin\frac{\Delta x}{2}\right|.$$

对任意的 α, 当 $\alpha \ne 0$ 时, 有 $|\sin\alpha| < \alpha$,

故 $|\Delta y| \le 2\left|\sin\frac{\Delta x}{2}\right| < |\Delta x|$, $\therefore$ 当 $\Delta x \to 0$ 时, $\Delta y \to 0$.

即函数 $y = \sin x$ 对任意 $x \in (-\infty, +\infty)$ 都是连续的.

二、函数的间断点

函数 $f(x)$在点x_0处连续必须满足的三个条件：

(1) $f(x)$在点x_0处有定义;

(2) $\lim\limits_{x\to x_0} f(x)$存在;

(3) $\lim\limits_{x\to x_0} f(x)=f(x_0)$.

如果上述三个条件中只要有一个不满足，则称函数 $f(x)$在点x_0处不连续(或间断)，并称点x_0为$f(x)$的不连续点(或间断点).

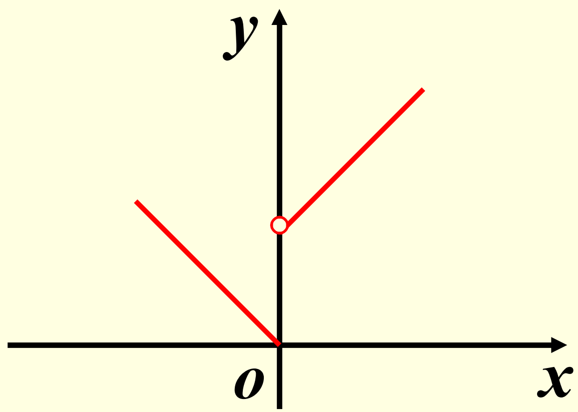
1.跳跃间断点 如果 $f(x)$在点 x_0处左, 右极限都存在,但$f(x_0-0)\neq f(x_0+0)$, 则称点 x_0为函数 $f(x)$的跳跃间断点.

例4 讨论函数 $f(x)=\begin{cases}-x, & x\le 0,\\ 1+x, & x>0,\end{cases}$ 在$x=0$处的连续性.

解 $f(0-0)=0,\quad f(0+0)=1,$

$\because f(0-0)\neq f(0+0),$

$\therefore x=0$为函数的跳跃间断点.

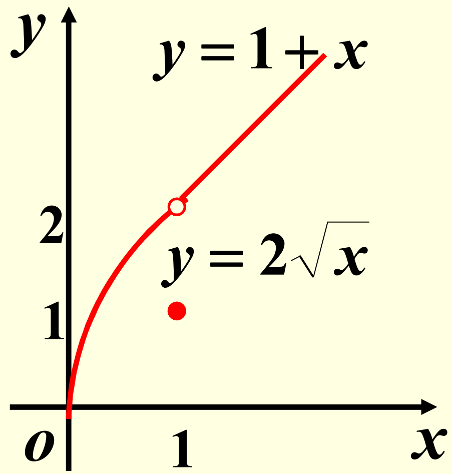


2.可去间断点 如果 $f(x)$ 在点 x_0 处的极限存在，但 $\lim\limits_{x \to x_0} f(x) = A \neq f(x_0)$，或 $f(x)$ 在点 x_0 处无定义则称点 x_0 为函数 $f(x)$ 的可去间断点.

例5 讨论函数

$$f(x) = \begin{cases} 2\sqrt{x}, & 0 \le x < 1, \\ 1, & x = 1 \\ 1 + x, & x > 1, \end{cases}$$

在 $x = 1$ 处的连续性.

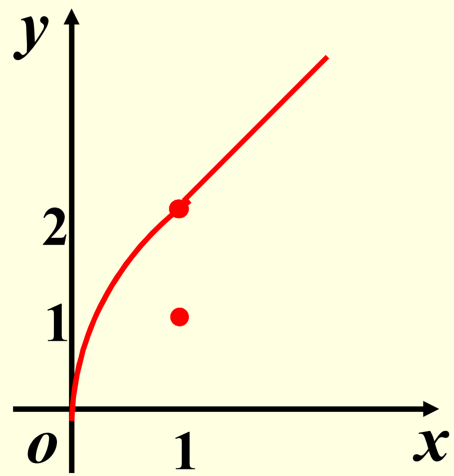


注意　可去间断点只要改变或者补充间断处函数的定义, 则可使其变为连续点.

如例5中，令 $f(1)=2$,

则 $f(x)=\begin{cases} 2\sqrt{x}, & 0\le x<1, \\ 1+x, & x\ge 1, \end{cases}$

在$x=1$处连续.



跳跃间断点与可去间断点统称为第一类间断点.

特点 函数在点 x_0 处的左、右极限都存在.

例5.4

考察函数$f(x)=\dfrac{x^2-1}{x-1}$的连续性和间断点.

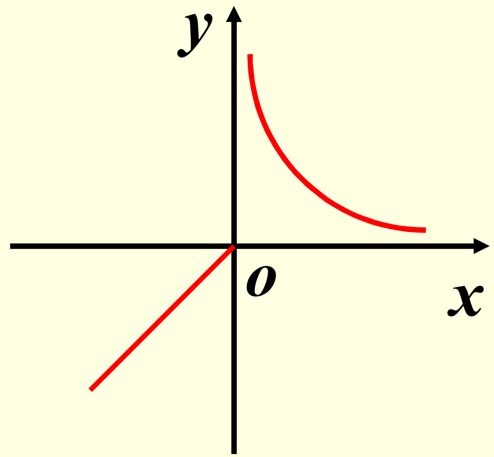
3.第二类间断点 如果 $f(x)$在点 x_0处的左、右极限至少有一个不存 在, 则称点 x_0为函数 $f(x)$的第二类间断点.

例6 讨论函数 $f(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{x}, & x>0,\\ x, & x\le 0,\end{cases}$ 在$x=0$处的连续性.

解 $f(0-0)=0,\quad f(0+0)=+\infty,$

$\therefore x=1$为函数的第二类间断点.

这种情况称为无穷间 断点.

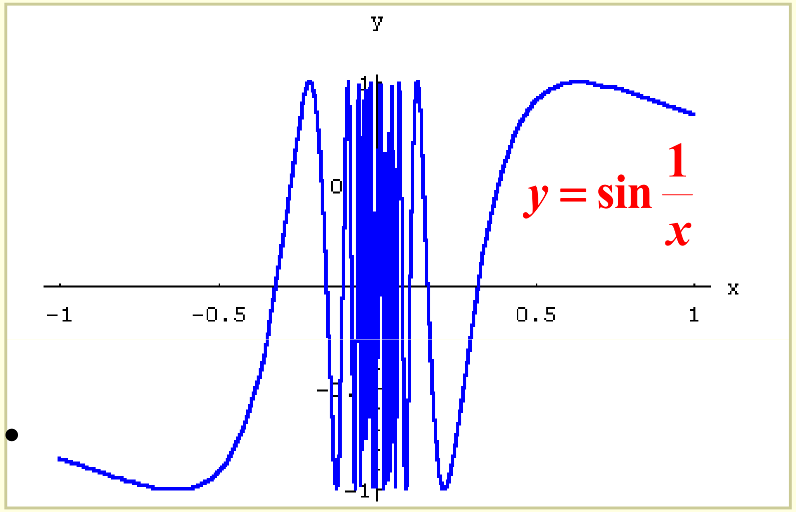


例7 讨论函数 $f(x)=\sin\frac{1}{x}$ 在 $x=0$ 处的连续性.

解 $\because$ 在 $x=0$ 处没有定义,

且 $\lim\limits_{x\to 0}\sin\frac{1}{x}$ 不存在.

$\therefore x=0$ 为第二类间断点.



这种情况称为的振荡间断点.

注意 不要以为函数的间断点只是个别的几个点.

★ 狄利克雷函数

$$y = D(x) = \begin{cases} 1, & \text{当}x\text{是有理数时}, \\ 0, & \text{当}x\text{是无理数时}, \end{cases}$$

在定义域R内每一点处都间断,且都是第二类间断点.

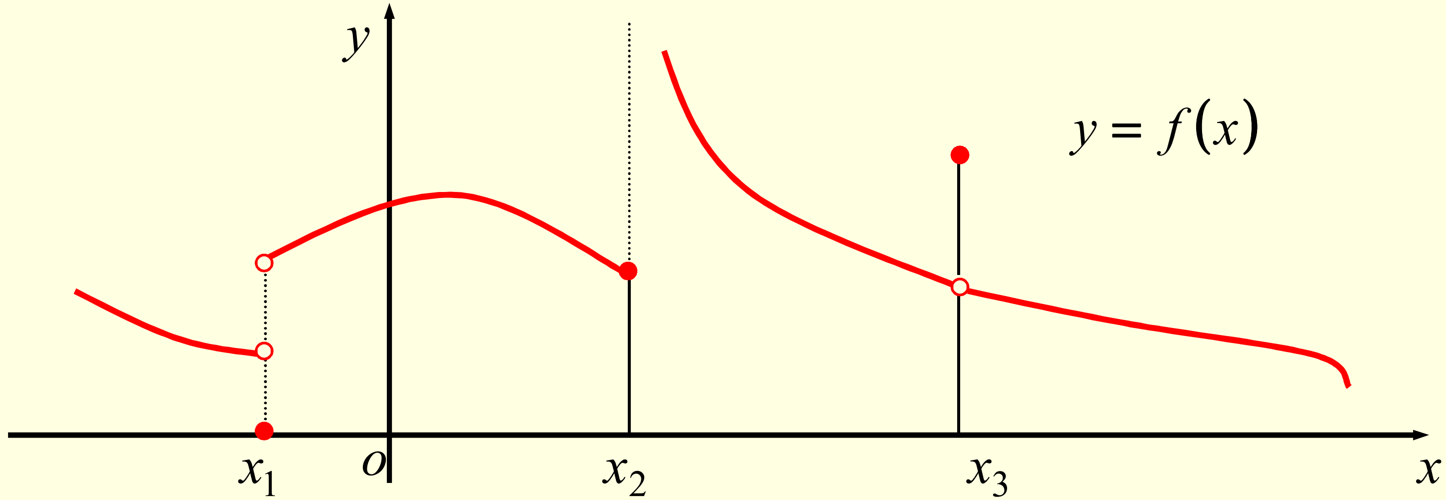
★ $$f(x) = \begin{cases} x, & \text{当}x\text{是有理数时}, \\ -x, & \text{当}x\text{是无理数时}, \end{cases}$$

仅在x=0处连续，其余各点处处间断.

★ $f(x)=\begin{cases} 1, & \text{当}x\text{是有理数时}, \\ -1, & \text{当}x\text{是无理数时}, \end{cases}$

在定义域 R 内每一点处都间断，但其绝对值处处连续.

判断下列间断点类型:



例8 当a取何值时,

函数 $f(x)=\begin{cases}\cos x, & x<0,\\ a+x, & x\geq 0,\end{cases}$ 在$x=0$处连续.

解 $\because f(0)=a,$

$$\lim_{x\to 0^-} f(x)=\lim_{x\to 0^-}\cos x=1,$$

$$\lim_{x\to 0^+} f(x)=\lim_{x\to 0^+}(a+x)=a,$$

要使 $f(0-0)=f(0+0)=f(0),\ \Rightarrow a=1,$

故当且仅当 $a=1$时，函数 $f(x)$在$x=0$处连续.

三、小结

1.函数在一点连续必须满足的三个条件;

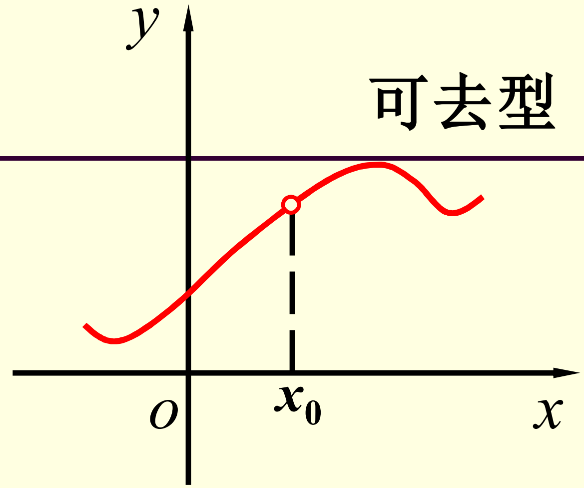
2.区间上的连续函数;

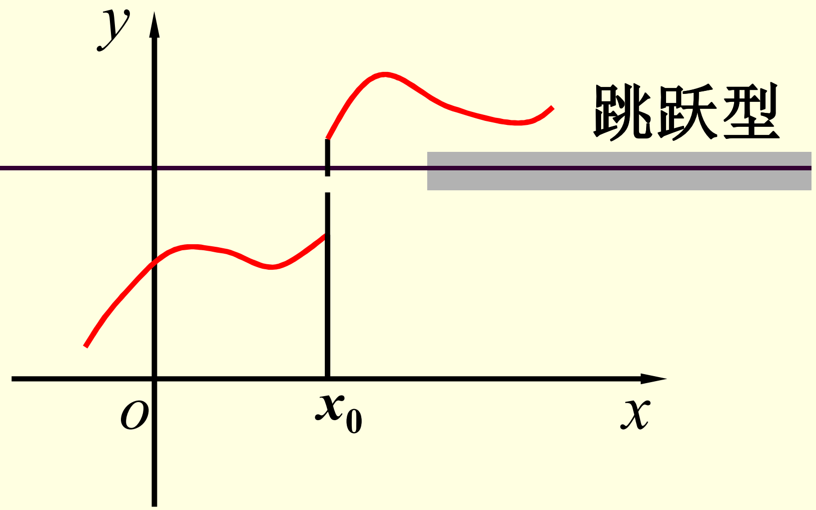
3.间断点的分类与判别;

间断点
- 第一类间断点:可去型,跳跃型.
- 第二类间断点:无穷型,振荡型.

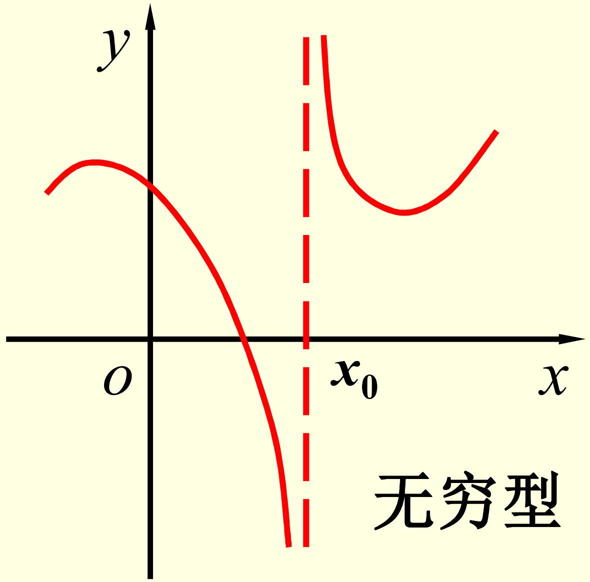
(见下图)

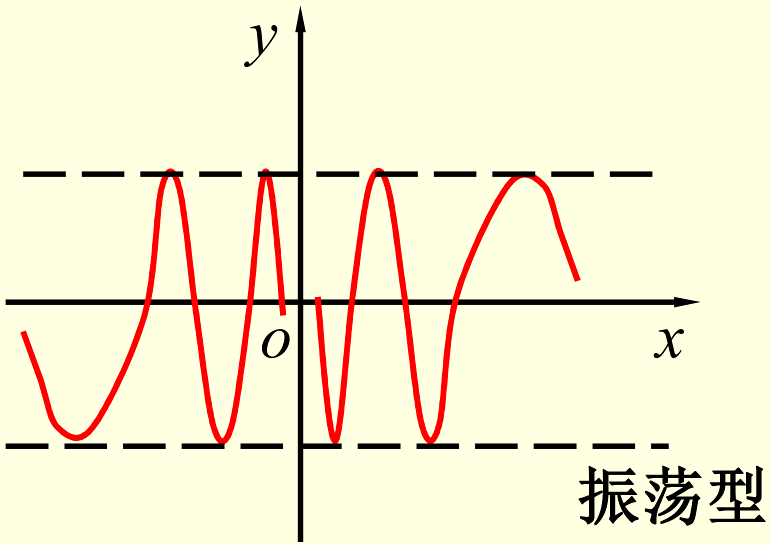
第一类间断点





第二类间断点





思考题

若 $f(x)$ 在 x_0 连续，则 $|f(x)|$、$f^2(x)$ 在 x_0 是否连续？又若 $|f(x)|$、$f^2(x)$ 在 x_0 连续，$f(x)$ 在 x_0 是否连续？

思考题解答

$\because f(x)$在x_0连续，　　$\therefore \lim\limits_{x\to x_0} f(x)=f(x_0)$

且 $0\le \left| |f(x)|-|f(x_0)| \right| \le |f(x)-f(x_0)|$

$\therefore \lim\limits_{x\to x_0} |f(x)| = |f(x_0)|$

$$\lim_{x\to x_0} f^2(x)=\left[\lim_{x\to x_0} f(x)\right]\cdot\left[\lim_{x\to x_0} f(x)\right]=f^2(x_0)$$

故$|f(x)|$、$f^2(x)$在x_0都连续.

但反之不成立.

例 $f(x)=\begin{cases}-1, & x\geq 0\\ 1, & x<0\end{cases}$ 在 $x_0=0$ 不连续

但 $|f(x)|$、$f^2(x)$ 在 $x_0=0$ 连续

练 习 题

一、填空题：

1、指出 $y=\dfrac{x^2-1}{x^2-3x+2}$ 在 $x=1$ 是第________类间断点；在 $x=2$ 是第______类间断点 .

2、指出 $y=\dfrac{x^2-x}{|x|(x^2-1)}$ 在 $x=0$ 是第_________类间断点；在 $x=1$ 是第_______类间断点；在 $x=-1$ 是第______类间断点 .

二、研究函数 $f(x)=\begin{cases} x, & |x|\le 1 \\ 1, & |x|>1 \end{cases}$ 的连续性，并画出函数的图形 .

三、指出下列函数在指定范围内的间断点，并说明这些间断点的类型，如果是可去间断点，则补充或改变函数的定义使它连续．

1、 $f(x)=\begin{cases} x-1, x\le 1 \\ 3-x, x>1 \end{cases}$ 在 $x\in R$ 上．

2、$f(x)=\dfrac{x}{\tan x}$, 在 $x\in R$ 上．

四、讨论函数 $f(x)=\lim\limits_{n\to\infty}\dfrac{1-x^{2n}}{1+x^{2n}}$ 的连续性，若有间断点，判断其类型．

五、试确定 a,b 的值, 使 $f(x)=\dfrac{e^x-b}{(x-a)(x-1)}$，

（1）有无穷间断点 $x=0$；（2）有可去间断点 $x=1$．

练习题答案

一、1、一类, 二类；　　2、一类, 一类, 二类.

二、$f(x)$在$(-\infty,-1)$与$(-1,+\infty)$内连续, $x=-1$为跳跃间断点.

三、1、$x=1$为第一类间断点；

2、$x=1$和$x=k\pi+\dfrac{\pi}{2}$为可去间断点,

$x=k\pi(k\neq 0)$为第二类间断点.

$$f_1(x)=\begin{cases}\dfrac{x}{\tan x}, x\neq k\pi, k\pi+\dfrac{\pi}{2}\\ 1, x=0\end{cases}$$

$(k=0,\pm1,\pm2,\cdots)$,

$$f_2(x)=\begin{cases}\dfrac{x}{\tan x}, x\neq k\pi, k\pi+\dfrac{\pi}{2} \\ 0, x=k\pi+\dfrac{\pi}{2}\end{cases}(k=0,\pm1,\pm2,\cdots).$$

四、$f(x)=\begin{cases}x, |x|<1\\ 0, |x|=0\\ -x, |x|>1\end{cases}$ $x=1$ 和 $x=-1$ 为第一类间断点.

五、(1) $a=0, b\neq 1$;　　(2) $a\neq 1, b=e$.