

## 0.1 可测集与测度

### 定义 0.1 (可测集)

设  $E \subset \mathbb{R}^n$ . 若对任意的点集  $T \subset \mathbb{R}^n$ , 有

$$m^*(T) = m^*(T \cap E) + m^*(T \cap E^c),$$

则称  $E$  为 **Lebesgue 可测集** (或  $m^*$ -可测集) 或  $E$  可测, 简称为可测集, 其中  $T$  称为**试验集** (这一定义可测集的等式也称为 **Carathéodory 条件**). 可测集的全体称为**可测集类**, 简记为  $\mathcal{M}$ .

### 定理 0.1 (集合可测的充要条件)

设  $E \subset \mathbb{R}^n$ , 则  $E \in \mathcal{M}$  的充要条件是对任一点集  $T \subset \mathbb{R}^n$  且  $m^*(T) < +\infty$ , 都有

$$m^*(T) \geq m^*(T \cap E) + m^*(T \cap E^c) \quad (1)$$

成立.

**注** 往后经常利用这个定理的充分性来证明一个集合可测. 但这个定理的必要性要弱于可测集的定义.

**证明** 必要性由可测集的定义立得. 下证充分性. 由外测度的次可加性可得

$$m^*(T) = m^*(T \cap \mathbb{R}^n) = m^*(T \cap (E \cup E^c)) = m^*((T \cap E) \cup (T \cap E^c)) \leq m^*(T \cap E) + m^*(T \cap E^c)$$

总是成立的. 又因为在  $m^*(T) = \infty$  时 (1) 式总成立, 故对任意的点集  $T \subset \mathbb{R}^n$ , 都有

$$m^*(T) = m^*(T \cap E) + m^*(T \cap E^c),$$

即  $E \in \mathcal{M}$ .

### 定义 0.2 (零测集)

外测度为零的点集称为**零测集**.

**注** 显然,  $\mathbb{R}^n$  中由单个点组成的点集是零测集. 从而根据外测度的次可加性知道  $\mathbb{R}^n$  中的有理点集  $\mathbb{Q}^n$  是零测集.

### 命题 0.1

1. 零测集的任一子集是零测集.
2. 零测集一定可测, 即若  $m^*(E) = 0$ , 则  $E \in \mathcal{M}$ .

**证明**

1. 由外测度的单调性立得.
2. 事实上, 此时我们有

$$m^*(T \cap E) + m^*(T \cap E^c) \leq m^*(E) + m^*(T) = m^*(T).$$

再由定理 0.1 立得.

### 命题 0.2

若  $E_1 \subset S, E_2 \subset S^c, S \in \mathcal{M}$ , 则有

$$m^*(E_1 \cup E_2) = m^*(E_1) + m^*(E_2).$$

**注** 这个命题表明: 当两个集合由一个可测集分离时, 其外测度就有可加性.

**证明** 事实上, 此时取试验集  $T = E_1 \cup E_2$ , 从  $S$  是可测集的定义得

$$m^*(E_1 \cup E_2) = m^*((E_1 \cup E_2) \cap S) + m^*((E_1 \cup E_2) \cap S^c) = m^*(E_1) + m^*(E_2).$$

□

**推论 0.1**

当  $E_1$  与  $E_2$  是互不相交的可测集时, 对任一集合  $T$  有

$$m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)) = m^*((T \cap E_1) \cup (T \cap E_2)) = m^*(T \cap E_1) + m^*(T \cap E_2).$$

♡

**证明** 注意到  $T \cap E_1 \in E_1, T \cap E_2 \in E_1^c$ , 而  $E_1 \in \mathcal{M}$ , 故由集合运算的性质和命题 0.2 可知

$$m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)) = m^*((T \cap E_1) \cup (T \cap E_2)) = m^*(T \cap E_1) + m^*(T \cap E_2).$$

□

**推论 0.2**

当  $E_1, E_2, \dots, E_n$  是互不相交的可测集时, 对任一集合  $T$  有

$$m^*\left(T \cap \bigcup_{k=1}^n E_k\right) = m^*\left(\bigcup_{k=1}^n (T \cap E_k)\right) = \sum_{k=1}^n m^*(T \cap E_k).$$

♡

**证明** 当  $n=1$  时, 结论显然成立. 假设当  $n=m$  时结论成立, 考虑  $n=m+1$  的情况. 由于  $E_1, E_2, \dots, E_{m+1}$  皆互不相交, 因此  $\bigcup_{k=1}^m E_k$  和  $E_{m+1}$  也互不相交. 于是由集合运算的性质和推论 0.1 以及归纳假设可得

$$\begin{aligned} m^*\left(T \cap \bigcup_{k=1}^{m+1} E_k\right) &= m^*\left(\bigcup_{k=1}^{m+1} (T \cap E_k)\right) = m^*\left(T \cap \left(\bigcup_{k=1}^m E_k \cup E_{m+1}\right)\right) = m^*\left(\left(T \cap \bigcup_{k=1}^m E_k\right) \cup (T \cap E_{m+1})\right) \\ &= m^*\left(T \cap \bigcup_{k=1}^m E_k\right) + m^*(T \cap E_{m+1}) = \sum_{k=1}^m m^*(T \cap E_k) + m^*(T \cap E_{m+1}) = \sum_{k=1}^{m+1} m^*(T \cap E_k). \end{aligned}$$

故由数学归纳法可知结论成立.

□

**定理 0.2 (可测集的性质)**

- (1)  $\emptyset \in \mathcal{M}$ .
- (2) 若  $E \in \mathcal{M}$ , 则  $E^c \in \mathcal{M}$ .
- (3) 若  $E_1 \in \mathcal{M}, E_2 \in \mathcal{M}$ , 则  $E_1 \cup E_2, E_1 \cap E_2$  以及  $E_1 \setminus E_2$  皆属于  $\mathcal{M}$ . (由此知, 可测集任何有限次取交、并运算后所得的集皆为可测集.)
- (4) 若  $E_i \in \mathcal{M} (i=1, 2, \dots)$ , 则其并集  $\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i$  也属于  $\mathcal{M}$ . 若进一步有  $E_i \cap E_j = \emptyset (i \neq j)$ , 则

$$m^*\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} m^*(E_i),$$

即  $m^*$  在  $\mathcal{M}$  上满足**可数可加性**(或称为  $\sigma$ -可加性).

- (5) 若  $E_i \in \mathcal{M} (i=1, 2, \dots)$ , 则其交集  $\bigcap_{i=1}^{\infty} E_i$  也属于  $\mathcal{M}$ .
- (6) 如果  $A$  和  $B$  分别为  $p$  维和  $q$  维空间的可测集, 那么  $A \times B$  是  $p+q$  维空间的可测集, 测度为

$$m(A \times B) = m(A) \cdot m(B).$$

♡

**证明**

- (1) 显然成立.
- (2) 注意到  $(E^c)^c = E$ , 从定义可立即得出结论.
- (3) 对于任一集  $T \subset \mathbb{R}^n$ , 根据集合分解 (参阅图 1) 与外测度的次可加性, 我们有

$$\begin{aligned} m^*(T) &\leq m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)) + m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)^c) \\ &= m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)) + m^*((T \cap E_1^c) \cap E_2^c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq m^*((T \cap E_1) \cap E_2) + m^*((T \cap E_1) \cap E_2^c) \\ &\quad + m^*((T \cap E_1^c) \cap E_2) + m^*((T \cap E_1^c) \cap E_2^c). \end{aligned}$$

又由  $E_1, E_2$  的可测性知, 上式右端就是

$$m^*(T \cap E_1) + m^*(T \cap E_1^c) = m^*(T).$$

这说明

$$m^*(T) = m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)) + m^*(T \cap (E_1 \cup E_2)^c).$$

也就是说  $E_1 \cup E_2$  是可测集.

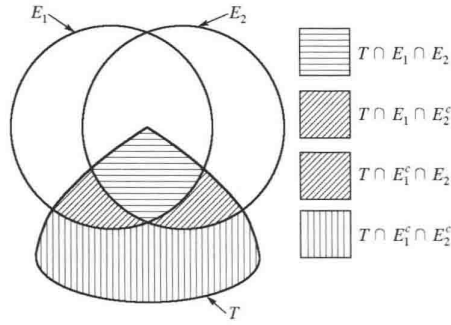


图 1

为证  $E_1 \cap E_2$  是可测集, 只需注意  $E_1 \cap E_2 = (E_1^c \cup E_2^c)^c$  即可. 又由  $E_1 \setminus E_2 = E_1 \cap E_2^c$  可知,  $E_1 \setminus E_2$  是可测集.

(4) 首先, 设  $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$  皆互不相交, 并令

$$S = \bigcup_{i=1}^{\infty} E_i, \quad S_k = \bigcup_{i=1}^k E_i, \quad k = 1, 2, \dots$$

由 (3) 知每个  $S_k$  都是可测集, 从而对任一集  $T$ , 我们有

$$\begin{aligned} m^*(T) &= m^*(T \cap S_k) + m^*(T \cap S_k^c) \\ &= m^*\left(\bigcup_{i=1}^k (T \cap E_i)\right) + m^*(T \cap S_k^c) \\ &\stackrel{\text{推论 0.2}}{=} \sum_{i=1}^k m^*(T \cap E_i) + m^*(T \cap S_k^c). \end{aligned}$$

由于  $T \cap S_k^c \supset T \cap S^c$ , 可知

$$m^*(T) \geq \sum_{i=1}^k m^*(T \cap E_i) + m^*(T \cap S^c).$$

令  $k \rightarrow \infty$ , 就有

$$m^*(T) \geq \sum_{i=1}^{\infty} m^*(T \cap E_i) + m^*(T \cap S^c).$$

再由外测度的次可加性可得

$$\begin{aligned} m^*(T) &\geq \sum_{i=1}^{\infty} m^*(T \cap E_i) + m^*(T \cap S^c) \geq m^*\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} (T \cap E_i)\right) + m^*(T \cap S^c) \\ &= m^*\left(T \cap \bigcup_{i=1}^{\infty} E_i\right) + m^*(T \cap S^c) = m^*(T \cap S) + m^*(T \cap S^c). \end{aligned}$$

这说明  $S \in \mathcal{M}$ . 此外, 在公式

$$m^*(T) \geq \sum_{i=1}^{\infty} m^*(T \cap E_i) + m^*(T \cap S^c)$$

中以  $T \cap S$  替换  $T$ , 则又可得

$$m^*(T \cap S) \geq \sum_{i=1}^{\infty} m^*(T \cap E_i).$$

又由外测度的次可加性可知反向不等式总是成立的, 因而实际上有

$$m^*(T \cap S) = \sum_{i=1}^{\infty} m^*(T \cap E_i).$$

在这里再取  $T$  为全空间  $\mathbb{R}^n$ , 就可证明可数可加性质:

$$m^*(S) = m^*\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} m^*(E_i).$$

其次, 对于一般的可测集列  $\{E_i\}$ , 我们令

$$S_1 = E_1, \quad S_k = E_k \setminus \left(\bigcup_{i=1}^{k-1} E_i\right), \quad k \geq 2,$$

则  $\{S_k\}$  是互不相交的可测集列. 而由  $\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i = \bigcup_{k=1}^{\infty} S_k$  可知,  $\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i$  是可测集.

(5) 由 (2) 可知  $E_i^c \in \mathcal{M}$ , 再由 (4) 可知  $\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i^c$ . 于是再利用 (2) 和 De Morgan 定律可得

$$\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i^c\right)^c = \bigcap_{i=1}^{\infty} E_i \in \mathcal{M}.$$

(6) 证明见知乎专栏.

□

### 推论 0.3

$\mathcal{M}$  是  $\mathbb{R}^n$  上的一个  $\sigma$ -代数.

♡

**证明** 由可测集的性质 (1)(2)(4) 立得.

□

### 命题 0.3

证明: Cantor 集  $C$  是可测的, 并且  $m(C) = 0$ .

♠

**证明** 开区间是可测的. 由开集构造定理, 我们知道  $\mathbb{R}$  中的开集是开区间的可数并, 因此也可测. 因此, 闭集也是可测的. 显然, 每个  $C_n$  都是闭集. 并且

$$C = \bigcap_{n=1}^{\infty} C_n$$

于是  $C$  也是闭集. 因此  $C$  是可测的.

下面, 我们用两种方法计算康托集的测度.

**法一:** 根据我们的构造,  $C_{n+1}$  的测度刚好是去掉了  $1/3$  的  $C_n$  的测度. 换言之,

$$m(C_{n+1}) = \left(1 - \frac{1}{3}\right) m(C_n) = \frac{2}{3} m(C_n)$$

递归地, 对任意  $n \in \mathbb{N}$ , 我们有

$$m(C_n) = \left(\frac{2}{3}\right)^n m(C_0) = \left(\frac{2}{3}\right)^n$$

注意到

$$m(C_0) = 1 < \infty$$

因此由测度的第二单调收敛定理,

$$m(C) = m\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} C_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(C_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{3}\right)^n = 0$$

此即得证.

**法二:** 设  $n \geq 2$ .  $C_n$  比  $C_{n-1}$  减少了  $2^{n-1}$  个区间, 每个区间长度为  $\frac{1}{3^n}$ . 因此  $C_n$  比  $C_{n-1}$  减少的长度为

$$2^{n-1} \frac{1}{3^n} = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right)^{n-1}$$

总共减少的长度为

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right)^{n-1} = \frac{1}{3} \frac{1}{1 - \frac{2}{3}} = \frac{1}{3} \cdot 3 = 1$$

因此

$$m(C) = 1 - 1 = 0.$$

□

#### 命题 0.4

$\mathcal{M}$  的基数是  $2^c$ .

**证明** 由命题 0.3 可知 Cantor 集是零测集, 不难推断  $\mathcal{M}$  的基数大于或等于  $2^c$ , 但  $\mathcal{M}$  的基数又不会超过  $2^c$ , 于是  $\mathcal{M}$  的基数实际上是  $2^c$ . □

#### 定义 0.3 (Lebesgue 测度)

对于可测集  $E$ , 其外测度称为**测度**, 记为  $m(E)$ . 这就是通常所说的  $\mathbb{R}^n$  上的 **Lebesgue 测度**.

♣

#### 定义 0.4 (测度)

设  $X$  是非空集合,  $\mathcal{A}$  是  $X$  的一些子集构成的  $\sigma$ -代数. 若  $\mu$  是定义在  $\mathcal{A}$  上的一个集合函数, 且满足:

- (i)  $0 \leq \mu(E) \leq +\infty$  ( $E \in \mathcal{A}$ );
- (ii)  $\mu(\emptyset) = 0$ ;
- (iii)  $\mu$  在  $\mathcal{A}$  上是可数可加的,

则称  $\mu$  是  $\mathcal{A}$  上的 (非负) **测度**.  $\mathcal{A}$  中的元素称为  $(\mu)$  **可测集**, 有序组  $(X, \mathcal{A}, \mu)$  称为**测度空间**.

♣

**注** 由推论 0.3 可知  $\mathcal{M}$  就是  $\mathbb{R}^n$  上的一个  $\sigma$ -代数, 故本节所建立的测度空间就是  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{M}, m)$ .

#### 定理 0.3 (测度的基本性质)

- (1) 非负性: 若  $E \in \mathcal{M}$ , 则  $m(E) \geq 0, m(\emptyset) = 0$ ;
- (2) 单调性: 若  $E_1, E_2 \in \mathcal{M}$  且  $E_1 \subset E_2$ , 则  $m(E_1) \leq m(E_2)$ , 并且  $m(E_2 \setminus E_1) = m(E_2) - m(E_1)$ ;
- (3) 可数可加性: 若  $E_i \in \mathcal{M}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 且  $E_i \cap E_j = \emptyset$  ( $i \neq j$ ), 则

$$m\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} E_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} m(E_i).$$

- (4) 若  $E_1, E_2 \in \mathcal{M}$ , 则  $m(E_1 \cup E_2) = m(E_1) + m(E_2) - m(E_1 \cap E_2)$ .

♥

**证明**

- (1) 由  $\mathbb{R}^n$  中点集的外测度性质立得.
- (2) 由  $\mathbb{R}^n$  中点集的外测度性质可知  $m(E_1) \leq m(E_2)$ . 再根据  $E_1$  可测的定义可知

$$m^*(E_2) = m^*(E_2 \cap E_1) + m^*(E_2 \cap E_1^c) = m^*(E_1) + m^*(E_2 \setminus E_1).$$

又由可测集的性质可知  $E_2 \setminus E_1$  可测, 又因为  $E_1, E_2$  可测, 所以上式等价于

$$m(E_2) = m(E_2 \cap E_1) + m(E_2 \cap E_1^c) = m(E_1) + m(E_2 \setminus E_1).$$

(3) 由可测集的性质立得.

(4) 注意到  $E_1 \cap (E_2 \setminus E_1 \cap E_2) = \emptyset$ , 故由 (2)(3) 可得

$$m(E_1 \cup E_2) = m(E_1 \cup (E_2 \setminus E_1 \cap E_2)) = m(E_1) + m(E_2 \setminus E_1 \cap E_2) = m(E_1) + m(E_2) - m(E_1 \cap E_2).$$

□

#### 定理 0.4 (递增可测集列的测度运算)

若有递增可测集列  $E_1 \subset E_2 \subset \cdots \subset E_k \subset \cdots$ , 则

$$m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k). \quad (2)$$

♡

**证明** 若存在  $k_0$ , 使得  $m(E_{k_0}) = +\infty$ , 则

$$m^*\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = m^*\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right) = \sum_{k=1}^{\infty} m^*(E_k) \geq m^*(E_{k_0}).$$

因此  $m^*\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = +\infty$ . 又由  $\{E_k\}_{k=1}^{\infty}$  递增可知

$$m^*(E_k) \geq m^*(E_{k_0}), \quad \forall k \geq k_0.$$

因此  $\lim_{k \rightarrow \infty} m^*(E_k) = +\infty$ . 故此时定理自然成立.

现在假定对一切  $k$ , 有  $m(E_k) < +\infty$ . 由假设  $E_k \in \mathcal{M} (k = 1, 2, \cdots)$ , 故  $E_{k-1}$  与  $E_k \setminus E_{k-1}$  是互不相交的可测集. 由测度的可加性知  $m(E_{k-1}) + m(E_k \setminus E_{k-1}) = m(E_k)$ . 因为  $m(E_{k-1})$  是有限的, 所以移项得  $m(E_k \setminus E_{k-1}) = m(E_k) - m(E_{k-1})$ . 令  $E_0 = \emptyset$ , 可得  $\lim_{k \rightarrow \infty} E_k = \bigcup_{k=1}^{\infty} E_k = \bigcup_{k=1}^{\infty} (E_k \setminus E_{k-1})$ . 再应用测度的可数可加性, 我们有

$$\begin{aligned} m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) &= m\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} (E_k \setminus E_{k-1})\right) = \sum_{k=1}^{\infty} (m(E_k) - m(E_{k-1})) \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^k (m(E_i) - m(E_{i-1})) = \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k). \end{aligned}$$

□

#### 推论 0.4 (递减可测集列的测度运算)

若有递减可测集列  $E_1 \supset E_2 \supset \cdots \supset E_k \supset \cdots$ , 且  $m(E_1) < +\infty$ , 则

$$m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k). \quad (3)$$

♡

**证明** 由可测集的性质 (5) 可知  $\lim_{k \rightarrow \infty} E_k$  是可测集, 再由测度的单调性可知  $\lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k) \leq m(E_1) < +\infty$ . 因为  $E_1 \setminus E_k \subset E_1 \setminus E_{k+1}, k = 2, 3, \cdots$ , 所以由可测集的性质 (2) 可知  $\{E_1 \setminus E_k\}$  是递增可测集合列. 于是由递增可测集列的测度运算可知

$$m\left(E_1 \setminus \lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} (E_1 \setminus E_k)\right) = \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_1 \setminus E_k).$$

由于  $m(E_1) < +\infty$ , 故由测度的基本性质 (2) 上式可写为  $m(E_1) - m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = m(E_1) - \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k)$ . 消去  $m(E_1)$ , 我们有  $m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = \lim_{k \rightarrow \infty} m(E_k)$ . □

## 定理 0.5

(1) 若有可测集列  $\{E_k\}$ , 且有  $\sum_{k=1}^{\infty} m(E_k) < +\infty$ , 则

$$m\left(\overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) = 0.$$

(2) 设  $\{E_k\}$  是可测集列, 则

$$m\left(\underline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) \leq \underline{\lim}_{k \rightarrow \infty} m(E_k), \quad m\left(\overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) \geq \overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} m(E_k).$$

注 也称结论

$$m\left(\underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} E_n\right) \leq \underline{\lim}_{n \rightarrow \infty} m(E_n), \quad m\left(\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} E_n\right) \geq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} m(E_n)$$

为测度论中的 Fatou 引理 (见第四章).

证明

1.

$$\begin{aligned} m\left(\overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) &= m\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) = m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) \\ &\stackrel{\text{递减可测集列的测度运算}}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} m\left(\bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) \\ &\stackrel{\text{测度的基本性质 (3)}}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=k}^{\infty} m(E_i) = 0. \end{aligned}$$

2. 因为  $\bigcap_{j=k}^{\infty} E_j \subset E_k, \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i \supset E_k (k = 1, 2, \dots)$ , 所以有

$$m\left(\bigcap_{j=k}^{\infty} E_j\right) \leq m(E_k), \quad m\left(\bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) \geq m(E_k) \quad (k = 1, 2, \dots).$$

令  $k \rightarrow \infty$ , 则得  $(\bigcap_{j=k}^{\infty} E_j \text{ 随 } k \text{ 增大而递增}, \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i \text{ 随 } k \text{ 增大而递减})$

$$\begin{aligned} m\left(\underline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) &= m\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcap_{j=k}^{\infty} E_j\right) = m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} \bigcap_{j=k}^{\infty} E_j\right) \\ &\stackrel{\text{递增可测集列的测度运算}}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} m\left(\bigcap_{j=k}^{\infty} E_j\right) \\ &\leq \underline{\lim}_{k \rightarrow \infty} m(E_k). \\ m\left(\overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} E_k\right) &= m\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) = m\left(\lim_{k \rightarrow \infty} \bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) \\ &\stackrel{\text{递减可测集列的测度运算}}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} m\left(\bigcup_{i=k}^{\infty} E_i\right) \\ &\geq \overline{\lim}_{k \rightarrow \infty} m(E_k). \end{aligned}$$

□