§2.3 法拉第定律

§2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，

§2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，　　　磁场 $\Longrightarrow$ 电流，

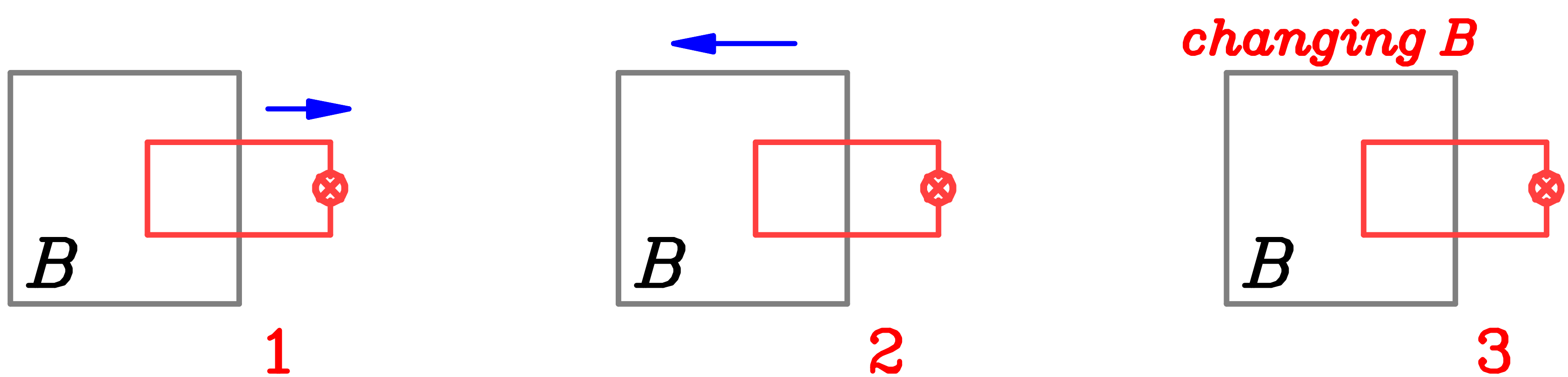
§ 2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场， 磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

§ 2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，　　　　磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

1831年法拉第报告了一系列实验结果，典型的三个实验结果总结如下

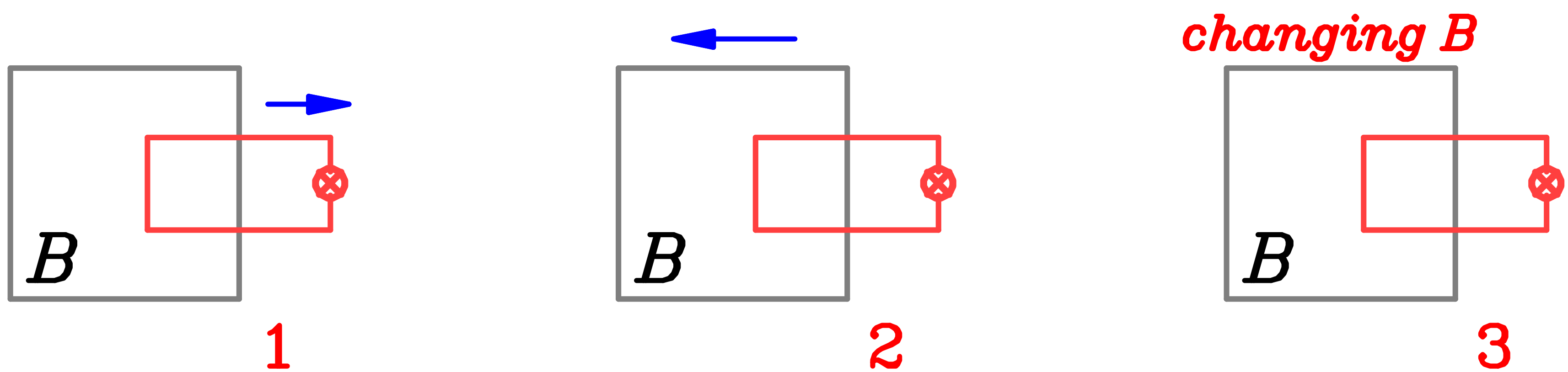


§2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，　　　　磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

1831年法拉第报告了一系列实验结果，典型的三个实验结果总结如下

1. 磁场不动（不变），回路运动经过有磁场的区域

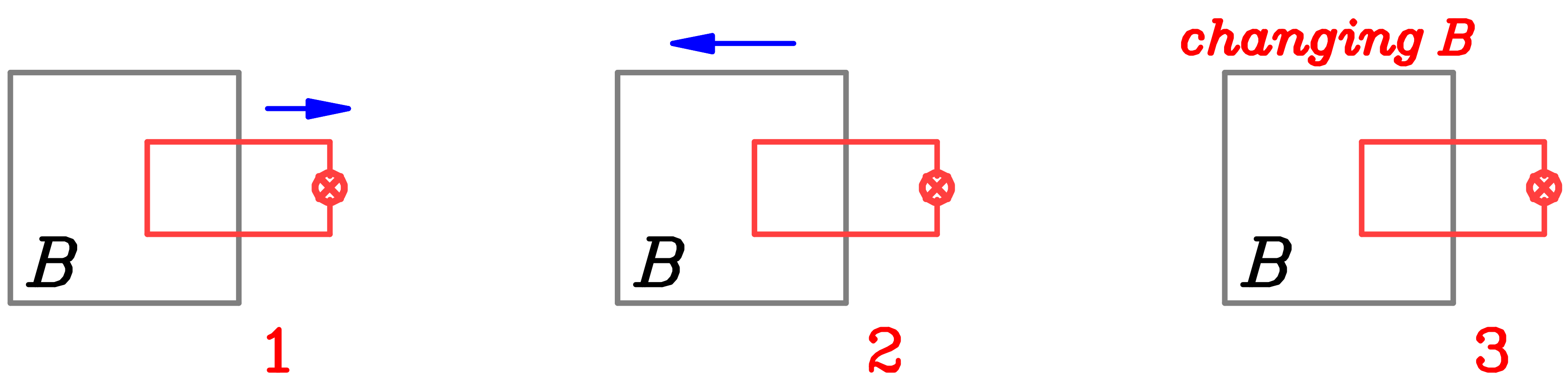


§2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场， 磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

1831年法拉第报告了一系列实验结果，典型的三个实验结果总结如下

1. 磁场不动（不变），回路运动经过有磁场的区域
2. 回路不动，移动磁铁

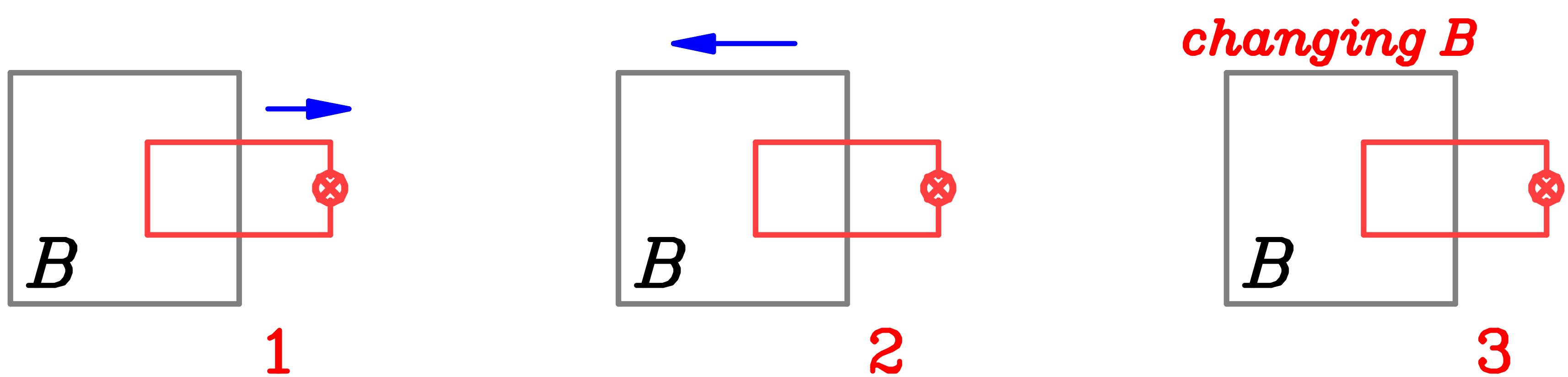


§ 2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，　　　　磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

1831年法拉第报告了一系列实验结果，典型的三个实验结果总结如下

1. 磁场不动（不变），回路运动经过有磁场的区域
2. 回路不动，移动磁铁
3. 回路磁铁都不动，改变（电磁铁）的场强



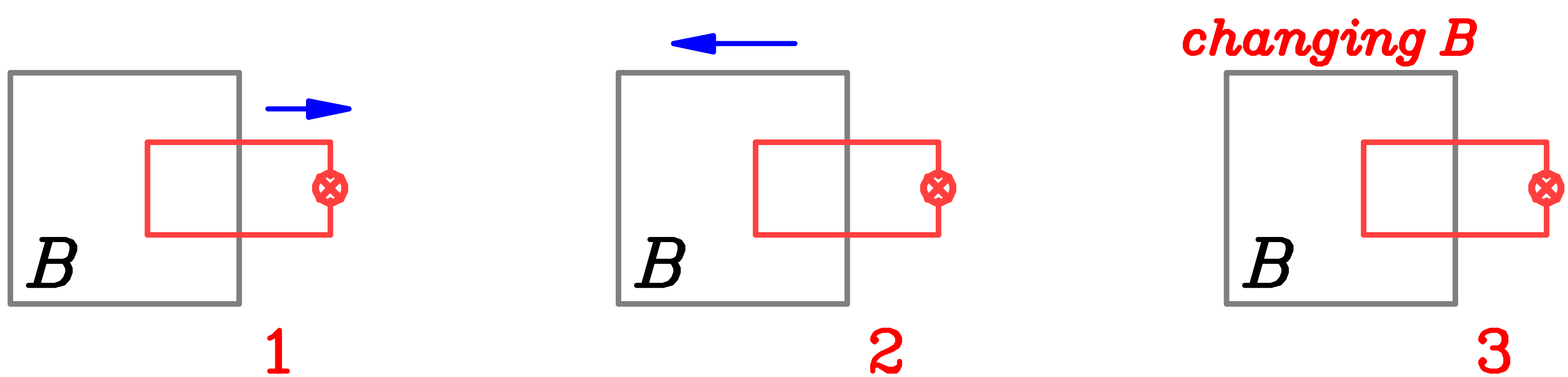
§ 2.3 法拉第定律

电流 $\Longrightarrow$ 磁场，　　　磁场 $\overset{?}{\Longrightarrow}$ 电流，

1831年法拉第报告了一系列实验结果，典型的三个实验结果总结如下

1. 磁场不动（不变），回路运动经过有磁场的区域
2. 回路不动，移动磁铁
3. 回路磁铁都不动，改变（电磁铁）的场强

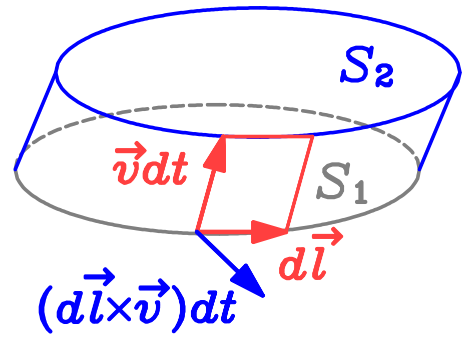
以上三种情况，闭合回路都出现电流。



一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

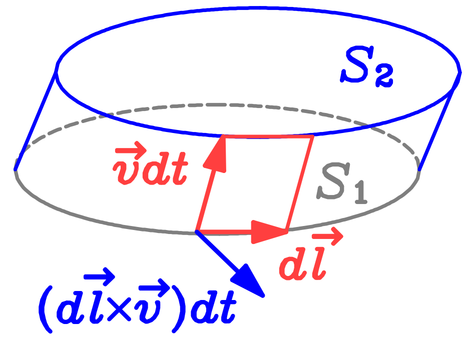
磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\mathrm{d}\Phi \quad = \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t)$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)



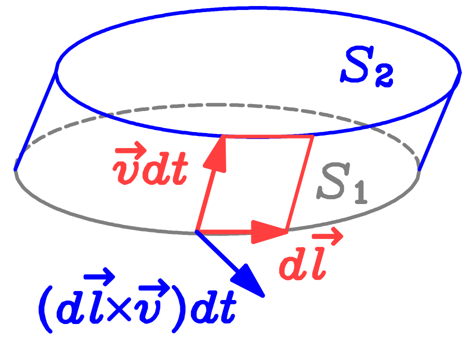
磁场不变，回路在磁场中运动。

设经过 $\mathrm{d}t$ 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\mathrm{d}\Phi = \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \qquad \oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



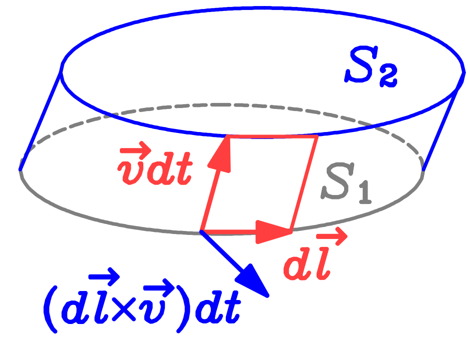
设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{环带} = 0$$

$$\mathrm{d}\Phi = \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t)$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



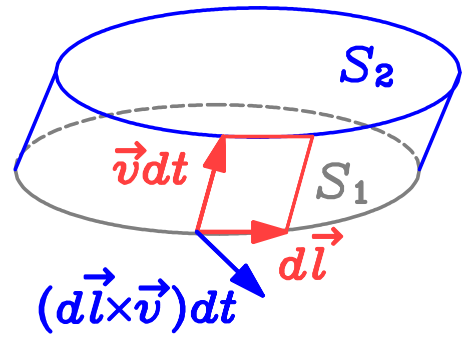
设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{环带} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{环带}$

$$\mathrm{d}\Phi \quad = \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t)$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)



磁场不变，回路在磁场中运动。

设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

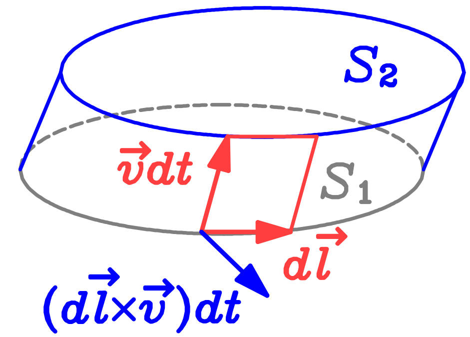
$$\begin{aligned}\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t)-\Phi(t)\\ &= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma\end{aligned}$$

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1}+\Phi_{S_2}+\Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2}-\Phi_{S_1} = \Phi_{S_2}+\Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{环带} = 0$$

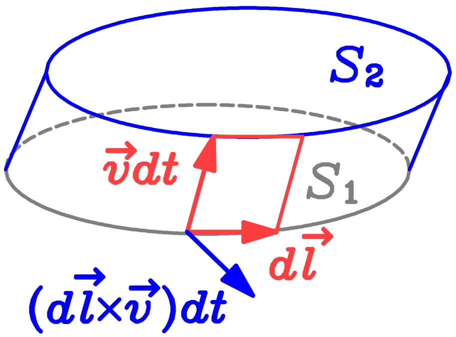
因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{环带}$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t)\\ &= -\oint_{环带} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma\end{aligned}$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 $\mathrm{d}t$ 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

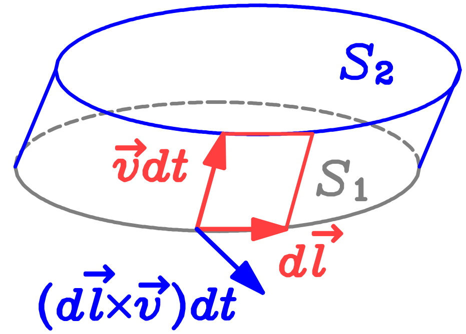
因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\begin{aligned}\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t)-\Phi(t)\\ &= -\oint_{环带}\vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma\\ &= -\oint_{环带}\vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t\end{aligned}$$

$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1}+\Phi_{S_2}+\Phi_{环带} = 0$

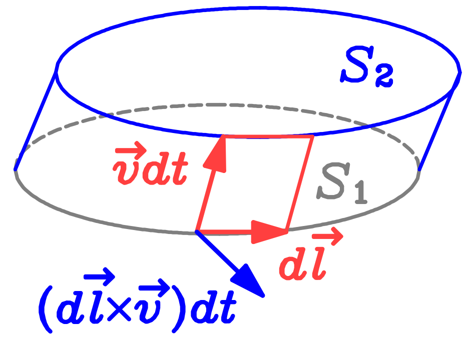
因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2}-\Phi_{S_1} = \Phi_{S_2}+\Phi_{-S_1} = -\Phi_{环带}$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\|d\vec{l}$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 $\mathrm{d}t$ 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

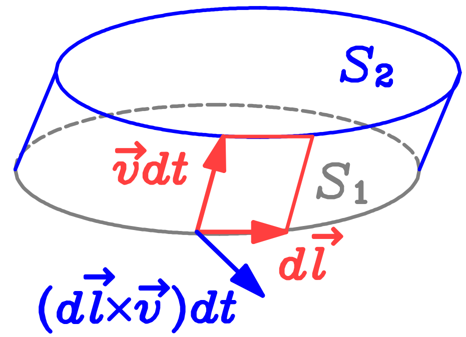
$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\| d\vec{l}$

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{B}\cdot[d\vec{l}\times\underbrace{(\vec{v}+\vec{u})}_{\vec{w}}]\right\}\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t)-\Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot(d\vec{\boldsymbol{l}}\times\vec{\boldsymbol{v}})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{\boldsymbol{B}}\cdot[d\vec{\boldsymbol{l}}\times\underbrace{(\vec{\boldsymbol{v}}+\vec{\boldsymbol{u}})}_{\vec{\boldsymbol{w}}}]\right\}\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

$\oint_S \vec{\boldsymbol{n}}\cdot\vec{\boldsymbol{B}}\mathrm{d}\sigma=0 \Rightarrow \Phi_S=\Phi_{-S_1}+\Phi_{S_2}+\Phi_{\text{环带}}=0$

因而 $\mathrm{d}\Phi=\Phi_{S_2}-\Phi_{S_1}=\Phi_{S_2}+\Phi_{-S_1}=-\Phi_{\text{环带}}$

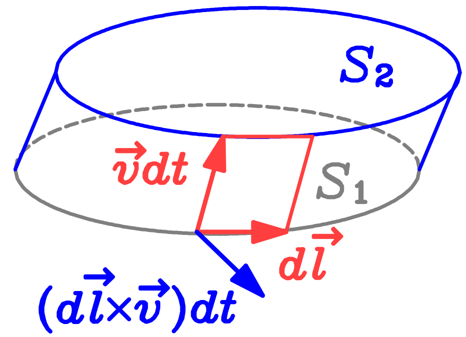
$\vec{\boldsymbol{n}}\,\mathrm{d}\sigma=(d\vec{\boldsymbol{l}}\times\vec{\boldsymbol{v}})\mathrm{d}t$，$\vec{\boldsymbol{v}}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{\boldsymbol{u}}$ 运动，因而 $\vec{\boldsymbol{u}}\|d\vec{\boldsymbol{l}}$

$\vec{\boldsymbol{w}}=\vec{\boldsymbol{v}}+\vec{\boldsymbol{u}}$ 为粒子的运动速度
且 $\vec{\boldsymbol{B}}\cdot(d\vec{\boldsymbol{l}}\times\vec{\boldsymbol{w}})=(\vec{\boldsymbol{w}}\times\vec{\boldsymbol{B}})\cdot d\vec{\boldsymbol{l}}$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 $\mathrm{d}t$ 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\,\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

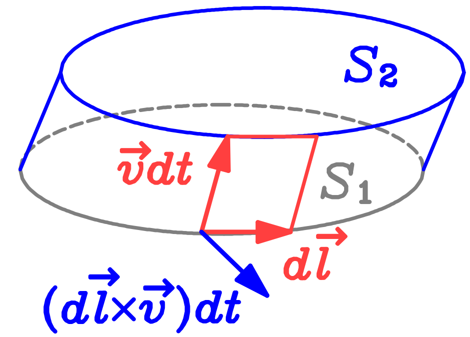
$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{B}\cdot[d\vec{l}\times\underbrace{(\vec{v}+\vec{u})}_{\vec{w}}]\right\}\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}\,\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\parallel d\vec{l}$

$\vec{w} = \vec{v} + \vec{u}$ 为粒子的运动速度
且 $\vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{w}) = (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)



磁场不变，回路在磁场中运动。

设经过 $\mathrm{d}t$ 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\parallel d\vec{l}$

$\vec{w} = \vec{v} + \vec{u}$ 为粒子的运动速度
且 $\vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{w}) = (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}$

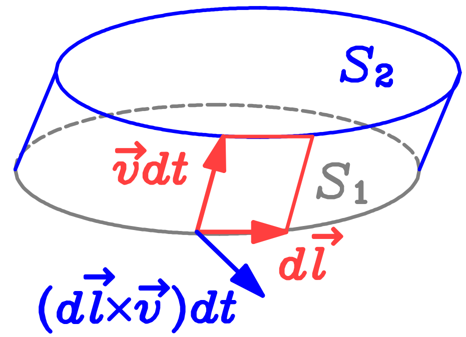
$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{B}\cdot[d\vec{l}\times\underbrace{(\vec{v}+\vec{u})}_{\vec{w}}]\right\}\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}\,\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

$\vec{w}\times\vec{B}$ 为单位正电荷在磁场中的洛伦兹力

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。

设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。



$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\|d\vec{l}$

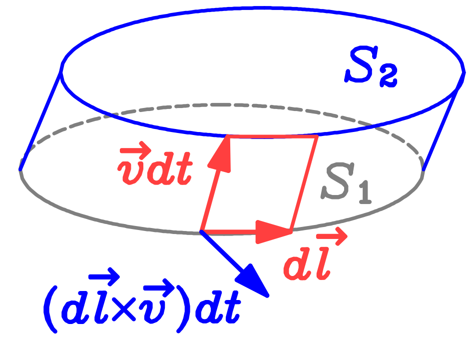
$\vec{w} = \vec{v} + \vec{u}$ 为粒子的运动速度
且 $\vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{w}) = (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}$

$\vec{w}\times\vec{B}$ 为单位正电荷在磁场中的洛伦兹力

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{B}\cdot\left[d\vec{l}\times\underbrace{(\vec{v}+\vec{u})}_{\vec{w}}\right]\right\}\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}\,\mathrm{d}t \\
&= -\left[\oint \vec{f}_{mag}\cdot d\vec{l}\right]\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

一、动生电动势 (motional electromotive force, motional emf)

磁场不变，回路在磁场中运动。



设经过 dt 时间，回路从 S_1 运动到 S_2 位置，
由于回路的运动，从而穿过回路的磁通量发生了改变。

$$\oint_S \vec{n}\cdot\vec{B}\mathrm{d}\sigma = 0 \Rightarrow \Phi_S = \Phi_{-S_1} + \Phi_{S_2} + \Phi_{\text{环带}} = 0$$

因而 $\mathrm{d}\Phi = \Phi_{S_2} - \Phi_{S_1} = \Phi_{S_2} + \Phi_{-S_1} = -\Phi_{\text{环带}}$

$$\begin{aligned}
\mathrm{d}\Phi &= \Phi(t+\mathrm{d}t) - \Phi(t) \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma \\
&= -\oint_{\text{环带}} \vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} \left\{\vec{B}\cdot[d\vec{l}\times\underbrace{(\vec{v}+\vec{u})}_{\vec{w}}]\right\}\mathrm{d}t \\
&= -\oint_{\text{环带}} (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}\,\mathrm{d}t \\
&= -\left[\oint \vec{f}_{mag}\cdot d\vec{l}\right]\mathrm{d}t
\end{aligned}$$

$\vec{n}\,\mathrm{d}\sigma = (d\vec{l}\times\vec{v})\mathrm{d}t$，$\vec{v}$ 为回路瞬时速度

带电粒子在回路中以速度 $\vec{u}$ 运动，因而 $\vec{u}\| d\vec{l}$

$\vec{w} = \vec{v} + \vec{u}$ 为粒子的运动速度
且 $\vec{B}\cdot(d\vec{l}\times\vec{w}) = (\vec{w}\times\vec{B})\cdot d\vec{l}$

$\vec{w}\times\vec{B}$ 为单位正电荷在磁场中的洛伦兹力

$$\boxed{-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \oint \vec{f}_{mag}\cdot d\vec{l} = \mathcal{E}}$$

几点说明：

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

这种电流称为：感生电流。这一现象称为：电磁感应现象。

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

这种电流称为：感生电流。这一现象称为：电磁感应现象。

当时认为，回路不动，不可能有磁力，什么使电荷流动？

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

这种电流称为：感生电流。这一现象称为：电磁感应现象。

当时认为，回路不动，不可能有磁力，什么使电荷流动？　　电场力

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

这种电流称为：感生电流。这一现象称为：电磁感应现象。

当时认为，回路不动，不可能有磁力，什么使电荷流动？ 电场力

法拉第认为：

几点说明：

1. 动生电动势来自磁力，满足通量规则：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$，但当时人们认为动生电动势的通量规则并没有包含新的物理，只是洛伦兹力的一个结果
2. 磁力本身不做功，是回路运动的驱动力做功；

二、感生电动势 (induced emf)

当回路不动，而穿过回路的磁通量发生变化，则回路有电流。

这种电流称为：感生电流。这一现象称为：电磁感应现象。

当时认为，回路不动，不可能有磁力，什么使电荷流动？　　电场力

法拉第认为：

$$\boxed{\text{变化的磁场会感应（激发）电场}}$$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}} \cdot \vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}} \cdot \vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

感生电动势： 沿回路移动单位正电荷一周外力（这时为感生电场 $\vec{\boldsymbol{E}}_i$ ）所做的功，故：

$$\mathcal{E}_i \quad = \boxed{\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}} \cdot \vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma}$$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

感生电动势：沿回路移动单位正电荷一周外力（这时为感生电场 $\vec{\boldsymbol{E}}_i$ ）所做的功，故：

$$\mathcal{E}_i \quad = \boxed{\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{S}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma}$$

回路固定: 右边 $= -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{S}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_{\mathcal{S}} \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

感生电动势：沿回路移动单位正电荷一周外力（这时为感生电场 $\vec{\boldsymbol{E}}_i$ ）所做的功，故：

$$\mathcal{E}_i = \boxed{\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma}$$

回路固定: 右边 $= -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_S \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

Stokes 定理: 左边 $= \oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = \int_S \left(\nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}_i\right)\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

感生电动势： 沿回路移动单位正电荷一周外力（这时为感生电场 $\vec{\boldsymbol{E}}_i$ ）所做的功，故：

$$\mathcal{E}_i \quad = \boxed{\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\mathcal{S}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma}$$

回路固定: 右边 $= -\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\displaystyle\int_{\mathcal{S}} \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_{\mathcal{S}} \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

Stokes 定理: 左边 $= \displaystyle\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = \int_{\mathcal{S}} (\nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}_i)\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_{\mathcal{S}} \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

法拉第进一步发现，变化的磁场激发的感生电动势也满足通量法则

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$$

感生电动势：沿回路移动单位正电荷一周外力（这时为感生电场 $\vec{\boldsymbol{E}}_i$ ）所做的功，故：

$$\mathcal{E}_i = \boxed{\oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma}$$

回路固定: 右边 $= -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \vec{\boldsymbol{B}}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_S \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

Stokes 定理: 左边 $= \oint \vec{\boldsymbol{E}}_i\cdot\mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = \int_S (\nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}_i)\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma = -\int_S \frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\mathrm{d}\sigma$

回路是任意的化为微分形式

$$\boxed{\nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}_i = -\frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}}$$

法拉第定律

几点说明：

几点说明：

1. 综合动生和感生两种情况，有普适的通量法则：
   不论何种原因导致回路磁通量发生改变，回路将出现电动势：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$

几点说明：

1. 综合动生和感生两种情况，有普适的通量法则：
   不论何种原因导致回路磁通量发生改变，回路将出现电动势：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$

2. 从当时的观点来看，作用于静止电荷的力属电场力，作用于运动电荷且与运动方向垂直的力为磁场力。因此，尽管动生和感生两种情况的电动势都满足通量法则，但从经典观点来看，动生电动势来源于磁场力，而感生电动势来自电场力，它们满足同一个规律纯属一种巧合。

几点说明：

1. 综合动生和感生两种情况，有普适的通量法则：
   不论何种原因导致回路磁通量发生改变，回路将出现电动势：$\mathcal{E}=-\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$

2. 从当时的观点来看，作用于静止电荷的力属电场力，作用于运动电荷且与运动方向垂直的力为磁场力。因此，尽管动生和感生两种情况的电动势都满足通量法则，但从经典观点来看，动生电动势来源于磁场力，而感生电动势来自电场力，它们满足同一个规律纯属一种巧合。

3. 运动是相对的，在回路惯性系看是电场力，在磁铁惯性系看是磁场力，它们满足相同的普适通量法则，这是否是否隐含着更深层次的物理规律：如电磁场是否为一种统一的场、不同惯性系物理规律的形式是否相同？爱因斯坦正是基于这普适通量法则提出其狭义相对论的基本假设；

几点说明：

1. 综合动生和感生两种情况，有普适的通量法则：
   不论何种原因导致回路磁通量发生改变，回路将出现电动势：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$

2. 从当时的观点来看，作用于静止电荷的力属电场力，作用于运动电荷且与运动方向垂直的力为磁场力。因此，尽管动生和感生两种情况的电动势都满足通量法则，但从经典观点来看，动生电动势来源于磁场力，而感生电动势来自电场力，它们满足同一个规律纯属一种巧合。

3. 运动是相对的，在回路惯性系看是电场力，在磁铁惯性系看是磁场力，它们满足相同的普适通量法则，这是否是否隐含着更深层次的物理规律：如电磁场是否为一种统一的场、不同惯性系物理规律的形式是否相同？爱因斯坦正是基于这普适通量法则提出其狭义相对论的基本假设；

4. 尽管通量法则的普适性，但它并不是基本规律，更基本的规律是：

几点说明：

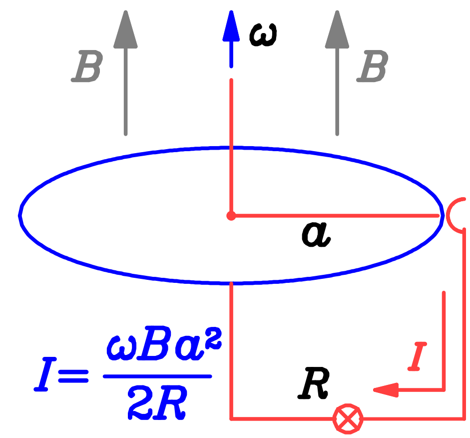
1. 综合动生和感生两种情况，有普适的通量法则：
   不论何种原因导致回路磁通量发生改变，回路将出现电动势：$\mathcal{E} = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$
2. 从当时的观点来看，作用于静止电荷的力属电场力，作用于运动电荷且与运动方向垂直的力为磁场力。因此，尽管动生和感生两种情况的电动势都满足通量法则，但从经典观点来看，动生电动势来源于磁场力，而感生电动势来自电场力，它们满足同一个规律纯属一种巧合。
3. 运动是相对的，在回路惯性系看是电场力，在磁铁惯性系看是磁场力，它们满足相同的普适通量法则，这是否是否隐含着更深层次的物理规律：如电磁场是否为一种统一的场、不同惯性系物理规律的形式是否相同? 爱因斯坦正是基于这普适通量法则提出其狭义相对论的基本假设；
4. 尽管通量法则的普适性，但它并不是基本规律，更基本的规律是：

   电磁感应定律： $\nabla \times \vec{\boldsymbol{E}} = -\dfrac{\partial \vec{\boldsymbol{B}}}{\partial t}$ Faraday 发现，Maxwell 写成此形式

   洛伦兹力： $\vec{\boldsymbol{F}} = q(\vec{\boldsymbol{E}} + \vec{\boldsymbol{v}} \times \vec{\boldsymbol{B}})$

   见下页图例

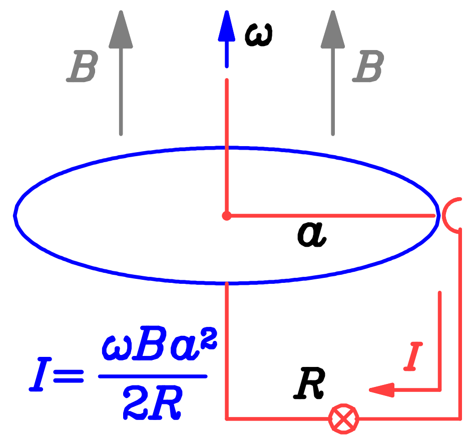
Let there be light



$$I = \frac{\omega B a^2}{2R}$$

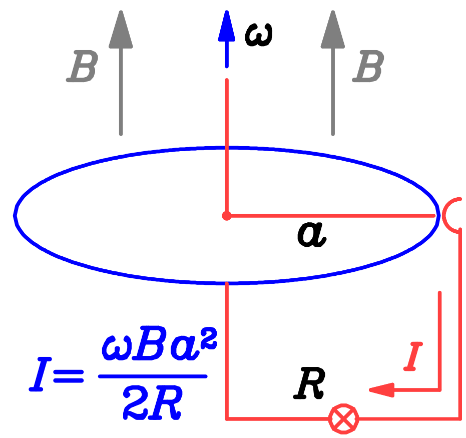
Let there be light

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。



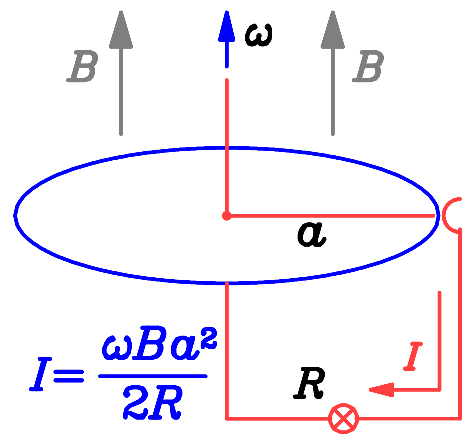
右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。

5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：



$$I = \frac{\omega B a^2}{2R}$$

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。

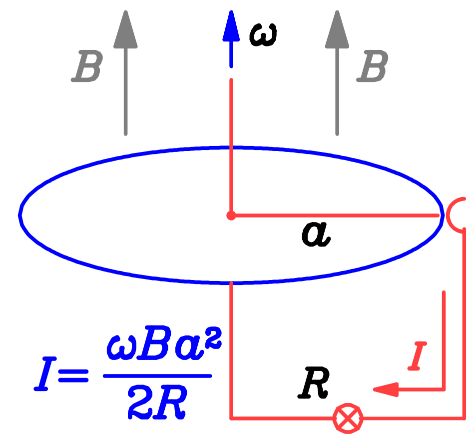


5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所
   激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。



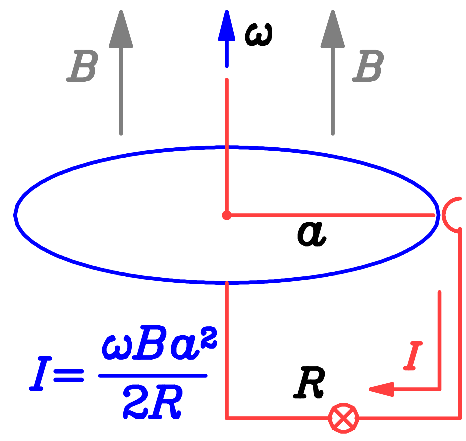
5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所
   激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了 场与场 之间的关系；

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。



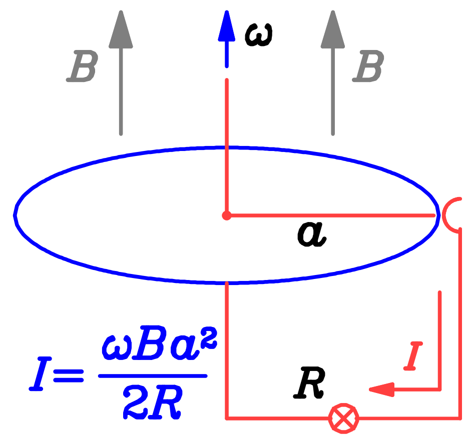
5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所
   激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了 场与场 之间的关系；

   法拉第定律揭示了一种新的电磁现象 — 电磁感应现象：变化的磁场可激发涡旋电场，称为感生电场；感生电场与静电场不同，后者是无旋场；



右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。

5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

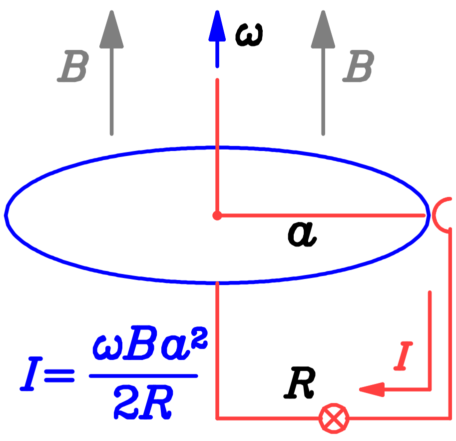
   从而动生或感生电动势产生的电流所激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了 场与场 之间的关系；

   法拉第定律揭示了一种新的电磁现象 — 电磁感应现象：变化的磁场可激发涡旋电场，称为感生电场；感生电场与静电场不同，后者是无旋场；

7. 空间任意一点的电场，是电荷激发的静电场 $\vec{E}_s$ 和变化的磁场激发的感应电场 $\vec{E}_i$ 之和：

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。



5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所
   激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

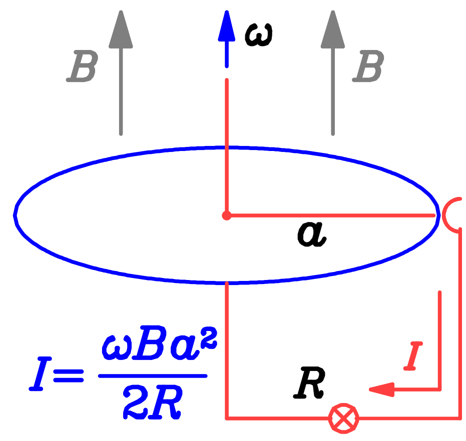
6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了场与场之间的关系；

   法拉第定律揭示了一种新的电磁现象 — 电磁感应现象：变化的磁场可激发涡旋电场，称为感生电场；感生电场与静电场不同，后者是无旋场；

7. 空间任意一点的电场，是电荷激发的静电场 $\vec{E}_s$ 和变化的磁场激发的感应电场 $\vec{E}_i$ 之和：

$$\vec{E}=\vec{E}_s+\vec{E}_i$$

右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。



5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了场与场之间的关系；

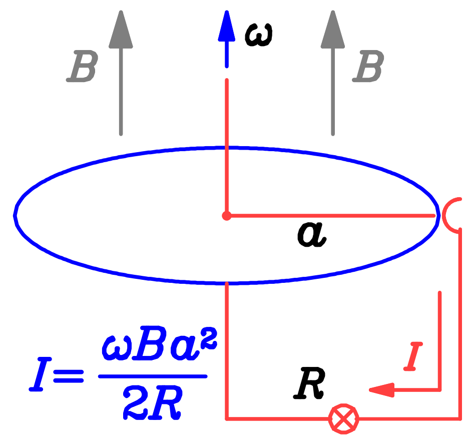
   法拉第定律揭示了一种新的电磁现象 — 电磁感应现象：变化的磁场可激发涡旋电场，称为感生电场；感生电场与静电场不同，后者是无旋场；

7. 空间任意一点的电场，是电荷激发的静电场 $\vec{E}_s$ 和变化的磁场激发的感应电场 $\vec{E}_i$ 之和：

$$\vec{E} = \vec{E}_s + \vec{E}_i$$

其中

$$\left.\begin{aligned} \nabla\cdot\vec{E}_s &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla\times\vec{E}_s &= 0 \end{aligned}\right\}$$ 无旋场
也称纵场



右图所示转动金属盘，红色回路的磁通量并没改变，但仍有电流。

5. 普适通量法则中的负号反映了楞次定律 (Lenz's law)：

   自然界不喜欢通量的改变。

   从而动生或感生电动势产生的电流所
   激发的磁场必定试图抵消外界所导致的磁通量的改变；

6. 对感生电场，法拉第定律中不出现回路参数，故其反映了 场与场 之间的关系；

   法拉第定律揭示了一种新的电磁现象 — 电磁感应现象：变化的磁场可激发涡旋电场，称为感生电场；感生电场与静电场不同，后者是无旋场；

7. 空间任意一点的电场，是电荷激发的静电场 $\vec{E}_s$ 和变化的磁场激发的感应电场 $\vec{E}_i$ 之和：

$$\vec{E}=\vec{E}_s+\vec{E}_i$$

其中

$$\left.\begin{aligned}\nabla\cdot\vec{E}_s&=\frac{\rho}{\epsilon_0}\\ \nabla\times\vec{E}_s&=0\end{aligned}\right\}\ \text{无旋场，也称纵场}\qquad \left.\begin{aligned}\nabla\cdot\vec{E}_i&=0\\ \nabla\times\vec{E}_i&=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\end{aligned}\right\}\ \text{无散场，也称横场}$$

8. 涡旋电流 (eddy current)：导体在非均匀磁场中运动或在时变磁场中，由于动生或感生电动势的存在，导体内部将出现涡旋电流。

8. 涡旋电流 (eddy current)：导体在非均匀磁场中运动或在时变磁场中，由于动生或感生电动势的存在，导体内部将出现涡旋电流。

关于涡旋电流的讨论和计算，参阅：Smythe, Static and Dynamic Electricity, Chap. 10

8. 涡旋电流 (eddy current)：导体在非均匀磁场中运动或在时变磁场中，由于动生或感生电动势的存在，导体内部将出现涡旋电流。

关于涡旋电流的讨论和计算，参阅：Smythe, Static and Dynamic Electricity, Chap. 10

例： 金属盘单摆，刻缝和不刻缝的金属盘展示了 eddy current 的影响

8. 涡旋电流 (eddy current)：导体在非均匀磁场中运动或在时变磁场中，由于动生或感生电动势的存在，导体内部将出现涡旋电流。

关于涡旋电流的讨论和计算，参阅：Smythe, Static and Dynamic Electricity, Chap. 10

例：金属盘单摆，刻缝和不刻缝的金属盘展示了 eddy current 的影响
不刻缝的金属盘显示明显的被阻滞现象，反映了楞次定律，

8. 涡旋电流 (eddy current)：导体在非均匀磁场中运动或在时变磁场中，由于动生或感生电动势的存在，导体内部将出现涡旋电流。

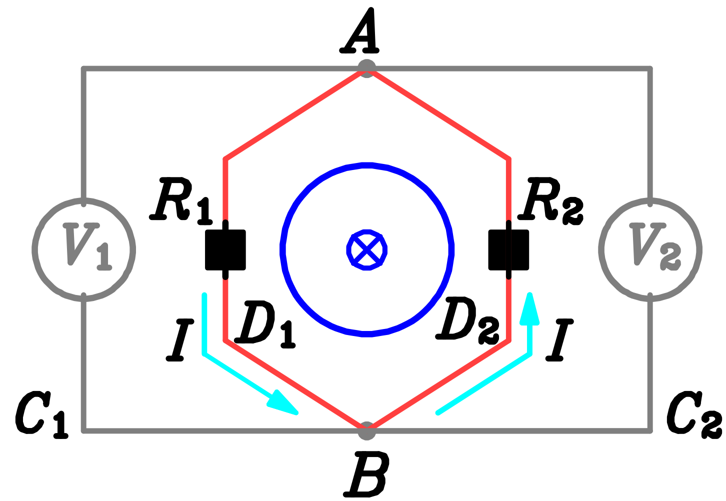
关于涡旋电流的讨论和计算，参阅：Smythe, Static and Dynamic Electricity, Chap. 10

例：金属盘单摆，刻缝和不刻缝的金属盘展示了 eddy current 的影响
不刻缝的金属盘显示明显的被阻滞现象，反映了楞次定律，
自然界不喜欢改变，eddy current 阻碍了单摆运动

三、例题

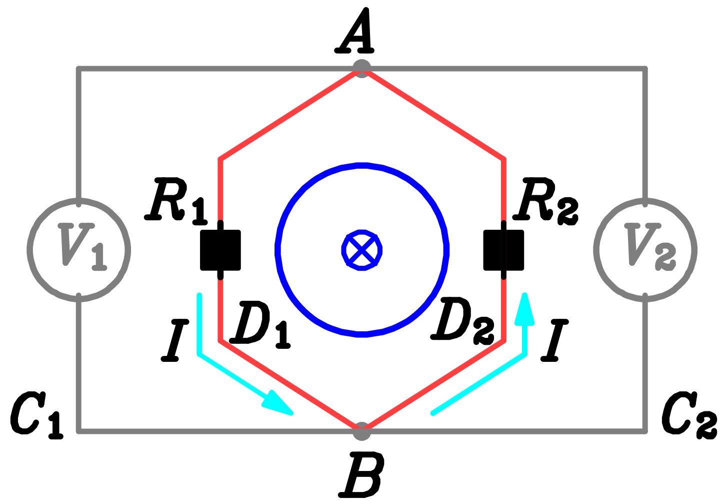
三、例题

例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。



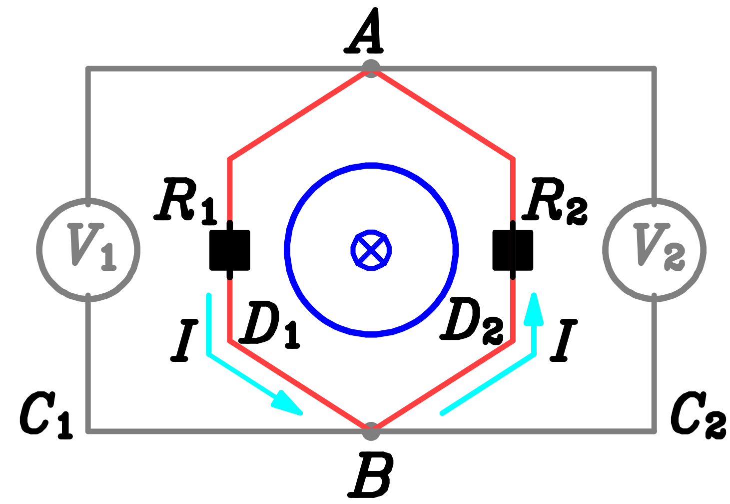
三、例题

例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha\, t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。



红色回路的磁通量变化率：$\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \alpha$，

三、例题



例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。

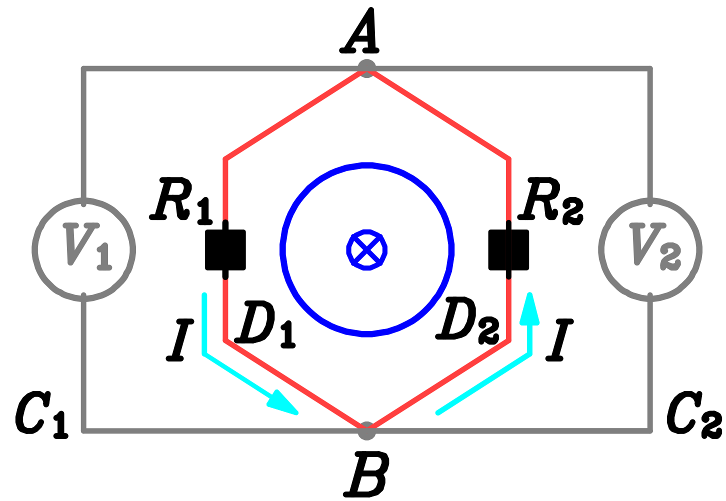
红色回路的磁通量变化率：$\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \alpha$，

故回路有感生电动势：$\mathcal{E} = \alpha$，

回路有电流：$I = \mathcal{E}/(R_1 + R_2) = \dfrac{\alpha}{R_1 + R_2}$，

三、例题

例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha\, t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。



红色回路的磁通量变化率：$\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \alpha$，

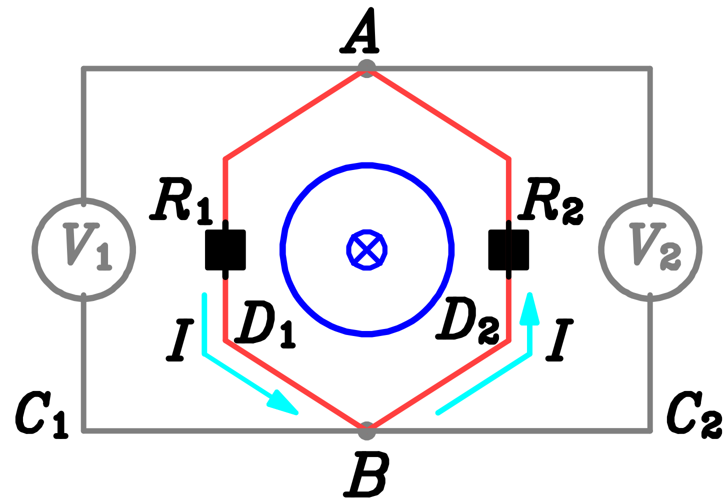
故回路有感生电动势：$\mathcal{E} = \alpha$，

回路有电流：$I = \mathcal{E}/(R_1 + R_2) = \dfrac{\alpha}{R_1 + R_2}$，

故： 电压表 V_1 读数：$V_1 = I R_1 = \dfrac{\alpha R_1}{R_1 + R_2}$， A 点高于 B 点 $V_A > V_B$

三、例题

例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。



红色回路的磁通量变化率：$\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \alpha$，

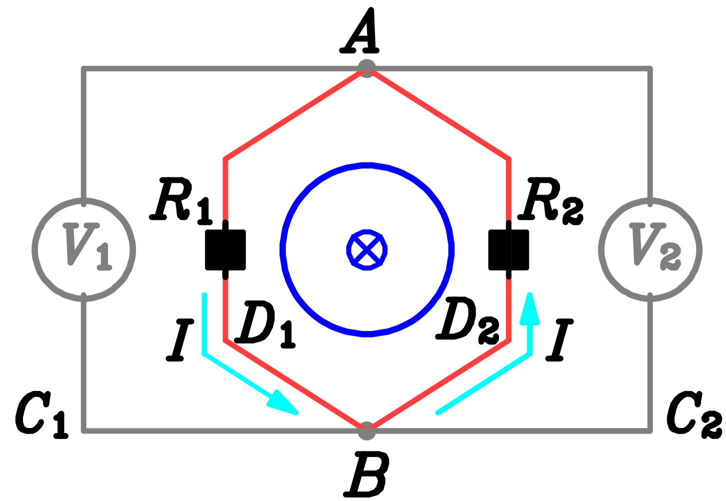
故回路有感生电动势：$\mathcal{E} = \alpha$，

回路有电流：$I = \mathcal{E}/(R_1 + R_2) = \dfrac{\alpha}{R_1 + R_2}$，

故： 电压表 V_1 读数：$V_1 = IR_1 = \dfrac{\alpha R_1}{R_1 + R_2}$， A 点高于 B 点 $V_A > V_B$

电压表 V_2 读数：$V_2 = IR_2 = \dfrac{\alpha R_2}{R_1 + R_2}$， B 点高于 A 点 $V_A < V_B$

三、例题



例 1： 如图所示一长螺线管（兰色部分）管内磁感应强度指向纸内，螺旋管电流随时间线性增加，管内磁通量 $\Phi = \alpha\, t$，两个内阻很大的电压表如图所示连接到 A, B 两点。求两电压表的读数。

红色回路的磁通量变化率：$\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \alpha$，

故回路有感生电动势：$\mathcal{E} = \alpha$，

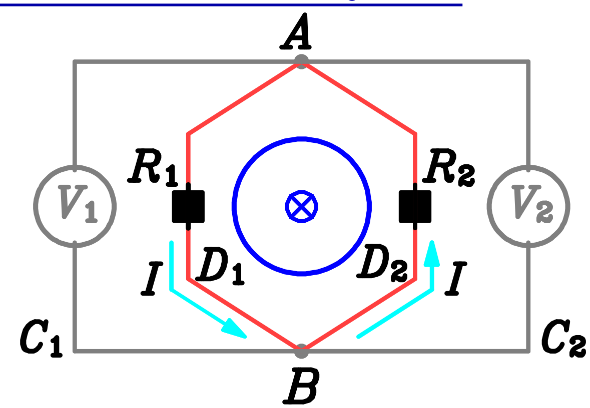
回路有电流：$I = \mathcal{E}/(R_1 + R_2) = \dfrac{\alpha}{R_1 + R_2}$，

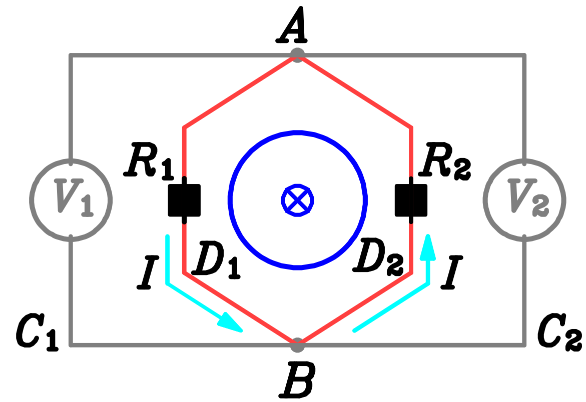
故： 电压表 V_1 读数：$V_1 = IR_1 = \dfrac{\alpha R_1}{R_1 + R_2}$， A 点高于 B 点 $V_A > V_B$

电压表 V_2 读数：$V_2 = IR_2 = \dfrac{\alpha R_2}{R_1 + R_2}$， B 点高于 A 点 $V_A < V_B$

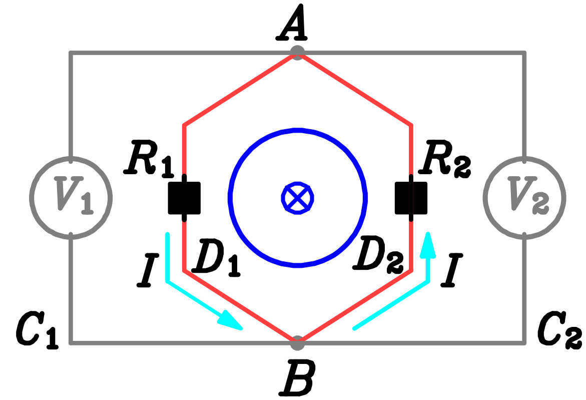
问题：$V_1 \neq V_2$，错了吗？如果没错，如何理解？

Let there be light

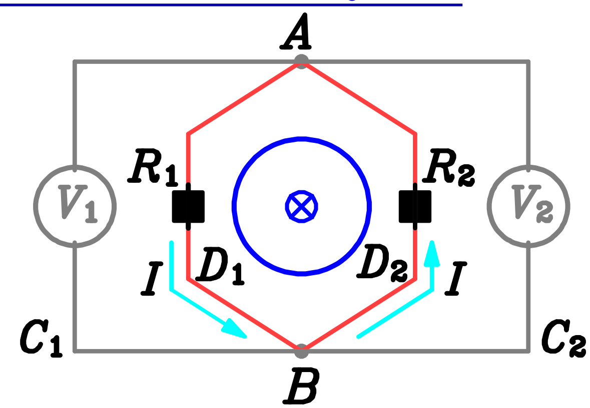




电压表 V_1 的读数：

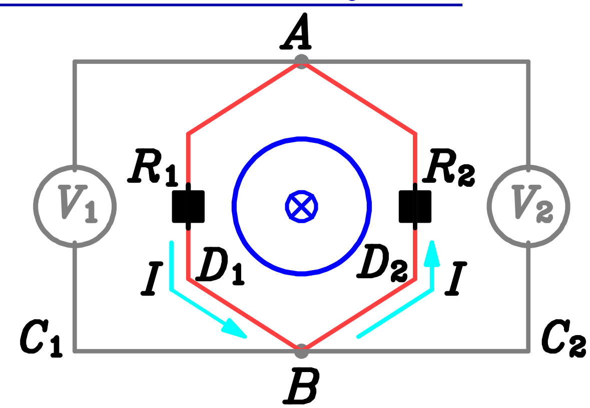


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$

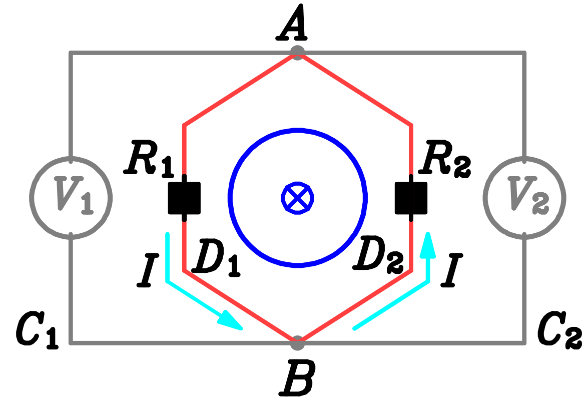
电压表 V_2 的读数：



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$

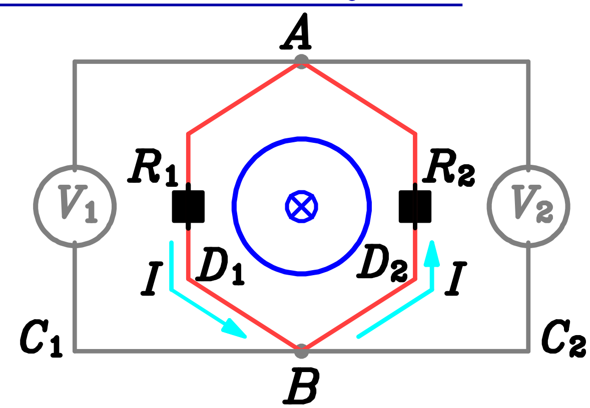
Let there be light



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\alpha \neq 0$$

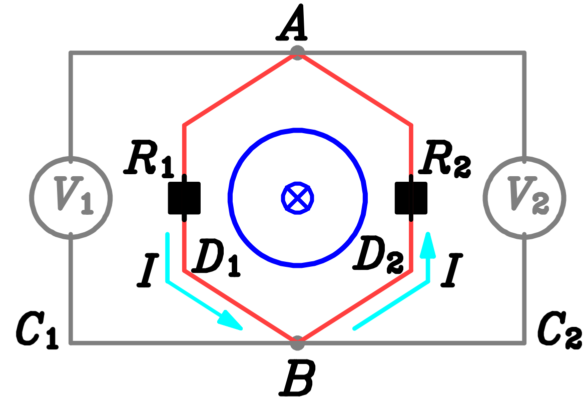


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数：$V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

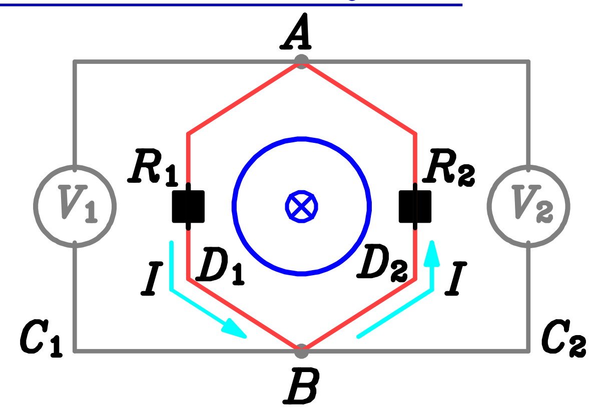


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} = \int_{AC_2B} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}} + \int_{BC_1A} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{l}}$$

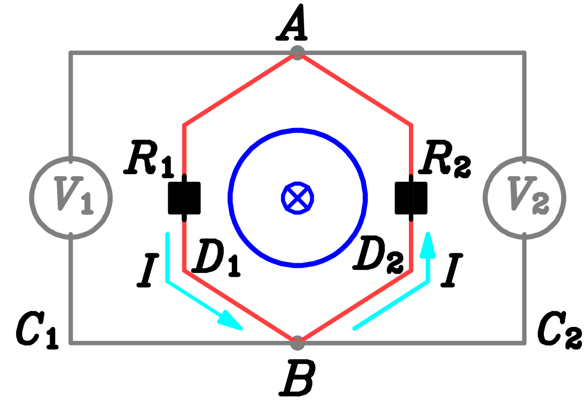


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} - \int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

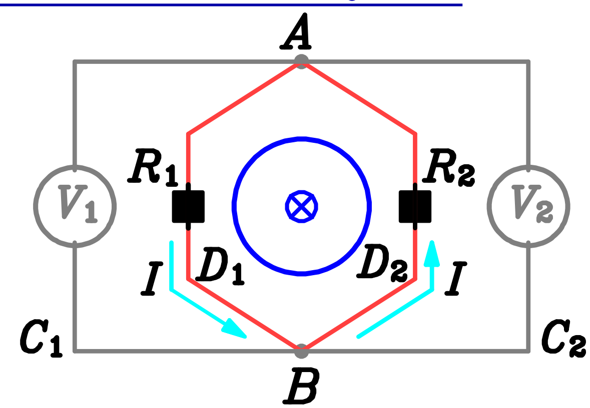


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{V_2} - \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$$

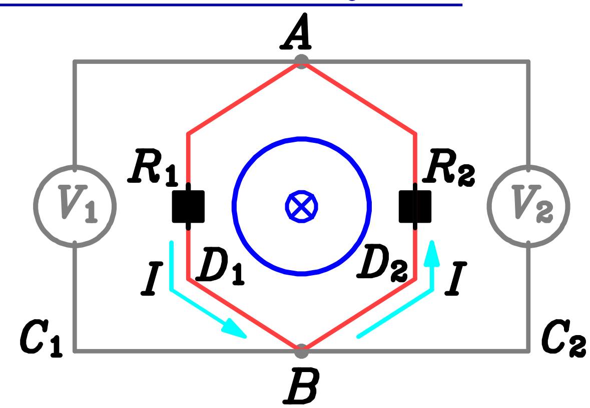


电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}}_{V_1}$$



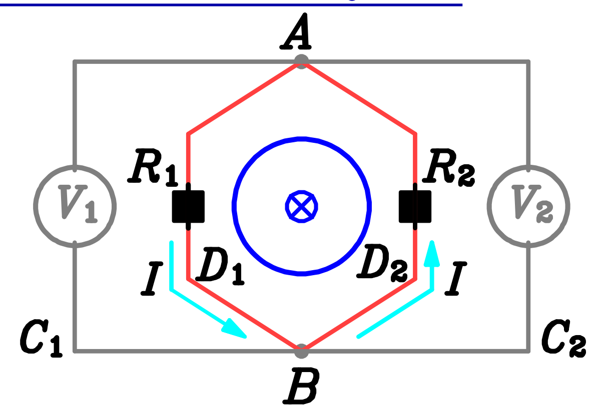
电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E} \cdot d\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot d\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E} \cdot d\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E} \cdot d\vec{l}}_{V_1}$$

$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

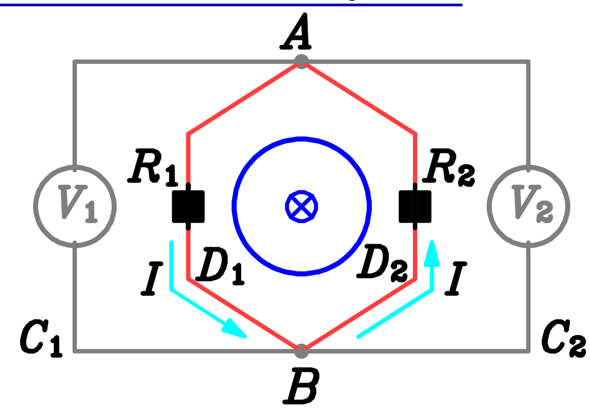
电压表 V_2 的读数：$V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{V_1}$$

$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla\times\vec{E} \neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E}\cdot d\vec{l} \neq 0$，电势多值（没明确的定义）。



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

电压表 V_2 的读数：$V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}$

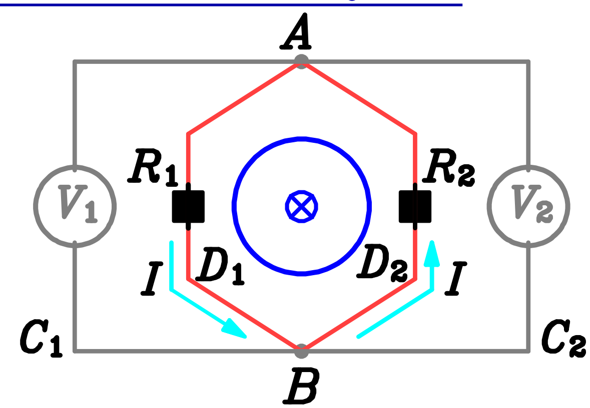
$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot d\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{V_1}$$

$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla\times\vec{E}\neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E}\cdot d\vec{l}\neq 0$，电势多值（没明确的定义）。

问题：但螺线管外 $\vec{B}=0$，满足 $\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} = 0$



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

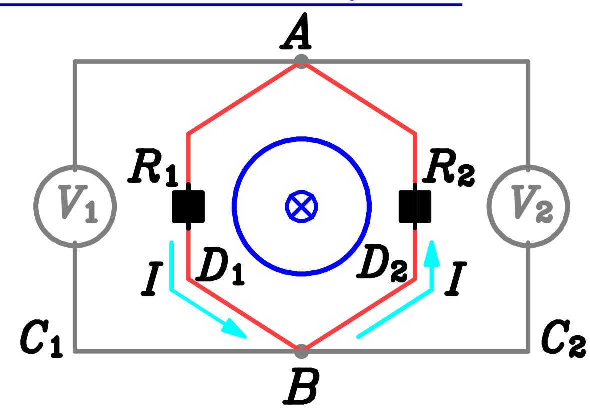
$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_1}$$

$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla\times\vec{E}\neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} \neq 0$，电势多值（没明确的定义）。

问题：但螺线管外 $\vec{B} = 0$，满足 $\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} = 0$ 症结所在：非单连通

(not simply connected)



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_1}$$

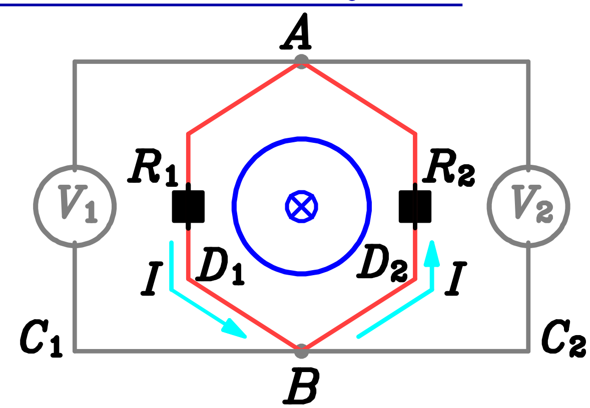
$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla\times\vec{E}\neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}\neq 0$，电势多值（没明确的定义）。

问题：但螺线管外 $\vec{B}=0$，满足 $\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

是否实验可测：

症结所在：非单连通
(not simply connected)



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数： $V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_1}$$

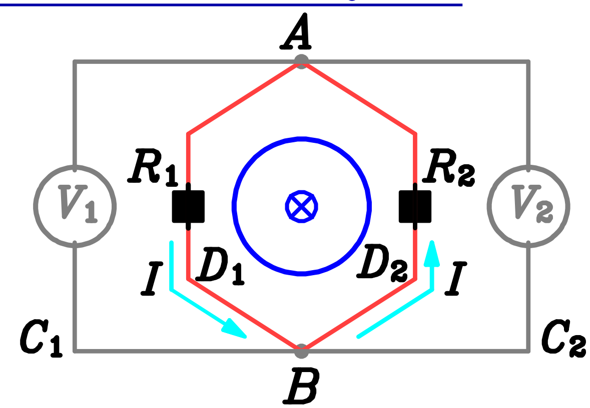
$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla \times \vec{E} \neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \neq 0$，电势多值（没明确的定义）。

问题：但螺线管外 $\vec{B} = 0$，满足 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

症结所在：非单连通
(not simply connected)

是否实验可测：Am. J. Phys. **50**, 1089



电压表 V_1 的读数： $V_1 = V_A - V_B = \int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

电压表 V_2 的读数：$V_2 = V_A - V_B = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\alpha \neq 0$$

$$\oint_{AC_2BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} + \int_{BC_1A} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \underbrace{\int_{AC_2B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_2} - \underbrace{\int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}}_{V_1}$$

$$\Longrightarrow \quad V_2 - V_1 = -\alpha$$

原因：如果 $\nabla \times \vec{E} \neq 0$，则 $\oint_{\mathcal{L}} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \neq 0$，电势多值（没明确的定义）。

问题：但螺线管外 $\vec{B} = 0$，满足 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

症结所在：非单连通 (not simply connected)

是否实验可测：Am. J. Phys. **50**, 1089

思考：既然电压表 V_1 读数是 $V_1 = -\int_{AC_1B} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$， V_1 是否为 R_1 两端电压 IR_1?