

PB14007151 赵凡怡

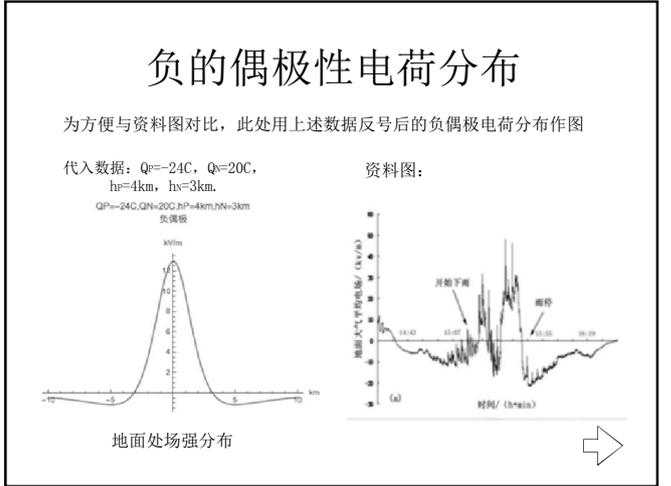
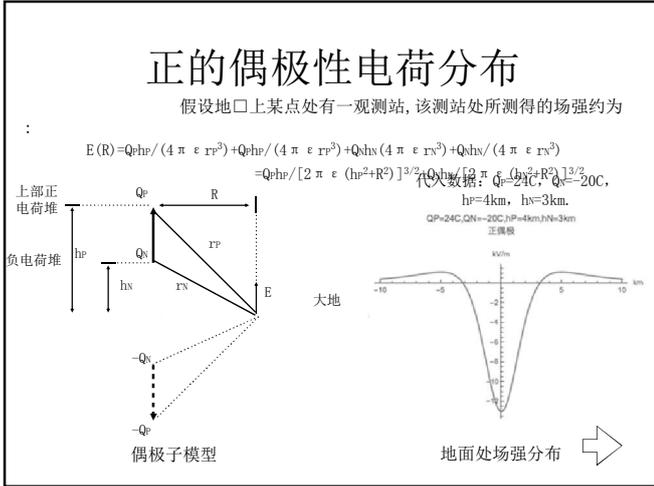
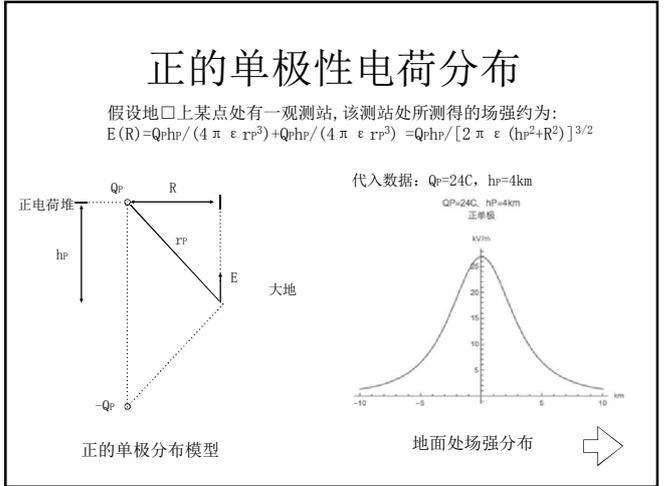
雷云荷电模型



在云开始形成时，云中的带电粒子是混乱分布的，由于带正的和带负的电量十分接近，云整体上呈电中性，随云发展到不同阶段，带电粒子由无序发展为有序的空间分布，经过各种起电过程后，在云内形成正的体电荷中心和负的体电荷中心，云内外的电场强度也逐渐增强，至雷暴阶段时，云内形成强的正、负体电荷中心，所产生的电场足以产生强电场，并形成雷雨。

雷云荷电模型作为雷电现象模型化研究的激励源，在雷电物理学研究中起着重要的作用。

- ## 雷云荷电模型
- (1) 无规则电荷分布。
 - (2) 正的单极性电荷分布。 
 - (3) 负的单极性电荷分布。（与正的类似，不赘述）
 - (4) 正的偶极性电荷分布。 
 - (5) 负的偶极性电荷分布。
 - (6) 多极性电荷分布。 
 - (7) 圆柱形电荷堆分布。 



三极性电荷分布

假设地口上某点处有一观测站, 该测站处所得的场强约为:

$$E(R) = Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^2) + Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^3) + Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3) + Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3) + Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3) + Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3)$$

$$= Q_{hp}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2} + Q_{hs}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2} + Q_{hl}/[2\pi\epsilon(h_1^2+R^2)]^{3/2}$$

如图为一较经典的分布示意图:

三极模型

雷暴云中电荷分布示意图

三极性电荷分布

雷暴云中电荷分布示意图

```

Print["Q1=40C;Q2=-40C;Q3=5C;h1=8km;h2=3km;h3=1.5km
三极"]
Print["x-km y-kV/m"]
Q1 = 40; Q2 = -40; Q3 = 5; h1 = 8; h2 = 3; h3 = 1.5; k = 8.99;
Plot[2 k (Q1 h1 / (h1^2 + x^2)^1.5 + Q2 h2 / (h2^2 + x^2)^1.5 + Q3 h3 / (h3^2 + x^2)^1.5),
{x, -10, 10}, Frame -> True, GridLines -> Automatic]
Q1=40C;Q2=-40C;Q3=5C;h1=8km;h2=3km;h3=1.5km 正-负-正
三极
x-km y-kV/m
E(R) = Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^2) + Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^3)
+ Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3) + Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3)
+ Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3) + Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3)
= Q_{hp}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2}
+ Q_{hs}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2}
+ Q_{hl}/[2\pi\epsilon(h_1^2+R^2)]^{3/2}
i) 取Q=40C, Q=-40C, Q=5C,
h_p=4km, h_n=3km, h_l=1.5km
    
```

三极性电荷分布

雷暴云中电荷分布示意图

```

Print["Q1=24C;Q2=-20C;Q3=4C;h1=10km;h2=5km;h3=2.5km
三极"]
Print["x-km y-kV/m"]
Q1 = 24; Q2 = -20; Q3 = 4; h1 = 10; h2 = 5; h3 = 2.5; k = 8.99;
Plot[2 k (Q1 h1 / (h1^2 + x^2)^1.5 + Q2 h2 / (h2^2 + x^2)^1.5 + Q3 h3 / (h3^2 + x^2)^1.5),
{x, -15, 15}, Frame -> True, GridLines -> Automatic]
Q1=24C;Q2=-20C;Q3=4C;h1=10km;h2=5km;h3=2.5km 正-负-正
三极
x-km y-kV/m
E(R) = Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^2) + Q_{hp}/(4\pi\epsilon r^3)
+ Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3) + Q_{hs}/(4\pi\epsilon r^3)
+ Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3) + Q_{hl}/(4\pi\epsilon r_1^3)
= Q_{hp}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2}
+ Q_{hs}/[2\pi\epsilon(h^2+R^2)]^{3/2}
+ Q_{hl}/[2\pi\epsilon(h_1^2+R^2)]^{3/2}
i) 取Q_p=24C, Q_n=-20C, Q_c=4C,
h_p=4km, h_n=3km, h_l=2.5km
    
```

地面处场强分布

三极性电荷分布

(下部小型正电荷区对电场的影响)

```

Print["Q1=40C;Q2=-60C;Q31=10C;Q32=5C;Q33=0C;h1=8km;h2=3km;h3=1.5km
三极"]
Print["x-km y-kV/m"]
Q1 = 40; Q2 = -60; Q31 = 10; Q32 = 5; Q33 = 0; h1 = 8; h2 = 3; h3 = 1.5; k = 8.99;
Plot[2 k (Q1 h1 / (h1^2 + x^2)^1.5 + Q2 h2 / (h2^2 + x^2)^1.5 + Q31 h3 / (h3^2 + x^2)^1.5),
2 k (Q1 h1 / (h1^2 + x^2)^1.5 + Q2 h2 / (h2^2 + x^2)^1.5 + Q32 h3 / (h3^2 + x^2)^1.5),
2 k (Q1 h1 / (h1^2 + x^2)^1.5 + Q2 h2 / (h2^2 + x^2)^1.5 + Q33 h3 / (h3^2 + x^2)^1.5),
{x, -10, 10}, Frame -> True, GridLines -> Automatic]
Q1=40C;Q2=-60C;Q31=10C;Q32=5C;Q33=0C;h1=8km;h2=3km;h3=1.5km 正-负-正
三极
x-km y-kV/m
    
```

雷暴云中电荷分布示意图

三极性电荷分布

为方便与资料图对比, 取一组不同于上图的数据作图比较

代入数据: $Q_p=24C, Q_n=20C, Q_c=3.5C, h_p=7km, h_n=5km, h_l=3.2km$

$Q_p=24C, Q_n=-20C, Q_c=3.5C, h_p=7km, h_n=5km, h_l=3.2km$

三极

地面处场强分布

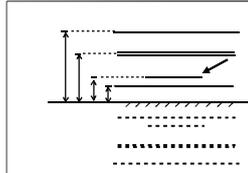
资料图:

地面大气电场强度(kV/m) vs 时间(h:min)

圆柱形电荷堆分布

上部正电荷堆
负电荷堆
下部小型正电荷堆

圆柱形电荷堆分布



```

In[207]:= Print["ρ₁=0.01nC, h₁=3.3km, a=3km
带电荷盘"]
Plot[
  2 * 0.01 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[3300^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, 3000}, {θ, 0, Pi/2}] & #R, {R, 0, 10000}]

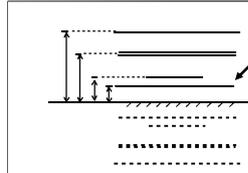
```

ρ₁=0.01nC, h₁=3.3km, a=3km
带电荷盘 x-m y-V/m

参数:
ρ₁ = 0.01nC/m³,
h₁=3.3km,
a=3km

$$E(\mathbf{x}) = 2 \rho_1 \mathbf{n}_1 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_1} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_1^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta$$

圆柱形电荷堆分布



```

In[208]:= Print["ρ₂=-0.6nC, h₂=1.5km, a=3km
带电荷盘"]
Plot[
  -2 * 0.6 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[1500^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, a / . {a -> 3000}}, {θ, 0, Pi/2}] & #R, {R, 0, 10000}]

```

ρ₂=-0.6nC, h₂=1.5km, a=3km
带电荷盘 x-m y-V/m

参数:
ρ₂ = -0.6nC/m³,
h₂=1.5km,
a=3km

$$E_2(\mathbf{x}) = 2 \rho_2 \mathbf{n}_2 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_2} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta$$

```

In[209]:= Plot[
  2 * 0.01 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[3300^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, 3000}, {θ, 0, Pi/2}] & #R +
  2 * 0.5 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[5500^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, 3000}, {θ, 0, Pi/2}] & #R +
  -2 * 0.6 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[1500^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, 3000}, {θ, 0, Pi/2}] & #R +
  2 * 0.5 * 10^-9
  π * 8.854187817 * 10^-12
  NIntegrate[
    1 / Sqrt[10000^2 + s^2 + #1^2 - 2 #1 Cos[θ]]
    {#1, 0, 3000}, {θ, 0, Pi/2}] & #R, {R, 0, 10000}]

```

参数: ρ₁ = 0.5nC/m³,
ρ₂ = -0.6nC/m³, ρ₃ = 0.5nC/m³,
ρ₄ = 0.01nC/m³, h₁=10km,
h₂=1.5km, h₃=5.5km, h₄=3.3km,
a=3km

$$E(\mathbf{x}) = 2 \rho_1 \mathbf{n}_1 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_1} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_1^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta + 2 \rho_2 \mathbf{n}_2 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_2} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta + 2 \rho_3 \mathbf{n}_3 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_3} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_3^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta + 2 \rho_4 \mathbf{n}_4 / (\pi \epsilon) \int_0^{h_4} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{1}{\sqrt{h_4^2 + s^2 + R^2 - 2sR \cos \theta}} ds d\theta$$

圆盘形电荷堆分布

代入参数: ρ₁ = 0.5nC/m³,
ρ₂ = -0.6nC/m³, ρ₃ = 0.5nC/m³,
ρ₄ = 0.01nC/m³, h₁=10km,
h₂=1.5km, h₃=5.5km, h₄=3.3km,
a=3km

对比三板模型:

通常雷暴可在地面产生10kV/m量级的电场，而在树等接地的自然尖端上的电场将比环境电场大上百倍。当环境地面电场超过一定的阈值（此阈值为1~10kV/m量级），空气将被击穿，形成闪电。

引用:
《雷电与人工引雷》 (王道洪, 上海交通大学出版社, 2000)
《雷电放电数值模拟与主动防护》 (魏光辉, 万浩江, 潘晓东)
《大气科学概论》 (黄荣辉 气象出版社 P25)
《雷电学原理》 (陈渭民 气象出版社 P75)

参考:
《大气电学基础》 (孙景群, 气象出版社, 1987)
《云物理学》 (B. J. 梅森, 科学出版社, 1978)
《雷电与人工引雷》 (王道洪, 上海交通大学出版社, 2000)
《大气物理学》 (盛裴轩, 北京大学出版社, 2003)
《雷电放电数值模拟与主动防护》 (魏光辉, 万浩江, 潘晓东)
《大气科学概论》 (黄荣辉 气象出版社 P25)
《雷电学原理》 (陈渭民 气象出版社 P75)
Atmospheric Electricity J. Alan. Chalmers
Thunderstorm Electricity D.J. Malan and B.F.J. Schonland

谢谢