

# 第1章 均匀传输线理论

1.1 均匀传输线方程及其解

1.2 传输线阻抗与状态参量

1.3 无耗传输线的状态分析

1.4 传输线的传输功率、效率与损耗

1.5 阻抗匹配

1.6 史密斯原图及其应用

1.7 同轴线的特性阻抗

## 主要内容:

1. 匹配的概念—— (1) 共轭匹配 (2) 无反射匹配
2. 无反射匹配的方法: (1)  $1/4$ 波长阻抗变换器,  
(2) 单枝节匹配

## 基本要求:

掌握 $1/4$ 波长阻抗变换器和单枝节的匹配原理与方法

# 1. 阻抗匹配的概念

- ◆ 匹配一词在电路中——共轭匹配。
- ◆ 匹配一词在低频电路中——设计放大器系统，增益、频带和灵敏度要求，设计输入、输出匹配网络。
- ◆ 微波和天线系统，不管是有源还是无源电路，都必须考虑其阻抗匹配问题。
- ◆ 主要是微波电路传输是电磁波，不匹配，就有反射。
- ◆ 对于微波传输系统，为了提高长线的传输效率及功率容量、保持信号源工作稳定，希望信号源给出最大功率，负载能够吸收全部入射波功率。
- ◆ 前者要求信号源内阻与长线输入阻抗实现共轭匹配，后者要求负载与长线实现无反射匹配。



# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

◆有人说，微波工程就是**微波匹配技术**，这话虽然显得过于偏颇，但其中仍透露出匹配之重要性：匹配可以使系统调到最佳状态，匹配可以使负载获得最大的功率。

## 一、传输线的三种匹配状态(无反射匹配、共轭阻抗匹配)

### ◆无反射匹配

#### ➤ 1、负载阻抗匹配（无反射匹配）

⊕负载阻抗匹配是负载阻抗等于传输线的特性阻抗的情形

#### ➤ 2、源阻抗匹配（无反射匹配）

⊕电源的内阻等于传输线的特性阻抗时，电源和传输线是匹配的，这种电源称之为**匹配源**。

### ◆共轭阻抗匹配

⊕对于不匹配电源，当负载阻抗折合到电源参考面上的输入阻抗为电源内阻抗的共轭值时，负载能得到最大功率值。通常将这种匹配称为**共轭匹配**。

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 一、传输线的三种匹配状态(负载阻抗匹配、源阻抗匹配、共轭阻抗匹配)

### ◆3、共轭阻抗匹配

⊕①由图1-11(a)，始端输入阻抗 $Z_{in}$ 为

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_l + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_l \tan \beta l} = R_{in} + jX_{in} \quad (1-5-1)$$

⊕②由图1-11(b)可知，负载得到的功率为

$$P = \frac{1}{2} \frac{E_g E_g^*}{(Z_g + Z_{in})(Z_g + Z_{in})^*} R_{in}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{|E_g|^2 R_{in}}{(R_g + R_{in})^2 + (X_g + X_{in})^2}$$

(1-5-2)

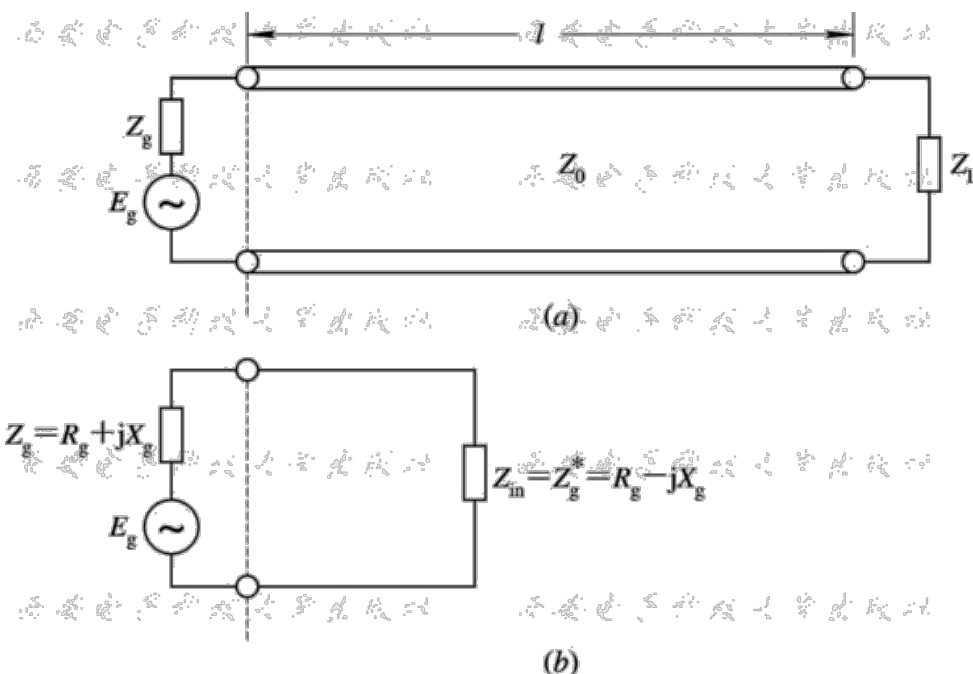


图1-11 无耗传输线信源的共扼匹配

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 一、传输线的三种匹配状态(负载阻抗匹配、源阻抗匹配、共轭阻抗匹配)

### ◆3、共轭阻抗匹配

⊕③要使负载得到的功率最大, 首先要求

$$X_{in} = -X_g \quad (1-5-3)$$

⊕④此时负载得到的功率为

$$P = \frac{1}{2} \frac{|E_g|^2 R_{in}}{(R_g + R_{in})^2} \quad (1-5-4)$$

⊕⑤要使P取最大值, 此时应满足  $\frac{dP}{dR_{in}} = 0$

$$\text{即 } R_g = R_{in} \quad (1-5-5)$$

⊕⑥综合式(1-5-3)和(1-5-5)得  $Z_{in} = Z_g^* \quad (1-5-6)$

⊕⑦此时, 负载得到的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{|E_g|^2}{8R_g} \quad (1-5-7)$$

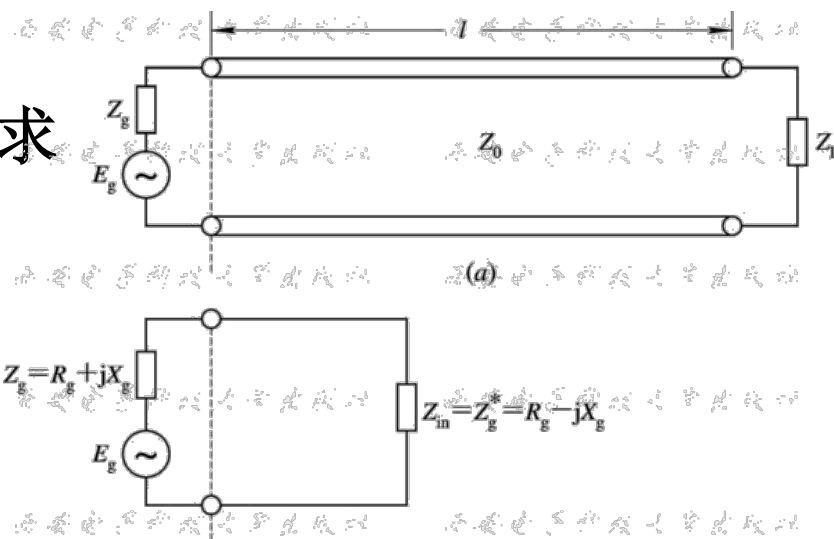


图1-11 无耗传输线信源的共轭匹配

## (2) 无反射匹配

◆ 条件  $Z_l = R_l = Z_0$

◆ 共轭匹配和无反射匹配要求的条件不同，不一定能同时实现。

◆ 行波工作状态时，负载吸收的功率不一定最大。

◆ 而负载吸收最大功率时，传输线上可能传输的是行驻波。

◆ 共轭匹配和无反射匹配同时实现条件

$$Z_l = R_l = Z_0 \quad Z_g = R_g = Z_0 \quad P_{\max} = \frac{|E_g|^2}{8Z_0}$$

$$Z_l = R_l = Z_0 \quad Z_g = R_g = Z_0 \quad P_{\max} = \frac{|E_g|^2}{8Z_0}$$

- ◆ 为满足两种匹配要求，使传输线上传输行波，负载又从源端得到最大功率，就必须对源和负载进行匹配。
- ◆ 源端的匹配用一单向器件就可实现，传输线的匹配主要是指负载端的无反射匹配。
- ◆ 匹配的实质是引入一新的反射，来抵消原来不匹配负载引起的反射。



# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

◆ 阻抗匹配方法从实现手段上划分为**串联  $\lambda/4$  阻抗变换器法**、**支节调配器法**。下面就来分别讨论两种阻抗匹配方法。

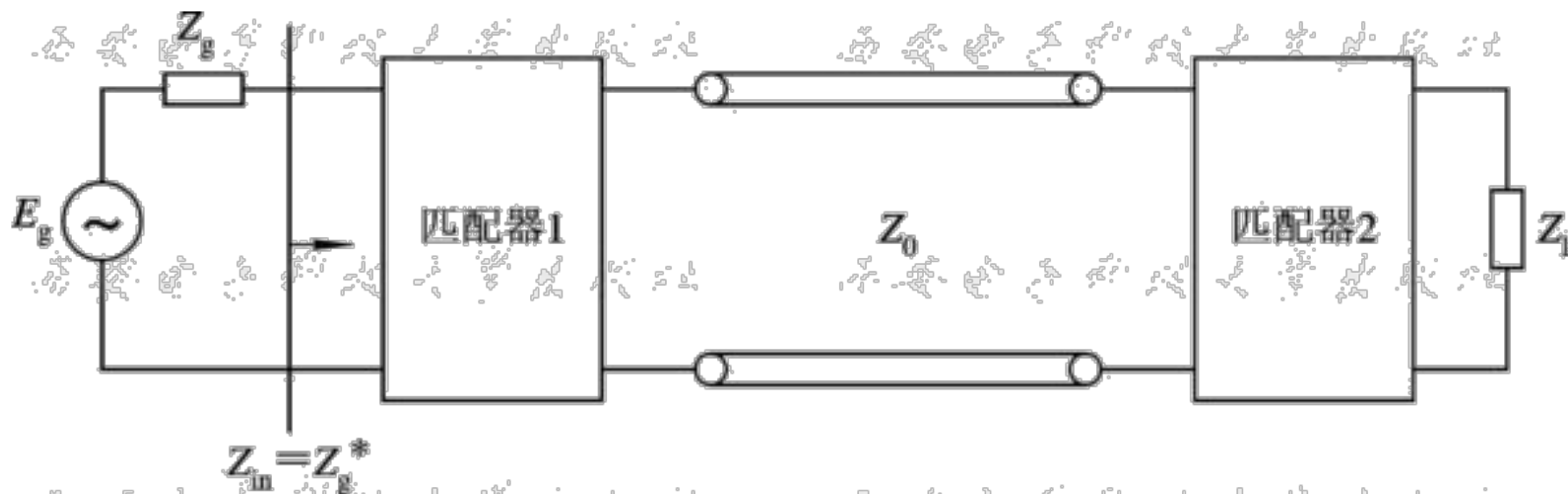


图1-12 传输线阻抗匹配方法示意图

## 二、阻抗匹配的方法

### 1、 $\lambda/4$ 阻抗变换器法

#### ◆(1)电阻性负载匹配

⊕①电阻性负载指的是  $Z_L = R_L \neq Z_0$ ,

最常见的是采用特性阻抗为  $Z_{01}$  的  $\lambda/4$  传输线段匹配。

⊕②由无耗传输线输入阻抗公式得

$$Z_{in} = Z_{01} \frac{R_L + jZ_{01}\tan(\beta\lambda/4)}{Z_{01} + jR_L\tan(\beta\lambda/4)} = \frac{Z_{01}^2}{R_L} \quad (1-5-8)$$

⊕③为了实现了负载和传输线间的阻抗匹配, 要求  $Z_{in} = Z_0$

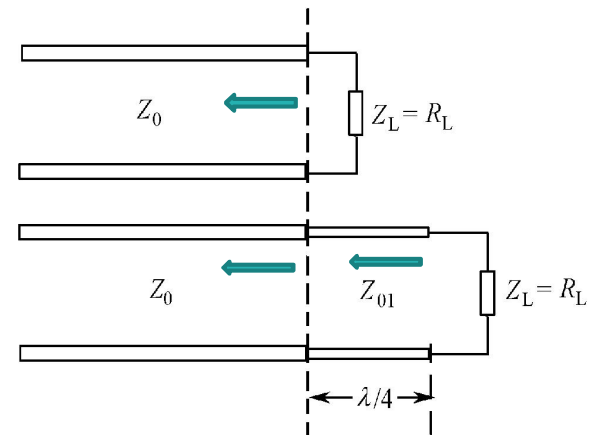
⊕④所以匹配段的特性阻抗

$$Z_{01} = \sqrt{R_L Z_0}$$

$$R_L = \rho Z_0 \quad Z_{01} = \sqrt{\rho} Z_0$$

$$R_L = Z_0 / \rho \quad Z_{01} = Z_0 / \sqrt{\rho} = \sqrt{K} Z_0$$

⊕⑤注意: 只有匹配区才无反射波。



(a)  $Z_L$  为纯电阻

## 二、阻抗匹配的方法

### 1、 $\lambda/4$ 阻抗变换器法

#### ◆(2)电抗性负载匹配

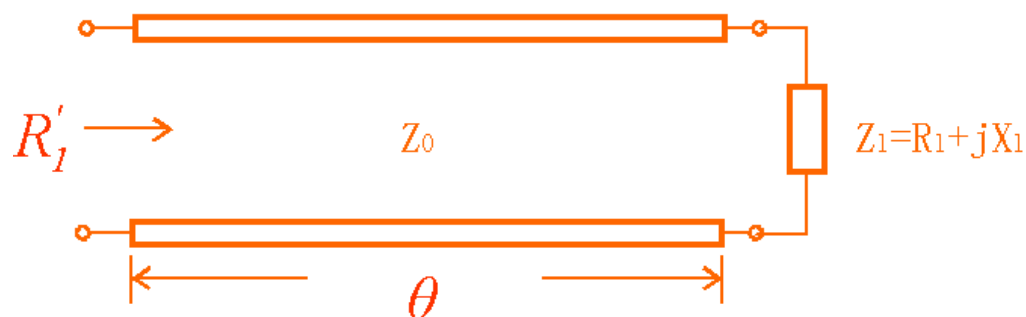


图1-14 电抗性负载向电阻性负载转换段

将 $Z_l$ 等效到波节(或波腹)处, 在该点接入 $\lambda/4$ 阻抗变换器。

➤  $Z_l \rightarrow Z_0 / \rho$  (波节)  $Z_{01} = Z_0 / \sqrt{\rho} = \sqrt{K} Z_0$

➤  $Z_l \rightarrow \rho Z_0$  (波腹)  $Z_{01} = \sqrt{\rho} Z_0$

➤  $l_{\min 1}$ 、 $l_{\max 1}$ 用公式求  $\Gamma_1 = |\Gamma_1| e^{j\varphi_l}$

$$z_{\max 1} = \frac{\varphi_l}{4\pi} \lambda \quad 0 < \varphi_l < \pi \quad z_{\max 1} = \frac{\varphi_l}{4\pi} \lambda + \frac{\lambda}{2} \quad -\pi < \varphi_l < 0$$

$$z_{\min 1} = \frac{\varphi_l}{4\pi} \lambda + \frac{2n+1}{4} \lambda = z_{\max 1} + \frac{\lambda}{4}$$

◆**注意:** 由于 $\lambda/4$ 阻抗变换器的长度取决于波长, 严格说只能在中心频率点才能匹配, 当频偏时匹配特性变差, 该匹配法是窄带的。

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

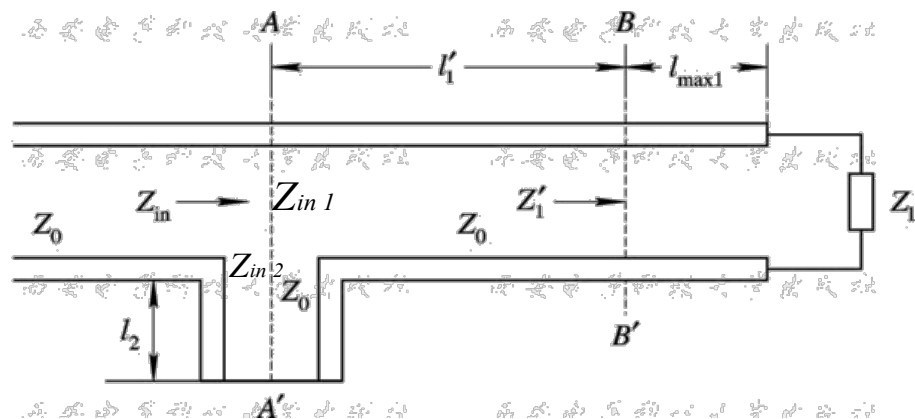


图1-15 串联单支节调配器

枝节调配器是由距离负载的某固定位置上的**并联或串联终端短路或开路的传输线**(又称枝节)构成的。

- ◆ 匹配的原理是利用可移动分支线产生一新的反射，抵消原来不匹配负载引起的反射。
- ◆ 分支线由装有可移动短路活塞的短载线构成，作为可调元件使用。
- ◆ 调节分支线离终端的距离 $d$ 和支节长度 $l$ 即可实现无反射匹配，使分支线左边的长线工作在行波状态
- ◆ 分析枝节匹配的方法均采用**倒推法**——由结果推向原因。

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

◆枝节调配器是由距离负载的某固定位置上的**并联或串联终端短路或开路的传输线**(又称枝节)构成的。

◆分析枝节匹配的方法均采用**倒推法**——由结果推向原因。

#### ◆(1)串联单枝节调配器

⊕结果要求:  $Z_{in} = Z_0 + j0$

⊕串联关系有:

$$Z_{in} = Z_{in1} + Z_{in2}$$

$$\begin{cases} Z_{in1} = Z_0 + jX \\ Z_{in2} = -jX \end{cases}$$

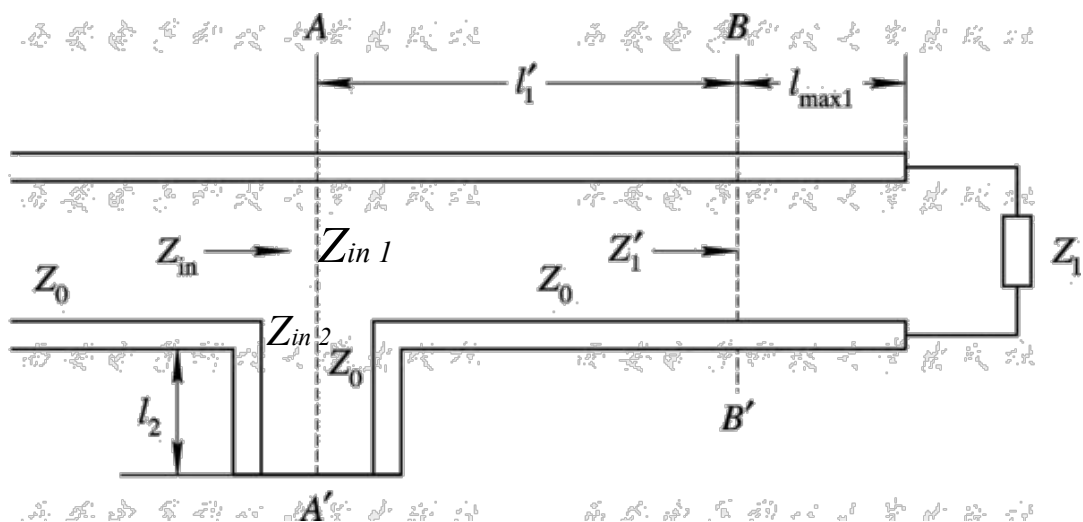


图1-15 串联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器

⊕①参考面**AA'**处输入阻抗为 $Z_{in1}$ ，则有

$$Z_{in1} = Z_0 \frac{Z_l + jZ_0 \tan(\beta l_1)}{Z_0 + jZ_l \tan(\beta l_1)} = R_1 + jX_1 \quad (1-5-10)$$

⊕②终端短路的串联支节输入阻抗为

$$Z_{in2} = jZ_0 \tan(\beta l_2) \quad (1-5-11)$$

⊕③则总的输入阻抗为

$$Z_{in} = Z_{in1} + Z_{in2}$$

$$= R_1 + jX_1 + jZ_0 \tan(\beta l_2) \quad (1-5-12)$$

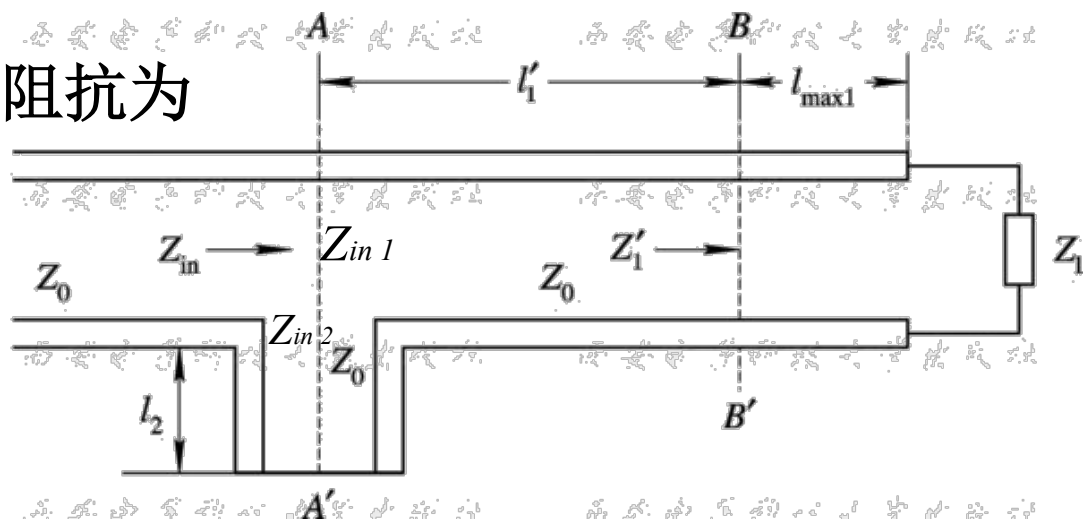


图1-15 串联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配 (Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器

⊕④要使其与传输线特性阻抗匹配, 应有

$$R_1 = Z_0$$

$$X_1 + Z_0 \tan(\beta l_2) = 0$$

(1-5-13)

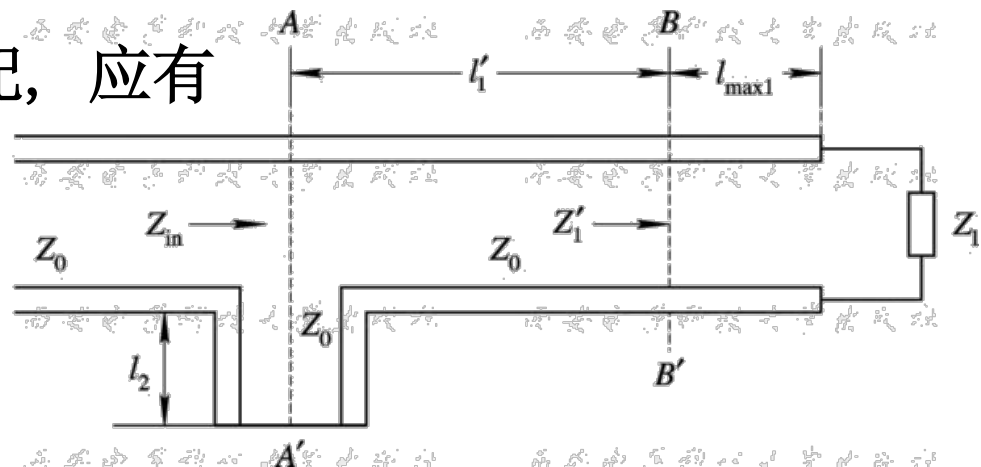


图1-15 串联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配 (Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器

⊕⑤经推导可得其中一组解

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{1}{\sqrt{\rho}} + \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_1 \\ l_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{\rho - 1}{\sqrt{\rho}} \end{cases} \quad (1-5-14b)$$

⊕⑥另一组解为

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \left( -\frac{1}{\sqrt{\rho}} \right) + \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_1 \\ l_2 = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \left( \frac{\sqrt{\rho}}{\rho - 1} \right) \end{cases} \quad (1-5-14c)$$

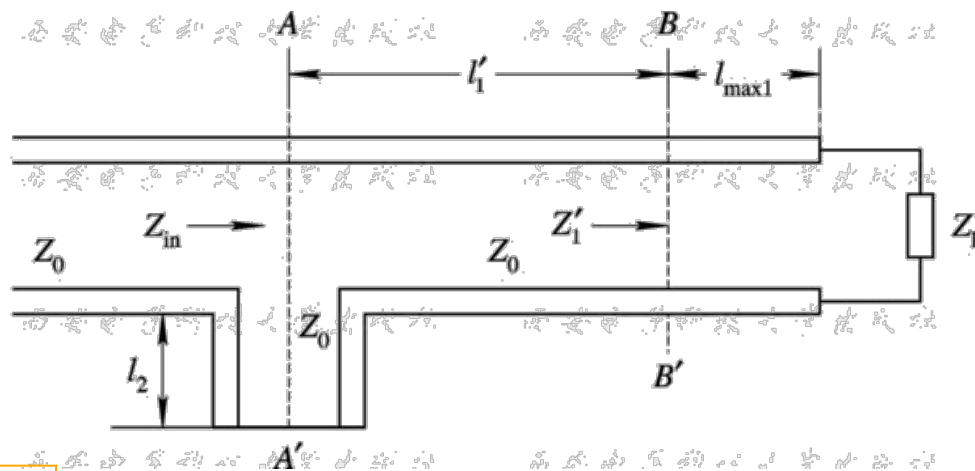


图1-15 串联单支节调配器

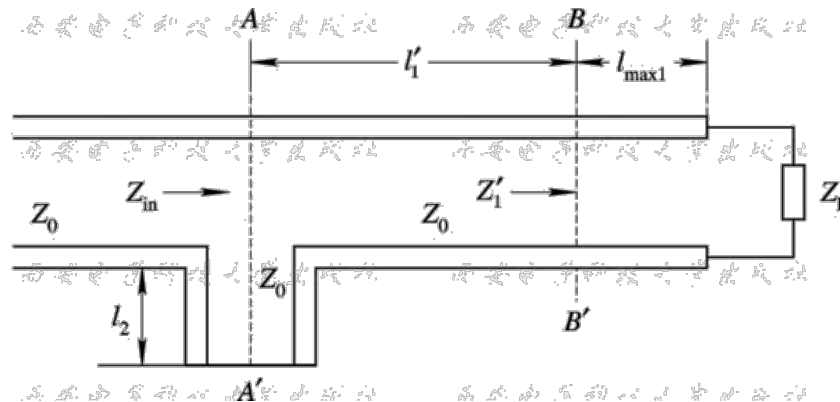


# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器



[例 1-5] 设无耗传输线的特性阻抗为 **$50\Omega$** , 工作频率为 **$300\text{MHz}$** , 终端接有负载 **$Z_1=25+j75(\Omega)$** , 试求串联短路匹配支节离负载的距离 **$l_1$** 及短路支节的长度 **$l_2$** 。

解:

•①由工作频率 **$f=300\text{MHz}$** , 得工作波长 **$\lambda=1\text{m}$**

•②终端反射系数

$$\Gamma_1 = |\Gamma_1| e^{j\phi_1} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = 0.333 + j0.667 = 0.7454 e^{j1.1071}$$

•③驻波系数

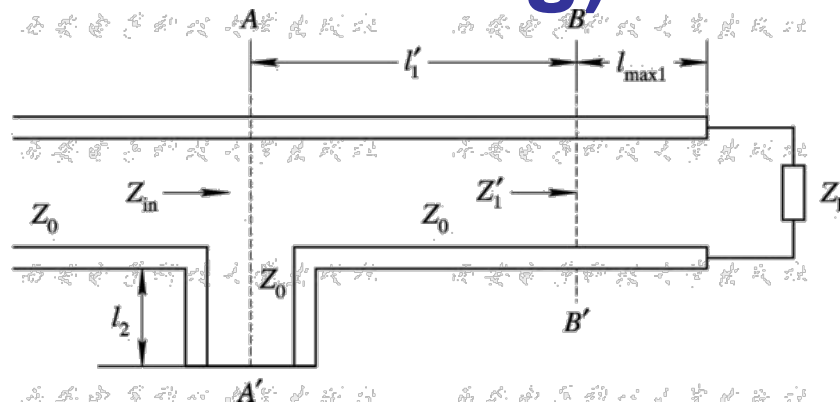
$$\rho = \frac{1 + |\Gamma_1|}{1 - |\Gamma_1|} = 6.8541$$

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器



[例 1-5] 设无耗传输线的特性阻抗为 $50\Omega$ , 工作频率为 $300\text{MHz}$ , 终端接有负载 $Z_L=25+j75(\Omega)$ , 试求串联短路匹配支节离负载的距离 $l_1$ 及短路支节的长度 $l_2$ 。

解:

•④第一波腹点位置  $l_{\max 1} = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_1 = 0.0881\text{m}$

•⑤调配支节位置  $l_1 = l_{\max 1} + \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{1}{\sqrt{\rho}} = 0.1462\text{m}$

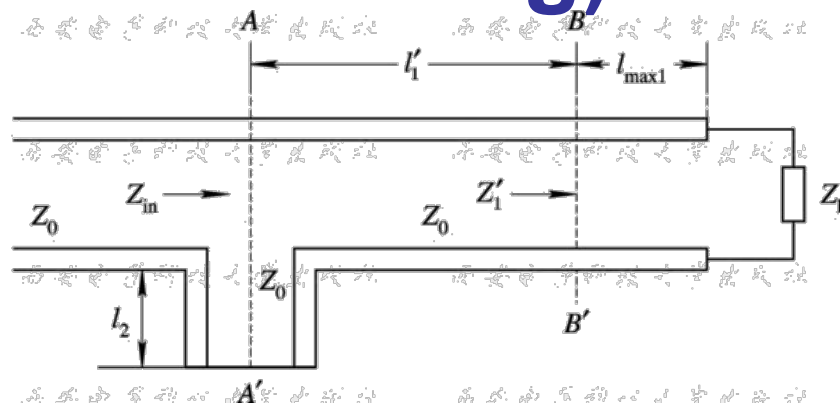
•⑥调配支节的长度  $l_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{\rho - 1}{\sqrt{\rho}} = 0.1831\text{m}$

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(1)串联单枝节调配器



[例 1-5] 设无耗传输线的特性阻抗为 **$50\ \Omega$** , 工作频率为 **$300\text{MHz}$** , 终端接有负载 **$Z_L=25+j75(\Omega)$** , 试求串联短路匹配支节离负载的距离 **$l_1$** 及短路支节的长度 **$l_2$** 。

解:

•⑦另一组解 
$$l_1 = l_{max1} + \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{1}{\sqrt{\rho}} = 0.03\text{ m}$$

$$l_2 = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\rho}}{\rho - 1} = 0.317\text{ m}$$

# 1.5 阻抗匹配 (Impedance Matching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(2)并联单枝节调配器

⊕结果要求:  $Y_{in} = Y_0 + j0$

⊕并联关系有:  $Y_{in} = Y_{in1} + Y_{in2}$

$$\begin{cases} Y_{in1} = Y_0 + jB \\ Y_{in2} = -jB \end{cases}$$

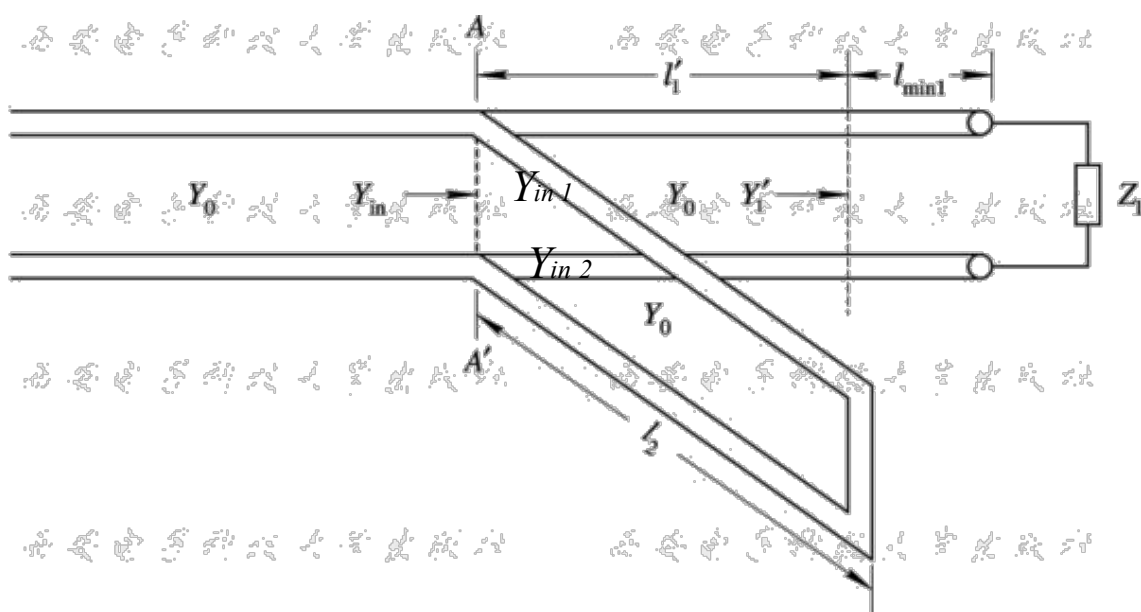


图1-15 并联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配 (Impedance Matching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(2)并联单枝节调配器

⊕①设参考面**AA'**处输入阻抗为  
 $Y_{in1}$ ，则有

$$Y_{in1} = Y_0 \frac{Y_l + jY_0 \tan(\beta l_1)}{Y_0 + jY_l \tan(\beta l_1)} = G_1 + jB_1$$

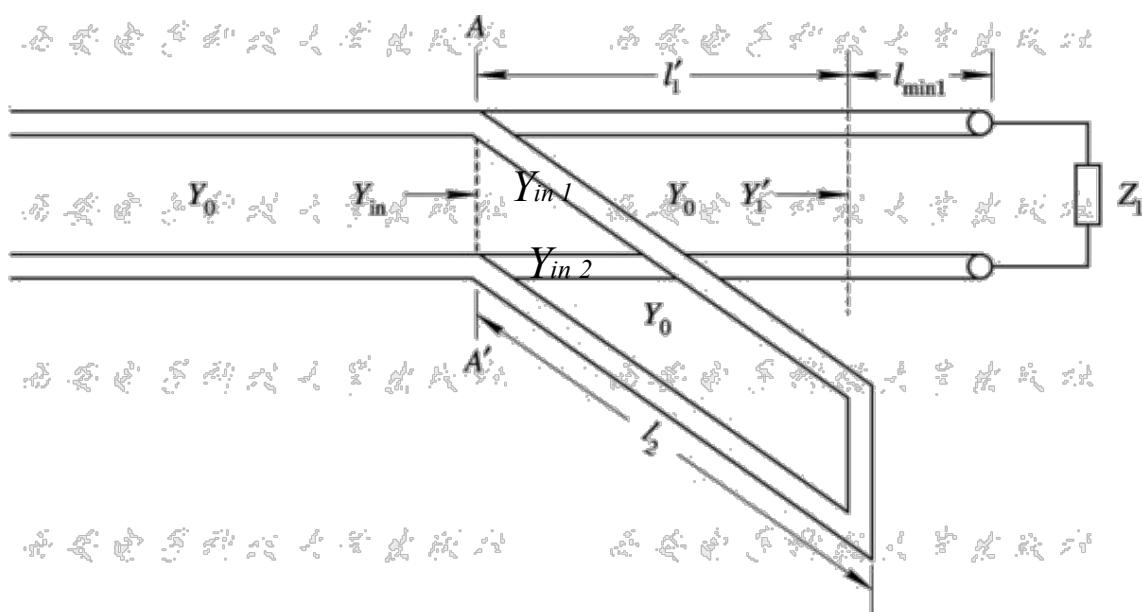


图1-15 并联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(2)并联单枝节调配器

⊕②终端短路的并联支节输入导纳为

$$Y_{in2} = -\frac{jY_0}{\tan(\beta l_2)} \quad (1-5-18)$$

⊕③则总的输入导纳为

$$Y_{in} = Y_{in1} + Y_{in2} = G_1 + jB_1 - \frac{jY_0}{\tan(\beta l_2)} \quad (1-5-19)$$

⊕④要使其与传输线特性导纳匹配, 应有

$$\begin{cases} G_1 = Y_0 \\ B_1 \tan(\beta l_2) - Y_0 = 0 \end{cases} \quad (1-5-20)$$

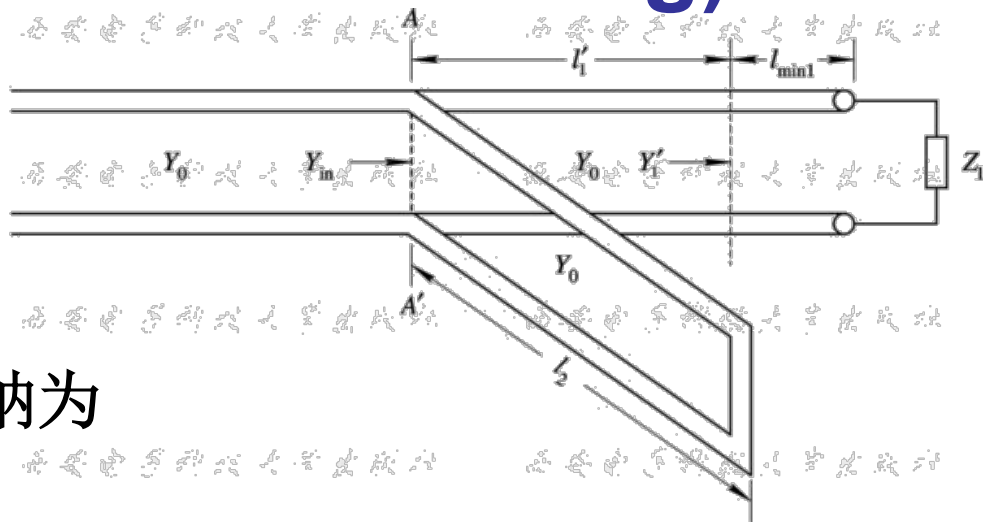


图1-15 并联单支节调配器

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

### 2、枝节调配器法

#### ◆(2)并联单枝节调配器

⊕⑤由此可得其中一组解为

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{1}{\sqrt{\rho}} + \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_l \pm \frac{\lambda}{4} \\ l_2 = \frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \end{cases} \quad (1-5-21b)$$

⊕⑥另一组解为

$$\begin{cases} l_1 = -\frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{1}{\sqrt{\rho}} + \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_l \pm \frac{\lambda}{4} \\ l_2 = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2\pi} \arctan \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \end{cases} \quad (1-5-21c)$$

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

◆**例题：**一均匀无耗传输线的特性阻抗为 $Z_0=500\ \Omega$ ，负载阻抗 $Z_L=200-j250\ \Omega$ ，通过 $\lambda/4$ 阻抗变换段及并联枝节线实现，如题图所示。已知工作频率 $f=300\text{MHz}$ ，求 $\lambda/4$ 阻抗变换器的特性阻抗 $Z_{01}$ 及并联短路枝节线的最短长度 $l_{min}$ 。

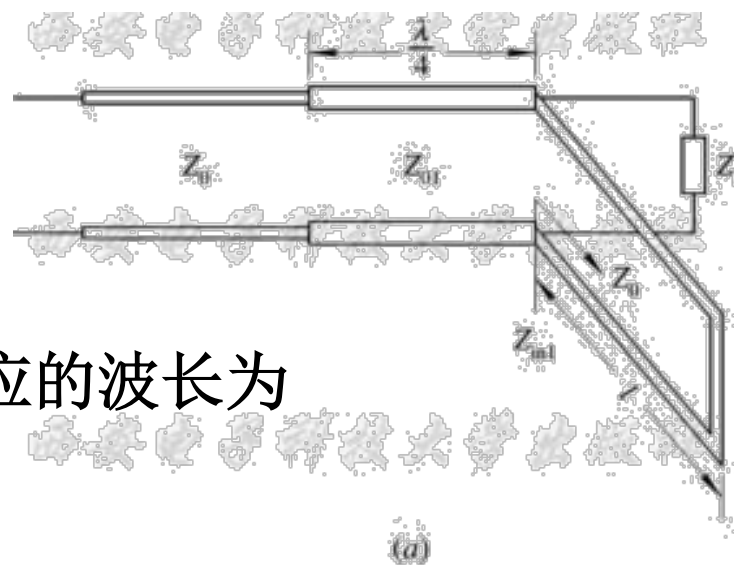
◆**解：**由于 $\lambda/4$ 阻抗变换段只能对纯电阻负载实现匹配，而现负载为电容性负载，所以并联短路支线的作用就是将电容性负载变换为电阻性负载。

⊕①为了分析方便，将负载用导纳来表示

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} = -\frac{j}{200-j250} = \frac{2}{1025} + j\frac{1}{410}$$

⊕②传输线的工作频率 $f=300\text{MHz}$ ，其对应的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{300 \times 10^6} = 1\text{m}$$



例题图



# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

◆**例题：**一均匀无耗传输线的特性阻抗为 $Z_0=500\ \Omega$ ，负载阻抗 $Z_L=200-j250\ \Omega$ ，通过 $\lambda/4$ 阻抗变换段及并联枝节线实现，如题图所示。已知工作频率 $f=300\text{MHz}$ ，求 $\lambda/4$ 阻抗变换器的特性阻抗 $Z_{01}$ 及并联短路枝节线的最短长度 $l_{min}$ 。

◆解：

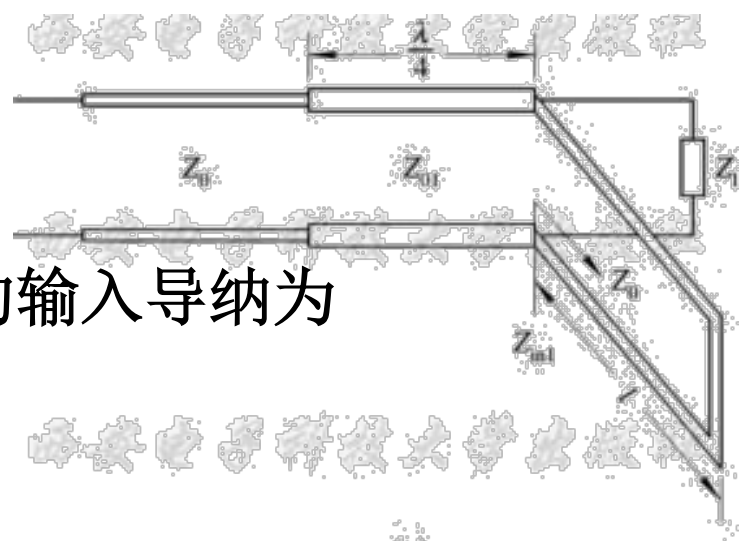
⊕③相移常数为 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi$

⊕④长度为 $l_{min}$ 的并联短路支线在ab端口的输入导纳为

$$Y_{in} = -\frac{jY_0}{\tan(\beta l_{min})} = -jY_0 \cot(\beta l_{min})$$

⊕⑤由 $Y_{in} + Y_L = 0$ ，得并联短路枝节线的最短程度为

$$l_{min} = \frac{1}{2\pi} \arctan \left[ \frac{1}{Z_0 \cdot \text{Im}(Y_L)} \right] = \frac{1}{2\pi} \arctan \left( \frac{41}{50} \right) \approx 0.11\text{m}$$



例题图

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

◆**例题：**一均匀无耗传输线的特性阻抗为 $Z_0=500\ \Omega$ ，负载阻抗 $Z_L=200-j250\ \Omega$ ，通过 $\lambda/4$ 阻抗变换段及并联枝节线实现，如题图所示。已知工作频率 $f=300\text{MHz}$ ，求 $\lambda/4$ 阻抗变换段的特性阻抗 $Z_{01}$ 及并联短路枝节线的最短长度 $l_{min}$ 。

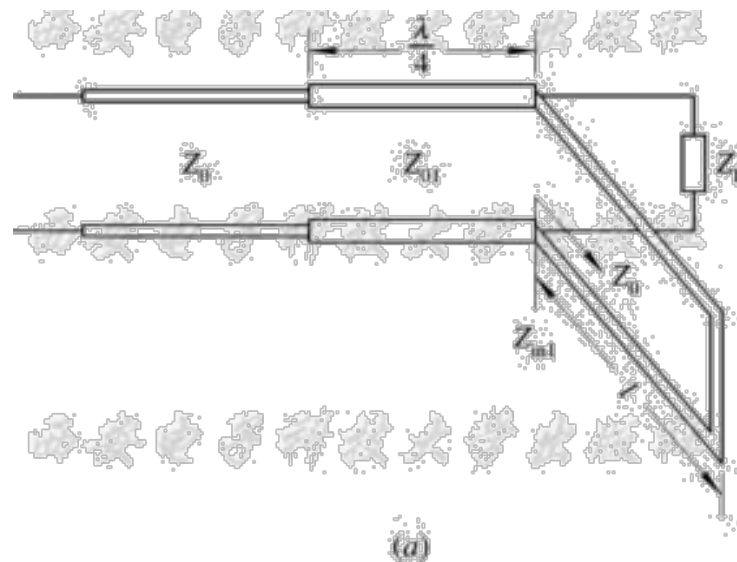
◆解：

⊕⑥此时端口**ab**处的等效电阻

$$R' = \frac{1}{\text{Re}(Y_L)} = 512.5\ \Omega$$

⊕⑦根据传输线的 $\lambda/4$ 阻抗变换性，得 $\lambda/4$ 阻抗变换段的特性阻抗

$$Z_{01} = \sqrt{500 \times 512.5} = 506.2\ \Omega$$

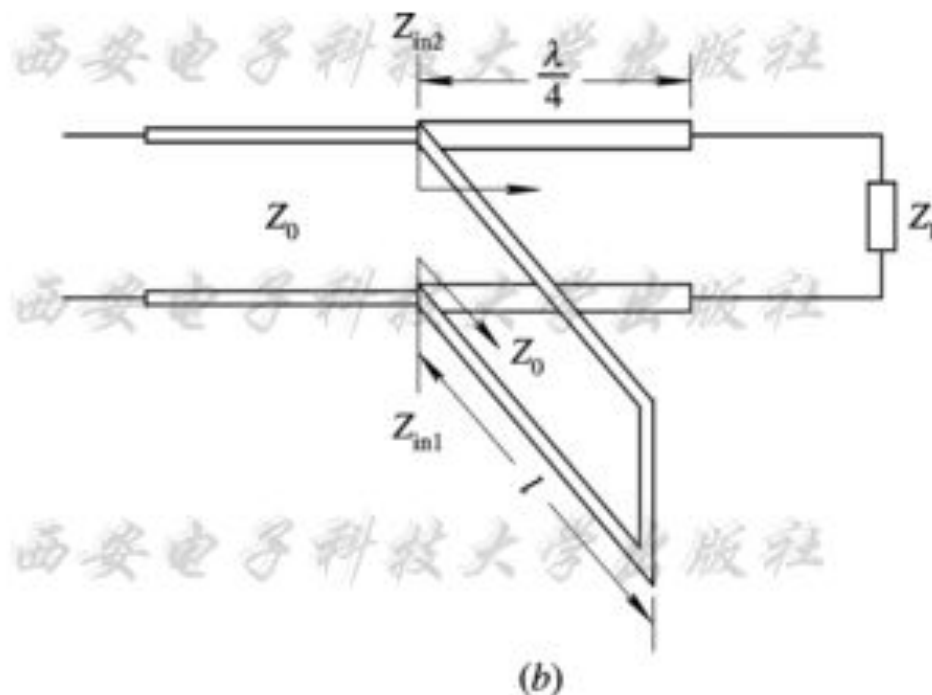


例题图

# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

## 二、阻抗匹配的方法

◆ **例题：**一均匀无耗传输线的特性阻抗为 $Z_0=500\ \Omega$ ，负载阻抗 $Z_L=200-j250\ \Omega$ ，通过 $\lambda/4$ 阻抗变换段及并联枝节线实现，如题图所示。已知工作频率 $f=300\text{MHz}$ ，求 $\lambda/4$ 阻抗变换段的特性阻抗 $Z_{01}$ 及并联短路枝节线的最短长度 $l_{min}$ 。



# 1.5 阻抗匹配(Impedance Mathching)

作业： 1.11