

赛区评阅编号（由赛区组委会填写）：

---

## 2018 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛

### 承 诺 书

我们仔细阅读了《全国大学生数学建模竞赛章程》和《全国大学生数学建模竞赛参赛规则》（以下简称为“竞赛章程和参赛规则”，可从全国大学生数学建模竞赛网站下载）。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上 QQ 群、微信群等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛章程和参赛规则的，如果引用别人的成果或资料（包括网上资料），必须按照规定的参考文献的表述方式列出，并在正文引用处予以标注。在网上交流和下载他人的论文是严重违规违纪行为。

我们以中国大学生名誉和诚信郑重承诺，严格遵守竞赛章程和参赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛章程和参赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们授权全国大学生数学建模竞赛组委会，可将我们的论文以任何形式进行公开展示（包括进行网上公示，在书籍、期刊和其他媒体进行正式或非正式发表等）。

我们参赛选择的题号（从 A/B/C/D 中选择一项填写）：\_\_\_\_\_B\_\_\_\_\_

我们的报名参赛队号（12 位数字全国统一编号）：\_\_\_\_\_2690\_\_\_\_\_

参赛学校（完整的学校全称，不含院系名）：\_\_\_\_\_四川大学\_\_\_\_\_

参赛队员（打印并签名）：1. \_\_\_\_\_夏瑞\_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_卢春海\_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_何嘉岳\_\_\_\_\_

指导教师或指导教师组负责人（打印并签名）：\_\_\_\_\_

（指导教师签名意味着对参赛队的行为和论文的真实性负责）

日期：\_\_\_\_\_2019\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_5\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_4\_\_\_\_\_日

（请勿改动此页内容和格式。此承诺书打印签名后作为纸质论文的封面，注意电子版论文中不得出现此页。以上内容请仔细核对，如填写错误，论文可能被取消评奖资格。）

赛区评阅编号（由赛区组委会填写）：

---

2018 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛

编 号 专 用 页

赛区评阅记录（可供赛区评阅时使用）：

评 阅 人						
备 注						

送全国评阅统一编号（赛区组委会填写）：

全国评阅随机编号（全国组委会填写）：

（请勿改动此页内容和格式。此编号专用页仅供赛区和全国评阅使用，参赛队打印后装订到纸质论文的第二页上。注意电子版论文中不得出现此页。）

# 基于相控阵各通道实测数据的天线方向图综合设计

## 摘 要

相控阵天线具有大空域内的波束扫描、可控波束方向、较大增益等优势，现已成为微波发射机研究的焦点。部署相控天线于微波接入中，能精准地控制基站发出微波的方向，建立接收机与发射机的最佳路径，确保最优通信质量。

基于任务要求，对天线方向图进行设计，从大类上归属于阵列天线综合。阵列天线综合包括五个参数的设计：阵列单元数目、阵元分布形式、阵元间距、各阵元激励幅度和相位。本文主要关心阵元的相位问题。

在问题 1 中，本文依据相控天线阵列和所给数据的对称性，先将 4 号与 20 号单元的数据补全，并根据麦克斯韦方程组，得到天线远区场的电场分布规律以及线极化相控天线阵各阵元在远区场的叠加方法。此后，为使得设计满足多指标的要求，本文建立静态方向图评估模型，并建立目标函数，将问题 1 转化为带约束的多参数整数规划问题，利用人工蜂群算法（ABC）进行优化，得到相应的移相器配置。

对问题 2，依据实测数据的离散标准，本文对目标覆盖区域进行网格划分，从而将该连续问题离散化，降低了解决难度。基于问题 1 的思路，以目标区域内的各个方位为波束指向（即最大功率方向），可以得到相应的波束，这些波束就构成了问题 2 的波束选择区间。之后，按题目要求构造约束条件，以“覆盖波束尽可能少”与“覆盖效果尽可能更好”为二维优化指标，建立动态方向图评估模型，从而导出目标函数，仍利用人工蜂群算法（ABC）求解，得到优化的波束配置方案。

此外，本文浅析了模型的优点，并对不足之处作了梳理，并尝试基于相控天线的物理原理，考虑天线阵元间互耦效应的影响，以偶极子等距直线相控阵为对象建立数学模型，最终把建模成果展示在模型推广部分。

**关键词：**相控阵 相位配置 波束配置 微波接入 方向图 互耦效应

## 一 问题提出

### 1.1 题目背景与研究意义

通信网络可以大致划分为四个层次：接入网、汇聚网、核心网和骨干网。其中，接入网起到连接终端用户与网络的任务，接入方案的选择决定了用户对通信技术的直接体验。

接入网主要有固网接入和移动接入两种实现方式，其中固网接入主要用于家庭宽带等无便携性要求的接入场景。固网接入根据传输介质又分为实体线路和非实体线路两种。微波接入就是非实体线路的固网接入实现方式。

采用微波接入方案，微波天线设计将成为关键问题。鉴于相控阵的种种优势，微波天线一般选用相控阵天线。而利用相控天线的波束扫描，覆盖特定角度的区域，在覆盖区域内有下面两个要求：

- ① 天线的辐射功率尽可能均匀，避免波束与波束之间存在缝隙（即“凹坑”）；
- ② 线波束数量尽可能少，从而缩短扫描时间，节约实现成本。

本问题主要利用已测 32 单元相控天线的各通道的辐射场幅相数据，对整个相控阵的辐射场进行研究并建立模型，进而结合设计目标决定天线阵列的波束配置。

### 1.2 问题重述

现有一个 32 单元相控阵，每个单元的移相器配置有 4 种方式（ $0^\circ$ - $90^\circ$ - $180^\circ$ - $270^\circ$ ）。采用仪器测量得到，每个单元每种相位配置下其辐射场的空间分布（数据见附件）。注意：使用数据时需要考虑数据中存在的测量误差，如移相器配置为  $90^\circ$  和  $180^\circ$  时，对应相位差为  $(90 \pm \text{err})^\circ$ ，其中  $\text{err}$  为测量误差。

#### 问题 1：

以方位（水平角  $AZ=10^\circ$ ，俯仰角  $EL=5^\circ$ ）为波束方向，允许关闭某些通道，求解满足以下要求的最优波束配置（移相器配置矢量  $z=[\Delta_1, \dots, \Delta_N]$ ）。

- ① 合成功率为 35dBm；
- ② 旁瓣电平尽可能低；
- ③ 避免对方位（ $AZ=10^\circ$ ， $EL=10^\circ$ ）处站点的干扰。

#### 问题 2：

以水平角  $\pm 30^\circ$ ，俯仰角  $\pm 15^\circ$  的区域为覆盖目标区域，求解满足以下条件的最优波束配置列表（移相器配置矢量列表  $[z_1, z_2, \dots, z_M]$ ）。

- ① 整个覆盖区域内，平均辐射功率 35dBm；
- ② 覆盖区域的“凹坑”尽可能小；
- ③ 所用波束个数尽可能少。

## 二 问题分析

此部分，对本文要解决的问题进行建模前的初步分析准备，以求为后文建模部分提供逻辑结构。

### 2.1 问题一的分析

问题 1 要求在指定最大辐射方向与合成功率，并满足指定方向为零点和旁瓣电平尽可能低时，给出各阵元的移相器配置。其中，最大辐射和零点的概念较为明确，合成功率、旁瓣电平的概念则相对模糊。经分析，合成功率即最大辐射方向的合成场功率（EIPR），可以用最大辐射强度的分贝值表征，这也与赛题及附件相统一。同时，本文引入副主瓣比的指标以衡量旁瓣电平的高低。

为便于权衡多种指标，本文考虑建立方向图评估模型，以此构建目标函数，将问题转化为对最值的优化求解。

### 2.2 问题二的分析

问题 2 要求相控天线在不同时刻合成的不同指向的波束，实现特定区域的覆盖。

首先，对目标区域进行方向划分，从而将该连续问题离散化，降低了解决难度。基于问题 1 的思路，以目标区域内部的各个方位为波束指向（即最大功率方向），可以得到相应的波束配置，这些波束就构成了问题 2 的波束选择区间。

其次，针对覆盖区域的平均辐射功率为 35dBm 的要求，即相控阵一个扫描周期内在目标区域的平均辐射功率。而以分贝法表示的功率无法直接做加减运算，解决思路为：由功率和场强换算式  $P(\text{dBm}) = 20 \log_{10} |E| = 10 \log_{10} |E|^2$ ，将功率运算转化为场强运算。具体方法为：将一个周期内所有波束对应的场强模值平方相加，并求其在目标区域内的平均，然后转为分贝表示，即最后要求的平均辐射功率。以上作为目标函数的约束条件。

最后，平衡“覆盖波束尽可能少”与“覆盖效果尽可能更好”的要求，以最小的未覆盖面和最少波数个数为目标，构建目标函数，利用算法求解，就能得到较佳的波束配置方案。

### 三 问题假设

1. 查找资料可知，天线参数测量中，测量对象一般为天线辐射场，故假设题目所给数据为各天线单元的辐射场（远区场）幅相数据。
2. 相控阵的阵元一般为弱方向性天线，因此不妨假设本问题中的阵元为偶极子天线。
3. 结合实际和简化问题的考虑，认为该相控天线的极化方式为线极化。
4. 根据相控阵扫描原理，认为其辐射场具有较强方向性。

模型推广部分：

5. 画出各天线单元辐射场的三维示意图，并观察，发现各天线单元的辐射场具有类似的方向性，集中在水平角度 $\pm 90^\circ$ 之间，因此假设存在天线背板，且该背板垂直于水平面（ $EL = 0^\circ$ 平面），与 $AZ = \pm 90^\circ$ 面重合。
6. 总的来看，发现不同单元的辐射场图像呈两两对称，故假设相控阵为均匀距离直线阵，方向与竖直线夹角。

#### 四 符号说明

符号	单位	符号意义
$I(z)$	A	天线单元上的电流分布
$I_m$	A	天线上电流波腹点的复振幅
$k$	—	相位常数
$z$	—	偶极子天线的坐标
$r$	m	场点距天线距离
$\theta$	°	场点方向与 Z 轴夹角
$E$	V/m	电场强度
$P_t$	W	发射机发射功率
$P_r$	W	天线辐射功率
$G$	—	天线增益
$\eta_A$	—	天线效率
$\eta$	—	介质波阻抗
$E_p$	W	理想电源的辐射功率
$E_{max}$	V/m	最大辐射方向上的场强
$AZ$	°	水平角
$EL$	°	俯仰角
$ph$	—	移相器配置方式
$f_k$	—	通道开关标志
$n$	—	天线单元编号
$S_{target}$	m <sup>2</sup>	覆盖目标区域全面积
$S_{beam}$	m <sup>2</sup>	单个波束的覆盖区域
$S_{over}$	m <sup>2</sup>	波束重叠的总面积
$Num$	—	波束总数

## 五 模型的建立和求解

### 5.1 问题一的建模和求解

#### 5.1.1 模型准备

本文的基本建模思路为：基于已知的 32 单元相控阵的各通道实测数据，建立特定约束条件下的目标函数，利用算法对数据进行筛选分析，从而得到满足题目要求的规划结果。而基于相控天线的物理原理进行建模的内容，本文会在模型推广中加以说明。

由于题目所给的实测数据为每个天线单元的辐射场数据（假设 1），因此，有必要对天线单元（即阵元）的物理特性加以分析，从而深入理解所给数据。

此部分为模型准备，内容主要为天线基本原理，包括线极化、相似元、远区场、合成功率等要点，以便为后面的建模做基础。

本文认为该 32 单元天线阵的阵元是线极化方式的偶极子天线（假设 2、3），作为下面分析的对象。

##### 1. 分析偶极子天线的辐射场（远区场）：

设该偶极子天线一臂的导线半径为  $a$ ，长度为  $l$ 。两臂之间的间隙很小，理论上可以忽略不计；另外，对细振子来说，不必考虑末端效应。

若想分析偶极子天线的辐射特性，必须首先知道它的电流分布。理论已证，偶极子天线上的电流分布接近于正弦函数分布；取图 5.1 中的坐标，其形式如下：

$$I(z) = \begin{cases} I_m \sin k(l - z) & z \geq 0 \\ I_m \sin k(l + z) & z < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $I_m$  为天线上电流波腹点的复振幅； $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$  为相位常数。

确定了偶极子天线的电流分布以后，就可以计算它的辐射场。方法为：将振子分成无限多电流元，振子天线的辐射场就是所有电流元的辐射场之和。为方便分析，以下在球坐标系下作简要分析，并设阵子臂（即偶极子臂）沿  $z$  轴分布，如下图所示：

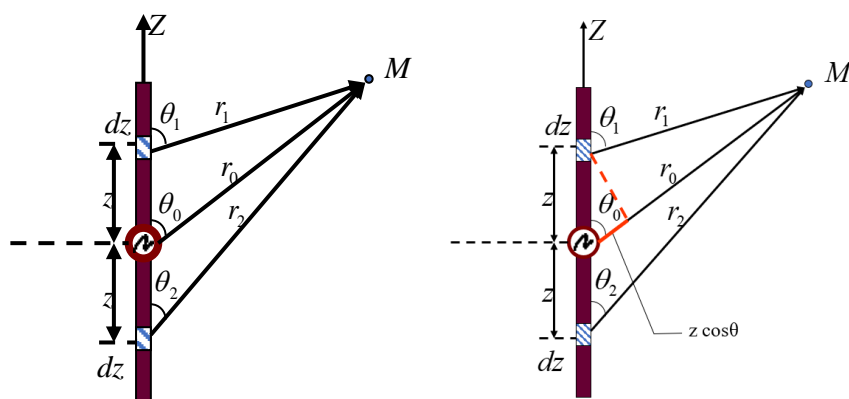


图 5.1 偶极子天线的坐标及辐射场计算

偶极子天线的辐射场与  $\phi$  无关，而观察点（远区场点） $M(r, \theta)$  距离天线足够远，可以认为各电流元在  $M$  点处产生的辐射场矢量方向相同，即  $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta_0 =$



$\theta$ ；同时，可以忽略电流元位置对辐射场大小的影响，但其对辐射场相位的影响却不能忽略。

在天线上取一小段 $dz$ ，认为 $dz$ 上电流分布是均匀的，则 $dz$ 所产生的场为：

$$dE_{\theta} = j \frac{60\pi I(z) dz}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \quad (2)$$

天线在 M 点产生的场是无数 $dz$ 在 M 点产生的场的积分：

$$E_{\theta} = \int_{-l}^l j \frac{60\pi I(z) dz}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \quad (3)$$

考虑 $r_1$ 、 $r_2$ 对辐射场相位的影响，并代入式(1)得

$$E_{\theta} = \int_0^l j \frac{60\pi I_m \sin k(l-z)}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr_1} dz + \int_{-l}^0 j \frac{60\pi I_m \sin k(l+z)}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr_2} dz \quad (4)$$

其中，由图 5.1 可知， $r_1 = r_1 = r_0 - z \cos \theta = r - z \cos \theta$

最终有，

$$E_{\theta} = \frac{j60\pi I_m e^{-jkr}}{\lambda r} \sin \theta \left[ \int_0^l \sin k(l-z) e^{jkz \cos \theta} dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) e^{jkz \cos \theta} dz \right] \\ = j \frac{60I_m}{r} \left[ \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} \right] e^{-jkr} \quad (5)$$

式中， $I_m$ 为天线上电流波腹点的复振幅； $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ 为相位常数； $r$ 为场点距天线距离； $l$ 为天线单臂长度； $\theta$ 为场点方向与 Z 轴夹角。

显然，推导过程和结果均表明，线极化的偶极子天线电场强度矢量仅有 $E_{\theta}$ 分量：其随时间仅在同一条直线上运动。

## 2. 分析天线阵列的辐射场（远区场）：

本文认为该 32 单元相控阵的阵元为相似元（假设 2），即各阵元类型、尺寸、架设方位相同。和上述推导中对各电流元的处理方法类似，对各个阵元，它们到远区场观察点的电波射线可认为相互平行，即各阵元在同一场点产生的场强矢量共线。

因此，阵列中各阵元对同一场点的瞬时合场强可由各分量以标量相加获得，可表达为如下的复数形式：

$$E * e^{j\omega t} = \sum_{i=1}^N E_i \cdot e^{j\omega t} \quad (6)$$

自然地，同一场点的合场强复振幅也可由各分量以标量相加获得，可表达为如下：

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (7)$$

场强的实数和复数形式关系如下：

$$E_{re}(t) = \text{Re}\{E * e^{j\omega t}\} = |E|\cos(\omega t + \angle E) \quad (8)$$

可见，场强实幅度和复振幅有如下关系：

$$E_A = |E| \quad (9)$$

因此，合场强幅度可表达如下：

$$E_A = |E| = \left| \sum_{i=1}^N E_i \right| = \left| \sum_{i=1}^N |E_i| \cdot e^{j\varphi_i} \right| \quad (10)$$

3. 功率问题：

准确来讲，合成功率(EIRP)定义如下：

$$\text{EIRP} = P_t * G \quad (11)$$

其中， $P_t$ 为发射机发射功率， $G$ 为天线增益；又有如下关系：

$$P_r = \eta_A \cdot P_t \quad (12)$$

$$P_r = \frac{1}{2\eta} |E_p|^2 \cdot 4\pi r^2 \quad (13)$$

$$G = \frac{|E_{max}|^2}{|E_p|^2} \quad (14)$$

式中， $P_r$ 为天线辐射功率， $\eta_A$ 为天线效率， $E_p$ 为理想电源的辐射功率， $\eta$ 为介质波阻抗， $r$ 为场点离天线距离； $E_{max}$ 为最大辐射方向上的场强。

整理后，合成功率可表达如下：

$$\text{EIRP} = \frac{\eta_A \cdot 4\pi r^2}{2\eta} |E_{max}|^2 = A \cdot |E_{max}|^2 \quad (15)$$

若以分贝法表示，形式如下：

$$\text{EIRP} = 10 \log_{10}(A \cdot |E_{max}|^2) \quad (16)$$

其中， $A$ 为常量，由 $\eta_A \cdot 4\pi r^2 / 2\eta$ 等效而来；对天线阵列而言，可认为各单元效率相同，到场点的传播介质相同，且场点距各阵元等距。

忽略常数因子，即得本文中合成功率定义，如下：

$$\text{EIRP} = 20 \log_{10}(|E_{max}|) \text{ dBm} \quad (17)$$

相应地，本文中功率归算如下：

$$P = 20 \log_{10}(|E|) \text{ dBm} \quad (18)$$

注意到，此定义与赛题图 6 及附件一致，符合题意。

### 5.1.2 静态方向图评估模型的建立

问题 1 的优化目标为合成功率、旁瓣电平、主瓣方向和零点方向，不考虑扫

描情形，上述指标均为静态指标。

第  $n$  号单元在某个方向的场强表示如下：

$$E_n(AZ, EL, ph)$$

其中， $AZ$  为水平角， $EL$  为俯仰角； $ph$  取 1~4，对应移相器配置的 4 种方式（ $0^\circ$ ， $90^\circ$ ， $180^\circ$ ， $270^\circ$ ）；单元  $n$  取 1~32。

由式（17），合成功率率为 35dBm，即

$$EIRP(10^\circ, 5^\circ, \vec{ph}) = 20 \log_{10} \left| \sum_{n=1}^{32} f_n \cdot E_n(10^\circ, 5^\circ, ph_n) \right| \rightarrow 35 \text{ dBm} \quad (19)$$

式中， $f_k$  为通道开关标志。

同时，本文考虑副主瓣比尽可能小，以抑制旁瓣，其中副主瓣比表达如下：

$$R = \frac{SLL}{MLL} \quad (20)$$

其中， $SLL$  即 maximum side-lobe level，第一副瓣电平， $MLL$  为 main-lobe level，主瓣电平，即最大场强方向的幅度。

此外，为避免对站点的干扰，本文考虑将方向图的一个零点设计在  $AZ=10^\circ$ ， $EL=10^\circ$  方向，如下：

$$\left| \sum_{k=1}^{32} f_n \cdot E_n(10^\circ, 10^\circ, ph_n) \right| \rightarrow 0 \quad (21)$$

为衡量是否满足上述所有要求，本文构建静态方向图评估模型如下：

$$\begin{aligned} SEva = & Coe_1 \frac{SLL}{MLL} + Coe_2 \left| \sum_{n=1}^{32} f_n \cdot E_n(10^\circ, 10^\circ, ph_n) \right| \\ & + Coe_3 \left| \left| \sum_{k=1}^{32} f_n \cdot E_n(10^\circ, 5^\circ, ph_n) \right| - 10^{\frac{35}{20}} \right| \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $Coe_1, Coe_2, Coe_3$  分别为旁瓣电平、零点、合成功率的权重系数，可以影响模型的倾向（侧重于满足哪个要求）； $SLL, MLL$  分别为第一副瓣电平和主瓣电平； $f_n$  为通道开关标志，取值 0 或 1。

### 5.1.3 模型的求解

本文分两步对问题 1 进行求解——数据预处理和配置优化。

首先，分析发现 4 号和 20 号（此处为原始数据的编号）阵元数据异常，须作预处理。之后，基于上述模型构建目标函数，采用人工蜂群算法(ABC)，对移相器配置进行优化。

#### （一）数据预处理

由附件中实测数据绘制出各阵元方向图如图 5.2 所示，易见 4 号和 20 号阵元方向图异常。

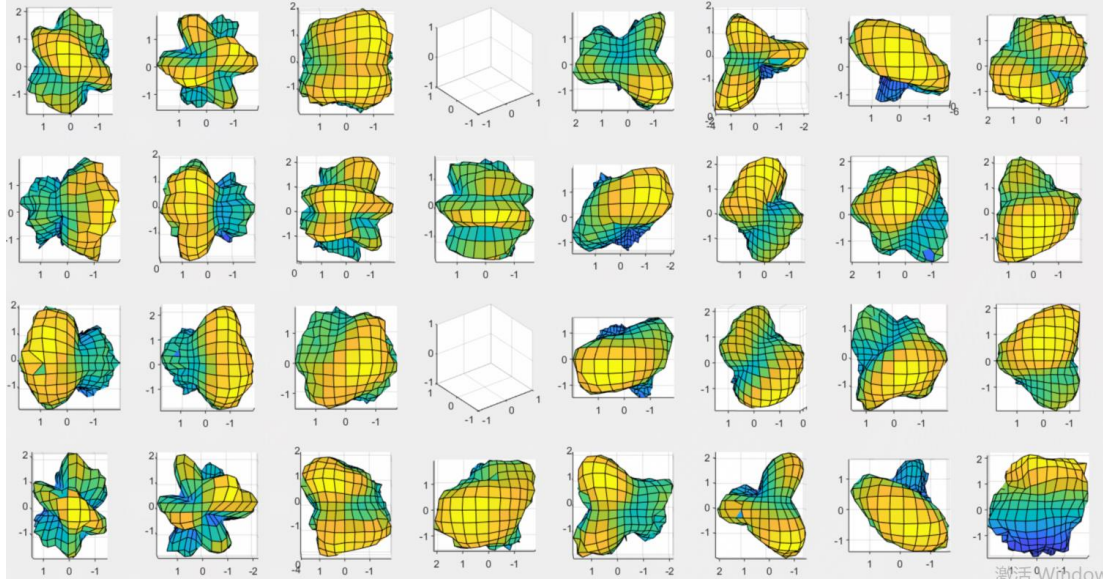


图 5.2 原始数据中各阵元方向图(朝 x 轴负向观察)

分析发现,考虑到互耦效应[1]的影响,方向图形状不规则,但对某个阵元来讲,总能找到一个方向图与之有较强对称性的阵元。基于此,我们对数据进行修复,并重新排列,得到方向图如图 5.3 所示:

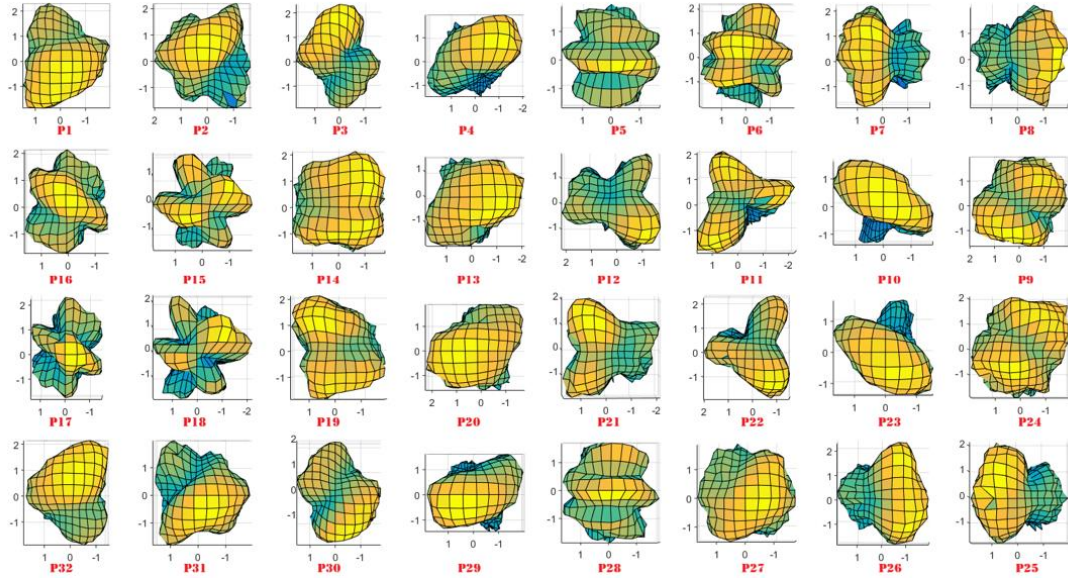


图 5.3 经预处理后的各阵元方向图(朝 x 轴负向观察)

P 下标数字即重新排列的的阵元位置

## (二) 配置优化

为满足合成功率、旁瓣电平、主瓣方向和零点方向的要求,基于评估模型,本文构建目标函数如下:

$$Obj_1 = \min\{SEva\} \quad (23)$$

$$\text{s.t. } f_n \in \{0,1\}$$

经试验, 本文取定 $Coe_1 = Coe_2 = Coe_3 = 1$ , 采用人工蜂群算法(ABC)对上式进行优化, 最终求得阵元配置如下表所示:

编号(排列后)	1	2	3	4	5	6	7	8
编号(原)	16	15	14	13	12	11	10	9
相位	3	4	1	4	1	3	4	3
开关	1	1	0	1	1	1	1	1
编号(排列后)	9	10	11	12	13	14	15	16
编号(原)	1	2	3	4	5	6	7	8
相位	4	1	3	3	2	3	2	2
开关	0	0	1	1	1	1	0	1
编号(排列后)	17	18	19	20	21	22	23	24
编号(原)	25	26	27	28	29	30	31	32
相位	3	3	3	2	1	3	3	2
开关	0	0	0	0	0	0	1	1
编号(排列后)	25	26	27	28	29	30	31	32
编号(原)	24	23	22	21	20	19	18	17
相位	3	2	2	3	4	1	3	1
开关	1	0	0	1	0	1	0	1

其中, 相位指移相器相位, 1 对应  $0^\circ$ , 2 对应  $90^\circ$ , 3 对应  $180^\circ$ , 4 对应  $270^\circ$ ; 开关指阵元开启或关闭, 0 对应关, 1 对应开。

此配置下, 辐射指标如下表所示:

合成功率(EIRP)	副主瓣比 (场强比/分贝法)	E(AZ= $10^\circ$ , EL= $5^\circ$ )	E(AZ= $10^\circ$ , EL= $10^\circ$ )
34.9867dBm	0.5579/-5.0689dB	56.1478V/m	0.5011V/m

方向图如下图:

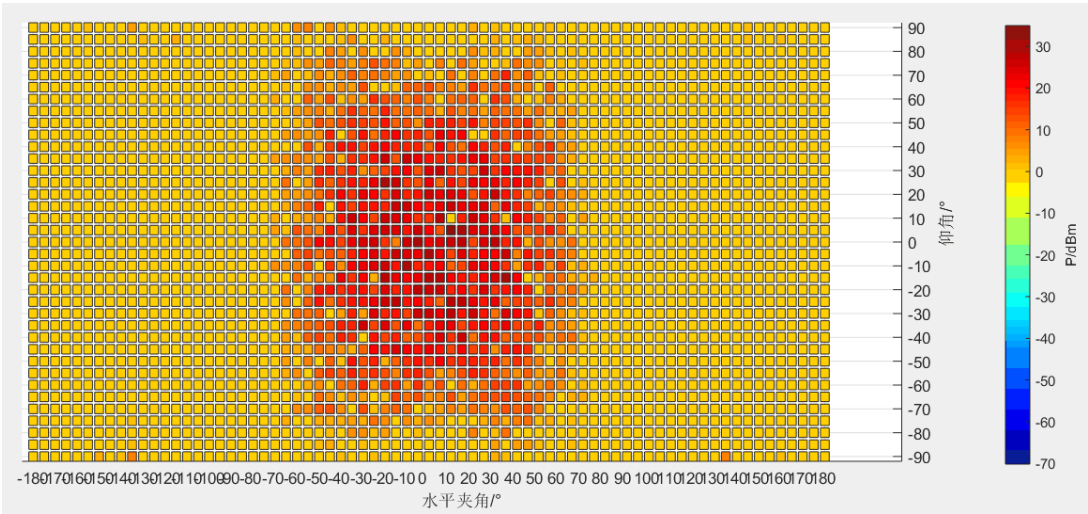


图 5.4 最优配置下的空间功率分布 (平面形式)

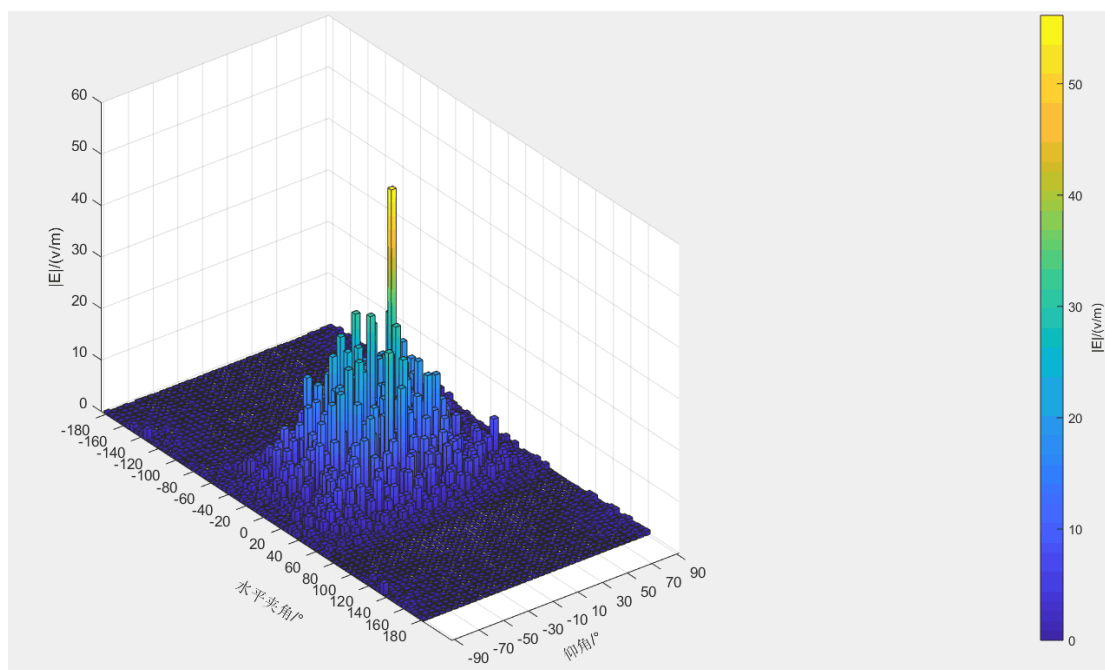


图 5.5 最优配置下的空间场强分布（柱状图形式）

## 5.2 问题二的建模和求解

### 5.2.1 模型简化说明

基于实测数据的采样标准, 本文以  $5^\circ$  为一个单位, 将水平角  $\pm 30^\circ$ 、俯仰角  $\pm 15^\circ$  的目标覆盖区域划分为 91 个方向 ( $13 \times 7$ , 包含边界, 不包含边界则为  $11 \times 5 = 55$  个方向), 并以 AZ、EL 为横纵轴, 建立直角坐标系如下图。

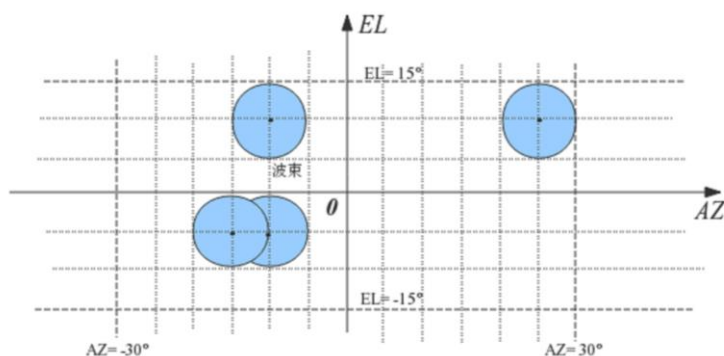


图 5.6 相控天线波束示意图

假设 4 指出, 波束具有强方向性。基于此, 本文认为各波束覆盖周边  $5^\circ$  的范围, 如上图蓝色圆形区域所示。同时, 为简化模型, 如未特别指出, 本文涉及的面积均在上述坐标系下作相应近似。

### 5.2.2 动态方向图评估模型的建立

问题 2 的优化目标为扫描场景下的平均辐射功率、凹坑面积、和波束个数, 故上述指标均为动态指标。

扫描周期足够短，相当于各波束同时覆盖目标区域，基于式（17），则可表达出扫描周期内的平均辐射功率，如下：

$$\bar{P} = 101 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^K P_n}{S_{target}} \quad (24)$$

由坡印廷定理，可得：

$$P_n = \int_S \frac{|E|^2}{2\eta} dS = \iint_S \frac{|E|^2}{2\eta} r^2 \sin\theta d\theta d\psi \quad (25)$$

由 5.1.1 知，本题忽略了功率中的常数因子，故有：

$$P_n = \iint_S |E|^2 \sin\theta d\theta d\psi \quad (26)$$

由 5.2.1 知，上式简化如下：

$$P_n = |E_{max_n}|^2 \cdot S_{beam} \quad (27)$$

最终，平均辐射功率整理如下：

$$\bar{P} = 101 \log_{10} \frac{S_{beam} \cdot \sum_{n=1}^K |E_{max_n}|^2}{S_{target}} \quad (28)$$

注意到，波束  $n$  的合成功率  $EIRP_n = 20 \log_{10} |E_{max_n}|$ ，其中  $E_{max_n}$  表示扫描到第  $n$  个波束时的最大辐射方向的场强。

为尽量避免覆盖区域出现“凹坑”，应尽量使扫描时，波束覆盖整个目标区域。由此，本文考虑由目标区域面积和覆盖区域面积之差表示凹坑的大小，称为凹坑的面积，如下：

$$S_{pit} = S_{target} - S_{cover} \quad (29)$$

$$S_{cover} = Num \cdot S_{beam} - S_{over} \quad (30)$$

注意到，上述面积在 AZ-O-EL 直角坐标系下衡量。其中， $S_{target}$  为目标区域全面积， $Num$  为波束总数； $S_{beam}$  为单个波束的覆盖区域，为简化模型，本文认为各波束覆盖区域相同； $S_{over}$  是波束重叠的总面积。

为衡量优化目标，本文构建动态方向图评估模型如下：

$$DEva = Coe_4 Num \cdot (Coe_5 |\bar{P} - \bar{P}_{req}| + Coe_6 \frac{S_{pit}}{S_{target}}) \quad (31)$$

其中， $\bar{P}_{req}$  为所要求满足的平均辐射功率。

### 5.2.3 模型的求解

本文分两步对问题二进行求解——波束初筛和配置优化。

首先，依据假设 x，本文筛选出以目标区域内 55 个方向为最大辐射方向的 55 个强方向性波束，此步在问题 1 模型的基础上，作些许改动即可求解。此后，本文由本题模型构建目标函数，采用人工蜂群算法(ABC)，对波束配置进行优化。

#### (一) 波束初筛

此步要求波束满足 2 个条件——指定方向和强方向性。  
指定方向，即指定某方向为最大辐射方向，即使得：

$$\left| \frac{|\sum_{n=1}^{32} E_n(AZ_i, EL_i, ph_n)|}{\max\{|\sum_{n=1}^{32} E_n(AZ, EL)|_{ph_n}\}} - 1 \right| = 0 \quad (32)$$

强方向性，可由副主瓣比[5]指标衡量，即使得：

$$\frac{SLL}{MLL} \ll \xi_r \quad (33)$$

故而，可对题 1 中静态方向图评估模型改进如下：

$$SEva_{Q2} = Coe_7 \left| \frac{|\sum_{n=1}^{32} E_n(AZ_i, EL_i, ph_n)|}{\max\{|\sum_{n=1}^{32} E_n(AZ, EL)|_{ph_n}\}} - 1 \right| + Coe_8 \frac{SLL}{MLL} \quad (34)$$

经试验，求解时，取  $Coe_7 = Coe_8 = 1$ 。

由模型，构建目标函数如下：

$$Obj_{1Q2} = \min\{SEva_{Q2}\} \quad (35)$$

采用人工蜂群算法(ABC)对上式进行优化，最终筛选出 55 个波束，详见天线问题二相关表格.xls。

#### (二) 配置优化

此步将从 55 个初筛得的波束中，依据平均辐射功率的目标，权衡波束个数、凹坑面积因素，对波束配置进行优化。具体来讲，此步可细分为三小步——计算面积、确定参数和配置优化。

##### 1. 有关面积的处理

首先，考虑到分析直观，且不改变相对大小，本文面积统一由角度数据计算，并未转化为弧度数据。基于 5.2.1，面积表达如下：

$$S_{target} = 60 \times 30 = 1800 \quad (36)$$

$$S_{beam} = \pi * 5^2 = 25\pi \quad (37)$$

下面分析波束重叠部分的面积计算：

当两个波束直接相邻(图 5.7 右)时，重合面积为

$$S_{o1} = 2 \times \left( \frac{\pi r^2}{3} - \frac{\sqrt{3}r^2}{4} \right) = \left( \frac{50\pi}{3} - \frac{25\sqrt{3}}{2} \right) \quad (38)$$

当两个波束对角相邻(图 5.7 左)时，重合面积为

$$S_{o2} = 2 \times \left( \frac{\pi r^2}{4} - \frac{r^2}{2} \right) = \left( \frac{25\pi}{2} - 25 \right) \quad (39)$$



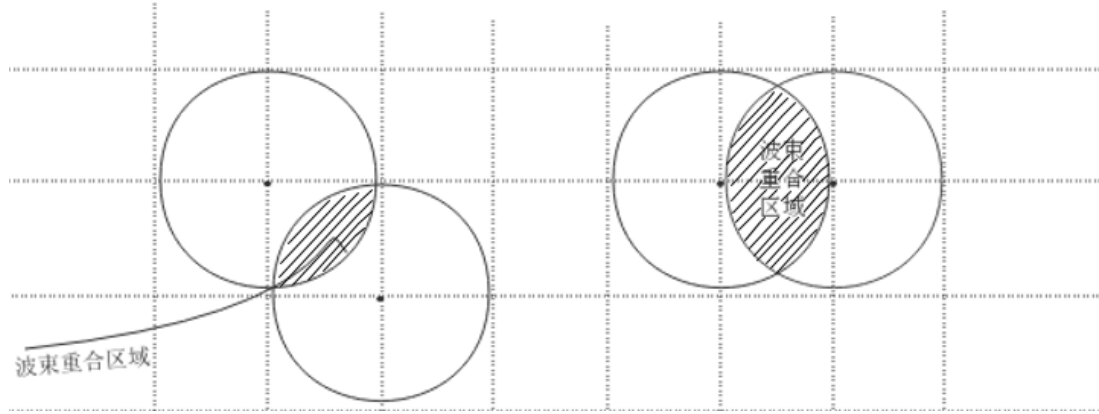


图 5.7 波束重叠示意图

## 2.参数的确定

首先，已知参数 $\bar{P}_{req}=35\text{dBm}$ 。

其次，待定系数 $Coe_4$ 、 $Coe_5$ 、 $Coe_6$ 由试验确定。经试验，本文最终取定 $Coe_4=1$ ， $Coe_5=1$ ， $Coe_6=4$ 。

## 3.配置优化

基于动态方向图评估模型，本文构建目标函数如下：

$$Obj_2 = \min\{DEva\} \quad (40)$$

采用人工蜂群算法(ABC)对上式进行优化，最终求得波束配置如下表所示：

波束	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AZ/°	-25	-25	-25	-25	-25	-20	-20	-20	-20	-20
EL/°	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
有无	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
波束	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AZ/°	-15	-15	-15	-15	-15	-10	-10	-10	-10	-10
EL/°	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
有无	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1
波束	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
AZ/°	-5	-5	-5	-5	-5	0	0	0	0	0
EL/°	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
有无	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
波束	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
AZ/°	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10
EL/°	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
有无	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1

波束	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
AZ/°	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20
EL/°	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
有无	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1

波束	51	52	53	54	55	配置总计：28 个波束
AZ/°	25	25	25	25	25	
EL/°	-10	-5	0	5	10	
有无	1	1	0	1	1	

其中，有无表示最终波束配置中是否存在该波束，1 表示存在，0 表示不存在。此外，有关 55 个波束的具体移相器配置及最大辐射场强或合成功率，请见天线问题二相关表格.xls

此波束配置下，目标区域“凹坑”较小，覆盖均匀，如下图所示：

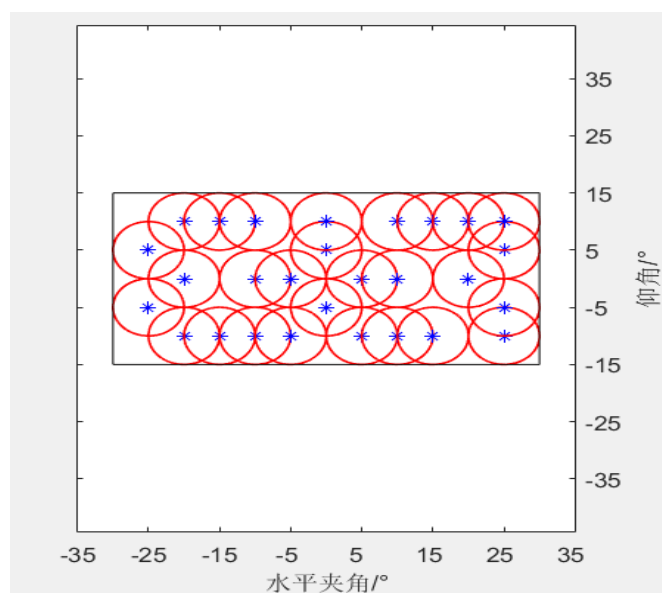


图 5.8 主瓣覆盖情况

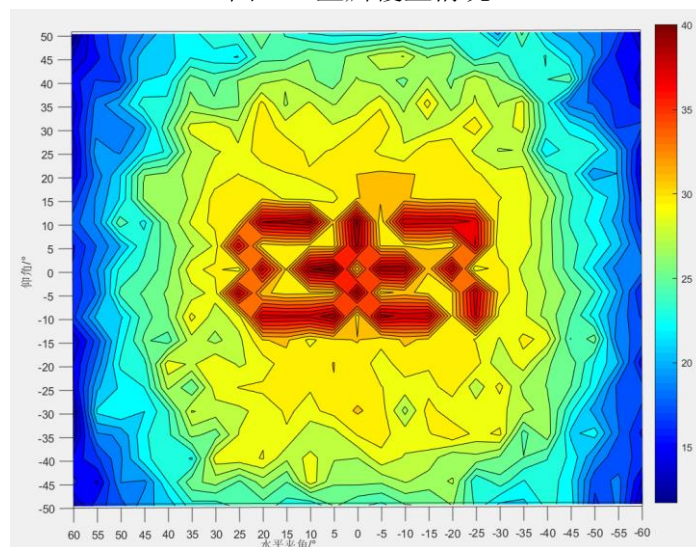


图 5.9 区域辐射情况

## 六 模型评价

### 6.1 模型的评价

#### 6.1.1 模型的优点

建模方面，本文模型以大量天线原理知识为支撑，具一定专业性。

优化方面，本文采用人工蜂群算法(ABC)实现优化目标。建立目标函数时，将等式约束转为不等式约束，将部分不等式约束转为罚函数，从而减少约束难度，同时进一步利用了 ABC 算法的优势。由于人工蜂群算法不存在求导和函数连续化的限定，具有更好的全局优化能力，本文用人工蜂群算法求解设计最优化是创新之处。

#### 6.1.2 模型的缺点

问题 2 的模型具一定合理性，但由于作了部分简化，对优化目标的表达不够精准，可能对优化效果有一定影响。例如，本文对面积的处理作了近似，造成凹坑面积不够准确，同时也对平均辐射功率有所影响。

## 七 模型推广

### 7.1 问题一再分析

问题 1 要求在多种约束条件下，设计天线阵中各阵元输入信号的幅度(指天线上波腹电流幅度，后称为馈电幅度)和相位(简称为馈电相位)。考虑到实测数据存在误差和异常，无法完全赖其求解，故在推广时，本文考虑基于相控天线的物理原理，建立相控阵辐射场模型。鉴于各阵元方向图的朝向，及其之间具渐变性和对称性，结合通信基站天线的工程要求，推广模型以偶极子直线相控阵为基础，并考虑阵元之间的互耦效应。

问题 1 指定了最大辐射方向、零点方向，并要求旁瓣尽可能低，若模型符合预期，基于模型，该题可简化为满足最值条件的优化问题，从而可建立目标函数，在满足指定合成功率率的约束下，对移相器配置进行优化。

### 7.2 推广模型的建立

#### 7.2.1 关于偶极子等距直线相控阵模型的简化说明

为便于分析，本文建立 XYZ 直角坐标系，其中 XOY 为水平面，EL 为俯仰角，AZ 为水平角，如图所示：

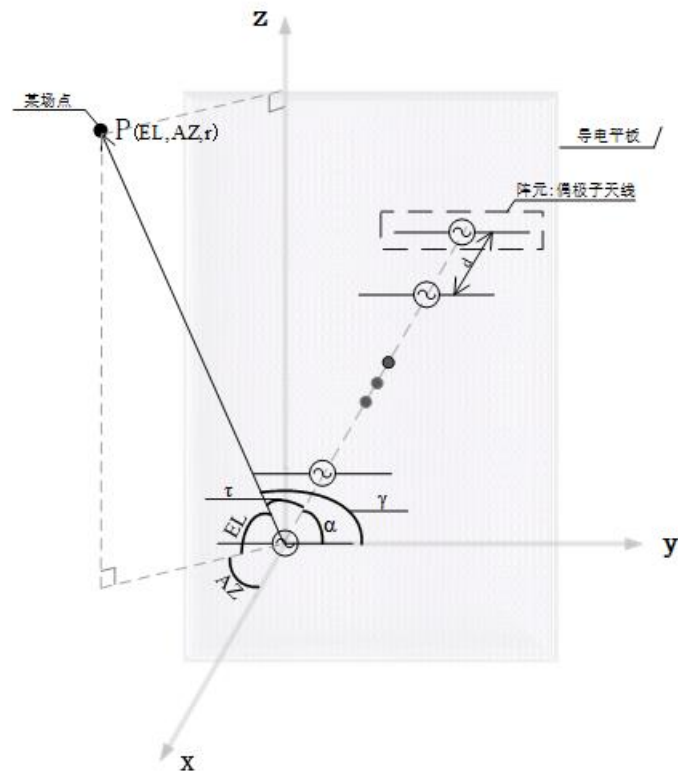


图 7.1 模型示意图

基于实测数据，在上述坐标系下绘制出各阵元方向图，如下图所示：

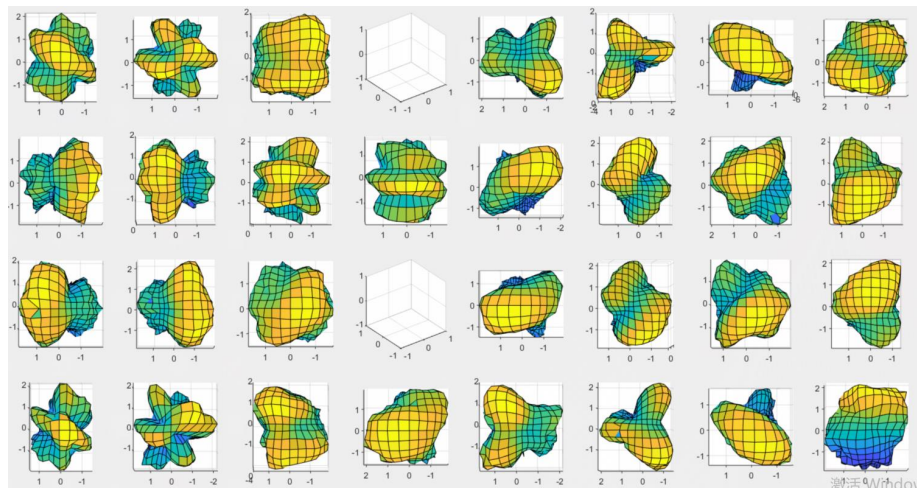


图 7.2 各阵元方向图(朝 x 轴负向观察)

分析发现，虽受互耦效应的影响，方向图形状不规则，但大致显现弱方向性，此外还具成对的对称性和渐变特性。由此，可知其阵元为弱方向性阵元，阵形具对称性。同时，由于对称性显现成对特点，可认为其阵形可由单对称轴阵形等效。为了简化模型，考虑相控阵阵元为偶极子天线，阵形为等距直线阵。

图 7.1 给出了本文基础坐标系、相控阵模型的阵列朝向、阵元朝向、排列、场点射线、各角度和天线导电平板等信息。

### 7.2.2 偶极子等距直线相控阵模型的建立

#### (一) 构建孤立阵元电场强度表达式

孤立阵元指自由空间中不受互耦效应的影响时的单个天线单元。本文阵元为偶极子天线，并带有导电平板，如图 x 所示。由于导电平板导电性良好且面积远大于阵元尺度，计算时可视为无限大导电平面，并可用负镜像代替平面上感应电流的影响。

通信服务发生在远区场，加之假设 1, 本文仅需考虑远区场的辐射情况。孤立时，偶极子天线在远区场的电场强度（即辐射场强）表达如下[5]：

$$E_0 = j \frac{60 I_0 e^{j p h_0}}{r} \cdot \frac{[\cos(\frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \cos \gamma) - \cos(\frac{2\pi l}{\lambda})]}{\sin \gamma} \cdot e^{-j 2\pi r / \lambda} \quad (41)$$

其中， $I_0$  为天线馈电幅度， $p h_0$  为馈电相位， $l$  为偶极子单臂臂长， $r$  为远区场点距天线的距离， $\lambda$  为微波波长， $\gamma$  为天线臂与场点位矢的夹角。式中场强省略了基向量  $\vec{e}_\theta$ 。

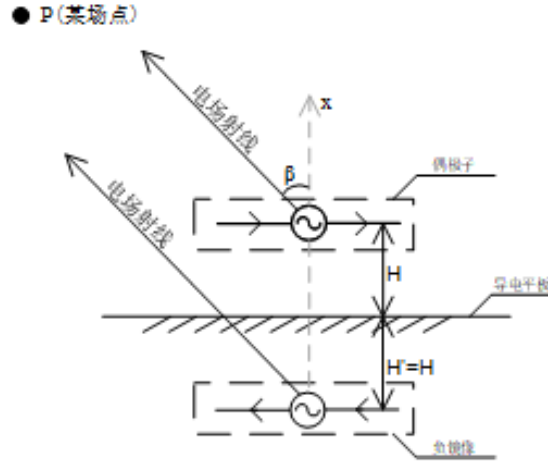


图 7.3 阵元及其负镜像

阵元和其负镜像的位置关系，如图 7.3 所示，其馈电关系可表达如下[5]：

$$I_0 = I'_0, \quad p h_0 = p h'_0 + \pi \quad (42)$$

其中， $I'_0$  为负镜像的馈电幅度， $p h'_0$  为其馈电相位。

阵元和其负镜像互为相似元，构成理想二元阵，阵列辐射场强可表达如下：

$$E = E_0 (1 - e^{\frac{j 2\pi H}{\lambda} \cos \beta}) \quad (43)$$

由于导电平板的作用，故孤立阵元辐射场仅存在于  $x > 0$  此半个空间，而由于  $H > 0$ , 平板相对足够大，因此可认为辐射场存在于  $\beta > 90^\circ$  时，其场强表达如下：

$$E = \begin{cases} E_0 (1 - e^{\frac{j 2\pi H}{\lambda} \cos \beta}), & \beta > 90^\circ \\ 0, & \beta < 90^\circ \end{cases} \quad (44)$$

#### (二) 建立偶极子等距直线相控阵模型

等距直线阵中阵元的辐射场强可表达如下：

$$E_n = j60m_n e^{j(ph_n - ph_1 + err_n)} \cdot E_1 \cdot \left(1 - e^{\frac{j2\pi H}{\lambda} \cos \beta}\right) \cdot V_n(EL) \quad (45)$$

式中 $V(EL) = V_i \cdot C$ ，称为方向向量[6]。另外， $C$ 为互耦矩阵， $EL$ 为自变量， $n$ 表示向量中第 $n$ 个分量， $E_1$ 为1号阵元辐射场强（孤立时）， $m_n$ 表示 $n$ 号阵元较1号的相对馈电幅度， $\lambda$ 为某频率微波波长， $H$ 、 $\beta$ 如图7.3所示。

理想情况下，阵元间不存在互耦效应，则有：

$$V(EL) = V_i = [1, e^{j2\pi d_\lambda \cdot \cos \tau}, e^{j4\pi d_\lambda \cdot \cos \tau}, \dots, e^{j62\pi d_\lambda \cdot \cos \tau}] \quad (46)$$

其中 $\cos \tau = \cos \alpha \cos EL \sin AZ + \sin \alpha \sin EL$ ， $\tau$ 、 $\alpha$ 如图7.1所示。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

实际情况中， $C_{ij} \neq 0$ ，对等距直线阵， $C$ 为对称的拓普利兹矩阵，如下[7]：

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{32} \\ c_2 & c_1 & c_2 & \ddots & c_{31} \\ c_3 & c_2 & c_1 & \ddots & c_{30} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{32} & c_{31} & c_{30} & \cdots & c_1 \end{bmatrix} \quad (48)$$

将式(41)带入式(45)，可得互耦影响下， $n$ 号偶极子阵元场强，如下：

$$E_n = j60I_n e^{j(ph_n + err_n)} \cdot \frac{[\cos(2\pi l_\lambda \cdot \cos \gamma) - \cos(2\pi l_\lambda)]}{\sin \gamma} \cdot e^{-j2\pi r_\lambda} \cdot \left(1 - e^{\frac{j2\pi H}{\lambda} \cos \beta}\right) \cdot V_n(EL) \quad (49)$$

至此，可建立偶极子等距相控阵模型，表达如下：

$$E = \sum_{n=1}^{32} E_n \quad (50)$$

其中 $I_n = m_n \frac{l_1}{r}$ ， $I_1$ 为1号阵元馈电幅度； $l_\lambda = \frac{l}{\lambda}$ ， $l$ 为偶极子单臂臂长； $r_\lambda = \frac{r}{\lambda}$ ， $r$ 为场点距阵列距离； $d_\lambda = \frac{d}{\lambda}$ ， $d$ 为阵元间距； $H_\lambda = \frac{H}{\lambda}$ ， $H$ 为阵元距导电平板距离； $\gamma$ 、 $\beta$ 如图7.1所示。

## 八 参考文献

- [1] 杨林. 阵列天线综合方法研究[D].哈尔滨工程大学,2006.
- [2] 康志勇, 李仙茂, 张范军. 雷达天线扫描周期精确测量技术研究[J].航天电子对抗, 2015, 31(1):62-64.
- [3] 沈喜明. 相控阵天线的原理及基本设计方法[C].中国电子学会电子对抗分会学术年会. 2003.
- [4] 杨凯, 张辉, 李忠强. 相控阵天线及其功率合成方法分析[J].舰船电子对抗, 2010, 33(2).
- [5] 宋铮, 张建华, 黄冶. 天线与电波传播[M].西安电子科技大学出版社,2016: 21,44-45.
- [6] 席磊. 阵列天线单元间的互耦分析与补偿技术[D]. 2010.
- [7] 张辰. 5G 移动通信中二维天线阵的互耦自校正及 MIMO 系统容量研究[D]. 2016.

# 基于人群信息需求量模型的广东骨干网规划设计

## 摘 要

随着众多网络接入技术的发展,以及未来用户数据需求量呈指数形式的增长,城市之间的骨干网输入输出端口带宽与容量需求也将爆炸式增长。因此,进行城市之间的骨干网改造升级已成必然。省级骨干网络的部署必须经过科学规划,本文以未来广东省的省内信息骨干网为规划对象,以满足全省人群的信息需求量为目标,建立人群信息需求量模型,在此基础上构建网络部署价值函数,以对电信工作者进行网络规划提供富有价值的参考。

首先,本文将原骨干网问题 1 拆解为问题 1 和问题 2,原骨干网问题 2 列为问题 3。

问题 1 的目标是建立各类人群的信息需求量模型并对未来进行预测。通过对科技更迭速度、新科技在人群中的接受度、人口年龄和收入分布等的分析,一个综合了以上各影响因素的**人群信息需求量模型**不难建立。本问题的难点在建立各类人群的区分标准及查找相关数据求解模型参数上。本文以结合年龄、收入要素的人群结构综合评分为标准,对每类人群加以区分,进而将讨论处于不同年龄段和收入水平的各类人群信息需求量问题 转换为 讨论具有**不同年龄结构和收入结构的各城市信息需求量**问题,这是本文的核心解决思路。此外,我们查找到广东省近年的全省**互联网接入流量**数据,将这些数据视为近年的广东省内各市人群信息需求量之和,是本文求解模型参数的基础。

问题 2 是以满足广东省全部人口的信息接入需求为目标的城际骨干网规划问题。首先,利用问题 1 所建模型,预估得到 2028 年广东各市的年信息需求总量,进而求得广州到各市的**骨干网带宽需求**,并在引入**带宽冗余系数**后,作为线路铺设的带宽要求。其次,根据广东各市到省会的直线距离和三种传输格式的距离要求,将不同城市分为**直联城市**和**非直联城市**,综合考虑距离因素和城市发展水平后选择网络中转城市,此为预规划。最后,以总部署价值最高建立目标函数,即可利用算法得到最优的网络部署方案。

问题 3 在问题 2 的基础上,引入了对不同人群网络接入价值的考量。本文的处理方法是以年龄和收入水平为影响因子构建人群的**网络价值系数**,然后用该系数决定各城市骨干网的带宽冗余度,以此重构网络部署价值函数及其约束条件,求解得到新的部署方案。

最后,我们对于上述建立的人群信息需求模型做了总结,并且对于该模型的**优点与不足**做了简要的分析。

**关键词:** 人群信息需求量模型 骨干网规划 带宽冗余系数 网络价值系数 人工蜂群算法



## 一 问题提出

### 1.1 题目背景与研究意义

通信网络可以大致划分为四个层次：接入网、汇聚网、核心网和骨干网。其中，骨干网作为连接多个地区和区域的高速网络，承担了各城市对外网络交互的出入口功能，其物理本质则是一种以光纤为介质的光传送网。

随着通信技术的高速发展，以及用户信息需求量的爆炸式增长，对现有骨干网的信息容量进行提升已是必然。骨干网的规划与建设是运营商、设备商以及政府必须考虑的课题。

本问题主要对信息时代各类人群的信息需求量进行研究并建立模型，并以满足该信息需求量为目标对未来城际骨干网进行规划，进而作为电信从业人员网络部署设计方案的参考。

### 1.2 问题重述

现需要在广东省对已有骨干网进行满足电信市场要求的改造。其中，电信市场要求主要体现在未来用户数据需求量的指数形式增长上。该需求量，一方面受群体对于新科技的接受度，以及科技自身的更迭速度影响，另一方面，群体的年龄结构和收入结构也是重要决定因素。

#### 问题 1:

参考广东省的相关数据，建立信息时代的人群信息需求量模型，预估广东省未来十年（截止 2028 年）信息时代各类人群所需要的信息量。

#### 问题 2:

以满足广东省全部人口的信息接入需求为目标，以广州市为数据中心，自我构造约束条件，为广东省未来电信市场建立一个有效的部署价值函数，找到更新省内城际骨干网的最优部署方案。

城际骨干网可选用的传输格式及其特性：

传输容量	最大传输距离	总容量	标准成本
400 Gb/s	200 km	32 Tb/s	X 万元
600 Gb/s	100 km	48 Tb/s	1.25X 万元
800 Gb/s	80 km	64 Tb/s	1.5X 万元

#### 问题 3:

在满足用户信息需求之外，考虑不同地区、不同年龄结构和收入结构的人群具有不同的网络接入价值，重新构建网络部署价值函数，选择性的接入网络价值大的人群，并找到新的最优部署方案。

## 二 问题分析

此部分，对本文要解决的问题进行建模前的初步分析准备，以求为后文建模部分提供逻辑结构。

### 2.1 问题一的分析

问题 1 需要建立信息时代的人群信息需求量模型。以广东省为研究对象，需要知道其近年的相关流量数据。具体可由两种方法得到：一种是通过网管部门对骨干网节点的出口流量进行采集，用流量探针或是软件方式实现，利用 OPNET 等网络仿真工具对采集到的业务流量进行分析预测，从而得到规划期内骨干网络上的流量情况；另一种方法是根据各个本地网上网用户在规划期内的预测数和上网特性来推算由此产生的总流量，按照一定的比例得到出本地网的业务流量<sup>[2]</sup>。本文采取方法一。搜集相关资料并加以分析，可以得到广东省近些年（2012-2018 年）的全省全年互联网接入流量，视该流量为全省各城市年接入流量之和。

不同城市的人口数、年龄结构以及收入结构不同，进而对新科技的接受度也不同，因此可以视作不同类人群。本文以结合年龄、收入因素的人群结构综合评分为标准，对每类人群加以区分，从而将讨论处于不同年龄段和收入水平的各类人群信息需求量问题 转换为 讨论具有不同年龄结构和收入结构的各城市信息需求量问题，进而将预估广东未来各类人群信息需求量的问题 转化为 预估未来广东各城市信息需求量的问题，使建立和求解模型的思路明朗化（城市编号见表 2.1）。

通过对人群年龄、收入及科技更迭速度等影响因子的分析，建立人群信息需求量模型，采用近年的广东省流量数据对模型进行求解，进而利用该模型预估广东省未来十年（截止 2028 年）各类人群所需要的信息量，至此，问题 1 可以解决。

城市	深圳	珠海	汕头	佛山	韶关	河源	梅州	惠州	汕尾	东莞
编号 k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
城市	中山	江门	阳江	湛江	茂名	肇庆	清远	潮州	揭阳	云浮
编号 k	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

表 2.1 广东主要行政城市编号，广州编号 k=21

### 2.2 问题二和问题三的分析

以广州市作为数据中心，规划广州到其余主要行政城市的骨干网，本质就是规划从广州到其他城市的传输线格式及数量。

问题 2 要求构造的网络部署价值函数，即是以部署价值（线路的传输容量价值减去布设成本）最大建立目标函数，以传输线路选用的格式及数量满足距离（所选格式的最大传输距离不低于广州与相应城市的直线距离）、容量（总传输容量不低于相应城市的信息需求量）要求为限制条件，利用整数规划的求解方法求出最优解集。

问题 3 在问题 2 的基础上，考虑了不同人群具有不同的网络接入价值，需要在人群信息需求量模型中引入网络价值参数。分析该参数的影响因子（人群年龄与收入结构），以便修改人群信息需求量模型，从而在此模型基础上构造新的网络部署价值函数，重复问题 2 的求解思路得到新的规划方案。

### 三 问题假设

1. 由于本文核心关注点在于人群信息需求量模型的建立及网络部署问题，人口增长模型、人群收入增长模型等不是重点研究对象，由此简化问题，可以有以下假设：
  - 1) 假设广东各市人口平稳增长，在未来十年(截至 2028 年)内人口增长率为近年(2012-2017 年)的平均人口增长率。
  - 2) 假设未来十年(截至 2028 年)内，广东各市全体居民的人均可支配收入按近年(2012-2017 年)趋势平稳增长。
  - 3) 假设未来十年(截至 2028 年)内，广东各市城镇与农村居民的人均可支配收入按近年(2012-2017 年)趋势平稳增长。
  - 4) 假设广东省科技更迭速度平稳，且各地同步，即将科技更迭速度这一影响因子视为常数，在短期内(截至 2028 年)不随时间和地区发生改变。
2. 考虑到最新的国家生育政策和广东经济发展地位，广东的人口自然增长和迁入都将对年龄结构产生正面影响，对人口老龄化的负面态势发生冲抵，因此，本文视广东各市的年龄构成保持在稳定状态，并以 2015 年全国 1%人口抽样调查结果作参考。
3. 查找资料，可得广东省近年的全省互联网接入流量，将此数据视为广东省历年全省人群信息需求总量。
4. 为了避免网络拥塞，设计网络带宽时应有一定冗余，在不考虑用户的网络接入价值时，本文假设骨干网的带宽冗余系数为 1.5，即设计带宽为需求带宽的 1.5 倍。
5. 假设广东省省内骨干网的为星形拓扑结构，以广州为数据中心，其他主要行政城市为结点。

#### 四 符号说明

类型	符号	单位	符号意义
变量	$t$	year	年份
	$S$	—	人群结构综合评分
	$S_{income}$	—	人群收入结构评分
	$S_{age}$	—	人群年龄结构评分
	$Coe1$	—	收入评分对综评的权重系数
	$Coe2$	—	年龄评分对综评的权重系数
	$AvIncome$	元	城市全体居民的人均收入
	$Uincome$	元	城镇居民的人均收入
	$Rincome$	元	农村居民的人均收入
	$\phi_i$	—	城市全体居民人均收入的年增长率
	$\phi_u$	—	城镇居民人均收入的年增长率
	$\phi_r$	—	农村居民的人均收入的年增长率
	$Popu$	人	城市总人口数
	$Ypopu$	人	少年人口数
	$Mpopu$	人	壮年人口数
	$Opopu$	人	老年人口数
	$d$	—	年龄评分中的权重系数
	$b$	—	科技更迭速度影响因子
	$a$	—	人群对新科技的接受度
	$\phi_p$	—	城市人口年增长率
下标	$k$	—	城市编号

## 五 模型的建立和求解

### 5.1 问题一的建模和求解

#### 5.1.1 关于人群信息需求量模型的简化说明

综合来看,人群信息需求量受内、外两方面因素影响。为简化模型,本文将人群内部因素归为收入、年龄和对新科技的接受度三类,外部因素仅考虑科技自身的更迭速度,忽略上网用户类型、职业、地理位置等因素的影响。

一般来讲,人群对新科技的接受度越高,科技自身更迭速度越快,人群信息需求量越大。简单起见,两者在本模型中作为正因子存在。

年龄段不同、收入阶层不同的人群,其信息需求量不同。而发展程度不同的城市也具有不同的人口年龄结构和收入结构,因此,不妨将讨论处于不同年龄段和收入水平的各类人群信息需求量问题 转换为 讨论具有不同年龄结构和收入结构的各城市信息需求量问题,从而使信息查找与模型建立的难度大大降低。

此外,建立该人口信息需求量模型,其最终指向是解决广东省的城际骨干网络规划问题,无须考虑城市内部的网络部署(与各类人群地理分布相关),因而不必单独分析不同收入、年龄水平的各人群的需求量,这就为上述问题简化策略提供了有力的支撑。

以具有不同年龄、收入结构的城市为研究对象,是以下建模过程的基础。

#### 5.1.2 人群信息需求量模型的建立

##### (一) 建立人群结构综合评分体系

为了量化人群的收入和年龄分布对其信息需求量的影响,本文建立人群结构综合评分体系,该体系主要包括两部分,即收入结构评分和年龄结构评分,然后分别赋以权重,形成综合评分,综评越高,对应的人群信息需求量越大。其数学形式如下:

$$S(t) = Coe1 \times Sincome(t) + Coe2 \times Sage(t) \quad (1)$$

式中,  $S(t)$  即人群结构综合评分;  $Sincome(t)$ ,  $Sage(t)$ ,  $Coe1$ ,  $Coe2$  分别为人群收入结构评分、年龄结构评分及对应的权重因子。

由于建立此评分体系的目的仅在于分析不同人群的信息需求问题,于是进行人群收入结构与年龄结构评分时,只需要考虑主要因素即可,从而避免模型复杂化。

对收入评分,本文只关心人均收入与收入差距。显然,人均收入水平越高,收入差距越小,收入结构越优质,对应人群的信息需求量更大。其中,对收入差距,本文以城乡收入差距来衡量。于是有:

$$Sincome(t) = \frac{AvIncome(t)}{Uincome(t) - Rincome(t)} \quad (2)$$

其中,  $AvIncome(t)$  表示城市全体居民人均可支配收入;  $Uincome(t)$ ,  $Rincome(t)$  分别表示城、乡居民人均可支配收入。

对年龄结构评分,本文参照人口统计学标准,将人口分为少年、壮年和老年三个年龄段。考虑到不同年龄段的信息需求量差异较大,同时,各年龄人群的信

息需求量可叠加, 本文采用各年龄段人口所占比例带权相加的形式, 进行人群年龄结构评分, 如下:

$$Sage(t) = \left( d_1 \frac{Ypopu(t)}{Popu(t)} + d_2 \frac{Mpopu(t)}{Popu(t)} + d_3 \frac{Opopu(t)}{Popu(t)} \right) / (d_1 + d_2 + d_3) \quad (3)$$

其中,  $Popu(t)$  表示总人口数;  $Ypopu(t), Mpopu(t), Opopu(t)$  分别表示少年、壮年、人口数,  $d_1, d_2, d_3$  为相应权重, 易知, 由于工作、社会关系、心理等因素, 壮年人口是网络通信的主要用户, 于是有  $d_2 > d_1, d_2 > d_3$ 。

由假设 1, 全体居民人均收入和城乡居民平均收入变化平稳, 于是有:

$$AvIncome(t) = AvIncome(t_0) \times (1 + \phi_i)^{t-t_0} \quad (4)$$

$$Uincome(t) = Uincome(t_0) \times (1 + \phi_u)^{t-t_0} \quad (5)$$

$$Rincome(t) = Rincome(t_0) \times (1 + \phi_r)^{t-t_0} \quad (6)$$

其中,  $t_0$  为基准年份,  $\phi_i, \phi_u, \phi_r$  分别表示城市全体居民、城镇居民和农村居民的人均收入年增长率。

由假设 2, 广东各市的年龄构成保持在稳定状态, 因此, 人群年龄结构评分仅随城市不同改变, 而与时间(年份)无关:

$$Sage = \left( d_1 \frac{Ypopu(t_1)}{Popu(t_1)} + d_2 \frac{Mpopu(t_1)}{Popu(t_1)} + d_3 \frac{Opopu(t_1)}{Popu(t_1)} \right) / (d_1 + d_2 + d_3) \quad (7)$$

最终, 某城市的人群结构综合评分的数学表达如下:

$$S(t) = Coe1 \cdot \frac{AvIncome(t_0) \times (1 + \phi_i)^{t-t_0}}{Uincome(t_0)(1 + \phi_u)^{t-t_0} - Rincome(t_0)(1 + \phi_r)^{t-t_0}} + Coe2 \cdot Sage \quad (8)$$

## (二) 建立人群信息需求量模型

人群信息需求量即全部人口的信息需求量之和, 可以由人均需求量和人口总量计算得到, 形式如下:

$$Need(t) = AvNeed(t) \times Popu(t) \quad (9)$$

其中,  $Need(t), AvNeed(t)$  分别表示  $t$  年份的人群信息需求总量和人均需求量, 与人群的年龄、收入分布等密切相关;  $Popu(t)$  表示人口数。

由假设 1, 广东省各市人口数增长平稳, 于是有:

$$Popu(t) = Popu(t_0) \times (1 + \phi_p)^{t-t_0} \quad (10)$$

其中,  $\phi_p$  表示人口年均增长率。

而影响人均信息需求量的因素, 则从上面建立的人群结构综评、人群对新科技的接受度以及科技自身更迭速度三方面考虑。

1. 用户信息需求中的马太效应指出, 信息需求量较大的用户, 随着时间的推移, 其信息需求量将愈来愈高于平均水平, 反之越低, 呈现“富者愈富, 穷者愈

穷”的走势。同时，有研究表明，用户数据需求量随时间呈指数形式增长。

因此，本文将人群结构综合评分作为与时间相关的底数，在其他条件不变时，综评越高的人群，人均需求量越高，并将呈现“复利”效应。

2. 在模型简化中已经说明，本文视科技更迭速度和接受度与人群信息需求量正相关。由假设 1，科技更迭速度影响因子为常量，设为  $b$ 。

3. 考虑收入结构、年龄结构越优质，群体对新科技的接受度越高，同时，考虑接受度存在“饱和”，即在发展水平较高地区，人群对科技的“接受度”都较高并且接近，因此，接受度可以如下表示：

$$a(t) = \frac{-1}{S(t)+1} + 1 = \frac{S(t)}{S(t)+1} \quad (11)$$

$$\because S(t) \geq 0 \therefore a(t) \in [0,1]$$

综上，人均信息需求量的表达式如下：

$$AvNeed(t) = b \times a(t) \times S^{ht}(t) \quad (12)$$

最终，结合以上各式，可以建立广东各市的人群年信息需求量模型，如下：

$$Need_k(t) = b \times \frac{S_k(t)}{S_k(t)+1} \times [S_k(t)]^{ht} \times Popu_k(t_0) \times (1 + \phi_{kp})^{t-t_0} \quad (13)$$

式中，

$$S_k(t) = Coe1 \times Sincome_k(t) + Coe2 \times Sage_k = Coe1 \cdot \frac{AvIncome_k(t_0) \times (1+\phi_{ki})^{t-t_0}}{Uincome_k(t_0) \times (1+\phi_{ku})^{t-t_0} - Rincome_k(t_0) \times (1+\phi_{kr})^{t-t_0}} + Coe2 \cdot Sage_k \quad (14)$$

下标  $k$  为广东省各市编号（表 2-1）； $t_0$  为基准年份； $b$  是科技更迭速度影响因子， $h$  是马太效应强度因子； $S(t)$  即人群结构综合评分； $Sincome(t)$ ,  $Sage$ ,  $Coe1$ ,  $Coe2$  分别为人群收入结构评分、年龄结构评分及对应的权重系数； $AvIncome$ ,  $Uincome$ ,  $Rincome$  分别表示城市全体居民、城镇居民及农村居民的人均收入； $\phi_i$ ,  $\phi_u$ ,  $\phi_r$  分别表示城市全体居民、城镇居民和农村居民的人均收入年增长率； $Popu$ ,  $\phi_p$  表示城市总人口和对应的年均增长率。

广东省年信息需求总量则为各市人群信息需求量之和：

$$Need(t) = \sum_{k=1}^{21} Need_k(t) \quad (15)$$

### 5.1.3 人群信息需求量模型的求解和预测

该部分包括两步：一是对上述所建模型进行求解，即确定模型中的所有未知参数值；然后，利用求解后的模型，对未来十年广东各类人群（即各城市）的信息需求量进行预测。

参数确定分为参数赋值和待定参数优化两步。首先，基于假设、数据等，本文对  $\phi_{xx}$ ,  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $Sage$ ,  $d_x$ ,  $k$  进行了赋值。随后，本文遵循最小二乘法的思路，基于人工蜂群算法(ABC)对待定参数  $b, h, Coe1, Coe2$  进行了拟合，并对结果进行了评估。

## （一）参数确定

### 1. 参数赋值

本文以查找得到的广东省 2012-2017 年各市人口和收入的相关数据，求解对应各市全部人口的年增长率 $\phi_{kp}$ 、全体居民和城、乡居民的人均收入年增长率 $\phi_i, \phi_u, \phi_r$ ；基准年份取 2012 年（详见附录，相关数据部分）。

基于假设 2，本文以广东各市 2015 年 1%人口抽样调查结果作为参考，式（7）中  $t_1$  取 2015 年，确定各年龄段人口比例。考虑到不同年龄段的信息需求量差异较大且以壮年用户为主，求解时，配置  $d_1 = d_3 = 1, d_2 = 3$ ，从而得到各市  $Sage_k$ 。

赋值结果如下：

城市	$Sage_k$	城市	$Sage_k$	城市	$Sage_k$
深圳	0.53292	惠州	0.49754	茂名	0.45912
珠海	0.51400	汕尾	0.48956	肇庆	0.48028
汕头	0.52176	东莞	0.48956	清远	0.47644
佛山	0.52176	中山	0.52108	潮州	0.47644
韶关	0.47052	江门	0.49840	揭阳	0.49186
河源	0.49754	阳江	0.49840	云浮	0.49186
梅州	0.47052	湛江	0.47692	广州	0.51468

表 5.1 广东各市的人群年龄结构评分结果

### 2. 参数拟合

基于最小二乘思想，构建目标函数如下式：

$$\min \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} (Need(t) - Need_{real}(t))^2 \quad (16)$$

式中， $t_{\min}$  取 2012， $t_{\max}$  取 2017； $Need(t), Need_{real}(t)$  分别表示模型计算得到的广东全年信息流量与查得的实际数据。

采用人工蜂群算法(ABC)，计算出对应的参数，即实现了对参数  $b$ 、 $h$ 、 $Coe1$ 、 $Coe2$  的拟合。

人工蜂群算法是模拟自然界中生物群在无控制情况下实现自组织、自适应行为而提出的一种智能算法。该算法最早是由土耳其学者 Karaboga<sup>[1]</sup>在 2005 年首次提出，并将其成功应用于解决函数优化问题。

优化结果如下：

$b=219.283583252828$	$h=0.0342529271073210$
$Coe1=2.77460350533835e-12$	$Coe2=35.8625355727762$

本文模型与原始数据拟合度如下：

$$R^2=0.9999863541232155$$

结果表明，拟合良好，模型具合理性。

## （二）预测需求

借助 MATLAB 求解，得到截止 2028 年的信息需求量，具体数据见文件 problem1.xlsx，结果如图 5.1、图 5.2、图 5.3 所示。城市编号如表 2.1 所示。



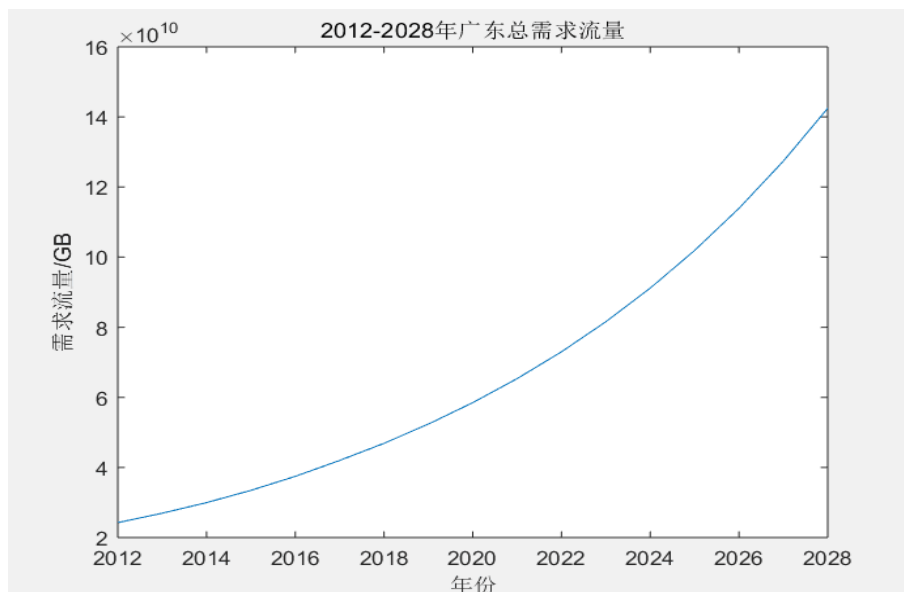


图 5.1 广东省 2012 至 2028 年信息需求量预测结果

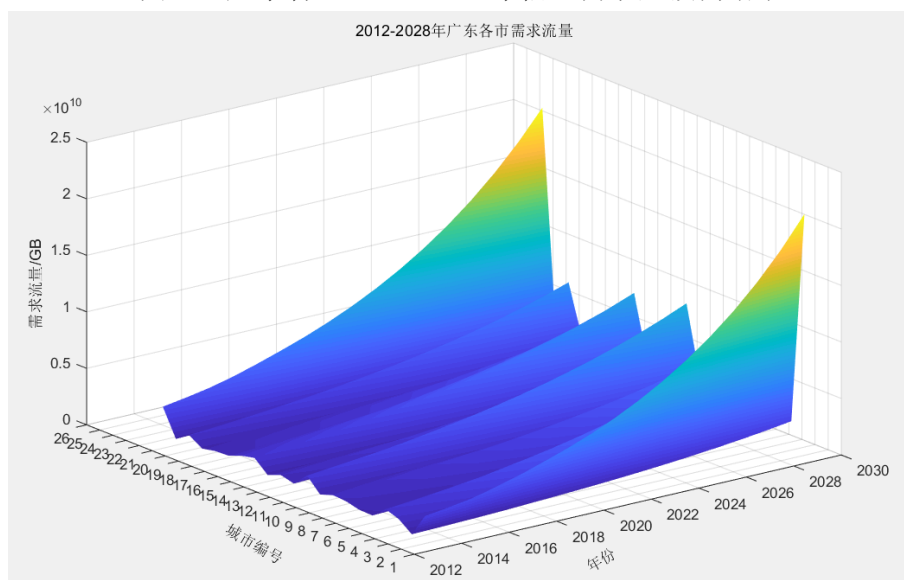


图 5.2 未来十年广东省各地级市信息需求量预测结果

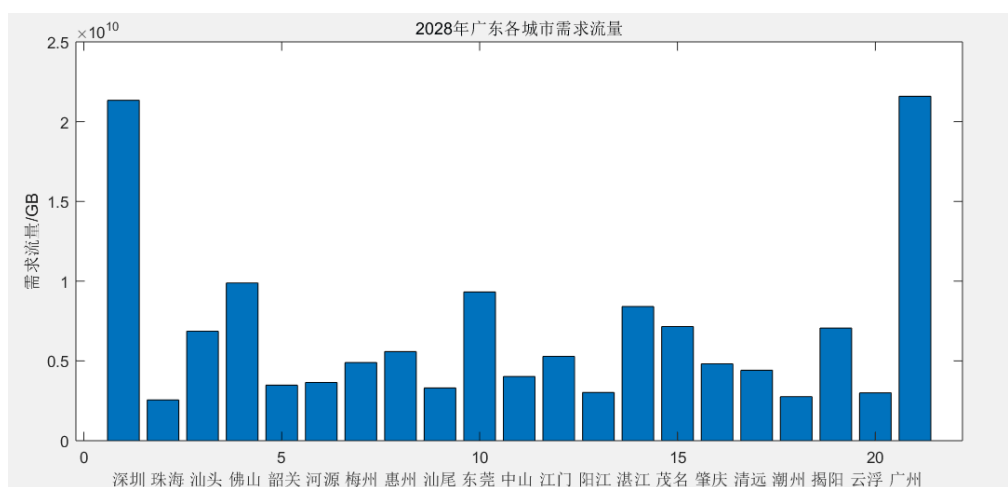


图 5.3 广东省各地级市 2028 年信息需求量预测结果

## 5.2 问题二的建模和求解

### 5.2.1 模型的建立

问题 2 要求为广东省未来电信市场建立一个有效的部署价值函数,对广东省内城际骨干网进行规划,本质就是规划从广州到其他城市的传输线使用格式及数量。设广州到第  $k$  座城市更新骨干网所用的三种格式的传输线的数目分别为  $w_k, y_k, z_k$ , 对应传输容量依次为 400Gb/s,600Gb/s,800Gb/s。

显然,网络部署价值函数应与铺设线路的预期营收和布设成本直接相关:

$$f_k(t) = f_{k1}(t) - f_{k2} \quad (17)$$

其中,  $f_k(t)$  表示第  $k$  座城市  $t$  年份的预期营收,与该城市的预估信息需求量呈正相关,即

$$f_{k1}(t) = Coe_N \cdot Need_k(t) \quad (18)$$

其中,系数  $Coe_N$  对最终的网络部署无影响,  $Coe_N$  表示信息需求对部署价值的影响系数,其数值代表了考虑部署方案时对信息需求量的侧重程度。为了满足该城市全部人群的信息需求,应有条件:

$$400w_k + 600y_k + 800z_k \geq (8 \cdot RE_{max} \cdot Need_k(t))/T \quad (19)$$

其中,  $RE_{max}$  表示网络带宽冗余,此处取值为 1.5,  $8 \cdot Need_k(t)$  表示将预估的信息需求量数据由 GB 单位转化为 Gb 单位。  $T=(365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)$ , 考虑一年 365 天每天 24 小时,将流量需求转化为流量速度需求。

式(20)中的  $f_{k2}$  指线路的布设成本,可以由每种格式传输线的使用数量、单位成本及城间距离计算得出,式子如下

$$f_{k2}(t) = Coe_L \cdot (e_k \cdot w_k \cdot 1X + e_k \cdot y_k \cdot 1.25X + e_k \cdot z_k \cdot 1.5X) \quad (20)$$

其中,系数  $Coe_L$  与式 X 中的  $Coe_N$  类似,表示线路成本对部署价值的影响系数,其数值代表了考虑部署方案时对线路成本的侧重程度,  $e_k$  表示广州与第  $k$  座城市的直线距离。每种传输格式均有距离限制和总容量限制,因此有

$$If(w_k > 0), e_k \leq 200 \quad (21)$$

$$If(y_k > 0), e_k \leq 100 \quad (22)$$

$$If(z_k > 0), e_k \leq 80 \quad (23)$$

$$w_k, y_k, z_k \leq 80 \quad (24)$$

由于三种传输格式的最大传输距离不超过 200km,而查询得到的广州与其他主要行政城市直线距离如下图:

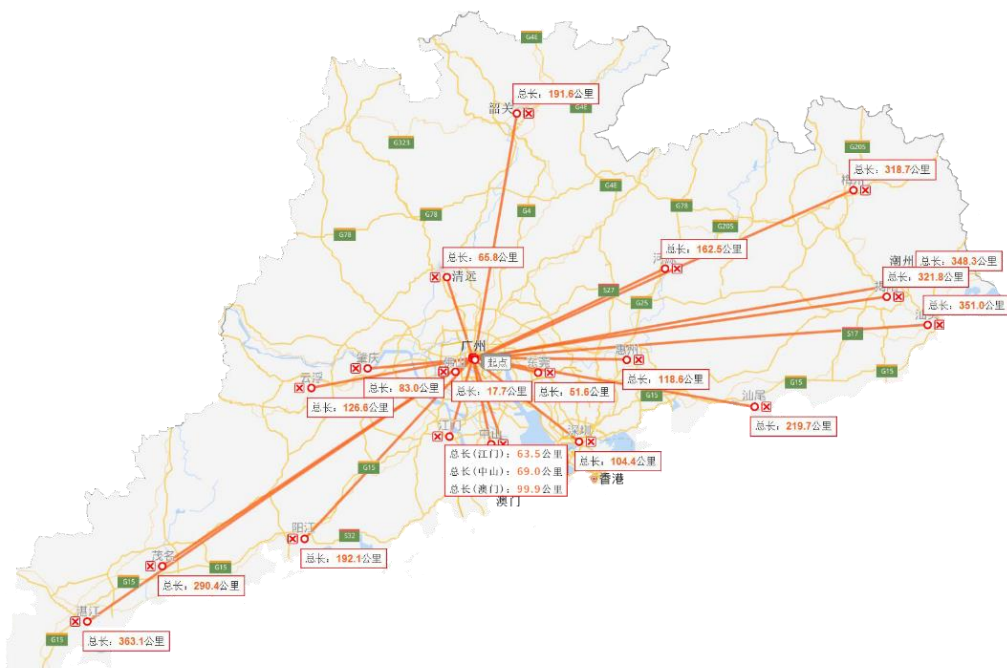


图 5.4 广州与其他主要行政城市直线距离

其中，广州与梅州、汕尾、湛江、茂名、潮州、揭阳等六城的直线距离超过 200km，因此，应当选择中间城市作为中转，选择标准为线路总距离最短，并结合城市发展水平综合考量，规划结果如下：

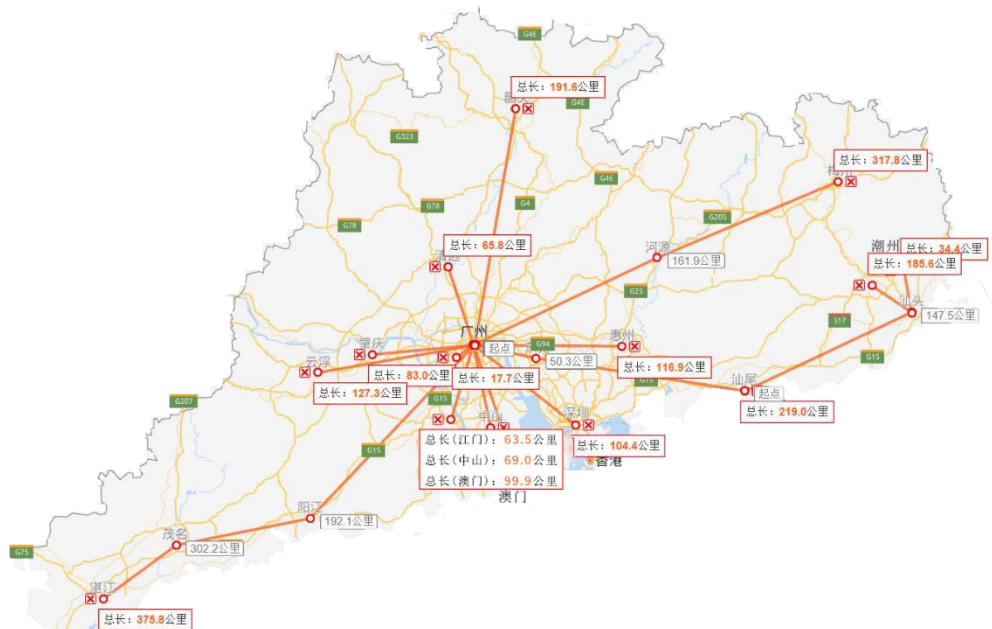


图 5.5 广州与其他主要行政城市规划直线距离

以图中汕头市为例，它既是广州到潮州等市的网络中转城市，本身也需要汕尾作为中转，相应地，规划广州到该城市的线路距离及传输容量要求都会发生变化。

从广州到中转城市所铺设线路的传输容量 应满足 该中转城市连接各城市（除广州）的总信息需求，在考虑非直连城市的线路铺设距离时 也只需要考虑其与中转城市的直线距离。结果如下表（单位：GB）：

城市	规划需求（2028）	预估信息需求量（2028）
深圳	21341704400	21341704400
珠海	2558444774	2558444774
汕头	16688918187 =本市+揭阳+潮州	6865350750
佛山	9884356577	9884356577
韶关	3481831724	3481831724
河源	8552085417 =本市+梅州	3652230803
梅州	4899854614	4899854614
惠州	5585310175	5585310175
汕尾	19996104474 =本市+汕头+揭阳+潮州	3307186287
东莞	29323369109 =本市+汕尾+汕头+揭阳+潮州	9327264635
中山	4020746413	4020746413
江门	5288761425	5288761425
阳江	18592072651 =本市+茂名+湛江	3024530944
湛江	8412519501	8412519501
茂名	15567541707 =本市+湛江	7155022206
肇庆	4820828528	4820828528
清远	4417859280	4417859280
潮州	2762327827	2762327827
揭阳	7061239611	7061239611
云浮	3001125036	3001125036
广州	21589641583	21589641583

表 5.2 广东各城市 2028 年的规划流量需求

城市	距中转城市/km	距广州/km	城市	距中转城市/km	距广州/km
深圳	104.4	104.4	中山	69	69
珠海	99.9	99.9	江门	63.5	63.5
汕头	147.5	351	阳江	192.1	192.1
佛山	17.7	17.7	湛江	73.6	363.1
韶关	191.6	191.6	茂名	110.1	290.4
河源	161.9	161.9	肇庆	83	83
梅州	155.9	317.8	清远	65.8	65.8
惠州	116.9	116.9	潮州	34.4	348.3
汕尾	168.7	219.7	揭阳	38.1	321.8
东莞	50.3	50.3	云浮	127.3	127.3

表 5.3 广东各城市的规划距离

最终，第 k 座城市的网络部署价值函数为：

$$f_k = Coe_N \cdot Need'_k - Coe_L \cdot (e'_k \cdot w_k \cdot 1X + e'_k \cdot y_k \cdot 1.25X + e'_k \cdot z_k \cdot 1.5X) \quad (25)$$

其中， $Need'_k$ 表示预估的 2028 年第  $k$  座城市的人群信息需求量（若该城市为中转城市，则表示其所连接各城的总信息需求）， $e'_k$ 表示第  $k$  座城市与广州的直线距离（若该城市不与广州直连，则表示其与中转城市的直线距离）。

由此，对于问题 2 的求解，其目标函数及约束问题可以写为：

$$\max \sum_{k=1}^{20} f_k \quad (26)$$

**s. t.**

$$\left\{ \begin{array}{l} 400w_k + 600y_k + 800z_k \geq (8 \cdot RE_{max} \cdot Need'_k)/T \quad (27) \\ w_k, y_k, z_k \in [0, 80] \quad (28) \\ If(w_k > 0), e'_k \leq 200 \quad (29) \\ If(y_k > 0), e'_k \leq 100 \quad (30) \\ If(z_k > 0), e'_k \leq 80 \quad (31) \end{array} \right.$$

### 5.2.2 模型的求解

问题 2 实质是一个求解多约束下目标函数最优解的整数规划问题，本文利用人工蜂群算法进行求解。

通过人工蜂群算法的求解，得到了满足 2028 年广东各市信息需求的网络部署最优方案，见下表：

城市	$w_k$	$y_k$	$z_k$	城市	$w_k$	$y_k$	$z_k$
深圳	21	0	0	中山	0	0	2
珠海	1	1	0	江门	0	1	2
汕头	16	0	0	阳江	18	0	0
佛山	0	1	4	湛江	1	1	3
韶关	4	0	0	茂名	15	0	0
河源	9	0	0	肇庆	2	2	0
梅州	5	0	0	清远	0	3	0
惠州	6	0	0	潮州	0	2	0
汕尾	20	0	0	揭阳	1	0	3
东莞	0	0	14	云浮	3	0	0

表 5.4 2028 年网络部署最优方案

其中， $w_k, y_k, z_k$  分别为广州到第  $k$  座城市更新骨干网所用的三种格式的传输线的数目，对应传输容量依次为 400Gb/s, 600Gb/s, 800Gb/s。

对应的广东各市的网络部署价值如下图：

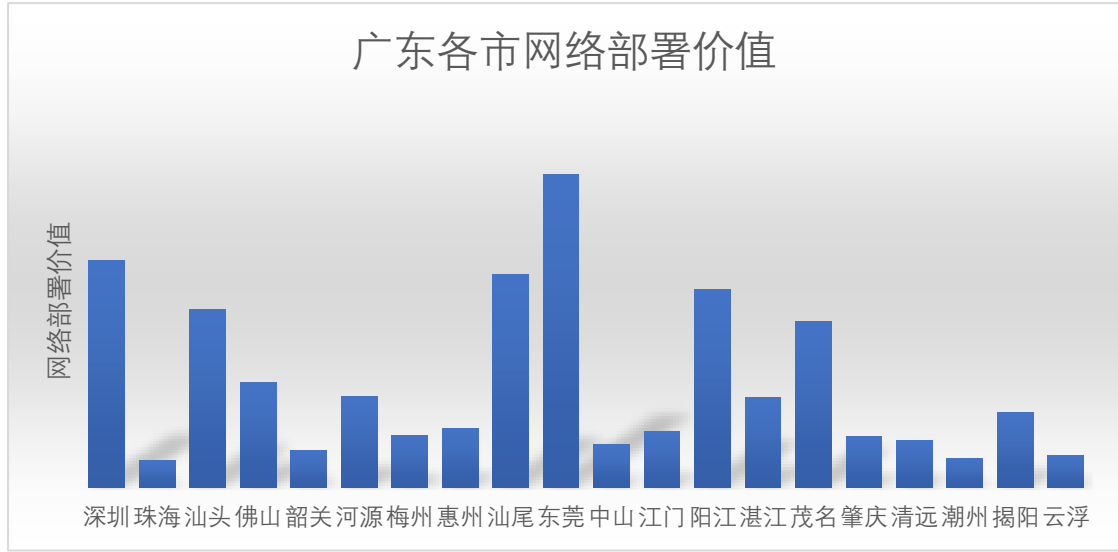


图 5.6 2028 年广东各市网络部署价值

由于本模型的结果为无量纲的数值，仅作为各城市部署价值相互比较的参考，因此只给出了相对部署价值。

### 5.3 问题三的建模和求解

#### 5.3.1 模型的建立

问题 3 在问题 2 的基础上，将不同人群的网络接入价值也纳入考虑，并选择性的接入网络价值大的人群。为此，本文引入了人群网络接入价值参数，结果如下：

$$V_k(t) = \frac{AvIncome^p \cdot Sage^q}{\max\{AvIncome^p \cdot Sage^q\}} \quad (32)$$

其中， $p$  为收入结构差距指数， $q$  为年龄结构差距指数。在本模型中取  $p=q=3$ ，取值越大，则各城市之间的网络价值差距被放大的越大。

利用该参数重新构建网络部署价值函数，可以采用多种办法，本文采取的处理思路为：从铺设线路（布设成本）的角度考虑人群网络接入价值，降低通向网络价值较低人群的带宽冗余，从而减少骨干网的布设成本。结果如下；

$$RE = RE_{min} + V_k(t) \cdot (RE_{max} - RE_{min}) \quad (33)$$

其中， $RE_{min}, RE_{max}$  表示最小和最大的网络带宽冗余系数，在本模型中分别取 1 和 1.5。网络接入价值参数  $V_k(t)$  作为网络带宽冗余的影响因子，使得不同地区人群的带宽冗余度在  $RE_{min} \sim RE_{max}$  范围内变动。

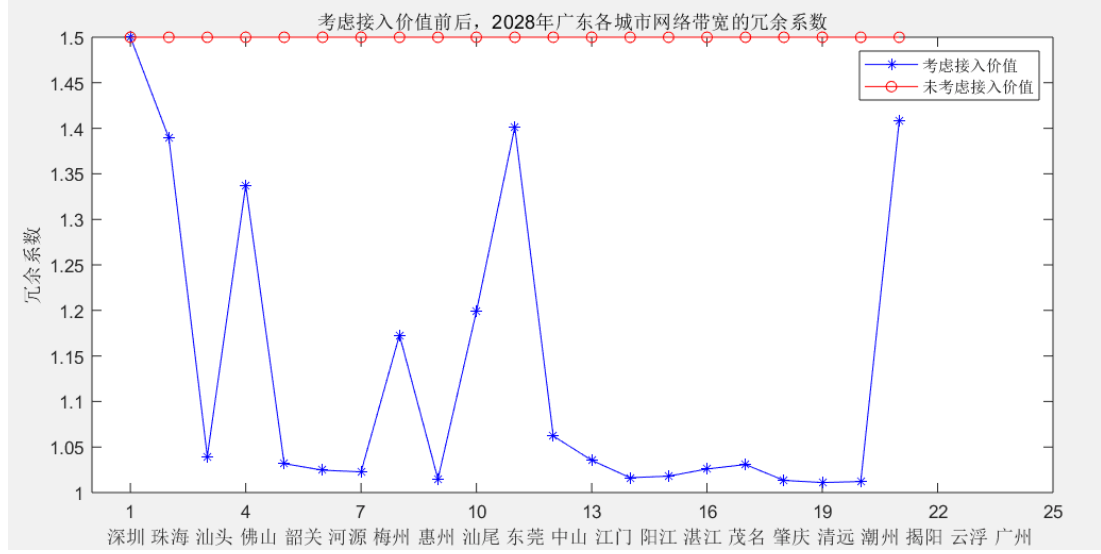


图 5.7 考虑接入价值前后，2028 年广东个城市网络带宽的冗余系数

由此，对于问题 2 的求解，其目标函数及约束问题可以写为：

$$\max \sum_{k=1}^{20} f_k \quad (34)$$

**s. t.**

$$\left\{ \begin{array}{l} 400w_k + 600y_k + 800z_k \geq (8 \cdot \text{RE} \cdot \text{Need}'_k)/T \quad (35) \\ w_k, y_k, z_k \in [0, 80] \quad (36) \\ \text{If}(w_k > 0), e'_k \leq 200 \quad (37) \\ \text{If}(y_k > 0), e'_k \leq 100 \quad (38) \\ \text{If}(w_k > 0), e'_k \leq 80 \quad (39) \end{array} \right.$$

### 5.3.2 模型的求解

问题 3 的求解方法与问题 2 一致，均采用人工蜂群算法，然后即可得到考虑了不同人群网络接入价值后的最优部署方案，见下表：

城市	$w_k$	$y_k$	$z_k$	城市	$w_k$	$y_k$	$z_k$
深圳	21	0	0	中山	0	0	2
珠海	1	1	0	江门	0	0	2
汕头	11	0	0	阳江	13	0	0
佛山	1	1	3	湛江	0	1	2
韶关	3	0	0	茂名	11	0	0
河源	6	0	0	肇庆	0	3	0

梅州	4	0	0	清远	0	2	0
惠州	5	0	0	潮州	0	0	1
汕尾	13	0	0	揭阳	0	2	1
东莞	0	3	8	云浮	2	0	0

表 5.5 考虑各城市的接入价值后 2028 年网络部署最优方案

相比于问题 2 的网络部署方案，问题 3 所采取的方案使得广东全省的网络部署总价值增加了 **5169.049957X** 万元，原因在于各个城市布线成本有所降低，如下图所示：

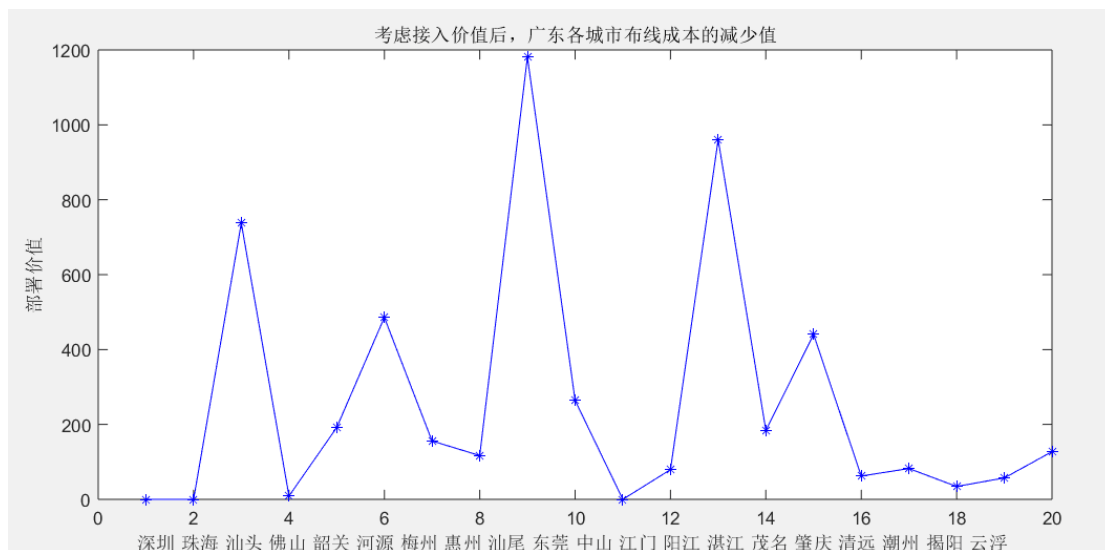


图 5.8 考虑接入价值后，广东各城市布线成本的减少值

## 六 模型的评价与推广

### 6.1 模型的评价

#### 6.1.1 模型的优点

需求预测方面，本文基于社科机理和规律，以信息需求的马太效应和指数趋势为支撑建立模型。同时，本文模型考虑了各城市人群结构的差异，在保证一定程度严谨的情况下作简化，构建了人群结构综合评分体系，有一定的创新。

网络规划方面，本文模型在需求量的基础上，为网络带宽设置了一定的冗余，后挖掘了其与接入价值的关联，将接入价值体现于其上，有一定创新。

优化设计方面，我们将人工蜂群算法（ABC）与本模型相结合，通过题目所给条件建立 ABC 算法的优化目标函数，对不等式约束条件，做罚函数处理，最终解得的参数对模型也有较高的契合度。由于人工蜂群算法不存在求导和函数连续化的限定，具有更好的全局优化能力，本文用人工蜂群算法求解设计最优化是创新之处。



### 6.1.2 模型的缺点

需求预测方面，本文模型具有一定合理性，但部分细节不够精准，还待完善。受限于统计周期和数据，在考虑年龄结构时，本文模型忽略了其逐年的变化。此外，在考虑人口、收入增长时，为简化模型，认为增长平稳，未来逐年增长匀速。但实际上，受政策等的影响，可能存在增长较快或较慢的年份。

### 6.2 模型的推广

需求预测方面，本文模型涉及各城市人口、收入的增长，可进一步研究其增长规律，提高模型准确度。此外，本文仅从收入、年龄两个维度，研究了人群结构、新科技接受度和人群接入价值，可进一步增加维度，如性别、职业等，进一步区分人群。

部署价值方面，本文模型分别考虑了需求量和网络规划两方面问题，并考虑了前者对后者的影响，可进一步分析后者对前者的影响，完善耦合关系。同时，网络规划方面，可优化算法，做到拓扑最优，成本最低。

## 七 参考文献

- [1] Voelker C, Hoffmann S, Kornadt O, et al. Heat and moisture transfer through clothing[J]. Center for the Built Environment, 2010.
- [2]刘鹰.广东省 IP 数据网络规划方法探讨[J].电视技术,2013,37(05):125-127.
- [3]刘鹰,陈文华.基于流量预测的 IP 骨干网络优化[J].广东通信技术, 2003, 23(1):6-9.
- [4]袁红,吴明明.用户信息需求的马太效应及实证分析[J].情报科学, 2011(5):747-751.

## 附录

%=====微波问题 1, 2.1=====%

%%%

%ABC 算法(ABC\_fit.m)

%%%

clear all;close all;clc

ReadData;%设置参数

fprintf('数据读取完成\n');

global m\_direction

/\*ABC 算法参数设置\*/

NP=800;%采蜜蜂的个数或观察蜂的个数与蜜源的数量相等

maxCycle=500;%算法最大迭代次数

objfun='p\_1\_1';%目标函数

% ub=[ 1\*ones(1,64) pi/32\*ones(1,32) 10\*ones(1,32) 0.7 10000 0.1 0.25  
pi/2];%参数的取值上限[x1,x2,...]

% lb=[ -1\*ones(1,64) -pi/32\*ones(1,32) 0\*ones(1,32) 0.2 0 0 0  
0];%参数的取值下限[x1,x2,...]

ub=[4\*ones(1,32)];

lb=[1\*ones(1,32)];

model=1;%模式设置：0 代表实数规划，1 代表整数规划

u=1;%领域搜索收敛因子，取值越小，收敛越慢，取值为(0,1]

du=200;%收敛梯度

/\*ABC 算法参数设置\*/

k=1;%方向个数(55)

FoodNumber=NP/2;%食物数量

D=size(ub,2);%参数个数

limit=NP\*D;

runtime=k;%算法运行次数

GlobalMins=zeros(1,runtime);

for r=1:runtime

m\_direction=r;

Range=ub-lb;

Lower=lb;

Foods = rand(FoodNumber,D);%rand 生成 FoodNumber\*D 大小的矩阵,元素为 0:

1

for i=1:D

```

        if model==1
            Foods(:,i) = round(Foods(:,i) .* Range(i) + Lower(i));
        else
            Foods(:,i) = Foods(:,i) .* Range(i) + Lower(i);
        end
    end

ObjVal=feval(objfun,Foods);%feval 用来计算指定函数在某点的函数值
Fitness=calculateFitness(ObjVal);

trial=zeros(1,FoodNumber);%初始化每个食物的 trial 为 0

%/*The best food source is memorized*/
BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));%find 函数找到 ObjVal 数组中的最小值的位置
BestInd=BestInd(end);%取 ObjVal 数组中最后的最小值的位置
GlobalMin=ObjVal(BestInd);%记录函数的最小值
GlobalParams=Foods(BestInd,:);%记录函数最小值对应的参数 (x,y)

iter=1;
while (iter <= maxCycle)
    deta=u^(iter/du);%引入领域搜索收敛因子
    %雇佣蜂先采一批蜜源回去供观察蜂观察
    %%%%%%%%%%EMPLOYED%%%%%%%%%BEE
    PHASE %%%%%%%%%%
    for i=1:(FoodNumber)

        %/*The parameter to be changed is determined randomly*/
        Param2Change=fix(rand*D)+1;%在[1:D]随机生成一个整数

        %/*A randomly chosen solution is used in producing a mutant
        %solution of the solution i*/
        neighbour=fix(rand*FoodNumber)+1;%即在所有食物中随机挑选食物
        %/*Randomly selected solution must be different from the solution i
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*FoodNumber)+1;
        end

        sol=Foods(i,:);

        if model==0
            sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
                (Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
                *(rand-0.5)*2*deta;%实数规划
        end
    end
end

```

```

else
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
    round((Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
        *(rand-0.5)*2*deta);% 整数规划
end
% /*if generated parameter value is out of boundaries, it is
% shifted onto the boundaries*/
ind=find(sol<lb);
sol(ind)=lb(ind);
ind=find(sol>ub);
sol(ind)=ub(ind);

%evaluate new solution
ObjValSol=feval(objfun,sol);
FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);

% /*a greedy selection is applied between the current solution i
% and its mutant
if (FitnessSol>Fitness(i)) /*If the mutant solution is better than
    %the current solution i, replace the solution with the mutant
    %and reset the trial counter of solution i*/
    Foods(i,:)=sol;
    Fitness(i)=FitnessSol;
    ObjVal(i)=ObjValSol;
    trial(i)=0;
else
    trial(i)=trial(i)+1;
end
end
end
prob=Fitness./sum(Fitness);

i=1;
t=0;
while(t<FoodNumber)

    if isnan(prob(:))
        break;
    end

    if(rand<prob(i))
        t=t+1;
        /*The parameter to be changed is determined randomly*/
        Param2Change=fix(rand*D)+1;

```

```

    /*A randomly chosen solution is used in producing a mutant
    %solution of the solution i*/
    neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

    /*Randomly selected solution must be different from the solution i
    while(neighbour==i)
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
    end

sol=Foods(i,:);

if model==0
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
    (Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
    *(rand-0.5)*2*deta;% 实数规划
else
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
    round((Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
    *(rand-0.5)*2*deta);% 整数规划
end

ind=find(sol<lb);
sol(ind)=lb(ind);
ind=find(sol>ub);
sol(ind)=ub(ind);

%evaluate new solution
ObjValSol=feval(objfun,sol);
FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);

% /*a greedy selection is applied between the current solution i and
%its mutant*/
if (FitnessSol>Fitness(i)) /*If the mutant solution is better than
%the current solution i, replace the solution with the mutant and
%reset the trial counter of solution i*/
    Foods(i,:)=sol;
    Fitness(i)=FitnessSol;
    ObjVal(i)=ObjValSol;
    trial(i)=0;
else
    trial(i)=trial(i)+1;
end
end
end

```

```

        i=i+1;
        if (i==(FoodNumber)+1) %确保每个蜜源至少被观察 1 次
            i=1;
        end
    end
end

%/*The best food source is memorized*/
    ind=find(ObjVal==min(ObjVal));
    ind=ind(end);
    if (ObjVal(ind)<GlobalMin)
        GlobalMin=ObjVal(ind);
        GlobalParams=Foods(ind,:);%储存最小函数值对应参数
    end
ind=find(trial==max(trial));
ind=ind(end);
if (trial(ind)>limit)
    Bas(ind)=0;

    if model==0
        sol=(ub-lb).*rand(1,D)+lb;%实数规划
    else
        sol=round((ub-lb).*rand(1,D))+lb;%整数规划
    end

    ObjValSol=feval(objfun,sol);
    FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);
    Foods(ind,:)=sol;
    Fitness(ind)=FitnessSol;
    ObjVal(ind)=ObjValSol;
end
iter=iter+1;

if GlobalMin==inf
    iter=1;
    Range=ub-lb;
    Lower=lb;
    Foods = rand(FoodNumber,D);%rand 生成 FoodNumber*D 大小的矩阵，元素
    为 0: 1
    for i=1:D
        if model==1
            Foods(:,i) = round(Foods(:,i) .* Range(i) + Lower(i));
        else
            Foods(:,i) = Foods(:,i) .* Range(i) + Lower(i);
        end
    end
end

```

```

end
ObjVal=feval(objfun,Foods,r);%feval 用来计算指定函数在某点的函数值
Fitness=calculateFitness(ObjVal);
trial=zeros(1,FoodNumber);%初始化每个食物的 trial 为 0
%/*The best food source is memorized*/
BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));%find 函数找到 ObjVal 数组中的最小值
的位置
BestInd=BestInd(end);%取 ObjVal 数组中最后的最小值的位置
GlobalMin=ObjVal(BestInd);%记录函数的最小值
GlobalParams=Foods(BestInd,:);%记录函数最小值对应的参数 (x,y)
end

fprintf('代数=%d GlobalMin=%g\n',iter-1,GlobalMin);
X(iter)=iter;
Y(iter)=GlobalMin;

end% End of ABC
GlobalMins(r)=GlobalMin;

GlobalParams %输出参数

Solutions(r,:)=GlobalParams;
end %end of runs

figure(1);
plot(X(2:end),Y(2:end));
xlabel('迭代次数');
ylabel('函数取值');
save all;

filename=['天线问题 2,55 个方向相位配置.mat'];
% filename=['天线问题 1 相位配置.mat'];
save (filename,'GlobalMin','Solutions');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%天线问题 1、2.1(p_1_1.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function ObjVal = p_1_1(Chrom)

global E EL m_direction%水平角
E_temp=zeros(size(EL));
ObjVal=zeros(size(Chrom,1),1);
for i=1:size(Chrom,1)

```

```

for j=1:32

    E_temp=E_temp+Chrom(i,j).*E(:,j,Chrom(i,j+32));%天线问题一
    E_temp=E_temp+E(:,j,Chrom(i,j));%天线问题二

end

E_temp=abs(E_temp);
Emax1=max(max(E_temp));
pos=find(E_temp==Emax1);
E_temp1=E_temp;
E_temp1(pos)=0;
Emax2=max(max(E_temp1));

ObjVal(i)=Emax2/Emax1+E_temp(39,21)+abs(E_temp(39,20)-10^(35/20));%天线问题一

% m_row=32+ceil(m_direction/5)-1;
% m_col=17+m_direction-1-(m_row-32)*5;
%
% ObjVal(i)=Emax2/Emax1+abs(Emax1/E_temp(m_row,m_col)-1);%天线问题二

end

end

%=====天线问题 2.2=====
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%天线问题 2.2(p_1_2.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function ObjVal = p_1_2(Chrom)

global ME_max

ObjVal=zeros(size(Chrom,1),1);
S1=30.71;
S2=14.27;
for i=1:size(Chrom,1)
    AreaOver=0;
    for k=1:size(ME_max,1)

```



```

    if Chrom(i,k)==0
        continue;
    end

    if mod(k,5)~=0&& k+1<=55&&Chrom(i,k+1)==1%判断右方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S1;
    end

    if mod(k,5)~=0&& k+5+1<=55&&Chrom(i,k+5+1)==1%判断右下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S2;
    end

    if k+5<=55&&Chrom(i,k+5)==1%判断下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S1;
    end

    if mod(k,5)~=1&& k+5-1<=55&&Chrom(i,k+5-1)==1%判断左下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S2;
    end
%    m_row=32+ceil(k/5)-1;
%    m_col=17+k-1-(m_row-32)*5;

end

Number=sum(Chrom(i,:));%波束个数
Power=10*log10(sum(ME_max(find(Chrom(i,:)==1)).^2)/72);%平均功率
Area1=sum(Chrom(i,:))*25*pi-AreaOver;%波束覆盖面积
Area2=1800-Area1;%凹坑面积
ObjVal(i)=Number*(4*Area2/1800+abs(Power-35));

end

end

%=====相关数据载入、绘图=====
%%%%%%%%%%%%%
%ABC 适宜度函数(calculateFitness.m)
%%%%%%%%%%%%%
function fFitness=calculateFitness(fObjV)
fFitness=zeros(size(fObjV));
ind=find(fObjV>=0);
fFitness(ind)=1./(fObjV(ind)+1);
ind=find(fObjV<0);
fFitness(ind)=1+abs(fObjV(ind));

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%载入相关数据(ReadData.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global ERang EPhase E EL AZ

load('raw_data.mat');
EL=raw_data.EL./180*pi;%垂直角
AZ=raw_data.AZ./180*pi;%水平角
LogMag_ini=raw_data.LogMag;
Phase_ini=raw_data.Phase;

for i=1:16%重新排阵
LogMag(:,i,:)=LogMag_ini(:,16-i+1,:);
Phase(:,i,:)=flipud(Phase_ini(:,16-i+1,:));
end
LogMag(:,17:24,:)=LogMag_ini(:,25:32,:);
LogMag(:,25:32,:)=LogMag_ini(:,17:24,:);
Phase(:,17:24,:)=Phase_ini(:,25:32,:);
Phase(:,25:32,:)=Phase_ini(:,17:24,:);

ERang=10.^(LogMag./20);%电压幅度
EPhase=Phase;%电压相位，弧度

E=ERang.*exp(1i.*EPhase);
E(:,13,:)=rot90(E(:,20,:),2);
E(:,28,:)=rot90(E(:,5,:),2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%相关数据绘图(Print4.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
close all

ReadData;
load('天线问题 2 多波束配置.mat');
ME_max=load('天线问题 2,55 个配置对应场强最大值.mat');
ME_max=ME_max.value';
Configure=load('天线问题 2,55 个方向相位配置.mat');
Configure=Configure.Solutions;
E_max=zeros(73,37);

```

```

for i=1:55

    if Solutions(i)==0
        continue;
    end

    E_temp=zeros(73,37);
    for j=1:32
        E_temp=E_temp+E(:,j,Configure(i,j));
    end
    E_temp=abs(E_temp);
    for m=1:73
        for n=1:37
            if E_temp(m,n)>E_max(m,n)
                E_max(m,n)=E_temp(m,n);
            end
        end
    end

    m_row=42-ceil(i/5)+1;
    m_col=17+i-1-(42-m_row)*5;

    x=m_col;
    y=m_row;

    r = 1;
    theta=0:0.01:2*pi ; % 圆滑性设置
    Circle1=x+r*cos(theta);
    Circle2=y+r*sin(theta);
    plot(Circle1,Circle2,'Color','r','linewidth',1);
    hold on;
    plot(x,y,'b*');
    hold on;
    axis([15 23 30 44])
    axis equal

end

rectangle('Position',[16,31,6,12]);
xbins=-35:10:40;
ybins=35:-10:-40;
set(gca,'XTickLabel',xbins);% 设置要显示坐标刻度
set(gca,'YTickLabel',ybins);
title([]);
x1=xlabel('仰角/° ');

```

```

x2=ylabel('水平夹角/° ');

figure(2);
E_max=20*log10(flipud(E_max));
contourf(E_max(25:49,9:29),25);
colorbar;
axis equal
% xbins=-45:10:50;
% ybins=45:-10:-50;
% set(gca,'XTickLabel',xbins);% 设置要显示坐标刻度
% set(gca,'YTickLabel',ybins);
title([]);
x1=xlabel('仰角/° ');
x2=ylabel('水平夹角/° ');

AreaOver=0;
S1=30.71;
S2=14.27;
for k=1:size(ME_max,1)

    if Solutions(k)==0
        continue;
    end

    if mod(k,5)~=0&& k+1<=55&& Solutions(k+1)==1%判断右方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S1;
    end

    if mod(k,5)~=0&& k+5+1<=55&& Solutions(k+5+1)==1%判断右下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S2;
    end

    if k+5<=55&& Solutions(k+5)==1%判断下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S1;
    end

    if mod(k,5)~=1&& k+5-1<=55&& Solutions(k+5-1)==1%判断左下方是否有波束
        AreaOver=AreaOver+S2;
    end

end

```

```

Number=sum(Solutions);%波束个数
Power=10*log10(sum(ME_max(find(Solutions==1)).^2)/72);% 平均功率
Area1=sum(Solutions)*25*pi-AreaOver;%波束覆盖面积
Area2=1800-Area1;%凹坑面积
ObjVal=Number*(2*Area2/1800+abs(Power-35));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%球坐标绘图 (Print3.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all

load('raw_data.mat');
load('天线问题 1 相位配置.mat');
% load('天线问题 2,55 个方向相位配置.mat');
EL=raw_data.EL;
AZ=raw_data.AZ;
LogMag_ini=raw_data.LogMag;
Phase_ini=raw_data.Phase;

for i=1:16
LogMag(:,i,:)=LogMag_ini(:,16-i+1,:);
Phase(:,i,:)=flipud(Phase_ini(:,16-i+1,:));
end
LogMag(:,17:24,:)=LogMag_ini(:,25:32,:);
LogMag(:,25:32,:)=LogMag_ini(:,17:24,:);
Phase(:,17:24,:)=Phase_ini(:,25:32,:);
Phase(:,25:32,:)=Phase_ini(:,17:24,:);

LogMag(:,13,:)=rot90(LogMag(:,20,:),2);
LogMag(:,28,:)=rot90(LogMag(:,5,:),2);
Phase(:,13,:)=rot90(Phase(:,20,:),2);
Phase(:,28,:)=rot90(Phase(:,5,:),2);

theta=0:pi/36:pi; %定义 theta 角的范围 (0-pi)
phi=0:pi/36:2*pi; %定义 j 角的范围 (0-2pi)
[tt,pp]=meshgrid(theta,phi); %把空间分为空间角的单元

phase_choose=4;
initial_phase=4;
% Solutions=ones(1,64);
for j=1:1

```

```

        r=zeros(73,37);
    for i=1:32

        %     phase_choose=rem((initial_phase+i-1),4);%等间相位
        %     if phase_choose==0
        %         phase_choose=4;
        %     end

        phase_choose=Solutions(i+32);
        m=Solutions(i);
        %     phase_choose=Solutions(j,i);
        %     m=1;

        if ~isnan(LogMag(:,i,phase_choose))

            ERang=10.^(LogMag(:,i,phase_choose)./20);% 电压幅度
            EPhase=Phase(:,i,phase_choose);% 电压相位， 弧度

            r=r+m*ERang.*exp(1i.*EPhase);

        %
        %     r=abs(r);
        %
        %     m=i;
        %     if i>8&&i<=16
        %         m=16-(i-8-1);
        %     end
        %     if i>24&&i<=32
        %         m=32-(i-24-1);
        %     end
        %     subplot(4,8,m);
        %     [x,y,z]=sph2cart(pp,pi/2-tt,r); %把球坐标转化成笛卡尔坐标
        %     mesh(x,y,z); %绘制网格图形
        %     surf(x,y,z,r); %绘制三维曲面
        %     axis equal;
        %     colorbar;
        %     surf(EL,AZ,r);

        end

    end

    r=abs(r);
    % r=20.*log10(r);

```

```

% value(j)=max(max(r));
end
% filename='天线问题 2,55 个配置对应场强最大值.mat';
% save (filename,'value');

figure(1);
[x,y,z]=sph2cart(pp,pi/2-tt,r); %把球坐标转化成笛卡尔坐标
mesh(x,y,z); %绘制网格图形
surf(x,y,z); %绘制三维曲面
axis equal;

figure(2);
surf(EL,AZ,r);

% subplot(1,2,1);
figure(3);
b=bar3(r);
c = colorbar;
c.Label.String = 'P/dBm';
for k = 1:length(b)
    zdata = b(k).ZData;
    b(k).CData = zdata;
    b(k).FaceColor = 'interp';
end
xbins=-90:10:90;
ybins=-180:10:180;
set(gca,'XTickLabel',xbins);% 设置要显示坐标刻度
set(gca,'YTickLabel',ybins);
set(gca,'YTick',1:2:74);
set(gca,'XTick',1:2:38);
title([]);
x1=xlabel('仰角/° ');
x2=ylabel('水平夹角/° ');
x3=zlabel('P/dBm');
% set(x1,'Rotation',30);
% set(x2,'Rotation',-30);

```

%===== 骨 干 网 问 题 一 代 码  
=====%

%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%

%ABC 算法

%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%

clear all;close all;clc

for name=1:1

SetParams;% 设置参数

fprintf('数据读取完成\n');

/\*ABC 算法参数设置\*/

NP=500;%采蜜蜂的个数或观察蜂的个数与蜜源的数量相等

maxCycle=1500;% 算法最大迭代次数

objfun='p\_2\_2\_1'; % 目标函数

ub=[1 1]; % 参数的取值上限[x1,x2,...]

lb=[0 0];% 参数的取值下限[x1,x2,...]

model=0;% 模式设置：0 代表实数规划，1 代表整数规划

u=1;% 领域搜索收敛因子，取值越小，收敛越慢，取值为(0,1]

du=200;% 收敛梯度

/\*ABC 算法参数设置\*/

FoodNumber=NP/2; % 食物数量

D=size(ub,2); % 参数个数

limit=NP\*D;

runtime=1;% 算法运行次数

GlobalMins=zeros(1,runtime);

for r=1:runtime

Range=ub-lb;

Lower=lb;

Foods = rand(FoodNumber,D);%rand 生成 FoodNumber\*D 大小的矩阵，元素为 0:

1

for i=1:D

if model==1

Foods(:,i) = round(Foods(:,i) .\* Range(i) + Lower(i));

else

Foods(:,i) = Foods(:,i) .\* Range(i) + Lower(i);

end

end



```

ObjVal=feval(objfun,Foods);%feval 用来计算指定函数在某点的函数值
Fitness=calculateFitness(ObjVal);

trial=zeros(1,FoodNumber);%初始化每个食物的 trial 为 0

%/*The best food source is memorized*/
BestInd=find(ObjVal==min(ObjVal));%find 函数找到 ObjVal 数组中的最小值的位置
BestInd=BestInd(end);%取 ObjVal 数组中最后的最小值的位置
GlobalMin=ObjVal(BestInd);%记录函数的最小值
GlobalParams=Foods(BestInd,:);%记录函数最小值对应的参数 (x,y)

iter=1;
while (iter <= maxCycle)
    deta=u^(iter/du);%引入领域搜索收敛因子
    %雇佣蜂先采一批蜜源回去供观察蜂观察
    %%%%%%%%%%EMPLOYED%%%%%%%%%BEE
    PHASE %%%%%%%%%%
    for i=1:(FoodNumber)

        %/*The parameter to be changed is determined randomly*/
        Param2Change=fix(rand*D)+1;%在[1:D]随机生成一个整数

        %/*A randomly chosen solution is used in producing a mutant
        %solution of the solution i*/
        neighbour=fix(rand*FoodNumber)+1;%即在所有食物中随机挑选食物
        %/*Randomly selected solution must be different from the solution i
        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*FoodNumber)+1;
        end

        sol=Foods(i,:);

        if model==0
            sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
                (Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
                *(rand-0.5)*2*deta;%实数规划
        else
            sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
                round((Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
                *(rand-0.5)*2*deta);%整数规划
        end
        % /*if generated parameter value is out of boundaries, it is

```

```

%shifted onto the boundaries*/
ind=find(sol<lb);
sol(ind)=lb(ind);
ind=find(sol>ub);
sol(ind)=ub(ind);

%evaluate new solution
ObjValSol=feval(objfun,sol);
FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);

% /*a greedy selection is applied between the current solution i
%and its mutant
if (FitnessSol>Fitness(i)) /*If the mutant solution is better than
    %the current solution i, replace the solution with the mutant
    %and reset the trial counter of solution i*/
    Foods(i,:)=sol;
    Fitness(i)=FitnessSol;
    ObjVal(i)=ObjValSol;
    trial(i)=0;
else
    trial(i)=trial(i)+1;
end
end

prob=Fitness./sum(Fitness);

i=1;
t=0;
while(t<FoodNumber)

    if isnan(prob(:))
        break;
    end

    if(rand<prob(i))
        t=t+1;
        /*The parameter to be changed is determined randomly*/
        Param2Change=fix(rand*D)+1;

        /*A randomly chosen solution is used in producing a mutant
        %solution of the solution i*/
        neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;

        /*Randomly selected solution must be different from the solution i

```

```

        while(neighbour==i)
            neighbour=fix(rand*(FoodNumber))+1;
        end

sol=Foods(i,:);

if model==0
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
    (Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
    *(rand-0.5)*2*deta;% 实数规划
else
sol(Param2Change)=Foods(i,Param2Change)+...
    round((Foods(i,Param2Change)-Foods(neighbour,Param2Change))...
    *(rand-0.5)*2*deta);% 整数规划
end

ind=find(sol<lb);
sol(ind)=lb(ind);
ind=find(sol>ub);
sol(ind)=ub(ind);

%evaluate new solution
ObjValSol=feval(objfun,sol);
FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);

% /*a greedy selection is applied between the current solution i and
% its mutant*/
if (FitnessSol>Fitness(i)) %/*If the mutant solution is better than
% the current solution i, replace the solution with the mutant and
% reset the trial counter of solution i*/
    Foods(i,:)=sol;
    Fitness(i)=FitnessSol;
    ObjVal(i)=ObjValSol;
    trial(i)=0;
else
    trial(i)=trial(i)+1;
end
end

i=i+1;
if (i==(FoodNumber)+1) % 确保每个蜜源至少被观察 1 次
    i=1;
end
end
end

```

```

%/*The best food source is memorized*/
    ind=find(ObjVal==min(ObjVal));
    ind=ind(end);
    if (ObjVal(ind)<GlobalMin)
        GlobalMin=ObjVal(ind);
        GlobalParams=Foods(ind,:);%储存最小函数值对应参数
    end
ind=find(trial==max(trial));
ind=ind(end);
if (trial(ind)>limit)
    Bas(ind)=0;

    if model==0
        sol=(ub-lb).*rand(1,D)+lb;%实数规划
    else
        sol=round((ub-lb).*rand(1,D))+lb;%整数规划
    end

    ObjValSol=feval(objfun,sol);
    FitnessSol=calculateFitness(ObjValSol);
    Foods(ind,:)=sol;
    Fitness(ind)=FitnessSol;
    ObjVal(ind)=ObjValSol;
end

iter=iter+1;
fprintf('代数=%d GlobalMin=%g\n',iter-1,GlobalMin);
X(iter)=iter;
Y(iter)=GlobalMin;

end% End of ABC
GlobalMins(r)=GlobalMin;

GlobalParams %输出参数
end %end of runs

figure(1);
plot(X(2:end),Y(2:end));
xlabel('迭代次数');
ylabel('函数取值');
save all;

filename=['骨干问题 2 参数第' num2str(name) '次拟合相关数据(p,q).mat'];

```

```

    save (filename,'GlobalMin','GlobalParams');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%参数拟合 (CoeIncome、CoeAge、SpeedTec、CoeT)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function ObjVal = p_2_1_1(Chrom)

global...
Flow People Need Accept SpeedTec...
S Sincome Sage CoeIncome CoeAge CoeT

ObjVal=zeros(size(Chrom,1),1);
for i=1:size(Chrom,1)

    CoeIncome=Chrom(i,1);
    CoeAge=Chrom(i,2);
    SpeedTec=Chrom(i,3);
    CoeT=Chrom(i,4);

    S=CoeIncome.*Sincome+CoeAge.*Sage;%每个城市的综合评价（年龄评价系
数*年龄评价+收入评价系数*收入评价）

    for k=1:size(S,2)
        Accept(:,k)=-1./(S(:,k)+1)+1;%每个城市科技接受度,取值范围[0,1]
        S(:,k)=S(:,k).^(CoeT*k);
    end

    Need=S.*SpeedTec.*Accept.*People;%每个城市的流量需求量

    SSR=sum((sum(Need)-Flow').^2);
%    SST=sum((sum(Need)-sum(Flow)/size(Flow,1)).^2);

%    ObjVal(i)=abs(SSR/SST-1);

    ObjVal(i)=SSR;

    if CoeIncome==0||CoeAge==0||SpeedTec==0
        ObjVal(i)= 10*ObjVal(i);
    end
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%需求量预估
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

```

```

SetParams;% 设置初始化参数

```

```

Future=2028;% 模型预估时间
dt=Future-Now;
t0=size(People,2);

```

```

% 参数扩充
AvGdp=[AvGdp zeros(21,dt-t0+1)];
Accept=[Accept zeros(21,dt-t0+1)];
Need=[Need zeros(21,dt-t0+1)];
Line=[Line zeros(21,dt-t0+1)];
People=[People zeros(21,dt-t0+1)];
Rincome=[Rincome zeros(21,dt-t0+1)];
S=[S zeros(21,dt-t0+1)];
Sage=[Sage zeros(21,dt-t0+1)];
Sincome=[Sincome zeros(21,dt-t0+1)];
Uincome=[Uincome zeros(21,dt-t0+1)];

```

```

for i=t0+1:dt+t0

```

```

    % 相关参数预估
    AvGdp(:,i)=AvGdp(:,i-1).*(1+CoeAvGdp);
    Uincome(:,i)=Uincome(:,i-1).*(1+CoeUincome);
    Rincome(:,i)=Rincome(:,i-1).*(1+CoeRincome);
    People(:,i)=People(:,i-1).*(1+CoePeople);

```

```

    % 相关参数再计算
    Sincome(:,i)=AvGdp(:,i)./(Uincome(:,i)-Rincome(:,i));
    Sage(:,i)=(1*AgeStru(:,1)+3*AgeStru(:,2)+1*AgeStru(:,3))./5;
    S(:,i)=CoeIncome.*Sincome(:,i)+CoeAge.*Sage(:,i);
    Accept(:,i)=-1./(S(:,i)+1)+1;
    Need(:,i)=S(:,i).^(CoeT*i).*SpeedTec.*Accept(:,i).*People(:,i);

```

```

    fprintf('%d 年各城市的预估流量需求已算出\n',i+Now-t0);

```

```

end

```

```
save ('骨干问题 1 广东 2012-2028 年各城市流量.mat','Need');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%布线规划
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function ObjVal = p_2_1_3(Chrom,count)
```

```
global...
```

```
LineData Need_Plan Line CoeNeed CoeLine Distance
```

```
%部署价值计算
```

```
ObjVal=zeros(size(Chrom,1),1);%部署价值初始化
```

```
for i=1:size(Chrom,1)
```

```
    %布线成本计算（距离*价格*数目）
```

```
    Line(count,end)=Distance(count)*LineData(1,4)*Chrom(i,1)+...
```

```
        Distance(count)*LineData(2,4)*Chrom(i,2)+...
```

```
        Distance(count)*LineData(3,4)*Chrom(i,3);
```

```
    %布线约束条件(三种线不能同时为 0)
```

```
    if Chrom(i,1)==0&&Chrom(i,2)==0&&Chrom(i,3)==0
```

```
        Line(count,end)=inf;
```

```
    end
```

```
    %速度约束条件
```

```
    if Need_Plan(count,end)/(365*24*60*60)*(1.5)>Chrom(i,1)*LineData(1,1)+...
```

```
        Chrom(i,2)*LineData(2,1)+...
```

```
        Chrom(i,3)*LineData(3,1)
```

```
        Line(count,end)=inf;
```

```
    end
```

```
    %距离约束条件
```

```
    if (Chrom(i,1)~=0 && Distance(count)>LineData(1,2))||...
```

```
        (Chrom(i,2)~=0 && Distance(count)>LineData(2,2))||...
```

```
        (Chrom(i,3)~=0 && Distance(count)>LineData(3,2))
```

```
        Line(count,end)=inf;
```

```
    end
```

```
    ObjVal(i)=CoeNeed*Need_Plan(count,end)-CoeLine*Line(count,end);
```

```
end
```

```
ObjVal=-ObjVal;%将求最大值问题转化为求最小值问题
```

end

```
%===== 骨 干 网 问 题 二 代 码
=====%
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
%布线规划
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
function ObjVal = p_2_2(Chrom,count)
```

```
global...
```

```
LineData Need_Plan Need_Real Line CoeNeed CoeLine Distance
```

```
%部署价值计算
```

```
ObjVal=zeros(size(Chrom,1),1);%部署价值初始化
```

```
for i=1:size(Chrom,1)
```

```
    %布线成本计算（距离*价格*数目）
```

```
    Line(count,end)=Distance(count)*LineData(1,4)*Chrom(i,1)+...
        Distance(count)*LineData(2,4)*Chrom(i,2)+...
        Distance(count)*LineData(3,4)*Chrom(i,3);
```

```
    %布线约束条件(三种线不能同时为 0)
```

```
    if Chrom(i,1)==0&&Chrom(i,2)==0&&Chrom(i,3)==0
        Line(count,end)=inf;
```

```
    end
```

```
    %速度约束条件
```

```
    if Need_Plan(count,end)/(365*24*60*60)>Chrom(i,1)*LineData(1,1)+...
        Chrom(i,2)*LineData(2,1)+...
        Chrom(i,3)*LineData(3,1)
        Line(count,end)=inf;
```

```
    end
```

```
    %距离约束条件
```

```
    if (Chrom(i,1)~=0 && Distance(count)>LineData(1,2))||...
        (Chrom(i,2)~=0 && Distance(count)>LineData(2,2))||...
        (Chrom(i,3)~=0 && Distance(count)>LineData(3,2))
```



```

        Line(count,end)=inf;
    end

    ObjVal(i)=CoeNeed.*Need_Real(count,end)-CoeLine.*Line(count,end);

end

ObjVal=-ObjVal;%将求最大值问题转化为求最小值问题

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%计算考虑接入价值的规划流量
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
p_2_1_2;%需求量预估

Need_Connect=Need(:,end);%获取 2028 年的各市流量需求，单位/GB

p=3;%价值差距增益指数
q=3;
REmin=1;%冗余度下限
REmax=1.5;%冗余度上限
ConnectValue=(AvGdp(:,end).^p).*Sage(:,end).^q;%接入价值
ConnectValue=ConnectValue./max(ConnectValue);
RE=REmin*(ConnectValue.*(REmax/REmin-1)+1);%各城市冗余度计算

Need_Connect=Need_Connect.*RE;

%计算规划流量
Need_Connect(3)=Need_Connect(3)+Need_Connect(19)+Need_Connect(18);
Need_Connect(6)=Need_Connect(6)+Need_Connect(7);
Need_Connect(9)=Need_Connect(9)+Need_Connect(3);
Need_Connect(10)=Need_Connect(10)+Need_Connect(9);
Need_Connect(13)=Need_Connect(13)+Need_Connect(14)+Need_Connect(15);
Need_Connect(15)=Need_Connect(15)+Need_Connect(14);

%===== 骨干网问题相关参数设置、相关数据、绘图
=====
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%ABC 算法适宜度函数 (calculateFitness.m)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function fFitness=calculateFitness(fObjV)
fFitness=zeros(size(fObjV));
ind=find(fObjV>=0);
fFitness(ind)=1./(fObjV(ind)+1);
ind=find(fObjV<0);
fFitness(ind)=1+abs(fObjV(ind));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%设置模型参数（SetParams.m）
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global...
Flow City Now LineData...
People CoePeople Need Line Accept SpeedTec...
AvGdp CoeAvGdp Uincome CoeUincome Rincome...
CoeRincome Sincome Sage CoeIncome CoeAge...
S CoeNeed CoeLine AgeStru Distance CoeT

%参数初始化
City=20;
Now=2017;%最新数据对应的时间
X=1;%标准成本
LineData=[400/8 200 32 X;600/8 100 48 1.25*X;800/8 80 64 1.5*X];%可选线相关的
参数
Flow=10000*xlsread('广东 2012-2017 互联网接入流量.xlsx','b2:b7')+...%单位/GB
10000*xlsread('广东 2012-2017 互联网接入流量.xlsx','d2:d7');
People=10000*xlsread('广东 2012-2017 各市总人口(含增长率).xls','b2:g22');%单位
/人
Distance=xlsread('广东各城市到广州的实际距离和规划距离.xlsx','b2:b21');%单位
/千米
AvGdp=xlsread('广东 2012-2017 各市全体居民人均收入(含增长率).xls','b2:g22');%
每个城市平均 GDP，单位/元
Uincome=xlsread('广东 2012-2017 各市城镇居民人均收入(含增长率).xls','b2:g22');%
每个城市城镇平均收入,单位/元
Rincome=xlsread('广东 2012-2017 各市农村居民人均收入(含增长率).xls','b2:g22');%
每个城市农村平均收入，单位/元
AgeStru=xlsread('广东各城市人口结构比例.xlsx','b2:d22');%各城市人口结构比例

CoePeople=xlsread('广东 2012-2017 各市总人口(含增长率).xls','h2:h22');%人口增
长率
CoeAvGdp=xlsread('广东 2012-2017 各市全体居民人均收入(含增长

```

```

率).xls','h2:h22');%各城市平均 GDP 增长系数
CoeUincome=xlsread('广东 2012-2017 各市城镇居民人均收入(含增长率).xls','h2:h22');%各城市城镇平均收入增长系数
CoeRincome=xlsread('广东 2012-2017 各市农村居民人均收入(含增长率).xls','h2:h22');%农村平均收入增长系数

```

```

CoeIncome=2.7746*10^-12;%收入评价系数
CoeAge=35.8625;%年龄评价系数
SpeedTec=219.2836;%技术进步系数
CoeT=0.0343;%指数函数系数

```

```

CoeNeed=1;%需求量转需求价值系数
CoeLine=1;%布线成本转布线价值系数

```

```

Sincome=AvGdp./(Uincome-Rincome);%每个城市的收入评价(城市平均 GDP/(城镇平均收入-农村平均收入))
Sage=(1*AgeStru(:,1)+3*AgeStru(:,2)+1*AgeStru(:,3))./5;%每个城市的年龄评价
Sage=repmat(Sage,1,6);%将 Sage 垂直方向复制 1 次,水平方向复制 6 次
S=CoeIncome.*Sincome+CoeAge.*Sage;%每个城市的综合评价(年龄评价系数*年龄评价+收入评价系数*收入评价)
Accept=-1./(S+1)+1;%每个城市科技接受度,取值范围[0,1]
for i=1:size(S,2)
    S(:,i)=S(:,i).^(CoeT*i);
end
Need=S.*SpeedTec.*Accept.*People;%每个城市的流量需求量
Line=zeros(size(Need));%每个城市的布线成本

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
%相关数据绘图 (print.m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%

```

```

clc
clear all
close all

```

```

load('骨干问题 1 广东 2012-2028 年各城市流量.mat');

```

```

year=[2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018;
      2019; 2020; 2021; 2022; 2023; 2024; 2025;
      2026; 2027; 2028];

```

```

city=['深圳 ','珠海 ','汕头 ','佛山 ','韶关 ','...
      '河源 ','梅州 ','惠州 ','汕尾 ','东莞 ','...

```

```

'中山 ','江门 ','阳江 ','湛江 ','茂名 ',...
'肇庆 ','清远 ','潮州 ','揭阳 ','云浮 ','广州 '];

```

```

[X Y]=meshgrid(1:size(Need,2),1:size(Need,1));
figure(1);
surf(X,Y,Need);
shading interp
title(['2012-2028 年广东各市需求流量']);
x1=xlabel('年份');
x2=ylabel('城市');
x3=zlabel('需求流量/GB');
set(x1,'Rotation',30);
set(x2,'Rotation',-30);

```

```

Need_Time=sum(Need);
figure(2);
plot(year,Need_Time);
title(['2012-2028 年广东总需求流量']);
xlabel('年份');
ylabel('需求流量/GB');

```

```

Need_City=Need(:,end);
figure(3);
bar(Need_City);
title(['2028 年广东各城市需求流量']);
xlabel(city);
ylabel('需求流量/GB');

```

```

figure(4);
x=1:21;
a=[1.500000000000000;1.38940126848202;1.03965487924920;1.33735323442368;1.
03176301472253;1.02455812893313;1.02273261535895;1.17288825357149;1.0149
0494988272;1.19869850228768;1.40127166321293;1.06211903989058;1.03541274
083741;1.01630493276342;1.01800766792839;1.02590416994008;1.030758781909
23;1.01336206688939;1.01099175359074;1.01207987542619;1.40786053940428];
b=1.5*ones(1,21);
plot(x,a,'-*b',x,b,'-or'); %线性，颜色，标记
title(['考虑接入价值前后，2028 年广东各城市网络带宽的冗余系数']);
set(gca,'XTick',[1:3:63]) %x 轴范围 1-6，间隔 1
legend('考虑接入价值','未考虑接入价值'); %右上角标注
xlabel(city);
ylabel('冗余系数');

```

```

figure(5);

```

```

x=1:20;
a=[-21341702208.0548,-2558444548.84717,-16688915827.2945,-
9884356448.79510,-3481830957.56516,-8552083960.09071,-4899853834.92912,-
5585309473.12262,-19996101100.3993,-29323368052.7628,-4020746205.89903,-
5288761155.08980,-18592069193.4212,-8412519004.13955,-15567540055.7829,-
4820828154.15069,-4417859032.93517,-2762327740.63946,-7061239401.10512,-
3001124654.53502];
b=[-21341702208.0548,-2558444548.84717,-16688916564.7945,-
9884356457.64510,-3481831149.16516,-8552084445.79071,-4899853990.82912,-
5585309590.02262,-19996102281.2993,-29323368316.8378,-4020746205.89903,-
5288761234.46480,-18592070153.9212,-8412519188.13955,-15567540496.1829,-
4820828216.40069,-4417859115.18517,-2762327775.03946,-7061239458.25512,-
3001124781.83502];
b=b-a;
plot(x,b,'-*b'); %线性，颜色，标记
title(['考虑接入价值后，广东各城市布线成本的减少值']);
xlabel(city(1:60));
ylabel('部署价值');

```

```

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
%相关数据（以下数据来自于广东省统计年鉴、各市 1%人口调查数据公报，国
家统计局）
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

```

1、广东 2012-2017 各市城镇居民人均收入(含增长率) 收入单位：元

市 别	2012	2013	2014	2015	2016	2017	增长率
深 圳	32792.5	36795.6	40948.0	44633.3	48695.0	52938.0	10.06%
珠 海	27151.8	31035.1	35287.3	38322.0	42537.4	46826.4	11.54%
汕 头	17583.6	19488.4	21445.9	23260.1	25120.9	27175.1	9.10%
佛 山	29584.4	33008.9	36554.7	39756.9	43120.3	46848.5	9.64%
韶 关	16930.6	19182.4	21583.3	23504.2	25854.6	28305.9	10.84%
河 源	14523.8	16364.1	18246.0	20015.8	21817.3	23779.6	10.37%
梅 州	15965.6	17903.5	19845.6	21810.3	23642.4	25694.6	9.99%
惠 州	20915.7	24023.9	27299.6	30056.9	33212.8	36608.3	11.86%
汕 尾	15609.5	17301.6	19036.2	20616.2	22389.2	24085.5	9.07%
东 莞	29968.3	33291.2	36764.0	39793.4	43096.2	46739.1	9.30%
中 山	26549.9	30283.2	34303.9	37254.0	41612.8	45295.3	11.30%
江 门	19801.1	22295.6	24976.2	27116.7	29557.2	32477.8	10.41%
阳 江	16881.7	18999.6	21239.8	23087.7	25281.0	27568.1	10.32%
湛 江	17406.1	19322.5	21317.4	23129.4	24887.2	27119.3	9.28%
茂 名	15656.1	17581.2	19540.5	21396.8	23322.6	25315.4	10.10%
肇 庆	17279.7	19460.9	21725.8	23746.3	25907.2	28276.1	10.36%
清 远	16551.2	18742.1	21093.4	22907.4	25266.9	27610.0	10.79%
潮 州	16450.8	17735.9	18854.7	20457.3	21787.1	22695.0	6.66%
揭 阳	16757.7	18257.1	19635.2	21343.5	22944.2	24099.7	7.55%
云 浮	15429.2	17032.7	18678.6	20154.2	21887.5	23446.0	8.74%
广 州	34467.3	38621.7	42954.6	46734.6	50940.7	55400.5	9.97%

2、广东 2012-2017 各市农村居民人均收入(含增长率) 收入单位：元

市 别	2012	2013	2014	2015	2016	2017	增长率
深 圳	13,623.53	15,582.41	17,662.80	19,323.10	21,448.64	23,483.88	11.52%
珠 海	15,133.33	16,901.72	18,394.80	20,510.20	22,889.39	23,496.37	9.25%
汕 头	8,730.16	9,965.30	11,190.26	12,454.80	13,662.87	14,904.72	11.31%
佛 山	15,832.49	17,930.78	20,094.00	22,063.20	24,159.22	26,389.63	10.77%
韶 关	8,090.65	9,281.65	10,532.20	11,606.50	12,790.35	14,107.59	11.78%
河 源	7,485.88	8,635.18	9,884.00	10,803.20	12,045.58	13,300.85	12.21%
梅 州	8,531.00	9,641.05	10,785.60	11,799.40	12,991.19	14,088.50	10.57%
惠 州	10,983.86	12,637.11	14,364.44	15,829.60	17,602.53	19,284.27	11.93%
汕 尾	8,268.75	9,309.73	10,415.30	11,290.20	12,441.78	13,501.35	10.32%
东 莞	17,644.92	19,900.41	22,327.10	24,224.90	26,526.27	29,078.28	10.52%
中 山	16,696.43	19,362.65	22,166.30	24,405.10	27,528.95	30,012.41	12.47%
江 门	10,159.11	11,418.15	12,746.30	13,817.00	15,226.32	16,473.31	10.16%
阳 江	8,791.59	10,089.27	11,488.50	12,543.20	13,960.54	15,341.66	11.80%
湛 江	9,317.92	10,341.82	11,381.10	12,405.40	13,335.80	14,483.97	9.23%
茂 名	9,413.77	10,677.88	11,913.47	13,224.00	14,519.90	15,695.19	10.78%
肇 庆	10,168.50	11,418.23	12,642.30	13,982.40	15,114.96	16,430.54	10.08%
清 远	8,280.59	9,427.68	10,600.30	11,681.50	12,873.05	14,026.75	11.13%
潮 州	8,397.33	9,443.88	10,551.10	11,458.50	12,558.51	13,672.93	10.25%
揭 阳	8,198.42	9,208.54	10,145.58	11,332.60	12,250.55	13,206.67	10.02%
云 浮	8,990.19	10,008.34	11,066.80	12,007.50	13,016.11	14,124.43	9.46%
广 州	13,623.53	15,582.41	17,662.80	19,323.10	21,448.64	23,483.88	11.52%

3、广东 2012-2017 各市全体居民人均收入(含增长率) 收入单位：元

市 别	2012.0	2013.0	2014	2015	2016	2017	增长率
深 圳	32792.5	36795.6	40948.0	44633.3	48695.0	52938.0	10.06%
珠 海	25650.2	29292.3	33234.9	36157.9	40154.1	44043.1	11.44%
汕 头	13755.7	15503.8	17266.3	18996.0	20713.0	22521.0	10.37%
佛 山	27937.8	31483.8	35139.8	38501.3	41940.7	45813.3	10.41%
韶 关	13004.9	14761.3	16622.7	18143.1	19977.5	21865.9	10.97%
河 源	10215.1	11698.4	13283.1	14548.1	16077.4	17717.7	11.66%
梅 州	11697.9	13278.5	14893.8	16404.4	17986.6	19635.0	10.93%
惠 州	17225.3	19966.1	22901.6	25219.6	28061.4	31090.6	12.56%
汕 尾	12404.9	13785.5	15211.6	16473.5	17936.7	19325.8	9.28%
东 莞	29065.2	32311.9	35711.9	38650.6	41901.9	45450.6	9.36%
中 山	25284.7	28926.6	32847.4	35712.2	40012.4	43553.7	11.51%
江 门	16256.8	18342.5	20585.7	22364.4	24426.7	26850.6	10.57%
阳 江	12764.5	14477.9	16311.2	17777.3	19513.2	21443.9	10.95%
湛 江	12372.6	13801.9	15301.8	16631.7	17934.4	19631.6	9.68%
茂 名	12206.0	13747.3	15266.2	16847.3	18402.7	19885.2	10.26%
肇 庆	13982.4	15649.2	17333.5	18991.4	20579.8	22360.0	9.85%
清 远	12130.5	13826.0	15637.0	17070.0	18859.3	20692.0	11.29%
潮 州	12555.4	13935.8	15242.5	16815.6	18060.5	19429.0	9.13%
揭 阳	12458.7	13732.3	14953.2	16308.4	17654.1	18750.1	8.53%
云 浮	11455.8	12730.2	14061.3	15212.4	16517.6	17874.5	9.31%
广 州	31336.3	35197.1	39229.1	42718.2	46667.0	50782.2	10.15%

4、广东 2012-2017 各市全体居民人均收入(含增长率) 人口单位：万人

市 别	2012	2013	2014	2015	2016	2017	增长率
深 圳	1054.74	1062.89	1077.89	1137.87	1190.84	1252.83	3.52%
珠 海	158.26	159.03	161.42	163.41	167.53	176.54	2.22%
汕 头	544.81	547.91	552.37	555.21	557.92	560.82	0.58%
佛 山	726.18	729.57	735.06	743.06	746.27	765.67	1.07%
韶 关	286.87	289.27	290.89	293.15	295.61	297.92	0.76%
河 源	301.01	303.76	306.32	307.35	308.10	309.11	0.53%
梅 州	429.41	430.70	432.33	434.08	436.08	437.43	0.37%
惠 州	467.40	470.00	472.66	475.55	477.50	477.70	0.44%
汕 尾	296.90	298.62	300.66	302.16	303.66	297.76	0.06%
东 莞	829.23	831.66	834.31	825.41	826.14	834.25	0.12%
中 山	315.50	317.39	319.27	320.96	323.00	326.00	0.66%
江 门	448.27	449.76	451.14	451.95	454.40	456.17	0.35%
阳 江	247.00	247.96	249.95	251.12	252.84	254.29	0.58%
湛 江	710.92	716.71	721.24	724.14	727.30	730.50	0.54%
茂 名	596.76	601.25	604.90	608.08	612.32	620.41	0.78%
肇 庆	398.23	402.21	403.58	405.96	408.46	411.54	0.66%
清 远	376.60	379.11	381.91	383.45	384.60	386.00	0.49%
潮 州	270.00	271.21	272.04	264.05	264.60	265.08	-0.36%
揭 阳	595.59	599.47	603.54	605.89	609.40	608.60	0.43%
云 浮	241.65	242.84	244.46	246.05	248.08	250.54	0.73%
广 州	1283.89	1292.68	1308.05	1350.11	1404.35	1449.84	2.47%

## 5、广东 2012-2017 互联网接入流量 流量单位：万 GB

年份	固定互联网接入流量/万GB	固定宽带接入用户/万户	移动互联网接入流量/万GB	移动互联网用户/万户
2012	2398536	1903.6	2023.7	3237.9
2013	2622942	2081.7	6690	5352
2014	3036348	2409.8	18665.3	7466.1
2015	3314169.2	2630.3	47901	9580.2
2016	3702495	2850.6	125243.7	11518.4
2017	3787882.6	3246.8	328812.5	14160.3
2018	4729107.2	3597.8	851766	15746.6

## 6、广东各城市人口结构比例

市 别	0-14岁	15-64岁	65岁及以上
深 圳	0.134	0.8323	0.0337
珠 海	0.1485	0.785	0.0665
汕 头	0.1277	0.8044	0.0679
佛 山	0.1277	0.8044	0.0679
韶 关	0.2027	0.6763	0.121
河 源	0.1905	0.7439	0.0655
梅 州	0.2027	0.6763	0.121
惠 州	0.1905	0.7439	0.0655
汕 尾	0.1943	0.7239	0.0818
东 莞	0.1943	0.7239	0.0818
中 山	0.14	0.8027	0.0573
江 门	0.1401	0.746	0.1139
阳 江	0.1401	0.746	0.1139
湛 江	0.2116	0.6923	0.0961
茂 名	0.2493	0.6478	0.1029
肇 庆	0.1992	0.7007	0.1001
清 远	0.208	0.6911	0.1009
潮 州	0.208	0.6911	0.1009
揭 阳	0.1689	0.7297	0.1013
云 浮	0.1689	0.7297	0.1013
广 州	0.1298	0.7912	0.07