

分 类 号 _____

学号 M201672235

学 校 代 码 10487

密级 _____

华中科技大学

硕士学位论文

面向频率选择表面设计的数据库

开发和应用研究

学位申请人： 余忠伟

学 科 专 业： 软件工程

指 导 老 师： 缪灵

答 辩 日 期： 2019 年 01 月 15 日

**A Thesis Submitted in Partial of Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering**

**Database Development and Application
Research for Frequency Selection
Surface Design**

Candidate : Yu Zhongwei

Major : Software Engineering

Supervisor : Associate Prof. Miao Ling

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

January, 2019

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名:

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 保 密 ☐，在年解密后适用本授权书。
不保密 ☐

(请在以上方框内打✓)

学位论文作者签名:

指导教师签名:

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘要

通过吸波材料降低雷达散射截面积（RCS）是实现雷达隐身的重要举措之一，频率选择表面（FSS）作为一种新型结构型吸波材料，在 RCS 缩减方面发挥着重要的作用。影响 FSS 电磁性能的结构参数众多，如何对 FSS 吸波结构的参数之间进行有效分析、设计出满足特定目标频段的 FSS 结构已经成为学者关注的热点。本文以微波智能设计集成平台（MIDIS）为基础，研究完成了频率选择表面的结构分析与智能优化。

本研究开发了 MIDIS 平台的任务管理、数据库系统、贝叶斯优化算法等功能模块。完成了无源单圆环 FSS 结构的分析、有源单圆环 FSS 结构的分析、单方环 FSS 吸波结构的优化和设计。

任务管理模块是通过建立任务队列的方式将 MIDIS 平台上的计算任务进行集中管理。任务管理模块的实现，减少了创建任务的时间、提高了计算资源的利用效率。针对 FSS 仿真数据的特点，设计了数据库系统，该数据库系统能够对所有仿真数据进行快速存储与查询，为其他数据分析和优化算法模块的设计提供了数据接口。

基于数据库系统，完成了无源 FSS 吸波结构的和有源 FSS 吸波结构数据处理模块。通过降维技术，分析了该结构变量之间的变化对吸波性能的影响。对有源 FSS 结构的数据，通过指定有源器件对应的仿真变量，进行包络线处理，得到有源 FSS 结构对应的反射率曲线，针对有源 FSS 吸波结构的仿真结果与测量结果不吻合的问题，提出了修正模型，拟合器件寄生参数的方案。

本文还提出了一种基于模型代理的优化算法，贝叶斯优化算法（BOA），它通过概率统计学的方法创建函数分布模型，在模型中寻找最优解的位置，极大地提高了优化效率。为了比较该算法与遗传算法的效率，设计了单方环 FSS 吸波结构，优化目标频段为 4-8GHz，结果显示两种算法都实现了优化目标，但 BOA 的优化时间更短。

关键词：频率选择表面 智能算法 数据库 吸波材料 贝叶斯优化算法

Abstract

The Radar Cross-Section (RCS) reduction using absorbing materials is one of the important measures to achieve radar stealth. Frequency selective surface (FSS), as a new type of structural absorbing material, plays an important role in RCS reduction. There are many structural parameters affecting the electromagnetic performance of FSS. How to effectively analyze the parameters of FSS absorbing structure and design the FSS structure to meet the specific target frequency band has become a hot topic of scholars. In this thesis, the structures analysis and intelligent optimization of FSS is presented, which is base on Microwave Intelligent Design Integration Studio (MIDIS).

Task management, database system, and Bayesian optimization algorithm for MIDIS are programmed. The analysis of the passive single-ring FSS structure, the analysis of the active single-ring FSS structure, and the optimization the single-ring FSS absorbing structure are completed.

The task management module centrally manages the computing tasks on the MIDIS platform by establishing a task queue. The implementation of the task management module reduces the time for creating tasks and improves the utilization efficiency of computing resources. According to the characteristics of FSS simulation data, a database system is designed. This database system can quickly store and query all simulation data, and provide a data interface for the design of other data analysis and optimization algorithm modules.

Based on the database system, the passive FSS absorbing structure and the active FSS absorbing structure data processing module are completed. The variables of the single-ring FSS structure are traversed within a certain range. Through the process of database query, evaluation formula evaluation and data display, the structural parameters corresponding to the best performance of the structure are obtained. Through the dimension reduction technique,

the influence of the variation between the structural variables on the absorbing performance is analyzed. The envelope of active FSS is processing by specifying the simulation variables corresponding to the active device, and the reflectivity curve corresponding to the active FSS structure is obtained. The simulation results for the active FSS absorbing structure do not match the measurement results. The problem is proposed by modifying the model and fitting the parasitic parameters of the device.

This thesis also proposes an optimization algorithm based on model agent. The difference between the optimization algorithm and the evolutionary algorithm is that it creates a function distribution model by means of probability statistics, and finds the position of the optimal solution in the model. In order to compare the efficiency of the algorithm and the genetic algorithm, a single-ring FSS absorbing structure is designed, and the target frequency band is optimized to 4-8 GHz. The results show that both algorithms achieve the optimization goal, but the optimization time of the Bayesian optimization algorithm is shorter.

Keywords: frequency selection surface, intelligent algorithm, database, absorbing material, Bayesian optimization algorithm

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	V
1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 FSS.....	4
2 微波智能设计集成平台 MIDIS 简介	5
2.1 MIDIS 平台简介	5
3 基于数据库系统的数据分析模块实现.....	6
3.1 数据库设计	6
4 贝叶斯优化在频率选择表面中的应用.....	8
4.1 贝叶斯优化算法	8
5 总结与展望.....	9
5.1 总结	9
5.2 展望	10
致谢.....	11
参考文献.....	13

附录 I 数据库系统存储数据代码 1	14
附录 II 数据库系统存储数据代码 2.....	14

1 绪论

1.1 研究背景及意义

21 世纪后^[1], 隐身技术的发展促进了各国武器装备竞争的加剧, 发展隐身技术, 提高武器系统生存, 空防和纵深打击能力, 已经成为集陆、海、空、天、电磁五位一体的立体现代战争的迫切需要 [1]。

针对不同的探测手段, 隐身技术可分为雷达隐身技术、红外隐身技术、可见光隐身技术、激光隐身技术、声隐身技术和磁隐身技术等。对于飞行器而言, 重点是雷达隐身和红外隐身 [2]。随着隐身技术的发展, 雷达散射截面积 (RCS) 缩减已经成为热门研究课题 [3-5]。在 RCS 缩减的众多的方法中, 雷达吸收材料 (RAM) 通过将入射电磁波转化为热量的方法得到广泛应用, 近年来, 人工复合材料兴起, 如频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) [6-7], 电磁带隙 (Electromagnetic Bandgap, EBG) 表面 [8], 和超材料/超颖表面 [9] 提供了缩减 RCS 的另一种可能方法 [10]。

频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS) 是指完全相同的单元沿一维或二维方向周期排列而成的无限大阵列 [11]。图 1-1 中给出了贴片型频率选择表面周期性阵列示意图, 在实际应用中 FSS 必须依附在介质基板上或嵌入介质基板中。频率选择表面对某些频段的入射波呈现出全反射或者全投射的特性, 从而有效地控制电磁波的传输与反射, 其本质可近似一个空间滤波器。频率选择表面结构在现实中有各种应用如天线、雷达罩和反射天线 [12]。当雷达进行探测任务时, 雷达与飞机通常不属于同一个高度, 此时雷达波会呈一个大角度入射到飞机表面。在平板型吸波结构的设计中, 如何在大角度斜入射的情况下保持其吸波性能的稳定性成为一个重难点。

$$Recall_u = \frac{|\mathcal{I}_u^{re} \cap \mathcal{I}_u^{te}|}{|\mathcal{I}_u^{te}|} \quad (1-1)$$

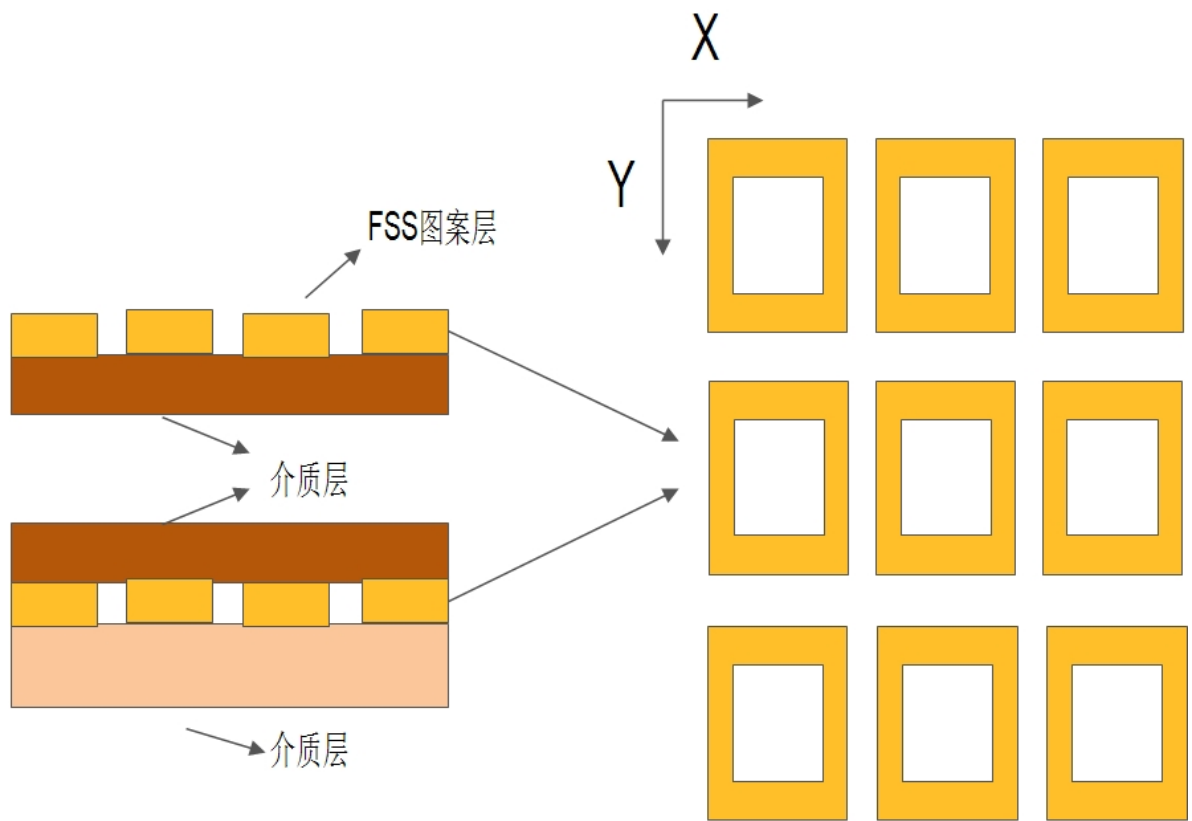


图 1-1 FSS 结构

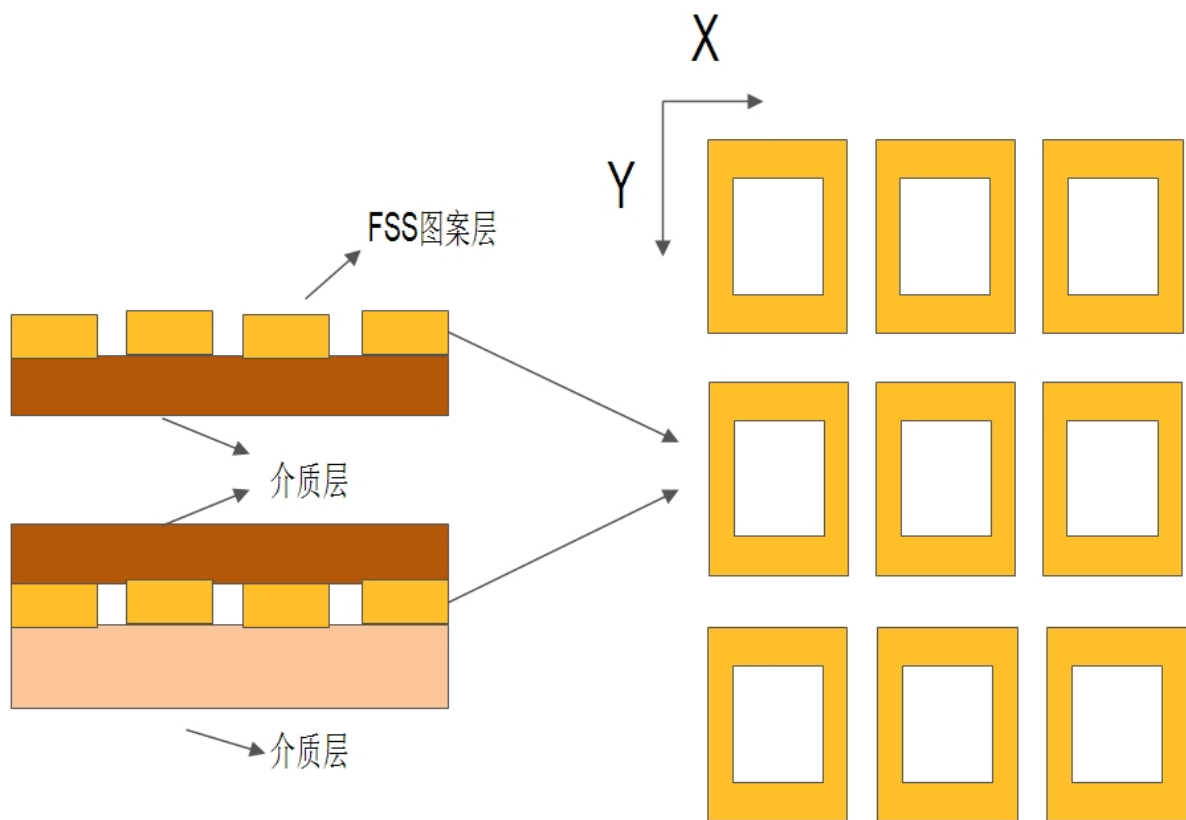


图 1-2 南京理工电光 13 级

1.1.1 FSS

$$Recall_u = \frac{|\mathcal{I}_u^{re} \cap \mathcal{I}_u^{te}|}{|\mathcal{I}_u^{te}|} \quad (1-2)$$

Google¹

¹<https://www.google.com/>

2 微波智能设计集成平台 MIDIS 简介

本章首先介绍了微波智能设计集成平台 (Microwave Intelligent Design Integrated Studio, MIDIS) 和在本人此平台的基础上开发了一些新的功能后形成的新框架。然后会介绍一些接口调用。最后会重点介绍任务管理模块的设计和实现。

2.1 MIDIS 平台简介

3 基于数据库系统的数据分析模块实现

MIDIS 平台在设计中，一直很注重对数据的管理。数据库是一种有组织的数据集合，能够提供数据存储，查询，备份的数据管理工具。设计一个高效强大的数据库系统对于 MIDIS 平台的数据管理和数据安全来说有较大意义。借助数据库系统可以很方便地实现其他数据处理的相关功能。本章将介绍 MIDIS 数据库系统的设计和基于数据库系统的数据处理模块的实现。

3.1 数据库设计

课题组搭建的机群主要是为了给实验室提供仿真计算使用，机群中的计算机可以相互访问。因此，设计一个能够提供相互访问的数据库系统，会数据处理带来极大方便。Python 自带的 sqlite3[42] 是一个轻量级的，不提供 ip 访问的数据库框架。Mysql 是能够提供网络访问的关系型数据库，但是 Mysql[43] 的语法较为复杂，提供的数据导出功能也并不友好。新出现的非关系型数据库 Mongodb[44] 能够满足本次设计的要求。Mongodb 的特色如表 3-1 所示。

$$Recall_u = \frac{|\mathcal{I}_u^{re} \cap \mathcal{I}_u^{te}|}{|\mathcal{I}_u^{te}|} \quad (3-1)$$

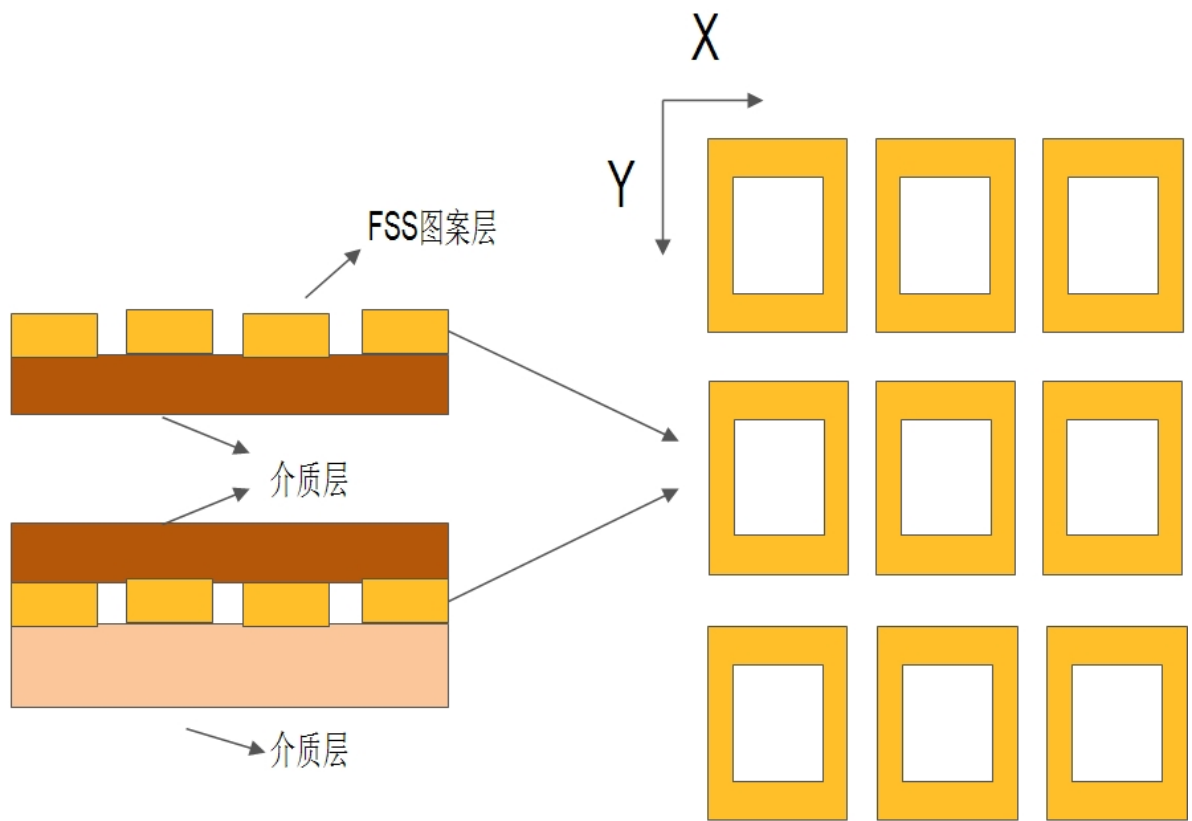


图 3-1 FSS 结构

4 贝叶斯优化在频率选择表面中的应用

近年来,为了提升 FSS 的优化设计效率,有很多优化方法被提出来,如遗传算法,支持向量回归算法,和模型代理法等。遗传算法是一种典型的全局优化算法,算法的规则简单并广泛应用于优化设计。然而,随着对 FSS 模型计算成本的增加,传统的遗传算法的收敛速度较慢,全局搜索能力也不突出,算法设置复杂,很多参数的设置需要依靠经验。模型代理法依靠统计学方法,通过采样的方法确定下一个个体 [45-46]。不同于进化算法的种群迭代模式,贝叶斯优化算法每次只会产生一个新样本点,这样会在很大程度减少了计算量减少了设计周期。

本章将会对贝叶斯优化算法的原理进行介绍,并且设计了基于贝叶斯优化算法的无源 FSS 优化模块。最后分别使用贝叶斯优化算法和遗传算法对无源单方环 FSS 进行优化,并根据优化结果比较两组优化算法的异同。

4.1 贝叶斯优化算法

贝叶斯优化算法 (BOA) 是一种用于优化“黑盒问题”的优化策略,这里的“黑盒问题”指的是优化的目标的具体函数形式是未知的,无法利用数学上的求导公式找到其极值点。比如在做一份糕点时,会考虑各种配料的用量和比例才能做出美味可口的蛋糕。在这样的需要多维度的场景当中,每个维度的可候选空间也非常大,此外各个维度属性之间可能相互影响,通过枚举遍历的方法进行尝试需要很大的时间成本和物质成本。在这种情况下,贝叶斯优化算法在较少的迭代次数下能够找到需要的参数。其算法流程如图 4-1 所示。

5 总结与展望

5.1 总结

本文在微波集成设计平台（MIDIS）的基础上，通过任务管理模块、数据库系统、有源无源 FSS 结构的数据处理、二维解空间、规律挖掘、结构优化等功能模块，完成了基于数据库系统的频率选择表面吸波结构的数据分析与结构优化。本文的主要研究成果如下：

（1）限于对课题组计算资源进行智能管理的需求，开发了任务管理模块。该模块能够对计算资源进行自动分配，对计算任务进行集中管理。以 MIDIS 为核心，形成了任务管理、数据遍历、智能优化、数据库存储、数据处理、数据挖掘的框架，对 MIDIS 与 HFSS 和 CST 之间的接口调用和参数化方式进行了介绍，特别针对 CST 的一些特殊设置进行了说明。

（2）基于对课题组计算数据的安全和数据分析的快捷性考虑，使用了企业级数据库 Mongoddb，设计了数据库系统。以数据库为基础，开发了针对无源仿真数据处理模块和有源数据处理模块以及利用降维技术的多种变量分析工具。数据库系统的实现，极大提高了对多维变量的吸波结构的分析效率。使用单圆环 FSS 结构，分别设计了无源吸波体，并对该结构的变量空间进行遍历，使用相应工具得到需要的结构模型，用降维分析工具对单圆环 FSS 结构进行了变量分析。通过单圆环的改进设计了有源 FSS 结构，并计算了不同状态的结构反射率曲线，通过包络线处理的方式，得到有源单圆环 FSS 结构的吸波性能。提出了针对寄生参数带来的有源仿真数据与测量数据不吻合的解决方法，即通过修改模型，对寄生参数继续遍历拟合的方式得到寄生参数的值。

（3）介绍了代理模型优化算法贝叶斯优化，分析了该算法原理和用来优化 FSS 吸波结构的可行性，并开发了针对无源 FSS 结构的贝叶斯优化模块。设计了单圆环 FSS 吸波结构，分别使用遗传算法和贝叶斯优化在 4-8GHz 对吸波结构进行优化，两个算法都能优化出在 4-8GHz 达到-10dB 的吸波结构，但是贝叶斯优化的效率要高于遗传

算法。通过对贝叶斯优化的数据进行分析，变量的分布疏密的不同和性能分布区域不同进一步表明了算法对 FSS 结构优化的有效性。

5.2 展望

本文实现了利用数据库系统对频率选择表面吸波结构进行数据分析和结构优化，但是在以下一些方面还值得进一步研究：

(1) 本文使用了较为简单的 FSS 吸波结构图案，计算的数据量也较少。可以对同种拓扑结构的图案进行大量计算和存储，然后对同一种类型的 FSS 结构进行数据分析，这样就可以得到更为普遍的规律和设计指导。也可以使用现代的数据分析技术，如神经网络，聚类算法、分类算法等对数据进行训练学习，提供吸波结构的性能预测等功能。

(2) 本文对有源吸波结构的仿真数据与测量数据的不吻合提供的解决方案较为简单，可以利用机器学习的算法对仿真与测量数据进行监督学习，提供一种具有普适性的针对仿真模型的校正方案。

(3) 本文设计了贝叶斯优化算法在频率选择表面上面的优化属于一种新的尝试，由于时间关系并没有使用多种不同的模型结构进行优化测试，只设计了单方环结构，可以设计不同特性的频率选择表面结构进行测试验证，通过优化结果调整算法的一些参数，使得该算法能够真正在频率选择表面的优化上产生较好的效果。

致 谢

至此论文结束之际，心中感慨万千。两年半的研究生生活留下了很多美好而难忘的回忆与经历。如今，在这 2018 年即将过去的时刻，心中除了对校园生活的怀念和不舍，心中充满了对所有老师和同学的感激。

首先，我要感谢江建军教授。江老师作为 IEI 实验室的负责人，一直孜孜不倦地为实验室的建设和发展而付出。正是在江老师的带领下，IEI 才有了现在的规模和软硬件条件。在整个研究生期间，江老师教导我们要树立正确的科研观、要把专业理论基础学牢。还通过组织观看我国空军发展的纪录片，激励了实验室全体人员为祖国的雷达隐身事业贡献自己的一份力量。同时，江老师还重视实验室的体育运动，鼓励大家参与体育运动。

然后，我要由衷地感谢我的导

师缪灵副教授，感谢缪老师对我的知遇之恩，在加入 IEI

大家庭之后，缪老师尊重我的研究兴趣和擅长的方向，给我规划了科研方向，才让我没有在科研的道路迷失方向。在科研中，缪老师是一个宽容大度的人，他不会因为我的一次失误而对我失去信心，但缪老师也是一个讲原则的人，如果安排的任务三次都没有完成，他也会毫不留情，和缪老师相处的这些日子使我养成了按时完成任务的习惯。在

生活中，缪老师鼓励我参加组会，他经常说：只有在组会中讲

出来你做的事情，才能有所改进。缪老师的学习能力很

强，思路很开阔，虽然他已经多年不写代码，

但是他扎实的基本功和活跃的思

维方式让我羡慕不

己。

接着我要感谢别少伟副教授和贺云博士后。别老师严谨的学术态度和刻苦钻研的

华中科技大学硕士学位论文

科研精神让我敬佩不已。贺博士后，虽然很年轻，但是不论是他的科研能力还是对实验室的管理能力都很出色。在今后的生活中，我会以别老师和贺博士后为榜样，认真做事。

感

谢

张玉禄、

郦程丽、

魏剑锋、吴松、

查大册、郭赛、曹昭旺、李芮、张宝、吉晓、刘佳、徐葵、赵勇等博

士生在科研方法上的指导。感谢金湾湾、徐壮、张宇豪、

方博、孙文钊、许迎东、孙梦、夏靖、何

凡、李莎、刘羽函、刘雨彤、

雷志朋、汪杰鸣、万玫玉等硕

士生在科研工作中的帮助。希望

IEI 在你们 的努力下发

展 得 越 来

越 好！

我还要感谢我的家人和关心我的人，没有他们在背后的支持和关怀，就没有今天的我。希望我以后能够给与你们回报，让家里人生活得更美好！

参考文献

- [1] Steffen Rendle, Christoph Freudenthaler, Zeno Gantner, and Lars Schmidt-Thieme. Bpr: Bayesian personalized ranking from implicit feedback. In *Proceedings of the twenty-fifth conference on uncertainty in artificial intelligence*, pages 452–461. AUAI Press, 2009.

附录 I 数据库系统存储数据代码 1

```
1  def insertfile( self, dbname, category, user, pwd, targetfile,
    ↪ var_opti_name, HFSSfilename ,fre, varmatrixs, R):
2      NewVarM = list()
3      temVarM = list()
4      for i in range(len(self.VarID)):
5          if self.VarID[i] != -1:
6              NewVarM.append(varmatrixs[self.VarID[i]])
7              temVarM.append(varmatrixs[self.VarID[i]])
8          else:
9              NewVarM.append(self.VarValue[i])
10     varsdict = dict(zip(self.VarList,NewVarM))
11     self.insertData2Table(dbname,user,
    ↪     pwd,targetfile,HFSSfilename,fre,self.tags,self.topos,\
12         self.thickness,var_opti_name, temVarM, varsdict,R,
    ↪     category)
```

附录 II 数据库系统存储数据代码 2

表 1 主要符号表

常用符号	意义
s	user number
t	item number
u	user
v	item
u_m	the specified user m
v_i	the specified item i
v_j	the specified item j
b_i	item bias
r_{ui}	real rating of user u on item i
\hat{r}_{ui}	predicted rating of user u on item i
\hat{r}_{uj}	predicted rating of user u on item j
e_i	entity, e.g., user u or item v
T	iteration number in the algorithm
$k \in \mathbb{R}$	number of latent dimensions
$r(j)$	the ranking place of the item v_j
\mathcal{P}	(user, item) pairs in training data
\mathcal{P}^{te}	(user item) pairs in test data
\mathcal{U}	the whole user set
\mathcal{I}	the whole item set
\mathcal{I}_u^{re}	recommended items for user u
\mathcal{I}_u^{te}	selected items by user u in test data
\mathcal{I}_u^{tr}	selected items by user u in training data
$\mathcal{I}_{u_m}^+$	the set of items selected by the user u_m
$U \in \mathbb{R}^{s \times k}$	user-specific latent matrix
$V \in \mathbb{R}^{t \times k}$	item-specific latent matrix
$U_{u \cdot} \in \mathbb{R}^{1 \times k}$	user-specific latent feature vector
$V_{v \cdot} \in \mathbb{R}^{1 \times k}$	item-specific latent feature vector
$Y^e = [y_1^e, y_2^e, y_3^e, \dots]$	latent representation of entities
$y_i^e \in \mathbb{R}^{1 \times k}$	the latent vector of entity e_i
$\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$	categories
$D_S := \{(m.i, j) v_i \in \mathcal{I}_{u_m}^+ \wedge v_j \in \mathcal{I} \setminus \mathcal{I}_{u_m}^+\}$	the set of all pairwise preference