中国科学技术大学

博士学位论文



**CEPC 硅钨图像型电磁量能器**

**原理样机预研**

|  |  |
| --- | --- |
| **作者姓名：** | 马思源 |
| **学科专业：** | 物理电子学 |
| **导师姓名：** | 刘树彬 教授 封常青 副教授 |
| **完成时间** | 二○一八年五月 |
|  |  |

University of Science and Technology of China

A dissertation for doctor’s degree



|  |  |
| --- | --- |
| **Author’s Name:** | Siyuan Ma |
| **Speciality:** | Physics electronics |
| **Supervisor:** | Prof. Shubin Liu,  A/Prof. Changqing Feng |
| **Finished time:** | May, 2018 |
| **Finished time:** | May, 2017 |

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 签字日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一，学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权，即：学校有权按有关规定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，可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等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、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

□公开 □保密（\_\_\_\_年）

作者签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

签字日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 签字日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**目 录**

[摘 要 I](#_Toc508702005)

[ABSTRACT II](#_Toc508702006)

[第一章 绪论 1](#_Toc508702007)

[1.1 标准模型与Higgs粒子 1](#_Toc508702008)

[1.1.1 标准模型 1](#_Toc508702009)

[1.1.2 探索Higgs粒子的意义 1](#_Toc508702010)

[1.1.3 Higgs粒子相关实验现状 1](#_Toc508702011)

[1.2 CEPC项目介绍 1](#_Toc508702012)

[1.3 本文主要内容及结构安排 1](#_Toc508702013)

[第二章 CEPC电磁量能器原型机需求讨论 3](#_Toc508702014)

[2.1 电磁量能器的指标需求分析 3](#_Toc508702015)

[2.2 电磁量能器的实现方法 3](#_Toc508702016)

[2.3 硅钨电磁量能器对电子学的需求 3](#_Toc508702017)

[第三章 CEPC 电磁量能器原型机预研方案及仿真验证 4](#_Toc508702018)

[3.1 硅钨图像型量能器方案调研 4](#_Toc508702019)

[3.2 CEPC 电磁量能器原型机设计 4](#_Toc508702020)

[3.3 针对原型机设计的仿真验证 4](#_Toc508702021)

[3.4 本章小结 4](#_Toc508702022)

[第四章 读出电子学设计 4](#_Toc508702023)

[4.1 读出电子学系统架构 4](#_Toc508702024)

[4.2 前端电子学模块 4](#_Toc508702025)

[4.3 数据接口模块 4](#_Toc508702026)

[4.4 数据获取模块 4](#_Toc508702027)

[4.5 本章小结 4](#_Toc508702028)

[第五章 探测器系统性能测试 5](#_Toc508702029)

[5.1 电子学测试 5](#_Toc508702030)

[5.2 探测器联调测试 5](#_Toc508702031)

[5.3 本章小结 5](#_Toc508702032)

[第六章 总结与展望 5](#_Toc508702033)

[6.1 总结 5](#_Toc508702034)

[6.2 展望 5](#_Toc508702035)

[致 谢 6](#_Toc508702036)

[在读期间发表的学术论文 7](#_Toc508702037)

# 摘 要

近

**关键字**：P

# ABSTRACT

I

**Keywords:** P

# 绪论

## 标准模型与Higgs粒子

### 标准模型

20世纪中叶，随着越来越多的粒子被发现，科学家们开始思考，是否有一种统一的理论可以解释各种基本粒子和基本相互作用。

为了统一电磁相互作用和弱相互作用，Sheldon Glashow 在1961年提出了一种理论，将这两种作用看成统一的电弱统一理论[1]，但这个理论有一个重大缺陷，即无法解释基本粒子如何获得质量这个问题。1964年，Peter Higgs等三位理论物理学家分别独立提出了希格斯机制（Brout-Englert-Higgs 机制）——一种自发性对称破缺机制，来解释该问题[2][3][4]。希格斯机制指出，存在Higgs场及其激发的自旋为零的Higgs玻色子，该粒子会与基本粒子结合并使基本粒子获得质量。为完善弱电统一理论， Steve Weinberg和Abdus Salam在1967年将希格斯机制引入其中[5][6]，这便构成了标准模型的电弱部分。

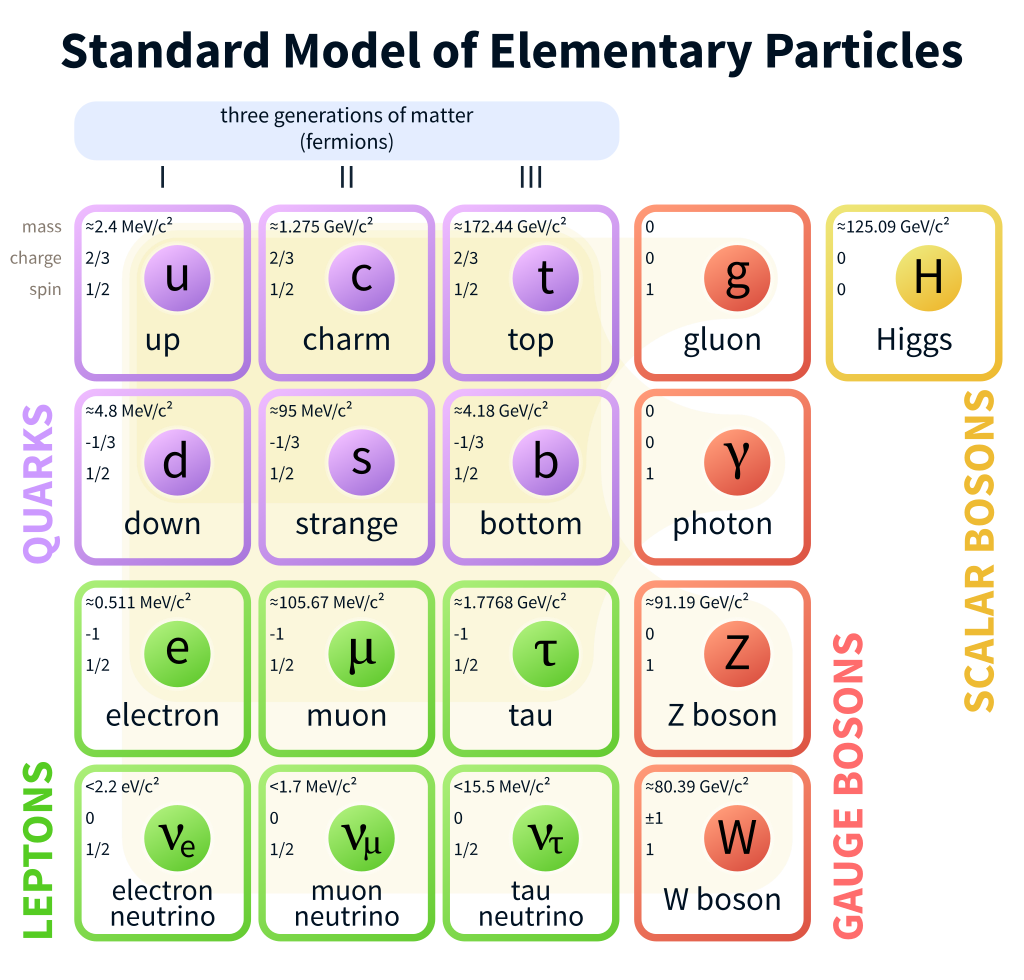


图. 1 标准模型中包含的基本粒子及基本相互作用

随着多种夸克和轻子等费米子被相继发现，Harald Fritzsch 等人于1973年在规范场论的基础上提出了量子色动力学，用来描述强相互作用[7]，这构成了标准模型中强相互作用部分。至此，标准模型已基本完成，它与狭义相对论以及量子力学兼容，隶属于量子场论范畴。

1983年，欧洲核子中心（CERN）正式宣布发现了W及Z玻色子[8][9]，然而这两种粒子的质量在发现之前已经被标准模型准确地预研了。标准模型也因此被广泛地接受。

标准模型是一个规范理论，基于框架,其中用以描述电弱相互作用[1]，而则用来描述夸克之间的强相互作用[7]。

图. 1 标准模型中包含的基本粒子及基本相互作用包含了标准模型中所有的基本粒子及基本相互作用，基本粒子分为两类——费米子和玻色子。费米子是遵守费米-狄拉克统计的基本粒子[10]，拥有半整数自旋并遵守泡利不相容原理。标准模型里的费米子由夸克和轻子组成，总共36种夸克和12种轻子，费米子是组成物质的基本粒子，一切重子与多种原子及原子核都是由这些基本费米子组成的复合粒子。而玻色子是遵循波色-爱因斯坦统计的粒子[11]，拥有整数自旋且不遵守泡利不相容原理。玻色子分为规范玻色子和Higgs玻色子，其中规范玻色子包含了8种胶子、2种W粒子、1种Z粒子以及1种光子，这些玻色子负责传递各种作用力，其共同点就是自旋均为1；Higgs玻色子由希格斯场激发，自旋为0，并且稳定性极差，其不传播任何相互作用，它的存在是与基本粒子相互结合从而使基本粒子获得质量。

二十世纪末的1995年，美国费米实验室宣布“顶夸克”被发现[12]，至此标准模型包含的61种基本粒子除了Higgs粒子外已被全部发现，而针对Higgs粒子的探测也成为了粒子物理的重要任务目标。2012年，大型强子对撞机（LHC）的ATLAS和CMS实验组宣布发现了平均质量为125.09GeV的疑似Higgs玻色子，并且在之后的2013年正式确认所发现的确实是Higgs玻色子[13][14]。

Higgs玻色子的发现，证明了Higgs场的存在，补全了标准模型的最后一块拼图，成功解释了基本粒子是如何获取质量这一难题。由于在标准模型理论中的突出贡献，Peter Higgs获得了2013年的诺贝尔物理学奖。

### 探索Higgs粒子的意义

由于Higgs粒子与其他基本粒子的质量形成有紧密关系，可以说是“质量之源”，因此Higgs粒子被赞誉为“上帝粒子”[16]。它的发现，成为了基础物理学的一个里程碑，标志着粒子物理发展的新起点。

但标准理论并非完美，虽然Higss粒子被发现，但标准理论并没有预言它质量的准确数值；同时虽然希格斯理论解释了其他基本粒子如何获取质量，但无法准确预言质量的具体数值，这些数值只能通过实验测得。为了研究并解释相关质量，获得一套完整的理论计算方法，需要进一步对Higgs粒子展开探索研究。此外，虽然标准模型在电弱领域及强相互作用领域的应用非常成功，但它并非完整的理论，标准模型不包含引力作用，这是一大遗憾；并且标准模型理论不能解释中微子为何具有非零的质量[15]，也不能解释暗物质和暗能量。

对Higgs粒子的探索，有望解决这些问题，例如针对暗物质与暗能量，部分科学家认为Higgs粒子可能与大质量弱相互作用粒子发生作用，形成暗物质[17]。此外，探索Higgs粒子还可能拓宽标准模型，甚至挖掘出其背后的物理规律，基于以上原因，Higgs粒子已经成为粒子物理研究的最前沿课题。

### Higgs粒子相关实验现状

由于研究Higgs粒子对于整个理论物理界有极为重要的作用，因此世界上广泛地开展了制造并研究Higgs粒子的实验。考虑到Higgs粒子的稀有度极高，平均寿命只有s，作为质量之源，它在宇宙大爆炸之初就完成了使命，如今要再次捕获Higgs粒子，一般通过粒子对撞的方式来实现。

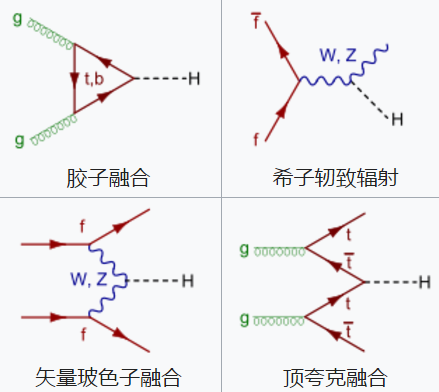


图. 2 Higgs粒子生成的费曼图

如图. 2所示，最常发生的生成Higgs粒子的反应一般认为有以下四种：

胶子融合[18]：在大型强子对撞机中，如果两个质子发生对撞，则有可能两个胶子碰撞在一起，在其碰撞后，经过虚夸克圈则可生成Higgs粒子。由于Higgs粒子与其他粒子的耦合跟粒子的质量成正比，因此在LHC这种强子对撞机中，这是主要的生成Higgs粒子反应，其发生概率是其他反应的十倍以上。

Higgs粒子韧致辐射[19]：如果费米子与反费米子碰撞，例如电子与正电子相互碰撞，则生成一个虚W玻色子或者虚Z玻色子，如果此时带有足够的能量，则可能会发射Higgs粒子，这是大型正负电子对撞机中最常发生的反应。

矢量玻色子融合[18]：由两个夸克分别发射的一个W玻色子或Z玻色子以或合并成一个中性的Higgs粒子。这种反应在强子对撞机和正负电子对撞机中都是次主要的反应。

顶夸克融合[18]：两个胶子衰变生成一对顶夸克和一对反顶夸克，然后一个顶夸克和一个反顶夸克结合可以形成一个Higgs粒子。这种反应发生概率较前面三种要小几个数量级。

LHC

ILC

介绍Higgs粒子背景，相关探测器项目

## CEPC项目介绍

世界上的环形正负电子对撞机

介绍CEPC项目的背景，设计目标

## 本文主要内容及结构安排

## 参考文献

1. Glashow S L. Partial-symmetries of weak interactions[J]. Nuclear Physics, 1961, 22(4): 579-588.
2. Higgs P W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(16): 508.
3. Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(9): 321.
4. Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Global conservation laws and massless particles[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(20): 585.
5. Weinberg S. A model of leptons[J]. Physical review letters, 1967, 19(21): 1264.
6. Salam A. Elementary particle theory[J]. Ed. N. Svartholm, Stockholm,\Almquist and Wiksell, 1968, 367.
7. Fritzsch H, Gell-Mann M, Leutwyler H. Advantages of the color octet gluon picture[J]. Physics Letters B, 1973, 47(4): 365-368.
8. Arnison G, Astbury A, Aubert B, et al. Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at s= 540 GeV[J]. Physics Letters B, 1983, 122(1): 103-116.
9. Banner M, Battiston R, Bloch P, et al. Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN pp collider[J]. Physics Letters B, 1983, 122(5-6): 476-485.
10. Fermi E. Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico[J]. Rendiconti Lincei, 1926, 145.
11. Bose S N. Plancks gesetz und lichtquantenhypothese[J]. 1924.
12. Abe F, Akimoto H, Akopian A, et al. Observation of top quark production in p p collisions with the Collider Detector at Fermilab[J]. Physical review letters, 1995, 74(14): 2626.
13. Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[J]. Physics Letters B, 2012, 716(1): 1-29.
14. O’Luanaigh C. New results indicate that new particle is a Higgs boson[J]. CERN-http://home. cern/about/updates/2013/03/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson (acessado em 21/08/2016), 2013.
15. Barger V, Marfatia D, Whisnant K. The physics of neutrinos[M]. Princeton University Press, 2012.
16. Lederman L M, Teresi D. The God particle: If the universe is the answer, what is the question?[M]. Houghton Mifflin Harcourt, 1993.
17. Physics World, ["Higgs could reveal itself in Dark-Matter collisions](http://physicsworld.com/cws/article/news/41218). British Institute of Physics. Retrieved 26 July 2011.
18. Baglio J, Djouadi A. Higgs production at the lHC[J]. Journal of High Energy Physics, 2011, 2011(3): 55.
19. Baglio J, Djouadi A. Predictions for Higgs production at the Tevatron and the associated uncertainties[J]. Journal of High Energy Physics, 2010, 2010(10): 64.

# CEPC电磁量能器原型机需求讨论

## 电磁量能器的指标需求分析

从CEPC角度分析对于ECAL的需求

## 电磁量能器的实现方法

可参考基金申请报告

各种ECAL比较，为何选用SiPIN

## 硅钨电磁量能器对电子学的需求

信号特征，对于读出电子学需求分析

# CEPC 电磁量能器原型机预研方案及仿真验证

## 硅钨图像型量能器方案调研

同行实验

## CEPC 电磁量能器原型机设计

整体设计，选用SiPIN，层数

## 针对原型机设计的仿真验证

## 本章小结

# 读出电子学设计

## 读出电子学系统架构

## 前端电子学模块

## 数据接口模块

## 数据获取模块

## 本章小结

# 探测器系统性能测试

## 电子学测试

## 探测器联调测试

## 本章小结

# 总结与展望

## 总结

## 展望

# 致 谢

# 在读期间发表的学术论文