

第一章 前言

1.1 粒子物理

物质组成的最小单位是什么？这是人们探索自然界的普遍规律时关心的问题。中国夏朝有“五行学说”，认为物质是由金、木、水、火、土组成；而古希腊有物质是由水、火、土、空气四种元素组成的“四元素学说”。19世纪，自然科学创立，物理、化学等领域相继诞生。19世纪初，道尔顿（John Dalton, 1766-1844）提出原子论，认为物质是由一种单一的粒子组成的 [?]。19世纪初，道尔顿（John Dalton, 1766 - 1844）提出原子论，认为物质是由一种单一的粒子组成的。19世纪末，英国物理学家汤姆逊通过真空管阴极射线实验发现了电子。20世纪物理学物理学得到了极大地发展，量子力学和相对论相继建立并蓬勃发展，各种粒子相继被发现。例如 1897 年汤姆逊发现电子；1901 年普朗克提出光量子假说，之后的 1905 年爱因斯坦利用此假说成功解释了光电效应；1911 年卢瑟福提出原子的核式结构，并于 1919 年发现了p；1932 年查德威克发现了中子；1932 年发现了第一个反粒子正电子；1937 年发现 μ 子；1947 年发现 π 介子；1950 年发现 K 介子， Λ, Σ ；1955 年发现反质子；1956 年发现反中子；1974 年发现 J/Ψ 介子，证实了粲(c)夸克的存在；1975 年发现 τ 轻子；1983 年发现玻色子： W^\pm 和 Z^0 ；1995 年发现顶夸克(top)；2012 年发现希格斯(Higgs)粒子 [2][3]。基本粒子的发现和研究，加快了粒子物理学的发展进程。

表 1.1: 四种基本相互作用性质的比较

相互作用	源	相互作用常数	媒介子	典型作用时间	力程
强作用	色荷	$\cong 1\sim 10$	胶子(g)	$10^{-23}s$	1fm
电磁作用	电荷	$\cong 1/137$	光子(γ)	$10^{-16}s$	∞
弱作用	弱超荷	$\cong 10^{-5}$	中间玻色子(W^\pm, Z^0)	$10^{-10}s$	1/400fm
引力	质量	$\cong 5\times 10^{-40}$	—	—	∞

粒子物理学又称高能物理，是研究基本粒子的性质、运动、相互作用、相互转化的规律的学科，是物理学的基础学科，也是物理学研究的最前沿[?]。自然界存在四种基本的相互作用：强相互作用、弱相互作用、引力相互作用、电磁相互作用，粒子物理主要研究对象是除引力以外的其他三种相互作用。四种基本相互作用的性质如表 1.1 所示。标准模型（Standard Model, SM）是目前描述基本相互作用以及基本粒子最成功的理论[?]。标准模型认为物质的最基本结构是夸克、轻子以及相互作用传播子。夸克按性质和质量可以分成三代，分别为 (u, d)、(c, s)、(t, b)，具有分数电荷；轻子也分为三代，分别是 (e^- , ν^e)、(μ^- , ν^μ)、(τ^- , ν^τ)。每一种夸克和轻子都有相应的反粒子；光子是电磁相互作用的传播子， W^\pm 及 Z^0 粒子是弱相互作用的传播子，胶子是强相互作用

的传播子； Higgs 粒子是对称性自发破缺的源头，使得规范玻色子和费米子具有了质量。图 1.1 是基本粒子的示意图。

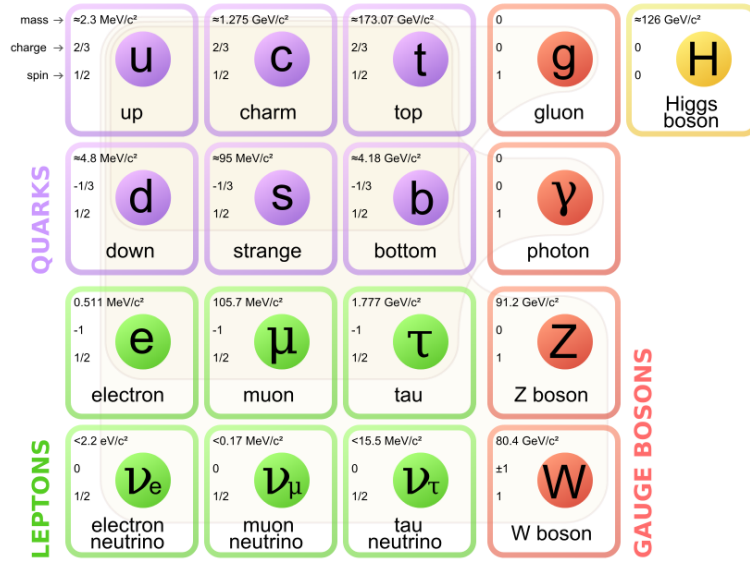


图 1.1: 标准模型中的基本粒子

粒子物理是一门实验学科。研究微观粒子需要很高的能量，因此需要高能加速器和探测器。对撞机在高能物理中有着十分重要的地位。 J/ψ 粒子、 τ 轻子和 Υ 粒子都可以在对撞实验中被发现，高能量的 Z^0 粒子、 W^\pm 粒子、t 夸克和 higgs 粒子也都是在对撞实验中被发现的。表 1.2 列出了世界上主要的加速器及其研究重点。

表 1.2: 主要高能物理对撞机及其研究重点

名称	国家	粒子源	能量(Gev)	研究重点
BEPC(BEPCII)	中国	e^+/e^-	2~5	粲夸克、 τ 粲能区物理
CESR	美国	e^+/e^-	10	b 夸克
CESR-c	美国	e^+/e^-	3-11	粲偶素、D 物理
HERA	德国	e^-/\bar{p}	30/820	质子结构
TEVATRON	美国	p/p	1800	t 夸克
PEPII	美国	e^+/e^-	3.1/9	b 介子、CP 破坏
KEKB	日本	e^+/e^-	3.5/8	b 介子、CP 破坏
RIHC	美国	A_u/A_u	200	重离子对撞
LHC	瑞士(CERN)	p/p(Pb/Pb)	14000(2700)	Higgs、b 介子、CP 破坏、重离子

1.2 环形正负电子对撞机 (CEPC)

1.2.1 CEPC 提出背景

希格斯粒子[?] [?]是为了解释物质的质量起源而被提出来的。它自旋为零，自身的质量来源还待进一步研究，参与非规范相互作用。希格斯粒子和其

自身的相互作用对宇宙早期演化具有重要的影响。希格斯粒子由于十分重要被称为“上帝粒子”，对希格斯粒子的研究能引导粒子物理和其他理论的发展，最终可能引起新物理、新技术的发展。希格斯粒子在二十世纪六十年代被提出，但当时对撞机的能量无法满足产生希格斯粒子的要求，所以不能从实验证实希格斯粒子的存在。直到2012年7月4日，欧洲核子中心（CERN）发布了其两个探测器独立探测到疑似希格斯粒子的消息[?] [?] [?]: CMS探测到一种质量为 $125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$ 的未知玻色子，如图 1.2 所示[?]; ATLAS 探测到质量为 $126.5 \text{ GeV}/c^2$ 的未知玻色子[?]。这一消息引起了粒子物理界的巨大轰动。之后经 LHC 进一步证实，确认了新发现的玻色子就是希格斯粒子。希格斯粒子的发现，标志着标准模型预测的粒子被全部发现。然而高能物理科学家普遍相信，标准模型并不是粒子物理的终极理论，我们仍需探索标准模型之外的新物理。

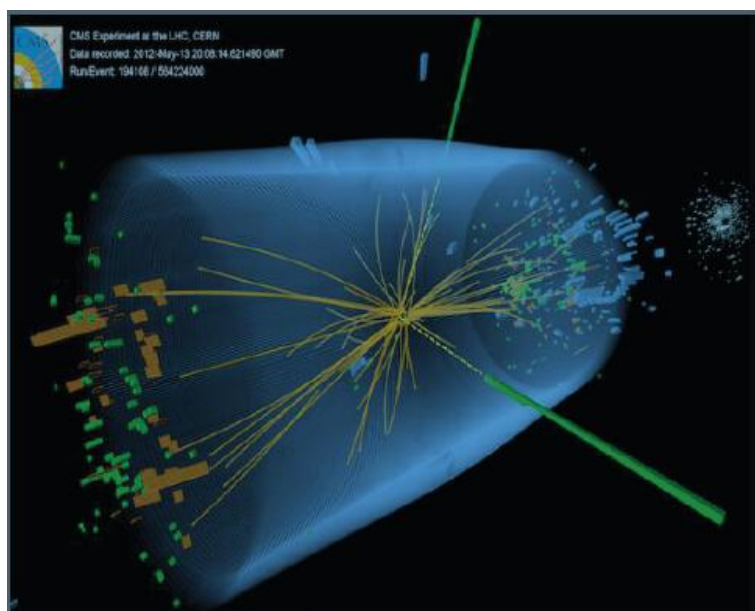


图 1.2: CMS捕获的Higgs粒子

为了探索超出标准模型之外的新物理，需要有更高能量的探测器。目前对Higgs粒子进行研究的是欧洲大型强子对撞机(Large Hardron Collider, LHC), LHC由于是质子对撞机，所以对撞产生粒子的能量很高，使其具有很强的发现新物理的能力。但由于强子对撞过程复杂，产生很大的本底，不利于对希格斯粒子的测量，并且由于质子不是基本粒子，无法计算对撞时质心的质量。由于以上种种不利因素，使得LHC对希格斯粒子测量时产生很大的误差。想要更加精确地研究希格斯粒子的性质及其作用原理，必须依赖轻子对撞机，建造希格斯工厂对希格斯粒子进行更加精确深入的研究。

为了推动高能物理学的进一步发展，中国高能物理学界提出了建造高能环形正负电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, CEPC),之后升级为超级强子对撞机(Super Positron Positron Collider, SPPC)的方案。方案示意图如

1.3 所示。2015年，CEPC的设计报告初步完成。作为希格斯工厂，CEPC 对撞的质心系能量240-250 GeV，周长为 50-100公里的环形正负电子对撞机，预计每年每个对撞点亮度可达到 $250fb^{-1}$ ，它在 $5fb^{-1}$ 的总积分亮度下。十年内可以产生约一百万个希格斯波色子[?]。

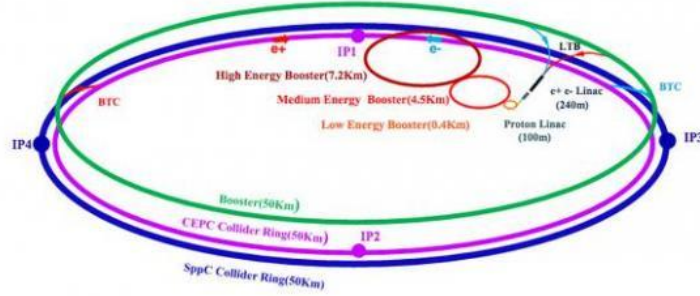


图 1.3: CEPC和SPPC设计图

1.2.2 CEPC的主要目标

CEPC的主要物理目标有：将正负电子加速到250GeV左右对撞，对正负电子对撞后产生的希格斯粒子进行精确测量。在对希格斯粒子研究过程中，深入探究质量起源以及电弱CP破缺机制等基本物理问题，并发现可能超出标准模型之外新物理现象的线索。CEPC运行结束后，在其同一隧道升级为SPPC。SPPC可将对撞粒子的能量加速至50-100TeV，能量超过LHC 能量的 7 倍。SPPC的主要目标为通过高能量的质子对撞，探索标准模型之外的新物理现象如超对称物理。这将有助于我们队宇宙中的暗物质，暗能量以及宇宙暴胀产生原理形成新的认识，从而能更加深入地了解我们所处的宇宙。

1.2.3 CEPC模拟软件框架

目前高能物理对撞机实验设备建造前都需要先对其模拟研究。对于CEPC来说，探测器设计是整个CEPC设计中很重要的一环。探测器模拟通过蒙特卡洛(Monte Calo)方法模拟重建粒子产生、运输以及相互作用、响应时间等过程，对探测器的建造进行模拟研究。对探测器的设计和建造来说，探测器模拟具有十分重要的参考价值。探测器模拟可以用于算法研究，参数优化，以及估计探测器的探测效率，其大致流程如图 1.4 所示。

在CEPC采用Geant4 作为其探测器模拟的工具。Geant4 是由欧洲核子中心主导开发的一款基于蒙特卡洛的程序包。其可以用来模拟高能粒子的相互作用和在物质中的输运过程。Geant4 的功能涉及到探测器模拟的每一个子过程，如事例产生、几何、物质材料、探测器响应、径迹跟踪、图形显示，用户接口等[?]。其功能示意图如图1.5 所示。用户可以根据自己的需要选择相应的功能。高能粒子的物理相互作用包含粒子类型以及相互作用类型两个部分。Geant4 提供了各种基本粒子的种类和属性，以及统一的电磁相互作用模型，多种强相互

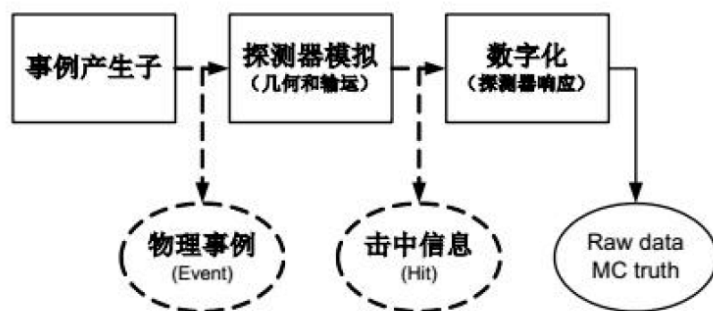


图 1.4: 探测器模拟重建算法流程图

作用模型。除此之外，Geant4 还提供了用于检查Geant4 程序是否正确的可视化接口。

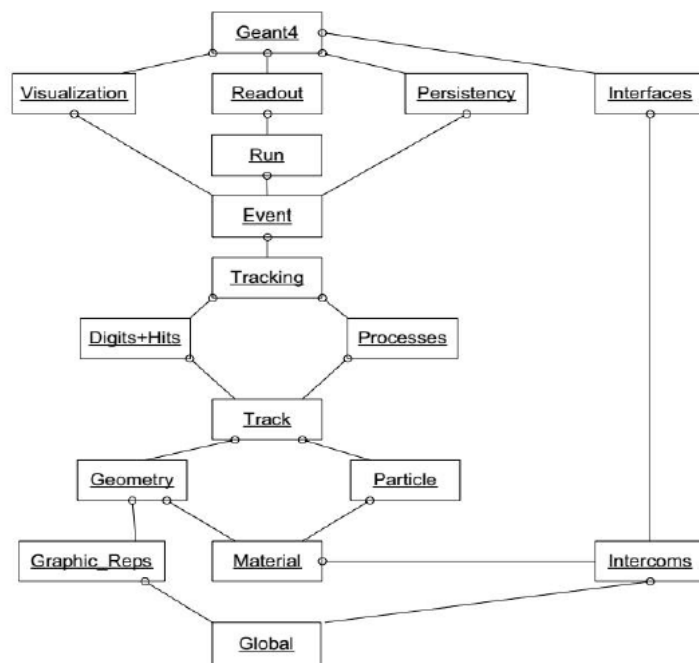


图 1.5: Geant4软件包结构示意图

1.2.4 CEPC探测器结构

CEPC探测器包含顶点探测器，时间投影室，硅径迹室，量能器， μ 探测器等若干子探测器，其结构如图1.5 所示。其设计方案借鉴了ILC 的设计，并结合自身条件作了一些改变，比如缩小CEPC探测器整体尺寸和探测器的Half Z 值，改变顶点探测器内半径以及时间投影室外半径等。个子探测器的结构和功能如下：

(1). 中心径迹探测器和顶点探测器

顶点探测器和中心径迹探测器的结构如图1.6 和图1.7 所示。它们离正负电子对撞点最近，是CEPC整个探测器重要的组成部分，其主要功能有：

- (a).确定对撞点的位置。
- (b).测量次级粒子衰变的顶点。
- (c).测量高能粒子在磁场中偏转的径迹，曲率半径和电荷符号。
- (d).测量次级粒子电荷量，并与其它探测器得到的信息相结合，测量粒子的类型和动量。

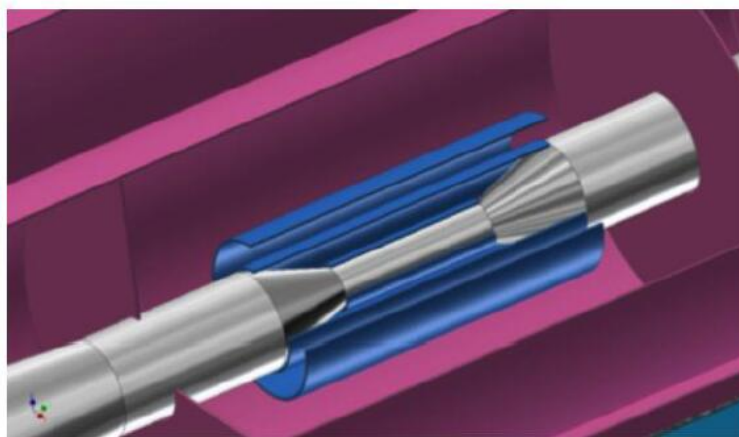


图 1.6: 顶点探测器

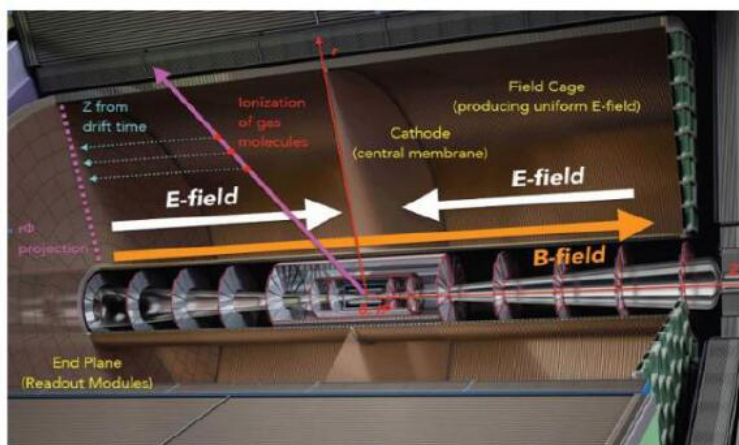


图 1.7: 中心径迹探测器

(2).量能器

量能器的作用为测量高能粒子的位置，能量，飞行方向等物理量。CEPC量能器结构参考ILC 量能器的设计结构（图1.8）。量能器能够对粒子能量进行很好地测量，已成为高能物理实验中不可或缺的部分。它具有如下特性：

- (a).既能测量带电粒子，又能测量中性粒子。
- (b).能够精确地测量入射粒子的方向和位置信息。

- (c).能量的测量精度随着入射粒子能量的提高而提高。
- (d).对不同的粒子有不同的相应，可用于粒子鉴别。
- (e).在能量很高的情况下，可以有较小的尺寸。
- (f).时间相应快，可进行高计数工作。

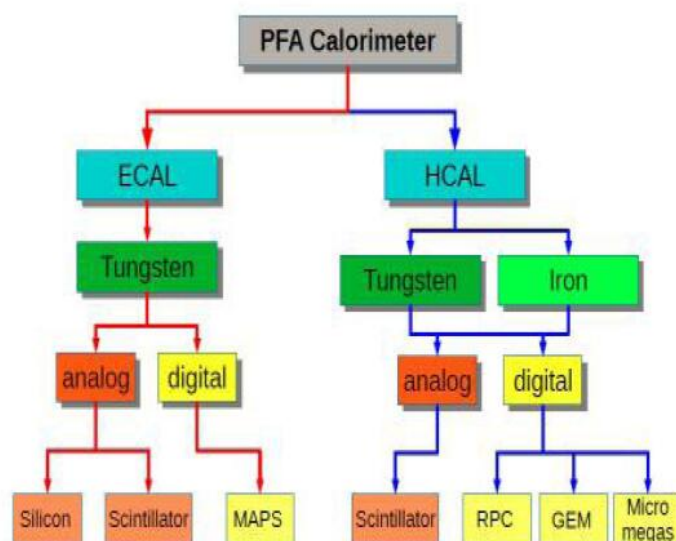


图 1.8: ILC量能器候选方案

(3). μ 子探测器

μ 子探测器作用为测量 μ 子的位置，动量等信息，其布局结构如图1.9所示。 μ 子探测器可鉴别出 μ 子和其它粒子。由于 μ 子探测器的空间比较大，它可以补偿量能器部分的能量泄漏[?]。

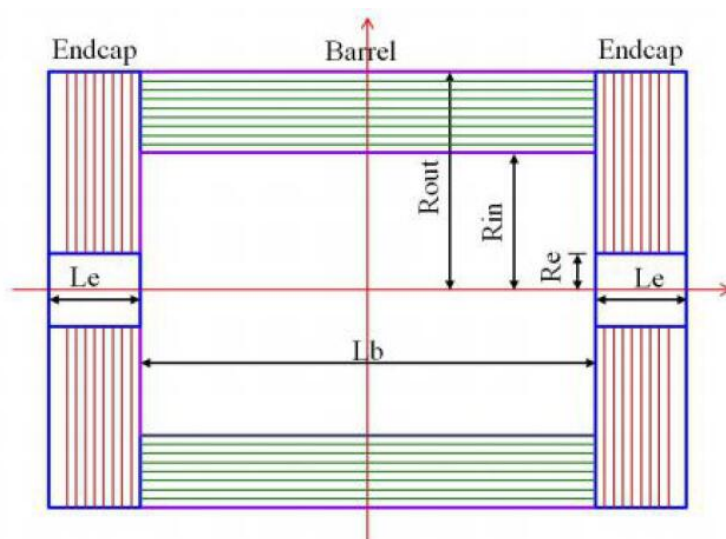


图 1.9: Muon探测器布局结构

1.3 喷注味道鉴别

喷注(jet)是指在高能实验中产生的呈喷射状的粒子团 [?]。喷注味道鉴别(jet flavor tag)是指将喷注中的底(b)夸克, 粲(c)夸克和轻夸克区分开来。虽然标准模型日趋完善, 但高能物理学界普遍相信标准模型并不是解释物理现象的终极理论, 在更高的能量区间仍有很大的潜力发现新粒子和新的相互作用。而发现新物理依赖于对高能粒子及其相互作用的精确测量。在CEPC 实验中, 喷注味道鉴别对测量 Higgs 到 $b\bar{b}$, $c\bar{c}$ 的分支比等物理至关重要, 并且可以用来精确检验 Higgs 到费米子对的 Yukawa 耦合和其它标准模型性质, 比如: $R_b(Z \rightarrow b\bar{b})$; 同时对于 jet 的研究也会顶点探测器的设计优化提出更多的依据。

1.4 机器学习

机器学习(Machine Learning)是人工智能领域研究的核心内容。它吸收了概率论, 信息论, 控制论等学科的成果, 研究计算机模拟人类的学习行为, 以获取新的知识技能并不断完善自身的性能。随着计算机计算能力的提升和算法的发展, 机器学习得到越来越广泛的应用, 在很多领域(诸如数据挖掘, 生物医药, 图像识别等)都取得了瞩目的成就。

喷注味道鉴别需要从探测器中读出数据, 由于数据具有数据量大, 多维度的特点, 很难使用传统公式推理的方式。

第二章 喷注味道鉴别流程

基于机器学习算法设计喷注味道鉴别分类器需要有三个过程，即训练，验证和测试。训练阶段用一部分样本（训练集）对机器学习模型训练，使模型的鉴别能力不断优化提升；验证过程用一部分样本（验证集，不包含训练集）评估训练阶段获得模型的性能，并根据模型在验证集上的性能更改模型超参数，继续进行训练；测试过程用一部分样本（不能包含训练集，测试集）对经过训练，验证过程后的模型进行测试。整个系统主要由四部分组成：数据获取，数据预处理，特征选择和训练，其流程示意图如图 2.1 所示。

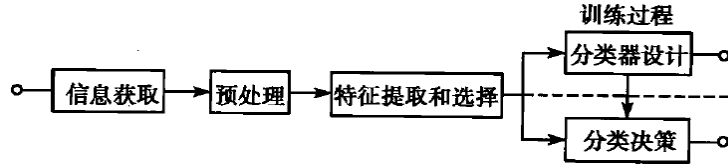


图 2.1: 机器学习解决喷注味道鉴别问题流程

2.1 原始数据获取

在CEPC实验中，能够被探测装置直接探测到的基本粒子必须满足如下条件：(1).必须是稳定粒子或者有较长的寿命，这样粒子可以在探测器中飞行较长的距离；(2).能够与探测器装置中的物质发生相互作用，因此可以被探测器测量。能够满足上述条件的基本粒子只有有限的几种，常见的有：

$$\gamma, e^{\pm}, \mu^{\pm}, \pi^{\pm}, K^{\pm}, p, \bar{p}.$$

高能物理实验观测到的是上述粒子的响应输出信号，分为时间(TDC)信息和幅度(ADC)信息。CEPC预研阶段，使用Geant4模拟上述信息，将其储存在计算机集群中，以供离线的物理分析。

2.2 原始数据预处理

探测器观测记录的时间信息和幅度信息数据虽然包含了事例的全部可观测信息，但这些信息不能反映事例的”面貌“和性质，不能用来直接作物理分析。将原始数据转化为能够直接反映粒子性质的物理数据过程称为预处理。高能物理的数据预处理包含模拟和重建两个过程。这两个过程在 [?] 中有详细讲解，本文不作介绍。

2.3 特征提取和选择

为了有效地对事例分类识别, 需要对预处理后的数据进行筛选和变换, 以获得反映事例分类本质特征的物理量, 这一过程就是特征提取和选择。特征提取和选择应该有如下三个原则:

- (1).有效性, 即经过特征提取后的物理量应该能够有效区分信号和本底。
- (2).充分性, 即提取特征后能够保留事例的完整信息。
- (3).具有降维能力, 通过特征提取能够有效地减少用它区分信号和本底所需的计算量。

本文用Geant4软件通过蒙特卡洛算法模拟产生CEPC喷注原始数据, 并经过模拟和重建过程, 获得预处理数据, 然后经过特征提取和选择过程, 提取事例的63个物理特征。提取特征变量参考 [?]。经过上述过程处理后的数据包含3类: b夸克, c夸克和其他夸克。每类包含210000事例。每个事例包含63个变量。本课题将所有事例分为训练集(400000个事例), 3个验证集(每个验证集包含50000个事例)和测试集(80000事例)。

2.4 模型训练

本文使用机器学习的方法获得喷注味道鉴别分类器。采用的算法为神经网络和基于决策树的集成算法。神经网络算法和基于决策树的集成算法将在第三章和第四章作详细介绍。

2.5 机器学习分类器的性能度量

性能度量(performance measure)是衡量模型能力的评价标准。在对比不同的模型时, 使用不同的性能度量往往会导致不同的评判结果[?]。本文从精度, 信号选择效率, 本底排斥率和模型训练时间等方面比较不同模型的性能对比。

2.5.1 精度

精度(accuracy)是指样本中被正确分类的事例占事例总数的比例。

2.5.2 信号效率, 误判率

虽然通过精度可以反映分类器判断事例味道的整体准确度, 但对于特殊的任务, 比如要求尽量多地将信号事例挑选出来, 或者挑出来的信号尽可能是正确的, 这时精度就不能作为评判依据, 需要使用其他的性能度量。

对于喷注味道鉴别, 根据其真实的类别和分类器模型预测的类别组合可将其划分为真正例(True Positive, TP), 假正例(False Postive, FP), 假负例(False Negative, FN)和真负例(True Negative, TN)四种情形。四种情形分别为:

真正例: 真实类别为信号, 预测类别也为信号的事例。

假正例: 真实类别为本底, 预测类别为信号的事例。

假负例：真实类别为信号，预测类别为本底的事例。

真负例：真实类别为本底，预测类别也本底为的事例。

预测结果的混淆矩阵(confusion matrix)如表 2.1 所示。

表 2.1: 预测结果的混淆矩阵

真实情况	预测结果	
	正例	反例
正例	TP (真正例)	FN (假反例)
反例	FP (假正例)	TN (真反例)

信号效率的定义为：

$$E_{sig} = \frac{TP}{TP + FN}$$

本底排斥率的定义为：

$$E_{bkg} = \frac{TN}{TN + FP}$$

信号效率和本底排斥率是一对矛盾的度量。一般来说，信号效率高时，本底排斥率往往偏低，而本底排斥率高时，信号效率往往偏低。通过训练获得分类器后，可根据不同的判选条件得到分类器不同的信号效率，本底排斥率，然后以信号效率为纵轴，本底排斥率为横轴，绘制 E_{sig} - E_{bkg} 曲线，通过 E_{sig} - E_{bkg} 曲线，可以对分类器在不同判选条件下的本底排斥率和信号效率有直观的了解。

第三章 人工神经网络

3.1 神经元模型

人类的大脑思维能力是人类智能的重要体现。大脑的神经网络系统中，神经元(neuron)是处理信息的基本单元。它由四部分组成：细胞体，树突，轴突和突触。树突接受外来信息，并传递给细胞体，是神经元细胞的输入通道；细胞体主要作用为接受并处理信息，是神经元细胞的新陈代谢中心；轴突向外传递信号，是神经元细胞的输出通道；突触为神经元末梢与另一神经元的细胞体或树突的接触，是神经元细胞的输入输出接口。图 3.1 为神经元结构的示意图。神经元有兴奋和抑制两种状态，其工作原理为：处于抑制状态的神经元，树突接受外来脉冲信号传递给细胞体，如果有多个树突传递则以代数和的方式叠加；如果输入的脉冲信号超出某个阈值，则神经元进入兴奋状态，并通过轴突向其它神经元传递信号。

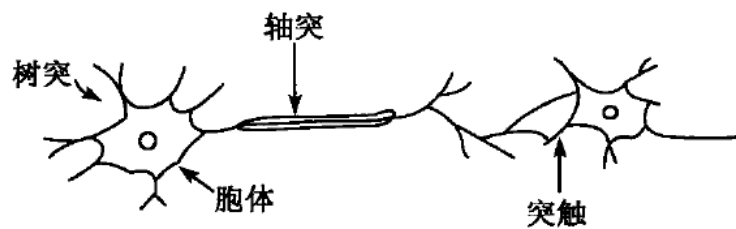


图 3.1: 神经元结构示意图

人工神经元是一种模仿生物神经元信息传递方式的数学模型，其结构示意图如图3.2 所示。

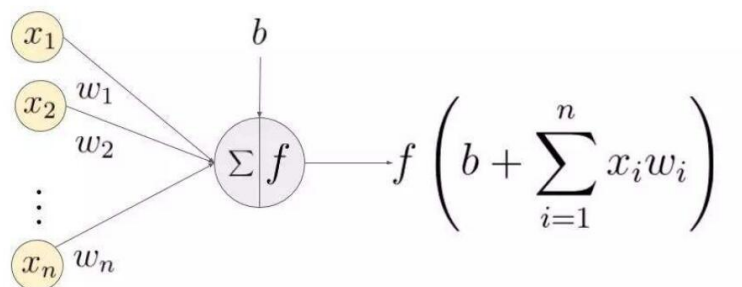


图 3.2: 人工神经元

图中， x_1, x_2, \dots, x_n 为外界的输入信号，相当于神经元的树突； w_1, w_2, \dots, w_n 为输入信号的权重(weight),相当于神经元中突触的连接强度； Σ 表示对n个输入

信号的累加, f 为对累加信号的响应, 成为激活函数, 类似于神经元的细胞体;
 b 为偏置项(bias), 类似于神经元的激活阈值。神经元的输入可表示为:

$$input = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b = \sum_{i=0}^n w_i x_i (x_0 = b, w_0 = 1)$$

输出为:

$$output = f(input)$$

常见的激活函数有:

(1).线性函数

$$f(x) = x$$

(2).符号函数

$$f(x) = \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ -1, x < 0 \end{cases}$$

(3).饱和函数

$$f(x) = \begin{cases} 1, x \geq \frac{1}{k} \\ kx, -\frac{1}{k} \leq x < \frac{1}{k} \\ -1, x < -\frac{1}{k} \end{cases}$$

(4).双曲正切函数

$$f(x) = \text{th}(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1$$

(5).阶跃函数

$$f(x) = \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases}$$

(6).Sigmoid函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

(7).Relu函数

$$f(x) = \max(0, x)$$

3.2 神经网络基本结构

把许多人工神经元按照特定的层次结构连接起来, 就得到神经网络。本文采用全连接型神经网络(Fully Connected neural network), 其连接方式如图3.3所示。全连接神经网络每一层与下一层神经元互相连接, 同层之间的神经元不连接, 包含输入层(input layer), 隐层(hidden layer)和输出层(output layer)。输入层接受输入信号, 并将其传递给隐层; 隐层接受上一层传递的信号, 将其通过激活函数处理后传递给下一层; 输出层输出网络的分类结果。

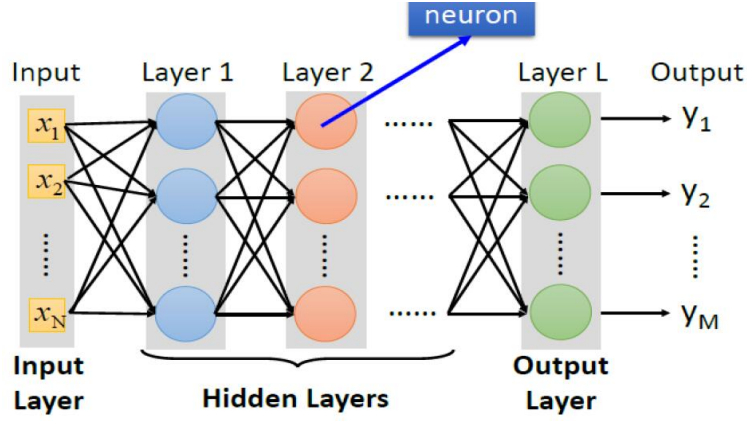


图 3.3: 全连接神经网络示意图

3.3 前向传播与反向传播

神经网络更新神经元的方式为根据输入层的值以及每个值的权重更新第一层的输出值，再根据第一层的输出值及每个输出值的权重更新第二层的输出值，依次类推直至更新输出层的输出值，此过程为正向传播过程。其计算公式为：

$$z_j = f(\sum_i w_{ji} z_{j-1})$$

其中 z_j 表示网络中第 j 层神经元的输出值， w_{ji} 表示 $j-1$ 层中第 i 个神经元同第 j 层神经元的连接权重。通过前向传播获得输出层的之后，通过输出层与真实值比较，得到损失函数 L 。损失函数有多重形式，本文采用交叉熵损失函数，其计算方式为：

$$L = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [y^i \log \hat{y}^i + (1 - y^i) \log(1 - \hat{y}^i)]$$

其中， y^i 表示第 i 类的真实值（0或1）， \hat{y}^i 表示第 i 类神经网络在输出层的输出值。

通过损失函数从后往前算出隐含层更单元的梯度，并以此修正各层之间的权重，此过程为反向传播过程。具体过程为：

输出层权重梯度：

$$\Delta w^L = \frac{\partial L}{\partial \hat{y}} * \frac{\partial \hat{y}}{\partial w^L}$$

输出层权重调整：

$$w^L = w^L + \Delta w^L$$

隐层权重梯度：

$$\frac{\partial L}{\partial z^l} = \frac{\partial L}{\partial z^{l+1}} * \frac{\partial z^{l+1}}{\partial z^l}$$

$$\Delta w^l = \frac{\partial L}{\partial z^l} * \frac{\partial z^l}{\partial w^l} = \frac{\partial L}{\partial z^{l+1}} * \frac{\partial z^{l+1}}{\partial z^l} * \frac{\partial z^l}{\partial w^l}$$

隐层权重调整：

$$w^l = w^l + \Delta w^l$$

(1).神经网络：准确率： 0.791 参数： hidden layers 5: Dropout:0.3 for the layer 4 and layer5 L2 regularizer:0. 00003 Epochs:50 running time:1950.1 Val accuracy: 0.791

参考文献

- [1] 朱永生. 实验物理中的概率和统计. 科学出版社, 2006.
- [2] G. Aad. et al. (ATLAS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:1–29, 2012.
- [3] S.Chatrchyan. et al. (CMS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:30–61, 2012.
- [4] 吕才典. 粒子物理学. 讲义, 中科院高能所, 2014.
- [5] 章乃森. 粒子物理学[M]. 北京科学出版社, 北京, 1968.
- [6] 杜东生, 杨茂志. 粒子物理导论. 北京科学出版社, 2014.
- [7] S. Weinberg.. A Model of Leptons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 19, 1967.
- [8] 唐孝威主编. 粒子物理实验方法. 高等教育出版社, 1982.
- [9] 徐克尊等编. 粒子探测技术. 上海科学技术出版社, 1981.
- [10] 谢一冈等主编. 粒子探测器与数据获取. 科学出版社, 2003.
- [11] 薛凤家等主编. 诺贝尔物理学奖百年回顾. 国防工业出版社, 2003.
- [12] 谢家麟等. 北京正负电子对撞机和北京谱仪. 浙江科学技术出版社, ISBN7-5341-0721-0, 1996.
- [13] 中国科学院高能物理研究所. BEPCII初步设计报告. 2003.
- [14] 中国科学院高能物理研究所. 北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII). 2006.
- [15] M.Ablilim. et al. (BESIII Collaboration). *Phys.Rev.Lett*, 110:252001, 2013.
- [16] 郑志鹏主编. 北京谱仪II正负电子物理(第一版). 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [17] M.Ablikim. et al. Design and Construction of the BESIII Detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 614:345–399, 2010.
- [18] Yuan C Z. et al. 高能物理与核物理, 24(12):1201, 2002.
- [19] Wang Y F. Chao K T et al. physics at BESIII. *Int. J. Mod. Phys., A* 24(1), 2009.

- [20] 王贻芳主编. 北京谱仪(BESIII)的设计与研制. 上海科学技术出版社, 2011.
- [21] 阮丽娟等. TOF在STAR实验中的标定. 高能物理与核物理, 29, 2005.
- [22] jian wu. et al. The performance of the TOF tray in STAR. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 538:243–248, 2005.
- [23] Yi Wang. et al. Production and quality control of STAR-TOF MRPC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 613:200–206, 2010.
- [24] A. Alici. Status and performance of the ALICE MRPC-based Time-Of-Flight detector. *Jinst*, 7, 2012.
- [25] A. Alici. Particle identification with the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 766:288–291, 2014.
- [26] ZHAO Chuan. et al. Time calibration for the end cap TOF system of BESIII. *Chinese Physics C*, 35(1):72–78, Jan., 2011.
- [27] 王小状. 北京谱仪端盖飞行时间探测器升级改造的MRPC性能研究. 中国科学技术大学博士论文, 2016.
- [28] Barrand G. et al. Proceeding of CHEP2000. February 6-12,2000.
- [29] Liu H M. Li W D et al. Proceeding of CHEP06. February 13-17,2006.
- [30] root. <http://root.cern.ch/>.
- [31] cern. <http://cernlib.web.cern.ch/cernlib/>.
- [32] 张晓梅等. . 核电子学与探测技术, 25(6):638, 2005.
- [33] 马想等. . 核电子学与探测技术, 27(4):670, 2007.
- [34] Ma Xiang. et al. Determination of event start time at BESIII. *Chinese Physics C*, 32(9), Sep., 2008.
- [35] 王亮亮等. BESIII主漂移室径迹的外推和径迹匹配. 高能物理与核物理, 31(2), Feb.,2007.
- [36] 伍灵慧. BESIII漂移室离线刻度研究及模型的束流测试. 中国科学院高能物理研究所博士论文, 2007.
- [37] 王纪科. BESIII径迹拟合算法与GPUPWA的相关开发. 中国科学院高能物理研究所博士论文, 2009.

-
- [38] Ming Shao. et al. Upgrade of the calibration procedure for a STAR time-of-flight detector with new electronics. *IOP science.*, 20:025102, 2009.
- [39] BIAN jian Ming. et al. Absolute photon energy calibration for the BESIII EMC. *Chinese Physics C*, 34:72–77, 2010.
- [40] Bauer A J M. BaBar Note 521. 2000.
- [41] Stanley B.and other著, 王刚, 杨巨峰译. *C++中文版 (第五版)*. 电子工业出版社, 2013.
- [42] 胡继峰. *BESIII*飞行时间计数器的刻度方法及离线软件. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2007.
- [43] 王贻芳主编. 北京谱仪(*BESIII*)的设计与研制. 上海科学技术出版社, 2011.
- [44] M. Ullrich. et al. Implementation of a Multigap-Resistive Plate-Chamber as Time of Flight Detector into the BOSS Framework. April 6,2014.
- [45] A. Akindinov. et al. Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. *Eur. Phys. J. Plus*, 128, 2013.
- [46] K.L.He. Status and Plan for Analysis and Tools software. *BESIII CollaborationMeeting*, 2007.