

密级:_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

BESIII 多气隙电阻板室飞行时间探测器刻度方法的研究

作者姓名: 郭迎晓

指导教师: 孙胜森 研究员

中国科学院高能物理研究所

学位类别: 工程硕士

学科专业: 计算机技术

培养单位: 中国科学院高能物理研究所

2017年 6月

The study of calibration algorithm of time of flight detector
based on multi-gap resistive plate chamber at BESIII

By

Yingxiao Guo

A Thesis Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Engineering

Institute of High Energy Physics
June, 2016

研究生学位论文声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签名：_____日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院高能物理研究所“关于中国科学院高能物理所研究生论文及研究成果使用权的规定”（2001）高发研生字第 315 号文件，即：高能物理研究所拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按规定提交学位论文，高能物理研究所可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，高能物理研究所可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供科研人员阅读，或在所内网站供科研人员浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆等相关部门报送可以公开的学位论文。

签名：_____日期：_____

摘 要

北京谱仪 (BESIII) 的物理目标是对 τ -粲 (c) 物理进行高精度的实验测量并寻找新物理。在较大的动量范围内很好地鉴别区分各种带电粒子是 BESIII 探测器设计的要求。BESIII 探测器的粒子鉴别系统主要由主漂移室 (MDC) 的 dE/dx 和飞行时间探测器 (TOF) 组成。飞行时间探测器的主要物理目标是粒子鉴别 (PID)，粒子鉴别能力的大小由相同动量不同种类粒子的飞行时间差和时间分辨决定。升级改造前的端盖飞行时间探测器采用塑料闪烁体直接耦合光电倍增管的方案，对于 π 介子，时间分辨达到 138 ps，已经不能满足 BESIII 实验高精度测量的需要。2015 年 10 月，BESIII 实验完成了端盖 TOF 的升级改造，用时间分辨性能更好的多气隙电阻性板室 (MRPC) 替代了原来的闪烁体，新的探测器参与了 2015-2016 运行取数。对 MRPC 端盖 TOF 离线数据刻度算法进行研究，并开发相关的软件，通过消除原始测量时间随粒子击中位置和过阈时间 (Time over Threshold, TOT) 的游动，进一步提高粒子鉴别能力，对实现 BESIII 高精度测量的物理目标是十分重要和不可或缺的。

国际上，相对论重离子对撞机 (RHIC) 上的 STAR 实验和大型强子对撞机 (LHC) 上的 ALICE 实验都采用了 MRPC 作为飞行时间探测器，结合他们各自的特点，分别采用多次样条插值和多项式拟合方法进行探测器刻度。

MRPC 端盖 TOF 的离线刻度算法软件基于 BESIII 离线数据处理和分析软件平台 (BOSS)。利用 BESIII 实验获得的真实数据，通过在线事例分类得到 Bhabha 事例做为刻度样本，对刻度算法进行了研究。研究对测量时间随带电粒子击中读出条位置，过阈时间的变化关系，以及他们之间的关联进行了分析。论文首先利用多次样条插值方法构造刻度算法，对原始测量时间随过阈时间的复杂的依赖关系进行了刻度，研究发现由于信号反射的存在，这种刻度方法的效果并不理想。通过对过阈时间的击中位置依赖关系的分析，揭示了信号在读出条内的反射造成 TOT 多峰的形成机制。然后在构造刻度公式方法中，首先对击中位置进行了刻度，这个过程同时也消除了过阈时间对击中位置的依赖，然后再对时间-幅度的关系进行刻度，收到了良好的效果，单条时间分辨达到 53.5 ps。论文还对刻度公式的适用性问题，以及刻度算法中过阈时间和击中位置的关联性进行了讨论。最后，论文介绍了离线刻度算法软件的实现。

利用 BESIII 获取的 Bhabha 事例样本，对升级改造后的 MRPC 端盖 TOF 的离线数据刻度算法进行了研究，确定了刻度的流程，构造了合理的刻度公式，完成了相关软件的开发。离线刻度的结果优于探测器硬件设计指标，新的刻度算法将会对 BESIII 获得高精度的测量结果产生积极的促进作用。

关键词： 离线刻度，多次样条插值，多气隙电阻性板室，飞行时间探测器，北

京谱仪

Abstract

Physics goal of BESIII are the tau-c physics in experimental measurement with high precision and searching new physics. In a large range of momentum, it is required to identify all species of charged tracks well in design of BESIII detector. The particle identification system of BESIII detector consists of Main Drift Chamber(MDC) which is providing the measurement of dE/dx and Time of Flight Detector(TOF). The main physical goal of TOF is to implement the Particle Identification(PID), and PID capability is determined by the different values of the time of flight for different species of particles with the same momentum and the time resolution. Before the upgrade, the endcap TOF adopted the project using plastic scintillator coupled with photomultiplier tubes(PMT) directly, and the time resolution is 138ps for pions. However, it couldnot satisfied the requirement of the high precision of BESIII experimental measurement. In October, 2015, the upgraded endcap TOF have been completed in BESIII experiment. And the new endcap TOF based on MRPC which has a better time resolution to substitute plastic scintillator. This new detector technology has been participate the physical data taking in the period of the year 2015 to 2016. And the study of the offline data calibration algorithm and develop the relevant software for MRPC endcap TOF is eliminate the original measurement of time with the dependence of the particle hit position and the time-walk of Time over Threshold(TOT), this study further improve the capability of PID, and is important and indispensable to reach the physical goal of high precision measurement at BESIII.

Both the STAR experiment in RHIC and the ALICE experiment in LHC used MRPC as their TOF detector. And considering their own characters, the offline date are calibrated using spline-fit method and polynomial fitting method.

The offline data calibration algorithm of MRPC endcap TOF is based on BESIII offline data processing and analysis software(BOSS). The calibration data sample is Bhabha events of real data which is selected. This study analyzed the alternative relations of the measurement time changes with hitted positions and TOT of signal, and also analyzed their the corelation between these variables. This paper first constructed a calibration algorithm by spline-fit method, and calibrated the original measurement time with the complex change of TOT. The Spline fit method is not ideal due to the presence of signal reflections found by studies. Then, the dependency of the hit position of TOT has been investigated,

it explained how the reflection of the signal within the readout strips causes the formation mechanism of the TOT multimodal. In the construction of the calibration formula, the hit position has been performed first, at the same time, the hit position dependency of TOT can be eliminated. And then, correct time versus TOT, it has good effect, the time resolution reached 53.5ps in one strip. The applicability of these calibration formula and the relevance between TOT and hit position in calibration algorithm are also discussed in this paper. Finally, the paper introduces the implementation of the software of the offline calibration algorithm.

Using the Bhabha samples collected from BESIII, the offline data calibration algorithm of the upgraded MRPC endcap TOF detector has been studied, determined the process of calibration, constructed reasonable calibration formula and complete the development of relevant software. The result of offline data calibration is better than design target of the detector hardware, and the new calibration algorithm will play a positive role in getting the high precision measurement results at BESIII.

Keywords: Offline Data Calibration, Spline Fit, Multi-gap Resistive Plate Chamber, Time of Flight Counter, BESIII

目 录

摘要 ······	I
Abstract ······	III
目录 ······	V
第一章 前言 ······	1
1.1 粒子物理学 ······	1
1.2 北京正负电子对撞机 (BEPCII) ······	3
1.3 北京谱仪(BESIII)的物理目标 ······	3
1.4 BESIII 探测器 ······	5
1.4.1 主漂移室 ······	6
1.4.2 飞行时间探测器 ······	7
1.4.3 电磁量能器 ······	8
1.4.4 μ 子探测器 ······	8
1.4.5 超导磁铁 ······	8
1.5 飞行时间探测器 ······	9
1.5.1 粒子鉴别 ······	10
1.5.2 桶部TOF和端盖TOF ······	10
1.5.3 TOF的电子学系统 ······	10
1.6 论文选题的意义 ······	12
1.7 MRPC刻度方法国内外现状 ······	13
1.7.1 STAR 实验的 MRPC 飞行时间探测器离线数据的刻度方法 ······	13
1.7.2 ALICE 实验的 MRPC 飞行时间探测器离线数据的刻度方法 ······	16
1.8 论文的结构 ······	16
第二章 MRPC 端盖 TOF 离线数据 ······	19
2.1 MRPC 硬件和电子学 ······	21
2.1.1 端盖MRPC的结构 ······	21
2.1.2 电子学系统 ······	22
2.2 BESIII 离线数据处理和分析系统 ······	23
2.3 端盖 TOF 数据刻度重建流程 ······	24
2.3.1 事例起始时间重建 ······	25
2.3.2 主漂移室的径迹外推 ······	26

2.3.3 飞行时间探测器的重建	26
2.4 原始数据分布	26
2.5 刻度的重点和难点	29
2.5.1 MRPC 离线刻度的信息量	29
2.5.2 MRPC 离线刻度的时间, 过阈时间, 击中位置等的原始分布	30
2.5.3 过阈时间和反射问题	31
2.6 小结	33
第三章 利用样条插值方法对 MRPC 进行刻度	35
3.1 修正击中位置前进行插值	36
3.1.1 等事例数分 bin 拟合	36
3.1.2 两个高斯拟合和单个高斯拟合	37
3.1.3 击中位置的修正	38
3.2 修正击中位置后进行插值	39
3.2.1 击中位置修正后, 时间对过阈时间的分布	39
3.2.2 修正击中位置后对过阈时间插值	39
3.3 小结	40
第四章 构造公式方法	41
4.1 击中位置的修正	41
4.1.1 击中位置等区间分 bin	41
4.1.2 每个 bin 采用 Nov 公式拟合	42
4.1.3 对得到的 graph 点采用三阶多项式拟合	43
4.2 过阈时间的修正	43
4.2.1 尝试各种公式	45
4.3 小结	46
第五章 双端修正	47
5.1 双端插值方法	47
5.2 双端构造公式	48
5.3 双端对击中位置的修正	50
5.4 小结	52
第六章 刻度公式的适用性研究	53
6.1 刻度常数及刻度后的时间分辨	53
6.2 刻度算法的稳定性	55
6.3 过阈时间和击中位置关联项的研究	56
6.4 小结	57

第七章 离线刻度算法软件的实现	59
7.1 软件平台	59
7.2 刻度算法原理	59
7.2.1 最小二乘法[46]	59
7.2.2 BOSS软件框架下刻度系数的求解	60
7.3 软件实现	60
7.3.1 算法的软件框架和数据类型的定义	60
7.3.2 参数求解的具体实现	61
7.4 结果	65
7.5 总结	65
第八章 总结	67
参考文献	69
简历	73
致谢	75

表 格

1.1 四种基本相互作用性质的比较	2
1.2 主要高能物理对撞机及其研究重点	3
1.3 BEPCII 和 BEPC 主要设计参数比较	4
1.4 BEPCII运行一年可以积累的事例数	4
1.5 BESIII 和 BESII 探测器的比较	6
1.6 预期的TOF时间分辨率分析	11
4.1 各类公式修正后最终的时间分辨	46
5.1 各种公式修正后时间分辨	49
6.1 过阈时间和击中位置关联项对时间分辨的影响	56

插 图

1.1 标准模型中的基本粒子	2
1.2 北京正负电子对撞机鸟瞰图	3
1.3 BESIII 总体结构端面视图	6
1.4 主漂移室的结构示意图	7
1.5 EMC晶体分布示意图	8
1.6 TOF探测器原理示意图	9
1.7 TOF探测器测量的飞行时间	9
1.8 飞行时间探测器结构BTOF指的桶部TOF, ETOF指的端盖TOF	11
1.9 端盖TOF几何尺寸与空间安排	11
1.10 STAR实验的MRPC模块结构图。 (a)长边视图; (b)短边视图	13
1.11 STAR 实验测得的不同模式的过阈时间的分布。前两幅图可以明显看出多峰现象	14
1.12 HPTDC 测量的原始时间的分布。分别对应上图不同的过阈时间模式	15
1.13 对应不同模式的过阈时间的样条插值	15
1.14 插值方法拟合事例起始时间和击中位置	15
1.15 最终修正后得到的时间分辨(a)总的时间分辨; (b)每个道的时间分辨	16
1.16 左图: LHC实验在2012年整体的电子学通道的时间偏移情况; 右图: 一个电子学通道的时间偏移的拟合	16
1.17 时幅修正。选择动量 $0.5 < p < 1.5 \text{ GeV}$ 的径迹。上方: 空的直方图和阴影的直方图分别表示拟合后和之后前的情况; 下方: 4个读数条拟合时幅修正的情况, 采用的是多项式拟合	17
1.18 ALICE实验的MRPC的时间分辨; 选择的是动量在 $0.95 < p < 1.05 \text{ GeV}/c$ 范围内的 π 介子作为刻度样本	17
2.1 端盖 TOF 的时间分辨: (a)电子和(b) μ 子	19
2.2 端盖 TOF 的各探测器单元的效率	19
2.3 1.0 GeV下 π (a)和 K (b)的时间分辨; (c):端盖 TOF 不同角度下的 π/K 分辨	20
2.4 BESIII/端盖TOF 双层MRPC阵列结构示意图	21
2.5 MRPC结构示意图	22
2.6 端盖TOF 升级MRPC 的结构图	22

2.7 简化的BESIII离线数据处理和物理分析过程	24
2.8 BESIII离线软件平台	24
2.9 BESIII事例重建过程	25
2.10 BESIII事例的时间关系	25
2.11 事例起始时间程序流程图	26
2.12 径迹外推算法的实现流程图	27
2.13 TOF的离线数据重建过程	27
2.14 原始的TDC	28
2.15 T-Q匹配后MRPC的原始时间和TOT的分布	28
2.16 事例起始时间的分布	29
2.17 一些原始的分布	30
2.18 反射问题和过阈时间	31
2.19 过阈时间的峰之间的间隔	32
2.20 过阈时间与击中位置图中两个水平线(折线)之间的间隔	32
3.1 时间对过阈时间的分布	36
3.2 截取一个bin的时间分布(对应两个峰值)	36
3.3 高斯拟合后的graph	37
3.4 样条插值	37
3.5 对过阈时间采用样条插值修正后时间对击中位置的分布	38
3.6 时间分辨	38
3.7 击中位置修正前后时间对过阈时间的分布	39
3.8 击中位置修正后插值	40
4.1 时间对击中位置和过阈时间的分布	41
4.2 击中位置的分布	41
4.3 单个 bin 的时间分布	42
4.4 单个 bin 的时间用 Nov 公式拟合的结果	42
4.5 10 个 bin 的时间用 Nov 公式拟合的结果	43
4.6 对击中位置采用多项式拟合	44
4.7 击中位置修正后时间对过阈时间的分布	44
4.8 几种公式对过阈时间的拟合	45
4.9 几种公式修正得到的时间分辨的比较	46
5.1 双端时间对击中位置和过阈时间的分布	47
5.2 双端插值方法	47
5.3 几种公式对过阈时间的拟合	48
5.4 几种公式修正得到的时间分辨的比较	49
5.5 双端修正过阈时间后的分布	49

5.6	击中位置与 $(t_{left}-t_{right})/2$ 的分布	50
5.7	对 t_{sub} 采用四阶多项式拟合	50
5.8	t_{sub} 修正前后时间对 t_{sub} 和击中位置的分布	51
5.9	双端修正 t_{sub} 后的分布	51
6.1	刻度后截取的两个模块共 24 条读数条的刻度常数	53
6.2	最终整体的时间分辨	54
6.3	刻度修正后时间对击中位置和过阈时间的分布	54
6.4	时间分辨随 MRPC 模块的编号的分布	55
6.5	时间分辨随 MRPC 读数条的编号的分布	55
6.6	模块编号为 55 的双端关于过阈时间刻度项和散点图的关系	56

第一章 前言

1.1 粒子物理学

物质是由什么组成的？这是人们研究自然界的普遍规律时关心的问题。在《庄子·天下篇》中，庄子有“一尺之捶，日取其半，万世不竭”的观点。说的是有一个一尺长的捶子，每天取它剩下的一半，这样取下去，可以一万世也取不尽。这是古代中国的辩证思想，认为物质的组成是没有极限的。中国夏朝时的“五行学说”认为物质是由金、木、水、火、土组成的。古希腊也有物质有水、火、土和空气等基本元素组成的观点，哲学家 Democritus 的观点是万物的本原是原子和虚空，原子是“不可再分”的。十九世纪初英国的科学家道尔顿提出原子理论。认为，原子是物质世界的最小单元，它是单一的，且独立的，不能被继续分割的，状态在化学变化中是稳定的，同一类型的原子的属性是一致的。这是真正带有近代性质的原子论。十九世纪，自然学科创立并蓬勃发展，物理学、化学等学科相继诞生，通过实验对物质的研究，提出物质都是由不同分子组成的，不同分子的性质上的不同导致物质的物理和化学性质的之间有差异。分子是有原子组成的。门捷列夫提出的元素周期表则告诉我们物质是由 110 多种的不同的元素组成的。二十世纪物理学蓬勃发展，量子力学和相对论相继建立并发展起来，实验上各类粒子相继被发现。例如 1897 年汤普逊发现电子；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 年希格斯(Higgs)粒子 [1][2]。大学的量子力学和原子核物理课程介绍了原子核和核外电子构成了原子，带电质子和中性中子组成了原子核。基本粒子的相继发现，加速了粒子物理学的诞生和发展。粒子物理学认为组成原子核的质子和中子是由夸克构成的。[3]

粒子物理学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 [4]。

自然界存在的四种基本相互作用分别是：强相互作用，弱相互作用，引力相互作用，电磁相互作用。它们的性质的比较如表 1.1 [5]。

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 [5] [6]。图 1.1 是基本粒子的示意图。

粒子物理学是一门实验科学。粒子物理实验的主要手段有宇宙线，高能物

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	$\cong 1\text{--}10$	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	$\cong 5 \times 10^{-40}$	—	—	∞

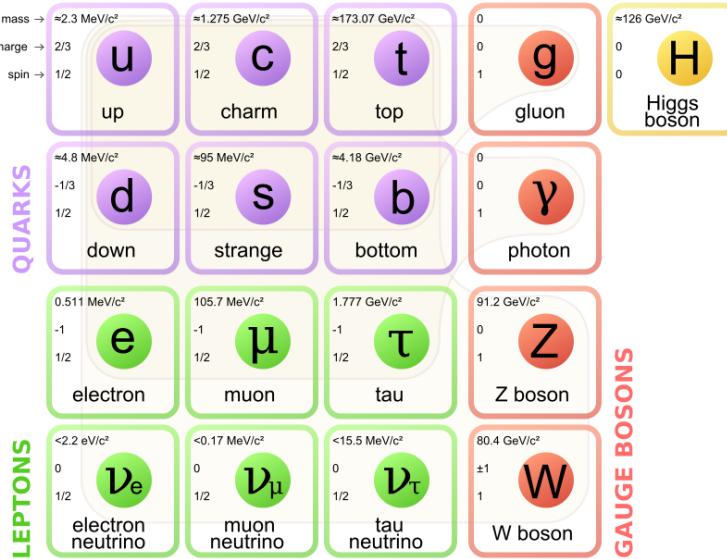


图 1.1: 标准模型中的基本粒子

理加速器和粒子探测器 [7] [8] [9][10]。研究越深层次的物质结构需要越精细的探针：即更高能量的入射粒子。高能加速器具有高能量，高亮度的特点，可以控制产生粒子物理实验所需要的高能粒子束流。

加速器物理实验通过粒子加速器把带电粒子加速到很高的能量，之后通过对撞或者打靶让高能粒子之间（对撞机实验）或者高能粒子和其他物质之间（固定靶实验）发生相互作用，通过一系列的探测器测量碰撞后的产生的次级粒子各类信息，借助必要的分析方法和研究手段，进而研究它们的性质和相互作用规律。对撞机实验和固定靶实验是加速器物理实验的两种方式，它们各有利弊。对撞机实验的优点是加速器的束流能量能够被完全的利用，缺点是束流种类、反应末态和对撞亮度等均受到限制。固定靶实验的优点是可以使用的束流和粒子种类多，反应的末态也比较丰富，但缺点是束流的能量不能完全的被利用。

对撞机实验在加速器实验中有着很重要的地位。 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。

北京正负电子对撞机 [11] [12] [13] 实验取得了一系列重要的物理成果，其中

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

包括： τ 轻子质量的精确测量、2-5Gev强子反应界面的精确测量、X(1835)共振态的发现和 $Z_c(3900)$ [14]共振态的发现等。

1.2 北京正负电子对撞机 (BEPCII)

坐落于北京西郊的北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider, BEPC)及其配套装置北京谱仪[15](Beijing Spetrometer, BES)建于1988年。1994-1996年，对撞机进行过升级改造仍旧称作BEPC，此时谱仪则称为BESII。图1.2给出了北京正负电子对撞机鸟瞰图示意图。

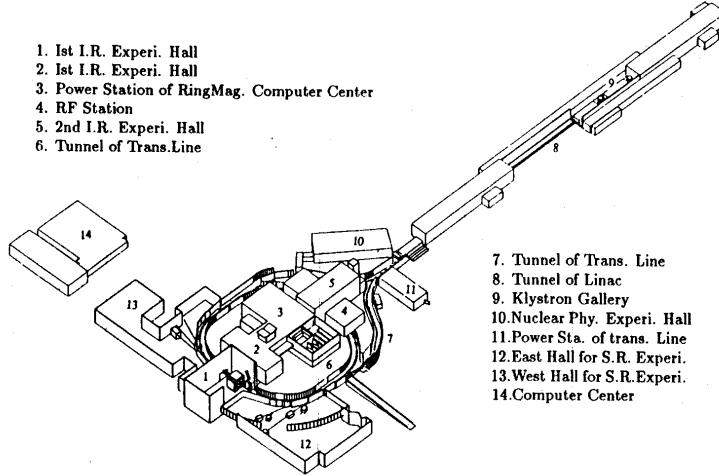


图 1.2: 北京正负电子对撞机鸟瞰图

2004年到2008年，BEPC和BESII完成升级改造，升级后的对撞机称为BEPCII，谱仪称为BESIII[16]。表1.3列出了BEPCII主要设计参数。

1.3 北京谱仪(BESIII)的物理目标

北京正负电子对撞机运行在 τ -粲能区，升级后BEPCII峰值亮度与之前的BEPC相比提高了100倍，即每秒可以获取的事例数提高了100倍，BESIII是

表 1.3: BEPCII 和 BEPC 主要设计参数比较

参数	BEPCII	BEPC
质心能量 (GeV)	2-4.6	2-5
储存环长度 (m)	237.5	240.4
环的数目	2	1
高频频率 f_{rf} (MHz)	499.8	199.5
$2 \times 1.89 \text{ GeV} (\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$ 下的峰值亮度	$\sim 10^{33}$	$\sim 10^{31}$
束团个数	2	1
束团流强 (A)	2×0.91	2×0.035
束团间隔 (m/ns)	2.4/8	-
束团长度 (σ_z) cm	1.5	~ 5
束团宽度 (σ_x) μm	~ 380	~ 840
束团高度 (σ_y) μm	~ 5.7	~ 37
相对能散	5×10^{-4}	5×10^{-4}
对撞点束流夹角 (mrad)	± 11	0

与此高亮度相对应的高精度探测器，可以为该能区的物理研究的高精度测量提供良好的条件。

BEPCII 的峰值亮度设计为在 1.89 Gev 处达到 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (已于 2015 年 4 月 5 日成功达到)，是 τ -粲能区历史上的最高值，获得了大量物理事例，提供了得到重要物理结果的机会。综合加速器的亮度、运行时间、各类事例的产生截面、探测器的最大覆盖立体角及正负电子束流的能散度，BEPCII 一年运行取数中各种事例数的列表 [17] 见表 1.4

表 1.4: BEPCII 运行一年可以积累的事例数

物理	质心系能量 (Gev)	峰值亮度 ($10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	物理截面 (nb)	每年产生事例数
J/ψ	3.097	0.6	~ 3400	10×10^9
τ	3.670	1.0	~ 2.4	12×10^6
ψ'	3.686	1.0	~ 640	3×10^9
D	3.770	1.0	~ 6.5	32×10^6
D_s	4.040	0.6	~ 0.32	1×10^6
D_s	4.160	0.6	~ 1.0	3×10^6

结合考虑 BESIII 探测器的性能和具体可以获取的各类事例数，BESIII 的物理研究目标为：轻强子谱、粲偶素物理、粲物理、QCD 与 τ 物理等，黄皮书 Physics at BESIII 里给出了 BESIII 详细的物理目标。[18] [19]

1.4 BESIII 探测器

北京谱仪是各种粒子探测器的组合，通过对正负电子对撞后产生的次级带电粒子的动量、能量、位置、质量等各种参数的观察和测量，重建各类反应过程，进而研究物质的基本性质。BEPCCII 的特点是高亮度、多束团，其设计亮度是 BEPC 的 100 倍，高亮度意味高统计量，这样 BESIII 的统计误差只有 BESII 的近 $1/10$ ，对撞机的高性能和实验的高精度要求都需要有一个高质量的 BESIII 探测器。因此 BESIII 探测器既需要满足多束团、高计数率下的取数要求，同时探测器的系统误差也应该减少到之前 BESII 的 $1/10$ 下。基于此，BESIII 的设计必须满足以下要求：

- 10MeV 到 2.5Gev 内，有良好的能量分辨率，位置分辨率和光子鉴别能力；
- 50Mev 到 2.5Gev 内，能精确的测量带电粒子的动量和方向；
- 50Mev 到 2.5Gev 内，有好的粒子鉴别能力；
- 电子学系统和数据获取系统能够满足多束团模式和高数据率取数的要求。

为满足以上要求，BESIII 探测器的最终设计为：

- 径迹探测器选用的单丝分辨率好于 $115\mu\text{m}$ 的小单元结构的氨基气体漂移室；
- 电磁量能器选用采用碘化铯(C_sI)晶体量能器，用来探测和鉴别光子和电子；
- 飞行时间探测器由塑料闪烁体构成，用来粒子鉴别；
- 超导螺线管磁铁的场强采用 1.0T 的；
- μ 子室采用阻性板探测器；
- 前端电子学系统采用流水线技术，用来适应多束团模式和高数据率的数据获取系统。

表 1.5 列出了 BESIII 各组成部分的主要性能。

图 1.3 给出了北京谱仪总体结构端面视图。由内到外分别是：束流管 (Beam Pipe), 主漂移室 (Main Drift Chamber, MDC), 飞行时间探测器 (Time of Flight Counter, TOF), 电磁量能器 (Electromagnetic Calorimeter, EMC), 超导磁铁 (Superconducting Magnet, SM), μ 子探测器。此外，BESIII 还具有用于监视谱仪各部分的运行并记录其运行参数的分布式的慢控制系统 (slow control system); 高保真读出各探测器信号的电子学系统 (read-out electronics system); 在线选择

表 1.5: BESIII 和 BESII 探测器的比较

子系统	BESIII(当前指标)	BESIII(设计指标)	BESII
主漂移室	$\sigma_{xy} = 115 \mu\text{m}$	$\sigma_{xy} = 130 \mu\text{m}$	$250 \mu\text{m}$
		$\Delta p/p = 0.5 \% @ 1 \text{ GeV}$	$2.4 \% @ 1 \text{ GeV}$
	$\sigma_{dE/dx} < 5 \%$	$\sigma_{dE/dx} = 6 \%$	8.5%
电磁量能器	$\sigma_E/E = 2.4 \% @ 1 \text{ GeV}$	$\sigma_E/E = 2.5 \% @ 1 \text{ GeV}$	$20 \% @ 1 \text{ GeV}$
		$\sigma_{x,y} = 0.6 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$	$3 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$
飞行时间探测器	$\sigma_T = 68 \text{ ps} (\text{桶部})$	$\sigma_T = 100 \text{ ps} (\text{桶部})$	$180 \text{ ps} (\text{桶部})$
		$\sigma_T = 110 \text{ ps} (\text{端盖})$	$350 \text{ ps} (\text{端盖})$
μ 子计数器	9 层	3 层	
磁铁	1.0 T	0.4 T	

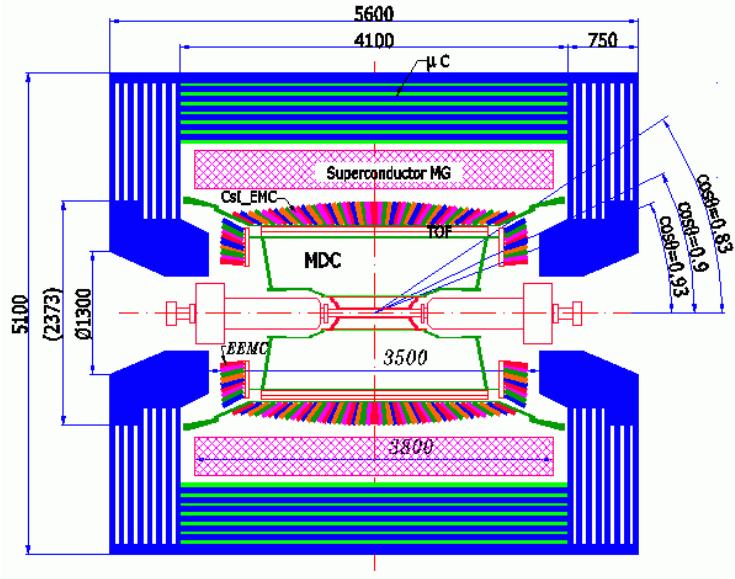


图 1.3: BESIII 总体结构端面视图

感兴趣的事例的触发系统 (trigger system); 在线数据获取系统 (data acquisition system,DAQ), 以及用于处理记录下来的数据的离线数据系统 (offline data processing system)。

1.4.1 主漂移室

主漂移室的主要任务是:

- 完成从对撞点产生的带电粒子动量和方向的精确测量;
- 完成电离能损 (dE/dx) 测量, 用作带电粒子的粒子鉴别;

- 对带电粒子的测量提供尽可能大的立体角覆盖 ($\sim 97\% 4\pi$)
- 带电粒子在低动量时，径迹重建也有足够高的效率；
- 提供带电粒子的一级硬件触发信号。

主漂移室中带电粒子的动量测量依赖于其在漂移室中径迹的测量，带电粒子在漂移室中击中的丝层越多，击中位置越多，径迹重建出来的粒子的飞行轨迹就越确定，测得的动量也就越准确。带电粒子在飞行过程中与探测器中的物质发生的多次库仑散射效应是影响低动量带电粒子动量测量精度的主要因素。为减少多次库仑散射的影响，漂移室的气体和场丝需要尽可能的选用低原子序列的材料。

漂移室采用小单元结构，场丝使用镀金铝丝，工作气体为 $H_e/C_3H_8(60/40)$ 。立体角覆盖 $\Delta\Omega/4\pi=0.93$ ，单丝的位置精确度为 $130\mu m$ 。对于动量为 1 GeV 的带电粒子动量分辨率为 0.5 % 左右；在粒子的入射角为 90° ， dE/dx 分辨 6 % 下， π/K 的分辨能力(3σ)可达到 770 MeV/c。

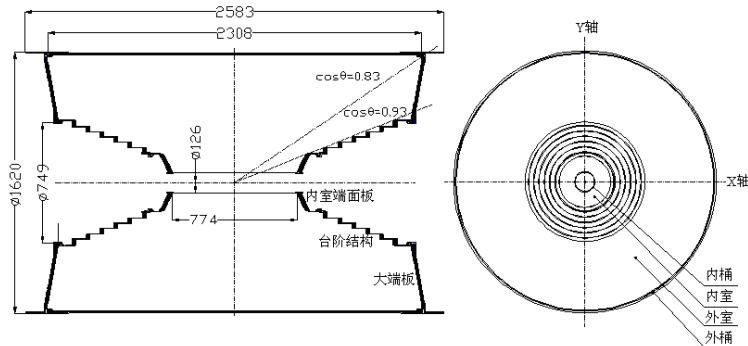


图 1.4: 主漂移室的结构示意图

1.4.2 飞行时间探测器

粒子鉴别是BESIII 的飞行时间探测器主要目的。决定其鉴别能力大小的是相同动量的不同种类的带电粒子的飞行时间差和其自身的时间分辨率。飞行时间探测器由桶部飞行时间探测器和端盖飞行时间探测器构成。其中，桶部部分固定在主漂移室上，采用双层结构，每层 88 块，共 176 块。每块长 2.32 m，厚 5 cm，梯形截面。信号由双端读出。端盖固定在端盖电磁量能器上，有东西两部分，每部分 48 个扇形闪烁体。桶部的立体角覆盖为 $|\cos(\theta)| < 0.83$ ；端盖的立体角覆盖为 $0.85 < |\cos(\theta)| < 0.95$ ；桶部的时间分辨设计指标是 100 ps，在粒子的入射角为 90° ， π/K 的鉴别能力 (3σ) 大约达到 700 MeV/c。

1.4.3 电磁量能器

电磁量能器可以精确的测量光子的能量和提供触发中性事例的信号。在动量大于 200 Mev/c下有好的 e/π 的分辨能力。EMC 有桶部和端盖部分组成，共有 6240 块晶体，其中桶部的内半径有 94 cm，内长 275 cm，覆盖角 $|\cos(\theta)| < 0.82$ ；端盖覆盖角为 $0.83 < |\cos(\theta)| < 0.93$ 。EMC的能量覆盖范围为 20 Mev~ 2 Gev，在 1 Gev下，能量分辨率为 $\Delta E/\sqrt{E}=2.5\%$,位置分辨率为 $\sigma=0.6\text{cm}/\sqrt{E}$ (E in Gev)。

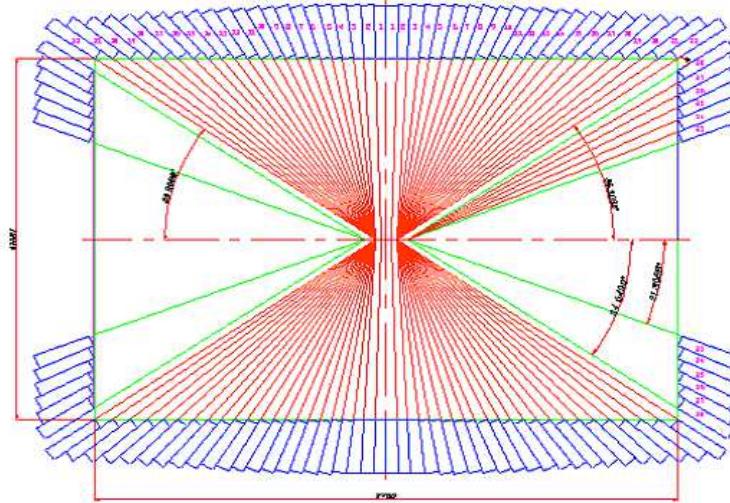


图 1.5: EMC晶体分布示意图

1.4.4 μ 子探测器

位于BESIII探测器的最外层是 μ 子探测器，有 μ 子探测器和强子吸收体两个部分组成，从末态的带电粒子中区分出 μ 子和 π 等其他带电强子是它的主要功能。 μ 子探测器选用的是阻性板计数器(resistive plate counters,RPC)。为了增大立体角覆盖， μ 子探测器设计成桶部和端盖两部分。桶部 μ 子探测器的内半径为 170 cm，外半径为 262 cm，共有8层按照八角形排列，厚度为 3-8 cm的RPC和吸收铁组成。吸收铁和 RPC 采用夹层结构，两层铁之间夹缝为 4 cm，RPC 位于其中。端盖采用夹层结构，共计 8 层吸收铁和 8 层RPC相互夹层。桶部立体角覆盖最内层为 0.75，最外层为 0.60，总的桶部端盖立体角覆盖为 0.85。在不同入射角度下，对于动量> 0.4 Gev的 μ 子,探测效率均大于等于 95%。

1.4.5 超导磁铁

超导磁铁是北京谱仪的一个重要组成部分，磁场回路选用的是轭铁，可以提供具有高强度的和一定均匀度的轴向磁场，带电粒子在此磁场中螺旋运动，可以供主漂移室测量带点粒子的径迹。磁铁长 4.91 m，内直径为 2.75 m，外直径为 3.4 m,中心直径为 2.95 m，线圈长度为 3.52 m。轭铁分为桶部和端盖两部

分，除了作为磁场回路外，也做 μ 子探测器的吸收体。磁场的强度越高，主漂移室中带电粒子的动量分辨率就越好，但同时磁场强度过高时，会不利于低动量的径迹测量。综合考虑，超导磁铁的中心磁场强度设计为沿束流方向为1.0T，主漂移室中磁场的不均匀性不大于5%，测量的磁场精度不大于0.1%。

1.5 飞行时间探测器

粒子的飞行时间是由飞行时间探测器测量出来的。具体来说，测量的是粒子到达飞行时间探测器的时刻。测量的时间和束流在对撞顶点发生对撞的时刻(t_0)之间的时间间隔，就是粒子从对撞点飞行到飞行时间探测器的时间。(见图1.6，图1.7)

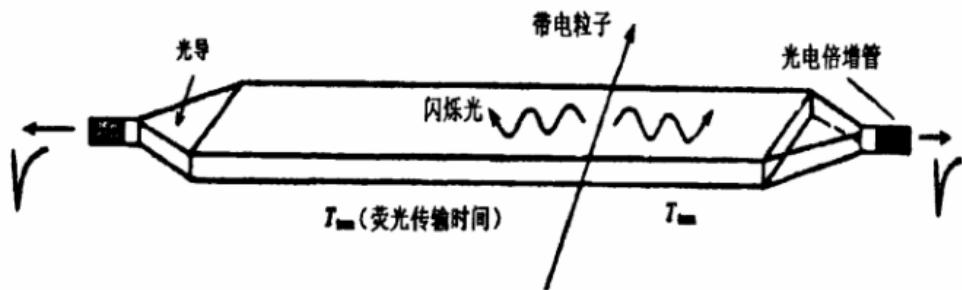


图 1.6: TOF探测器原理示意图

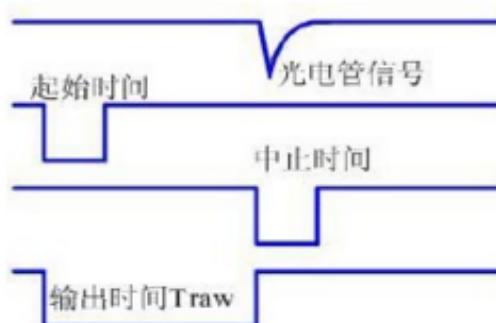


图 1.7: TOF探测器测量的飞行时间

带电粒子从对撞顶点到击中TOF的预期飞行时间 t_{exp} 由公式1.1给出，其中 L 是带电粒子从对撞顶点到击中TOF的飞行距离。 β 是带电粒子的飞行速度，由公式1.2给出，其中 m 是带电粒子的质量， p 是带电粒子的动量。 L 和 p 都是由主漂移室测量得到的。

$$t_{exp} = L/\beta c \quad (1.1)$$

$$\beta = p/\sqrt{p^2 + m^2} \quad (1.2)$$

对于动量都等于 p , 质量分别为 m_1 和 m_2 的两个带电粒子, 它们的飞行时间差的具体由公式 1.4 给出。

$$\frac{1}{\beta_2^2} - \frac{1}{\beta_1^2} = \frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2} \quad (1.3)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{L}{c\beta_2} - \frac{L}{c\beta_1} = \left(\frac{L}{c}\right)\left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2}\right)\left(\frac{\beta_1\beta_2}{\beta_1 + \beta_2}\right) \leq \left(\frac{L}{c}\right)\left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{2p^2}\right) \quad (1.4)$$

由公式 1.4 可知, 粒子飞行距离越长, 粒子动量越小, 则粒子的鉴别能力越好。

1.5.1 粒子鉴别

粒子鉴别是飞行时间探测器的主要物理目标, 其鉴别能力的大小主要决定于相同动量的不同种类带电粒子的飞行时间差和飞行时间探测器自身的时间分辨。它通过测量带电粒子在主漂移室内的飞行时间, 结合主漂移室测得粒子的动量和径迹, 根据不同粒子具有不同的质量, 从而辨别出粒子的种类; 飞行时间探测器也参与第一级触发判选, 不同探测器输出信号之间时间关系可以被用来排除宇宙线本底的影响。内半径越大, 飞行时间探测器的飞行时间差越大; 推算的对撞的事例起始时间精度和测量的带电粒子打到飞行时间探测器后的截止时间的精度分别决定时间分辨率, 其中主要因素是飞行时间探测器自身的时间分辨率。

影响TOF的时间分辨的因素很多, 总的时间分辨 σ 可以写成:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{TOF}^2 + \sigma_{bunch-time}^2 + \sigma_{bunch-length}^2 + \sigma_{Z-position}^2 + \sigma_{electronics}^2 + \sigma_{expect}^2 + \sigma_{time-walk}^2}$$

其中 σ_{TOF} 是 TOF 的本征时间分辨率, 反映了探测器的主要性能; $\sigma_{bunch-time}$ 表示对撞束团的时间不确定性; $\sigma_{bunch-length}$ 表示由于束团的长度引起的对撞时刻的不确定性; $\sigma_{Z-position}$ 来源于粒子击中闪烁体的沿束流方向位置的不确定性, 会引起光信号在闪烁体内的传输时间不确定; $\sigma_{electronics}$ 表示来自电子学时间测量的不确定性; σ_{expect} 表示来自预期飞行时间的不确定性; $\sigma_{time-walk}$ 表示来源于过阈时间的时间晃动效应。

表 1.6 列出了预期的 TOF 时间分辨率分析。

1.5.2 桶部TOF和端盖TOF

桶部 TOF 的径向半径从 810 mm 到 925 mm。桶部闪烁体选用的是长度为 2.3 m, 宽度约为两英寸, 厚度为 5 cm, 型号为 BC408 闪烁体。

端盖TOF的塑料闪烁体的长度短于桶部 TOF, 选用的是 BC404 信号的闪烁体, 可以充分发挥 BC404 光产额高, 时间快的优势。

1.5.3 TOF的电子学系统

飞行时间探测器的电子学系统的基本功能是对带电粒子的飞行时间进行测量。简单讲, 测量的是正负电子从对撞时刻到次级带电粒子击中飞行时间探测

表 1.6: 预期的TOF时间分辨率分析

时间分辨项目	桶部时间分辨率	端盖时间分辨率
单层TOF本征时间分辨率(对1Gev的 μ 子)	80-90ps	80ps
束团时间的不确定性	5ps	5ps
束团长度的不确定性	15mm,35ps	15mm,35ps
MDC外推的定位精度	5mm,33ps	5-10mm,47-95ps
电子学测量的精度	25ps	25ps
预期飞行时间精度	30ps	40ps
时幅修正	10ps	10ps
单层TOF总的时间分辨率	100-110ps	110-137ps
双侧TOF总的时间分辨率	80-90ps	无

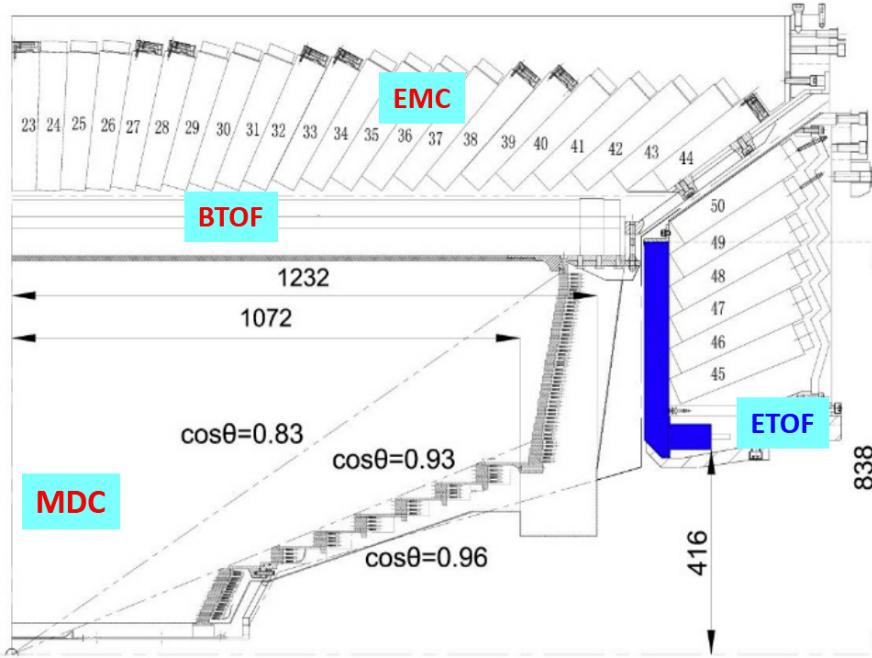


图 1.8: 飞行时间探测器结构BTOF指的桶部TOF, ETOF指的端盖TOF

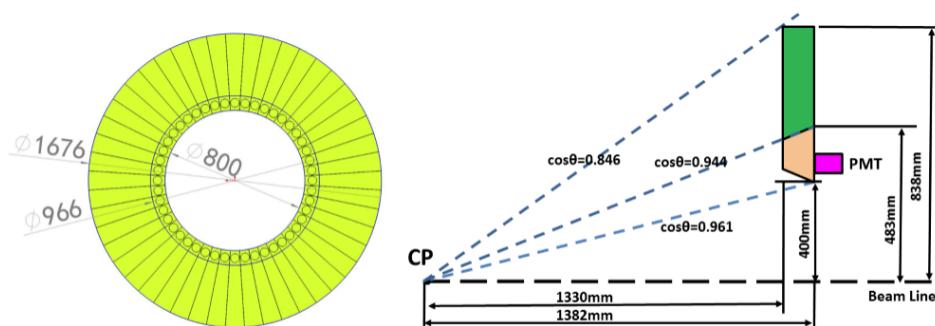


图 1.9: 端盖TOF几何尺寸与空间安排

器刻度之间的时间间隔。快前沿定时是现代粒子物理实验测量时间最有效的定时方法。系统还需要对输出信号的幅度(电荷)进行测量，用来校正前沿定时方法中时间游走(time-walk)效应带来的测量误差。飞行时间探测器的还有一个主要功能是给触发系统提供粒子击中的快时间响应信号。基于此，飞行时间探测器的电子学系统需要完成三项基本功能：时间测量，电荷测量，提供粒子击中的快时间响应。

TOF 的读出电子学系统由前置放大器部分和读出电子学 VME(Versa Module Eurocard bus Crate)系统组成。前置放大器对光电倍增管输出的探测器信号进行 10 倍的放大，输出的差分信号经过 18 米长的差分屏蔽电缆送入到读出电子学系统进行数字化处理。

TOF 前端电子学系统采用的是 VME 9U 作为 TOF 前端读出电子学系统的硬件平台；采用全差分的信号处理和传输技术；对时间和电荷量的测量采用统一的数字化处理。时间测量采用的是快前沿定时甄别+高性能时间数字转化器(high performance time to digital converter,HPTDC) 数字化技术。TOF 采用阈值甄别技术，只有高于阈值的信号才能被电路输出。HPTDC 时间测量直接测量的是粒子到达探测器的击中时间。飞行时间需要测量时间减去粒子对撞的初始时间得到。而粒子对撞的初始时间需要离线数据分析，找到对撞时间所对应的时钟信号，然后结合束团之间固有的时间关系计算出来。

1.6 论文选题的意义

BESIII 实验的原始数据以二进制文件的形式记录并储存，记录的是在线数据获取系统经过触发判选以及在线选择的好事例。原始数据主要包含的信息量是探测器的电子学信号的时间和幅度信息。这样的原始数据是不能直接被物理分析使用的。原始数据需要经过一定的处理才能得到物理分析所需要的包括能量，动量，运动方向等的信息。这些需要的中间处理过程就是离线刻度和重建。离线数据刻度可以消除实验中的各种外部条件和探测器自身条件对电子学信号和物理测量量之间转化带来的影响。离线数据刻度对每个不同的子探测器分别进行，分别生成刻度常数。重建就是利用刻度得到的刻度常数将原始的数据重建转化为粒子的动量，能量，运动方向等物理量，生成重建数据。物理分析就是利用重建数据进行的。[19]

BESIII 实验在 2015 年夏季完成端盖飞行时间探测器的升级改造，用多气隙电阻性板室（Multi-gap Resistive Plate Chamber，简称 MRPC）替代现有的闪烁体。MRPC 探测器具有较小的时间分辨，同时又能保证足够的探测效率。为与探测器硬件升级相适应，离线数据处理和分析系统需要完成 MRPC 端盖 TOF 的软件开发和数据处理方面的研究。

对端盖 MRPC-TOF 探测器的刻度方法进行研究，建立一套稳定并行之有效的刻度流程，满足数据刻度和重建的需要，把优秀的探测器指标转化为物理

分析中的优良的粒子鉴别能力，是论文研究的主要内容，也是意义所在。研究采用了样条插值和构造公式两种方法。之后的章节会详细探讨两种方法在新的MRPC飞行时间探测器离线数据刻度中的应用，以及在研究中遇到的难点及解决办法。

1.7 MRPC刻度方法国内外现状

相对论重离子对撞机 RHIC 是美国布鲁克海文国家实验室 (BNL) 的对撞机，其上的螺旋径迹探测器 STAR 实验 [20] [21] [22] 的主要科学目标是寻找可能存在的新物质形态夸克-胶子等离子体，并研究极端高温、高密下的强相互作用物质的演化动力学。欧洲核子中心 (CERN) 的大型强子对撞机 LHC 上的大型离子对撞机 ALICE 实验 [23] [24] 是在极端能量密度下研究强相互作用物理，寻找夸克胶子等离子体，研究量子色动力学。这两个实验都采用 MRPC 做为飞行时间探测器。

1.7.1 STAR 实验的 MRPC 飞行时间探测器离线数据的刻度方法

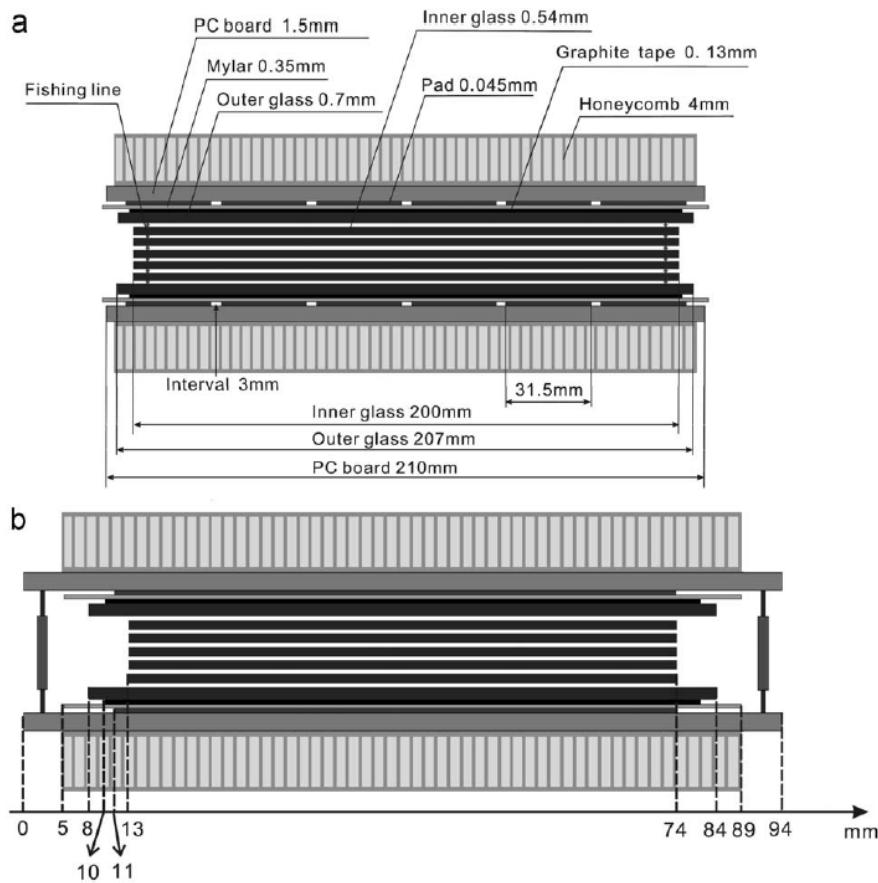


图 1.10: STAR 实验的 MRPC 模块结构图。 (a)长边视图; (b)短边视图

STAR 实验的圆柱型 TOF 覆盖面积大约有 $64m^2$ ，整个系统由 120 个托盘，

每个托盘有 32 个 MRPC 模块组成，每个 MRPC 模块有 6 个读数条。每个读数条长 6.0 cm，宽 3.1 cm [22]。图 1.10 给出了 STAR 实验的 MRPC 模块的结构图。实验采用基于 CERN 开发的 NINO 芯片的前端电子学系统，高性能的时间-数字转化电路(high-performance time to digital convertor,HPTDC)可以同时测量信号过阈的前沿和后沿时间。其中前沿时间用于定时，后沿时间和前沿时间之间的间隔为过阈时间(time-over-threshold,TOT)，用于对前沿时间的晃动进行校准。

STAR 关于 MRPC-TOF 的刻度方法分为 5 步：

- 挑选样本：选择动量在 $0.3\text{-}0.6 \text{ GeV } c^{-1}$, $dE/dx < 2.5 \text{ KeV cm}^{-1}$ 的 π (纯度 $\geq 99\%$)
- 对事例起始时间进行修正，按每个读出通道进行修正
- 对过阈时间进行修正，按每个读出通道进行修正
- 对击中读数条的位置进行修正，因为每个读数条信号的传播速度并不一致，按每个读出通道进行修正。(这里只考虑沿着读数条传播方向的效应)
- 对第三步和第四步进行第二次修正，进一步提高修正效应

具体每步修正采用的是样条插值(spline fit)的方法。图 1.11 是 STAR 实验测得的不同模式的过阈时间的分布。左边的图和中间的图可以看出很明显的多峰现象(这一点和我们 BESIII 的 MRPC 测得的过阈时间的分布很类似，都存在多峰现象)。

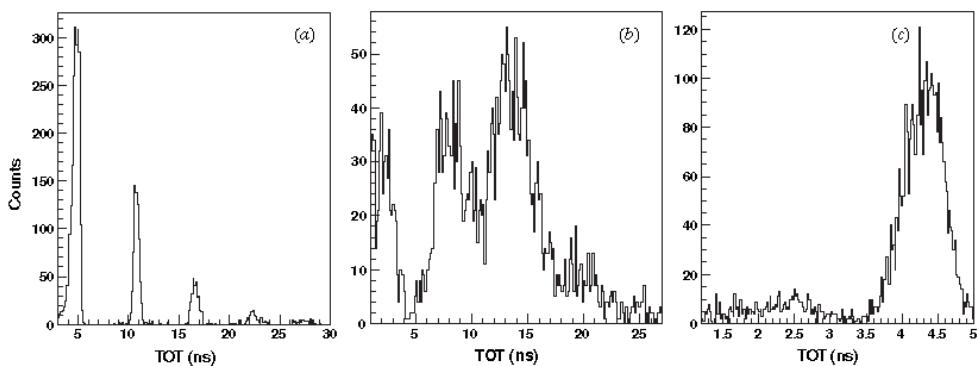


图 1.11: STAR 实验测得的不同模式的过阈时间的分布。前两幅图可以明显看出多峰现象

图 1.12 是 STAR 实验测得的不同过阈时间模式下的原始时间的分布。

图 1.13 是 STAR 实验对过阈时间修正的方法，对于不同的过阈时间模式采用的都是样条插值的方法。

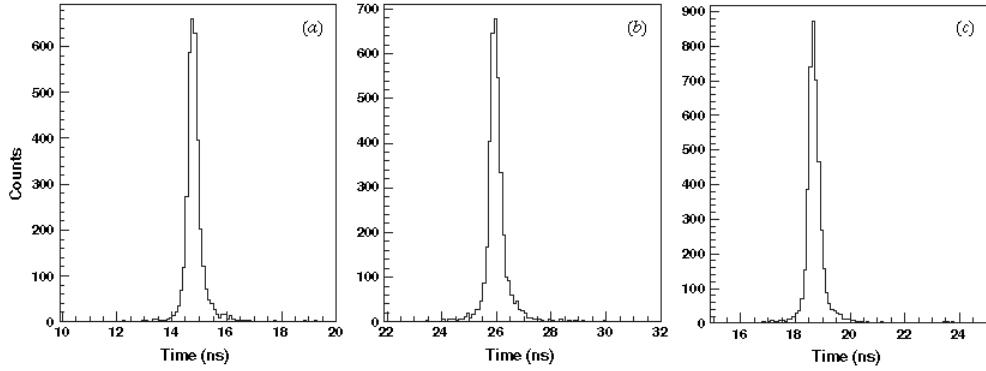


图 1.12: HPTDC 测量的原始时间的分布。分别对应上图不同的过阈时间模式

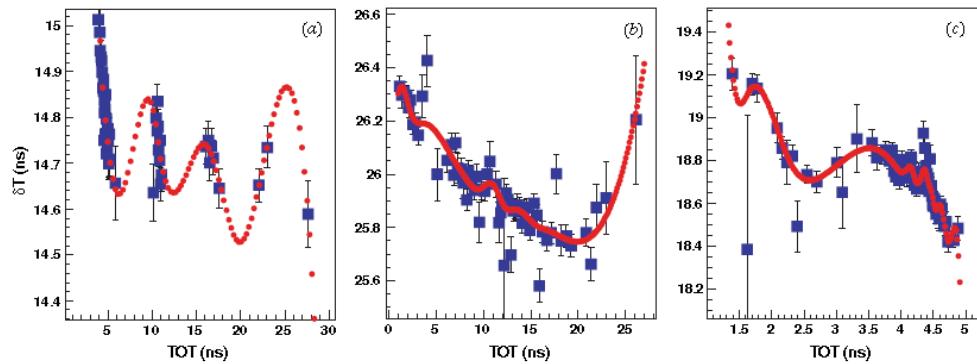
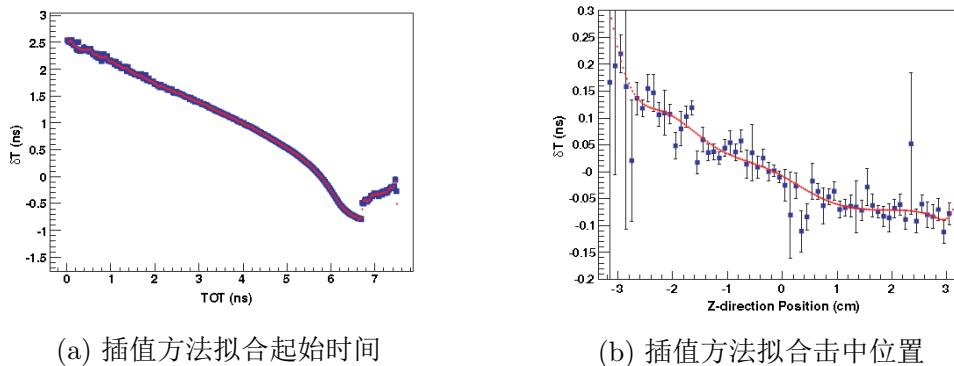


图 1.13: 对应不同模式的过阈时间的样条插值



(a) 插值方法拟合起始时间

(b) 插值方法拟合击中位置

图 1.14: 插值方法拟合事例起始时间和击中位置

图 1.14a 表示插值拟合对事例起始时间的修正(这个修正放在修正过阈时间和击中位置之前的)。图 1.14b 表示插值拟合对击中位置的修正。

图 1.15 是 STAR 实验修正后得到的时间分辨(过阈时间和击中位置都是修正了两次)，约 89 ps，扣除起始时间的晃动(~ 55 ps)，最终的MRPC的时间分辨是 75 ps。

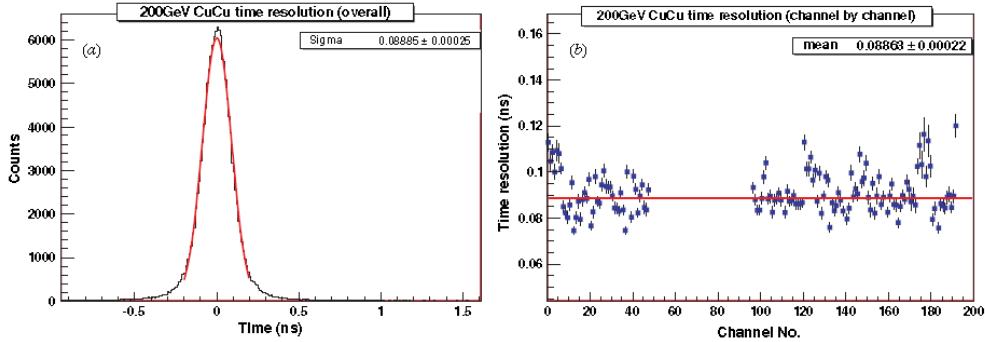


图 1.15: 最终修正后得到的时间分辨(a)总的时间分辨; (b)每个道的时间分辨

1.7.2 ALICE 实验的 MRPC 飞行时间探测器离线数据的刻度方法

ALICE 的 TOF 由 1593 块 MRPC 组成，每块面积为 $7.4 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ ，每个模块 96 个读出端，每个读出端面积为 $2.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ 。刻度需要完整的径迹重建。TOF 刻度分为三个步骤：(1) 一个整体的偏移；(2) 每个电子学通道的偏移；(3) 每个电子学通道的时幅修正。

图 1.16 对应上面的前两步。左图表示的是一个整体的偏移情况，右图表示的是拟合获取单个电子学通道偏移值。

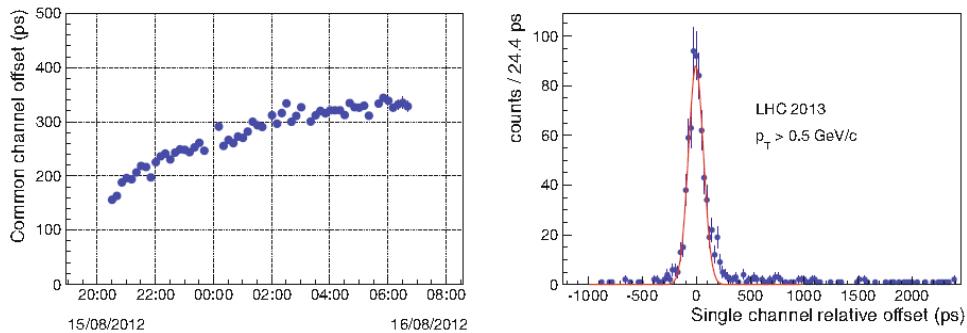


图 1.16: 左图: LHC实验在2012年整体的电子学通道的时间偏移情况；右图: 一个电子学通道的时间偏移的拟合

图 1.17 对应第三步的修正。其中对于时幅修正采用的是多项式拟合。

图 1.18 对应第三步的修正。选择的是动量在 $0.95 < p < 1.05 \text{ GeV}/c$ 范围内的 π 介子作为刻度样本。扣除起始时间的晃动后时间分辨是 80 ps。

1.8 论文的结构

根据论文的主要内容，论文的结构安排如下：

第一章是论文的前言部分，简单介绍了粒子物理学和 BESIII 实验的基本知识，然后介绍了论文选题的背景和意义，以及国内外关于 MRPC 飞行时间探测器离线数据刻度方法。

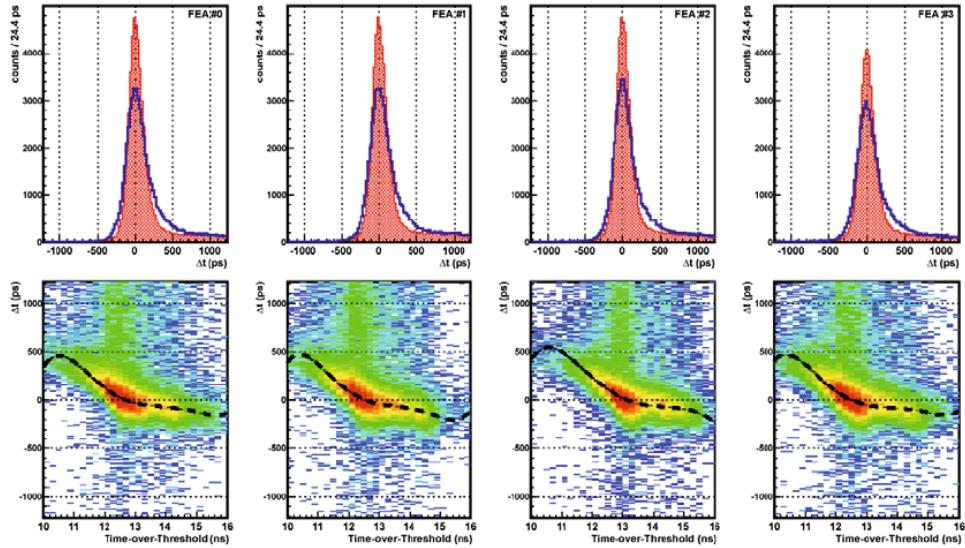


图 1.17: 时幅修正。选择动量 $0.5 < p < 1.5 \text{ GeV}$ 的径迹。上方: 空的直方图和阴影的直方图分别表示拟合后和之后前的情况; 下方: 4个读数条拟合时幅修正的情况, 采用的是多项式拟合

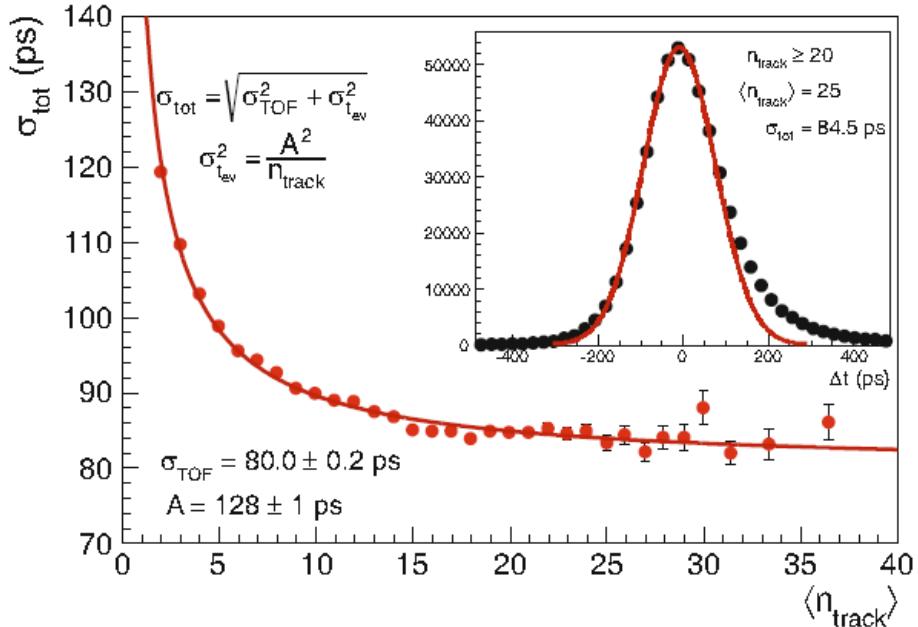


图 1.18: ALICE实验的MRPC的时间分辨; 选择的是动量在 $0.95 < p < 1.05 \text{ GeV}/c$ 范围内的 π 介子作为刻度样本

第二章介绍了 BESIII 实验的 MRPC 端盖 TOF, 刻度重建流程, 以及刻度中的重点和难点问题。

第三章介绍利用插值方法对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。

第四章介绍利用构造公式对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。

第五章介绍利用双端数据采用插值和构造公式两种方法对 BESIII 的 MRPC 端盖 TOF 进行离线数据刻度的研究。

第六章介绍了刻度公式的适用性问题，以及过阈时间和击中位置关联项的问题研究。

第七章介绍了离线刻度算法软件的实现，介绍了具体的软件实现问题。

第八章对论文的内容进行总结。

第二章 MRPC 端盖 TOF 离线数据

原来的端盖 TOF 采用的塑料闪烁体，分东西两部分，每部分单层结构，闪烁体为扇形，光电倍增管垂直耦合，放置于扇形闪烁体的内端。每部分有 48 块。图 2.1 给出了端盖 TOF 的时间分辨。其中对于 Bhabha 事例样本，时间分辨为 148 ps；对于双 μ 子事例，时间分辨为 110 ps[25]。分辨率的不同主要来自不同粒子与探测器材料不同作用的差别，由于 μ 子散射小，击中塑料闪烁体的位置不确定性较小，相比较 Bhabha 事例而言（位置的不确定性以及多次散射效应）非本征的时间分辨贡献较小，因而时间分辨相对较好。图 2.2 给出了端

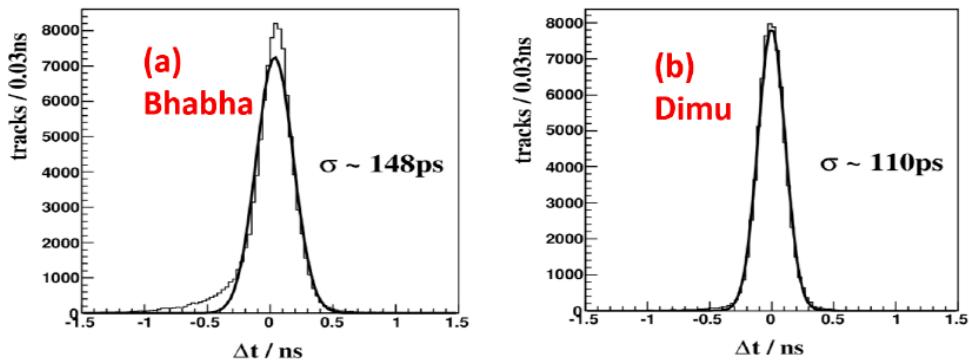


图 2.1: 端盖 TOF 的时间分辨: (a)电子和(b) μ 子

盖 TOF 的各探测单元的效率。探测效率大致为 96% [26]。

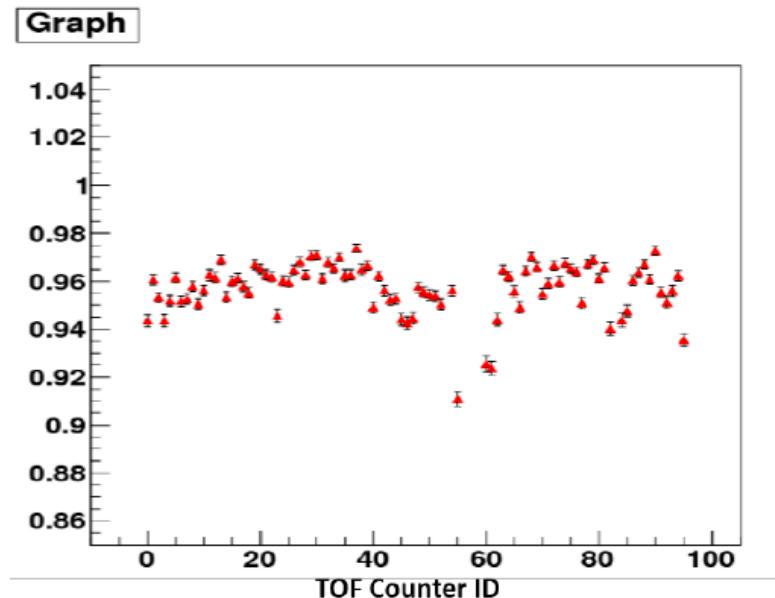


图 2.2: 端盖 TOF 的各探测器单元的效率

对于端盖 TOF 而言，由于多次散射，导致性能相比较桶部而言，明显较差。端盖TOF 的 π/K 的分辨能力如图 2.3 [25]所示，在 95.4%(2σ) 正确率下， π/K 介子的鉴别能力基本可以达到 1.1 GeV 以内。

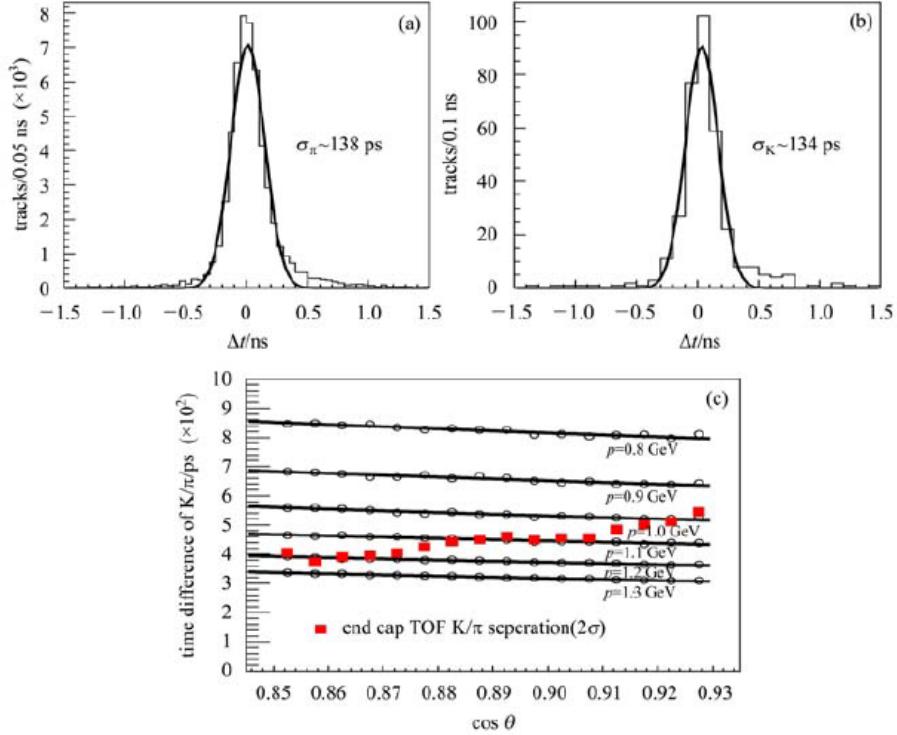


图 2.3: 1.0 GeV 下 π (a) 和 K (b) 的时间分辨; (c): 端盖 TOF 不同角度下的 π/K 分辨

BESIII 端盖飞行时间探测器采用的是单层的闪烁体结构，以及端盖部分多次散射的影响较大，其本征时间分辨和非本征时间分辨都比较大。

BESIII 谱仪的设计目标是在 τ -粲能区的高精度测量，在这一能区 J/ψ 衰变是最主要的物理过程。模拟结果显示， J/ψ 衰变强子动量分布可以达到 1.5 GeV/c, 虽然在 0.95 GeV/c 以上的强子占的比例较小，但是，对于 BES 物理追求的高精度测量以及稀有衰变事例的研究仍然是非常重要的。因此进一步提高其粒子鉴别能力，对于提升整个谱仪粒子鉴别能力，完成 BES 物理目标具有重要意义。

测量中性D介子系统的CP破坏和混合参数是 BESIII 的物理目标之一。D介子是唯一没有被测量到 CP 破坏的重味介子。测量D介子混合的黄金衰变道是 $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$, $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^-\pi^+$, $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 由于 K 和 π 介子的动量分布在 0.8-1.05 GeV，这样我们需要很好的 π/K 粒子鉴别，要达到较显著的测量结果，要求 π/K 误鉴别率在 1.05 GeV 时要达到 1% 以下。

而 BESIII 目前的端盖 TOF 时间分辨为 140 ps, π/K 的误鉴别率在 1.05 GeV 时约为 5% 左右，使得中性D介子的混合参数测量显著性很大程度上下降。

由于D介子系统的CP破坏很小，粒子物理的标准模型预言CP破坏的大小在千分之一左右，要求测量的寻迹系统误差很小，同时也要求 π/K 的误鉴别应该在1%以下。端盖TOF的改造不仅改善对带电径迹的粒子鉴别，同时好的飞行时间测量也能提高主漂移室对带电径迹的测量精度，改善寻迹的系统误差，特别是端盖小角度的误差和误鉴别率的改善。当然对于D介子的半轻子衰变和形状因子以及CKM矩阵元V_{cs}和V_{cd}的测量，改造后的TOF端盖会降低由于粒子误鉴别造成的本底，提高这些物理量的测量精度。

2.1 MRPC 硬件和电子学

2.1.1 端盖MRPC的结构

升级后的端盖TOF采用了MRPC技术。利用MRPC做成的飞行时间探测器有好的时间分辨，同时又能保证探测效率，有好的粒子鉴别能力，而且价格也便宜。从MRPC探测原理出发分析，当带电粒子穿过MRPC时，其原初电离的发生雪崩放大现象，这一过程是在多个气隙中同时进行，总的信号等于各个气隙的信号的叠加。因此MRPC性能的重要的指标参数是气隙的宽度和数目。采用较小的气隙宽度可以降低工作电压，提高工作稳定性；采用多气隙数目，可以增加带电粒子在气隙中发生雪崩现象的概率，继而可以提高探测效率；可以减小雪崩过程的统计涨落，有利于提高时间分辨。

采用MRPC的端盖TOF的具体阵列设计如图2.4所示，每层18个模块，采用双层结构，通过相邻模块间的交叠可以减少死区，提高探测效率。

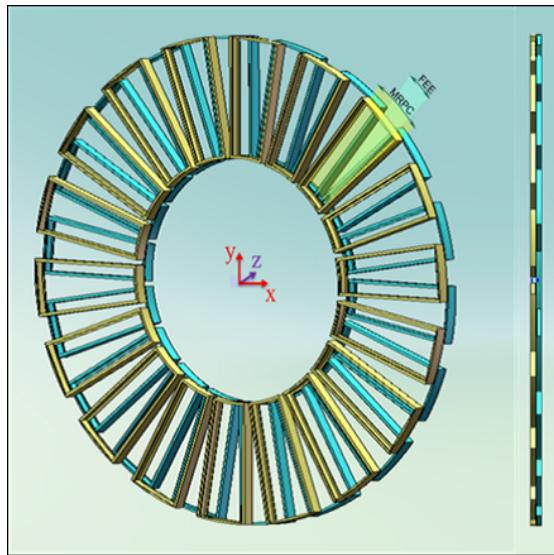


图 2.4: BESIII/端盖TOF 双层MRPC阵列结构示意图

每个模块的PCB的设计如图2.5所示。每个模块采用梯形结构，共有12个读数条，读数条宽2.4 cm，相邻读数条之间的距离为3 mm。读数条最短的是

9.1 cm, 最长的是 15.1 cm。每个读数条采用双端读出, 共有 24 路读出信号通道。

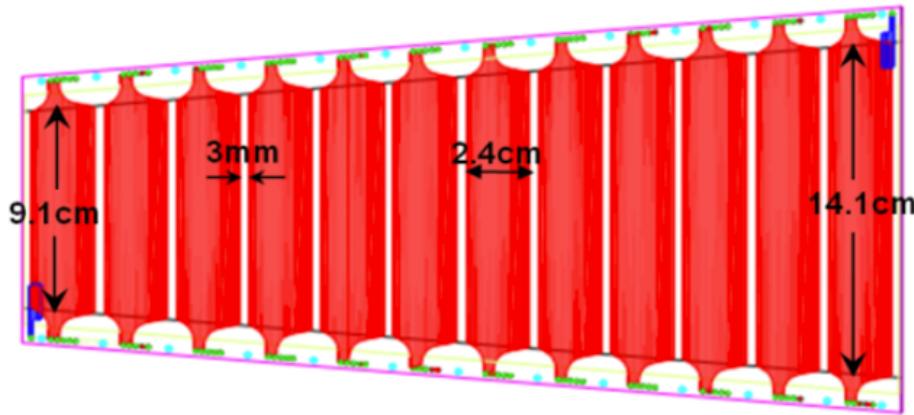


图 2.5: MRPC 结构示意图

MRPC 模型几何结构如图 2.6 所示。模块采用双层堆叠的设计方式, 一共有 2×6 个气隙, 每个气隙 $220 \mu\text{m}$, 每个模块的厚度 $< 2.4 \text{ cm}$, 双层总厚度 $< 5 \text{ cm}$; 环状探测器外半径为 844 mm, 内半径为 454 mm。

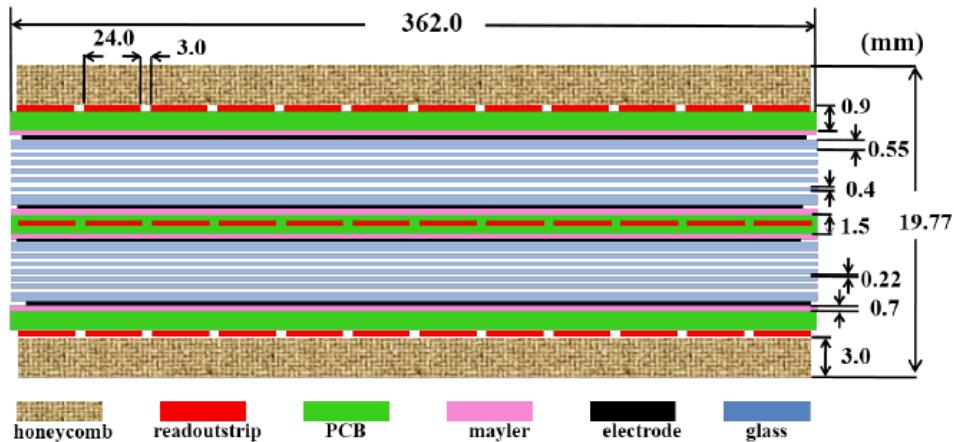


图 2.6: 端盖TOF 升级MRPC 的结构图

MRPC 需要工作在气密的环境下, 工作气体组分是 90% Freon+5% SF_6 +5% iso- C_4H_{10} 。

2.1.2 电子学系统

MRPC 的电子学系统设计方案和电子学系统包含前端放大甄别 FEE(Front end Electronics)模块、飞行时间测量 TDIG(Time to Digital module)插件、提供阈值和电源给 FEE 模块并传输击中信息至触发系统等功能的 CTTP(Coincidence

Test Threshold Power module)插件，时钟扇出插件硬件系统和数据获取软件和控制软件系统。

整个系统共 72 个 FEE 模块，FEE 模块采用基于 TOT 技术的 NINO 芯片，每个 FEE 模块含有 4 片 NINO 芯片，产生 24 路 LVDS 电平的输出信号，共完成 1728 路信号的放大甄别。MRPC 输出的电荷约为几十 fC，信号脉冲上升时间小于 1ns，输出信号电流比较小，必须进行进一步的放大和成形。为了最大程度的利用 MRPC 自身产生的差分信号，NINO-ASIC 芯片采用差分的输入，全线路的差分信号处理方式。NINO 对输入的信号进行快速放大，同时为了满足过阈时间(TOT)的测量将输入的信号电流转换为了输出的信号宽度。飞行时间数字化插件 TDIG。前端电子学输出的信号使用 HPTDC 芯片接收并数字化，并根据数据格式进行打包，经 VME 总线上传至数据获取系统。NINO 配合 HPTDC 同时测量出信号过阈时间的前沿时间(leading edge)和后沿时间(trailing edge)。其中前沿时间用来定时，结合前沿时间和后沿时间的 TOT 用来修正过阈时间不同引起的时间晃动。端盖 TOF 电子学系统中，CTTP 插件共两块，一个 CTTP 插件对应 36 个 FEE 模块。插件的作用是接收 NINO 芯片产生的击中信息，然后通过光纤上传到触发系统；为 NINO 芯片提供阈值电压，电源和测试信号，使芯片正常运行和满足测试需求。CTTP 插件同时还完成快控制功能。时钟扇出插件为 TDIG 和 CTTP 插件提供同步时钟信号。

2.2 BESIII 离线数据处理和分析系统

BESIII 实验开发的一套由软件平台、模拟、刻度、重建和物理分析工具等部分组成的软件系统是为了用来处理和分析 BESIII 离线数据。对探测器和模拟产生的原始数据进行离线处理，生成包含末态粒子各种信息的数据(DST 数据)供物理分析使用是它的主要任务，同时连接探测器和物理分析的衔接系统，提供了物理研究所需的各种软件工具。BESIII 的简化的离线数据处理过程如图 2.7 所示。

结合 BESIII 实验的具体需求，选用 cern 的 LHCb 实验开发的通用高能物理实验底层软件框架 GAUDI [27]为基础，以 C++ 语言为主要程序语言开发的全新离线数据处理和分析软件平台 [28](BOSS)是 BESIII 离线软件系统的核心部分。

包括离线数据刻度、事例重建、事例分类、MC 模拟和物理分析等阶段的离线数据处理的数据管理工具是由 BOSS 软件平台提供的。软件平台结合数据处理各阶段的特点和探测器特点的设计出符合不同探测器的数据结构，然后对这些数据采用专门的数据管理服务进行关键。BOSS 软件平台实现动态库的链接机制，可以有效的缩短再编译的时间。软件系统同时采用了如 ROOT [29]，CERNLIB [30] 等国际高能物理实验室的开源软件库和各种软件工具。

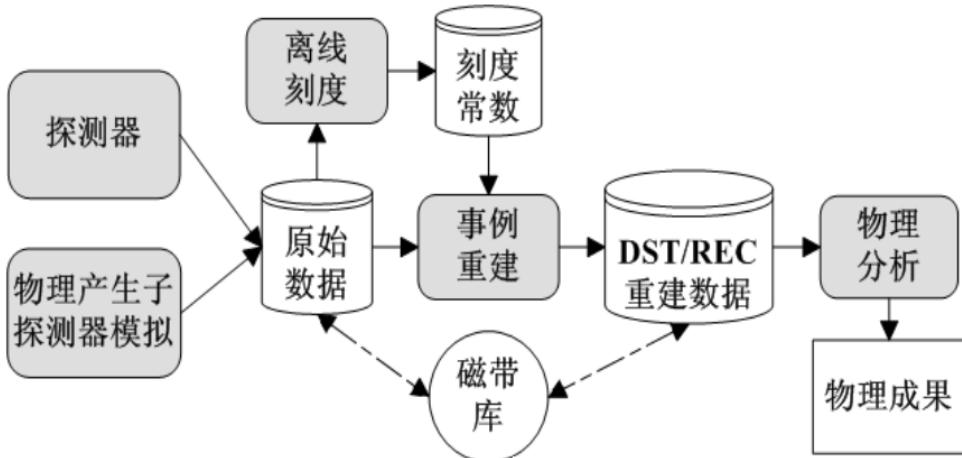


图 2.7: 简化的BESIII离线数据处理和物理分析过程

图 2.8给出了BESIII离线软件平台的整体结构图。软件的核心部分是：模拟、刻度、重建和物理分析算法。

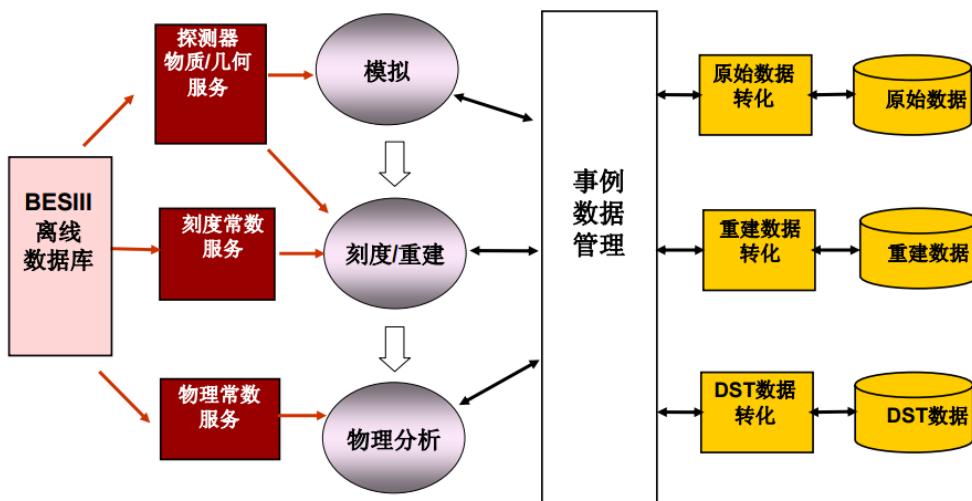


图 2.8: BESIII离线软件平台

BESIII 数据处理和物理分析软件系统，有超过200个的软件单元。组织和管理这些单元采用的是软件包的形式。BESIII 规范软件开发和发布过程利用的是配置管理工具(Configuration Management Tool,CMT)，该工具有一套管理规则和管理工具组成。

2.3 端盖 TOF 数据刻度重建流程

MDC、EMC、TOF 和 MUC 子系统以及径迹外推和匹配部分组成共同组成 BESIII 离线事例重建软件系统。BEPCII 采用的多束团对撞的机制，BEPCII 的高频时钟为 499.8 MHz，周期为 2 ns，储存环中共有 93 个束团，两个相邻束团之间的时间间隔为 6 ns。BESIII 触发系统的周期为 24 ns，因此在每个触发周

期内有 4 个束团对撞，准确的事例起始时间无法由在线系统直接给出。必须通过离线数据分析，通过事例重建，主要是 MDC 径迹重建，得到最可几事例起始时间。

事例重建系统的一般流程如图 2.9。

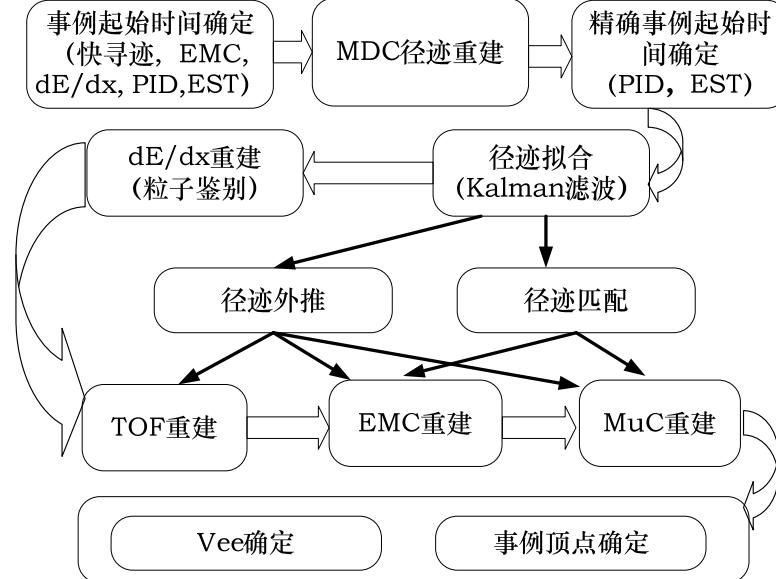


图 2.9: BESIII 事例重建过程

2.3.1 事例起始时间重建

前面提到在一个触发周期内有 4 个束团发生对撞，因此准确的事例起始时间无法由在线系统直接给出。事例起始时间需要离线数据重建得到。图 2.10 给出了 BESIII 的时间测量系统。事例的起始时间 T_{est} 可以表示为： $T_{est} = T_{DCM} - T_{ev}$ 。其中 T_{est} 表示事例起始时间，为对撞发生时刻的时间； T_{DCM} 表示 TOF 电子学测量到的原始 TDC 时间， T_{ev} 为带电粒子从对撞顶点飞到到给出信号的探测器之间的飞行时间。

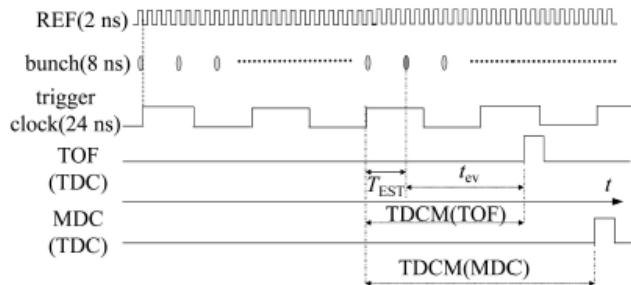


图 2.10: BESIII 事例的时间关系

图 2.11 给出了计算事例起始时间 T_{est} 的程序流程图。主要包括快重建 [31] 和时间起始时间重建两部分 [32]。在 MDC 快重建和粒子鉴别完成后， T_{est}

由 MDC 和 TOF 分别计算得到, 具体的计算方法见文献 [33]。其中 TOF 得到的 T_{est} 精确度高。

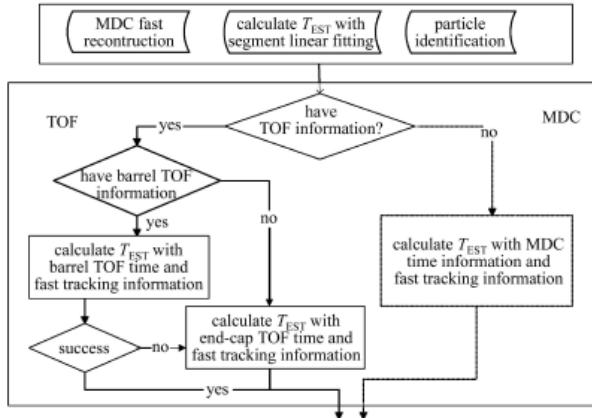


图 2.11: 事例起始时间程序流程图

2.3.2 主漂移室的径迹外推

BESIII 主漂移室重建径迹的外推算法, 利用小步长外推提供了主漂移室中的带电径迹外推到外部飞行时间探测器, 电磁量能器等其他子探测器上的预期径迹信息。算法在外推的过程中充分考虑了带电径迹在磁场中的偏转情况以及带电粒子与探测器物质发生相互作用引起的电离能损等效应, 计算径迹参数的参数误差矩阵时考虑了库仑多次散射效应的影响。

在考虑带电粒子的磁场偏转, 以及电离能损的情况下, 小步长外推是比较精确的计算径迹的预期参数的一个常用方法。此方法认为径迹可以近似为螺旋线, 在每个小步长外推结束时, 从带电粒子的动量中减去该步长的电离能损, 之后再进行下一个步长外推, 如此直到推至要求的位置 [34]。具体径迹外推程序 TrkExtAlg 流程图见图 2.12。

2.3.3 飞行时间探测器的重建

TOF 离线数据重建流程如图 2.13 所示。TOF 电子学系统给出 TOF 的时间信号和幅度信号。MDC 重建和 KalmanFilter 径迹拟合得到带电径迹的动量和径迹长度等信息 [35] [36], 进而计算出粒子飞行的预期时间, 径迹外推给出击中 TOF 的位置信息 [34], 事例起始时间算法 [33] 给出 t_0 信息, 利用这些信息结合刻度得到的刻度常数完成 TOF 的离线数据重建。

2.4 原始数据分布

图 2.14 给出了MRPC端盖TOF的原始的TDC的信息。

图 2.15 给出了 T-Q 匹配后 MRPC 端盖 TOF 的原始的时间和过阈时间的分布。

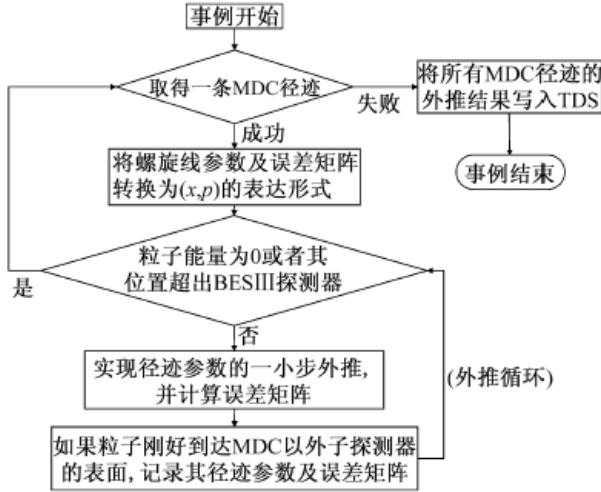


图 2.12: 径迹外推算法的实现流程图

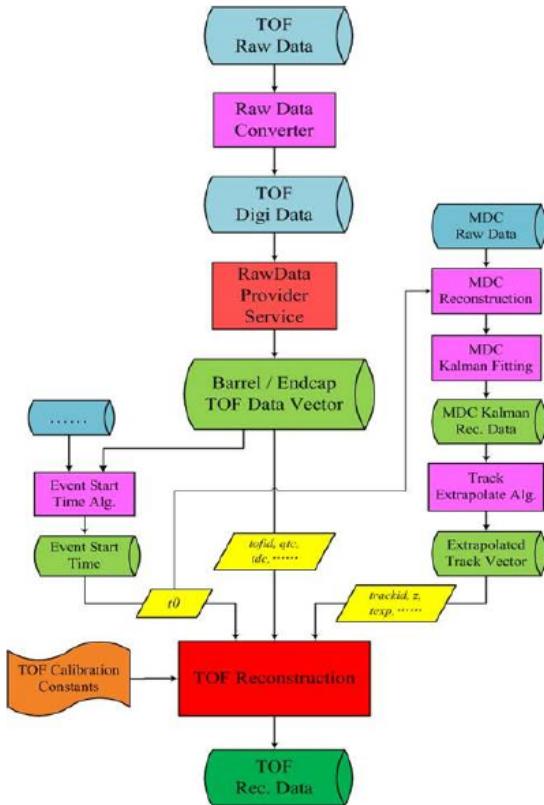


图 2.13: TOF 的离线数据重建过程

图 2.16 给出了事例起始时间的分布。

原始测量的时间信号 TDC 包括事例的起始时间 t_0 ，对撞事例从对撞顶点到 TOF 探测器的飞行时间 t_{tof} ，信号在读数条的传播时间 t_{pro} ，电子学的延迟 t_{ele} ，过阈时间的晃动 $t_{time-walk}$ 。即： $TDC = t_0 + t_{tof} + t_{pro} + t_{ele} + t_{time-walk}$ ，所以飞行时间 $t_{tof} = TDC - (t_0 + t_{pro} + t_{ele} + t_{time-walk})$ ，其中 TDC 是 TOF 探测器测量到的原

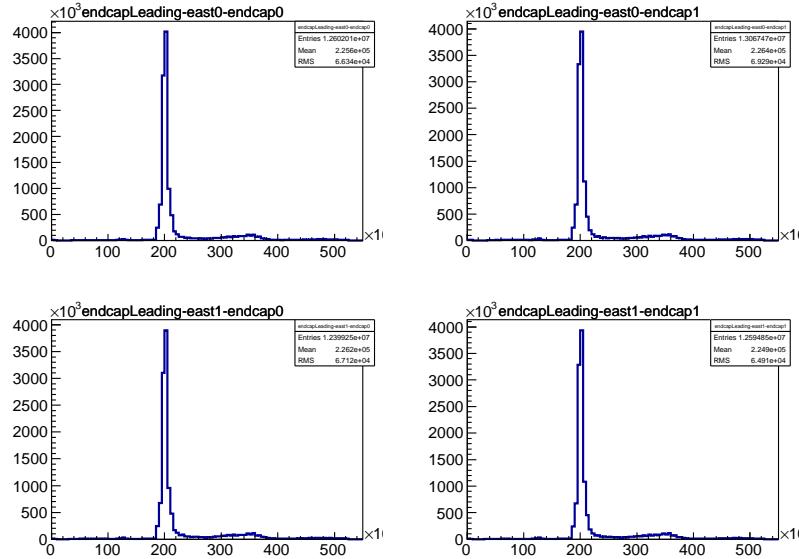


图 2.14: 原始的TDC

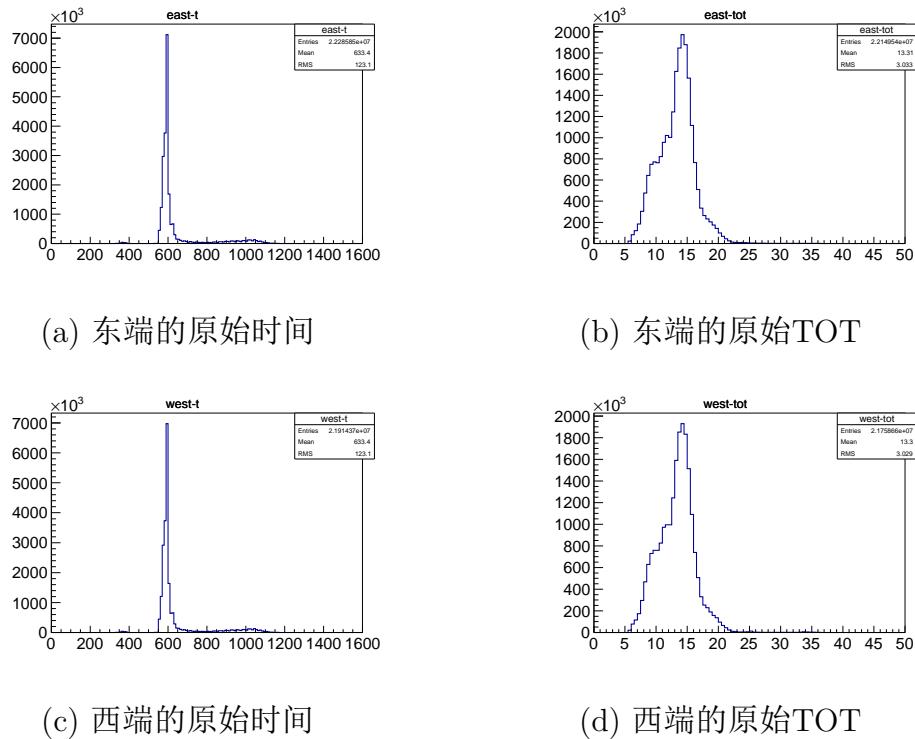


图 2.15: T-Q匹配后MRPC的原始时间和TOT的分布

始时间信号，对于 MRPC 来讲，采用的双端读数，所以一个事例有两个 TDC 时间信号。 t_0 由事例起始时间算法给出， t_{pro} 对于 MRPC 来说是信号在读数条的传播时间。这个是刻度的主要内容之一。 t_{ele} 是电子学延迟项,是一个常数项。 $t_{time-walk}$ 对于 MRPC 来说是 TOT 的晃动。

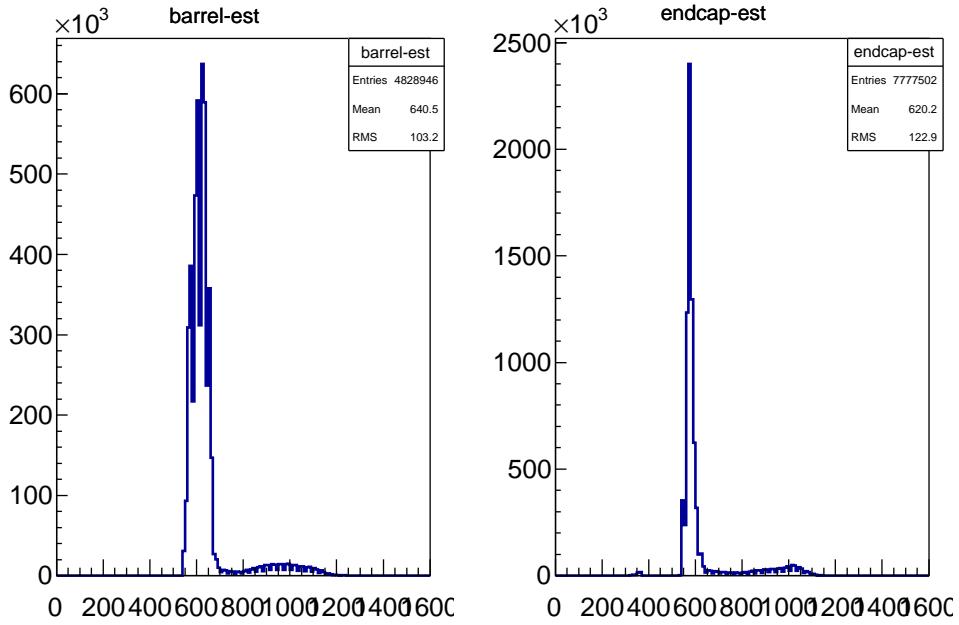


图 2.16: 事例起始时间的分布

2.5 刻度的重点和难点

2.5.1 MRPC 离线刻度的信息量

前面已经介绍了 MRPC 直接测量的是时间信号 TDC，还有过阈时间 TOT。MRPC 的读数条采用的是双端的读出形式。所以对应一个事例测量的有两个时间信号 TDC1, TDC2；有两个过阈时间 TOT1, TOT2。在这里定义：

$$t_{left} = TDC1 - t_0 \quad (2.1)$$

$$t_{right} = TDC2 - t_0 \quad (2.2)$$

则 t_{left} 和 t_{right} 为事例从对撞点时刻到电子学读出的过阈时间前沿的时刻之间的间隔。包括从对撞点飞行到 MRPC 探测器的飞行时间，信号在读数条中的传播时间，信号在电缆等的传播时间，电子学的时延，过阈时间的晃动等部分。

刻度的目的正是修正除了飞行时间外的其它时间的贡献。其中信号在电缆的传播时间和电子学的时延是常数项，信号在读数条的传播时间是一个依赖击中位置的时间量。过阈时间的晃动是和信号的大小有关的量。

BESIII 系统的坐标定义为：正 Z 轴沿着束流方向，水平向东；正 Y 轴指向天空，竖直向上；正 X 轴取水平向北。取对撞点为坐标原点 O(0,0,0)。空间某一点 P(x,y,z) 的方位角定义为直线 OP 从正 X 轴沿逆时针在 Z—Y 平面投影的角度 ϕ ，在端盖 MRPC 中对应的不同模块的编号和相同模块不同的击中位置(来自径迹外推)。OP 的极角定义为 OP 和正 Z 轴的夹角 $\cos\theta$ ，在端盖 MRPC 中对应的是读数条的编号。

之前已经介绍了利用 MDC 重建和卡曼滤波径拟合可以得到带电径迹的动量和径迹长度的信息，进而可以求出带电粒子的预期飞行时间 t_{exp} 。

至此，刻度需要的所有相关量已经介绍完了。包括电子学系统测量的量：初始时间 t_{left}, t_{right} (TDC 扣除 t_0 后的时间在本论文中仍旧称为初始时间)，过阈时间 q_{left}, q_{right} (测量的两个过阈时间的值在本文中都表示成 q_{left}, q_{right} 的形式)；外推的量：击中位置 z_{rhit} ，预期时间 t_{exp} ，以及模块的编号，读数条的编号。

2.5.2 MRPC 离线刻度的时间，过阈时间，击中位置等的原始分布

图 2.17 给出了 MRPC 离线刻度的一些原始的分布。上面的三幅图分别是原始的时间，过阈时间和击中位置分布的一维图，其中 2.17a 是原始的时间分布，值大小主要分布在区间 12-14 ns；2.17b 是原始的过阈时间的分布，明显看出，存在多峰现象（下一小节将介绍这种现象来自于信号在读数条的反射）；2.17c 是信号击中读数条位置的分布，可以看出事例数随着击中位置是分布均匀的。下面三幅图分别是原始的时间，过阈时间和击中位置两两相互关系的二维图，其中 2.17d 表示时间随击中位置的分布，这个关系近似线性，斜率表示信号在读数条传播的等效速度，这是刻度的主要项之一；2.17e 表示时间随过阈时间的分布，关系分布复杂，呈折线型（来自反射），这也是刻度中的重点和难点部分，能否合理的处理时间和过阈时间的关系是决定刻度算法能否实现的关键；2.17f 表示过阈时间和击中位置的分布，也是存在折线关系（将在下一个节介绍这种分布的形成原因）。

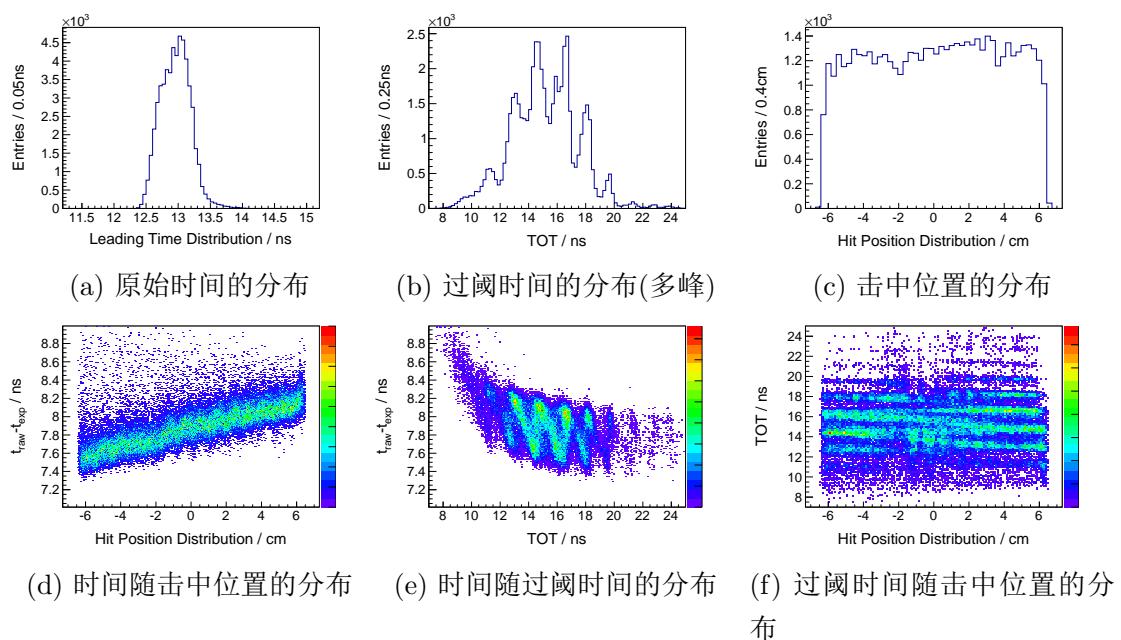


图 2.17: 一些原始的分布

2.5.3 过阈时间和反射问题

刻度的主要内容包括：信号在读数条的传播时间项，过阈时间的修正项。

其中信号在读数条的传播时间和信号在读数条的击中位置以及信号在读数条的等效传播速度有关。对于MRPC的每条读数条而言，长度以及工艺上的差别，导致信号在每个读数条的等效速度不尽相同，因此需要分别对每条读数条进行离线刻度。

信号在读数条的传播时间项如图 2.17d 所示，近似是一个线性的关系。预估采用低阶多项式即可完成修正。而过阈时间修正项如图 2.17e 所示，可以看出时间对过阈时间的分布存在折线关系，分布复杂，需要分析这种折线分布背后的产生的机制。采用合适的方式处理这种关系。

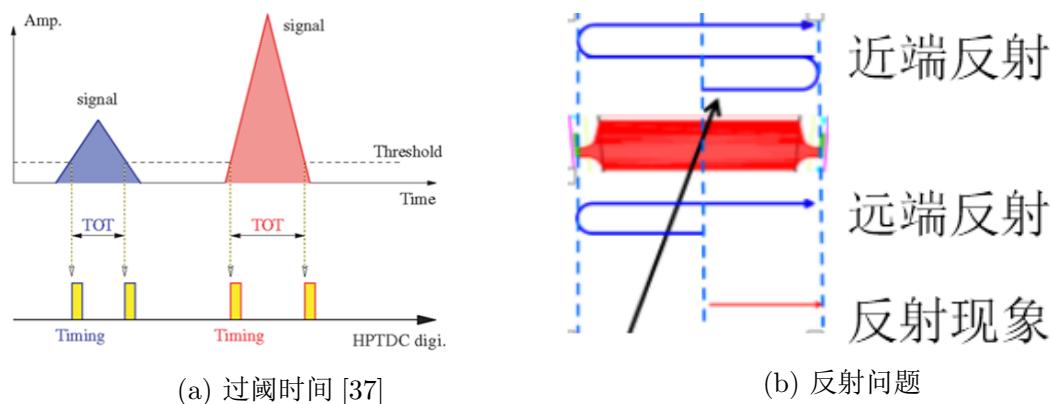


图 2.18: 反射问题和过阈时间

图 2.18a 是信号的过阈时间。对于一定的阈值，幅度大小不同的信号，对应的过阈时间不同。信号幅度越大，过阈时间也就越大。过阈时间的多峰来自于反射。图 2.18b 是 MRPC 读数条的反射问题，分为近端反射和远端反射。由于读数条本身较短，反射信号只是比真实信号时间晚不到2ns，这样导致反射信号和原来的真实信号叠加。测量的过阈时间也就变大了。正是由于过阈时间和反射问题的存在，导致时间对过阈时间的分布复杂。对时间和过阈时间的关系的研究也刻度研究的重点和难点部分。

关于反射和过阈时间有以下结论：

- TOT不随击中位置变化
- 近端反射是两倍读出条长传播时间。对击中读出条位置没有依赖。
- 远端反射依赖击中位置，且与时间依赖关系相反。
- 对多次反射的情况，无论近端还是远端反射，相互之间差两倍读出条长的传播时间。

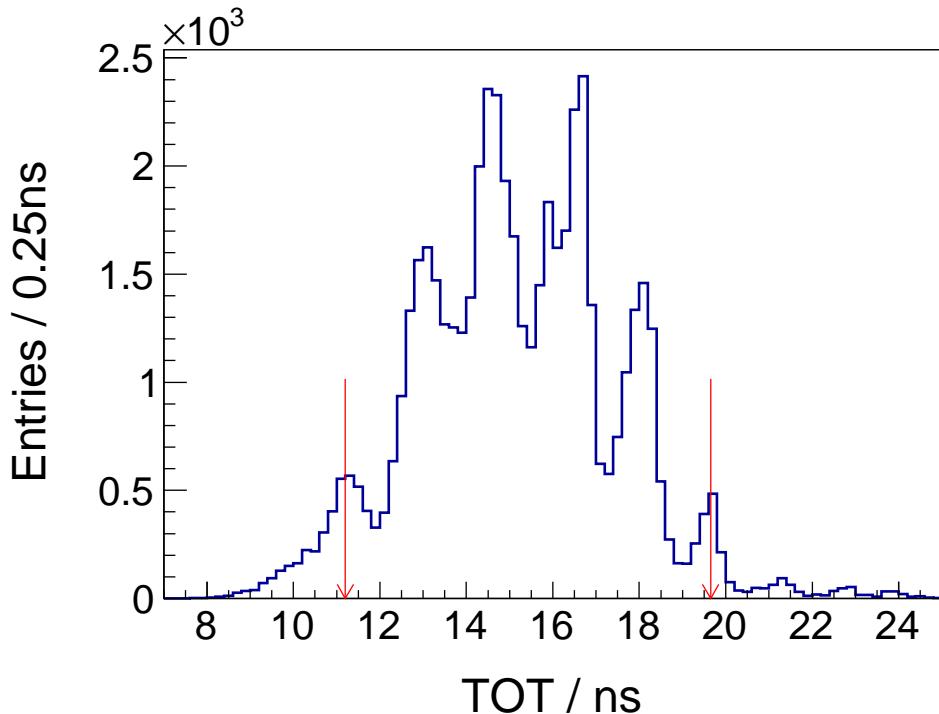


图 2.19: 过阈时间的的峰之间的间隔

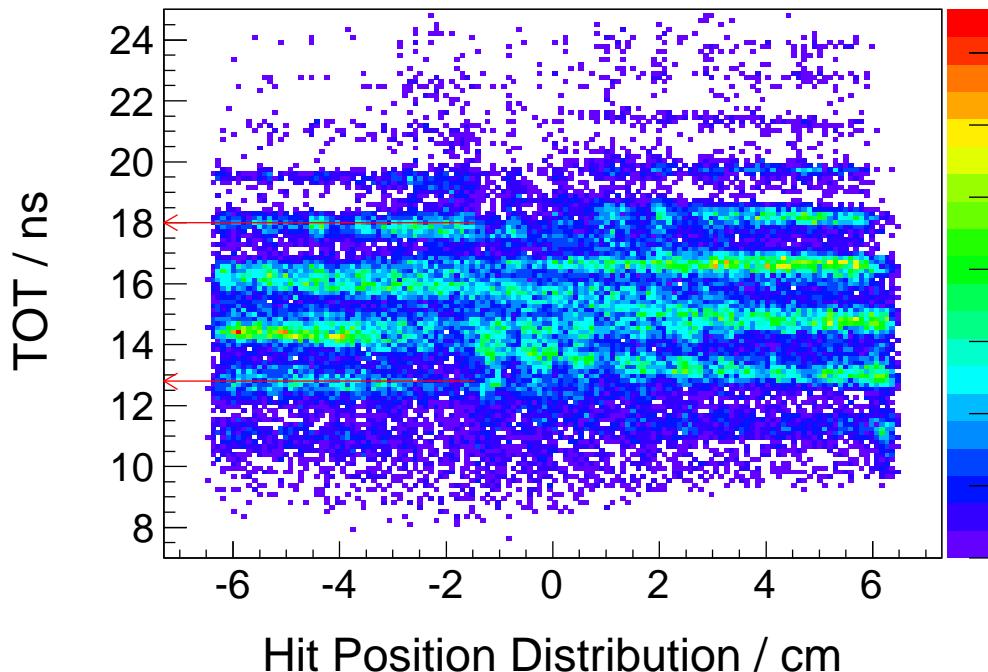


图 2.20: 过阈时间与击中位置图中两个水平线(折线)之间的间隔

图 2.19 表示过阈时间的分布，多峰。两个峰之间的时间间隔是： $(19.65\text{ns} - 11.2\text{ns})/5 = 1.69\text{ns}$ ；图 2.20 表示过阈时间与击中位置的分布。两个水平线之间(近端反射)的时间间隔是： $(18.0\text{ns} - 12.8\text{ns})/3 = 1.73\text{ns}$ ；

读数条编号是 7 的这一条长度是 13 cm，读数条的切角长度是 2.8 cm。信

号在读数条传播的等效速度大约是 55 ps/cm(即图 4.1a 的斜率)。这样信号传播一个读数条长度所需要的时间是: $(13+2.8)*55=869\text{ps}$ 。传播两倍的读数条长需要的时间是 $869*2\text{ps}=1.738\text{ns}$ 。这个值正是对应过阈时间(图 2.19)之间峰的间隔, 和过阈时间与击中位置(图 2.20)中两个平行线之间的间隔。

两倍读数条传播时间和过阈时间间隔的吻合, 说明了造成过阈时间多峰的来源正是来自信号在读数条的反射。而反射对击中位置的依赖关系是线性的, 这也使得对于时间和过阈时间的处理可以采用先对击中位置修正消除其中对击中位置的依赖的方法 (具体在后续章节将会详细讨论)。

2.6 小结

本章首先介绍了原来的端盖闪烁体 TOF 的时间分辨等性能, 由于时间分辨达不到 BESIII 实验高精度测量的要求, 端盖 TOF 在 2015 年完成了升级改造, 换成了时间分辨更好的 MRPC 探测器。MRPC 探测器作为一种新型的飞行时间探测器, 具有时间分辨好, 探测效率高, 造价便宜等优势。之后介绍了 BESIII 实验的 MRPC 的结构。分东西端盖两部分, 各有 36 个模块。每个模块有 12 个读数条, 采用双端电子学读出信号。BESIII 的离线数据处理和分析系统可以处理包括模拟、刻度、重建和物理分析等一系列的物理问题, 其中 BOSS 是整个离线软件的核心。然后介绍了 BESIII 离线数据重建过程, 事例起始时间的重建, MDC 的径迹外推, 以及 TOF 的离线数据重建过程。最后介绍了 MRPC 端盖 TOF 的一些原始分布以及刻度的主要内容, MRPC 测量的原始数据是原始的时间和过阈时间。其中原始时间除了包括带电粒子的飞行时间, 还有事例起始时间(t_0), 信号在读数条内传播的时间, 过阈时间的前沿晃动, 电缆等的延迟等。这些时间贡献需要刻度修正。其中信号在读数条内的传播时间依赖信号在读数条的有效速度, 几乎是一个线性关系。由于反射的原因, 导致时间和过阈时间的关系分布复杂, 需要采用合适的方式处理。过阈时间的修正也是刻度的重点和难点部分。

第三章 利用样条插值方法对 MRPC 进行刻度

在上一章中讲到，MRPC-TOF 直接测量的信息包括原始的飞行时间和过阈时间（time-over-threshold，简称 TOT）。为了得到精确的飞行时间信息，还需要对粒子在读数条上的传播时间，过阈时间前沿的晃动以及在电缆的时间延迟等因素进行刻度和修正，需要进行离线分析。为了得到良好的时间分辨，需要利用刻度样本进行离线刻度和修正，得到相应的刻度常数，再对原始数据进行重建，进而得到飞行时间探测器的性能。

MRPC-TOF 的离线刻度是通过比较测量时间 $t_{mea} = t_{raw} - t_0 - t_{cor}$ 与带电粒子从对撞顶点到击中 MRPC-TOF 的预期飞行时间 $t_{exp} = L/\beta c$ 来比较，其中 t_{raw} 是飞行时间探测器电子学测得的原始的时间； t_0 是事例的起始时间，可以由事例起始时间算法给出； t_{cor} 是时间的修正项； c 是真空中的光速； $\beta = p/\sqrt{p^2 + m^2}$ 是带电粒子的飞行速度； m 是粒子的质量；飞行长度 L 和动量 P 是通过主漂移室(MDC)测量得到的。

时间修正项 t_{cor} 是过阈时间(TOT)和击中位置(z)的函数。对于击中位置项，信号击中读数条的位置不同，则在读数条上的传播时间不同，在上一章的讨论中知道，时间随击中位置的变化近似线性，它们之间的斜率对应读数条中信号传播的有效速度。对于过阈时间，由于过阈和反射问题的存在，时间对过阈时间的分布呈现折线型，这种分布难以采用有效的函数进行拟合。这是刻度研究中的重点和难点部分。

STAR 实验 MRPC 采用的是样条插值(spline Fit)刻度的方法。在第一章关于论文的国内外研究进展中介绍了 STAR 实验的过阈时间也存在多峰现象，也是因为反射现象造成的，这一点和我们 BESIII 实验的 MRPC-TOF 的过阈时间的多峰问题类似，因此本文也首先对 BESIII 的 MRPC 进行了样条插值方法的研究。

本章主要介绍样条插值方法。分两部分介绍：先对过阈时间进行插值，之后对击中位置修正(对应 STAR 实验的刻度方法)；先对击中位置进行修正，之后对过阈时间进行插值。并进行了一定的结果比较，发现先修正击中位置，然后对过阈时间进行插值的结果比另一种方法好。

样条插值方法优点：光滑性好，且低阶就能拟合的很好。高能所集群下的 root 中有关于 TSpline 的类包，可以利用它完成样条插值的拟合。

本章数据选用的是 2016 年 5 月 24 日到 5 月 30 日这期间 BESIII 对撞数据中的 Bhabha 事例。选用 Bhabha 事例是因为它事例量大，易于挑选，纯度高，适合做刻度样本。

3.1 修正击中位置前进行插值

本节以挑选的 Bhabha 事例中击中MRPC-TOF读数条位置在 MRPC 中模块编号为 55，对数条编号为 7 这一个读数条为例。首先按照 STAR 实验的做法进行刻度研究。具体做法，就是先对过阈时间进行插值修正，之后对得到的结果再次进行击中位置修正得到最终的时间分辨等刻度信息。

3.1.1 等事例数分 bin 拟合

- 以过阈时间的大小为量对所选的事例数进行等事例数分 bin
- 对于每个 bin 区间，进行拟合
- 对于上一步得到的中心值进行插值，得到插值的刻度常数
- 利用上一步得到的刻度常数，对时间信息进行修正

等事例数分 bin 的原因是时间随过阈时间的分布是不均匀的。在过阈时间很小或者很大的部分事例数很少，如果采用等区间分 bin 的话，会出现比较大的误差棒。

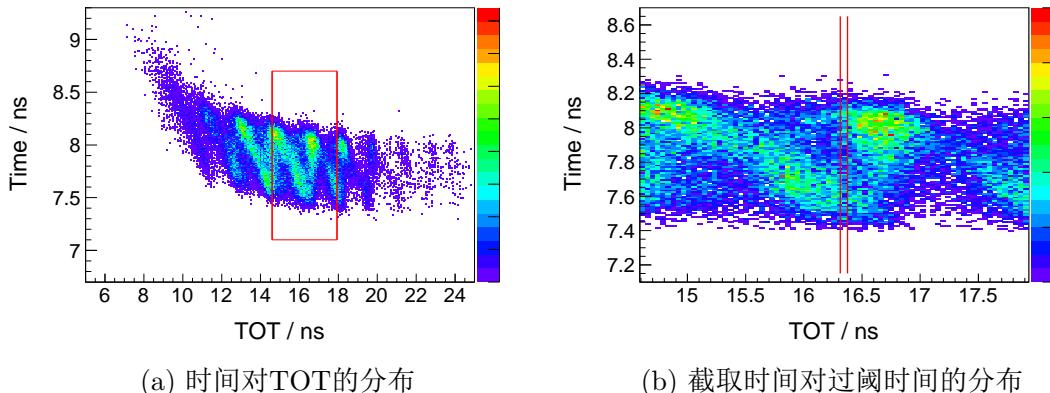


图 3.1: 时间对过阈时间的分布

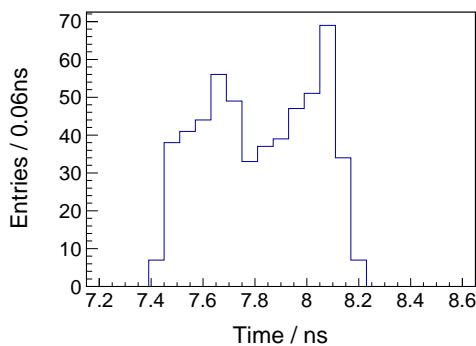


图 3.2: 截取一个bin的时间分布(对应两个峰值)

分 bin 完成后，发现一个 bin 内时间有两个峰值(如图 3.2)。图 3.1a 是时间对过阈时间的分布，图 3.1b 是图 3.1a 截取的一部分的分布。图 3.2 是一个bin内的时间分布，可以明显看出具有双峰。对此，找不到合适的函数可以在一个区间内得到一个合适的中心值。

3.1.2 两个高斯拟合和单个高斯拟合

在上一节中时间与过阈时间的的散点图中，已经看到分 bin 后一个 bin 区间中对应两个时间峰值。因此首先考虑对每个区间采取两个高斯函数进行拟合，并得到对应的两个中心值。然后选取两个高斯占比例高的($>50\%$)对应的中心值作为插值拟合的插值点进行插值，发现最终得到的时间分辨效果很差。之后考虑对每个区间直接采用高斯拟合得到中心值(这个中心值在采用两个高斯拟合得到的两个中心值之间)进行插值拟合。并与上一个方法进行对比。具体做法如下：

图 3.3a， 3.3b 分别是对每个 bin 用两个高斯和一个高斯函数拟合后得到的中心值的分布

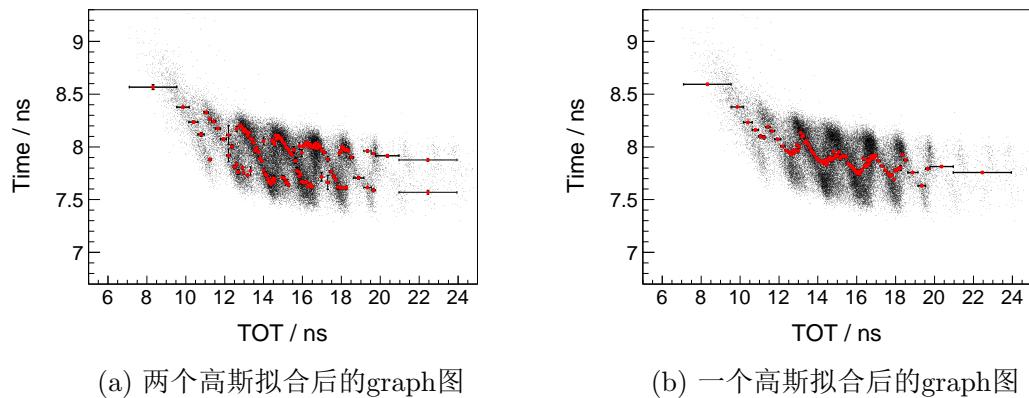


图 3.3: 高斯拟合后的graph

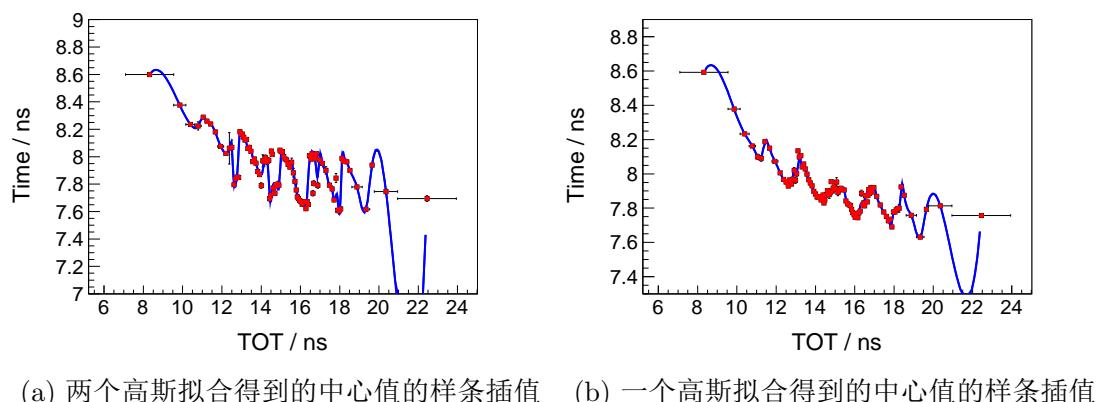


图 3.4: 样条插值

图 3.4a 第一种做法的样条插值曲线，对于每个 bin 的时间的中心值取相对比例高的那一个。图 3.4b 第二种做法的样条插值曲线。

3.1.3 击中位置的修正

上述两种方法，插值修正完过阈时间后，时间随击中位置的分布还有依赖(如图 3.5)，对此进行一个多项式修正，然后得到最终时间分辨。

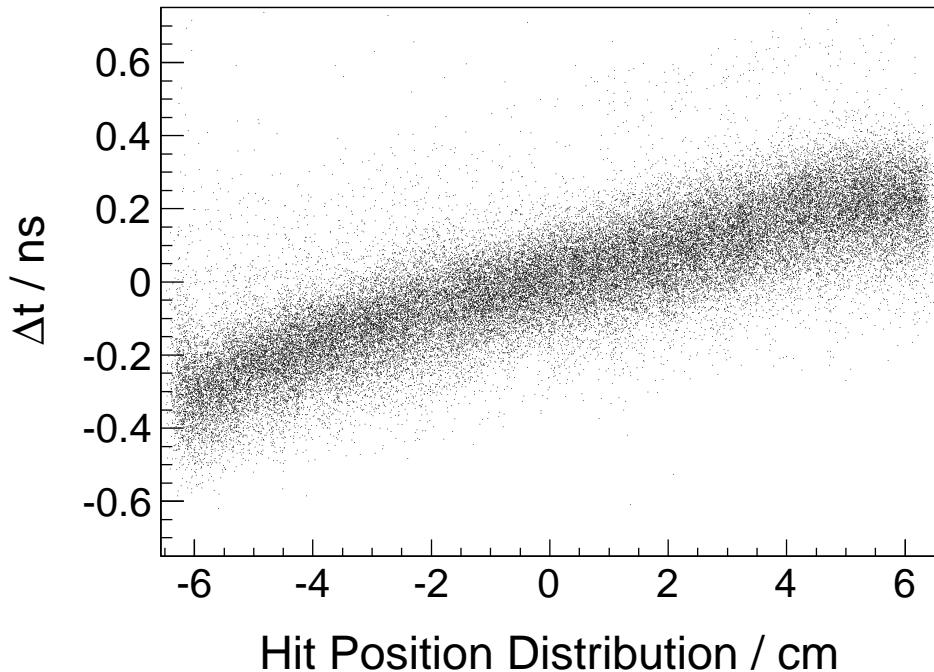


图 3.5: 对过阈时间采用样条插值修正后时间对击中位置的分布

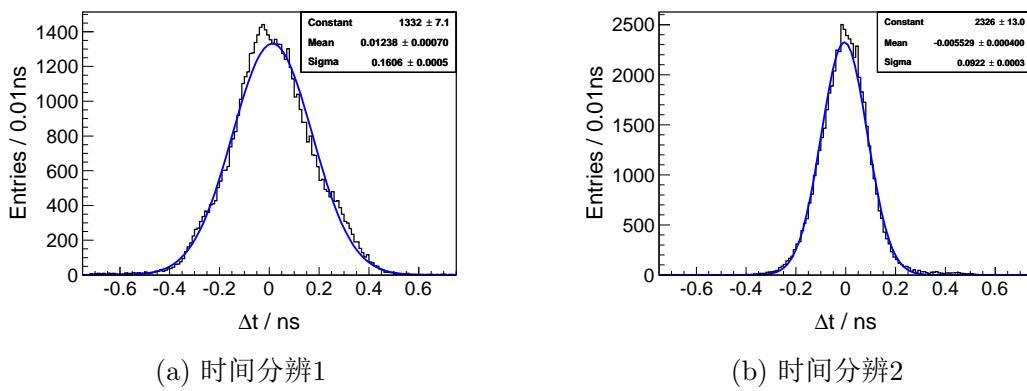


图 3.6: 时间分辨

图 3.6a 是第一种做法得到的时间分辨，为 160 ps；图 3.6b 是第二种做法得到的时间分辨，为 92 ps。这个结果和下一节先修正击中位置后修正过阈时间的结果相比，差别很大。

分析原因：在上一章中介绍反射问题时讲到，过阈时间(TOT)的多峰来自反射。一次反射内，时间对过阈时间的依赖近似线性关系，样条插值的光滑性决定不能完全描述这种关系。

3.2 修正击中位置后进行插值

上一小节采用的是 STAR 实验关于 MRPC-TOF 离线数据刻度方法，效果并不好。在论文第二章中关于反射部分的分析指出，在 BESIII 实验中的 MRPC-TOF 的过阈时间和击中位置之间存在依赖。这种依赖正是来自信号在读数条中的反射。基于此，采用先对击中位置进行修正，然后对过阈时间进行修正的方法。

3.2.1 击中位置修正后，时间对过阈时间的分布

图 3.7 给出了修正击中位置前后，时间对过阈时间的分布变化。其中图 3.7a 表示修正击中位置前，图 3.7b 表示修正击中位置后。容易看出，修正完击中位置后时间对过阈时间的折线几乎消失。在此基础上，对过阈时间进行插值拟合。

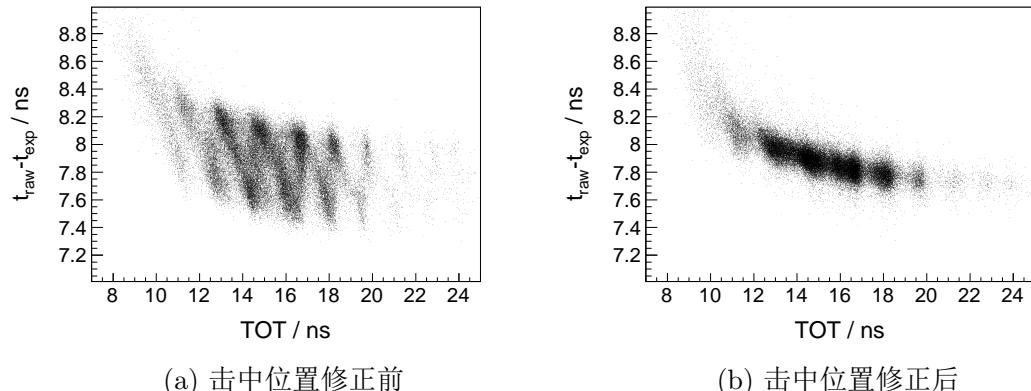


图 3.7: 击中位置修正前后时间对过阈时间的分布

3.2.2 修正击中位置后对过阈时间插值

对 3.7 进行插值拟合，如图 3.8a；图 3.8b 是这种方法得到的最终的时间分辨，为 64 ps，比之前先对过阈时间进行插值修正然后对击中位置进行修正得到的时间分辨(160 ps, 92 ps)好。

出现这种结果的原因是在于先修正击中位置的贡献后，时间对过阈时间的依赖关系变得简单，在此基础上进行插值拟合效果变好。这种对比也说明了先对击中位置进行修正，之后再对过阈时间进行修正是应该采取的修正顺序。

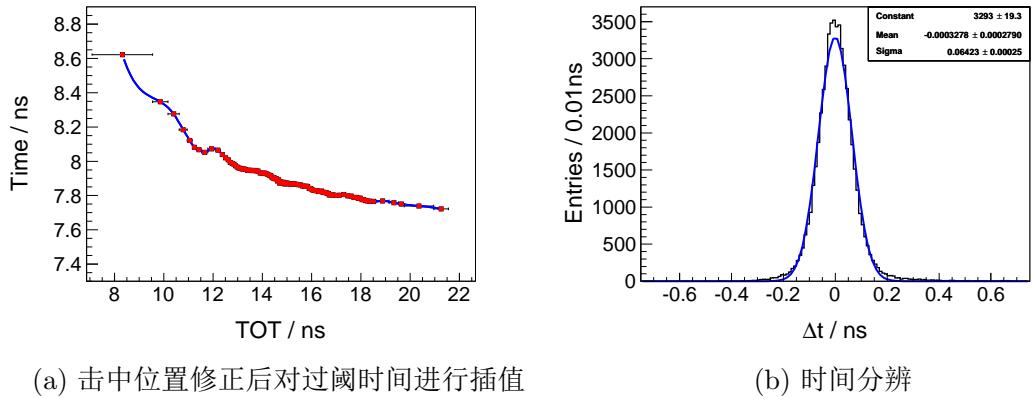


图 3.8: 击中位置修正后插值

3.3 小结

STAR 实验中关于 MRPC-TOF 中的过阈时间的多峰问题的产生机制和我们 BESIII 实验的 MRPC-TOF 的过阈时间的多峰问题类似。STAR 实验对此刻度采用的是样条插值方法，先对过阈时间进行修正，然后对击中位置进行修正。

本章利用样条插值方法，首先介绍 STAR 实验在 BESIII 实验的 MRPC-TOF 离线数据刻度中的实际效果，发现在处理过阈时间问题上效果不好，得到的时间分辨不好。分析原因是来自于信号在读数条中的反射。这种反射导致时间对过阈时间的分布出现折线状，折线部分是线性的。样条插值的光滑性导致不能完全描述这种情况。基于此，采用先对击中位置进行修正的方法，发现修正后时间对过阈时间的分布的折线状况几乎消失，然后对过阈时间进行插值拟合。并对这两种方法得到的时间分辨进行比较。得出应该先进行击中位置的修正，然后进行过阈时间的插值拟合修正。

第四章 构造公式方法

上一章主要从插值方法入手介绍了对 TOF 的 MRPC 的离线数据的刻度方法。这一章将从构造公式入手对刻度进行研究。仍然采用击中位置和过阈时间分开修正的方法。其中对于击中位置的修正采用简单的多项式构造，对于过阈时间的修正，通过分析时间对过阈时间的分布，构造出几种简单的公式，并比较拟合的情况和拟合的结果，最终确定过阈时间项的公式。

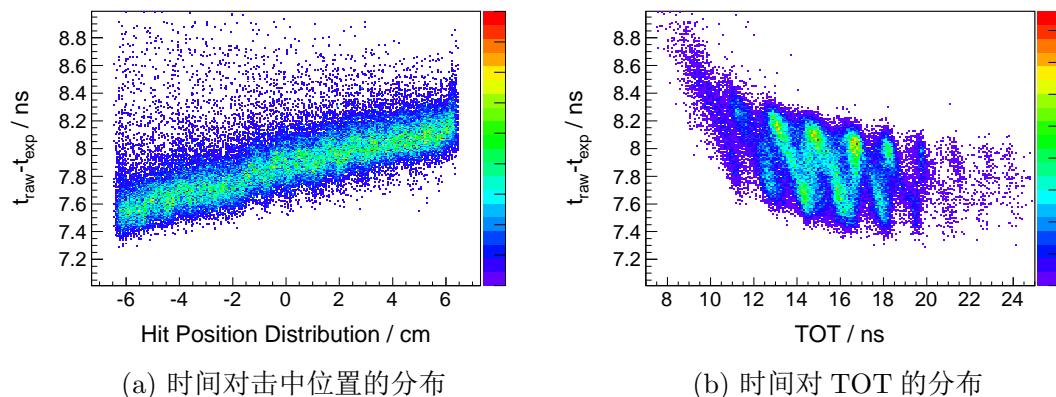


图 4.1: 时间对击中位置和过阈时间的分布

4.1 击中位置的修正

刻度修正的主要项之一就是击中位置项的修正。图 4.1a 时间与击中位置项的分布关系相对简单，几乎是线性关系，这一项主要是信号在对数条内的传播时间。图 4.1a 中的斜率表示的信号在读数条传播的有效速度。

4.1.1 击中位置等区间分 bin

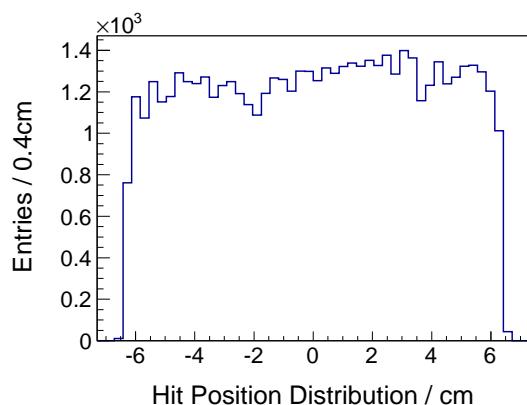


图 4.2: 击中位置的分布

图 4.2 是击中位置的分布。可以看出，在此方向上事例数是均匀分布的，因此对击中位置的分 bin 采用等区间分 bin 方式。

图 4.3 是单个 bin 的时间分布。可以看出，这个分布左右并不完全对称，故不适合采用高斯拟合。考虑过采用朗道卷积一个高斯的拟合，但拟合的也并不十分贴切。

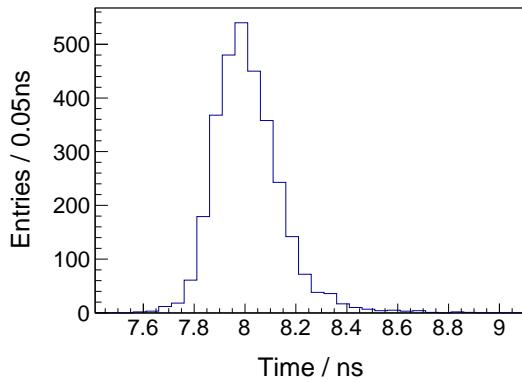


图 4.3: 单个 bin 的时间分布

4.1.2 每个 bin 采用 Nov 公式拟合

从之前边渐鸣文章 Absolute photon energy calibration for the BESIII EMC [38] 中看到关于 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 的分布也是左右不对称的，拟合采用的是一个 Novosibirsk[39] 的公式。关于这个公式：

$$f_{Nov}(m) = A \exp\left(\frac{-\ln^2(1 + t \frac{\sinh(t\sqrt{\ln 4})}{t\sqrt{\ln 4}} \frac{m-m_0}{\sigma}) - \frac{t^2}{2}}{2t^2}\right)$$

A 表示归一化常数， σ 表示时间分辨， m_0 表示中心值， $t(< 0)$ 表示参数化的尾巴。这个函数可以被看做是有一个不对称的尾巴的高斯函数。分析发现，这个函数形式对于拟合图 4.3 很合适。

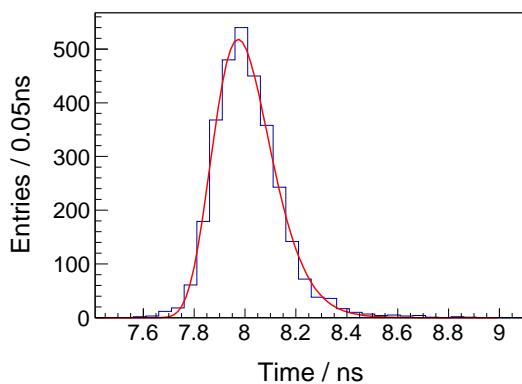


图 4.4: 单个 bin 的时间用 Nov 公式拟合的结果

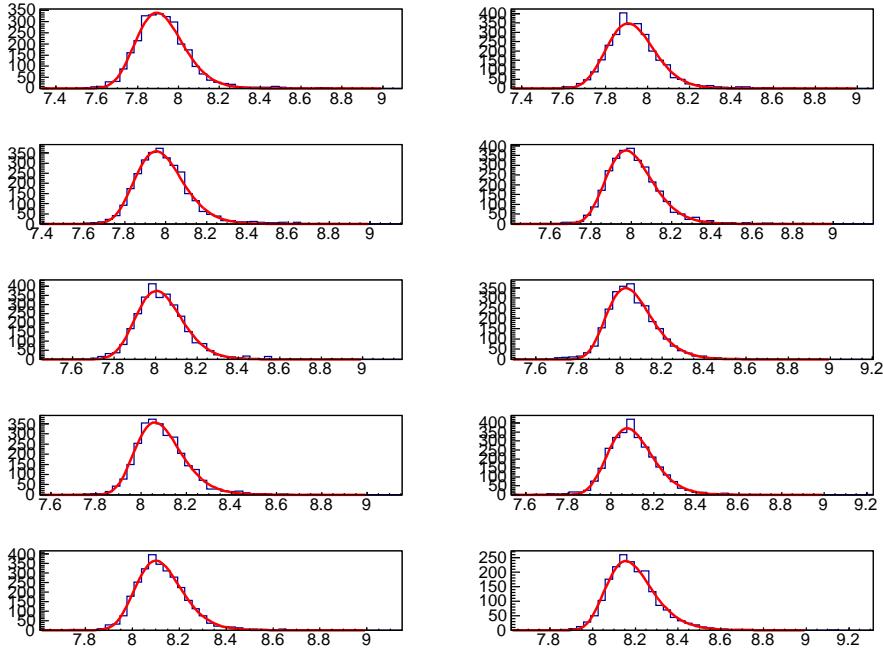


图 4.5: 10 个 bin 的时间用 Nov 公式拟合的结果

图 4.4 是单个 bin 采用 Nov 公式拟合的结果。可以看出拟合的很好。

图 4.5 是利用 Nov 公式对 10 个 bin 拟合情况，拟合的效果都比较好。所以对于击中位置分 bin 后就采用 Novsibirsk 公式进行拟合。

4.1.3 对得到的 graph 点采用三阶多项式拟合

上一小节研究得到了分 bin 后的每个 bin 的中心值。中心值拟合得到的曲线的斜率是等于信号在读数条内传播的有效速度，对此采用一个多项式拟合。如图 4.6

4.2 过阈时间的修正

修正完击中位置的贡献后，时间与过阈时间的分布变得简单。图 4.7 是利用上述方法修正完击中位置后的时间对过阈时间的分布，此时时间对过阈时间的分布的折线现象基本消失。

基于此种分布，选用以下几种公式进行尝试，分别是：

$$p_0 + p_1/\sqrt{q} \quad (4.1)$$

$$p_0 + p_1/q \quad (4.2)$$

$$p_0 + p_1/q^2 \quad (4.3)$$

$$p_0 + p_1/q^3 \quad (4.4)$$

$$p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q \quad (4.5)$$

$$p_0 + p_1 * q + p_2 * q^2 + p_3 * q^3 \quad (4.6)$$

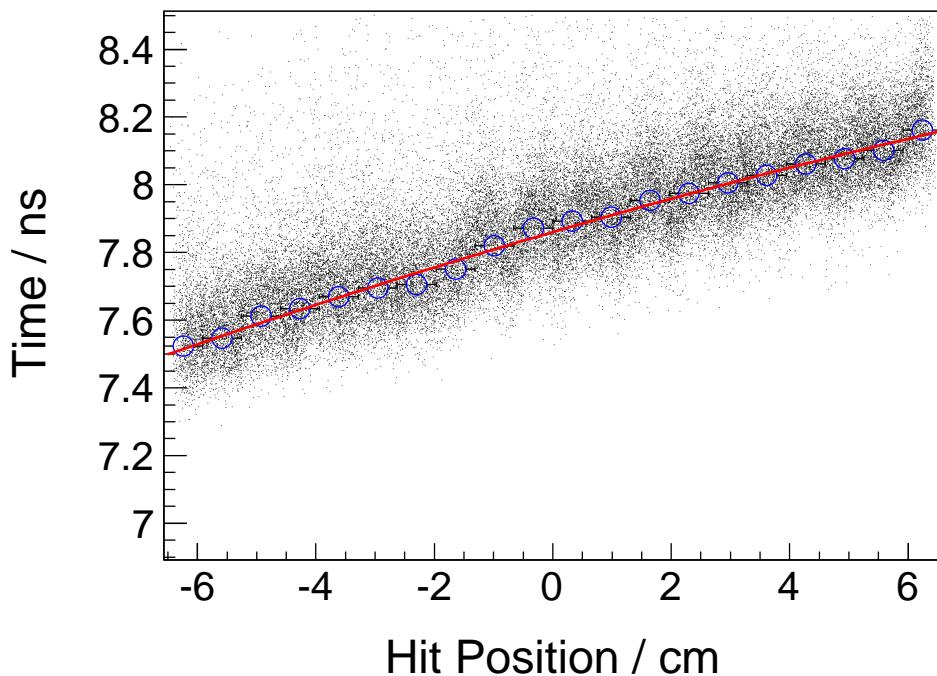


图 4.6: 对击中位置采用多项式拟合

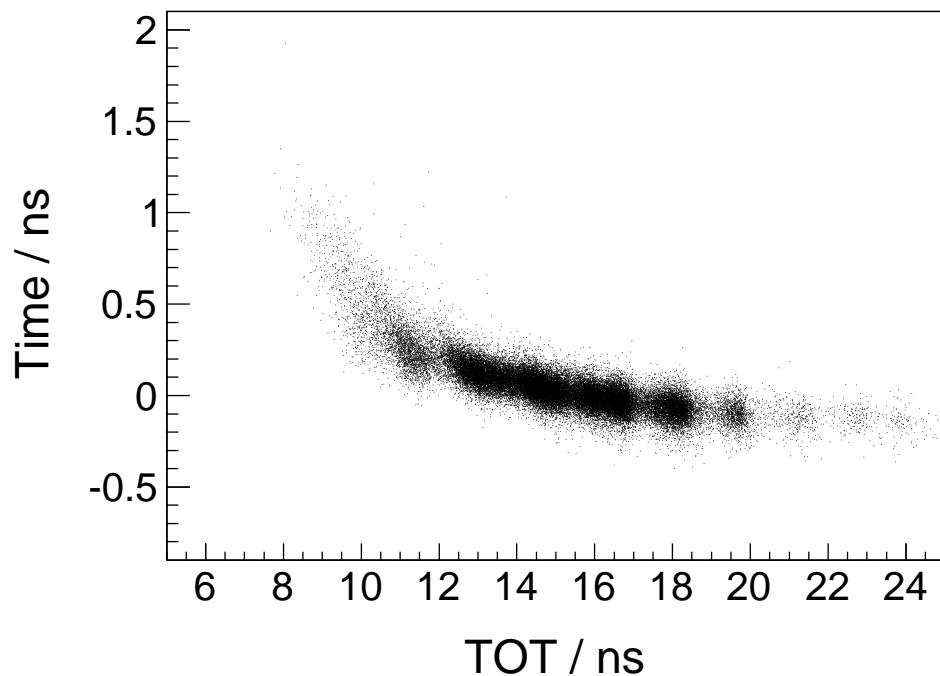


图 4.7: 击中位置修正后时间对过阈时间的分布

比较公式 4.1 , 4.2 , 4.3 , 4.4 , 4.5 , 4.6 拟合的好坏, 以及最终的时间分辨, 分辨随击中位置和过阈时间, MRPC 模块的编号, 读数条的编号等的分布, 决定哪个是时间与过阈时间关系的主项。

4.2.1 尝试各种公式

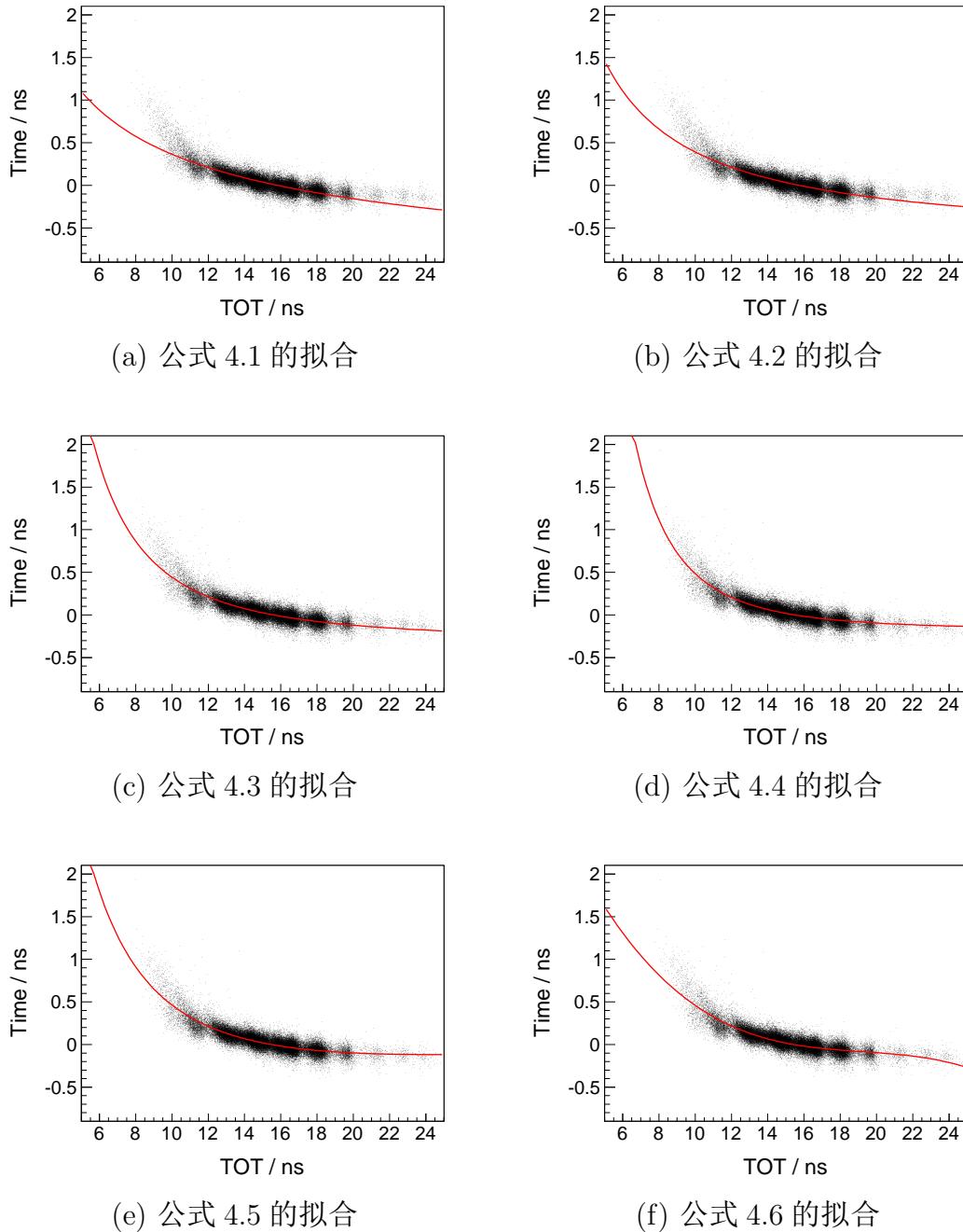


图 4.8: 几种公式对过阈时间的拟合

图 5.3 是上述几种公式拟合的结果。就这一条的拟合结果来看, 公式 4.3 , 4.4 , 4.5 , 4.6 拟合的都不错。

表 4.1 给出了这几种公式修正完成后得到的时间分辨。

表 4.1: 各类公式修正后最终的时间分辨

公式	时间分辨(ps)
$p_0 + p_1/\sqrt{q}$	65.6
$p_0 + p_1/q$	65.1
$p_0 + p_1/q^2$	63.9
$p_0 + p_1/q^3$	63.9
$p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$	63.9
$p_0 + p_1 * q + p_2 * q^2 + p_3 * q^3$	64.3

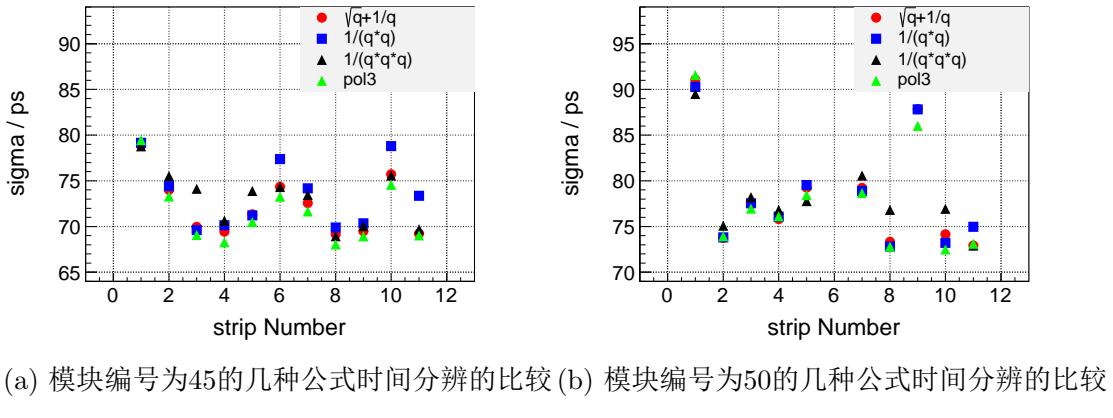


图 4.9: 几种公式修正得到的时间分辨的比较

在此研究的基础上随机选了两个模块，然后比较几种公式修正得到的时间分辨的。见图 4.9a 和图 4.9b。可以看出，除了使用多项式外，公式 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 得到的时间分辨基本是最好的。对于多项式拟合而言，在过阈时间比较大的一端拟合的并不足够好，并未真正的反映出时间随过阈时间的变化随着过阈时间的增大逐渐趋于平滑的这种趋势。

基于单条的拟合结果，以及比较多块的最终的时间分辨。重点考虑选用公式 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 为刻度过阈时间的公式。在下一章关于双端公式的介绍部分会发现这个公式对于双端的拟合也是适用的。

4.3 小结

上章利用插值方法对 MRPC 的离线数据进行刻度，这章从另一个角度构造公式入手进行刻度。对于击中位置的修正，采用分 bin，每个 bin 采用一个非对称的公式 Novosibirsk 拟合，最后对击中位置的修正采用一个三阶多项式拟合。而对于过阈时间的拟合，结合时间和过阈时间的分布关系，拟选取了几种可能能够描述这种分布关系的公式，经过比较几种公式，包括每个公式拟合的符合程度，以及随机选用两块比较这些公式的时间分辨。其中 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 是重点考虑的公式。

第五章 双端修正

上两章主要从插值方法和构造公式入手介绍了对 TOF 的 MRPC 的离线数据的刻度方法,研究的主要单端的刻度。这章将介绍双端刻度方法。BESIII 实验的 MRPC 的读数条采用双端读出,因此对应一个事例双端共有两个信号值。可以利用两端信号值的均值进行刻度。

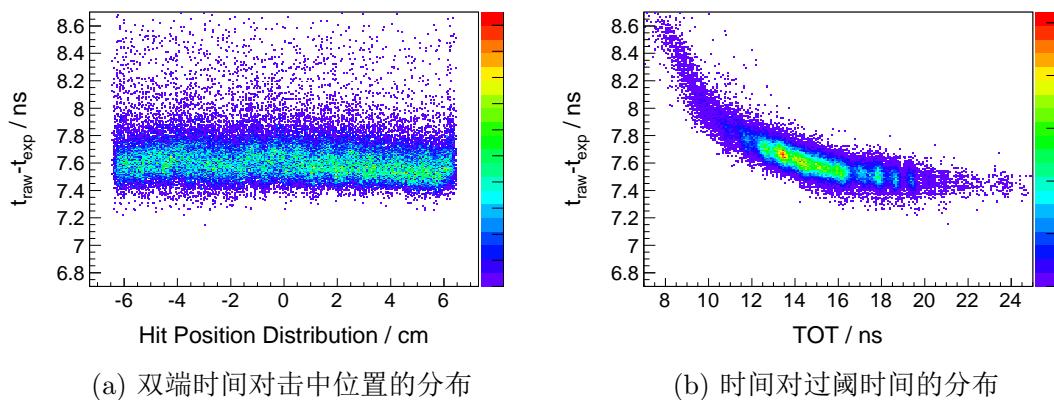


图 5.1: 双端时间对击中位置和过阈时间的分布

图 5.1 是双端的时间对击中位置和过阈时间的分布。从图中可以看出,双端的时间对击中位置的依赖很小。时间对过阈时间的依赖关系和单端修正击中位置后时间对过阈时间的分布很类似。因此对于双端修正,直接对过阈时间修正,采用和单端修正击中位置后处理时间与过阈时间的关系相同的方法。

5.1 双端插值方法

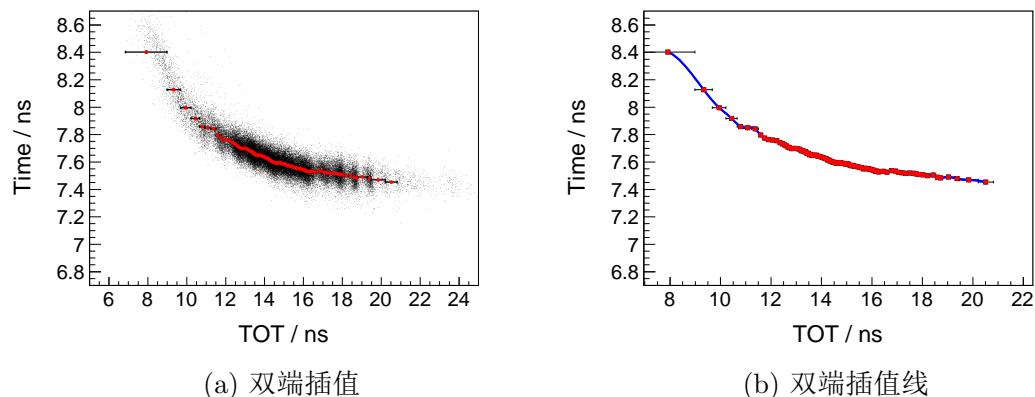


图 5.2: 双端插值方法

图 5.2a 和图 5.2b 表示的是双端的插值方法。图 5.2a 采用的是和单端处理时

间和过阈时间的一样的方法：将时间和过阈时间按过阈时间大小等事例数分成 100 份，对每个 bin 拟合得到中心值。图 5.2b 表示的是对此 100 个点采用三阶样条插值拟合得到的曲线。

5.2 双端构造公式

图 5.3 是上述几种公式拟合的结果。就这一条的拟合结果来看，公式 4.4，4.5 拟合的比较符合。

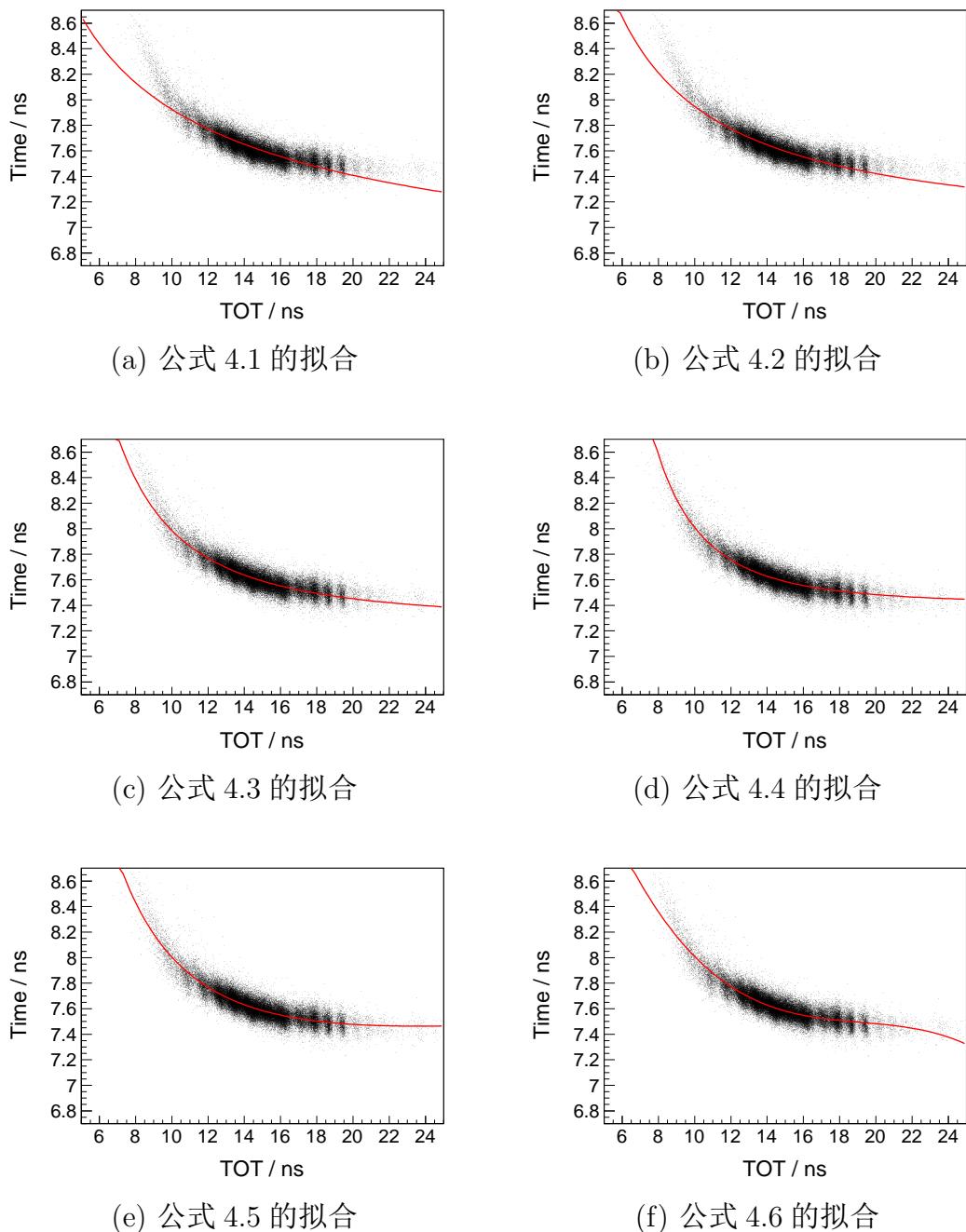


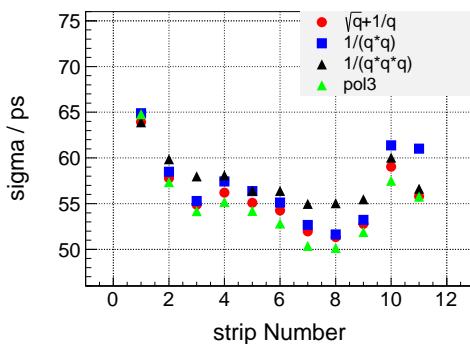
图 5.3: 几种公式对过阈时间的拟合

表 5.1 给出了这几种公式修正完成后得到的时间分辨。可以看出公式 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 的结果是最好的。

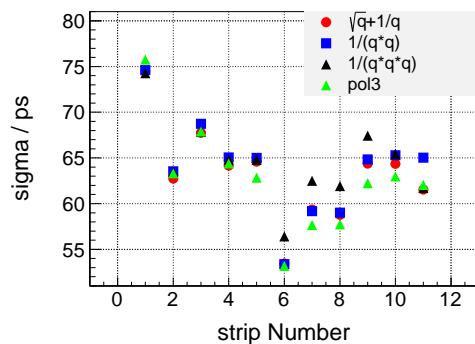
在此研究的基础上随机选了两个模块，然后比较几种公式修正得到的时间分辨的。见图 5.4a 和图 5.4b。可以看出，除了使用多项式外，公式 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 得到的时间分辨基本是最好的。

表 5.1: 各种公式修正后时间分辨

公式	时间分辨(ps)
$p_0 + p_1/\sqrt{q}$	60.1
$p_0 + p_1/q$	58.9
$p_0 + p_1/q^2$	65.9
$p_0 + p_1/q^3$	56.7
$p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$	56.4
$p_0 + p_1 * q + p_2 * q^2 + p_3 * q^3$	56.6
spline-fit	55.8

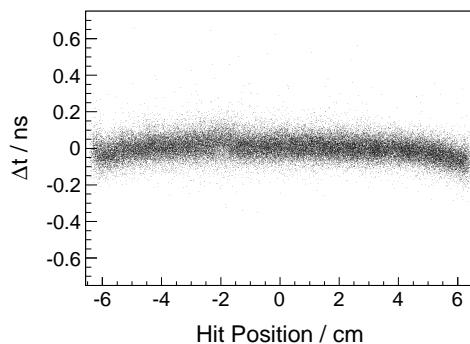


(a) 模块编号为45的几种公式时间分辨的比较

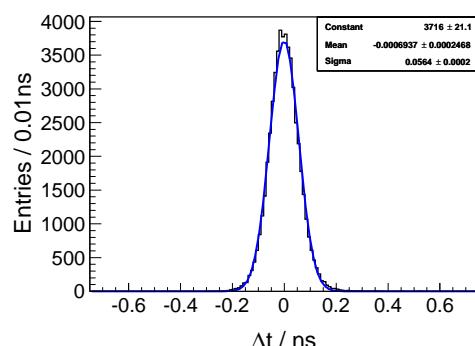


(b) 模块编号为50的几种公式时间分辨的比较

图 5.4: 几种公式修正得到的时间分辨的比较



(a) 双端修正过阈时间后时间对击中位置的分布



(b) 双端修正过阈时间后的時間分辨

图 5.5: 双端修正过阈时间后的分布

5.3 双端对击中位置的修正

图 5.5a 给出了双端时间修正过阈时间后时间对击中位置的分布，可以看出还是有一定的依赖。对此需要对击中位置进行修正。

在第二章中讲到重建流程时指出击中位置(zrhit)来自于径迹外推。在读数条边界处会有偏差。为了避开使用击中位置的信息，选择使用和它类似的信息量 $(t_{left}-t_{right})/2$ 代替它。 $t_{left}=(L+zrhit)/v+C_0$ ； $t_{right}=(L-zrhit)/v+C_1$ 两式相减除2得 $(t_{left}-t_{right})/2=zrhit/v+C_2$ 定义 $t_{sub}=(t_{left}-t_{right})/2$ 其中 L 为半个读数条长，为一常量；v 为信号在读数条内的传播速度，为常量； C_0, C_1 分别是两端的时延等信息，为常量。 $C_2=C_0-C_1$ ；综上得出 $(t_{left}-t_{right})/2$ 与击中位置成正相关。

图 5.6 是 t_{sub} 和击中位置的分布，可以看出呈线性关系。

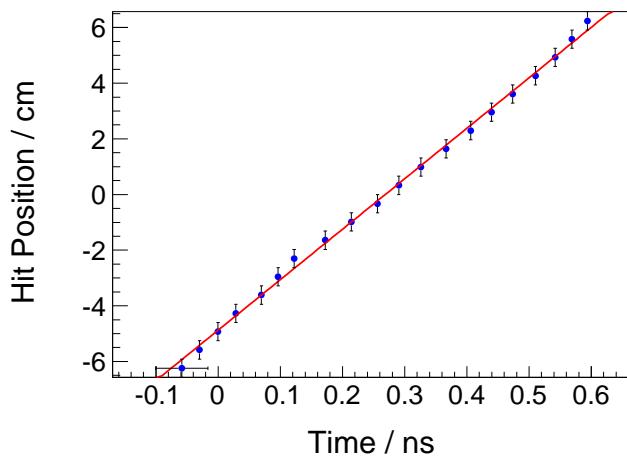


图 5.6: 击中位置与 $(t_{left}-t_{right})/2$ 的分布

基于此，可以利用 t_{sub} 信息修正击中位置。

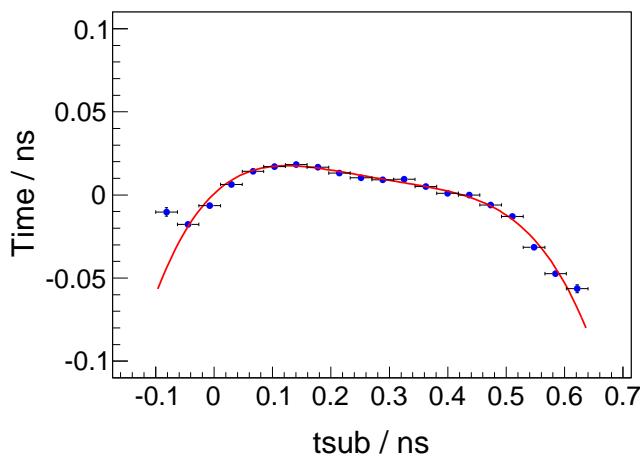


图 5.7: 对 t_{sub} 采用四阶多项式拟合

图 5.7 是时间对 t_{sub} 的分布关系，对此采用了一个四阶多项式的修正。

图 5.8 是修正 t_{sub} 前后，时间对 t_{sub} 和击中位置的分布关系。可以看出，修正过 t_{sub} 后，时间对击中位置的分布不再有明显的依赖。

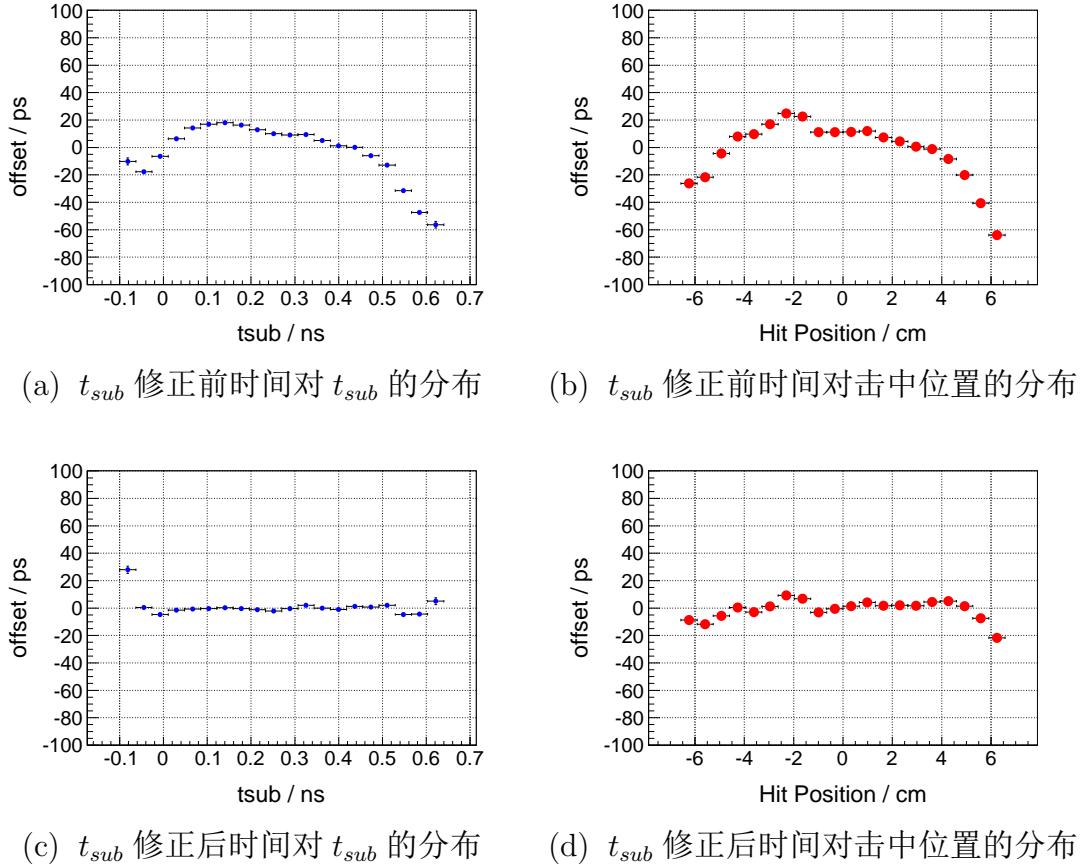


图 5.8: t_{sub} 修正前后时间对 t_{sub} 和击中位置的分布

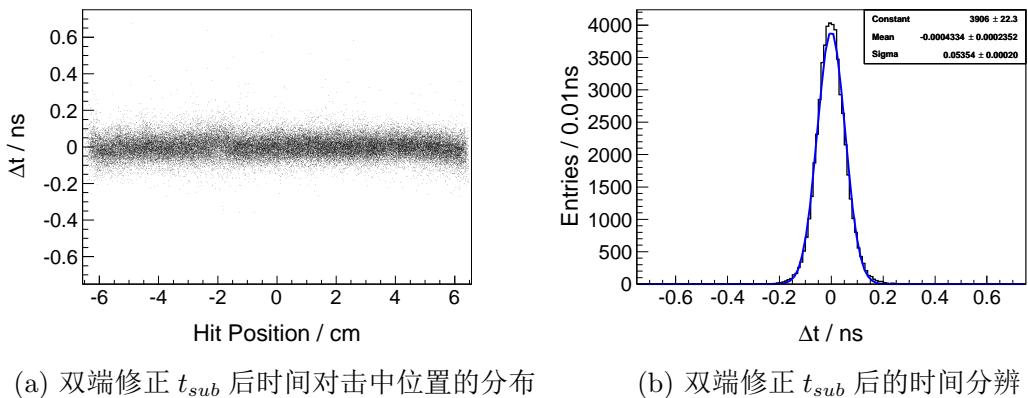


图 5.9: 双端修正 t_{sub} 后的分布

图 5.9a 是修正 t_{sub} 后时间对击中位置的分布的散点图。可以看出这时候分布关系已经基本平滑。图 5.9b 是修正 t_{sub} 后双端的时间分辨，为 53.5 ps。相应

的先对双端的过阈时间进行插值拟合修正后得到的时间分辨是 55.8 ps。插值修正过阈时间后，再对击中位置进行修正，得到的最终的时间分辨是 53.2 ps。

5.4 小结

本章介绍了双端刻度方法的研究。BESIII 实验的 MRPC-TOF 的读数条采取的是双端读出的方式,对应的一个事例在读数条两端各有信号测量值,采用两个测量值的均值进行刻度。这时的时间对击中位置的分布依赖很弱,而时间与过阈时间的分布和单端修正完击中位置后时间与过阈时间的分布类似。因此先对过阈时间进行修正,采用的是和单端对此修正一样的方法。修正完过阈时间后,发现时间对击中位置还是有些依赖的。考虑到由于边界效应,径迹外推得到的击中位置(z_{rhit})在读数条两端有偏差,而信息量 $(t_{\text{left}} - t_{\text{right}})/2$ 和击中位置之间存在线性关系。因此采用了信息量 $(t_{\text{left}} - t_{\text{right}})/2$ 对击中位置进行修正。最终得到双端的单条修正后的时间分辨为 53.5 ps。

第六章 刻度公式的适用性研究

前面的三章都是以 MRPC 的模块编号为 55，读数条的编号为 7 这一条读数条为例进行研究的。在之前的第二章介绍 BESIII 的 TOF-MRPC 的结构时，讲到现在的端盖 MRPC 有东西两部分组成，每部分 36 个模块。每个模块有 12 个读数条。共计 864 个读数条。显然，刻度公式需要对于这 864 个读数条都是适用的。这一章就是探讨刻度公式的适用性的问题。

6.1 刻度常数及刻度后的时间分辨

在第4章和第5章的研究中，对于击中位置的修正采用多项式修正；对于过阈时间的修正，进行了击中公式的比较。其中公式 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 是拟合比较的一个公式。基于此：这里选用公式如下：

单端： $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q + p_3 * zrhit + p_4 * zrhit^2 + p_5 * zrhit^3 + p_6 * zrhit^4$

双端： $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q + p_3 * t_{sub} + p_4 * t_{sub}^2 + p_5 * t_{sub}^3 + p_6 * t_{sub}^4$

其中对于单端： q 表示的是过阈时间(TOT)，zrhit 表示的是击中位置；对于双端： q 表示的是双端的过阈时间的平均值， t_{sub} 表示的是测量的初始时间差的一半，即 $t_{sub} = (t_{left} - t_{right})/2$ ， 和 zrhit 量存在线性关系，可以用来修正击中位置。

以此为刻度公式，选择 2016 年 5 月 24 日到 5 月 30 日的 Bhabha 事例为刻度样本，完成刻度工作。

97	4.31909	16.2088	-16.2994	0.0715777	0.0285677	-0.00802079	-0.00258741
98	8.10066	-14.2404	37.5313	0.0514276	-0.00328376	-0.000218375	3.92719e-05
99	8.13414	-10.6349	31.613	0.0515422	-0.0045923	-0.00012703	9.4226e-05
100	8.05608	-13.5146	37.5965	0.0509404	-0.00445748	-0.000129273	8.3961e-05
101	9.50075	-24.378	57.9143	0.0552144	-0.00204377	-0.000193041	5.32054e-06
102	7.08829	-4.74965	20.3284	0.052255	-0.000447463	-0.000135099	-3.0361e-05
103	8.10759	-14.2899	36.749	0.0553046	-0.00028172	-0.000197319	-3.45393e-05
104	7.28257	-9.03388	26.886	0.0525875	-0.000694761	-0.000137387	-1.63536e-05
105	8.31304	-12.7972	33.0986	0.0561575	-0.000714709	-0.000193258	-2.26365e-05
106	7.70727	-12.3931	33.1578	0.0532956	-0.00057618	-0.00012859	-1.6207e-05
107	8.42454	-15.7948	39.387	0.0541296	-0.000573347	-0.000144626	-1.71085e-05
108	8.23415	-15.4808	39.3123	0.0548009	-0.000314363	-0.000130858	-1.73687e-05
109	9.73998	-28.4335	66.6194	0.0338784	-0.00051816	0.000526832	-0.000349154
110	9.90188	-28.6528	66.7492	0.0543118	0.000368634	-0.000600564	-0.000113096
111	8.38887	-18.8393	47.7947	0.0513277	5.6768e-05	-0.000433406	-0.000122903
112	8.23068	-21.9918	55.1341	0.0524305	-0.000450917	-0.000293203	-0.000109578
113	8.02918	-16.4449	43.8482	0.0516713	-0.00162342	-0.000261576	-3.88296e-05
114	8.603	-22.6818	55.4723	0.0563574	-0.00055653	-0.000360815	-5.11846e-05
115	8.00903	-17.6083	47.7425	0.053455	-0.00145633	-0.000260083	-8.2212e-06
116	8.36025	-21.9685	56.1925	0.0550333	-0.000622649	-0.000168242	-2.64015e-05
117	7.73097	-16.6734	45.1625	0.0539107	-0.000887242	-0.000179361	-2.04488e-05
118	8.63496	-25.691	63.5934	0.0551935	-0.000443269	-0.00015541	-2.89774e-05
119	8.68395	-25.7743	64.2708	0.0542572	-0.000126653	-0.0001532	-2.1721e-05
120	8.06999	-17.5363	46.3991	0.054949	-0.000573802	-7.76621e-05	-4.81388e-06

图 6.1: 刻度后截取的两个模块共 24 条读数条的刻度常数

图 6.1 给出了单端刻度后的部分读数条的刻度常数。其中第一列表示的是一个行号，对应不同的读数条的编号。第二列表示的是刻度项的常数项，主要在 8-9 ns 之间，之后的两项表示的是和过阈时间相关的刻度常数。最后的四项是和击中位置相关的刻度常数，其中的第一项基本在 0.055 ns/cm 左右，基本和信号在读数条内传播的有效速度一致。

图 6.2 给出了这一周的数据刻度得到的单端和双端的整体的时间分辨。其中单端的为 67 ps，双端的为 56.6 ps。

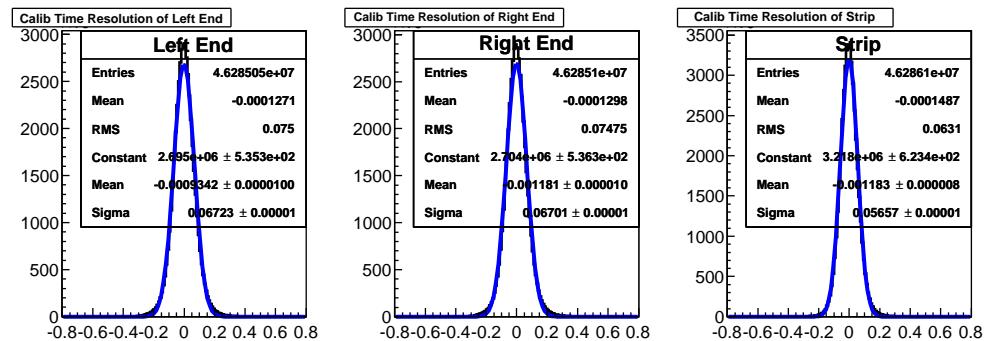


图 6.2: 最终整体的时间分辨

图 6.3 给出了刻度修正后时间对击中位置和过阈时间的分布。其中上面三幅图表示时间和击中位置的分布，分别为两个单端和一个双端；下面三幅图表表示时间对过阈时间的分布，分别对应两个单端和一个双端。

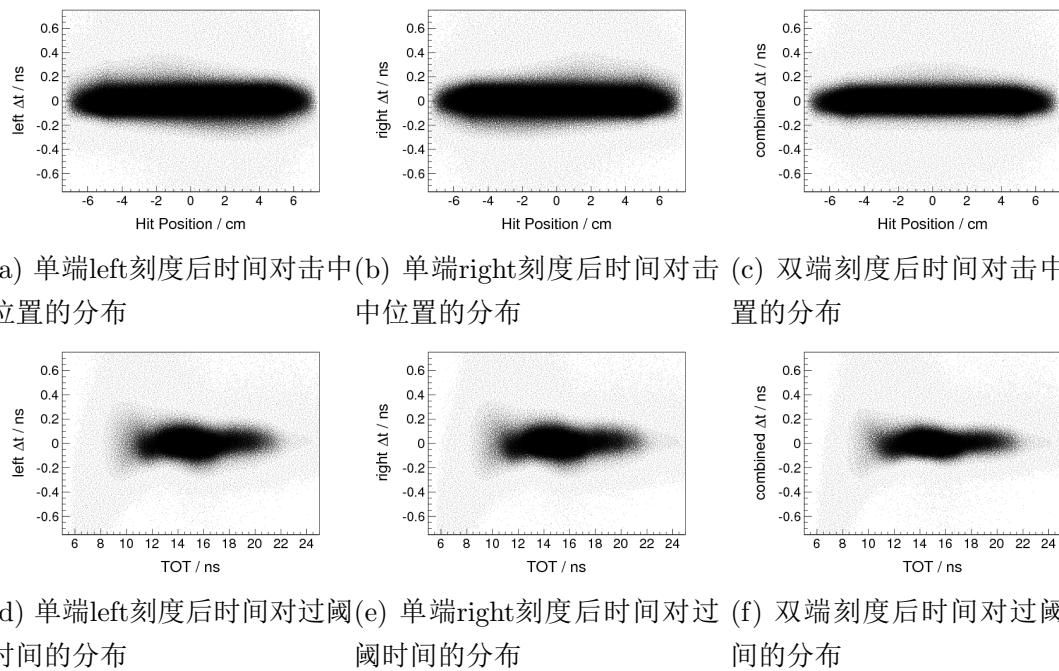


图 6.3: 刻度修正后时间对击中位置和过阈时间的分布

6.2 刻度算法的稳定性

对于 MRPC 刻度而言，一个适合的刻度算法应该能够适用所有模块和所有读数条。这一节就探讨论刻度算法的稳定性问题。

图 6.4 给出的时间刻度后时间分辨随 MRPC 模块的分布，对于每个模块最终的时间采用的是一个高斯拟合，左图是每个模块的时间采用高斯拟合的中心值分布，右图是高斯拟合得到的方差，也就是模块的时间分辨的分布；其中红色的点表示双端结果，蓝色和黑色的点表示单端的结果。时间分辨随着模块的编号分布基本稳定。

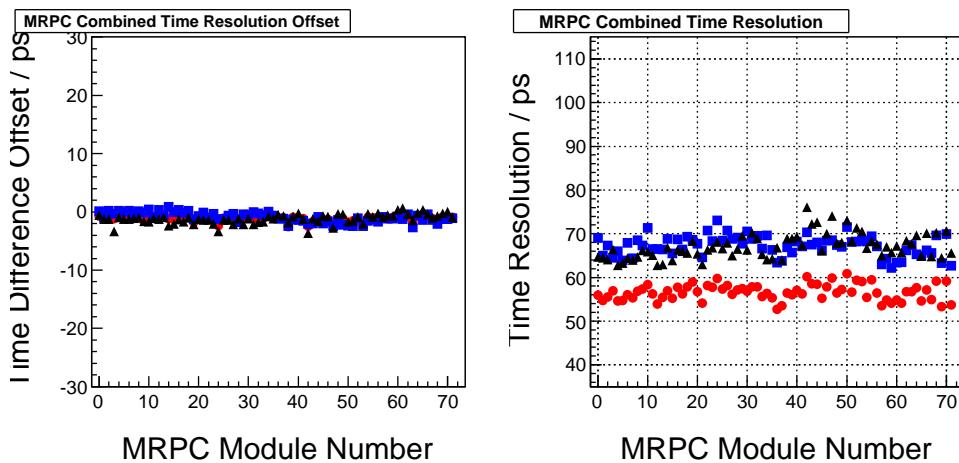


图 6.4: 时间分辨随 MRPC 模块的编号的分布

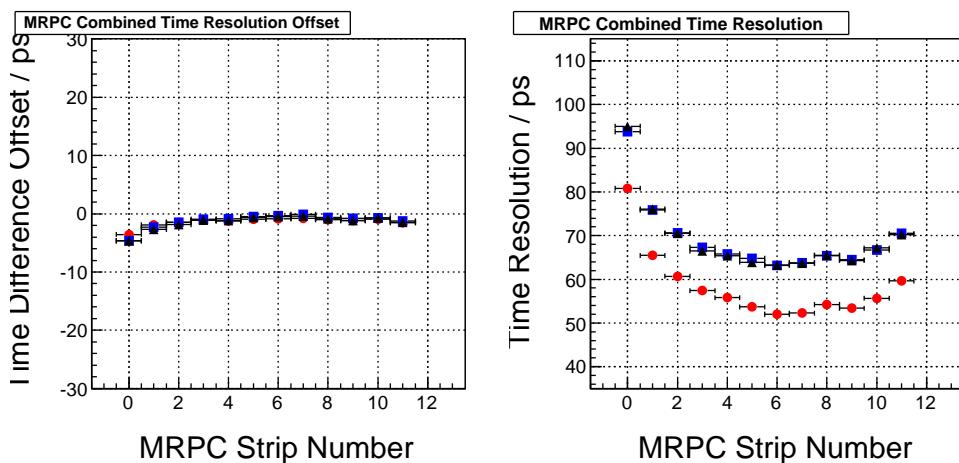


图 6.5: 时间分辨随 MRPC 读数条的编号的分布

图 6.5 给出的时间刻度后时间分辨随 MRPC 读数条的分布。对于每个读数条的最终时间采用一个高斯拟合，左图是每个读数条的时间采用高斯拟合的中心值分布，右图是高斯拟合得到的方差，也就是模块的时间分辨的分布，其中红色的点表示双端结果，蓝色和黑色的点表示单端的结果。

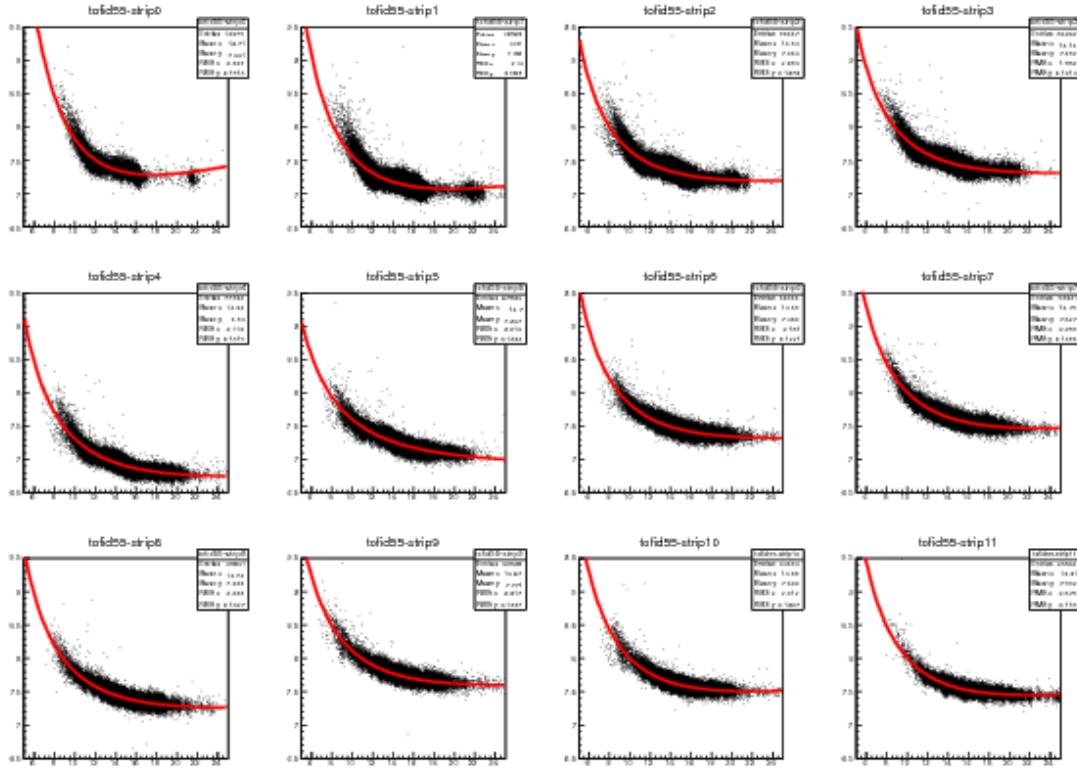


图 6.6: 模块编号为 55 的双端关于过阈时间刻度项和散点图的关系

图 6.6 给出了 MRPC 的模块编号为 55 的双端的刻度关于过阈时间项的公式和散点图的关系。可以看出，这个模块 12 个读数条符合的都比较好。说明关于过阈时间的 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 对于整个模块是适用的。

6.3 过阈时间和击中位置关联项的研究

前面研究的都是时间和过阈时间，时间和击中位置之间的关系情况。这一小节主要介绍一下关于过阈时间和击中位置关联项的研究。研究是在本章之前介绍的 7 项公式基础上添加过阈时间和击中位置关联项，然后刻度，然后比较最终得到的时间分辨，时间分辨随模块的编号的分布和时间分辨随读数条的编号的分布等。主要研究了添加 $z/\sqrt{q} + z^2/\sqrt{q}$ 和 $z/q + z^2/q$ 的最终结果。最终得到的分布和不添加这些相关项得到的分布差别不明显。说明，在 7 项公式刻度修正后过阈时间和击中位置之间的关联项的作用很弱。

表 6.1: 过阈时间和击中位置关联项对时间分辨的影响

公式	单端left时间分辨(ps)	单端right时间分辨(ps)	双端的时间分辨(ps)
7项公式	67.2	67	56.6
7项公式+ $z/\sqrt{q} + z^2/\sqrt{q}$	66.7	66.5	56.3
7项公式+ $z/q + z^2/q$	66.7	66.5	56.3

表 6.1 给出了添加关联项后时间分辨的对比情况。可以看出添加的这两种

关联项的情况对于最终的时间分辨的影响都是很小的。说明关联比较弱。至于时间随过阈时间，时间随击中位置，以及时间分辨随模块的编号，时间分辨随读数条的编号等的分布变化甚微。

6.4 小结

本章介绍了刻度公式的适用性问题。对 2016 年 5 月 24 日到 5 月 30 日这一周的 Bhabha 数据进行刻度，得到的刻度常数基本稳定，刻度得到的时间分辨随着和模块和读数条的分布基本稳定，确认选用的刻度公式是适用的。之后在此基础上对过阈时间和击中位置的关联项进行了研究，发现它们之间的关联在刻度修正之后比较弱。

第七章 离线刻度算法软件的实现

7.1 软件平台

论文第二章简要的介绍了 BESIII 实验的离线数据处理和分析系统。它的核心是 BOSS [28]软件框架，以高能物理实验通用的底层软件 GAUDI [27]作为基础，采用 C++ 作为主要程序开发语言，采用模块化，将离线数据处理和分析软件的各个部分灵活的组织起来，完成离线数据的处理任务。

作为一种面向对象的语言，C++主张一切皆对象。对面向对象的支持，让开发人员可以方便的将功能模块封装成类，并且可以对类进行派生来扩展类的功能，而不影响原有功能的实现。C++具有三大特性：封装性、继承性和多态性。[40]

- 封装性(Encapsulation)

封装，是指将具体的实现功能包装和隐藏起来，让外界无法直接访问，只能通过某些特定的方式才能访问。C++把万物都视为“对象”(Object)，任何对象都具有一定的特性和行为。C++中将其特性称为“成员变量”(Member Variable)，将其行为称为“成员函数”(Member Function)，被封装的特性只能通过特定的行为去访问。

- 继承

继承机制可以对类的功能进行扩展。具体就是利用已有的类通过继承机制定义新的类。这样新类中可以定义新的成员，同时拥有原有类的成员。C++中称已存在的用来派生新类的类为基类，或者为父类；派生出的新类为派生类，或者子类。

- 多态

通过函数和运算符的重载以及虚函数的多重定义，实现一个接口下的多种算法的多态性，具体是通过父类指针的指针或者引用来实现运行时的一个动态绑定，它不同于重载的静态绑定。这个性质在飞行时间探测器的离线数据的刻度中实现了一个接口下桶部和端盖的不同算法。

7.2 刻度算法原理

7.2.1 最小二乘法[46]

TOF的离线刻度中对刻度参数的求解采用的是最小二乘法方法。第三章中讲到TOF的离线刻度是通过比较测量时间 $t_{mea} = t_{raw} - t_0 - t_{cor}$ 和预期时间 t_{exp} 来

实现的,其中 t_{raw} 为测量的原始时间, t_0 为事例起始时间。 t_{cor} 为修正项, 是关于击中位置和过阈时间的函数, 不妨先设为一般的函数(这也是刻度工作需要找到的合适的公式)

$$t_{cor} = \sum_{i=1}^N P_i f_i(x) \quad (7.1)$$

对于每一个读出电子学通道, 每个读出单元定义:

$$\chi^2(readout_channel, readout) = \sum_{event} (t_{mea} - t_{exp})^2 = \sum_{event} (t_{raw} - t_0 - t_{exp} - t_{cor})^2 \quad (7.2)$$

这里设

$$t_{raw} - t_0 - t_{exp} = y \quad (7.3)$$

通过分析大量的事例样本, 利用最小 χ^2 方法, 刻度常数项可以通过 $\partial\chi^2/\partial P_i = 0$ 得到。具体为求解方程组

$$\sum_{j=1}^N \sum_{event} (y - \sum_{i=1}^N P_i f_i(x)) f_j(x) = 0 \quad (7.4)$$

7.2.2 BOSS软件框架下刻度系数的求解

由公式 7.5 得出

$$\sum_{j=1}^N \sum_{event} y f_j(x) = \sum_{j=1}^N \sum_{event} \sum_{i=1}^N P_i f_i(x) f_j(x) \quad (7.5)$$

在BOSS软件框架下, TOF刻度流程的设计思想如论文[41]中所述。刻度参数求解的做法是: 定义了一个矩阵

$$F_{[i][j]} = \sum_{event} f_i(x) f_j(x) \quad (7.6)$$

一个N维向量

$$Y_{[i]} = \sum_{event} f_i(x) y \quad (7.7)$$

定义X为待求参数的矢量 $X = (p_1, p_2 \dots p_N)^T$

对应的关系为矩阵方程: $F \times X = Y$, 求解问题转化为求解一个 $N \times N$ 的矩阵F和一个向量Y。对于一个确定形式的函数, 矩阵F和向量Y可以通过对所有的事例遍历叠加求出, 继而可以利用矩阵方程求解出刻度参数。

7.3 软件实现

7.3.1 算法的软件框架和数据类型的定义

参考已有的桶部和端盖闪烁体飞行时间探测器的离线刻度流程的软件框架, 结合现在的 MRPC 离线数据的自身的特性, 目前MRPC飞行时间探测器刻度采

用的是统一的框架。对于一些接口，利用C++的多态性，采用虚函数的多重定义实现了不同的功能。现在的软件框架可以同时实现离线数据重建和刻度，也可以将重建和刻度功能分开实现。同样的，刻度软件，支持实现桶部和端盖同时刻度，或者单独刻度的功能。

刻度的算法框架采用的是如下的刻度算法：

```
#include "GaudiKernel/Algorithm.h"
#include "GaudiKernel/NTuple.h"
class tofcalgsec:public Algorithm {
public:
    tofcalgsec(const std::string& name, ISvcLocator* pSvcLocator);
    //构造公式，第一个参数指定刻度算法的名字，第二个参数用来索引
    该参数
    ~tofcalgsec(); //析构函数
    StatusCode initialize(); //初始化算法
    StatusCode beginRun(); //算法开始
    StatusCode execute(); //算法的执行过程，处理事例循环
    StatusCode endRun(); //算法结束
    StatusCode finalize(); //算法末尾的处理
};
```

其中initialize(), beginRun(), execute(), endRun()过程实现离线数据重建的功能，finalize()函数实现离线数据的刻度功能。

数据的重建和刻度采用的是统一的数据类型接口。具体的定义了三个数据类型：结构体类型rootRecord，两个类类型Record，TofDataSet。结构体类型rootRecord定义了一个事例的诸如原始的时间和过阈时间的信息，以及外推得到的击中位置信息zrhit，预期飞行时间 t_{exp} ，事例起始时间 t_0 等信息，这些信息定义成double型，同时定义了一些用于记录事例编号的int型数据，具体为run号，事例数号，模块号，读数条编号，读出端编号等。类Record用来保存一个事例的所有数据信息。typedef std::vector<Record*> RecordSet语句定义了类型RecordSet为一组Record类型。类TofDataSet保存一组的RecordSet数据类型，同时定义了最终保存的root文件的格式。对数据格式的定义的统一保证了离线数据重建和刻度生成的数据格式的统一。

7.3.2 参数求解的具体实现

整个刻度流程采用的是模块化的结构，对桶部和端盖采用统一的数据定义模式。定义了类TofCalibManager，其中的成员函数addCalib用于定义添加需要刻度的内容，诸如桶部的时间刻度，端盖MRPC的时间刻度，桶部的有效速度刻度，MRPC的束团的刻度等。成员函数doCalibration用于完成刻度中的计

算。关于类TofCalibManager的部分声明如下：

```
class TofCalibManager{
    ...
    void addCalib( TofCalib* cal_item1, int isbarrel );
    void addCalib( TofCalibFit* cal_item2, bool isbarrel ); //添加要刻度的项
    void doCalibration(); //
};

doCalibration函数中关于MRPC刻度的过程如下
void TofCalibManager::doCalibration() {
    for( unsigned int i=0; i<NEtf*NStrip; i++ ) {
        RecordSet* etfData = m_dataset->getEtfData(i);
        if( !calib_etf_item.empty() ) {
            std::vector<TofCalib*>::iterator iter1 = calib_etf_item.begin();
            for( ; iter1!=calib_etf_item.end(); iter1++ ) {
                (*iter1)->calculate( etfData, i );//计算矩阵F和矢量Y，然后求得参数
            }
        }
    }
}
```

类TofCalib定义了函数calculate可以用来求得刻度得到的刻度参数，关于矩阵F和矢量Y的计算的实现就是在此过程完成的；函数updateData用于完成刻度修正后的数据更新。类TofCalib的部分声明如下

```
#include "tofcalgsec/TofDataSet.h"
#include "CLHEP/Matrix/Matrix.h"
#include "CLHEP/Matrix/Vector.h"
class TofCalib{
public:
    TofCalib( const int npar ):Npar(npar) { //量npar表示刻度公式的项数
        F = HepMatrix(Npar,Npar,0);
        Y = HepVector(Npar,0);
        X = HepVector(Npar,0);
        funcs = HepVector(Npar,0);
    }
public:
```

```
virtual void calculate( RecordSet*& data, unsigned int icounter ); //求刻度参数
```

```
virtual void updateData( RecordSet*& data ) = 0; //刻度后更新数据
protected:
```

```
virtual void calculate_funcs(const Record* r) = 0; //对于给定的事例，计算公式各项的值，可重载
```

```
virtual void calculate_y(const Record* r) = 0; //对于给定的事例，计算y的值，可重载
```

```
protected:
```

```
HepMatrix F; //N×N矩阵
```

```
HepVector X; //需要求得的参数
```

```
HepVector Y; //N维矢量
```

```
HepVector funcs; //函数
```

```
};
```

具体的矩阵和参数的求解过程都在函数calculate中实现。对于矩阵F和矢量Y采用的是逐事例遍历叠加得到。具体实现如下：

```
void TofCalib::calculate( RecordSet*& data, unsigned int icounter ) {
    std::vector<Record*>::iterator iter = data->begin();
    for( ; iter!=data->end(); iter++ ) {
        calculate_funcs( (*iter) );
        for( int i=0; i<F.num_col(); i++ ) {
            for( int j=0; j<F.num_col(); j++ ) {
                F[i][j] += funcs[i]*funcs[j]; //遍历事例，并叠加到矩阵F上
            }
        }
        calculate_y( (*iter) );
        for( int k=0; k<Y.num_row(); k++ ) {
            Y[k] += y*funcs[k]; //遍历事例，求矢量Y
        }
        X = (qr_solve(F,Y));
    }
}
```

函数calculate_funcs, calculate_y都定位为虚函数，便于对于不同的刻度内容重载出不同的刻度公式。

以MRPC双端刻度为例，介绍如何构造公式并利用上述基类重载出新的类

```
#include "tofcalgsec/TofCalib.h"
```

```
const int nEtfCombine = 7; //表示刻度公式参数的数目
```

```
class calib_etf_combine:public TofCalib {
```

```

public:
    calib_etf_combine():TofCalib( nEtfCombine ) { //函数参数是刻度公式的
参数的数目
        m_name = string("calib_etf_combine");
    }
    void calculate_funcs( const Record* r ) { //取出用于计算各个函数量的数据
        double q = ( r->qleft() + r->qright() )/2.0; //其中q取值是两端过阈时间的平均值
        double z = (r->tleft() - r->tright() )/2.0; //z取值是两端时间差的一半
        if( q<0.0 ) {
            for( int i=0; i<nEtfCombine; i++ ) {
                funcs[i] = 1.0;
            }
        }
        else {
            funcs[0] = 1.0;//刻度公式的各个项，这也是刻度需要寻找的公式项
            funcs[1] = 1.0/sqrt(q);
            funcs[2] = 1.0/q;
            funcs[3] = z;
            funcs[4] = z*z;
            funcs[5] = z*z*z;
            funcs[6] = z*z*z*z;
        }
        return;
    }
    void calculate_y(const Record* r) {
        y = ( r->tleft() + r->tright() )/2.0 - r->texp();//取出用于计算y值的数据，这里选取的是两端时间的均值减去预期时间
        return;
    }
    void updateData( RecordSet*& data ) {//用于更新刻度修正后的数据
        if( data->size() > 0 ) {
            std::vector<Record*>::iterator iter = data->begin();
            for( ; iter!=data->end(); iter++ ) {
                calculate_funcs( (*iter) );
                double tcorr = 0.0;

```

```

        for( int i=0; i<X.num_row(); i++ ) {
            tcorr += X[i]*funcs[i];
        }
        (*iter)->setT0( ( (*iter)->tleft() + (*iter)->tright() )/2.0 - tcorr -
(*iter)->texp() );
    }
}
return;
}
};


```

整个软件框架采用统一定义的数据类型，对于桶部闪烁体探测器和端盖MRPC飞行时间探测器的时间刻度采用统一的类结构和成员函数。利用C++的模块化和多态性，关于不同的刻度内容的区别在于一些具体过程的实现有所不同。整个软件框架运行稳定，具有很强的扩展性，可以方便的添加其它的刻度内容，只需要派生出一个具体的派生类即可，不需要对框架的整体做大的修改。关于刻度公式，在未来的研究中如果有其它更好的公式形式，也只需要将对应的头文件中的刻度公式的数目和刻度公式的具体形式做出修正，对于框架整体不需要做调整。

7.4 结果

在root环境下，利用研究得到的刻度公式对相应的头文件做出修改，生成刻度软件的测试版本，采用2015年5月24日到30日这一周的离线真实数据，选用Bhabha事例为刻度样本进行刻度。并采用编写好的检查脚本对刻度得到的诸如刻度参数的稳定性，以及刻度结果得到的时间分辨的稳定性进行分析，具体讨论在第六章刻度公式的适用性的研究中。结果表示研究的刻度公式稳定性良好。软件运行正常。鉴于BESIII实验中原始数据的本底情况对于不同的取数日期有很大的差别，新的刻度公式和新的刻度算法的软件版本需要在以后的日常刻度工作中更加完善。

7.5 总结

本章节首先介绍了MRPC离线数据刻度软件的原理。求解刻度公式中刻度项的参数采用的是最小二乘法的原理。在软件中具体的做法是将刻度参数的求解转化为对矩阵方程： $F \times X = Y$ 的求解上。对于一个确定形式的函数，矩阵F和向量Y可以通过对所有的事例遍历叠加求出，然后利用矩阵方程可以求出刻度参数X。接下来介绍了求解刻度参数的软件构架。对于刻度和重建采用统一的数据类型，利用C++的封装和多态性，将不同刻度内容的具体实现封装起来，对用户而言，采用相同的接口，在对刻度公式的研究中只需要对程序的部分头

文件进行一定的修改即可。利用软件测试版本对离线数据进行刻度，得到的刻度参数和时间分辨随不同模块具有较高的稳定性，软件对于 MRPC 不同模块的刻度显示出良好的稳定性。

第八章 总结

本论文介绍了北京谱仪 MRPC 端盖飞行时间探测器刻度方法的研究。利用 2016 年 5 月 24 日到 5 月 30 日的北京正负电子对撞机对撞获取的 Bhabha 事例真实数据为刻度样本，分别利用样条插值方法和构造公式两种方法，对新的 MRPC 端盖 TOF 的离线数据刻度方法进行研究。

论文首先介绍了现在的 BESIII 探测器。在 BESIII 实验中参与粒子鉴别的 是主漂移室和飞行时间探测器，主漂移室通过测量电离能损来提供 dE/dx 信息，飞行时间探测器测量带电粒子的飞行时间信息。粒子的鉴别能力由相同动量的不同种类的带电粒子的飞行时间差和飞行时间探测器自身的时间分辨决定。原来的端盖飞行时间探测采用的是单层的塑料闪烁体，对于 π 介子的时间分辨是 138 ps，已经达不到 BESIII 实验高精度测量的要求。MRPC 探测器具有时间分辨小，造价低廉等优点，可以用来作为新型的飞行时间探测器。2015 年夏季 BESIII 的端盖飞行时间探测器完成了硬件的升级改造，由原来的闪烁体换成了 MRPC，并且参与 2015-2016 年度运行取数。研究新的 MRPC 端盖飞行时间探测器的刻度方法，开发相应的刻度软件，刻度消除带电粒子在读数条内的传播时间和过阈时间的晃动问题，得到好的时间分辨，对于粒子鉴别和物理分析具有重要意义。利用真实数据刻度样本，对信号在读数条的传播时间，以及过阈时间等对时间分辨影响最为敏感的问题开展了研究。对于在读数条的传播时间问题，相对简单，采用多项式拟合即可完成。而对于过阈时间的修正问题，相对复杂，这也是本文研究的重点和难点。

STAR 实验采用的是样条插值方法。做法是先对事例起始时间修正，之后先对过阈时间修正，然后对击中位置修正。其中对过阈时间和击中位置采用两次修正的迭代方法，最终扣除事例起始时间后的时间分辨是 75 ps。ALICE 的实验采用的是多项式拟合的方法，扣除事例起始时间后的时间分辨是 80 ps。

在本文的第三章讨论了插值方法在 BESIII 实验 MRPC 离线数据刻度中的应用。经过对过阈时间和击中位置修正先后顺序的研究。发现在 BESIII 实验上采用先对击中位置进行修正，然后对过阈时间采用样条插值得到的时间分辨好。具体做法是先对击中位置进行修正，这样时间和过阈时间的依赖减弱，然后在此基础上对过阈时间插值拟合，得到模块编号是 55，读数条编号是 7 这一条单端最终的时间分辨是 64 ps。第四章介绍了公式在离线数据刻度中的应用，依然采用先对击中位置进行刻度，然后对过阈时间采用公式拟合，选用了几种公式进行拟合，并比较拟合修正后得到的时间分辨和时间对击中位置，过阈时间等的分布，其中 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 是重点考虑的公式，这时候这一条单端的时间分辨是 63.9 ps。在第五章中介绍了双端刻度的方法。由于 MRPC 端盖飞行时

间探测器采用双端读出，对应的一个事例在双端各有一个原始时间信号和过阈时间信号。通过分析两端信号的均值，进行刻度修正，先对过阈时间进行修正，和单端的方法类似。修正过阈时间后，时间对击中位置还有一些依赖。考虑击中位置信息来自径迹外推，而径迹外推在读数条两端的边界处有很大误差。而两端时间差是和击中位置呈线性关系的量。因此采用两端时间差对击中位置进行修正，最终得到的双端的时间分辨是 $p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q$ 公式是 53.5 ps，插值方法是 53.2 ps。

在论文的第六章对刻度公式的适用性问题进行了分析，MRPC 共有 72 块，每块有 12 个读数条，共有 864 个读数条，刻度公式需要具有一定的适用性。选用如下公式：

$$\text{单端: } p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q + p_3 * \text{zrhit} + p_4 * \text{zrhit}^2 + p_5 * \text{zrhit}^3 + p_6 * \text{zrhit}^4$$

$$\text{双端: } p_0 + p_1/\sqrt{q} + p_2/q + p_3 * t_{sub} + p_4 * t_{sub}^2 + p_5 * t_{sub}^3 + p_6 * t_{sub}^4$$

其中对于单端： q 表示的是过阈时间(TOT), zrhit 表示的是击中位置；对于双端： q 表示的是双端的过阈时间的平均值， t_{sub} 表示的是测量的初始时间差的一半，即 $t_{sub}=(t_{left}-t_{right})/2$ ，与 zrhit 量存在线性关系，可以用来修正击中位置。经过整体刻度，得到一组刻度常数，发现刻度常数是稳定的。查看了时间分辨随模块编号和读数条的编号基本是稳定的。整体 864 条读数条的单端时间分辨是 67 ps，双端是 56.6 ps。之后研究了过阈时间和击中位置关联项在刻度公式中的影响，发现关联很弱，几乎可以忽略。

论文最后对TOF的离线刻度软件进行了介绍。刻度软件基于BESIII实验的BOSS软件框架，利用面向对象的程序设计思想，主要采用C++语言开发完成。TOF的离线刻度算法基于最小二乘法原理，相应的刻度参数的求解可以转化为对矩阵方程： $F \times X = Y$ 中 $N \times N$ 的矩阵 F 和 N 维向量 Y 的求解。在软件设计中充分利用C++语言的封装，继承和多态等性质。关于 run 号，事例数号，模块号，读数条编号，读出端编号等数据类型的定义，刻度和重建流程采用统一的数据定义格式。软件中求解矩阵 F 和 向量 Y 的成员函数采用虚函数的定义方式，设计成为一个统一的接口，对于桶部和端盖，以及其他不同的刻度内容，可以很容易的重载出不同形式的算法，实现了一个接口下，对应不同刻度内容具有不同刻度算法的功能。软件兼具良好稳定性的同时，具有好的可扩展性，可以方便的利用继承机制添加其它的刻度内容项，而不会影响软件现有的功能。利用软件测试版本对离线数据进行刻度，刻度常数和时间分辨随读数条，模块数稳定性良好。刻度公式和刻度算法软件的健壮性需要在今后的工作中更加的完善。

论文研究得到了离线刻度算法，完成了相关的软件开发，将优秀的探测器设计指标转化为物理分析中优秀的粒子鉴别能力，将会对BESIII实验获得高精度的测量结果产生积极的促进作用。

参考文献

- [1] G. Aad. et al. (ATLAS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:1–29, 2012.
- [2] S. Chatrchyan. et al. (CMS Collaboration). *Phys.Lett.B*, 716:30–61, 2012.
- [3] 吕才典. 粒子物理学. 讲义, 中科院高能所, 2014.
- [4] 章乃森. 粒子物理学[M]. 北京科学出版社, 北京, 1968.
- [5] 杜东生, 杨茂志. 粒子物理导论. 北京科学出版社, 2014.
- [6] S. Weinberg.. A Model of Leptons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 19, 1967.
- [7] 唐孝威主编. 粒子物理实验方法. 高等教育出版社, 1982.
- [8] 徐克尊等编. 粒子探测技术. 上海科学技术出版社, 1981.
- [9] 谢一冈等主编. 粒子探测器与数据获取. 科学出版社, 2003.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 中国科学院高能物理研究所. BEPCII初步设计报告. 2003.
- [13] 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.
- [14] M.Ablilim. et al. (BESIII Collaboration). *Phys.Rev.Lett*, 110:252001, 2013.
- [15] 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.
- [16] M.Ablikim. et al. Design and Construction of the BESIII Detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 614:345–399, 2010.
- [17] Yuan C Z. et al. 高能物理与核物理, 24(12):1201, 2002.
- [18] Wang Y F. Chao K T et al. physics at BESIII. *Int. J. Mod. Phys., A* 24(1), 2009.
- [19] 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.

- [20] 阮丽娟等. TOFr在STAR实验中的标定. *高能物理与核物理*, 29, 2005.
- [21] jian wu. et al. The performance of the TOFr tray in STAR. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 538:243–248, 2005.
- [22] Yi Wang. et al. Production and quality control of STAR-TOF MRPC. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 613:200–206, 2010.
- [23] A. Alici. Status and performance of the ALICE MRPC-based Time-Of-Flight detector. *Jinst*, 7, 2012.
- [24] 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.
- [25] ZHAO Chuan. et al. Time calibration for the end cap TOF system of BESIII. *Chinese Physics C*, 35(1):72–78, Jan., 2011.
- [26] 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.
- [27] Barrand G. et al. Proceeding of CHEP2000. February 6-12,2000.
- [28] Liu H M. Li W D et al. Proceeding of CHEP06. February 13-17,2006.
- [29] root. <http://root.cern.ch/>.
- [30] cern. <http://cernlib.web.cern.ch/cernlib/>.
- [31] 张晓梅等. . 核电子学与探测技术, 25(6):638, 2005.
- [32] 马想等. . 核电子学与探测技术, 27(4):670, 2007.
- [33] Ma Xiang. et al. Determination of event start time at BESIII. *Chinese Physics C.*, 32(9), Sep., 2008.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.

- [37] Ming Shao. et al. Upgrade of the calibration procedure for a STAR time-of-flight detector with new electronics. *IOP science.*, 20:025102, 2009.
- [38] BIAN jian Ming. et al. Abosolute photon energy calibration for the BESIII EMC. *Chinese Physics C*, 34:72–77, 2010.
- [39] Bauer A J M. BaBar Note 521. 2000.
- [40] 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.
- [41] 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论文, 2007.
- [42] 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.
- [43] M. Ullrich. et al. Implementation of a Multigap-Resistive Plate-Chamber as Time of Flight Detector into the BOSS Framework. April 6,2014.
- [44] A. Akindinov. et al. Performance of the ALICE Time-Of-Flight detector at the LHC. *Eur. Phys. J. Plus*, 128, 2013.
- [45] K.L.He. Status and Plan for Analysis and Tools software. *BESIII Collaboration Meeting*, 2007.
- [46] 朱永生. 实验物理中的概率和统计. 科学出版社, 2006.

简 历

基本情况

郭迎晓，男，河南省新乡市人，1991 年 5 月出生，未婚，中国科学院高能物理研究所在读硕士研究生。

教育状况

2010 年 9 月至 2014 年 6 月，湘潭大学，本科，专业：物理学。

2014 年 9 月至 2017 年 7 月，中国科学院高能物理研究所，硕士，专业：计算机技术。

工作经历

无。

研究兴趣

TOF刻度。

联系方式

通讯地址：北京市石景山区玉泉路 19 号乙中国科学院高能物理研究所

邮编：100049

E-mail: guoyingxiao@ihep.ac.cn

致 谢

三年光景，不过弹指一挥间。前些日子的一个下午在主楼看到那些在四楼大厅焦急等待硕士复试结果的一群学生。不禁回想起自己3年前来所里复试的情景。那时候自己不也和他们一样渴望进入高能所，对未来满怀憧憬。如今，自己也已经完成了自己硕士期间的课题。在此，要对那些曾经在成长路上帮助过我的那些人表示感谢。

首先，需要感谢的是我的导师孙胜森老师。记得和孙老师第一次见面时，他就说年轻人要目标长远，理想远大。孙老师学识渊博，对BESIII探测器软件部分很是了解，更是TOF探测器方面的专家。刚入所时，我对TOF探测器的硬件以及软件都不甚了解，程序也看不懂。在孙老师的帮助下和一次次耐心的讲解下，对BESIII实验的软件有了比较全面的了解，熟悉了TOF探测器的刻度和重建的流程，也能够自己编写一些程序脚本对数据进行处理和检查。在之后对MRPC数据离线刻度方法的研究中更是每次遇到困难都能得到孙老师好的指导和建议。而且孙老师指导学生认真负责，每此的考核报告，都从内容，逻辑，格式，用词等方面对我提出意见。除了在学术上对我的帮助外，孙老师还经常和我聊一些科研工作外的话题，教我一些科研外的东西。临近毕业，我有些迷茫，也对自己有些不满，孙老师也给予了我很大的鼓励和安慰。

然后需要感谢一下林韬师兄。林韬师兄在计算机方面知之甚多，而且很是热心肠。在B406办公室，我和他是邻桌，刚入室的时候，我对编程可谓一窍不通，这个时候林韬时候就经常主动帮助我，教我怎么写结构体和类，教我如何编译。让我慢慢的能够自己写代码，并对程序的运行等等都有了一些了解。他还经常推荐我一些网站和教我一些软件和工具，像github，有道云笔记，IHEPBox等都是他介绍给我并教我如何使用的。我的这些论文的latex模板也是他提供给我的。这里我之所以单独感谢一下林韬师兄是因为大多数情况下，都是他主动帮助我的。这是一个人最难能可贵的品质。

感谢戴忠、于庆洋、董伟伟、付颖、张其安、魏占辰、邴丰、杨佼汪、黎炎等等同学，在怀柔一起去上课，一起去图书馆自习，一起在操场打牌，一起吃串喝酒等等，总之在怀柔有你们这帮同学的陪伴，我有了一个丰富多彩的学习生活。

感谢教育处的保增宽老师，李苏敏老师，陈红珍老师，柯笑晗老师。来所里复试时接待的是你们，感谢你们在包括入学，考核，各类档案以及论文提交等手续给予的帮助。在我打印成绩单需要所里出具证明的时候，在我学生证需要注册的时候，在我对毕业论文的事情有些不清楚询问的时候，每位老师总是很热情。

感谢B406办公室的安芬芬、李新颖、王洪鑫、张坤、周明、方肖、王蒙、肖言佳，马明明、杨荣兴、黄震、张晋、付婷婷、苗楠楠、陆佳达等在学习和生活上对我的帮助和照顾。

感谢父母、弟弟对我学业上的支持。我体质原因，容易上火，每次你们电话都是让我多注意休息，多吃水果。很感谢父母在外打拼，努力赚钱，让我不至于为了家里的生计担忧，能够静下心来好好学习，安心科研。感谢父母在我每次心情不爽的时候可以安慰我，鼓励我。感谢弟弟和他女朋友在16年元旦来看我，给我带礼物，并能够在节假日或者北京天气有变化的时候给我打电话，发短信。你们永远是我最坚强的后盾。