



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

博士学位论文

在 ATLAS 实验上寻找超出标准模型希格斯粒子

作者姓名: 周茂森

指导教师: 方亚泉 研究员 中国科学院高能物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 粒子物理与原子核物理

培养单位: 中国科学院高能物理研究所

2019 年 6 月

Search for the BSM Higgs boson with the ATLAS detector at LHC

A thesis submitted to the
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Particle Physics and Nuclear Physics
By
Zhou Maosen
Supervisor: Professor Fang Yaquan

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

June, 2019

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对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或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

关键词：ATLAS, 超出标准模型希格斯粒子, ITk

Abstract

Keywords: ATLAS, BSM Higgs, ITk

目 录

第一部分 粒子物理实验理论	1
第 1 章 一些准备	3
第 2 章 希格斯唯象学	5
2.1 希格斯场	5
2.2 单希格斯粒子产生模式	5
2.3 标准模型希格斯对产生	9
2.4 超出标准模型希格斯对产生	11
2.5 希格斯对衰变	12
第 3 章 大型强子对撞机	15
3.1 质子加速过程	16
3.2 LHC 重要参数	16
第 4 章 ATLAS 探测器	19
4.1 坐标系统	19
4.2 内部径迹探测器	19
4.3 量能器	21
4.4 μ 子光谱仪	22
4.5 触发和数据采集系统	24
第 5 章 事例重建	27
5.1 径迹和能量簇射	27
5.2 电子	28
5.3 μ 子	31
5.4 喷注	33
5.5 τ_{had}	33
5.6 丢失横动量	34
第 6 章 事例仿真	35
第二部分 hh/SS 信号寻找	39
第 1 章 数据和蒙特卡罗样本	41

1.1	数据样本	41
1.2	蒙特卡罗样本	41
1.2.1	信号样本	41
1.2.2	背景样本	42
第 2 章	事例筛选和信号优化	45
2.1	粒子鉴别及筛选	45
2.1.1	Object definitions in 4W	45
2.1.2	Overlap removal	45
2.2	事例筛选	46
2.2.1	初步筛选	46
2.2.2	信号优化	48
第 3 章	背景估计	53
3.1	QmisID 估计	55
3.1.1	似然函数方法	55
3.1.2	系统误差	56
3.2	Fakes 估计	58
3.2.1	Fake factor 方法	58
3.2.2	系统误差	61
3.2.3	总预期本底估计	64
第 4 章	信号优化	67
4.1	优化策略	67
4.2	优化效率检查	73
4.3	信号及背景筛选结果	74
4.3.1	hh 搜索筛选结果	74
4.3.2	SS 搜索筛选结果	74
第 5 章	系统误差	81
5.1	对撞亮度	81
5.2	信号样本理论误差	81
5.3	data-driven 本底估计系统误差	82
5.4	本底预期截面误差	82
5.5	探测器误差	82
第 6 章	统计结果	85

第 7 章 4W 联合统计结果	89
7.1 系统误差相关性	89
7.2 统计模型检查	90
7.3 联合统计结果	98
 第三部分 通过多轻子道寻找 $t\bar{t}H$ 产生模式	101
第 1 章 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 分析道	103
1.1 信号选择	103
1.2 Fake 本底估计	105
1.3 MVA 研究	105
1.4 系统误差	109
第 2 章 $t\bar{t}\bar{H}$ 分析结果	111
2.1 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 结果	111
参考文献	117
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	125
致谢	127

图形列表

1.1 质子-质子对撞中的部分子硬散射过程。	3
1.2 NNPDF3.0[?] 在 $\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2$ 和 $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$ 时的质子部分子分布函数 $xf(x)$, 其中曲线宽度代表 PDF 误差。	4
2.1 (a) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 m_h 变化 ($\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$), (b) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 \sqrt{s} 变化 ($m_h = 125 \text{ GeV}$)。	6
2.2 (a) 典型 LO 阶 ggF 产生过程; (b) 典型 LO 阶 VBF 产生过程。	6
2.3 (a) 典型 LO 阶 Vh 产生过程; (b) (c) 典型 LO 阶 $ggZh$ 产生过程。	7
2.4 典型 LO 阶 $t\bar{t}h$ 和 $b\bar{b}h$ 费曼图。	7
2.5 (a) (b) 典型 LO 阶 $thqb$ 过程; (c) (d) 典型 LO 阶 thW 过程。	8
2.6 领头阶标准模型 hh 胶子融合产生过程。	9
2.7 领头阶标准模型 hh 矢量玻色子融合产生过程。	10
2.8 QCD 次领头阶 hh 各产生模式的截面随 \sqrt{s} 变化情况 [8], 包括胶子融合, 矢量玻色子融合, 顶夸克对, W/Z 玻色子关联以及单顶夸克模式。这里 H 指代标准模型 Higgs, 线宽代表不确定度, 包括 scale 和 PDF。	10
2.9 超出标准模型希格斯粒子产生模式, 其中 2.9a 和 2.9b 通过修改希格斯粒子耦合顶点常数实现, 2.9c 则通过中间态高质量粒子, X , 实现。	11
2.10 Total cross sections (y-axis) at the LO and NLO in QCD for di-Higgs production channels, at the LHC 14 TeV as a function of the self-interaction coupling λ (x-axis) . The dashed (solid) lines and light-(dark-) color bands correspond to the LO (NLO) results and to the scale and PDF uncertainties added linearly. The SM values of the cross sections are obtained at $\kappa = 1$, indicated by the red vertical line. H refers to the SM Higgs	12
2.11 hh 主要衰变道分支比, 其中 $m_h=125 \text{ GeV}$ 。	13
2.12 The observed and expected 95% CL upper limits of $\sigma(gg \rightarrow H) \times BR(H \rightarrow hh)$ at $s = 8 \text{ TeV}$ as functions of the heavy Higgs boson mass, m_H , combining resonant searches in Higgs boson pair to $b\bar{b}\tau^+\tau^-$, $W+W-\gamma\gamma$, $b\bar{b}\gamma\gamma$, and $b\bar{b}bb\bar{b}$ final states. The expected limits from individual searches are also shown. The green and yellow bands represent $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ uncertainty ranges of the expected combined limits. The improvement above $m_H = 500 \text{ GeV}$ reflects the sensitivity of the $b\bar{b}bb\bar{b}$ analysis. The results beyond 1 TeV are from the $b\bar{b}bb\bar{b}$ final state alone	14

3.1	LHC 概览	15
3.2	ATLAS 2015 年和 2016 年亮度-pileup 分布。	17
4.1	ATLAS 探测器简图	19
4.2	ATLAS 内部径迹探测器	20
4.3	ATLAS 量能器布局	22
4.4	(a) Cross-section of the barrel muon system perpendicular to the beam axis (non-bending plane), showing three concentric cylindrical layers of eight large and eight small chambers. The outer diameter is about 20m. (b) Cross-section of the muon system in a plane containing the beam axis (bending plane). Infinite-momentum muons would propagate along straight trajectories which are illustrated by the dashed lines and typically traverse three muon stations.	24
4.5	The ATLAS TDAQ system in Run 2 with emphasis on the components relevant for triggering. L1Topo and FTK were being commissioned during 2015 and not used for the results shown here. [30]	25
4.6	(a) L1 and (b) HLT trigger rates grouped by trigger signature during an LHC fill in October 2015 with a peak luminosity of $4.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Due to overlaps the sum of the individual groups is higher than the (a) L1 total rate and (b) Main physics stream rate, which are shown as black lines. Multi-object triggers are included in the b-jets and tau groups. The rate increase around luminosity block 400 is due to the removal of prescaling of the B-physics triggers. The combined group includes multiple triggers combining different trigger signatures such as electrons with muons, taus, jets or MET. [30]	26
5.1	A $(r - \phi)$ view of a slice of the ATLAS detector, showing the typical signature of the physics objects reconstructed by the ATLAS software algorithms obtained by combining tracks and energy clusters. Image courtesy of the ATLAS Experiment.	28
5.2	Electron reconstruction efficiency in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events, as a function of E_T and η [41]	29
5.3	Efficiencies in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events for the different electron ID likelihood operating points as a function of the number of reconstructed primary vertices (whose distribution is overlaid in background)[41]. The latter is an alternative measurement to $\langle \mu \rangle$ of the pileup effect, and is directly sensitive to charged particle activity in the ATLAS detector.	30

5.4	Electron trigger efficiency in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events for the main single electron trigger chain of 2015, as a function of E_T and η [41].	30
5.5	Muon reconstruction efficiency in 2015, 2016 data and simulated $Z \rightarrow \mu\mu$, $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$ events, as a function of p_T (for Medium muons only, and inclusively for $ \eta > 0.1$) and η [43]. The recovery in efficiency in $ \eta < 0.1$ for the Loose working point is due to the inclusion of calorimeter-tagged muons in the object definition.	32
5.6	Muon trigger efficiency in 2015, 2016 data events for the L1 MU20 seed and for main single muon HLT trigger chain of 2016, as a function of p_T , for the barrel and end-cap regions, respectively [44]. The online selection at HLT includes a requirement of low activity around the muon candidate (isolation).	32
6.1	Pictorial representation of a $t\bar{t}$ event as produced by an event generator. The hard interaction (big red blob) is followed by the decay of both top quarks and the Higgs boson (small red blobs). Additional hard QCD radiation is produced (red) and a secondary interaction takes place (purple blob) before the final-state partons hadronise (light green blobs) and hadrons decay (dark green blobs). Photon radiation occurs at any stage (yellow).[57]	36
1.1	ATLAS 数据收集情况: (a) 2015 年, (b) 2016 年。	41
2.1	The final efficiency of pre-selections for hh signal samples.	49
2.2	The final efficiency of pre-selections for SS signal samples.	50
2.3	Distributions of p_T and number of jet for signal. Figure 2.3a to Figure 2.3e are distributions of p_T of jet before 25 GeV cuts, corresponding for $mX=260, 300, 400, 500$ GeV and non-resonant signal. Two dashed vertical lines are $p_T=10$ GeV and $p_T=25$ GeV, respectively. Figure 2.3f is number of jet distribution after 25 GeV cuts.	51
3.1	The comparison between data and all MC backgrounds at pre-selection level. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The slashed pink bands are corresponding to statistical uncertainties. Each process is normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .	54
3.2	The electron charge mis-identification rates as a function of ($ \eta $, p_T) computed in data with the likelihood method.	56
3.3	The comparison between the charge mis-identification rates of electrons measured in simulated $Z \rightarrow e^+e^-$ events with the truth-matching method and the 2D likelihood method.	57

3.4	The systematic uncertainty on the charge mis-identification rate, for different bins in p_T and $ \eta $	58
3.5	The comparisons between data and backgrounds at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The uncertainties, represented by slashed bands, include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the other background components. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	66
3.6	The comparisons between data and backgrounds at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The uncertainties, represented by slashed bands, include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the other background components. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	66
4.1	Correlation check of input training variables.	68
4.2	The distributions of kinematic variables that are used to form optimization selections at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	69
4.3	The distributions of kinematic variables that are used to form optimization selections at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	70
4.4	The significance scan as a function of efficiency for $\mu\mu$ in non-resonant signal search. Statistical uncertainties on the background and the signal are considered. The 0.72 working point is chosen for $\mu\mu$ channel in the non-resonant signal optimizations.	71
4.5	Signal efficiency with respect to pre-selections in ee , $\mu\mu$ and $e\mu$ channel after applying all of the optimisation selections for the non-resonant and resonant hh signal.	73
4.6	Signal efficiency with respect to pre-selections in ee , $\mu\mu$ and $e\mu$ channel after applying all of the optimisation selections for the resonant SS signal.	74
4.7	The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to non-resonance search.	75
4.8	The unblinded $M(\text{all})$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=260 \text{ GeV}$) search.	76
4.9	The unblinded $M(\text{all})$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=300 \text{ GeV}$) search.	77
4.10	The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=400 \text{ GeV}$) search.	77

4.11	The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=500$ GeV) search.	78
4.12	The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to SS low mass search. The signal shown here is $m_X=300$ GeV, $m_S=135$ GeV.	79
4.13	The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to SS high mass search. The signal shown here is $m_X=340$ GeV, $m_S=145$ GeV.	80
6.1	The expected limits for $pp \rightarrow X \rightarrow hh$, as a function of mX.	86
6.2	The expected limits for $pp \rightarrow X \rightarrow SS$ production. Left: fixing $m_S=135$ GeV; right: fixing $m_X=340$ GeV.	86
7.1	pull check on B-only asimovData of $m_H = 260GeV$	91
7.2	pull check on obsData of $m_H = 260GeV$	91
7.3	pull check on S+B asimovData of $m_H = 260GeV$	91
7.4	pull check on B-only asimovData of $m_H = 500GeV$	92
7.5	pull check on obsData of $m_H = 500GeV$	92
7.6	pull check on S+B asimovData of $m_H = 500GeV$	92
7.7	correlation check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 260GeV$	93
7.8	correlation check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 500GeV$	94
7.9	NP ranking check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 260GeV$	94
7.10	NP ranking check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 500GeV$	95
7.11	The 95% CL upper limits in $WWWW$ channels with all systematic.	98
7.12	The expected and observed limit with all systematic uncertainty is shown as the function of m_S	99
1.1	The original di-tau events are classified based on the Monte Carlo truth as fake-fake, fake-real, real-real from Higgs decay or anything else, respectively, in left and the origin of the fake taus are shown in right. The top row for OS and the bottom row for SS. The signal is normalized to the total background in each plot.	104
1.2	BDT input variables. Top row: njet, nbjet, Htjets; Middle row: LeadPt, SubPt, Mttau; Bottom row: Jjdr and Etamax.	107

1.3	The BDT distributions for the signal and background obtained during the training and testing (left); The rejection for the background vs the efficiency for the signal as a function of BDT cut (right).	107
1.4	The BDT inputs and output are compared using the SS events in the signal region. Top row: njet, nbjet; Second row: Htjets, leadPt; Third row: subPt, mtautau; Bottom row: Jjdr, Etamax, and BDT.	108
1.5	The BDT shape systematic is estimated using different Monte Carlo generators including the SS/OS shape systematic from fakes, which are compared for tth, ttV, and SS/OS with fakes from Monte Carlo events.	109
2.1	The systematics used in the fitter.	112
2.2	The pull plot for systematics.	113
2.3	The BDT Asimov data are shown in pre-fit (left) and post-fit (right).	114
2.4	Left: the fitted correlation; Right: ranking of systematic based on their impacts on the signal strength measurements.	115

表格列表

2.1 Standard Model predictions for the Higgs boson production cross sections at 13 TeV. The value of the Higgs boson mass is assumed to be $m_H = 125.09$ GeV. The uncertainties on the cross sections are evaluated as the sum in quadrature of the uncertainties resulting from variations of the QCD scales, parton distribution functions, and α_s . The order of the theoretical calculations is also indicated. In the case of the bbH production, the values are given for the mixture of five-flavor (5FS) and four-flavor (4FS) schemes.	9
3.1 LHC 设计指标, 以及在 2015 年和 2016 年的运行参数 [23]	17
1.1 Summary of the MC hh samples which have been produced for study.	42
1.2 Summary of the MC $X \rightarrow SS$ signal samples used.	43
2.1 4W 物理分析粒子筛选条件总结	45
2.2 Overlap removal in 4W analysis.	46
2.3 The event cleaning criteria.	48
2.4 The cutflow of pre-selection for non-resonant hh signal. The cross-section of $pp \rightarrow hh$ is 33.41 fb. The event yields are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} , corresponding to the final state of two-signed leptons. The statistical uncertainty is added in the last row.	49
3.1 definitions of tight electrons and anti-tight electrons. In addition to the inverted ID requirement, anti-tight electrons are required to pass the loose selection criteria.	59
3.2 definitions of tight muons and anti-tight muons. In addition to the inverted isolation requirement, anti-tight muons are required to pass the loose selection criteria.	59
3.3 Summary of different regions used to estimate fakes for low mass and high mass searches.	59
3.4 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of electron in low mass search. Uncertainties are statistical.	60
3.5 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of muon in low mass search. Uncertainties are statistical.	60

3.6	Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of electron in high mass search. Uncertainties are statistical.	60
3.7	Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of muon in high mass search. Uncertainties are statistical.	60
3.8	Summary of fake factors of electron and muon with different N_{jet} requirements. Uncertainties are statistical.	61
3.9	Observed number of data and expected events yields in high jet multiplicity region, which is used to predict fakes in low mass search. Uncertainties are statistical.	61
3.10	Observed number of data and expected events yields in high jet multiplicity region, which is used to predict fakes in high mass search. Uncertainties are statistical.	62
3.11	Estimated jet fakes in three channels with different selections. Uncertainties are statistical.	62
3.12	Non-closure uncertainty on θ_e and θ_μ . To reduce the statistical error, SS, $p_T(\ell)$ and $M(\ell\ell) > 15$ GeV requirements are dropped in pre-selections.	62
3.13	The contribution from $t\bar{t}$ becomes bigger as more jets are required. W+jets and $t\bar{t}$ (semi-leptonic) MC samples are produced with the same generator (Sherpa).	63
3.14	The fake factors with and without b -jet.	63
3.15	Summary of systematic uncertainty on θ_e with different N_{jet} selections(in %).	64
3.16	Summary of systematic uncertainty on θ_μ with different N_{jet} selections(in %).	64
3.17	Event yields at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. The total uncertainties include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the others. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	65
3.18	Event yields at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. The total uncertainties include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the others. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1}	65
4.1	Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow hh$ ($m_X=260, 300$ GeV). All mass cuts are in GeV.	68
4.2	Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow hh$ ($m_X=400, 500$ GeV and non-resonant). All mass cuts are in GeV.	72

4.3	Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow SS$. All mass cuts are in GeV.	72
4.4	The unblinded results of non-resonant search in ee channel.	74
4.5	The unblinded results of non-resonant search in $\mu\mu$ channel.	75
4.6	The unblinded results of non-resonant search in $e\mu$ channel.	75
4.7	The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in ee channel.	75
4.8	The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in $\mu\mu$ channel.	75
4.9	The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in $e\mu$ channel.	76
4.10	The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in ee channel.	76
4.11	The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in $\mu\mu$ channel.	76
4.12	The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in $e\mu$ channel.	76
4.13	The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in ee channel.	77
4.14	The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in $\mu\mu$ channel.	77
4.15	The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in $e\mu$ channel.	77
4.16	The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in ee channel.	78
4.17	The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in $\mu\mu$ channel.	78
4.18	The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in $e\mu$ channel.	78
4.19	The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in ee channel.	78
4.20	The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in $\mu\mu$ channel.	79
4.21	The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in $e\mu$ channel.	79
4.22	The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in ee channel.	79
4.23	The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in $\mu\mu$ channel.	80
4.24	The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in $e\mu$ channel.	80
5.1	The theoretical uncertainties on $X \rightarrow hh$ production.	82
5.2	The theoretical uncertainties on $X \rightarrow SS$ production.	82
5.3	The summary of systematic uncertainty for the search of non-resonant hh in $e\mu$ channel. All numbers are in %. It should be noted that the non-closure, sample composition and stat. uncertainties are not shown for fakes.	83

6.1	The combined exclusion limits at the 95% CL for the production cross section of a gluon fusion produced X boson times its branching ratio to hh.	85
6.2	The combined exclusion limits at the 95% CL for the production cross section of a gluon fusion produced X boson times its branching ratio to SS.	87
7.1	Systematic variation on signal and total background yield. The variation is asymmetric on signal yield.	90
7.2	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in hh model	93
7.3	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model	95
7.4	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model	96
7.5	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in hh model	96
7.6	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model	97
7.7	$\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model	97
7.8	This table summarizes the expected in each channel and combined channel and the combined observed limit. For non-resonant, the limit is on the ratio over SM Higgs pair prediction.	99
7.9	This table shows the expected limit in each channel and the observed limit in $pp \rightarrow SS$ model.	100
1.1	A closure of the data driven fake estimation is tested in the $n_{jet} < 3$ and the signal depleted control regions.	105
1.2	The rank of input variables are shown based on their importance to BDT.	106
1.3	The summary of signal and backgrounds in the three categories entering the fit in the $1\ell+2\tau_{had}$ SR as defined by the cut $BDT \leq 0.$, $0.0 < BDT \leq 0.6$, $BDT > 0.6$, and total. The errors are including both statistical and systematic uncertainties.	108

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
R	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_v	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_p	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
E	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h_T	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
k	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
S_{ij}	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
τ_{ij}	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
δ_{ij}	Kronecker tensor	1
I_{ij}	identity tensor	1

算子

Symbol	Description
Δ	difference
∇	gradient operator
δ^\pm	upwind-biased interpolation scheme

缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lowy
EOS	Equation of State
JWL	Jones-Wilkins-Lee
WENO	Weighted Essentially Non-oscillatory
ZND	Zel'dovich-von Neumann-Doering

第一部分

粒子物理实验理论

第1章 一些准备

普遍认为质子对撞比电子对撞有更丰富的物理过程，这得益于质子是一个复合粒子。对于一定能量（GeV以上）的质子，在每次对撞中，往往是质子的某一部分（Parton，部分子）参与相互作用（图1.1），而这一部分的能量是不确定的，多种多样具有不同能量阈值的物理过程才可以发生。但是为了准确预测各种物理过程的产生截面，我们需要了解质子中各部分子的能量分布情况。通过深度非弹性实验 [1]，单举喷注产生 [2] 或者强子对撞机的电弱过程测量 [3, 4]，我们可以得知具有特定比例动量 x 的部分子的存在概率 $f(x)$ ，即 PDF (Parton Distribution Function)。但是这些测量均在特定 μ （代表散射过程中的典型能量转移大小）进行，得到的 PDF 须根据微扰 QCD 演化公式 [5] 外推到 LHC 能量尺度。图1.2 展示 LHC 常用的一种 PDF，值得指出的是， $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$ 表示希格斯粒子产生过程的典型能量转移，在 13 TeV 质心系能量下， x 大约为 10^{-2} ，所以 LHC 希格斯粒子产生的主要贡献来自胶子融合。之后，根据因子化定理 [6]，图1.1所示的

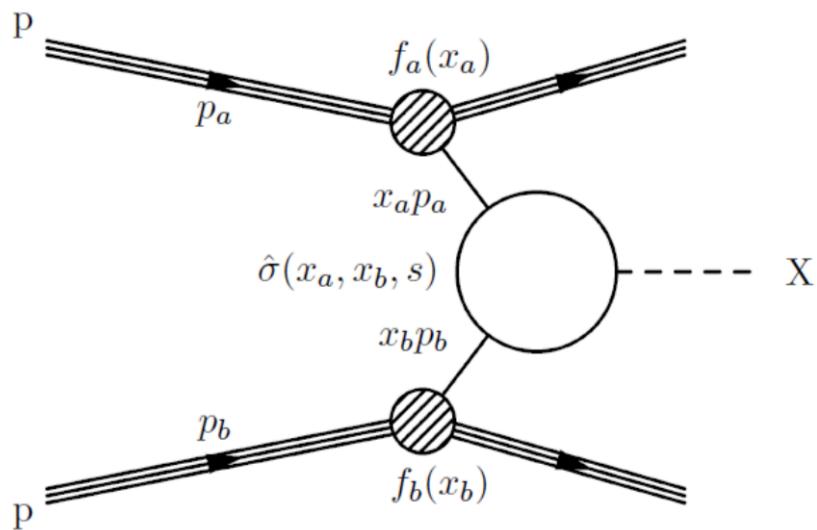


图 1.1 质子-质子对撞中的部分子硬散射过程。

质子-质子对撞的单举产生截面则为：

$$\sigma_{pp \rightarrow X} = \sum_{a,b} \int dx_a dx_b f_a(x_a, \mu_F^2) f_b(x_b, \mu_F^2) \hat{\sigma}_{ab \rightarrow X}(x_a p_a, x_b p_b, \mu_R^2, \mu_F^2) \quad (1.1)$$

其中对所有可以发生某过程的各种味道部分子求和，部分子的 PDF $f_i(x_i, \mu_F^2)$ 依赖 μ_F^2 ，即因子化尺度，代表探查质子时的能量尺度，而硬散射过程 $ab \rightarrow X$ 截

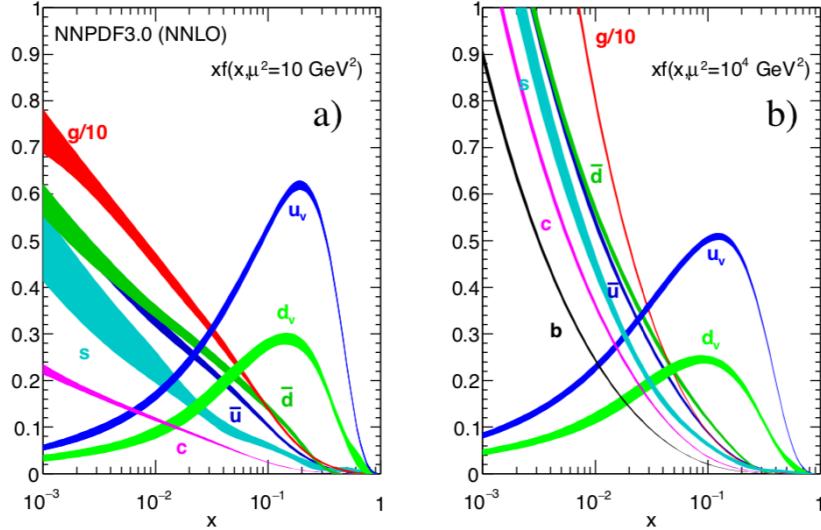


图 1.2 NNPDF3.0[?] 在 $\mu^2 = 10 \text{ GeV}^2$ 和 $\mu^2 = 10^4 \text{ GeV}^2$ 时的质子部分子分布函数 $xf(x)$ ，其中曲线宽度代表 PDF 误差。

面还依赖于 QCD 重整化大小 μ_R^2 。需要指出的是， μ_F 和 μ_R 都是为了计算结果有物理意义而人为选择的参数，在微扰 QCD 中，如果能够计算散射过程的所有展开阶数，物理过程的产生截面不依赖于 μ_F 和 μ_R ，但是在有限阶数的计算下， μ_F 和 μ_R 的大小选择会影响截面的计算结果，这也是理论误差的来源之一。

第2章 希格斯唯象学

2.1 希格斯场

标准模型引入了一个具有非零真空期望值的复标量 Higgs 场, φ , 其场势能项为:

$$V(\varphi) = -v^2 \lambda \varphi^\dagger \varphi + \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 \quad (2.1)$$

其中, $v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} \approx 246 \text{ GeV}$ 为 Higgs 场真空期望值, λ 是 Higgs 自耦合参数。通过自发对称性破缺, W^\pm 和 Z 玻色子得到质量, 而且预言了一个额外的标量粒子, 即 Higgs 玻色子。在标准模型中包含 Higgs 耦合项的拉氏量密度如公式2.2所示:

$$\mathcal{L} = -\lambda \bar{f} f h + \delta_V V_\mu V^\mu (\lambda_{hVV} h + \lambda_{hhVV} h^2) + \lambda_{hh} h^2 + \lambda_{hhh} h^3 + \lambda_{hhhh} h^4 \quad (2.2)$$

其中, f 代表费米子, V 为 W^\pm ($\delta_W=1$) 和 Z ($\delta_Z=1/2$) 玻色子, 并且方程中的耦合参数可以表达为:

$$\begin{aligned} \lambda_{h\bar{f}f} &= \frac{m_f}{v}, \quad \lambda_{hVV} = \frac{2m_V^2}{v}, \quad \lambda_{hhVV} = \frac{m_V^2}{v^2} \\ \lambda_{hh} &= \frac{m_h^2}{2}, \quad \lambda_{hhh} = \frac{m_h^2}{2v} = \lambda v, \quad \lambda_{hhhh} = \frac{m_h^2}{8v^2} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Higgs 质量模型并未预言, 需要实验确定, 当 Higgs 粒子质量确定之后, Higgs 自耦合参数 λ_{hhh} 也随之确定, λ_{hhh} 的测量是 hh 搜寻的首要目标。还可以发现, Higgs 与其他粒子的耦合强度依赖于粒子质量。

2.2 单希格斯粒子产生模式

在 LHC 单希格斯粒子可以有以下产生模式:

- 胶子融合 (ggF) $gg \rightarrow h$;
- 矢量玻色子融合 (VBF) $q'q \rightarrow q'qh$;
- W 或 Z 玻色子关联产生 (Vh) $q\bar{q} \rightarrow Vh$, 其中还包括部分 ($\sim 8\%$) $gg \rightarrow Zh$ (ggZh);
- 底夸克对关联产生 ($b\bar{b}h$) $q\bar{q}/gg \rightarrow b\bar{b}h$, 和顶夸克对关联产生 ($t\bar{t}h$) $q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t}h$;
- t 过程单顶夸克关联产生 ($thqb$) $qg \rightarrow th\gamma qb$ (四味方案), 和关联 W 玻色子产生 (thW) $gb \rightarrow thW$ (五味方案); s 过程可以忽略。

图2.1分别总结了上述几种产生模式在 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 时产生截面随 m_h 变化情况，和在 $m_h=125 \text{ GeV}$ 时随 \sqrt{s} 变化情况。 ggF 是 LHC 上 Higgs 产生的主要过程，大

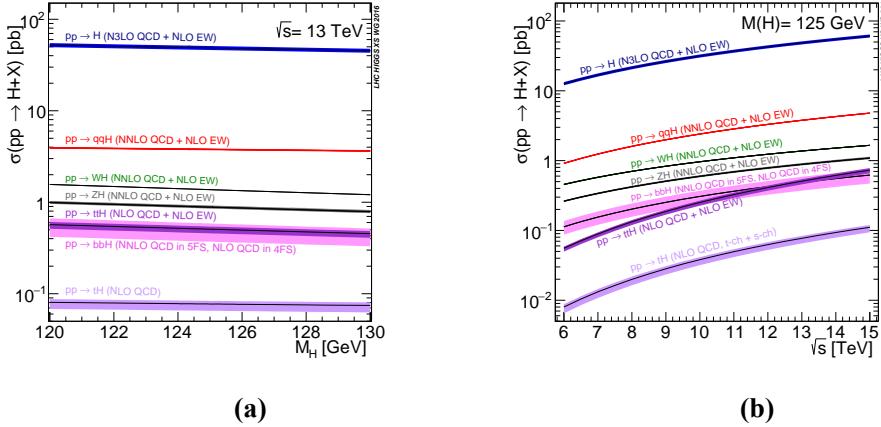


图 2.1 (a) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 m_h 变化 ($\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$)，(b) 标准模型希格斯粒子各产生模式截面随 \sqrt{s} 变化 ($m_h = 125 \text{ GeV}$)。

约占比 90% ($m_h=125 \text{ GeV}$)，是 Higgs 发现的首要贡献过程。在一般的超出标准模型设置中， ggF 也假设为主要贡献过程，如本文将要研究的 hh 产生。不过需要指出的是， ggF 这过程有很高的 QCD 本底，不能很好地纯化。图2.2a是 ggF 的领头阶 (LO) 的费曼图，因为胶子是无质量的，所以必须通过重味夸克传递。 VBF 具有第二大的产生截面，其 LO 的费曼图如图2.2b所示，除了产生 Higgs 外，还有两个较前向的喷注，这是它的显著信号特征，可以与 ggF 进行很好区分。 Vh

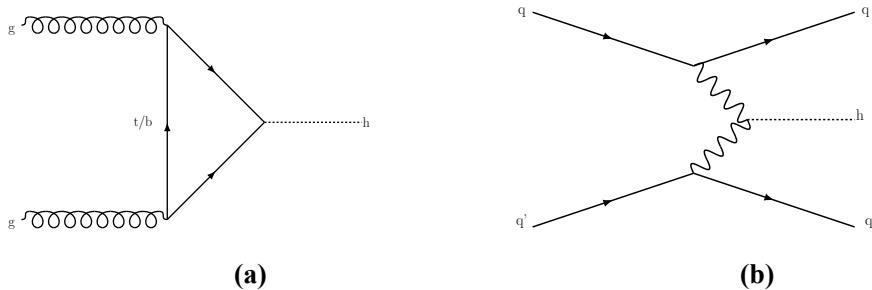


图 2.2 (a) 典型 LO 阶 ggF 产生过程；(b) 典型 LO 阶 VBF 产生过程。

过程的显著特征是末态中只有一个 W 或 Z 玻色子和 Higgs，其 LO 阶费曼图如图2.5a所示。它可以通过玻色子的轻子化衰变产物去寻找，从而极大地压低 QCD 本底。 Vh 是发现 $h \rightarrow b\bar{b}$ 的黄金过程，并已于 2018 年正式发现 []。通过 Vh 过程，我们还可以测量 λ_{hVV} 参数。另外， $ggZh$ 的产生截面很小，一般在的 Higgs 性质测量中，没有考虑。

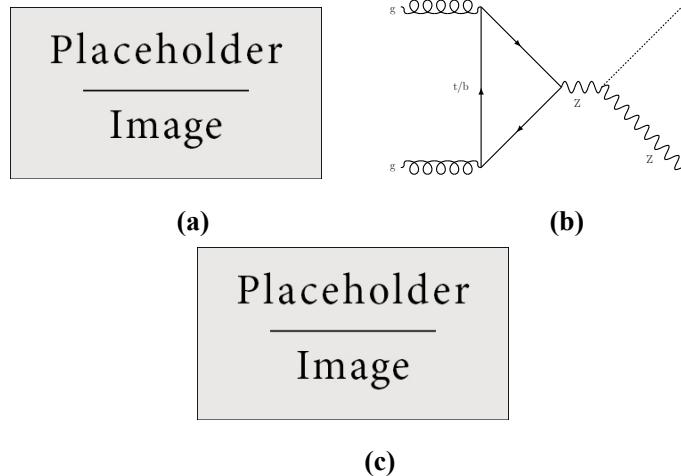


图 2.3 (a) 典型 LO 阶 Vh 产生过程; (b) (c) 典型 LO 阶 $ggZh$ 产生过程。

相比于 ggF 和 VBF , $b\bar{b}h$ 和 $t\bar{t}h$ 产生截面很小。对于 $b\bar{b}h$, 其挑战在于一般 b 夸克动量很低, 不能有效地标记。而对于 $t\bar{t}h$, 得益于顶夸克的质量, 其衰变产物, 如 b 喷注, 具有较高的动量, 可以有效标记, 最终可以标记到此过程的相空间。通过 $t\bar{t}h$ 的研究可以测量 Higgs 与最重粒子, t , 的 Yukawa 耦合参数。在 ATLAS, $t\bar{t}h$ 是近几年的研究热点, 已开展 $t\bar{t}h(\rightarrow \gamma\gamma)$, $t\bar{t}h(\rightarrow b\bar{b})$ 以及 $t\bar{t}h(\rightarrow \ell/\tau)$ (一般称为 tthML), 其中 tthML 研究将在本文讲述。 $t\bar{t}h$ 的 LO 费曼图见图??。

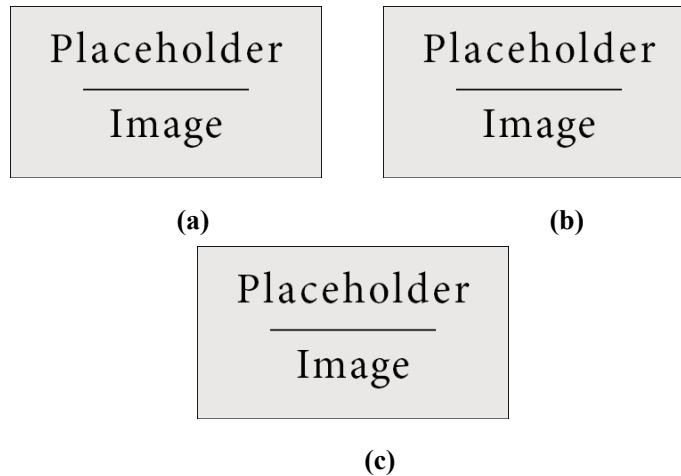


图 2.4 典型 LO 阶 $t\bar{t}h$ 和 $b\bar{b}h$ 费曼图。

th 过程, 具有最小的产生截面, 其 LO 阶费曼图如图2.5所示。它的末态产物跟 $t\bar{t}h$ 很相似, 可以跟 $t\bar{t}h$ 一起研究, 联合测量 Higgs 与顶夸克的 Yukawa 耦合常数。

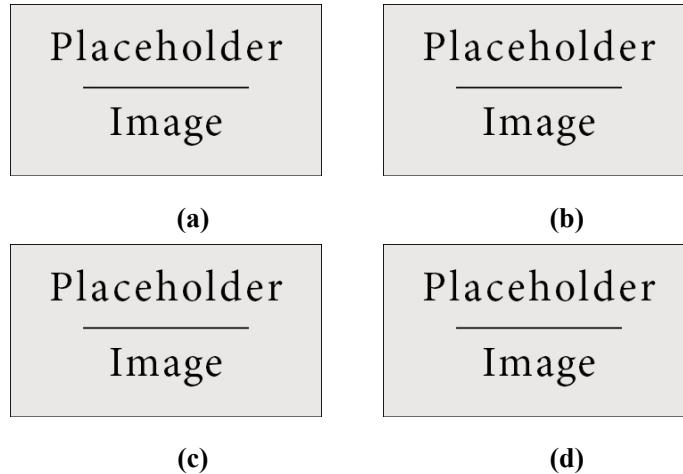


图 2.5 (a) (b) 典型 LO 阶 $thqb$ 过程; (c) (d) 典型 LO 阶 thW 过程。

表2.1总结这些产生过程在 $\sqrt{s} = 13$ TeV 时的截面, 其计算 QCD 阶数和 QED 阶数也列出。

Production process	Cross section [pb]	Order of calculation
ggF		
VBF		
Wh		
Zh		
$ggZh$		
$t\bar{t}h$		
th		
$b\bar{b}h$		
Total		

表 2.1 Standard Model predictions for the Higgs boson production cross sections at 13 TeV. The value of the Higgs boson mass is assumed to be $m_H = 125.09$ GeV. The uncertainties on the cross sections are evaluated as the sum in quadrature of the uncertainties resulting from variations of the QCD scales, parton distribution functions, and α_s . The order of the theoretical calculations is also indicated. In the case of the bbH production, the values are given for the mixture of five-flavor (5FS) and four-flavor (4FS) schemes.

2.3 标准模型希格斯对产生

标准模型还预言了希格斯对产生，与单 Higgs 产生类似，其主要来源是胶子融合过程。在 LHC LO 阶的产生过程如图2.6所示，分为箱图 (2.6a) 和能够测量 λ_{hhh} 的三角图 (2.6b)。在三角图中，中间态的 Higgs 作为一个传播子，质量不在壳，而末态的双 Higgs 均在壳；而中间态 Higgs 在壳，末态 Higgs 不在壳的情况被极大地压低 [7] 引用存疑。而且需要指出的是，箱图和三角图过程具有抵消干涉项，导致标准模型希格斯对总产生截面很小。

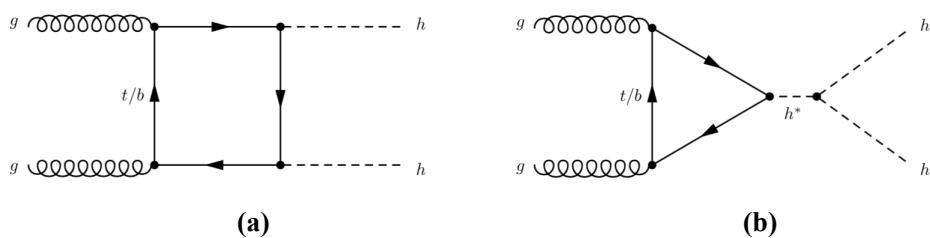


图 2.6 领头阶标准模型 hh 胶子融合产生过程。

另外，除了胶子融合过程，还有其他 Higgs 对产生模式，比如矢量玻色子融合，其领头阶费曼图如图2.8所示。需要指出的是，在 ATLAS 利用 2015 年和 2016

年进行的分析中，仅考虑了胶子融合过程，这也是本文 hh 研究的考虑范围，但是在新一轮的研究中，一些分析道开始考虑矢量玻色子融合过程。

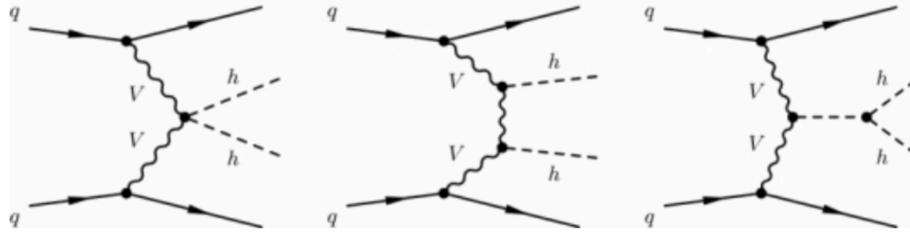


图 2.7 领头阶标准模型 hh 矢量玻色子融合产生过程。

图2.8总结了不同 hh 产生过程截面随 \sqrt{s} 的变化情况。对于 13 TeV 质子质子

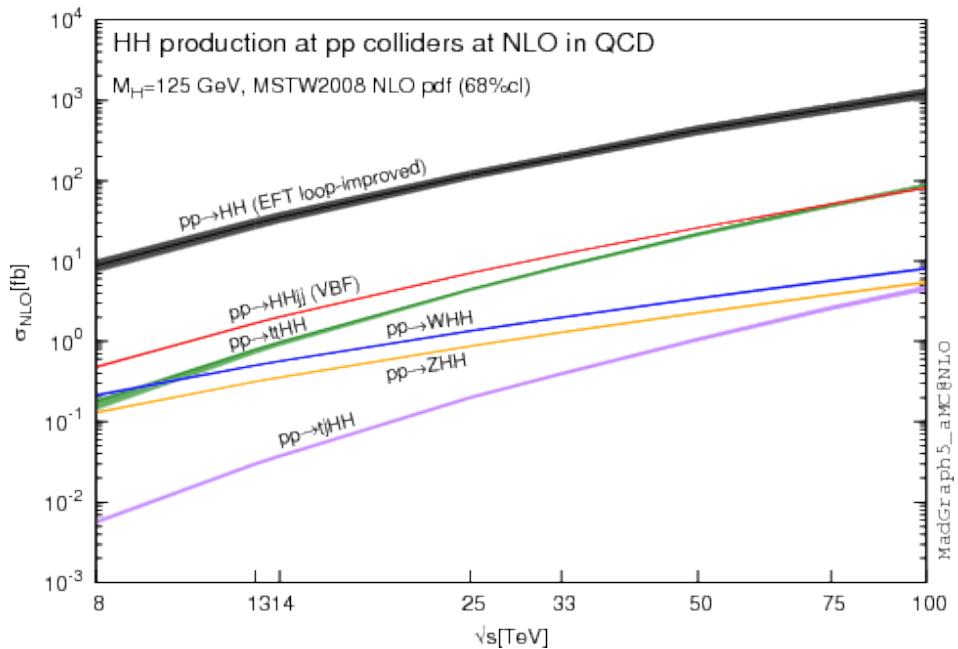


图 2.8 QCD 次领头阶 hh 各产生模式的截面随 \sqrt{s} 变化情况 [8]，包括胶子融合，矢量玻色子融合，顶夸克对， W/Z 玻色子关联以及单顶夸克模式。这里 H 指代标准模型 Higgs，线宽代表不确定度，包括 scale 和 PDF。

对撞，考虑到 QCD 次次领头阶和次次领头阶对数求和，同时考虑到次领头阶有限顶夸克质量影响，几种 hh 产生过程的截面 [9] 总结如下¹：

- 胶子融合： $\sigma_{gg \rightarrow hh} = 33.49^{+4.3\%}_{-6.0\%} \pm 5\% \pm 2.3\% \pm 2.1\%$ ；
- 矢量玻色子融合： $\sigma_{gg \rightarrow hh} = 33.49^{+4.3\%}_{-6.0\%} \pm 5\% \pm 2.3\% \pm 2.1\%$ ；
- 胶子融合产生三 Higgs：

¹ 目前已有新的计算结果 [10, 11]，但本文 hh 分析使用所列出的计算值。

2.4 超出标准模型希格斯对产生

虽然目前 Higgs 的测量结果越来越符合标准模型预期，但 125 GeV 的质量会有精细调节问题 [1]，如果有 TeV 量级的新粒子，不自然的问题就解决了。在许多超出标准模型中， hh 产生截面既可以通过非共振态也可以通过共振态模式增强。对于非共振态模式中，可以通过修改 $\lambda_{h\bar{t}t}$ 顶点 [12, 13] 或者一个新的带色荷标量粒子 [14]；还可以通过增强 λ_{hhh} 自耦合顶点，如图 2.9b 中的绿圈所示。非共振态增强可以表述为超出标准模型产生截面与标准模型产生截面比值，对于希格斯自耦合顶点增强而言，等价于耦合常数增强，即 $\kappa_\lambda = \lambda/\lambda_{SM}$ ，从标准模型电弱测量得知，其被限制在 $(-14, 17.4)$ [15] 范围内。而且值得指出的是，不同的 κ 对希格斯对产生有不同的影响 [8]，图 2.10 展示希格斯对产生截面随 κ 的变化情况。在高 λ 区 ($|\kappa_\lambda| > 10$)，非共振态干涉贡献主要来自于自耦合顶点。 κ 的确认可以通过测量希格斯对产生截面得到，这是 hh 研究的重要目标。

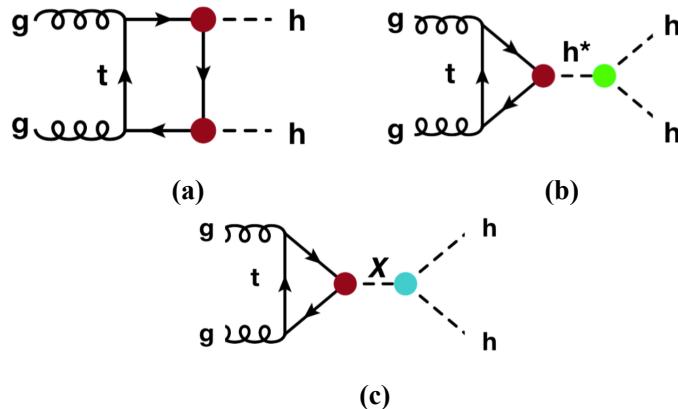


图 2.9 超出标准模型希格斯粒子产生模式，其中 2.9a 和 2.9b 通过修改希格斯粒子耦合顶点常数实现，2.9c 则通过中间态高质量粒子， X ，实现。

理论上比较容易引入一个新的与希格斯粒子耦合的标量粒子，从而使得希格斯对产生截面增大。一个简单的扩展是 2HDM [16]，它有两个希格斯二重态，从而有 5 个希格斯玻色子，分别是 h （轻标量 Higgs，一般看作发现的标准模型 Higgs）， X （重标量 Higgs）， A （重赝标量 Higgs）， H^\pm （两个带电 Higgs）。为了避免树图阶味道改变中性流，2HDM 应用分立对称性使得带电费米子只与一个希格斯二重态耦合。

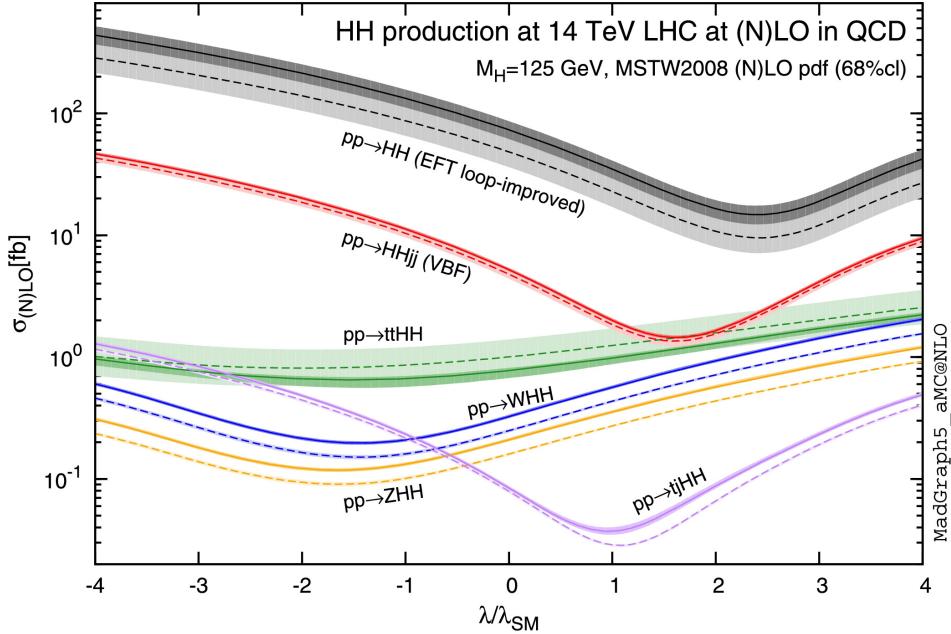


图 2.10 Total cross sections (y-axis) at the LO and NLO in QCD for di-Higgs production channels, at the LHC 14 TeV as a function of the self-interaction coupling λ (x-axis). The dashed (solid) lines and light-(dark-) color bands correspond to the LO (NLO) results and to the scale and PDF uncertainties added linearly. The SM values of the cross sections are obtained at $\kappa = 1$, indicated by the red vertical line. H refers to the SM Higgs

2.5 希格斯对衰变

希格斯粒子的寿命只有 1.56×10^{-22} s，在对撞顶点即衰变，表2.11总结了 hh 的主要衰变道的分支比。在 Run 1，ATLAS 研究过 $b\bar{b}b\bar{b}$ [17]， $b\bar{b}\gamma\gamma$ [18]， $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ 和 $WW^*\gamma\gamma$ ，均没有观测到数据与预期的明显偏差。对于非共振态模式，其截面上限为 0.69 pb，对应 $\kappa < 70$ 。共振态模式的联合拟合截面上限总结在图2.12。

现就一些衰变道作出简要概述：

- $b\bar{b}b\bar{b}$: 它具有最大的衰变分支比，是 hh 搜索的主要分析道，能够重建 Higgs 以及 X 的质量，但是其分辨率受限于 b 喷注重建及鉴别。在低 m_X 区，因为 b 喷注触发效率太低，其显著性较低；但是在高 m_X 区，两个 b 喷注倾向合并，可以重建两个 large- R b 喷注，而且得益于提高的 b 喷注触发效率，其显著性得到提高。
- $b\bar{b}W^+W^-$: 具有第二大分支比，但是 $t\bar{t}$ 本底限制了显著性，目前 ATLAS 正在积极研究优化策略。
- $b\bar{b}\gamma\gamma$: 虽然截面不大，但是受益于较干净的双光子本底以及很好的光子分辨，在低 m_X 区有显著优势，但在高质量区，双光子的合并对光子鉴别造成影响，

BR	$b\bar{b}$	WW^*	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$
$b\bar{b}$	33%				
WW^*	25%	4.6%			
$\tau\tau$	7.4%	2.5%	0.4%		
ZZ	3.1%	1.2%	0.3%	0.08%	
$\gamma\gamma$	0.26%	0.1%	0.029%	0.013%	0.005%

图 2.11 hh 主要衰变道分支比，其中 $m_h=125$ GeV。

使得显著性下降。

- $b\bar{b}\tau^+\tau^-$: 该道与前两个道具有相当的显著性，尤其是在低 m_X 区，其主要挑战是赝 τ 的本底处理。
- $WW^*\gamma\gamma$: 该道与上述衰变道相比具有较差的显著性，但是得益于双光子以及轻子化衰变的 W 玻色子，本底较少，是 hh 搜寻的重要补充。
- WW^*WW^* : 该道是本文 hh 分析的研究题目，将在章节??详细讲述。
- $WW^*\tau\tau, \tau\tau\gamma\gamma, \tau\tau\tau\tau, b\bar{b}ZZ, WWZZ$: 这些衰变道的分支比都很小，均不能或者部分重建 Higgs，还未公开发表过结果。但是随着 ATLAS 累积更多的数据，使用单举策略²，即以它们的衰变物进行分类，如轻子数，不明显关注 hh 衰变中间态，而后进行优化，最后联合拟合得出结果，也许可以为 hh 搜寻作出重要贡献。

² $WW^*\gamma\gamma$ 和 WW^*WW^* 也纳入其中

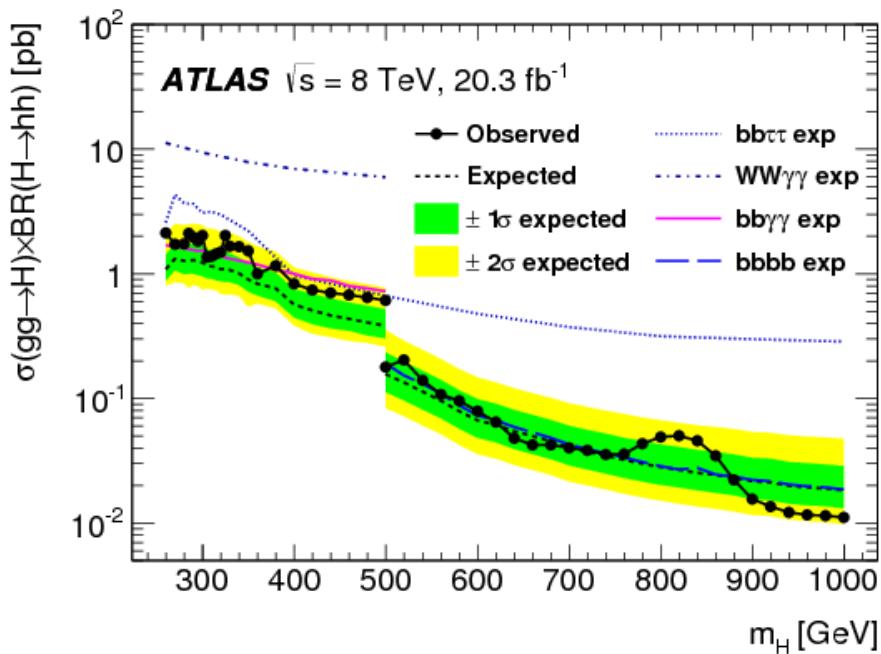


图 2.12 The observed and expected 95% CL upper limits of $\sigma(gg \rightarrow H) \times BR(H \rightarrow hh)$ at $s = 8\text{TeV}$ as functions of the heavy Higgs boson mass, m_H , combining resonant searches in Higgs boson pair to $bb\tau^+\tau^-$, $W+W-\gamma\gamma$, $b\bar{b}\gamma\gamma$, and $b\bar{b}b\bar{b}$ final states. The expected limits from individual searches are also shown. The green and yellow bands represent $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ uncertainty ranges of the expected combined limits. The improvement above $m_H = 500\text{GeV}$ reflects the sensitivity of the $b\bar{b}b\bar{b}$ analysis. The results beyond 1TeV are from the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state alone

第3章 大型强子对撞机

座落在瑞士法国边境的大型强子对撞机 (LHC) 是在地下 100 米, 周长为 27 公里的储存环。在 LHC 储存环上, 有四个相互作用点(实验), 分别是 ATLAS [19], CMS [20], LHCb [21] 以及 ALICE [22], 其相对位置如简图 3.1 所示。ALTAS 和 CMS 是多用途探测器, 主要为了检验标准模型和发现 TeV 量级新物理, 随后会进一步介绍 ATLAS 探测器。LHCb 实验主要用于 CP 破坏以及 b - 强子稀有衰变的精确测量。ALICE 实验主要研究重离子对撞。本文将讨论质子-质子对撞和 ATLAS 实验。

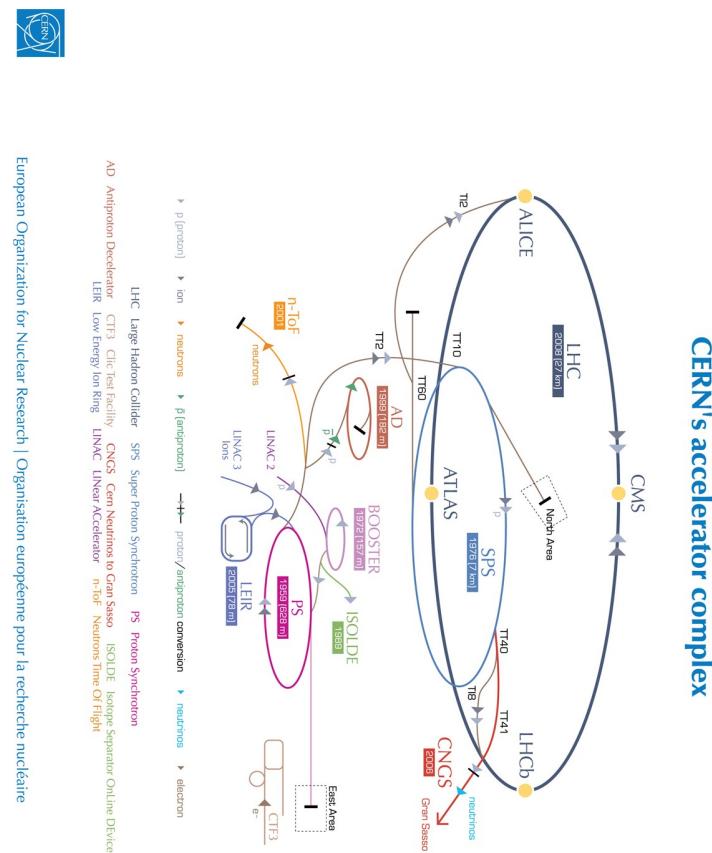


图 3.1 LHC 概览

3.1 质子加速过程

LHC 的设计目标是提供质心系能量为 14 TeV, 平均瞬时亮度可达 $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的质子-质子对撞。质子来源于电离氢气, 而后会经历以下加速过程:

- 通过线性加速器 (Linac2) 加速到 50 MeV ($\beta \approx 5\%$) ;
- 注入到质子同步推进器 (Proton Synchrotron Booster) , 加速至 1.4 GeV ($\beta \approx 70\%$) ;
- 质子同步器 (Proton Synchrotron) 加速至 25 GeV ($\beta \approx 99.9\%$) ;
- 超级质子同步器(Super Proton Synchrotron)提升至 450 GeV($\beta \approx 99.9998\%$);
- 注入储存环上的两条束流管, 一条顺时针, 另一条逆时针转圈, 每次注入大约花费 4 分钟。
- 最终通过储存上的超导高频腔加速到 6.5 TeV。

LHC 的每次注入可持续几小时, 直到束流密度下降到一定阈值, 而后, 束流被导出, 一个新的循环开始。

3.2 LHC 重要参数

LHC 的瞬时亮度公式如下:

$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 f_r n_b F}{4 \varepsilon_n \beta^*} \quad (3.1)$$

其中 N_b (束流团所含质子数), n_b (储存环中运行束流团数), f_r (束流团旋转频率) 以及 ε (束团归一横向发射度, 描述粒子横向扩散) 由质子加速过程决定; 而 β^* 是在对撞点的所谓振幅函数, 它的性质由聚焦磁铁决定; F 是为修正束团对撞角度偏差的束流形状因子, 一般小于 1。 $\varepsilon_n \beta^*$ 正比于束流横向面积, 那么越小的横向发射度或者越小的振幅函数意味着更窄的束流, 对撞频率就越高。关于 LHC 亮度的重要参数如表 3.1 所示, 需要注意的是, 自 LHC 开机以来, 不断的进行优化, 一些所列参数已经超过设计指标, 比如最大瞬时亮度, 其已在 2016 年运行时超过 $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 主要是因为更小的 β^* 和优化的形状因子。相应地, pileup 数也随之增加, 见图 3.2。

Beam/collision parameters	2015	2016	Nominal design (if available)
Center-of-mass energy (\sqrt{s}) [TeV]	13	13	14
Bunch spacing [ns]	50-25	25	25
Bunch revolution frequency (f_r) [kHz]	11.245	11.245	11.245
Max. number of bunches/beam (n_b)	2232	2208	2808
Max. charge per bunch colliding (10^{11} p/bunch)	1.21	1.31	1.15
Peak instantaneous luminosity [10^{34} cm $^{-2}$ s $^{-1}$]	0.5	1.38	1
Max. pileup	28.2	52.2	
Longest stable beams fill duration [h]	24.3	37.03	

表 3.1 LHC 设计指标，以及在 2015 年和 2016 年的运行参数 [23]

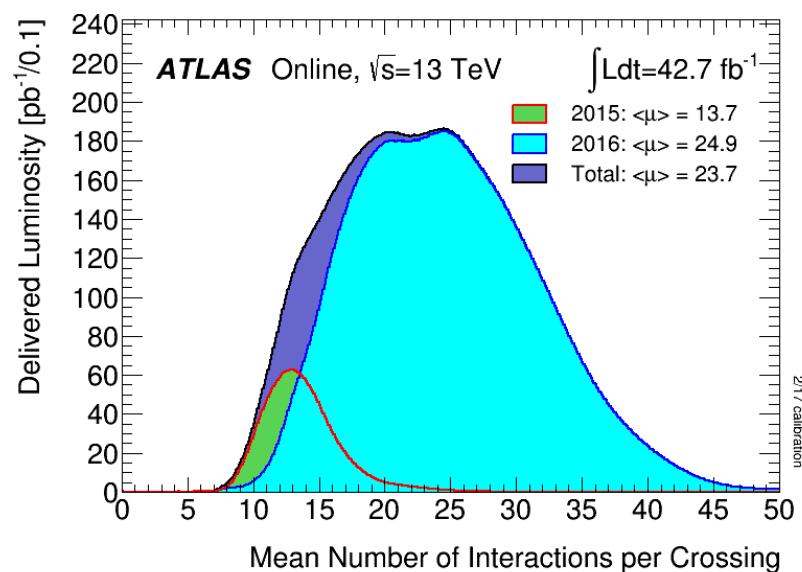


图 3.2 ATLAS 2015 年和 2016 年亮度-pileup 分布。

第4章 ATLAS探测器

ATLAS探测器座落在LHC储存环的Point I，它有25米高，44米长，总重大约7000吨。ATLAS探测器内层是内部径迹探测器(ID)，其被直径为2.3米的超导螺线管包围，该超导线圈提供平行于束流方向，大小为2T的磁场；紧挨着ID是量能器系统(EM)，EM分为电磁量能器和强子量能器；最外层是 μ 子探测器(MS)。本章将论述图4.1所示的各个部分。

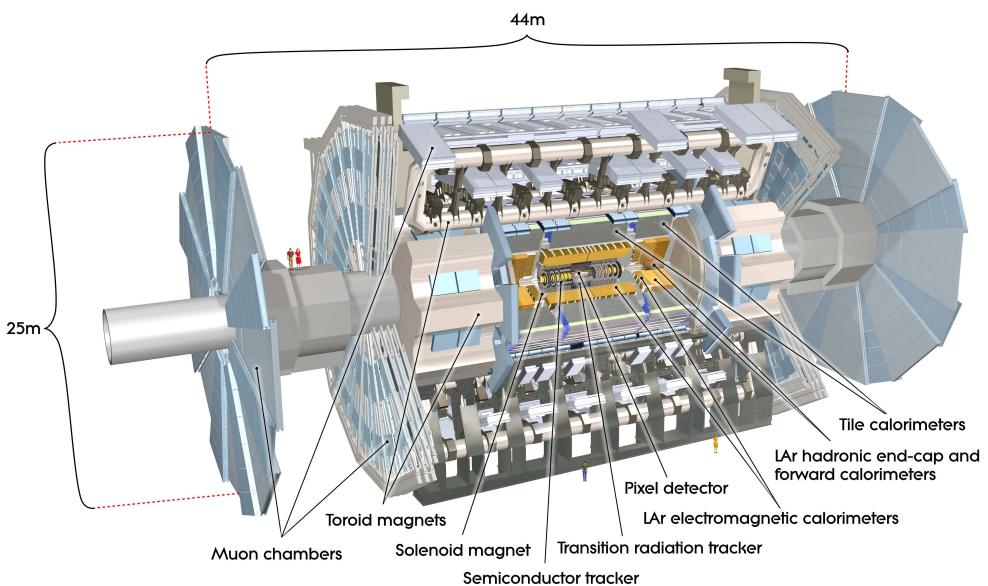


图4.1 ATLAS探测器简图

4.1 坐标系统

ATLAS使用右手坐标系，其定义IP为原点，z轴为束流方向，正x轴指向环中心，正y轴则向上。在极角坐标系中，定义方位角 ϕ 在(x,y)平面，大小从 $-\pi$ 到 π ，极角 θ 从0到 π ， $\theta=0$ 时与正z轴同向。

赝快度定义为 $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ ($m \ll E$)，更大的 $|\eta|$ 意味着粒子更靠近束流方向，在ATLAS一般称为更前向。那么可以定义两个粒子的角距离 $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ 。

4.2 内部径迹探测器

ATLAS内部径迹探测器主要用来精确寻迹($p_T > 0.1 \text{ GeV}$)，可覆盖 $|\eta| < 2.5$ 。它包括三个子探测器，离束流中心距离从3.3 cm到101.6 cm，图4.2展示ID的

各个部分的分布。ID 沉浸在通过铌钛超导螺线管产生的 2 T 轴向磁场中，线圈通过液氦冷却，温度为 4.5 K。ID 的强磁场可偏转带电粒子，通过测量径迹曲率可推出粒子动量。

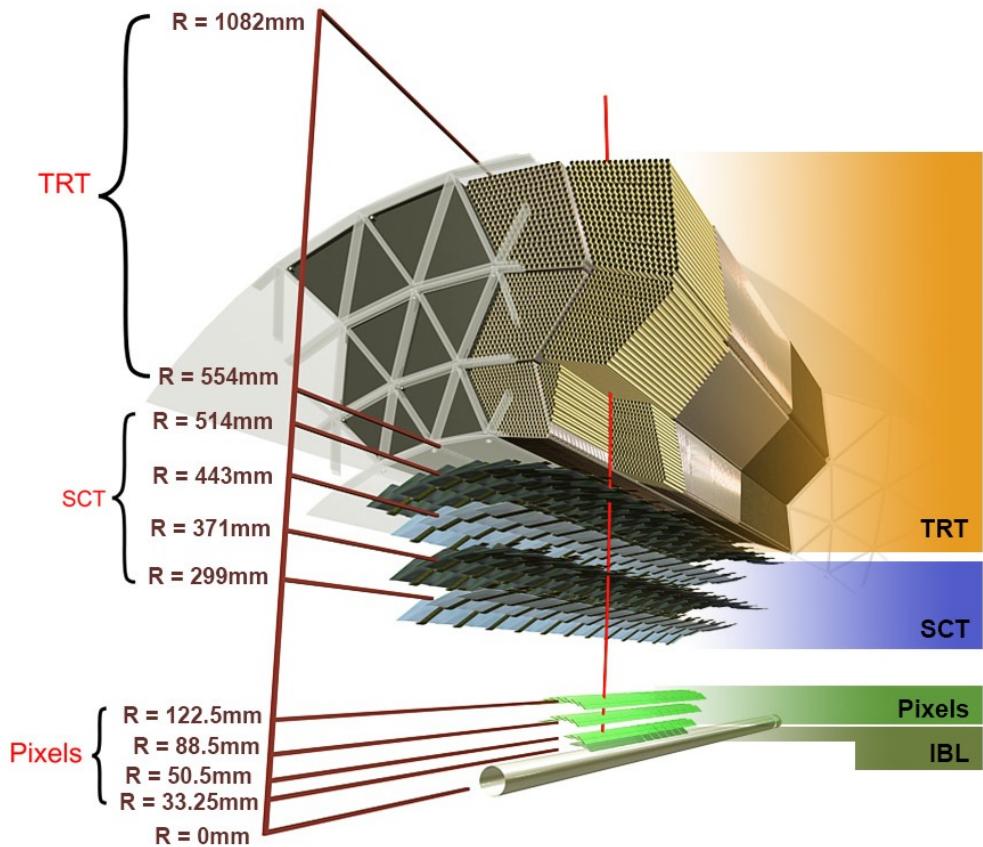


图 4.2 ATLAS 内部径迹探测器

像素探测器 (Pixel detector) 围绕着束流中心，是离束流最近的系统，会经受最高密度的粒子束流，因此在 ATLAS 所有子探测器中具有最高的分辨率。Pixel 在桶部区有四层，由 1744 个模块组成 (module)，端盖区有三层，含有 288 个模块。桶部区的最内层在 Run 1 和 Run 2 之间安装，主要用于提高 b -jet 鉴别。每个 Pixel 模块含有 46080 个电子学读出道，Pixel 探测器总共有 8 千万读出道。模块面积为 $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ ，其位置分辨率可达 $10 \mu\text{m}$ ($r-\phi$) , $115 \mu\text{m}$ (z 方向)。

硅微条探测器 (Semiconductor silicon Strip Detector, 称 SCT) 桶部区有四层，端盖区有 9 层。SCT 模块只能提供二维位置信息，所以每层 SCT 两个模块背靠背以一定角度粘贴在一起，当粒子穿过时，就可提供三维位置信息。一般 SCT 的分辨率为 $17 \mu\text{m}$ ($r-\phi$) , $580 \mu\text{m}$ (z 方向)。SCT 的总读出电子学道为 630 万。

穿越辐射探测器 (Transition Radiation Tracker, 称 TRT) 由大约 30 万，直径为 4 mm 充满 70% 氩气，20% CF_4 ，10% 二氧化碳的漂移管组成，桶部区的漂移管与

轴线平行，端部区的漂移管则成辐射状，其总的电子学读出道为 351,000。带电粒子穿过漂移管电离气体，电子在电压作用下达到管中心丝。桶部区（端部）只提供 $r - \phi$ (r-z) 方向的位置测量。

TRT 还有助于带电粒子识别。TRT 管与聚丙烯纤维和箔层交错：通过具有不同折射率的材料之间的边界区域的带电粒子发射 X 射线辐射，其强度与粒子本身的相对论 γ 因子成比例。通过这种 X 射线在吸管气体中的光电效应产生的电子产生的信号具有比源自经过的颗粒的信号更高的振幅。鉴于它们的轻质量，当它们的动量接近 1 GeV 时，电子开始产生过渡辐射，而 π 介子仅在 O (100) GeV 动量范围内开始辐射。这条信息与电子识别算法有关。

ID 可为粒子径迹重建提供 36 个着火点。联合这三个子探测器的信息，ID 可测量 p_T 低至 400 MeV 的粒子，其相应的动量可由如下公式 [19] 描述：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = 0.05\% p_T \oplus 1\% \quad (4.1)$$

4.3 量能器

ATLAS 量能系统 [19] 包括几个具有不同技术和粒度的组件，涵盖非常大的范围 ($|\eta| < 4.9$)。所有组件都是采样量能计，带有被动态非活性材料，可以产生电磁/强子簇射，这些簇射被连接到活性材料层，以检测一小部分进入的粒子能量。能量通过测试束流 [24, 25] 进行校准，并在碰撞数据中验证。ATLAS 量能器的布局如图 ?? 所示。螺线管外部最里面的部分是电磁量能器 (EM)，专门用于电子和光子的能量测量。它使用液氩 (LAr) 作为活性介质，具有优异的辐射硬度和能量分辨率，并容易产生电磁簇射。电极是镀有铜的电镀铜板，分成条带，构成读出单元。EM 桶部覆盖到 $|\eta| = 1.4$ ，端盖系统延伸到 $|\eta| = 3.2$ 。它分为 3-4 层，具有类似手风琴的几何形状，可提供完整的 ϕ 覆盖而不会出现死区，并且在 ID 探测范围内 ($|\eta| < 2.5$) 具有精细的 $\Delta\eta \times \Delta\phi$ 分辨，最小值为 0.025×0.025 ，可以分辨 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 。EM 厚度在桶部大于 22 个辐射长度 (X0)，在端盖区域中大于 24 倍 X0，这样才能确保接收绝大多数电磁簇射。过渡区域，即 $1.37 < |\eta| < 1.52$ ，由于大多数服务设施都位于此，能量测量部分缺乏，会有较差的能量测量表现。EM 能量分辨率可描述为 [19]：

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\% \quad (4.2)$$

强子量能器 (HCal) 包围着 EM 量能器，专门用于测量中子， π 介子和中子等强子的能量。桶区 $|\eta| < 1.7$ 由三层钢-塑料闪烁体采样量能仪 (TileCal) 组成，其

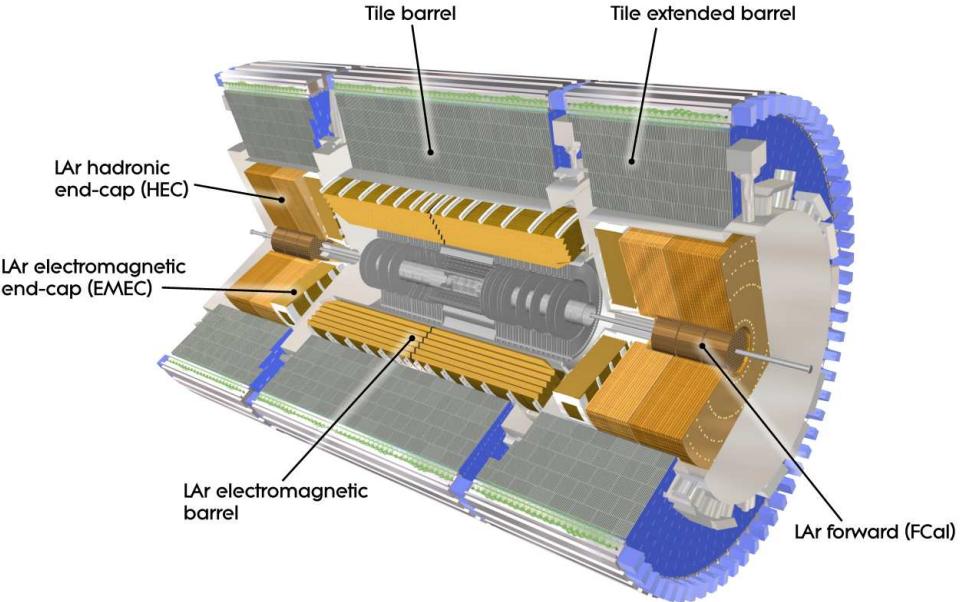


图 4.3 ATLAS 量能器布局

在 $\eta = 0$ 时总厚度为 9.7 倍相互作用长度 (λ)。这最大限度地强子簇射穿透 HCal 并到达外部 μ 子光谱仪。强子端盖量能器 (HEC) 覆盖 $1.5 < |\eta| < 3.2$, 尽管使用铜作为被动材料并为平面状, 但是与 HCal 采用相同的液态氩技术。强子量能器的粒度比 EM 更粗, $\Delta\eta \times \Delta\phi$ 为 0.1×0.1 , 并且由于强子与材料核相互作用的性质, 能量分辨率更差 [19]:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\% \quad (4.3)$$

最后, 3 层前向热量计 (FCal) 覆盖 $3.1 < |\eta| < 4.9$ 以测量缺失的横向能量和前向喷注。它利用 LAr 技术, 分别用铜和钨作为第一层和最后两层的吸收材料。

4.4 μ 子光谱仪

μ 子光谱仪 (MS) 环绕着量能器, 是 ATLAS 最外层的子探测系统, 用于测量穿过 ID 和量能器的 μ 子动量和位置。MS 系统有大约 100 万个电子学读出道, 从半径 5 米延伸到 10 米, 在 $|\eta|=0$ 处因为服务电缆有一个小间隙。MS 桶区由 3 个同心圆柱体组成, 设计用于测量动量高于 5 GeV 的 μ 子, 其分辨率在 100 GeV 时为 3%。端盖区有四个轮状部分, 覆盖到 $|\eta| < 2.7$ 。与 ID 类似, MS 也可测量 μ 子动量, 其磁场由大型空心环形磁体系统提供, 大小在 0.5 T 和 1 T 之间。

μ 子室有两组系统: 一组用于 μ 子轨道的精确测量, 第二组用于 μ 子触发。精密

腔室包括监测漂移管 (MDT) [26] 和阴极条带室 (CSC) [27]。MDT 涵盖 $|\eta| < 2.7$ 的大部分区域，除了端盖最内层安装 CSC 区域 $2.0 < |\eta| < 2.7$ 。MDT 由 3cm 直径的漂移管组成，其含有 93% 氩和 7%CO₂ 的混合物。每根管具有单根钨-铼线，其在 3kV 的电压下操作，基于入射粒子产生的电离电荷的漂移时间可测量其相对位置。单管的典型空间分辨率低于 $100\mu m$ ，并且通过在每个腔室中使用 3 或 4 层管取决于其在检测器中的位置而改善至约 $50\mu m$ 。

CSC 由具有正交平面阴极的多丝比例室组成。它们可以处理更高的粒子流并且具有比 MDT 更高的辐射耐受性，因此被放置在粒子通量较大的前向区域 $2 < |\eta| < 2.7$ 。径向导线保持在 1.9kV 的电位，并与每个条状阴极保持 2.5mm 的距离。在弯曲平面的 CSC 探测器寻迹分辨率约为 $60\mu m$ 并且具有高抗辐照性，因此用在 MS 的第一层。

精密腔室通常具有长的电荷收集时间，MDT 约为 700ns，CSC 约为 40ns。收集时间的巨大差异是因为 MDT 和 CSC 的设计不同。MDT 是在中心丝上施加电压的管，其中电场以 $1/r^2$ 下降 (r 是与中心丝的距离)。而 CSC 是具有恒定电压差和恒定场的平坦腔室。两个专用触发室提供快速测量，用于触发决策。 μ 子事件的触发系统基于电阻板腔 (RPC) [28] 仪器在桶区域 $|\eta| < 1.05$ ，而薄间隙腔 (TGC) [29] 用于端盖区域。RPC 由平行电极板组成，它们相距 2mm 并填充有 C₂H₂F₄ 的气体混合物，工作在 9.8kV 的电压，有非常好的时间分辨率约为 2ns。TGC 由多线比例室组成，具有 CO₂ 和 n-C₅H₁₂ 的气体混合物。TGC 的阳极线距离带状阴极 1.4mm，之间的电位差为 2.9kV，时间分辨率为 4ns。

环形磁铁在方位角平面上产生 0.5T 至 1T 的磁场。桶部中有八个矩形线圈，覆盖 $|\eta| < 1.6$ ，每个端盖中有 8 个线圈，覆盖 $1.4 < |\eta| < 2.7$ 。线圈由铝，铜，镍和钛的混合物构成，并用液氦冷却至 4.5K。MS 的 μ 子 p_T 分辨率受到磁场不均匀性的限制。

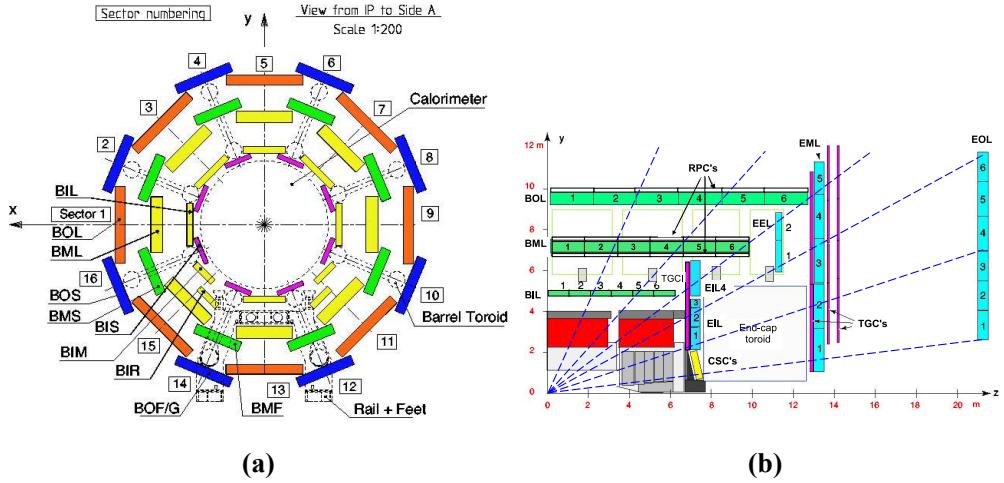


图 4.4 (a) Cross-section of the barrel muon system perpendicular to the beam axis (non-bending plane), showing three concentric cylindrical layers of eight large and eight small chambers. The outer diameter is about 20m. (b) Cross-section of the muon system in a plane containing the beam axis (bending plane). Infinite-momentum muons would propagate along straight trajectories which are illustrated by the dashed lines and typically traverse three muon stations.

4.5 触发和数据采集系统

LHC 束团间距为 25ns，那么束团碰撞率为 40MHz，质子非弹性散射率接近 1GHz，平均 pileup 数为 23.7，考虑到电子读出系统和数据存储能力的限制，ATLAS 触发和数据采集系统 (TDAQ) [30] 是探测器的基本组成部分，它负责决定是否为以后的离线研究保存事件。

TDAQ 有两级：基于硬件的使事例率降低至 100 kHz 的 Level-1 触发器 (L1)，以及基于软件的高级触发器 (HLT) 系统。HLT 使用 40,000 个 CPU，并在一次 LHC 填充 (fill) 期间以 1 kHz 的平均速率选择事件，这是离线计算模型和存储可以处理的最大值。

L1 触发器包括中央触发处理器 (CTP)，它处理来自 L1 量能器 (L1Calo) 和 L1 μ 子 (L1Muon) 触发子系统的输入。L1Calo 直接从量能器获取信息。L1Muon 利用桶部 ($|\eta| < 1.0$) RPC 和 $1.0 < |\eta| < 2.4$ 区的 TGC 进行测量。为了应对更高的事件发生率并有效地选择感兴趣的物理事件，在 2016 年一个称为 L1 拓扑处理器 (L1Topo) [31] 的新元素添加到 L1 中。L1Topo 系统从 L1Calo 和 L1Muon 获取信息，可以计算不变质量等物理变量以用于 L1 决策。由于 L1 电子设备的延迟为 $2.5\mu\text{s}$ ，CTP 也应用预防性死时间，设置 L1 连续两次接受决策之间的最短

时间以避免重叠读出窗口，并限制在给定 bunch-crossing 数目内 L1 接受决策数以避免前端缓冲区溢出。

在 L1 触发接受之后，HLT 使用更细粒度的量能器信息，来自 MS 的精确测量和来自 ID 的径迹信息来处理事件。为了最大限度地提高效率，HLT 软件经过调整，使算法和选择尽可能接近离线重建。HLT 接受的事件最终存储在磁盘上，并导出到 CERN 计算中心进行离线重建。根据需要，HLT 可以处理来自 L1 处识别的兴趣区域（RoI）或来自完整探测器的信息。ATLAS 触发系统的完整方案如图 4.5 所示。L1 和 HLT 步骤的触发决策是对物理对象和筛选算法的一系列

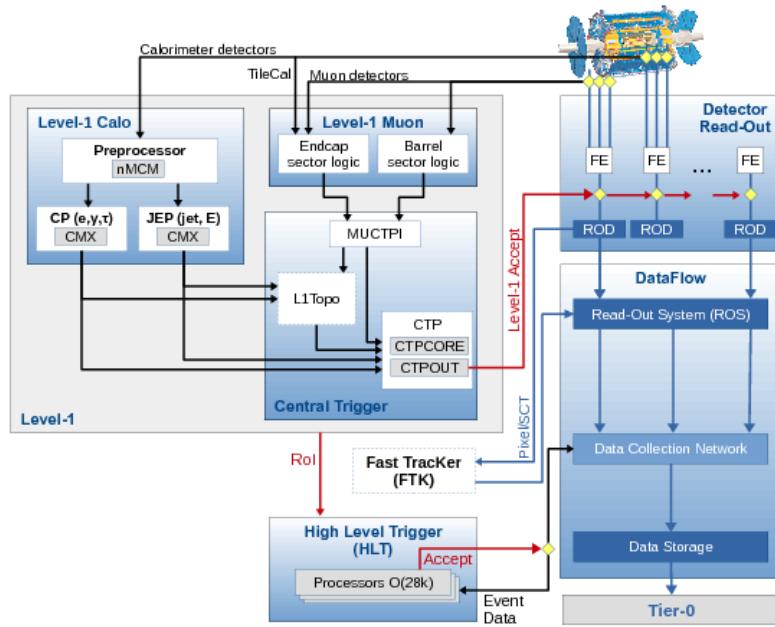
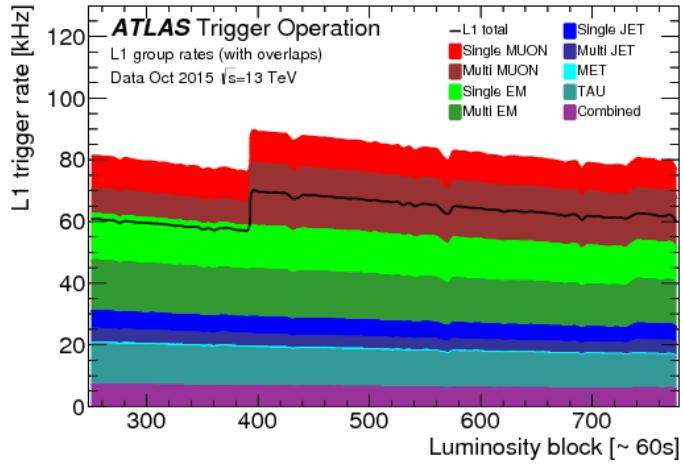
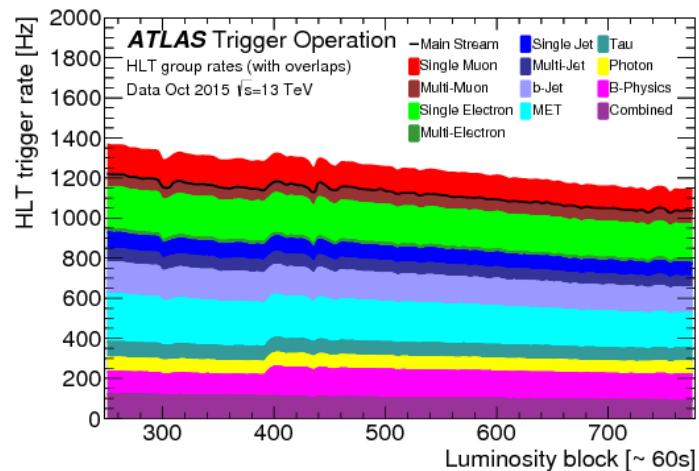


图 4.5 The ATLAS TDAQ system in Run 2 with emphasis on the components relevant for triggering. L1Topo and FTK were being commissioned during 2015 and not used for the results shown here. [30]

要求的结果，而这些定义了所谓的触发菜单。菜单中的主要触发器涵盖了各种 ATLAS 物理搜索所需的所有信号，包括电子， μ 子，光子， τ 轻子，喷注和丢失能量 (MET)。触发菜单组成和触发阈值针对若干亮度范围进行了优化，以便最大化实验的物理输出并且满足 ATLAS 探测器读出速率和带宽限制。许多 ATLAS 分析的主要特征信号，包括 $hh \rightarrow 4W$ 搜索，是电子或者 μ 子。因此，在事件中需要存在至少一个 $p_T > 25$ GeV 轻子的触发占据可用带宽的很大一部分，如图??所示。



(a)



(b)

图 4.6 (a) L1 and (b) HLT trigger rates grouped by trigger signature during an LHC fill in October 2015 with a peak luminosity of $4.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Due to overlaps the sum of the individual groups is higher than the (a) L1 total rate and (b) Main physics stream rate, which are shown as black lines. Multi-object triggers are included in the b-jets and tau groups. The rate increase around luminosity block 400 is due to the removal of prescaling of the B-physics triggers. The combined group includes multiple triggers combining different trigger signatures such as electrons with muons, taus, jets or MET. [30]

²⁶The combined group includes multiple triggers combining different trigger signatures such as electrons with muons, taus, jets or MET. [30]

第 5 章 事例重建

重建是指将探测器各个子系统的着火点或者能量沉积的低级信息转换成与对撞中产生的粒子相关的高级信息的过程。ATLAS 中的重建是一个由集中式软件框架中的众多算法执行的复杂的多步骤过程 [32]，其最终输出是用于各种物理分析的物理对象（也简称为“对象”），包括电子，光子， μ 子，喷注和强子 τ 候选者，以及丢失能量 (MET)。下面将概述重建这些物理对象的基本步骤，更多地关注与本文中 hh 和 $t\bar{t}H$ 搜索相关的对象。

5.1 径迹和能量簇射

重建的基本输入时径迹和能量簇射。

径迹是由带电粒子经过 ID 或者 MS 造成的一系列着火点构成的。径迹重建 [33] 的初始种子是探测器 (Pixel 和 SCT) 中的三个空间着火点。它们通过组合迭代算法形成径迹候选者，随后拟合到考虑过材料效应，能量损失和多次散射以及磁场非均匀性的螺旋轨迹 [34]。然后通过根据每个候选者的属性（例如重合测量数量和拟合质量）对轨迹进行排序来解决模糊性。最后，轨迹被外推到 TRT，并且在完整轨迹上执行新的拟合。然后基于重建径迹使用专业算法 [35] 决定每个束团对撞的顶点候选者，以及可用于识别重味喷注的次级顶点。

μ 子候选者的径迹通过连接 ID 中的轨迹与 MS 重建的轨迹得到。MS 轨道搜索算法 [36] 首先搜索精密室中的命中模式，以在每层中形成直线轨道段；然后通过片段种子组合算法找到 μ 子 MS 径迹候选者，并且根据全局 χ^2 拟合得分接受或拒绝与每个候选者相关联的着火点。

来自量能器的能量簇射是 ATLAS 中粒子重建的另一个基本输入。穿过量能器的电子，光子和强子与活性材料相互作用产生次级粒子的级联而失去能量，从而在纵向和横向留下几个量能器单元的信号。来自电子和光子的簇射主要包含在 EM 量能器中，而强子通常在 HCal 中产生簇射。簇射算法 [37] 将着火单元组合在一起，根据粒子种类使用不同的逻辑，并将每个簇射内的总沉积能量相加，同时确定位置。根据进入的粒子类型（电子和光子，或强子射流），校准能量以补偿簇射外或者死区的能量沉积。

结合径迹和量能器簇射信息最终可以鉴别物理对象，图 5.1 显示 ATLAS 不同粒子的径迹和能量沉积模式。

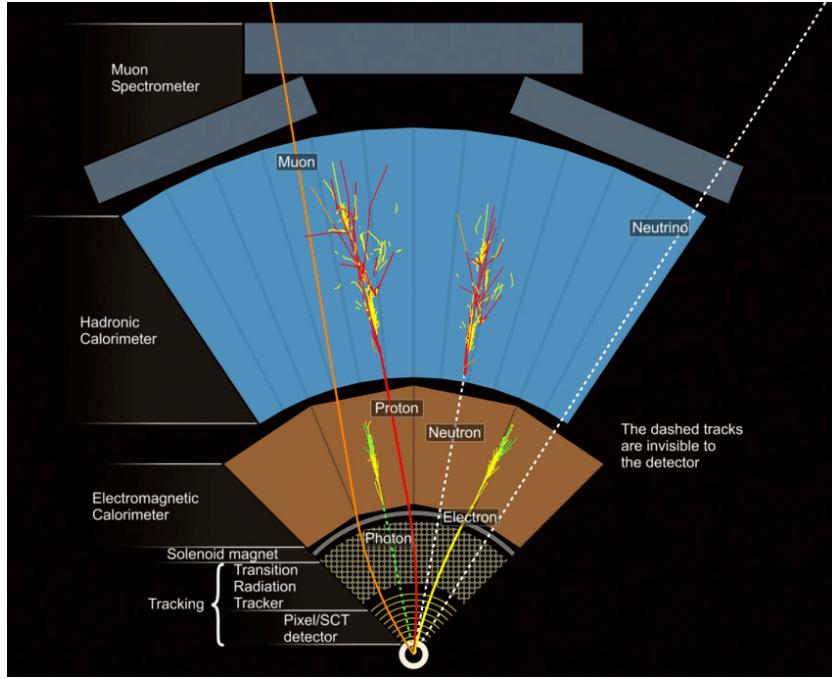


图 5.1 A ($r - \phi$) view of a slice of the ATLAS detector, showing the typical signature of the physics objects reconstructed by the ATLAS software algorithms obtained by combining tracks and energy clusters. Image courtesy of the ATLAS Experiment.

5.2 电子

电子和光子在 EM 量能器中有非常相似的特征。两个对象之间的主要区别在于电子也会在 ID 中留下径迹。ATLAS 有许多基于光子末态的物理分析，因为它们具有非常好的能量分辨率。然而，本文分析并没有涉及光子，所以不会讲述光子鉴别，光子重建的细节可以在参考文献 [38] 中找到。

对于电子，其簇射通过滑动窗口算法进行 [37]，即在一定范围内搜索使 3×5 单元窗口（单元大小为 0.025×0.025 , $\eta \times \phi$ ）内具有最大沉积能量并将其作为初始簇射种子，即塔（tower¹），电子径迹重建如前面讲述，但考虑到电子通过 ID 时因韧致辐射造成的稍大的能量损失，会使用特定的模式识别和拟合假设。使用高斯和滤波器（Gaussian Sum Filter）[39] 重新拟合在 (η, ϕ) 平面与 EM 簇射松散匹配的电子轨迹，以更好地考虑致辐射过程中的非线性。然后，在更严格的条件下匹配重新拟合后的轨迹与簇射，例如要求一定的最小硅着火点数以及在最内层 Pixel 中存在着火点以排除在 ID 中转换的光子。电子能量由 EM 簇射给出，其最终校准基于蒙特卡罗模拟 [40]，而 η 和 ϕ 坐标由相应的轨道参数给出。

¹A tower in the EM calorimeter represents the set of cells contained in a 0.025×0.025 (η, ϕ) unit spanning longitudinally over the 3(4) calorimeter layers.

电子重建仅针对 $|\eta| < 2.47$ 和 $E_T > 7 \text{ GeV}$, 对于 $p_T > 15 \text{ GeV}$ 电子, 重建效率大概在 97% 到 99%。重建效率的测量基于 $Z \rightarrow ee$ 和 $J/\Psi \rightarrow ee$ 事例 [41] **Update?**, 其结果如图5.2所示, 数据和模拟样本中的效率差别在 $O(1)\%$ 水平, 而且在实际分析中此相对差别会作为修正因子考虑到 MC 中。电子鉴别 (ID) 通过基于似然函

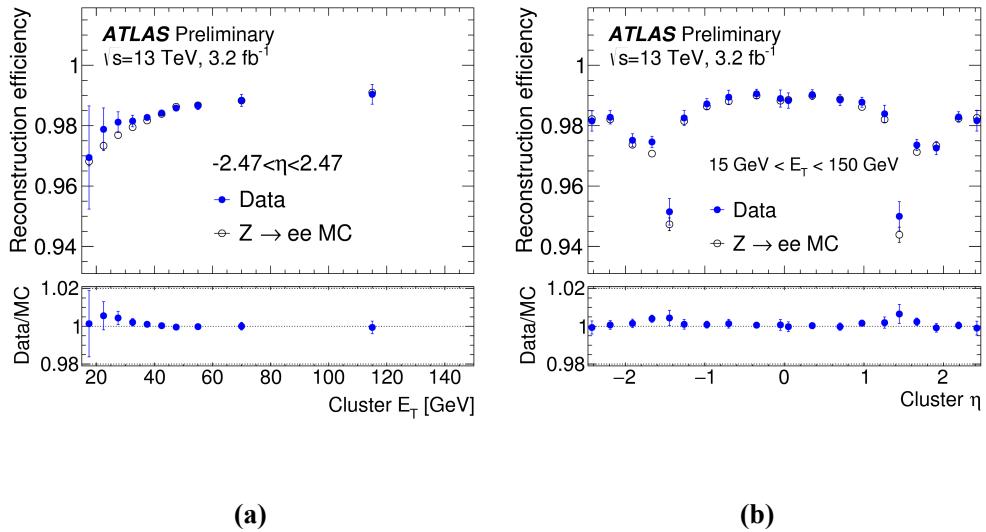


图 5.2 Electron reconstruction efficiency in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events, as a function of E_T and η [41]

数多变量判别式 [41] 进行。算法的输入变量包括量能器簇射形状, 基于 TRT 穿越辐射的似然概率和轨道-簇射匹配相关量, 以及轨迹的测量总数和 IBL 中的测量数量和韧致辐射变量。基于不同鉴别效率, 定义三个电子鉴别工作点, 分别命名为 **Loose**, **Medium** 和 **Tight**。对于 $E_T = 25 \text{ GeV}$ 真实电子而言, 它们的鉴别效率在 78-90%, 而相应的本底误判率为 0.3-0.8%。图5.3展示各个工作点随 pileup 数的变化情况, 基本上其效率比较稳定。 $Z \rightarrow ee$ 和 $J/\Psi \rightarrow ee$ 事例也用来测量触发效率 [41]。图5.4展示 2015 年使用的单电子触发器²效率随 E_T 和 η 的变化, 在 $E_T > 27 \text{ GeV}$ 时, 触发效率可达 95%, 数据与 MC 之间的差别在 5% 以内。最大的偏差发生在 24 GeV 附近, 这是因为在 L1 阶段, 数据与 MC 使用了不同的阈值, MC 会根据这些差别进行修正。

²HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH

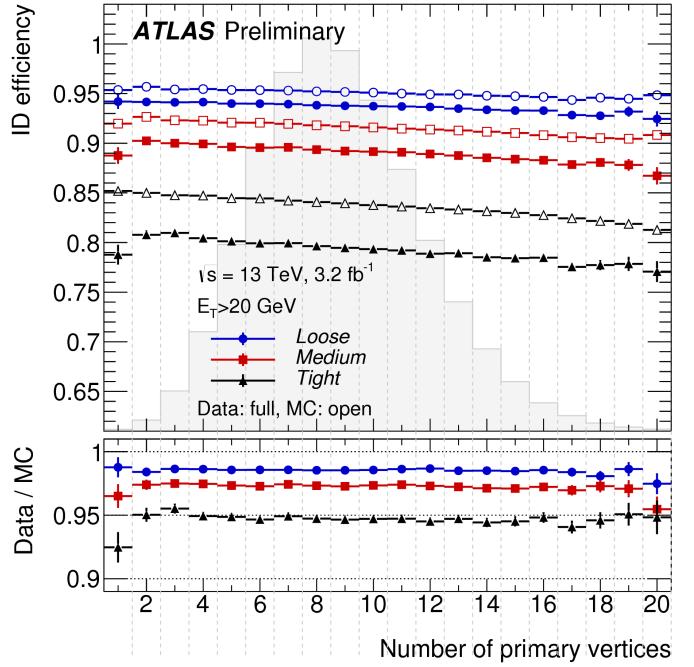


图 5.3 Efficiencies in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events for the different electron ID likelihood operating points as a function of the number of reconstructed primary vertices (whose distribution is overlaid in background)[41]. The latter is an alternative measurement to $\langle \mu \rangle$ of the pileup effect, and is directly sensitive to charged particle activity in the ATLAS detector.

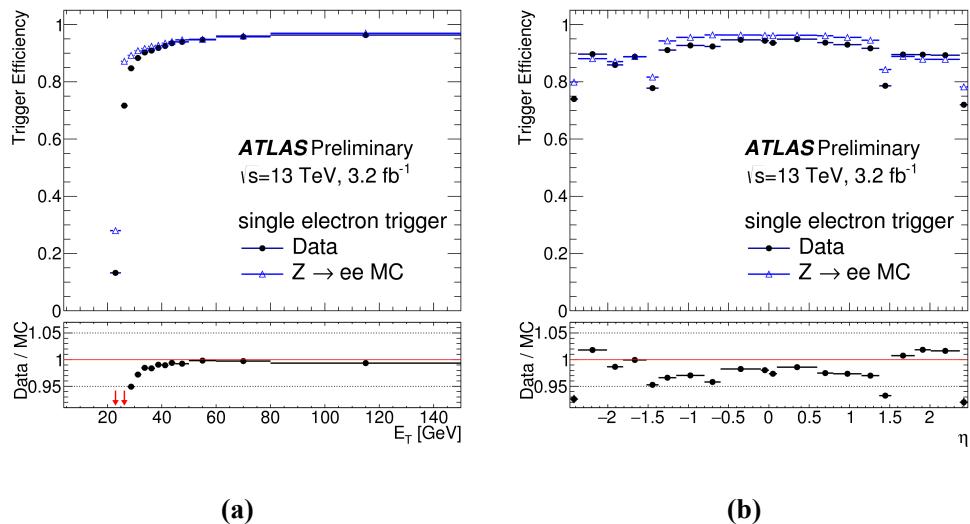


图 5.4 Electron trigger efficiency in 2015 data and simulated $Z \rightarrow ee$ events for the main single electron trigger chain of 2015, as a function of E_T and η [41].

5.3 μ 子

μ 子重建联合利用 ID 和 MS 的径迹，以及量能器信息，它有四类：

- Combined muons (CB). 这些 μ 子通过同时拟合 ID 和 MS 的着火点得到，在拟合过程中，MS 着火点可以被添加或者移除以改善拟合质量。
- Segment tagged muons (ST). 这类 μ 子代表当完整 ID 轨迹仅与 MDT 或 CSC 中的一个轨道段 (segment) 匹配时的情况，这要么是因为 p_T 低或者因为它们穿过 MS 接收度低的区域。
 - Calorimeter tagged muons (CT). 来自电弱衰变的高动量 μ 子在穿过量能器时仅沉积很少的能量，与最小的电离损失相当。当 ID 轨迹与一个这样的簇射匹配时，则定义为 CT μ 子候选者。这些 μ 子是假的概率较高，但可以在 MS 探测器件较少的 $|\eta| < 0.1$ 区找回一些。
- Extrapolated muons (ME). 为了处理 ID 未覆盖的前向区 $2.5 < |\eta| < 2.7$ ，可以仅重建 MS 的轨迹，然后考虑在量能器内的能量损失后外推回初级顶点。

不同类别的 μ 子重叠消除之后，才定义物理分析可用的对象粒子。值得指出的是， μ 子重建可到 4 GeV。与电子类似，有三个 μ 子质量工作点：Loose, Medium 和 Tight。Tight μ 子仅包括 CB 类，并且有额外的径迹质量要求以压低不是初级顶点来的 μ 子；Medium μ 子也包括 $|\eta| > 2.5$ 的 ME 类，但是要求至少存在要一个 MS 径迹 segment；Loose μ 子也包括 ST 和 CT 类。

μ 子重建效率的评估与电子类似，利用 $Z \rightarrow \mu\mu$ 和 $J/\Psi \rightarrow \mu\mu$ 事例 [42]。对于 Loose 类和 Medium 类，重建效率为 98%，而对于 Tight 类，平均为 95%。图 5.5 总结 2016 年 μ 子重建效率情况，可以看到，数据与 MC 的差别在几个百分点，主要集中在 MDT 对齐稍差的桶部区。 μ 子触发效率 [44] 表现估计与电子类似。图 5.6 展示 L1 MU20 触发器的效率，这类触发要求 MS 中至少存在一个 $p_T > 20$ GeV 的 μ 子候选者。L1 桶部触发效率大约为 70%，而在前向区为 90%，这是因为 RPC 比 TGC 更少的几何接收度。然而对于通过 L1 的 μ 子，HLT 触发效率可达 100%。数据与 MC 之间的触发效率在几个百分比水平。MC 中 μ 子动量大小和分辨率会根据对撞数据校准 [42]，其相对分辨率在 1.7% 与 2.9% 之间，在校准之后，对于大部分 $|\eta|$ 区域数据与 MC 的分辨率相差在 5% 以内。

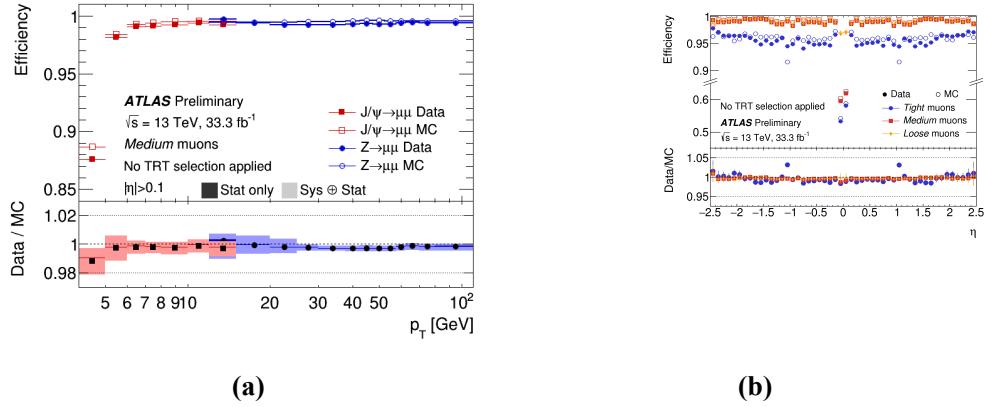


图 5.5 Muon reconstruction efficiency in 2015, 2016 data and simulated $Z \rightarrow \mu\mu, J/\Psi \rightarrow \mu\mu$ events, as a function of p_T (for Medium muons only, and inclusively for $|\eta| > 0.1$) and η [43].
The recovery in efficiency in $|\eta| < 0.1$ for the Loose working point is due to the inclusion of calorimeter-tagged muons in the object definition.

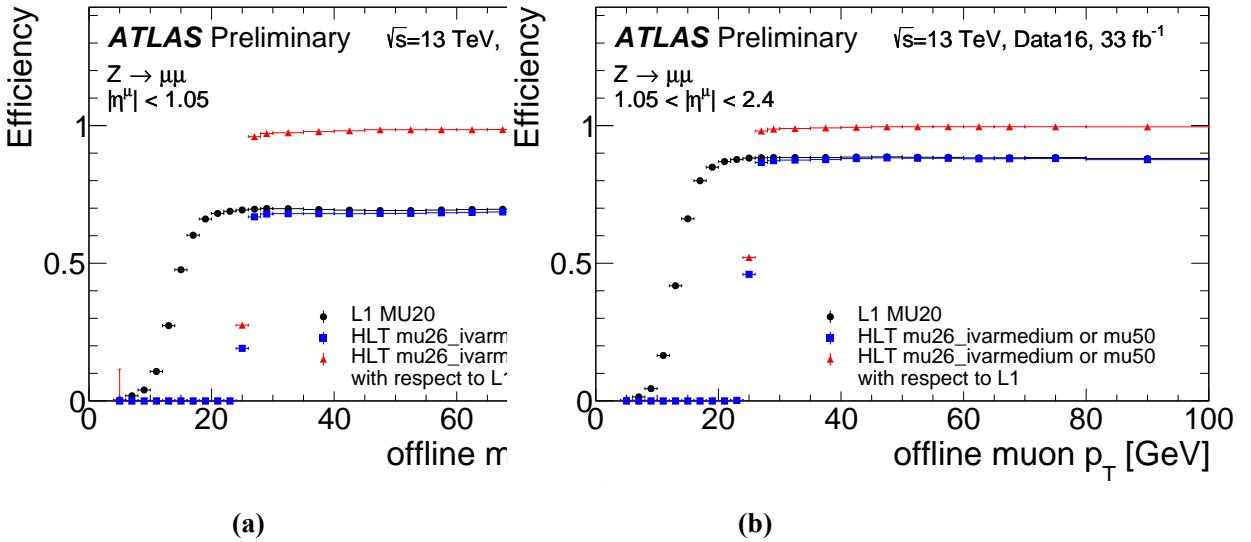


图 5.6 Muon trigger efficiency in 2015, 2016 data events for the L1 MU20 seed and for main single muon HLT trigger chain of 2016, as a function of p_T , for the barrel and end-cap regions, respectively [44]. The online selection at HLT includes a requirement of low activity around the muon candidate (isolation).

5.4 喷注

硬散射过程中的末态夸克和胶子（也包括初态辐射）会通过虚胶子的微扰辐射产生部分子簇射，当簇射能量传递下降到典型的强子尺度 $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$ 时，QCD 微扰论不再适用，强子化过程开始，即形成无色荷的束缚态。

从探测器角度看，强子化的结果是一束相互比较靠近的强子，被称为喷注（jet），显然，喷注的能量和方向是与初始部分子直接相关的。ATLAS 喷注重建算法的输入是拓扑相连的簇射（topoclusters），topoclusters 由相邻的单元组成，只要单元中的信号比噪声显著 [45]。在本文物理分析中使用的喷注是由在电磁能量标度（EM）下校准的 topoclusters 构建的，它正确地测量了量能器中电磁簇射的沉积能量 [46]。

本文使用的喷注是利用 anti- k_t 算法 [47] 在 $\Delta R=0.4$ 范围基于 topoclusters 构建的，其 ($p_T > 25 \text{ GeV}$) 能量大小和分辨最终通过仿真的技术校准到真实部分子能量，而且在 data-driven 中得到证实 [48, 49]。

$p_T < 60 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.4$ 的喷注有一定概率的来自 pileup，一个称为喷注顶点标记（JVT）[50] 的算法通过关联喷注径迹与顶点可以压低 pileup 影响。在 $t\bar{t}H$ 分析对该算法的应用中，每个喷注的平均关联效率为 92%。JVT 的效率利用 $Z \rightarrow \mu\mu + \text{jets}$ 事例校准，最终的 MC 的修正因子在 1-5% 之间。

顶夸克是标准模型中最重的粒子，不会强子化，几乎百分百衰变到 $W + b$ 。来源于 b 夸克的喷注一般会包含 B^\pm 介子，而 B^\pm 介子衰变之前会经过一段宏观可探测到的距离 ($c\tau_{B^\pm} \approx 0.5 \text{ mm}$)。这个性质可以用来标记来源于 b 夸克的喷注，从而间接标记顶夸克。在 ATLAS 实际应用中，一个联合利用喷注径迹影响参数，次级顶点，以及 b 或 c 强子衰变拓扑结构的多变量学习算法 MV2[51, 52] 开发出来用于标记 b 喷注。在本文的 hh 和 $t\bar{t}H$ 分析中使用的是 MV210，它的训练样本是 $t\bar{t}$ ，并且假设本底是 93% 轻夸克喷注与 7% c 夸克喷注，所使用的工作点对应 70% b -tagging 效率，以及对 c 喷注（轻味喷注）的拒绝因子（rejection factor）为 12 (381)。而后使用与 Run 1 类似的方法 [53] 校准 MC b -tagging 效率到数据，基本上修正因子在 5% 以内，最大的系统误差不超过 10%。Update?

5.5 τ_{had}

τ 轻子有较大的质量 ($\approx 1.77 \text{ GeV}$)，并且并不稳定，大约 36% 衰变道电子或者 μ 子，而剩下的 64% 衰变到强子。对于强子化衰变的 τ 子，标记为 τ_{had} ，主要有两类，一类是末态有一个带电 π 介子 (1-prong)，另一类是有三个带电 π

介子 ($3-prong$)。因为 τ 轻子的衰变长度很短 ($c < \tau > \approx 87\mu\text{m}$)，非常靠近顶点，区分来源于 τ 轻子与直接来源于顶点的电子或 μ 子比较困难，而 τ_{had} 在 ID 中有 1 条或者 3 条径迹，并且相对准直的径迹与能量簇射使得重建比较可行。关于 τ_{had} 的重建及鉴别可参见 [54]。 $t\bar{t}H$ 分析中几个分析道都包含 τ_{had} 末态，它可以用来压低 QCD 喷注本底。Update?

5.6 丢失横动量

在横截面平面，总动量为零，那么可以定义丢失横动量如下：

$$\vec{E}_T^{miss} = \vec{E}_x^{miss} + \vec{E}_y^{miss} = - \sum \vec{E}_T^{vis} \quad (5.1)$$

\vec{E}_T^{miss} 包含不与探测器反应的中微子或者刚好穿过探测器死区的粒子。丢失横动量的大小定义为：

$$E_T^{miss} = \sqrt{(E_x^{miss})^2 + (E_y^{miss})^2} \quad (5.2)$$

$$E_{x(y)}^{miss} = - \sum E_{x(y)}^{vis}. \quad (5.3)$$

ATLAS E_T^{miss} 重建算法 [55] 会考虑所有校准之后的重建粒子作为方程 5.3 右端的输入，即：

$$\begin{aligned} E_{x(y)}^{miss} = & E_{x(y)}^{miss,e} + E_{x(y)}^{miss,\gamma} + E_{x(y)}^{miss,\tau} + E_{x(y)}^{miss,jet} + \\ & E_{x(y)}^{miss,TST} + E_{x(y)}^{miss,\mu} \end{aligned} \quad (5.4)$$

其中，TST (TrackSoftTerm) 指 ID 中未与其他粒子重建联系起来的低动量径迹，另一方面，这一项也可以使用量能器中未被其他粒子重建使用的能量，但会导致 E_T^{miss} 有很强的 pileup 依赖。 E_T^{miss} 的重建表现可见 [55]

第 6 章 事例仿真

物理分析的一项重要目标是比较高能对撞的观测数据和某些假设或者预测模型，包括某些感兴趣的物理过程以及相应本底过程。通常情况下，可用的观测数据数量有限，不足以提供足够精度去描述需要的物理过程，尤其是当该物理过程截面本身很小时。所以，对标准模型物理过程以及新物理模型进行仿真是非常有必要的，可以提供大量的仿真事例用来理解与研究。

ATLAS 的仿真是包括事例产生和探测器模拟的多步骤过程。一个典型的质子质子对撞过程如图 6.1 所示，一般关心的是携带大动量的部分子的碰撞，即硬散射过程，而后衰变，部分子簇射以及强子化，得到稳定粒子，这些都通过蒙特卡罗事件产生子（Monte-Carlo generator）模拟 [56]。最后，模拟稳定粒子与探测器的相互作用。

- 整合所仿真的物理过程的相空间（运动学，自旋），在一定的 QCD 或者 QED 微扰展开级数下计算并模拟硬散射过程（Matrix element）。
- 利用专用程序模拟硬散射过程的部分子的初态和末态辐射胶子以及紧接的部分子簇射过程（PS），在这一般是使用微扰 QCD 来模拟粒子级联，通常能到次级对数精度（NLL），这个过程直到微扰 QCD 不再适用的尺度 $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$ 才停止。类似 PS，QED 过程的辐射光子利用等价的数学框架模拟。
- 强子化过程不依赖于初始的物理过程，即 Matrix element，它不能使用微扰 QCD 论，目前从第一性原理出发也未能理解，所以一般通过基于实验数据的唯象模型描述，所使用的方法在不同的软件环境中有不同的实现。
- 仿真 underlying event (UE)。UE 代表了碰撞质子中未参与硬散射过程的部分子的强子化，或者它们之间的相互作用，它们可以是微扰 QCD 尺度，也可以在非微扰尺度。同样地。导致 pileup 的 minimum bias 事件也会叠加在硬散射事例中。
- 利用 GEANT4 软件 [58] 模拟前面步骤产生的稳定粒子与探测器的相互作用，探测器的几何形状与材料分布都会考虑 [59]。这个步骤是整个 ATLAS 实验耗费计算资源最多的一环，所以对某些过程使用所谓的快速模拟技术（fast simulation）[60] 以节省计算资源和加快模拟过程。
- 探测器着火点被复现并数字化，而后进行与对撞数据完全一样的事例重建过程，并且以相同的文件格式存储。在这过程中，也对触发决策进行模拟。

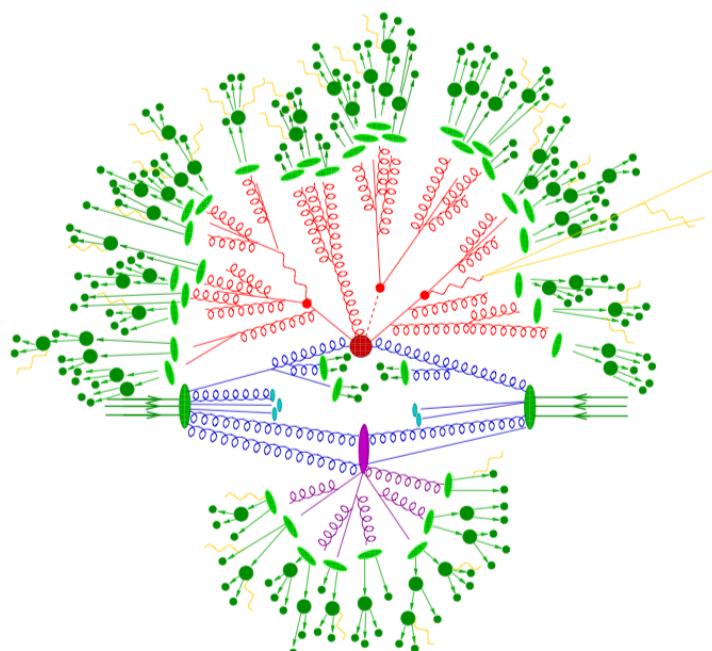


图 6.1 Pictorial representation of a $t\bar{t}H$ event as produced by an event generator. The hard interaction (big red blob) is followed by the decay of both top quarks and the Higgs boson (small red blobs). Additional hard QCD radiation is produced (red) and a secondary interaction takes place (purple blob) before the final-state partons hadronise (light green blobs) and hadrons decay (dark green blobs). Photon radiation occurs at any stage (yellow).[57]

如前所述，仿真样本的重建效率，鉴别效率，触发效率和能量刻度以及能量校准都会乘上一定的修正因子使之与真实数据匹配，需要注意的是，pileup 仿真强烈依赖假设的对撞条件。

第二部分

hh/SS 信号寻找

第1章 数据和蒙特卡罗样本

1.1 数据样本

本分析利用 2015 年和 2016 年 ATLAS 探测器收集的质心系能量为 13 TeV 的数据，排除掉受损或者探测器未完全运作时的数据，其积分亮度为 36.1 fb^{-1} 。其中，2015 年和 2016 年的数据收集情况如图 1.1 所示。

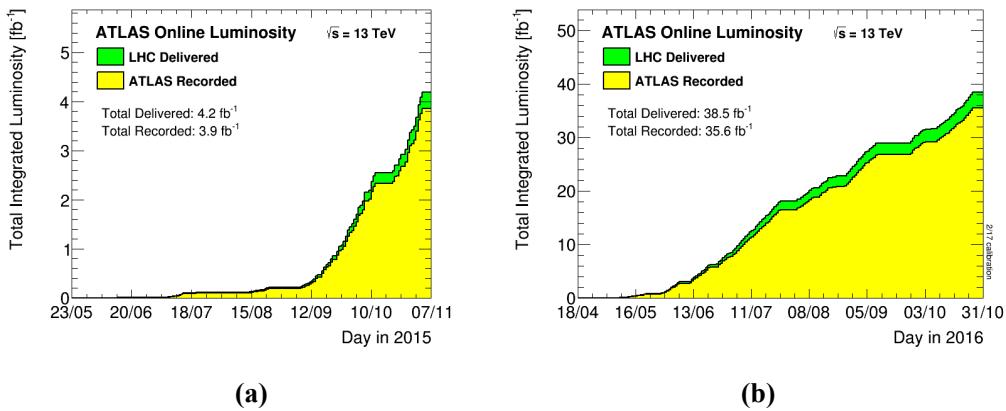


图 1.1 ATLAS 数据收集情况：(a) 2015 年，(b) 2016 年。

1.2 蒙特卡罗样本

1.2.1 信号样本

信号样本包含两种模型，分别为希格斯粒子对 ($gg \rightarrow (X) \rightarrow hh$) 和类希格斯粒子对 ($gg \rightarrow X \rightarrow SS$)。

1.2.1.1 $gg \rightarrow (X) \rightarrow hh$

1. SM 信号（非共振态模式），即 $gg \rightarrow hh$ ，利用包含 NLO 修正的双希格斯粒子模型 [8]，在 MadGraph5_aMC@NLO [61, 62] 中产生。其产生截面为 33.4 fb [63, 64]，考虑了 NNLO QCD 修正和 including resummation of soft-gluon emission at next-to-next-to-leading-logarithmic (NNLL) accuracy for $m_H = 125.09 \text{ GeV}$ 。

2. 共振态模式 ($gg \rightarrow X \rightarrow hh$) 也利用包含 NLO 修正的 2HDMCP_EFT 的信号模型 [65]，在 MadGraph5_aMC@NLO 中产生。其中重标量粒子 X，即共振态粒子，被假设具有远小于实验精度的衰变宽度；在实际模拟中，其宽度设为 10 MeV ，并考虑四个质量点，分别为 $260 \text{ GeV}, 300 \text{ GeV}, 400 \text{ GeV}$ 和 500 GeV 。此过程产生截面假设为 1 pb 。

DSID	lepton charge	m_X [GeV]	Num. Events	Simulation	e/a/s/r/p-tags
344133	++	Non-res	500000	AFII	e5060, a766, a821, r7676, p2949
344134	--	Non-res	500000	AFII	e5060, a766, a821, r7676, p2949
343704	++	260	100000	AFII	e5234, a766, a821, r7676, p2949
343712	--	260	100000	AFII	e5234, a766, a821, r7676, p2949
343706	++	300	100000	AFII	e5234, a766, a821, r7676, p2949
343714	--	300	100000	AFII	e5234, a766, a821, r7676, p2949
343709	++	400	100000	AFII	e5153, a766, a821, r7676, p2949
343717	--	400	100000	AFII	e5153, a766, a821, r7676, p2949
343711	++	500	100000	AFII	e5153, a766, a821, r7676, p2949
343719	--	500	100000	AFII	e5234, a766, a821, r7676, p2949

表 1.1 Summary of the MC hh samples which have been produced for study.

两个希格斯粒子均被要求衰变到 W 玻色子对，随后，其中两个 $W^+(W^-)$ 被要求衰变到轻子（包括 τ ），而另两个 $W^-(W^+)$ 则到强子对。这一系列衰变通过 Herwig++ [66] 实现，也包括随后的 showering 和强子化过程，其衰变分支比为 $BR(hh \rightarrow 4W \rightarrow \ell^\pm \nu \ell^\pm qqqq) = 4.4 \times 10^{-3}$ 。两种模式的信号样本的产生情况总结如表 1.1 所示。

1.2.1.2 $gg \rightarrow X \rightarrow SS$

$gg \rightarrow X \rightarrow SS$ 利用 Pythia 8 在 LO 阶产生，PDF 为 A14NNPDF2.3LO，模型为 HiggsBSM:gg2A3， X 和 S 均假设具有远小于实验分辨率的宽度，为各自质量的 1%。与 $gg \rightarrow (X) \rightarrow hh$ 类似， S 被要求衰变到两个 W 玻色子，其中两个 $W^+(W^-)$ 被要求衰变到轻子（包括 τ ），而另两个 $W^-(W^+)$ 则到强子对。随后的 showeringhe 强子化过程也由 Pythia 8 实现。 m_X 和 m_S 选择使得 4W 末态能够最显著。同样的， $gg \rightarrow X \rightarrow SS$ 截面假设为 1 pb，而 $BR(S \rightarrow WW)$ 则依赖于 m_S ，即希格斯粒子在不同质量点的衰变分支比 [67]。表 1.2 总结了此信号样本产生情况。

1.2.2 背景样本

多玻色子 (VV/VVV) 和 $V\gamma$ 样本通过 Sherpa 2.1 [68] 在 NLO 阶产生； $V+jets$ 则通过 Sherpa 2.2 在 NLO 阶产生，此两种过程均采用 CT10 PDF。 VH 利用 Pythia 8 在 LO 阶产生，采用 NNPDF2.3LO PDF。 $t\bar{t}$ 通过 Powheg-Box 2.0 [69] 在 NLO 阶产生，而后传递到 Pythia 8 进行 parton showering 和强子化模拟，采用 PDF 为

Charge	m_X	m_S	BR(two SS leptons)	DSID	N_{events}
++	280 GeV	135 GeV	1.47×10^{-2}	344927	25000
	300 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344928	25000
	320 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344930	25000
	340 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344933	25000
	340 GeV	145 GeV	3.454×10^{-2}	344934	25000
	340 GeV	155 GeV	6.049×10^{-2}	344935	24000
	340 GeV	165 GeV	8.842×10^{-2}	344936	25000
--	280 GeV	135 GeV	1.47×10^{-2}	344937	25000
	300 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344938	25000
	320 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344940	25000
	340 GeV	135 GeV	1.535×10^{-2}	344943	25000
	340 GeV	145 GeV	3.454×10^{-2}	344944	24000
	340 GeV	155 GeV	6.049×10^{-2}	344945	25000
	340 GeV	165 GeV	8.842×10^{-2}	344946	25000

表 1.2 Summary of the MC $X \rightarrow SS$ signal samples used.

NNPDF2.3LO。单顶夸克过程 ($t + X$) 同样通过 Powheg-Box 2.0 在 NLO 阶产生，但传递到 Pythia 6.4 [70] 进行后续模拟，采用 PDF 则为 CT10。 $t\bar{t}V$ 样本则在 NLO 阶通过 MadGraph5_aMC@NLO +Pythia 8 产生，采用 PDF 为 NNPDF2.3LO。 $t\bar{t}H$ 样本通过 MadGraph5_aMC@NLO +Herwig++ 产生，PDF 为 NNPDF3.0 [71]。更多关于这些背景过程的产生及模拟过程可参考文献 [72–74]。

第 2 章 事例筛选和信号优化

2.1 粒子鉴别及筛选

2.1.1 Object definitions in 4W

粒子鉴别遵循 ATLAS 一般流程，如章节 ?? 所述。对于 4W 分析，进一步的粒子筛选条件总结如表 2.1 所示。

粒子	选择条件	
	Baseline	Tight
电子	$E_T > 10 \text{ GeV}$	TightLH ID
	$ \eta < 2.47$, 排除 $1.37 < \eta < 1.52$ 区间	FixedCutTight
	LooseLH ID, Loose isolation	$(E_T^{\text{cone}20}/p_T < 0.06, p_T^{\text{varcone}20}/p_T < 0.06)$
	$ z_0 \sin \theta < 0.5 \text{ mm}, d_0/\sigma(d_0) < 5$	
μ	$p_T > 10 \text{ GeV}$	Tight ID
	$ \eta < 2.5$	FixedCutTightTrackOnly
	Loose ID, Loose isolation	$(p_T^{\text{varcone}20}/p_T < 0.06)$
	$ z_0 \sin \theta < 0.5 \text{ mm}, d_0/\sigma(d_0) < 3$	
Jet	$p_T > 25 \text{ GeV}, \eta < 2.5$	
	$ \text{JVT} < 0.59 \text{ if } p_T < 60 \text{ GeV and } \eta < 2.4$	
MET	$E_T^{\text{miss,TRK}}$	

表 2.1 4W 物理分析粒子筛选条件总结

2.1.2 Overlap removal

经过粒子基准 (baseline) 筛选之后，为了进一步保证没有误重建的重复粒子，专门的 overlap removal 需要完成。该分析中的 overlap removal 总结如表 2.2 所示。

Keep	Remove	Cone size (ΔR)
muon	electron	0.1
electron	electron(lower p_T)	0.1
electron	jet	0.3
jet	muon	$\min(0.4, 0.04 + 10[\text{GeV}]/p_T(\mu))$

表 2.2 Overlap removal in 4W analysis.

2.2 事例筛选

2.2.1 初步筛选

所选事例应当通过如下初步筛选条件:

- **GRL**

2015 data: data15_13TeV.periodAllYear_DetStatus-v79-repro20-02
 _DQDefects-00-02-02_PHYS_StandardGRL_All_Good_25ns.xml

2016 data: data16_13TeV.periodAllYear_DetStatus-v88-pro20-21
 _DQDefects-00-02-04_PHYS_StandardGRL_All_Good_25ns.xml

- **Event cleaning criteria:** cleaning for Tile corrupted events, LAr noise bursts

and corrupted data

- **Vertex criteria:** events are required to contain at least one primary vertex with ≥ 2 associated tracks. The detailed selection on the vertex can be found in [?]

- **Trigger:**

对于 2015 年数据, 满足以下任一 trigger:

- Single lepton triggers:
 - * HLT_mu20_iloose_L1MU15
 - * HLT_mu50
 - * HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH
 - * HLT_e60_lhmedium
 - * HLT_e120_lhloose
- Dilepton triggers:
 - * HLT_2e12_lhloose_L12EM10VH
 - * HLT_e17_lhloose_mu14
 - * HLT_mu18_mu8noL1

对于 2016 年数据, 满足以下任一 trigger:

- Single lepton triggers:

- * HLT_mu24_ivarmedium
- * HLT_mu50
- * HLT_e24_lhtight_nod0_ivarloose
- * HLT_e60_lhmedium_nod0
- * HLT_e140_lhloose_nod0
- Dilepton triggers:
- * HLT_2e17_lhvloose_nod0
- * HLT_e17_lhloose_nod0_mu14
- * HLT_mu22_mu8noL1

与数据一样，模拟样本也应当满足以上 trigger 条件，其相应的 trigger 效率修正已添加到每个样本事例中

- 选择通过章节 2.1.1 所述的粒子。
- **轻子数：**
 - 两个相同电荷的轻子。
 - 每个 **tight** 电子应当满足 $\text{ChargeIDBDTTight} > 0.067$ ，此变量是用来压低“假”电子，如附录 ?? 所述。
 - 至少有一个轻子应当能匹配以上任一或多个 trigger，除此之外，大横动量轻子 p_T 应大于 30 GeV，小横动量轻子大于 20 GeV。
 - 排除掉任何含有 **b-jet** 的事例。
 - $E_T^{\text{miss,TRK}} > 10 \text{ GeV}$ 。
 - 因为 Drell-Yan 过程目前并不能被 MC 很好模拟，所以为了避免此问题，双轻子不变质量应大于 15 GeV。
 - 为了压低来自于 $Z+jets$ 过程的本底（电荷误判）， $|M(\ell\ell) - M(Z)| > 10 \text{ GeV}$ 条件须通过。
 - **jet** 数的要求依赖于质量点的选择，低（高）质量点要求至少 2（3）个 jet。此项会在 ?? 深入讨论。

以上的事例筛选过程总结在表 2.3。最后，通过以上筛选条件的事例根据轻子味道分为三个分析道，为 ee $\mu\mu$ 和 $e\mu$ 。表 2.4 展示了标准模型希格斯对信号经过以上一系列条件时的事例数和效率变化，此处对应亮度为 36.1 fb^{-1} ，截面 ($gg \rightarrow hh$) 为 33.4 fb 。图 2.1（图 2.2）展示所有 hh (SS) 信号样本的经过初步筛选之后的效率，可以看到：一是随着 m_X 或者 m_S 的增加，效率相应增加（对于 SS ，在 $m_X = 340 \text{ GeV}$, $m_S = 135 \text{ GeV}$ 质量点的效率下降是因为从此点开始要求至少三个

	GRL
	Event clean criteria
	Pass any trigger applied
	Select objects following object definitions
	Overlap removal
Pre-selections	<p>Two tight same-signed leptons, with at least one trigger matched</p> $p_T(\ell_1) > 30 \text{ GeV}, p_T(\ell_2) > 20 \text{ GeV}$ b veto
	$E_T^{miss} > 10 \text{ GeV}$
	$M(\ell\ell) > 15 \text{ GeV}$
	$ M(\ell\ell) - M(Z) > 10 \text{ GeV}$ in ee channel
	$N_{jet} \geq 2(3)$

表 2.3 The event cleaning criteria.

jet)；二是 $e\mu$ 道具有最高的效率值， $\mu\mu$ 次之， ee 最低，这是因为理论上 $e\mu$ 的分支比是其他两个道的两倍，以及 μ 比 e 具有更好的鉴别效率。

2.2.2 信号优化

2.2.2.1 hh 信号优化

本分析中的显著信号是两个相同电荷的轻子和 jet 数。两个希格斯粒子倾向于出射到两个相反的半球，随后，两个希格斯粒子均衰变到 W 玻色子，总共四个 W 玻色子中有两个是不在壳的，而在壳的 W 玻色子会贡献相当部分的低动量的 jet ($p_T < 25 \text{ GeV}$)。在图 2.3a 到 2.3e 中可以看到（此图未通过初步筛选条件），很大一部分的第四条 jet p_T 是低于 25 GeV 的，甚至在高质量信号点。那么加上基本的筛选条件之后，大部分信号事例只有三条 jet，如图 2.3f 所示。同时可以发现，对于低质量点，即 $m_X=260 \text{ GeV}$ 和 $m_X=300 \text{ GeV}$ ，其大部分事例最多只有 2 条 jet。所以，对于不同的质量点，应当应用不同的 jet 数条件，对于低质量点，要求 $N_{jet} \geq 2$ ，而高质量点， $N_{jet} \geq 3$ 。为了证实该分类能够给出最高的信号显著性，考虑本底后，详细检查可见附录 ?? 最后，为了提高信号显著性，一系列动力学被重建，从而用来优化信号，具体优化方法会在章节 ?? 具体讨论，以下列出一些具有区分度的变量：

- $M(\ell\ell)$, the invariant mass of two same-signed leptons;
- MET , missing transverse energy;
- $M(jj)^W$, the invariant mass of two closest jets among all selected good jets;

Cut flow	Event yield			Efficiency		
Evgen	-			100%		
HIGG8D1	2.76			56.34%		
Event cleaning	2.76			56.34%		
Trigger	2.10			44.84%		
Channel	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
OB, OLR	0.29	0.28	0.56	5.86%	6.23%	11.96%
Tight leptons, trigger match	0.14	0.20	0.33	2.33%	3.46%	5.68%
$p_T(\ell)$	0.11	0.15	0.24	1.93%	2.70%	4.53%
b veto	0.10	0.14	0.23	1.79%	2.49%	4.18%
MET	0.10	0.14	0.22	1.76%	2.45%	4.10%
Drell-Yan cut	0.10	0.14	0.22	1.76%	2.44%	4.10%
Z veto	0.08	0.14	0.22	1.58%	2.44%	4.10%
$N_{jet} \geq 3$	0.05 ± 0.002	0.09 ± 0.002	0.14 ± 0.003	1.03%	1.92%	2.99%

表 2.4 The cutflow of pre-selection for non-resonant hh signal. The cross-section of $pp \rightarrow hh$ is 33.41 fb. The event yields are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} , corresponding to the final state of two-signed leptons. The statistical uncertainty is added in the last row.

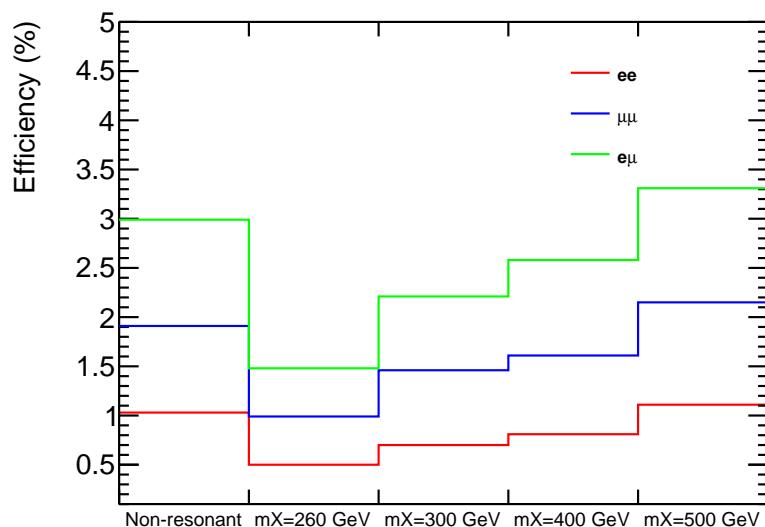


图 2.1 The final efficiency of pre-selections for hh signal samples.

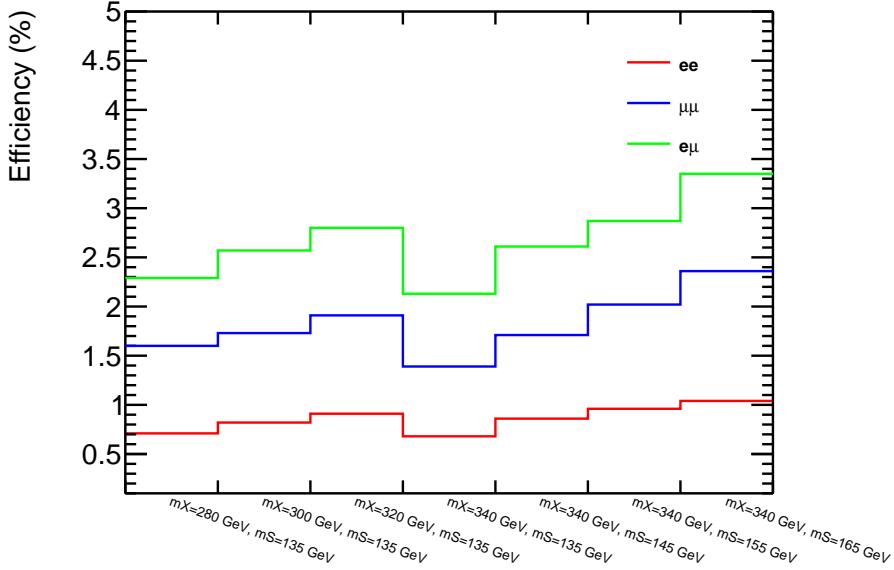


图 2.2 The final efficiency of pre-selections for SS signal samples.

- $M(l_1 jj)$, the invariant mass of leading lepton and two closest jets;
- $M(all)$, the invariant mass of all selected objects;
- M_T , the transverse mass of all selected objects;
- $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$, ΔR distance between leading lepton and the closest jet;
- $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$, ΔR distance between sub leading lepton and the closest jet;

2.2.2.2 SS 信号优化

S 标量粒子所取质量从 135 GeV 到 165 GeV , X 粒子从 280 GeV 到 340 GeV 。
 SS 与 hh 具有类似的动力学性质, 为了尽可能增加信号显著性, N_{jet} 分类适用于此, 具体如下:

- 固定 $m_S = 135 \text{ GeV}$: $m_X = 280 \text{ GeV}$, $m_X = 300 \text{ GeV}$ and $m_X = 320 \text{ GeV}$; $N_{\text{jet}} \geq 2$ 。
- 固定 $m_X = 340 \text{ GeV}$: $m_S = 135 \text{ GeV}$, $m_S = 145 \text{ GeV}$, $m_S = 155 \text{ GeV}$ and $m_S = 165 \text{ GeV}$; $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。

前述章节 2.2.2.1 的动力学变量也可用来进一步优化信号显著性。

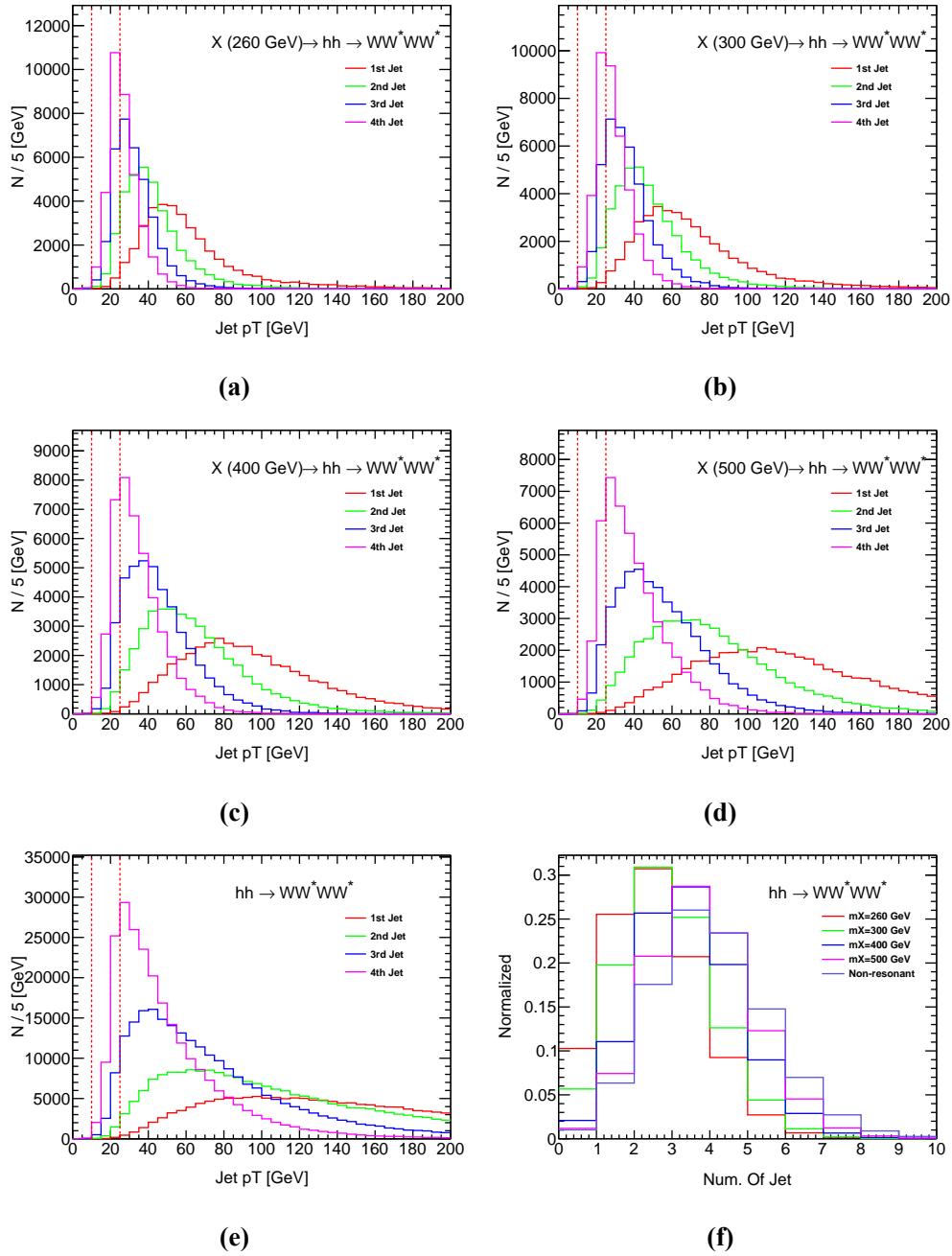


图 2.3 Distributions of p_T and number of jet for signal. Figure 2.3a to Figure 2.3e are distributions of p_T of jet before 25 GeV cuts, corresponding for $mX=260, 300, 400, 500 \text{ GeV}$ and non-resonant signal. Two dashed vertical lines are $p_T=10 \text{ GeV}$ and $p_T=25 \text{ GeV}$, respectively. Figure 2.3f is number of jet distribution after 25 GeV cuts.

第3章 背景估计

4W 物理分析背景分为可以贡献两个相同电荷的过程 (promptSS)，电荷误鉴别 (QmisID) 和“假”轻子过程 (fakes)。promptSS 主要来自 $t\bar{t}V$, VV , tV 以及 $t\bar{t}H$ 过程，该背景可用 MC 估计。QmisID 一般来自于 $Z + jets$ 和 $t\bar{t}$ (轻子衰变过程)。fakes 来自于 $W + jets$, $t\bar{t}$ (半轻子衰变) 过程，其中一个 jet 被误判成轻子或者一个轻子来源于 b -jet (non-prompt)。目前 ATLAS MC 不能很好地描述 QmisID 和 fakes，如图 3.1 所示，如果所有背景均用 MC 模拟，可以看到，数据跟预期有非常大的偏差。所以，这表明 data-driven 的方法去估计 QmisID 和 fakes 是有必要的。在以下章节中，将分别讲述 QmisID 和 fakes 的估计方法。

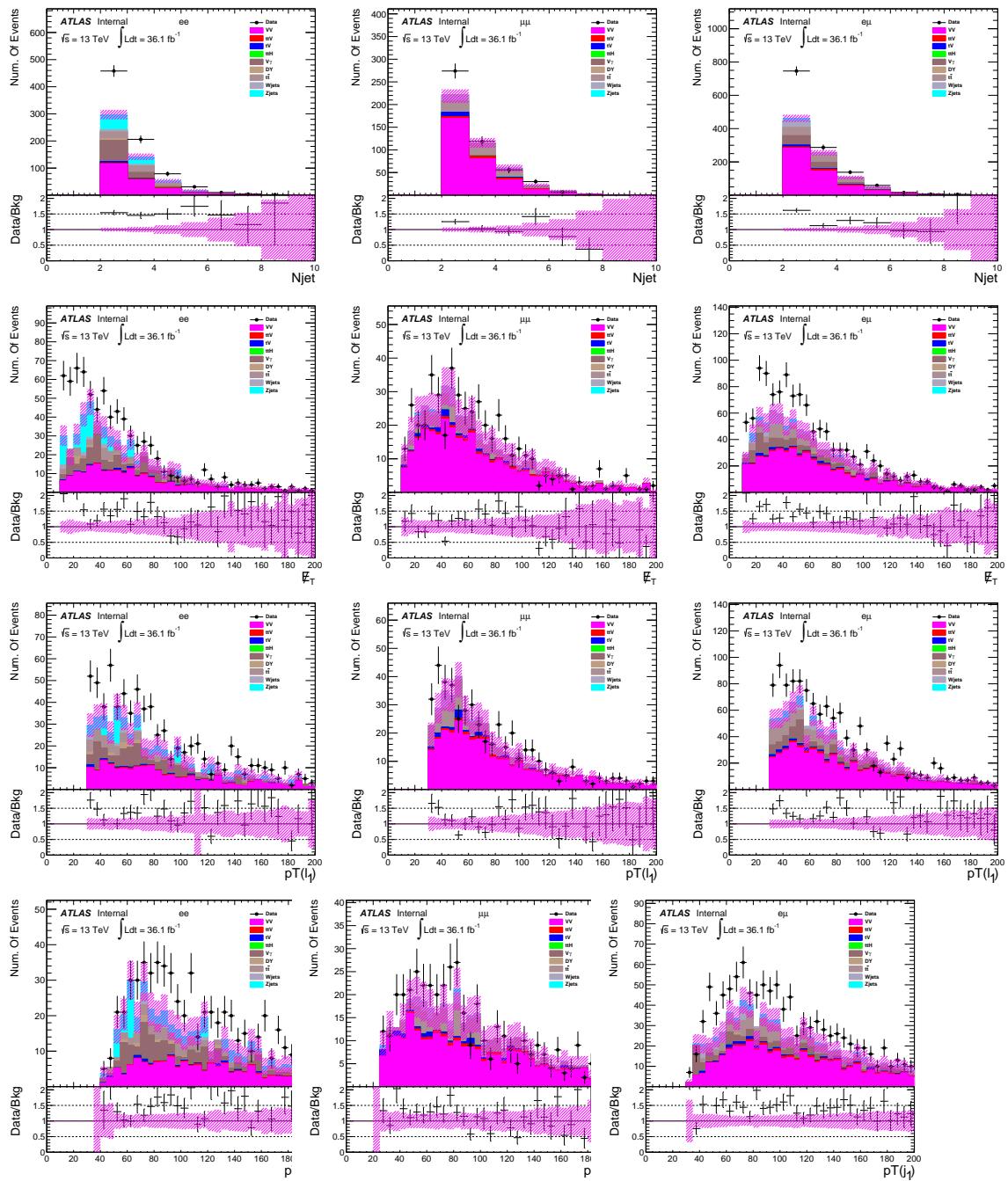


图 3.1 The comparison between data and all MC backgrounds at pre-selection level. Left: ee, middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The slashed pink bands are corresponding to statistical uncertainties. Each process is normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

3.1 QmisID 估计

双轻子为同电荷和同味道双轻子的 Z veto 的选择条件，会极大地压低 $t\bar{t}$ 和 $Z + jets$ 背景，但如果一个电荷误判，即使很低的误判率，但考虑到这两种过程的极大截面，仍有相当一部分的 QmisID 会贡献到最终背景中。根据 8 TeV 的研究 [75]， μ 电荷误判率非常低（一般低于 10^{-5})¹，所以只考虑电子电荷误判背景。

电子电荷误判有两种原因：

- 当电子穿过探测器材料时，出射一个光子（韧致辐射）；而后这个光子转换成一对正负电子，然而在随后的径迹重建中，带相反电荷的电子被利用，从而导致电荷误判。韧致辐射依赖于探测器材料密度，而探测器材料密度随着 $|\eta|$ 变化，所以电子的电荷误判率也依赖于 $|\eta|$ 。
- 第二种贡献相对来讲比较小，主要是因为测量精度不够，当电子径迹的曲率很小或者内部探测器径迹与量能器的簇射匹配错误时，得到完全相反曲率的径迹，从而导致电荷误判。所以，当电子具有高横动量时这个效应比较明显，那么误判率也依赖于 p_T 。

3.1.1 似然函数方法

一般假设电子电荷误判率不依赖于产生模式，因为 Z 玻色子产生截面大，而且其不变质量峰重建比较好，所以 Z 过程可以用来测量电子电荷误判率，采用似然函数技术 [76]，构建的似然函数如下：

$$\ln L(\varepsilon | N_{SS}, N) = \sum_{i,j} \ln[N^{ij}(\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j)]N_{SS}^{ij} - N^{ij}(\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j) \quad (3.1)$$

其中， ε_i 和 ε_j 分别为 $\eta - p_T$ 二维区间中第 i 个和第 j 个电子的误判率， N_{SS} 和 N 是观察到的相同电荷事例数和总事例数。 $\eta - p_T$ 区域总共分为 28 个小区域，其 $|\eta|$ 和 p_T 的分界线分别为 $[0., 0.60, 1.1, 1.37, 1.52, 1.70, 2.00, 2.47]$ 和 $[10, 60, 90, 130, 1000]$ GeV。随后，为了得到电子电荷误判率，需按照以下过程进行：

1. 按照 Z 玻色子过程筛选双轻子数据，其中轻子质量要求应与章节2所述一致。

¹The rate of charge mis-identification for muons is only affected by the track curvature. Because of the long lever arm to the muon system and the fact that the charge is measured in both the inner detector and muon spectrometer the mis-identification rates of the muon charge are very low, making this background negligible compared to the other sources of background

2. 在所选数据中通过高斯函数拟合 Z 不变质量谱，得到 Z 不变质量拟合值 κ 和标准偏差 σ 。而后分为如下三个区间，

A	B	C
$(\kappa - 8\sigma, \kappa - 4\sigma)$	$(\kappa \pm 4\sigma)$	$(\kappa + 4\sigma, \kappa + 8\sigma)$

3. 为了进一步提高 Z 玻色子纯度，剩余本底会被减去，即 $N_Z = n_B - \frac{n_A + n_C}{2}$ 。

4. 所选数据根据电荷分为 SS 和 OS，利用最大似然函数法得到各个 $|\eta| - p_T$ 区间的误判率。

图3.2展示电子电荷误判率随着 $|\eta|$ 增加而增大，因为在高 $|\eta|$ 粒子会穿过更多探测器材料；误判率也随着 p_T 增大而增大，这与前面的讨论一致。最后，利用公式 3.2 计算出 ee 和 $e\mu$ 道经过初步筛选后，在 $N_{jet} \geq 2$ 时 ($N_{jet} \geq 3$) 的误判事例数分别为 101.47 ± 0.60 (35.60 ± 0.38) 和 18.21 ± 0.23 (8.38 ± 0.16)。

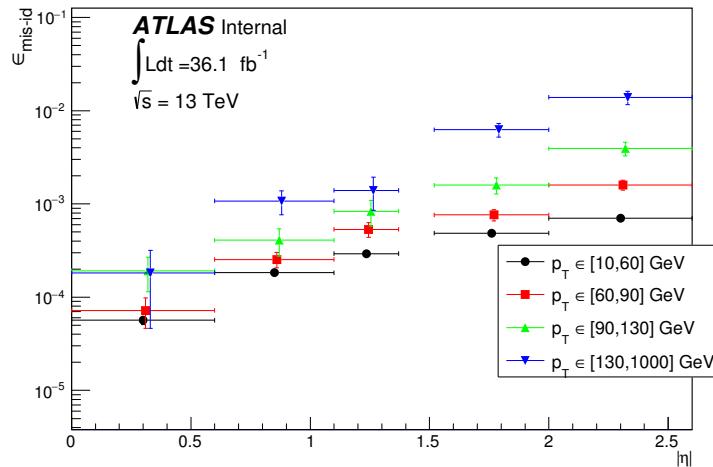


图 3.2 The electron charge mis-identification rates as a function of ($|\eta|, p_T$) computed in data with the likelihood method.

$$N_{ee}^{QmisID} = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j - 2\varepsilon_i\varepsilon_j}{1 - \varepsilon_i - \varepsilon_j + 2\varepsilon_i\varepsilon_j} N^{OS}, N_{e\mu}^{QmisID} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} N^{OS} \quad (3.2)$$

3.1.2 系统误差

在 Q_{misID} 估计中，考虑了三种系统误差：

1. 每个 $|\eta| - p_T$ 小区域中的统计误差；
2. 为了证实似然函数方法的可靠性，可以利用 Z MC 进行以上的误判率估计，因为在 MC 中，电子误判率是已知的，从而比较似然函数估计值与真实值就

可判断该方法的可信程度 (closure test)。图 3.3 比较了真实值与似然函数估计值，总体上是一致的。该项差距将作为 QmisID 的系统误差之一。

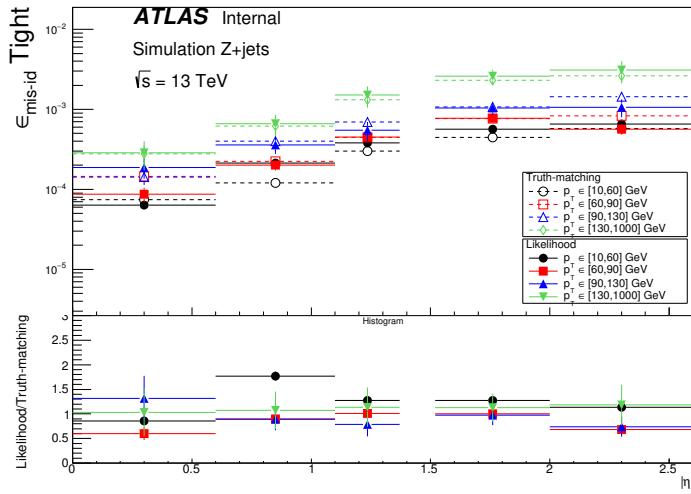


图 3.3 The comparison between the charge mis-identification rates of electrons measured in simulated $Z \rightarrow e^+e^-$ events with the truth-matching method and the 2D likelihood method.

3. Z 峰区间的变动会影响 QmisID 的估计，所以，如果偏移 Z 峰 1σ ，其 QmisID 率的相对变化考虑成系统误差。

图 3.4 总结了几种系统误差在不同 $|\eta| - p_T$ 的相对大小，随着 p_T 的增加统计误差越来越大，因为大部分电子是低动量的，其次是似然函数误差在低动量区更显著。

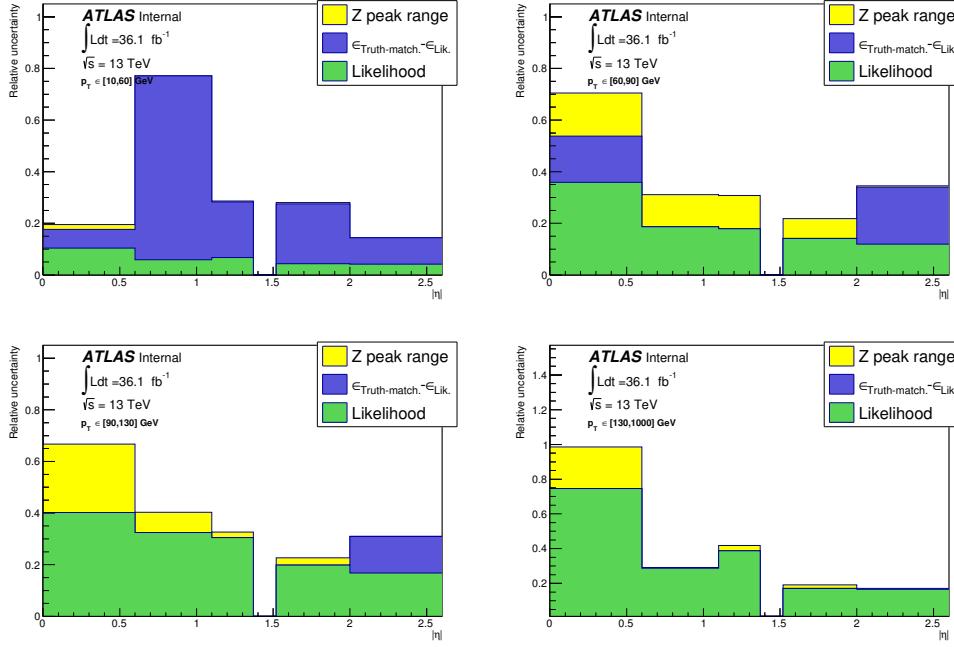


图 3.4 The systematic uncertainty on the charge mis-identification rate, for different bins in p_T and $|\eta|$.

3.2 Fakes 估计

误鉴别粒子是一项非常重要的本底，因为对其形成机制理解不够准确，MC 并不能很好地描述，所以有必要使用 data-driven 的方法去估计该项本底。在该分析中，我们使用 fake factor 的方法。

3.2.1 Fake factor 方法

在 4W 分析中，Fake factor 方法的假设是 fake factor 不依赖于 jet 数，其定义是具有两个 tight SS 轻子的事例数与具有一个 tight 和一个 anti-tight 的轻子的事例数比例，如等式 3.3 所示。

$$\theta_\ell = \frac{N_{\ell\ell}}{N_{\ell\ell}} \quad (3.3)$$

其中， ℓ 为 tight 电子或者 μ 子， ℓ 是 anti-tight 的轻子。通常，分母的选择是 fake factor 中最困难的部分：分母的选择应当使得真实轻子极大地压低，而尽量增大误鉴别轻子的比例。如果分母选择条件越严格，与外延相关的系统误差越小，但是另一方面，事例越少，相应的统计误差越大。所以，为了优化整体的系统误差，必须考虑到这些相反的影响。一般来讲，利用 ID 和 isolation 条件可以很好地压低误鉴别的电子，而 isolation 和碰撞参数可以用来压低误鉴别 μ 子 [77]。在本分析中， ℓ 和 ℓ 的定义如表 3.1 和表 3.2 所示。

	tight electron	anti-tight electron
ID	TightLH	fail TightLH
isolation	isolationFixedCutTight	-
QmisID	ChargeIDBDTTight>0.067	ChargeIDBDTTight>0.067

表 3.1 definitions of tight electrons and anti-tight electrons. In addition to the inverted ID requirement, anti-tight electrons are required to pass the loose selection criteria.

	tight muon	anti-tight muon
ID	Tight	-
isolation	isolationFixedCutTightTrackOnly	fail isolationFixedCutTightTrackOnly

表 3.2 definitions of tight muons and anti-tight muons. In addition to the inverted isolation requirement, anti-tight muons are required to pass the loose selection criteria.

值得指出的是，因为在本分析中，有两个 N_{jet} 类别，所以对于低质量点，计算 fake factor 时要求一个 jet；对于高质量点，要求 1 到 2 个 jet。总结如表 3.3 所示。接下来，作为例子，我们将只展示高质量点的 fakes 的计算方式。之前提过，

	Region	Fake factor CR (low jet multiplicity region)	SR (high jet multiplicity region)
Low mass	$hh: m_X=260, 300 \text{ GeV}$ $SS: \text{Fixing } m_S=135 \text{ GeV}, m_X=280, 300, 320 \text{ GeV}$	$N_{\text{jet}}=1$	$N_{\text{jet}} \geq 2$
High mass	$hh: m_X=400, 500 \text{ GeV, no-resonant}$ $SS: \text{Fixing } m_X=340 \text{ GeV}, m_S=135, 145, 155 \text{ and } 165 \text{ GeV}$	$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$N_{\text{jet}} \geq 3$

表 3.3 Summary of different regions used to estimate fakes for low mass and high mass searches.

本底包括 fakes, QmisID, $V\gamma$ 和 promptSS，为了不重复考虑这些本底，实际计算 fake factor 时应当减去这些本底，如公式 3.5 所示。

$$\theta_e (1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) = \frac{N_{ee}^{\text{data}} - N_{ee}^{\text{promptSS}} - N_{ee}^{V\gamma} - N_{ee}^{\text{QmisID}}}{N_{e\ell}^{\text{data}} - N_{e\ell}^{\text{promptSS}} - N_{e\ell}^{V\gamma} - N_{e\ell}^{\text{QmisID MC}}} (1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) \quad (3.4)$$

$$\theta_\mu (1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) = \frac{N_{\mu\mu}^{\text{data}} - N_{\mu\mu}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\mu}^{V\gamma}}{N_{\mu\ell}^{\text{data}} - N_{\mu\ell}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\ell}^{V\gamma}} (1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2) \quad (3.5)$$

可以看到，promptSS, QmisID 和 $V\gamma$ 在分子分母中均被减去。promptSS 用 MC 估计，并且要求其中一个轻子能够匹配到真实轻子（truth-matching）。 $V\gamma$ 也利用

MC 估计，但是并不要求 truth-matching，因为其中一个轻子很可能来自于 γ 。对于 QmisID，分子中的 N_{ee}^{QmisID} 计算如章节 3.1 所述，而 $N_{e\ell}^{\text{QmisID MC}}$ 直接利用 MC 估计，其中要求电子 truth-matching。表 ?? 到 表 ?? 总结在不同 N_{jet} 类别下，用来计算 fake factor 各个成分的值。

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{\text{jet}} == 1$	ee	204.64 ± 19.13	1.09 ± 0.08	5.08 ± 0.93	0.03 ± 0.01	135.94 ± 12.84	164.46 ± 0.65	976
	$e\ell$	44.26 ± 3.51	0.13 ± 0.03	8.25 ± 1.32	0.00 ± 0.00	67.33 ± 10.49	135.54 ± 71.62	1116

表3.4 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of electron in low mass search. Uncertainties are statistical.

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	Data
$N_{\text{jet}} == 1$	$\mu\mu$	296.37 ± 9.72	1.92 ± 0.11	5.91 ± 1.01	0.02 ± 0.02	0.00 ± 0.00	455
	$\mu\ell$	56.84 ± 5.00	0.13 ± 0.03	20.80 ± 2.34	0.00 ± 0.00	0.63 ± 0.45	378

表3.5 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of muon in low mass search. Uncertainties are statistical.

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	ee	309.38 ± 19.75	3.67 ± 0.16	11.27 ± 1.47	0.10 ± 0.02	213.30 ± 17.29	230.40 ± 0.81	1434
	$e\ell$	66.58 ± 5.19	0.39 ± 0.06	15.85 ± 1.89	0.02 ± 0.01	104.00 ± 12.71	187.16 ± 78.65	1591

表3.6 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of electron in high mass search. Uncertainties are statistical.

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	Data
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	$\mu\mu$	463.01 ± 11.61	6.14 ± 0.21	15.20 ± 2.26	0.17 ± 0.03	0.01 ± 0.01	729
	$\mu\ell$	74.30 ± 5.40	0.45 ± 0.06	43.59 ± 3.37	0.02 ± 0.01	1.62 ± 0.74	658

表3.7 Observed number of data and expected events yields in low jet multiplicity region, which is used for fake factor calculation of muon in high mass search. Uncertainties are statistical.

最终，根据公式 3.5，得到各种类别的 fake factor，总结在表 3.8。接下来，就

Selections	Fake factor	Value
$N_{\text{jet}} == 1$	θ_e	0.5401 ± 0.0311
	θ_μ	0.5033 ± 0.0503
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	θ_e	0.5472 ± 0.0264
	θ_μ	0.4544 ± 0.0350

表 3.8 Summary of fake factors of electron and muon with different N_{jet} requirements. Uncertainties are statistical.

可以计算在信号区，即高 N_{jet} 区，的 fakes 估计值。计算方法如下：

$$N_{ee}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) = (N_{e\ell}^{\text{data}} - N_{e\ell}^{\text{promptSS}} - N_{e\ell}^{V\gamma} - N_{e\ell}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_e \quad (3.6)$$

$$N_{\mu\mu}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) = (N_{\mu\mu}^{\text{data}} - N_{\mu\mu}^{\text{promptSS}} - N_{\mu\mu}^{V\gamma})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_\mu \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} N_{e\mu}^{\text{fakes}}(N_{\text{jet}} \geq 3) &= (N_{e\mu} - N_{e\mu}^{\text{promptSS}} - N_{e\mu}^{V\gamma} - N_{e\mu}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_\mu \\ &\quad + (N_{\mu e} - N_{\mu e}^{\text{promptSS}} - N_{\mu e}^{V\gamma} - N_{\mu e}^{\text{QmisID MC}})(N_{\text{jet}} \geq 3) \times \theta_e \end{aligned} \quad (3.8)$$

各个成分的选择同样遵循计算 fake factor 时要求，表 3.9（表 3.10）总结各种成分在 $N_{\text{jet}} \geq 2$ ($N_{\text{jet}} \geq 3$) 时的数值。最后，计算得到信号区的 fakes 结果

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{\text{jet}} \geq 2$	$e\ell$	37.39 ± 4.24	1.67 ± 0.12	11.55 ± 1.62	0.19 ± 0.04	51.74 ± 8.67	137.17 ± 33.00	829
	$\mu\mu$	32.41 ± 2.83	1.44 ± 0.15	38.97 ± 3.15	0.12 ± 0.03	1.01 ± 0.59	-	583
	$\ell\mu$	39.71 ± 3.06	2.02 ± 0.17	15.46 ± 2.13	0.19 ± 0.04	53.50 ± 9.21	195.94 ± 19.80	708
	$e\mu$	17.89 ± 2.50	0.42 ± 0.10	17.00 ± 1.99	0.03 ± 0.02	0.75 ± 0.39	0.43 ± 0.03	267

表 3.9 Observed number of data and expected events yields in high jet multiplicity region, which is used to predict fakes in low mass search. Uncertainties are statistical.

如表 3.11 所示。其中，只考虑了统计误差，其计算方式为 $\theta_\ell \times \sqrt{N_{\ell\ell}^{\geq 2 \text{jet}(3\text{jet})}}$ [77]。

3.2.2 系统误差

计算 fake factor 时有如下系统误差：

1. 统计误差，低 N_{jet} 区的统计误差会传递到 fake factor;
2. QmisID，QmisID 的贡献在 ee 道是比较大的，其系统误差也会传递到 θ_ℓ 的计算。

Selections		VV	$t\bar{t}V$	tV	$t\bar{t}H$	$V\gamma$	QmisID	Data
$N_{jet} \geq 3$	$e\ell$	15.07 ± 1.83	1.41 ± 0.11	3.96 ± 0.90	0.17 ± 0.03	15.07 ± 4.85	85.54 ± 6.45	354
	$\mu\mu$	14.95 ± 1.94	1.12 ± 0.13	16.18 ± 2.01	0.10 ± 0.03	0.03 ± 0.03	-	303
	$e\mu$	17.84 ± 2.04	1.60 ± 0.16	6.71 ± 1.62	0.18 ± 0.04	17.98 ± 5.18	102.56 ± 5.64	287
	$e\mu$	4.78 ± 1.06	0.36 ± 0.09	7.68 ± 1.24	0.02 ± 0.02	0.44 ± 0.27	0.21 ± 0.03	149

表 3.10 Observed number of data and expected events yields in high jet multiplicity region, which is used to predict fakes in high mass search. Uncertainties are statistical.

Selections	$N_{jet} \geq 2$			$N_{jet} \geq 3$		
	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
Event yield	318.27 ± 9.64	256.20 ± 8.06	332.69 ± 9.62	127.38 ± 6.10	122.97 ± 5.58	138.25 ± 6.16

表 3.11 Estimated jet fakes in three channels with different selections. Uncertainties are statistical.

3. **Closure test**, 此分析中 fake factor 的假设是其值不依赖于 jet 数, 但此假设本身是有误差的, 所以为了考虑此项误差, 可以利用 MC (semi-leptonic $t\bar{t}$) 重复一遍 fake factor 方法, 将真实的 fakes 与预测值作为系统误差。具体流程如下:

- 要求 $1 \leq N_{jet} \leq 2$, 其中为了增大统计量, 去除 b -veto, Z veto 和轻子 p_T 选择条件。

• 选择 ee ($e\ell$) 和 $\mu\mu$ ($\mu\mu$) 事例, 计算 fake factor ($\frac{N_{\ell\ell}}{N_{e\ell}}$):
 $\theta_e = 0.32 \pm 0.12$, $\theta_\mu = 0.12 \pm 0.04$;

- 预测高 $N_{textjet}$ 区的 fakes 数 ($\theta \times N_{\ell\ell}$)。

表 3.12 的总结了在 $t\bar{t}$ MC 中真实 fakes, 预测值以及它们之间的相对差别, 其中 $e\mu$ 道最大的相对差别会作为 fake factor closure 系统误差。

	Predicted	Real	Relative difference
ee	24.69 ± 9.47	26.92 ± 2.06	9.03%
$\mu\mu$	30.44 ± 10.00	34.88 ± 2.35	14.59%
$e\mu$	40.80 ± 11.31	56.63 ± 3.01	38.80%

表 3.12 Non-closure uncertainty on θ_e and θ_μ . To reduce the statistical error, SS, $p_T(\ell)$ and $M(\ell\ell) > 15$ GeV requirements are dropped in pre-selections.

4. **样本成分**, 低 N_{jet} 与高 N_{jet} 区的一个显著区别是背景成分, 以表 3.13 作为例证, 可以看到, 随着 jet 数的增加, $t\bar{t}$ 的比例相应增大。不同味道的 jet 具有不同的误鉴别率, 从而不同本底会有不同的 fake factor。在此估计中, fake factor 是在低 N_{jet} 区估计的, 而后应用在高 N_{jet} , 那么从表 3.13 推论出, $t\bar{t}$ 本底被低估了。为了补偿此项偏差, 可以重复以上 fake factor 方法, 加上至少一个 b -jet 的条件。最后, 把他们之间的差别作为系统误差, 结果如表 3.14 所示。

Pre-selections	$N_{\text{jet}}=1$			$N_{\text{jet}}=2$			$N_{\text{jet}} \geq 3$		
	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
Sherpa W+jets	38.84	30.74	152.01	4.49	13.98	49.85	5.20	3.96	19.88
Sherpa $t\bar{t}$	7.20	-0.34	10.32	9.62	37.35	62.95	15.66	28.04	59.79
$N_{t\bar{t}}/N_{\text{W+jets}}$	0.19	-0.011	0.068	2.14	2.67	1.26	3.01	7.08	3.00

表 3.13 The contribution from $t\bar{t}$ becomes bigger as more jets are required. W+jets and $t\bar{t}$ (semi-leptonic) MC samples are produced with the same generator (Sherpa).

$N_{\text{jet}}=1$	with b veto	with b -jet	uncer.
θ_e	0.5401 ± 0.0311	0.7228 ± 0.1919	33.83%
θ_μ	0.5033 ± 0.0503	0.3438 ± 0.0856	31.69%
$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$	with b veto	with b -jet	uncer.
θ_e	0.5472 ± 0.0264	0.8000 ± 0.1171	46.20%
θ_μ	0.4544 ± 0.0350	0.3060 ± 0.0413	48.50%

表 3.14 The fake factors with and without b -jet.

5. **prompt SS 产生截面**, 在 fake factor 计算中, prompt SS 作为减去项, 那么它们的截面理论值也会影响 fake factor 的结果, 它们的理论误差会传递到 fake factor 的误差中, 其中低于 1% 影响的过程被忽略。

Fake factor 的所有系统误差总结在表 3.15 和表 Table 3.16 中。可以发现, 最显著的误差是 Non-closure 和样本成分; 对于 μ 而言, WZ 的产生截面也有 30% 到 40% 的影响, 而对于 electron fake factor, QmisID 误差大小约为 30%; 其次是统计误差最小, 只有不到 10% 的影响, 说明轻子选择条件是比较合理的, 没有引入较大统计误差; 虽然在各个 N_{jet} 类别, 电子 fake factor 误差略高于 μ 子的, 但它们

总误差都在 60% 到 72% 之间。

	$N_{\text{jet}} == 1$	$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$
Statistics	5.76	4.82
QmisID	33.0	30.0
θ_e syst.	38.80	38.80
Sample dependence	33.83	46.20
$W^\pm W^\pm$	1.22	2.08
WZ	8.93	7.94
$V\gamma$	11.15	12.28
QmisID MC	1.50	2.00
Total	63.09	69.18

表 3.15 Summary of systematic uncertainty on θ_e with different N_{jet} selections(in %).

	$N_{\text{jet}} == 1$	$1 \leq N_{\text{jet}} \leq 2$
Statistics	9.99	7.70
θ_μ syst.	38.80	38.80
Sample dependence	31.69	48.50
$W^\pm W^\pm$	6.06	10.39
WZ	39.0	33.6
Total	64.55	71.79

表 3.16 Summary of systematic uncertainty on θ_μ with different N_{jet} selections(in %).

3.2.3 总预期本底估计

表 3.17 和表 3.18 分别总结在 $N_{\text{jet}} \geq 2$ 和 $N_{\text{jet}} \geq 3$ 时，经过初步筛选之后，的各项本底的估计值与观测数据数；表内的误差考虑了 fakes 的统计误差和 fake factor 的系统误差，假设它们相互独立，总的误差为 $\sqrt{(\theta_\ell^{\text{sys.}} \times N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}})^2 + \theta_\ell \times N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}}}$ ，其中 $\theta_\ell^{\text{sys.}}$ 是 fake factor 系统误差值， $N_{\text{jet fakes}}^{\text{median}}$ 是 fakes 预期值。在三个轻子道中，fakes 都占有比较大的比例，都高于 30%，尤其在 ee 中，fakes 作为最大的本底成分，高达 44%。图 3.5 和图 3.6 是 N_{jet} 的分布，分别对应 $N_{\text{jet}} \geq 2$ 和 $N_{\text{jet}} \geq 3$ 。,

相比图 3.1，数据与预期本底吻合度得到极大地提升，其偏差基本控制在 2 个标准偏差之内。

	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
Jet fakes	318.27 ± 201.23	256.20 ± 165.77	332.69 ± 156.43
PromptSS	208.92 ± 6.64	334.71 ± 8.74	560.18 ± 10.63
$V + \gamma$	105.39 ± 12.43	0.01 ± 0.01	107.99 ± 15.17
QmisID	101.47 ± 0.60	0.00 ± 0.00	18.21 ± 0.23
Total backgrounds	734.07 ± 201.72	590.93 ± 166.00	1019.06 ± 157.52
Observed	790	487	1257

表 3.17 Event yields at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. The total uncertainties include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the others. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
Jet fakes	127.38 ± 88.52	122.97 ± 88.60	138.25 ± 69.55
PromptSS	95.34 ± 4.30	154.40 ± 5.64	262.03 ± 7.04
$V + \gamma$	28.03 ± 4.52	0.01 ± 0.01	51.62 ± 13.75
QmisID	35.60 ± 0.38	0.00 ± 0.00	8.38 ± 0.16
Total backgrounds	286.35 ± 88.74	277.38 ± 88.78	460.27 ± 71.25
Observed	332	213	511

表 3.18 Event yields at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. The total uncertainties include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the others. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

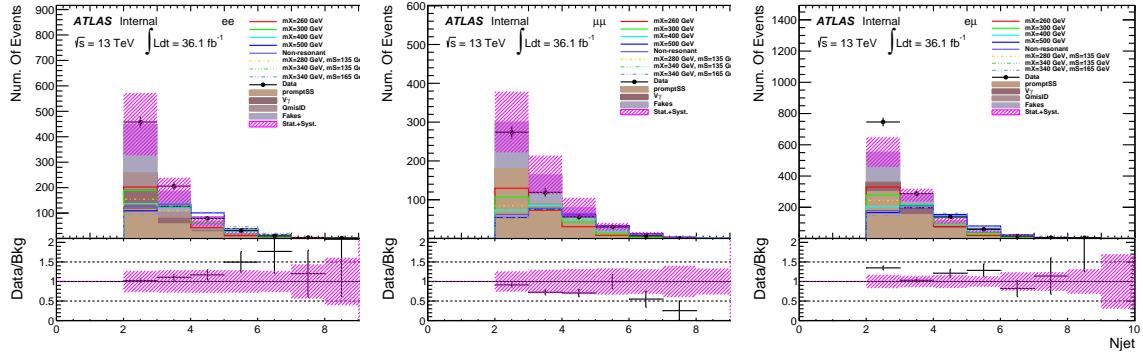


图 3.5 The comparisons between data and backgrounds at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The uncertainties, represented by slashed bands, include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the other background components. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

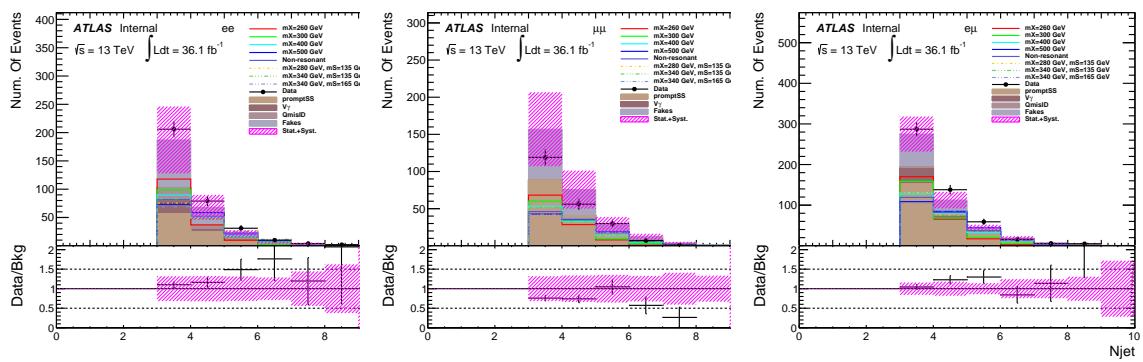


图 3.6 The comparisons between data and backgrounds at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. Left: ee , middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. The uncertainties, represented by slashed bands, include all systematics on fakes and statistical uncertainties on the other background components. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

第 4 章 信号优化

在初步筛选之后，为了进一步加强信号显著性，利用动力学性质进行信号优化是有必要的。因为每个信号质量点的动力学性质差别较大，所以，每个质量点都会进行信号优化过程，而后通过各自动力学选择条件之后的区域才作为每个质量点的最终信号区。

4.1 优化策略

MVA 方法用于确定不同运动学变量的分离能力，并考虑所有变量之间的相关性。最终，前五个运动学变量用于形成优化选择，分别是 $M(\ell\ell)$, $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$, $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$, $M_{\ell_{1jj}}$ 和 $M(all)$ ，它们具有很强的分离能力，而且相互之间的相关性很低(图 4.1)。通常， $M(\ell\ell)$ 和 $M_{\ell_{1jj}}$ 对低质量点敏感，而其余对高质量和非共振信号敏感。基于这些知识， $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$, $M(\ell\ell)$, $M_{\ell_{1jj}}$ 和 $M(all)$ 用于在低质量搜索中形成优化削减，而 $\Delta R_{min}(\ell_2, j)$, $\Delta R_{min}(\ell_1, j)$, $M(\ell\ell)$ 和 $M_{\ell_{1jj}}$ 用于高质量搜索中。它们的相应分布分别见图 4.2 和图 4.3。

TMVA 包 (CutsSA 选项) [78] 用于实现最佳筛选。所有背景: promptSS, $V\gamma$, QmisID 和 fakes 都包含在训练中。为了减少对变量筛选顺序的依赖，每次仅训练 2 个变量。在每个信号效率工作点 (WP)，在测试样本中对每个事例应用对应的选择条件，并计算显著性 (S/\sqrt{B})。随后，选择具有最高信号显著性的 WP，对应该 WP 的 2 个变量筛选值即为最佳选择，最后再对剩下两个变量重复以上步骤。图 4.4 展示 SM 希格斯粒子对搜寻中 $\mu\mu$ 分析道的效率，各个运动学变量的选择上下限以及显著性随信号效率 WP 的分布。对剩余的分析道或者其他质量点重复此操作，即可得到所有质量点的分析道的最佳优化选择条件。值得指出的是，对于 SS 信号优化，因为各个质量点之间的运动学性质比较接近，所以只针对 $m_S = 135 \text{ GeV}, m_X = 300 \text{ GeV}$ ($m_X = 340 \text{ GeV}, m_S = 145 \text{ GeV}$) 进行优化，而后应用在所有的低 (高) 质量点。

最终考虑从低到高 (和非共振) 质量点筛选值的单调性，一定的选择调整被执行。最终的选择总结在表 4.1, 表 4.2 和表 4.3 中，分别对应于 hh 低质量， hh 高质量和 SS 信号寻找。

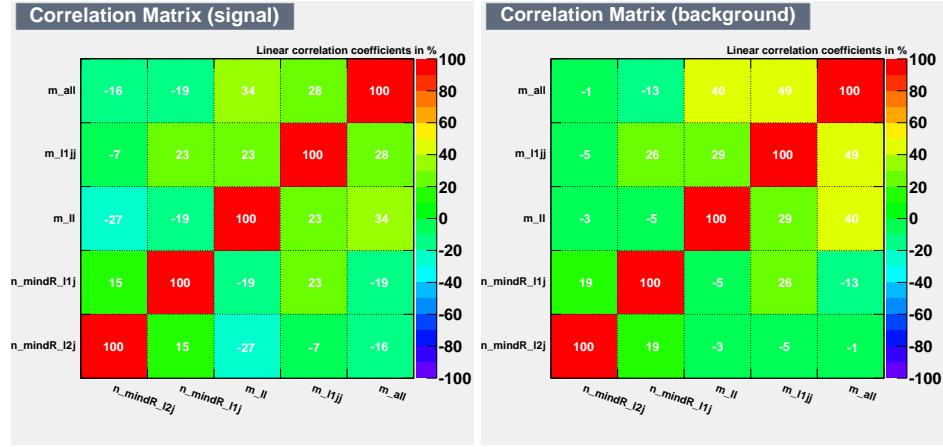


图 4.1 Correlation check of input training variables.

	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(ll)$	$M_{\ell_1 jj}$	$M(all)$
$m_X=260$ GeV	ee	0.35, 1.85	<100	<145	<1100
	$\mu\mu$	0.25, 2.10	<80	<115	<700
	$e\mu$	0.25, 1.80	<85	<135	<650
$m_X=300$ GeV	ee	0.35, 1.75	<120	<160	<1400
	$\mu\mu$	0.20, 1.75	<115	<185	<1000
	$e\mu$	0.20, 1.80	<135	<160	<800

表 4.1 Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow hh$ ($m_X=260, 300$ GeV). All mass cuts are in GeV.

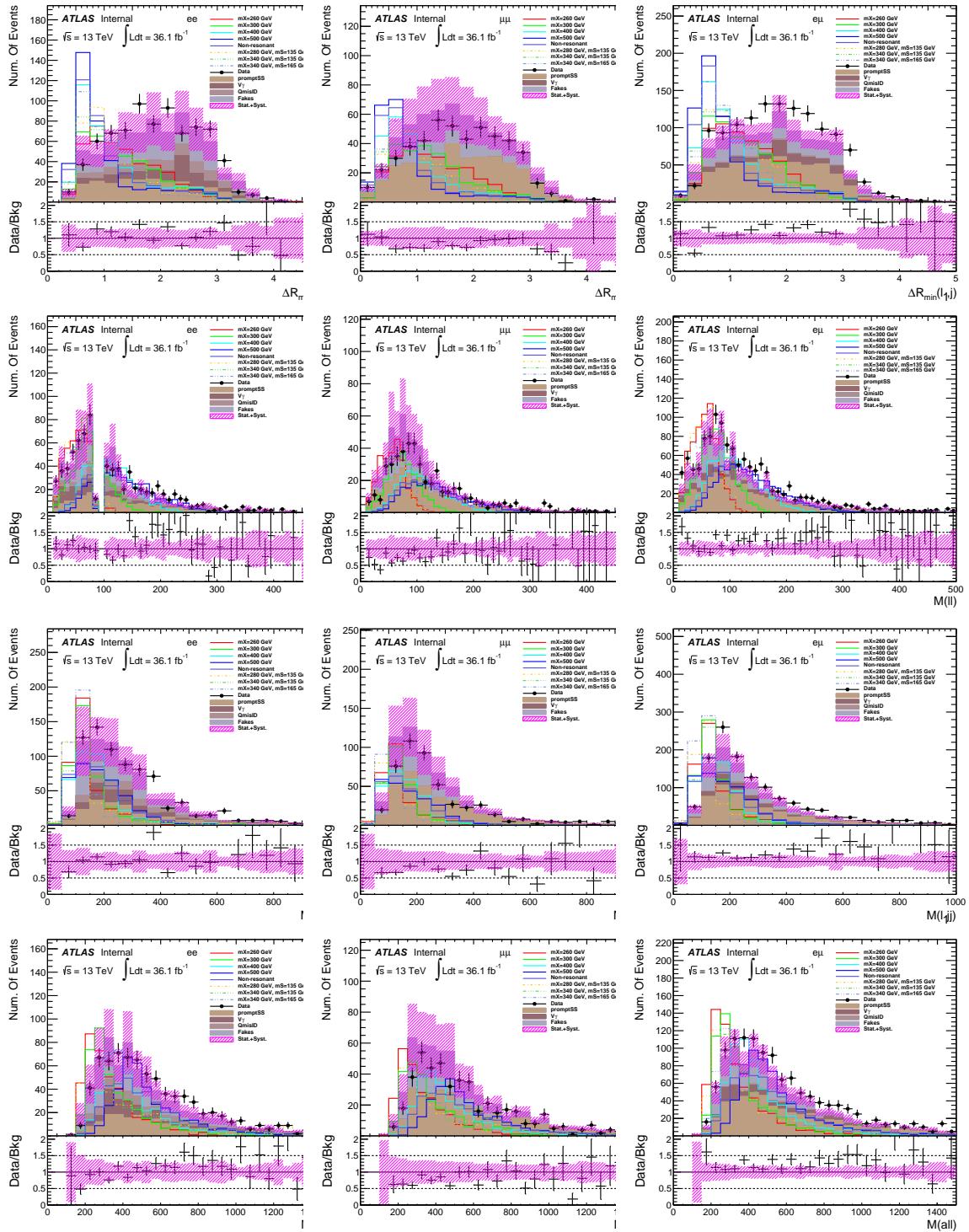


图 4.2 The distributions of kinematic variables that are used to form optimization selections at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 2$. Left: ee, middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .

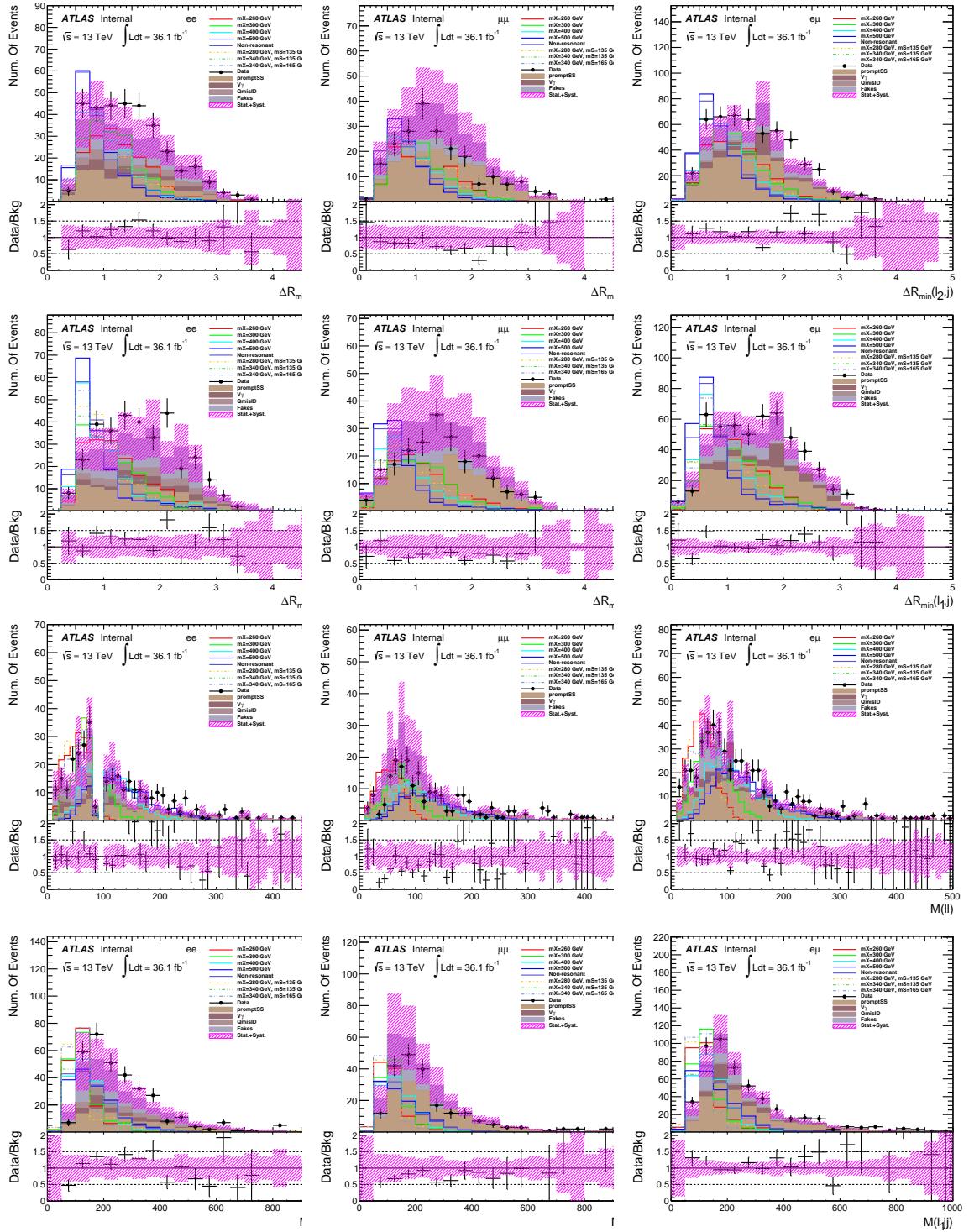
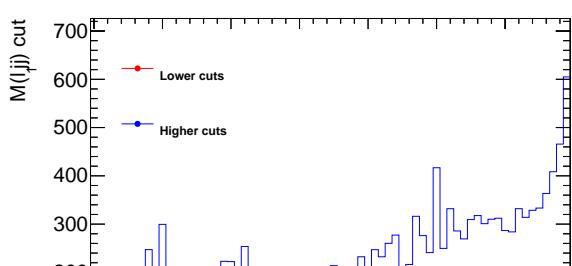
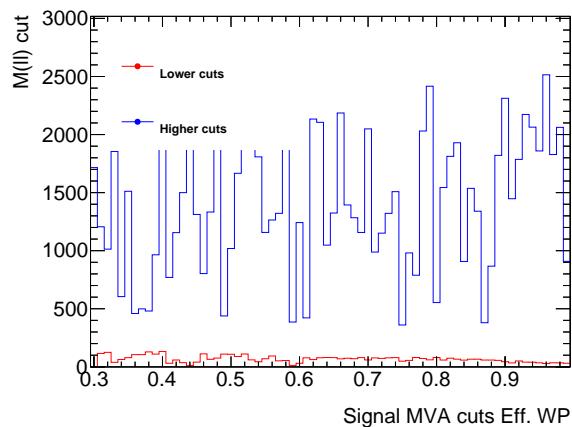
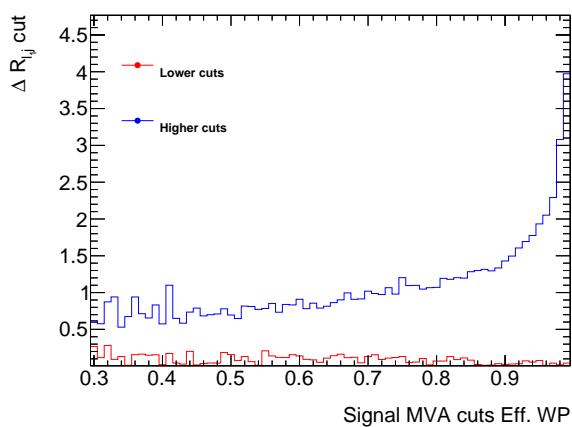
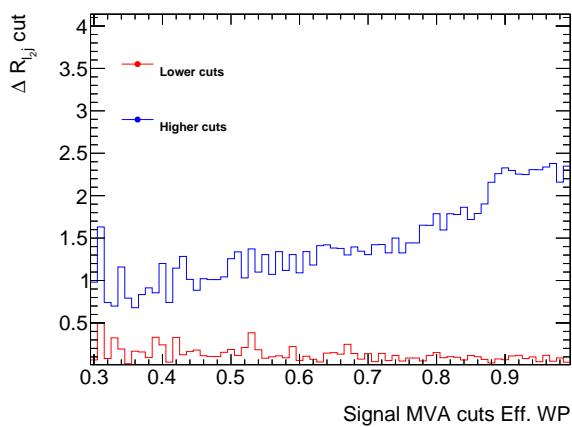
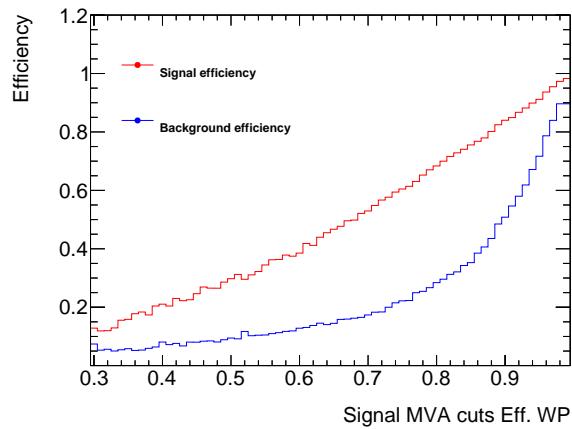


图 4.3 The distributions of kinematic variables that are used to form optimization selections at pre-selection level, corresponding to $N_{\text{jet}} \geq 3$. Left: ee, middle: $\mu\mu$, right: $e\mu$. PromptSS and $V + \gamma$ are normalized to the luminosity of 36.1 fb^{-1} .



	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_2, j)$	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(l\bar{l})$	$M_{\ell_1 j j}$
$m_X=400$ GeV	ee	0.35, 1.50	0.30, 1.25	45, 235	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.20	0.20, 1.20	40, 215	30, 260
	$e\mu$	0.20, 1.50	0.20, 1.05	35, 195	30, 235
$m_X=500$ GeV	ee	0.20, 1.15	0.20, 1.15	100, 270	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.05	0.20, 0.75	60, 250	30, 310
	$e\mu$	0.20, 1.00	0.20, 0.80	75, 250	35, 350
Non-resonant	ee	0.20, 1.40	0.20, 1.15	55, 270	40, 285
	$\mu\mu$	0.20, 1.05	0.20, 0.75	60, 250	30, 310
	$e\mu$	0.20, 1.15	0.20, 0.80	75, 250	35, 350

表 4.2 Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow hh(m_X=400, 500 \text{ GeV and non-resonant})$. All mass cuts are in GeV.

	Channel	$\Delta R_{min}(\ell_2, j)$	$\Delta R_{min}(\ell_1, j)$	$M(l\bar{l})$	$M_{\ell_1 j j}$
$m_X=300 \text{ GeV}, m_S=135$ GeV	ee	0.35, 2.5	0.4, 1.65	<80	50, 150
	$\mu\mu$	0.25, 2.05	0.2, 1.85	< 95	50, 150
	$e\mu$	0.25, 1.7	0.25, 1.65	< 95	50, 150
$m_X=340 \text{ GeV}, m_S=145$ GeV	ee	0.35, 1.85	0.2, 1.65	< 130	50, 190
	$\mu\mu$	0.2, 2.0	0.2, 1.65	< 115	50, 185
	$e\mu$	0.25, 1.6	0.25, 1.6	< 150	50, 150

表 4.3 Summary of optimization selections for the search of $X \rightarrow SS$. All mass cuts are in GeV.

4.2 优化效率检查

为了防止过度优化或者欠优化的情况，可以检查每个信号 MC 经过以上选择条件之后的效率。图 4.5 和图 4.6 分别表示 hh 和 SS 信号相对于经过初步筛选条件之后的选择效率。总体上大多数质量点的选择效率相当接近，但是由于优化时每两个变量一组，它们之间的相关性在三个分析道中略有不同，并且各个分析道具有不同的背景组成，导致不同质量点不同分析道具有不同效率的趋势。

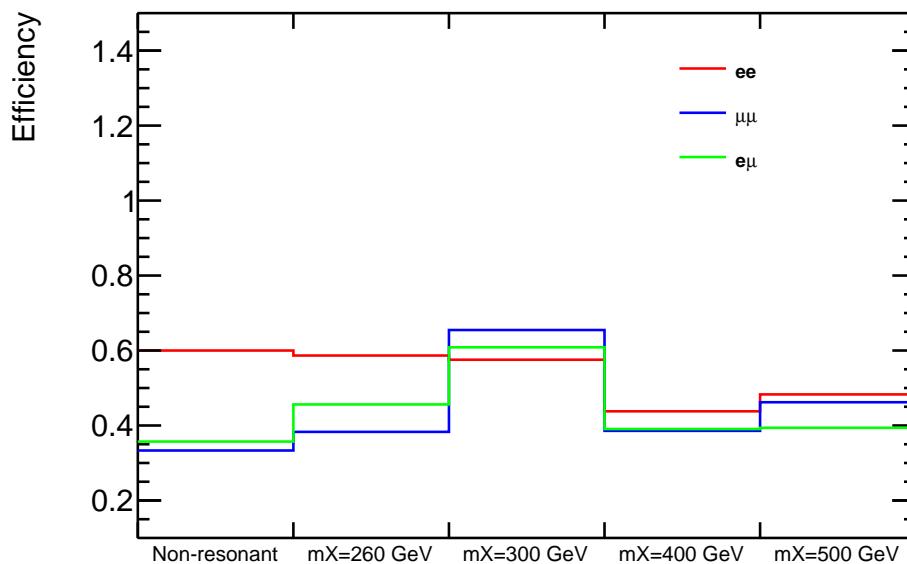


图 4.5 Signal efficiency with respect to pre-selections in ee , $\mu\mu$ and $e\mu$ channel after applying all of the optimisation selections for the non-resonant and resonant hh signal.

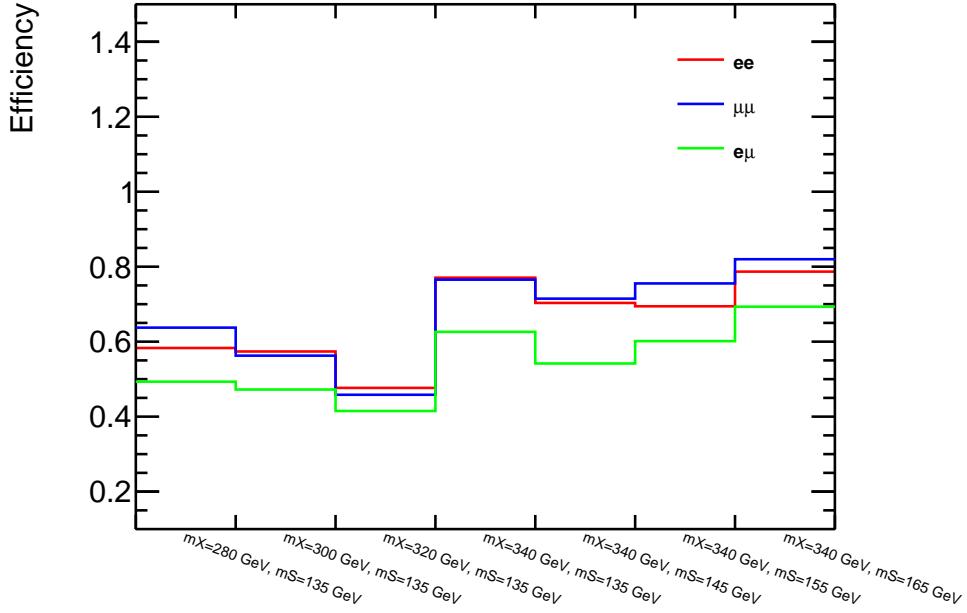


图 4.6 Signal efficiency with respect to pre-selections in ee , $\mu\mu$ and $e\mu$ channel after applying all of the optimisation selections for the resonant SS signal.

4.3 信号及背景筛选结果

经过所有筛选条件之后，表 4.4 到表 4.24 展示各个质量点不同分析道中的各种背景，预期信号以及观测事例数的结果。总预期本底的误差包括了所有的系统误差，并考虑了非 fakes 本底的系统误差 (syst1) 与 fakes 本底的系统误差 (syst2) 的反相关性质。对于每个质量点的每个分析道，一个运动学变量的分布也被展示，从图 4.7 到图 4.13。

4.3.1 hh 搜索筛选结果

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$46.87 \pm 2.91(\text{stat.}) \pm 14.06(\text{syst.})$	$16.25 \pm 3.99(\text{stat.}) \pm 8.12(\text{syst.})$	$15.60 \pm 0.24(\text{stat.}) \pm 5.15(\text{syst.})$	$64.87 \pm 5.96(\text{stat.}) \pm 44.88(\text{syst.})$	$143.59 \pm 7.74(\text{stat.}) \pm 17.04(\text{syst.1.}) \pm 44.88(\text{syst2.})$	158	0.04 ± 0.00
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$16.38 \pm 1.80(\text{stat.}) \pm 4.91(\text{syst.})$	$2.89 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 1.45(\text{syst.})$	$5.23 \pm 0.13(\text{stat.}) \pm 1.72(\text{syst.})$	$26.32 \pm 3.79(\text{stat.}) \pm 18.21(\text{syst.})$	$50.81 \pm 4.33(\text{stat.}) \pm 5.40(\text{syst1.}) \pm 18.21(\text{syst2.})$	62	0.03 ± 0.00
$M(\ell\ell)$	$11.70 \pm 1.65(\text{stat.}) \pm 3.51(\text{syst.})$	$0.95 \pm 0.34(\text{stat.}) \pm 0.48(\text{syst.})$	$3.38 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 1.12(\text{syst.})$	$21.24 \pm 3.41(\text{stat.}) \pm 14.70(\text{syst.})$	$37.28 \pm 3.80(\text{stat.}) \pm 3.72(\text{syst1.}) \pm 14.70(\text{syst2.})$	46	0.03 ± 0.00
$M(l_1 jj)$	$8.37 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 2.51(\text{syst.})$	$0.54 \pm 0.24(\text{stat.}) \pm 0.27(\text{syst.})$	$2.61 \pm 0.09(\text{stat.}) \pm 0.86(\text{syst.})$	$17.46 \pm 3.09(\text{stat.}) \pm 12.08(\text{syst.})$	$28.98 \pm 3.27(\text{stat.}) \pm 2.67(\text{syst1.}) \pm 12.08(\text{syst2.})$	35	0.03 ± 0.00

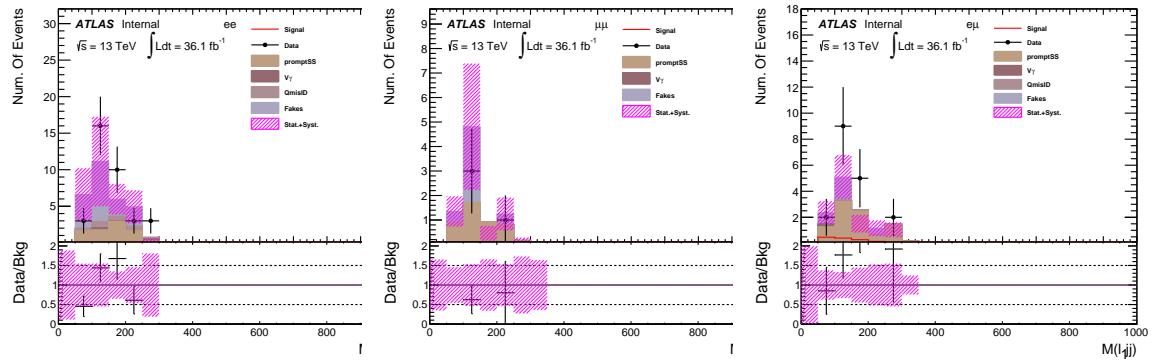
表 4.4 The unblinded results of non-resonant search in ee channel.

4.3.2 SS 搜索筛选结果

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$47.41 \pm 2.70(\text{stat.}) \pm 14.22(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$37.76 \pm 4.14(\text{stat.}) \pm 27.11(\text{syst.})$	$85.17 \pm 4.94(\text{stat.}) \pm 14.22(\text{syst1.}) \pm 27.11(\text{syst2.})$	72	0.07 ± 0.00
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$9.52 \pm 1.17(\text{stat.}) \pm 2.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$5.59 \pm 1.59(\text{stat.}) \pm 4.01(\text{syst.})$	$15.11 \pm 1.98(\text{stat.}) \pm 2.86(\text{syst1.}) \pm 4.01(\text{syst2.})$	10	0.04 ± 0.00
$M(\ell\ell)$	$6.21 \pm 0.97(\text{stat.}) \pm 1.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$4.01 \pm 1.35(\text{stat.}) \pm 2.88(\text{syst.})$	$10.22 \pm 1.66(\text{stat.}) \pm 1.86(\text{syst1.}) \pm 2.88(\text{syst2.})$	4	0.04 ± 0.00
$M(l_1 jj)$	$4.50 \pm 0.74(\text{stat.}) \pm 1.35(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$3.56 \pm 1.27(\text{stat.}) \pm 2.55(\text{syst.})$	$8.05 \pm 1.47(\text{stat.}) \pm 1.35(\text{syst1.}) \pm 2.55(\text{syst2.})$	4	0.03 ± 0.00

 表 4.5 The unblinded results of non-resonant search in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$94.91 \pm 3.97(\text{stat.}) \pm 28.47(\text{syst.})$	$15.89 \pm 4.14(\text{stat.}) \pm 7.95(\text{syst.})$	$3.46 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 1.14(\text{syst.})$	$48.27 \pm 4.96(\text{stat.}) \pm 24.35(\text{syst.})$	$162.53 \pm 7.59(\text{stat.}) \pm 29.58(\text{syst1.}) \pm 24.35(\text{syst2.})$	194	0.11 ± 0.00
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$19.61 \pm 1.80(\text{stat.}) \pm 5.88(\text{syst.})$	$1.88 \pm 0.94(\text{stat.}) \pm 0.94(\text{syst.})$	$0.68 \pm 0.05(\text{stat.}) \pm 0.22(\text{syst.})$	$9.16 \pm 2.20(\text{stat.}) \pm 5.30(\text{syst.})$	$31.33 \pm 2.99(\text{stat.}) \pm 5.96(\text{syst1.}) \pm 5.30(\text{syst2.})$	44	0.06 ± 0.00
$M(\ell\ell)$	$11.34 \pm 1.29(\text{stat.}) \pm 3.40(\text{syst.})$	$0.24 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.12(\text{syst.})$	$0.34 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.})$	$1.73 \pm 0.94(\text{stat.}) \pm 0.89(\text{syst.})$	$13.65 \pm 1.61(\text{stat.}) \pm 3.41(\text{syst1.}) \pm 0.89(\text{syst2.})$	21	0.05 ± 0.00
$M(l_1 jj)$	$9.28 \pm 1.15(\text{stat.}) \pm 2.79(\text{syst.})$	$0.24 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.12(\text{syst.})$	$0.27 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.09(\text{syst.})$	$1.33 \pm 0.82(\text{stat.}) \pm 0.66(\text{syst.})$	$11.13 \pm 1.43(\text{stat.}) \pm 2.79(\text{syst1.}) \pm 0.66(\text{syst2.})$	18	0.05 ± 0.00

 表 4.6 The unblinded results of non-resonant search in $e\mu$ channel.

 图 4.7 The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to non-resonance search.

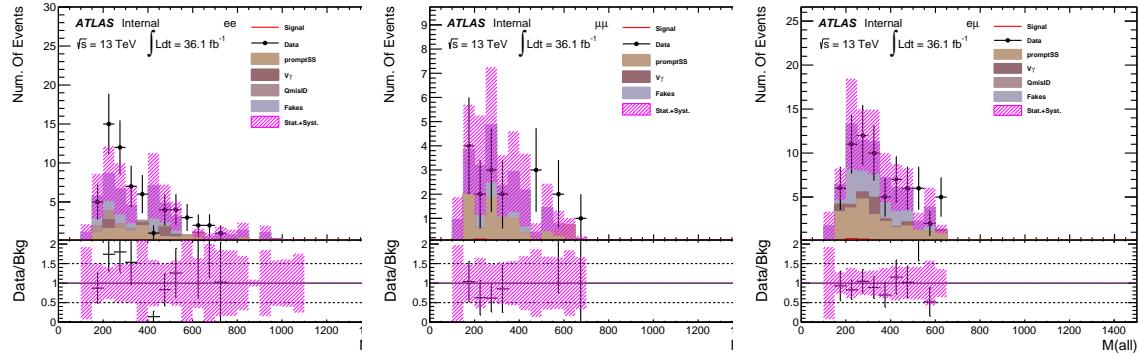
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$110.96 \pm 6.65(\text{stat.}) \pm 33.29(\text{syst.})$	$37.23 \pm 6.02(\text{stat.}) \pm 18.61(\text{syst.})$	$39.43 \pm 0.35(\text{stat.}) \pm 13.01(\text{syst.})$	$145.41 \pm 8.86(\text{stat.}) \pm 91.74(\text{syst.})$	$333.03 \pm 11.69(\text{stat.}) \pm 40.30(\text{syst1.}) \pm 91.74(\text{syst2.})$	371	0.59 ± 0.00
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$39.91 \pm 2.89(\text{stat.}) \pm 11.97(\text{syst.})$	$21.34 \pm 4.74(\text{stat.}) \pm 10.67(\text{syst.})$	$17.43 \pm 0.18(\text{stat.}) \pm 5.75(\text{syst.})$	$86.67 \pm 6.84(\text{stat.}) \pm 54.68(\text{syst.})$	$165.35 \pm 8.81(\text{stat.}) \pm 17.04(\text{syst1.}) \pm 54.68(\text{syst2.})$	173	0.58 ± 0.00
$M(\ell\ell)$	$12.41 \pm 1.74(\text{stat.}) \pm 3.72(\text{syst.})$	$3.34 \pm 1.26(\text{stat.}) \pm 1.67(\text{syst.})$	$4.78 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 1.58(\text{syst.})$	$28.20 \pm 3.90(\text{stat.}) \pm 17.79(\text{syst.})$	$48.72 \pm 4.45(\text{stat.}) \pm 4.37(\text{syst1.}) \pm 17.79(\text{syst2.})$	63	0.44 ± 0.00
$M(l_1 jj)$	$11.71 \pm 1.71(\text{stat.}) \pm 3.51(\text{syst.})$	$3.34 \pm 1.26(\text{stat.}) \pm 1.67(\text{syst.})$	$4.68 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 1.55(\text{syst.})$	$27.96 \pm 3.89(\text{stat.}) \pm 17.64(\text{syst.})$	$47.70 \pm 4.43(\text{stat.}) \pm 4.19(\text{syst1.}) \pm 17.64(\text{syst2.})$	62	0.44 ± 0.00

 表 4.7 The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$207.37 \pm 6.74(\text{stat.}) \pm 62.21(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$181.81 \pm 9.57(\text{stat.}) \pm 117.36(\text{syst.})$	$389.18 \pm 11.70(\text{stat.}) \pm 62.21(\text{syst1.}) \pm 117.36(\text{syst2.})$	309	1.21 ± 0.04
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$73.92 \pm 4.34(\text{stat.}) \pm 22.18(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$91.31 \pm 6.78(\text{stat.}) \pm 58.94(\text{syst.})$	$165.23 \pm 8.05(\text{stat.}) \pm 22.18(\text{syst1.}) \pm 58.94(\text{syst2.})$	102	1.07 ± 0.04
$M(\ell\ell)$	$10.34 \pm 1.52(\text{stat.}) \pm 3.10(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$17.80 \pm 2.99(\text{stat.}) \pm 11.49(\text{syst.})$	$28.13 \pm 3.36(\text{stat.}) \pm 3.10(\text{syst1.}) \pm 11.49(\text{syst2.})$	20	0.56 ± 0.03
$M(l_1 jj)$	$8.79 \pm 1.47(\text{stat.}) \pm 2.64(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$14.91 \pm 2.74(\text{stat.}) \pm 9.63(\text{syst.})$	$23.70 \pm 3.11(\text{stat.}) \pm 2.64(\text{syst1.}) \pm 9.63(\text{syst2.})$	17	0.54 ± 0.03

 表 4.8 The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$282.43 \pm 7.10(\text{stat.}) \pm 84.73(\text{syst.})$	$36.01 \pm 5.38(\text{stat.}) \pm 18.00(\text{syst.})$	$9.42 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 3.11(\text{syst.})$	$169.37 \pm 9.45(\text{stat.}) \pm 78.88(\text{syst.})$	$497.22 \pm 12.99(\text{stat.}) \pm 86.67(\text{syst1.}) \pm 78.88(\text{syst2.})$	589	1.69 ± 0.05
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$105.47 \pm 4.54(\text{stat.}) \pm 31.64(\text{syst.})$	$18.73 \pm 4.47(\text{stat.}) \pm 9.37(\text{syst.})$	$2.02 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.67(\text{syst.})$	$103.33 \pm 7.37(\text{stat.}) \pm 47.60(\text{syst.})$	$229.55 \pm 9.74(\text{stat.}) \pm 33.00(\text{syst1.}) \pm 47.60(\text{syst2.})$	244	1.53 ± 0.05
$M(\ell\ell)$	$29.17 \pm 2.42(\text{stat.}) \pm 8.75(\text{syst.})$	$5.89 \pm 1.87(\text{stat.}) \pm 2.95(\text{syst.})$	$0.54 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.18(\text{syst.})$	$45.62 \pm 4.90(\text{stat.}) \pm 20.94(\text{syst.})$	$81.23 \pm 5.77(\text{stat.}) \pm 9.23(\text{syst1.}) \pm 20.94(\text{syst2.})$	80	1.04 ± 0.04
$M(l_1 jj)$	$23.61 \pm 2.14(\text{stat.}) \pm 7.08(\text{syst.})$	$4.87 \pm 1.67(\text{stat.}) \pm 2.44(\text{syst.})$	$0.46 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.15(\text{syst.})$	$41.89 \pm 4.69(\text{stat.}) \pm 19.28(\text{syst.})$	$70.84 \pm 5.42(\text{stat.}) \pm 7.49(\text{syst1.}) \pm 19.28(\text{syst2.})$	70	0.99 ± 0.04

表 4.9 The unblinded results of $m_X=260$ GeV search in $e\mu$ channel.图 4.8 The unblinded $M(\text{all})$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=260$ GeV) search.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$102.50 \pm 4.47(\text{stat.}) \pm 30.75(\text{syst.})$	$33.03 \pm 5.51(\text{stat.}) \pm 16.52(\text{syst.})$	$35.61 \pm 0.33(\text{stat.}) \pm 11.75(\text{syst.})$	$128.89 \pm 8.34(\text{stat.}) \pm 81.32(\text{syst.})$	$300.04 \pm 10.96(\text{stat.}) \pm 36.83(\text{syst1.}) \pm 81.32(\text{syst2.})$	343	0.80 ± 0
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$49.48 \pm 3.15(\text{stat.}) \pm 14.84(\text{syst.})$	$22.72 \pm 5.05(\text{stat.}) \pm 11.36(\text{syst.})$	$22.09 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 7.29(\text{syst.})$	$92.54 \pm 7.07(\text{stat.}) \pm 58.38(\text{syst.})$	$186.83 \pm 9.25(\text{stat.}) \pm 20.06(\text{syst1.}) \pm 58.38(\text{syst2.})$	194	0.74 ± 0
$M(\ell\ell)$	$18.49 \pm 1.92(\text{stat.}) \pm 5.55(\text{syst.})$	$5.31 \pm 2.21(\text{stat.}) \pm 2.65(\text{syst.})$	$2.27 \pm 0.08(\text{stat.}) \pm 2.40(\text{syst.})$	$36.86 \pm 4.46(\text{stat.}) \pm 23.25(\text{syst.})$	$67.93 \pm 5.34(\text{stat.}) \pm 6.60(\text{syst1.}) \pm 23.25(\text{syst2.})$	90	0.61 ± 0
$M(l_1 jj)$	$18.15 \pm 1.91(\text{stat.}) \pm 5.44(\text{syst.})$	$5.31 \pm 2.21(\text{stat.}) \pm 2.65(\text{syst.})$	$7.22 \pm 0.08(\text{stat.}) \pm 2.38(\text{syst.})$	$36.34 \pm 4.43(\text{stat.}) \pm 22.93(\text{syst.})$	$67.02 \pm 5.31(\text{stat.}) \pm 6.51(\text{syst1.}) \pm 22.93(\text{syst2.})$	89	0.61 ± 0

表 4.10 The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$169.68 \pm 6.15(\text{stat.}) \pm 50.90(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$142.15 \pm 8.46(\text{stat.}) \pm 91.75(\text{syst.})$	$311.83 \pm 10.46(\text{stat.}) \pm 50.90(\text{syst1.}) \pm 91.75(\text{syst2.})$	245	1.80 ± 0.06
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$97.25 \pm 4.96(\text{stat.}) \pm 29.17(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$120.11 \pm 7.77(\text{stat.}) \pm 77.53(\text{syst.})$	$217.36 \pm 9.22(\text{stat.}) \pm 29.17(\text{syst1.}) \pm 77.53(\text{syst2.})$	141	1.66 ± 0.06
$M(\ell\ell)$	$50.83 \pm 3.33(\text{stat.}) \pm 15.25(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$78.24 \pm 6.28(\text{stat.}) \pm 50.51(\text{syst.})$	$129.07 \pm 7.11(\text{stat.}) \pm 15.25(\text{syst1.}) \pm 50.51(\text{syst2.})$	79	1.47 ± 0.05
$M(l_1 jj)$	$47.98 \pm 3.29(\text{stat.}) \pm 14.39(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$77.49 \pm 6.25(\text{stat.}) \pm 50.02(\text{syst.})$	$125.47 \pm 7.06(\text{stat.}) \pm 14.39(\text{syst1.}) \pm 50.02(\text{syst2.})$	74	1.46 ± 0.05

表 4.11 The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$285.01 \pm 7.13(\text{stat.}) \pm 85.50(\text{syst.})$	$36.28 \pm 5.39(\text{stat.}) \pm 18.14(\text{syst.})$	$9.46 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 3.12(\text{syst.})$	$170.21 \pm 9.47(\text{stat.}) \pm 79.34(\text{syst.})$	$500.96 \pm 13.02(\text{stat.}) \pm 87.46(\text{syst1.}) \pm 79.34(\text{syst2.})$	596	2.64 ± 0.07
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$182.33 \pm 5.88(\text{stat.}) \pm 54.70(\text{syst.})$	$26.12 \pm 4.79(\text{stat.}) \pm 13.06(\text{syst.})$	$3.99 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 1.32(\text{syst.})$	$139.61 \pm 8.57(\text{stat.}) \pm 64.37(\text{syst.})$	$352.05 \pm 11.44(\text{stat.}) \pm 56.25(\text{syst1.}) \pm 64.37(\text{syst2.})$	397	2.57 ± 0.07
$M(\ell\ell)$	$68.67 \pm 3.59(\text{stat.}) \pm 20.60(\text{syst.})$	$10.73 \pm 2.76(\text{stat.}) \pm 5.36(\text{syst.})$	$1.41 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.47(\text{syst.})$	$66.72 \pm 5.92(\text{stat.}) \pm 30.48(\text{syst.})$	$147.52 \pm 7.45(\text{stat.}) \pm 21.29(\text{syst1.}) \pm 30.48(\text{syst2.})$	163	2.05 ± 0.06
$M(l_1 jj)$	$59.41 \pm 3.38(\text{stat.}) \pm 17.82(\text{syst.})$	$8.94 \pm 2.50(\text{stat.}) \pm 4.47(\text{syst.})$	$1.24 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$	$62.74 \pm 5.74(\text{stat.}) \pm 28.94(\text{syst.})$	$132.33 \pm 7.12(\text{stat.}) \pm 18.38(\text{syst1.}) \pm 28.94(\text{syst2.})$	144	1.99 ± 0.06

表 4.12 The unblinded results of $m_X=300$ GeV search in $e\mu$ channel.

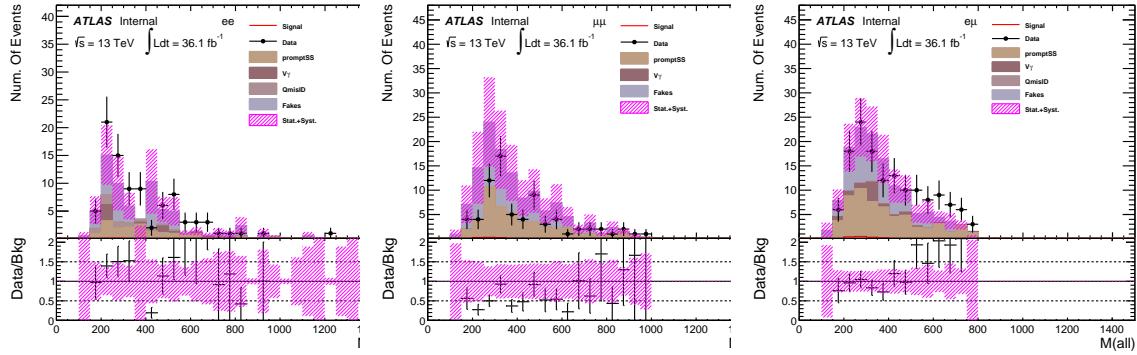


图 4.9 The unblinded $M(\text{all})$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=300$ GeV) search.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{\min}(l_2, j)$	$52.12 \pm 3.04(\text{stat.}) \pm 15.64(\text{syst.})$	$17.85 \pm 4.08(\text{stat.}) \pm 8.93(\text{syst.})$	$17.54 \pm 0.26(\text{stat.}) \pm 5.79(\text{syst.})$	$69.22 \pm 6.15(\text{stat.}) \pm 47.89(\text{syst.})$	$156.73 \pm 7.99(\text{stat.}) \pm 18.91(\text{syst1.}) \pm 47.89(\text{syst2.})$	182	3.33 ± 0.08
$\Delta R_{\min}(l_1, j)$	$20.98 \pm 1.96(\text{stat.}) \pm 6.29(\text{syst.})$	$3.51 \pm 1.10(\text{stat.}) \pm 1.76(\text{syst.})$	$6.68 \pm 0.15(\text{stat.}) \pm 2.20(\text{syst.})$	$27.96 \pm 3.91(\text{stat.}) \pm 19.35(\text{syst.})$	$59.14 \pm 4.52(\text{stat.}) \pm 6.90(\text{syst1.}) \pm 19.35(\text{syst2.})$	75	2.34 ± 0.07
$M(\ell\ell)$	$16.15 \pm 1.83(\text{stat.}) \pm 4.85(\text{syst.})$	$1.25 \pm 0.42(\text{stat.}) \pm 0.63(\text{syst.})$	$4.50 \pm 0.12(\text{stat.}) \pm 1.49(\text{syst.})$	$21.82 \pm 3.46(\text{stat.}) \pm 15.09(\text{syst.})$	$43.73 \pm 3.93(\text{stat.}) \pm 5.11(\text{syst1.}) \pm 15.09(\text{syst2.})$	59	2.27 ± 0.07
$M(l_1 jj)$	$11.56 \pm 1.25(\text{stat.}) \pm 3.47(\text{syst.})$	$0.83 \pm 0.34(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$	$3.46 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 1.14(\text{syst.})$	$19.09 \pm 3.23(\text{stat.}) \pm 13.21(\text{syst.})$	$34.94 \pm 3.48(\text{stat.}) \pm 3.67(\text{syst1.}) \pm 13.21(\text{syst2.})$	46	2.16 ± 0.07

表 4.13 The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{\min}(l_2, j)$	$59.36 \pm 3.01(\text{stat.}) \pm 17.81(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$51.25 \pm 4.83(\text{stat.}) \pm 36.79(\text{syst.})$	$110.61 \pm 5.69(\text{stat.}) \pm 17.81(\text{syst1.}) \pm 36.79(\text{syst2.})$	99	1.72 ± 0.06
$\Delta R_{\min}(l_1, j)$	$25.36 \pm 1.92(\text{stat.}) \pm 7.61(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$18.80 \pm 2.92(\text{stat.}) \pm 13.50(\text{syst.})$	$44.17 \pm 3.50(\text{stat.}) \pm 7.61(\text{syst1.}) \pm 13.50(\text{syst2.})$	37	1.38 ± 0.05
$M(\ell\ell)$	$18.50 \pm 1.72(\text{stat.}) \pm 5.55(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$17.02 \pm 2.78(\text{stat.}) \pm 12.22(\text{syst.})$	$35.51 \pm 3.27(\text{stat.}) \pm 5.55(\text{syst1.}) \pm 12.22(\text{syst2.})$	26	1.34 ± 0.05
$M(l_1 jj)$	$13.82 \pm 1.38(\text{stat.}) \pm 4.15(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$14.09 \pm 2.53(\text{stat.}) \pm 10.11(\text{syst.})$	$27.91 \pm 2.88(\text{stat.}) \pm 4.15(\text{syst1.}) \pm 10.11(\text{syst2.})$	19	1.30 ± 0.05

表 4.14 The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{\min}(l_2, j)$	$145.72 \pm 5.10(\text{stat.}) \pm 43.72(\text{syst.})$	$23.17 \pm 4.97(\text{stat.}) \pm 11.59(\text{syst.})$	$5.06 \pm 0.13(\text{stat.}) \pm 1.67(\text{syst.})$	$72.77 \pm 6.07(\text{stat.}) \pm 36.36(\text{syst.})$	$246.72 \pm 9.35(\text{stat.}) \pm 45.26(\text{syst1.}) \pm 36.36(\text{syst2.})$	283	3.33 ± 0.08
$\Delta R_{\min}(l_1, j)$	$46.01 \pm 2.73(\text{stat.}) \pm 13.80(\text{syst.})$	$7.96 \pm 3.23(\text{stat.}) \pm 3.98(\text{syst.})$	$1.69 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.56(\text{syst.})$	$27.03 \pm 3.75(\text{stat.}) \pm 14.31(\text{syst.})$	$82.70 \pm 5.65(\text{stat.}) \pm 14.38(\text{syst1.}) \pm 14.31(\text{syst2.})$	93	2.34 ± 0.07
$M(\ell\ell)$	$33.90 \pm 2.37(\text{stat.}) \pm 10.17(\text{syst.})$	$6.54 \pm 3.20(\text{stat.}) \pm 3.27(\text{syst.})$	$0.86 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.28(\text{syst.})$	$20.86 \pm 3.29(\text{stat.}) \pm 11.11(\text{syst.})$	$62.16 \pm 5.17(\text{stat.}) \pm 10.69(\text{syst1.}) \pm 11.11(\text{syst2.})$	69	2.27 ± 0.07
$M(l_1 jj)$	$24.13 \pm 1.97(\text{stat.}) \pm 7.24(\text{syst.})$	$2.47 \pm 1.25(\text{stat.}) \pm 1.23(\text{syst.})$	$0.60 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.20(\text{syst.})$	$17.82 \pm 3.06(\text{stat.}) \pm 9.80(\text{syst.})$	$45.02 \pm 3.84(\text{stat.}) \pm 7.35(\text{syst1.}) \pm 9.80(\text{syst2.})$	57	2.16 ± 0.07

表 4.15 The unblinded results of $m_X=400$ GeV search in $e\mu$ channel.

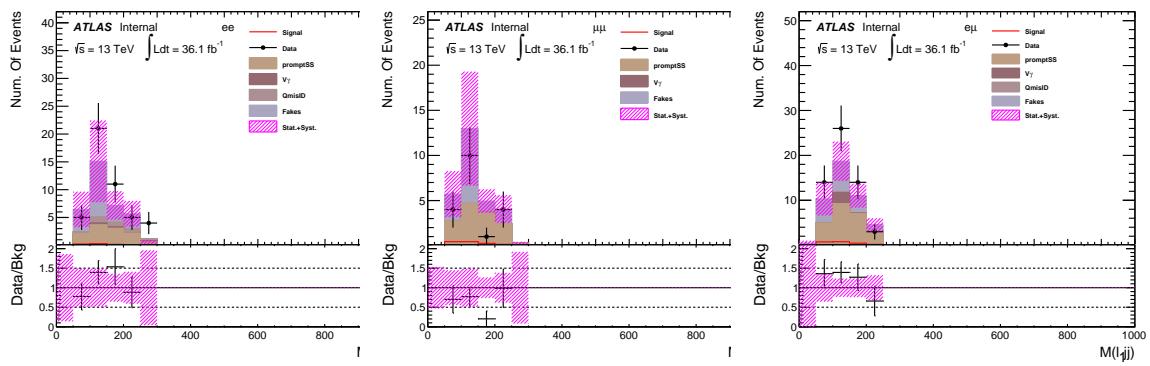


图 4.10 The unblinded $M(\ell_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=400$ GeV) search.

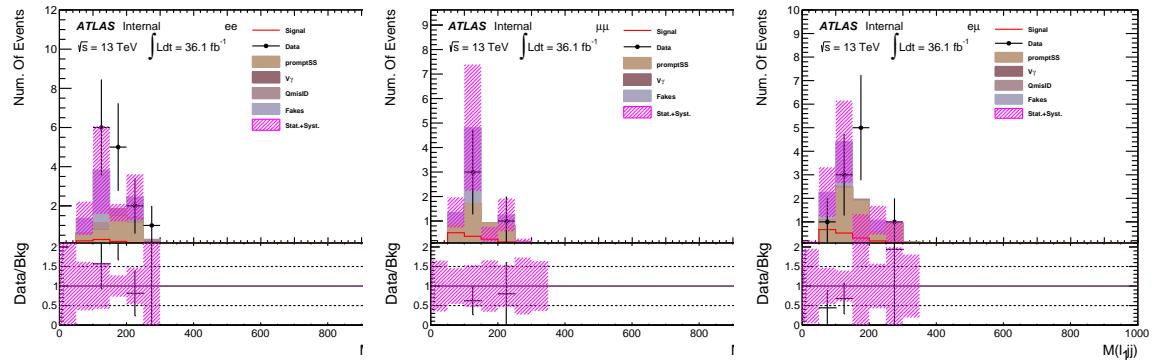
	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$36.10 \pm 2.66(\text{stat.}) \pm 10.83(\text{syst.})$	$12.21 \pm 3.77(\text{stat.}) \pm 6.10(\text{syst.})$	$11.32 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 3.73(\text{syst.})$	$49.72 \pm 5.22(\text{stat.}) \pm 34.39(\text{syst.})$	$109.34 \pm 6.96(\text{stat.}) \mp 12.98(\text{syst1.}) \pm 34.39(\text{syst2.})$	117	1.40 ± 0.05
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$13.11 \pm 1.68(\text{stat.}) \pm 3.93(\text{syst.})$	$1.89 \pm 0.95(\text{stat.}) \pm 0.94(\text{syst.})$	$4.00 \pm 0.12(\text{stat.}) \pm 1.32(\text{syst.})$	$17.81 \pm 3.12(\text{stat.}) \pm 12.32(\text{syst.})$	$36.81 \pm 3.67(\text{stat.}) \mp 4.26(\text{syst1.}) \pm 12.32(\text{syst2.})$	47	1.13 ± 0.04
$M(\ell\ell)$	$5.40 \pm 0.79(\text{stat.}) \pm 1.62(\text{syst.})$	$0.36 \pm 0.19(\text{stat.}) \pm 0.18(\text{syst.})$	$1.59 \pm 0.08(\text{stat.}) \pm 0.53(\text{syst.})$	$6.65 \pm 1.91(\text{stat.}) \pm 4.60(\text{syst.})$	$14.01 \pm 2.08(\text{stat.}) \mp 1.71(\text{syst1.}) \pm 4.60(\text{syst2.})$	21	0.90 ± 0.04
$M(l_1 jj)$	$3.92 \pm 0.70(\text{stat.}) \pm 1.17(\text{syst.})$	$0.12 \pm 0.05(\text{stat.}) \pm 0.06(\text{syst.})$	$1.24 \pm 0.07(\text{stat.}) \pm 0.41(\text{syst.})$	$4.03 \pm 1.48(\text{stat.}) \pm 2.79(\text{syst.})$	$9.31 \pm 1.64(\text{stat.}) \mp 1.25(\text{syst1.}) \pm 2.79(\text{syst2.})$	14	0.85 ± 0.04

表 4.16 The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$47.41 \pm 2.70(\text{stat.}) \pm 14.22(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$37.76 \pm 4.14(\text{stat.}) \pm 27.11(\text{syst.})$	$85.17 \pm 4.94(\text{stat.}) \mp 14.22(\text{syst1.}) \pm 27.11(\text{syst2.})$	72	2.29 ± 0.06
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$9.52 \pm 1.17(\text{stat.}) \pm 2.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$5.59 \pm 1.59(\text{stat.}) \pm 4.01(\text{syst.})$	$15.11 \pm 1.98(\text{stat.}) \mp 2.86(\text{syst1.}) \pm 4.01(\text{syst2.})$	10	1.50 ± 0.04
$M(\ell\ell)$	$6.21 \pm 0.97(\text{stat.}) \pm 1.86(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$4.01 \pm 1.35(\text{stat.}) \pm 2.88(\text{syst.})$	$10.22 \pm 1.66(\text{stat.}) \mp 1.86(\text{syst1.}) \pm 2.88(\text{syst2.})$	4	1.43 ± 0.04
$M(l_1 jj)$	$4.50 \pm 0.74(\text{stat.}) \pm 1.35(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$3.56 \pm 1.27(\text{stat.}) \pm 2.55(\text{syst.})$	$8.05 \pm 1.47(\text{stat.}) \mp 1.35(\text{syst1.}) \pm 2.55(\text{syst2.})$	4	1.40 ± 0.04

表 4.17 The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$71.26 \pm 3.23(\text{stat.}) \pm 21.38(\text{syst.})$	$12.92 \pm 3.94(\text{stat.}) \pm 6.46(\text{syst.})$	$2.74 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.90(\text{syst.})$	$40.57 \pm 4.57(\text{stat.}) \pm 20.90(\text{syst.})$	$127.48 \pm 6.85(\text{stat.}) \mp 22.35(\text{syst1.}) \pm 20.90(\text{syst2.})$	152	3.41 ± 0.07
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$15.07 \pm 1.61(\text{stat.}) \pm 4.52(\text{syst.})$	$0.63 \pm 0.23(\text{stat.}) \pm 0.31(\text{syst.})$	$0.53 \pm 0.05(\text{stat.}) \pm 0.18(\text{syst.})$	$6.42 \pm 1.86(\text{stat.}) \pm 4.17(\text{syst.})$	$22.64 \pm 2.47(\text{stat.}) \mp 4.53(\text{syst1.}) \pm 4.17(\text{syst2.})$	30	2.19 ± 0.06
$M(\ell\ell)$	$8.61 \pm 1.15(\text{stat.}) \pm 2.58(\text{syst.})$	$0.03 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.02(\text{syst.})$	$0.27 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.09(\text{syst.})$	$2.10 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 1.10(\text{syst.})$	$11.01 \pm 1.55(\text{stat.}) \mp 2.59(\text{syst1.}) \pm 1.10(\text{syst2.})$	13	1.94 ± 0.05
$M(l_1 jj)$	$7.07 \pm 1.04(\text{stat.}) \pm 2.12(\text{syst.})$	$0.03 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm 0.01(\text{syst.})$	$0.21 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.07(\text{syst.})$	$1.70 \pm 0.93(\text{stat.}) \pm 0.86(\text{syst.})$	$9.01 \pm 1.40(\text{stat.}) \mp 2.12(\text{syst1.}) \pm 0.86(\text{syst2.})$	10	1.91 ± 0.05

表 4.18 The unblinded results of $m_X=500$ GeV search in $e\mu$ channel.图 4.11 The unblinded $M(l_1 jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to resonance ($m_X=500$ GeV) search.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg	Observed	signal
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$177.91 \pm 6.06(\text{stat.}) \pm 53.37(\text{syst.})$	$84.84 \pm 11.72(\text{stat.}) \pm 42.42(\text{syst.})$	$81.84 \pm 0.54(\text{stat.}) \pm 27.01(\text{syst.})$	$257.46 \pm 11.79(\text{stat.}) \pm 162.43(\text{syst.})$	$602.05 \pm 17.70(\text{stat.}) \mp 73.33(\text{syst1.}) \pm 162.43(\text{syst2.})$		
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$84.62 \pm 3.98(\text{stat.}) \pm 25.39(\text{syst.})$	$29.21 \pm 5.40(\text{stat.}) \pm 14.60(\text{syst.})$	$29.29 \pm 0.30(\text{stat.}) \pm 9.67(\text{syst.})$	$102.28 \pm 7.43(\text{stat.}) \pm 64.53(\text{syst.})$	$245.41 \pm 10.02(\text{stat.}) \mp 30.84(\text{syst1.}) \pm 64.53(\text{syst2.})$		
$M(\ell\ell)$	$29.09 \pm 2.45(\text{stat.}) \pm 8.73(\text{syst.})$	$18.51 \pm 4.62(\text{stat.}) \pm 9.25(\text{syst.})$	$12.04 \pm 0.15(\text{stat.}) \pm 3.97(\text{syst.})$	$58.21 \pm 5.61(\text{stat.}) \pm 36.73(\text{syst.})$	$117.84 \pm 7.67(\text{stat.}) \mp 13.32(\text{syst1.}) \pm 36.73(\text{syst2.})$		
$M(l_1 jj)$	$10.16 \pm 1.50(\text{stat.}) \pm 3.05(\text{syst.})$	$3.34 \pm 1.26(\text{stat.}) \pm 1.67(\text{syst.})$	$3.77 \pm 0.06(\text{stat.}) \pm 1.24(\text{syst.})$	$20.43 \pm 3.32(\text{stat.}) \pm 12.89(\text{syst.})$	$37.69 \pm 3.86(\text{stat.}) \mp 3.69(\text{syst1.}) \pm 12.89(\text{syst2.})$		
	X280, S135	X300, S135	X320, S135		Observed		
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	3.04±0.21	3.54±0.19	4.09±0.22		647		
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	2.48±0.19	2.92±0.18	3.40±0.20		284		
$M(\ell\ell)$	2.38±0.18	2.61±0.17	2.70±0.18		128		
$M(l_1 jj)$	1.86±0.16	2.10±0.15	2.04±0.16		50		

表 4.19 The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	229.53 \pm 6.81(stat.) \pm 68.86(syst.)	0.01 \pm 0.01(stat.) \pm 0.00(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	188.45 \pm 9.74(stat.) \pm 121.65(syst.)	417.99 \pm 11.88(stat.) \pm 68.86(syst1.) \pm 121.65(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	137.67 \pm 5.13(stat.) \pm 41.30(syst.)	0.01 \pm 0.01(stat.) \pm 0.00(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	121.81 \pm 7.83(stat.) \pm 78.63(syst.)	259.49 \pm 9.36(stat.) \pm 41.30(syst1.) \pm 78.63(syst2.)
$M(\ell\ell)$	65.75 \pm 3.73(stat.) \pm 19.73(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	87.44 \pm 6.63(stat.) \pm 56.44(syst.)	153.19 \pm 7.61(stat.) \pm 19.73(syst1.) \pm 56.44(syst2.)
$M(l_1jj)$	21.62 \pm 2.05(stat.) \pm 6.49(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	0.00 \pm 0.00(stat.) \pm 0.00(syst.)	43.90 \pm 4.70(stat.) \pm 28.34(syst.)	65.52 \pm 5.13(stat.) \pm 6.49(syst1.) \pm 28.34(syst2.)
	X280, S135	X300, S135	X320, S135	Observed	
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	6.37 \pm 0.27	7.13 \pm 0.29	7.74 \pm 0.31	355	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	5.71 \pm 0.26	6.23 \pm 0.28	6.82 \pm 0.29	210	
$M(\ell\ell)$	5.51 \pm 0.26	5.51 \pm 0.26	5.43 \pm 0.26	104	
$M(l_1jj)$	4.43 \pm 0.24	4.31 \pm 0.22	3.96 \pm 0.23	46	

表 4.20 The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	305.75 \pm 7.53(stat.) \pm 91.72(syst.)	47.54 \pm 6.37(stat.) \pm 23.77(syst.)	10.98 \pm 0.19(stat.) \pm 3.62(syst.)	174.03 \pm 9.56(stat.) \pm 79.98(syst.)	538.30 \pm 13.74(stat.) \pm 94.82(syst1.) \pm 79.98(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	155.59 \pm 5.15(stat.) \pm 46.68(syst.)	19.51 \pm 4.02(stat.) \pm 9.76(syst.)	5.65 \pm 0.13(stat.) \pm 1.87(syst.)	92.23 \pm 6.96(stat.) \pm 42.10(syst.)	272.99 \pm 9.54(stat.) \pm 47.72(syst1.) \pm 42.10(syst2.)
$M(\ell\ell)$	69.36 \pm 3.51(stat.) \pm 20.81(syst.)	12.81 \pm 3.74(stat.) \pm 6.41(syst.)	1.40 \pm 0.04(stat.) \pm 0.46(syst.)	66.56 \pm 5.91(stat.) \pm 30.43(syst.)	150.14 \pm 7.83(stat.) \pm 21.78(syst1.) \pm 30.43(syst2.)
$M(l_1jj)$	25.91 \pm 2.24(stat.) \pm 7.77(syst.)	4.70 \pm 1.66(stat.) \pm 2.35(syst.)	0.49 \pm 0.02(stat.) \pm 0.16(syst.)	39.17 \pm 4.54(stat.) \pm 18.25(syst.)	70.27 \pm 5.33(stat.) \pm 8.12(syst1.) \pm 18.25(syst2.)
	X280, S135	X300, S135	X320, S135	Observed	
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	8.34 \pm 0.33	9.25 \pm 0.33	10.86 \pm 0.40	649	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	6.87 \pm 0.29	7.74 \pm 0.31	8.98 \pm 0.37	302	
$M(\ell\ell)$	6.52 \pm 0.28	6.87 \pm 0.29	7.18 \pm 0.32	155	
$M(l_1jj)$	5.15 \pm 0.23	5.46 \pm 0.26	5.37 \pm 0.28	62	

表 4.21 The unblinded results of the searches for $m_X=280$ GeV, $m_X=300$ GeV and $m_X=320$ GeV(fixing $m_S=135$ GeV) in $e\mu$ channel.

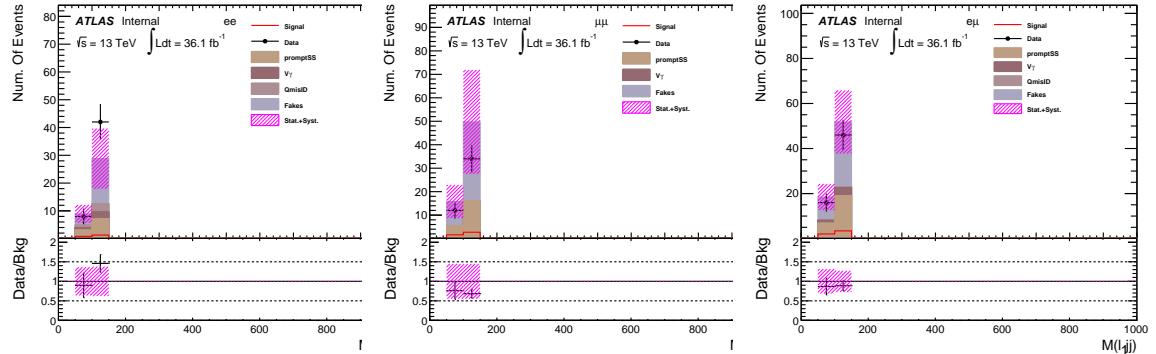


图 4.12 The unblinded $M(\ell_1jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to SS low mass search. The signal shown here is $m_X=300$ GeV, $m_S=135$ GeV.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	67.65 \pm 3.53(stat.) \pm 20.30(syst.)	20.22 \pm 4.14(stat.) \pm 10.11(syst.)	23.49 \pm 0.31(stat.) \pm 7.75(syst.)	84.19 \pm 6.79(stat.) \pm 58.24(syst.)	195.54 \pm 8.70(stat.) \pm 23.96(syst1.) \pm 58.24(syst2.)
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	39.86 \pm 2.57(stat.) \pm 11.96(syst.)	10.52 \pm 2.58(stat.) \pm 5.26(syst.)	13.01 \pm 0.21(stat.) \pm 4.29(syst.)	43.87 \pm 4.90(stat.) \pm 30.35(syst.)	107.26 \pm 6.11(stat.) \pm 13.75(syst1.) \pm 30.35(syst2.)
$M(\ell\ell)$	22.40 \pm 2.12(stat.) \pm 6.72(syst.)	7.57 \pm 2.41(stat.) \pm 3.79(syst.)	8.57 \pm 0.15(stat.) \pm 2.83(syst.)	35.70 \pm 4.42(stat.) \pm 24.70(syst.)	74.24 \pm 5.47(stat.) \pm 8.21(syst1.) \pm 24.70(syst2.)
$M(l_1jj)$	11.57 \pm 1.34(stat.) \pm 3.47(syst.)	3.51 \pm 1.21(stat.) \pm 1.75(syst.)	4.22 \pm 0.08(stat.) \pm 1.39(syst.)	24.59 \pm 3.67(stat.) \pm 17.01(syst.)	43.89 \pm 4.09(stat.) \pm 4.13(syst1.) \pm 17.01(syst2.)
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	2.95 \pm 0.20	9.19 \pm 0.52	17.48 \pm 0.94	29.64 \pm 1.58	
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	2.56 \pm 0.19	8.26 \pm 0.50	15.41 \pm 0.86	27.84 \pm 1.51	
$M(\ell\ell)$	2.38 \pm 0.19	7.83 \pm 0.49	15.31 \pm 0.85	27.84 \pm 1.51	
$M(l_1jj)$	2.22 \pm 0.18	7.15 \pm 0.47	13.95 \pm 0.82	25.66 \pm 1.44	

表 4.22 The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in ee channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$116.18 \pm 4.57(\text{stat.}) \pm 34.85(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$102.27 \pm 6.82(\text{stat.}) \pm 73.42(\text{syst.})$	$218.45 \pm 8.21(\text{stat.}) \pm 34.85(\text{syst1.}) \pm 73.42(\text{syst2.})$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$72.61 \pm 3.46(\text{stat.}) \pm 21.78(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$64.78 \pm 5.43(\text{stat.}) \pm 46.50(\text{syst.})$	$137.39 \pm 6.44(\text{stat.}) \pm 21.78(\text{syst1.}) \pm 46.50(\text{syst2.})$
$M(\ell\ell)$	$39.34 \pm 2.56(\text{stat.}) \pm 11.80(\text{syst.})$	$0.01 \pm 0.01(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$55.61 \pm 5.03(\text{stat.}) \pm 39.92(\text{syst.})$	$94.96 \pm 5.64(\text{stat.}) \pm 11.80(\text{syst1.}) \pm 39.92(\text{syst2.})$
$M(l_1jj)$	$22.92 \pm 1.79(\text{stat.}) \pm 6.88(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$0.00 \pm 0.00(\text{stat.}) \pm 0.00(\text{syst.})$	$39.33 \pm 4.23(\text{stat.}) \pm 28.24(\text{syst.})$	$62.25 \pm 4.59(\text{stat.}) \pm 6.88(\text{syst1.}) \pm 28.24(\text{syst2.})$
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	5.92 ± 0.26	19.02 ± 0.83	38.96 ± 1.50	64.54 ± 2.19	172
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	5.39 ± 0.25	17.52 ± 0.81	36.36 ± 1.47	61.47 ± 2.14	113
$M(\ell\ell)$	4.89 ± 0.24	16.51 ± 0.79	35.05 ± 1.44	61.31 ± 2.14	66
$M(l_1jj)$	4.34 ± 0.23	14.90 ± 0.75	32.26 ± 1.39	56.55 ± 2.06	38

表 4.23 The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in $\mu\mu$ channel.

	promptSS	$V + \gamma$	QmisID	Fakes	Total bkg
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	$158.05 \pm 5.26(\text{stat.}) \pm 47.42(\text{syst.})$	$24.53 \pm 4.99(\text{stat.}) \pm 12.26(\text{syst.})$	$5.42 \pm 0.13(\text{stat.}) \pm 1.79(\text{syst.})$	$79.82 \pm 6.36(\text{stat.}) \pm 39.91(\text{syst.})$	$267.81 \pm 9.65(\text{stat.}) \pm 49.01(\text{syst1.}) \pm 39.91(\text{syst2.})$
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	$93.10 \pm 4.03(\text{stat.}) \pm 27.93(\text{syst.})$	$13.51 \pm 3.65(\text{stat.}) \pm 6.76(\text{syst.})$	$3.28 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 1.08(\text{syst.})$	$49.78 \pm 5.03(\text{stat.}) \pm 25.05(\text{syst.})$	$159.67 \pm 7.41(\text{stat.}) \pm 28.76(\text{syst1.}) \pm 25.05(\text{syst2.})$
$M(\ell\ell)$	$65.27 \pm 3.46(\text{stat.}) \pm 19.58(\text{syst.})$	$10.94 \pm 3.53(\text{stat.}) \pm 5.47(\text{syst.})$	$1.47 \pm 0.04(\text{stat.}) \pm 0.49(\text{syst.})$	$42.40 \pm 4.64(\text{stat.}) \pm 21.29(\text{syst.})$	$120.08 \pm 6.78(\text{stat.}) \pm 20.34(\text{syst1.}) \pm 21.29(\text{syst2.})$
$M(l_1jj)$	$23.53 \pm 2.01(\text{stat.}) \pm 7.06(\text{syst.})$	$3.53 \pm 1.29(\text{stat.}) \pm 1.76(\text{syst.})$	$0.52 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.17(\text{syst.})$	$25.49 \pm 3.64(\text{stat.}) \pm 13.58(\text{syst.})$	$53.07 \pm 4.36(\text{stat.}) \pm 7.28(\text{syst1.}) \pm 13.58(\text{syst2.})$
	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165	Observed
$\Delta R_{min}(l_2, j)$	8.50 ± 0.34	24.75 ± 0.83	49.33 ± 1.64	85.30 ± 2.45	308
$\Delta R_{min}(l_1, j)$	7.51 ± 0.31	21.64 ± 0.78	43.74 ± 1.54	79.38 ± 2.37	179
$M(\ell\ell)$	7.41 ± 0.31	21.53 ± 0.78	43.57 ± 1.54	79.38 ± 2.37	131
$M(l_1jj)$	5.58 ± 0.27	16.64 ± 0.68	35.70 ± 1.41	69.41 ± 2.23	64

表 4.24 The unblinded results of the searches for $m_S=135$ GeV, $m_S=145$ GeV, $m_S=155$ GeV and $m_S=165$ GeV(fixing $m_X=340$ GeV) in $e\mu$ channel.

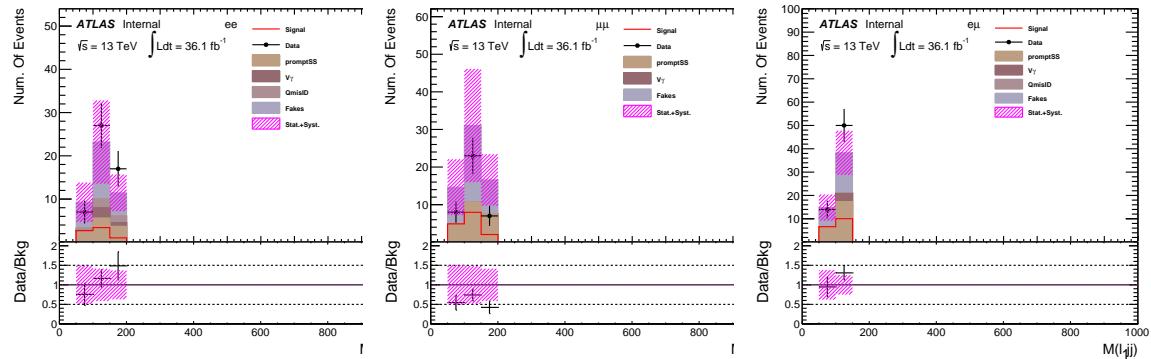


图 4.13 The unblinded $M(\ell_1jj)$ distribution after all optimization selections, corresponding to SS high mass search. The signal shown here is $m_X=340$ GeV, $m_S=145$ GeV.

第 5 章 系统误差

5.1 对撞亮度

2015 年和 2016 年的联合亮度的不确定性为 2.1%，将应用到信号样本和 promptSS 本底上。亮度误差估计利用与文献 [79] 类似的方法得出，来自于 2015 年 8 月和 2016 年 5 月进行的 xy 束流分离扫描对亮度的初步校准结果。

5.2 信号样本理论误差

- 标准模型希格斯对的信号样本的理论误差依据推荐 [80] 是 $^{+4.3}_{-6.0}(\text{scale})^{+5.0}_{-5.0}(\text{Th.})^{+2.1}_{-2.1}(\text{PDF})^{+2.3}_{-2.3}(\alpha_S)\%$ 。
- 共振态希格斯对信号样本利用 CT10 PDF（具有 26 个相互独立参数）产生，其来源于 PDF 的误差通过 LHAPDF6 [81] 估计，每个产生的事例会根据 PDF 参数变动被重新赋予权重：

$$w_i = \frac{x_1 f_{1i}(x_1; Q) x_2 f_{2i}(x_2; Q)}{x_1 f_{10}(x_1; Q) x_2 f_{20}(x_2; Q)} (i = 1, 2, \dots, 52), \quad (5.1)$$

其中“1”和“2”表示硬散射过程中的两个入射部分子，“0”是 PDF 的最佳拟合值，即基准值，而 i 对应 PDF 参数的一次向上或向下变动。每项 PDF 变动之后的事例数与使用基准值的事例数差别作为单项误差，而总的 PDF 误差取它们的平方和。对于 SS 样本，PDF 误差则是 NNPDF23 中的 100 项参数变动带来的误差的平方和，结果大约为 6%。

- QCD 重整化和因子化参数同时或者单独加倍（或者减半），然后计算相应变动之后的事例数，最终把与基准值差别最大的一次作为系统误差，对于 hh (SS) 可达到 10% (4%)。
- 部分子簇射产生子的选择可影响信号的接收效率。对于 hh 信号，使用 Pythia 8 作为部分子簇射产生子的信号样本被产生，而后比较其与使用 Herwig++ 的基准信号接收效率的差别，此差别将作为部分子簇射产生模型的系统误差，随着 m_X 的增大，其值从 40% 到 10%；而对于 SS ，Pythia 8 内部的所有部分子簇射模型参数变动带来的差别的平方和将作为此项误差，其值大概为 10%。

所有的信号样本的理论误差总结在表 5.1 和表 5.2 中。

hh	SM Higgs pair				$m_X=260 \text{ GeV}$				$m_X=300 \text{ GeV}$				$m_X=400 \text{ GeV}$				$m_X=500 \text{ GeV}$					
	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	
PDF	4.01	4.07	4.09	3.88	3.80	3.92	3.87	3.78	3.86	3.85	3.75	3.83	3.98	3.94	3.95							
PS	13.24	18.18	10.00	26.58	42.65	19.28	30.72	31.65	18.96	22.02	24.48	33.14	1.64	16.59	12.76							
Scale	1.39	1.15	6.96	5.78	3.97	0.06	0.13	4.85	0.02	9.86	0.09	3.07	3.91	0.98	1.05							

表 5.1 The theoretical uncertainties on $X \rightarrow hh$ production.

hh	$m_X=280 \text{ GeV}, m_S=135 \text{ GeV}$		$m_X=300 \text{ GeV}, m_S=135 \text{ GeV}$		$m_X=320 \text{ GeV}, m_S=135 \text{ GeV}$		$m_X=340 \text{ GeV}, m_S=135 \text{ GeV}$		$m_X=340 \text{ GeV}, m_S=145 \text{ GeV}$		$m_X=340 \text{ GeV}, m_S=155 \text{ GeV}$		$m_X=340 \text{ GeV}, n$								
	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$	ee	$\mu\mu$	$e\mu$
PDF	5.75	5.79	5.80	5.86	5.87	5.86	5.98	6.06	6.06	6.07	6.37	6.22	6.06	6.14	6.10	6.05	6.22	6.25	6.10	6.18	
PS	4.97	6.50	6.95	5.97	8.12	2.86	3.90	10.69	7.44	8.65	6.16	5.83	10.15	6.24	6.51	7.41	7.32	9.18	9.29	8.74	
Scale	0.55	2.22	3.90	0.55	2.22	3.90	0.55	2.22	3.90	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	1.16	0.36	3.32	

表 5.2 The theoretical uncertainties on $X \rightarrow SS$ production.

5.3 data-driven 本底估计系统误差

QmisID 和 fakes 本底的误差如章节 3 所示，值得指出的是，QmisID 的系统误差对其本身和 fakes 上具有相反的影响。

5.4 本底预期截面误差

promptSS 和 $V\gamma$ 本底利用 MC 估计，其中主要部分是 WZ (70%)，根据三轻子分析道的估计， WZ 的截面误差为 25%。 $W^\pm W^\pm$ 本底在 promptSS 占据大约 10%，其误差假设为 50%。剩下的 $V\gamma$, tV , $t\bar{t}V$ 和 $t\bar{t}H$ 的预期截面误差均假设为 50%，为了支持 50% 是一个足够保守的估计，可参见标准模型截面测量实验， tZ 和 ttW (ttZ) 的截面测量误差分别为 15% [82] 和 53.3% (33%) [83]。

5.5 探测器误差

探测器误差主要来源于粒子重建及鉴别，校准等。

- 影响信号运动学分布的系统误差
- 电子沉积能量测量和分辨率
- 受低动量径迹影响的 E_T^{miss} 重建误差
- Jet 能量测量及分辨误差
- 末态重建及选择带来的效率修正误差
- 轻子重建，鉴别以及孤立效率
- Pile-up reweighting
- JVT event weight
- b -tagging 效率

信号, promptSS 和 $V\gamma$ 同时考虑了这些误差, 但在实际操作中, 每个分析道每个信号区各自舍弃掉整体影响低于 0.5% 的系统误差。表 5.3 总结了在 hh 搜寻中 $e\mu$ 分析道的系统误差大小。

Uncertainty source	Non-resonant hh	PromptSS	$V\gamma$	Fakes	QmisID
Luminosity	± 2.1	± 2.1	± 2.1	∓ 2.1	
PDF	± 2.1				
Scale	$+4.3/-6.0$				
Top mass	± 5.0				
α_s	± 2.3				
WZ cross-section		± 12.5		∓ 19.8	
$ssWW$ cross-section		± 8.3		∓ 6.1	
ttV cross-section		± 8.1			
tV cross-section		± 1.2			
ttH cross-section		± 1.9			
$V\gamma$ cross-section			± 50		
Pile-up reweighting	± 3.63	± 2.24	± 20.48		
b-tagging	± 2.63	± 2.8			
JVT	± 0.78	± 0.61	± 0.6		
lepton ID	± 1.1	± 1.2	± 1.0		
JES/JER	± 4.0	± 14.7	± 98		
MET	± 0.8	± 1.24			
QmisID				∓ 16.1	± 30

表 5.3 The summary of systematic uncertainty for the search of non-resonant hh in $e\mu$ channel.
All numbers are in %. It should be noted that the non-closure, sample composition and stat.
uncertainties are not shown for fakes.

第 6 章 统计结果

在此搜寻中，并没有发现明显信号，所以构建以下似然函数比作为假设检验量。

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(0, \hat{\theta}(0))} & \text{if } \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta})} & \text{if } 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \text{if } \hat{\mu} > \mu \end{cases}$$

其中 $\hat{\theta}$ 表示无条件拟合， $\hat{\theta}$ 表示有条件拟合（即 μ 为固定值）。利用此假设检验量，在渐近近似分布 [84] 下基于 CL_s 方法 [85] 即可得到产生截面上限。

- 在 95% CL_s 置信度下，标准模型希格斯对 ($pp \rightarrow hh$) 观测（期望）产生截面上限为 5.6 pb (4.8 pb)，即 168 倍 (145 倍) 标准模型预测值。
- 在 95% CL_s 置信度下，共振态希格斯对 ($pp \rightarrow X \rightarrow hh$) 的产生截面上限如表 6.1 所示，对应图 6.1。
- 在 95% CL_s 置信度下， SS ($pp \rightarrow X \rightarrow SS$) 随 m_S 或 m_X 变化的产生截面上限如表 6.2 和图 6.2 所示。

	SM Higgs pair	260 GeV	300 GeV	400 GeV	500 GeV
Median	144.96	36.96	30.06	12.09	3.37
Observed	168.01	31.53	26.85	11.72	3.04
$+2\sigma$	292.48	87.71	66.75	29.44	7.18
$+1\sigma$	206.69	56.13	44.18	18.33	4.89
-1σ	104.45	26.63	21.66	8.71	2.43
-2σ	77.80	19.84	16.14	6.49	1.81

表 6.1 The combined exclusion limits at the 95% CL for the production cross section of a gluon fusion produced X boson times its branching ratio to hh .

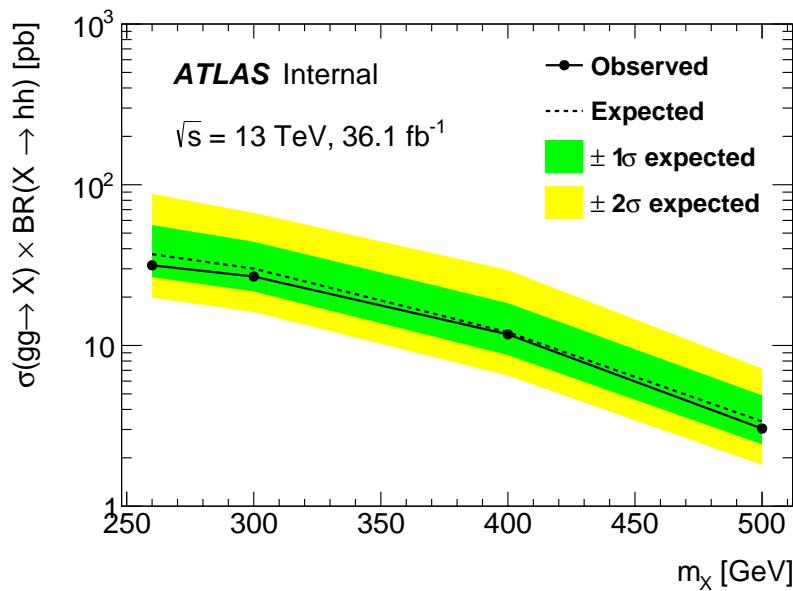


图 6.1 The expected limits for $pp \rightarrow X \rightarrow hh$, as a function of m_X .

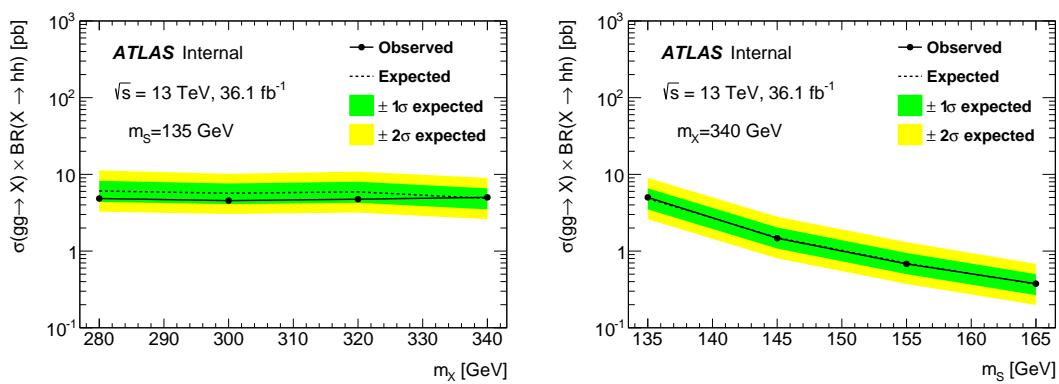


图 6.2 The expected limits for $pp \rightarrow X \rightarrow SS$ production. Left: fixing $m_S=135$ GeV; right: fixing $m_X=340$ GeV.

	X280, S135	X300, S135	X320, S135	X340, S135	X340, S145	X340, S155	X340, S165
Median	6.07	5.68	5.91	4.85	1.50	0.69	0.37
Observed	4.85	4.55	4.75	5.02	1.47	0.68	0.38
$+2\sigma$	11.28	10.15	10.86	8.98	2.80	1.31	0.68
$+1\sigma$	8.24	7.60	8.01	6.58	2.03	0.95	0.50
-1σ	4.38	4.09	4.26	3.50	1.08	0.50	0.27
-2σ	3.26	3.05	3.17	2.60	0.80	0.37	0.20

表 6.2 The combined exclusion limits at the 95% CL for the production cross section of a gluon fusion produced X boson times its branching ratio to SS.

第7章 4W 联合统计结果

为了最大化 4W 分析道的灵敏度，对 3 个现有衰变分析道进行统计组合，包括 2LSS, 3Lep 和 4Lep。统计处理与参考文献 [86, 87] 中描述的相同。每个 bin 的事例数采用泊松假设，联合乘积即可构建似然函数；其中系统误差，即冗余参数，利用高斯函数模拟。值得注意的是，影响多个分析道的系统误差应当使用相同的冗余参数，这样子系统误差对整个实验的影响才能有效一致的传递。检验统计量使用参考文献 [84] 中定义的 profile 似然比 $\Lambda(\mu)$ 。最终应用渐近逼近式修改的频率方法 CL_s [88] 在 95% 置信度下提取上限。

7.1 系统误差相关性

影响多个衰变分析道的系统误差关联考虑，具体关联情况见表 ??。亮度， μ 子，轻子，光子，味道鉴别，pile-up 和 MET 相关的系统误差是相互关联的，而 fakes 相关的误差没有关联，fakes 是在不同的区域估计的。JES uncertainty is not correlated because the knowledge of the source is removed when the simplification of nuisance parameter scheme is done? The uncertainty on the electron efficiency is only correlated between 2L and 3L channels, since 4L uses a different correlation scheme.?

Sys source	number of NP	correlation strategy
Lumi	1NP	correlated
Jet systematic	JES 21NP ¹ , JER 1NP	21NP JES is not correlated, JER is correlated
EGam systematic	EG Scale 1NP, EG resolution 1NP	correlated
Electron systematic	4(ID,RECO,TRIG,ISO) for SS2L/3L, 33(15 uncorr+15corr+3 ISO, reco, TRIG) for 4L	only correlate SS2L and 3L
Muon systematic	Trigger(2NP),ID(4),TTVA(2NP),ISO(2NP),Momentum(3NP)	correlated
Flavor tagging	6(B)+4(C)+15(Light)+2(Extrap)	correlated
MET	3NP	correlated
Pileup	1NP	correlated
MC Stat		not correlated
Fake factor uncertainty	6(2L)+2(3L)+1(4L)	not correlated

7.2 统计模型检查

本章检查在建立的统计模型中的系统误差的拟合结果 (pull)，相关性以及影响排序。为了使得图像更清晰，所有的 pull 图分为两张，其中红点是 4Lep 中的 ZZ 归一因子，因为它并不是高斯函数所模拟，所以其中心值为 1，在联合拟合中的误差大约为 5%。

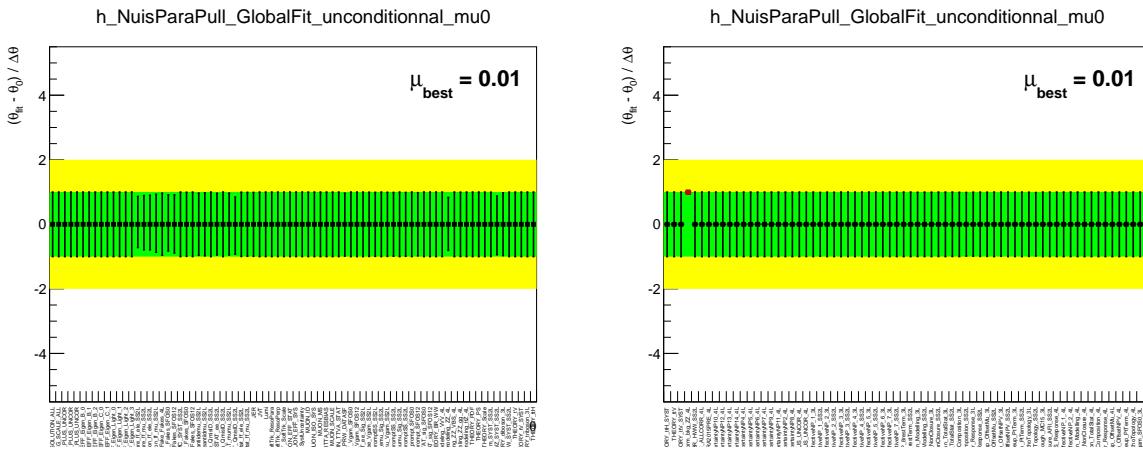
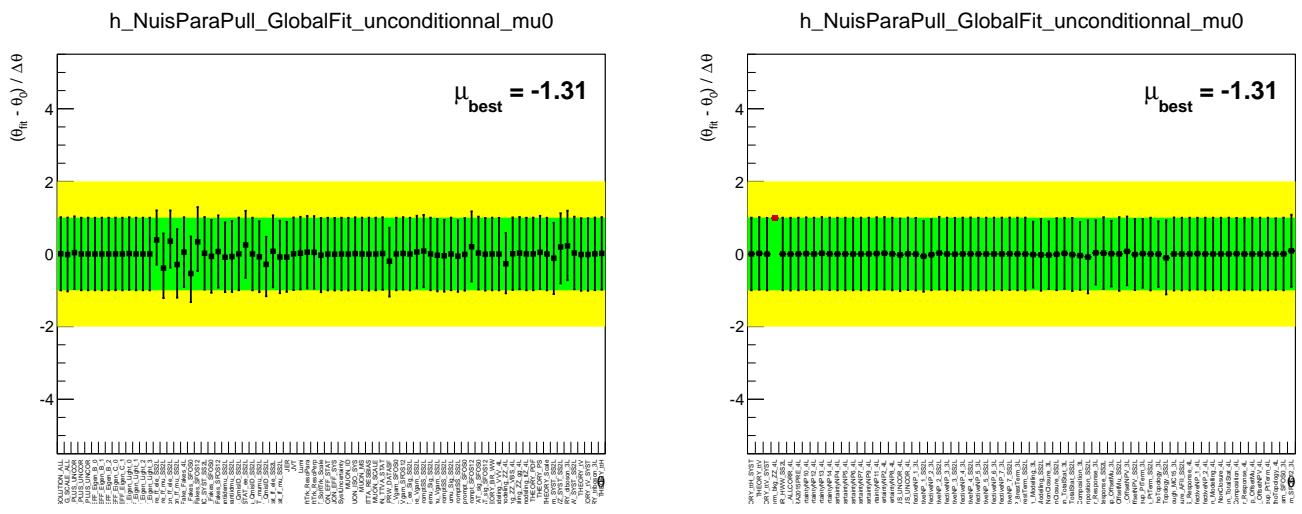
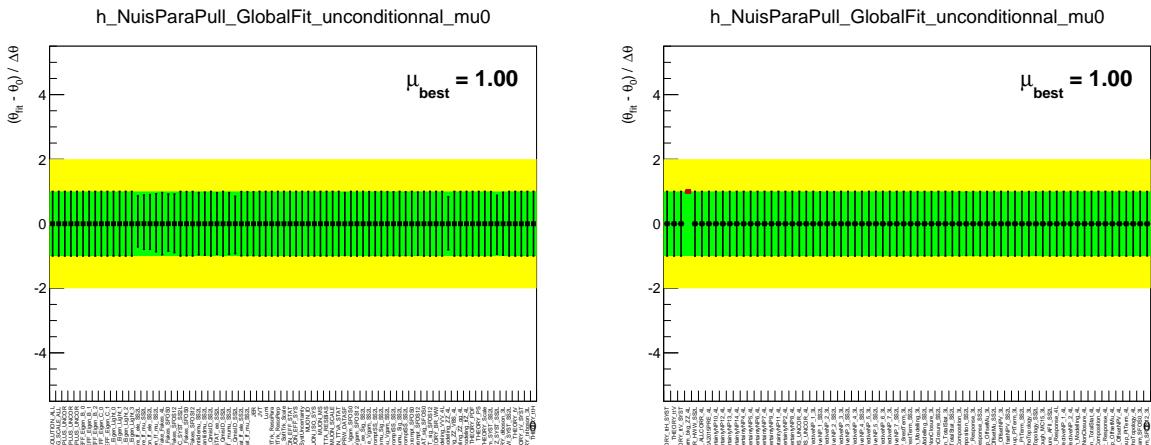
图 7.1 到图 7.6 展示在 $m_X=260 \text{ GeV}$ 和 $m_X=500 \text{ GeV}$ 两个质量点搜寻中系统误差在不同假设下的拟合结果。在无信号假设和信号 + 预期背景的假设下，pull 的表现是非常合理的。而在实际观测数据的拟合中，因为数据的涨落，2L 的 fakes 误差偏移较大。在图 7.7 和图 7.8 还可以看到，系统误差之间没有较大相关性。图 7.9 和图 7.10 是系统误差影响的排序，虚线阴影区表示截面上限随冗余参数向上或向下变化一个标准偏差时的变化，并分别展示在拟合前和拟合后的变化情况。fake factor 的系统误差对最终结果影响最大。在 $m_X=500 \text{ GeV}$ 的 S+B asimov 拟合和观测值拟合中，JET Pileup OffsetMu 对 3L 只有单边的影响，这是源于其对信号和本底的影响是单边的，见表 7.1。

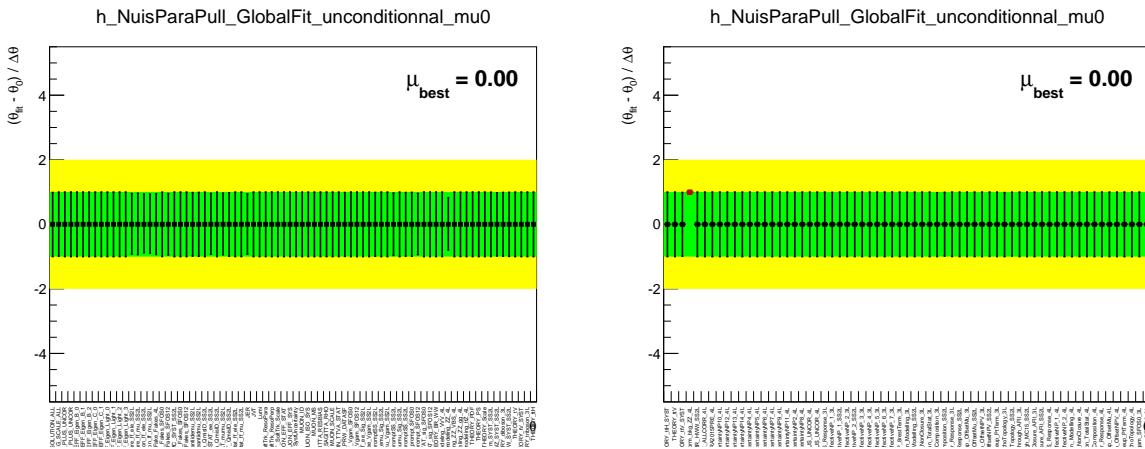
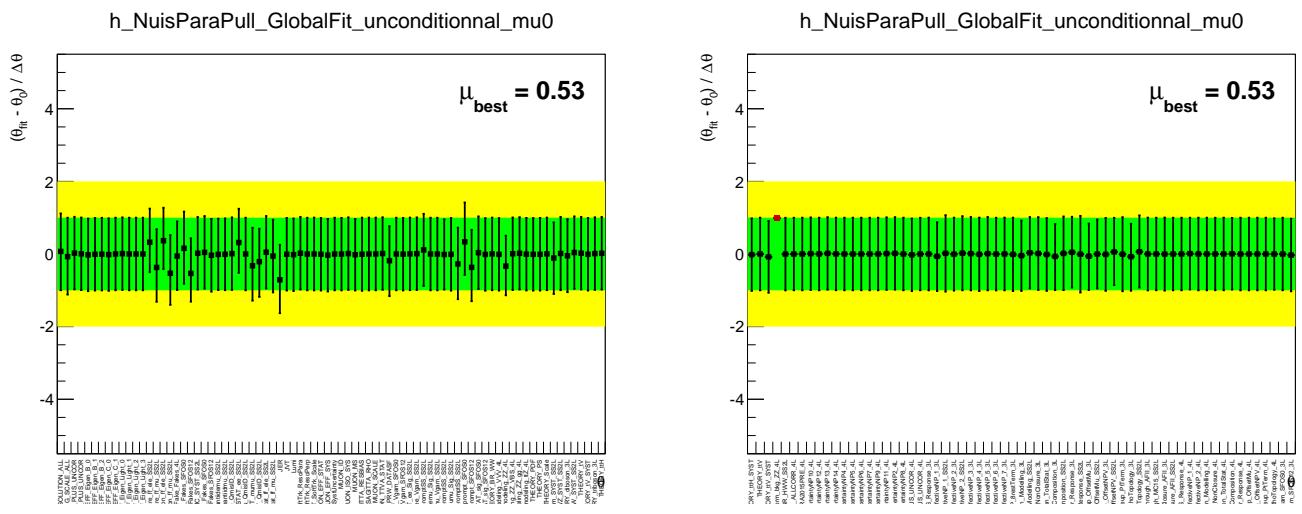
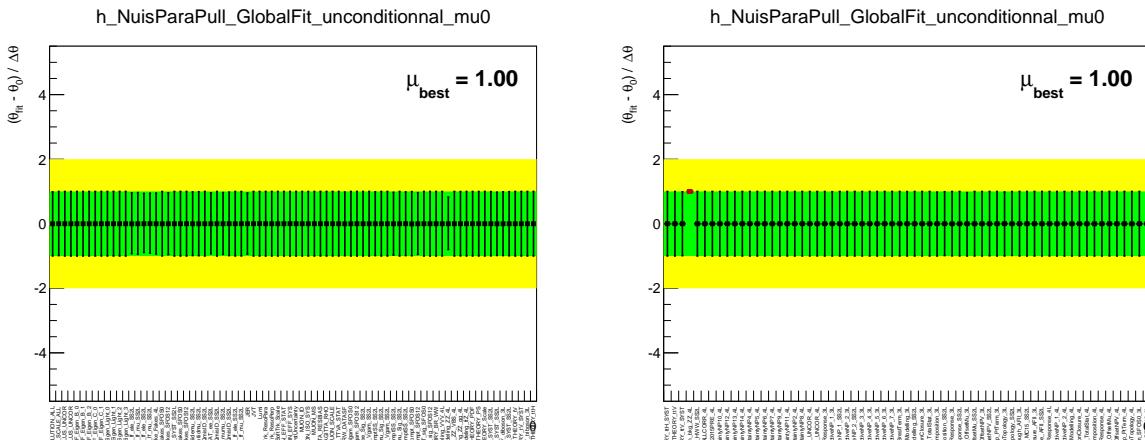
Another check is to fix specific uncertainty to nominal value and quantify the variation of upper limit compared with full systematics uncertainties. Table 7.5, 7.6 and 7.7 summarize the variation of upper limit after switching off certain uncertainty. The upper limit is sensitive to fake uncertainty.

另一个重要检查是在拟合中固定住单个或者多个系统误差，观察结果变化。表 7.5，表 7.6 和表 7.7 总结在固定住某些系统误差后，拟合截面上限的变化，得出结论拟合结果对 fakes 的误差最敏感，与前述的影响排序是一致的。

alpha_ATLAS_JET_21NP_JET_Pileup_OffsetMu	background	signal	observed
ThreeLep_SFOS0_m500	0.000(+1 σ)/-0.004(-1 σ)(in percentage)	0.00/-0.00(yield)	-0.490(+1 σ)/-0.001(-1 σ) -0.18/-0.00(yield) 2
ThreeLep_SFOS12_m500	0.000(+1 σ)/0.000(-1 σ)(in percentage)	0.00/0.00(yield)	-0.485(+1 σ)/0.006(-1 σ) -0.43/0.01(yield) 1

表 7.1 Systematic variation on signal and total background yield. The variation is asymmetric on signal yield.

图 7.1 pull check on B-only asimovData of $m_H = 260GeV$ 图 7.2 pull check on obsData of $m_H = 260GeV$ 图 7.3 pull check on S+B asimovData of $m_H = 260GeV$

图 7.4 pull check on B-only asimovData of $m_H = 500GeV$ 图 7.5 pull check on obsData of $m_H = 500GeV$ 图 7.6 pull check on S+B asimovData of $m_H = 500GeV$

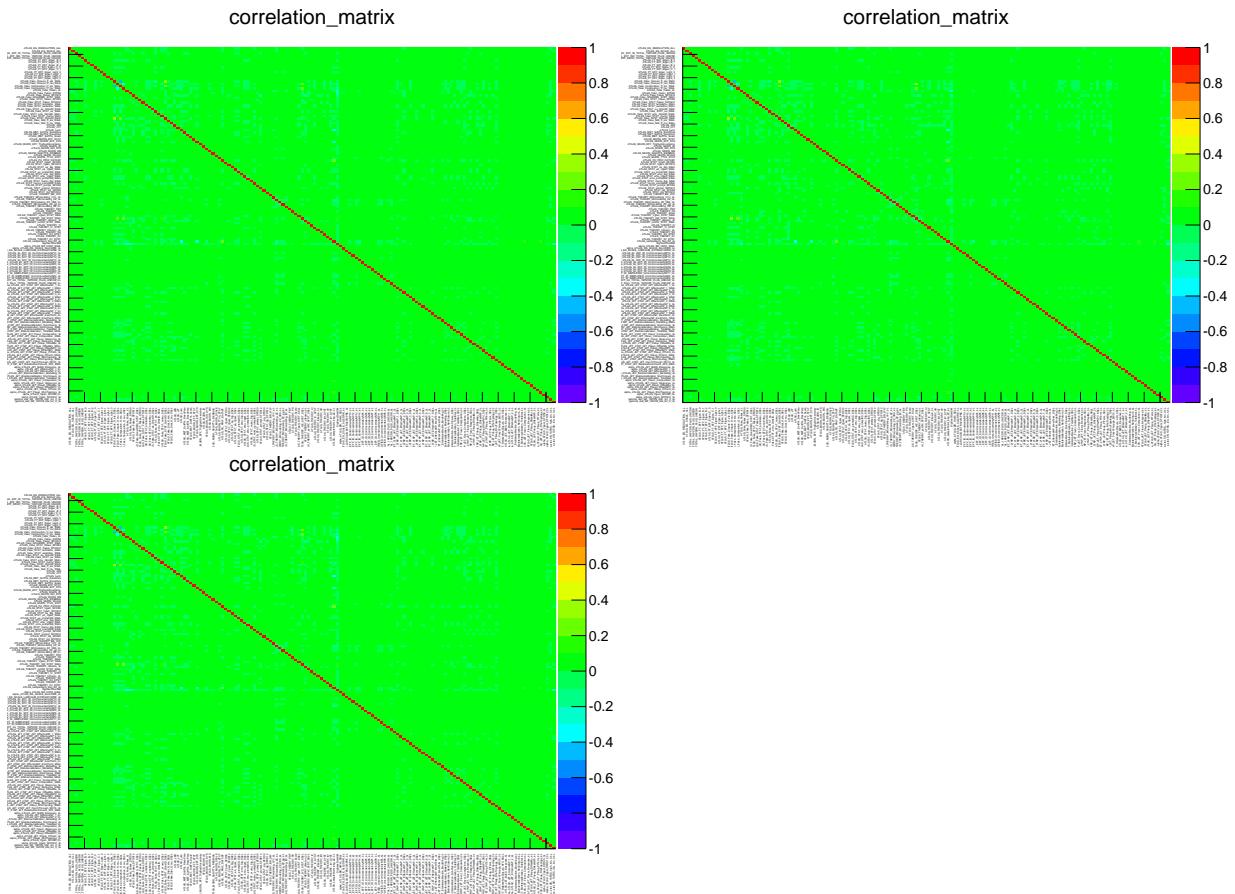


图 7.7 correlation check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 260GeV$

$\Delta limit / limit$	nonres	$m_H = 260GeV$	$m_H = 300GeV$	$m_H = 400GeV$	$m_H = 500GeV$
Lumi	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
JET	0.10	0.02	0.05	0.11	0.07
FT	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00
EG	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
EL	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MUON	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MET	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MC STAT	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03
Fake	0.08	0.10	0.12	0.21	0.11
THEORY	0.05	0.05	0.06	0.10	0.04

表 7.2 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in hh model

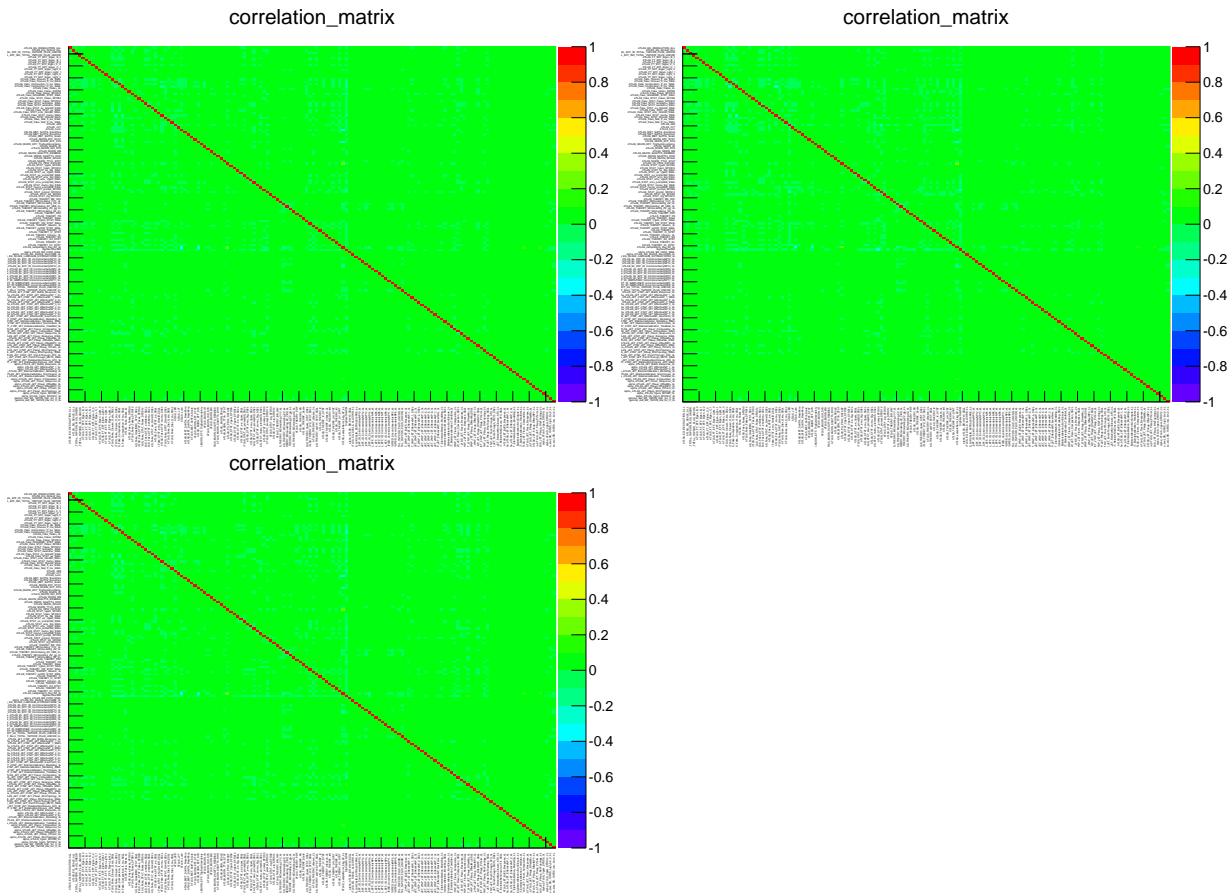


图 7.8 correlation check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 500\text{GeV}$

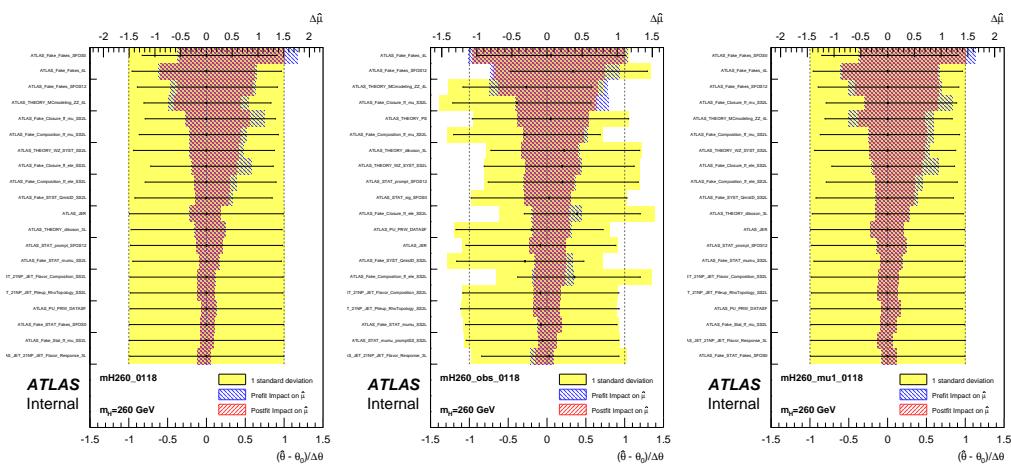


图 7.9 NP ranking check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 260\text{GeV}$

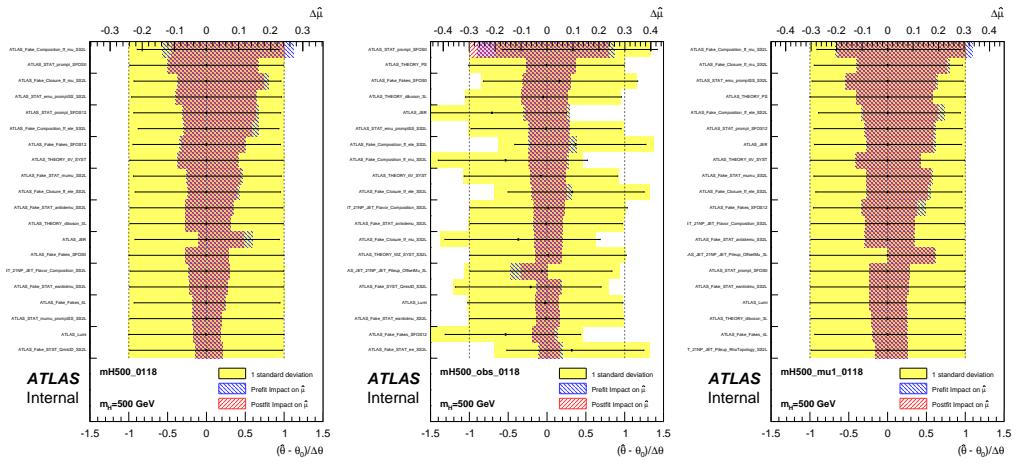


图 7.10 NP ranking check on B-only asimovData, obsData and S+B asimovData of $m_H = 500\text{GeV}$

$\Delta limit / limit$	H280S135	H300S145	H320S155	H340S135
Lumi	0.004	0.001	0.006	0.044
JET	0.011	0.031	0.040	0.086
FT	0.003	0.001	0.004	0.042
EG	0.003	0.001	0.004	0.041
EL	0.003	0.001	0.004	0.042
MUON	0.003	0.001	0.004	0.042
MET	0.003	0.000	0.004	0.042
MC STAT	0.008	0.007	0.012	0.051
Fake	0.131	0.154	0.174	0.190
THEORY	0.030	0.034	0.045	0.071

表 7.3 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model

$\Delta limit / limit$	H340S135	H340S145	H340S155	H340S165
Lumi	0.044	0.036	0.029	0.023
JET	0.086	0.075	0.026	0.006
FT	0.042	0.037	0.031	0.012
EG	0.041	0.037	0.034	0.000
EL	0.042	0.037	0.034	0.006
MUON	0.042	0.037	0.034	0.006
MET	0.042	0.037	0.034	0.000
MC STAT	0.051	0.037	0.037	0.006
Fake	0.190	0.275	0.289	0.234
THEORY	0.071	0.067	0.055	0.023

表 7.4 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model

$\Delta limit / limit$	nonres	$m_H = 260 GeV$	$m_H = 300 GeV$	$m_H = 400 GeV$	$m_H = 500 GeV$
Lumi	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
JET	0.10	0.02	0.05	0.11	0.07
FT	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00
EG	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
EL	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MUON	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MET	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00
MC STAT	0.02	0.01	0.03	0.04	0.03
Fake	0.08	0.10	0.12	0.21	0.11
THEORY	0.05	0.05	0.06	0.10	0.04

表 7.5 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in hh model

$\Delta limit / limit$	H280S135	H300S145	H320S155	H340S135
Lumi	0.004	0.001	0.006	0.044
JET	0.011	0.031	0.040	0.086
FT	0.003	0.001	0.004	0.042
EG	0.003	0.001	0.004	0.041
EL	0.003	0.001	0.004	0.042
MUON	0.003	0.001	0.004	0.042
MET	0.003	0.000	0.004	0.042
MC STAT	0.008	0.007	0.012	0.051
Fake	0.131	0.154	0.174	0.190
THEORY	0.030	0.034	0.045	0.071

表 7.6 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model

$\Delta limit / limit$	H340S135	H340S145	H340S155	H340S165
Lumi	0.044	0.036	0.029	0.023
JET	0.086	0.075	0.026	0.006
FT	0.042	0.037	0.031	0.012
EG	0.041	0.037	0.034	0.000
EL	0.042	0.037	0.034	0.006
MUON	0.042	0.037	0.034	0.006
MET	0.042	0.037	0.034	0.000
MC STAT	0.051	0.037	0.037	0.006
Fake	0.190	0.275	0.289	0.234
THEORY	0.071	0.067	0.055	0.023

表 7.7 $\Delta limit / limit$ is shown after switching off specific uncertainty in SS model

7.3 联合统计结果

最终提取出的 hh 95% CL_s 的截面上限如表 7.8 和图 7.11 所示。标准模型希格斯对的观测（期望）截面上限值 ($pp \rightarrow hh$) 为 159 倍 (111 倍) 标准模型预测值，观测值在期望值的两个标准偏差以内；对共振态搜寻 ($pp \rightarrow X \rightarrow hh$) 而言，观测值均在一个标准偏差以内，观测（期望）截面上限值随着 m_X 增加从 9.1 pb (9.7 pb) 到 2.6 pb (2.4 pb)，在低质量区，4L 具有最高的期望显著性，3L 次之，2L 最低，而在高质量区，其顺序刚好相反。在 SS 信号 ($pp \rightarrow SS$) 搜寻中，所有质量点的观测值均在期望值的一个标准偏差以内，观测（期望）截面上限值随 m_X 或 m_S 增大从 1.7 pb (2.2 pb) 到 0.17 pb (0.19 pb)，其中在低质量区 4L 同样地具有最高的显著性，而在高质量区三个分析道显著性非常接近。

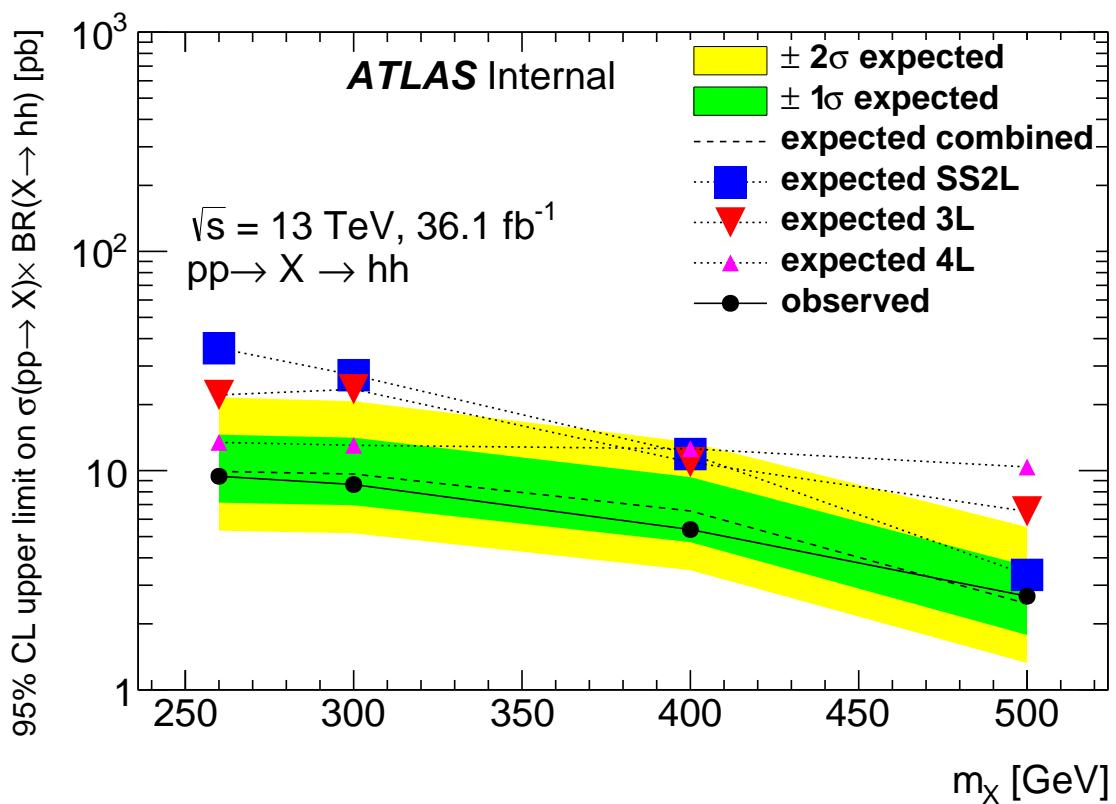


图 7.11 The 95% CL upper limits in $WWWW$ channels with all systematic.

Upper Limit(pb)	non-resonant	$m_X = 260 \text{ GeV}$	$m_X = 300 \text{ GeV}$	$m_X = 400 \text{ GeV}$	$m_X = 500 \text{ GeV}$
expected SS 2L	144.57	27.60	23.88	9.77	3.21
expected 3L	211.94	20.38	20.61	10.26	6.17
expected 4L	387.41	13.44	13.03	12.56	10.37
combined	111.42	9.66	9.41	6.14	2.41
observed	159.29	9.09	8.23	5.19	2.56
$+2\sigma$	215.30	19.84	19.11	11.34	5.08
$+1\sigma$	156.16	13.90	13.48	8.40	3.51
-1σ	80.28	6.96	6.78	4.43	1.74
-2σ	59.80	5.18	5.05	3.30	1.30

表 7.8 This table summarizes the expected in each channel and combined channel and the combined observed limit. For non-resonant, the limit is on the ratio over SM Higgs pair prediction.

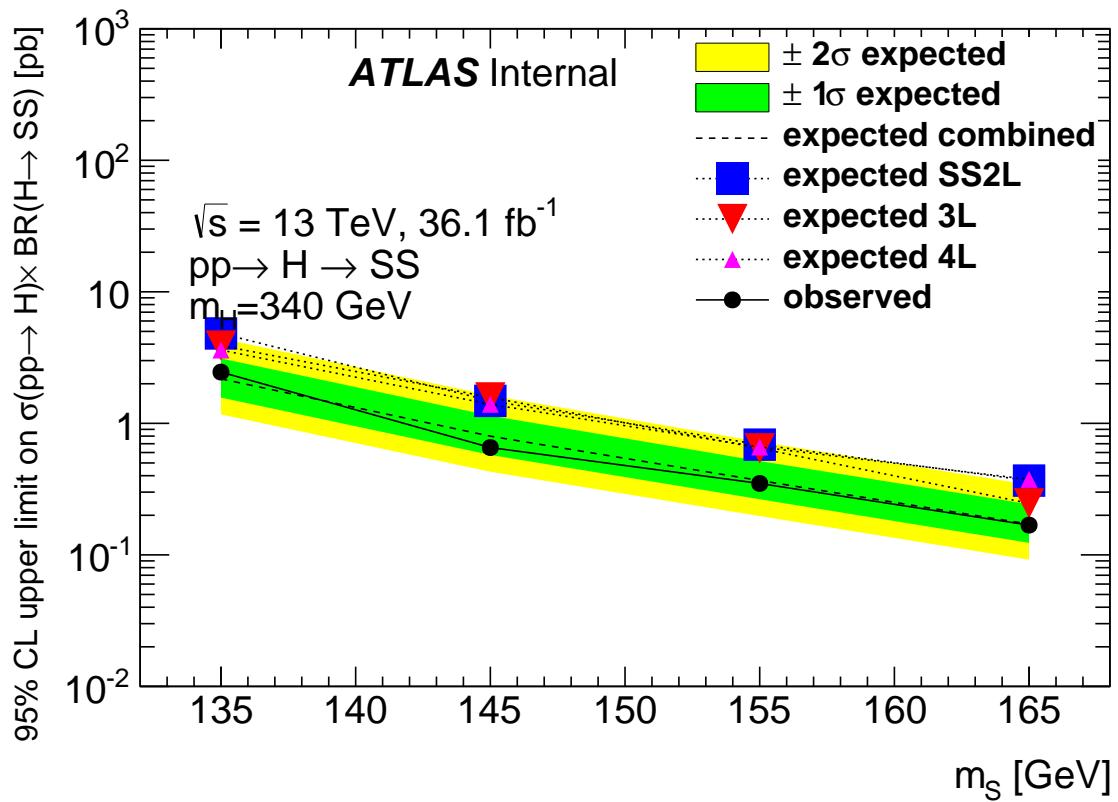


图 7.12 The expected and observed limit with all systematic uncertainty is shown as the function of m_S

	H280_S135	H300_S135	H320_S135	H340_S135	H340_S145	H340_S155	H340_S165
expected SS 2L	5.69	5.41	5.69	4.83	1.48	0.69	0.37
expected 3L	4.05	4.67	5.20	3.90	1.57	0.65	0.25
expected 4L	3.16	3.25	3.57	3.61	1.40	0.66	0.37
combined	2.20	2.43	2.53	2.17	0.92	0.39	0.19
observed	1.74	2.15	2.34	2.45	0.65	0.35	0.17
+2 σ	4.46	4.79	5.13	4.42	1.63	0.72	0.34
+1 σ	3.07	3.33	3.58	3.12	1.14	0.52	0.24
-1 σ	1.52	1.66	1.80	1.57	0.58	0.26	0.12
-2 σ	1.13	1.24	1.34	1.17	0.43	0.20	0.09

表 7.9 This table shows the expected limit in each channel and the observed limit in $pp \rightarrow SS$ model.

第三部分

通过多轻子道寻找 $t\bar{t}H$ 产生模式

第1章 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 分析道

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 聚焦于通过 $t\bar{t}H \rightarrow \tau^+\tau^-$ 衰变道寻找 $t\bar{t}H$, 其分析基本遵循文献 [] 的方法, 但是考虑到 ATLAS 对 τ 的鉴别效率的提升, τ 的选择条件有相应的加强。 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 的基本策略是经过初步的事例筛选之后, 利用 BDTG 方法进一步区分信号与主要本底, 即 $t\bar{t}$ (其中至少一个 τ_{had} 是来源于 b 喷注, 强子化衰变的 W 玻色子或者部分子簇射)。最后 $0 < BDT \leq 0.6$ 和 $0.6 < BDT \leq 1.0$ 为信号比例较高的区域, $BDT < 0$ 为信号比例较低的区域, 同时拟合三个区域得到信号强度。

1.1 信号选择

轻子, 喷注以及 τ_{had} 的筛选跟其他衰变道一致, 轻子须通过 `isolationFixedCutLoose`, 电荷误判压低变量和 `non-prompt` 轻子压低变量。所用的单轻子触发判选条件如下:

- 2015 data: `HLT_mu20_iloose_L1MU15||HLT_mu50||HLT_e60_lhmedium||HLT_e24_lhmedium_L1EM20VH||HLT_e120_iloose;`
- 2016 and 2017 data: `HLT_mu26_ivarmedium||HLT_mu50||HLT_e140_lhloose_nod0||HLT_e26_lhtight_nod0_ivarloose||HLT_e60_lhmedium_nod0.`
- The trigger lepton is required to have: $pT > 27 \text{ GeV}/c$ in 2016 and 2017 data; $pT > 21 \text{ GeV}/c$ for muon and $25 \text{ GeV}/c$ for electron in 2015 data.

喷注 p_T 要求至少 25 GeV , $|\eta| < 2.5$, 以及 JVT 条件。 b -tagging 是基于多变量学习方法的, 所选的 b -tagging 效率 WP 为 70% , $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 要求所有喷注都不是 b -tagged 的。 τ_{had} 须通过 `tight ID`, $p_T > 25 \text{ GeV}$ 以及 $|\eta| < 2.5$ 筛选, 其中 $1.37 < |\eta| < 1.52$, 即电磁量能器的空区, 被排除掉。

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 中的主要本底是 $t\bar{t}$, 为了压低此项本底, 有两个办法:

1. 因为至少一个 τ_{had} 是来自 b 喷注, 所以要求所选的 τ_{had} 不是 b -tagged 的, 可以去除 25% 的假本底, 而保持 96% 的信号选择效率;
2. 喷注数和 $\tau_{\text{had}} p_T$ 可以帮助压低假本底, 这是因为 $t\bar{t}$ 倾向具有较少的喷注数和较低动量的 τ_{had} ; 但是它们作为 BDTG 的训练变量也许能够发挥更大作用, 所以选择具有至少三个喷注和 $\tau_{\text{had}} p_T$ 大于 25 GeV 的事例, 与其他衰变道一致。信号的初步筛选可总结为:

- 两个通过 **tight ID** 具有相反电荷的 $\tau_{had}, p_T > 25 \text{ GeV}$, 并且都没有 *b*-tagged;
- 两个 τ_{had} 必须来自 **primary vertex**;
- 一个匹配任一触发判选条件的孤立电子或 μ 子;
- 至少三个喷注, 其中至少一个是 *b*-tagged 的。

通过 MC 样本可以检查 τ_{had} 的来源, 定义来自希格斯玻色子或者矢量玻色子的为真 (real) τ_{had} , 来自 QCD 喷注的为假 (fake) τ_{had} 。图 1.1 中两 τ_{had} 分为 fake-fake, fake-real, 来自于 $H \rightarrow \tau\tau$ 的 real-real, 以及其他; 可以发现 $t\bar{t}H$ 的纯度非常高, 达到 90%, 而主要来源于 $t\bar{t}$ 的本底至少有一个 fake。图 1.1 也给出假 τ_{had} 的来源分布, 大部分来源胶子喷注。由图中还可以发现相反电荷与相同电荷具有非常相似的分布, 其稍微的不同会考虑成假本底的形状误差, 通过比较相同电荷与相反电荷的 $t\bar{t}$ 样本得到, 这会在章节 1.4 中讨论。

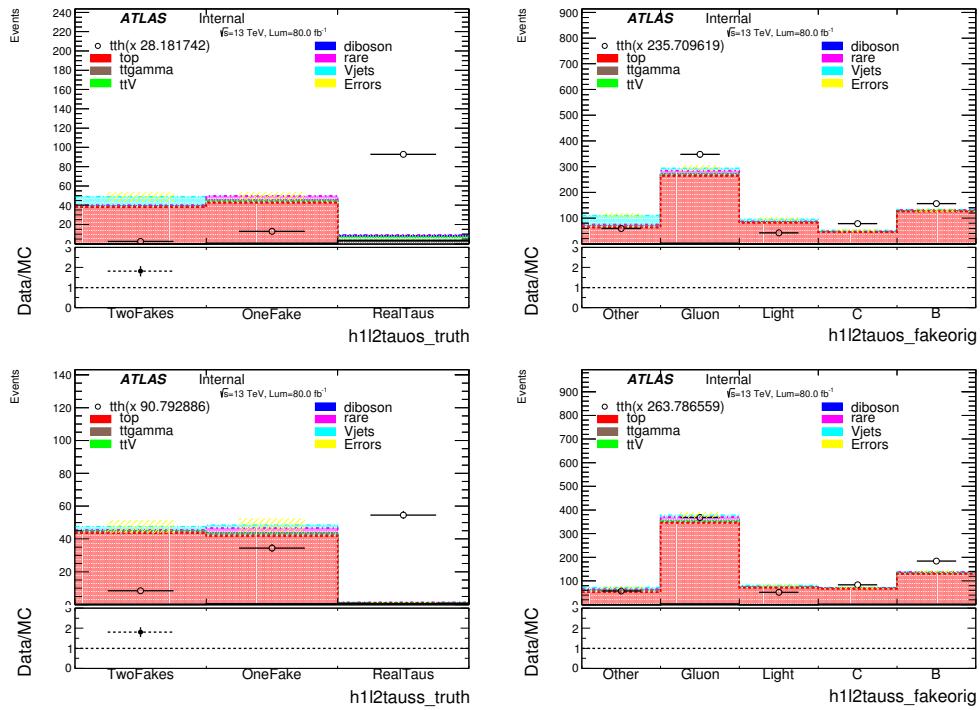


图 1.1 The original di-tau events are classified based on the Monte Carlo truth as fake-fake, fake-real, real-real from Higgs decay or anything else, respectively, in left and the origin of the fake taus are shown in right. The top row for OS and the bottom row for SS. The signal is normalized to the total background in each plot.

1.2 Fake 本底估计

虽然利用多变量学习方法重建 τ_{had} 能够过滤掉大部分假 τ_{had} , 但是在 $1\ell+2\tau_{had}$ 的主要本底仍然是假 τ_{had} 。另外, 通过检查所选轻子的来源, 发现接近 99% 是真实的。所以, 只需估计假 τ_{had} 即可。但由于 MC 并不能很好描述假 τ_{had} , 利用 data-driven 方法去估计 τ_{had} 是非常有必要的。

喷注被误判成 τ_{had} 时, 其有相同概率被标定成带正电或者负电, 所以, 假本底中有相当部分的相同电荷 (SS) 两 τ_{had} 和相反电荷 (OS) 两 τ_{had} 事例。这样, 可以利用 SS 的数据去估计 OS 信号区的假本底, 即:

$$\begin{aligned} \text{Expected fakes : } OS_{fake} &= SS_{data} - SS_{truth} \\ \text{Expected total yield : } OS_{exp} &= OS_{fake} + OS_{truth} \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, OS/SS_{data} 是观测到的数据中的 OS/SS 事例数, OS/SS_{truth} 则是 MC 中 (包括信号 MC) 真实 τ_{had} 事例数。表 Tab:1l2tau.fake 在两个控制区验证此假设, 分别是低信号区 ($BDT < 0.5, njet > 3$) 和低喷注区 ($njet < 3$), 总体而言, 总期望值与 OS 数据是一致的, 最大的偏差在低信号区, OS_{exp}/OS_{data} 为 1.00 ± 0.22 , 22% 将作为此假本底估计方法的内禀误差。

Samples	SS_{data}	SS_{truth}	OS_{truth}	OS_{exp}	OS_{data}	OS_{exp}/OS_{data}
$njet < 3$	112 ± 11	1.2 ± 0.1	10.8 ± 1.0	121.6 ± 11.0	108	1.13 ± 0.10
$njet \geq 3, (BDT < 0.5)$	62 ± 7.8	0.55 ± 0.07	4.69 ± 0.18	66.1 ± 7.9	54	1.22 ± 0.15

表 1.1 A closure of the data driven fake estimation is tested in the $njet < 3$ and the signal depleted control regions.

1.3 MVA 研究

多变量方法可以进一步压低 $t\bar{t}$ 本底, 作为训练变量的 7 个运动学变量如下:

- Njets: 喷注数 (若大于 5 则设为 5);
- Nbjets: 标定为 b 的喷注数 (若大于 3 则设为 3);
- Htjets: 喷注 p_T 的标量和 (MeV);
- LeadPt: 高动量 $\tau_{had} p_T$ (GeV);
- SubPt: 低动量 $\tau_{had} p_T$ (GeV);
- Mttau: 两 τ_{had} 不变质量 (GeV);
- Jjdr: 所选喷注的两两组合中的最小 ΔR ;

- Etamax: 两 τ_{had} 中的较大 $|\eta|$ 。

这些变量的分布如图 1.2 所示, 可以看到每个变量的区分度一般, 并不足以支持应用一个简单的筛选条件, 所以把这些变量输入 BDTG [], 希望能够充分开发其筛选潜能, 提高信号显著性。在训练中, 所选信号的两 τ_{had} 均是真实的, 而为了增加本底事例数, $t\bar{t}MC$ 包括 OS 和 SS, 总共有 8258 个信号事例与 1268 个本底事例。值得指出的是, 根据事例标签, 信号 MC 分为奇事例与偶事例, 通过奇(偶)事例得到的训练配置在实际使用中会应用到偶(奇)事例中, 这样可以避免训练偏差。从图 1.3 看到, 训练分布与测试分布是非常接近的, 说明没有过度训练。表 1.2 给出输入变量的重要性排序, Etamax 具有最高的重要性。在图 1.3 还可以看到本底压低随信号效率变化的曲线。那么在该分析, 可以直接应用一个简单的 BDT 筛选或者拟合 BDT 分布去提高信号显著性, 但一般来讲, 联合拟合多个信号区会给出更高的信号显著性。所以, 根据 BDT 分为三个信号区域: $0.6 < BDT \leq 1.0$, $0 < BDT \leq 0.6$ 和 $BDT < 0.$, 最后的统计分析会联合拟合这三个区域得到最终的信号强度。

值得注意的是, 以上多变量训练使用的本底是 $t\bar{t}MC$, 而在实际的分析中, 主要本底是 SS data, 图 1.4 比较 SS data 与 $t\bar{t}MC$ 的差异, 基本上, 输入变量以及 BDT 的分布是非常相似的。最后, 表 1.3 总结了三个信号区的事例数以及预期信号强度。

Rank	Input variable	Importance
1	Etamax	0.18
2	Mtautau	0.15
3	Jjdr	0.14
4	Htjets	0.13
5	LeadPt	0.125
6	SubPt	0.12
7	Njets	0.089
8	Nbjets	0.068

表 1.2 The rank of input variables are shown based on their importance to BDT.

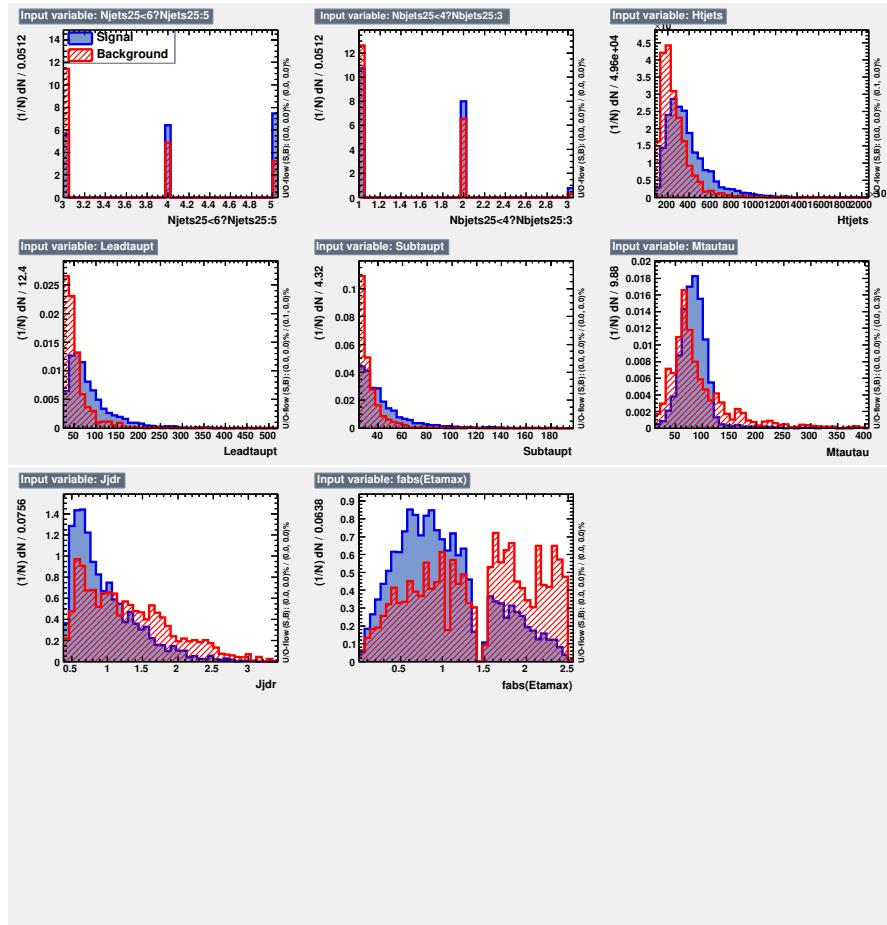


图 1.2 BDT input variables. Top row: njet, nbjet, Htjets; Middle row: LeadPt, SubPt, Mtautau; Bottom row: Jjdr and Etamax.

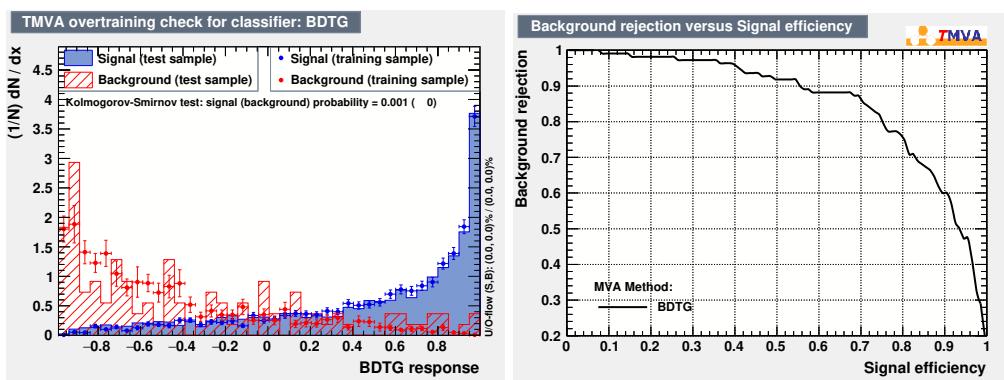


图 1.3 The BDT distributions for the signal and background obtained during the training and testing (left); The rejection for the background vs the efficiency for the signal as a function of BDT cut (right).

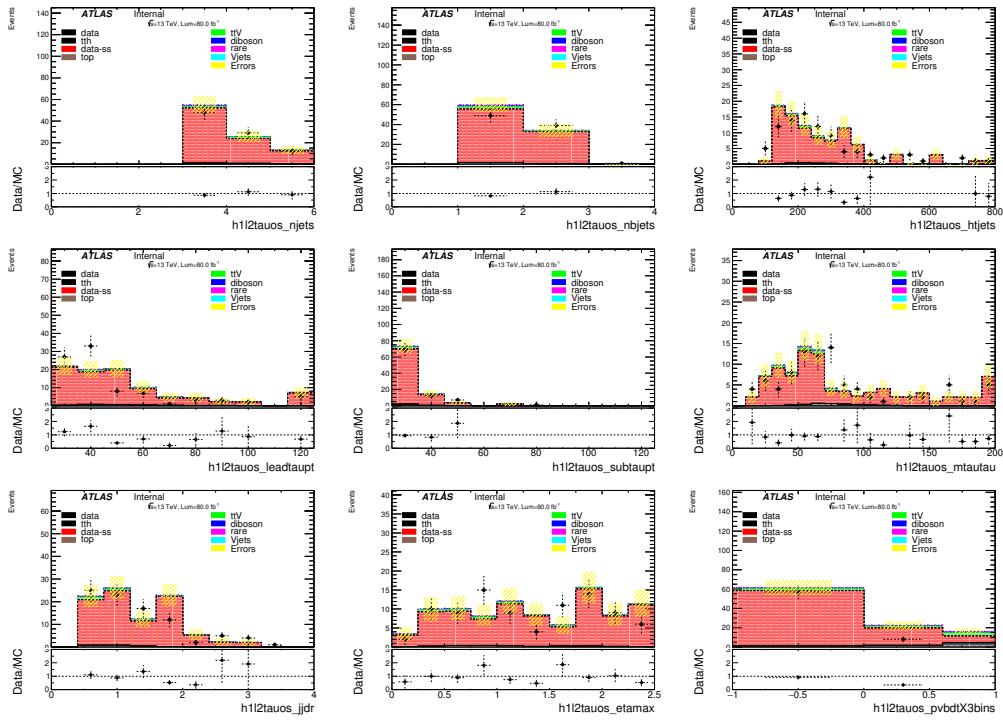


图 1.4 The BDT inputs and output are compared using the SS events in the signal region. Top row: njet, nbjet; Second row: Htjets, leadPt; Third row: subPt, mtautau; Bottom row: Jjdr, Etamax, and BDT.

OS Sample	$BDT \leq 0.$	$0 < BDT \leq 0.6$	$0.6 < BDT \leq 1.0$	Total
ttH(truth)	1.25 ± 0.19	1.71 ± 0.25	4.17 ± 0.98	7.13 ± 1.34
ttV(truth)	1.65 ± 0.29	1.62 ± 0.31	3.03 ± 0.52	6.31 ± 1.02
Diboson(truth)	0.70 ± 0.39	0.48 ± 0.26	0.72 ± 0.39	1.90 ± 1.01
Rare(truth)	0.09 ± 0.05	0.09 ± 0.05	0.19 ± 0.10	0.36 ± 0.19
Fake(SS)	50.0 ± 13.1	15.0 ± 5.1	5.0 ± 2.5	70.0 ± 17.5
Total B	52.4 ± 13.1	17.2 ± 5.1	8.9 ± 2.6	78.6 ± 17.6
z_0	0.09	0.23	0.73	0.98

表 1.3 The summary of signal and backgrounds in the three categories entering the fit in the $1\ell+2\tau_{had}$ SR as defined by the cut $BDT \leq 0.$, $0.0 < BDT \leq 0.6$, $BDT > 0.6$, and total. The errors are including both statistical and systematic uncertainties.

1.4 系统误差

$1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 系统误差来源包括截面计算, QCD scales, 产生子, PDF 以及探测器响应等等, 并分为两类, 一类是只影响归一化, 比如截面计算, 另一类是同时影响归一化和形状, 比如 PDF。两类系统误差在最大似然函数拟合中都当成冗余参数。信号和本底都考虑的系统误差有触发, 亮度, 粒子鉴别, MC 模拟; 所有的系统误差如图 2.1 所示。对于主要本底假 τ_{had} , 因为其是利用 SS data 模拟, 这也许跟 OS 假 τ_{had} 的形状有偏差, 所有可以把 OS $t\bar{t}$ 与 SS $t\bar{t}$ 的差异作为此项误差, 在图 1.5 中, 可以看到在高 BDT 区, 其大小可达 15%; 图 1.5 还列出了产生子带来的形状误差。

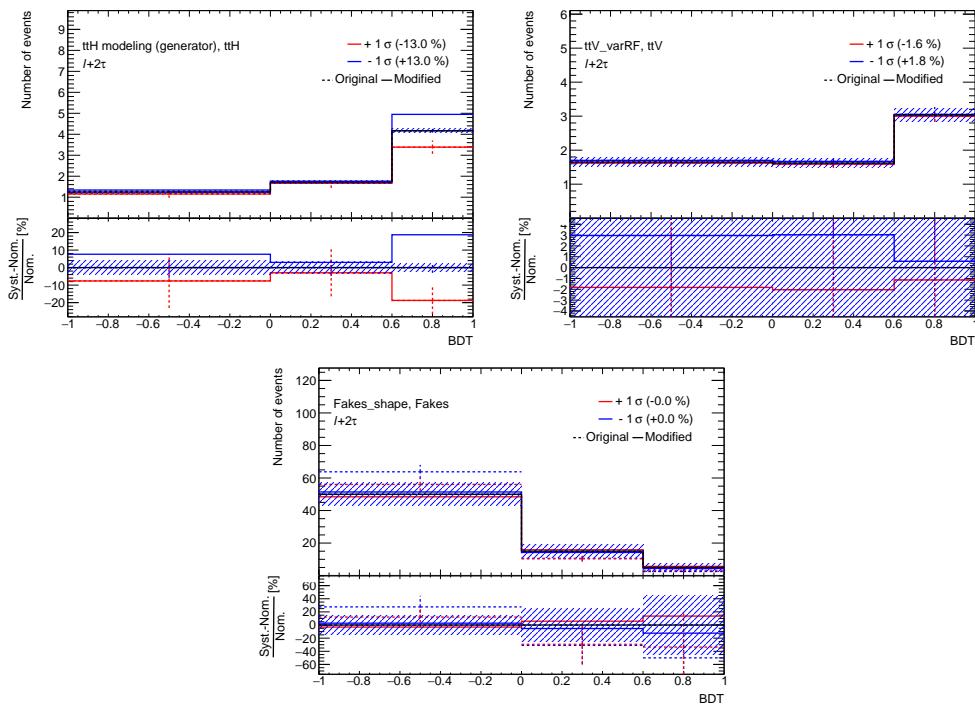


图 1.5 The BDT shape systematic is estimated using different Monte Carlo generators including the SS/OS shape systematic from fakes, which are compared for $t\bar{t}h$, $t\bar{t}V$, and SS/OS with fakes from Monte Carlo events.

第 2 章 $t\bar{t}H$ 分析结果

2.1 $1\ell+2\tau_{\text{had}}$ 结果

首先忽略归一化或者形状影响低于 0.5% 的系统误差，最终考虑的系统误差如图 2.1 所列。图 2.2 展示冗余参数拟合前和拟合后对信号强度的影响 ($\theta_{\text{fit}} - \theta_0/\Delta\theta$)；图 2.3 给出拟合前和拟合后 BDT 的分布。最终给出的期望信号强度为：

$$\mu_{t\bar{t}H} = 1.00^{+0.88}_{-0.75} (\text{Stat})^{+0.85}_{-0.69} (\text{syst}) = 1.00^{+1.22}_{-1.02} (\text{total})$$

，对应 0.98 个标准偏差。系统误差间的相关性和系统误差影响排序如图 2.4 所示，最大的误差是假 τ_{had} 的统计误差。

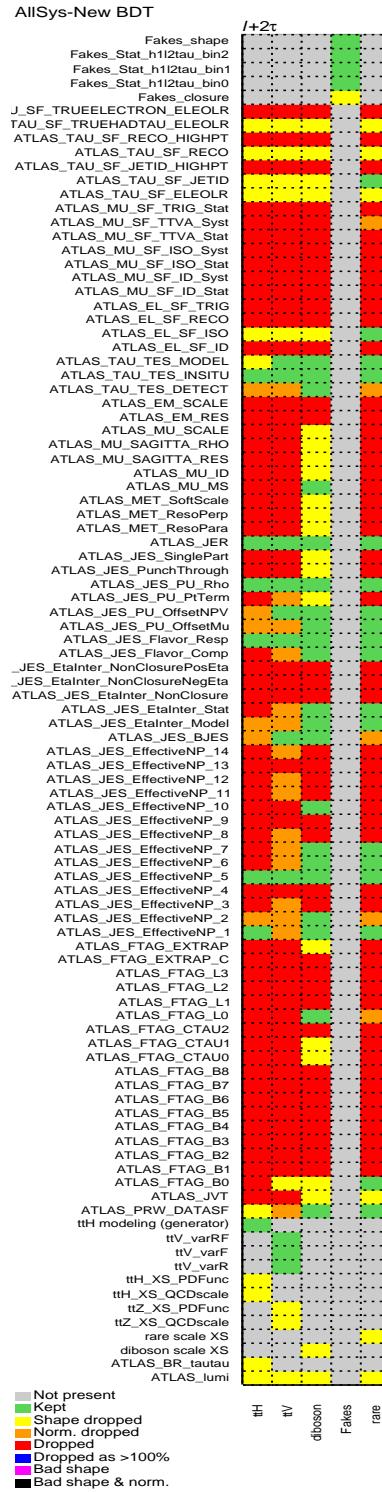


图 2.1 The systematics used in the fitter.

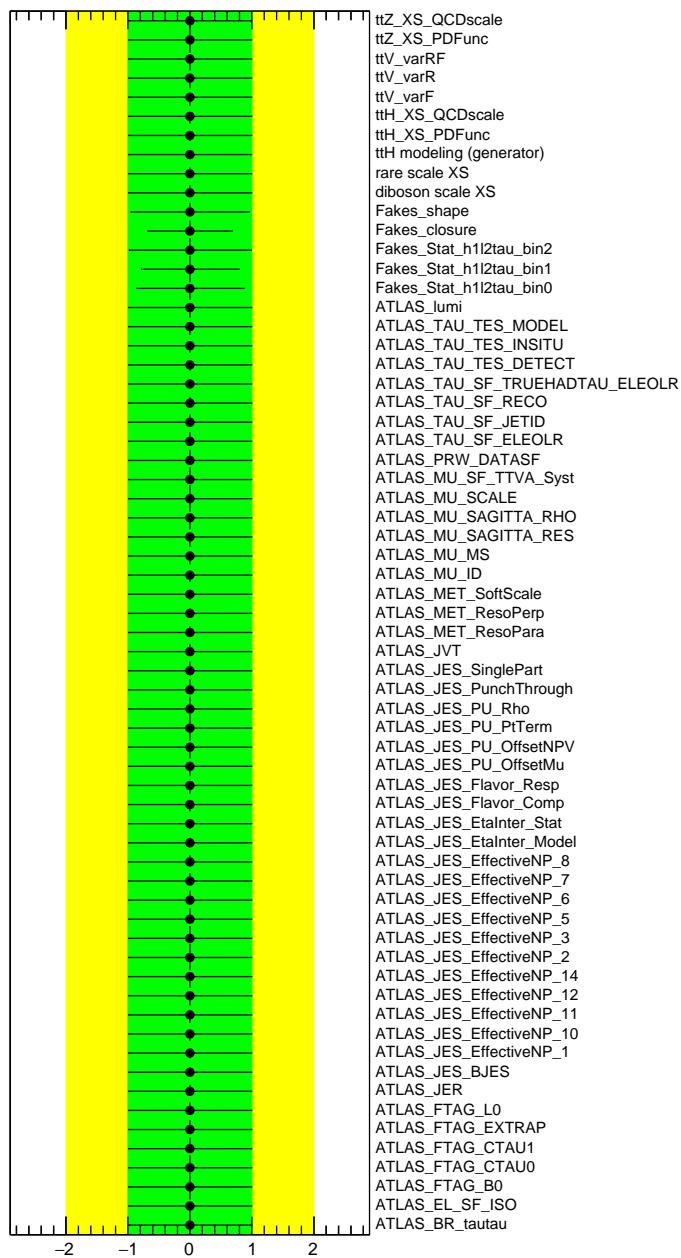


图 2.2 The pull plot for systematics.

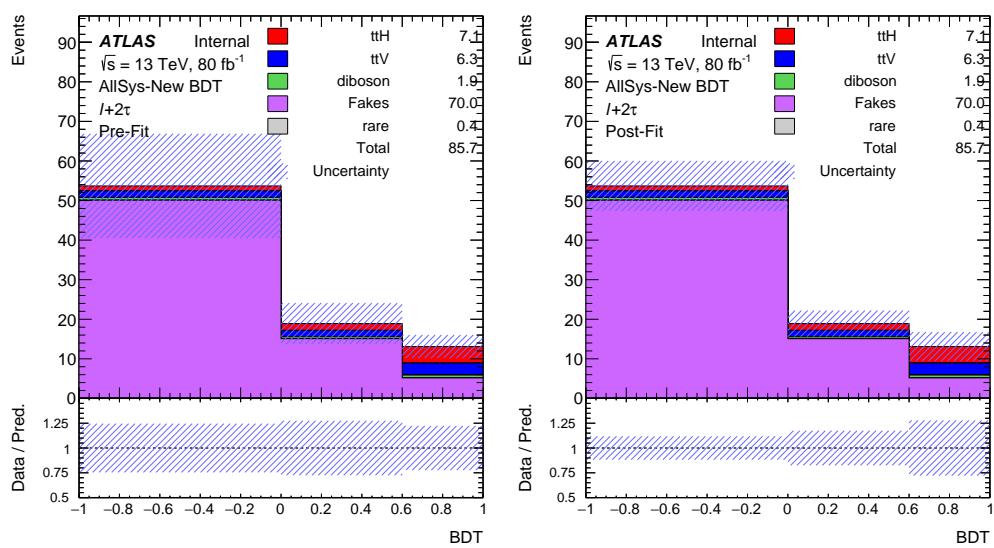


图 2.3 The BDT Asimov data are shown in pre-fit (left) and post-fit (right).

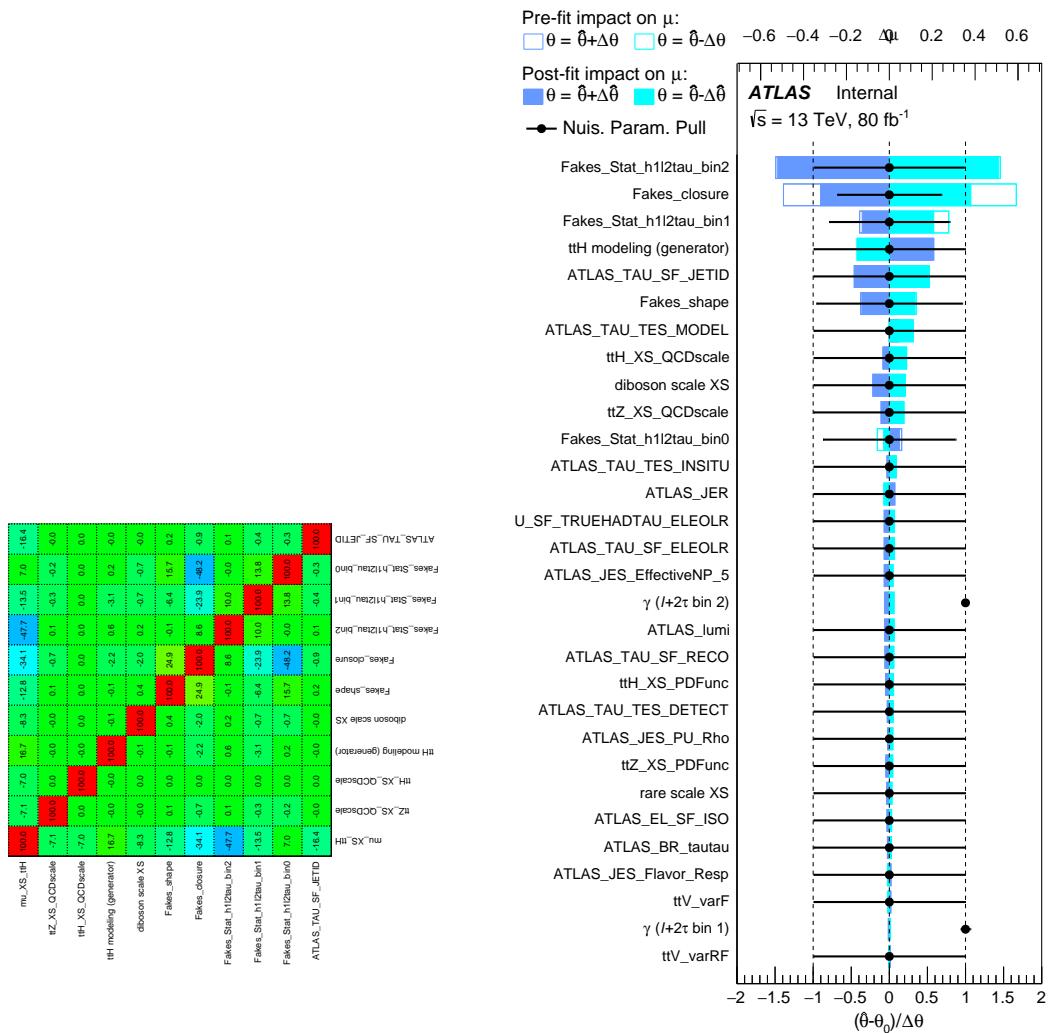


图 2.4 Left: the fitted correlation; Right: ranking of systematic based on their impacts on the signal strength measurements.

参考文献

- [1] KUHLEN M. Springer tracts in modern physics: QCD at HERA: the hadronic final state in deep inelastic scattering[M/OL]. Berlin: Springer, 1999. <https://cds.cern.ch/record/390284>.
- [2] The ATLAS collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. Measurement of the inclusive jet cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ tev using 4.5 fb^{-1} of data with the atlas detector[J/OL]. Journal of High Energy Physics, 2015, 2015(2):153. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2015\)153](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2015)153).
- [3] The CMS collaboration, KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, et al. Measurement of electroweak production of a w boson and two forward jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ tev[J/OL]. Journal of High Energy Physics, 2016, 2016(11):147. [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2016\)147](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2016)147).
- [4] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, et al. Measurement of electroweak production of two jets in association with a z boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ tev [J/OL]. The European Physical Journal C, 2015, 75(2):66. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-3232-5>.
- [5] ELLIS R K, STIRLING W J, WEBBER B R. Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology: Qcd and collider physics[M/OL]. Cambridge University Press, 1996. DOI: [10.1017/CBO9780511628788](https://doi.org/10.1017/CBO9780511628788).
- [6] COLLINS J C, SOPER D E, STERMAN G F. Factorization of Hard Processes in QCD[J/OL]. Adv. Ser. Direct. High Energy Phys., 1989, 5:1-91. DOI: [10.1142/9789814503266_0001](https://doi.org/10.1142/9789814503266_0001).
- [7] PATRIGNANI C, et al. Review of Particle Physics[J/OL]. Chin. Phys., 2016, C40(10):100001. DOI: [10.1088/1674-1137/40/10/100001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/10/100001).
- [8] FREDERIX R, FRIXIONE S, HIRSCHI V, et al. Higgs pair production at the LHC with NLO and parton-shower effects[J/OL]. Phys. Lett., 2014, B732:142-149. DOI: [10.1016/j.physletb.2014.03.026](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.03.026).
- [9] DE FLORIAN D, et al. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector[J/OL]. 2016. DOI: [10.23731/CYRM-2017-002](https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-002).
- [10] GRAZZINI M, HEINRICH G, JONES S, et al. Higgs boson pair production at NNLO with top quark mass effects[J/OL]. JHEP, 2018, 05:059. DOI: [10.1007/JHEP05\(2018\)059](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2018)059).
- [11] DE FLORIAN D, MAZZITELLI J. Higgs Boson Pair Production at Next-to-Next-to-Leading Order in QCD[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2013, 111:201801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.201801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.201801).
- [12] GROBER R, MUHLLEITNER M. Composite Higgs Boson Pair Production at the LHC[J/OL]. JHEP, 2011, 06:020. DOI: [10.1007/JHEP06\(2011\)020](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2011)020).

- [13] CONTINO R, GHEZZI M, MORETTI M, et al. Anomalous Couplings in Double Higgs Production[J/OL]. JHEP, 2012, 08:154. DOI: [10.1007/JHEP08\(2012\)154](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2012)154).
- [14] KRIBS G D, MARTIN A. Enhanced di-Higgs Production through Light Colored Scalars [J/OL]. Phys. Rev., 2012, D86:095023. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.095023](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.095023).
- [15] KRIBS G D, MAIER A, RZEHAK H, et al. Electroweak oblique parameters as a probe of the trilinear Higgs boson self-interaction[J/OL]. Phys. Rev., 2017, D95(9):093004. DOI: [10.1103/PhysRevD.95.093004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.093004).
- [16] BRANCO G C, FERREIRA P M, LAVOURA L, et al. Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models[J/OL]. Phys. Rept., 2012, 516:1-102. DOI: [10.1016/j.physrep.2012.02.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.02.002).
- [17] AAD G, et al. Search for Higgs boson pair production in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state from pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector[J/OL]. Eur. Phys. J., 2015, C75(9):412. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3628-x](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3628-x).
- [18] AAD G, et al. Search For Higgs Boson Pair Production in the $\gamma\gamma b\bar{b}$ Final State using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV from the ATLAS Detector[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2015, 114 (8):081802. DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.081802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.081802).
- [19] COLLABORATION T A, AAD G, ABAT E, et al. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):S08003-S08003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08003>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08003).
- [20] COLLABORATION T C, CHATRCHYAN S, HMAYAKYAN G, et al. The CMS experiment at the CERN LHC[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):S08004-S08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08004>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08004).
- [21] COLLABORATION T L, ALVES A A, FILHO L M A, et al. The LHCb detector at the LHC [J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):S08005-S08005. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08005>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08005).
- [22] COLLABORATION T A, AAMODT K, QUINTANA A A, et al. The ALICE experiment at the CERN LHC[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(08):S08002-S08002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08002>. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/s08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/s08002).
- [23] Atlas data summary[EB/OL]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DATAPREPARATION/DataSummary/2016/records.py>.
- [24] Rousseau D. The atlas liquid argon calorimeter : test beam, installation and commissioning [C/OL]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record: volume 1. 2007: 147-152. DOI: [10.1109/NSSMIC.2007.4436305](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4436305).
- [25] DAVIDEK T, THE ATLAS TILECAL SYSTEM. ATLAS tile calorimeter performance for single particles in beam tests[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 160:012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2F160%2F01%2F012057>. DOI: [10.1088/1742-6596/160/1/012057](https://doi.org/10.1088/1742-6596/160/1/012057).

- [26] BAUER F, et al. Construction and Test of MDT Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer [J/OL]. Nucl. Instrum. Meth., 2001, A461:17-20. DOI: [10.1016/S0168-9002\(00\)01156-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)01156-6).
- [27] ARGYROPOULOS T, et al. Cathode strip chambers in ATLAS: Installation, commissioning and in situ performance[J/OL]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2009, 56:1568-1574. DOI: [10.1109/TNS.2009.2020861](https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2020861).
- [28] AIELLI G, et al. The RPC first level muon trigger in the barrel of the ATLAS experiment [J/OL]. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 2006, 158:11-15. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.031](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2006.07.031).
- [29] MAJEWSKI S, CHARPAK G, BRESKIN A, et al. A THIN MULTIWIRE CHAMBER OPERATING IN THE HIGH MULTIPLICATION MODE[J/OL]. Nucl. Instrum. Meth., 1983, 217:265-271. DOI: [10.1016/0167-5087\(83\)90146-1](https://doi.org/10.1016/0167-5087(83)90146-1).
- [30] Atlas Collaboration, AABOUD M, AAD G, et al. Performance of the atlas trigger system in 2015[J/OL]. The European Physical Journal C, 2017, 77(5):317. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4852-3>.
- [31] SIMIONI E. The Topological Processor for the future ATLAS Level-1 Trigger: from design to commissioning[J]. 2014.
- [32] CALAFIURA P, LAVRIJSEN W, LEGGETT C, et al. The Athena control framework in production, new developments and lessons learned[C]//Computing in high energy physics and nuclear physics. Proceedings, Conference, CHEP'04, Interlaken, Switzerland, September 27-October 1, 2004. 2005: 456-458.
- [33] CORNELISSEN T, ELSING M, FLEISCHMANN S, et al. Concepts, Design and Implementation of the ATLAS New Tracking (NEWT): ATL-SOFT-PUB-2007-007. ATL-COM-SOFT-2007-002[R/OL]. Geneva: CERN, 2007. <https://cds.cern.ch/record/1020106>.
- [34] CORNELISSEN T G, ELSING M, GAVRILENKO I, et al. The global χ^2 track fitter in ATLAS [J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032013. <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F119%2F3%2F032013>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032013).
- [35] PIACQUADIO G, PROKOFIEV K, WILDAUER A. Primary vertex reconstruction in the ATLAS experiment at LHC[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032033. <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F119%2F3%2F032033>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032033).
- [36] BENEKOS N C, DEDES G, KASHIF L, et al. ATLAS muon spectrometer simulation and its validation algorithms[J/OL]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 119(3):032009. <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F119%2F3%2F032009>. DOI: [10.1088/1742-6596/119/3/032009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/3/032009).
- [37] LAMPL W, LAPLACE S, LELAS D, et al. Calorimeter Clustering Algorithms: Description and Performance: ATL-LARG-PUB-2008-002. ATL-COM-LARG-2008-003[R/OL]. Geneva: CERN, 2008. <https://cds.cern.ch/record/1099735>.
- [38] Measurements of the photon identification efficiency with the ATLAS detector using 4.9 fb $^{-1}$

- of pp collision data collected in 2011: ATLAS-CONF-2012-123[R/OL]. Geneva: CERN, 2012. <https://cds.cern.ch/record/1473426>.
- [39] Improved electron reconstruction in ATLAS using the Gaussian Sum Filter-based model for bremsstrahlung: ATLAS-CONF-2012-047[R/OL]. Geneva: CERN, 2012. <https://cds.cern.ch/record/1449796>.
- [40] The ATLAS Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. Electron and photon energy calibration with the atlas detector using lhc run 1 data[J/OL]. The European Physical Journal C, 2014, 74 (10):3071. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-3071-4>.
- [41] Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2015 LHC proton-proton collision data: ATLAS-CONF-2016-024[R/OL]. Geneva: CERN, 2016. <https://cds.cern.ch/record/2157687>.
- [42] Atlas Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. Muon reconstruction performance of the atlas detector in proton-proton collision data at $\sqrt{s}=13$ tev[J/OL]. The European Physical Journal C, 2016, 76(5):292. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4120-y>.
- [43] COLLABORATION A. Atlas muon combined performance with the full 2016 dataset [EB/OL]. <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/MUON-2017-001/index.html>.
- [44] COLLABORATION A. Muon trigger public results[EB/OL]. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/MuonTriggerPublicResults>.
- [45] AAD G, et al. Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1[J/OL]. Eur. Phys. J., 2017, C77:490. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5004-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5004-5).
- [46] Jet energy scale and its systematic uncertainty in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS 2011 data: ATLAS-CONF-2013-004[R/OL]. Geneva: CERN, 2013. <https://cds.cern.ch/record/1509552>.
- [47] CACCIARI M, SALAM G P, SOYEZ G. The anti- k_t jet clustering algorithm[J/OL]. JHEP, 2008, 04:063. DOI: [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063).
- [48] COLLABORATION T A. Monte Carlo Calibration and Combination of In-situ Measurements of Jet Energy Scale, Jet Energy Resolution and Jet Mass in ATLAS[J]. 2015.
- [49] COLLABORATION T A. Pile-up subtraction and suppression for jets in ATLAS[J]. 2013.
- [50] COLLABORATION T A. Tagging and suppression of pileup jets[J]. 2014.
- [51] Expected performance of the ATLAS b -tagging algorithms in Run-2: ATL-PHYS-PUB-2015-022[R/OL]. Geneva: CERN, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2037697>.
- [52] Optimisation of the ATLAS b -tagging performance for the 2016 LHC Run: ATL-PHYS-PUB-2016-012[R/OL]. Geneva: CERN, 2016. <https://cds.cern.ch/record/2160731>.
- [53] AAD G, et al. Performance of b -Jet Identification in the ATLAS Experiment[J/OL]. JINST, 2016, 11(04):P04008. DOI: [10.1088/1748-0221/11/04/P04008](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/04/P04008).
- [54] Reconstruction, Energy Calibration, and Identification of Hadronically Decaying Tau Leptons

- in the ATLAS Experiment for Run-2 of the LHC: ATL-PHYS-PUB-2015-045[R/OL]. Geneva: CERN, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2064383>.
- [55] AABOUD M, et al. Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV[J/OL]. Eur. Phys. J., 2018, C78(11):903. DOI: [10.1140/epjc/s10052-018-6288-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6288-9).
- [56] BUCKLEY A, BUTTERWORTH J, GIESEKE S, et al. General-purpose event generators for lhc physics[J/OL]. Physics Reports, 2011, 504(5):145 - 233. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157311000846>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.03.005>.
- [57] GLEISBERG T, HOECHE S, KRAUSS F, et al. Event generation with SHERPA 1.1[J/OL]. JHEP, 2009, 02:007. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/02/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/02/007).
- [58] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4—a simulation toolkit [J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3):250 - 303. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- [59] The ATLAS Collaboration, AAD G, ABBOTT B, et al. The atlas simulation infrastructure [J/OL]. The European Physical Journal C, 2010, 70(3):823-874. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1429-9>.
- [60] LUKAS W. Fast Simulation for ATLAS: Atlfast-II and ISF[C/OL]//2012. <http://cdsweb.cern.ch/record/1458503/files/ATL-SOFT-PROC-2012-065.pdf>.
- [61] ALWALL J, FREDERIX R, FRIXIONE S, et al. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations[J/OL]. JHEP, 2014, 07:079. DOI: [10.1007/JHEP07\(2014\)079](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2014)079).
- [62] KALOGEROPOULOS A, ALWALL J. The SysCalc code: A tool to derive theoretical systematic uncertainties[J]. 2018.
- [63] BOROWKA S, GREINER N, HEINRICH G, et al. Higgs Boson Pair Production in Gluon Fusion at Next-to-Leading Order with Full Top-Quark Mass Dependence[J/OL]. Phys. Rev. Lett., 2016, 117(1):012001. DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.012001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.012001).
- [64] DE FLORIAN D, et al. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 4. Deciphering the Nature of the Higgs Sector[J/OL]. 2016. DOI: [10.23731/CYRM-2017-002](https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-002).
- [65] MALTONI F. Higgs pair production[EB/OL]. <https://cp3.irmp.ucl.ac.be/projects/madgraph/wiki/HiggsPairProduction>.
- [66] BELLM J, et al. Herwig++ 2.7 Release Note[J]. 2013.
- [67] DENNER A, HEINEMEYER S, PULJAK I, et al. Standard Model Higgs-boson branching ratios with uncertainties[J/OL]. Eur. Phys. J., 2011, C71:1753. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1753-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1753-8).
- [68] GLEISBERG T, HOECHE S, KRAUSS F, et al. Event generation with SHERPA 1.1[J/OL]. JHEP, 2009, 02:007. DOI: [10.1088/1126-6708/2009/02/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/02/007).

- [69] ALIOLI S, NASON P, OLEARI C, et al. A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs: the POWHEG BOX[J/OL]. *JHEP*, 2010, 06:043. DOI: [10.1007/JHEP06\(2010\)043](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2010)043).
- [70] SJÖSTRAND T, STEPHEN M, PETER S. PYTHIA 6.4 physics and manual[J/OL]. *JHEP*, 2006, 05:026. DOI: [10.1088/1126-6708/2006/05/026](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026).
- [71] BALL R D, et al. Parton distributions for the LHC Run II[J/OL]. *JHEP*, 2015, 04:040. DOI: [10.1007/JHEP04\(2015\)040](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2015)040).
- [72] ATLAS Collaboration. Simulation of top-quark production for the ATLAS experiment at $\sqrt{s} = 13$ TeV[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2120417>.
- [73] ATLAS Collaboration. Modelling of the $t\bar{t}H$ and $t\bar{t}V(V = W, Z)$ processes for $\sqrt{s} = 13$ TeV ATLAS analyses[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2120826>.
- [74] ATLAS Collaboration. Multi-boson simulation for 13 TeV ATLAS analyses[M/OL]. 2016. <https://cds.cern.ch/record/2119986>.
- [75] The ATLAS Collaboration. Search for heavy neutrino, W_R and Z_R gauge bosons in events with two high- P_T leptons and jets with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV[J]. ATL-COM-PHYS-2013-810, 2013.
- [76] A. Alonso and B. Meirose. New data-driven methods for lepton charge mis-identification[J]. ATL-COM-PHYS-2012-164, 2012.
- [77] ALISON J. The fake factor method[M/OL]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 151-209. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10344-0_9.
- [78] HOECKER A, SPECKMAYER P, STELZER J, et al. TMVA: Toolkit for Multivariate Data Analysis[J]. PoS, 2007, ACAT:040.
- [79] ATLAS Collaboration. Luminosity determination in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV using the ATLAS detector at the LHC[J]. 2016.
- [80] ATLAS Collaboration. Analytical parametrization and shape classification of anomalous hh production in eft approach[J]. LHCHXSWG-INT-2016-001, 2016.
- [81] BUCKLEY A, FERRANDO J, LLOYD S, et al. LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2015, C75:132. DOI: [10.1140/epjc/s10052-015-3318-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3318-8).
- [82] ATLAS Collaboration. Measurement of the $W^\pm Z$ boson pair-production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *Phys. Lett.*, 2016, B762:1-22.
- [83] ATLAS Collaboration. Measurement of the $t\bar{t}Z$ and $t\bar{t}W$ production cross sections in multi-lepton final states using 3.2 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector[J]. *Eur. Phys. J.*, 2017, C77:40.
- [84] COWAN G, et al. Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics[J/OL]. *Eur. Phys. J.*, 2011, C71:1554. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1554-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1554-0).
- [85] READ A L. Presentation of search results: The CL(s) technique[J/OL]. *J.Phys.*, 2002, G28: 2693-2704. DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).

- [86] AAD G, et al. Combined search for the Standard Model Higgs boson in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector[J/OL]. Phys. Rev., 2012, D86:032003. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.032003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.032003).
- [87] Procedure for the LHC Higgs boson search combination in summer 2011[J]. 2011.
- [88] READ A L. Presentation of search results: the CL_s technique[J/OL]. J. Phys. G, 2002, 28: 2693. DOI: [10.1088/0954-3899/28/10/313](https://doi.org/10.1088/0954-3899/28/10/313).

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

本科生无需此部分。

作者简历

casthesis 作者

吴凌云，福建省屏南县人，中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生。

ucasthesis 作者

莫晃锐，湖南省湘潭县人，中国科学院力学研究所硕士研究生。

已发表 (或正式接受) 的学术论文:

[1] ucasthesis: A LaTeX Thesis Template for the University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

申请或已获得的专利:

(无专利时此项不必列出)

参加的研究项目及获奖情况:

可以随意添加新的条目或是结构。

致 谢

