

单喷注实验数据对部分子分布函数的影响

王启荣,毛建龙,沙依甫加马力·达吾来提*

(新疆大学 物理科学与技术学院,新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830046)

摘要:大型强子对撞机(LHC)上质心能量为2.76 TeV时,紧凑渺子线圈(CMS)探测器利用质子-质子对撞实验测量了单喷注产生的双微分散射截面,文章研究该实验数据对CT18NNLO部分子分布函数(PDFs)的影响。利用NLOJet++和CT18NNLO部分子分布函数计算出单喷注产生的双微分散射截面,并与CMS 2.76 TeV实验数据进行比较,大部分数据点的理论预测与测量的散射截面一致。进一步,用ePump(error PDF updating method package)更新CT18NNLO部分子分布函数得到CT18NNLO+Jet部分子分布函数。结果显示,当能量标度 $Q=100$ GeV时,在大 x 范围内($x>0.3$),CT18NNLO+Jet胶子部分子分布函数的中心值相比CT18NNLO胶子部分子分布函数而言急剧下降;在 $0.1<x<0.4$ 区间内,CT18NNLO+Jet胶子部分子分布函数的误差相比CT18NNLO胶子部分子分布函数而言减小了1%。

关键词:部分子分布函数;单喷注;ePump

中图分类号:O572.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2024)03-0591-07

Impact of the Inclusive Jet Data on Parton Distribution Functions

WANG Qirong, MAO Jianlong, Sayljamal Dulat*

(College of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: We study the impact of the inclusive jet data from the Compact muon Solenoid (CMS), at the Large Hadron Collider (LHC), at a center-of-mass energy of 2.76 TeV, on CT18 Parton Distribution Functions (PDFs) at the next-to-next-to leading order (NNLO) accuracy, using the fast and efficient tool-Error PDF Updating Method Package (ePump). First, we calculate the inclusive jet double differential cross-section with non-perturbative correction using CT18NNLO PDFs at the next-to leading order (NLO) accuracy. Then, using error PDF updating method package, the CMS 2.76 TeV inclusive jet double differential cross-section data and theoretical prediction, we update the CT18NNLO PDFs. We find the error band of the gluon PDF reduced by 1% in the range $0.1 < x < 0.4$, the central value dramatically decreased in the high x range ($x > 0.3$) at $Q = 100$ GeV. We also provide the ratios of the NLO QCD theoretical predictions from CT18NNLO and CT18NNLO+Jet to the measurement of the double-differential inclusive jet production cross-section. The predictions are in agreement with the measured cross-section for most of the data points.

Key words: parton distribution function; inclusive jet; ePump

0 引言

在高能物理中,初态为强子的任何散射实验都需要用部分子分布函数(Parton Distribution

Functions, PDFs)^[1-4]分析以及理解其物理结果。因为部分子分布函数是非微扰的,不能从第一性原理计算得到,所以在量子色动力学的框架下,对大量硬散射过程的实验数据全局拟

收稿日期:2023-01-28;接受日期:2023-03-28

基金项目:国家自然科学基金(11965020)

作者简介:王启荣(1999-),女,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为高能物理。E-mail:2118814048@qq.com

*通信作者:沙依甫加马力·达吾来提(Sayljamal Dulat),E-mail: sdulat@hotmail.com

引文格式:王启荣,毛建龙,沙依甫加马力·达吾来提.单喷注实验数据对部分子分布函数的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(3):591-597. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023077

合^[5-6]得到部分子分布函数。这些数据来自大型强子对撞机(LHC)、强子-电子环形加速器(HERA)和兆电子伏特加速器(Tevatron)等。目前,国际上有几个部分子分布函数研究组使用不同的参数化形式来研究部分子分布函数,例如CT18NNLO^[7]、NNPDF4.0^[8]和MSHT20^[9]等部分子分布函数。获取部分子分布函数误差最常用的2种方法为:Hessian方法^[10-11]和Monte Carlo方法^[12]。CTEQ和MSHT研究组是使用Hessian方法进行研究的,而NNPDF研究组是使用Monte Carlo方法进行研究的。全局拟合方法不仅需要对大量的数据进行拟合分析,还需要较长的时间和先进的计算设备,因此不能及时地知道新实验数据带来的信息。于是CTEQ-TEA研究组就研发了ePump(error PDF updating method package)软件^[13]。ePump可以更新和优化部分子分布函数的中心值和误差,以及更新其他任何可观测量。用ePump构造部分子分布函数时,只需要输入旧的Hessian部分子分布函数、新的实验数据和相应的理论预测结果,而不需要进行复杂的量子色动力学整体分析,这样很快就可以得到一个近似于做整体分析的新的部分子分布函数,大大减少了更新部分子分布函数所需的时间。参考文献[13-14]详细介绍了ePump软件,参考文献[15-19]介绍了使用ePump软件做的相关研究。

在LHC上质子-质子对撞产生大量的喷注(pp → jet + X),喷注的产生过程如图1所示。

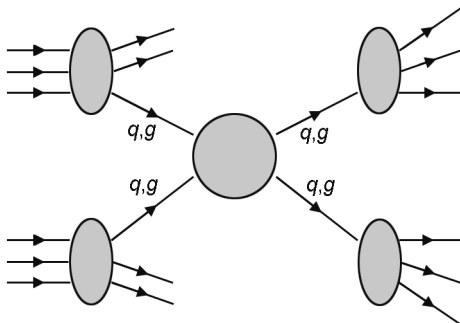


图1 喷注的产生过程

Fig. 1 The Feynman diagram of jet production

精确测量不同质心能量的单喷注产生的散射截面,可用于确定部分子分布函数和强耦合常数 α_s 。本文使用CT18NNLO PDFs^[7],

CT18NNLO PDFs包含LHC上超导环场探测器(ATLAS)、紧凑渺子线圈(CMS)和LHC底夸克(LHCb)探测器产生的单喷注、W/Z玻色子、顶夸克对和Drell-Yan对的实验数据。通过研究新数据与部分子分布函数之间的关系,考虑是否将新数据囊括进部分子分布函数中,在全局拟合之前做初步分析。目前在喷注的实验测量方面,CMS和ATLAS探测器分别测量了质子与质子在质心能量为2.76 TeV^[20-21]、7 TeV^[22-23]、8 TeV^[24]和13 TeV^[25-26]时碰撞产生的喷注的散射截面,其中CMS 2.76 TeV、ATLAS 13 TeV的喷注实验数据并没有加入CT18NNLO PDFs。本文使用CMS研究组发布的质心能量为2.76 TeV、积分亮度为5.43 pb⁻¹的单喷注实验数据,研究该实验数据对CT18NNLO PDFs的影响。

本文包括以下内容:第1节比较理论结果与CMS 2.76 TeV单喷注实验数据。第2节研究理论结果与CT18NNLO胶子部分子分布函数之间的关联性。第3节用CMS 2.76 TeV单喷注实验数据更新CT18NNLO PDFs。第4节进行总结。

1 理论预测与CMS 2.76 TeV单喷注实验数据的比较

本文采用CMS研究组发布的质心能量为2.76 TeV、积分亮度为5.43 pb⁻¹的单喷注实验数据,喷注半径 $R=0.7$,通过测量喷注的横向动量 p_T 和绝对快度 $|y|$ 来确定单喷注的双微分散射截面($d^2\sigma/dp_T dy$),此测量中CMS研究组对喷注的横向动量和绝对快度使用如下边界条件: $74 \leq p_T \leq 592$ GeV,绝对快度 $|y|$ 分为6个区间,分别为 $0 < |y| < 0.5$ 、 $0.5 < |y| < 1.0$ 、 $1.0 < |y| < 1.5$ 、 $1.5 < |y| < 2.0$ 、 $2.0 < |y| < 2.5$ 和 $2.5 < |y| < 3.0$ 。实验数据的误差包括统计误差和系统误差(系统误差包括不相关的系统误差和相关的系统误差)。实验数据里给出总误差 $\Delta\sigma(\text{exp})$ 为统计误差 σ_{StatErr} 和不相关系统误差 σ_{SysErr} 平方和的算术平方根:

$$\Delta\sigma(\text{exp}) = \sqrt{(\sigma_{\text{StatErr}})^2 + (\sigma_{\text{SysErr}})^2}. \quad (1)$$

下面简要介绍获取单喷注产生的双微分散射截面的理论预测值的方法。强子-强子对撞过程的微分散射截面为

$$d\sigma^{h_1 h_2 \rightarrow cd} = \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \sum_{a,b} f_{a/h_1}(x_1, \mu_F^2) f_{b/h_2}(x_2, \mu_F^2) d\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd}, \quad (2)$$

其中 $\sigma^{ab \rightarrow cd}$ 是部分子 $ab \rightarrow cd$ 过程的散射截面。 $f_{a/h_i}(x_i, \mu_F^2)$ 为部分子分布函数,描述了在一个强子 h_i 中能找到具有动量分数 x_i 的部分子 i 的概率密度 ($i = 1, 2$); μ_F 是因子化标度。部分子的微分散射截面 $d\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd}$ 以耦合常数 α_s 进行 n 阶微扰展开

$$d\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd} = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^n d\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd(n)} = d\hat{\sigma}_{\text{LO}}^{ab \rightarrow cd} + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right) d\hat{\sigma}_{\text{NLO}}^{ab \rightarrow cd} + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi} \right)^2 d\hat{\sigma}_{\text{NNLO}}^{ab \rightarrow cd} + \dots, \quad (3)$$

其中 LO (Leading Order) 表示领头阶水平, NLO (Next-to-Leading-Order) 表示次领头阶水平, NNLO (Next-to-Next-to-Leading-Order) 表示次次领头阶水平。

参考文献[27]给出了使用 NLOJET++ 蒙特卡洛数据计算程序计算的部分子的散射截面 $\hat{\sigma}^{ab \rightarrow cd}$, 计算过程中,把因子化标度 (μ_F) 和重整化标度 (μ_R) 设定为喷注的横向动量 (p_T), 即 $\mu_F = \mu_R = p_T$ 。在 APPLGRID^[28] 环境下,我们用 CT18NNLO PDFs 和 CT18NNLO+Jet PDFs 分别得到了在 NLO 水平上单喷注的双微分散射截面 ($d^2\sigma/dp_T dy$) 的理论预测值。

在图 2 中,我们提供理论结果与 CMS 2.76 TeV 单喷注实验数据的比较。横坐标代表单喷注的横向动量;纵坐标为理论结果与实验数据的比值。青色的误差带代表总误差;橙色的误差带代表统计误差。紫色的误差棒代表由 CT18NNLO PDFs 得到理论结果;深蓝色的误差棒代表由 CT18NNLO+Jet PDFs 得到理论结果,误差棒代表 68% 置信水平的 PDFs 误差;在误差棒中间,紫色的正方形代表用 CT18NNLO PDFs 预测的理论中心值;深蓝色的圆点代表用 CT18NNLO+Jet PDFs 预测的理论中心值。CT18NNLO PDFs 和 CT18NNLO+Jet PDFs 各包含一个最佳拟合部分子分布函数(00.pds)和

58 个误差部分子分布函数。PDFs 的对称误差用如下公式计算:

$$\Delta f = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_p} (f_i^+(x, Q) - f_i^-(x, Q))^2}, \quad (4)$$

其中 $N_p = 29$ 是 PDFs 自由参数的数目; $f_i^\pm(x, Q)$ 表示与正负特征向量方向相对应的对称误差部分子分布函数; x 为动量分数; Q 为能量标度。

从图 2 中可以发现, CT18NNLO PDFs 和 CT18NNLO+Jet PDFs 预测的大多数散射截面的中心值和误差都在总误差和统计误差范围内,这表明分别用 CT18NNLO PDFs 和 CT18NNLO+Jet PDFs 计算的理论与 CMS 2.76 TeV 单喷注实验数据在误差范围内符合得很好,此外我们发现用 CT18NNLO+Jet PDFs 计算的散射截面的误差更小,中心值更接近实验数据。

2 理论预测与 CT18NNLO 胶子 PDFs 的关联性

为了研究特定的单喷注实验数据点在给定 x 和 Q 时对 CT18NNLO 部分子分布函数 $f_i(x, Q)$ 的影响,需要计算这个数据点的理论结果与 CT18NNLO 胶子部分子分布函数之间的关联性 $\cos \phi$ ^[29-35]。首先简要地介绍关联性的定义。如果在参数空间 a_i 中有两个自变量 $X(\vec{a}_i)$ 和 $Y(\vec{a}_i)$, 则关联性 $\cos \phi$ 可表示为:

$$\cos \phi = \frac{\vec{\nabla} X \cdot \vec{\nabla} Y}{|\vec{\nabla} X| |\vec{\nabla} Y|}, \quad (5)$$

其中 $\vec{\nabla} X$ 和 $\vec{\nabla} Y$ 分别是自变量 $X(\vec{a}_i)$ 和 $Y(\vec{a}_i)$ 的梯度; ϕ 是 $\vec{\nabla} X$ 和 $\vec{\nabla} Y$ 之间的角度。 $\vec{\nabla} X$ 的第 i 个分量为:

$$(\vec{\nabla} X)_i = \frac{\partial X}{\partial a_i} = \frac{1}{2} (X^+(a_i) - X^-(a_i)), \quad (6)$$

其中, $X^+(a_i)$ 和 $X^-(a_i)$ 分别代表两组部分子分布函数沿着第 i 个特征向量正反方向计算出的 X 值。通过数值化的形式来说明任意两个可观测量之间存在的内部关联性。关联性 $\cos \phi$ 的取值区间为 $[-1, 1]$ 。若 $\cos \phi$ 的值为正,则表明两个可观测量之间存在正关联性,且其值越接近于 1, 则关联性越来越强;若 $\cos \phi$ 的值

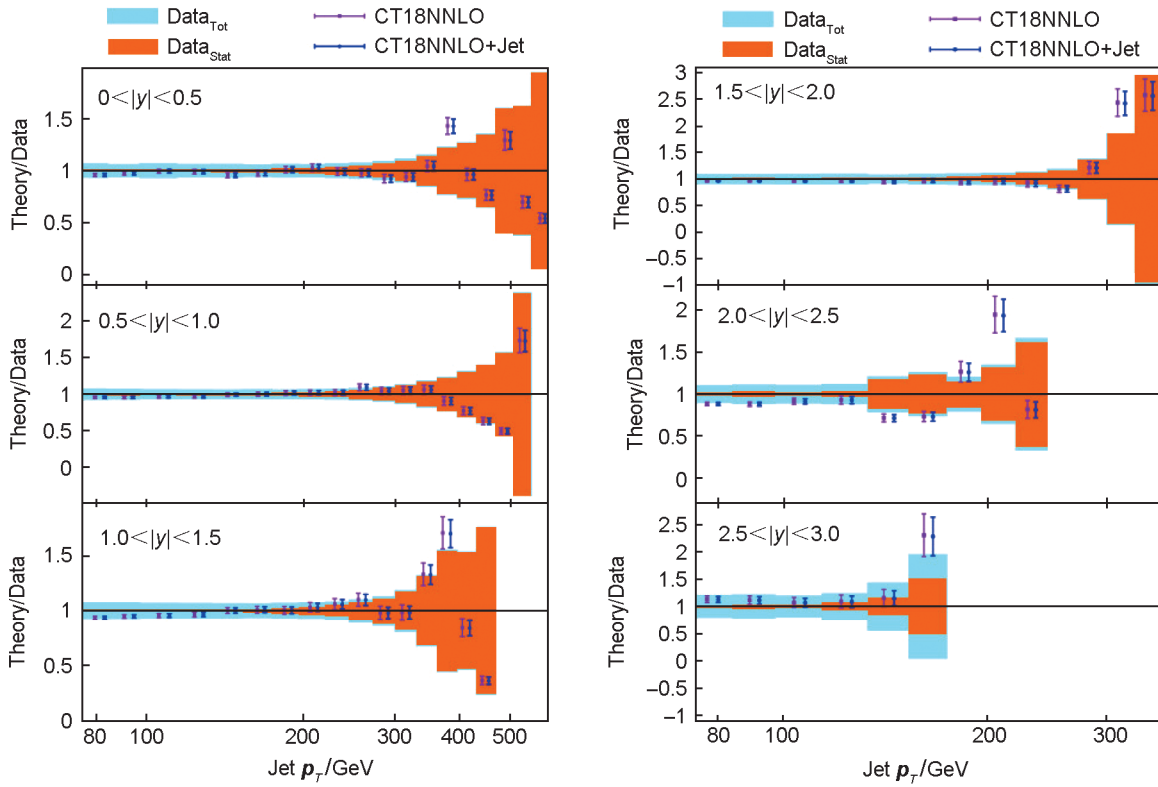


图2 不同绝对快度 $|y|$ 条件下比较理论预测与CMS 2.76 TeV单喷注实验数据

Fig. 2 Comparison of theoretical predictions and the CMS 2.76 TeV inclusive jet data among different absolute rapidities

为负,则表明两个可观测量之间存在反关联性,且其值越接近于-1,则反关联性越来越强;若 $\cos \phi$ 的值接近于0,则表明关联性很弱。如果在某个区间的实验数据与部分子分布函数的关联性很强,那么这些实验数据将可能会对这个区间相关味道的部分子分布函数产生影响。

利用CT18NNLO胶子部分子分布函数,通过NLOJet++计算得到单喷注产生的总散射截面理论结果。在图3中,展示了当 $Q=100$ GeV时,在6个绝对快度区间内,CT18NNLO胶子部分子分布函数与理论结果之间的关联性随动量分数 x 的变化关系。因为CMS质心能量为2.76 TeV的单喷注数据包含81个数据点,所以使用81条不同颜色的曲线来分别表示在6个绝对快度区间内 $\cos \phi$ 随 x 的变化关系。横坐标为部分子的动量分数 x (部分子所具有的能量与质子能量的比值),纵坐标为CT18NNLO胶子部分子分布函数与理论结果之间的关联性 $\cos \phi$ 。

从图3中可以发现,当 $Q=100$ GeV时,

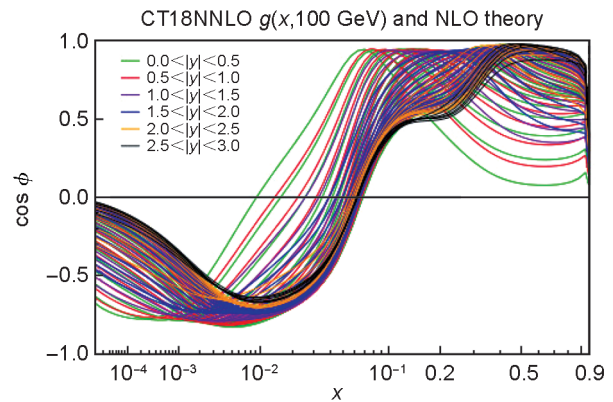


图3 CT18NNLO胶子PDFs与理论预测之间的关联性
Fig. 3 The correlation between the CT18NNLO gluon PDF and theoretical predictions

CT18NNLO胶子部分子分布函数与用CT18NNLO PDFs计算的CMS 2.76 TeV单喷注产生的总散射截面理论结果之间有强的关联性。在 $0.08 < x < 0.5$ 区间内, $\cos \phi \rightarrow 1$;在 $10^{-4} < x < 10^{-2}$ 区间内, $\cos \phi \rightarrow -1$ 。因此预计CMS 2.76 TeV单喷注实验数据在上述区间内可能对CT18NNLO胶子部分子分布函数有较大的影响。

3 更新CT18NNLO PDFs

由上可知,在 $0.08 < x < 0.5$ 和 $10^{-4} < x < 10^{-2}$ 区间内,CT18NNLO 胶子部分子分布函数与理论结果之间有强的关联性,说明在这个动量分数区间范围内 CMS 2.76 TeV 单喷注实验数据可能对 CT18NNLO 胶子部分子分布函数有影响,本节将研究 CMS 2.76 TeV 单喷注的双微分散射截面实验数据对 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的具体影响。

使用 ePump,将单喷注的双微分散射截面的理论预测值和 CMS 2.76 TeV 单喷注实验数据加到 CT18NNLO PDFs 中生成新的部分子分布函数 (CT18NNLO+Jet PDFs)。CT18NNLO+Jet PDFs 近似等于全局拟合得到的部分子分布函数。在更新过程中,权重因子设置为 1,使用动态公差 (dynamical tolerance),而不是 CTEQ-PDFs 的固定公差 $\Delta T^2 = 100$,否则会高估实验数据对 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的影响。

图 4 展示了当 $Q = 100$ GeV 时,将 CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心值和误差归一化到 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的中心值和误差得到的比率图,研究单喷注实验数据对最佳拟合 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的影响。在图 4 和图 5 中,横坐标表示动量分数 x ,纵坐标表示所有的部分子分布函数对 CT18NNLO PDFs 归一化的值。CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心值 (红线) 和误差 (红色区域) 以及 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的误差 (蓝色区域) 都除以 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的中心值 ($y = 1.0$ 的蓝线)。其中部分子分布函数误差在 90% 的置信水平内。

从图 4 中可以发现,在大 x 范围内 ($x > 0.3$),CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心值相比 CT18NNLO 胶子部分子分布函数而言急剧下降。

图 5 展示了当 $Q = 100$ GeV 时,分别将 CT18NNLO 胶子部分子分布函数与 CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心值和误差归一化到各自的中心值和误差得到误差带的比较

图,研究单喷注实验数据对 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的误差的影响。

从图 5 中可以发现,在 $0.1 < x < 0.4$ 区间内,CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的误差相比 CT18NNLO 胶子部分子分布函数而言减小了 1%。

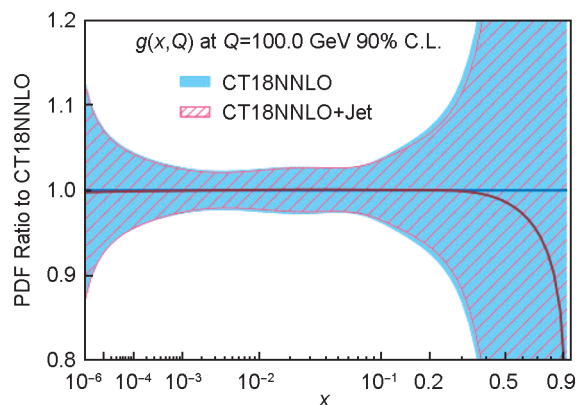


图 4 在 $Q = 100$ GeV 时 CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数与 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的比率图

Fig. 4 Ratio of CT18NNLO+Jet gluon PDF to CT18NNLO gluon PDF at $Q = 100$ GeV

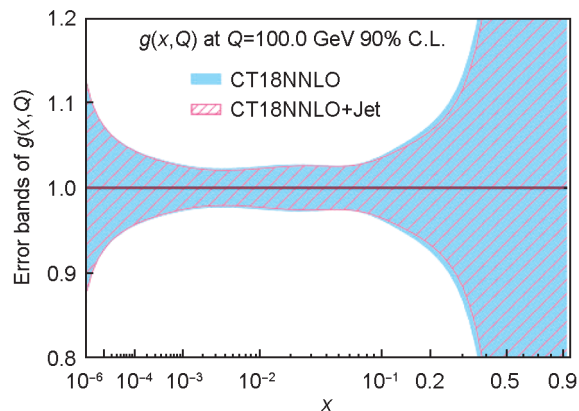


图 5 在 $Q = 100$ GeV 时 CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数与 CT18NNLO 胶子部分子分布函数的误差带的比较

Fig. 5 Comparison of error bands between CT18NNLO+Jet gluon PDF and CT18NNLO gluon PDF at $Q = 100$ GeV

4 结论

在标准模型框架下,使用 ePump 更新 CT18NNLO PDFs 得到 CT18NNLO+Jet PDFs。研究表明用 CT18NNLO+Jet PDFs 计算的散射截面的误差更小,中心值更接近实验数据。在大 x 范围内 ($x > 0.3$),CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心值相比 CT18NNLO 胶子部分子分布函数而言急剧下降。在 $0.1 < x < 0.4$

区间内, CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的误差相比 CT18NNLO 胶子部分子分布函数而言减小了 1%。因此我们得出 CMS 2.76 TeV 单喷注的双微分散射截面实验数据可以减小 CT18NNLO+Jet 胶子部分子分布函数的中心和误差这一结论。

参考文献:

- [1] DULAT S, HOU T J, GAO J, *et al.* New Parton Distribution Functions from a Global Analysis of Quantum Chromodynamics[J]. *Phys Rev D*, 2016, **93**(3): 033006. DOI: 10.1103/physrevd.93.033006.
- [2] WILLIS C G, BROCK R, HAYDEN D, *et al.* New Method for Reducing Parton Distribution Function Uncertainties in the High-mass Drell-Yan Spectrum[J]. *Phys Rev D*, 2019, **99**(5): 054004. DOI: 10.1103/physrevd.99.054004.
- [3] CZAKON M, DULAT S, HOU T J, *et al.* An Exploratory Study of the Impact of CMS Double-differential Top Distributions on the Gluon Parton Distribution Function[J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2021, **48**(1): 015003. DOI: 10.1088/1361-6471/abb1b6.
- [4] ACCARDI A, BRADY L T, MELNITCHOUK W, *et al.* Constraints on Large-x Parton Distributions from New Weak Boson Production and Deep-inelastic Scattering Data[J]. *Phys Rev D*, 2016, **93**(11): 114017. DOI: 10.1103/physrevd.93.114017.
- [5] GRIBOV V N, LIPATOV L N. Deep Inelastic Electron Scattering in Perturbation Theory[J]. *Phys Lett B*, 1971, **37**(1): 78-80. DOI: 10.1016/0370-2693(71)90576-4.
- [6] ALTARELLI G, PARISI G. Asymptotic Freedom in Parton Language[J]. *Nucl Phys B*, 1977, **126**(2): 298-318. DOI: 10.1016/0550-3213(77)90384-4.
- [7] HOU T J, GAO J, HOBBS T J, *et al.* New CTEQ Global Analysis of Quantum Chromodynamics with High-precision Data from the LHC[J]. *Phys Rev D*, 2021, **103**: 014013. DOI: 10.1103/physrevd.103.014013.
- [8] BALL R D, CARRAZZA S, CRUZ-MARTINEZ J, *et al.* The Path to Proton Structure at 1% Accuracy[J]. *Eur Phys J C*, 2022, **82**(5): 428. DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10328-7.
- [9] BAILEY S, CRIDGE T, HARLAND-LANG L A, *et al.* Parton Distributions from LHC, HERA, Tevatron and Fixed Target Data: MSHT20 PDFS[J]. *Eur Phys J C*, 2021, **81**(4): 341. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09057-0.
- [10] GIELE W T, KELLER S. Implications of Hadron Collider Observables on Parton Distribution Function Uncertainties[J]. *Phys Rev D*, 1998, **58**(9): 094023. DOI: 10.1103/physrevd.58.094023.
- [11] TEAM H D, BELOV P, BRITZGER D, *et al.* Parton Distribution Functions at LO, NLO and NNLO with Correlated Uncertainties between Orders[J]. *Eur Phys J C*, 2014, **74**(10): 3039. DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-3039-4.
- [12] PUMPLIN J, STUMP D, BROCK R, *et al.* Uncertainties of Predictions from Parton Distribution Functions. II. the Hessian Method[J]. *Phys Rev D*, 2001, **65**: 014013. DOI: 10.1103/physrevd.65.014013.
- [13] SCHMIDT C, PUMPLIN J, YUAN C P. Updating and Optimizing Error Parton Distribution Function Sets in the Hessian Approach[J]. *Phys Rev D*, 2018, **98**(9): 094005. DOI: 10.1103/physrevd.98.094005.
- [14] HOU T J, YU Z T, DULAT S, *et al.* Updating and Optimizing Error Parton Distribution Function Sets in the Hessian Approach. II[J]. *Phys Rev D*, 2019, **100**(11): 114024. DOI: 10.1103/physrevd.100.114024.
- [15] ABLAT A, DULAT S, RASHIDIN R, *et al.* The Impact of Single Top Data on CT14nnlo PDFS[J]. *Int J Theor Phys*, 2020, **59**(10): 3023-3031. DOI: 10.1007/s10773-020-04473-6.
- [16] YALKUN N, DULAT S. QCD Analysis of CMS W + Charm Measurements at LHC with $\sqrt{s} = 7$ TeV and Implications for Strange PDF[J]. *Chin Phys C*, 2019, **43**(12): 123101. DOI: 10.1088/1674-1137/43/12/123101.
- [17] ABLIMIT A, RASHIDIN R, ABLAT A, *et al.* QCD and Electro-weak Corrections to the Production of Higgs+2 Jets at the LHC[J]. *Commun Theor Phys*, 2020, **72**(10): 105202. DOI: 10.1088/1572-9494/aba254.
- [18] JANDAOLET Q, ABLAT A, OBUL P, *et al.* ResBos and ePump Analysis on ATLAS 8TeV Z Boson Transverse Momentum Distributions[J]. *Int J Theor Phys*, 2021, **60**(8): 3013-3023. DOI: 10.1007/s10773-021-04852-7.
- [19] DENG Q L, HAN Q D, YIN H, *et al.* Impact of LHCB 13 TeV W and Z Pseudo-data on the Parton Distribution Functions[J]. *Chin Phys C*, 2021, **45**(2): 023110. DOI: 10.1088/1674-1137/abcd90.
- [20] C C. Measurement of the Inclusive Jet Cross Section in Pp Collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV[EB/OL]. arXiv preprint: 1512.06212, 2015. <https://arxiv.org/abs/1512.06212>.
- [21] AAD, ABAJYAN, ABBOTT, *et al.* Measurement of the Inclusive Jet Cross-section in Pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV and Comparison to the Inclusive Jet Cross-section at $\sqrt{s} = 7$ TeV Using the ATLAS Detector[J]. *Eur Phys J C Part Fields*, 2013, **73**(8): 2509-1.

- [22] C C. Measurement of the Inclusive Jet Cross Section in Pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV[EB/OL]. arXiv Preprint: 1106.0208, 2011. <https://arxiv.org/abs/1106.0208>.
- [23] COLLABORATION T A, AAD G, ABBOTT B, *et al.* Measurement of Inclusive Jet and Dijet Cross Sections in Proton-proton Collisions at 7 TeV Centre-of-mass Energy with the ATLAS Detector[J]. *Eur Phys J C*, 2011, **71**(2): 1512. DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1512-2.
- [24] COLLABORATION T C, KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, *et al.* Measurement and QCD Analysis of Double-differential Inclusive Jet Cross Sections in Pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and Cross Section Ratios to 2.76 and 7 TeV[J]. *J High Energy Phys*, 2017, **2017**(3): 156. DOI: 10.1007/JHEP03(2017)156.
- [25] C C. Measurement of the Double-differential Inclusive Jet Cross Section in Proton-proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV[EB/OL]. arXiv Preprint: 1605.04436, 2016. <https://arxiv.org/abs/1605.04436>.
- [26] COLLABORATION H A, AABOUD M, AAD G, *et al.* Measurement of Inclusive Jet and Dijet Cross-sections in Proton-proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS Detector[J]. *J High Energy Phys*, 2018, **2018**(5): 1-47. DOI: 10.1103/PhysRevD.86.014022.
- [27] NAGY Z. Next-to-leading Order Calculation of Three-jet Observables in Hadron-hadron Collisions[J]. *Phys Rev D*, 2003, **68**(9): 094002. DOI: 10.1103/physrevd.68.094002.
- [28] CARLI T, CLEMENTS D, COOPER-SARKAR A, *et al.* A Posteriori Inclusion of Parton Density Functions in NLO QCD Final-state Calculations at Hadron Colliders: The APPLGRID Project[J]. *Eur Phys J C*, 2010, **66**(3): 503-524. DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1255-0.
- [29] NADOLSKY P M, LAI H L, CAO Q H, *et al.* Implications of CTEQ Global Analysis for Collider Observables[J]. *Phys Rev D*, 2008, **78**: 013004. DOI: 10.1103/physrevd.78.013004.
- [30] GAO J, GUZZI M, HUSTON J, *et al.* CT10 Next-to-next-to-leading Order Global Analysis of QCD[J]. *Phys Rev D*, 2014, **89**(3): 033009. DOI: 10.1103/physrevd.89.033009.
- [31] CACCIARI M, SALAM G P, SOYEZ G. The Anti- k_r Jet Clustering Algorithm[J]. *J High Energy Phys*, 2008, **2008**(4): 63. DOI: 10.1088/1126-6708/2008/04/063.
- [32] ELLIS S D, SOPER D E. Successive Combination Jet Algorithm for Hadron Collisions[J]. *Phys Rev D Part Fields*, 1993, **48**(7): 3160-3166. DOI: 10.1103/physrevd.48.3160.
- [33] DOKSHITZER Y L, LEDER G D, MORETTI S, *et al.* Better Jet Clustering Algorithms[J]. *J High Energy Phys*, 1997, **1997**(8): 1. DOI: 10.1088/1126-6708/1997/08/001.
- [34] STRENG K H, WALSH T F, ZERWAS P M. Quark and Gluon Jets in the Breit Frame of Lepton-nucleon Scattering[J]. *Z Phys C - Particles and Fields*, 1979, **2**(3): 237-242. DOI: 10.1007/BF01474667.
- [35] ABT I, AHMED T, AID S, *et al.* The H1 detector at HERA [J]. *Nucl Instrum Methods in Phys Res A*, 1997, **386**(2): 310-347. DOI: 10.1016/S0168-9002(96)00893-5.