第54卷第6期 原子能科学技术 Vol. 54, No. 6
2020年6月 Atomic Energy Science and Technology Jun. 2020

STCF RICH 原型探测器的测试电子学系统构建与联调测试

侯宝临[1,2],赵 雷[1,*],陈 朕[1],张志永[1],刘 倩[3],丰建鑫[1],
汪安琪[1],邵 明[1],刘建北[1],李嘉铭[1],封常青[1],刘树彬[1],安 琪[1]
(1. 核探测与核电子学国家重点实验室,中国科学技术大学,安徽 合肥 230026;
2. 西南科技大学 信息工程学院,四川 绵阳 621010;3. 中国科学院大学 物理科学学院,北京 100049)

摘要:环形成像切伦科夫(RICH)探测器作为超级陶粲装置(STCF)带电强子(π/K/p)鉴别的技术选项之一,采用厚型气体电子倍增器+微网格气体(THGEM+Micromegas)混合探测器结构以实现对切伦科夫光的探测。针对 RICH 原型探测器的信号读出,构建了一套 1 024 通道测试电子学系统,并与探测器进行了联合测试。该测试电子学系统使用高密接插件与 RICH 原型探测器进行连接,探测器输出信号通过测试电子学系统上的 AGET 和 ADC 芯片进行放大、成形和波形数字化,输出的数据经 FPGA 处理后通过千兆以太网传输至后端 PC 并进行数据分析。测试结果表明,在 120 fC 输入动态范围下,系统的等效噪声电荷(ENC)小于 0.3 fC,且具有良好的输入-输出线性。该系统成功应用于 RICH 原型探测器切伦科夫成像束流实验中,并取得了良好的切伦科夫光成像结果。

关键词:超级陶粲装置;AGET;RICH 原型探测器;多通道测试电子学系统
中图分类号:O572.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2020)06-1055-06
doi:10.7538/yzk.2020.youxian.0045

Development of Verification Electronics System for STCF RICH Prototype Detector and Its Testing with Detector

HOU Baolin[1,2], ZHAO Lei[1,*], CHEN Zhen[1], ZHANG Zhiyong[1], LIU Qian[3],
FENG Jianxin[1], WANG Anqi[1], SHAO Ming[1], LIU Jianbei[1], LI Jiaming[1],
FENG Changqing[1], LIU Shubin[1], AN Qi[1]
(1. *State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics*,
University of Science and Technology of China, *Hefei* 230026, *China*;
2. *School of Information Engineering*, *Southwest University of Science and Technology*, *Mianyang* 621010, *China*;
3. *School of Physics*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The ring imaging Cherenkov (RICH) prototype detector, which is based on a

收稿日期:2020-01-15;**修回日期:**2020-03-28
基金项目:中国科学技术大学"双一流"重点建设项目资助(YD2030000603)
作者简介:侯宝临(1987—),男,河南开封人,讲师,博士研究生,物理电子学专业
* **通信作者:**赵 雷,E-mail: zlei@ustc.edu.cn
网络出版时间:2020-05-15;**网络出版地址:**http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200514.1333.006.html

thick gaseous electron multiplier+micro mesh gas (THGEM + Micromegas) hybrid detector structure to detect Cherenkov light, is one of the technical options for particle identification of charged hadron (π/K/p) at the super tau-charm facility (STCF). The setup of 1 024-channel verification electronics system for the RICH prototype detector and the test result with the detector were presented. The verification electronics system imports signal from the RICH prototype detector through high-density connectors, and uses the AGET and ADC ASICs for signal amplification, shaping, and waveform digitization. The digital data are then processed by the FPGA and finally transferred to a remote PC for data analysis. The results show that the system equivalent noise charge (ENC) is less than 0.3 fC and the good input-output linearity is achieved with an input dynamic range of 120 fC. The verification electronics system is successfully applied in the beam test of the RICH prototype detector, and good Cherenkov light images are obtained.

Key words: super tau-charm facility; AGET; RICH prototype detector; multi-channel verification electronics system

在粒子物理实验中,陶粲能区具有非常独特的物理特征,被认为是研究强子物理和寻找新物理的重要场所。正在预研中的超级陶粲装置(STCF)是我国继北京正负电子对撞机(BEPCⅡ)之后基于加速器的粒子物理大科学装置的重要选项之一,为陶粲物理和强子物理研究提供独特平台。STCF 质心系能量计划运行在 2～7 GeV,这一能区由正负电子碰撞所产生的强子末态,其最大动量可达 2.0 GeV/c,这就要求粒子鉴别(PID)探测器对相应能段的带电强子(π/K/p)具有 3σ 的粒子鉴别能力。

切伦科夫探测器是利用不同速度的带电粒子经过辐射体产生的切伦科夫光角度不同来进行粒子鉴别的[1]。实现切伦科夫辐射角精确测量的探测器技术包括环形成像切伦科夫(RICH)探测器、内部全反射切伦科夫光探测器(DIRC)等[2-4]。其中,RICH 探测器具有粒子鉴别动量范围大且连续的特点,有很好的粒子鉴别能力。RICH 原型探测器的核心部件是光探测器,切伦科夫光产额低,要求光探测器必须对单光子灵敏,由表面镀碘化铯(CsI)的厚型气体电子倍增器+微网格气体(THGEM+Micromegas)混合探测器可很好地满足 RICH 探测器对光探测的各项要求[5]。RICH 原型探测器的尺寸为 160 mm×160 mm,阳极读出像素单元的尺寸为 5 mm×5 mm,共有 1 024 路读出像素单元。RICH 原型探测器对单光电子的增益约为 10^5,其输出信号主要由雪崩产生的电子漂移和离子漂移贡献,电子漂移速度很快,因此信号前沿持续时间仅约 1 ns;离子漂移的速度相对较慢,故信号后沿持续时间较长(约 100 ns)。要求测试电子学系统同时实现时间和电荷的测量,时间分辨达 1 ns,电荷测量动态范围达48 fC,系统的等效噪声电荷(ENC)小于 0.5 fC。基于以上对测试电子学系统提出的需求,为评估 RICH 原型探测器的性能,本文构建一套高集成度、低噪声的测试电子学系统,并对其性能进行测试,以准确地评估探测器设计的正确性及性能指标。

1 RICH 原型探测器测试电子学系统

针对 RICH 原型探测器的测试需求,基于波形数字化的分析方法可最全面准确地反映粒子的基本信息,且可进行在线数据分析和处理[6-7]。目前气体电子倍增器(GEM)和 Micromegas 探测器常用的读出 ASIC 有 APV25、GERO、AFTER 和 AGET 及利用这些 ASIC 设计的前端读出电子学系统等[8-12]。本工作采用已设计完成的基于 AGET 的电子学系统[13-15]来构建 RICH 原型探测器的测试电子学系统。AGET 是法国 Saclay 实验室为时间投影室(TPC)通用电子学系统专门开发的一款前端读出芯片,该芯片主要由前端电荷灵敏放大、整形、滤波、开关电容阵列(SCA)等组成,其

输入动态范围(120 fC、240 fC、1 pC 和 10 pC)、达峰时间(50 ns～1 μs)和 SCA 采样频率(1～100 MHz)均可调。在输入电容小于 30 pF、成形时间为 1 μs 的情况下，其 ENC 小于 0.08 fC[12]。AGET 芯片结合后端的模数转换(ADC)和数字信号处理单元，可实现对 RICH 原型探测器输出波形的数字化读出。

RICH 原型探测器测试电子学系统结构如图 1 所示。利用 4 块 AGET 前端电子学(FEE，每个 FEE 256 通道)模块[13-14]实现了1 024路 RICH 原型探测器信号的读出。由于 AGET 芯片的 ENC 随输入电容的增大而增大，随成形时间的增大而减小[12]，因此，为了降低系统噪声，RICH 原型探测器和 FEE 之间采用高密连接器相连，且转接板尺寸应尽可能地小，使走线更短，以减小由走线引入的输入电容，同时，在做束流实验时，对 FEE 做了电磁屏蔽处理，以保证测试电子学系统的 ENC 小于 0.5 fC。

RICH 原型探测器的输出信号经 AGET 放大、滤波成形，并在触发信号的控制下完成 SCA 采样和 ADC 变换，ADC 量化位宽为12 bit，并由 FPGA 对数据进行预处理，然后通过光纤将数据传输至数据汇总模块(DCM)[15]。DCM 汇总 4 块 FEE 的数据并打包，经千兆以太网将打包后的数据上传至 PC。

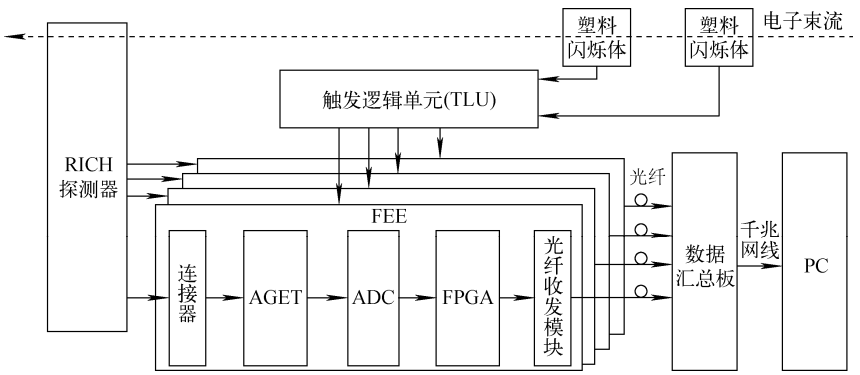


图 1　测试电子学系统结构

Fig. 1　Structure of verification electronics system

2　测试系统性能测试结果

2.1　基线噪声测试

在将此测试电子学系统用于与探测器的联合测试前，必须对系统本身的性能进行测试和评估。在 120 fC 输入动态范围、25 MHz SCA 采样频率和 1 μs 达峰时间条件下，分别对 FEE 进行了不连接和连接 RICH 原型探测器的基线噪声测试。图 2a 为不连接 RICH 原型测器时的基线噪声，单个通道基线噪声的 RMS 小于 3.6 ADC 道值，ENC 约为 0.1 fC。图 2b 为

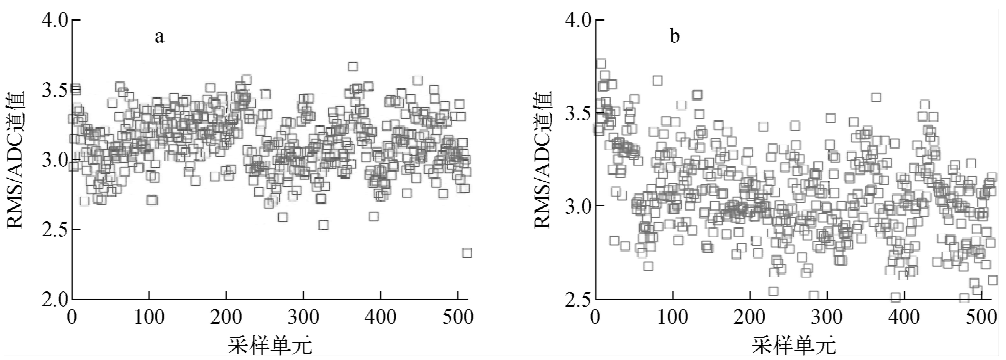


图 2　单通道 FEE 的基线噪声测试

Fig. 2　Baseline noise test for single channel of FEE

连接 RICH 原型探测器时的基线噪声，连接 RICH 原型探测器后单个通道基线噪声的 RMS 小于 3.8 ADC 道值，ENC 约为 0.12 fC。连接探测器后噪声变大的原因为：RICH 原型探测器输出电容等的引入使得 FEE 的 ENC 略大于不连接 RICH 原型探测器时的 ENC，但此结果仍满足 RICH 原型探测器对测试电子学系统的要求。

2.2 线性测试

在与基线噪声测试相同的条件下，对 FEE 进行了输入-输出线性测试，单通道 FEE 输入-输出线性测试结果如图 3 所示，通过对测试结果的线性拟合可看出，单通道 FEE 具有良好的输入-输出线性。

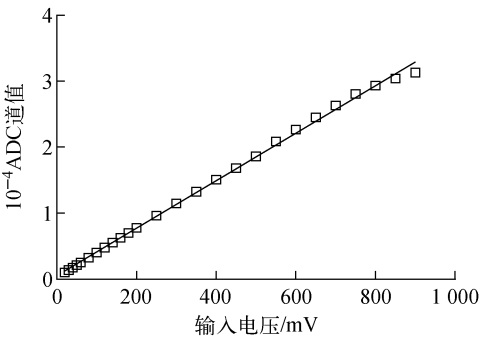


图 3 单通道 FEE 输入-输出线性测试结果

Fig. 3 Input-output linear test result for single channel of FEE

256 通道单块 FEE 的输入-输出线性测试结果如图 4 所示，可看出，单块 FEE 各通道输入-输出线性一致性良好，线性拟合后 256 通道单块 FEE 的曲线斜率服从高斯分布(图 5)。

采用传输线延时法对不同成形时间下电子学的时间分辨进行测量，结果如图 6 所示，可看出，在不同成形时间下，当输入电荷量大于 35 fC时，电子学的时间分辨好于 1 ns。

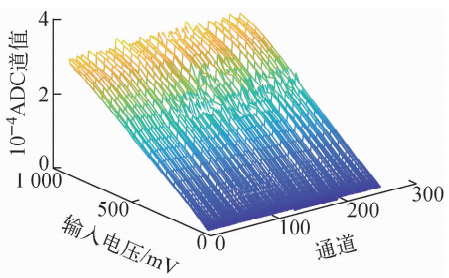


图 4 256 通道单块 FEE 的输入-输出线性测试结果

Fig. 4 Input-output linear test result for 256 channels of FEE

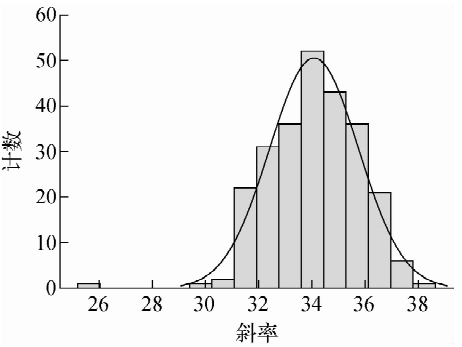


图 5 单块 FEE 256 通道输入-输出斜率分布

Fig. 5 Input-output slope distribution for 256 channels of FEE

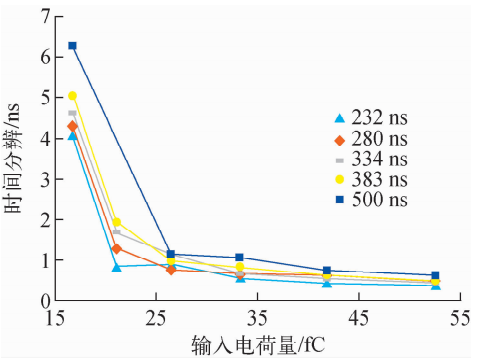


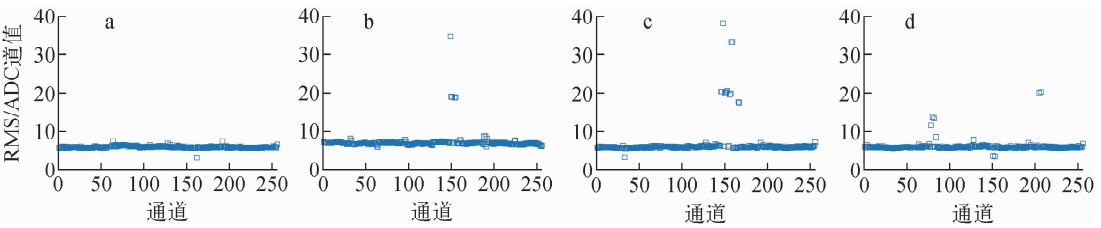
图 6 不同成形时间下电子学的时间分辨

Fig. 6 Electronics time resolution at different shaping time

3 高能电子束流测试

为验证 RICH 原型探测器系统的功能及性能，课题组在德国电子同步辐射装置(DESY)[16]上进行了为期 1 个月的束流实验。使用配备有电子学的 RICH 原型探测器样机进行束流测试，束流测试要求最高事例率为 100 Hz，若 FEE 采用全读出模式，每个 FEE 共有 256 路读出，每路 512 个采样点。采用 12 bit ADC 对每个采样点进行量化，每个样值前加入 4 bit 对应的芯片号，每个通道的数据组成 1 帧，帧头和帧尾共 192 bit，数据传输采用 8b/10b 编码方式，则 4 块 FEE 汇总至 DCM 后的数据率为 4.292 Gbps。由于 DCM 与 PC 之间采用千兆

以太网传输,目前 RICH 原型探测器测试电子学系统的 DCM 与 PC 之间数据的上限传输速率约为 650 Mbps[17]。该上限传输速率小于 4 块 FEE 总的数据率,为了实现高事例率的数据读出,必须采用每个读出通道阈值压缩的方式进行数据传输,使压缩后总的数据率小于 650 Mbps。因此,测试开始前,需在束流环境下对每块 FEE 的基线噪声进行测试,测试结果如图 7所示,束流环境下各 FEE 基线噪声的 RMS 约为 10 ADC 道值,即 ENC 约为0.3 fC,仅个别通道的基线噪声(最大约 38 ADC 道值,ENC 约 1.1 fC)偏高,分析其原因可能是束流现场的干扰所致,但对实验结果的影响可忽略。按平均每个事例击中 10 个阳极读出像素单元计算,采用每通道阈值压缩后的数据率为 41.92 Mbps,远小于 DCM 与 PC 之间的上限传输速率,从而保证了电子学系统在束流测试时能稳定可靠地运行。



a——2 号板;b——5 号板;c——7 号板;d——10 号板

图 7　束流现场各 FEE 基线噪声测试结果

Fig. 7　Each FEE's baseline noise test result on beam test-site

图 8 为一次束流实验 RICH 原型探测器记录多个事例(约 30 000 个)的切伦科夫辐射光信号(图 8 上部分弧形区域)和幅度较大的电离信号(图 8 下部分圆形区域)的击中位置。图 9 为 RICH 原型探测器单光电子信号的电荷量分布,可看出,电荷量分布的平均值为1 366 ADC 道值,对应的电荷量约为40 fC。该电荷分布对应 RICH 原型探测器对单光电子信号的增益约为 2×10^5,在此增益下,系统的时间分辨好于 0.8 ns。

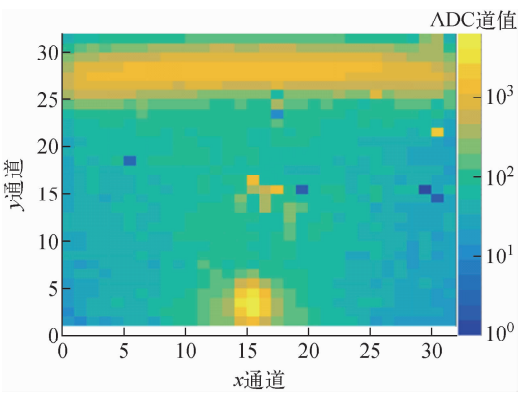


图 8　RICH 原型探测器多个事例击中位置

Fig. 8　Hit map for RICH prototype detector

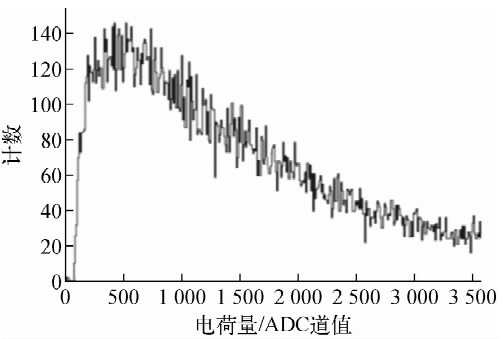


图 9　RICH 原型探测器单光电子信号的电荷量分布

Fig. 9　Charge distribution of single photoelectron for RICH prototype detector

4　结论

针对 RICH 原型探测器的研究需求,构建了一套集成 1 024 通道的高集成度、低噪声的测试电子学系统。测试结果表明,该测试电子学系统的 ENC 小于 0.3 fC,且具有良好的输入-输出线性,各通道一致性较好。通过单通道阈值压缩的方式,保证了在事例率不超过 100 Hz 时,系统能稳定地将数据传输至 PC 端,满足了 RICH 原型探测器数据读出的需求。此测试电子学系统已用于探测器原型的束流实验,成功测到了单光电子信号。

参考文献：

[1] 汪晓莲，李澄，邵明，等. 粒子探测技术[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2015.

[2] SHIBATA T A. Ring imaging Cherenkov counter of HERMES for pion, kaon, proton and antiproton identification[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2014, 766: 267-269.

[3] BARNYAKOV A Y, BARNYAKOV M Y, BOBOROVNIKOV V S, et al. Particle identification system for the Super Charm-Tau Factory at Novosibirsk[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2020, 958: 162352.

[4] DÜREN M, ALI A, BELIAS A, et al. Particle identification with DIRCs at PANDA[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2020, 958: 162114.

[5] ALEXEEV M, BIRSA R, BRADAMANTE F, et al. Status of the development of large area photon detectors based on THGEMs and hybrid MPGD architectures for Cherenkov imaging applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 824: 139-142.

[6] 朱金涛，刘国福，杨云，等. 带电粒子鉴别方法的发展与现状[J]. 核电子学与探测技术，2014，34(2)：194-199.
ZHU Jintao, LIU Guofu, YANG Yun, et al. Development of charged particle identification methods[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(2): 194-199(in Chinese).

[7] CHEN E, ZHAO L, YU L, et al. Test system of the front-end readout for an application-specific integrated circuit for the water Cherenkov detector array at the large high-altitude air shower observatory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, 28(6): 53-62.

[8] 胡守扬，蹇司玉，周静，等. 基于 APV25 芯片的 GEM 探测器读出电子学系统的测试与改进[J]. 原子能科学技术，2014，48(6)：1 143-1 146.
HU Shouyang, JIAN Siyu, ZHOU Jing, et al. Test and improvement of readout system based on APV25 chip for GEM detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(6): 1 143-1 146(in Chinese).

[9] 李兴隆，胡守扬，周静，等. 微结构气体探测器多通道高速读出系统研制[J]. 原子能科学技术，2018，52(10)：1 867-1 873.
LI Xinglong, HU Shouyang, ZHOU Jing, et al. Development of multi-channel high speed readout system for MPGD[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(10): 1 867-1 873(in Chinese).

[10] MAXIMOV D A. Concept of data storage prototype for Super-C-Tau Factory detector[J]. JINST, 2017, 12: C09012.

[11] ZHAO X, LIU F, DENG Z, et al. GERO: A general SCA-based readout ASIC for micro-pattern gas detectors with configurable storage depth and on-chip digitizer[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(9): 131-138.

[12] ANVAR S, BARON P, BLANK B, et al. AGET, the GET front-end ASIC, for the readout of the time projection chambers used in nuclear physic experiments[C]// Proceedings of Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. Valencia: [s. n.], 2011.

[13] 田静，刘树彬，郑其斌，等. 基于 AGET 芯片的 MPGD 探测器前端电子学设计[J]. 核电子学与探测技术，2016，36(4)：430-434.
TIAN Jing, LIU Shubin, ZHENG Qibin, et al. A front-end design of readout electronics for MPGD based on AGET[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(4): 430-434 (in Chinese).

[14] 董家宁. PandaX-Ⅲ实验前端读出电子学方法研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2017.

[15] LI C, FENG C Q, ZHU D Y, et al. An optical fiber-based flexible readout system for micro-pattern gas detectors[J]. JINST, 2018, 13: P04013.

[16] DIENER R, DREYLING-ESCHWEILER J, EHRLICHMANN H, et al. The DESY Ⅱ test beam facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2019, 922: 265-286.

[17] 李诚. PandaX-Ⅲ实验读出电子学系统研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2018.