生物燃料乙醇产业发展新模式

一、前言

按照我国《可再生能源法》的定义，生物质能是指利用自然界的植物、粪便及城乡有机废物转化成的能源。生物燃料则是生物质能的载体，泛指由生物质组成或经加工得到的固体、液体或气体燃料。

燃料乙醇是目前世界上应用最广泛的可再生能源，也是我国重点培育和发展的战略性新兴产业之一，符合我国能源供给侧结构性改革和能源发展战略的方向。生物燃料乙醇是联通农业、能源和环保的国家战略性新兴产业，在保障国家粮食安全、解决能源危机和环境治理等方面将发挥更大的作用。一方面，燃料乙醇作为传统石化能源的替代品之一，有助于进一步优化我国能源结构，降低石油对外依赖度，保证能源安全；另一方面，生物燃料乙醇是粮食生产的“推进器”和粮食安全的“调节阀”，通过生物燃料乙醇的生产和加工，有助于稳定粮食生产，是解决“问题粮食”的唯一现实途径，可以有效促进农业健康发展。同时，燃料乙醇还是一种清洁能源，是汽油最环保的增氧剂和辛烷值促进剂，能够有效减少温室气体和PM2.5排放，对于改善大气环境质量有着积极作用。

目前美国和巴西燃料乙醇的生产及消费在全球居于领先地位，主要得益于稳定且廉价的原料供应和可再生能源的激励政策。以美国为例，2019年美国共计生产了4.717×10^7 t乙醇，替代了从5亿桶原油中提炼的汽油，创造了320亿美元的收入，支持了6.8万个直接工作岗位和28万个间接工作岗位。十多年来，我国生物燃料乙醇产业累计生产量超过1.98×10^7t，调合汽油近2×10^8 t，改善了现有的能源消费结构，间接减少原油进口量达3.2×10^8 t；消化人畜不能食用的玉米、水稻、小麦等粮食作物1.43×10^7t，副产1.24×10^7t高蛋白饲料；累计减排CO_2当量2.52×10^7 t，减少汽车尾气有害物质排放，替代甲基叔丁基醚（MTBE）使用，保护了地下水资源。在拉动农业、保护环境、替代能源三大战略方面初见成效，社会、经济和生态效益显著。

近年来，一系列国家层面的扶持和推广政策陆续出台，推动了我国燃料乙醇产业的发展步伐。2016年，国家能源局发布《生物质能发展“十三五”规划》，提出加快生物液体燃料的示范和推广，尤其是推进燃料乙醇的应用。2017年，我国确定加快发展燃料乙醇的策略，15个国家部委联合印发《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用生物乙醇汽油的实施方案》，大力推广燃料乙醇的使用；之后，又确定了《全国生物燃料乙醇产业总体布局方案》。2018年我国燃料乙醇装置产能新增近1×10^6t，总量达到3.7×10^6 t，2020年在全国范围推广后，燃料乙醇年需求量将超过1×10^7t，而燃料乙醇市场至少有7×10^6t的缺口。

我国燃料乙醇产业即将迎来广阔的发展空间和重大的发展机遇。尽管生物燃料乙醇产业已基本形成了从生产、混配、储运到销售的完整产业体系，但整体发展与美国仍有很大差距。在国家推进工业化与信息化深度融合的背景下，利用我国工业互联网和第五代移动通信（5G）技术优势，以大数据、数字孪生和区块链等新技术为支撑，结合先进信息管理系统，探讨未来生物燃料乙醇工厂的智能化、安全化发展新模式，对于我国燃料乙醇产业高质量发展具有重要价值。

二、生物燃料乙醇产业发展现状

燃料乙醇产业是国家重点推广的新型产业，是基于石油危机和控制大气污染所产生的新兴绿色产业之一，目前我国生物燃料乙醇主要生产方式分为粮食乙醇和纤维素乙醇。使用生物发酵法制乙醇在我国主要经历了3个发展阶段：1代燃料乙醇以玉米、小麦等陈粮为原料，通过生物发酵将淀粉转化为乙醇；1.5代燃料乙醇以非粮农作物（木薯）为原料，同样通过发酵将淀粉转化为乙醇，虽然此路线可避免与人争粮的问题，但目前该原料主要依赖于进口；2代燃料乙醇主要是纤维素乙醇，优势在于原料充足，但由于我国的纤维素乙醇关键技术还没有实现突破，所以成本与粮食乙醇相比偏高。整体来看，我国燃料乙醇生产水平处于从1代向1.5代过渡的阶段，2代纤维素乙醇将是未来生物燃料乙醇的主流路线。

2018年，全球约有2000家燃料乙醇工厂处于运行状态，燃料乙醇年产量达到8.5×10^7 t，同比增长5.28%。国际能源署（IEA）于2018年10月发布了《2018年可再生能源：2018—2023年市场分析和预测》，认为可再生能源市场将继续扩张，远期可占全球能源消费增长量的40%；生物燃料产量将增长15%，到2023年达到1.65

×1011L（约1.3×10^8
t）。根据美国可再生燃料协会（RFA）公布的数据，美国作为燃料乙醇的主要生产国，2018年燃料乙醇产量达到4.796×10^7
t，占全球总产量的56%；巴西
是乙醇全球第二大生产国，2018年乙醇产量达到2.365×10^7
t，约占全球总产量的28%；欧盟1993年生物燃料
乙醇产量仅为4.8×10^4t，经过十余年发展，于2004年达到4.2×10^5
t，随后开始大幅增长并于2006年达到1.2×10^6t，2018年达到4.27×10^6
t（见表1）。无论是起步时间还是增长速度，欧盟生物燃料乙醇产业均不能和美国、巴西等生物燃料乙醇大国相比，但具备了较为牢固的生物燃料乙醇产业基础。世界上多数国家均已发布推广应用的相关法律或政策，燃料乙醇产业前景可期。

表12014—2018年世界燃料乙醇产量$\times10^4$t

国家/地区	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
美国	4274	4422	4578	4759	4796
巴西	1849	2118	2179	2108	2365
欧盟	432	414	411	423	427
中国	190	243	252	261	314
加拿大	152	130	130	134	143
泰国	93	100	96	118	116
阿根廷	48	63	79	93	99
印度	46	63	67	84	87
其他	258	117	146	139	164
合计	7342	7670	7938	8119	8511

能源情报

数据来源：美国可再生燃料协会（RFA）。

提升生产效率一直是燃料乙醇关键技术的研发核心。这将使生产企业在多方面受益：一是提高现有装置产能，提升设备利用率和各操作单元的转化效率；二是优化产品结构，通过分级利用实现产品价值的最大化；三是节约能源及水的消耗；四是降低“三废”排放；五是降低新增产能的投资成本和现有装置的生产成本，提升装置整体效益。未来的装置工艺过程将会更加简洁、绿色，设备更加稳定可靠，使产品在全生命周期内的碳排放及净能量、污染物排放方面有更大的提升。合成生物学和分子生物学作为先进生物技术的发展方向，将在未来燃料乙醇产业发展中起到重要作用，包括基因育种、高效酶制剂、酵母等在内的多项生物技术正在全面进入燃料乙醇产业链。

国家非粮生物质能源工程技术研究中心利用合成生物学技术构建得到乙醇耐受性加强的工程菌YM-27，与原始酿酒酵母相比，在12%乙醇胁迫条件下，生长量提升至1.97倍。该菌株在木薯乙醇生产中运用，可克服浓醪发酵中后期酵母菌受高浓度乙醇抑制而导致发酵活力不足的问题。将乙醇耐受性、渗透压耐受性提高的酵母应用于浓醪发酵，原料可快速糖化，发酵后无残糖剩余，乙醇终浓度接近20%（v/v）。采用发酵－渗透汽化耦合技术原位分离乙醇可以减小产物抑制作用、提高单位体积产率。应用生物技术使我国的燃料乙醇产业逐渐实现产品质量的提高与生产成本的降低，但由于我国现阶段生产燃料乙醇的主要原料仍为玉米等粮食作物，生产成本相对较高，与美国和巴西存在较大差距。此外，相对煤制乙醇等其他燃料乙醇生产途径，生物燃料乙醇的生产成本处于劣势。

近年来，我国生物燃料乙醇生产线逐步实现了自动化，通过“机器代人”显著提升了生产效率，同时降低了生产过程的人力劳动成本。然而，生产线的信息化和智能化程度依然偏低，难以通过感知、获取、分析生产线的全要素信息以进一步优化生产线资源配置和生产力；同时企业决策层难以及时了解和掌握生产现场的实际情况，导致管理难度大、成本高。为保证生物燃料乙醇产业安全高效生产和提升未来核心竞争力，相关企业亟需通过新技术手段进行资源整合、优化生产过程，以提高自身产能、降低生产成本，由此走出一条高质量发展路线。

此外，化工行业生产过程具有危险性大、连续性强、规模大、生产工艺复杂等特点，安全生产始终是化工行业的第一基本准则。根据2018年全国化工事故分析报告统计，2018年全国范围内共发生化工事故176起、死亡223人；其中中毒和窒息事故32起、化学爆炸26起。化工企业目前仍缺乏有效的生产过程智能管控平台，企业存在监测盲点多的安全隐患，化工生产安全、环境安全仍是众多化工企业的痛点问题。生物燃料乙醇产业是集生物、化工、能源产业于一体的复合型产业，安全生产同样是企业长远发展面临的重要挑战。

三、生物燃料乙醇产业未来发展的新模式

2019年7月，《流程型智能制造白皮书》正式发布，在智能制造这一新的背景和机遇下，流程型制造业在设备运维和资产管理模式、生产模式、运营模式、商业模式等方面都将发生显著变化。为了保证企业安全高效生产、提升未来核心竞争力，寻找生物燃料乙醇产业发展的新模式迫在眉睫。

利用智能控制、工业大数据、5G网络等先进信息化技术保证生物燃料乙醇企业的安全高效生产，这是寻找生物燃料乙醇产业发展新模式的主要方向。我国先后出台《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》《智能制造发展规划（2016—2020年）》《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》等政策文件，为智能制造发展提供了有力的政策支持，标志着信息化与工业化深度融合成为我国发展的新战略[10,11]。5G商用进程快速推进，将提供10倍于4G网络的连接速率，网络延迟降低至1ms。5G网络的灵活便捷将直接促进各行各业的数字化转型，并为智能化发展提供关键的网络基础设施。工业大数据是制造强国建设技术路线图中的重要突破点，以数据为核心构建智能化体系有望成为支撑智能制造和工业互联网的核心动力。

（一）基于发酵过程大数据的智能生产新模式

近年来，与工业大数据相关的国家政策加快了信息化与工业的深度融合，创新实现产业新模式。2018年，中国信息通信研究院发布的《中国大数据发展调查报告（2018年）》显示，2016—2018年中国工业大数据市场规模稳步增长，预计2018—2020年增速将保持在30%以上。生物发酵过程具有原料来源多样且不确定、发酵过程机理复杂、过程变量维数众多且交互影响复杂、设备单元特征各不相同等特点。同时，生物发酵过程保存了海量的历史生产数据，这些数据蕴含着生产过程丰富的特征信息。

生物燃料乙醇作为生物发酵的典型过程，未来生产过程的新模式可基于生产线的历史运行数据，构建工艺知识图谱，利用大数据分析和深度学习来实现生产过程的建模与动态调度（见图1）：①针对生物燃料乙醇生产过程原料来源不确定性造成的全局单一模型难以精确描述生产过程的难点，通过基于层次聚类算法的生产条件宏观模态判别技术以及对应的海量历史数据分割技术，结合不同类别样本构建对应类别的仿真模型，为生物燃料乙醇生产过程的智能化控制提供可靠样本数据；②针对目前生物燃料乙醇生产线发酵和分离等关键工艺过程机理认识不清的现状，对模型关键参数、结构等进行优化校正和自适应选择，通过开展大数据的信息挖掘来弥补机理认知的不足，实现发酵和分离等生物燃料乙醇生产线关键工艺过程的精确仿真；同时通过大数据整合的关键工艺过程性能指标在线计算模型，进行关键性能指标精确计算，用于指导生产过程的全局优化，实现生物燃料乙醇生产过程的智能化控制。基于工业大数据，结合先进控制、工艺优化等技术，使生产过程中的物料趋于平衡，显著提高生产效率、节约能源消耗，构成了生物燃料乙醇生产的新模式。

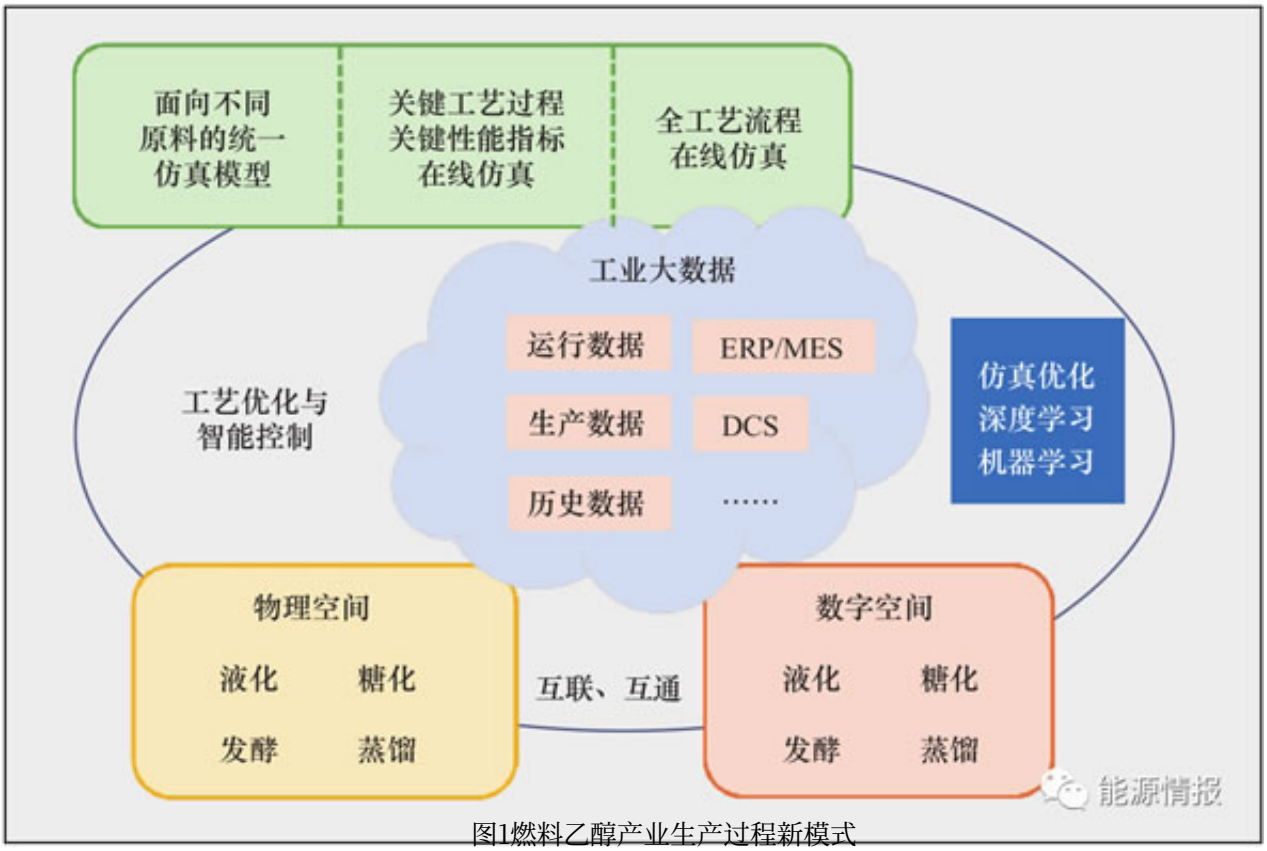

图1燃料乙醇产业生产过程新模式

注：ERP为企业资源计划；MES为制造执行系统；DCS为集散控制系统。

（二）基于数字孪生技术的安全生产新模式

生物燃料乙醇行业的生产设备需要长时间不停机运行，传统的被动诊断与维护技术因其严重的滞后效应和低自适应性而难以有效预示事故现象。升级传统的诊断与维护技术，使其具备主动和自适应的状态评估能力，这是保障设备安全运行、提升作业质量、减少经济损失和避免人员伤亡的有效方式。数字孪生、远程运维、故障诊断等技术构成了燃料乙醇产业设备运维新模式的关键技术（见图2）。

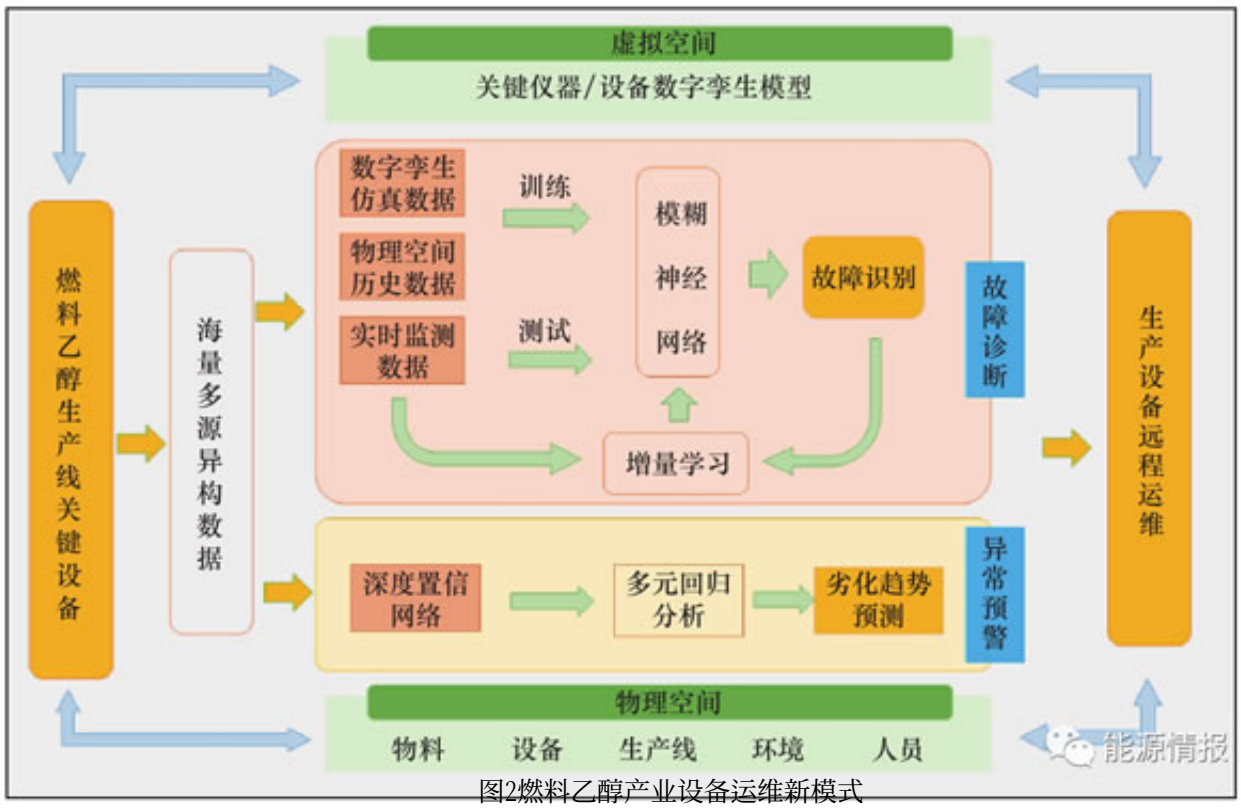

图2燃料乙醇产业设备运维新模式

数字孪生的应用场景涵盖制造、建筑、医疗、城市规划等，相关技术正在深刻地改变制造业：美国国家航空航天局（NASA）在月球车、战斗机、新型发动机等高端产业研发与制造方面成功应用了数字孪生技术；国内科大讯飞股份有限公司发布了建设数字孪生城市计划；在北京新机场建设过程中，通过对建筑物龙骨、管网等进行孪生，提升建造效率的同时降低了5%~10%的建造成本，缩短了10%的建造工期。构建生物燃料乙醇生产线数字孪生系统，建立涵盖多空间尺度和多时间尺度的数字孪生对象模型，可以实现设备远程在线监测能力；结合增强现实（AR）技术，将设备数据实时传送至故障诊断专家，直接指导现场工作人员开展设备维修操作，显著节约人工成本。此外，数字孪生系统提供三维沉浸式智能巡检、工艺流程培训、操作培训、安环监控等功能，成为解决大范围厂区、高危区域、恶劣天气下的人工巡检、产线管理等难题的潜在手段。

预测性维护是建立在现代数字信号处理、人工智能等先进技术基础上的一种新型设备维护方式，包括对燃料乙醇生产线装备进行实时监测和故障报警，对设备运行数据实行远程分析和综合管理，赋予燃料乙醇生产线完善的自检和自诊断能力。整合传感器检测、信号处理和大数据分析技术，对生物燃料乙醇生产线的关键设备特征进行动态观测和数据分析，具备实时监测和诊断能力，提早发现问题并及时部署维护方案，确保设备正常运转，将运行风险系数降到最低。通过燃料乙醇产业设备运维的模式转变，提高设备运维的效率和准确性，保证相关企业的安全生产。

（三）基于工业互联网和区块链技术的能源产业管理新模式

在国家政策的推动下，生物燃料乙醇产业发展迅速，但也面临着一些挑战，比如如何使国家政策更加高效地落地，如何避免定价机制转换带来的影响等。无论是在行业层面，还是在企业层面，对生物燃料乙醇市场实施精益管理（及全数字化管理）都是非常必要的：生产总量需要控制，上下游各环节需要协作，避免市场失控，既要消化多余的粮食又要确保粮食储备处于安全线之上。因此，采用工业互联网和区块链技术打造燃料乙醇产业新管理模式，有助于生物燃料乙醇产业实施精益管理，为国家政策全方位执行、高质量推进提供保障。

2017年以来，我国工业互联网产业蓬勃发展，传统制造企业、工业软件企业、工业设备供应商、信息通信企业均开展了工业互联网平台的建设。构建产业的互联网平台有助于打通上下游信息、整合数据，进而提升企业的管理效率[18,19]。工业互联网是第四次工业革命的关键支撑，5G是新一代信息通信技术升级的重要方向，二者的融合发展将推动我国制造业转型升级，支撑制造强国和网络强国建设。目前“5G+工业互联网”的研究与建设还处于起步阶段，在生物燃料乙醇产业的应用方面亟待突破，发展空间广阔。基于生物燃料乙醇企业发展需求和行业政策，以“5G+工业互联网”为手段，对企业进行工业互联网内网设计、建设和管理运维，将分布于各地的生产企业连接起来，通过平台进行生产数据、工业模型、业务服务的积累，通过工业应用程序（APP）进行工业知识、经验的传递和复制，从而实

现数据共享和产业链信息集成。由此提升生产企业的管理水平，探索燃料乙醇产业可持续发展的商业管理模式，支持企业转型、跨企业价值链延伸、全行业生态构建与配置优化。

区块链技术作为新一代信息技术，是继蒸汽机、电力、互联网之后的颠覆性创新，将为新一轮技术创新和产业变革带来新机遇。采用区块链技术有助于解决能源行业“三难”问题：一是优化能源流程降低成本；二是提高供应的安全性；三是提供更多的可再生能源和低碳解决方案。相关资料显示，目前能源行业采用区块链技术的主要是电力企业和石油石化企业。区块链模式在供应链金融平台和产品溯源平台等方面的应用探索，可作为生物燃料乙醇行业商业模式创新的重要突破口。通过商业模式的转变，推动企业转型升级，优化业务实施模式，提高管理效率并降低交易成本，从而促进燃料乙醇产业的转型。

四、对策建议

（一）关键技术攻关

《国家可再生能源中长期发展规划》明确提出，从长远考虑，要积极发展以纤维素类生物质为原料的生物燃料技术。目前2代纤维素乙醇发展的瓶颈问题在于缺乏先进、高效、廉价的酶和工业菌种，核心技术尚缺乏竞争力和抗风险能力，尤其受制于纤维原料综合利用水平差、技术集成度低等因素。针对纤维素乙醇技术存在的技术瓶颈和市场需求，亟需有效整合不同学科和特定技术领域，重点攻克秸秆预处理、糖平台、生物转化、生化分离、生物炼制和副产物联产等制约纤维醇类产业化发展的关键技术，将相关技术组合形成一套完整的技术体系。在整体突破的基础上，将解决方案整合集成为紧密衔接的完整工艺包，进行产业化示范和推广，由此保障我国油品质量升级和替代，以期带来可观的经济、社会和环境效益。

在近期，建议将纤维素乙醇作为发展切入点，推行互利共赢的理念，与现有生产装置（1代或1.5代）进行深度整合，依托其公用工程来实现资源的最大化利用，从而降低纤维素乙醇工厂的整体投资和运行成本。这是目前行业先行者认可和推崇的新模式，预期具有可观的综合效益。

（二）政策保障

加强顶层设计，从国家战略层面引导产业发展，加快制定培育生物燃料产业智能化发展的专项纲领性文件。加强组织管理，尽快建立国家生物液体燃料推广和研发工作协调机制，成立国家生物液体燃料工作领导小组，统筹生物燃料乙醇生产和车用乙醇汽油推广使用工作。健全生物燃料乙醇产业标准体系。

地方政府在国家战略明确的基础上，开展体制机制改革试点，积极促进产业新形态形成。针对现有产业规模企业、基地和集群，出台相关政策，对产业智能化升级和建设给予必要扶持，加强对相关企业政策优惠支持。鼓励人才、技术、资金向优势区域集中，引导生物燃料乙醇产业基地特色化、联合化、智能化发展，有步骤、有重点地培育若干世界级生物液体燃料产业集群，在有条件的地区开展生物液体燃料新技术和新模式示范。

企业层面注重创新生产模式和生产技术，加强与科研机构合作，坚持自主研发与引进吸收并举、基础研究与商业化应用结合的原则，建立完善以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。加强创新平台建设，增强自主研究能力，集中力量突破关键共性技术，探索适合国情的先进生物燃料技术路线。积极配合国家政策导向，提升市场竞争力，提高企业内部工作效率，支撑生物燃料乙醇产业的高质量发展。（文/王梦 田晓俊 陈必强 林海龙 岳国君,北京化工大学生命科学与技术学院 国投生物科技投资有限公司）

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/news/157593.html