

引用格式: 吴明霞, 安仲勋. 超级电容器行业规范标准建设及未来发展[J]. 标准科学, 2025(9):100-108.

WU Mingxia, AN Zhongxun. Development of Industry Standards and Future Prospects for Supercapacitors [J]. Standard Science, 2025(9):100-108.

超级电容器行业规范标准建设及未来发展

吴明霞 安仲勋

(上海奥威科技开发有限公司)

摘要: 【目的】超级电容器作为高效储能器件,在新能源、轨道交通等领域应用广泛,但其行业的标准建设滞后于技术发展,制约了产业协同与国际竞争力提升。系统梳理国内外超级电容器行业标准现状,针对技术路线多元化、标准体系差异显著等核心问题展开研究。【方法】全面梳理了国内外超级电容器的技术路线、标准规范,分析其现状和差异,结合双电层电容器、赝电容器、混合型电容器等不同技术路线的特性,揭示当前标准体系存在的三大矛盾:技术路线与标准适配性不足、国内外标准兼容性薄弱、标准体系不完善。【结果】基于此,提出分层级标准建设框架,以技术创新为核心,通过“分层递进”标准体系、产业链协同及政策支持,实现国产化替代与国际协同发展,提升中国在全球产业链中的主导地位。【结论】研究结论为行业政策制定、企业技术攻关提供系统性参考,强调标准建设需与技术创新动态协同,以推动超级电容器产业的规范化与国际化发展。

关键词: 超级电容器; 标准体系; 产业链

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.09.013

Development of Industry Standards and Future Prospects for Supercapacitors

WU Mingxia AN Zhongxun

(Shanghai Aowei Technology Development Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] Supercapacitors, as efficient energy storage devices, are widely used in fields such as renewable energy and rail transportation. However, the development of industry standards lags behind technological development, which restricts industrial collaboration and the enhancement of international competitiveness. This paper aims to systematically sort out the current status of industry standards for supercapacitors both domestically and internationally, and conduct research on core issues such as the diversification of technological routes and significant differences in standards systems. [Methods] This paper comprehensively reviews the technological routes and standards for supercapacitors both domestically and internationally, and analyzes their current status and differences. By considering the characteristics of various technological routes such as double-layer capacitors, pseudocapacitors, and hybrid capacitors, it reveals three major contradictions existing in the current standards system: insufficient compatibility between

基金项目: 本文受上海市高价值专利升级培育项目资助。

作者简介: 吴明霞, 博士, 高级工程师, 研究方向为快充储能器件的产品开发及标准、知识产权等。

安仲勋, 博士, 高级工程师, 研究方向为快充储能器件的产品开发及知识产权。

technological routes and standards, weak compatibility between domestic and international standards, and an incomplete standards system. [Results] Based on this, a hierarchical standard construction framework is proposed, which centers on technological innovation. Through a “layered progression” standards system, industrial chain collaboration, and policy support, the goal is to achieve domestic substitution and international collaborative development, thereby enhancing China’s dominant position in the global industrial chain. [Conclusion] The research provide systematic reference for industry policy formulation and technological breakthroughs by enterprises, emphasizing that standard development should dynamically collaborate with technological innovation to promote the standardization and international development of the supercapacitor industry.

Keywords: supercapacitor; standards system; supply chain

0 引言

环境污染、能源短缺等诸多问题已成为制约经济、社会可持续发展、影响城市化进程的重要因素,发展环保、绿色的新能源日益受到各方关注。随着经济的发展,人们对能源的需求日益增多,由此产生的环境污染问题也越来越严峻。有关资料显示,截至2024年,我国的机动车保有量达到4.53亿辆,其中汽车保有量为3.53亿辆^[1]。在排放方面,移动源已成为大气污染物排放的重要来源。具体来说,全国大气污染物的排放总量中,氮氧化物和挥发性有机物分别占了60%和24%左右,而机动车、非道路移动机械、船舶、铁路内燃机车等移动源的排放量已超过900万吨^[2]。能源短缺与环境污染问题成为限制我国经济、社会可持续发展的巨大障碍。因此,大力发展环保型新能源汽车和储能产业,将很大程度地缓解我国目前面临的环境和能源危机。

近几年来,各部委、各省市地方政府出台了很很多促进和鼓励新能源产业的政策,促进了我国新能源汽车产业的快速发展。新能源产业的迅猛发展使我国成为世界上最大的新能源汽车增量市场,同时也使储能技术成为当今许多国家在推进碳中和目标进程中所采用的关键技术之一。2024年,新增装机容量达到69 GW/169 GWh,以GWh计的同比增速达到76%。

常见的新能源汽车及其储能器件的动力电源主要有锂离子电池^[3-4]、燃料电池、钠离子电池及超级电容器等。其中,超级电容器因其特有的快速充放电能力、超长循环寿命等优点,成为各高校、

研究院所及企业的研究热点^[5]。超级电容器,也称为电化学电容器,是一种介于传统电容器和电池之间的新型储能装置。其基本原理是利用电极和电解质之间的界面双电层来存储能量。超级电容器具有高功率密度、快速充放电、长循环寿命和宽工作温度范围等显著特点。其在需要快速能量释放和高效能量回收的应用场景中表现出色。在电动汽车中,超级电容器用于提供瞬间高功率输出,支持加速和制动能量回收;在智能电网中,超级电容器用于平衡电力负荷和提供备用电源;在消费电子产品中,超级电容器用于延长电池寿命和提供瞬时高功率支持。此外,超级电容器还在工业设备、航空航天和军事装备等领域发挥着重要作用^[6]。

然而,市场的快速发展也带来了标准不统一、产品质量参差不齐等问题,亟须通过标准化建设来规范行业发展。

1 国内外超级电容器标准规范分类

1.1 超级电容器技术简介及分类

超级电容器(Supercapacitors, 又称电化学电容器)作为高效储能器件,在新能源、电动汽车、智能电网等领域应用广泛。它是一种电化学储能器件,至少有一个电极主要是通过电极/电解液界面形成的双电层电容或电极表面快速氧化还原反应形成的赝电容实现储能。在恒流充电或放电过程中,时间与电压曲线通常近似于直线。

根据储能机制,超级电容器可以分为双电层电容器、赝电容器和混合电容器^[7],如图1所示。双

电层电容器主要由活性炭等碳材料组成。碳、石墨烯和碳纳米管作为电极材料,没有氧化还原反应。目前广泛应用于风力发电机、交通运输、能量回收、消费、电子及电源波动抑制。赝电容器主要使用金属氧化物和导电聚合物作为电极材料,由于赝电容器的阻抗性能和循环稳定性较差,成本也比较高,至今尚未实现商业化应用。混合超级电容器主要包括锂离子电容器、电池型电容器等。目前混合型超级电容器已广泛应用于大容量储能场景,如公交、轨交、一次电力频率调节、二次电力频率调节、新能源船舶、特种设备等。

超级电容器目前已经广泛应用于电动车辆和混合动力汽车,用于能量回收系统和提供瞬时动力。在可再生能源系统(如风能和太阳能)中,超级电容器可用于平衡能量输出。在电力电子设备中,可以用于平滑电源波动,提高功率因数。在船用领域也展示了较广的应用前景,优势在于可以快速充放电、循环寿命可达百万次。总体而言,超级电容器在现代储能技术中占有重要地位,尤其是在需要快速响应和高功率输出的应用场景中,它们展现出了巨大潜力。在未来,随着技术的进步和材料的开发,超级电容器的性能和船用领域应用范围有望进一步提升。表1对比了主要用于商业推广

的双电层电容器、混合型超级电容器和锂离子电池的性能差异。

1.2 超级电容器国内外标准现状

目前,超级电容器行业在国内外已建立部分标准,但整体仍处于发展阶段,尚未形成完整的标准体系。

目前该行业的国际标准主要由IEC(国际电工委员会)主导,部分由IEEE(电气电子工程师学会)制定,涉及的标准详情如表2所示。

国内标准体系包括国家标准(GB)、行业标准(如能源、电子)、团体标准(T)、地方标准(DB)等,超级电容器领域目前国内的相关国家标准和行业标准如表3所示。

除了国家标准和行业标准,中国超级电容器行业还有一些团体标准,主要由行业协会和产业联盟制定,涵盖了多个应用领域和技术规范。以下是一些重要的团体标准:

(1) 电梯与港口设备应用标准

《电梯用超级电容器及其能量回收系统技术规范》针对电梯领域的超级电容器应用,规范了能量回收系统的技术要求,旨在提升节能效果。

《港口起重设备用超级电容器及其能量回收系统技术规范》适用于港口起重设备的超级电容

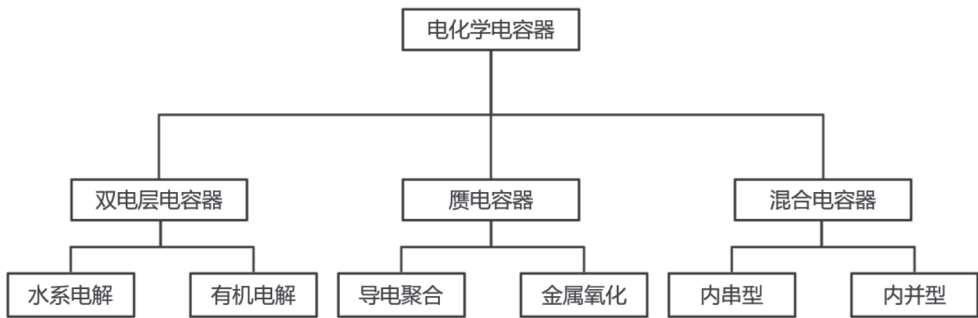


图1 电化学电容器的分类

表1 不同储能器件性能的比较			
储能器件	能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	功率密度/(W·kg ⁻¹)	循环寿命
双电层电容器	3~20	5000~50 000	5×10 ⁵ ~5×10 ⁶
混合型超级电容器	20~150	3000~30 000	5×10 ⁴ ~5×10 ⁵
锂离子电池	100~250	<10 ³	<10 ⁴

表2 超级电容器领域的国际标准

序号	标准类型	标准编号	标准名称	标准内容
1	IEC标准	IEC 62391-1:2015	固定电子设备用电容器 第1部分：通用规范	涵盖超级电容器的基本定义、测试方法等，主要针对双电层电容器
2		IEC 62391-1:2022	固定电动和电子设备用双层电容器 第1部分：通用规格	针对双电层电容器建立了标准术语、检查程序和测试方法
3		IEC 62391-2:2015	固定电子设备用电容器 第2部分：双电层电容器分规范	专门针对双电层电容器（EDLC）的性能测试、寿命评估等
4		IEC 62576:2009	混合动力电动汽车用超级电容器测试方法	适用于车用超级电容器的性能与安全测试，针对双电层电容器
5	IEEE标准	IEEE 1888.4-2014	泛在绿色社区控制网络协议标准：存储网络与管理	能源存储系统的网络通信和管理，为储能设备（如电池、超级电容器等）提供标准化的数据交互和控制协议，不仅限于超级电容器
6	美国安全检测实验室	UL 810A	关于超级电容器的安全标准	超级电容器的安全认证标准

表3 超级电容器领域的国内标准

序号	标准类型	主管部门	标准编号	标准名称	标准内容
1	推荐性国家标准	中国电器工业协会	GB/T 34870.1—2017	超级电容器 第1部分：总则	涵盖超级电容器的基本定义、测试方法等，主要针对双电层电容器
2		国家标准化管理委员会	GB/T 43545—2023	危险货物检验安全规范 超级电容器	主要包括超级电容器的运输危险性分类规则、分类要求和检验规则，并描述了对应的检测方法
3		中国钢铁工业协会	GB/T 37386—2019	超级电容器用活性炭	包括超级电容器用活性炭的术语和定义、分类和代号、技术要求、试验方法、检测规则、包装、标志、储存和运输等方面的规定
4	轻工推荐性行业标准	工业和信息化部	QB/T 4900—2024	超级电容器纸	规定了超级电容器纸的技术指标和外观等要求，描述了相应的试验方法
5	机械推荐性行业标准	工业和信息化部	JB/T 14908—2024	超级电容器供电式钢卷运输车	针对超级电容器供电的钢卷运输车提出了具体的技术要求和测试方法，旨在确保此类车辆在运行过程中的安全性和可靠性
6	电子推荐性行业标准	工业和信息化部	SJ/T 11861—2024	超级电容器术语	规定了超级电容器（又称电化学电容器）的术语和定义
7		工业和信息化部	SJ/T 11895—2023	节能电梯用双电层超级电容器规范	规范节能电梯领域中双电层超级电容器的技术要求、测试方法、安全要求、检验规则以及包装、运输和贮存等方面的要求
8		工业和信息化部	SJ/T 11894—2023	船用超级电容器总规范	规定了用于船舶的超级电容器的技术要求、试验方法和检验规则
9		工业和信息化部	SJ/T 11892—2023	赝电容超级电容器总规范	规定了赝电容超级电容器的要求，检验规则，标志，包装、运输和储存，描述了对应的检验方法，界定了术语和定义以及符号

续表3

10		工业和信息化部	QC/T 741—2014	车用超级电容器	规定了电动道路车辆用超级电容器的要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和储存
11		工业和信息化部	SJ/T 11626—2016	超级电容器用充电器通用规范	规定了超级电容器用充电器的技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装、贮存和运输要求，适用于为超级电容器提供充电功能的设备，涵盖工业、交通、储能等领域
12		工业和信息化部	SJ/T 11625—2016	超级电容器分类及型号命名方法	规定了超级电容器的分类及型号命名方法。适用于以下类型：双电层电容器、赝电容器、混合型电容器、由上述单体组成的超级电容器组
13		工业和信息化部	SJ/T 11582—2016	动力型超级电容器电性能测试方法	适用于动力型超级电容器单体的电性能测试，包括静电容量、储能能量、直流/交流内阻、电压保持能力、高低温性能、循环寿命等核心指标
14		工业和信息化部	SJ/T 11732—2018	超级电容器用有机电解液规范	规定了超级电容器用有机电解液(以下简称"电解液")的要求、试验方法、检验规则、包装、运输、标志和储存
15	煤炭推荐性行业标准	国家矿山安全监察局	MT/T 1194—2020	矿用一般型超级电容器电机车	规定了矿用一般型超级电容器电机车、电源装置及充电机的术语、定义、技术要求、试验方法、检验规则等
16	能源推荐性行业标准	国家能源局	NB/T 31149—2018	风力发电机组变桨系统用超级电容器技术规范	主要规定了风力发电机组变桨系统用超级电容器的技术要求、试验方法、检验规则等
17	电力推荐性行业标准	国家能源局	DL/T 1652—2016	电能计量设备用超级电容器技术规范	规定了电能计量设备用超级电容器的技术要求、试验方法、检验规则、包装、运输和存储的要求
18		国家能源局	DL/T 2080—2020	电力储能用超级电容器	规定了电力储能用超级电容器的规格、技术要求和检验规则等内容
19		国家能源局	DL/T 2081—2020	电力储能用超级电容器试验规程	规定了电力储能用超级电容器的基本规定、试验准备和试验方法等内容

器系统，推动其在重型机械中的绿色能源应用。

(2) 微能量供电与光伏遥控器标准

《超级电容—微能量供电遥控器技术规范》规定了微能量供电遥控器中超级电容器的技术要求和测试方法。

(3) 其他相关团体标准

《超级电容器分类及型号命名方法》由中电标协超级电容器标准工作组制定，规范了超级电容器的分类和命名规则。

《超级电容器用充电器通用规范》适用于超

级电容器充电器的技术要求，包括输入电压、安全性能等。

《节能电梯用双层超级电容器总规范》针对电梯节能应用，规定了超级电容器的性能和安全标准。

这些团体标准由中国电子工业标准化技术协会超级电容与“双碳”专业委员会和超级电容产业联盟等机构推动，旨在促进超级电容器在新能源、轨道交通、工业设备等领域的标准化应用，是国家标准及行业标准的有力补充。

2 国内外超级电容器标准对比及发展趋势

2.1 国内外标准体系建设对比

对国内外整理的超级电容器标准相关数据进行对比分析可以发现,和国外相比,国内超级电容器行业的标准建设更为完善,标准体系涵盖了超级电容器原材料、超级电容器单体和模块(包含双电层超级电容器、赝电容超级电容器和混合型超级电容器)、超级电容器应用等各方面。而国外的标准则主要集中在双电层超级电容器技术领域。

图2对比了国内外超级电容器行业标准数量,可以看出国内标准(含国家标准和行业标准)数量总数远超过国际标准数量。图3梳理了国内超级电容器不同行业标准的占比情况,可以看出,电子行业的标准占比过半,达56.25%,其次为能源和电力行业,占比为25%。这也间接说明目前超级电容器在电子行业及电力行业的应用最为广泛。

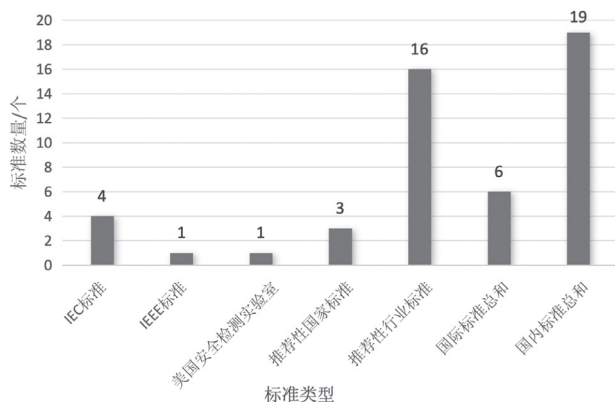


图2 国内外超级电容器行业的标准数量对比

进一步分析不同技术路线的超级电容器标准情况,可以大体分为原材料、单体技术和系统应用等板块,国际标准的分析情况如图4所示,国内标准的分析情况如图5所示。可以看出,目前国际标准主要涉及双电层超级电容器单体技术及应用,而在其他类型的超级电容器方面尚未制定,也没有针对超级电容器原材料的相关标准。而中国标准则相对更加全面,标准体系更加完善,三大技术路

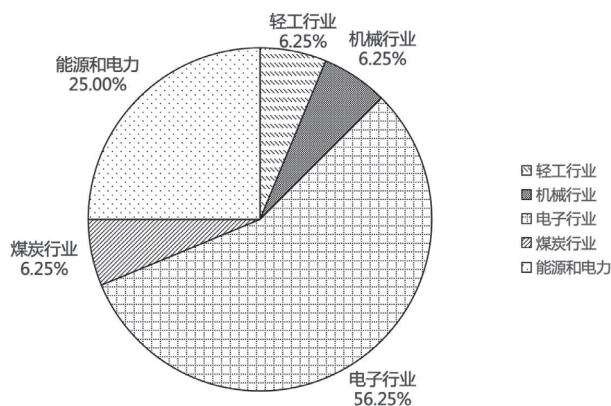


图3 国内超级电容器不同行业标准的占比对比

线(双电层电容器、赝电容器、混合型电容器)均有所布局,囊括了原材料、单体技术和系统应用等多方面。正如前文所提,其中赝电容器由于缺少商业化应用,因此其应用标准目前尚未制定。

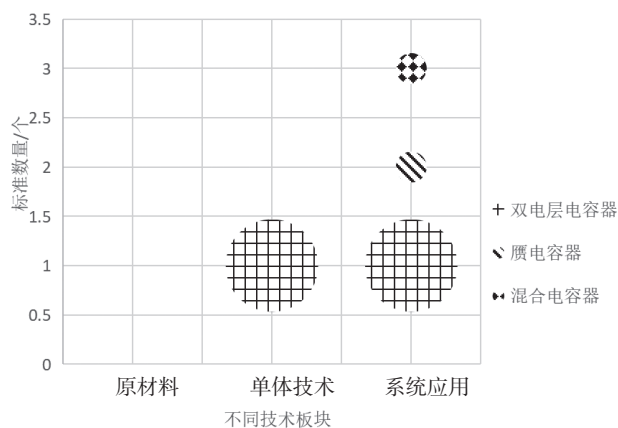


图4 国际标准在超级电容器不同技术板块的分布情况

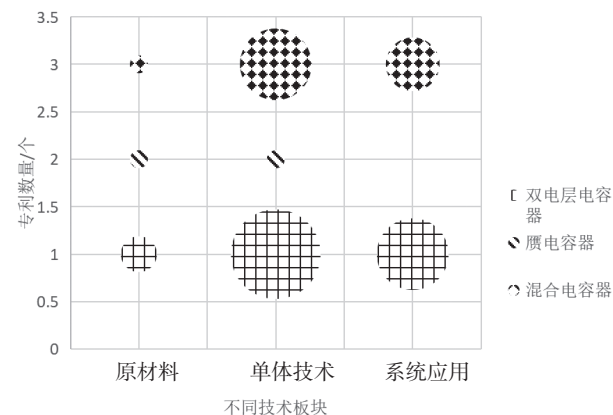


图5 中国标准在超级电容器不同技术板块的分布情况

2.2 未来发展趋势

目前,超级电容器行业标准的国内外发展趋势在宏观层面呈现差异化特征,主要体现在技术研发方向、政策驱动重点、应用领域拓展等方面。

(1) 技术研发方向

国内主要聚焦核心材料突破与规模化应用^[8]。目前国内超级电容器技术研发以提升能量密度、功率密度及循环寿命为核心目标,重点突破电极材料和电解液的关键性能指标。例如,国内企业上海奥威科技开发公司、烯晶碳能电子科技无锡有限公司等已实现能量型超级电容器技术指标处于全球前列。因此,未来必然会出现更多涉及创新材料体系以及兼顾高能量、高功率和长寿命的超级电容器产品及应用的标准。而国外的研究更注重可持续材料开发与废物资源化利用^[9]。

(2) 政策驱动重点

目前,中国通过《基础电子元器件产业发展行动计划》等政策明确支持超级电容器国产化,并成立“超级电容与‘双碳’专业委员会”,发布一系列团体标准,推动其在轨道交通、新能源电网等领域的规范化应用。市场定位上,国内企业依托新能源产业爆发式增长,聚焦新能源汽车辅助动力源、储能调频等场景。欧美、日、韩以市场需求驱动技术迭代,国际标准化更侧重于传统的双电层超级电容器技术与现有能源系统的兼容性。

未来,国内将通过团体标准先行,加速行业整合。比如通过行业协会主导制定细分领域标准,强化产业链协同创新,推动龙头企业技术优势转化为标准话语权。同时,依托“双碳”目标,标准制定倾向于绿色能源场景,如微电网储能、风光电调频等。而国外则通过国际协同与专利布局主导标准建设,国际标准化组织(如IEC)主导构建跨区域技术标准,并通过专利壁垒巩固技术领先地位。

(3) 应用领域拓展

国内发展趋势是新能源与工业场景为主,超级电容器作为辅助动力源广泛应用于轨道交通(如制动能量回收)、新能源汽车(如启停系统)、电力系统调频等领域,并逐步向主动力源过渡。国际的

应用更趋多元化,涵盖消费电子(如太阳能手表、笔记本电脑)、航空航天(机载储能系统)及高附加值工业领域(如精密运动控制)。

总体而言,国内外超级电容器行业标准发展的核心差异在于:国内以政策驱动和规模化应用为引擎,技术标准与“双碳”目标深度绑定;国外则依托材料创新与全球化市场整合,标准体系更强调技术兼容性与环境可持续性。未来,随着中国在核心材料和混合型电容器技术的突破,以及国际协同标准的推进,行业将呈现“区域特色显著、共性标准趋同”的双轨发展格局。

3 下一步工作措施

当前超级电容器行业标准建设呈现“国内团体标准先行,国际协同化推进”的双轨特征。我国超级电容产业标准体系日益完善,国家标准、行业标准和团体标准已经涵盖超级电容器基础标准、关键材料、器件、相关仪器设备、生产和工艺控制、包装、储存和运输及综合应用等方面,涉及方向包括材料、器件(单体、模块、系统)、应用、仪器设备、运输、安全等。而国际标准则主要聚焦于双电层超级电容器技术,技术路线比较单一。国内外标准在技术指标和应用场景覆盖上仍存在差异,制约了产业链全球化协作。

对本行业未来的标准工作提出以下工作措施:

(1) 超级电容器行业技术处于快速发展的阶段,存在技术驱动标准升级的需求,新型电极材料、电解液技术、陶瓷隔膜等新技术的突破将大大提升超级电容器产品的性能^[10],因此标准体系需要及时纳入量化性能指标。未来进一步强化核心材料与技术的标准化攻关,量化材料性能,通过标准体系的迭代助推国产材料替代。

(2) 构建“分层递进、技术-应用-战略”的标准体系。图6为未来超级电容器标准工作的体系框架设想。在基础层,进一步完善材料、器件级标准;在应用层,针对新能源汽车、智能电网等场景,制定细分领域技术规范;在国际协同层,积极参与

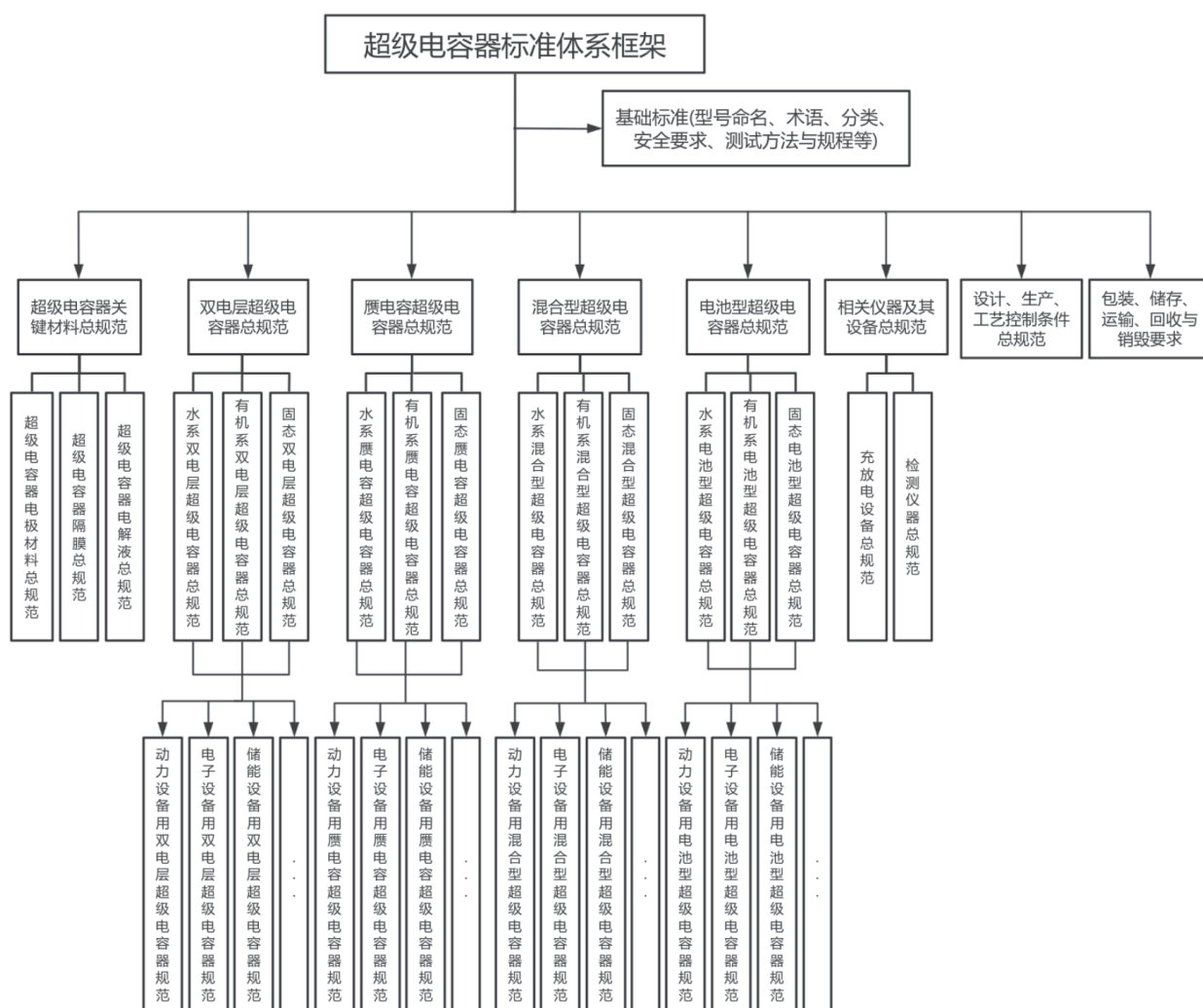


图6 超级电容器标准体系框架

IEC标准修订,推动国内团体标准与国际接轨。

(3) 推动产业链协同创新与专利布局。通过产业链整合促进上下游企业技术协同,降低核心材料成本。鼓励国内企业申请创新材料等领域的国际专利,提前布局,打破技术垄断。

(4) 政策引导与市场机制结合。通过税收优惠、研发补贴支持超级电容器在新能源领域的应用;建立“绿色技术认证”体系,优先采购符合高效能、低排放标准的产品,推动行业优胜劣汰;培育新兴应用场景与国际化合作,参与国际合作平台,如参与全球超级电容器产业联盟,联合研发高能量密度技术,共同制定标准,提升国际话语权。

超级电容器行业标准建设需以技术突破为基

石,通过“材料-器件-应用”全链条标准化,实现国产化替代与国际化协同。行业可加速实现从“辅助动力源”向“主动力源”的转型,助力全球能源结构绿色化与智能化升级。

4 结语

本文通过多维视角剖析超级电容器行业标准建设的现状与挑战,对国内外的标准建设进行研究,基于超级电容器的不同技术体系和技术板块的标准分析,揭示了技术迭代与标准滞后之间的结构性矛盾。研究表明,超级电容器行业标准的国内外发展趋势在宏观层面呈现技术研发方向、政

策驱动重点、应用领域拓展等方面的差异化特征,构建“技术-应用-战略”三级标准框架,不仅能缓解当前标准分散化、区域化问题,还可为下一代技术研发提供方向锚点。然而,标准体系的完善需产业链上下游协同:材料供应商需参与测试方法优化,设备制造商应推动工艺标准化,而政策层面则需建立动态修订机制以响应技术变革。未来研究

可进一步探讨标准实施中的企业合规成本、国际标准互认的博弈策略等实操性问题。超级电容器行业的规范化进程不仅是技术整合的必然要求,更是全球能源转型背景下中国抢占产业话语权的战略抓手。唯有通过标准先行、创新驱动、生态共建,方能在新一轮产业竞争中实现从“跟跑”到“领跑”的跨越。

参考文献

- [1] 中华人民共和国公安部. 全国机动车保有量达4.53亿 辆 驾驶人达5.42亿人[N]. 人民公安报, 2025-01-15(3).
- [2] 生态环境部生态环境执法局. 关于进一步优化机动车环境监管的意见答记者问[EB/OL]. (2025-03-22) [2025-12-01]. http://www.gulang.gov.cn/zfxgk/fdzdgknr/zcjd/202503/t20250322_1234567.html.
- [3] LIBICH J, MACA J, VONDRAK J, et al. Supercapacitors: Properties and applications [J]. *Energy Storage*, 2018, 17: 224-227.
- [4] LIN Z, GOIKOLEA E, BALDUCCI A, et al. Materials for supercapacitors: When Li-Ion battery power is not enough[J]. *Materials Today*, 2018, 21(4):419-436.
- [5] WU M, ZHANG C, YANG C, et al. Over-heating triggered thermal runaway characteristic of lithium-ion hybrid supercapacitor based lithium nickel cobalt manganate oxide/activated carbon cathode and hard carbon anode[J]. *Solid State Ionics*, 2022, 377: 115883.
- [6] RAUT K, SHENDGE A, CHAUDHARI J, et al. Modeling and simulation of photovoltaic powered battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82(3):1.1-1.19.
- [7] 荆葛,阮殿波.电化学电容器正名[J].*储能科学与技术*, 2020, 9(4):1009-1014.
- [8] 陈英放,李媛媛,邓梅根.超级电容器的原理及应用[J].*电子元件与材料*, 2008(4):6-9.
- [9] 肖婉彤,雷西萍,赵新晨,等.凝胶聚合物电解质在超级电容器中的研究现状与发展趋势[J].*复合材料学报*, 2025, 42(7):3705-3721.
- [10] RUTHES J G A, DELLER A E, PAMETÉ E, et al. Hydrogel-based flexible energy storage using electrodes based on polypyrrole and carbon threads [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, 10(27): 2300373.