DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.219 **中图分类号**：U231+.8 **文献标志码**：A

城轨混合储能系统控制策略综述与展望

韩 悦(中国电源学会学生会员)，李佳静(中国电源学会会员)，乔 宇，王佳兴
(石家庄铁道大学电气与电子工程学院河北省交通电力网智能融合技术与装备协同创新中心，石家庄 050043)

摘要：随着城市轨道交通建设速度的不断加快，再生制动能量利用率低等问题日益凸显。储能系统是解决城轨再生能量利用问题的有效方式之一。对储能系统的合理控制可以提高城轨系统稳定性，加快储能系统响应速度。针对城轨交通混合储能系统，首先，对车载式和地面式储能系统的安全性、灵活性、传输损耗、节能效率等特性进行分析；其次，结合储能介质特点分别归纳电池、飞轮、超级电容和混合储能 4 种用于车载式和地面式的主要储能方式；然后，在此基础上，从控制方式和研究应用现状等多个角度阐述和分析 5 种混合储能系统的控制策略。最后，对城轨混合储能系统的控制策略关键技术进行总结，展望未来发展方向。

关键词：城市轨道交通；混合储能；再生制动能量；控制策略

Review and Prospect of Control Strategies for Urban Rail Hybrid Energy Storage Systems

HAN Yue, *Student Member, CPSS* , LI Jiajing, *Member*, *CPSS*, QIAO Yu, WANG Jiaxing
(Hebei Provincial Collaborative Innovation Center of Transportation Power Grid Intelligent Integration Technology and Equipment, School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: With the rapid construction of urban rail transit, the problems such as the low utilization rate of regenerative braking energy have become increasingly prominent. The energy storage system is one of the effective ways to solve the utilization problem of regenerative energy in urban rail, and its reasonable control can accelerate its response speed and improve the stability of urban transit systems. First, aimed at the hybrid energy storage systems of urban rail transit, the characteristics of vehicle-mounted and ground-mounted energy storage systems including their safety, flexibility, transmission loss and energy saving efficiency are analyzed. Second, with the combination of the characteristics of energy storage media, four main energy storage approaches (i.e., battery, flywheel, supercapacitor and hybrid energy storage) for the vehicle-mounted and ground-mounted energy storage systems are summarized separately. On this basis, five control strategies for hybrid energy storage systems are elaborated and analyzed from multiple perspectives, such as their control modes and application statuses. Finally, the key technologies of control strategies for urban rail hybrid energy storage systems are summed up, and the development direction in the future is also projected.

Keywords: Urban rail transit; hybrid energy storage; regenerative braking energy; control strategy

收稿日期：2023-12-19；**修回日期**：2024-01-08；**录用日期**：2024-01-18；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：河北省引进留学人员资助项目(C20230362)；河北省石家庄铁道大学研究生创新基金资助项目(YC2023025)
This work is supported by the Foundation of Hebei Province for the Returned Overseas Chinese Scholars under the grant C20230362; the Innovation Fund of Postgraduate Shijiazhuang Tiedao University under the grant YC2023025

近年来，随着我国城市轨道交通不断发展，运营线路长度也不断增长，截至 2025 年底，中国大陆地区(不含港澳台)共开通城市轨道交通运营路线 382 条，运营里程达 13 067.8 km[1]。在享受城轨交通带来便利的同时，再生制动能量如何高效利用也是亟待解决的重要问题。

目前，节能降耗是我国工业发展的基本原则，

针对再生制动能量高效利用的问题，不仅需要对牵引供电系统进行改进，还需要储能装置满足更高的性能要求。相较于电阻能耗型和逆变回馈型，能量储存型装置结构简单、能耗小，易安装，不需要将能量回馈给电网，效率更高[2]。随着储能技术的快速发展，能量储存型再生制动能量回收技术越来越受到重视[3-4]。根据安装位置不同，城轨交通系统常用的储能方式分为车载式和地面式。车载式储能是根据列车的运行状况进行充放电控制，以最短回路实现牵引供电与制动回收；地面式储能系统具有安装位置灵活、车辆损耗小、不占用车内安装空间等特点，同时方便对其进行检修与维护[5]。常见单一储能装置包括电池、飞轮和超级电容。针对城轨交通系统启动制动频繁、载客量大、速度快等特点，为了满足节能环保等需求，提出了混合储能装置。混合储能装置不仅结合单一储能系统响应快、能量密度高和功率密度高的优势，还具备经济性优势，解决了某一储能元件单独应用的不足[5]。储能控制是根据母线电压或其他参考量对储能装置进行充放电控制，大多数城轨交通储能系统采用电压、电流双闭环控制，随着对储能控制的研究愈加深入，国内外学者逐渐提出一些改进型控制策略。较之单一储能控制，混合储能控制策略还需解决各储能元件之间的功率分配问题。

针对以上情况，本文首先总体分析了车载式和地面式储能系统特性；其次，分别归纳了车载式和地面式的 4 种储能方式；最后，对目前已知混合储能系统的控制策略进行了详细阐述和总结，并对混合储能系统的控制策略进行了展望。

1 车载式和地面式储能系统特性

在城市轨道交通系统中，储能系统一般包括储能元件和电力电子变换装置。当列车运行或制动时，通过 DC-DC 变换器控制系统充放电实现储能系统与直流母线间的能量流动，根据安装的位置可分为车载式和地面式[6]。

1.1 车载式储能系统特性

车载式储能系统的安装位置通常在列车内部，包括车顶、车底等位置，可根据列车运行状态做出快速响应，由于车载储能设备不直接与直流牵引网相连，因此储能元件吸收和释放能量时损耗较低，能量的回收利用率高。但其造价较高，车载储能设备需要占据车辆空间，增加列车自身质量，对现有车辆进行改装也具有一定的难度，同时车载储能设备应具有较高的安全性，当储能设备发生故障时不能影响列车的正常安全运行[6]。车载式储能系统如图 1 所示。当列车制动时，车辆产生的再生制动能量可以快速且直接地储存在安装在该车辆上的车载式储能装置中，储能元件可以吸收制动能量；当列车启动或者加速时，直流牵引网母线电压降低，车载储能装置可以对列车释放之前储存的能量，释放的能量包括满足列车运行所需的能量和承载储能装置的牵引能量，保持列车运行稳定。

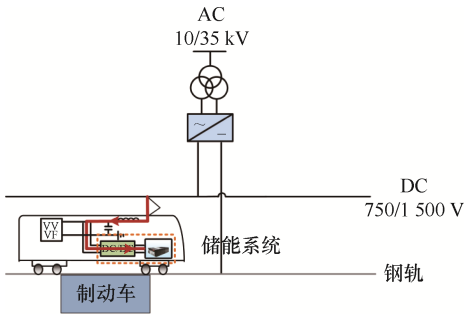


图 1 车载式储能系统

Fig. 1 Vehicle-mounted energy storage system

1.2 地面式储能系统特性

地面式储能系统通常被安装在牵引变电站等车辆之外的固定位置上，同时可以针对再生制动能量分布集中的区段进行选择性安装，更好地与整体运行线路配合。与车载式相比，地面式储能不受能量和空间的限制，可以配置更多的储能容量，更具有灵活性。当能量流过牵引网时，牵引网阻抗会产生能量损耗，且受接触网网压的限制，会存在一定的局限性。地面式储能系统如图 2 所示，列车制动时，牵引网电压升高，列车产生的制动能量通过变流器经直流牵引网传输，存储在储能装置中；列车牵引时，再次经过直流牵引网，通过变流器给列车供给能量，使得列车运行平稳。

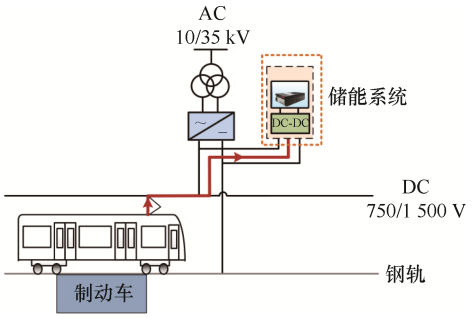


图 2　地面式储能系统

Fig. 2 Ground-mounted energy storage system

2　4 种储能方式

目前，用于城市轨道交通的储能技术主要有电池储能、飞轮储能和超级电容储能。随着技术的不断进步，单一储能元件系统难以满足大功率、大能量等需求，越来越多的学者希望将单一储能方式的优势结合，从而提出将储能特性互补的 2 种储能元件进行组合的混合储能系统。

2.1　电池储能

随着生产技术越来越成熟，蓄电池储能成为目前应用最为广泛的能量储存方式[7]。电池储能是指通过物理或化学等方法实现对电能的储存，并在需要时进行释放。电池储能凭借安装位置便捷、能量密度高和生产价格较低等优势，在车载式和地面式上均得到了较好的发展。

2007 年 12 月，法国尼斯引进了一批装有车载镍氢蓄电池组的 Citadis302 有轨电车，实现了部分无网式供电。2014 年，国内的中车南京浦镇车辆有限公司将安装三元锂电池的有轨电车应用在了南京的河西线与麒麟线。与车载式电池储能相比，地面式电池储能方式发展较为成熟。目前，日本多条轨道交通线路安装了电池储能系统，包含湖西线、名古屋铁路、鹿儿岛谷山线等；韩国首尔地铁 9 号线等线路应用了电池储能系统；意大利的部分线路也安装了地面式电池储能系统。

然而，蓄电池的使用寿命一般只有 5 年[8]，并且其充电时间过长，长时间使用会导致功率密度逐渐下降，且电池更换频繁，限制了蓄电池的发展。从环保角度考虑，废蓄电池处理不好易对环境和人体造成一定伤害。

2.2　飞轮储能

飞轮储能主要有充电、放电、能量保持 3 种工作模式。飞轮的主要工作原理是电能和机械能之间的相互转化。充电模式时，飞轮的转速增加，电能转化为机械能储存；放电模式时，飞轮转速降低，机械能转化为电能回馈到牵引网。

飞轮储能在轨道交通中的实际应用案例较少，大多处于试验阶段。盾石磁能科技有限公司研发的 400 kW 飞轮系统安装在由庞巴迪生产的车辆上，并在金士顿环形轨道上进行测试，这是为数不多的车载式飞轮储能技术的应用。由于飞轮的质量和体积较大，对车载式的安装会造成一定影响，因此英国伦敦地铁、美国洛杉矶地铁和纽约地铁远洛克威线均引入了地面式飞轮储能系统。2019 年，国内首次于北京地铁房山线安装了 1 套地面式飞轮储能系统，开展了示范应用[9]。

飞轮储能装置内部结构比较复杂、控制困难，飞轮储能系统造价昂贵，且自放电率高，因此为保证高速旋转的安全性，对安装条件提出了一定的要求，制约了其发展与应用。

2.3　超级电容储能

与飞轮储能装置相比，超级电容器应用广泛，它是将电能以电荷形式进行储存的 1 种储能器件。国外对超级电容储能的研究较早。2011 年，由西班牙 CAF 公司生产的快速充电系统 ACR(Acumulador de Carga Rápida)安装在 Urbos 型有轨电车上，该系统首次应用在西班牙萨拉戈萨市轻轨 1 号线。在国内，车载超级电容系统主要安装应用在武汉、沈阳、深圳等地的有轨电车上。相较于车载系统，地面式对列车牵引能量的消耗较少。日本西武线、韩国大同江变电所和法国里昂地铁等均引入了地面式超级电容储能系统。国内研发的首套地铁超级电容储能系统于 2016 年在北京地铁八通线成功试

运行，后续在青岛地铁 3 号线、北京地铁 8 号线、无锡地铁等线路得到应用。

超级电容储能作为 1 种功率密度高、充放电速度快的储能装置，具有耐温性能好、维护费用低、环境友好等优点[10]。但是超级电容器也存在着电压不平衡、能量密度较低等技术难题。

2.4 混合储能

混合储能系统多应用于微电网、风电、光伏新能源发电并网、电动汽车等领域，常见的混合储能方式由电池与超级电容组成，将 2 个单一储能元件结合，采用高效的功率分配方式，最大限度地利用储能装置。电池的高能量密度特点可以降低变电所输出的峰值功率，且在供电系统故障时可作为备用电源使列车自行牵引至就近站台；超级电容的高功率密度特点匹配列车制动时的功率特性，能够有效吸收列车制动时的瞬时功率，避免列车再生制动失效。

在交通领域，混合储能系统研究主要集中在电动汽车和有轨电车上。西班牙 CAF 公司生产的 Urbos3 型有轨电车在中国台湾的高雄捷运采用蓄电池与超级电容混合的供电技术。西门子将 Sitras HES 技术应用于 CombinoPlus 有轨电车上。2018 年，由中车四方机车车辆股份有限公司生产的混合储能式有轨电车已经在青海德令哈线上投入运营。

近几年来，城轨列车发展十分迅速，美国费城地区铁路应用的锂电池/超级电容混合储能系统用于回收制动能量。在国内，北京交通大学电气工程学院杨中平&林飞实验室[11]利用电池/超级电容混合储能系统高能量密度和高功率密度的特点，提出了混合储能系统容量配置方法和控制策略，并基于“十三五”国家重点研发计划项目研发了 MW 级钛酸锂电池/超级电容混合储能系统样机，并且已成功在北京地铁八通线路中进行日间挂网运行，节能效果得到了提升。

为了清晰地展现 4 种储能方式，从能量密度、功率密度、响应时间、成本及它们的优缺点等方面对其进行了对比分析与总结，见表 1。根据上述分析可知，电池储能的能量密度高，但其功率密度低、充电时间过长且寿命短。飞轮储能的能量密度和功率密度均较高，但昂贵的造价制约了其发展与应用。超级电容储能的功率密度高，但存在着电压不平衡、能量密度较低等问题。而混合储能方式结合了高能量密度和高功率密度的优点，在全寿命周期情况下也相对降低了总费用，但由于系统涉及多种储能方式，因此会使技术成本偏高，多种能量之间转换产生损耗。

表 1 4 种储能方式优缺点对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of advantages and disadvantages of four energy storage approaches

储能方式	使用寿命	效率/%	能量密度/($Wh\cdot kg^{-1}$)	功率密度/($W\cdot kg^{-1}$)	响应时间	成本	优点	缺点
电池储能	几千次	约 85	30~200	200~700	较慢	低	安装位置便捷，能量密度高，生产价格较低	充电时间长，化学反应时间慢，充放电循环寿命低
飞轮储能	50~60 万次	约 90	40~70	300~10 000	较快	高	寿命长，免维护，可以快速、深度充放电	结构复杂，工作时损耗大，造价昂贵
超级电容储能	40~50 万次	约 95	5~20	500~18 000	快	较高	功率密度高，充放电速度快，转换效率高，耐温性好	电压不平衡，能量密度较低
混合储能(电池/超级电容)	40~50 万次	约 95	30~200(电池)	500~18 000(超级电容)	快	较低	高能量密度和高功率密度，全寿命周期情况下的总费用也相对降低	技术成本较高，能量转换有损耗，存在安全风险

3　混合储能系统的控制策略

城市轨道交通 4 种储能方式各有特点，为了集合电池、超级电容、飞轮储能等单一储能装置的优点，研究者们研究、发展了混合储能系统。其中的关键技术是混合储能系统的控制策略，主要混合储能系统的控制策略如图 3 所示。目前，在城市轨道交通领域对混合储能系统控制策略的研究相对较少，城市轨道交通领域的应用和发展还有很多可以研究和探索的空间。

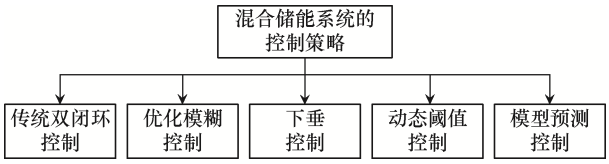


图 3　混合储能系统的控制策略

Fig. 3 Control strategies for hybrid energy storage system

3.1　传统双闭环控制

传统双闭环控制是利用直流网的电压比例积分 PI(proportional integral)控制外环和电流 PI 控制内环，通过控制储能元件所连接的 DC-DC 变换器的工作模式，实现对混合储能系统的控制与功率之间的合理分配。电压外环电流内环双 PI 控制策略框图如图 4 所示。

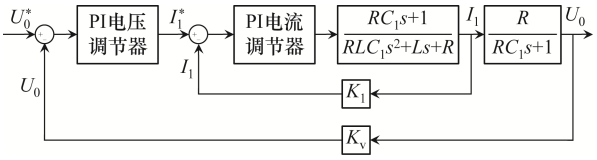


图 4　电压外环电流内环双 PI 控制策略框图

Fig. 4 Block diagram of dual-PI control strategy for voltage outer-loop and current inner-loop

当含有混合储能系统的城轨列车处于制动状态时，仅采用传统双闭环控制往往会出现网压超调的问题。针对这一问题，通常考虑改进双闭环控制，李逢兵等[12]对超级电容控制部分进行了调整，使得网压平稳。陈亚爱等[13]对电压外环部分的变增益比例进行调整，提高了系统动态响应能力，同时对传统滤波分配法进行改进，避免混合储能系统内部功率循环，进一步实现对整体系统的优化。

当混合储能系统采用传统双闭环控制时，其控制核心部分为功率分配模块和电压外环、电流内环的协调控制模块，如何将 2 种储能系统的功率分配及利用得更加合理就是需要改进的地方。功率分配时储能系统之间能量交互和混合储能系统整体对网压均有影响，若想解决这类问题，在传统双闭环控制的基础上，首先要对各个储能系统功率进行多次分配，采用各个储能系统相互控制；其次结合不同工况，得出多组动态功率参数值；最后对整体功率进行再次分配，达到稳压和功率高效利用的效果。

在采用传统双闭环控制的基础上，结合多种列车运行工况的情况越来越受到关注。杨丰萍等[14]通过对列车的实时运行速度进行监测进而判断列车的运行工况，有效抑制了牵引网压的跌落与抬升。李志强等[15]在不同运行工况下，通过建立网压与系统运行功率的关系，实现动态功率回馈。但对双闭环控制没有改进会带来储能系统本身电压不均衡等问题。

3.2　优化模糊控制

在传统双闭环控制的基础上建立模糊集合与模糊规则，利用模糊逻辑控制算法动态调整储能系统充放电部分的阈值，使混合储能系统达到有效的协调控制，优化混合储能系统的运行。模糊控制充放电控制策略原理如图 5 所示。

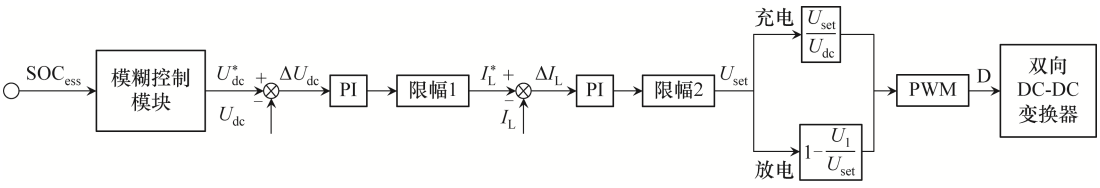


图 5　模糊控制充放电控制策略原理

Fig. 5 Schematic of fuzzy control charging and discharging control strategy

不同于传统双闭环控制，模糊控制系统的鲁棒性强，尤其适用于时变系统的设计，因此更加适用于储能部分的实时动态调整。根据这一特征，朱志莹等[16]针对飞轮储能系统在转速和负载变化下的稳定控制问题，提出了基于模糊 PID 控制的开关磁阻飞轮储能充放电控制策略；Zhang 等[17]设计了 1 种基于模糊逻辑的监控控制器，实时监测超级电容器功率，提高再生制动能量利用率。列车运行时的负载变化和空载电压的变化也会影响储能系统的节能效果，考虑到这两点，Liu 等[18]基于模糊控制提出了自适应调整策略。模糊规则可以根据经验设置，但是模糊规则最优化不能只是凭借经验。显然，王晓侃等[19]注意到了这一点，使用最小模糊度法和加权系数联合确定隶属度函数，提高了模糊规则的精度。尽管如此，相较其他方法，模糊控制需寻找更好的算法确定隶属度函数，增加系统整体的稳定性。

3.3 下垂控制

下垂控制往往在系统处于孤岛运行状态时使用。以系统独立运行为前提，胡治国等[20]提出 1 种基于电压下垂控制的混合储能系统控制策略，该策略有效延长了电池的使用寿命，希望以后这种方法可以适用于城轨交通系统。电压下垂控制在稳压式控制策略的基础上将稳压式变为电压下垂式，当储能装置投入运行后，放电时仍采用固定阈值，充电时电压外环的电压指令不再是固定值，而是随着高压侧充电电流的变化而变化。电压下垂控制框图如图 6 所示。

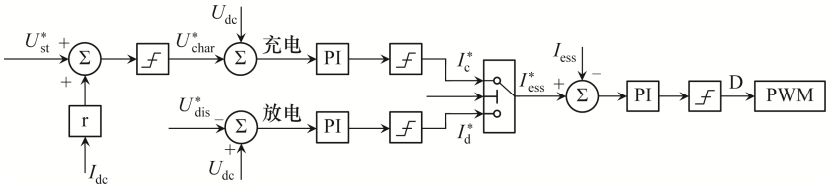


图 6 电压下垂控制框图

Fig. 6 Block diagram of voltage droop control

在城轨交通中，当供电发生故障时，储能系统如何快速高效地向列车提供紧急牵引能量也使得解决孤岛运行问题显得尤为重要。陶孝涛[21]考虑空载网压波动影响，根据列车工况优化参数，采用电流下垂控制的能量管理策略，实现了网压在一定范围内的波动。然而，下垂控制只是对电压部分控制，它的精度不高且系数固定，这就导致其不太适用于处于运行状态的列车。为了更加贴合实际列车运行应用，赵峰等[22]利用模糊规则对下垂控制的系数进行修正，有效解决了传统下垂控制精度不高、下垂系数固定等问题。总之，单一下垂控制方式比较简单，对网压波动的改善较明显，如果想应用于实际列车运行，控制策略需要智能化或者与其他可以实时监测调整的方式相结合，也就意味着可以利用不同的算法提高系统的稳定性。

3.4 动态阈值控制

随着控制策略方法不断地投入实际应用，列车运行工况常常被考虑在其中。传统固定阈值不能满足列车的持续运行，动态阈值控制对功率的不断调整恰好满足需求。考虑到混合储能装置具有经济性和环保性，因此其一般适用于电池储能系统动态调整。艾明成[23]提出了 1 种基于电池荷电状态 SOC (state of charge)跟随的动态功率阈值控制策略。如图 7 所示，通过改变锂电池的充放电功率阈值来调整其功率输出，从而降低充放电循环次数，并有效延长电池的使用寿命。杨浩丰等[24]根据全天的列车运行工况，并利用电池高能量密度的特点提出基于

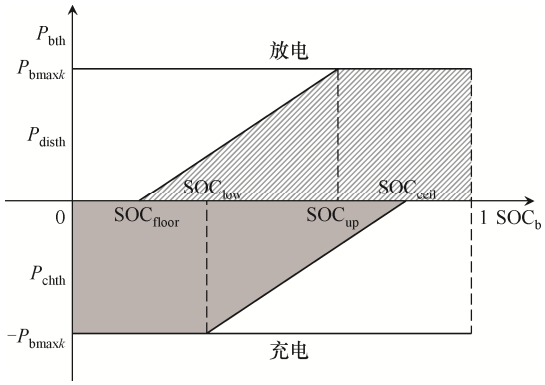


图 7 动态功率阈值控制策略控制逻辑

Fig. 7 Control logic of dynamic power threshold control strategy

列车运行工况的动态比例分配策略，该控制策略依托安装在北京地铁八通线梨园牵引变电站内的 1 MW 功率等级的混合储能样机，并实现了可行性的验证。秦强强等[25]根据城轨交通供电系统的实际运行状况，提出基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分时段控制策略。在实际应用中，动态阈值控制实现了在线优化，因此该方法具有一定的工程应用价值。未来可以与人工智能相结合，有助于进一步提高精度。

3.5 模型预测控制

模型预测控制 MPC(model predictive control)算法作为 1 种基于预测模型的滚动优化控制系统设计方法，具有前馈-反馈控制结构，可以对预测数据进行反复修正，因此降低了系统对模型精度的要求。MPC 的算法原理框图如图 8 所示。

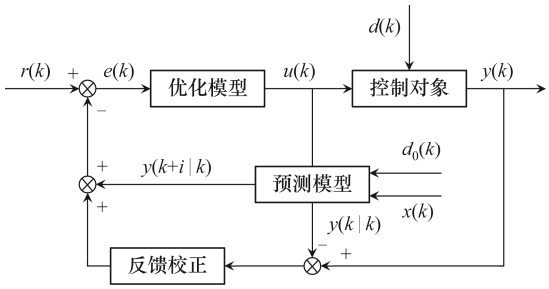


图 8　MPC 的算法原理框图

Fig. 8 Block diagram of principle for MPC algorithm

对于传统 PI 控制的城轨混合储能系统而言，存在的问题包括参数调节烦琐和列车启停工况响应滞后等。针对这些问题，杨丰萍等[26]提出多步预测控制算法，将传统的 PI 电流内环改进为多步预测电流控制环。通过这种改进，系统在规避单步预测存在的预测误差缺陷的同时，还能改善仅有传统双闭环控制导致的系统动态响应速度慢的问题。研究表明，模型预测在城轨交通混合储能系统中的应用仍较少。因此，在微电网中的应用也值得借鉴，孙凯胜[27]建立了基于模型预测控制的并网功率波动率在线控制策略，在跟踪前置并网目标功率的同时滚动优化储能功率。Guo 等[28]在 2 个时间段上控制混合储能系统的荷电状态使其得到优化，满足网压波动需求。鲍建等[29]采用电感误差补偿来提高 MPC 模型精度，实现储能系统功率的快速响应。

总体来说，模型预测的理论多于实践，主要是设计参数，但是当数据过少时，预测的精度也就随之降低。对于该算法而言，既可以不断优化算法本身，又可以和其他算法相结合，更加灵活地适应实际生产需要。

对上述混合储能系统控制策略的研究情况进行总结归纳，结果见表 2。

表 2　混合储能系统控制策略对比与分析

Tab. 2 Comparison and analysis of control strategies for hybrid energy storage systems

控制策略	第一作者	创新点	优点	缺点	研究的局限性
传统双闭环控制	李逢兵[12]	基于锂电池充放电状态对超级电容储能 SOC 进行调整	优化了系统功率指令调节能力	锂电池充放电功率不如基本控制时平滑	应将仿真模型应用于实际工程中进行验证
	陈亚爱[13]	对电压外环部分的变增益比例进行调整，对传统滤波分配法进行改进	提高了系统动态响应能力，有效避免了混合储能系统的内部功率循环	未对电流内环进行操作，可能会导致电流突变	将锂电池模拟为列车等效功率源，与实际情况有出入。可以采用电机等方式更好地对列车的运行特性进行等效
	杨丰萍[14]	通过对列车的实时运行速度进行监测，进而判断列车的运行工况	有效抑制了牵引网压的跌落与抬升，避免了单独开断误动	会导致单个储能系统之间的电压不均衡	应考虑多辆列车运行时的制动能量交换
	李志强[15]	通过建立网压与系统运行功率的关系，实现了动态功率回馈	能够充分利用再生制动能量	未对双闭环控制进行改进	可以加入对中压能馈技术的研究
优化模糊控制	Zhang[17]	将小波变换和神经网络与模糊控制相结合	实时监测	未考虑模糊规则最优化问题	需考虑多种不同运行工况
	Liu[18]	自适应能量管理	模糊规则考虑空载电压与发车间隔	对比数据过少	可以改用更好的算法确定隶属度函数

表 2（续）

控制策略	第一作者	创新点	优点	缺点	研究的局限性
优化模糊控制	王晓侃[19]	结合列车运行需求功率设置模糊规则	使用最小模糊度法和加权系数联合确定隶属度函数	未考虑各储能系统之间传递的损耗	使用实际数据更能保证系统的输出精度和模型的鲁棒性
下垂控制	胡治国[20]	在电池电流内环控制中引入与超级电容荷电状态有关的虚拟冲击电流扰动	延长电池使用寿命	模型设计复杂	可以考虑应用于城轨交通系统
	陶孝涛[21]	将外部的充放电阈值与内部储能元件的充放电电流相结合	根据列车工况优化参数	各部分阻抗和下垂控制中系数固定	在工况变化时尝试在线优化
	赵峰[22]	利用模糊规则对下垂控制的系数进行修正	有效解决传统下垂控制精度不高、下垂系数固定问题	未与单一下垂式控制进行对比	可以进行多种工况下 3 种形式的对比与分析
动态阈值控制	艾明成[23]	不同工况动态调整电池充电功率阈值	减小电池充放电功率和循环深度	超级电容响应频繁	放电功率阈值取值需要进一步研究
	杨浩丰[24]	根据全天的列车运行工况，并利用电池高能量密度的特点	在高峰期降低变电所峰值功率	验证成本过高	可以继续研究电池和超级电容使用寿命
	秦强强[25]	结合实际发车间隔	提高吸收剩余再生制动能量的能力	仿真模型复杂	当全线装设时，应对各个混合子系统协调控制进行研究
模型预测控制	杨丰萍[26]	采用多步预测电流控制环代替传统 PI 电流内环	规避单步预测存在的预测误差缺陷的同时提升系统动态响应速度	不满足时变	可以对充放电设定阈值进行实时控制
	孙凯胜[27]	设计一种含滞后度的滑动平均算法	改善储能系统在长期运行过程中的能量状态	只设计了单向的能量流动	可以考虑应用于城轨交通系统
	Guo[28]	在两个时间段上控制混合储能系统	荷电状态得到优化，满足网压波动需求	模型较复杂，包含不稳定性	提升模型的适配度，改进模型的鲁棒性
	鲍建[29]	采用电感误差补偿控制提高模型精度	提高储能系统功率响应速度，改进系统暂态特性	计算复杂度提高	可以考虑多种不同运行工况下储能换流器的控制系统性能

4 结论

目前，城轨混合储能系统的控制策略大多是在传统双闭环控制的基础上完成的。传统双闭环控制采用电压外环和电流内环相结合的方式，通过 PID 对电压电流的阈值进行调节并对混合储能系统的功率进行分配，实现能量管理；优化模糊控制一般是利用模糊逻辑控制算法分别动态调整混合储能系统充放电的电压阈值，使混合储能系统的功率分配更加准确；下垂控制则是考虑到混合储能系统自身的电压外环及牵引网电压，将外部的充放电阈值与内部储能元件的充放电电流相结合，利用最低电压实现对储能元件的优化控制；动态阈值控制策略更多的是结合列车运行图动态分析不同列车运行工况下的功率分配，为某一储能元件设定 1 个功率阈值，功率阈值内的功率由该储能元件提供，功率阈值外的剩余功率由另一储能元件提供，提高储能元件功率利用率；模型预测控制针对混合储能系统某一部分，可以是电流内环也可以是整个系统级进行分步分级预测，规避单步预测存在的预测误差缺陷的同时提升系统动态响应速度。

随着城市轨道交通不断发展，对再生制动能量回收的研究也不断增多。在对混合储能系统控制策略研究的过程中，不仅要对单一储能元件的电压电流进行控制，还需要解决各储能元件之间的功率分配问题，因此，储能系统在轨道交通中的应用仍面临诸多挑战。

(1)解决不同储能介质间的能量交换问题。在运用控制策略对混合储能系统功率进行分配时，考虑不同储能介质间的能量交换，可以在功率分配前对某一储能元件进行抑制控制，提升混合储能系统的能量利用率和动态性能。

(2)改进混合储能系统控制策略。首先将电压下垂法与多步预测法相结合，将外部的充放电阈值与内部储能元件的充放电电流相结合，利用最低电压实现对储能元件的优化控制，再对电流内环进行分步预测，提升单一部分控制策略的精确度和动态响应速度，最后可以采用模糊控制提高时变系统的稳定性。

(3)控制策略工程应用可行性验证。针对储能系统等效模型众多的情况，在搭建城轨交通混合储能系统仿真平台的同时，需要采用合适的硬件对系统和控制策略进行实验验证，为后续投入工程实际应用提供参考。

(4)储能系统性能提升。储能材料是储能系统研发和制造的重要影响因素，影响储能系统的性能、体积和制造成本，随着储能材料优化和装置制造技术的进步，储能系统在城轨交通中的应用可以得到进一步推广。

参考文献：

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2025 年度统计和分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2026.
China Urban Rail Transit Association. Statistical and analysis report on urban rail transit in 2025 [R]. Beijing: China Urban Rail Transit Association, 2026. (in Chinese)

[2] 杨铁成, 丁明进, 王响成, 等. 基于超级电容的双向 DC-DC 变换器控制研究[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 129-139.
Yang Yicheng, Ding Mingjin, Wang Xiangcheng, et al. Research on control of bidirectional DC-DC converter based on super capacitor [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 129-139. (in Chinese)

[3] 金勇, 黄先进, 石春珉, 等. 城市轨道交通地面储能技术应用综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642.
Jin Yong, Huang Xianjin, Shi Chunmin, et al. Review on wayside energy storage technology for urban rail transit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4568-4582, 4642. (in Chinese)

[4] 高锋阳, 宋志翔, 高建宁, 等. 计及光伏和储能接入的牵引供电系统能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 745-757.
Gao Fengyang, Song Zhixiang, Gao Jianning, et al. Energy management strategies for traction power systems with PV and energy storage access [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 745-757. (in Chinese)

[5] Ramsey D, Letrouve T, Bouscayrol A, et al. Comparison of energy recovery solutions on a suburban DC railway system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1849-1857.

[6] Khodaparastan M, Mohamed A A, Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 2831-2847.

[7] Papageorgiou P G, Oureilidis K O, Christoforidis G C. A systematic review of hybrid superconducting magnetic/battery energy storage systems: Applications, control strategies, benefits, limitations and future prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 183: 113436.

[8] Liu Wei, Placke T, Chau K T. Overview of batteries and battery management for electric vehicles [J]. Energy Reports, 2022, 8: 4058-4084.

[9] Konishi T, Morimoto H, Yoshii T, et al. Fixed energy storage system and high voltage system for DC electrified railway[C]// PCIM Europe Digital Days 2020. Berlin, Germany: Mesago PCIM GmbH, 2020: 127-132.

[10] Guo Lingcong, Hu Pan, Wei Hong. Development of

supercapacitor hybrid electric vehicle [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 65: 107269.

[11] 杨中平, 林飞. 储能技术在地面式再生制动能量吸收和利用装置中的应用[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 1-8.
Yang Zhongping, Lin Fei. Application of energy storage technology in stationary regenerative braking energy absorption and utilization devices [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(6): 1-8. (in Chinese)

[12] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 70-75.
Li Fengbing, Xie Kaigui, Zhang Xuesong, et al. Control strategy design for hybrid energy storage system based on charge/discharge status of lithium-ion battery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 70-75. (in Chinese)

[13] 陈亚爱, 林演康, 王赛, 等. 基于滤波分配法的混合储能优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4009-4018.
Chen Yaai, Lin Yankang, Wang Sai, et al. Optimal control strategy of hybrid energy storage based on filter allocation method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4009-4018. (in Chinese)

[14] 杨丰萍, 郑文奇, 刘锋, 等. 城市轨道交通车载混合储能系统的研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(1): 33-40.
Yang Fengping, Zheng Wenqi, Liu Feng, et al. Research on vehicle-mounted hybrid energy storage system for urban rail transit [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(1): 33-40. (in Chinese)

[15] 李志强, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 城轨交通混合型再生制动能量利用系统及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 203-210.
Li Zhiqiang, Hu Haitao, Chen Junyu, et al. Hybrid regenerative braking energy utilization system and its control strategy in urban rail transit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 203-210. (in Chinese)

[16] 朱志莹, 安聪, 丛冰玉, 等. 基于模糊 PID 的开关磁阻飞轮储能充放电控制[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 101-107.
Zhu Zhiying, An Cong, Cong Bingyu, et al. Charge and discharge control of switched-reluctance machine driven flywheel energy storage system based on fuzzy PID [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 101-107. (in Chinese)

[17] Zhang Qiao, Wang Lijia, Li Gang, et al. A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101721.

[18] Liu Yuyan, Yang Zhongping, Wu Xiaobo, et al. An adaptive energy management strategy of stationary hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 2261-2272.

[19] 王晓侃, 王琼. 城轨列车车载储能系统功率需求的动态模糊优化控制方法研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 564-570.
Wang Xiaokan, Wang Qiong. Power demand of on-board composite energy storage system for urban rail trains based on dynamic fuzzy optimal control method [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2023, 42(4): 564-570. (in Chinese)

[20] 胡治国, 张磊冲, 司少康, 等. 基于电压下垂法的独立直流微网混合储能系统控制策略改进[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 39-44.
Hu Zhiguo, Zhang Leichong, Si Shaokang, et al. Improvement of hybrid energy storage system control strategy of independent DC microgrid based on voltage sag method [J]. Smart Power, 2022, 50(9): 39-44. (in Chinese)

[21] 陶孝涛. 基于改进 *I-V* 下垂曲线调整的城轨地面混合储能系统能量管理策略研究[D]. 北京：北京交通大学, 2021.
Tao Xiaotao. Research on energy management strategy of urban rail ground hybrid energy storage system based on improved *I-V* sag curve adjustment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)

[22] 赵峰, 肖骅轩, 陈小强, 等. 基于模糊下垂控制的光伏接入城轨供电系统混合储能控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2025, 20(3): 357-367.

Zhao Feng, Xiao Huaxuan, Chen Xiaoqiang, et al. Research on hybrid energy storage control strategy with photovoltaic access to urban rail power supply system based on fuzzy droop control [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(3): 357-367. (in Chinese)

[23] 艾明成. 基于电池 SOC 跟随的城轨地面混合储能系统控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Ai Mingcheng. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage system based on battery SOC following [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[24] 杨浩丰, 刘冲, 李彬, 等. 基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 168-178.
Yang Haofeng, Liu Chong, Li Bin, et al. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operating condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 168-178. (in Chinese)

[25] 秦强强, 张骄, 李宇杰, 等. 基于列车运行状态的城轨地面混合储能装置分时段控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 760-769.
Qin Qiangqiang, Zhang Jiao, Li Yujie, et al. Research on time-phased control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operation status [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 760-769. (in Chinese)

[26] 杨丰萍, 周铭栀, 程权, 等. 一种改进多步预测的城轨混合储能系统控制算法[J]. 机车电传动, 2022(3): 76-81.
Yang Fengping, Zhou Mingzhi, Cheng Quan, et al. An improved multi-step prediction control algorithm for urban rail hybrid energy storage system [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 76-81. (in Chinese)

[27] 孙凯胜. 风电-混合储能联合系统控制策略及其容量配置研究[D]. 北京：华北电力大学，2021.
Sun Kaisheng. Research on control strategy and capacity configuration of wind power hybrid energy storage joint system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)

[28] Guo Tingting, Liu Youbo, Xiang Yue, et al. A novel two-stage model predictive control for wind power smoothing based on HESS [C]// 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China, 2020: 1-8.

[29] 鲍建, 杨沛豪. 采用改进 MPC 提高储能系统电压暂态特性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 242-249.
Bao Jian, Yang Peihao. Research on improving voltage transient characteristics of energy storage system with improved MPC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 242-249. (in Chinese)



韩悦

作者简介：

韩悦(1998—)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：储能系统能量管理与控制。E-mail：1202109049@student.stdu.edu.cn。

李佳静(1992—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：储能系统容量配置与能量管理，轨道交通系统牵引供电技术。E-mail：lijiajingheb@stdu.edu.cn。

乔宇(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：储能系统能量管理与控制。E-mail：1202209007@student.stdu.edu.cn。

王佳兴(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：微电网能量管理与系统稳定性分析。E-mail：1202209010@student.stdu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)