新能源汽车国家大数据联盟微课堂第27期

NDANEV

NDANEV | 微课堂 第27期

新型清洁能源与轨道交通系统技术融合研究

06月10日 19:30-20:30

课程提纲

一、新型清洁能源与轨道交通系统融合发展的能源与交通背景

二、轨道交通系统的发展趋势及与新型清洁能源的融合场景分析

三、新型清洁能源与轨道交通系统融合发展的可行性分析

四、新型清洁能源与轨道交通系统融合发展的解决方案

五、基于技术、供需、效益的新型清洁能源与轨道交通系统融合应用对比分析

六、基于我国光伏资源分布的融合演进路线

马静

国家重点研发计划交通基础设施指南编制专家组副组长

国家第六次技术预测能源领域专家组组长

华北电力大学科学技术研究院副院长

扫码回看第27期视频

查看全部微课堂课程

关注联盟微信公众号

新型清洁能源与轨道交通系统技术融合研究

汇报人：马静

华北电力大学

2021年6月10日

目录

1	能源与交通融合研究背景
2	能源与交通发展趋势及融合场景分析
3	能源与交通融合发展的可行性分析
4	能源与交通融合发展的解决方案
5	能源与交通融合应用的对比分析
6	基于我国光伏资源分布的融合演进路线

一、研究背景

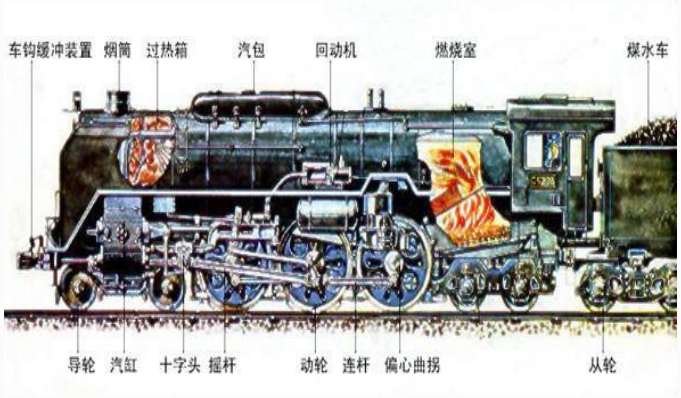
面对资源紧缺、气候变化、环境污染给人类带来的严峻挑战，**粗放非协同增长方式**难以为继，**产业转型与升级**已成为世界各国，尤其是中国，应对这些挑战的主要政策取向和根本途径。

能源与交通作为社会经济体系最重要的基础产业和具有集大成者特征的科技领域，亟需重大变革以引领和塑造经济发展模式。

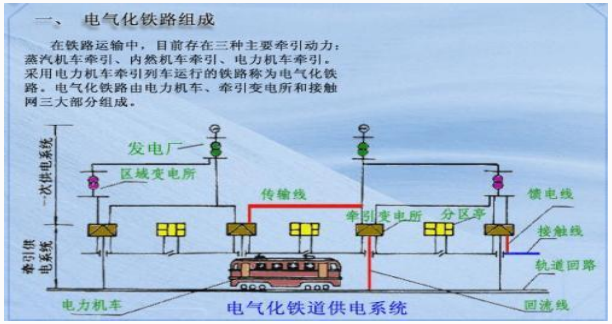
一、研究背景

回顾历史，**能源与交通**的互动发展一直是人类社会经济过程合理、有效运转和持续进步的基本条件和保障。**二者的融合发展对人类社会经济发展新模式和新文明的持续形成**发挥不可替代的作用。

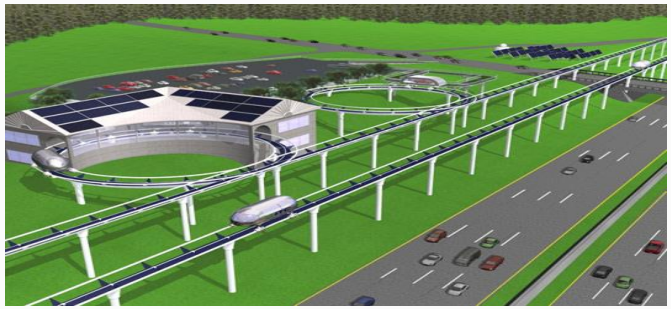
生物质能源+交通→农业文明



煤炭+交通→第一次工业革命



柴油/电力+交通→第二次产业革命



新能源+交通→ 新模式、新技术

一、研究背景

轨道交通作为运输量最大、效率最高的交通方式， 预计到2050年，全球轨道交通规模将达到210万公里，其中**97%客运**和**67%货运**将由**电能**驱动，年消费电量将**超过7000亿千瓦时**。

清洁电能与轨道交通的融合发展作为能源与交通融合发展的先行者，对推动轨道交通绿色化、可持续发展具有重要意义。

一、研究背景

从资源、技术、成本、环保等综合因素考虑，太阳能是解决我国交通能源问题的有效方案，将会由目前的补充和替代能源，逐步过渡成为主要能源和主导能源。

光伏+交通

优点：融合资源丰富、技术成熟、成本逐渐下降

缺点：环保问题有待进一步解决

风电+交通

优点：技术成熟、成本逐渐下降

缺点：融合资源不足、效率低、调度难

氢能+交通

优点：环境友好、效率高

缺点：一体化技术不成熟、成本高、安全性差

生物质+交通

优点：零排放、效率高、来源丰富

缺点：成本过高、体积大

目录

1 能源与交通融合研究背景

2 能源与交通发展趋势及融合场景分析

3 能源与交通融合发展的可行性分析

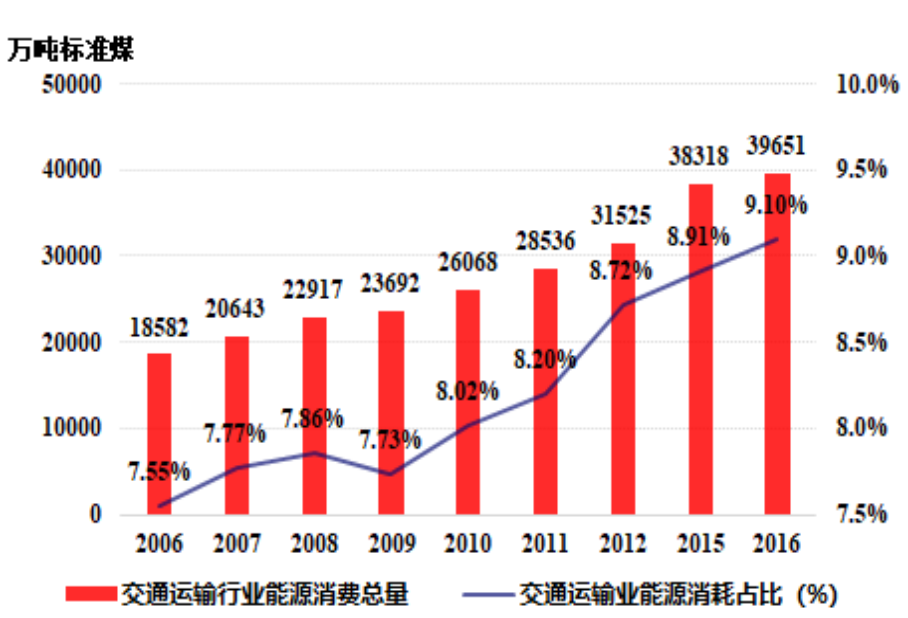
4 能源与交通融合发展的解决方案

5 能源与交通融合应用的对比分析

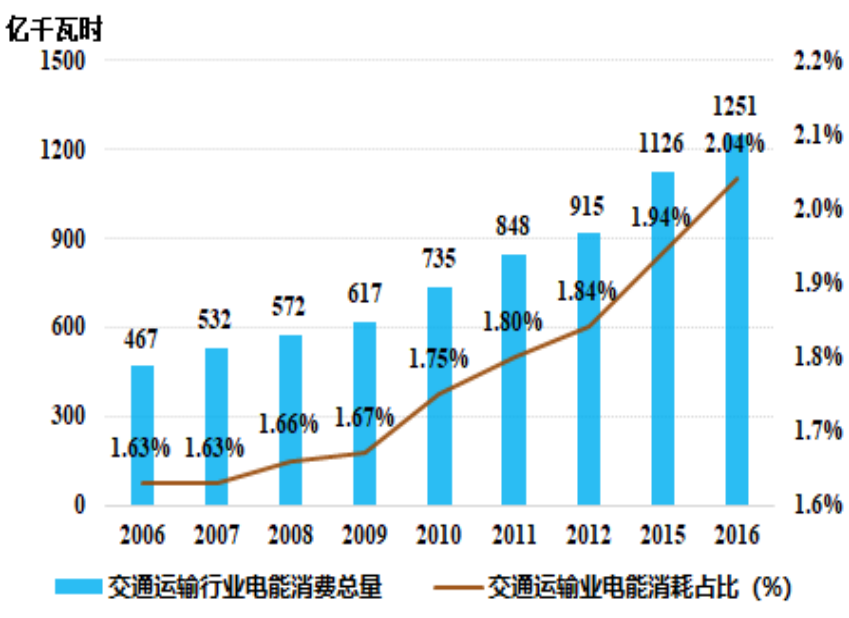
6 基于我国光伏资源分布的融合演进路线

二、发展趋势及融合场景

- 交通运输行业能源消耗总量和电能消耗总量**逐年递增**；
- 预计到**2050年，97%的客运铁路和2/3的货运铁路将依赖电力，**且其中**58%是可再生能源产生的电力。**（数据来源：国际能源署）



我国交通运输行业能源消耗状况

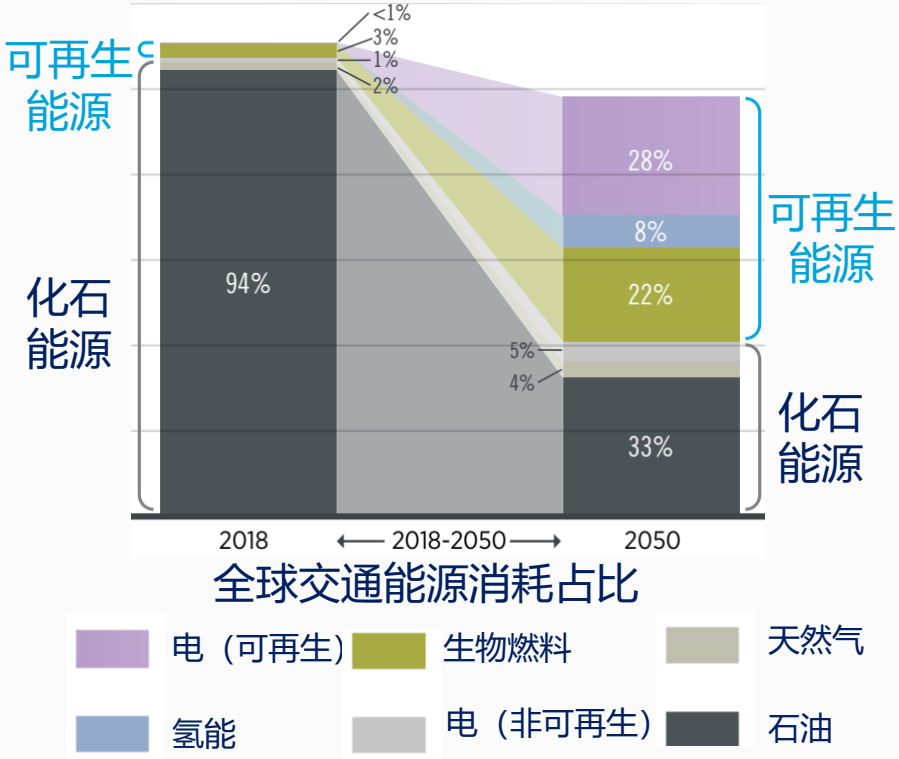


我国交通行业的电能消耗总状态

(数据来源: 国际可再生能源署《Global Energy Transformation 2018》)

二、发展趋势及融合场景

- **电能、氢能在交通用能占比中增速明显，其中：电能从2018年的1%上升到2050年的33%，氢能在2050年占比上升为8%。**
- **石油在交通用能占比显著下降，从2018年的94%下降到2050年的33%，石油消费量下降近70%。**



类型	2018年	2050年	趋势
电（可再生）	<1%	28%	↑↑
氢能	≈0%	8%	↑
生物燃料	3%	22%	↑↑
电（化石）	1%	5%	↑
天然气	2%	4%	↑
石油	94%	33%	↓↓

数据来源：IRNEA《Global Energy Transformation 2018》

二、发展趋势及融合场景

- **铁路资产向绿色能源化方向发展**（光伏供能技术运用于铁路系统）
- **铁路能源供给向自洽多元化方向发展**（通过光伏出力的接入，采用混合储能装置作为中间单元，为铁路系统提供多元化的能源供给）
- **铁路用能管理向协同弹性化方向发展**（通过高弹性能量流路径结构规划和组分配置布局协同规划策略，保障轨道交通在正常运行时的高能效和故障发生态下的高弹性用能管理）

1.铁路资产向绿色能源化方向发展

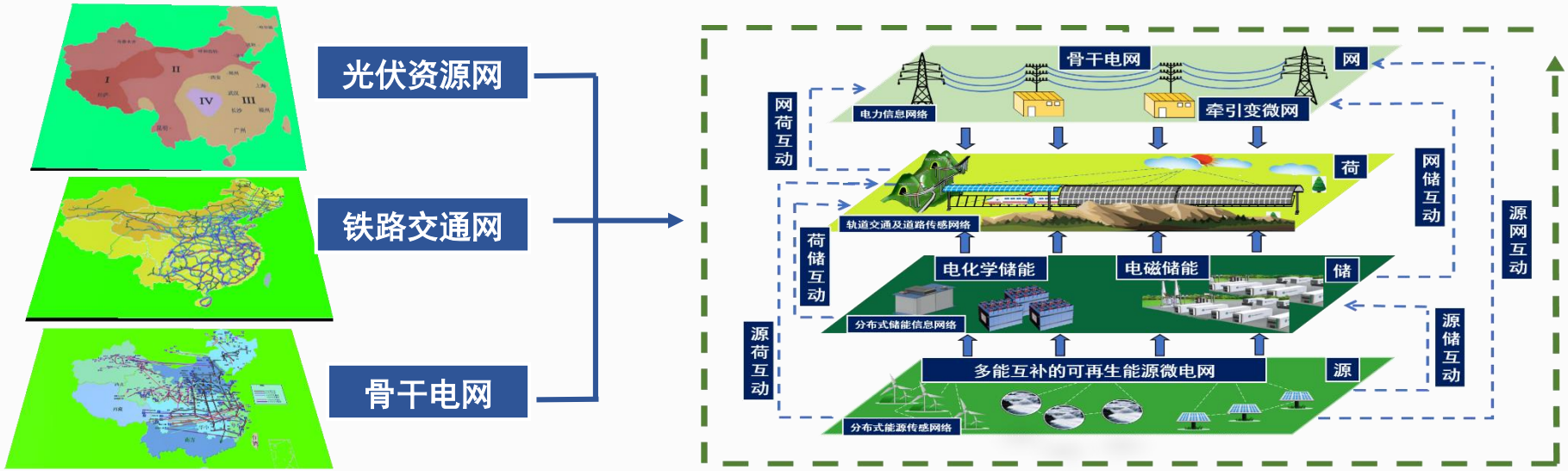
2.铁路能源供给向自洽多元化方向发展

3.铁路用能管理向协同弹性化方向发展

二、发展趋势及融合场景

- 铁路新能源系统的建设和优化调度需要综合铁路**光伏资源**的出力特性、我国**骨干电网**的建设特性以及**铁路负荷**的分布特性三个方面，建设**因地制宜**、**因网制宜**以及**因荷制宜**的三网合一型铁路新能源融合网。
- 铁路新能源系统具有“源-网-荷-储”四重属性，运营管理模式首先将朝向**“源-网-荷-储”协同调度**的方向演进。

三网合一型“源–网–荷–储”协同调度的铁路新能源融合网



二、发展趋势及融合场景

源属性——铁路资产能源化

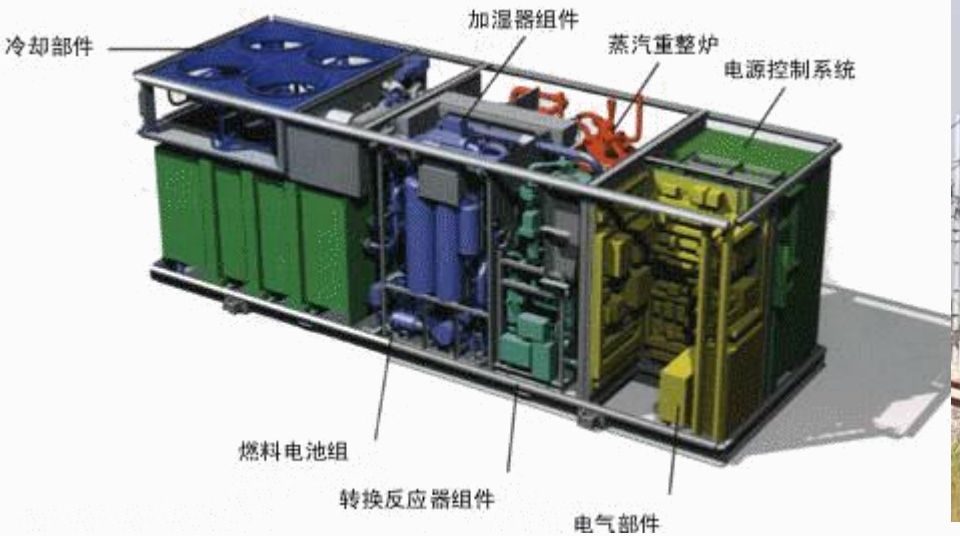
太阳能光伏发电具有结构简单、运维便捷、集成度高的优势，通过与**铁路系统运载体**、**基础设施**和**服务设施**铺设光伏板，可为轨道交通系统用电提供清洁的电量供给。

太阳能光伏发电作为清洁电能的**转换方式**，应充分利用站、线路等可用空间布局光伏发电，构建太阳能集成的**陆基供能系统**。

二、发展趋势及融合场景

源属性——铁路资产能源化

氢能的高含能属性、能量载体属性，使其十分适合作为交通运载体的动力源，通过与轨道车辆、站台基地的一体化集成，实现车载能源的清洁化、自洽化供给。

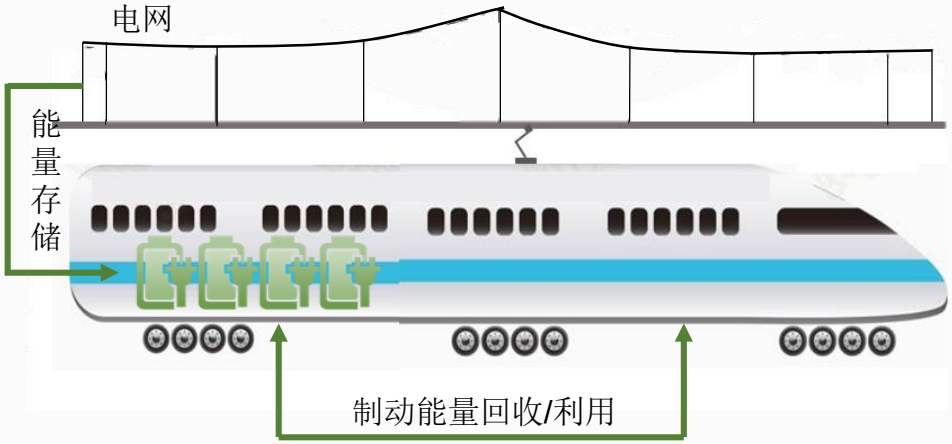


氢作为高密度能源存储的载体，应充分发挥其动力燃料属性，构建氢能主导的车载供能系统。

二、发展趋势及融合场景

储属性

储能具有转换效率高、能量双向流动、部署灵活等优势，通过与轨道线路、轨道车辆的集成，既可**回收制动能量**用以机车辅助用电，也可连接主网时**平抑网压波动**，提升轨道交通电力供给的效率与品质。



储能作为电能双向存储与释放系统，应利用其**电力/电量平衡能力**，通过与光伏的结合，构建**高弹性、高能效的能源系统**。

二、发展趋势及融合场景

荷属性

随着铁路作为源属性和网属性的迁移和演化，铁路将逐渐减小对电网的冲击，荷属性将具有新型的季节耦合性、空间分布性、时间和空间的不平稳性。

- **季节的耦合性：**

  新模式下，光伏发电具有季节性，对于电网来说，铁路系统负荷四季不再相同，呈现出季节特性。

- **空间的分布性:**

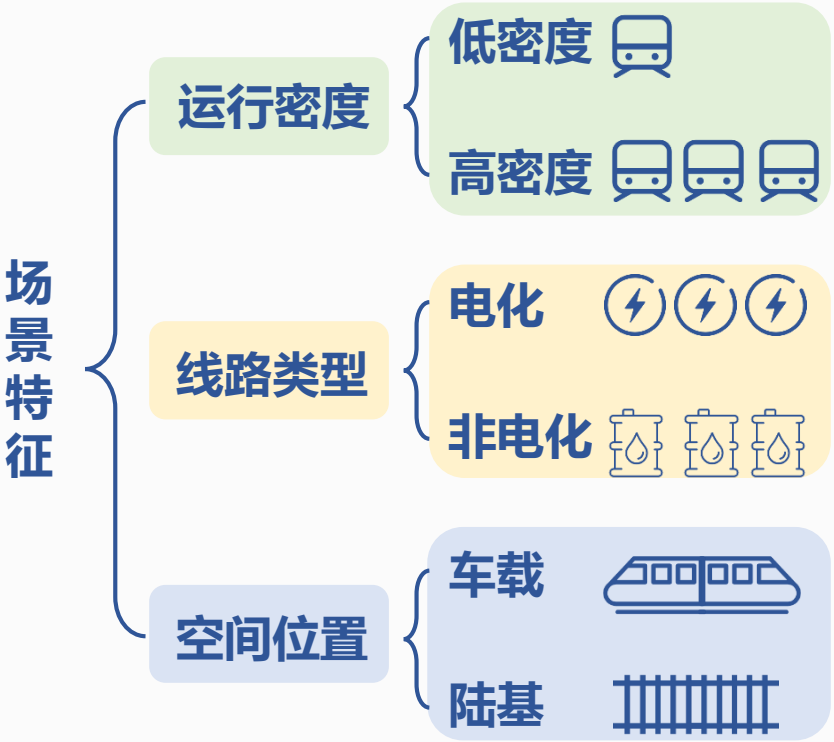
  新模式下，铁路负荷不再由互联大电网供电，而是分配到大量的分布式微网中，呈现出分散特性。

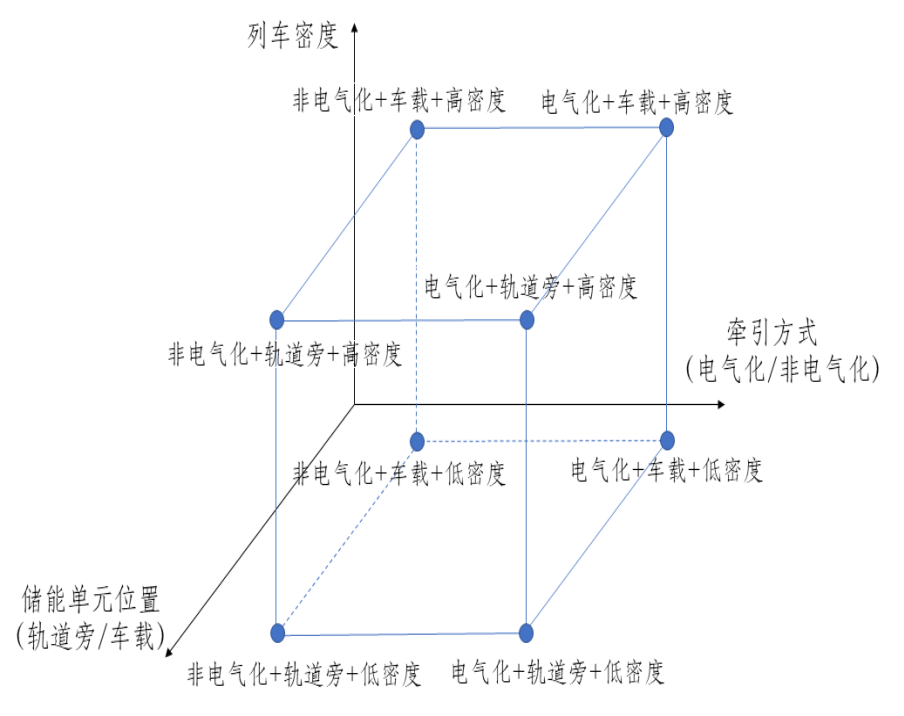
- **时间和空间的不平稳性:**

  新模式下，铁路的间歇冲击性负荷将转移到各储能装置，避免了对电网产生直接影响，并对负荷的冲击性进行了有效缓冲。

二、发展趋势及融合场景

根据**列车运行密度高低、电化/非电化线路和车载/陆基空间安装位置**，提炼**8个**差异化的新型清洁能源与轨道交通系统融合发展的应用**场景**。





二、发展趋势及融合场景

太阳能	**本构属性：** 高间歇性、低能量密度、光-电转换效率 **融合目标：** 提供清洁新能源电力/电量，削减外供电量 **融合场景：** 电化/非电化区陆基部署
氢能	**本构属性：** 高能量密度、高含能性、电-氢-电转换效率低 **融合目标：** 移动装备燃料、移动式应用场景 **融合场景：** 非电化区车载部署
储能	**本构属性：** 高能量密度、电-X-电转换效率高、强平衡能力 **融合目标：** 利用制动能量、支撑网压、应急保供 **融合场景：** 电化/非电化区陆基与车载部署

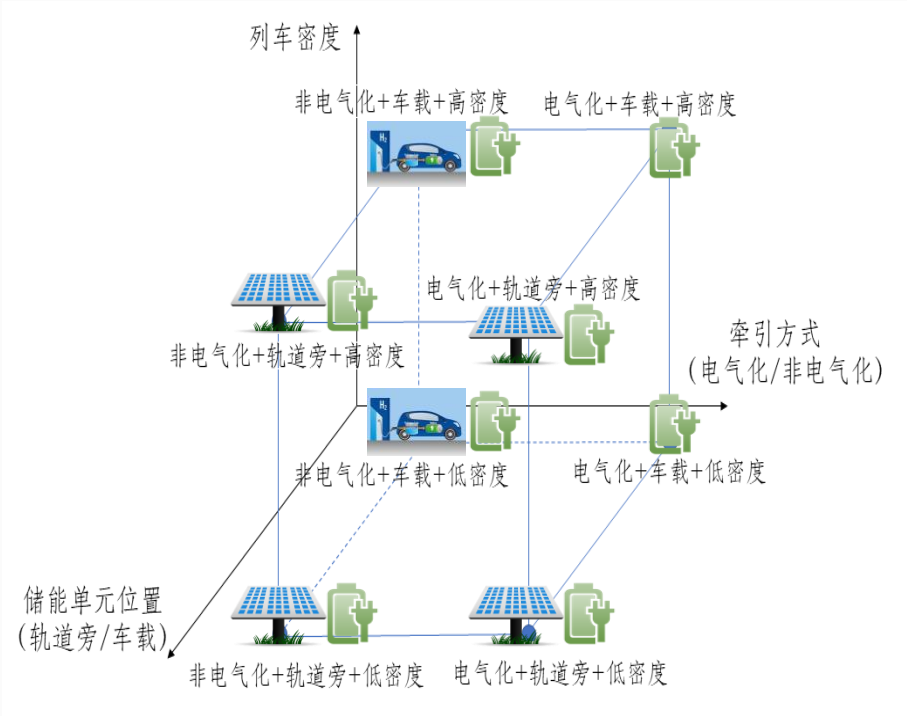
二、发展趋势及融合场景

结合新型清洁能源的转换效率、能量密度、含能性等独特优势，太阳能与轨道交通融合有**4个应用场景**，氢能与轨道交通融合有**2个应用场景**，储能与轨道交通融合有**8个应用场景**。

太阳能

氢能

储能



目录

1 能源与交通融合研究背景

2 能源与交通发展趋势及融合场景分析

3 能源与交通融合发展的可行性分析

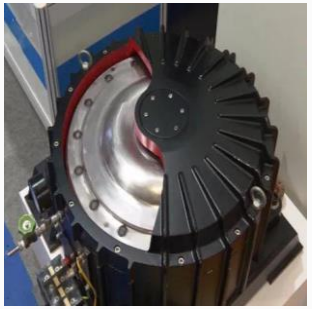
4 能源与交通融合发展的解决方案

5 能源与交通融合应用的对比分析

6 基于我国光伏资源分布的融合演进路线

三、可行性分析

能源战略	新时代背景下，“四个革命、一个合作”能源安全新战略的提出，推动了**清洁低碳、安全高效的现代能源体系**的建设。
交通战略	《交通强国建设纲要》指出，强化节能减排和污染防治，**优化交通能源结构**，推进新能源、清洁能源应用。



三、可行性分析

光伏需求	光伏发电作为清洁能源的转换方式，可满足轨道交通线路、站点对清洁电力消费的需求，促进清洁能源的应用。
氢能需求	氢能零碳排放优势、高含能属性及制备方式多样性，能够进一步提升可再生能源的利用效能，促进产业升级与转型。
储能需求	储能系统输出稳定、布置灵活且不受自然条件影响，且在促进可再生能源消纳、平抑网压波动有着巨大作用。

三、可行性分析

光伏技术

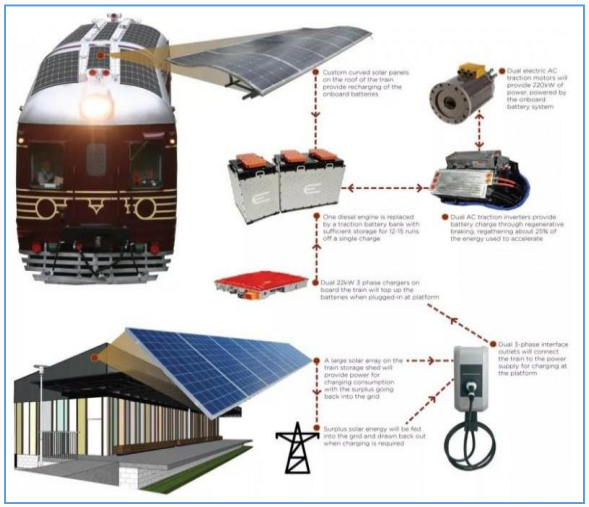
光伏建筑一体化技术不断完善、光伏板转换效率与使用寿命持续提升、光伏发电系统可用性提升明显。

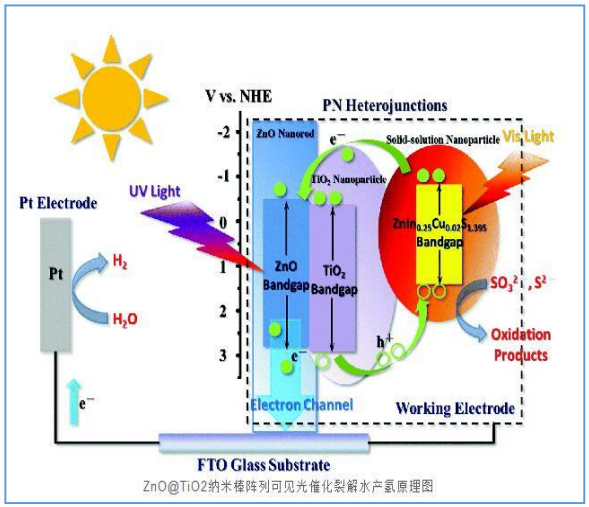
氢能技术

氢高密度存储技术持续升高、氢驱动技术进步显著，氢安全防护技术水平稳步提升。

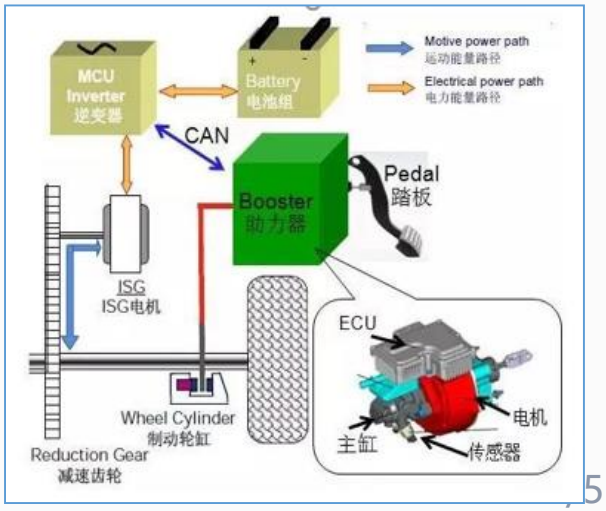
储能技术

比容量/功率与转换效率不断升高、锂电池/电容/飞轮能量管理技术稳步提升、中长时间与短时高频储能装备不断完善。





ZnO@TiO2纳米棒阵列可见光催化裂解水产氢原理图



三、可行性分析

光伏经济

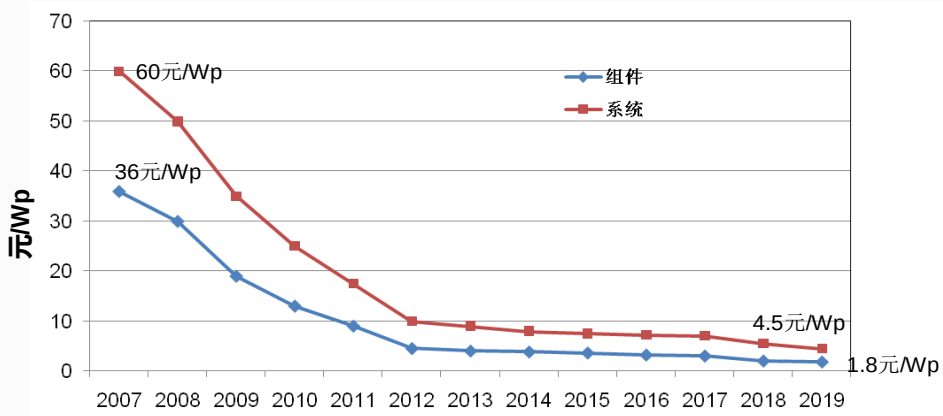
多场景集成光伏装备进入规模化发展，光伏系统组件成本持续走低，预计到2035年光伏组件价格下降55%。

氢能经济

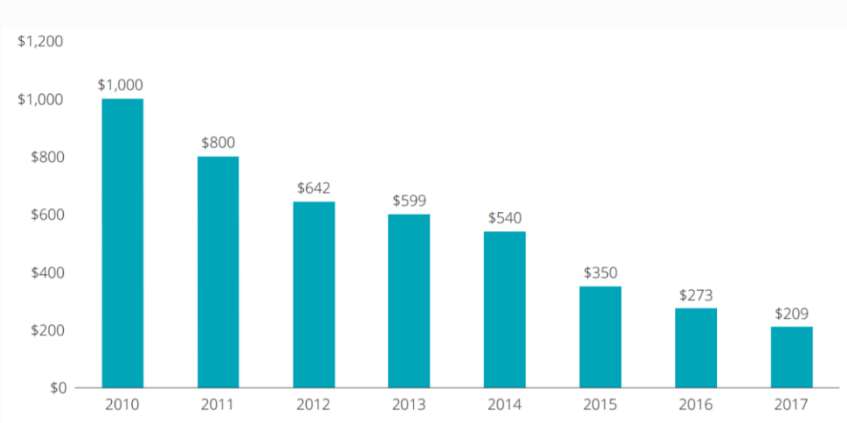
在政策支持下，氢规模化发展趋势明显，未来10年内氢解决方案成本将大幅下降，整体成本将下降50%。

储能经济

储能装备产业发展迅速，跨行业应用趋势显著，装备成本快速下降，锂电池比能量成本在过去10年间下降约10倍。



光伏组件成本



锂电池成本

数据来源：发改委能源所《中国2050年光伏发展展望(2019)》/前瞻产业研究院《中国汽车电子报告》

目录

1 能源与交通融合研究背景

2 能源与交通发展趋势及融合场景分析

3 能源与交通融合发展的可行性分析

4 能源与交通融合发展的解决方案

5 能源与交通融合应用的对比分析

6 基于我国光伏资源分布的融合演进路线

4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

铁 路 能 源 系 统 的 新 模 式

三个历史使命： 绿色化、 高弹性、 高效能

三个创新方向：资产能源化、 供给自洽化、 调度弹性化

三个调整角度：能源做调整、交通做调整、能源交通共同做调整

三个演进阶段： 2021年--2025年； 2026年--2030年； 2031年--2035年

4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

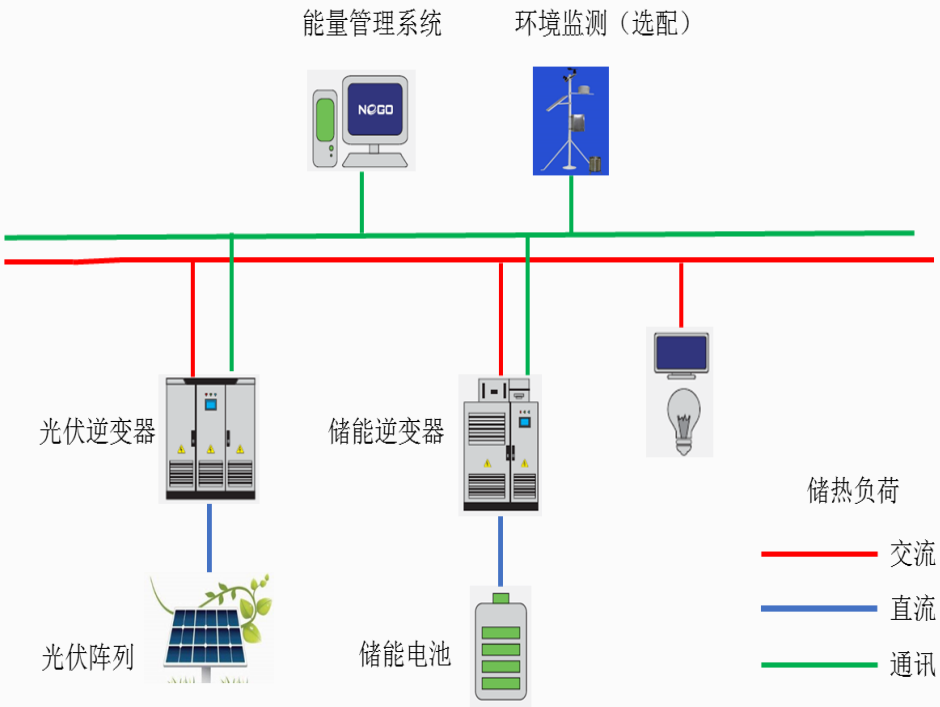
交通集成的新型能源系统	面向轨道交通站点用能场景，通过光伏发电与既有空间设施的结合，可为轨道交通站点照明、空调等提供清洁电力，降低系统外购电量与运行成本。
交通专用的新型能源系统	面向无电地区轨道交通小负荷应用场景，通过光伏、储电、储热等设施的配合，可解决偏远、无电网接入地区的站点日常用电与供暖问题。
交通适配的新型能源系统	面向轨道交通牵引供电应用场景，通过对光伏发电进行结构、功能的适应性调整，利用自有光伏发电提供部分牵引电力，解决电气化铁路牵引能耗高的问题。

4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

交通集成的新型清洁能源系统是利用站台屋顶、雨棚等既有空间资源，架设光伏发电装备，可为照明、通风等设备设施提供电力供给，同时富余电量回馈电网，实现自发自用、余电上网运行。

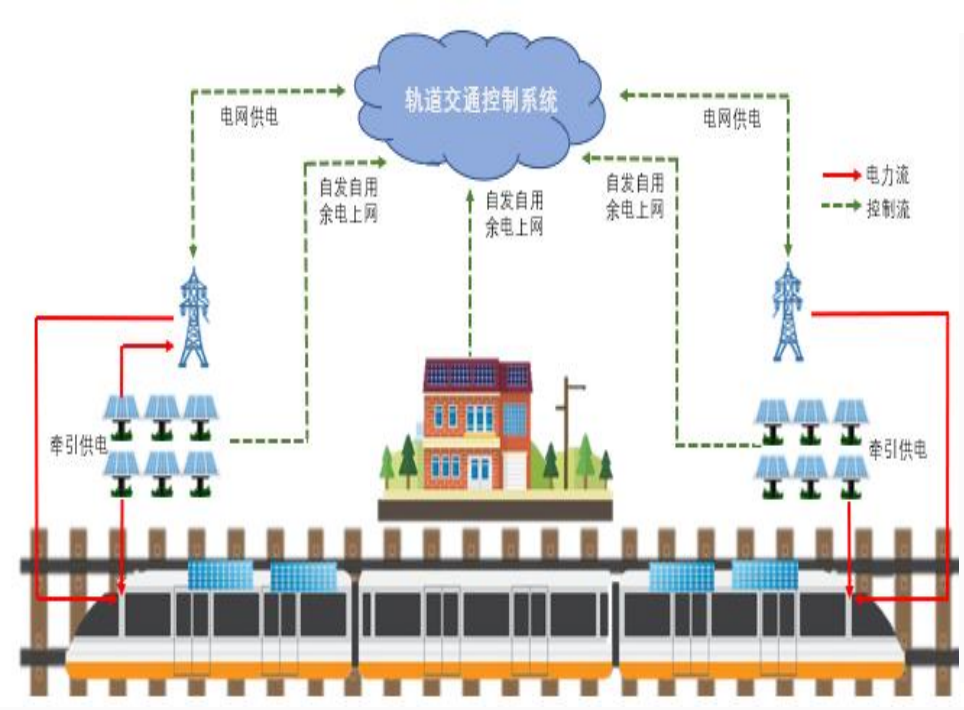
4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

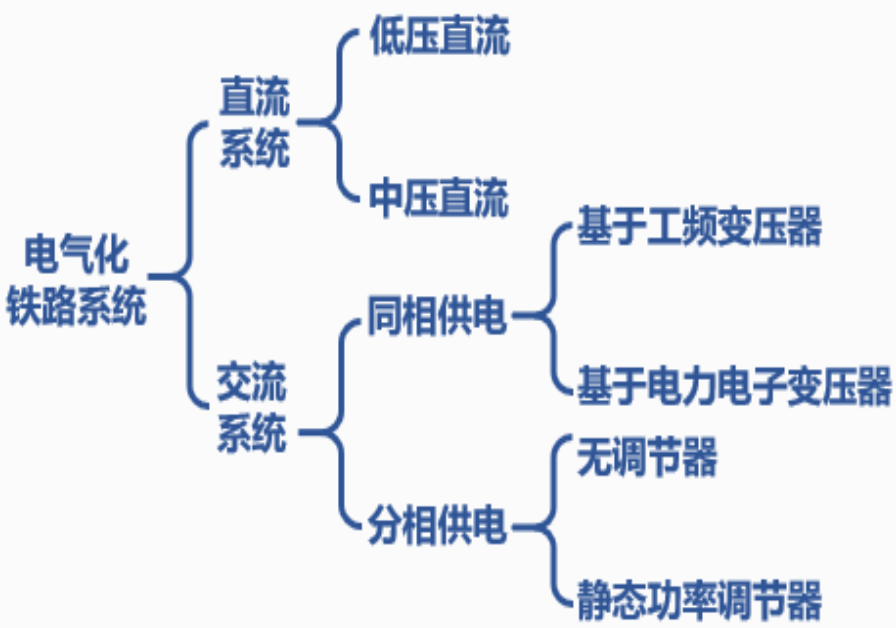
交通专用的新型能源系统针对偏远无网地区服务站点的用电与供暖需求，利用光伏装备完成发电、制热，解决服务站点的全天用电及供暖问题，实现光储协同、发用平衡运行。



4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

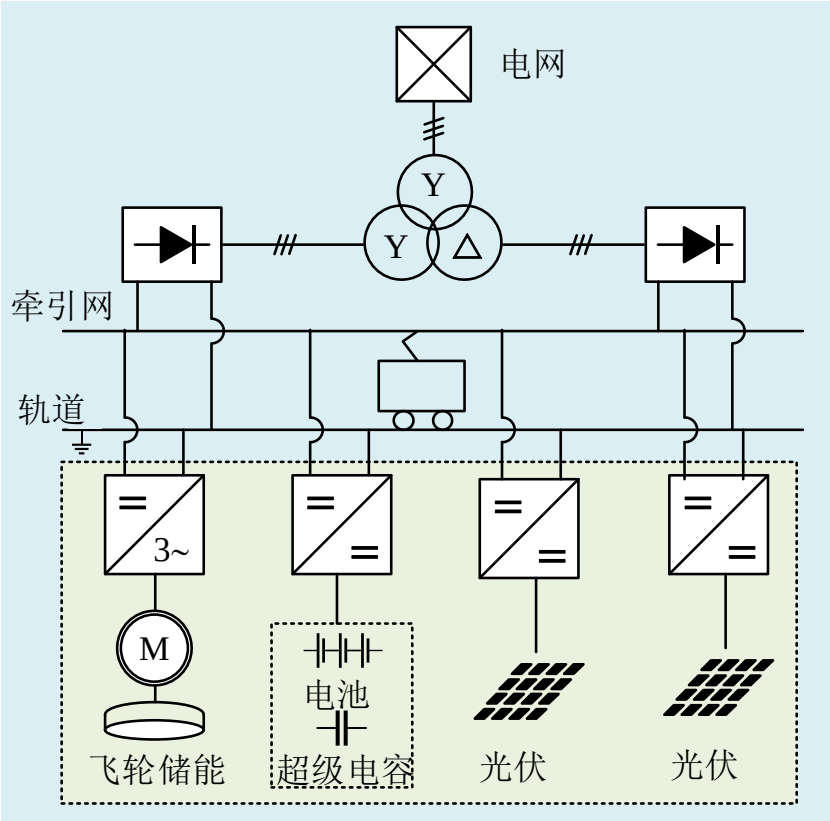
交通适配的新型能源系统面向轨道交通牵引供电场景，通过光伏发电装备进行适应性调整，使其适合于轨道交通牵引系统结构集成，并提供清洁牵引电力，实现光伏发电的**适配集成、全额消纳**的运行。



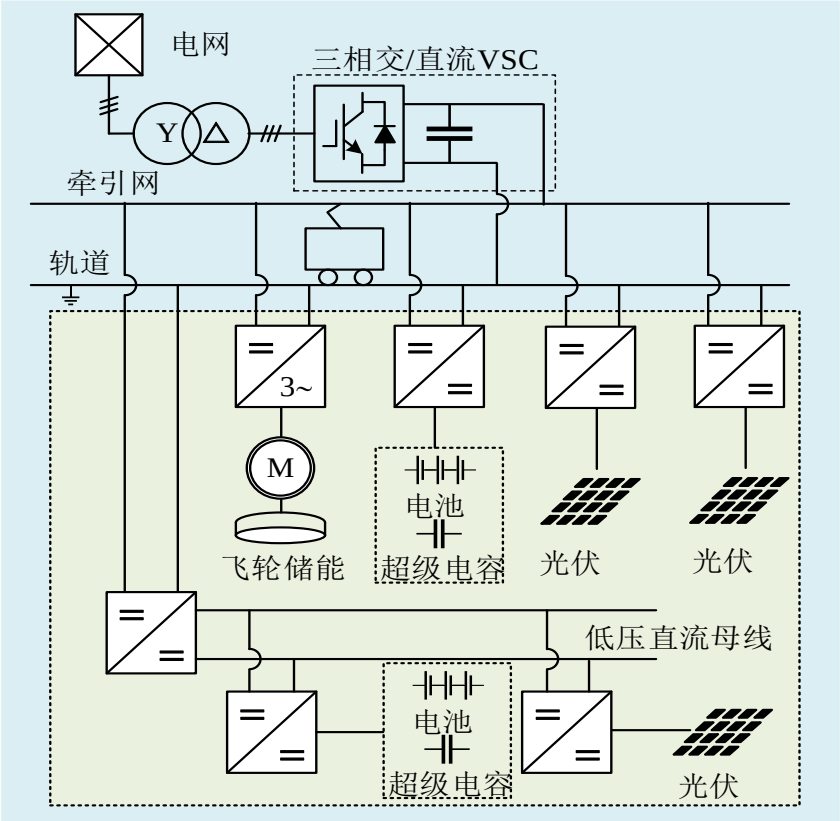


4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

针对**直流牵引供电系统**，光伏发电装备具备**近站区**接入与**沿线**接入两种方式，并根据牵引电压等级（低压0.75-3.0kV，中压7.5-24kV），构建低压直流微电网与**含直流子网的**中压直流微电网。



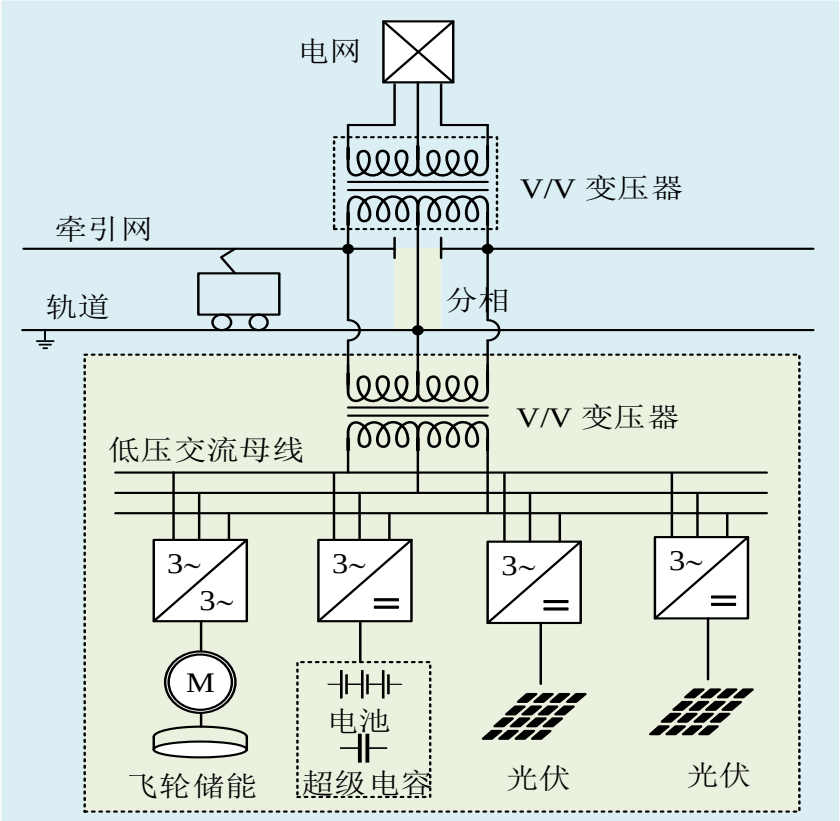
低压直流微网



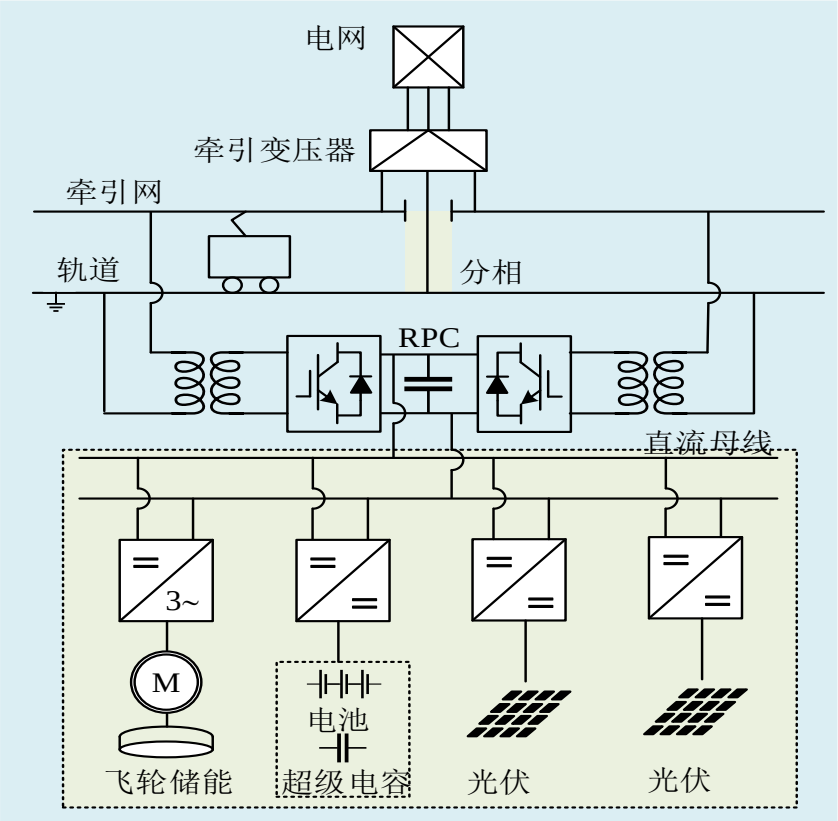
中压直流微网

4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

针对**分相交流牵引供电系统**，可利用V/v变压器构造额外交流母线或铁路功率调节器（RPC）的公共直流母线，分别构造**交流**微电网与**直流**微电网，实现光伏发电的**近站区接入**。



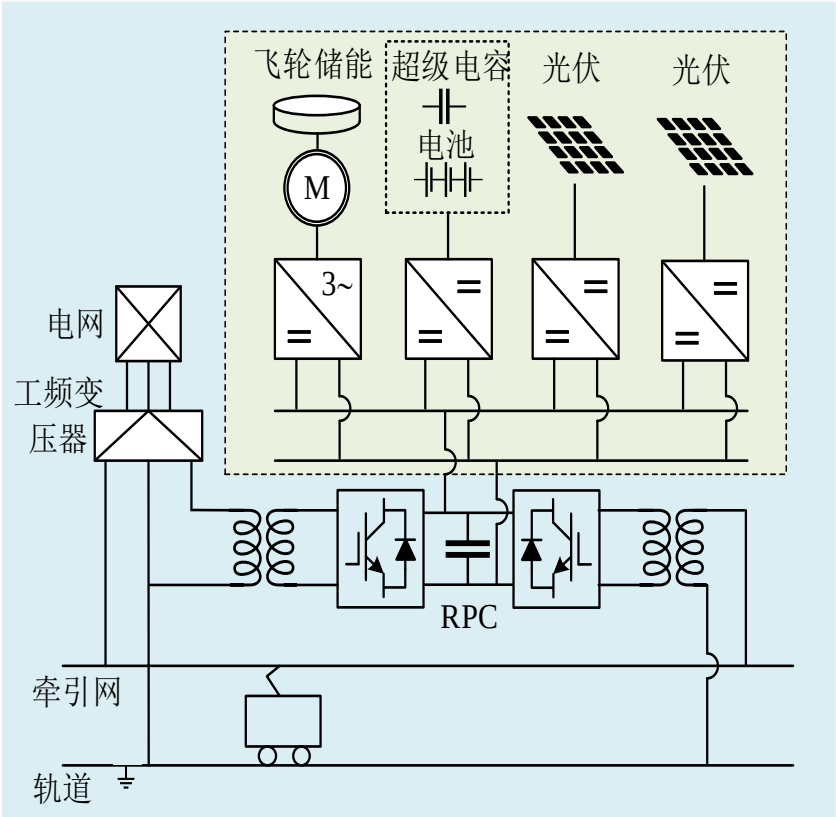
交流微网



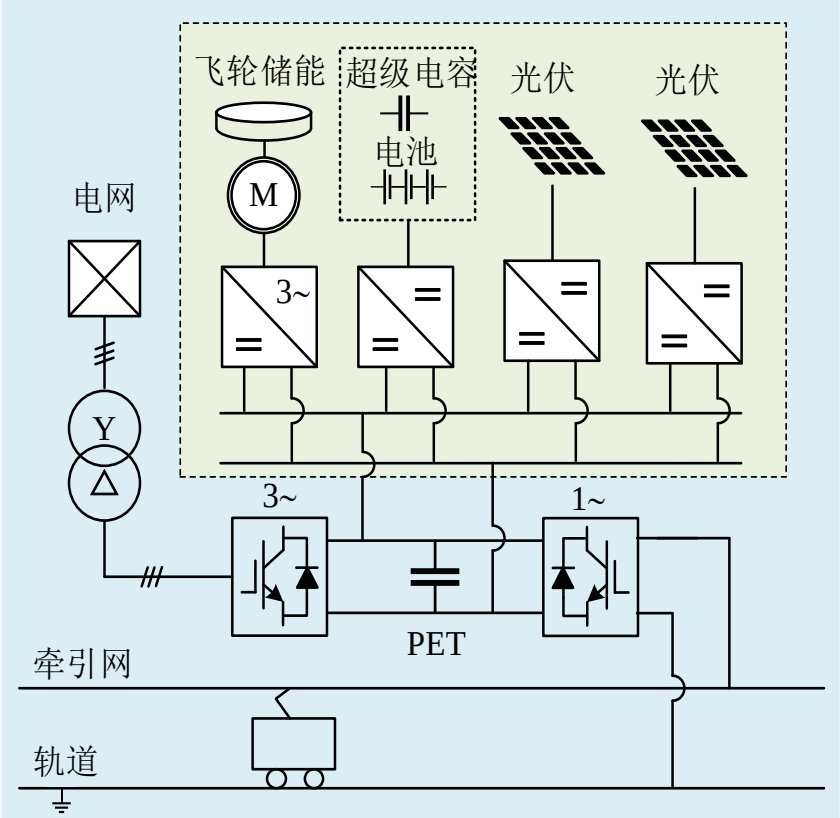
直流微网

4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

针对**同相交流牵引供电系统**，由于铁路功率调节器RPC和电力电子变压器PET均存在公共直流侧，可利用**公共直流端**构建直流微电网，实现光伏发电的**近站区接入**。



直流微网



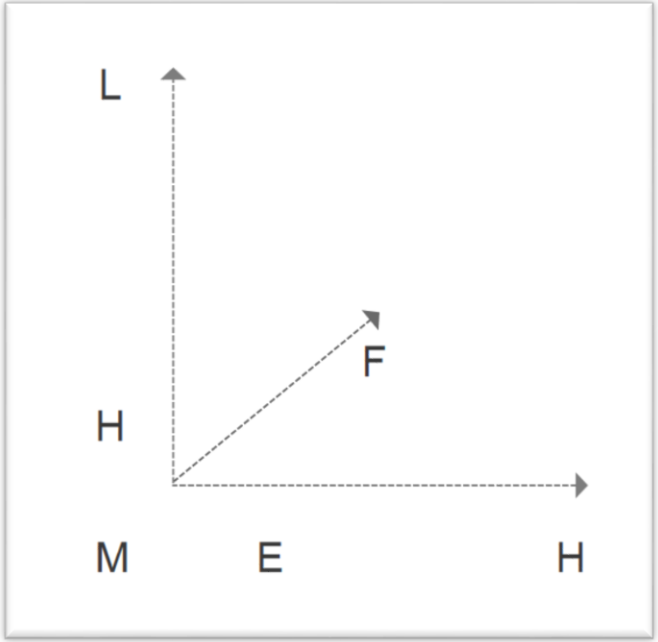
直流微网

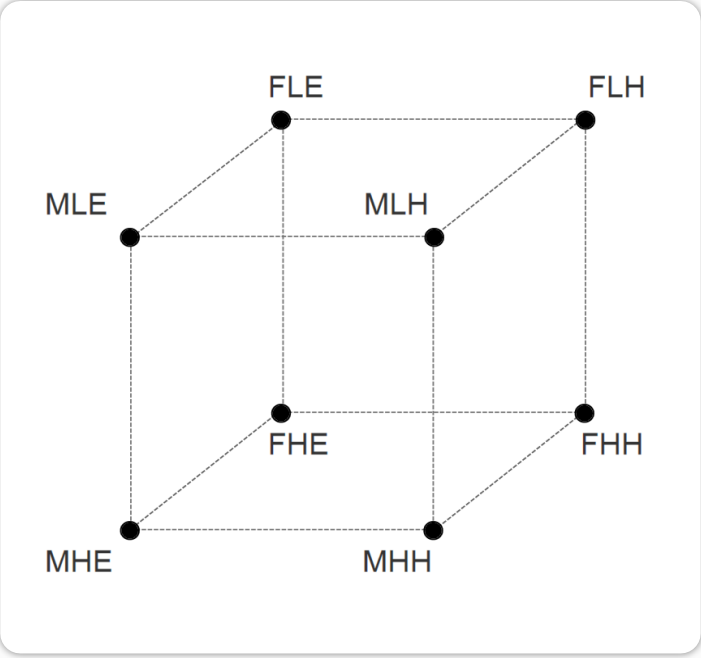
4.1 光储与轨道交通融合的解决方案

牵引供电类型	微网类型	系统实施	功率容量&方向	制动能量回收方式	并网位置
分相交流	交流	简单	中/双向	1. 回馈至电网	1. 近变电站区域
同相交流	直流	复杂	中/双向	1. 回馈至电网 2. 可供电至相邻站	1. 近变电站区域
低压直流	直流	简单	低/单向	1. 可供电至相邻站	1. 近变电站区域 2. 轨道交通沿线
中压直流	直流	复杂	高/双向	1. 回馈至电网 2. 可供电至相邻站	1. 近变电站区域 2. 轨道交通沿线

4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

考虑到大功率氢燃料电池动力系统在铁路机车车辆可能存在**不同场景应用**，根据场景基本要素（**氢能来源是否可移动**、**服务频率**以及**牵引方式**等）特征，设定**八大场景**。





大功率氢燃料电池动力系统场景转化的超立方体转化关系图

X坐标　E: 牵引方式电气与氢能混合化;　H: 牵引方式氢能化;

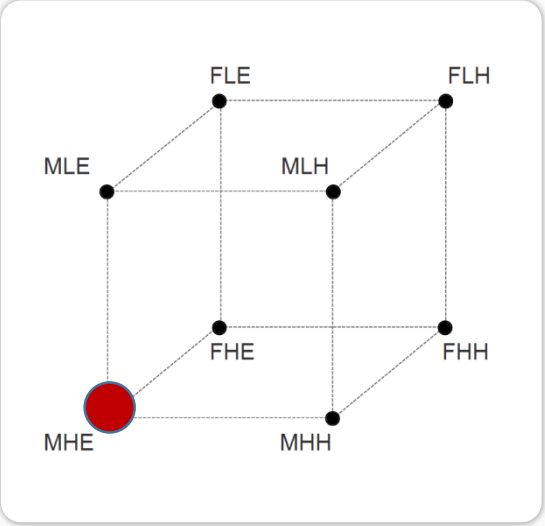
Y坐标　H: 列车的服务频率高;　L: 列车的服务频次低;

Z坐标　M: 氢能供给环能装置可更换轨道;　F: 固定的氢能供给轨道。

4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（1）MHE场景：可移动的氢能供给轨道(Movable Hydrogen Battery Track)，列车服务频次高(High Service Frequency)，牵引方式电气与氢能混合化(Electric and Hydrogen Hybrid Drive).

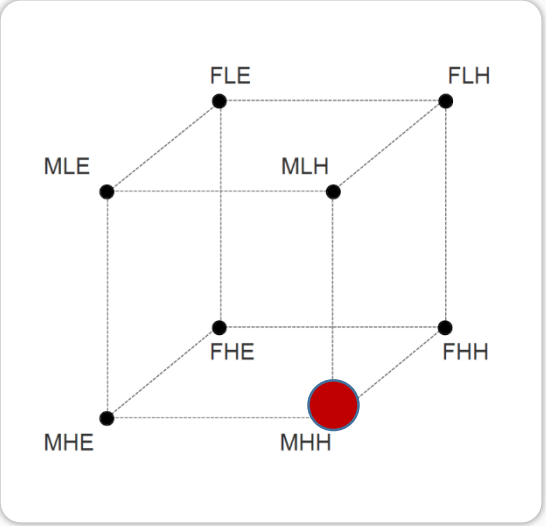
在列车轨道端架设由光伏制电驱动的**移动换能装置**，可为服务频次高的列车提供即时能量补充。**电气与氢能混合化**的驱动与供能方式可为列车**提供足够的能量**供应。此种场景的融合解决方案是：移动换电+轨道储能+主电网+高频服务。

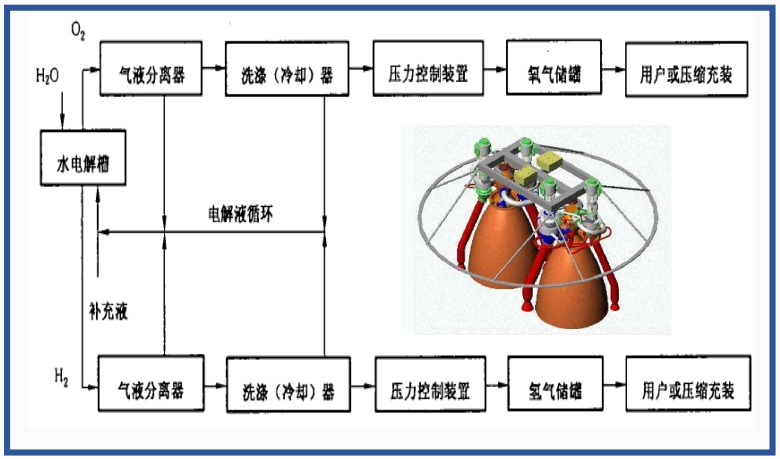


4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（2）MHH场景：可移动的氢能供给轨道(Movable Hydrogen Battery Track)，列车服务频次高(High Service Frequency)，牵引方式氢能化(Hydrogen Drive).

在**电网不可靠或难以架设**的地区，通过**密集建设**列车轨道端**移动换能装置**，能够保证列车在高频次服务条件下的用能需求。此场景在工程建设初期耗资较大，但可通过**合理布设**列车轨道端移动换能**装置的位置与规模**，对建设成本与运营效益进行优化。此种场景的融合解决方案是：移动换电+轨道储能+氢能驱动+高频服务。

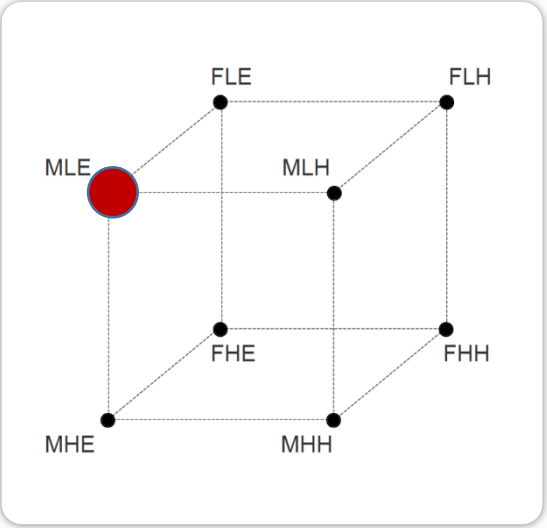


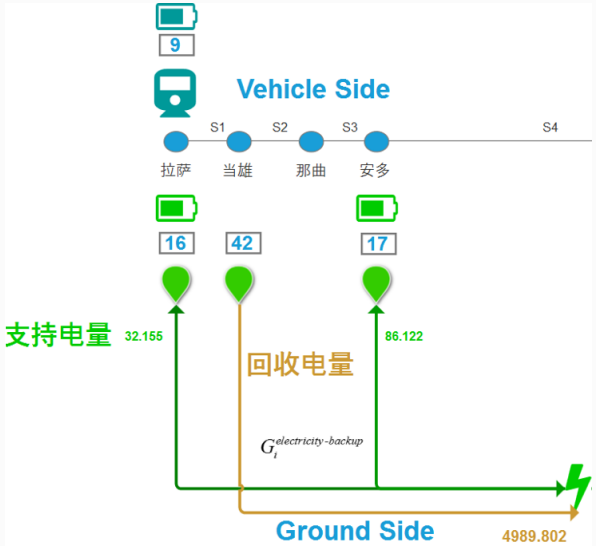


4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（3）MLE场景：可移动的氢能供给轨道(Movable Hydrogen Battery Track)，列车服务频次低(Low Service Frequency)，牵引方式电气与氢能混合化(Electric and Hydrogen Hybrid Drive).

在列车**服务频次较低**条件下，**电气与氢能混合化**的**驱动**与供能方式可为列车提供完备保障的能量供应。此种场景的融合解决方案是：移动换电+轨道储能+主电网+高频服务+自给自足。

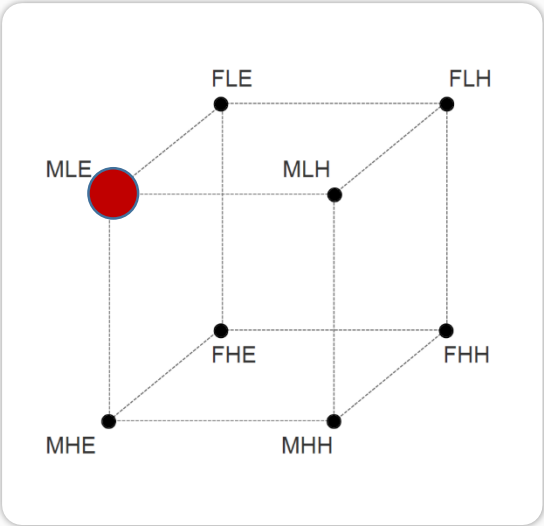


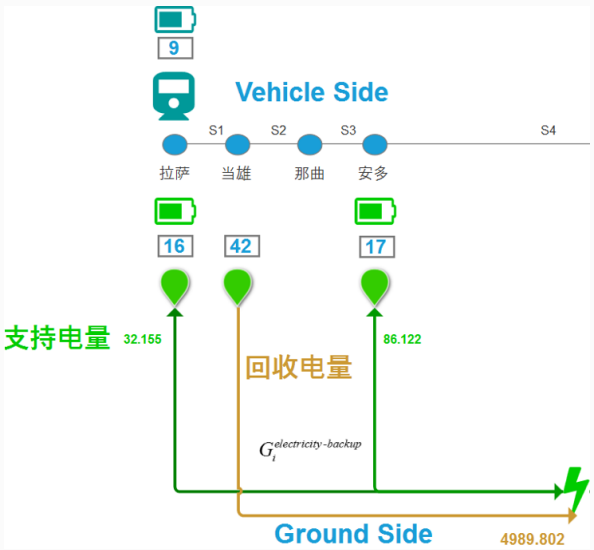


4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（4）MLH场景：可移动的氢能供给轨道(Movable Hydrogen Battery Track)，列车服务频次高(Low Service Frequency)，牵引方式氢能化(Hydrogen Drive).

在列车**服务频次较低**条件下，通过**建设更多**列车轨道端**移动换能**装置能够**保证服务频次较低列车的用能需求**。此种场景的融合解决方案是：移动换电+轨道储能+氢能驱动+自给自足。

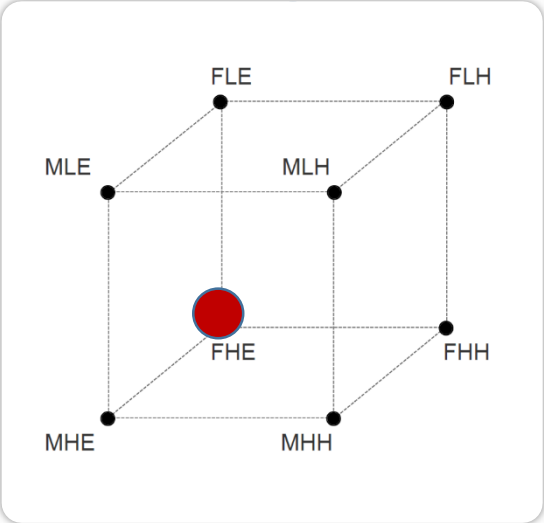


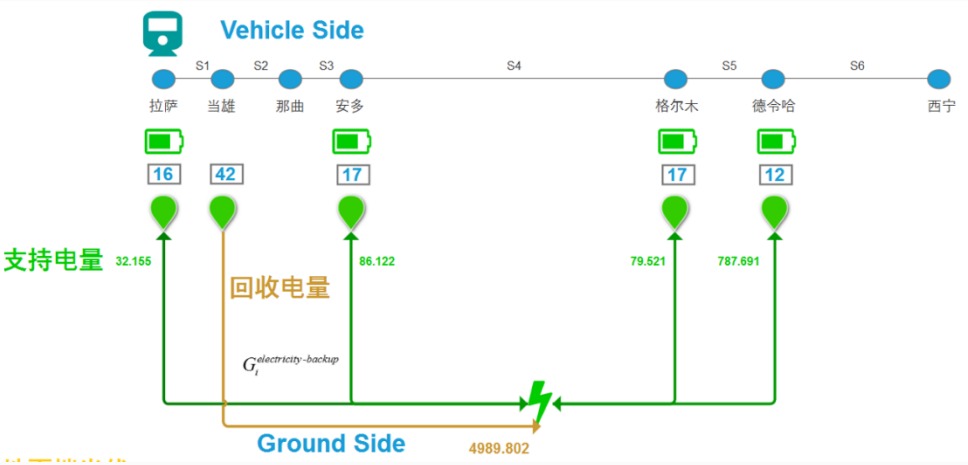


4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（5）FHE场景：氢能固定车载(Fixed Hydrogen Energy on Train)，列车服务频次高(High Service Frequency)，牵引方式电气与氢能混合化(Electric and Hydrogen Hybrid Drive).

在**氢能固定车载**条件下，由于可用能源有限，对于**高密度、长距离**运行车辆需要后备电能支持。列车的较长续航里程很大程度上**依赖混合能量系统**的保障。可靠的电网功能是列车高里程运行的保障条件。此种场景的融合解决方案是：固定车载+混合驱动+主电网+高频服务。

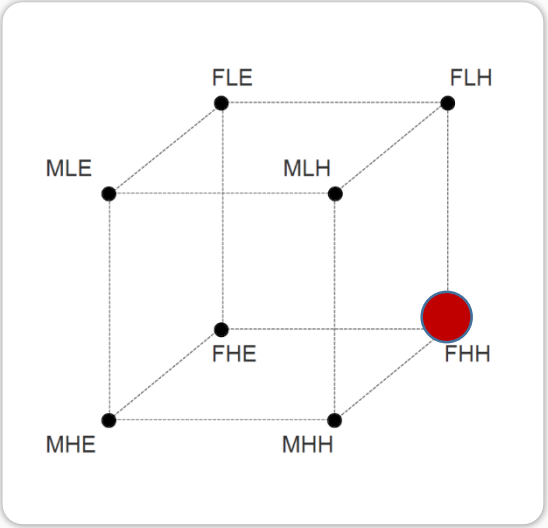




4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（6）FHH场景：氢能固定车载 (Fixed Hydrogen Energy on Train)，列车服务频次高(High Service Frequency)，牵引方式氢能化(Hydrogen Drive).

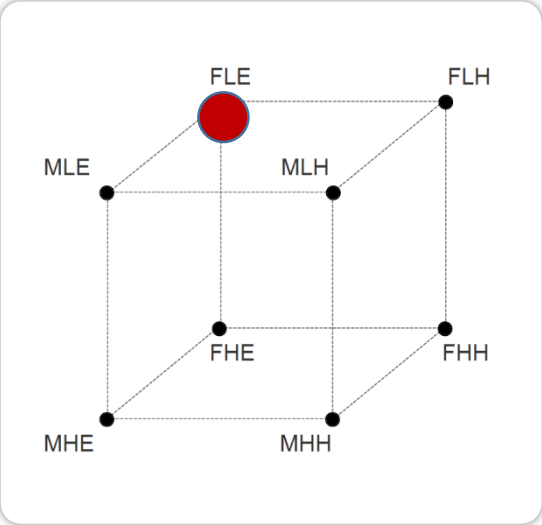
在氢能**固定车载**与氢能驱动**条件下**，列车只能**在保守续航能力范围内运行**，轨道列车在**高频服务下**具有一定的**运行风险**。此种场景的融合解决方案是：固定车载+氢能驱动+保守续航。

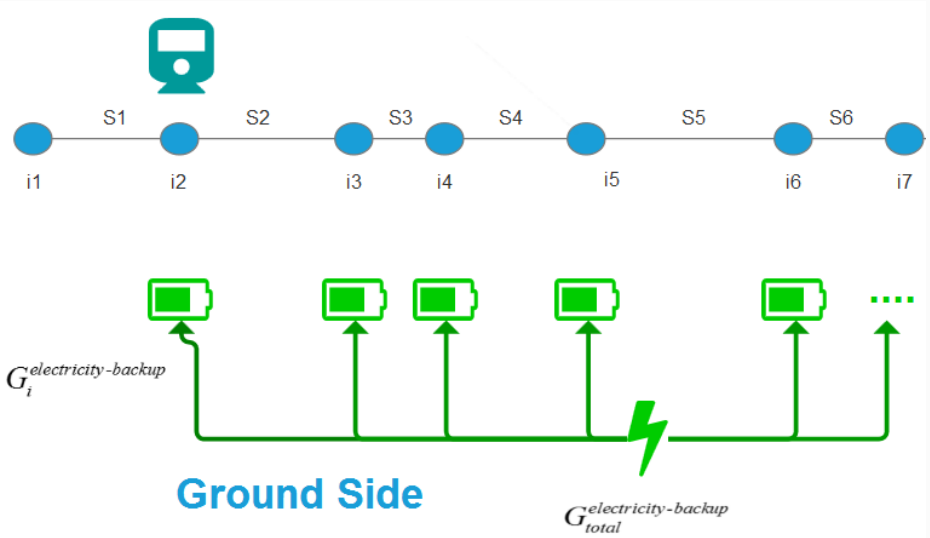


4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（7）FLE场景：氢能固定车载 (Fixed Hydrogen Energy on Train)，列车服务频次低(Low Service Frequency)，牵引方式电气与氢能混合化(Electric and Hydrogen Hybrid Drive).

在氢能**固定车载**与**混合能源驱动**条件下，列车能在电能保障下**延长续航范围**，低频服务下能够实现**更低运行成本**。此种场景的融合解决方案是：固定车载+氢能驱动+低频服务。

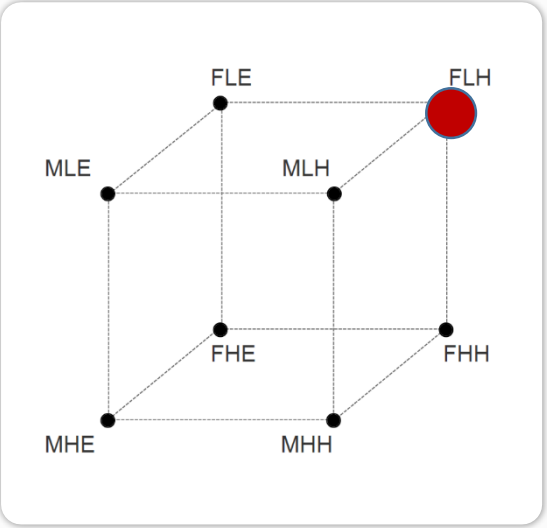


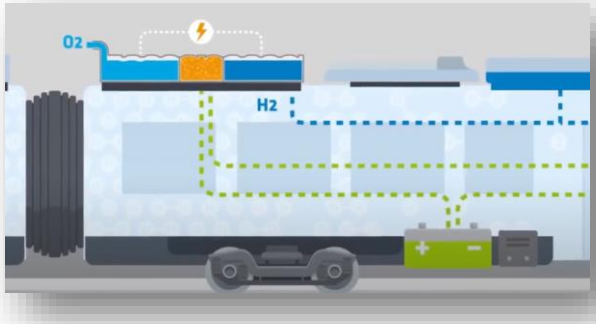


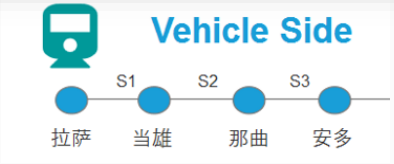
4.2 氢能与轨道交通融合的解决方案

（8）FLH场景：氢能固定车载(Fixed Hydrogen Energy on Train)，列车服务频次低(Low Service Frequency)，牵引方式氢能化(Hydrogen Drive).

在氢能**固定车载**与**氢能驱动条件下**，列车只能**在保守续航能力范围内**运行，低频服务下能够实现更低的运行成本。此种场景的融合解决方案是：固定车载+混合驱动+低频服务。







目录

1 能源与交通融合研究背景

2 能源与交通发展趋势及融合场景分析

3 能源与交通融合发展的可行性分析

4 能源与交通融合发展的解决方案

5 能源与交通融合应用的对比分析

6 基于我国光伏资源分布的融合演进路线

五、应用对比分析

技术成熟度	关注能源技术本身，是指新型清洁能源转换、存储、利用的技术水平与发展程度。
集成兼容度	关注系统结构方面，是指新型清洁能源装备、设施等与轨道交通车辆、站点、线路现有结构相互协调的程度。
需求匹配度	关注供需平衡方面，是指新型清洁能源本构属性及潜力对轨道交通车辆、站点、线路需求的满足程度。
应用经济性	关注整体效益方面，是指新型清洁能源的安装接入对现有轨道交通站点、线路等运营成本的影响。

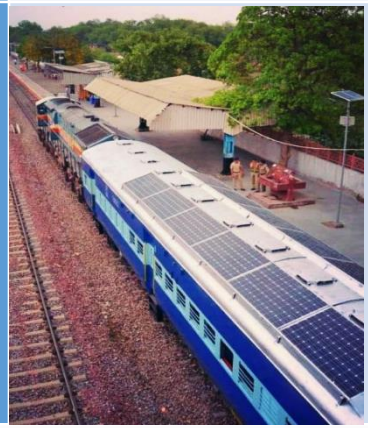
5.1 光伏在轨道交通中的应用对比分析

基于光伏系统与轨道交通的融合场景设想，基于交通侧光伏系统的安装场景、储能电池的使用类型以及列车自身用能类型三方面，对技术成熟度、集成兼容度、需求匹配度和应用经济性进行对比分析。

应用对比

光伏安装位置	储能电池类型	列车用能类型
路基光伏	飞轮储能	电动化轨道车辆
车载光伏	超级电容	非电动化轨道车辆
	锂电池	

5.1 光伏在轨道交通中的应用对比分析

	车载光伏	陆基光伏
技术成熟度	★★★★★ 安装固定方式复杂、转换效率适中	★★★★★ 安装便捷、转换效率适中
集成兼容度	★ 安装受车顶形状、安装角度、本构强度等因素限制	★★★★ 空间充足，集成方式灵活
需求匹配度	★ 车顶空间受限、难以满足用电需求	★★★★ 轨旁/屋顶空间充足、电力供给量大
应用经济性	★ 安装结构复杂、成本高、经济性差	★★★★ 安装成本低，降低系统外购电量
应用示例		

5.2 储能在轨道交通中的应用对比分析

	飞轮储能	超级电容	锂电池
技术成熟度	★★★★★ 已有相关结合案例	★★★★★ 安装方式丰富、转换效率高	★★★★ 技术还在逐渐完善中
集成兼容度	★★★ 空间、承重要求较高	★★★★ 安装受重量、成本制约	★★★★ 空间充足，集成可行性强
需求匹配度	★★★★ 电气化+轨道旁应用广泛	★★★★★ 短时间内提供巨大牵引力	★★★★★ 可平衡”源网荷”特性
应用经济性	★★★★★ 电气化+轨道旁经济性好	★★★★ 国产超容成本低，有竞争力	★★★★ 生命周期经济性有下降空间
应用示例			

5.3 氢能在轨道车辆中的应用对比分析

	非电动化轨道车辆	电动化轨道车辆
技术成熟度	★★★★ 发动机技术门槛高、转换效率适中	★★★★★ 燃料电池技术成熟、转换效率适中
集成兼容度	★★ 不需借助架空线供电，集成方式单一	★★★★ 氢光电互补架构，集成方式灵活
需求匹配度	★★★ 适用于低功率短程列车供能	★★★★ 适用于大功率远程列车供能
应用经济性	★★★ 短期成本较高，长期成本下降	★★★★ 短期成本较低
应用示例		

目录

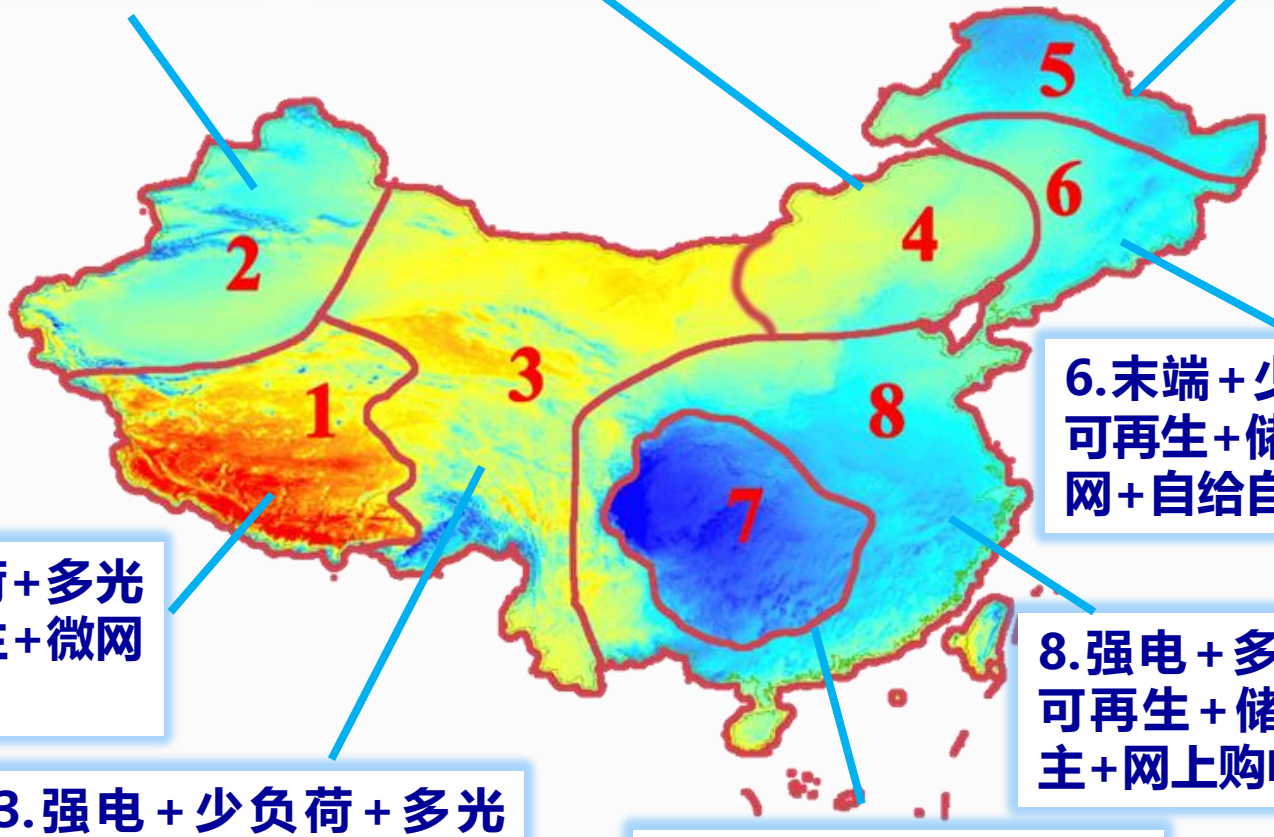
1	能源与交通融合研究背景
2	能源与交通发展趋势及融合场景分析
3	能源与交通融合发展的可行性分析
4	能源与交通融合发展的解决方案
5	能源与交通融合应用的对比分析
6	基于我国光伏资源分布的融合演进路线

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

2.末端+少负荷+少光可再生能源+储能+微网/电网+自给自足

4.强电+负荷多+多光可再生+储能+微网/电网+自给自足

5.无电+少负荷+少光内燃机+可再生+微网+自给自足



6.末端+少负荷+少光可再生+储能+微网/电网+自给自足

1.无电+少负荷+多光内燃机+可再生+微网+自给自足

8.强电+多负荷+少光可再生+储能+电网为主+网上购电

3.强电+少负荷+多光可再生+储能+微网+余电上网

7.强电+少负荷+少光可再生+储能+微网/电网+余电上网

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

投资收益测算

总投资：考虑光伏系统投资及储能投资

总收益：包括节省购电/油收益、上网售电收益和光伏补贴收益

回收年限(全国平均)：保守场景5.43年；基本场景4.37年；积极场景3.36年

		1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	全国总计
保守场景	总投资（亿元）	26.81	43.06	110.28	173.41	65.91	97.65	162.99	416.36	923.76
	总收益（亿元）	9.51	8.21	18.33	29.17	11.72	19.56	17.32	78.14	170.22
	收益投资比	0.35	0.19	0.17	0.17	0.18	0.20	0.11	0.19	0.18
	回收年限（年）	2.82	5.24	6.02	5.94	5.63	4.99	9.41	5.33	5.43
	减排量（万吨）	16.21	88.72	150.00	649.59	39.83	214.20	140.36	1085.66	2384.57
基本场景	总投资（亿元）	46.92	76.13	177.88	401.14	115.34	172.62	262.90	963.13	1824.35
	总收益（亿元）	23.81	15.63	36.65	94.88	50.22	41.97	34.63	229.00	417.58
	收益投资比	0.51	0.21	0.21	0.24	0.44	0.24	0.13	0.24	0.23
	回收年限（年）	1.97	4.87	4.85	4.23	2.30	4.11	7.59	4.21	4.37
	减排量（万吨）	27.81	146.89	203.68	1083.12	68.35	360.34	215.78	2841.13	4947.11
积极场景	总投资（亿元）	67.03	105.67	245.49	622.26	164.77	239.61	362.82	1494.02	2724.94
	总收益（亿元）	45.58	26.53	70.84	205.82	92.19	69.10	65.46	470.29	810.02
	收益投资比	0.68	0.25	0.29	0.33	0.56	0.29	0.18	0.31	0.30
	回收年限（年）	1.47	3.98	3.47	3.02	1.79	3.47	5.54	3.18	3.36
	减排量（万吨）	32.41	174.58	230.57	1274.01	79.67	448.64	251.66	4477.92	6969.46

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

综合考虑各模式区域内的地形越复杂度、区域经济效益指数等，得到**新模式下我国各区域内的铁路能源系统建设难易指数及经济效益指数。**

编号	场景	建设难易指数	经济效益指数
1	无电+少负荷+多光	★	★★★★★
2	末端+少负荷+多光	★★★	★★★★
3	强电+少负荷+多光	★★★	★★★★
4	强电+多负荷+多光	★★★★★	★★★★
5	无电+少负荷+少光	★★	★★★★
6	末端+少负荷+少光	★★★★	★★★
7	强电+少负荷+少光	★★★	★
8	强电+多负荷+少光	★★★	★★★

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

2021-2025：融合潜力测算

2025年，在保守开发场景下，**我国新能源铁路的用能自洽率可达15.6%，用电自洽率可达为19.5%**。可再生能源配合混合储能可提供部分有功出力，主要用能仍以电网供电为主。**节能减排效果显著，能效逐步提高**。

应用场景	新能源渗透率（%）								
	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	总计
保守场景	0.1	0.89	2.05	5.79	0.7	2.41	1.77	15.62	29.33
基本场景	0.2	1.04	2.08	8.76	1.5	2.80	1.92	22.61	40.91
积极场景	0.3	1.08	2.08	9.64	2.2	2.97	1.95	28.14	48.36

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

2026-2030：融合潜力测算

2030年，在基本开发场景下，**我国新能源铁路的用能自洽率为31.0%，用电自洽率为34.5%。**可再生能源配合混合储能可提供的有功出力进一步增多，剩余出力由电网补充。**节能减排取得大幅度进展，能效进一步提高。**

开发场景	新能源渗透率（%）								
	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	总计
保守场景	0.1	0.90	2.20	5.49	0.7	2.48	1.87	16.99	30.73
基本场景	0.2	1.02	2.23	8.48	1.5	2.81	2.00	22.90	41.14
积极场景	0.2	1.05	2.23	9.36	2.2	2.96	2.03	27.57	47.6

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

2030-2035：融合潜力测算

2035年，在积极开发场景下，**我国新能源铁路的用能自洽率为44.2%，用电自洽率为46.5%**。可再生能源配合混合储能可提供几乎一半的有功出力。**铁路交通向实现智能化、绿色化、高效化和环境友好性大踏步前进！**

开发场景	新能源渗透率（%）								
	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	总计
保守场景	0.2	0.92	2.39	5.34	1.7	2.61	2.01	18.61	33.78
基本场景	0.4	1.02	2.42	8.22	2.4	2.89	2.12	23.68	43.15
积极场景	0.6	1.05	2.42	9.14	4.1	3.02	2.14	27.69	50.16

六、基于光伏资源分布的融合演进路线

2021年-2035年 铁路新能源融合系统演进路线图

		2021-2025	2026-2030	2031-2035
总体目标		新能源渗透率不低于10%	新能源渗透率不低于30%	新能源渗透率不低于50%
演化路径	区域	优先开发第3、4号强电+多光区域	深入推进第1、2号少负荷+多光区域	逐步推动第5~8号少光区域
	模式	可再生+储能+微网+余电上网 微网/电网+自给自足	可再生+储能+微网/电网+余电上网 可再生+微网+自给自足	可再生+储能+微网/电网+自给自足 可再生+储能+微网/电网+余电上网
	预期	用电自洽率：19.5% 用能自洽率：15.6% 减排：2384.57万吨	用电自洽率：34.5% 用能自洽率：31.0% 减排：4947.11万吨	用电自洽率：46.5% 用能自洽率：44.2% 减排：6969.46万吨

感谢各位专家，恳请提出宝贵意见