

# 燃料电池混合动力轨道车动力源分析与设计

白欢 刘沅明

株洲时代电子技术有限公司 湖南 株洲 412001

**【摘要】**：针对燃料电池动态响应慢，输出特性软，无法回收制动能量的问题，文章以氢燃料为主，锂电池为辅助动力源的混合动力轨道车动力源展开研究，结果表明氢燃料与锂电池动力源配置是合理的，具有可行性与经济性。

**【关键词】**：轨道车；氢燃料电池；锂电池；混合动力源

## 1 引言

随着我国新能源技术的发展，大功率燃料电池技术逐步取得重大突破，为在轨道交通领域大规模应用提供了支撑<sup>[1]</sup>。燃料电池自身动态响应慢，输出特性无法满足爬坡、紧急加速等急冲功率的要求，要辅以其它动力源进行弥补。文献<sup>[2]</sup>中，李维荣等基于有轨电车分析了氢燃料电池、动力电池、超级电容配置方案的可行性、经济性及实用性，辅助动力源采用超级电容与动力电池组合配置。

为充分发挥燃料电池加注快、续航里程长的优点，本文将锂电池作为辅助动力源应用在轨道工程机械领域，分析与设计轨道车混合动力源。

## 2 混合动力源性能分析

氢燃料电池发电供给整车牵引走行，不能进行回馈充电；氢燃料电池轨道车增加辅助动力源弥补输出特性软的缺点<sup>[2]</sup>，为了提高整车经济性能，混合动力轨道车将氢燃料电池与动力电池相组合，实现大功率输出，通过有效的动力传递路线实现节能。

### 2.1 氢燃料电池系统

燃料电池系统由储氢系统、燃料电池、供氢系统、散热系统及其附件等组成。氢燃料电堆模块内部发生化学反应后，经配电箱控制输出直流电，通过能量控制单元实现系统控制。燃料电池参数如表1所示。

表1 燃料电池模块参数

模块	项目	参数
单电堆模块	额定输出功率	100kW
	额定输出电流	134A
	输出电压范围	650~690VDC

储氢模块	氢气发电量/kg	15kwh
	单瓶储氢量	5kg

### 2.2 动力电池系统

动力电池系统主要由电箱、高压控制盒、电池管理系统等组成，具有过压、过流、过热、过载、短路等保护功能。锂电池具有能量密度高、充放电迅速、循环寿命长、绿色环保等优点，混合驱动轨道车采用锂动力电池，参数见下表2。

表2 动力电池单体参数

项目	参数
额定电压	2.3V
额定容量	20Ah
持续放电电流	158A
快速充电率	5C
循环寿命	20000次

单体电池所能输出的最大能量  $E_{b\max}$  及最大输出功率  $P_{b\max}$  为：

$$E_{b\max} = U_{i\max} \cdot C_b \cdot D_b \quad (1)$$

$$P_{b\max} = I_{\max} \cdot U_{i\max} \quad (2)$$

式(1)、(2)中： $U_{i\max}$ 为持续最大放电电流工作时的单体电压，取2.3V， $C_b$ 为单体电池额定容量， $D_b$ 为放电深度，取0.9； $I_{\max}$ 为最大持续放电电流158A，得出单体电池的最大输出能量为0.0414kW·h；最大输出功率为0.3634kW。

## 3 混合动力源控制原理及配置

燃料电池系统在加氢站实现能量补给，在燃料电池电堆模块中进行化学反应，输出直流电，经配电箱将直流电变换

成中间电压，经牵引逆变器逆变成VVVF交流电，控制牵引电机输出扭矩。动力电池系统输出直流电与配电箱输出直流电并联，供给牵引逆变器。牵引过程中将燃料电池多余的电能输出给动力电池，实现充电；在制动时，牵引电机工作在发电状态，经牵引逆变器整流后供给动力电池充电。

### 3.1 牵引特性曲线

该动力源所适用的轨道车基本参数如下表3所示。

表3 轨道车基本参数

项目	参数
整备重量	约60t
通过最大坡度	35‰
轮径	840mm
通过最小曲线半径	145m

根据轨道车基本参数及牵引计算公式，计算出轨道车在恒力阶段0-15.2km/h牵引时，轮轴牵引力为62kN；恒功阶段在15.2-120km/h牵引时，轮轴牵引功率为持续制：257kW。得出牵引特性曲线及不同坡道下的阻力曲线如下图1所示。

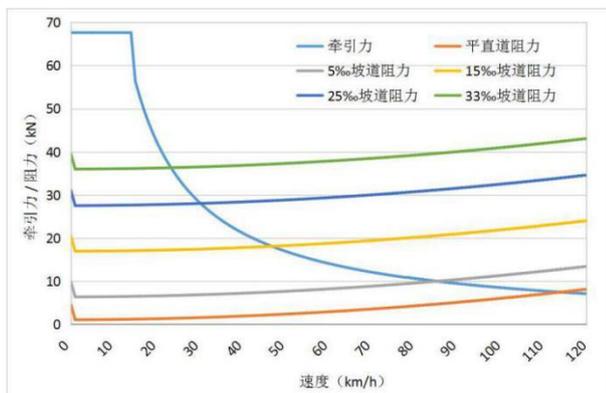


图1 牵引特性曲线

### 3.2 动力传递路线

混合动力轨道车根据工况将动力传递路线分为三种：

(1) 低功率牵引工况（平直道）下仅采用氢燃料电池供电，同时向锂电池进行充电。

(2) 大功率牵引工况（爬坡等）下采用氢燃料电池和动力电池混合供电，共同发挥牵引功率；

(3) 再生制动工况下，牵引电机将动能转换成电能，回馈充电。

### 3.3 动力源功率分配

混合动力源以动力电池进行虚拟总容量计算。根据轨道车发挥的轮轴功率P，求解虚拟总容量 $C_v$  [3]。

$$C_v = \sum (I \cdot t) = \sum \left[ \frac{P}{\eta} \cdot t \cdot 10^3 / U \right] \quad (3)$$

$$\eta = \eta_C \cdot \eta_N \cdot \eta_Q \quad (4)$$

式(3)、(4)中： $t$ 为放电时间； $\eta$ 为机车电传动功率； $\eta_C$ 为齿轮传动效率，取0.975； $\eta_N$ 为逆变器效率，取0.98； $\eta_Q$ 为牵引电机效率。

混合动力轨道车最高运行速度 $v_{max} = 120 \text{ km/h}$ ，续航里程 $l \geq 500 \text{ km}$ ，在线路具体参数及不同工况下，根据轮周功率及效率，可以计算动力源虚拟总容量 $C = 1694.7 \text{ Ah}$ 。

基于动力源虚拟总容量，通过以下步骤来确定FC和Bat的容量[4]：

(1) 确定线路条件： $v_{max} = 120 \text{ km/h}$ ， $l \geq 500 \text{ km}$ ，满足3个天窗作业时间 $h_w = 3 \times 3 = 9 \text{ h}$ ；

(2) 确定能量分配规则：为充分发挥氢动力加氢快，运行里程长的优势，氢燃料电池贡献率为90%；动力电池在氢燃料电池燃料耗尽，或故障等紧急牵引工况，或对氢燃料电池预热时使用，贡献率为10%。行车过程中混合动力进行，发挥氢燃料电池优势的同时，向动力电池充电；

(3) 对混合动力轨道车走行模拟，综合不同工况下的容量进行验证，确定平衡整个走行区间的电量作为氢燃料电池容量；

(4) 动力电池考虑最大充放电功率、放电量和寿命研究动力电池容量，确定动力电池容量。

综合动力源特性、线路工况、里程、能量分配规则确定混合动力轨道车的配置方案如下表3所示。

表3 配置方案表

动力源	输出功率	电池容量	容量	电压等级	组合方式
氢燃料电池	200kW	1600Ah (虚拟)	1200kWh	750V	(8瓶×5kg) ×2套电堆
动力电池	150kW	160Ah	100kWh	724.5V	8P9S×35个

#### 4 结语

混合动力源以氢燃料为主，彻底实现了“零排放”，相比动力电池直接发挥了加注快、运行里程长的显著优势，有效摆脱了动力电池充电速度和寿命的限制。利用该动力源配

置方案，可降低燃油成本，实现脱碳，采用模块化、平台化设计，可为同类轨道车动力系统方案配置提供参考，保证动力系统的普适性和维护便捷性，为我国新能源在轨道交通领域的广泛应用奠定坚实基础。

#### 参考文献：

- [1] 侯明,衣宝廉.燃料电池技术发展现状与展望[J].电化学,2012,18(01):1-13.
- [2] 陈维荣,张国瑞,孟翔,卜庆元,李奇.燃料电池混合动力有轨电车动力性分析与设计[J].西南交通大学学报,2017,52(01):1-8.
- [3] 杜玉峰,刘伟.地铁电动工程车牵引蓄电池参数的确定[J].电力机车与城轨车辆, 2004(07):36-37 69.
- [4] 小川賢一,金祥林.日本新型燃料电池混合动力试验电动车辆[J].国外机车车辆工艺,2021(01):13-15+30

#### 作者简介：

白欢（1993年1月），男，助理工程师，株洲时代电子技术有限公司，单位邮编：412007，研究方向：轨道工程机械电气系统研发与应用。