

研  
究  
开  
发

## 锂离子电池在铁路客车上的应用研究

苑丰彪, 杨 君

(唐山轨道客车有限责任公司 研发中心, 河北 唐山 063035)



作者简介: 苑丰彪(1965-), 男, 高级工程师, 现从事轨道客车电气系统技术管理工作。

**摘 要:** 对铁路客车的供电制式、供电参数进行了分析, 对3种蓄电池的性能进行了比较, 提出了锂离子电池的优点, 并对锂离子电池应用在铁路客车供电系统的方案进行了研究与探讨。

**关键词:** 铁路客车; 锂离子蓄电池; 供电; 蓄电池

**中图分类号:** TM912; U266.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)03-0023-05

## Application Studies of Li-ion Battery in Railway Passenger-cars

YUANFeng-biao, YANG Jun

(R&amp;D Center, CSR Tangshan Railway Vehicle Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China)

**Abstract:** Power supply system and parameters of railway passenger-cars were analyzed. Performances of three types of batteries were compared and the advantages of Li-ion battery were indicated. Moreover, application schemes of Li-ion battery for railway passenger-cars power supply system were studied and discussed.

**Key words:** railway passenger-car; Li-ion battery; power supply; battery

## 0 引言

锂离子电池是20世纪开发成功的新型高能电池。锂离子电池的研究始于20世纪80年代, 90年代进入产业化阶段, 并飞速发展。锂离子电池由于比能量高、体积小、无维护、环境友好而受到各行业的青睐, 正逐步从手机、笔记本电脑的应用走向电动自行车、电动汽车等。随着技术进步和新能源产业的发展, 大容量锂离子电池技术和产业发展非常迅猛, 已经成为国际上大容量电池的主流。

中国铁路事业飞速发展, 从早期的22型车发展到现在的高速动车组, 但铁路客车的蓄电池仍然没有实质进步, 沿用着铅酸蓄电池和镉镍碱性蓄电池, 该蓄电池含有的重金属会给环境带来很大危害, 蓄电池的生产、使用和销毁过程中都会产生大量重金属铅、镉等离子, 这种重金属离子不仅严重破坏生态环境, 而且能通过水、空气和食物进入人体内, 导致人的健康状况恶化。寻找一种可替代镉镍碱性蓄电池的环保电

池是非常必要的, 锂离子电池作为首选, 将是铁路客车电池系统的一次革命, 对保护环境、节约资源意义重大。

## 1 铁路客车供电及蓄电池

## 1.1 轴驱发电方式

早期B型车的供电制式为直流48 V, 由KFT-1或KFT-2型感应子发电机、48 V蓄电池组构成, 发电机与蓄电池并联为全车的直流负载供电。车辆所使用的蓄电池早期为铅酸蓄电池(TG350、TG450、TG540), 现多为碱性镉镍蓄电池(GN系列)。

## 1.2 发电车供电

发电车设3台柴油发电机组, 总装机容量为900 kW, 供电制式为AC400 V三相四线制50 Hz, 分二路向列车供电。发电车供客用电负载为AC380 V, 只有少量的控制设备为直流负载。蓄电池作为应急电源向直流负载供电, 电池为48 V、60 A·h铅酸蓄电池。

## 1.3 电力机车供电

电力机车供电采用集中变流分散整流的方式, 电力机车的列车辅助供电装置将受电弓接受的25 kV单相

收稿日期: 2010-11-05; 收修改稿日期: 2011-03-04

高压交流电降压、整流、滤波成 600 V 直流电向空调客车供电。600 V 直流电送入空调逆变电源装置(简称逆变器)及 DC 110 V 电源装置(简称充电器)。空调逆变电源将 600 V 直流电逆变成三相 50 Hz 交流电,向空调装置、伴热等三相交流用电负载供电。DC 110 V 供电装置将 600 V 直流电转换成 DC 110 V 直流电,给蓄电池组充电的同时向照明、供电控制等负载供电。由于电气化区段每隔 50 km 左右便有一个分相区(不同变压器之间换相)即无电区,DC 600 V 电源装置在过分相区时停止输出,因此逆变器也没有三相交流输出。过分相区时,照明、控制由安装在车下的蓄电池供电。电池为 110 V、120 A·h 中倍率碱性电池。

#### 1.4 高速动车组供电

现代高速动车组大多为动力分散型电动车组,动车组的控制、照明、紧急通风采用直流供电,列车运行时,充电机作为主要直流电源,向蓄电池充电的同时向直流负载供电。动车组在车库内或辅助交流供电系统故障情况下,蓄电池作为直流供电的电源设备,确保向重要负载供电。蓄电池为 110 V、320 A·h 中倍率碱性电池。

## 2 蓄电池工作原理

蓄电池是一种储能装置,充电时将电能转变成化学能储存起来,而在放电时将化学能转变为电能。电池种类不同,工作原理不同。

### 2.1 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池放电的化学反应是依靠正极板活性物质(二氧化铅和铅)和负极板活性物质(海绵状纯铅)在电解液(稀硫酸溶液)的作用下进行。

电池反应:  $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{HSO}_4^- = 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

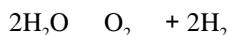
铅酸蓄电池充电过程中存在水分解反应,当充电到 70% 时,正极开始析出氧气,充电到 90% 时负极开始析出氢气。

### 2.2 镉镍蓄电池

镉镍蓄电池是一种在充电时将电能转变成化学能储存起来,而在放电时将化学能转变为电能的装置。充放电时,蓄电池正负极上发生氧化还原反应,其电化学反应方程式如下:



由蓄电池反应方程式可知,蓄电池在充放电时,理论上不消耗电解液,但烧结正负极板具有较多的孔,具有吸收或释放水的特性,充电时释放水,使电解液液面升高,放电时吸收水,使电解液液面下降,同时蓄电池的隔膜具有极高的吸液能力。因此,蓄电池在充放电过程中,电解液液面变化很大(气室较小的蓄电池,全放电态时只有很少的游离电解液),在充电后期(或过放电时),有部分水被电解,产生氧气和氢气。其反应方程式如下:



### 2.3 锂离子电池

锂离子电池主要由正极、负极、电解液以及隔膜构成。电池的负极是碳素材料,如石墨等。正极则是含锂的过渡金属氧化物及其掺杂化合物,如  $\text{LiCOO}$ 、 $\text{LiMnO}$  等。电解液主要由有机溶剂和无机锂盐组成,

锂离子电池在充电时正极材料中的  $\text{Li}^+$  从正极脱离,穿过隔膜向负极方向迁移,在负极上捕获一个电子被还原为  $\text{Li}$  并存储于层状结构的石墨中;放电时在负极中  $\text{Li}$  会失去一个电子而成为  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Li}^+$  穿过隔膜向正极方向迁移并存储于正极材料中。在充放电过程中,  $\text{Li}^+$  在正负极间来回迁移,如图 1 所示。

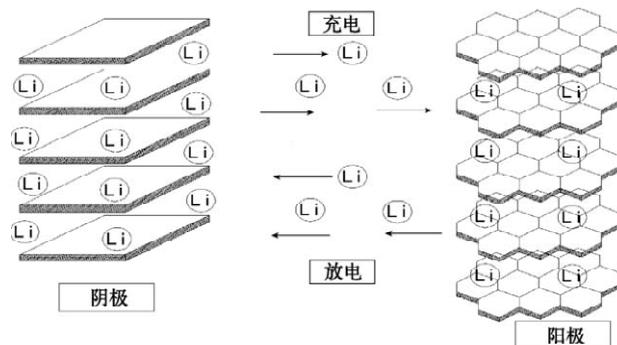


图 1 锂离子电池的工作原理示意图

电池的充电反应为:



放电过程的反应为:



式中: M 为 Co, Ni, Fe, W 等

## 3 蓄电池性能比较

目前,镉镍电池系列中指标达到 IEC 60623 标准,性能最好的是超高倍率全烧结式镉镍电池,锂离子电池具有代表性的是磷酸铁锂电池,具有性能稳定、放电性能好、安全、环保等优点。表 1 是 40 A·h 的超高倍率全烧结式镉镍电池和 40 A·h 锂离子电池性能比较表。

### 3.1 质量

锂离子电池质量比能量为

$$40 \times 3.2 / 1.2 = 107 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$$

镉镍电池质量比能量为

$$40 \times 1.2 / 1.5 = 32 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$$

同容量锂离子电池的质量只有镉镍电池的 1/3 左右。

### 3.2 体积

锂离子电池体积比能量为

$$40 \times 3.2 / 0.32 \times 1.01 \times 1.92 = 206.3 \text{ W} \cdot \text{h/dm}^3$$

镉镍电池体积比能量为

$$40 \times 1.2 / 0.36 \times 0.81 \times 2.31 = 71.2 \text{ W} \cdot \text{h/dm}^3$$

锂离子电池的体积也只有镉镍电池的 1/3 左右。

### 3.3 放电性能

低温放电性能是考核蓄电池的重要指标(从性能

比较表 1 可看出)

表 1 镉镍电池和锂离子电池性能比较

性能项目	超高倍率全烧结式镉镍电池	锂离子电池	
标称电压	1.2 V/只	3.2V/只	
额定容量 /A·h	40	40	
外形尺寸 /mm	49 × 81.5 × 244	32 × 101 × 192	
最大质量 /kg	1.5	1.2	
常温放电性能	8 A 放电: 放电容量 40 A·h	8A 放电: 放电容量 46.7 A·h	
	40 A 放电: 放电容量 40 A·h	40A 放电: 放电容量 45.8 A·h	
	200 A 放电: 放电容量 33 A·h	200A 放电: 放电容量 42.7 A·h	
	320A 放电: 放电容量 18.7 A·h	300A 放电: 放电容量 39.4 A·h	
	8 A 放电: 放电容量 32 A·h	8 A 放电: 放电容量 40 A·h	
	40 A 放电: 放电容量 23 A·h	40 A 放电: 放电容量 38.9 A·h	
低温 - 18 放电性能	200 A 放电: 放电容量 13 A·h	120 A 放电: 放电容量 39.9 A·h	
	环保	镉镍电池具有镉重金属污染, 对人体有害	锂离子电池所用材料都对人体无害, 属于环保型绿色电源
	使用维护	工作时会有碱雾和爬碱造成蓄电池盖上经常有白色碳酸盐结晶, 要经常擦拭保持干净 每 3 个月给电池添加蒸馏水或纯净水 要求电池电解液面在规定的范围内, 当液面降至最低液面线以下时, 应在充电结束的 1h 内补加蒸馏水至液面上限 定期检查气塞是否通气并清洗和更换电池气塞 定期进行充放电检查电池容量	电池密封不需要像镉镍电池那样维护 贮藏或不使用的情况下, 定期进行充放电循环检查电池容量

低温-18 工况下, 以 $0.2C_5$ 放电, 镉镍电池只放到额定容量的80%, 锂离子电池可放到额定容量的100%。以 $1C_5$ 放电, 镉镍电池只放到额定容量的57%, 锂离子电池可放到额定容量的97%。以 $5C_5$ 放电, 镉镍电池只放到额定容量的32%, 锂离子电池可放到额定容量的99%。

低温不同倍率放电性能, 锂离子电池大大优于镉镍电池。

### 3.4 环保

锂离子电池的负极是嵌锂碳材料, 没有毒性, 正极是锂的过渡金属氧化物, 毒性很小。同时电池密封性很好, 在使用过程中没有气体放出, 是一种无毒无污染的绿色环保电池。镉镍电池中有镉重金属, 易对环境造成污染。

### 3.5 维护性

镉镍电池使用过程中需要经常维护, 定期添加蒸馏水, 锂离子电池不需要定期维护。

### 3.6 安全性

从蓄电池的工作原理可知: 镉镍蓄电池充放电过程中电化学反应会析出氢气和氧气, 需要强制通风和自然通风。

根据EN 50272-2:2001《蓄电池和安装蓄电池的安全要求》, 当气体排放到周围环境中时, 如果氧含量超过空气中含量的4%, 则会产生爆炸性混合气体。蓄电池箱通风有最小空气流量要求, 如果自然通风不能确保通风气流量, 应当通过强制通风来保证通风气流量, 所以镉镍蓄电池不适合在室内、车内等密闭空间使用。

锂离子电池充放电过程中无气体产生, 不需要通风环境, 可以用于任何场合。

随着制造工艺的进步和新材料的应用, 锂离子电池的安全性能得到了很大的提高。根据对锂离子电池的过充、过放、短路、挤压、高温(80、120 min)穿钉等安全性测试, 结果表明, 锂离子电池无起火、爆炸等严重的安全问题。

## 4 锂离子电池应用方案

随着电气化铁路的发展, 电力机车供电已成为现代普通铁路客车主要的供电模式。下面介绍电力机车供电客车和高速动车组2种锂离子电池应用方案。

### 4.1 电力机车供电客车锂离子电池应用研究

电力机车供电客车简称DC 600 V客车, 列车过分相区时, 蓄电池向客车照明、控制系统供电。

#### 4.1.1 中倍率镉镍碱性电池应用方案

##### 1) 蓄电池系统参数

电池类型	中倍率镉镍碱性电池
容量	120 A·h
电压	110 V
电池数量	78只
电池质量	546 kg
电池箱质量	2 × 200 kg=400 kg
安装方式	2个电池箱吊装于车下

##### 2) 充电特性

中倍率镉镍碱性电池充电机采用电压电流双闭环控制, 实现蓄电池恒流定压充电。蓄电池在电压低时采取恒流充电的方式, 在电压充到一定程度时采取恒压浮充的方式。限流充电值为 $0.2C_5$ 即24 A。蓄电池充电采用了温度补偿措施, 充电电流随环境温度变化而变化。

##### 3) 蓄电池组的放电性能

DC 600 V客车在20 环境中, 蓄电池的放电性能不低于表2的要求。

表2 蓄电池的放电性能

恒流放电电流 /A	放电终止电压 /V	最低放电时间
$0.2C_5$	78	5 h
$1C_5$	70.2	40 min
$2C_5$	70.2	10 min

### 4.1.2 锂离子电池应用方案

DC 600 V 客车电池系统采用锂离子电池,由独立的 25.6 V/40A·h 锂离子电池模块串并联组成 110 V/120A·h 电池组。

#### 1) 电池模块参数

长 × 宽 × 高	310 mm × 140 mm × 240 mm
质量	14.5 kg
额定电压	25.6 V
额定容量	40 A·h

#### 2) 锂离子电池组设计

电池组由 25.6 V/40A·h 模块 4 串 3 并组成,连接方式见图 2。

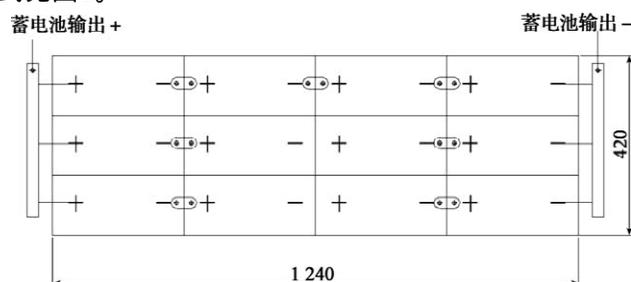


图 2 锂离子电池组连接方式

电池组安装在车下一个电池箱内。

容量	120 A·h
电压	110 V
电池模块数量	12 只
电池质量	174 kg
电池占用面积	1.24 × 0.42 = 0.52 m <sup>2</sup>
电池箱质量	200 kg
安装方式	电池箱吊装于车下

#### 3) 充电方式

采用恒流充电+恒压浮充电方式,以 0.2C<sub>5</sub>(24 A)恒流充电至电压 118 V 后,恒压充电至电流小于 0.2 A,充电截止,此充电方式和镉镍碱性电池充电方式基本相同。

锂离子电池充电不需要温度补偿,充电电流不随环境温度变化而变化,可以简化充电机的结构。

#### 4) 蓄电池组的放电性能

在 20 °C 环境中,锂离子电池蓄电池放电性能见表 3。

表 3 锂离子电池蓄电池放电性能

恒流放电电流 / A	放电终止电压 / V	最低放电时间
0.2C <sub>5</sub>	100	5 h
1C <sub>5</sub>	96	1 h
2C <sub>5</sub>	90	30 min

### 4.1.3 应用锂离子电池优越性

从上述方案可得出应用锂离子电池优越性如下:

质量小:应用锂离子电池质量比中倍率镉镍碱性电池质量减少 372 kg,锂离子电池质量是中倍率镉镍碱性电池质量的约三分之一。如果考虑减少 1 个蓄电池箱质量 200 kg,减少的总质量为 572 kg。

放电性能提高:比较表 2 和表 3,锂离子电池放电

时电压平稳,大电流放电时间是中倍率镉镍碱性电池的 3 倍,锂离子电池完全能满足 DC 600 V 客车的需要。

充电性能:锂离子电池的充电特性和镉镍碱性电池相同,恒流充电电流都为 24 A,完全可用既有充电机为锂离子电池充电。

### 4.2 高速动车组锂离子电池应用研究

#### 4.2.1 既有高速动车组蓄电池系统

新一代高速动车组的电气控制系统、照明、广播、紧急通风采用 DC 110 V 直流供电。动车组的 2 个牵引单元各设 1 套 DC 110 V 直流供电电源装置,包括充电机和蓄电池。直流电源分配如图 3。

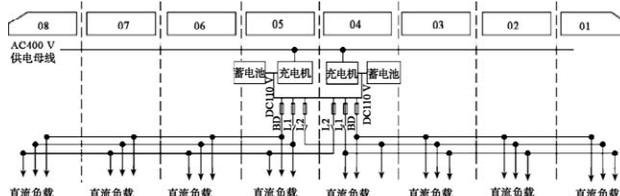


图 3 直流电源分配图

供电等级分为 2 级,一级为不间断供电干线“BD”,“BD”与蓄电池直接连接,另一级为母线供电 L1、L2, L1、L2 通过接触器与充电机和蓄电池连接。

高速动车组蓄电池的功能是保证一级负载的不间断供电,在动车组交流系统故障时,向车内的直流负载提供应急供电,供电工况见表 4。

表 4 供电工况

负载工况	功率 / kW	持续时间 / min	最低允许的电池电压 / V
所有负载	30	0~5	87
必要负载	15	6~60	84
应急照明	2.5	61~120	82
启动	15	121~125	84

#### 蓄电池系统参数:

电池类型	中倍率镉镍碱性电池
容量	320 A·h
电压	110 V
电池数量	168 只
电池质量	1 184 kg
安装方式	电池箱吊装于车下
充电方式	恒流充电+恒压浮充

### 4.2.2 锂离子电池应用方案

独立的 25.6V、40A·h 锂离子电池模块串并联组成 110 V、320 A·h 电池组。电池模块技术参数与 DC 600 V 客车用锂离子电池参数相同。

#### 1) 锂离子电池组设计

电池组由 25.6 V、40 A·h 模块 4 串 3 并组成,将 4 个电池模块串联组成 1 个子电池组,额定容量 40 A·h,额定电压 110 V。8 个子电池组并联组合成 1 个电池组,额定电压 110 V,额定容量 320A·h。

#### 锂离子电池组参数:

容量	320 A·h
----	---------

电压	110 V
电池模块数量	32只
电池质量	464 kg
安装方式	安装于车下电池箱内或车内电气柜内

## 2) 锂离子电池组的充电适应性

既有高速动车组中倍率镉镍碱性蓄电池充电分为恒流充电—浮充方式2个阶段。首先,使用最大充电电流 96 A 为电池充电,电压达到  $U_1$ 后保持在  $U_1$  恒定,充电电流减少,电流减少至 13 A 以下时,进入浮充电状态,电压将从  $U_1$  转为  $U_2$  恒压充电。

$$U_1 = 132.72 \text{ V}(20^\circ \text{C})$$

$$U_2 = 124.32 \text{ V}(20^\circ \text{C})$$

锂离子电池组充电分为恒流升压充电—浮充方式2个阶段,以  $0.2C_5$  (64 A) 充电至 118 V,电压达到 118 V 时恒压浮充电。此充电方式与中倍率镉镍碱性蓄电池的充电方式基本相同,通过微调既有高速动车组充电机的参数就可实现对锂离子电池组的充电。

## 3) 锂离子电池组的放电优越性

图4是 110 V 320 A·h 锂离子电池组的放电曲线,从电池组的放电曲线可以得出,锂离子电池组以  $0.2C_5$ 、 $0.5C_5$ 、 $1C_5$ 、 $2C_5$  放电时,放电曲线平稳,电压变化小,即使全部放电,最低电压也在 90 V 之上,完全满足表4中动车组对电池系统的要求。

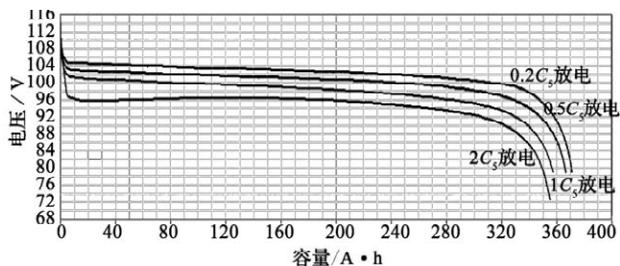


图4 电池组放电曲线

## 5 结语

本文对各类型蓄电池的性能进行了分析比较,对 DC 600 V 客车和高速动车组应用锂离子蓄电池的设计方案进行了研究与探讨,作为绿色环保能源的锂离子电池如果在中国铁路客车和高速动车组上普遍应用,将是中国铁路史的一次能源革命。

### 参考文献:

- [1] 郭炳焜,等. 锂离子电池[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2002.
- [2] 庞静,卢世刚. 锂离子电池高温反应及其影响因素[J]. 电池工业, 2004(9)
- [3] 唐致远,陈玉红,等. 锂离子电池安全性的研究[J]. 电池, 2006, 36(1): 7.
- [4] 郝德利,冯熙康,王伯良,等. 电动汽车用锂离子蓄电池的研究[J]. 电源技术, 2003, 27(S1)

(上接第5页) 驱动,功率可从 10 W 到 5 MW,转速从 50 r/min 到 10 000 r/min,调速范围宽,电机各相独立工作,可缺相运行,并具有再生制动功能,适合于频繁启停及正反转运动。这些优点决定了开关磁阻电机(SRM)非常适用于轨道交通领域,显示出越来越广阔的应用前景。

## 5 结语与展望

随着现代科学技术和交通领域的迅速发展,对驱动电机的要求越来越高,新技术、新思路、新材料、新工艺不断出现,大大推动了驱动电机在轨道交通领域的研究与应用。交流牵引电机正在向大功率、高扭矩、轻量化、模块化等方向发展,而且随着控制技术的发展,交流牵引电机已成为交通领域的主流产品。世界各国都在集中力量在交流传动领域继续攻关,力求占领技术高点,当前主要在永磁电机的高速动车牵引系统和磁悬浮高速牵引系统力求突破,增强竞争能力。我国经济发展要求节能低碳绿色环保,交流牵引电机及控制系统正符合这一要求。我们应紧紧跟随世界发

展的新技术新动态,通过自主创新,研发具有中国知识产权的大功率重载交流牵引电机及控制系统和高速动车的交流牵引电机及控制系统,提升我国企业的研发竞争能力,并带动相关产业技术进步,缩小与发达国家在轨道交通领域的差距,为我国轨道交通行业牵引电机和控制系统做出应有的贡献。

### 参考文献:

- [1] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究[J]. 机车电传动, 2010(5): 15-21.
- [4] 王渤洪,石清伶. 日本铁路机车车辆传动用永磁同步电动机的研发概况[J]. 机车电传动, 2010(5): 41-48.
- [5] 王渤洪. 创新的直接传动动力转向架 Syntegra[J]. 机车电传动, 2007(2): 44-51.
- [6] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [7] 黄成荣,等. 大功率交流传动机车驱动系统选型研究[J]. 机车电传动, 2010(4): 31-34.