纯电动汽车制动能量回收系统技术方案研究

1、研究制动能量回收的背景和意义

在电动汽车研究中，如何研制高性能储能设备、如何提高能量利用率，是所有研究中比较重要的两个方面。尽管蓄电池技术发展迅速，但受经济性、安全性等因素制约，难以在短时间内实现重大突破。因此如何提高电动汽车的能量利用率是一个非常关键的问题。

研究制动能量再生对提高电动汽车的能量利用率非常有意义。汽车在制动过程中，汽车的动能通过摩擦转化为热量消耗掉，大量的能量被浪费掉。据有关数据研究表明，在几种典型城市工况下，汽车制动时由摩擦制动消耗的能量占汽车总驱动能量的50%左右。

这对于改善汽车的能量利用效率、延长电动汽车的行驶里程具有重大意义。国外有关研究表明，在较频繁制动与起动的城市工况运行条件下，有效地回收制动能量，电动汽车大约可降低15%的能量消耗，可使电动汽车的行驶距离延长10%～30%。

因此，对电动汽车制动能量进行回收，意义如下：

· 在当前电动汽车电池储能技术没有重大突破的条件下，回收电动汽车制动能量可以提高电动汽车的能量利用率，增加电动汽车的行驶距离；

· 机械摩擦制动与电制动结合，可以减少机械摩擦制动器的磨损，延长制动器使用寿命，节约生产成本；

· 分担传统制动器部分制动强度，减少汽车在繁重工作条件下（例如长下坡）制动时产生的热量，降低了制动器温度，提高了制动系统抗热衰退的能力，提高了汽车的安全性和可靠性。

电动汽车再生制动的基本原理是：通过具有可逆作用的电动机/发电机来实现电动汽车动能和电能的转化。在汽车减速或制动时，可逆电机以发电机形式工作，汽车行驶的动能带动发电机将汽车动能转化为的电能并储存在储能器（蓄电池或超级电容）中；汽车起步或加速时，可逆电机以电动机形式工作，将储存在储能器中的电能转化为机械能给汽车。

2、国内外制动能量再生领域研究状况

美国Texas A&M大学：

Yimin Gao提出了评价制动能量回收效率的三种制动力分配控制策略，在此基础上建立了纯电动汽车的制动能量仿真实验模型，针对不同的制动强度进行了仿真实验。

YImin Gao和Mehrdad Ehsani提出了一种基于制动能量回收系统的纯电动汽车和混合动力汽车ABS系统的控制策略，通过精确设计电机制动力门限值，使得再生制动系统与ABS系统可兼容工作。

Wicks等建立了城市客车在市区行驶循环工况下的数学模型，研究再生制动系统的节能效果。

Hongwei Gao等提出了混合动力汽车基于开关磁阻电机再生制动的神经网络控制系统，并在行驶循环工况下进行了能量回收效率的分析。

Panagiotidis等建立了并联式混合动力汽车的再生制动模型，对再生制动的效果进行仿真计算和影响因素的分析比较。

Hoon Yeo采用Ⅰ曲线作为前后制动力分配策略，但是该分配策略加大了后轮制动器制动力，减小了电机制动力，从而降低了能量回收率，增大了前轮或后轮抱死的可能性。

近年来，世界各国汽车公司都推出了自己的能量回收系统，这些再生制动系统所采用的控制策略都比较先进：

丰田Prius轿车的ECB制动系统能够实现四轮单独控制，车辆的常规制动、紧急制动、制动能量回收以及防加速打滑控制等技术只需一套制动系统就可能实现；

本田Insight轿车的ESP系统同时集成了多种控制技术，可实现制动能量回收，车轮防抱死和防加速打滑控制等功能；

福特公司的Prodigy，日产的Tino和通用的Precept轿车均为新研制出的混合动力电动汽车，它们的制动系统都具有制动能量回收功能。

3、制动能量回收要解决的问题

目前汽车制动能量回收系统研究主要集中在回收制动能量方法、回收制动能量的效率、驱动电机与功率转换器的控制技术、再生制动控制策略、机电复合制动的协调等方面。目前急需解决的制动能量回收系统关键技术问题主要有四个方面：

· 制动稳定性问题

· 制动能量回收的充分性问题

· 制动踏板平稳性问题

· 符合制动协调兼容问题

4、制动能量回收要考虑的几个因素

电动汽车制动能量回收，是提高电动汽车能源效率的一个主要因素。制动能量回收要考虑到制动效果、制动能量分配、储能电池的特性、储存能量的利用等几个方面，然后确定制动储能系统如何实现。

4.1、储能电池的特点：

电动汽车制动时有时缓慢，有时很突然，这就要求储能电池能够迅速转换充放模式而对电池无害，而且能够高倍率充放电，以及时储存制动能量，也能将储能电池里的能量及时利用。

电动汽车主流的驱动电池是锂离子电池，锂离子电池的充放电原理是化学反应，它在充放电之间转换需要时间，不是随意的，不然就会对锂电池有害。因此，锂电池是不适合做制动能量回收储能电池的，更不适合用电动汽车的驱动电池简单地用作对制动能量回收的储存（目前此观点有争议）。目前只有超级电容具有高倍率充放电和迅速转换充放电模式的特点，是真正适合用作制动能量回收的储存部件。

4.2、储存能量的利用：

储存在制动能量回收储存部件里的能量，要赶在下次制动前及时释放出去，牵涉到放电分配，储能超级电容应该优先释放能量。超级电容的内阻比锂电池大，要使超级电容先放电，就得使超级电容储能部件的电压比驱动电池的电压高，当电动汽车停下来一定时间时，把超级电容里的能量馈送给锂电池。

4.3、制动效果和制动能量分配：

司机踩下刹车，用力不同，需要的制动效果不同，能量回收的程度不同。缓慢刹车，可以100%用电子刹车，停止驱动，把电机的能量馈送到超级电容里。如果刹车狠，就要在回收能量的同时，加上机械刹车，不同的用力，按照不同的比例分配。

从上面的分析中可以看出，电动汽车制动能量回收应该是这样一个过程：司机刹车，制动能量回收系统迅速回收能量，根据采集司机踩下制动器力量的大小，分配机械制动力的大小，以达到刹车效果。

回收的能量，通过DC-DC储存在超级电容做成的制动能量回收储存部件中。当车辆停下或熄火一定的时间后，通过放电DC-DC馈送到驱动电池中。如果车辆没有停，或着随后继续行驶，则首先由回收在超级电容里的能量，通过

放电DC-DC驱动电机，不够的能量，由驱动电池及时补上，随后由驱动电池继续供电。

5、制动能量再生系统结构方案

电动汽车制动能量再生系统主要包括两部分：电机再生制动部分和传统液压摩擦制动部分。再生制动虽然可以回收制动能量并向车轮提供部分制动力，但是电机再生制动效果受电机特性、电池、车速等诸多条件的限制，在紧急制动和高强度制动时不能独立完成制动要求，为了保证整车制动的安全性，在采用再生制动的同时，还要采用传统的液压摩擦制动作为辅助。

电动汽车再生制动系统主要由能量存储装置、可逆电机、馈能电路（电机控制器）组成。

本文所选电动汽车以锂离子电池组作为整车的动力源，锂离子电池组由20块电压3.65V的单体电池组成，其额定电压为72V，额定容量160Ah。

驱动电机采用四个直流轮毂电机，轮毂电机可以直接安装在车轮上，免掉了传统电动汽车减速器等传动系统，减轻了整车重量，节约了空间。

馈能电路采用二象限DC/DC变换器，不仅起到控制电机的作用，可以升高电机的充电电压，更好地回收制动能量。

本文选用的电动汽车驱动电机为永磁无刷直流电机。永磁无刷直流电机与其他类型的电机相比不仅使用寿命长，而且还具有启动转矩大、过载能力强、功率密度高、可靠性好以及维护费用低等特点，同时永磁无刷直流电机具有良好的机械特性，尤其适用于调速范围较宽的电力驱动系统。

6、再生制动时的电机机械特性分析

电动汽车制动时，可逆电机工作在发电状态时的条件是：使电机的转速大于理想空载转速，从而使感应电动势大于电枢回路电压，电机处于发电状态，使电动汽车的动能转换成电能反馈给蓄电池。直流电机的再生制动分为以下两种方式：

6.1正向再生制动

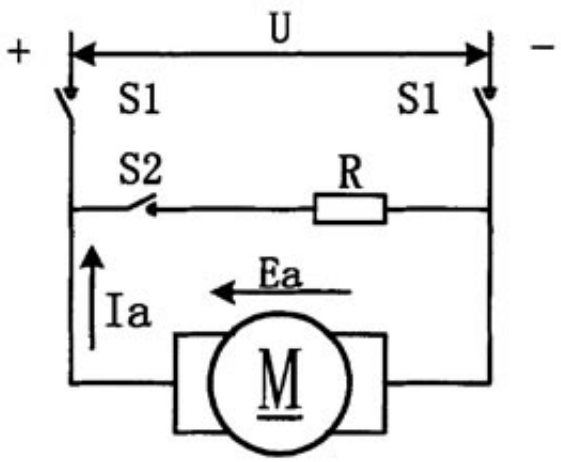

图 2.5 正向再生制动电路原理图

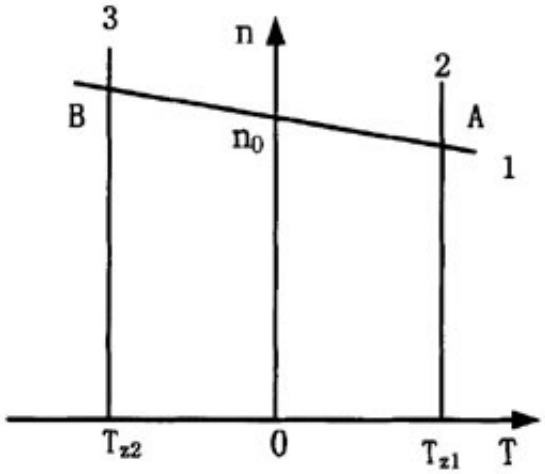

图 2.6 电机机械特性图

电机正向制动时的电路原理图和机械特性分别如图2.5和图2.6所示。电动汽车行驶在平直路面上时，电路开关S1闭合，电机两端为正向电压，电机工作在正转电动运行状态。此时，电机的机械特性曲线1与负载特性曲线2相交于A点，如图2.6所示。

7、电动汽车制动能量再生的约束条件

可回收的制动能量是电动汽车最重要的特性之一，但是电动汽车对制动能量回收受到诸多因素的制约，主要包括：

7.1行驶工况

行驶工况不同，汽车的制动频率不一样，从而可回收的制动能量不同。

7.2蓄电池

蓄电池的充电效率要受到蓄电池的SOC值、蓄电池温度以及充电电流的限制。蓄电池SOC值很高或者温度很高时都不能进行制动能量回收。充电电流过大时，会使蓄电池温度快速升高，也不能回收制动能量。

7.3电机因素

电机能够提供的制动转矩越大，能够回收的制动能量越多。电机的再生制动转矩受到发电功率和转速制约，当制动强度过大时，电机不能满足制动要求。

7.4控制策略

为了保证在制动安全的条件下实现能量充分回收，需要合理设计再生制动与机械制动的分配关系

7.5驱动型式

再生制动系统只能回收驱动轮上的制动能量。

为了尽可能多的回收制动能量，应综合考虑制动能量回收的约束条件，合理配置回收制动能量的方法、驱动电机及控制策略，以提高制动能量回收的效率。

8、电动汽车制动能量再生控制策略

电动汽车的再生制动是在原制动系统的基础上添加的，通过对两种制动力的重新匹配实现制动功能。在此需要解决的两个问题是：

一是如何在再生制动和机械摩擦（液压）制动之间分配所需的总制动力，以回收尽可能多的车辆的动能；

二是如何在前后轮轴上分配总制动力，以达到稳定的制动效果。

通常，再生制动只对驱动轮有效，为回收尽可能多的能量，必须控制牵引电机产生特定的制动力，同时，应控制机械制动系统满足由驾驶员给出的制动力命令。

目前主要有三种不同的制动能量再生控制策略：理想制动力分配控制策略、最佳制动能量回收控制策略、并联制动能量回收控制策略。

8.1理想制动力分配控制策略

根据制动踏板位置传感器或制动管路压力获得汽车的制动减速度，当制动减速度小于0.15g，制动力全部由前轮再生制动力提供，后轮上不施加制动力；当制动减速度大于0.15g时，施加在前后轮上的制动力将依据理想的制动力分布曲线进行分配。

其中，作用在前轮上的制动力可分为两部分：再生制动力和机械摩擦制动力，当前轮所需要的制动力小于电动机所能产生的最大值动力时，则前轮制动力全部由再生制动力提供；当前轮所需要的制动力大于电动机所能产生的最大制动力时，电机将会产生最大的制动力矩，同时，剩余的制动力将由机械制动系统予以补足。

理想制动力分配控制策略的优点是能充分利用地面附着条件，制动距离最短，制动时汽车方向稳定性好，同时能够回收较多的制动能量；缺点是需要精确检测前后轮法向载荷，以及一个智能化程度较高的控制器，控制系统复杂。

目前即使最先进的传统汽车都未能实现前后轮制动力的最优控制和分配，更何况又增加了额外的电机制动力，这使得协调控制难度更大。但相信随着传感技术及ABS控制技术的不断进步，未来该策略可能会得到实际应用。

8.2最佳制动能量回收控制策略

最佳能量回收控制策略，侧重于最大程度回收制动能量，其控制思想为：

8.2.1当车辆制动强度小于路面附着系数时，在满足相关制动法规及车轮不抱死情况下，前后轮制动力可以再一定范围内变化。在这种情况下，应尽可能多的利用前轮制动力。

8.2.2如果制动强度远远小于路面附着系数，再生制动力提供整车制动所需的全部制动力，常规制动系统不起作用。

8.2.3附着系数很大时，再生制动力达到最大值，剩余部分由机械制动系统提供；附着系数较小时，只用再生制动力制动。

最优能量回收控制策略理论上可以最大限度回收制动能量，但是它同时需要对再生制动力和机械制动力进行精确控制，控制系统复杂，制动稳定性差，实现它需要高智能化控制器，技术难度大，制造成本高，目前来看这一控制策略还没有实际应用的可能，只存在理论研究的价值。

8.3并联再生制动控制策略

并联再生制动控制策略也包括电机再生制动和机械摩擦制动系统，其机械摩擦制动力和传统汽车制动力一样按一定比例分配，同时在驱动轮上施加再生制动力，当制动强度小于0.1时，制动力全部由再生制动力提供，随着制动强度的增大，再生制动力也逐步增加，当制动强度大于0.7时，这时属于紧急制动，再生制动逐渐较小为零，伺候前后轮制动力分配按最优制动力曲线分配，缩短制动距离，提高制动安全性。

与前两种控制策略相比，尽管所回收的制动能量相对要小，但是该方法不需要控制机械制动力的大小，仅需要控制电机再生制动力的大小，结构简单可靠，制造成本低，当再生制动失效时，仍可安全制动。

9、四轮驱动控制能量回收控制策略

四轮驱动下制动能量回收控制策略主要考虑三部分内容：

一是摩擦制动力与电机再生制动力的分配关系；

二是前后轴摩擦制动力的分配关系；

三是前后轴电机再生制动力的分配关系。

同时制动能量回收控制策略还要符合以下要求：

· 制动安全；

· 尽可能多的回收制动能量；

· 再生制动控制系统结构简单，降低制造成本。

由于并联再生制动系统不改变原车机械制动系统参数，机械制动与再生制动相互独立，互不影响，电动汽车制动时分别沿两条路线传递制动力。

由于并联再生制动的机械制动力不可调，对于双轴驱动的汽车，加入再生制动力后会使制动力分配系数变小，从而导致后轴易于抱死。为了保证制动安全，所施加的电机再生制动力矩不应超过三个约束条件规定的再生制动力矩的上限值。而为了尽可能多的回收制动能量，提高能量回收率，应充分利用电机再生制动，提高其在整车制动力中所占比例。

制定并联再生制动控制策略主要在于判断是否进行再生制动以及确定再生制动力的大小。通过调节电机再生制动力的大小，可以使整车制动力分配系数在合理区间变化，这样就可以再保证制动安全的前提下，充分利用电机进行再生制动，从而回收更多的制动能量。

由于z≤0.1时ECE法规对制动力分配未作限制，而且城市循环工况下制动强度变化较小，因此可以对并联再生制动控制策略进行改进：取消制动踏板的空行程阶段，并限制空行程范围内的制动强度z≤0.1，当z≤0.1时，只采用电机再生制动。

当0.1＜z＜0.7时，按并联再生控制策略分配制动力；当z≥0.7时，制动力完全由机械制动力提供。

10、结论与展望

目前我国制动能量回收缺乏统一的测评指标，目前主要采用理论计算法，来反映车辆实际的能耗状况。

中国乘用车能耗评价一般采用欧洲油耗和排放评定标准(NEDC)工况。研究新能源汽车制动能量回收，也比较适合NEDC市区工况；同时整车质量对制动能量回收的影响较大，整车质量越大，制动能量回收效果越好。

国外整车制动能量回收评价指标有美国ERP法规中的制动能量回收系统效率、续驶里程贡献率和制动距离变化。我国相关企业和研究机构常用的新能源汽车能耗经济性评价指标包括制动能量回收对整车续驶里程或能量消耗率的贡献率。

其测试方法参考《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法(GB/T 18386-2005)》，分别开启和关闭制动能量回收功能，在车辆等速行驶续驶里程基本相同的前提下，通过NEDC市区循环的续驶里程变化来评价制动能量回收效果。

国内企业中，比亚迪通过测量在制动过程中回收到动力电池包中的电量与同等状态下没有制动能量回收系统的电动汽车耗电量之比来评价制动能量的回收效果。经测量，其某款电动车的制动能量回收率可达到19%。

据悉，中国汽车技术研究中心已经开始对制动能量回收评价体系方法的验证工作，以求进一步完善评价方法，建立科学客观的电动汽车制动能量回收技术体系，促进电动汽车技术发展，为国家制定相关政策和技术标准法规提供参考依据。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/124531.html