

DOI: 10.3901/JME.2012.16.080

电动城市公交车制动能量回收评价方法*

仇 斌 陈全世

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 制动能量回收是提高电动城市公交车整车能量效率的关键技术之一,但在评价制动能量回收对改善电动城市公交车能量效率作用方面目前国内外还缺少科学系统的方法。以一辆 12 m 电动城市公交车为研究对象,通过建立电动城市公交车制动过程能量流模型,提出一种涉及 6 个环节因素的制动能量回收效率评价方法,在详细分析这些因素对制动能量回收效率影响的基础上,进一步提出一个综合评价制动能量回收作用的新指标——制动能量回收贡献率。制动能量回收贡献率综合考虑整车参数、循环工况和制动能量回收效率等因素,从而能更全面地评价制动能量回收对提高整车能效的作用,提出的评价方法为电动城市公交车通过制动能量回收技术来进一步改善其整车能量效率指出技术途径。

关键词: 电动城市公交车 制动能量回收 评价方法 能量效率 行驶工况

中图分类号: U463

Evaluation Method of Regenerative Braking for Electric City Bus

QIU Bin CHEN Quanshi

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Regenerative braking is one of the key technologies to improve the energy efficiency of electric city bus, but there is no available scientific method to evaluate the effectiveness of regenerative braking for electric city bus. A six-factor contained regenerative braking system efficiency index is introduced based on brake energy flow model of 12 m long electric city bus, a rounded analysis of the influence of aboved six factors on regenerative braking system efficiency is made detailedly. Then a new comprehensive and scientific evaluation index named regenerative braking contribution rate, which takes regenerative braking system efficiency, vehicle parameters and drive cycle into account, is raised to evaluate the effectiveness of regenerative braking system. The evaluation method is helpful to orientate technological approaches to improve the energy efficiency of electric city bus by regenerative braking further.

Key words: Electric city bus Regenerative braking Evaluation method Energy efficiency Drive cycle

0 前言

制动能量回收是电动城市公交车提高能量利用效率的有效手段之一,但目前国内外关于如何科学地评价制动能量回收效率一直还没有统一的标准和方法。最常用的评价方法是用在制动能量回馈过程中电动机发出的电能占总制动能量中的占比(简称为制动能量回馈率)作为评价指标^[1],也有采用在某循环工况下电动机回馈发出的电能占电动机总消耗能量的百分比(简称为能量回收率)来作为制动能量回收效率的评价指标^[2],此外还有用电动机回馈

发出的电能占整车总动能或动力电池总储电量的百分比方法^[3-4]。但电动城市公交车制动能量回收过程是一个复杂的动态过程,涉及的子系统多,影响制动能量回收效率的因素和环节较多,因此采用上述指标来评价制动能量回收效率并不能全面反映问题。例如制动能量回馈率仅考虑了电动机发出的电能占总制动能量的比例,而关于这部分回馈电能被回收储存及在将来的利用情况等诸多因素则未加以考虑。从全面系统地评价制动能量回收效率的角度出发,需要在建立电动城市公交车制动过程能量流模型的基础上,提出包含从制动能量回馈给驱动轮、经传动系统传输到电动机、电动机发电、储能装置充电储能直到再用于驱动等 6 个环节因素的制动能量回收效率评价指标,从而为评价制动能量回收

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划,2006AA11A102)·20111117 收到初稿,20120622 收到修改稿

对改善电动城市公交车的整车能效的作用提供一种有效方法。

1 制动能量回收过程能量流模型

电动城市公交车制动能量回收过程中能量流关系可用能量流模型来分析, 图 1 给出了在循环工况下电动城市公交车制动能量回收过程的能量流模型。该模型包括了纯电动、混合动力(串联、并联和混联)和燃料电池等车型。在建立该能量流模型时, 将动力系统各部件从车辆中解耦出来, 抽象为无质量的能量储存、转换和传递部件, 忽略道路坡度和风的影响, 且不考虑附件的能量消耗。

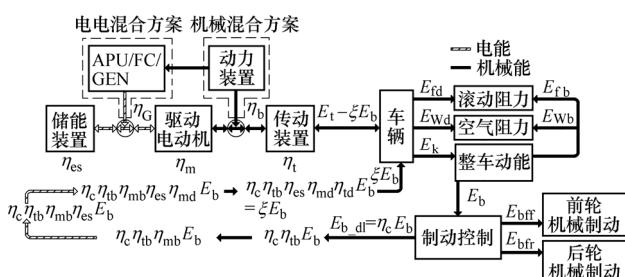


图 1 电动城市公交车制动能量回收过程能量流模型

在循环工况下运行时, 车辆对动力系统要求输出的总驱动能量为 E_t , E_t 在因克服滚动阻力、空气阻力消耗一部分后, 剩余的能量转化为整车的动能, 其能量流关系为

$$E_t = E_{fd} + E_{wd} + E_k \quad (1)$$

式中 E_t ——总驱动能量

E_{fd} ——驱动状态下克服滚动阻力消耗的能量

E_{wd} ——驱动状态下克服空气阻力消耗的能量

E_k ——整车动能

当车辆制动时, E_k 这部分能量除了一部分在制动过程中克服轮胎滚动阻力和空气阻力消耗外, 剩余的需要由制动系统消耗转化为其他形式的能量, 其能量流关系为

$$E_k = E_{fb} + E_{wb} + E_b \quad (2)$$

式中 E_{fb} ——制动状态下克服滚动阻力消耗的能量

E_{wb} ——制动状态下克服空气阻力消耗的能量

E_b ——制动系统消耗的能量

将式(2)代入式(1)可得

$$E_t = E_{fd} + E_{wd} + E_{fb} + E_{wb} + E_b = E_f + E_w + E_b \quad (3)$$

式中 E_f ——克服滚动阻力消耗的总能量

E_w ——克服空气阻力消耗的总能量

对那些没有制动能量回收功能的车辆来说, E_b 完全要由机械制动系统所消耗。但对电动城市公交

车而言, 可以通过制动能量回收将 E_b 中的一部分加以回收利用。通常在制动时动力系统不消耗能量, 因此不可能在能量回收同时加以利用, 必须借助某种储能装置将回收的这部分能量先储存起来, 待下一时刻需要驱动能量时再加以利用。因此 E_b 的能量流关系为

$$E_b = E_{bfr} + E_{bfr} + E_{b_{dl}} \quad (4)$$

式中 E_{bfr} ——前轮机械制动消耗的能量

E_{bfr} ——后轮机械制动消耗的能量

$E_{b_{dl}}$ ——驱动轮处回收的制动能量

$E_{b_{dl}}$ 这部分能量还要依次经过传动系统和电动机驱动系统(含电动机及控制器)的传递和转换后才能变成电能储存在储能装置中。所以 $E_{b_{dl}}$ 实际上可看成是制动能量回收系统的净输入, 由于传动系统工作时不可避免地存在能量损失, 而电动机驱动系统在发电过程中也存在能量损失, 因此最终充入储能装置中的那部分电能只是 $E_{b_{dl}}$ 中的一部分。而充入储能装置的这部分电能又重新被动力系统利用时还存在储能装置的放电能量损失、电动机驱动系统的能量损失和传动系统的能量损失等因素, 这些因素在分析制动能量回收效率时都需要加以考虑。由于回收并储存在储能装置中的这部分能量可以替代部分驱动能量, 电动城市公交车的动力系统所需要直接提供的能量就少于总驱动能量 E_t 。

2 制动能量回收效率

为了全面评价制动能量回收效率, 引入一个制动能量回收效率 ξ 的评价指标, 其定义如下: 在整个循环工况下的总制动能量 E_b 中被回收并储存在储能装置中, 又被动力系统重新利用且传递到驱动轮的那一部分能量 E_ξ 在总制动能量 E_b 中所占的比例。由图 1 可知, ξ 共包含了部分制动能量经驱动轮、传动系统、电动机发电、储能装置充放电、电动机驱动直到驱动轮等共计 6 个环节的平均效率, 即

$$\xi = \frac{E_\xi}{E_b} = \eta_c \eta_{tb} \eta_{mb} \eta_{es} \eta_{md} \eta_{td} \quad (5)$$

式中 ξ ——制动能量回收效率

E_ξ ——制动能量中被回收又重新被动力系统利用且传递到驱动轮的那一部分能量

η_c ——制动控制环节的平均效率

η_{tb} ——传动系统在制动能量回收环节的平均效率

η_{mb} ——驱动电动机及控制器在发电过程中的平均效率

η_{es} ——储能装置的充放电平均能量效率

η_{md} ——驱动电动机及控制器在驱动过程中的平均效率

η_{td} ——传动系统在驱动过程中的平均效率

按照上述定义, 由于 ξ 是针对整个循环工况的平均效率, 因此其 6 个组成环节的效率也都是指整个循环工况下的平均工作效率。

现针对上述 6 个环节的平均效率分别加以讨论。

2.1 制动控制环节效率

制动控制环节效率 η_c 是驱动轮处回收的制动能量 E_{b_dl} 在总制动能量 E_b 中的占比, 即

$$\eta_c = \frac{E_{b_dl}}{E_b} = \frac{E_{b_dl}}{E_{b_ff} + E_{b_ff} + E_{b_dl}} = \frac{\int_{P_t < 0} F_{b_dl} v dt}{\int_{P_t < 0} (F_{b_dl} + F_{b_ff} + F_{b_ff}) v dt} \quad (6)$$

式中 F_{b_ff} ——前轮机械制动力

F_{b_ff} ——后轮机械制动力

F_{b_dl} ——驱动轮处的电动机制动力

P_t ——驱动轮处的驱动或制动功率

v ——车速

式(6)中积分号下标 $P_t < 0$ 表示制动过程。 η_c 数值的大小取决于很多因素, 主要包括制动能量回收控制策略、运行工况、整车动力系统关键部件如电动机和动力电池的性能等, 其中制动能量回收控制策略的作用是根据运行工况、电动机及电池的状态来决定如何分配电动机制动力和前后轮机械摩擦制动力, 所以制动力的分配关系就直接决定了有多少制动能量能够进入动力系统环节被回收利用, 因而制动能量回收控制策略对制动控制环节效率起着决定作用。

2.2 传动系统效率

传动系统效率 η_{tb} 表示制动能量由驱动轮流向储能装置的过程中传动系统的平均工作效率, 就是电动机制动时的机械输入能量 E_{m_b} 与驱动轮处回收的能量 E_{b_dl} 之比

$$\eta_{tb} = \frac{E_{m_b}}{E_{b_dl}} = \frac{\int_{P_t < 0} T_{m_b} \omega_{m_b} dt}{\int_{P_t < 0} F_{b_dl} v dt} \quad (7)$$

式中 E_{m_b} ——电动机制动时的机械输入能量

T_{m_b} ——电动机制动转矩

ω_{m_b} ——电动机转速

2.3 电动机驱动系统效率

电动机驱动系统效率 η_{mb} 是制动能量由驱动轮流向储能装置的过程中电动机及控制器的平均发电效率, 就是充入储能装置的电能 E_{es_reg} 与电动机的机械输入能量 E_{m_b} 之比

$$\eta_{mb} = \frac{E_{es_reg}}{E_{m_b}} = \frac{\int_{P_t < 0} U_{es_reg} I_{es_reg} dt}{\int_{P_t < 0} T_{m_b} \omega_{m_b} dt} \quad (8)$$

式中 E_{es_reg} ——充入储能装置的电能

U_{es_reg} ——储能装置充电电压

I_{es_reg} ——储能装置充电电流

2.4 储能装置平均能量效率

储能装置平均能量效率 η_{es} 是储能装置在充电以及充入的电能再被利用这两个环节的充放电平均能量效率。由于储能装置通常都是非线性和时变的复杂电化学系统, 其充放电能量效率受荷电状态(State of charge, SOC)、温度、充放电功率和寿命等多种因素的影响, 因此客观上很难准确得到由制动能量回收过程充入的这部分电能再被利用整个过程的能量效率。在实际研究工作中 η_{es} 通常取某类储能装置在一定 SOC 值和温度下的充放电平均能量效率, 对于国内大多数锂离子动力电池而言, 在常用的 SOC 值范围(0.2~0.8)内平均能量效率在 85%~94%。

2.5 电动机驱动系统效率和传动系统效率

η_{md} 和 η_{td} 分别是回收充入到储能装置中的那部分电能再被用于驱动时电动机驱动环节和传动系统传动环节的平均效率。在实际分析工作中 η_{md} 和 η_{td} 也通常选取在循环工况下的平均效率。

2.6 制动能量回收效率分析实例

下面以一辆 12 m 电动城市公交车为例通过仿真方法来分析其制动能量回收效率, 整车参数如表 1 所列(电动机类型为交流异步感应电动机; 动力电池类型为磷酸铁锂)。

仿真分析时采用的循环工况为中国典型城市公交循环工况, 其车速—时间曲线如图 2 所示。

分析时采用了三种制动控制策略, 即能量最大化串联控制策略、简单并联控制策略(简称并联 1)和异步并联控制策略(简称并联 2), 这些制动策略的制动能量回收效率如表 2 所列。

从表 2 可知, 在影响制动能量回收效率的 6 个环节中, 不同制动控制策略下的制动控制环节效率 η_c 差别最大, 由此导致的制动能量回收效率差别也

表 1 12 m 电动城市公交车整车参数

参数	数值
外形尺寸 $\frac{l}{\text{mm}} \times \frac{b}{\text{mm}} \times \frac{h}{\text{mm}}$	12 000×2 550×3 430
整车质量 m/kg	18 000
轴距 L/mm	6 000
车轮半径 r/m	0.475
轮胎滚动阻力系数 f_0	0.008
$\frac{C_D A}{m}/(\text{m}^2/\text{kg})$	0.000 309 2
车轮转动惯量 $I_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	4.5
电动机额定功率 P_1/kW	100
峰值功率 P_2/kW	185
电动机额定转矩 $T_1/(\text{N} \cdot \text{m})$	531
峰值扭矩 $T_2/(\text{N} \cdot \text{m})$	1 100
电池容量 $C/(\text{A} \cdot \text{h})$	400
标称电压 U/V	384
减速器传动比 i	1.86
主减速比 i'	6.2

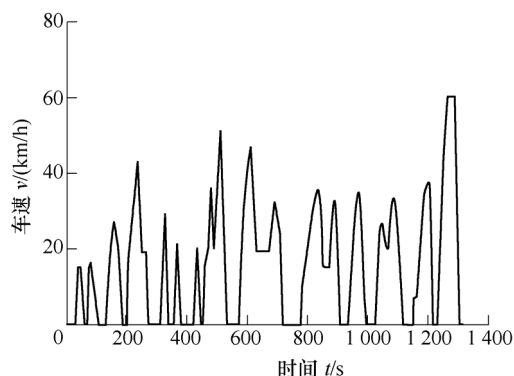


图 2 中国典型城市公交循环工况车速—时间曲线

表 2 不同控制策略下的制动能量回收效率 %

控制策略	效率					
	η_c	η_{tb}	η_{mb}	η_{es}	η_{md}	η_{td}
串联	88.6	90.7	88.0	88.5	84.7	89.9
并联 1	31.1	88.2	74.7	94.2	84.5	90.1
并联 2	69.6	90.0	85.5	93.3	84.5	90.1

最大, 因此制动控制环节效率是影响制动能量回收效率的关键因素。

3 制动能量回收贡献率

3.1 制动能量回收贡献率定义

由于采用制动能量回收后有部分制动能量 ξE_b 被回收利用, 这样直接由动力系统提供的驱动能量就减少了, 因此考虑了制动能量回收因素后, 需要由电动城市公交车动力系统直接提供的总驱动能量

$$E_{t\zeta} = E_t - \xi E_b = E_t \left(1 - \xi \frac{E_b}{E_t} \right) \quad (9)$$

式中, $E_{t\zeta}$ 为动力系统直接提供的驱动能量。

从式(9)看出, 制动能量回收效率 ξ 只是反映了电动城市公交车对总制动能量的回收利用效率, 还不能完全说明制动能量回收对改善整车能量效率的作用, 因此, 本文引入一个新的评价指标—制动能量回收贡献率 ψ , 其定义为

$$\psi = \xi \frac{E_b}{E_t} \quad (10)$$

制动能量回收贡献率 ψ 直接反映了制动能量回收对减少整车驱动能量需求的贡献比例, 如果一辆电动城市公交车的制动能量回收贡献率为 15%, 就意味着在同样循环工况下由动力系统直接提供的驱动能量只有不带制动能量回收功能时的 85%。

式(10)中的 E_b/E_t 反映了制动能量在驱动能量中的占比, 在一定的循环工况下, 整车的驱动或制动能量可由式(11)计算

$$E = \int P_t dt = \int \left[mgf_0 v + \frac{\rho C_D A v^3}{2} + \left(m + \frac{n I_w}{r^2} \right) v \frac{dv}{dt} \right] dt \quad (11)$$

式中 E ——驱动或制动能量

ρ ——空气密度

n ——车轮个数

为了便于分析, 将驱动和制动过程中的能量分别加以考虑, 并作如下规定: 加速度 dv/dt 为不带符号的量, 令 $m_e = (m + n I_w / r^2)$, S 代表循环工况运行总里程。此外考虑到公交车的平均车速较低, 忽略车速对轮胎滚动阻力系数的影响。由此可得出单位里程单位质量的驱动能量 $E_t/(mS)$ 和制动能量 $E_b/(mS)$ 的方程为

$$\frac{E_t}{mS} = \alpha f_0 + \beta \frac{C_D A}{m} + \gamma \frac{m_e}{m} \quad (12)$$

$$\frac{E_b}{mS} = \gamma \frac{m_e}{m} - \alpha' f_0 - \beta' \frac{C_D A}{m} \quad (13)$$

式中 α, α' ——与克服滚动阻力有关的驱动或制动能量计算系数

β, β' ——与克服空气阻力有关的驱动或制动能量计算系数

γ ——与整车加速阻力有关的驱动能量计算系数

式(12)和式(13)中的 f_0 、 $C_D A/m$ 和 m_e/m 是整车参数, 而 $\alpha, \beta, \gamma, \alpha'$ 和 β' 则主要和循环工况有关。

由于在任何循环工况下,汽车的初、终速度都为零,因此系数 γ 应该相同。通过对国内市场上主流的公交车型参数的调查和统计,其主要参数的分布范围如图 3 所示。

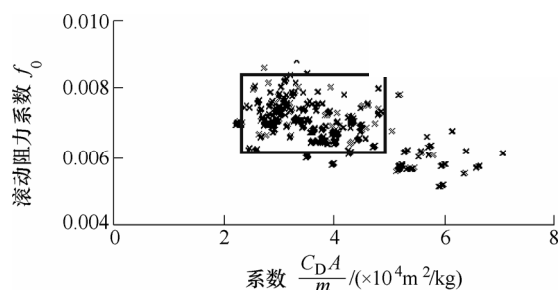


图 3 国内主流公交车整车参数分布范围
($m_e/m = 1.005 \sim 1.030$)

以上述调查得到的所有城市公交车参数作为输入,通过编程分别计算出在中国典型城市公交循环工况下的单位质量单位里程驱动能量 $E_d/(mS)$ 和制动能量 $E_b/(mS)$ 数值,通过多元线性回归分析,分别得到了各典型循环工况下的 α 、 β 、 γ 和 α' 、 β' 数值,如表 3 所示。

表 3 计算系数 α 、 β 、 γ 和 α' 、 β' 数值表

循环 工况	$\alpha/(m/s^2)$	$\beta/[kg/(m \cdot s^2)]$	$\gamma/(m/s^2)$	$\alpha'/(m/s^2)$	$\beta'/[kg/(m \cdot s^2)]$
中国典型城市 公交循环 工况	6.774	38.697	0.138	3.036	13.107

将式(12)、(13)代入式(10)可得

$$\psi = \xi \frac{E_b}{E_t} = \xi \frac{\gamma \frac{m_e}{m} - \alpha' f_0 - \beta' \frac{C_D A}{m}}{\gamma \frac{m_e}{m} + \alpha' f_0 + \beta \frac{C_D A}{m}} \quad (14)$$

从式(14)可知,制动能量回收贡献率 ψ 主要取决于三方面因素:一是制动能量回收效率 ξ ,二是整车参数,三是循环工况。因此制动能量回收贡献率更系统全面地评价了制动能量回收对改善电动城市公交车能量效率的作用。

表 4 列出了第 2.6 节中提及的 12 m 电动公交车在中国典型城市公交循环工况下应用三种制动控制策略时的制动能量回收贡献率仿真结果,从表 4 中可以看出,不同制动控制策略下制动能量回收贡献率有较大差别。

从 ψ 的定义还可以看出,制动能量回收效率 ξ 高不一定意味着制动能量回收贡献率就一定很高,因为还要看 E_b/E_t 的大小。如果电动城市公交车实际

运行工况比较平稳,没有频繁的加速和减速工况,大部分驱动能量都消耗在克服滚动阻力和空气阻力方面,可供回收的制动能量就很少,因此即使制动能量回收效率 ξ 很高,但制动能量回收贡献率 ψ 也不见得很高。也就是说,遇到比较平稳的行驶工况时,设计再好的制动能量回收系统也无用武之地。

表 4 制动能量回收贡献率 ψ 分析结果 %

控制 策略	制动能量 回收效率 ξ	制动与驱动能 量之比 E_b/E_t	制动能量回收 贡献率 ψ
串联	47.6	53.9	25.7
并联 1	14.7	53.9	7.9
并联 2	38.0	53.9	20.5

3.2 提高制动能量回收贡献率的技术途径

综上所述,提高电动城市公交车制动能量贡献率的技术途径主要有以下几个方面。

(1) 优化整车参数,选用低滚阻轮胎,改进车身设计,降低空气阻力系数。

(2) 优化制动系统设计,在保证制动安全和操纵感觉一致性的前提下,尽量提高制动控制环节效率。

(3) 优化动力系统关键部件如驱动电动机、储能装置和传动系统等部件的性能和参数匹配设计,提高各部件的平均工作效率。

4 结论

(1) 基于电动城市公交车制动过程能量流模型提出了包含从制动能量回馈给驱动轮、经传动系统传输到电动机、电动机发电、储能装置充电储能直到再利用于驱动的整个过程中所有 6 个环节因素的制动能量回收效率评价指标。通过分析可知,制动控制环节效率是影响制动能量回收效率的关键因素。

(2) 提出了制动能量回收贡献率评价指标,该指标综合考虑了制动能量回收效率、整车参数和循环工况等多种因素,从而能够更系统全面地评价制动能量回收对改善电动城市公交车整车能量效率的作用,最后讨论了提高制动能量回收贡献率的技术途径。

(3) 以一辆 12 m 电动城市公交车为例分析得到了在中国典型城市公交循环工况下采用典型制动控制策略时的制动能量回收效率和贡献率仿真结果。

参 考 文 献

- [1] 张俊智,陆欣,张鹏君,等. 混合动力城市客车制动能

- 量回收系统道路试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 25-30.
- ZHANG Junzhi, LU Xin, ZHANG Pengjun, et al. Road test of hybrid electric bus with regenerative braking system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 25-30.
- [2] 李国斐, 林逸, 何洪文, 等. 电动汽车再生制动控制策略研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6): 520-524.
- LI Guofei, LIN Yi, HE Hongwen, et al. Regenerative braking control strategy for electric vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(6): 520-524.
- [3] 晋旋. 后轮驱动电动汽车再生制动控制策略的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- JIN Xuan. Study on regenerative braking control strategy for rear-wheel drive electric vehicle[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [4] 王保华, 郁俊杰. 混合动力客车制动能量回馈及控制仿真研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2008, 22(4): 1-5.
- WANG Baohua, YU Junjie. Study of braking energy recovery and control strategy for hybrid electric bus[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2008, 22(4): 1-5.
- [5] 薛俊亮. 混合动力系统制动能量回馈控制策略的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- XUE Junliang. Study of the regenerative braking control strategy for hybrid electric system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [6] 刘凌, 李雪峰, 汪伟, 等. 串联式混合动力客车制动能量回收的研究[J]. 交流技术与电力牵引, 2007(3): 45-48.
- LIU Ling, LI Xuefeng, WANG Wei, et al. Research of brake energy regeneration in serial hybrid electric bus[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007(3): 45-48.
- [7] SOVRAN G, BLASER D. A contribution to understanding automotive fuel economy and its limits[R]. SAE, 2003-01-2070, 2003.
- [8] SOVRAN G, BLASER D. Quantifying the potential impacts of regenerative braking on a vehicle's tractive-fuel consumption for the U.S., European, and Japanese driving schedules[R]. SAE, 2006-01-0664, 2006.
- [9] SOVRAN G. The impact of regenerative braking on the powertrain-delivered energy required for vehicle propulsion[R]. SAE, 2011-01-0891, 2011.
- [10] GAO Yimin, CHEN Liping, EHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[R]. SAE, 1999-01-2910, 1999.
- [11] 仇斌, 陈全世, 张开斌. 北京市区电动轻型客车制动能量回收潜力[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 87-91.
- QIU Bin, CHEN Quanshi, ZHANG Kaibin. A study on the effectiveness of regenerative braking for electric car in Beijing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 87-91.
- [12] 余志生. 汽车理论[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- YU Zhisheng. Automotive theory[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2008.

作者简介: 仇斌(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士研究生, 副研究员。主要研究方向为电动汽车整车设计和电动汽车制动能量回收。
E-mail: qblucy@tsinghua.edu.cn
陈全世, 男, 1945 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动城市公交车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车的设计与研制。
E-mail: chenqs@tsinghua.edu.cn