

无刷直流电机电动汽车再生 ABS 双闭环控制研究 *

赵国柱¹, 魏民祥²

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京航空航天大学能源与动力工程学院, 南京 210016)

[摘要] 为使无刷直流电机电动汽车在冰雪等低附着路面上进行纯再生制动时, 驱动轮仍具有防抱死功能, 采用了双闭环控制策略。文中首先阐述了双管调制下的无刷直流电机再生制动机理; 提出了通过控制 PWM 占空比来防止驱动轮抱死的方案; 接着建立了单轮车辆动力学模型; 设计了再生 ABS 双闭环控制器, 外环采用滑模控制来调节车轮滑移率, 内环通过电流滞环控制来改变电机电枢电流。最后, 建立了再生 ABS 的 SIMULINK 仿真模型, 并进行仿真。结果表明, 系统具有良好的实时性、稳定性和鲁棒性; 而再生 ABS 回收的制动能量随路面附着系数的增大而增加。

关键词: 电动汽车; 制动; 再生 ABS; 无刷直流电机; 双闭环控制

A Research on the Double-closed-loop Control for Regenerative Antilock Braking System in an Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor

Zhao Guozhu¹ & Wei Minxiang²

1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

[Abstract] To retain the antilock braking function of an electric vehicle driven by brushless direct current motor (BLDCM) in pure regenerative braking on low-adhesion road, a double closed-loop control strategy is adopted in this paper. Firstly the regenerative braking mechanism of BLDCM with double switching modulation is expounded and a novel scheme is proposed to achieve antilock-braking by controlling the duty cycle of PWM. Then a single wheel vehicle dynamics model is developed and a double-closed-loop controller is designed, in which the sliding-mode control is used to adjust the slip ratio of wheel in outer loop and the armature current of motor is changed with hysteresis current control in inner loop. Finally a simulation model for regenerative ABS is built with SIMULINK and a simulation is conducted. The results show that the system created has good realtimeness, stability and robustness, and the amount of braking energy recovered in regenerative ABS increases with the rise in road adhesive coefficient.

Keywords: electric vehicle; braking; regenerative antilock braking system; brushless DC motor; double-closed-loop control

前言

当电动汽车在冰雪等低附着路面上进行再生制动时, 即使制动强度小, 也极有可能使驱动轮抱死; 对于后驱动型电动汽车, 在转向再生制动工况下, 即使车轮不抱死, 也会使操纵稳定性降低。再生 ABS 是

指电动汽车驱动轮在进行再生制动时, 通过调节再生制动力使驱动轮具有防抱死功能的一种制动系统。再生 ABS 不但能提高电动汽车制动能量回收, 且能增强其操纵稳定性。文献[1]中利用模型跟随控制法(MFC)对比分析了再生 ABS 和液压 ABS, 结果表明再生 ABS 比液压 ABS 的反应速度快, 控制精度高。文献[2]中分别运用滑移率控制法(SRC)和

* 国家自然科学基金(51005113)和江苏省农机局科研启动基金(Gxz10003)资助。

原稿收到日期为 2011 年 9 月 22 日, 修改稿收到日期为 2011 年 12 月 10 日。

模型跟随控制法对再生 ABS 进行了对比研究,仿真结果表明滑移率控制法的控制精度高。文献[3]中基于 simplorer 仿真软件对比分析了再生 ABS 与液压 ABS,结果表明再生 ABS 的反应速度快于液压 ABS。文献[4]中利用蓄电池与超级电容器的串并联组合,利用滑模控制建立了离散型再生 ABS 模型。文献[5]中利用迭代学习控制法设计了再生 ABS 模型。文献[6]~文献[7]中利用简化的电机模型设计了再生 ABS 滑模控制器。以上对于再生 ABS 的研究中,或从电机系统工程观点出发,忽略功率变换器的影响,把电机统一简化为直流电机模型来处理;或从简化分析、突出概念出发,把非线性的轮胎模型简化成线性模型,这类模型虽具有理论研究价值,但不适合于再生 ABS 的工程实践。本文中以精确的无刷直流电机(brushless DC motor, BLDCM)和逆变器仿真模型为基础,建立该电机驱动的电动汽车再生 ABS 双闭环控制模型,外环控制滑移率,内环控制电机电枢电流。该模型控制框图见图 1,图中 λ_d 为目标滑移率, λ 为实际滑移率, e 为 λ_d 与 λ 的偏差, i^* 为电机电枢回路指令电流, i 为该回路实际电流, α 为电机 PWM 调制信号的占空比, T_{mb} 为驱动轮上电制动转矩, v 为车体纵向速度, ω_w 为车轮角速度。

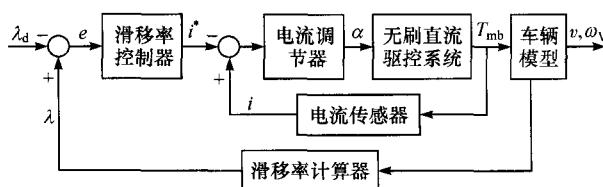


图 1 再生 ABS 双闭环控制方框图

1 双管调制的 BLDCM 再生制动机理

BLDCM 的双管 PWM 调制是指任何时刻均只有两个功率开关管工作,且两管同时导通与关断。采用双管调制可以对制动电流进行有效控制^[8]。由于电机在每个 60° 电角度内,虽然电枢绕组的通电与功率开关管的导通会随转子位置的变化而依次轮换,但任何时刻均只有两组电枢绕组通电,参与调制的开关管也始终只有两个;并且电机工作的整体情况、相关的各种波形及电气方程式也均相同,因此,只须分析电机在一个区间内的电气制动原理。设电机驱动时,在某个 60° 电角度内只由 VT1 和 VT6 进行 PWM 调制,如图 2 所示。

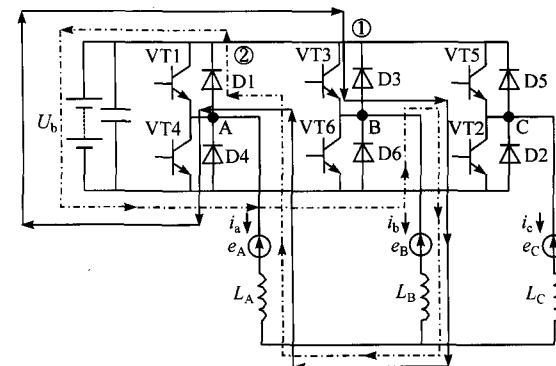


图 2 电气制动原理

转入再生制动后,在同一个 60° 电角度内,则只有 VT3 和 VT4 管同时导通与关断。当导通时,在电源与反电动势共同作用下,电流沿图 2 中第①路径流动。此时为反接制动。忽略 VT3 和 VT4 的管压降时的电气方程为

$$-U_b = E + Ri + Ldi/dt \quad (1)$$

式中: U_b 为电池端电压; E 为电机反电动势; L 为电枢回路电感; R 为回路电阻。

当 VT3 和 VT4 同时关断后,电流沿图 2 中第②路径流动。此阶段向蓄电池回馈电能,故称为回馈制动,其电气方程为

$$U_b = E + Ri + Ldi/dt \quad (2)$$

由以上分析可知,双管调制时,BLDCM 再生制动的基本制动模式是反接制动与回馈制动的交替。在一个 PWM 周期 T 内,反接制动阶段与回馈制动阶段电流变化率的绝对值之比与每个阶段所占时间成反比^[9],即

$$\frac{\alpha T}{(1-\alpha)T} = \left| \frac{U_b/L - E/L - Ri/L}{-U_b/L - E/L - Ri/L} \right| \quad (3)$$

考虑到低速再生制动时有 $U_b > E + Ri$,而制动时电枢电流与参考方向相反 ($i < 0$),设制动电流 $i_b = -i$,则由式(3)得

$$i_b = [E - (1 - 2\alpha)U_b]/R \quad (4)$$

从式(4)可知,再生 ABS 工作时,可通过调节占空比来改变电磁转矩,从而使驱动轮在冰雪等低附着路面上进行纯再生制动时保持最佳滑移率。

2 再生 ABS 控制系统建模

2.1 单轮车辆动力学模型

以单轮车辆模型为例建立车辆动力学模型,为建模方便,忽略制动时车轮纵向载荷转移的影响,驱

动轮受力情况如图 3 所示。图中 F_w 为空气阻力, m 为车辆质量, T_f 为滚动阻力矩, F_{xb} 为地面制动力, F_z 为地面对车轮的法向反力, r 为车轮滚动半径。

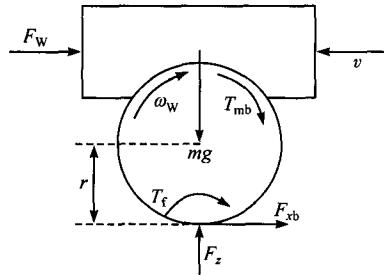


图 3 驱动轮制动受力分析

车辆动力学模型和车轮力矩平衡方程分别为

$$mdv/dt = F_{xb} - F_w - F_f \quad (5)$$

$$J\dot{\omega}_w = T_{mb} - F_{xb}r - T_f \quad (6)$$

式中: $F_{xb} = mg\mu(\lambda)$, $\mu(\lambda)$ 为附着系数, 其值由轮胎模型确定; $F_w = 0.5 C_D A \rho v^2$, C_D 为空气阻力系数, A 为迎风面积, ρ 为空气密度; F_f 为滚动阻力, $F_f = T_f/r$; J 为车轮转动惯量; $\omega_w = \omega_m/i_g$, ω_m 为电机角速度, i_g 为传动系传动比; $T_{mb} = T_e i_g/2$, T_e 为电机电磁转矩, 即

$$T_e = k_t i^*$$

式中: k_t 为电机转矩常数。

将方程改写为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = g\mu(\lambda) - \frac{\rho C_D A v^2}{2m} - g f_r \\ \frac{d\omega_w}{dt} = \frac{i_g k_t i^*}{2J} - \frac{m g f_r}{J} - \frac{m g r}{J} \mu(\lambda) \end{cases} \quad (8)$$

设 $x_1 = \omega_v = v/r$, $x_2 = \omega_w$, $f_1 = g/r$, $f_2 = \rho C_D A r/(2m)$, $f_3 = g f_r/r$, $f_4 = i_g k_t/(2J)$, $f_5 = m g f_r/J$, $f_6 = m g r/J$ 。滑移率控制器输出量 $u = i^*$, 则式(8)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 \mu(\lambda) - f_2 x_1^2 - f_3 \\ \dot{x}_2 = -f_5 - f_6 \mu(\lambda) + f_4 u \end{cases} \quad (9)$$

式中即为轮胎模型的表述:

$$\mu(\lambda) = 2\mu_p \lambda_p \lambda / (\lambda_p^2 + \lambda^2) \quad (10)$$

该模型在 $\lambda \in [-0.3, 0]$ 时比较精确^[10]。其中, μ_p 为峰值附着系数, 压实雪路与结冰路面的峰值附着系数分别为 -0.2 和 -0.1, λ_p 为峰值附着系数对应的滑移率, 本文中设 $\lambda_p = -0.2$ 。

2.2 双闭环控制器的设计

2.2.1 外环控制器

制动时滑移率定义为

$$\lambda = (\omega_w - \omega_v) / \omega_v \quad (11)$$

对式(11)求 1 阶导数, 并将式(9)代入, 得关于滑移率的动力学方程为

$$\lambda = f + bu \quad (12)$$

其中:

$$f = -\left(\frac{f_5}{x_1} + \frac{f_6 \mu(\lambda)}{x_1}\right) - (1 + \lambda) \frac{f_1 \mu(\lambda) - f_2 x_1^2 - f_3}{x_1};$$

$$b = f_4/x_1;$$

$$u = i^*$$

式中: f 为有界未知连续函数; b 为控制增益。

由式(12)知滑移率动力学模型是一个 1 阶单输入非线性系统。设 f 的估计值为 \hat{f} , 估计误差受已知函数 $F(\lambda, \hat{\lambda})$ 的限制, 即 $|\hat{f} - f| \leq F$ 。控制增益 b 是时变的, 但其界确定, 即 $0 < b_{\min} \leq b \leq b_{\max}$, 设其估计值为 $\hat{b} = \sqrt{b_{\min} b_{\max}}$ 。当控制对象的模型存在不确定性时, 通常采用鲁棒控制, 滑模控制 (sliding mode control, SMC) 是一种简单而有效的鲁棒控制。本文中采用该控制算法来控制车轮滑移率。控制器设计目标是使车轮滑移率跟踪目标滑移率 λ_d 。定义滑移率的跟踪误差为 $e = \lambda - \lambda_d$, 其中 $\lambda_d = -0.2$, 现定义切换函数为

$$s = \lambda - \lambda_d \quad (13)$$

对式(13)求导, 并令 $\dot{s} = 0$ 得到使系统沿滑动面运动的等效控制量为

$$u_{eq} = -\hat{f}/\hat{b} \quad (14)$$

当系统状态在滑动面之外时, 要使其在有限时间内到达滑动面, 则控制律应使系统状态满足:

$$\frac{1}{2} \times \frac{d}{dt} s^2 \leq -\xi |s|, \quad \xi > 0 \quad (15)$$

式中 ξ 为设计参数。为此, 应在等效控制的基础上添加一个不确定控制量, 这样所得控制律为

$$u = \hat{b}^{-1} [\hat{u} - k \text{sgn}(s)] \quad (16)$$

式中 \hat{u} 为 u 的估计值。选择 k 值使其满足:

$$k \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1) |\hat{u}| \quad (17)$$

式中: $\beta = \sqrt{b_{\max}/b_{\min}}$, η 为正常数。式(16)控制律的 Bang-Bang 控制项 $K \text{sgn}(s)$ 会引起系统抖振, 且抖振随 k 值的增大而增大。为此, 用一个饱和函数 $\text{sat}(s/\varphi)$ 代替式(16)中的符号函数 $\text{sgn}(s)$ 来平滑控制律, 饱和函数定义为

$$\text{sat}(s/\varphi) = \begin{cases} s/\varphi, & |s| < \varphi \\ \text{sgn}(s), & |s| \geq \varphi \end{cases} \quad (18)$$

式中 φ 为滑动面附近的边界层厚度。最后, 滑模控

制器输出量含有大量的开关信号,其结果须经低通滤波才能应用。

2.2.2 内环控制器

当电机在额定转速以下运转时,电流调节器采用滞环比较方式的 PWM 电流跟踪控制可获得最佳电机性能^[11]。电流滞环 PWM 控制预先在指令电流曲线上建立了一个允许的偏差带,当实际电流低于 $i^* - \Delta I$ 时,比较器产生电路导通信号,电路闭合,实际电流增大;当实际电流大于 $i^* + \Delta I$ 时,比较器产生电路断开信号,电路断开,实际电流减小。从而将电流控制在 $i^* + \Delta I$ 和 $i^* - \Delta I$ 之间,使得实际电流跟踪指令电流成锯齿状变化。与此同时,滞环比较器产生控制信号—PWM 波,如图 4 所示。

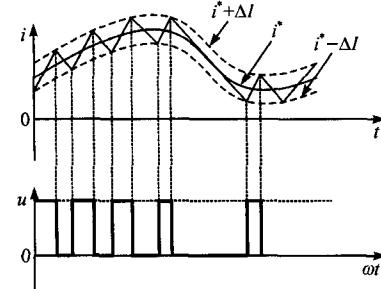


图 4 滞环比较方式的 PWM 电流跟踪控制

3 仿真结果分析

现以某电动汽车在冰雪路面上直线制动为例进行仿真分析。相关参数如下: 电机额定电压为 300V, 额定电流为 250A, 回路电感为 10mH, 回路电阻为 0.099Ω , 转矩系数为 $1.086\text{N} \cdot \text{m/A}$, 电势系数为 $1.086\text{V} \cdot \text{s/rad}$; 电池组额定容量为 $25\text{A} \cdot \text{h}$, 额定电压为 300V。整车质量为 425kg, 车轮惯量为 $0.5\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 迎风面积为 3.1m^2 , 风阻系数为 0.3, 车轮半径为 0.325m, 空气密度为 1.29kg/m^3 , 滚动阻力系数为 0.01, 传动系传动比为 10, 初速度为 30km/h。此外, 再生 ABS 与传统 ABS 一样, 也只在车速高于 5km/h 时才起作用, 当车速低于该值后, 再生 ABS 停止工作, 此后由机械制动系统停车; 且车速很小时, 为尽快停车, 必须使车轮制动抱死。由于再生 ABS 制动时, 充电电流持续时间较短, 且制动前, 电池处于放电状态, 对于铅酸蓄电池, 在最初的 5min 内可用 5C 甚至 8C 的大电流充电而不会影响电池的使用寿命^[12]。

仿真结果表明, 尽管由于模型的不确定性而存在建模误差, 但无论在积雪路面还是在结冰路面上, 滑移率均能快速地稳定在目标值上, 说明系统具有足够的实时性与稳定性。由于积雪路面附着系数大于结冰路面, 因而在积雪路面时的制动距离小于结冰路面, 如图 5 所示。

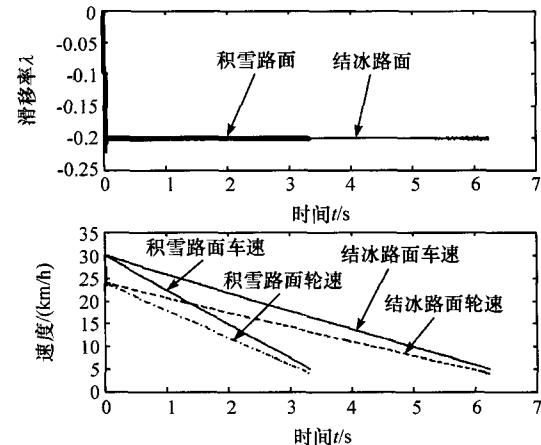


图 5 在积雪与结冰路面上制动时的滑移率、车速和轮速

当制动过程从结冰路面跃变为积雪路面时, 系统外环在 SMC 控制时, 滑移率经过一个瞬间抖动后, 能迅速稳定在目标滑移率上, 表现出较强的鲁棒性; 而采用 PI 控制时, 滑移率虽能重新稳定, 但距目标滑移率有一个小的偏差, 如图 6 所示。

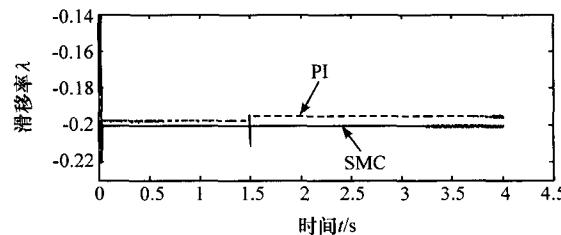


图 6 系统由结冰到积雪路面时外环分别在 SMC 与 PI 控制下的滑移率

在再生 ABS 的控制机理作用下, 只要制动电流同时小于电机最大允许制动电流和蓄电池最大允许充电电流, 则随附着条件的改善, 系统将自动增大电制动份额, 从而相应减小其它阻力(如空气阻力和滚动阻力等)的制动份额, 使制动能量回收增加。其次, 随着制动过程的进行, 反电动势越来越低, 而蓄电池端电压却不断升高, 使得一个 PWM 周期内回馈制动阶段的电磁转矩不断下降。为满足外环对制动转矩的请求, 系统自动增大占空比来延长一个 PWM

周期内反接制动阶段的时间,以保证一个 PWM 周期内的平均电磁转矩能满足外环的需求,如图 7 所示。

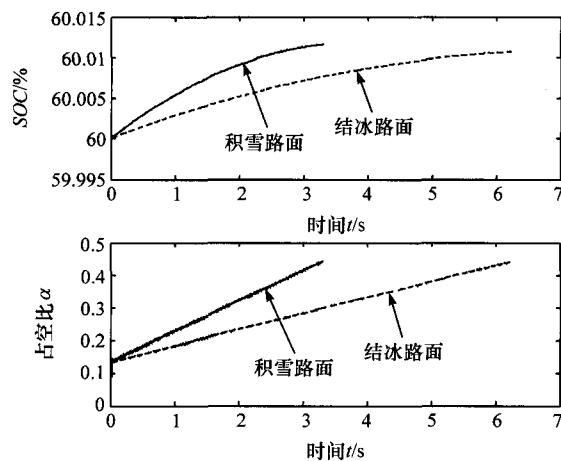


图 7 系统分别在积雪与结冰路面上的电池 SOC 和占空比

双管调制下的 BLDCM 再生制动基本模式是反接制动与回馈制动的交替,因此其充电电流瞬时值呈正负交替变化。但其每隔 0.1s 的平均值均是负值,如图 8 所示,说明 BLDCM 在双管调制模式下的电气制动性质整体上仍是回馈制动。在反接制动阶段,从蓄电池里流出的电能和此时反电动势产生的电能基本变成了回路电感的磁场能;在回馈制动阶段,回路电感的磁场能和此时反电势产生的电能一起回馈到蓄电池中,反接制动阶段从电源流出的电能起到了增强电机回收制动能量的作用。

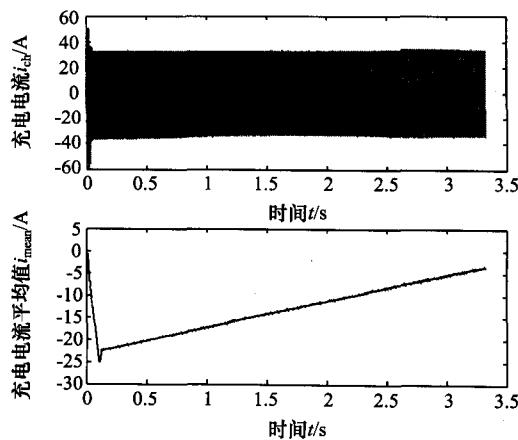


图 8 积雪路面时充电电流及其每隔 0.1s 的平均值

4 结论

所设计的无刷直流电机电动汽车再生 ABS 双闭环控制模型具有良好的动态性、足够的稳定性与强健的鲁棒性。只要在电机峰值工作能力和蓄电池最大充电接受能力以内, 制动回收的能量将随着路面附着系数的增大而增加。所建仿真模型能方便地对比分析该型电动汽车再生 ABS 在不同控制算法下的制动性能, 并为该型电动汽车再生 ABS 的工程实践提供明确的设计方案。

参考文献

- [1] Sakai S, Sado H, Hori Y. Anti-skid Control with Motor in Electric Vehicle [C]. In Proceedings 6th International Workshop on Advanced Motion Control, Nagoya, Japan, IEEE, 2000:317-322.
- [2] Hori Y. Future Vehicle Driven by Electricity and Control Research on Four Wheel Motored“UOT Electric March II” [J]. IEEE Advanced Motion Control, 2002(7):1-14.
- [3] Tur O, Ustun O, Tuncay R N. An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-lock Braking System [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey: IEEE, 2007:944-948.
- [4] Hsiao M, Lin C. Antilock Braking Control of Electric Vehicles with Electric Brake [C]. SAE Paper 2005-01-1581.
- [5] Mi C T, Lin H, Zhang Y. Iterative Learning Control of Antilock Braking of Electric and Hybrid Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2):486-494.
- [6] 陈庆樟, 何仁, 赵连生. 汽车能量再生制动防抱死集成控制方法研究 [J]. 中国机械工程, 2009(2):245-248.
- [7] 赵国柱, 魏民祥. 城市电动客车再生 ABS 系统的建模与仿真 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2):256-261.
- [8] 胡庆波, 郑继文, 吕征宇. 混合动力中无刷直流电机反接制动 PWM 调制方式的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30):87-91.
- [9] 钟仁人. 关于直流脉宽调速系统在制动中泵升电压及能量回馈情况的讨论 [J]. 电气传动, 1990(5):46-51.
- [10] Unsal C K P. Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking Systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999(3):271-281.
- [11] Chan C C, Chau K T, Jiang J Z, et al. Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(2):331-339.
- [12] Valeriote E M, Chang T G, Joehim D M. Fast Charging of Lead-acid Batteries [C]. In 9th Annual Battery Conf: Applications and Advances, California State University, New York, 1994:11-13.