



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

混合动力汽车系统 建模与控制

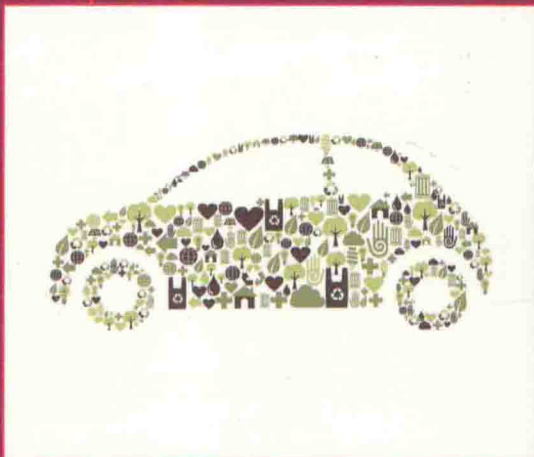
Introduction to Hybrid Vehicle System
Modeling and Control

[加拿大] Wei Liu 著

殷国栋 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

混合动力汽车系统 建模与控制

[加拿大] Wei Liu 著
殷国栋 等译



机械工业出版社

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control >, ISBN < 978-1-118-30840-0 >, by < Wei Liu >, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2013-5122 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

混合动力汽车系统建模与控制/[加] 刘伟著; 殷国栋等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Introduction to hybrid vehicle system modeling and control

ISBN 978-7-111-48496-7

I. ①混… II. ①刘…②殷… III. ①混合动力汽车—系统建模②混合动力汽车—控制系统 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 265194 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 郑 彤

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 陈立辉

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21 印张 · 417 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48496-7

定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

本书系统地讲述了混合动力汽车建模和控制系统的基本原理与实现技术，研究内容注重建模、控制和算法，包括丰富的数据和实例。本书主要包括混合动力汽车的建模、控制、仿真、性能分析和设计等内容，介绍了一个完整的系统解决方案。本书共9章和2个附录，可分为3个部分：①混合动力汽车的系统组成与建模；②混合动力汽车的先进控制算法；③混合动力汽车的工程实现。

本书可作为高等院校车辆工程、电气工程和能源动力专业的高年级本科生及研究生教材，同时也可作为混合动力汽车系统分析、设计和开发的培训参考资料，供汽车设计和研究人员阅读。

译者序

为应对能源和环境危机，世界各国都在致力于新能源汽车的开发和研究。混合动力汽车克服了纯电动汽车续航里程短和传统汽车燃油消耗高的缺陷，被认为是当前最具有发展潜力的新能源汽车。

本书的作者 Wei Liu (刘伟) 博士是美国通用汽车公司高级工程师，具有 20 多年的混合动力汽车的研究开发经验和 15 年的学术科研经历。作者依据在混合动力汽车领域中的科研与实践经验，系统、详细地描述了混合动力汽车的系统特性和数学模型、先进的控制算法和实现技术方法，包括丰富的数据和实例。本书为新能源汽车研究者和企业工程师提供了一套科学严谨的方案，解决混合动力汽车建模和控制方面的问题，是该领域中处理技术难题的有效工具，有助于先进控制算法的研究，促进高效节能的混合动力汽车技术的发展。因此，本书对从事汽车工程研究的学者和工程技术人员有很高的参考价值。

在本书的翻译过程中，得到了国内外同行和朋友的热情帮助。特别是东南大学陈南教授、陈建松、王荣蓉和王金湘老师的认真审阅，车辆工程专业博士生：金贤建、边辰通，以及硕士生：陈琦、李江湖、吕永健、陆志平、刘江华、沈晨、王震宇、陈明胜、吴昊等学生的热情帮助，在翻译和校稿方面做了很多工作，在此一并表示感谢。

由于时间较为仓促以及译者的英文水平问题，书中翻译错误和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正，并希望通过 E-mail 与我们联系（殷国栋：ygd@seu.edu.cn）。

殷国栋
2014. 9. 20

前 言

在过去的 10 年中，混合动力汽车已经进入市场，大量新技术有了显著的发展进步，并得到广泛运用。但是，由于更加严格的燃油经济性、排放要求，以及电力电子、电池和其他主要组成部件的技术发展限制，混合动力汽车的系统设计仍然存在一些重要的挑战。

混合动力汽车使用内燃机与一个或多个电动机相结合来进行驱动，能在不同的燃料、负载和天气等条件不断变化的环境中运行。混合动力汽车系统工程师现在正面临着挑战，他们需要扩大视野，拓展概念和方法来使他们不仅可以适应不完整的模型系统，也能适应初始模型不容易界定、需要在运行中在线修改的系统。

从整体系统性能分析、制造生产计算到新的设计制造和劳务成本，建模与控制在技术发展中发挥着关键作用。为了阐明混合动力汽车系统面临的挑战及推进混合动力汽车系统技术的进步，作者认为出版一本关于混合动力汽车系统建模与控制的图书是很有必要的。

本书中的材料来源于我在加拿大国家研究理事会和通用汽车公司 10 多年的汽车开发、生产和研究工作。本书的目的是帮助读者更好地了解混合动力汽车系统，包括混合动力汽车建模、控制、仿真、性能分析和初步设计等方面知识。

关于混合动力汽车系统建模、仿真和控制算法的研究已经有很多很好的文章。但是，直到现在，仍没有一本能够更加系统和深入地研究性能分析、建模和控制设计三者之间关系的图书。因此，写本书的动机就是提供足够的信息来满足工程师们日益增长的需求，让他们能在书中找到混合动力汽车设计和分析的精确方法。我希望，书中众多简洁和经过精挑细选来解释建模、仿真和控制方法的例子能够达到这样的效果。

本书内容共分为 9 个章节和 2 个附录。第 1 章介绍混合动力汽车系统的架构、能量流及控制。第 2 章介绍混合动力汽车系统的主要部件及其特性，包括内燃机、电动机/发电机、能量存储系统和燃料电池系统。

第 3 章介绍混合动力汽车系统的系统组件在设计和模拟分析中的具体数学模型，包括内燃机、传动系统、电动机、发电机、电池系统、车体系统和驾驶员。本章中建立的模型既可以用于独立的组件分析，也可以用来建立整车仿真系统。

第 4 章介绍了电力电子技术与电动机在混合动力汽车系统中的应用。首先介绍了常用的电力电子开关的特性，然后介绍了 DC-DC 变换器和 DC-AC 逆变器的工作原理，以及无刷直流电动机和交流感应电动机及其控制原理在混合动力汽车中的应用。本章的最后介绍了插入式充电器设计。

第5章介绍了蓄能系统的建模和控制。相关算法起着非常重要的作用，因为它直接影响着混合动力汽车系统的整体燃油经济性、驾驶性能和车辆安全性。但是，由于测量的不确定性，混合动力汽车系统工程师在车辆需求算法方向面临着技术挑战。因此，本章介绍了SOC确定算法和面临的技术挑战。随后，讨论了功率容量算法与电池寿命算法，混合动力汽车电池平衡算法、电池核心温度估计方法和电池系统效率计算也有涉及。

第6章介绍了在不同的驱动工况下有关能源管理问题的解决方案。本章讨论了直接和间接的优化方法。本章中介绍的方法可以被视为最通用的、实际的混合动力汽车的能源管理问题的解决方案。

第7章详细阐述了混合动力系统的其他控制问题，包括发动机波动转矩倾角主动控制、高电压巴士的电压波动控制、能量存储系统的温度控制、电动机牵引和防反转控制、主动悬架系统控制。

第8章讨论AC-120和AC-240的特性、插电式混合动力汽车和纯电池电动汽车的快速公共充电方式，充电电网和配电系统的分配影响。此外，介绍了各种插入式充电策略，包括最优充电策略。

第9章介绍了在混合动力汽车系统的最初设计阶段其确定组件大小和进行系统性能仿真的技术。详细说明了典型测试工况、车辆燃油经济性和排放的计算。

附录A介绍了系统识别、状态和参数估计方法。介绍了混合动力汽车系统控制算法中常用的数学模型。利用递推最小二乘法和广义最小二乘法进行参数估计。运用卡尔曼滤波器和扩展卡尔曼滤波器进行状态和参数联合估计。另外，也涉及了实际混合动力汽车稳定性的算法。

附录B简要介绍了一些改善混合动力汽车系统性能的先进控制方法，包括系统的极点配置，基于目标函数的最优控制，基于动态规划的最优控制，适用于系统随机行为的最小方差和自适应控制技术。另外，还介绍了增强混合动力汽车系统的可靠性和安全性的容错控制策略。

本书既能作为混合动力汽车系统分析与设计的工程参考书，也可作为混合动力汽车系统开发的培训教材，能帮助设计工程师更加了解混合动力汽车系统控制算法的设计与发展，也能用于本科、研究生层次的混合动力汽车系统建模与控制教学课程中。希望作者的努力能成功地帮助读者更好地了解这有趣和令人鼓舞的技术。

刘伟 博士

常用符号表

符 号	名 称
A_d	空气密度
$A_{H/C}$	电池组和加热/冷却通道之间的加热/冷却表面积
Ah	安时
C_a	空气密度高度校正系数
Cap _{BOL}	电池初始容量
Cap _{BOL}	电池寿终的设计容量
C_{bat_life}	电池寿命消耗权重系数
C_c	冷却液比热
C_d	汽车气动阻力系数
C_{ds}	MOSFET 从源极到漏极的电容
C_{diff}	二阶电路电池模型的扩散电容
C_{dl}	一阶和二阶电路电池模型的双电层电容
C_{dyn}	电池回路模型的动态电容
C_{ele}	电力消耗权重因数
$C_{energy_balance}$	能量不平衡消耗因数
C_{ess}	电池组的比热
C_{fuel}	燃料消耗权重因数
C_{gd}	MOSFET 从栅极到漏极的寄生电容
C_{gs}	MOSFET 从栅极到源极的寄生电容
D	PWM 控制方法的调制周期
D_{cf}	汽车质心到前轮的距离
D_{cr}	汽车质心到后轮的距离
E_a	反电动势
E_a	电池的活化能
F	法拉第常数, 每摩尔电子的库仑量 ($9.6485309 \times 10^4 \text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$)
F_a	汽车迎风面积
$F_{actuator_max}$	主动悬挂系统驱动器最大输出力
F_{wf}	汽车前轮摩擦力
F_{wr}	汽车后轮摩擦力

(续)

符 号	名 称
$G_{\text{actuator}}(s)$	主动悬挂系统驱动器的传递函数
$G(\text{Cap})$	电池组的容量降低量
$G(R)$	电池组内阻增量
H_2	氢气
H_{cg}	汽车质心高度
$H_{\text{gen'd}}$	电池发热量
$I_{\text{balancing_max}}$	电池组最大平衡电流
I_{FAV}	最大平均正向电流
I_{FRMS}	最大方均根正向电流
I_{FSM}	最大浪涌电流
I_{H}	晶闸管维持电流
I_{GM}	晶闸管最大峰值正向栅电流
$I_{\text{max_chg}}$	电池组最大充电电流
$I_{\text{max_dischg}}$	电池组最大放电电流
J	电动机转动惯量
J_{axle}	传动系统在轴上的集中惯量
J_{eng}	发动机集中惯量
J_{fil}	主减速器惯量
J_{gr}	减速箱惯量
J_{mot}	电动机集中惯量
J_{tc}	液力变矩器集中惯量
J_{wh}	车轮惯量
K	PID 控制器比例放大系数
K_{actuator}	主动悬挂系统驱动器从输入电压到输出力的放大倍数
K_e	无刷直流电动机电压常数
K_m	无刷直流电动机转矩常数
LiFePO_4	磷酸铁锂
L_m	励磁电感
L_r	转子相电感
L_r	液力变矩器负荷率
L_s	电动机定子相电感
M_c	能量存储系统冷却液总质量
M_{ess}	能量存储系统质量

符 号	名 称
N_C	行星齿轮组保持架齿数
N_R	行星齿轮组行星轮齿数
N_S	行星齿轮组太阳轮齿数
O_2	氧气
P_{acc}	集中辅助功率
P_{a_pet}	加速踏板位置的百分比
P_{brake_pet}	制动踏板位置的百分比
P_{bat}	电池功率
P_{ct}	爬坡能力
P_{eng}	发动机功率
P_{mot}	电动机功率
$P_{max_chg_bat}$	电池最大充电功率
$P_{max_dischg_bat}$	电池最大放电功率
$P_{max_prop_mot}$	电机最大输出功率
$P_{max_regen_mot}$	电机最大输入功率
P_{pump}	加热/冷却系统系的运行功率
P_{Veh}	汽车需求功率
Q	电池反应商数
Q_c	表面对流传热
$\dot{Q}_{H/C}$	加热器/冷却器的传热效率
R	电阻
R_{BOL}	电池初始内阻
R_{EOL}	电池寿终内阻
R_{ct}	二阶电路电池模型的充电电阻
R_{diff}	二阶电路电池模型的扩散电阻
R_{dyn}	电池回路模型的动态电阻
R_{ess}	电池组内阻
R_g	普适气体常数
R_{iyt}	电池内阻
R_{ohm}	电池回路模型的电阻
R_r	电动机转子相电阻
R_s	电动机定子相电阻
R_{wf}	汽车前轮反作用力

(续)

符 号	名 称
R_{wr}	汽车后轮反作用力
SOC_{init}	电池初始充电状态
SOC_{target}	电池目标充电状态
$T_{actuator}$	驱动器从输入电压到输出的时间常数
T_c	冷却液温度
T_{c_init}	冷却液初始温度
T_{c_sp}	冷却液设定温度
T_d	PID 控制器微分时间常数
T_{ess}	能量存储系统温度
T_{ess_init}	电池初始温度
T_{ess_sp}	能源存储系统的设定温度
T_i	PID 控制器积分时间常数
T_j	电力电子最高结温
T_s	PWM 信号周期/采样周期
V_{BE}	双极型晶体管的基极-发射极电压
V_{CE}	双极型晶体管的集电极-发射极电压
V_{DRM}	晶闸管正向峰值重复阻断电压
$V_{dynamic}$	电池回路模型的动态组件电压
V_{GM}	晶闸管的最大峰值正栅极电压
V_{GS}	MOSFET 栅极电压
V_{max}	电池组最高端电压
V_{min}	电池组最低端电压
V^0	标准电池电位
V_o	电池回路模型电位
V_{oc}	开路电压
V_R	功率二极管的最大反向电压
V_{RRM}	晶闸管峰值反向阻断电压
V_{RSM}	晶闸管的非重复性峰值反向电压
V_{RWM}	功率二极管的最大工作峰值反向电压
$V_{terminal}$	电池组端电压
a	加速度
f_d	主减速器传动比
f_{fuel}	燃油经济性

符 号	名 称
f_{emi_CO}	一氧化碳排放
f_{emi_HC}	碳氢化合物排放
$f_{emi_NO_x}$	氮氧化合物排放
f_{emi_PM}	颗粒物排放
g_{CO_hot}	热一氧化碳排放率
g_{fuel_hot}	热燃油经济性
g_{HC_hot}	热碳氢化合物排放率
g_m	MOSFET 的跨导
$g_{NO_x_hot}$	热氮氧化合物排放率
g_{PM_hot}	热颗粒物排放率
g_r	传动比
h	传热系数
h_{bat}	电池的传热系数
i_{ds}	交流感应电动机的 d 轴或气隙磁链电流
i_{qs}	交流感应电动机的 q 轴或转矩电流
i_{Qs}	交流感应电动机定子 q 轴电流
i_{Ds}	交流感应电动机定子 d 轴电流
i_{Qr}	交流感应电动机转子 q 轴电流
i_{Dr}	交流感应电动机转子 d 轴电流
k_{aero}	风阻因数
k_{chg}	充电功率裕度系数
k_d	插入式充电器畸变因数
k_{rrc}	滚动阻力系数
k_{sc}	路面系数
k_{split}	发动机和电动机的分离系数
\dot{m}_c	冷却液流量
m_v	制造商称汽车总质量
$m_v a$	加速阻力
$m_v g$	汽车总质量
n_e	电池反应中转移的电子数
r_C	行星齿轮组保持架半径
r_{ds}	MOSFET 源极到漏极的电阻
r_o	MOSFET 输出电阻

(续)

符 号	名 称
r_R	行星齿轮组行星轮半径
r_S	行星齿轮组太阳轮半径
r_{wh}	车轮有效滚动半径
s_r	液力变矩器传动比
ν_{Qs}	交流感应电动机定子 q 轴电感
ν_{Ds}	交流感应电动机定子 d 轴电感
ν_{Qr}	交流感应电动机转子 q 轴电感
ν_{Dr}	交流感应电动机转子 d 轴电感
ΔS	反应熵的变化量
ψ	电动机转子磁链
Ψ_{Qs}	电动机定子 q 轴磁链
Ψ_{Ds}	电动机定子 d 轴磁链
Ψ_{Qr}	电动机转子 q 轴磁链
Ψ_{Dr}	电动机转子 d 轴磁链
α	道路倾角
λ	遗忘因子的递推最小二乘估计值
λ_{fuel}	燃油经济性的温度因数
λ_{CO}	一氧化碳排放的温度因数
λ_{HC}	碳氢化合物排放的温度因数
λ_{NO_x}	氮氧化物排放的温度因数
λ_{PM}	颗粒物排放的温度因数
$\delta(t)$	单位脉冲函数
η_{bat}	电池效率
η_{chg}	电池充电效率
η_{td}	主减速器效率
η_{gr}	变速箱效率
$\eta_{H/C}$	加热器/冷却器效率
η_{mot}	电动机效率
η_{pt_eng}	传动系统效率
η_{pt_mot}	电动机功率在动力系统效率
η_{tc}	液力变矩器效率
μ_A	模糊控制的隶属函数
τ_a	加速力矩

符 号	名 称
τ_{access}	机械配件的集中力矩
τ_{C}	库仑摩擦力矩
τ_{ect}	发动机在节气门关闭状态下的力矩
τ_{com}	压缩力矩
τ_{crank}	起动力矩
τ_{demand}	汽车需求力矩
τ_{e}	电磁力矩
τ_{eng}	发动机力矩
τ_{load}	负载力矩
τ_{loss}	集中损失力矩
τ_{mot}	电动机转矩
τ_{regen}	再生转矩
τ_{r}	液力变矩器力矩放大系数
τ_{s}	静摩擦力矩
τ_{trac}	动力系统牵引力
τ_{v}	黏性摩擦力矩
ω	车轮转速
ω_{c}	行星轮系行星架转速
ω_{eng}	发动机转速
$\omega_{\text{max_eng}}$	发动机最高转速
ω_{mot}	电动机转速
$\omega_{\text{max_mot}}$	电动机最高转速
ω_{R}	行星轮系行星轮转速
ω_{s}	交流感应电动机的同步转速
ω_{s}	行星轮系太阳轮转速

缩 写 词

缩 写	英 文	中 文
AC	Alternating Current	交流电
APU	Auxiliary Power Unit	辅助动力模块
AR	AutoRegressive model	自回归模型
ARMAX	AutoRegressive Moving Average eXogenous model	自回归移动平均外源性模型
ARX	AutoRegressive eXogenous model	自回归外源性模型
BEV	Battery- powered Electric Vehicle	纯电动汽车
BJT	Bipolar Junction Transistor	双极结型晶体管
BLDC	BrushLess DC	无刷直流电动机
CD	Charging Depleting	充电深度
CO	Carbon monoxide	一氧化碳
CO ₂	Carbon dioxide	二氧化碳
CS	Charging Sustaining	充电保持
CVT	Continuously Variable Transmission	无级变速器
DC	Direct Current	直流电
DCR	Driving Cycle Recognition	行驶工况识别
DoD	Depth of Discharge	放电深度
DOE	Department Of Energy ; Design Of Experiment	能源部 ; 实验设计
DOHC	Dual Overhead Cam Engine	双顶置凸轮轴发动机
DP	Dynamic Programming	动态规划
DSR	Driving Style Recognition	驾驶方式识别
ECE	Emission Certificate Europe	欧洲排放标准
ECU	Electronic/Engine Control Unit	发动机控制单元
e- CVT	electronic Continuously Variable Transmission	电控无级变速器
EDLC	Electrochemical Double- Layer Capacitor	电化学双电层电容器
EKF	Extended Kalman Filter	扩展卡尔曼滤波器
EMF	ElectroMagnetic Force	电磁力
EMI	ElectroMagnetic Interference	电磁干扰
EREV	Electric Range Extended hybrid Vehicle	电控增程式混合动力汽车
ESS	Energy Storage System	储能系统

(续)

缩 写	英 文	中 文
EUDC	Extra Urban Driving Cycle	城郊行驶工况
EV	Electric Vehicle	电动汽车
EVT	Electrical Variable Transmission	电气变速器
FC	Fuel Cell	燃料电池
FET	Field Effect Transistor	场效应晶体管
FTP	Federal Test Procedure	联邦测试程序
Genset	engine-Generator pair set	发动机-发电机组
GM	General Motors	通用汽车公司
HC	HydroCarbons	碳氢化合物
HEV	Hybrid Electric Vehicle	混合动力汽车
HPPC	Hybrid Pulse Power Characterization test	混合脉冲功率特性试验
ICE	Internal Combustion Engine	内燃机
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
Li-ion	Lithium ion	锂离子
LQC	Linear Quadratic Control	线性二次最优控制
MIMO	Multi-Input Multi-Output system	多输入多输出系统
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor	金属氧化物半导体场效应晶体管
MPC	Model Predictive Control	模型预测控制
MRAC	Model Reference Adaptive Control	模型参考自适应控制
NiCd	Nickel-Cadmium battery	铬镍电池
NiMH	Nickel-Metal Hydride battery	镍金属氢化物电池
NiO _x	Nickel Oxyhydroxide	羟基氧化镍
NO _x	Nitrous Oxide	氮氧化合物
OCV	Open-Circuit Voltage	开路电压
OP	Operating Point	工作点
OVPU	Over Voltage Protection Unit	过电压保护单元
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	质子交换膜燃料电池
PFC	Power Factor Correction	功率因数校正
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	插电式混合动力汽车
PID	Proportional Integral Derivative controller	比例-积分-微分控制器
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles	新一代车辆伙伴关系
PST	Power Split Transmission	功率分流传动
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制

(续)

缩 写	英 文	中 文
RMS	Root Mean Square	方均根
RPM	Revolution Per Minute	每分钟转数
RWR	RoadWay Recognition	道路识别
SEI	Solid- Electrolyte Interface	固体电解质界面
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure	联邦补充测试循环
SG	Specific Gravity	比重
SI	Spark Ignition	火花塞点火
SISO	Single- Input- Single- Output system	单输入单输出系统
SOC	State Of Charge	荷电状态
SOFC	Solid- Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
SOH	State Of Health	健康状况
SOHC	Single OverHead Cam engine	单顶置凸轮发动机
SOL	State Of Life	寿命状况
SP	Singular Pencil model	奇异束模型
TRC	Transient Response Characteristic	瞬态响应特性
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule	城市测功机行驶工况
USABC	U. S. Advanced Battery Consortium	美国先进电池联盟
VITM	Voltage, current, and Temperature Measurement unit	电压、电流和温度测量单位