

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.013

基于 Ansoft 的高速开关磁阻电机有限元分析

朱宏基¹, 周 飞², 瞿遂春², 李建忠¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 分析了开关磁阻电机结构和数学模型, 设计了一台 1 kW 三相 6/4 极高速开关磁阻电机样机结构参数。利用有限元软件 Ansoft 详细地对该样机的电磁参数进行了仿真计算, 仿真结果验证了电机设计的正确性。同时为 SR 电机的优化设计及进一步的研究提供了理论依据。

关键词: 开关磁阻电机; 数学模型; 有限元分析; Ansoft; 优化设计

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0066-05

Finite Element Analysis of High Speed Switched Reluctance Motor Based on Ansoft

Zhu Hongji¹, Zhou Fei², Qu Suichun², Li Jianzhong¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China)

Abstract: Analyzes the structure and mathematical model of switched reluctance motor and designs structure parameter for a prototype of 1kw three phase 6/4 poles high speed switched reluctance motor. Simulates and calculates the electromagnetic parameters in detail by the finite element analysis software of Ansoft. The simulation results verify the correctness of the design method and also provide theoretical basis for the design optimization and further research of SR motor.

Keywords: switched reluctance motor; mathematical model; finite element analysis; Ansoft; optimal design

0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SR 电机) 结构简单坚固, 可靠性高、容错能力强, 调速性能优异, 适合应用于高速领域。SR 电机为双凸极结构, 绕组电流非正弦和铁心磁路高度饱和的现象, 使其中的电磁关系十分复杂。电感和磁链均为电流和转子位置角度的二维函数, 再加上 SR 电机采用的是非线性电路和非线性控制策略, 这些特性使得高速 SR 电机在电机设计, 驱动控制系统设计与实现等方面都存在较多技术难题^[1]。SR 电机的高度非线性

使得解析法建立非线性模型非常困难, 也无法用计算公式准确描述电机参数变化对电机性能的影响, 给高速 SR 电机的结构参数优化, 性能校验等工作带来较多困难^[2]。

本文利用有限元分析软件 Ansoft, 对设计的一台高速 SR 电机样机进行静态和瞬态电磁场分析, 以此来验证样机设计方案和设计过程的正确性。同时, 采用二维瞬态磁场和耦合电路协同仿真的分析方法, 计算了样机一个工作时间段内的瞬时工况, 并进行了后处理场图的性能曲线绘制, 为高速 SR 电机优化设计提供理论依据和参考。

收稿日期: 2013-05-19

作者简介: 朱宏基 (1987-), 男, 江苏宿迁人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型电机及其控制,

E-mail: zhuhongji11@163.com

1 SR 电机结构和数学模型

1.1 电机结构

SR 电机的定、转子均采用双凸极齿槽结构, 并且极数不同, 定子设有集中绕组, 转子既无绕组也无永磁体。以三相 6/4 结构 SR 电机为例, 其定子有 6 个齿极, 沿圆周均匀分布, 每个齿极上设有一个绕组, 径向相对的 2 个绕组串联构成一相绕组, 可组成 A, B, C 三相绕组。转子有 4 个沿圆周均匀分布的齿极, 齿极上无绕组。图 1 为三相 6/4 结构 SR 电机一相电路的结构图。

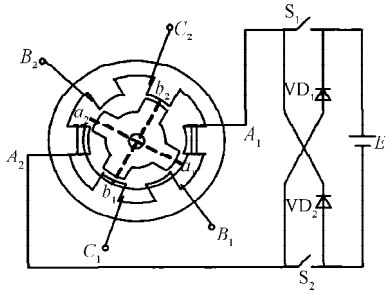


图 1 三相 6/4 结构 SR 电机结构原理图

Fig. 1 The structure schematic of three-phase 6/4 SRM

1.2 数学模型

SR 电机运行的理论和所有电磁式机电装置运行理论在本质上没有区别, 都是由一对电端口和一对机械端口构成的二端口装置。对 k 相 SR 电机, 在不计磁滞、涡流和绕组间互感时, 其系统示意图如图 2 所示^[3]。

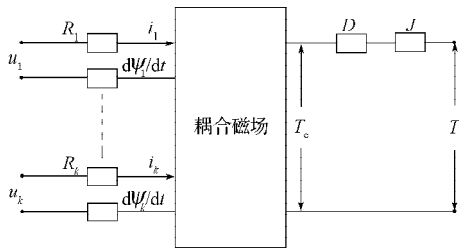


图 2 SR 电机系统示意图

Fig. 2 The system diagram of SRM

图中: u_k, R_k, i_k, ψ_k 分别为 k 相绕组的电压、电阻、电流和磁链;

J 为 SR 电机转子及负载的转动惯量;

D 为黏性摩擦系数;

T_c 和 T_l 分别为电磁转矩和负载转矩。

1.2.1 电压方程

根据电路基本定律, SR 电机第 k 相的电压平衡方程^[3]为

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

1.2.2 运动方程

根据力学定律, 可得 SR 电机的电磁转矩和负载

转矩作用下的转子机械运动方程^[3]为

$$T_c = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_l, \quad (2)$$

$$T_c = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i_k = \text{const}}, \quad (3)$$

式中 W' 为绕组的磁共能。

在线性的条件下, 由式 (3) 可得

$$T_c = \left. \frac{\partial(\psi i/2)}{\partial \theta} \right|_{i_k = \text{const}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}, \quad (4)$$

式中: θ 为转子的位移角;

L 为绕组电感。

2 电磁设计

根据高速开关磁阻电机电磁设计的经验计算公式, 初步设计了一台功率为 1 kW, 额定转速为 55 000 r/min 的 6/4 极高速开关磁阻电机样机^[4]。然后利用 Ansoft 的 RMxpirt 和 Maxwell 2D 模块, 并采用电磁场有限元分析方法, 对样机的瞬态和静态性能进行精确分析, 通过对样机设计参数进行多次调整, 最后得到比较符合工程实际的结果。样机主要参数如表 1 所示。

表 1 开关磁阻样机主要结构参数

Table 1 Main structure parameters of SR prototype

| 参数 | 额定功率 / kW | 额定转速 / (r · min ⁻¹) | 定子极数 | 定子外径 / mm | 定子内径 / mm |
|----|------------|---------------------------------|-----------|-----------|------------|
| 取值 | 1 | 55 000 | 6 | 70 | 40 |
| 参数 | 定子极弧 / (°) | 定子极高 / mm | 转子极数 | 转子内径 / mm | 转子极弧 / (°) |
| 取值 | 30 | 9 | 4 | 16 | 32 |
| 参数 | 转子轭高 / mm | 气隙长度 / mm | 铁心长度 / mm | 每相绕组匝数 | |
| 取值 | 6 | 0.5 | 45 | 53 | |

基于 Ansoft 的 RMxpirt 模块, 根据表 1 的结构参数建立电机的二维几何模型, 如图 3 所示。

在 RMxpirt 模块中仿真计算得到 2 条重要的性能曲线和计算结果清单, 如图 4~6 所示。

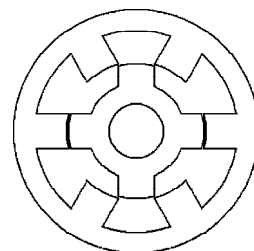


图 3 SR 电机的 RMxpirt 模型

Fig. 3 RMxpirt model of SRM

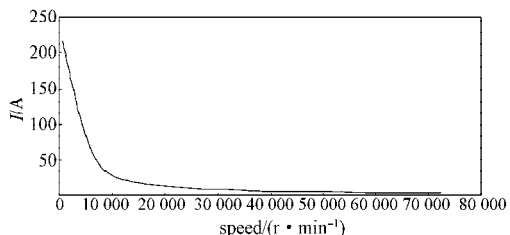


图4 转速-电流曲线

Fig. 4 The curve of speed-current

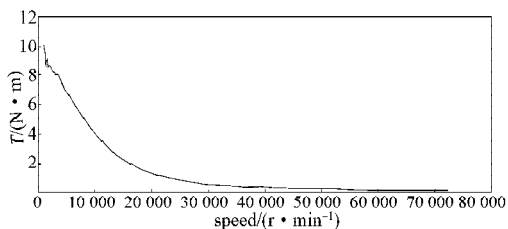


图5 转速-输出转矩曲线

Fig. 5 The curve of speed-output torque

| FULL-LOAD OPERATION DATA | |
|---|---------|
| Input DC Current (A): | 5.08108 |
| Phase RMS Current (A): | 4.37332 |
| Phase Current Density (A/mm ²): | 14.0467 |
| Frictional and Windage Loss (W): 30.8983 | |
| Iron-Core Loss (W): 257.905 | |
| Winding Copper Loss (W): 63.734 | |
| Diode Loss (W): 3.81146 | |
| Transistor Loss (W): 13.373 | |
| Total Loss (W): 375.322 | |
| Output Power (W): 995.553 | |
| Input Power (W): 1371.89 | |
| Efficiency (%): 72.5391 | |
| Rated Speed (rpm): 56547 | |
| Rated Torque (N · m): 0.167829 | |
| Flux Linkage (Wb): 0.6233062 | |
| Stator Pole Flux Density (T): 0.495731 | |
| Stator Yoke Flux Density (T): 0.428537 | |
| Rotor Pole Flux Density (T): 0.488638 | |
| Rotor Yoke Flux Density (T): 0.428537 | |
| Coil Length per Turn (mm): 164.254 | |
| Winding Resistance in Phase (ohm): 1.21202 | |
| Winding Resistance at 20C (ohm): 0.996907 | |
| Winding Leakage Inductance (mH): 0.242608 | |
| Iron-Core Loss Resistance (ohm): 493.803 | |
| Frequency of Phase Current (Hz): 3775.46 | |
| Maximum Output Power (W): 4265.56 | |

图6 RMxpirt的计算结果清单

Fig. 6 The calculation result list of RMxpirt

由图4可知,低速时的电流很大,通常可以采用电流斩波来控制过大的启动电流。由图5和图6可知,满载的转速与预期设计的转速相接近,其它相关数据也在合理的范围内。RMxpirt 模块仿真结果初步验证了样机结构参数设计的正确性。

3 瞬态磁场分析

在 Maxwell 2D 瞬态场建立的二维有限元模型如图7所示。

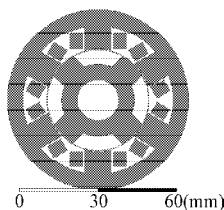


图7 三相6/4结构SR电机模型

Fig. 7 The model of three-phase 6/4 SRM

利用二维瞬态磁场与耦合电路协同仿真的分析方法,计算了高速SR电机的瞬时工况,并进行了后处理场图的性能曲线绘制,得到2条重要的性能曲线如图8~9所示。

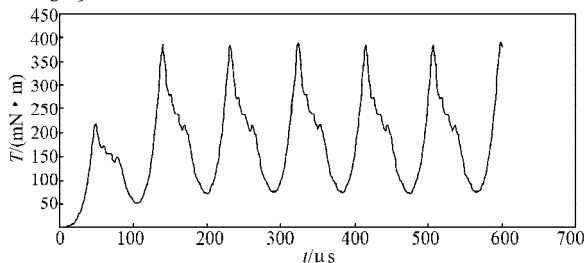


图8 SR电机转矩曲线

Fig. 8 The torque curve of SRM

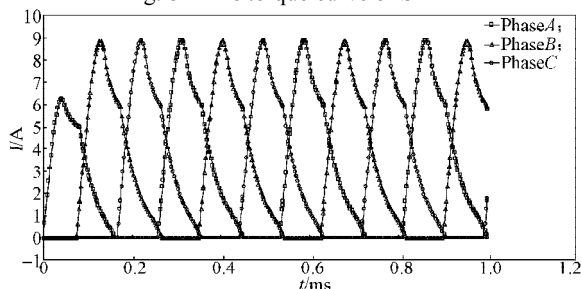


图9 SR电机相电流曲线

Fig. 9 The phase current curve of SRM

根据公式 $P = T\Omega$ 可知,电机额定转矩的理论值为 $173.624 \text{ mN} \cdot \text{m}$,由 Maxwell 2D 的后处理计算结果可得,图8中稳态阶段的平均转矩为 $174.745 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。仿真结果表明,仿真值接近理论值,从而达到了预期效果,也初步验证了电机设计过程的正确性。从图中也可看出,SR电机转矩脉动较大。

为达到降低转矩脉动的目的,可利用 Ansoft 的参数化功能来优化电机结构参数。当电机的结构参数初步确定后,可通过二维模型的仿真计算来进行优化设计,以达到预期目标。

4 静态磁场分析

当电机某相绕组通以励磁电流时,该相绕组的磁链、电感和转矩不仅随电流 i 变化,而且随转子位置 θ 的不同作周期性变化^[5]。

在仿真分析的过程中,可通过 Maxwell 的参数化计算方法^[6],对电机磁场的分布、磁链曲线 $\Psi(\theta, i)$ 、电感曲线 $L(\theta, i)$ 以及矩角特性 $T(\theta, i)$ 进行分析和计算,以此来考察 SR 电机的静态特性。静态特性可以全面地反映一台电机的性能特点,并且直接与电机设计过程有关,对验证电机性能有重要的意义^[7-8]。

4.1 静态仿真建模

对系统进行静态特性分析的建模过程如下:

- 1) 将 RMxpirt 模块中建立的电机模型导入 Maxwell;

- 2) 默认瞬态场求解器, 修改并选择 Magnetostatic 求解器;
- 3) 删除原边界条件, 重新定义边界条件和激励;
- 4) 设置转子位置约束变量 θ 和电流变量 I ;
- 5) 设置 θ 和 I 的步长, 并进行参数化求解。

4.2 仿真结果及分析

仿真计算时设置转子位置角 θ 为 $0\sim 90^\circ$, 其中 0° 为转子槽中心线对准定子极中心线位置, 45° 为转子极中心线对准定子极中心线位置。

样机单相通电时, 在相绕组电流为 10 A , 转子位置角为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 时的二维磁场的等磁位线分布, 如图 10 所示。

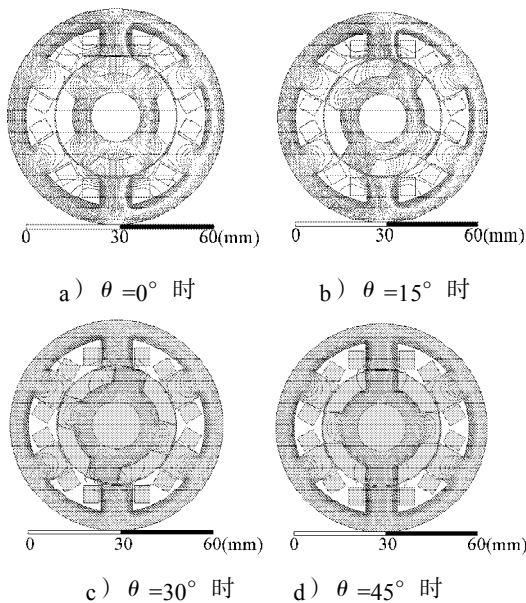


图 10 单相励磁 SR 电机磁力线分布图

Fig. 10 The distribution of magnetic field line for single-phase excitation SRM

由图可知, 当 SR 电机一相绕组通以电流, 转子位置角 $\theta=0^\circ$ 时, 由于气隙磁阻较大, 样机的漏磁通也相对较大。当定、转子极部分重合时, 定、转子极极身的局部饱和严重。随着转子极与定子极表面重合面积的增大, 定、转子极极身的饱和部分逐渐增加, 完全重合时, 定、转子极基本上处于饱和状态。

电流为 $0\sim 80\text{ A}$, 转子位置为 $0\sim 45^\circ$ 的样机, 单相导通的磁化曲线族, 如图 11 所示。从图分析可得, 当转子位置角在 0° (最小电感处) 时, 磁链与电流呈线性关系且与电流成正比, 此时电感值为常数。当转子位置从不对齐位置 (电角度为 0°) 旋转到部分对齐位置 (电角度为 $15^\circ, 30^\circ$) 再到完全对齐位置 (电角度为 45° , 即最大电感处) 的过程中, 磁链和电流呈非线性关系。当电流逐渐增加时, 由于铁心饱和的影响, 电感逐渐下降。在同一电流下, 磁链

值随着转子位置角的增大而增大。当转子极旋转到与定子极接近重合时, 磁路由欠饱和过渡到过饱和, 导致磁链增加非常缓慢。

转子位置为 $0\sim 90^\circ$, 电流为 $0\sim 80\text{ A}$ 的电感特性曲线, 如图 12 所示。

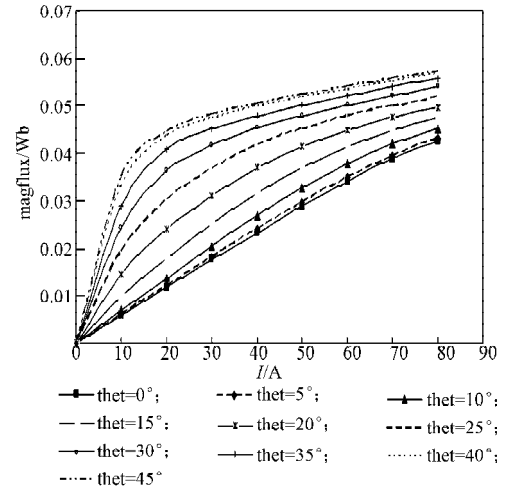


图 11 磁化曲线族

Fig. 11 Magnetization curves

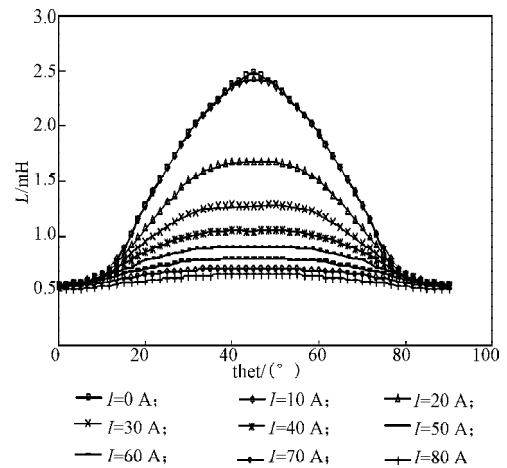


图 12 电感特性曲线

Fig. 12 The curve of inductive characteristics

由图可知, 三相 $6/4$ 极开关磁阻电机, 转子角为 $0\sim 45^\circ$ 时电感增大, $45\sim 90^\circ$ 电感减小, 并且关于 45° 时对称, 电感周期为 90° 。

由于开关磁阻电机的对称性, 分析一个转子角即可得到整个电机的特性。

转子位置为 $0\sim 90^\circ$, 电流为 $0\sim 80\text{ A}$ 时的矩角特性曲线, 如图 13 所示。由图可知, 在转子位置角为 $0\sim 45^\circ$, 即电感上升区, 转矩为正, 且随着电流的增大转矩增大, 在转子位置角为 $45\sim 90^\circ$, 即电感下降区, 转矩为负, 且随着电流的增大转矩增大, 符合开关磁阻电机理论推导结果。二维图与三维图准确给出了转矩与电流、转子位置的关系。

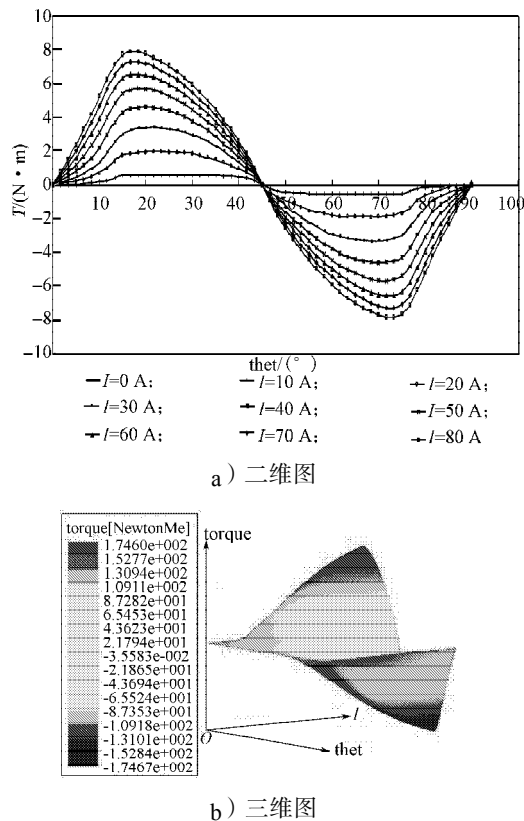


图13 矩角特性曲线

Fig. 13 The characteristic curve of torque-angle

针对SR电机具有的高度非线性特点,为实现非线性模型的创建,可将Ansoft仿真得到的电流、转子位置和转矩数据存储在Matlab仿真软件中的Lookup table模块中,以便于在Matlab中通过二维查表法创建非线性模型。同时根据检测得到的转子位置和相电流查表,可得到转矩值,进而为SR电机高性能的直接转矩控制提供有效途径。

5 结语

1) 分析了SR电机的结构和工作原理,给出了其数学模型,并设计了一台1 kW三相6/4结构高速SR电机。

2) 利用Ansoft软件对SR电机的电磁设计、瞬态磁场和静态磁场进行了仿真,得到了相关的性能曲线和计算清单。仿真结果较精确地反映了高速开关磁阻电机的转矩、电流、电感、磁链等特性,从而初步验证了电机设计的正确性。

3) 瞬态磁场仿真计算结果为高速SR电机的优化设计、改善电机性能提供了理论依据。静磁场下计算出的SR电机的磁化数据和矩角数据,为在Simulink中依据二维查表实现SR电机的非线性模型创建提供

依据,为进一步减小转矩脉动提供了方法。

参考文献:

- [1] 裴丽娜,葛宝明,毕大强,等.高速开关磁阻电机电磁解析分析方法[J].电机与控制学报,2010,14(9):48-54. Pei Li'na, Ge Baoming, Bi Daqiang, et al. An Analytical Method for Electromagnetic Performance of High-Speed Switched Reluctance Motor[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(9): 48-54.
- [2] 王宏华.开关磁阻电动机调速控制技术[M].北京:机械工业出版社,1999:37-38. Wang Honghua. SRM Speed Regulation Control Technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999: 37-38.
- [3] 吴红星.开关磁阻电机系统理论与控制技术[M].北京:中国电力出版社,2010:21-23. Wu Hongxing. SRM System Theory and Control Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 21-23.
- [4] 周飞,瞿遂春,朱宏基,等.一种计算开关磁阻电机径向力的新方法[J].南通大学学报:自然科学版,2013,12(2):16-20. Zhou Fei, Qu Suichun, Zhu Hongji, et al. A New Method of Calculating the Radial Force for Switched Reluctance Motor[J]. Journal of Nantong University: Natural Science Edition, 2013, 12(2): 16-20.
- [5] Jain A K, Mohan N. Dynamic Modeling, Experimental Characterization and Verification for SRM Operation with Simultaneous Two-Phase Excitation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1238-1249.
- [6] 曲兵妮,宋建成,张宏达,等.基于有限元分析的开关磁阻电动机静态和稳态特性研究[J].太原理工大学学报,2009,40(4):400-402. Qu Bingni, Song Jiancheng, Zhang Hongda, et al. Research on the Static Characteristic and Steady State Performance of a Switched Reluctance Motor Based on Finite Element Analysis[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2009, 40(4): 400-402.
- [7] Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Application[M]. Florida: CRC Press, 2001: 55.
- [8] Li Weili, Sheng Man, Huo Fei. Optimal Design and Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles[C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008: 1-5.

(责任编辑:邓光辉)