

# 太阳能电动汽车总体设计和匹配

简林莎,郎明华,吉跟昌,卢吉国

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**针对电动汽车动力来源的局限性和太阳能技术的不成熟,提出了太阳能电动汽车的总体设计和参数匹配的设计方案;建立了太阳能电池组工程数学模型,并根据建立的模型对太阳能电动汽车的设计做了补充计算和创新应用,主要确定了整车动力系统和传动系统的基本参数和构造形式,并基于 Matlab 平台对该设计进行分析和匹配仿真。结果表明:建立的太阳能电池工程数学模型符合设计要求,使太阳能电池总是工作在最佳功率点;得出了汽车行驶阻力与驱动力图、汽车加速度倒数曲线图、功率、转矩与转速曲线图和汽车动力特性图,并与实际法规的要求和设计手册上的数据相比较,其设计要求和各项参数的选定都能满足整车要求。

**关键词:**汽车工程;太阳能;总体设计;动力系统;参数匹配

**中图分类号:**U469.721

**文献标志码:**A

## Overall design and matching of solar energy electric vehicles

JIAN Lin-sha, LANG Ming-hua, JI Gen-chang, LU Ji-guo

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Since the electric vehicle power sources are limited and solar technology is not mature, the overall design and parameters matching design scheme of the solar electric car were put forward. The solar battery engineering mathematics model was established, and the supplementary calculation and application innovation were added according to the mode. The basic parameters and construction forms of vehicles' dynamic system and transmission system were determined based on Matlab platform which accomplished analysis and matching simulation for the design. The results show that the solar battery engineering mathematics model is consistent with the design requirements, and solar cells work at the best power points. The car running resistance and driving force diagram, car acceleration reciprocal diagram, power, torque and speed curve and automobile dynamic characteristic diagram are obtained. Finally, the conclusion are compare with actual regulatory requirements and data in the design manual, and the design requirements and the parameters selection meet the requirements of vehicles. 2 tabs, 8 figs, 14 refs.

**Key words:** automotive engineering; solar energy; overall design; power system; parameter matching

0 引言

汽车工业面临的<sup>最大挑战是能源的消耗和尾气排放对周围环境的破坏。其中,汽车造成的空气污染占整个城市空气污染的 60%,甚至到 90%,所以,太阳能电动汽车的发展将成为未来汽车行业的发展潮流<sup>[1]</sup>。</sup>

太阳能电动汽车的<sup>总体设计在实用型汽车中应用较少,主要用于赛车部分,太阳能电动汽车的研制还仅限于小功率的利用和辅助利用,况且太阳能电动汽车的开发技术还不成熟,总体设计和匹配没有系统的理论基础,相应的零部件开发还处于基本空白阶段,而用在太阳能电动汽车上的先进技术,如光电技术、轻质车身技术、太阳能最大功率跟踪和控制技术等都有待提高<sup>[2-3]</sup>。开发太阳能电动汽车的费用比较高,研发费用高达上千万,因此,对太阳能车的总体设计和较好的匹配是降低费用的关键,也是发展太阳能车的关键。为此,本文研究和设计了太阳能电动汽车的总体设计和匹配计算,主要针对动力系统和传动系统,而对转向系、制动系和车身线路只做了简要介绍。首先确定整车的基本结构和布置形式,然后选定整车的各项参数,并通过各项要求对电动机、蓄电池和太阳能电池进行选型和动力性参数匹配计算,并基于 Matlab 平台对该车的动力性进行验证,结果表明,该太阳能电动汽车的总体设计和各项参数均满足设计的要求。</sup>

1 结构和工作原理

太阳能电动汽车的主体构造是由太阳能电池板、储能装置和电机系统三大结构组成,其结构原理如图 1 所示。

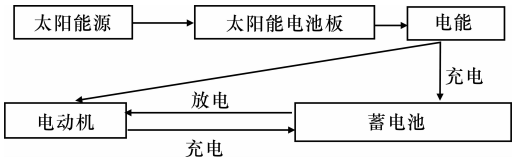


图 1 太阳能电动汽车构造

Fig. 1 Structure of solar energy electric vehicle

太阳能电动汽车的工作原理如下:光照射在电池板上产生电流,通过峰值功率跟踪仪以及蓄电池的充电控制器输送至蓄电池存储或直接送给电动机工作。为了有效地利用太阳能,常常需要有太阳能最大功率跟踪装置(MPPT),而且在车辆工作中需

要控制装置进行合理的能量分配,完整的能量流程如图 2 所示<sup>[4]</sup>。

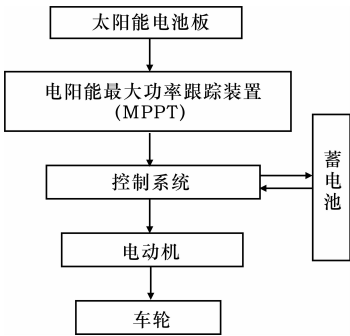


图 2 能量流程

Fig. 2 Energy flow

本文主要考虑以下工作过程,对再生制动不做深入地研究。

(1) 阳光充足或不足时,尽量利用太阳能和蓄电池中的电同时驱动车辆。

(2) 当没有阳光或者太阳能电池驱动设备不能正常工作时,蓄电池可以独自驱动车辆行驶。

2 总体设计流程

电动汽车整车总体设计主要有:确立整车设计目标、整车参数、底盘三维参数布置设计、车身设计和整车性能计算。其中,底盘三维参数布置设计包括蓄电池布置设计、电机及控制系统布置设计、转向系布置设计、传动系布置设计、车身线路布置设计和制动系布置设计,具体流程如图 3 所示。

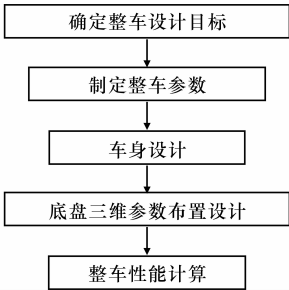


图 3 整车总体设计流程

Fig. 3 Vehicle overall design process

本文着重研究和介绍了动力系统参数和传动系统参数的设计和匹配计算。

3 整体设计

3.1 整车参数设计

经查阅大量的书籍和资料,并且按照初步计算和设计要求设计出整车尺寸,具体参数见下页表 1。

表 1 整车参数

Tab. 1 Parameters of vehicle

型式	长车头,4×2 前轮驱动		
外形尺寸	总长/mm	3 560	
	总宽/mm	1 600	
	总高/mm	1 670	
额定乘员数 /人		5	
品质参数	整车整备质量/kg		930
	最大设计总质量/kg		1 360
	前轴质量	空载/kg	555
		满载/kg	680
轴距/mm			2 335
轮距	前轮/mm		1 360
	后轮/mm		1 355
前悬/ mm			645
后悬/mm			580

3.2 整车性能要求

太阳能电动汽车的动力性能主要取决于动力系统参数匹配(包括动力源、驱动电机、控制器、变速器等)以及控制策略和各部件的特性等<sup>[5-6]</sup>。根据设计要求,预计续驶里程 150 km,因此要求选用轮胎型号为 145/70R12,设计的太阳能电动汽车整车动力性能及相关参数为:最高车速≥100 km/h;母线电压 144 VDC;最大爬坡度(满载)≥20%;整车整备质量 930 kg;车轮滚动半径 0.25 m。

3.3 主要系统的结构选型和参数匹配

太阳能电动汽车的主要动力组件有:太阳能电池、蓄电池、电动机和相关的控制系统,其驱动系统结构如图 4 所示<sup>[7]</sup>。

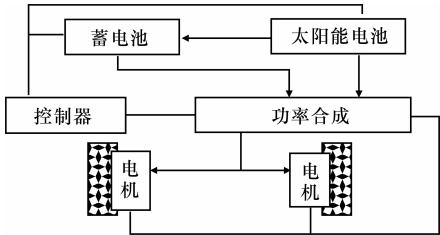


图 4 驱动系统结构

Fig. 4 Structure of driving system

3.3.1 太阳能电池的选取和匹配计算

太阳能电池的应用参数较多,主要为开路电压、短路电流、峰值功率、最大功率时的电压和最大功率时的电流<sup>[8]</sup>。太阳能电池的数学模型为

$$I = I_{ac} [1 - C_1 (e^{V - \Delta V / C_2 V_{oc}} - 1)] + \Delta I \quad (1)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$  分别为电池组 1 和 2 的电池容量; $V$  为单节电池的电压; $\Delta V$  为电池组 1 和 2 之间的电压差值; $\Delta I$  为电池组 1 和 2 之间的电流差值; $I_{ac}$  为短路电

流; $V_{oc}$  为开路电压。

由于要使用太阳能电池阵列的最大功率跟踪器,所以太阳能电池的阵列总是在最佳功率点工作,此时,最大功率时的电流与电压的关系为

$$V_m = V_{oc} \left[ 1 + 0.053 \lg \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) \right] + \beta (T - T_{ref}) \quad (2)$$

式中: $\beta$  为参考日照强度下电压温度系数(V/℃); $S$  为试验时的日照强度; $S_{ref}$  为日照强度参考值; $V_m$  为最大功率点电压; $T_{ref}$  为参考电池温度; $T$  为在试验时的日照强度  $S$  及任意环境温度  $T_{air}$  下的太阳能电池温度。

将  $\beta = 0.005V_{oc}$ ,  $T = T_{air} + 0.03S$  代入式(2),可以得到

$$I_m = I_{ac} [1 - C_1 (e^{V - \Delta V / C_2 V_{oc}} - 1)] + \Delta I \quad (3)$$

那么,在任意条件下的输出功率  $P_m$  为

$$P_m = V_m I_m \quad (4)$$

这里给出了  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\Delta I$  和  $\Delta V$  的表达式为

$$C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{ac}}) e^{-(V_m / C_2 V_{oc})} \quad (5)$$

$$C_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) \left[ \ln(1 - \frac{I_m}{I_{ac}}) \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\Delta I = \alpha \frac{S}{S_{ref}} \Delta T + (\frac{S}{S_{ref}} - 1) I_{ac} \quad (7)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_a \Delta I \quad (8)$$

式中: $I_m$  为峰值电流; $R_a$  为太阳能电池串连电阻; $\alpha$  为在参考日照强度下的电流温度系数; $\Delta T$  为温度差<sup>[9-10]</sup>。

根据当前开发的太阳能电池种类的优缺点,选择单晶硅太阳能电池,其主要的参数经过上述公式计算和分析,计算结果见表 2。

表 2 太阳能电池的参数

Tab. 2 Parameters of the solar energy battery

型号	标称功率	峰值电压	峰值电流	开路电压	短路电流
	$P_m/W$	$V_m/V$	$I_m/A$	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/A$
CAT-200 MIIIH	200	25.4	7.874	34.0	8.34

3.3.2 最大功率的计算和电动机的选型及匹配

根据最高车速求最大功率,计算式为

$$P_{max} = \frac{1}{3\,600\eta_t} (mgf + \frac{C_d A V_{max}^2}{21.15}) V_{max} \quad (9)$$

式中: $P_{max}$  为最高车速下的功率(kW); $\eta_t$  为传动效率(选取 0.85); $V_{max}$  为最高车速(设计要求提出的

车速, km/h);  $m$  为整车质量(选取 1 500 kg);  $g$  为重力加速度(选取 9.8 m/s<sup>2</sup>);  $f$  为地面摩擦因数(选取 0.25);  $C_d$  为空气阻力系数(选取 0.25);  $A$  为迎风面积(选取 1.8 m<sup>2</sup>)。

由整车参数计算可得  $P_{\max}$  和额定功率  $P_a$  为  
 $P_{\max} = 19 \text{ kW}$ ,  $P_a = 6.72 \text{ (kW)}$ 。

根据最大爬坡度确定最大功率为

$$P_e = \frac{1}{\eta_i} \left( \frac{Gfu_a \cos(\alpha)}{3\,600} + \frac{G \sin(\alpha)}{3\,600} + \frac{C_D A u_a^3}{76\,140} \right) = 25 \text{ (kW)} \quad (10)$$

从理论上讲,电动机的最大功率应满足整车的最大功率需求,但实际行驶过程中,最大功率工作时间很短,所以一般以整车平均速度下的功率为基点,同时满足超载条件(超载能力大于等于 2),由此选取电动机额定功率为 20 kW,最大功率为 25 kW。

### 3.3.3 蓄电池的选取和匹配计算

蓄电池的容量主要考虑蓄电池的  $E_{\text{SOC}}$  值在设定范围(0.3 ~ 0.8)输出的能量满足车辆在最大功率下行驶最长时间所需的能量。电池的放电能量计算公式为

$$W_{\text{ess}} = \frac{U_{\text{ess}} C \Delta E_{\text{SOC}}}{1\,000} \quad (11)$$

$$= \frac{12 \times 24 \times 0.7}{1\,000} = 0.2 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$$

式中: $E_{\text{SOC}}$  值为电池剩余电量与电池充满电状态下电量的比值; $W_{\text{ess}}$  为电池组的实际能量(kWh); $U_{\text{ess}}$  为电池组的平均工作电压(V); $C$  为单节电池的容量(Ah)。

电动汽车续驶里程  $L$ (km) 所需的能量可以通过下式计算,假定汽车以  $u_a = 80 \text{ km/h}$  的速度行驶,则

$$P_e = \frac{1}{\eta_i} \left( \frac{Gfu_a}{3\,600} + \frac{C_D A u_a^3}{76\,140} \right) = 10.1 \text{ (kW)} \quad (12)$$

$W_{\text{ned}} = P_e t = PS/u = 7.575 \text{ (kW} \cdot \text{h)}$  (13)  
 式中: $P_e$  为汽车以纯电动驱动所需的功率(kW); $W_{\text{ned}}$  为行驶 80 km 所消耗的电池组的能量; $L$  为电动汽车的续驶里程; $u_a$  为纯电动行驶时的车速。

当续驶里程  $L = 80 \text{ km}$  时,应满足: $W_{\text{ess}} \geq W_{\text{ned}}$ 。

由电池容量与电压直接求续驶里程,其计算公式为

$$L = U_{\text{ess}} C \zeta_{\text{soc}} V_{\text{ele}} / P_{\text{ele}} \quad (14)$$

式中: $\zeta_{\text{soc}}$  为电池组的有效放电容量; $V_{\text{ele}}$  为电池块的有效电压; $P_{\text{ele}}$  为电池块的有效功率。

由于电池不可能完全 100% 放出其额定容量,所以其从放电初始时  $E_{\text{SOC}}$  为 0.9 放电到  $E_{\text{SOC}}$  为 0.2,则该系数为 0.7,即可放出最大容量的 70%。

根据上述公式、所匹配的电压、电池容量的关系和选定的参数( $u_a$  取 80 km/h),经计算电池组的电压为 250 V,电池组的容量为 37 Ah。考虑到行驶过程中,其他电动附件对能量的消耗,故选取电池组的电压为 250 V,电池组的容量为 40 Ah。

### 3.3.4 主减速器和变速器选取和匹配计算

由车辆最高车速和电机最高转速确定传动比  $i$  的上限为

$$i \leq 0.377 \frac{n_{\max}}{V_{\max}} \quad (15)$$

式中: $n_{\max}$  为电机最高转速; $V_{\max}$  为整车最高车速; $r$  为车轮半径。

根据电机最高转速下对应的最高输出转矩和最高车速对应的最大行驶阻力,确定传动比  $i$  的下限<sup>[11-12]</sup>。

$$M_{\max} = \frac{9\,550 P_{\max}}{n_{\max}} \quad (16)$$

$$F_{\max} = (mgf + \frac{C_d A V_{\max}^2}{21.15}) \quad (17)$$

$$i \geq \frac{F_{\max} r}{\eta_i m_{\max}} \quad (18)$$

式中: $M_{\max}$  为电机最高转速对应的最大输出转矩; $P_{\max}$  为电机最高转速对应的最大输出功率; $F_{\max}$  为最高车速对应的最大行驶阻力。

代入原始数据计算可得: $2.756\,7 \leq i \leq 3.927\,82$ 。

所以本文中选取的  $i = 3.4$ ,设计中要求的变速器选择 4 挡变速器,其中传动比分别为 6.09、3.09、1.71 和 1.00,该设计可以提供更高的速度和更好的爬坡能力。

## 4 基于 Matlab 的动力特性分析

基于 Matlab 平台对该车的参数进行编程处理,并对动力特性进行分析,汽车驱动力与行驶阻力平衡的关系,如下页图 5 所示。

从图 5 可以看出:当驱动力和行驶阻力相等时,汽车处于稳定的平衡状态;当车速低于最高车速时,驱动力大于行驶阻力,这样汽车就可以利用剩余的

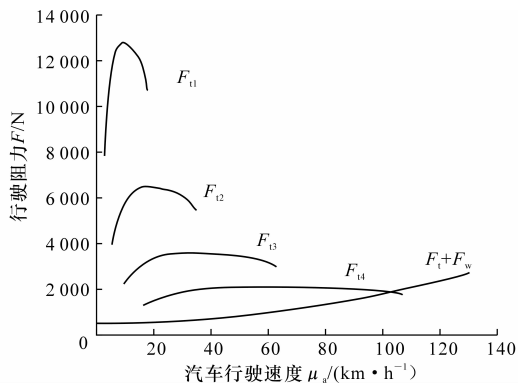


图 5 不同汽车驱动力与阻力的平衡曲线

Fig. 5 Balance curves of car driving forces and resistances

驱动力加速或爬坡,因此,本文设计的驱动系统和传动系统符合设计要求。

图 6 为加速度倒数-速度曲线,汽车的加速性能可用在良好路面上行驶时能产生的加速度来评价,但由于加速度的数值不易测量,实际中常用加速时间来表明汽车的加速能力,就像用直接挡行驶时,由最低稳定速度加速到一定距离所需的时间表明汽车的加速能力<sup>[13-14]</sup>。汽车的加速时间由汽车行驶方程式求出

$$a = \frac{1}{\delta m} [F_t - (F_f + F_w)] \quad (19)$$

式中: $a$  为加速度; $\delta$  为旋转质量换算系数; $F_t$  为电动汽车驱动力; $m$  为整车质量; $F_f$  为汽车行驶时的滚动阻力; $F_w$  为汽车行驶时的空气阻力。

显然,利用式(19)可以计算出各挡在某一车速的加速度曲线,又可根据加速度的公式求出由某一车速加速到另一个较高车速所需要的时间。

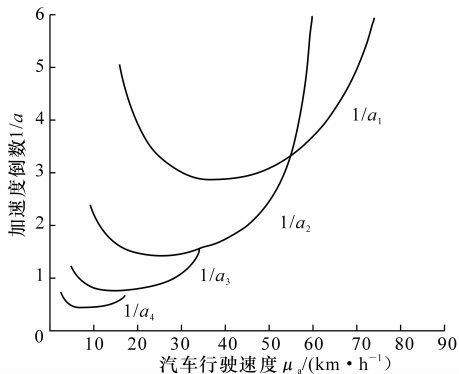


图 6 不同汽车加速度倒数与速度的曲线

Fig. 6 Curves of car acceleration reciprocals and velocities

另外,根据选择的电动机的型号及各项参数做出  $P_e-n$  与  $T_{tq}-n$  曲线,如图 7 所示。

根据数据和动力特性公式编程得到了电动汽车

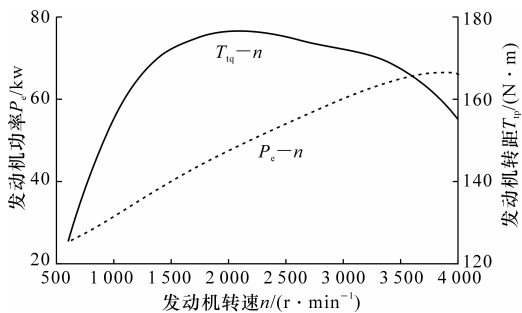


图 7  $P_e-n$  曲线和  $T_{tq}-n$  曲线

Fig. 7 Curve of  $P_e-n$  and  $T_{tq}-n$

动力特性,如图 8 所示。

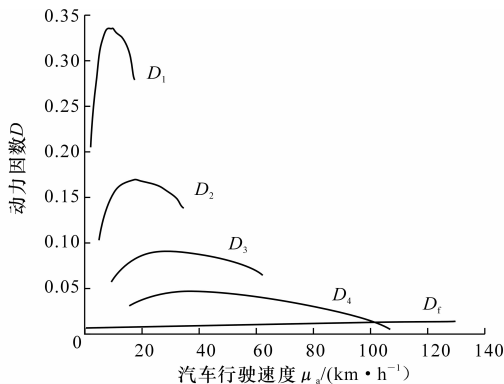


图 8 不同动力因数的汽车动力特性曲线

Fig. 8 Curves of different vehicle dynamic characteristics

## 5 结 语

(1)通过建立太阳能电池组工程数学模型,完成了太阳能电池的理论计算和参数的设定,对太阳能车的理论发展做了补充计算和创新应用。

(2)基于 Matlab 平台做了太阳能电动汽车的总体设计和参数匹配的工作,确定了整车动力系统和传动系统的基本参数和构造形式,并在 Matlab 平台上得出了汽车行驶阻力与驱动力图、汽车加速度倒数曲线图、 $P_e-n$  和  $T_{tq}-n$  曲线图和汽车动力特性图。

(3)本文设计的电动汽车,与实际法规和设计手册上的数据相比,其设计的要求和各项参数的选定都满足整车要求,尤其是太阳能电池组的匹配,这对于以后的太阳能电动汽车的研究和发展提供了一定的理论基础。

## 参考文献:

### References:

[1] 陈庆樟,何 仁. 汽车再生制动系统机电制动力分配[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2008,29(5):

- 394-397.
- CHEN Qing-zhang, HE Ren. Motor and hydraulic braking force distribution in car regenerative braking system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(5): 394-397. (in Chinese)
- [2] Zheng J Y, Bie H Y, Chen H G, et al. Experimental and simulation study on bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels[J]. Acta Energine Solaris Sinica, 2009, 30(7): 1000-1004.
- [3] 钱立军, 吴伟岸, 赵 韩, 等. 混合动力汽车传动系优化匹配[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 6-9.
- QI Li-jun, WU Wei-an, ZHAO Han, et al. Matching optimization of power train for a hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 6-9. (in Chinese)
- [4] 尚金成, 张立庆. 电力节能减排与资源优化配置技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 58-68.
- SHANG Jin-cheng, ZHANG Li-qing. Technologies research and application on energysaving, emission reducing and resources allocation optimization in electric power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 58-63. (in Chinese)
- [5] 王炳忠, 汤 洁. 几种太阳位置计算方法的比较研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 12-17.
- WANG Bing-zhong, TANG Jie. Comparison of the deferent methods for solar position calculation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 12-17. (in Chinese)
- [6] 汤 涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 负荷建模的基本原则和方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 6-8.
- TANG Yong, ZHANG Hong-bin, HOU Jun-xian, et al. Study on essential principle and methods for load modeling[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 6-8. (in Chinese)
- [7] 孙茵茵. 自适应复精度太阳跟踪平台[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- SUN Yin-yin. Adaptive complex precision solar tracking platform[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] Meeus J. Astronomical algorithms[M]. Richmond: Will-MannBell, 1998.
- [9] Zhang Y, Mao X J, Li L M, et al. Control of energy regeneration for electric vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2008, 13(4): 431-434.
- [10] Hu J, Chen J, Sundararaman S, et al. Analysis of composite hydrogen storage cylinders subjected to localized flame impingements[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(11): 2739-2743.
- [11] 陈 炜, 肖 丹, 王慧敏, 等. 双馈风力发电系统空载并网模糊 PI 控制[J]. 太阳能学报, 2009, 30(6): 795-798.
- CHEN Wei, XIAO Dan, WANG Hui-min, et al. Fuzzy PI controller for no-load cutting-in control of doubly fed induction generator in wind power system[J]. Acta Energine Solaris Sinica, 2009, 30(6): 795-798. (in Chinese)
- [12] Salman H, Biswarup D, Vinay P. Reduced rule base self-tuning fuzzy PI controller for TCSC[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(9): 1005-1012.
- [13] Sayman O. Analysis of multi-layered composite cylinders under hydrothermal loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(7): 923-933.
- [14] Hyun S L, Kwi S, Byeong S O. An experimental study of controlling strategies and drive forces for hydrogen full cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(3): 216-221.