

基于无源性的光伏 DC/DC 变换器的 全局滑模控制

李东山, 宋晓娜, 宋 帅

(河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 在光伏发电系统中, 当其受环境影响时, 系统输出电压及功率不稳定, 主要由 DC/DC 变换器来实现其过程能量转换, 因此研究高效的 DC/DC 变换器控制方法具有重要意义; 引入了一种满足无源性的 DC/DC 变换器, 同时引入一种新的指数趋近律, 设计全局滑模控制策略; 所设计控制方法不仅确保了系统状态的稳定性, 而且提高了系统的鲁棒性, 减弱了 DC/DC 变换器的抖动现象; 并以双向 Buck 变换器为例, 通过 Matlab 仿真验证了所设计控制器的有效性。

关键词: 光伏; 全局滑模控制; DC/DC 变换器; 双向 Buck 变换器; 无源性

Global Sliding Model Control Based on Passivity of Photovoltaic DC/DC Converter

Li Dongshan, Song Xiaona, Song Shuai

(Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In photovoltaic power generation system, the output voltage and power of the system are not stable, the DC/DC converter plays an important role in the process of energy conversion, the high efficiency DC/DC converter control method is of great significance. Putting forward a kind of DC/DC converter can satisfy the passivity, at the same time introducing a new exponential reaching law, to design the global sliding mode control strategy. The design control method not only ensure the stability of the system state, and improve the robustness of the system, abate the dithering phenomenon of DC/DC converter; With bidirectional Buck converter as an example, verifying the effectiveness of the designed controller through MATLAB simulation.

Keywords: photovoltaic; global sliding model control; DC/DC converter; bidirectional Buck converter; passivity

0 引言

随着工业化进程的迅猛推进, 人们对能源的需求日益增加, 伴随而来的是世界能源危机以及一系列的环境污染问题, 因此, 寻找可再生能源^[1], 成为人类和社会首要问题之一。而太阳能以其独特的特点成为人类的首选, 同时在最近几十年里, 光伏产业在世界各国都得到了迅猛的发展^[2]。但是目前光伏发电的利用也存在着急需解决的问题, 即光伏发电的转换效率偏低^[3]。要解决此问题, 就要进一步提高光伏发电的转换效率, 因此研究提高转换效率的控制策略成为必要的问题。

光伏发电系统中的能量转换电路主要由 DC/DC 变换器实现, 因此为了提高光伏发电的转换效率, 降低光伏发电的成本, 有必要对 DC/DC 变换器的控制问题进行研究。而在对 DC/DC 变换器控制问题的研究中, 文献 [4] 中采用滑模变结构的方法, 提出了研究中, 文献 [4] 采用模糊神经网络控制的方法, 提出了新方法解决了复杂全桥式串联共振型 DC/DC 变换器繁琐参数调节的问题; 而文献 [5] 采用了自适应控制

的方法, 解决了 DC/DC 变换器在线估计变换器参数的问题, 除以上以外, 针对 DC/DC 变换器的相关控制问题, 文献 [6] 用了自适应反步法控制, 文献 [7] 用了准滑模控制等。由以上研究可知, 这几种控制方法各有优缺点。

众所周知, 在对 DC/DC 变换器进行控制的策略中, 上述几种控制方法在控制的过程中, 系统的鲁棒性减弱, 同时出现状态轨迹的高频振荡即抖动现象, 会使系统的稳定性降低。因此, 如何减少控制过程到达稳定时间和削弱抖动现象是控制急需解决的问题, 如在文献 [8-10] 中采用滑模控制的控制趋近律为一般的 $\dot{s}(t) = -\mu s - \eta \text{sgn}(s)$, $\mu > 0, \eta > 0$ 。同时还有在文献 [11] 中引入了一种新的控制趋近律为 $\dot{s}(t) = -k s - \epsilon^2 \text{sgn}(s)$, $k > 0, \epsilon > 0$ 等方法, 为了减少控制稳定的时间和削弱抖动。

另一方面, 无源性作为研究非线性系统的重要工具之一, 在系统的分析与研究中受到广泛关注, 有很多文献对 DC/DC 变换器系统的无源性控制及无源控制器设计进行了讨论。如文献 [12] 无源控制的变换器闭环系统对输入电源负载扰动的瞬态响应特性均较好的效果等, 而把无源性作为性能指标在 DC/DC 变换器的控制中有较少的文献, 但是把无源性作为性能指标会使控制的效果更好。

本文在此基础上采用全局滑模控制的策略, 从根本上减少了控制时间, 这不仅可以确保系统的稳定性, 而且可增强鲁棒性以及满足无源性。同时引入一种新的控制趋近律, 其能减弱抖动现象, 并以双向 Buck 变换器为例, 通过 Matlab 进行仿真。

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2015-12-30。

基金项目: 国家自然科学基金(61203047); 河南省重点科技攻关项目(152102210273)。

作者简介: 李东山(1990-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事滑模控制、鲁棒控制和混沌控制方向的研究。

宋晓娜(1983-), 女, 辽宁海城人, 副教授, 博士, 主要从事分数阶模糊系统、时滞系统、鲁棒控制方向的研究。

1 DC/DC 变换器控制方法分析与建模

1.1 DC/DC 变换器的数学模型的建立

Buck 变换器是基本的 DC/DC 变换电路, 而用 MOSFET 替代二极管组成的双向同步 Buck 变换器如图 1 所示, 已成为实现高效率低电压开关电源的首选拓扑之一, 所以本文选用双向 Buck 变换器为例进行滑模变结构控制研究。其中开关管 S_1 和 S_2 工作在互补状态, 则系统始终工作在 CCM 下。

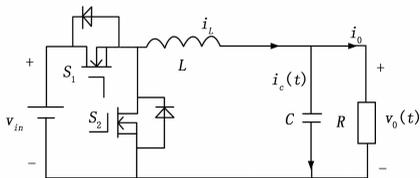


图 1 双向 Buck 变换器

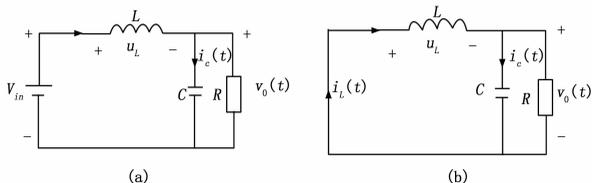


图 2 不同开关双向 Buck 变换器电路 (a) $u=1$; (b) $u=0$

对于双向 Buck 变换器, 开关管 S_1 和 S_2 不同的开关状态对应不同的主电路结构, 如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知双向 Buck 变换器在连续导电模式下, 应用 KVL 和 KCL 可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{in}u(t) - v_0 \\ C \frac{dv_0}{dt} = i_L - \frac{v_0}{R} \end{cases} \quad (1)$$

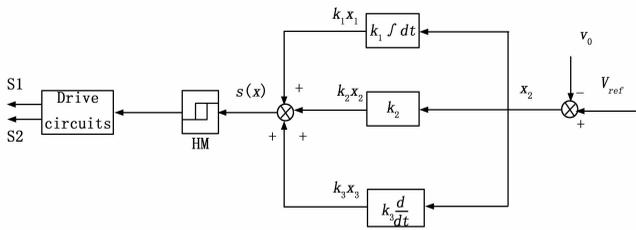


图 3 双向 Buck 变换器的滑模控制器

滑模控制也称变结构, 其本质上是一类特殊的非线性控制, 其可根据系统当前的状态有目的地不断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动, 而闭合回路系统的动态行为可由滑模面来规范。同时可以根据实际情况来设计滑模面, 双向 Buck 变换器模型在理想状态下, 电压控制器仅需要电压 v_0 和电感电流 i_L , 但在开关频率有限或定频滑模控制是不完美的, 电压 v_0 存在稳态误差, 使 $v_0 \neq V_{ref}$ 。所以将以输出电压偏差 x_2 及其微分 x_3 为状态变量, 同时把输出电压偏差的积分 x_1 引入控制器中形成附加的受控状态变量, 以起到优化控制效果的作用。受控状态变量的具体表达式为:

$$\begin{cases} x_1 = \int (V_{ref} - v_0) \\ x_2 = (V_{ref} - v_0) \\ x_3 = \frac{d(V_{ref} - v_0)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

利用式 (1) 的变结构模型和式 (2) 对时间的导数, 可得双向 Buck 变换器的动态模型, 即:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 = V_{ref} - v_0 \\ \dot{x}_2 &= x_3 = -\frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_0}{R} \right) \\ \dot{x}_3 &= \frac{d}{dt} \left[-\frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_0}{R} \right) \right] = \\ &= -\frac{1}{C} \left[\frac{1}{L} (V_{in}u(t) - v_0) - \frac{1}{RC} \left(i_L - \frac{v_0}{R} \right) \right] = \\ &= -\frac{1}{LC}x_2 - \frac{1}{RC}x_3 - \frac{V_{in}}{LC}u(t) + \frac{V_{ref}}{LC} \end{aligned}$$

则可得双向 Buck 变换器系统建模矩阵方程为:

$$\dot{x} = Ax + Bu + D \quad (3)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{V_{in}}{LC} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{V_{ref}}{LC} \end{bmatrix}, u_1 \in \{0, 1\}, x^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$$

(A, B) 是完全可控的, (A_{11}, A_{12}) 是 A 的子系统且也可控的。

当本文考虑双向 Buck 变换器系统存在干扰时, 系统的建模矩阵方程由 (3) 式可得:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D + D_1\omega(t) \quad (4)$$

同样可以得到: $z(t) = cx(t)$

本文假设 $B = [0 \quad B_2^T]^T, B_2 \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 是满秩的, 同时令 $\delta(t) = D + D_1\omega(t)$, 则式 (4) 也可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) \\ \dot{x}(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t) + \delta(t) \end{cases} \quad (5)$$

1.2 全局滑模控制器的设计

在设计滑模控制器时, 主要任务为选取合适的切换函数, 但是实际 DC/DC 控制器上, 理想的原器件是不存在的, 所有这些都会产生稳态误差。

现在借助滑模面函数来分析稳态误差, 由于非理想因素的影响, 滑模面函数引入误差信号 $f(t)$, 则: $s(t) = G[x(t) - f(t)]$, 其中 $f(t)$ 是为了达到全局滑模而设计的函数且 $f(t)$ 应满足以下条件:

- 1) $f(0) = x(0)$;
- 2) $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$;
- 3) $f(t)$ 具有 1 阶导数。

本文设计 $f(t)$ 为 $f(t) = e^{-\beta}x(0)$ 时, 滑模面即为全局滑模如下:

$$s(t) = G[x(t) - e^{-\beta}x(0)] \quad (6)$$

其中: $G = [G_1 I], G_1 = \mathbf{R}^{1 \times 2}, G_{11} \in G_1, G_{12} \in G_1$ 。

当系统运行在滑模面上时有:

$$s(t) = G[x(t) - e^{-\beta}x(0)] = 0$$

同时把 (5) 式带入 (6) 式可得:

$$\dot{x}_1(t) = (A_{11} - A_{12}G_1)x_1(t) + A_{12}Ge^{-\beta}x(0) \quad (7)$$

其中: \bar{A} 为 $(A_{11} - A_{12}G_1)$ 所有预期的特征值; 存在 $a > 0, b > 0$; 使得 $\|e^{\bar{A}t}\| \leq ae^{-bt}$ 。

则实际 DC/DC 控制器系统运行在滑模面上的稳态解为:

$$x_1(t) = e^{\lambda t} x_1(0) + \int_0^t e^{\lambda(t-\tau)} A_{12} G e^{-\beta \tau} x(0) d\tau \quad (8)$$

系统输出电压产生稳态电压误差的积分, 当时间无限大时,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (V_{ref} - v_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = 0$$

根据状态方程 (4) 式, 同时针对外加干扰的控制系统, 可采用等效控制加切换控制, 即:

$$u_1 = u_{eq} + u_d \quad (9)$$

式 (9) 中的切换控制 u_d 实现对外加干扰的鲁棒控制。

由 $s(t) = 0$ 和 $\dot{s}(t) = 0$ 可解得等效控制的表达式:

$$u_{eq} = -(GB)^{-1} [GAx(t) + G\delta(t) + G\beta e^{-\beta} x(0)] \quad (10)$$

为了提高对外加干扰的鲁棒性和消除抖动, 引入一种新的控制趋近律为:

$$\dot{s}(t) = -(\mu + \eta e^{-\lambda} \|s\|^{-\alpha}) s \quad (11)$$

其中: $\mu, \eta, \alpha > 0, \lambda \geq 0$ 。可解得切换控制的表达式:

$$u_d = -(GB)^{-1} \dot{s}(t) = -(GB)^{-1} [(\mu + \eta e^{-\lambda} \|s\|^{-\alpha}) s] \quad (12)$$

即可得:

$$u_1 = -(GB)^{-1} [GA(t) + G\delta(t) + G\beta e^{-\beta} x(0) + \mu s + \eta e^{-\lambda} \|s\|^{-\alpha} s]$$

根据李雅普诺夫函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t)$$

则:

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) \quad (13)$$

将 (5) 式、(6) 式和 (11) 式带入 (13) 式, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s(t)\dot{s}(t) = \\ & s(t)[GAx(t) + GBu(t) + G\delta(t) + G\beta e^{-\beta} x(0)] = \\ & s(t)[GAx(t) + G\delta(t) + G\beta e^{-\beta} x(0) - GAx(0) - \\ & G\delta(t) - G\beta e^{-\beta} x(0) - \mu s - \eta e^{-\lambda} \|s\|^{-\alpha} s] = \\ & -\mu \|s\|^2 - \eta e^{-\lambda} \|s\|^{2-\alpha} \end{aligned}$$

即可得:

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) < 0 \quad (14)$$

则 DC/DC 变换器的全局滑模控制系统渐近稳定。

2 DC/DC 变换器系统的无源性分析

2.1 系统的无源性

下面根据文献 [13] 给出 DC/DC 变换器系统的无源性定义。

定义 1: 对于系统 (4), 如果存在一个常数 $\alpha \geq 0$, 使得对于具有零初始值条件的每一个解, 无源不等式:

$$2 \int_0^t \omega(t)^T z(t) dt \geq -\alpha \int_0^t \omega(t)^T \omega(t) dt \quad (15)$$

对于所有的正常数 t 均成立, 则称系统 (4) 是无源的。

2.2 系统的稳定性分析

定理 1: 当存在标量 $\alpha > 0$ 时, 如果存在一个对称矩阵 $X > 0, Y$; 使得下列参数相关矩阵不等式成立:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \Delta & D_1 + XC^T \\ * & -\alpha I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

其中: $\Delta = AX + XA^T + BY + Y^T B$, 同时令 $G = X^{-1}$ 和 $K = YX^{-1}$ 。

则 DC/DC 变换器满足无源性的滑模控制系统渐进稳定。

证明: 构造 Lyapunov 函数:

$$V(t) = x^T(t)Gx(t) \quad (17)$$

由系统的建模方程式 (4), 及对式 (17) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{x}^T(t)Gx(t) + x^T(t)G\dot{x}(t) = \\ & x^T(t)[G(A+BK) + (A+BK)^T G]x(t) + \\ & 2x^T(t)GB[u - Kx(t) + \vartheta] + 2x^T(t)GD_1\omega(t) \end{aligned} \quad (18)$$

由式 (6) 的滑模面方程 $s(t) = 0$ 可知:

$$2x^T(t)G = 2e^{-\beta} x^T(0)G \quad (19)$$

在零初始条件下, 可得:

$$2x^T(t)G = 2e^{-\beta} x^T(0)G = 0 \quad (20)$$

由式 (18) 和定义 1 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) - 2z^T(t)\omega(t) - \alpha\omega^T(t)\omega(t) &= \\ x^T(t)[G(A+BK) + (A+BK)^T G]x(t) + \\ 2x^T(t)GD_1\omega(t) - 2z^T(t)\omega(t) - \alpha\omega^T(t)\omega(t) &= \\ \begin{bmatrix} x(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta & GD_1 - C^T \\ * & -\alpha I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} &= \\ \epsilon^T(t)Q_2\epsilon(t) \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $\Delta = G(A+BK) + (A+BK)^T G$,

$$\epsilon(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}, Q_2 = \begin{bmatrix} \Delta & GD_1 - C^T \\ * & -\alpha I \end{bmatrix}$$

进而把 Q_2 的前后分别乘以矩阵 $diag\{G^{-1}, I\}$, 同时令 $G = X^{-1}$ 和 $K = YX^{-1}$, 可得:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \Delta & D_1 + XC^T \\ * & -\alpha I \end{bmatrix} = Q_1 < 0 \quad (22)$$

其中: $\Delta = AX + XA^T + BY + Y^T B$ 。

由式 (21) 和式 (22) 可得:

$$\dot{V}(t) - 2z^T(t)\omega(t) - \alpha\omega^T(t)\omega(t) < 0 \quad (23)$$

把式 (23) 两边积分可得:

$$0 \leq V(t) < \int_0^t 2z^T(t)\omega(t) + \alpha\omega^T(t)\omega(t) \quad (24)$$

即可得:

$$2 \int_0^t \omega(t)^T z(t) dt \geq -\alpha \int_0^t \omega(t)^T \omega(t) dt \quad (25)$$

证明完毕。

3 仿真结果及分析

为了验证所设计的全局滑模控制算法的有效性, 仿真时以图 3 中双向 Buck 变换器滑模控制器的形式进行仿真, 从而研究高效的 DC/DC 变换器的控制策略。

本文设计的电流连续型双向 Buck 变换器基本参数为: 输入电压 $V_m = 20$ V, 输出电压期望值 $V_{ref} = 10$ V, 负载 $R = 20$ Ω , 输入电感 $L = 1$ H, 输出滤波电容 $C = 200$ mF。取 $G = [2 \ 3 \ 1]$, 令初值 $x(0) = [-1 \ 1 \ 0]^T, \beta = 1, \lambda = 3, \mu = 3, \eta = 1, \alpha = 0.8, D_1 = [1 \ 1 \ 1]^T, \omega(t) = \sin(0.1 t)$ 。

根据定理 1 可知, 式 (16) 用 LMI 的解可得如下:

$$X = \begin{bmatrix} 0.6888 & -0.8963 & -0.7925 \\ -0.8963 & 0.7925 & -0.8963 \\ -0.7925 & -0.8963 & 0.6888 \end{bmatrix}$$

$$G = X^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1029 & -0.5307 & -0.5722 \\ -0.5307 & 0.0614 & -0.5307 \\ -0.5722 & -0.5307 & 0.1029 \end{bmatrix}$$

$$Y = [0.0757 \ -0.0610 \ 0.1041]$$

按照 (3) 式输出电压偏差 x_2 及其微分 x_3 和积分 x_1 及 (4) 式 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D + D_1\omega(t)$, 仿真结果见图 4。

其中, 对满足无源性的 DC/DC 变换器全局滑模控制按照式 (6), 可知滑膜控制器设计的滑模面为 $s(t) = 2x_1 + 3x_2 + x_3 - e^{-t}$, 仿真结果见图 5。按照 (9) 式设计的控制器如下所示:

$$u_1 = -0.03x_2(t) + 0.0275x_3(t) + 0.01e^{-t} + 0.03s(t) + 0.01e^{-3t} \|s\|^{-0.8}s(t) + 0.4 + \sin(0.1t)$$

仿真结果见图 6。

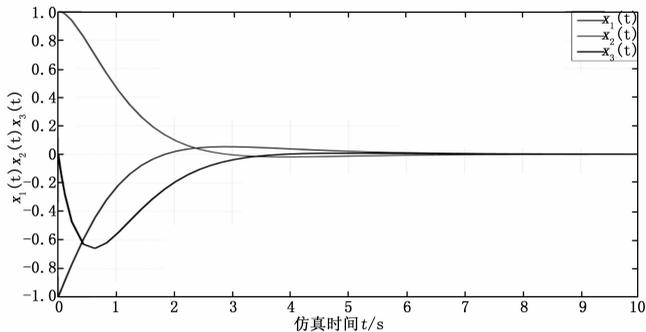


图 4 状态响应

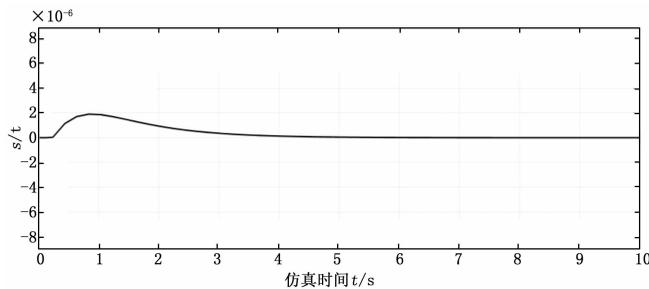


图 5 滑模面

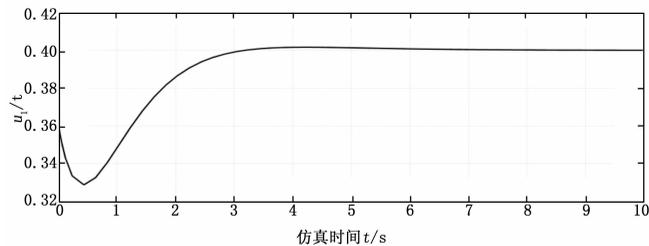


图 6 控制输入

4 结论

本文针对光伏发电系统中的 DC/DC 变换器的控制, 通过引入新的控制率进行了全局滑模控制器设计, 通过 Matlab 仿真验证了全局滑模控制策略的有效性, 可得此控制策略增加了整个系统的稳定性和鲁棒性, 同时使 DC/DC 变换器的控制满足无源性。

参考文献:

- [1] 耿新华, 赵玉文. 光伏发电和光伏产业在本世纪能源中的地位与发展趋势 [J]. 科学中国人, 2003 (9): 24-25.
- [2] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 栗秋华, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (7): 21-25.
- [4] 王伟, 易建强, 等. DC-DC 变换器的模糊神经网络控制方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16 (11).
- [5] 胡文金, 周东华. 基于强跟踪滤波器的 DC/DC 变换器自适应控制 [J]. 清华大学学报, 2008, 48 (S2).
- [6] 王艳, 陈进军, 纪志成. 基于 SG 的 Buck 变换器自适应反步法控制 [J]. 控制工程, 2009, 16 (6): 0662-0665, 0669.
- [7] 倪雨, 许健平. 准滑模控制开关 DC-DC 变换器分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (21): 0001-0006.
- [8] Vadim Utkin. Sliding mode control of DC/DC converters [J]. Journal of the Franklin institute, 2013, 350 (8): 2146-2165.
- [9] Chang J F, Hung M L, Yang Y S, et al. Controlling chaos of the family of Rossler systems using sliding mode control [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37 (2): 609-622.
- [10] Wang H, Han Z, Xie Q, et al. Sliding mode control for chaotic systems based on LMI [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14 (4): 1410-1417.
- [11] 倪雨, 许健平. 控制受限滑模控制 Buck 变换器优化设计 [J]. 电子学报, 2013 (3): 555-560.
- [12] 吴磊涛, 杨兆华, 胥布工. DC/DC 开关变换器的无源控制方法 [J]. 电工技术学报, 2004, 19 (4): 66-69.
- [13] 宋晓娜, 徐胜元, 沈浩, 等. 不确定 T-S 模糊时变时滞系统的时滞依赖无源输出反馈控制 [J]. 南京理工大学学报, 2011, 35 (1): 6-10.

(上接第 97 页)

人体的智能。本文在当前大多数研究者都致力于将两类想象任务通过 BCI 作用于外骨骼机器人的基础上, 展开了用于下肢外骨骼机器人控制的六种人体运动模式 (包括静止、行走、跑步、下蹲起立、上斜坡和下斜坡) 的脑电感知方法研究, 并取得了以下主要结论。

- 1) 在信号预处理方面, 基于小波变换的阈值降噪处理方法, 对采集到的脑电信号进行预处理, 符合信号降噪处理的光滑性和相似性准则。
- 2) 在特征提取方面, 应用小波变换特征提取, 结合能量值特征, 能够构建一种反映脑电信号非线性、时变的小波特征。
- 3) 在对脑电信号进行分类方面, 运用最小二乘支持向量

机对六种想象运动脑电信号进行分类处理, 得出了平均识别率为 66.67%、最高识别率达到 69.44% 的分类识别效果。

参考文献:

- [1] 刘会勇, 赵青. 下肢外骨骼助行机器人研究现状及发展趋势 [J]. 机械设计与制造, 2013, 8 (8): 146-148.
- [2] 蒋靖. 下肢助力外骨骼机构设计与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [3] 董长虹, 高志. 小波分析工具箱原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 张海军. 支持向量机方法在脑功能信号分析与识别中的应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [5] 刘冲, 赵海滨. 基于 CSP 与 SVM 算法的运动想象脑电信号分类 [J]. 东北大学学报, 2010, 31 (8): 1098-1101.