

# 控制与决策

*Control and Decision*

## 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制

楼琦凯, 陈蓓, 丁勔, 牛玉刚

引用本文:

楼琦凯, 陈蓓, 丁勔, 牛玉刚. 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(12): 3207–3214.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0606>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 非匹配不确定性影响下的无人车路径跟踪控制

Path following control for autonomous vehicles with mismatched uncertainties

*控制与决策*. 2022, 37(1): 160–166 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1069>

#### 基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

*控制与决策*. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

#### 基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

*控制与决策*. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

#### 磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

#### 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

*控制与决策*. 2021, 36(4): 885–892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

# 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制

楼琦凯<sup>1</sup>, 陈蓓<sup>1†</sup>, 丁勳<sup>1</sup>, 牛玉刚<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620;  
2. 华东理工大学 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** 针对一类控制通讯信道受到攻击下直流微电网系统母线电压波动问题, 提出一种基于滑模控制方法的镇定策略, 以实现动态控制与快速响应. 首先, 在直流微电网系统中引入蓄电池储能系统并构建系统数学模型; 其次, 设计积分滑模控制策略, 控制储能系统注入镇定电流以稳定直流母线电压, 从而抑制非线性扰动和虚假数据注入攻击对系统性能的影响; 然后, 借助适当的 Lyapunov 泛函, 得到确保滑动模态渐近稳定和滑模面可达性的充分条件, 保证直流微电网系统能够实现负载需求的迅速响应及稳定运行; 最后, 通过 Matlab 数值仿真验证所提出的滑模控制策略的有效性.

**关键词:** 直流微电网; 滑模控制; 稳定性; 虚假数据注入攻击; 恒功率负载

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2021.0606

**引用格式:** 楼琦凯, 陈蓓, 丁勳, 等. 虚假数据注入攻击下直流微电网的滑模控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3207-3214.

## Sliding mode control of DC microgrid under false data injection attack

LOU Qi-kai<sup>1</sup>, CHEN Bei<sup>1†</sup>, DING Meng<sup>1</sup>, NIU Yu-gang<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process of Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** In this paper, a stabilization strategy based on sliding mode control method is proposed to solve the problem of bus voltage fluctuation in the DC microgrid system under the attack of the control communication channel. Firstly, the battery energy storage system is introduced into the DC microgrid and the mathematical model of the system is constructed. Then, an integral sliding mode control strategy is designed to control the energy storage system to inject stabilizing current to stabilize the DC bus voltage, so as to suppress the influence of nonlinear disturbance and false data injection attack on the system performance. Using an appropriate Lyapunov functional, sufficient conditions are obtained to ensure the asymptotic stability of sliding mode dynamics and the reachability of sliding surface, so that the DC microgrid system can realize the rapid response to load demand and stable operation. Finally, the effectiveness of the proposed sliding mode control strategy is verified by Matlab numerical simulation.

**Keywords:** DC microgrid; sliding mode control; stability; false data injection attack; constant power loads

## 0 引言

微电网是一种将分布式电源、负荷以及储能设备有机整合的局部小规模能源网. 利用其运行控制和能量管理等能力, 微电网既可以并网运行, 也可以利用分布式电源实现孤岛运行<sup>[1]</sup>. 而风能、太阳能等可再生能源在微电网中的有效应用, 使得微电网已被公认为可以提高可再生能源的渗透率, 在可再生能源大力发展的趋势下, 微电网将成为未来配用电系统

的重要组成部分<sup>[2]</sup>.

相比于交流微电网, 直流微电网可以实现更高的能量转换效率、电能质量和鲁棒性. 并且, 许多电子负载, 例如飞机、电动汽车、轮船、数据中心的计算机等, 都需要直流电源<sup>[3-4]</sup>. 因此, 解决直流微电网的稳定性和镇定问题至关重要. 对于直流微电网, 借助一些先进的电力电子设备, 改进电子变换器负载输出功率的瞬态响应性能, 将负载建模为恒功率负载(constant

收稿日期: 2021-04-10; 录用日期: 2021-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803255, 62173222); 上海市自然科学基金项目(18ZR1416700).

责任编辑: 吴立刚.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: chenbei1631@163.com.

power loads, CPLs). 然而, CPLs 通常具有负阻抗特性, 会增加系统的非线性程度, 从而破坏整个直流微电网的稳定性. 所以, 缓解 CPLs 非线性对系统带来的影响, 从而提高直流微电网的稳定性, 成为了亟待解决的问题<sup>[5-6]</sup>.

目前, 已经有很多方法用于改善微电网的稳定性. 例如: 文献[7]为了提高恒功率负载直流微电网的稳定性, 提出了虚拟电感方法构造负电感环节, 有效抵消了电源与传输线之间线路电感的消极影响; 文献[8]提出了一种  $H_\infty$  控制技术, 以解决负载侧变换器作为 CPLs 所引起的不稳定性问题, 并能很好地抑制由参数变化、输入电压和 CPLs 电流波动引起的扰动, 保证了对负载的有效供电和直流微电网的稳定运行; 文献[9]针对恒功率负载下微电网系统的稳定性问题, 采用基于滑模控制的负载侧补偿技术, 有效地改善了这一问题.

滑模控制作为一种有效的鲁棒控制方法, 其显著特征是针对外界干扰和参数不确定性具有很好的鲁棒性<sup>[10-14]</sup>. 因此, 一些学者开始将滑模控制方法应用于微电网稳定性控制问题<sup>[9, 15-16]</sup>. 文献[15]基于滑模控制方法, 通过变频器触发脉冲控制输出电压幅值, 实现并网与孤岛运行模式的平滑切换. 文献[16]提出了一种非奇异终端滑模控制设计方法, 通过控制微电网电压来保证微电网在参数不确定和外部干扰下的稳定性. 上述工作体现了滑模控制的有效性, 但忽略了数据传输过程可能遭受的网络攻击.

为了因地制宜发展分布式能源, 微电网系统的各组成部分通常在地域上较为分散, 引入通信网络可以大大提高微电网的效率和灵活性<sup>[17]</sup>, 但同时也不可避免地带来一些网络诱导问题, 如时延、丢包、恶意网络攻击等<sup>[18-20]</sup>. 其中, 网络攻击的不可预测与随机性给系统稳定性带来了很大影响, 针对微电网系统在网络攻击下的攻击检测与稳定性控制问题开始受到关注. 文献[21]研究了微电网环境下虚假数据注入攻击的状态估计问题, 从微电网的电力潮流测量出发, 提出了利用测量值增量的  $\chi^2$  检验的方法, 能够有效地检测微电网是否受到攻击的影响; 文献[22]针对 DoS (denial-of-service) 攻击下孤岛微电网电压和无功率控制问题, 提出了基于三元组自触发通信的多智能体一致性算法, 并构造了检测函数, 对 DoS 攻击频率进行了有效约束; 文献[23]研究间歇性拒绝服务攻击 (intermittent denial-of-service, IDoS) 对网络物理微电网系统安全性的影响, 证明了 IDoS 攻击使系统

随之振荡, 分析了 IDoS 攻击下微电网系统的动态安全性, 并提出了一种风险评估方法来研究网络物理微电网系统在 IDoS 攻击下的稳定性; 文献[24]提出了一种具有多个非线性恒功率负载的直流微电网在受到 IDoS 攻击下的事件触发控制器设计方法; 文献[25]针对分布式拒绝服务和虚假数据注入攻击下的网络物理系统, 提出了一种改进的基于观测器的镇定控制器策略. 因此, 考虑网络攻击下微电网系统的稳定性分析和控制器设计问题, 提高微电网稳定性以及抵御外界攻击能力, 对提高微电网可靠性及电能质量具有重要的理论和实际意义. 然而, 到目前为止, 关于通讯信道可能发生网络攻击下, 基于滑模方法的微电网稳定性控制问题的研究工作尚未见到, 这正是本文的研究动机所在.

通过对母线电压波动原因的探究以及受到上述控制思想的启发, 本文首先在直流微电网系统中引入蓄电池储能系统, 以实现负载需求的迅速响应; 然后结合滑模控制策略, 控制储能系统注入镇定电流以稳定直流母线电压; 同时, 滑模控制器可以有效消除非线性扰动和虚假数据注入攻击对系统性能的影响, 保证所考虑的直流微电网系统的稳定性.

## 1 问题描述

### 1.1 直流微电网系统

为了减轻负载突变给直流母线电压带来的消极影响, 在此直流微电网中引入蓄电池储能系统, 通过 DC/DC 变换器与直流母线相连. 控制器收集负载电压和电流, 控制储能系统注入镇定电流以稳定直流母线电压. 图1和图2 (详见文献[6]) 给出了由  $n$  个恒功率负载和 1 个储能系统 (energy storage system, ESS) 组成的直流微电网的典型结构和电路图. 直流微电网被解耦为  $n+1$  个子系统, 包括  $n$  个 CPLs 和 1 个储能系统.

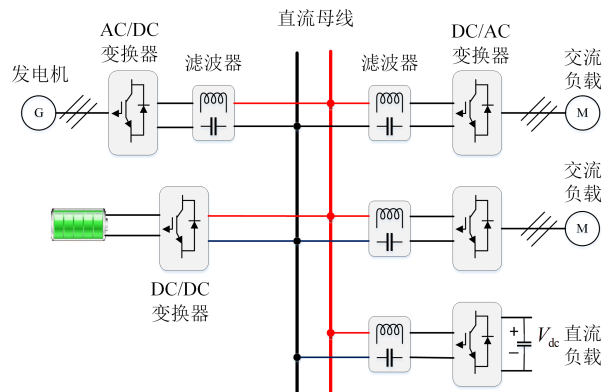


图1 包含  $n$  个 CPLs 和 1 个 ESS 的直流微电网结构

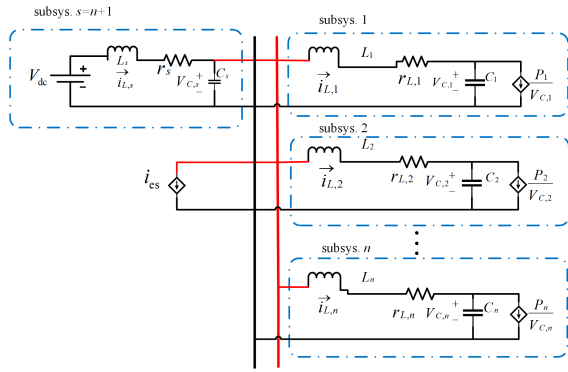


图2 包含n个CPLs和1个ESS的直流微电网电路

根据基尔霍夫电压、电流定律,可得第j个CPL的状态方程为

$$\dot{x}_j(t) = A_j x_j(t) + d_j h_j(x_j(t)) + A_{js} x_s(t). \quad (1)$$

其中:  $x_j(t)$  表示第j个 ( $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) CPL的状态向量,且  $x_j(t) = [i_{L,j} \ V_{C,j}]^T$ ,  $i_{L,j}$  和  $V_{C,j}$  分别表示第j个CPL中的电感电流和电容电压;  $h_j(x_j(t))$  表示第j个CPL电流波动引起的扰动;  $x_s(t)$  表示储能系统的状态向量;以及

$$A_j = \begin{bmatrix} -\frac{r_{L,j}}{L_j} & -\frac{1}{L_j} \\ \frac{1}{C_j} & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{js} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_j} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$d_j = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_j} \end{bmatrix}, \quad h_j(x_j(t)) = \frac{P_j}{V_{C,j}}, \quad s = n + 1.$$

$r_{L,j}$  表示第j个CPL中电感器的电阻,  $L_j$  表示连接到第j个CPL的滤波器电感,  $C_j$  表示连接到第j个CPL的滤波器电容,  $P_j$  表示第j个CPL的功率.

蓄电池作为直流微电网中的储能部件,是一种可以循环充放电的设备.由于蓄电池的电压与直流母线电压等级不同,需要由双向DC/DC变换器完成电压转换与能量传递的任务.为了简化控制器的设计,假设CPLs为理想型,功率值是恒定的,可以将直流电源子系统描述为

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + b_s V_{dc} + b_{es} \tilde{i}_{es} + \sum_{j=1}^n A_{cn} x(t). \quad (2)$$

其中:  $x_s(t) = [i_{L,s} \ V_{C,s}]^T$ ,  $i_{L,s}$  和  $V_{C,s}$  分别表示ESS中的电感电流和电容电压,  $V_{dc}$  表示储能电源电压,  $\tilde{i}_{es}(t)$  表示ESS镇定电流作为控制输入,以及

$$A_s = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}, \quad b_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{cn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_s} & 0 \end{bmatrix}, \quad b_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_s} \end{bmatrix},$$

$r_s$  表示与直流电源相连的滤波器电阻.

由式(1)和(2)可以得到CPLs和ESS共同作用下的直流微电网的增广系统动态方程,即

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + DH(x(t)) + B_{es} \tilde{i}_{es}(t) + B_s V_{dc}. \quad (3)$$

其中

$$x(t) = [x_1^T(t) \ x_2^T(t) \ \dots \ x_n^T(t) \ x_s^T(t)]^T,$$

$$H(x(t)) =$$

$$[h_1(x_1(t)) \ h_2(x_2(t)) \ \dots \ h_n(x_n(t))]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 & A_{1s} \\ 0 & A_2 & \dots & 0 & A_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_n & A_{ns} \\ A_{cn} & A_{cn} & \dots & A_{cn} & A_s \end{bmatrix}, \quad B_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_{es} \end{bmatrix},$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_s \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

应用坐标变换将系统(3)的平衡点移至原点,以储能系统电流为控制输入,得到如下新的直流微电网状态方程:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + DH(\tilde{x}(t)) + B_{es} \tilde{i}_{es}(t). \quad (4)$$

其中

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x_0 =$$

$$[\tilde{x}_1^T(t) \ \tilde{x}_2^T(t) \ \dots \ \tilde{x}_n^T(t) \ \tilde{x}_s^T(t)]^T,$$

$$H(\tilde{x}(t)) =$$

$$[h_1(\tilde{x}_1(t)) \ h_2(\tilde{x}_2(t)) \ \dots \ h_n(\tilde{x}_n(t))]^T,$$

$$h_j(\tilde{x}_j(t)) = \frac{P_j \tilde{V}_{C,j}}{V_{C_0,j}(\tilde{V}_{C,j} + V_{C_0,j})}. \quad (5)$$

这里:  $x_0$  表示直流微电网平衡点,  $V_{C_0,j}$  表示  $V_{C,j}$  平衡点,  $\tilde{V}_{C,j}$  表示新坐标中第j个CPL的电容电压.

在直流微电网系统(4)中,非线性项满足

$$H^T(\tilde{x}(t))H(\tilde{x}(t)) = \sum_{j=1}^n h_j^T(\tilde{x}_j(t))h_j(\tilde{x}_j(t)) \leq \alpha^2 \tilde{x}^T(t)F^T F \tilde{x}(t). \quad (6)$$

其中:  $\alpha > 0$  为已知参数;定义对角矩阵  $F$  为

$$F = \begin{bmatrix} F_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & F_n & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}.$$

本文的设计目标是给出ESS镇定电流的具体设计方案,稳定直流微电网系统的母线电压,提高闭环系统对非线性干扰和恶意网络攻击的鲁棒性。

## 1.2 虚假数据注入攻击

在众多网络攻击中,发生在控制器侧的虚假数据注入攻击是一种较为常见的攻击方式,并通常满足下列假设条件:

**假设1** 攻击者可以获取并利用系统的状态信息/测量输出来生成虚假数据。

**假设2** 攻击者可以将虚假数据注入控制器与执行器之间的通信信道。

基于上述假设条件,虚假数据注入攻击难以被直接检测到.图3是受到该攻击下的系统示意图,控制信号 $\tilde{i}_{es}(t)$ 从控制器传送到执行器的通信信道时可能受到虚假数据注入攻击,因此,执行器接收到的其实是虚假信号 $\tilde{i}_{es}^A(t)$ ,而不再是 $\tilde{i}_{es}(t)$ .

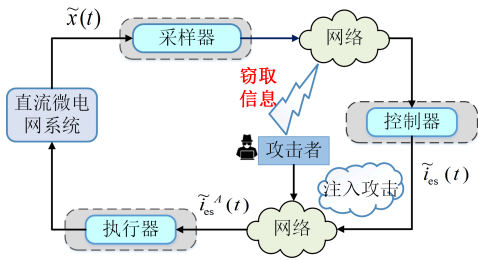


图3 虚假数据注入攻击下的控制系统

虚假数据注入攻击下,执行器接收到的控制信号表示为

$$\tilde{i}_{es}^A(t) = \tilde{i}_{es}(t) + W(t)\Psi(\tilde{x}(t), t). \quad (7)$$

其中: $\tilde{i}_{es}$ 为设计的控制量; $W(t)\Psi(\tilde{x}(t), t)$ 为攻击信号,即攻击者注入的虚假数据。

**假设3**  $W(t)$ 为未知的加权矩阵,表示攻击的注入模式,并满足 $\|W(t)\| \leq \mu$  ( $\mu$ 是已知参数)。

**假设4** 非线性函数 $\Psi(\tilde{x}(t), t)$ 表示攻击者使用的系统信息,存在非负函数 $\psi(\tilde{x}(t), t)$ 满足 $\|\Psi(\tilde{x}(t), t)\| \leq \psi(\tilde{x}(t), t)$ 。

**注1** 矩阵 $W(t)$ 表示将虚假数据注入通信信道的模式/方式,通常被描述为已知的常数矩阵.如前所述,攻击者经常会将攻击模式/方式设计为时变且未知的形式以避免被检测到.例如在文献[26]中,它被定义为 $W(t) = \text{diag}(w_1, \dots, w_m)$ 且 $w_i \in \{0, 1\}$ ,这实际上是本文所考虑模型的一种特殊情况。

将实际控制信号(7)代入直流微电网状态方程(4),得到虚假数据注入攻击下的系统状态方程为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + DH(\tilde{x}(t)) + B_{es}\tilde{i}_{es}^A(t). \quad (8)$$

下面的引理将在后面的证明中用到。

**引理1** 设 $a, b$ 为适当维数的实矩阵,对于任意

非零矩阵 $X > 0$ ,有

$$ab + b^T a^T \leq aXa^T + b^T X^{-1}b.$$

## 2 主要结果

本节将设计有效的滑模面和滑模控制律,以克服时变攻击和系统非线性带来的影响。

### 2.1 滑模面设计与稳定性分析

滑模控制的主要特征是根据系统当前状态有目的地调节控制律,使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动,其中滑动模态可以进行设计,且与对象参数及扰动无关,因此具有优越的鲁棒性.本节将设计一种积分型滑模面,并通过Lyapunov方法和线性矩阵不等式技术,得到滑动模态渐近稳定的充分条件.相比于传统滑模面,积分滑模面可以通过设计合适的初始位置使系统从一开始就位于滑模面上,具有更好的动态性能和鲁棒性。

构造积分型滑模函数如下:

$$S(t) = G\tilde{x}(t) - \int_0^t G(A + B_{es}K)\tilde{x}(\tau)d\tau. \quad (9)$$

其中:切换矩阵 $G \in \mathbf{R}^{m \times q}$ 满足 $G = B_{es}^T P$  ( $P > 0$ 将会在定理1中求解得到),选择矩阵 $K \in \mathbf{R}^{m \times q}$ 满足 $A + B_{es}K$ 是Hurwitz矩阵。

由滑模控制理论可知,当系统状态轨迹进入滑模面后有 $S(t) = 0, \dot{S}(t) = 0$ .根据上述条件,由式(8)和(9)可得

$$\dot{S}(t) = G\dot{\tilde{x}}(t) - G(A + B_{es}K)\tilde{x}(t). \quad (10)$$

利用 $\dot{S}(t) = 0$ 可以得到等效控制律为

$$\tilde{i}_{eseq}(t) = K\tilde{x}(t) - (GB_{es})^{-1}G[DH(\tilde{x}(t)) + B_{es}W(t)\Psi(\tilde{x}(t), t)]. \quad (11)$$

将式(11)代入系统(8),得到滑动模态方程为

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (A + B_{es}K)\tilde{x}(t) + [D - B_{es}(GB_{es})^{-1}GD]H(\tilde{x}(t)). \quad (12)$$

**注2** 此处的等效控制律仅作为分析滑动模态稳定性的工具使用,并不作为实际的控制律使用.实际滑模控制律将在第2.2节中设计。

下面给出滑动模态(12)渐近稳定的充分条件。

**定理1** 对于直流微电网系统(8),切换函数由式(9)确定.如果存在正定矩阵 $P > 0$ 和参数 $\bar{\beta} > 0$  ( $\bar{\beta} = \beta^{-1}$ )满足下列具有等式约束的线性矩阵不等式条件:

$$\begin{bmatrix} \Sigma_1 & PB_{es} & \sqrt{2}F\alpha \\ B_{es}^T P & -B_{es}^T PB_{es} & 0 \\ \sqrt{2}F^T \alpha & 0 & -\bar{\beta}I \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$D^T P D \leq \beta I, \quad (14)$$

$$\beta\bar{\beta} = 1, \tag{15}$$

其中  $\Sigma_1 = P(A + B_{es}K) + (A + B_{es}K)^T P + P$ , 则滑动模态(12)是全局渐近稳定的.

**证明** 选取Lyapunov函数为

$$V(t) = \tilde{x}^T(t)P\tilde{x}(t).$$

沿滑动模态(12)的状态轨迹对  $V(t)$  求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \tilde{x}^T(t)[P(A + B_{es}K) + \\ & (A + B_{es}K)^T P]\tilde{x}(t) + \\ & 2\tilde{x}^T(t)PDH(\tilde{x}(t)) - \\ & 2\tilde{x}^T(t)PB_{es}(B_{es}^T PB_{es})^{-1} \times \\ & B_{es}^T PDH(\tilde{x}(t)). \end{aligned} \tag{16}$$

根据引理1, 对于任意非零矩阵  $P > 0$ , 有

$$\begin{aligned} -2\tilde{x}^T(t)PB_{es}(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T PDH(\tilde{x}(t)) \leq \\ \tilde{x}^T(t)PB_{es}(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T P\tilde{x}(t) + \\ H^T(\tilde{x}(t))D^T PDH(\tilde{x}(t)). \end{aligned} \tag{17}$$

由条件  $D^T PD \leq \beta I$ , 有

$$H^T(\tilde{x}(t))D^T PDH(\tilde{x}(t)) \leq \beta H^T(\tilde{x}(t))H(\tilde{x}(t)).$$

再根据式(6), 有

$$\beta H^T(\tilde{x}(t))H(\tilde{x}(t)) \leq \beta\alpha^2 \tilde{x}^T(t)F^T F\tilde{x}(t).$$

同理可得

$$\begin{aligned} 2\tilde{x}^T(t)PDH(\tilde{x}(t)) \leq \\ \tilde{x}^T(t)P\tilde{x}(t) + \beta\alpha^2 \tilde{x}^T(t)F^T F\tilde{x}(t). \end{aligned} \tag{18}$$

将式(17)和(18)代入(16), 得

$$\dot{V}(t) \leq \tilde{x}^T(t)\Omega\tilde{x}(t),$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega = & P(A + B_{es}K) + (A + B_{es}K)^T P + \\ & P + 2\beta\alpha^2 F^T F + PB_{es}(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T P. \end{aligned}$$

根据Schur补定理可知, 如果线性矩阵不等式(13)~(15)成立, 则可知  $\Omega < 0$ , 从而有  $\dot{V}(t) < 0$  (当  $\tilde{x}(t) \neq 0$  时), 根据Lyapunov稳定性理论可知系统(12)是渐近稳定的.  $\square$

### 2.2 控制律设计与可达性分析

本节将设计滑模控制律, 保证系统状态轨迹能在有限时间内到达滑模面  $S(t) = 0$ , 并在接下来的时间不离开滑模面. 因此, 考虑系统非线性和受到虚假数据注入攻击, 设计如下的滑模控制律:

$$\tilde{i}_{es}(t) = K\tilde{x}(t) - \rho(t)\text{sgn}(s) - \varepsilon S(t). \tag{19}$$

其中:  $\rho(t) = \alpha\|(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T PDF\tilde{x}(t)\| + \mu\psi(\tilde{x}(t), t)$ ,  $\varepsilon > 0$ .

下面证明所设计的滑模控制律(19)能够保证滑模面的可达性.

**定理2** 对于控制系统(8), 当切换面由式(9)确定且  $G = B_{es}^T P$  (其中  $P > 0$  是线性矩阵不等式(13)的解)时, 滑模控制律(19)能够保证系统状态轨迹在有限时间内被吸引到切换面  $S(t) = 0$  上.

**证明** 选取Lyapunov函数为

$$V(t) = \frac{1}{2}S^T(t)(B_{es}^T PB_{es})^{-1}S(t).$$

根据式(9)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & S^T(t)(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T P[A\tilde{x}(t) + \\ & DH(\tilde{x}(t)) + B_{es}i_{es}^A(t) - (A + B_{es}K)\tilde{x}(t)] = \\ & S^T(t)(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T P[DH(\tilde{x}(t)) + \\ & B_{es}W(t)\Psi(\tilde{x}(t), t) - B_{es}\rho(t)\text{sgn}(s) - \\ & \varepsilon B_{es}S(t)] \leq \\ & \|S^T(t)\|[\alpha\|(B_{es}^T PB_{es})^{-1}B_{es}^T PDF\tilde{x}(t)\| + \\ & \mu\psi(\tilde{x}(t), t) - \|S^T(t)\|\rho(t) - \varepsilon S^T(t)S(t) \leq \\ & -\varepsilon\|S^T(t)S(t)\| < 0. \end{aligned}$$

因此, 在本节设计的滑模控制律作用下, 式(9)所确定的滑模面的可达性成立.  $\square$

### 3 仿真分析

为了验证本文所提出的滑模控制方法应用在包含系统非线性和虚假数据注入攻击的直流微电网系统中的有效性, 选取直流微电网文献[27]中的一个基准例子来进行验证. 为方便计算, 对只有一个CPL的情况进行仿真分析. 直流微电网的电路基本参数如表1所示, 参数  $\alpha = 0.0055$ .

表1 直流微电网中CPL的参数

参数	数值	参数	数值
$r_1/\Omega$	1.1	$V_{dc}/V$	200
$V_{C_{0,1}}/V$	196.64	$L_1/mH$	39.5
$C_S/\mu F$	1100	$P_1/W$	300
$L_S/mH$	39.5	$r_s/\Omega$	1.1
$C_1/\mu F$	500		

根据表1, 可得到系统(8)的参数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 27.9 & -25.3 & 0 & 25.3 \\ 900 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -27.9 & -25.3 \\ -900 & 0 & 900 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{es} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -900 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ -900 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

本文控制目标是设计一个滑模控制律,使得系统可以在有限时间内到达指定的滑模面,并沿着该滑模面渐近稳定. 本文设计的滑模面(9),其中  $K = [0.1 \ 1.0 \ 2.5 \ 2.5]$ ,求解线性矩阵不等式(13)~(15),得

$$P = \begin{bmatrix} 0.1965 & -0.0033 & 0.6799 & -0.0053 \\ -0.0033 & 0.0002 & -0.0117 & 0.0002 \\ 0.6799 & -0.0117 & 2.3910 & -0.0188 \\ -0.0053 & 0.0002 & -0.0188 & 0.0003 \end{bmatrix},$$

$$\beta = 0.0048.$$

由定理2得到滑模控制律(19).

设状态初始值  $x(0) = [1.5 \ 210 \ 1.5 \ 210]^T$ . 为了观察虚假数据注入攻击对系统的影响,并验证本文所提出方法的有效性,考虑以下3种情况.

情况1: 无攻击下开环和闭环状态.

图4和图5分别为无攻击下开环系统和闭环系统. 由图4和图5可知:开环状态下直流微电网系统的状态是发散的;在滑模控制作用下(图5),其状态趋于收敛.

下面,通过两种情况来验证本文所设计的积分型滑模控制能够有效抵御不同形式的攻击.

情况2: 无攻击和有攻击.

在相同的系统参数下给出无攻击和有攻击情况下的系统状态  $\tilde{x}(t)$ 、滑模函数  $S(t)$  和控制量  $\tilde{i}_{es}(t)$ . 设置注入攻击参数  $\Psi(\tilde{x}(t), t) = 1.2\tilde{x}(t) \cos t$ ,  $W = [2 \cos t \ 4 \sin t \ 2 \cos t \ 4 \sin t]$ . 为了能够更清楚地

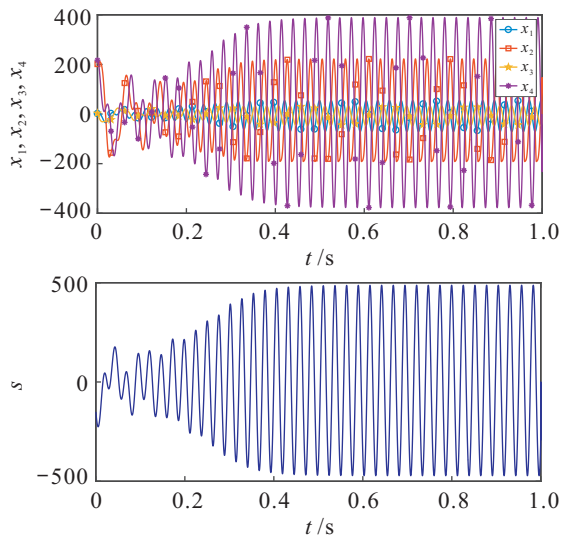


图4 无攻击下开环系统

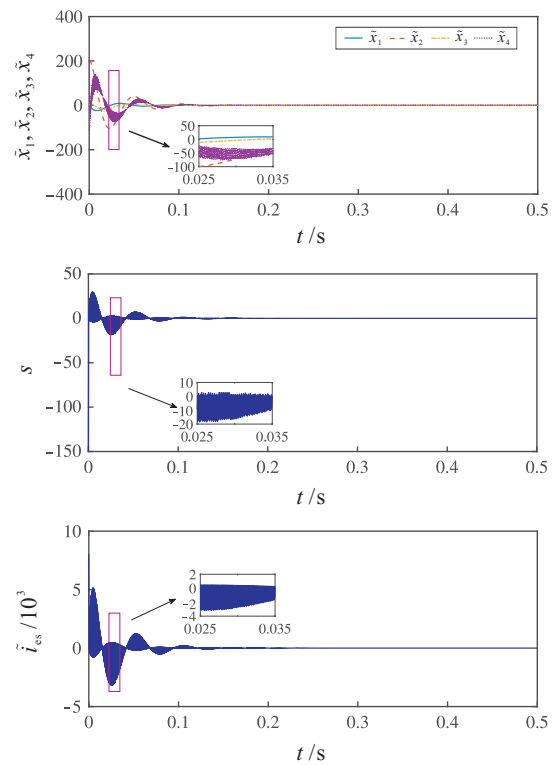


图5 无攻击下闭环系统

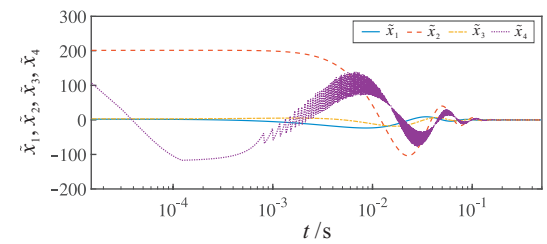


图6 无攻击的情况

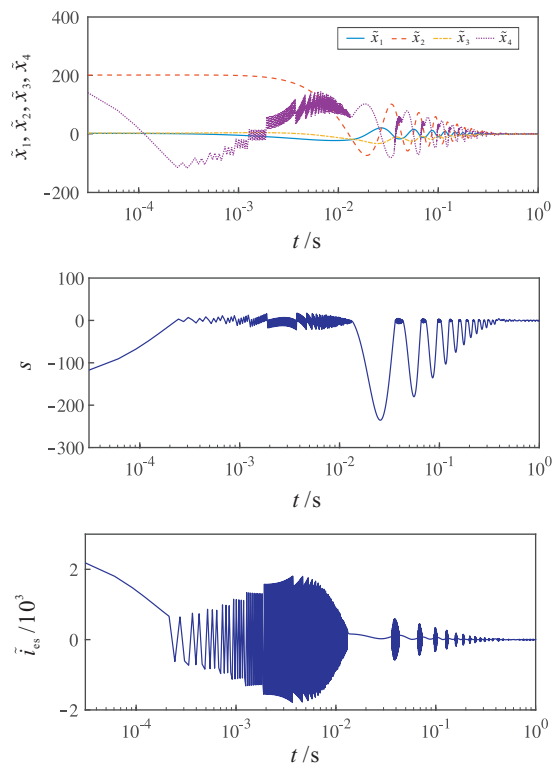


图7 虚假数据注入攻击下

观察曲线的特性, 绘制基于时间轴为对数的曲线(见图6和图7)。系统在虚假数据注入攻击的影响下动态响应变差, 但是在滑模控制的作用下, 仍然可以趋于收敛。

情况3: 周期性攻击和非周期性攻击。

考虑表2所示的具体攻击形式, 可以看到: 图8中攻击者注入高频连续的周期性攻击数据; 在图9中, 攻击者注入非周期性攻击数据, 此时, 系统的状态响应曲线有明显的跳跃。从图8和图9可以看出, 在周期性攻击和非周期性攻击的影响下, 本文所设计的滑模控制方法仍能使系统达到稳定。

表2 虚假数据注入攻击的具体形式

情况3	$\Phi(\tilde{x}(t), t)$	攻击类型
a	$2.5(\tilde{x}(t) + 5 \cos 350)$	高频周期性攻击
b	$6 \tanh(3\tilde{x}(t))$	非周期性攻击

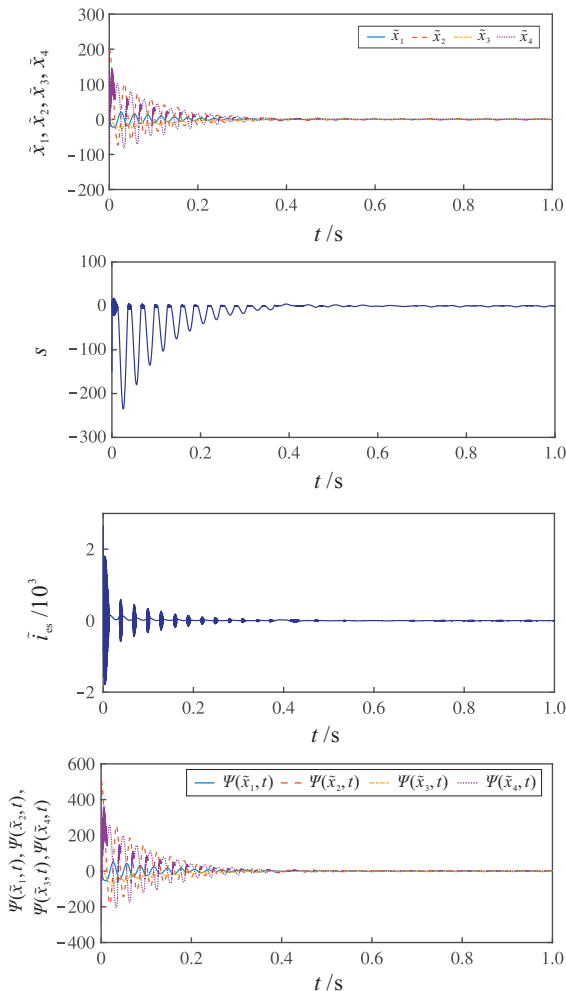


图8 周期性攻击

### 4 结论

本文针对直流微电网系统易受到非线性扰动和虚假数据注入攻击的影响, 提出了一种积分型滑模控制策略, 以解决直流母线电压波动问题。通过在直流

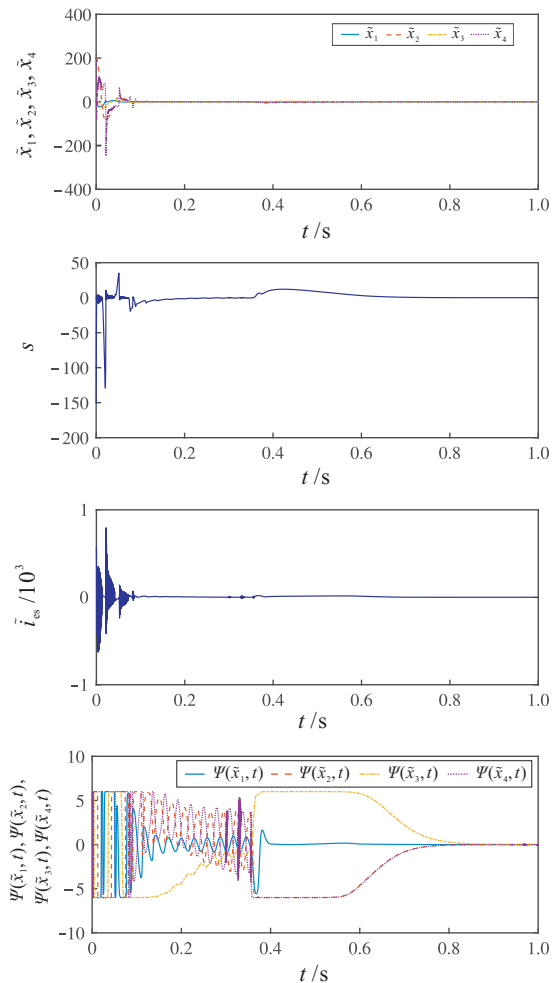


图9 非周期性攻击

微电网系统中引入蓄电池储能系统, 实现对负载需求的迅速响应。结合滑模控制策略, 控制储能系统注入镇定电流以稳定直流母线电压。同时, 所设计的滑模控制器可以有效消除非线性扰动和虚假数据注入攻击对系统性能的影响, 保证所考虑的直流微电网系统的稳定性。仿真结果验证了本文所提出方法的有效性。直流微电网系统除了容易受到网络攻击外, 还会由于大量冗余采样信号被释放到带宽有限的共享通信网络中而造成网络拥塞。下一步可以考虑引入事件触发机制来解决信道拥塞问题。

### 参考文献(References)

- [1] Xu W, Xiao X N, Chen P W. Overview of key microgrid technologies[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(7): e2566.
- [2] Cagnano A, de Tuglie E, Mancarella P. Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation[J]. Applied Energy, 2020, 258: 114039.
- [3] Liang H F, Huang Y X, Sun H, et al. Research on large-signal stability of DC microgrid based on droop control[J]. Energies, 2019, 12(16): 3186.
- [4] Wang D, Locment F, Sechilariu M. Modelling, simulation, and management strategy of an electric

- vehicle charging station based on a DC microgrid[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 2053.
- [5] Braitor A C, Konstantopoulos G C, Kadiramanathan V. Stability analysis and nonlinear current-limiting control design for DC micro-grids with CPLs[J]. IET Smart Grid, 2020, 3(3): 355-366.
- [6] Vafamand N, Khooban M H, Dragievi T, et al. Networked fuzzy predictive control of power buffers for dynamic stabilization of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1356-1362.
- [7] Cheng Z P, Gong M, Gao J F, et al. Research on virtual inductive control strategy for direct current microgrid with constant power loads[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4449.
- [8] Boukerdja M, Chouder A, Hassaine L, et al.  $H_\infty$  based control of a DC/DC buck converter feeding a constant power load in uncertain DC microgrid system[J]. ISA Transactions, 2020, 105: 278-295.
- [9] Hossain E, Perez R, Padmanaban S, et al. Investigation on the development of a sliding mode controller for constant power loads in microgrids[J]. Energies, 2017, 10(8): 1-24.
- [10] Zhao H J, Niu Y G, Jia T G. Security control of cyber-physical switched systems under Round-Robin protocol: Input-to-state stability in probability[J]. Information Sciences, 2020, 508: 121-134.
- [11] 陈强, 曹雅倩, 吴春. 基于变速趋近律的机电伺服系统自适应滑模控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1067-1073.  
(Chen Q, Cao Y Q, Wu C. Adaptive sliding mode control of electromechanical servo system based on variable rate reaching law[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 1067-1073.)
- [12] Song J, Ho D, Niu Y. Model-based event-triggered sliding-mode control for multi-input systems: Performance analysis and optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, DOI: 10.1109/TCYB.2020.3020253.
- [13] 陈志梅, 田柳青, 王贞艳. 一类不确定中立时变时滞系统的自适应全局滑模控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 909-915.  
(Chen Z M, Tian L Q, Wang Z Y. Adaptive global sliding mode control for a class of uncertain neutral systems with time-varying-delay[J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 909-915.)
- [14] Chen B, Zou Y Y, Niu Y G. Dynamic event-triggered sliding mode security control for Markovian jump systems: Learning-based iteration optimization method[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(5): 2500-2517.
- [15] Esmaeli A. RETRACTED: Stability analysis and control of microgrids by sliding mode control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 22-28.
- [16] Rizzi M T, Eliasi H. Nonsingular terminal sliding mode controller for voltage and current control of an islanded microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185: 106354.
- [17] Singh N, Elamvazuthi I, Nallagownden P, et al. Routing based multi-agent system for network reliability in the smart microgrid[J]. Sensors: Basel, Switzerland, 2020, 20(10): 2992.
- [18] Yan J J, Yang G H. Adaptive fault estimation for cyber-physical systems with intermittent DoS attacks[J]. Information Sciences, 2021, 547: 746-762.
- [19] Saha S, Roy T K, Mahmud M A, et al. Sensor fault and cyber attack resilient operation of DC microgrids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 540-554.
- [20] Zhang Z N, Niu Y G, Cao Z R, et al. Security sliding mode control of interval type-2 fuzzy systems subject to cyber attacks: The stochastic communication protocol case[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(2): 240-251.
- [21] Peng H Y, Peng C, Sun H T, et al. Incremental detection mechanism of a microgrid under false data injection attacks[J]. Information and Control, 2019, 48(5): 522-527.
- [22] Ma L, Xu G. Voltage and reactive power control in microgrid based on self-triggered consistency under DoS attack[J]. Computer Engineering, 2020, 46(9): 298-305.
- [23] Fu R, Huang X J, Sun J, et al. Stability analysis of the cyber physical microgrid system under the intermittent DoS attacks[J]. Energies, 2017, 10(5): 680.
- [24] Hu S L, Yuan P, Yue D, et al. Attack-resilient event-triggered controller design of DC microgrids under DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(2): 699-710.
- [25] Mahmoud M S, Hamdan M M, Baroudi U A. Secure control of cyber physical systems subject to stochastic distributed DoS and deception attacks[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 51(9): 1653-1668.
- [26] Hu L, Wang Z D, Han Q L, et al. State estimation under false data injection attacks: Security analysis and system protection[J]. Automatica, 2018, 87: 176-183.
- [27] Kardan M A, Asemani M H, Khayatian A, et al. Improved stabilization of nonlinear DC microgrids: Cubature Kalman filter approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5104-5112.

## 作者简介

楼琦凯(1995—), 男, 硕士生, 从事直流微电网运行控制、滑模控制的研究, E-mail: 1071830878@qq.com;

陈蓓(1985—), 女, 副教授, 博士, 从事滑模控制、微电网系统、Markov系统等研究, E-mail: chenbei1631@163.com;

丁勳(1997—), 男, 硕士生, 从事滑模控制、多智能体系统的研究, E-mail: 1803688731@qq.com;

牛玉刚(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事随机系统、网络控制系统等研究, E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)