

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 18 日 (18.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/119092 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01R 31/00 (2006.01) **G06F 17/50** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/094386
- (22) 国际申请日: 2019 年 7 月 2 日 (02.07.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811515424.6 2018 年 12 月 12 日 (12.12.2018) CN
- (71) 申请人: 江南大学(JIANGNAN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。
- (72) 发明人: 王子贇(WANG, Ziyun); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。王艳(WANG, Yan); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。刘子幸(LIU, Zixing); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。纪志成(JI, Zhicheng); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu

214122 (CN)。徐桂香(XU, Guixiang); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。张帅(ZHANG, Shuai); 中国江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道 1800 号, Jiangsu 214122 (CN)。

(74) 代理人: 无锡华源专利商标事务所(普通合伙)(WUXI HUAYUAN PATENT AND TRADEMARK AGENCY (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国江苏省无锡市梁溪区清扬路 228 号地铁大厦 1108 室聂启新, Jiangsu 214023 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: BUCK CONVERTER FAULT DETECTION METHOD BASED ON INVERSE KALMAN FILTER

(54) 发明名称: 基于逆向卡尔曼滤波器的Buck变换器故障检测方法

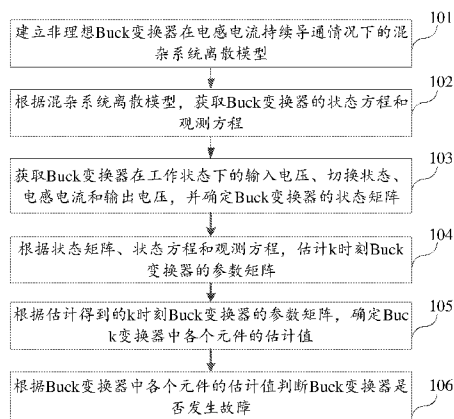


图 1

- 101 Establish a hybrid system discrete model of a non-ideal buck converter under the continuous conduction of an inductive current
- 102 Acquire a state equation and an observation equation of the buck converter according to the hybrid system discrete model
- 103 Acquire an input voltage, a switching state, an inductive current and an output voltage of the buck converter in a working state, and determine a state matrix of the buck converter
- 104 Estimate a parameter matrix of the buck converter at the k moment according to the state matrix, the state equation and the observation equation
- 105 Determine an estimated value of each element in the buck converter according to the estimated parameter matrix of the buck converter at the k moment
- 106 Determine, according to the estimated value of each element in the buck converter, whether a fault occurs in the buck converter

(57) Abstract: Disclosed is a buck converter fault detection method based on an inverse Kalman filter, wherein same belongs to the field of power converter fault detection. The method comprises: establishing a hybrid system discrete model of a non-ideal buck converter under the continuous conduction of an inductive current; acquiring a state equation and an observation equation of the buck converter; acquiring an input voltage, a switching state, an inductive current and an output voltage in a working state, and determining a state matrix of the buck converter; estimating a parameter matrix at the k moment according to the state matrix, the state equation and the observation equation; determining an estimated value of each element according to the estimated parameter matrix of the buck converter at the k moment; and determining, according to the estimated value of each element, whether a fault occurs in the buck converter. The problems of fault diagnosis instantaneity of the current buck converter being poor and precision being low are solved, and the effect of improving the instantaneity and accuracy of the fault detection for the buck converter is achieved.

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则
4.17(ii))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于逆向卡尔曼滤波器的Buck变换器故障检测方法, 属于电力变换器故障检测领域。该方法包括建立非理想Buck变换器在电感电流持续导通情况下的混杂系统离散模型; 获取Buck变换器的状态方程和观测方程; 获取在工作状态下的输入电压、切换状态、电感电流和输出电压, 确定Buck变换器的状态矩阵; 根据状态矩阵、状态方程和观测方程, 估计k时刻的参数矩阵; 根据估计得到的k时刻Buck变换器的参数矩阵, 确定各个元件的估计值; 根据各个元件的估计值判断Buck变换器是否发生故障; 解决了目前Buck变换器的故障诊断实时性不好, 精度不高的问题; 达到了提高Buck变换器故障检测的实时性和准确度的效果。

基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法

技术领域

- 5 本发明实施例涉及电力变换器故障检测领域，特别涉及一种基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法。

背景技术

- 10 电力变换器作为电力系统转换中间环节的重要器件，可用于电力系统、能源、汽车、农业等领域。随着电子技术应用领域的拓展，变换器必将继续在各个领域发挥重要的作用。

由于电解电容退化、开关管故障、焊点故障等原因，常常导致斩波电路出现故障，为了保障电力变换器安全工作，需要对电力变换器进行故障检测。

- 15 故障诊断方法可以分为两大类：基于模型的和基于数据驱动的。其中，基于数据驱动的故障诊断方法需要以充足可靠的历史数据为前提，但数据采集过程中往往会受到不同噪声的影响，采集到的数据质量不高，且故障诊断的实时性不好；基于模型的故障诊断方法适用于已知的模型，对数据源的依赖性较低，但对某些故障的检测结果精度不高。

20 发明内容

为了解决现有技术的问题，本发明实施例提供了一种基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法。该技术方案如下：

第一方面，提供了一种基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法，该方法包括：

- 25 建立非理想 Buck 变换器在电感电流持续导通情况下的混杂系统离散模型；
根据混杂系统离散模型，获取 Buck 变换器的状态方程和观测方程；
获取 Buck 变换器在工作状态下的输入电压、切换状态、电感电流和输出电压，并确定 Buck 变换器的状态矩阵；

根据状态矩阵、状态方程和观测方程，按如下公式估计 k 时刻 Buck 变换器

的参数矩阵, 参数矩阵中的元素根据 Buck 变换器中元件的值确定;

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)\epsilon(k);$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \hat{X}(k-1|k-1);$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k) \cdot [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R]^{-1};$$

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) / \lambda + \Gamma Q_{k-1} \Gamma^T;$$

$$\epsilon(k) = Y(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1);$$

$$P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1);$$

根据估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵, 确定 Buck 变换器中各个元件的估计值;

10 根据 Buck 变换器中各个元件的估计值判断 Buck 变换器是否发生故障;

其中, 状态方程为 $X(k+1) = X(k) + W(k)$, 观测方程为 $Y(k) = H(k)X(k) + V(k)$;

$X(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵, $Y(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的观测矩阵, $H(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的状态矩阵, $V(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的观测噪声序列, $W(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的过程噪声序列, $V(k)$ 与 $W(k)$ 相互独立; $\hat{X}(k|k)$ 表示 k 时刻参数矩阵 $X(k)$ 的最优估计结果, $\hat{X}(k|k-1)$ 表示利用 $\hat{X}(k-1|k-1)$ 进行估计得到的结果, $P(k|k)$ 表示 k 时刻 $\hat{X}(k|k)$ 对应的协方差矩阵, $K(k)$ 表示 k 时刻的卡尔曼滤波增益矩阵, Γ 表示噪声驱动矩阵, I 表示单位矩阵; λ 表示遗忘因子, $\lambda=1$ 或 $0 < \lambda < 1$; k 为整数;

20 $Y(k) = \begin{bmatrix} i_L(k) \\ u_o(k) \end{bmatrix}$, $i_L(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的电感电流, $u_o(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的输出电压;

$H(k) = [i_L(k-1) \cdot I_2 \quad u_o(k-1) \cdot I_2 \quad S(k) \cdot I_2]$, I_2 表示二维单位矩阵, $S(k)$ 表示 Buck 变换器中 MOSFET 管的切换状态;

$$X(k) = \hat{X}(k|k) = [\hat{x}_{11}(k) \quad \hat{x}_{12}(k) \quad \hat{x}_{13}(k) \quad \hat{x}_{14}(k) \quad \hat{x}_{15}(k) \quad \hat{x}_{16}(k)]^T \\ = \begin{bmatrix} 1 & \frac{RT}{C(R+R_c)} & -\frac{T}{L} & 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{LC(R+R_c)} & \frac{ET}{L} & \frac{RR_cET}{L(R+R_c)} \end{bmatrix}^T,$$

25 T 表示采样周期, E 表示 Buck 变换器的输入电压, R 表示 Buck 变换器中电阻的值, L 表示 Buck 变换器中电感的值, Buck 变换器中电解电容等效为电容和串联电阻, C 表示电容的值, R_c 表示串联电阻的值。

可选的, 根据 Buck 变换器中各个元件的估计值判断 Buck 变换器是否发生

故障，包括：

检测 k 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内；预定时间范围为 1 至 N ， N 为整数， $1 \leq k \leq N$ ；

5 若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围内，则确定所述元件无故障；

若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外，则检测 $k+1$ 时刻至 $k+j$ 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量是否为 j ； j 为整数；

若检测到 $k+1$ 时刻至 $k+j$ 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量为 j ，则确定所述元件发生故障；

10 若检测到 $k+1$ 时刻至 $k+j$ 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量不为 j ，则确定所述元件无故障。

可选的，根据估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵，确定 Buck 变换器中各个元件的估计值，包括：

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中电感的估计值：

$$15 \quad \hat{L}(k) = \frac{E \cdot T}{\hat{x}_{15}(k)} ;$$

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中电阻的估计值：

$$\hat{R}(k) = \frac{\hat{x}_{12}(k) \cdot E}{E - \hat{x}_{14}(k) \cdot E - \hat{x}_{16}(k)} ;$$

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中用于等效电解电容的串联电阻和电容的估计值：

$$20 \quad \hat{R}_c(k) = \frac{\hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{R}(k) \cdot \hat{L}(k)}{\hat{R}(k) \cdot E \cdot T - \hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{L}(k)} ;$$

$$\hat{C}(k) = \frac{\hat{L}(k) \cdot \hat{x}_{16}(k)}{E \cdot \hat{x}_{12}(k) \cdot \hat{R}_c(k)} .$$

本申请实施例提供的技术方案带来的有益效果是：

通过建立非理想 Buck 变换器在工作状态下的混杂系统离散模型，根据混杂系统离散模型获取 Buck 变换器的状态方程和观测方程，获取 Buck 变换器在工作时的输入电压、开关的切换状态、电感电流和输出电压的数值，根据获取到的数值确定 Buck 变换器的状态矩阵，在预定时间范围内根据状态矩阵、状态方程、观测矩阵递推估计 Buck 在各个时刻的参数矩阵，根据估计得到的参数矩阵

中的各个元素确定 Buck 变换器中各个元件的估计值，根据元件的估计值实时检测 Buck 变换器是否发生故障；解决了目前 Buck 变换器的故障诊断实时性不好，精度不高的问题；达到了提高 Buck 变换器故障检测的实时性和准确度的效果。

此外，还可以得到在元件发生故障时的故障数值，具有可靠性高、跟随性强的特点。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 是根据一示例性实施例示出的一种基于逆向卡尔曼滤波器的变换器故障检测方法的流程图；

图 2 是一种 Buck 变换器的拓扑图；

图 3 是一种非理想 Buck 变换器的拓扑原理图；

图 4 是根据一示例性实施例示出的一种 Buck 变换器中电感 L 对应的参数变化曲线图；

图 5 是根据一示例性实施例示出的一种 Buck 变换器中电阻 R 对应的参数变化曲线图；

图 6 是根据一示例性实施例示出的一种 Buck 变换器中串联电阻 R_c 对应的参数变化曲线图；

图 7 是根据一示例性实施例示出的一种 Buck 变换器中电容 C 对应的参数变化曲线图。

具体实施方式

为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本申请实施方式作进一步地详细描述。

请参考图 1，其示出了一个实施例提供的基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法的流程图。如图 1 所示，该基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck

变换器故障检测方法可以包括以下步骤：

步骤 101，建立非理想 Buck 变换器在电感电流持续导通情况下的混杂系统离散模型。

5 Buck 变换器的拓扑图如图 2 所示，采用非理想 Buck 变换器等效变换的方法对 Buck 变换器电路进行简化，即将开关管 MOSFET 等效为理想开关 S1，将二极管 D 等效为理想开关 S2，将电感 L 视为理想元件，电解电容 C' 等效为电容 C 和串联电阻 R_c ，得到的非理想变换器的拓扑原理图如图 3 所示。

1、建立非理想 Buck 变换器的混杂系统模型。

10 由于 Buck 变换器在电感电流连续导通 (Continuous Conduction Mode, CCM 模式) 时存在两种情况：S1 闭合且 S2 开通、S1 开通 S2 闭合，将两种情况下的状态结合，得到在 CCM 模式下 Buck 变换器的混杂系统模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{R}{C(R+R_c)} & -\frac{L+RR_cC}{CL(R+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_o \end{bmatrix} + S \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ \frac{RR_cE}{L(R+R_c)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

15 式 (1) 中 S 表示 Buck 变换器的开关管的切换状态，E 表示 Buck 变换器的输入电压， i_L 表示 Buck 变换器的电感电流， u_o 表示 Buck 变换器的输出电压， $\dot{i}_L$ 表示 i_L 关于时间 t 的一阶导数， $\dot{u}_o$ 表示 u_o 关于时间 t 的一阶导数。

如图 3 所示，Buck 变换器的元件包括电感 L、电阻 R、电解电容 C' 等效得到的电容 C 和串联电阻 R_c 。

2、对式 (1) 进行离散化处理，得到非理想 Buck 变换器在电感电流持续导通情况下的混杂系统离散模型：

$$\begin{bmatrix} i_L(k) \\ u_o(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T}{L} \\ \frac{RT}{C(R+R_c)} & 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{CL(R+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(k-1) \\ u_o(k-1) \end{bmatrix} + S(k) \begin{bmatrix} \frac{ET}{L} \\ \frac{RR_cET}{L(R+R_c)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

25 式 (2) 中 T 表示采样周期，k 为离散时间， $i_L(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的电感电流， $u_o(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的输出电压； $S(k)$ 表示 Buck 变换器中 MOSFET 管的切换状态，在一个周期 T 内 $S(k)$ 的值为 1 或 0， $S(k)$ 的值为 1 时表示 MOSFET 管处于导通状态， $S(k)$ 的值为 0 时表示 MOSFET 管处于断开状态。

步骤 102，根据混杂系统离散模型，获取 Buck 变换器的状态方程和观测方

程。

根据混杂系统离散模型，即式 (2)，定义 k 时刻 Buck 变换器的状态矩阵 $H(k)$ 、 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵 $X(k)$ 、 k 时刻 Buck 变换器的观测矩阵 $Y(k)$ ：

$$5 \quad H(k) = [i_L(k-1) \cdot I_2 \quad u_o(k-1) \cdot I_2 \quad s(k) \cdot I_2] \quad (3)$$

$$X(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{RT}{C(R+R_c)} & -\frac{T}{L} & 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{LC(R+R_c)} & \frac{ET}{L} & \frac{RR_cET}{L(R+R_c)} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$Y(k) = \begin{bmatrix} i_L(k) \\ u_o(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式 (2)、(3)、(4)、(5) 可得：

$$Y(k) = H(k)X(k) \quad (6)$$

10 其中， I_2 表示二维单位矩阵；未知的参数矩阵 $X(k)$ 有 6 个元素 $x_{i_i}(k)$ ， $i=1, 2, \dots, 6$ ；观测矩阵 $Y(k)$ 的元素即电感电流 $i_L(k)$ 和输出电压 $u_o(k)$ 可以通过对 Buck 电路进行测量获得。

由式 (4) 可以看出，参数矩阵 $X(k)$ 中的元素根据 Buck 变换器中元件的值确定。需要说明的是，带有“^”的参数表示估计值。

15 在卡尔曼滤波算法中，根据系统中已知的参数，得到的系统未知的状态的估计值；在本发明实施例中利用逆向卡尔曼滤波算法，即根据系统已知的状态，得到系统中未知的参数的估计值，也即根据已知的状态矩阵 $H(k)$ 得到未知的参数矩阵 $X(k)$ 。

20 根据式 (6)，将 Buck 变换器的未知的参数矩阵 $X(k)$ 转换为状态矩阵的形式，将 Buck 变换器的已知的状态矩阵 $H(k)$ 转换为参数矩阵的形式，即：

令 k 时刻 Buck 变换器的参数 $x_i(k)$ 为：

$$x_i(k) = x_{i_i}(k) \quad (7)$$

令 $k+1$ 时刻 Buck 变换器的参数 $x_i(k+1)$ 为：

$$x_i(k+1) = x_{i_i}(k) + w_i(k) \quad (8)$$

25 其中， $w_i(k)$ 是 Buck 变换器的过程噪声序列，是均值为零的高斯白噪声序列。

根据式 (8) 可以确定 Buck 变换器的状态方程：

$$X(k+1) = X(k) + W(k) \quad (9)$$

其中， $W(k)$ 是 k 时刻 Buck 变换器的过程噪声序列， $W(k)$ 由 $w_i(k)$ 组成，

且 $E[W(k)W^T(i)] = Q_k \delta_{ki}$; Q_k 为非负定方差阵, Q_k 是过程噪声序列 $W(k)$ 的方差矩阵, δ_{ki} 是克罗尼克 δ 函数。

根据式 (6) 可以确定 Buck 变换器的观测方程:

$$Y(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (10)$$

5 $V(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的观测噪声序列, $V(k)$ 与 $W(k)$ 相互独立。

步骤 103, 获取 Buck 变换器在工作状态下的输入电压、切换状态、电感电流和输出电压, 并确定 Buck 变换器的状态矩阵。

在预定时间范围内, 获取 Buck 变换器在工作状态下的输入电压、开关的切换状态、电感电流和输出电压。

10 预定时间范围为 1 至 N , N 为整数, N 的值是预先设置的。

可选的, 在未知参数的 Buck 变换器中, 利用电压表测量和示波器采样, 得到输入电压 E 、开关的切换状态 S 、电感电流 i_L 和输出电压 u_o , 得到 Buck 变换器的状态

再根据式(3)确定出 Buck 变换器的状态矩阵 $H(k)$; k 的取值范围为 1 至 N ,
15 k 为整数。

步骤 104, 根据状态矩阵、状态方程和观测方程, 估计 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵。

在预定时间范围内, 根据状态矩阵、状态方程和观测方程, 估计 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵; 预定时间范围为 1 至 N , N 为整数, N 的值是预先设置的;
20 即, k 的取值范围为 1 至 N 。

在预定时间范围内, k 时刻的状态矩阵 $H(k)$ 均可以通过步骤 103 确定。

在估计 Buck 变换器的参数矩阵之前, 需要对预测的协方差矩阵 P 进行初始化。

按式 (11) - (16) 递推计算, 估计 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵 $X(k)$ 。

$$25 \quad \hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)\epsilon(k) \quad (11)$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \hat{X}(k-1|k-1) \quad (12)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k) \cdot [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R]^{-1} \quad (13)$$

$$\epsilon(k) = Y(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \quad (14)$$

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) / \lambda + \Gamma Q_{k-1} \Gamma^T \quad (15)$$

$$30 \quad P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1) \quad (16)$$

其中, $\hat{X}(k|k)$ 表示 k 时刻参数矩阵 $X(k)$ 的最优估计结果, $\hat{X}(k|k-1)$ 表示利用 $\hat{X}(k-1|k-1)$ 进行估计得到的结果, $P(k|k)$ 表示 k 时刻 $\hat{X}(k|k)$ 对应的协方差矩阵, $K(k)$ 表示 k 时刻的卡尔曼滤波增益矩阵, I 表示单位矩阵; Q_{k-1} 是过程噪声序列 $W(k-1)$ 的方差矩阵; Γ 表示噪声驱动矩阵, 在此 Buck 变换器系统中 Γ 为单位矩阵。

式 (15) 中 λ 表示遗忘因子, $\lambda=1$ 或 $0<\lambda<1$ 。

由于历史数据会对故障检测的结果造成一定影响, 若需要减小历史数据对检测结果的影响, 则令 $0<\lambda<1$; 若不需要减小历史数据对检测结果的影响, 则令 $\lambda=1$ 。

10 对参数矩阵估计的递推过程为:

(1) 利用 $k-1$ 时刻的参数矩阵 X 的最优估计结果 $\hat{X}(k-1|k-1)$ 进行预测, 得到 k 时刻参数矩阵 X 的预测结果 $\hat{X}(k|k-1)$, 即式 (12);

(2) 利用 $k-1$ 时刻的 $\hat{X}(k-1|k-1)$ 对应的协方差矩阵 $P(k-1|k-1)$, 对 k 时刻的协方差矩阵 $P(k|k-1)$ 进行预测, 即式 (15);

15 (3) 计算 k 时刻的卡尔曼滤波增益矩阵 $K(k)$, 即式 (13);

(4) 计算 k 时刻的新息矩阵 $\epsilon(k)$, 即式 (14); 新息表示预测值与实测值之差;

(5) 利用 k 时刻参数矩阵 X 的预测结果 $\hat{X}(k|k-1)$ 更新得到 k 时刻参数矩阵 X 的最优估计结果 $\hat{X}(k|k)$, 即式(11);

20 (6) 更新得到 k 时刻的 $\hat{X}(k|k)$ 对应的协方差矩阵 $P(k|k)$, 即式 (16)。

估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵 $X(k)$ 是 $\hat{X}(k|k)$, 即 $X(k) = \hat{X}(k|k) = [\hat{x}_{11}(k) \quad \hat{x}_{12}(k) \quad \hat{x}_{13}(k) \quad \hat{x}_{14}(k) \quad \hat{x}_{15}(k) \quad \hat{x}_{16}(k)]^T$ 。

步骤 105, 根据估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵, 确定 Buck 变换器中各个元件的估计值。

25 由于 $X(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{RT}{C(R+R_c)} & -\frac{T}{L} & 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{LC(R+R_c)} & \frac{ET}{L} & \frac{RR_cET}{L(R+R_c)} \end{bmatrix}^T$, 即

$$\hat{x}_{12}(k) = \frac{RT}{C(R+R_c)}, \quad \hat{x}_{13}(k) = -\frac{T}{L}, \quad \hat{x}_{14}(k) = 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{LC(R+R_c)}, \quad \hat{x}_{15}(k) = \frac{ET}{L},$$

$\hat{x}_{16}(k) = \frac{RR_cET}{L(R+R_c)}$, 所以可以根据参数矩阵中的元素确定出 Buck 变换器中各个元件的估计值。

具体地:

按式 (17) 确定 k 时刻 Buck 变换器中电感的估计值 $\hat{L}(k)$:

$$\hat{L}(k) = \frac{E \cdot T}{\hat{x}_{15}(k)} \quad (17)$$

按式 (18) 确定 k 时刻 Buck 变换器中电阻的估计值 $\hat{R}(k)$:

$$\hat{R}(k) = \frac{\hat{x}_{12}(k) \cdot E}{E - \hat{x}_{14}(k) \cdot E - \hat{x}_{16}(k)} \quad (18)$$

5 按式 (19) 和 (20) 确定 k 时刻 Buck 变换器中用于等效电解电容的串联电阻和电容的估计值, 即 $\hat{R}_c(k)$ 和 $\hat{C}(k)$:

$$\hat{R}_c(k) = \frac{\hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{R}(k) \cdot \hat{L}(k)}{\hat{R}(k) \cdot E \cdot T - \hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{L}(k)} \quad (19)$$

$$\hat{C}(k) = \frac{\hat{L}(k) \cdot \hat{x}_{16}(k)}{E \cdot \hat{x}_{12}(k) \cdot \hat{R}_c(k)} \quad (20)$$

10 步骤 106, 根据 Buck 变换器中各个元件的估计值判断 Buck 变换器是否发生故障。

根据估计值可以实时确定 Buck 变换器中的哪个元件发生了故障, 确定元件发生故障时的参数值。

在进行故障诊断之前, 每个元件的参考值已知。

15 在预定时间范围内, 针对 Buck 变换器中每个元件, 检测 k 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内。

可选的, 预定范围是预先设置的, 预定范围根据实际需要确定。

预定时间范围为 1 至 N, N 为整数, $1 \leq k \leq N$ 。预定时间范围内的每个时刻的估计值均与参考值比较, 并检测估计值与参考值之差是否在预定范围内。

若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围内, 则确定元件无故障。

20 若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外, 则检测 k+1 时刻至 k+j 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量是否为 j; j 为整数。

依次检测 k+1 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内, k+2 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内, k+3 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内, ……., k+j 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内; 检测估计值与参考值之差在预定范围外的数量是否为 j。

若检测到 k+1 时刻至 k+j 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量为 j, 则确定元件故障。

若检测到检测k+1时刻至k+j时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量不为j，则确定元件无故障。

j的值是预先设置的，j的值根据实际需要确定，比如j=5。

在确定元件发生故障后，将在预定时间范围内最终得到的稳定的估计值确定为故障元件的故障值。

可选的，在预定时间范围内，针对Buck变换器中每个元件，根据元件的估计值绘制元件参数变化曲线，即针对电感、电阻、电解电容等效得到的串联电阻和电容分别绘制元件参数变化曲线。

根据元件参数变化曲线可以直观地看出元件在各个时刻的估计值，根据元件参数变化曲线的波动和跳变状态可以直观地看出哪个元件发生了故障，从元件参数变化曲线上发生跳变后的最终稳定值可以得到故障元件的故障数值。

综上所述，本申请实施例通过建立非理想Buck变换器在工作状态下的混杂系统离散模型，根据混杂系统离散模型获取Buck变换器的状态方程和观测方程，获取Buck变换器在工作时的输入电压、开关的切换状态、电感电流和输出电压的数值，根据获取到的数值确定Buck变换器的状态矩阵，在预定时间范围内根据状态矩阵、状态方程、观测矩阵估计Buck在各个时刻的参数矩阵，根据估计得到的参数矩阵中的各个元素确定Buck变换器中各个元件的估计值，根据元件的估计值实时检测Buck变换器是否发生故障；解决了目前Buck变换器的故障诊断实时性不好，精度不高的问题；达到了提高Buck变换器故障检测的实时性和准确度的效果。

此外，还可以确定在元件发生故障时确定故障数值，具有可靠性高、跟随性强的特点。

需要说明的是，本申请实施例中带有“^”的参数表示估计值。

在基于图1所示实施例的可选实施例中，若不考虑历史数据对元件参数估计的影响，则令遗忘因子 $\lambda=1$ ，在执行步骤104时，在预定时间范围内，迭代计算k时刻Buck变换器的参数矩阵 $X(k)$ 的公式为：

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)\epsilon(k)$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \hat{X}(k-1|k-1)$$

$$\begin{aligned}
K(k) &= P(k|k-1)H^T(k) \cdot [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R]^{-1} \\
\varepsilon(k) &= Y(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1) \\
P(k|k-1) &= P(k-1|k-1) + \Gamma Q_{k-1} \Gamma^T \\
P(k|k) &= [I - K(k)H(k)]P(k|k-1)
\end{aligned}$$

5

在基于图 1 所示实施例的可选实施例中，若考虑历史数据对元件参数估计的影响，令故障检测的结果更准确，则令遗忘因子 $0 < \lambda < 1$ ，在执行步骤 104 时，在预定时间范围内，迭代计算 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵 $X(k)$ 的公式为式 (11) - (16)。

10 遗忘因子 λ 是根据实际需要人为预先设置的；可选的，遗忘因子 λ 的取值在 0.95~1 之间，比如 $\lambda=0.9989$ 。

15 在一个例子中，令遗忘因子 $\lambda=0.9989$ ，在预定时间范围内，执行步骤 101 至步骤 106 后，得到在预定时间范围内各个时刻的估计值，确定出 Buck 变换器中电感 L 、电阻 R 、电容 C 没有发生故障，串联电阻 R_c 出现故障；根据各个元件的估计值绘制 Buck 变换器中电感 L 、电阻 R 、串联电阻 R_c 和电容 C 对应的参数变化曲线，分别如图 4、图 5、图 6、图 7 所示；从图 7 可以看出，发生故障的串联电阻 R_c 对应的参数变化曲线上有明显波动且在一定时间内数值持续上升。

20 需要说明的是，本申请实施例提供的基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器的故障检测方法，检测 Buck 变换器是否发生故障是在 Buck 变换器处于工作状态下进行的，且假定 Buck 变换器在同一时刻只有单个元件发生故障。

25 需要说明的是：上述本申请实施例序号仅仅为了描述，不代表实施例的优劣。

本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例的全部或部分步骤可以通过硬件来完成，也可以通过程序来指令相关的硬件完成，所述的程序可以存储于一种计算机可读存储介质中，上述提到的存储介质可以是只读存储器，磁盘或光盘等。

30 以上所述仅为本申请的较佳实施例，并不用以限制本发明，凡在本申请的

精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1、一种基于逆向卡尔曼滤波器的 Buck 变换器故障检测方法，其特征在于，所述方法包括：

建立非理想 Buck 变换器在电感电流持续导通情况下的混杂系统离散模型；

5 根据所述混杂系统离散模型，获取 Buck 变换器的状态方程和观测方程；

获取 Buck 变换器在工作状态下的输入电压、切换状态、电感电流和输出电压，并确定所述 Buck 变换器的状态矩阵；

10 根据所述状态矩阵、所述状态方程和所述观测方程，按如下公式估计 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵，所述参数矩阵中的元素根据 Buck 变换器中元件的值确定；

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)\epsilon(k);$$

$$\hat{X}(k|k-1) = \hat{X}(k-1|k-1);$$

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k) \cdot [H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R]^{-1};$$

$$\epsilon(k) = Y(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1);$$

$$15 \quad P(k|k-1) = P(k-1|k-1) / \lambda + \Gamma Q_{k-1} \Gamma^T;$$

$$P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1);$$

根据估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵，确定 Buck 变换器中各个元件的估计值；

20 根据所述 Buck 变换器中各个元件的估计值判断所述 Buck 变换器是否发生故障；

其中，所述状态方程为 $X(k+1) = X(k) + W(k)$ ，所述观测方程为 $Y(k) = H(k)X(k) + V(k)$ ；

25 $X(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵， $Y(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的观测矩阵， $H(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的状态矩阵， $V(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的观测噪声序列， $W(k)$ 表示 k 时刻 Buck 变换器的过程噪声序列， $V(k)$ 与 $W(k)$ 相互独立； $\hat{X}(k|k)$ 表示 k 时刻参数矩阵 $X(k)$ 的最优估计结果， $\hat{X}(k|k-1)$ 表示利用 $\hat{X}(k-1|k-1)$ 进行估计得到的结果， $P(k|k)$ 表示 k 时刻 $\hat{X}(k|k)$ 对应的协方差矩阵， $K(k)$ 表示 k 时刻的卡尔曼滤波增益矩阵， Γ 表示噪声驱动矩阵， I 表示单位矩阵； λ 表示遗忘因子， $\lambda=1$ 或 $0 < \lambda < 1$ ；k 为整数；

$$Y(k) = \begin{bmatrix} i_L(k) \\ u_o(k) \end{bmatrix}, \quad i_L(k) \text{ 表示 } k \text{ 时刻 Buck 变换器的电感电流, } u_o(k) \text{ 表示 } k \text{ 时刻 Buck 变换器的输出电压;}$$

$H(k) = [i_L(k-1) \cdot I_2 \quad u_o(k-1) \cdot I_2 \quad S(k) \cdot I_2]$, I_2 表示二维单位矩阵, $S(k)$ 表示 Buck 变换器中 MOSFET 管的切换状态;

$$X(k) = \hat{X}(k|k) = [\hat{x}_{11}(k) \quad \hat{x}_{12}(k) \quad \hat{x}_{13}(k) \quad \hat{x}_{14}(k) \quad \hat{x}_{15}(k) \quad \hat{x}_{16}(k)]^T$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \frac{RT}{C(R+R_c)} & -\frac{T}{L} & 1 - \frac{(L+RR_cC)T}{LC(R+R_c)} & \frac{ET}{L} & \frac{RR_cET}{L(R+R_c)} \end{bmatrix}^T,$$

T 表示采样周期, E 表示 Buck 变换器的输入电压, R 表示 Buck 变换器中电阻的值, L 表示 Buck 变换器中电感的值, Buck 变换器中电解电容等效为电容和串联电阻, C 表示电容的值, R_c 表示串联电阻的值。

2、根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述根据所述 Buck 变换器中各个元件的估计值判断所述 Buck 变换器是否发生故障, 包括:

在预定时间范围内, 针对所述 Buck 变换器中每个元件, 检测 k 时刻的估计值与参考值之差是否在预定范围内; 预定时间范围为 1 至 N, N 为整数, $1 \leq k \leq N$;

若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围内, 则确定所述元件无故障;

若检测到 k 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外, 则检测 k+1 时刻至 k+j 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量是否为 j; j 为整数;

若检测到 k+1 时刻至 k+j 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量为 j, 则确定所述元件发生故障;

若检测到 k+1 时刻至 k+j 时刻的估计值与参考值之差在预定范围外的数量不为 j, 则确定所述元件无故障。

3、根据权利要求 1 或 2 所述的方法, 其特征在于, 所述根据估计得到的 k 时刻 Buck 变换器的参数矩阵, 确定 Buck 变换器中各个元件的估计值, 包括:

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中电感的估计值:

$$\hat{L}(k) = \frac{E \cdot T}{\hat{x}_{15}(k)};$$

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中电阻的估计值：

$$\hat{R}(k) = \frac{\hat{x}_{12}(k) \cdot E}{E - \hat{x}_{14}(k) \cdot E - \hat{x}_{16}(k)} ;$$

按如下公式确定 k 时刻 Buck 变换器中用于等效电解电容的串联电阻和电容的估计值：

$$\hat{R}_c(k) = \frac{\hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{R}(k) \cdot \hat{L}(k)}{\hat{R}(k) \cdot E \cdot T - \hat{x}_{16}(k) \cdot \hat{L}(k)} ;$$

$$\hat{C}(k) = \frac{\hat{L}(k) \cdot \hat{x}_{16}(k)}{E \cdot \hat{x}_{12}(k) \cdot \hat{R}_c(k)} .$$

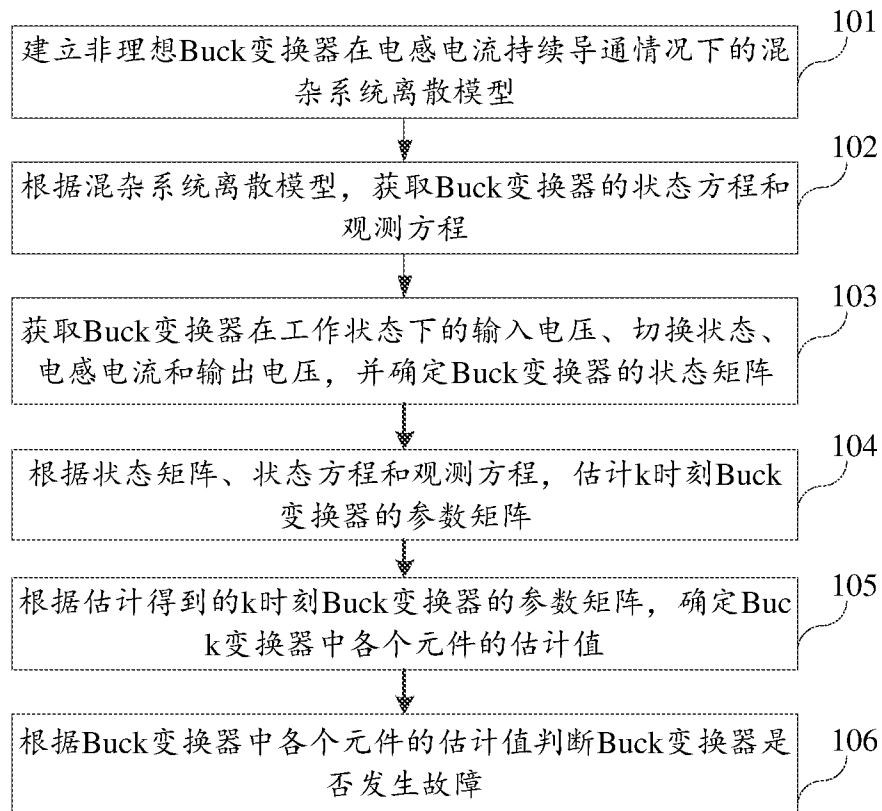


图 1

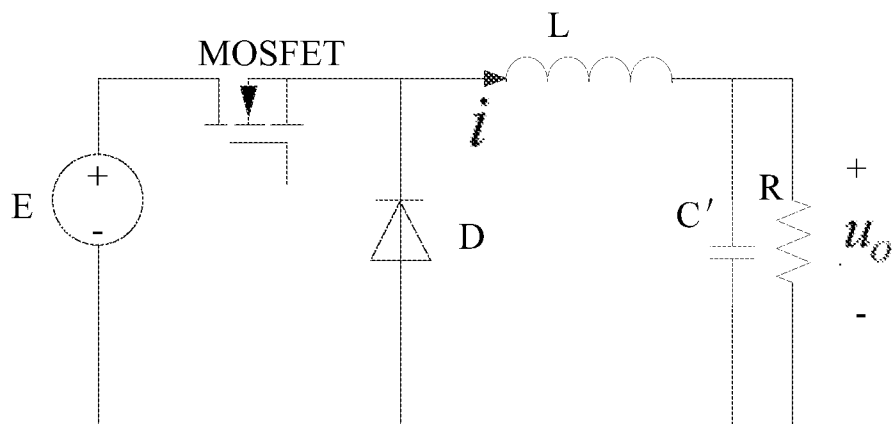


图 2

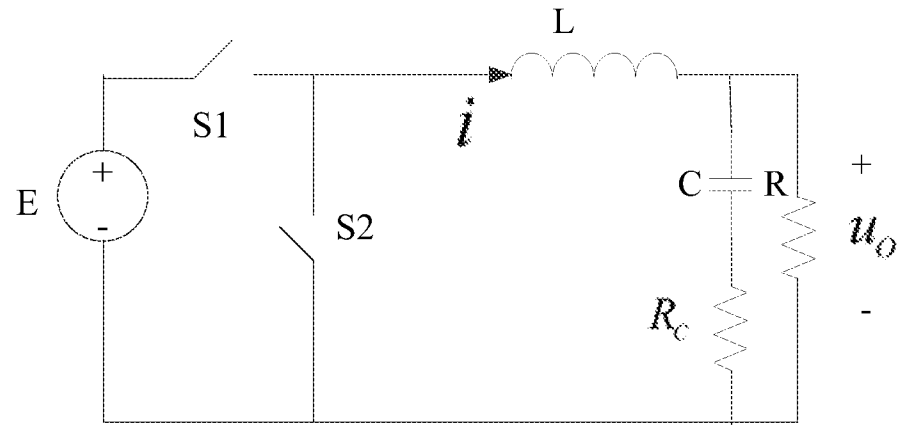


图 3

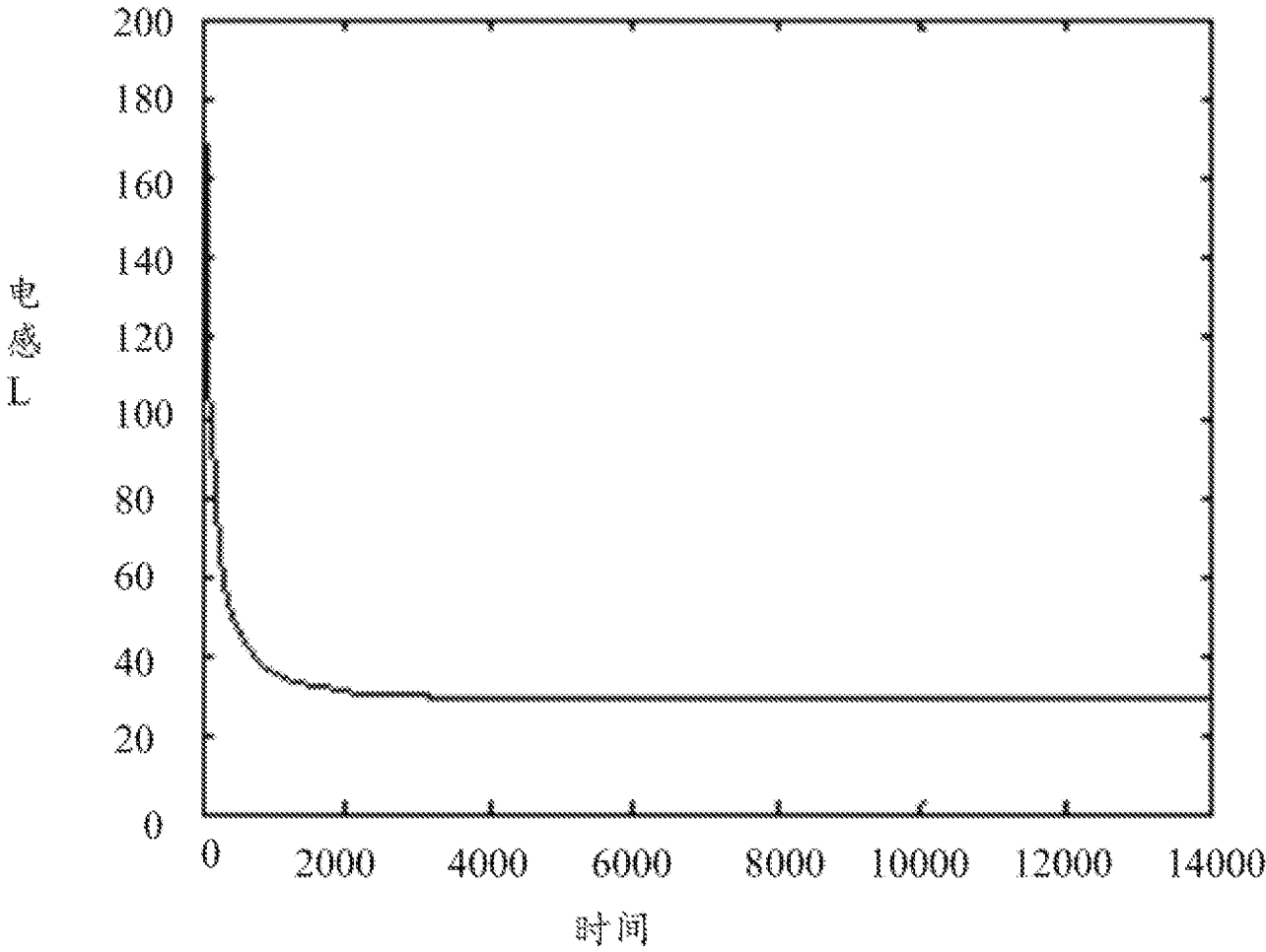


图 4

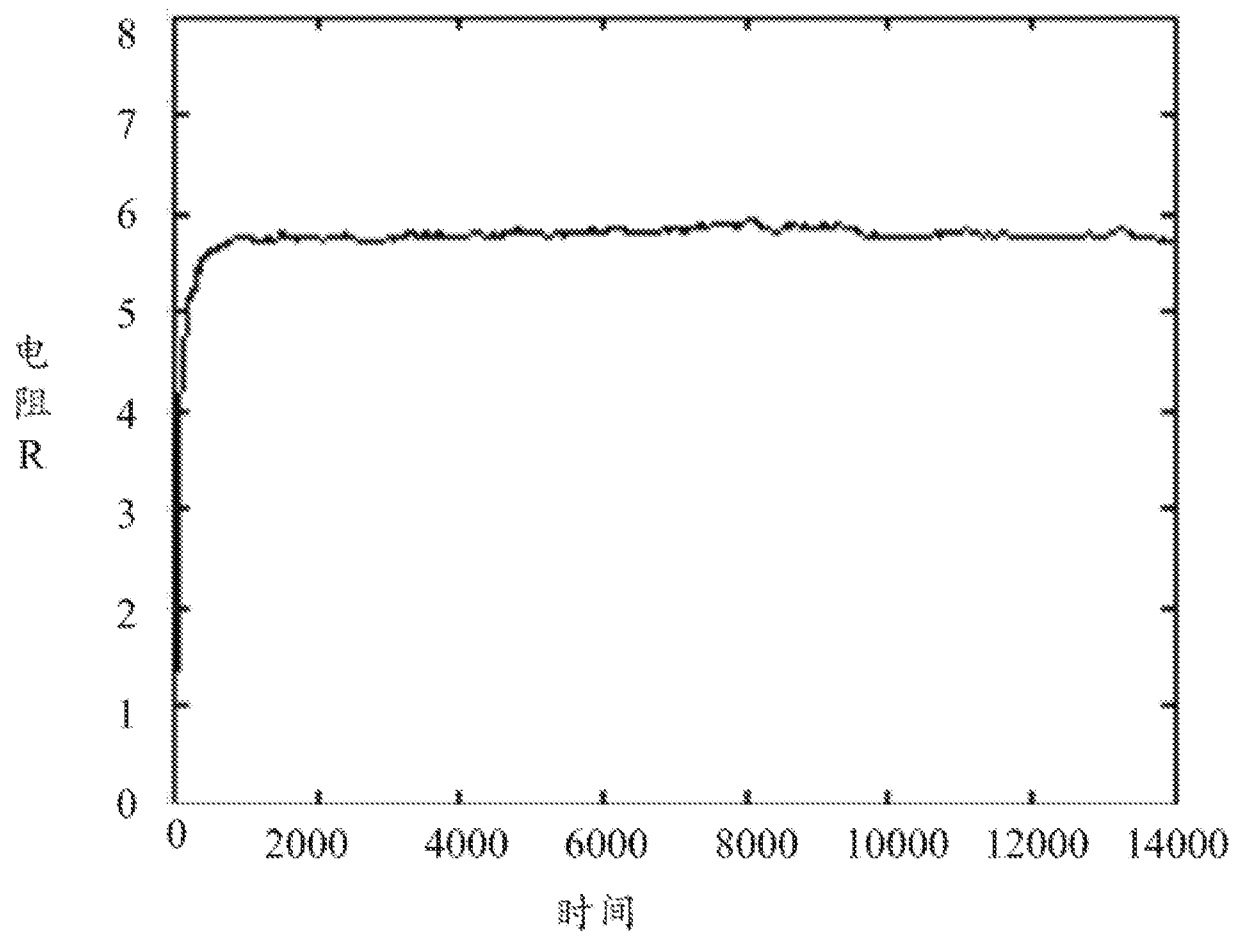


图 5

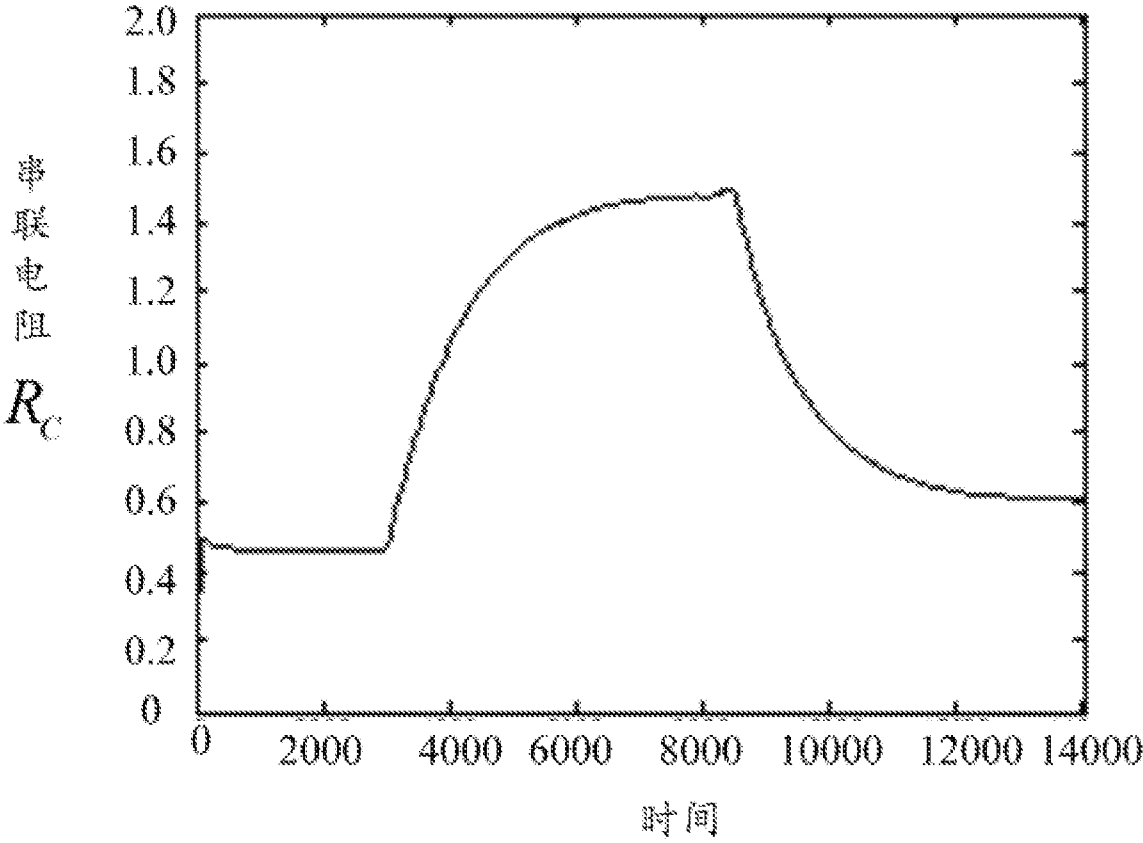


图 6

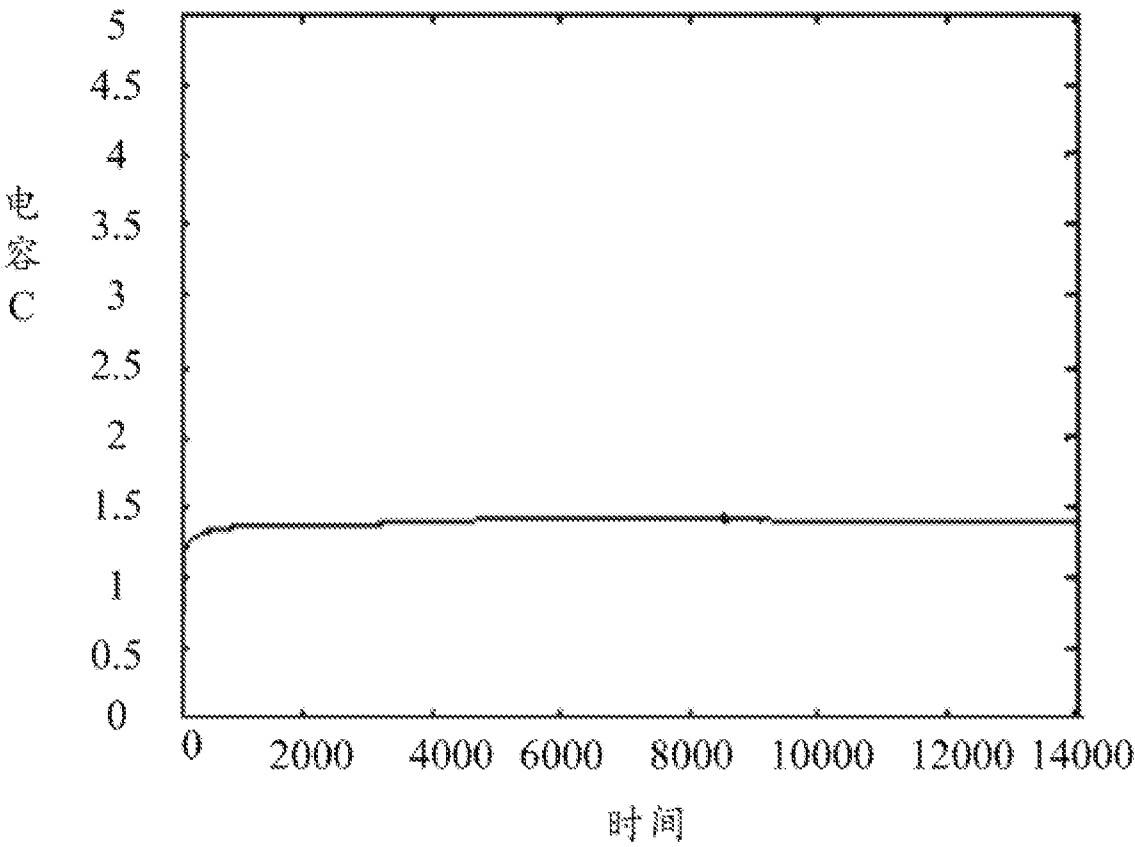


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/094386

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/00(2006.01)i; G06F 17/50(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R; G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; VEN; CNKI; CNTXT; USTXT; WOTXT; EPTXT: 卡尔曼, 滤波, 降压, 稳压, 变换器, 故障, Kalman, filter, Buck, converter, voltage, stabilizer, regulator, fault

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109725213 A (JIANGNAN UNIVERSITY) 07 May 2019 (2019-05-07) description, paragraphs [0005]-[0038]	1-3
A	陈巴特尔 等 (CHEN, Baerte et al.). "基于强跟踪滤波器的开关变换器故障诊断 (Strong Tracking Filter Based Switching Converter Fault Diagnosis)" <i>控制工程 (Control Engineering of China)</i> , Vol. 19, No. 2, 31 March 2012 (2012-03-31), ISSN: 1671-7848, pp. 320-323	1-3
A	CN 103577710 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 12 February 2014 (2014-02-12) entire document	1-3
A	GB 2287843 A (K B ELECTRONICS) 27 September 1995 (1995-09-27) entire document	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 August 2019

Date of mailing of the international search report

27 September 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/094386

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109725213	A	07 May 2019	None			
CN	103577710	A	12 February 2014	CN	103577710	B	14 September 2016
GB	2287843	A	27 September 1995	CA	2114507	A1	29 July 1995

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/094386

A. 主题的分类

G01R 31/00(2006.01)i; G06F 17/50(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01R; G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS; VEN; CNKI; CNTXT; USTXT; WOTXT; EPTXT; 卡尔曼, 滤波, 降压, 稳压, 变换器, 故障, Kalman, filter, Buck, converter, voltage, stabilizer, regulator, fault

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109725213 A (江南大学) 2019年 5月 7日 (2019 - 05 - 07) 说明书第[0005]-[0038]段	1-3
A	陈巴特尔 等. “基于强跟踪滤波器的开关变换器故障诊断” 控制工程, 第19卷, 第2期, 2012年 3月 31日 (2012 - 03 - 31), ISSN: 1671-7848, 第320-323页	1-3
A	CN 103577710 A (南京航空航天大学) 2014年 2月 12日 (2014 - 02 - 12) 全文	1-3
A	GB 2287843 A (K B ELECTRONICS) 1995年 9月 27日 (1995 - 09 - 27) 全文	1-3

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 8月 20日

国际检索报告邮寄日期

2019年 9月 27日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

顾裕丰

电话号码 86-(0512)-88997235

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/094386

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109725213	A	2019年 5月 7日	无	
CN	103577710	A	2014年 2月 12日	CN	103577710 B 2016年 9月 14日
GB	2287843	A	1995年 9月 27日	CA	2114507 A1 1995年 7月 29日