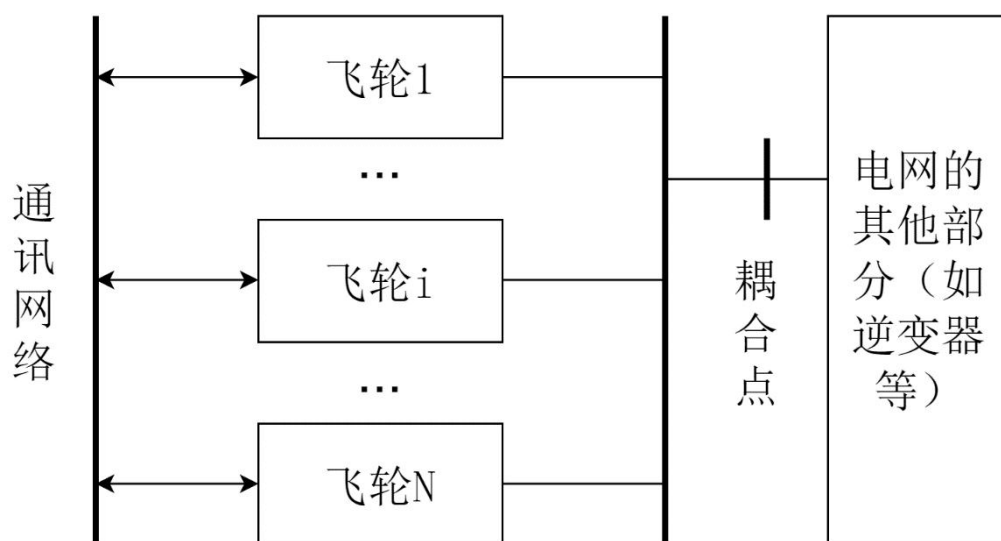


本发明公开了一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，包括如下步骤：S1. 确定飞轮储能单元的动态模型；S2. 根据耦合点的实时功率与参考功率，设定指令发生器；S3. 根据指令发生器，设定每个飞轮储能单元的分布式观测器；S4. 根据飞轮的动态模型，为每一个飞轮储能单元设置控制器，实现飞轮储能系统的功率跟踪与荷能平衡的双目标控制。在本发明中，飞轮实际动态模型得到考虑，储能系统可在飞轮模型下保持其功率跟踪与荷能平衡，系统的双目标控制得以实现。



1、一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

S1. 确定飞轮储能单元的动态模型；

S2. 根据耦合点的实时功率与参考功率，设定指令发生器；

S3. 根据指令发生器，设定每个飞轮储能单元的分布式观测器；

S4. 根据飞轮的动态模型，为每一个飞轮储能单元设置控制器，实现飞轮储能系统的功率跟踪与荷能平衡的双目标控制。

2、根据权利要求1所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，所述飞轮储能系统包括通讯网络、若干个储能单元和电网，储能单元为飞轮。

3、根据权利要求2所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，所述储能单元的动态模型如下：

$$I_i \dot{\omega}_i(t) = -B_{vi} \omega_i(t) + T_{ei}(t)$$

其中， $I_i$ 、 $\omega_i(t)$ 、 $B_{vi}$ 和 $T_{ei}(t)$ 分别表示第*i*个飞轮的转动惯量、时刻*t*的角速度、阻尼系数及时刻*t*的电磁转矩；对于任意的函数 $x(t)$ ， $\dot{x}(t)$ 表示函数 $x(t)$ 在时刻*t*的导数，第*i*个飞轮在时刻*t*储存的能量 $E_i(t)$ 为：

$$E_i(t) = \frac{1}{2} I_i \omega_i^2(t)$$

定义第*i*个储能单元在时刻*t*的输出功率 $P_i(t) = -\dot{E}_i(t)$ ，当储能单元放能时， $P_i(t) > 0$ ；当储能单元储能时， $P_i(t) < 0$ ，由此得：

$$P_i(t) = B_{vi} \omega_i^2(t) - T_{ei}(t) \omega_i(t)$$

定义在时刻*t*阻尼导致的功率损耗 $P_{i,loss}(t) = B_{vi} \omega_i^2(t)$ ，输入电网的功率 $P_{i,out}(t) = -T_{ei}(t) \omega_i(t)$ ；

第*i*个飞轮的储能容量 $E_{ci}$ 为：

$$E_{ci} = \frac{1}{2} I_i \omega_{i,max}^2$$

其中，用 $\omega_{i,max}$ 表示飞轮运行时允许的最大转速；

在时刻*t*第*i*个飞轮的荷能状态定义为：

$$\phi_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{ci}} = \frac{\omega_i^2(t)}{\omega_{i,max}^2} = \gamma_i \omega_i^2(t)$$

式中 $\gamma_i = 1/\omega_{i,max}^2$  为荷能转速系数；由上述各式得

$$\begin{aligned}\phi_i(t) &= \frac{2\gamma_i}{I_i}(-B_{vi}\omega_i^2(t) + T_{ei}(t)\omega_i(t)) \\ &= -\frac{2\gamma_i}{I_i}\left(\frac{B_{vi}}{\gamma_i}\phi_i(t) + P_{i,out}(t)\right) \\ &= -\frac{2B_{vi}}{I_i}\phi_i(t) - \frac{2\gamma_i}{I_i}P_{i,out}(t)\end{aligned}$$

对于整个储能系统，用 $P_{FESS}(t)$ 表示在时刻 $t$ 飞轮储能系统的总输出功率，其中 $P_{FESS}(t) = \sum_{i=1}^N P_{i,out}(t)$ ，飞轮数目为 $N$ ；用 $P_{REF}$ 表示其参考值。

4、根据权利要求3所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，每一个储能单元的控制其储能系统功率跟踪和荷能平衡的目标表达式为：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (P_{FESS}(t) - P_{REF}) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\phi_i(t) - \phi_j(t)) = 0。$$

5、根据权利要求4所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，指令发生器的设定如下：

当系统参数 $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ 相同时，指令发生器CG为：

$$\zeta_0 = 0$$

$$\zeta_0(0) = P_{REF}/N$$

其中 $\zeta_0(t)$ 、 $\zeta_0(0)$ 分别表示指令发生器的状态变量及其初值，飞轮数目为 $N$ ；

当系统参数 $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ 不同时，指令发生器CG为：

$$\zeta_0(t) = \alpha(P_{REF} - P_{FESS}(t))$$

其中 $\zeta_0(t)$ 表示指令发生器的状态变量， $\alpha > 0$  为指令发生器增益1。

6、根据权利要求5所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，系统的分布式观测器设定如下：

$$\zeta_i(t) = \mu_\zeta \sum_{j=0}^N a_{ij}(\zeta_j(t) - \zeta_i(t))$$

其中 $\zeta_i(t)$ 表示第 $i$ 个分布式观测器的状态变量， $\mu_\zeta$ 表示观测器增益1，如果第 $i$ 个储能单元获得第 $j$ 个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为 $N$ 。

7、根据权利要求6所述的一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，其特征在于，系统的控制器设定如下：

当系统参数 $(I_i, B_{vi}, \gamma_i)$ 相同时，步骤S4所述的控制器设定为：

$$T_{ei}(t) = \frac{1}{\omega_i(t)} (k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) - \zeta_i(t))$$

其中 $k_\phi > 0$ 表示第一控制器增益，如果第 $i$ 个储能单元获得第 $j$ 个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为 $N$ 。

当系统参数 $I_i, B_{vi}, \gamma_i$ 不同时，所述的控制器设定为：

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i(t) &= \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) \\ T_{ei}(t) &= \frac{1}{\omega_i(t)} (k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) + k_\xi \xi_i(t) - k_\zeta \zeta_i(t)) \end{aligned}$$

式中 $\xi_i(t)$ 表示控制器内部状态变量， $k_\phi, k_\xi, k_\zeta$ 分别表示第一控制器增益、第二控制器增益、第三控制器增益，如果第 $i$ 个储能单元获得第 $j$ 个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为 $N$ 。

## 一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法

### 技术领域

本发明涉储能系统协同控制领域，尤其在考虑基于飞轮的储能系统中，具体涉及一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法。

### 背景技术

生活生产中，对电能的需求往往具有很强的时间性和空间性，为了更合理地利用能源以提高其利用率，需要把一段时期内暂时不用的多余能量通过某种方式收集并储存起来，在使用高峰时再提取使用，或者运往能量紧缺的地方再使用，储能系统便可以实现这样的功能。作为电力系统的重要组成部分，储能系统充当了能量缓冲的角色，并且可以有效平整间歇性能源，如光能、风能等，带来的大幅度功率波动。

储能主要包括热能、动能、电能、电磁能、化学能等能量的存储，而储能技术的研究、开发与应用主要是以储存热能、电能为主，广泛应用于太阳能利用、电力的“移峰填谷”、废热和余热的回收以及工业与民用建筑和空调的节能等领域。现有的电力储能系统主要分为五类：机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能。

其中，隶属于机械储能方式的飞轮储能，是可以将电能、风能、太阳能等能源转化成飞轮的旋转动能加以储存的一种新型的高效的机械储能技术。其主要特点有：①储能密度高，功率密度大，因而在短时间内可以输出更大的能量；②能量转换效率高，一般可达 85%~95%；③对温度不敏感，对环境友好；④使用寿命和储能密度不会因过充电或过放电而受到影响，只取决于飞轮电池中电子元器件的寿命，一般可达 20 年左右；⑤容易测量放电深度和剩余“电量”；⑥充电时间短，属于分钟级别。

大型储能系统往往由多个小容量的储能单元共同组成，比如大容量飞轮储能系统通常是由许多个飞轮组成的，各飞轮直接连接母线，然后通过耦合点与主电网连接，或并入微电网。飞轮之间存在能量的交换，由每个飞轮的独立控制器实现其信息沟通与能量控制。对于多个储能单元构成的储能系统，其控制目标主要有以下两点：第一，储能系统的总输出功率需跟踪上层控制所设定的参考值；第二，当储能元件的剩余能量过高（过低）时将停止吸收（输出）能量以保障系统安全，延长元件寿命。因此，每个储能元件的剩余能量比例需保持一致以最大化储能系统的功率输出能力。分布式控制方案与典型的集中式控制方案不同的地方在

于，前者实现了去中心化，每个储能单元的独立控制器在通信网络之间传递局部信息，从而实现独立控制。

现有飞轮储能系统的控制方法（飞轮储能系统, CN111541336A）多针对由单个飞轮构成的飞轮储能系统,因此无法用于本发明所涉及的由多个飞轮构成的飞轮储能系统。文献(H. Cai, Power Tracking and State-of-Energy Balancing of an Energy Storage System by Distributed Control, *IEEE Access*, vol.8, pp. 170261-170270, 2020.)考虑了由多个储能单元构成的储能系统,但其储能单元的模型为简化的一阶积分器模型,因此也无法直接用于本发明所涉及的飞轮储能系统。针对本发明所涉及的由多个飞轮构成的飞轮储能系统,目前尚未有可行的分布式控制方案可以实现功率跟踪与荷能平衡的双目标控制。

## 发明内容

本发明考虑基于飞轮动态模型的储能系统的分布式双目标控制方法,即一方面储能系统的整体功率输出应该满足指定的参考功率,另一方面所有储能单元的荷能状态实现平衡。

本发明至少通过如下技术方案之一实现。

一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法,包括以下步骤:

- S1. 确定飞轮储能单元的动态模型;
- S2. 根据耦合点的实时功率与参考功率,设定指令发生器;
- S3. 根据指令发生器,设定每个飞轮储能单元的分布式观测器;
- S4. 根据飞轮的动态模型,为每一个飞轮储能单元设置控制器,实现飞轮储能系统的功率跟踪与荷能平衡的双目标控制。

优选的,所述飞轮储能系统包括通讯网络、若干个储能单元和电网,储能单元为飞轮。

优选的,所述储能单元的动态模型如下:

$$I_i \dot{\omega}_i(t) = -B_{vi} \omega_i(t) + T_{ei}(t)$$

其中,  $I_i$ 、 $\omega_i(t)$ 、 $B_{vi}$ 和 $T_{ei}(t)$ 分别表示第  $i$  个飞轮的转动惯量、时刻  $t$  的角速度、阻尼系数及时刻  $t$  的电磁转矩;对于任意的函数  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ 表示函数  $x(t)$ 在时刻  $t$  的导数,第  $i$  个飞轮在时刻  $t$  储存的能量  $E_i(t)$ 为:

$$E_i(t) = \frac{1}{2} I_i \omega_i^2(t)$$

定义第  $i$  个储能单元在时刻  $t$  的输出功率  $P_i(t) = -\dot{E}_i(t)$ ,当储能单元放能时,  $P_i(t) > 0$ ;当储能单元储能时,  $P_i(t) < 0$ ,由此得:

$$P_i(t) = B_{vi}\omega_i^2(t) - T_{ei}(t)\omega_i(t)$$

定义在时刻  $t$  阻尼导致的功率损耗  $P_{i,\text{loss}}(t) = B_{vi}\omega_i^2(t)$ ，输入电网的功率  $P_{i,\text{out}}(t) = -T_{ei}(t)\omega_i(t)$ ；

第  $i$  个飞轮的储能容量  $E_{ci}$  为：

$$E_{ci} = \frac{1}{2}I_i\omega_{i,\text{max}}^2$$

其中，用  $\omega_{i,\text{max}}$  表示飞轮运行时允许的最大转速；

在时刻  $t$  第  $i$  个飞轮的荷能状态定义为：

$$\phi_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{ci}} = \frac{\omega_i^2(t)}{\omega_{i,\text{max}}^2} = \gamma_i\omega_i^2(t)$$

式中  $\gamma_i = 1/\omega_{i,\text{max}}^2$  为荷能转速系数；由上述各式得

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_i(t) &= \frac{2\gamma_i}{I_i}(-B_{vi}\omega_i^2(t) + T_{ei}(t)\omega_i(t)) \\ &= -\frac{2\gamma_i}{I_i}\left(\frac{B_{vi}}{\gamma_i}\phi_i(t) + P_{i,\text{out}}(t)\right) \\ &= -\frac{2B_{vi}}{I_i}\phi_i(t) - \frac{2\gamma_i}{I_i}P_{i,\text{out}}(t)\end{aligned}$$

对于整个储能系统，用  $P_{FESS}(t)$  表示在时刻  $t$  飞轮储能系统的总输出功率，其中  $P_{FESS}(t) = \sum_{i=1}^N P_{i,\text{out}}(t)$ ，飞轮数目为  $N$ ，用  $P_{REF}$  表示其参考值。

优选的，每一个储能单元的控制器其储能系统功率跟踪和荷能平衡的目标表达式为：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (P_{FESS}(t) - P_{REF}) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\phi_i(t) - \phi_j(t)) = 0。$$

优选的，指令发生器的设定如下：

当系统参数  $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$  相同时，指令发生器 CG 为：

$$\dot{\zeta}_0 = 0$$

$$\zeta_0(0) = P_{REF}/N$$

其中  $\zeta_0(t)$ 、 $\zeta_0(0)$  分别表示指令发生器的状态变量及其初值，飞轮数目为  $N$ ；



当系统参数 $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ 不同时，指令发生器 CG 为：

$$\zeta_0(t) = \alpha(P_{REF} - P_{FESS}(t))$$

其中 $\zeta_0(t)$ 表示指令发生器的状态变量， $\alpha > 0$  为指令发生器增益 1。

优选的，系统的分布式观测器设定如下：

$$\dot{\zeta}_i(t) = \mu_\zeta \sum_{j=0}^N a_{ij}(\zeta_j(t) - \zeta_i(t))$$

其中 $\zeta_i(t)$ 表示第  $i$  个分布式观测器的状态变量， $\mu_\zeta$ 表示观测器增益 1，如果第  $i$  个储能单元获得第  $j$  个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为  $N$ 。

优选的，系统的控制器设定如下：

当系统参数（ $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ ）相同时，步骤 S4 所述的控制器设定为：

$$T_{ei}(t) = \frac{1}{\omega_i(t)}(k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) - \zeta_i(t))$$

其中 $k_\phi > 0$  表示第一控制器增益，如果第  $i$  个储能单元获得第  $j$  个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为  $N$ ；

当系统参数 $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ 不同时，所述的控制器设定为：

$$\begin{aligned} \xi_i(t) &= \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) \\ T_{ei}(t) &= \frac{1}{\omega_i(t)}(k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) + k_\xi \xi_i(t) - k_\zeta \zeta_i(t)) \end{aligned}$$

式中 $\xi_i(t)$ 表示控制器内部状态变量， $k_\phi$ 、 $k_\xi$ 、 $k_\zeta$ 分别表示第一控制器增益、第二控制器增益、第三控制器增益，如果第  $i$  个储能单元获得第  $j$  个储能单元的信息，则 $a_{ij} = 1$ ，否则， $a_{ij} = 0$ ，飞轮数目为  $N$ 。

本发明基于飞轮的储能系统，设定出满足储能系统的功率跟踪及荷能平衡双目标的分布式控制方案。在本发明中，飞轮实际动态模型得到考虑，储能系统可在飞轮模型下保持其功率跟踪与荷能平衡，系统的控制双目标得以实现。

与现有的技术相比，本发明的有益效果为：针对由多个飞轮组成的飞轮储能系统，本发明首次提出了可行的分布式控制方法，以实现功率跟踪与荷能平衡的双目标控制。

## 附图说明

- 图 1 为本实施例一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法的储能系统结构图；  
 图 2 为本实施例一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法仿真中的储能单元通信关系图；  
 图 3a 为本实施例飞轮荷能状态随时间变化的仿真结果曲线图；  
 图 3b 为本实施例飞轮输出功率随时间变化的仿真结果曲线图；  
 图 3c 为本实施例输出总功率与参考功率的误差随时间变化的仿真结果曲线图；  
 图 4a 为本实施例调整后荷能状态随时间变化曲线图；  
 图 4b 为本实施例调整后飞轮输出功率随时间变化的曲线图；  
 图 4c 为本实施例调整后输出总功率与参考功率的误差随时间变化的仿真结果曲线图。

## 具体实施方式

为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确，以下结合附图并举实施例对本发明作进一步详细描述。

本发明考虑基于飞轮动态模型的储能系统的分布式双目标控制方法，即一方面储能系统的整体功率输出应该满足指定的参考功率，另一方面所有储能单元的荷能状态实现平衡。

本实施例一种飞轮储能系统的荷能平衡控制方法，包括如下步骤：

S1.确定飞轮储能单元的动态模型；

下面对步骤 S1 所述的系统数学模型作具详细分析。

如图 1 所示，所述飞轮储能系统包括通讯网络、 $N$  个飞轮储能单元和电网的其他部分，如图 2 所示，本实施例采用 15 个飞轮储能单元。第  $i$  个飞轮储能单元的动态模型如下：

$$I_i \dot{\omega}_i(t) = -B_{vi} \omega_i(t) + T_{ei}(t)$$

其中， $I_i$ 、 $\omega_i(t)$ 、 $B_{vi}$ 和 $T_{ei}(t)$ 分别表示第  $i$  个飞轮的转动惯量、时刻  $t$  的角速度、阻尼系数及时刻  $t$  的电磁转矩；给定函数 $x(t)$ ， $\dot{x}(t)$ 表示函数 $x(t)$ 在时刻  $t$  的导数。第  $i$  个飞轮在时刻  $t$  储存的能量 $E_i(t)$ 为：

$$E_i(t) = \frac{1}{2} I_i \omega_i^2(t)$$

定义第  $i$  个储能单元在时刻  $t$  的输出功率 $P_i(t) = -\dot{E}_i(t)$ ，当储能单元放能时， $P_i(t) > 0$ ；当储能单元储能时， $P_i(t) < 0$ ，由此得：

$$P_i(t) = B_{vi} \omega_i^2(t) - T_{ei}(t) \omega_i(t)$$

定义在时刻  $t$  阻尼导致的功率损耗  $P_{i,\text{loss}}(t) = B_{vi}\omega_i^2(t)$ ，输入电网的功率  $P_{i,\text{out}}(t) = -T_{ei}(t)\omega_i(t)$ ；

第  $i$  个飞轮的储能容量  $E_{ci}$  为：

$$E_{ci} = \frac{1}{2}I_i\omega_{i,\text{max}}^2$$

其中，用  $\omega_{i,\text{max}}$  表示飞轮运行时允许的最大转速；

在时刻  $t$  第  $i$  个飞轮的荷能状态定义为：

$$\phi_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{ci}} = \frac{\omega_i^2(t)}{\omega_{i,\text{max}}^2} = \gamma_i\omega_i^2(t)$$

式中  $\gamma_i = 1/\omega_{i,\text{max}}^2$  为荷能转速系数；由上述各式可得

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_i(t) &= \frac{2\gamma_i}{I_i}(-B_{vi}\omega_i^2(t) + T_{ei}\omega_i(t)) \\ &= -\frac{2\gamma_i}{I_i}\left(\frac{B_{vi}}{\gamma_i}\phi_i(t) + P_{i,\text{out}}(t)\right) \\ &= -\frac{2B_{vi}}{I_i}\phi_i(t) - \frac{2\gamma_i}{I_i}P_{i,\text{out}}(t)\end{aligned}$$

对于整个储能系统，用  $P_{FESS}(t)$  表示在时刻  $t$  飞轮储能系统的总输出功率，其中  $P_{FESS}(t) = \sum_{i=1}^N P_{i,\text{out}}(t)$ ，**飞轮数目为  $N$** ；用  $P_{REF}$  表示其参考值。

在本发明中，需要为每一个储能单元设定控制器，实现储能系统功率跟踪和荷能平衡的目标，该目标可以表达为：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (P_{FESS}(t) - P_{REF}) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\phi_i(t) - \phi_j(t)) = 0。$$

S2. 设定指令发生器；

系统参数 ( $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ ) 相同时，步骤 S2 所述的指令发生器 CG 如下：

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}_0 &= 0 \\ \zeta_0(0) &= P_{REF}/N\end{aligned}$$

其中  $\zeta_0(t)$ 、 $\zeta_0(0)$  分别表示指令发生器的状态变量及其初值，**飞轮数目为  $N$** 。

当系统参数  $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$  不同时，指令发生器 CG 为：

$$\zeta_0(t) = \alpha(P_{REF} - P_{FESS}(t))$$

其中 $\zeta_0(t)$ 表示指令发生器的状态变量,  $\alpha > 0$  为指令发生器增益 1 ;

S3.设定系统的分布式观测器;

$$\dot{\zeta}_i(t) = \mu_\zeta \sum_{j=0}^N a_{ij}(\zeta_j(t) - \zeta_i(t))$$

其中 $\zeta_i(t)$ 表示第  $i$  个分布式观测器的状态变量,  $\mu_\zeta$ 表示观测器增益 1, 如果第  $i$  个储能单元可以获得第  $j$  个储能单元的信息, 则 $a_{ij} = 1$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ , 飞轮数目为  $N$ 。

S4.设定系统控制器

系统参数 ( $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ ) 相同时, 步骤 S4 所述的控制器如下:

$$T_{ei}(t) = \frac{1}{\omega_i(t)} (k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) - \zeta_i(t))$$

其中 $k_\phi > 0$  表示第一控制器增益, 如果第  $i$  个储能单元获得第  $j$  个储能单元的信息, 则 $a_{ij} = 1$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ , 飞轮数目为  $N$ ;

当系统参数 $I_i$ 、 $B_{vi}$ 、 $\gamma_i$ 不同时, 所述的控制器设定为:

$$\begin{aligned} \xi_i(t) &= \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) \\ T_{ei}(t) &= \frac{1}{\omega_i(t)} (k_\phi \sum_{j=1}^N a_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t)) + k_\xi \xi_i(t) - k_\zeta \zeta_i(t)) \end{aligned}$$

式中 $\xi_i(t)$ 表示控制器内部状态变量,  $k_\phi$ 、 $k_\xi$ 、 $k_\zeta$ 分别表示第一控制器增益、第二控制器增益、第三控制器增益, 如果第  $i$  个储能单元获得第  $j$  个储能单元的信息, 则 $a_{ij} = 1$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ , 飞轮数目为  $N$ 。

本发明基于飞轮的储能系统, 设计出满足储能系统的功率跟踪及荷能平衡双目标的分布式控制方案。在本发明中, 飞轮实际动态模型得到考虑, 储能系统可在飞轮模型下保持其功率跟踪与荷能平衡, 控制系统的双目标得以实现。

本发明实施例的仿真结果各图所示。各飞轮的荷能状态初值为 $\phi_i(0) = 0.9 - 0. * (i - 1)$ , 储能系统参考功率 $P_{REF} = 30\text{kW}$ 。定义 $P_e(t) = P_{REF} - P_{FESS}(t)$ 。

图 3a 中，一段时间后，每个储能单元的荷能状态相差接近于 0，可见实现了荷能平衡目标，且由图 3b 可看出，各单元输出功率在一段时间后也实现了平衡。同时，图 3c 中，输出总功率与参考功率的误差在一定时间后归零，这说明系统同时实现了功率跟踪。

图 4a 中，一段时间后，每个储能单元的荷能状态几乎相等，图中表现为各荷能状态值在同一直线上持平，因此各单元荷能状态仍能保持平衡。同时，通过图 4b 可看到各单元输出功率在一段时间后也实现了平衡。最后，由图 4c 可知，系统在短时间的调整后，输出功率能够无差追踪参考功率，功率追踪目标实现。

上述实施例为本发明较佳的实施方式，但本发明的实施方式并不受上述实施例的限制，其他的任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化，均应为等效的置换方式，都包含在本发明的保护范围之内。

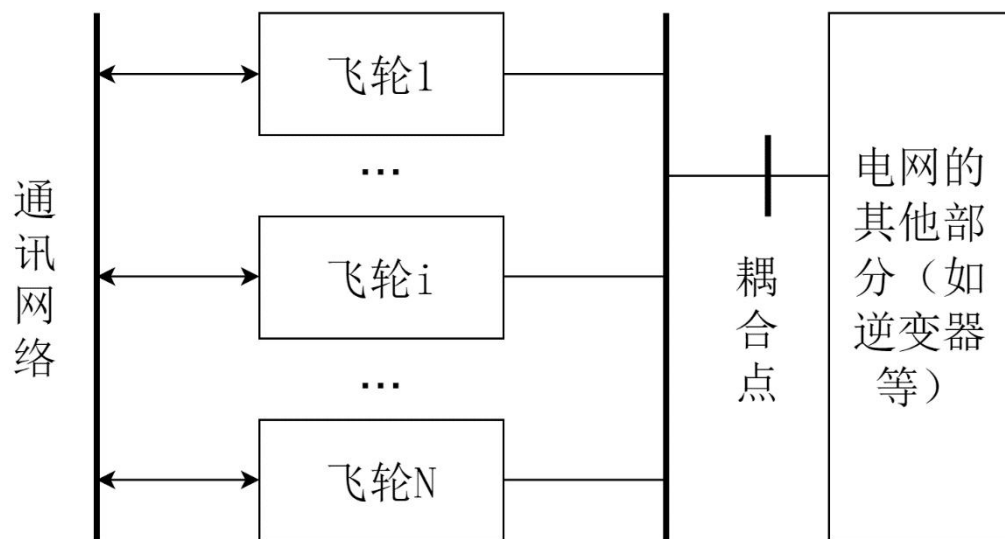


图 1

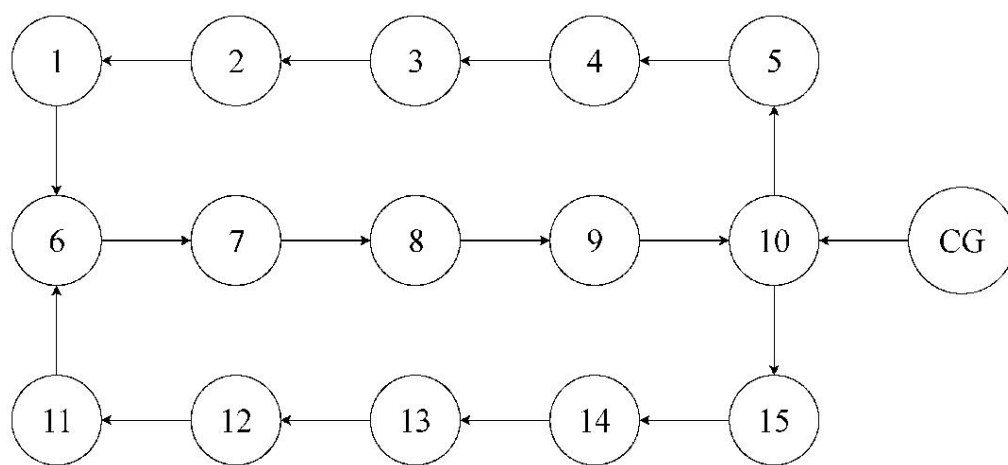


图 2

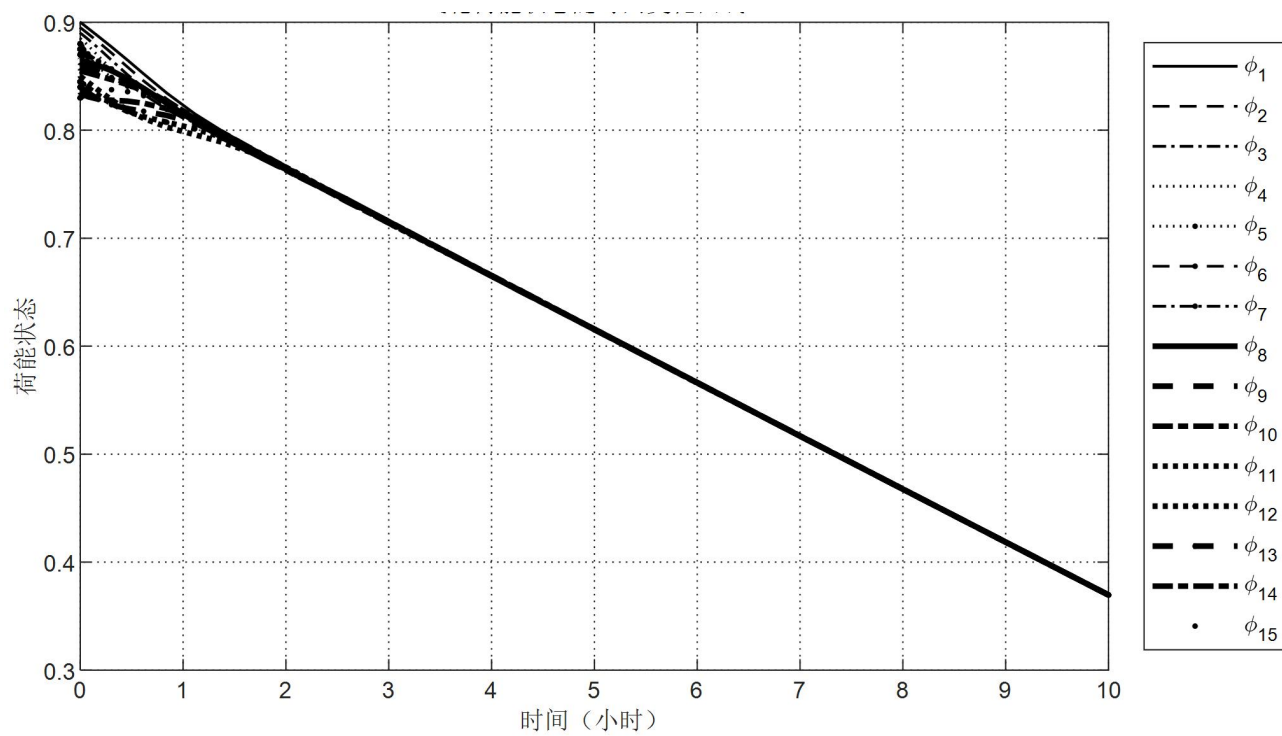


图 3a

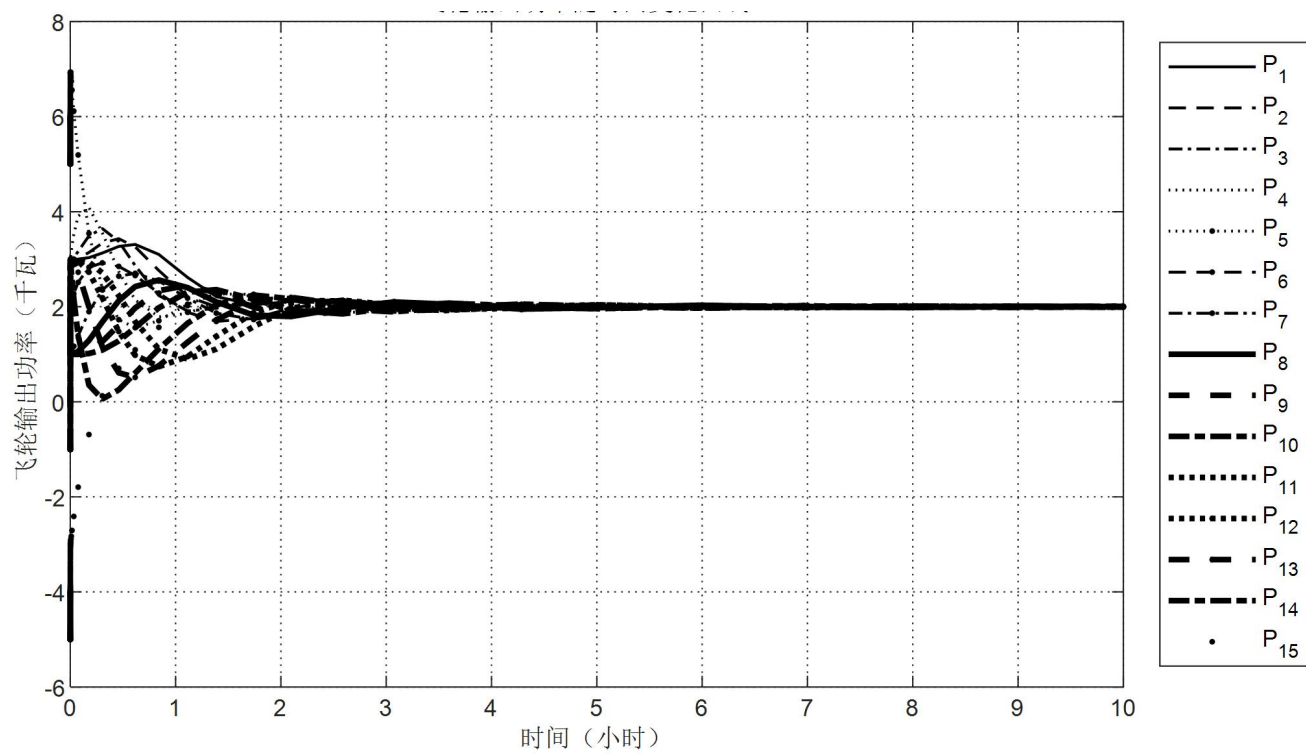


图 3b

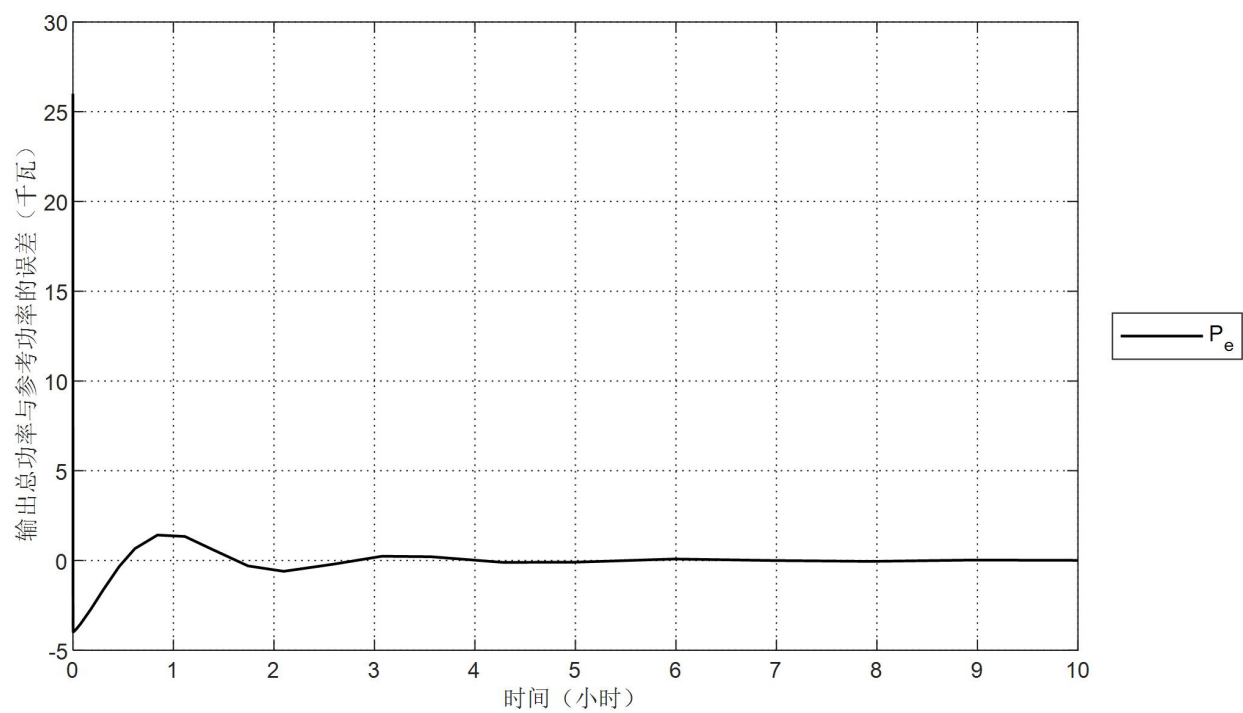


图 3c

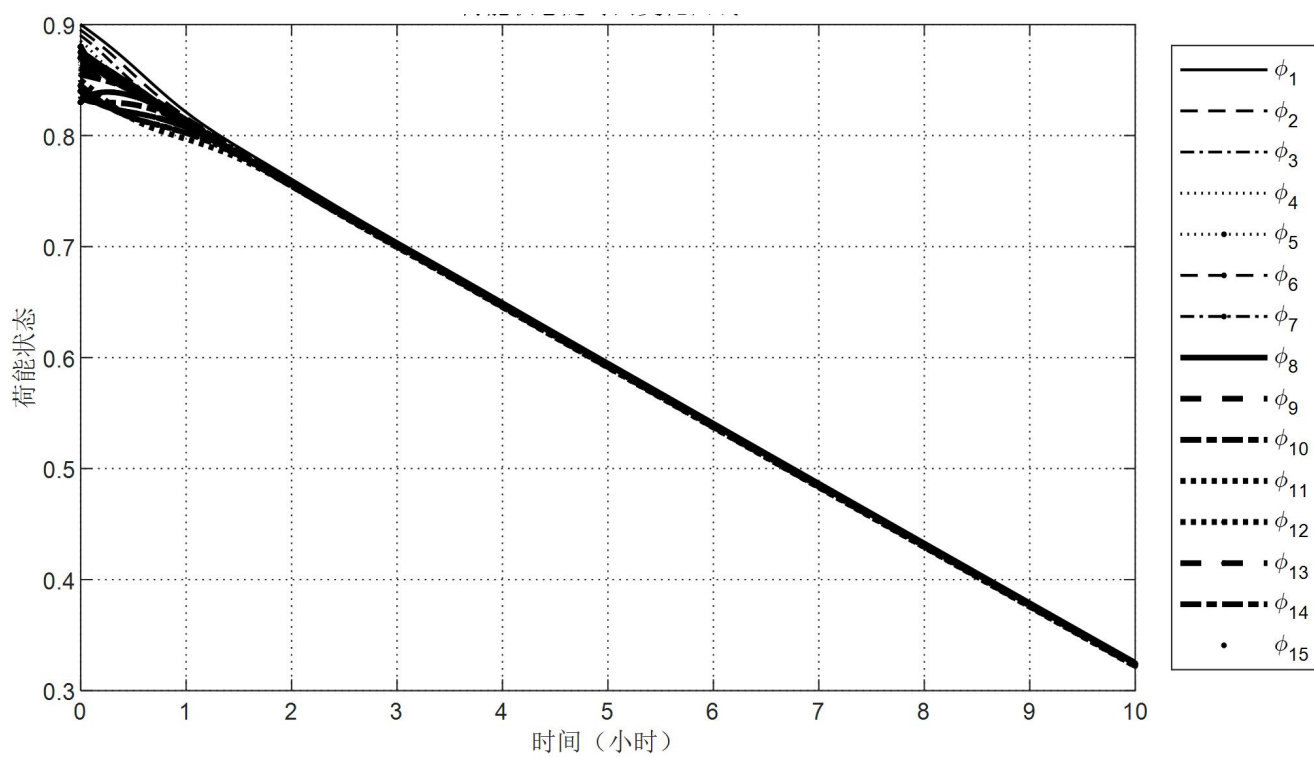


图 4a



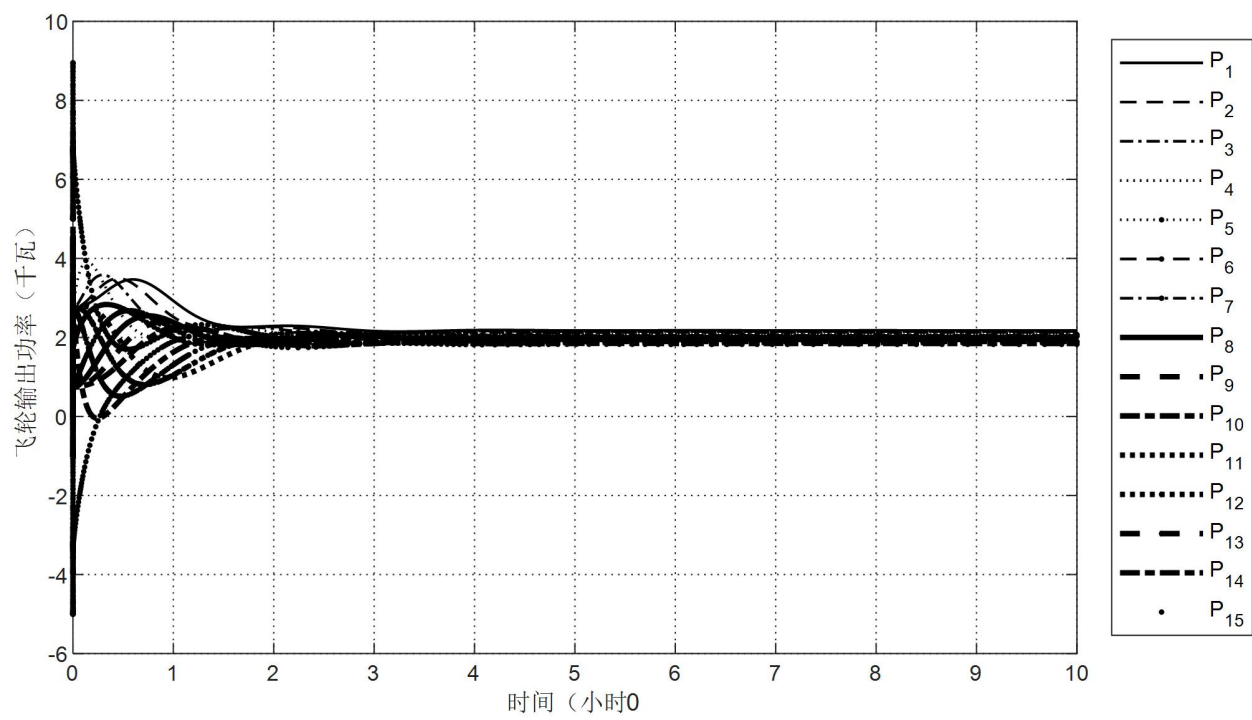


图 4b

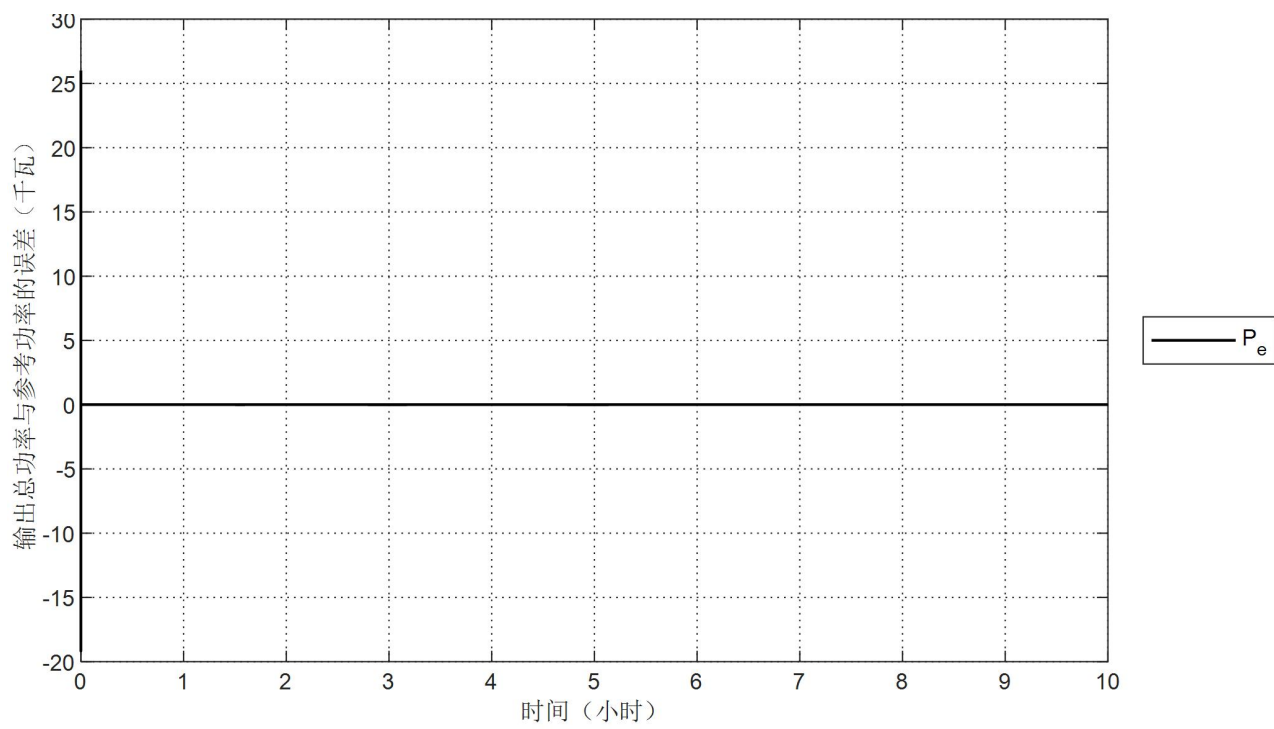


图 4c