



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102336189 A

(43) 申请公布日 2012.02.01

(21) 申请号 201110154888.0

(22) 申请日 2011.06.10

(71) 申请人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路  
193号

(72) 发明人 陈无畏 姜武华 赵林峰 朱茂飞  
黄鹤 张荣芸

(74) 专利代理机构 合肥金安专利事务所 34114  
代理人 范克明 金惠贞

(51) Int. Cl.

B60W 30/00 (2006.01)

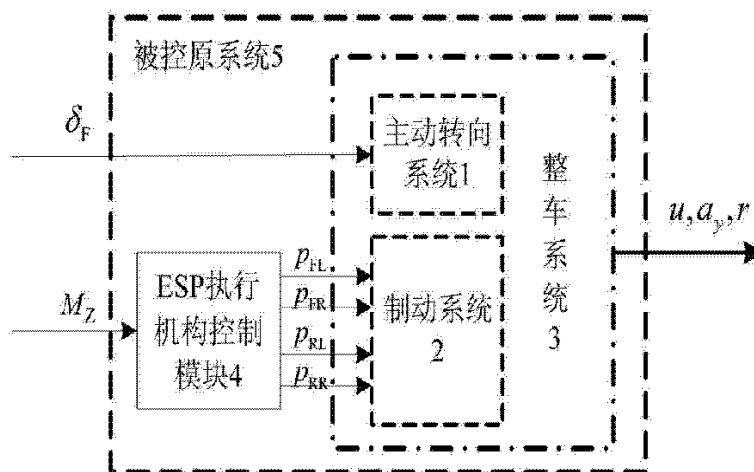
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 5 页

(54) 发明名称

一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法,采用包含主动转向系统 1 和制动系统 2 的整车系统 3、ESP 执行机构控制模块 4 组成被控原系统 5;根据被控原系统 5 的动力学特性,利用静态神经网络 6 加积分器 7 来构造被控原系统 5 的动力学逆向系统 8;将逆向系统 8 串联在被控原系统 5 前组成复合被控系统 13,从而构成两个控制通道彼此解耦的子系统;分别根据信号检测模块 16 的两路输出信号值与其期望值的偏差设计了复合被控系统 13 的闭环控制器 11 (AFS 控制器,ESP 控制器);将闭环控制器 11 串联在逆向系统 8 前一起形成 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制器 12,实现对配备 AFS 和 ESP 汽车质心侧偏角和横摆角速度的解耦控制,而且应用广泛。



1. 一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法,其特征在于:将包含主动转向系统(1)和制动系统(2)的整车系统(3)、ESP 执行机构控制模块(4)作为一个整体组成被控原系统(5);根据被控原系统(5)的动力学特性,利用静态神经网络(6)加积分器(7)构造逆向系统(8)来逼近被控原系统(5)的逆向动力学特性;将逆向系统(8)串联在被控原系统(5)之前一起组成复合被控系统(13),复合被控系统(13)被线性化解耦为两个控制通道互不关联的单输入单输出子系统;根据信号检测模块(16)的两路输出信号值与其期望值的偏差,采用一种线性系统的综合方法对复合被控系统(13)的两个单输入单输出系统分别设计了 AFS 控制器(9)和 ESP 控制器(10)构成闭环控制器(11);最后将闭环控制器(11)串联在逆向系统(8)前并一起形成 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制器(12)来实现对汽车横摆角速度和质心侧偏角的解耦控制。

2. 根据权利要求 1 所述的一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法,其特征在于解耦控制器的结构:将闭环控制器(11)串联在逆向系统(8)之前,共同组成 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制器(12),逆向系统(8)由 1 个静态神经网络和 1 个积分器(包含两个积分环节  $s^{-1}$ )组成,闭环控制器

(11)由 1 个 AFS 控制器(9)和 1 个 ESP 控制器(10)组成;其中闭环控制器(11)的  $\bar{u}_1$  和  $\bar{u}_2$  输出端分别连接逆向系统(8)相应的输入端,逆向系统(8)的  $\delta F$  和  $MZ$  第一和第二输出端分别连接主动转向系统(1)和 ESP 执行机构控制模块(4)。

3. 根据权利要求 1 所述的一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法,其特征在于被控原系统(5)的逆向系统(8)的构造方法:采用 4 个输入节点、2 个输出节点的静态神经网络(6)加包含两个积分环节  $s^{-1}$  的积分器(7)构成具有 2 个输入节点、2 个输出节点的逆向系统(8),其中逆向系统(8)的第一个输入  $\bar{u}_1$  作为静态神经网络(6)的第一个输入  $P_1$ ,  $\bar{u}_1$  经积分器  $s^{-1}$  的输出  $P_3$  为静态神经网络(6)的第二个输入;逆向系统(8)的第二个输入  $\bar{u}_2$  经积分器  $s^{-1}$  的输出  $P_4$  作为静态神经网络(6)的第三个输入,逆向系统(8)的第二个输入  $\bar{u}_2$  直接为静态神经网络(6)的第四个输入  $P_2$ 。

## 一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种汽车主动前轮转向 (AFS) 和汽车电子稳定程序 (ESP) 集成系统的解耦控制方法, 用于消除集成系统的控制回路耦合影响, 属于汽车底盘控制领域。

### 背景技术

[0002] 近年来, 随着汽车行驶安全性要求的不断提高, 如何在危险工况下弥补驾驶员决策和操纵能力的不足, 对汽车实施主动控制或干预成为汽车底盘控制领域内的研究热点。汽车主动前轮转向 (AFS) 是一种能将驾驶员的转向输入角和实际的车辆转角分离开来, 在驾驶员转向角输入的基础上叠加一个附加转向角, 用于优化汽车对驾驶员输入的响应或在紧急情况下提高汽车的操纵稳定性。但由于充气轮胎侧向力固有的非线性特性, AFS 的性能被限制于汽车中低侧向加速度的线性操纵区域内。汽车电子稳定程序 (ESP) 通过采集方向盘转角信息来判断驾驶员的转向意图, 通过调节制动力在各车轮上的合理分配来控制汽车的横摆运动, 在汽车的线性和非线性操纵区域内都能有效改善汽车的操纵稳定性。但 ESP 的持续工作会影响汽车的纵向动力学特性, 使汽车的纵向车速降低很多, 不利于驾驶舒适性的改善。

[0003] 目前, 当汽车轮胎侧向力处于线性范围、侧偏角和制动力较小时, 利用 AFS 改变前轮转角以影响轮胎的侧向力, 进而改善汽车的侧向稳定性和操纵性能。而当汽车处于极限运动条件下, 如高速大转弯、紧急制动或加速、变路径操作等, 轮胎的侧向力达到饱和状态, 这种情况下单靠前轮转角难以调整汽车的运动状态, 此时利用 ESP 通过汽车制动防抱死系统 (ABS) 来产生需要的横摆力矩, 从而改善汽车的稳定性。因此, 对 AFS 和 ESP 实施集成控制以充分利用二者的功能优势成为汽车主动安全控制主要关键技术之一。

[0004] 由于汽车现有的 AFS 和 ESP 电控系统主要是以实现汽车的某种局部功能为目标, 很少考虑二者之间或与其它系统之间的相互影响, 因而当 AFS 和 ESP 同时装备在汽车上时, 就会不可避免的产生耦合和干涉, 影响汽车的整体性能。因此, 对于汽车 AFS 和 ESP 集成系统, 需采用一些新的控制技术和控制方法来解决 AFS 和 ESP 这两个控制回路间的耦合影响问题。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的解决汽车 AFS 和 ESP 之间的相互影响问题, 提出一种能够有效消除 AFS 和 ESP 集成系统中两控制回路间的耦合关联作用的解耦方法, 使集成系统的一个输出仅由一个控制输入完全控制, 并且使系统具有动态响应快、稳态误差小和鲁棒性高等优点。

[0006] 一种应用于汽车 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制方法, 采用如下的技术方案: 将包含主动转向系统 1 和制动系统 2 的整车系统 3、ESP 执行机构控制模块 4 作为一个整体组成被控原系统 5; 根据被控原系统 5 的动力学特性, 利用静态神经网络 6 加积分器 7 构造逆向系统 8 来逼近被控原系统 5 的逆向动力学特性; 将逆向系统 8 串联在被控原系统 5 之前一起组成复合被控系统 13, 复合被控系统 13 被线性化解耦为两个控制通道互不关联的单输

入单输出子系统；根据信号检测模块 16 的两路输出信号值与其期望值的偏差，采用一种线性系统的综合方法对复合被控系统 13 的两个单输入单输出系统分别设计了 AFS 控制器 9 和 ESP 控制器 10 构成闭环控制器 11；最后将闭环控制器 11 串联在逆向系统 8 前并一起形成 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制器 12 来实现对汽车横摆角速度和质心侧偏角的解耦控制。

[0007] 本发明的有益效果在于：

1. 通过设计逆向系统与包含 AFS 和 EPS 的被控原系统串联，使得到的复合被控系统的输入和输出间具有一一对应的关系，并且两个控制通道彼此解耦；

2. 采用 AFS 控制器和 ESP 控制器组成闭环控制器，并将闭环控制器与逆向系统串联构成解耦控制器，不仅可以提高 AFS 和 ESP 集成系统的鲁棒性，并且可以提高集成系统的静态和动态性能；

3. 提出的逆向系统加闭环控制器的解耦控制方法不仅在汽车 AFS 和 ESP 集成系统中得到很好的应用，并且在汽车底盘其它电控系统或集成系统中也有较高的应用价值。

## 附图说明

[0008] 图 1 是本发明的包含主动转向系统、制动系统和 EPS 执行机构控制模块的被控原系统结构图。

[0009] 图 2 是本发明的静态神经网络加积分器的逆向系统结构图。

[0010] 图 3 是本发明的静态神经网络结构示意图。

[0011] 图 4 是本发明的施加于被控原系统以获得静态神经网络训练样本的激励信号（(a) 是变幅值正弦信号的附加转向角，(b) 是附加横摆力矩的阶跃信号）。

[0012] 图 5 是本发明的逆向系统与被控原系统组成的复合被控系统的示意图及解耦后的等效结构图。

[0013] 图 6 是本发明的由闭环控制器、信号检测模块和复合被控系统组成的闭环控制系统结构示意图。

[0014] 图 7 本发明的是用于横摆角速度检测和质心侧偏角预估的信号检测模块结构图。

[0015] 图 8 是本发明的 AFS 和 ESP 集成系统解耦控制结构框图。

## 具体实施方式

[0016] 本发明的实施方案是：首先将包含主动转向系统和制动系统的整车系统、ESP 执行机构控制模块作为一个整体组成被控原系统；根据被控原系统的动力学特性，利用静态神经网络加积分器构造逆向系统用于逼近被控原系统的逆向动力学特性；然后将逆向系统串联在被控原系统之前一起组成复合被控系统，使复合被控系统被线性化解耦为两个控制通道互不关联的单输入单输出子系统；根据信号检测模块的两路输出信号值与其期望值的偏差，采用一种线性系统的综合方法对复合被控系统的两个单输入单输出系统分别设计了 AFS 控制器和 ESP 控制器构成闭环控制器；最后将闭环控制器串联在逆向系统前并一起形成 AFS 和 ESP 集成系统的解耦控制器来实现对汽车横摆角速度和质心侧偏角的解耦控制。根据不同的控制要求，可选择不同的硬件和软件来实现。

[0017] 具体的实施分以下几个步骤：

步骤 1:构造被控原系统。首先将包含主动转向系统和制动系统的整车系统 3、ESP 执行机构控制模块 4 组成被控原系统 5。该被控原系统 5 以附加前轮转向角和附加横摆力矩为其输入,汽车的相关行驶状态参数为输出(如图 1 所示)。

[0018] 步骤 2:通过分析和推导,为被控原系统的逆向系统的构造提供理论依据。首先根据拉格朗日法或牛顿-欧拉法建立汽车 AFS 和 ESP 的集成系统动力学方程为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (\text{i})$$

其中,  $\mathbf{x} = [\beta \quad r]^T$  为状态变量,  $\beta$  是质心侧偏角,  $r$  是横摆角速度;

$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2]^T = [\delta_f \quad M_z]^T$  为被控原系统 5 的控制输入变量,  $\delta_f$  为附加转向角,  $M_z$  为附加横摆力矩;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  分别为被控原系统 5 的输入矩阵。根据 AFS 和 ESP 集成控制要求,定义被控原系统 5 的控制输出变量为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (\text{ii})$$

其中,  $\mathbf{y} = [y_1 \quad y_2]^T = [\beta \quad r]^T$  为被控原系统 5 控制输出变量,  $\mathbf{C}$  为输出矩阵。

[0019] 其次根据 Interactor 算法:计算输出变量  $y$  对时间的各阶导数,直到  $y$  的导数方程中显含输入变量  $u$ ,得到被控原系统 5 的向量相对阶为

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \quad \alpha_2]^T = [1 \quad 1]^T \quad (\text{iii})$$

由上式 (iii) 可以看出,被控原系统 5 中存在  $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = n = 2$  ( $n$  为被控原系统 5 的阶数),

由隐函数定理可知,被控原系统 5 的逆向系统存在,且其逆向系统的输出  $u$  (即被控原系统 5 的输入)可表示为

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{y}}_1, \dot{\mathbf{y}}_2) = \boldsymbol{\varphi}(\beta, r, \dot{\beta}, \dot{r}) \quad (\text{iv})$$

其中,  $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$  为逆向系统的输出与输入间的非线性映射关系;

令  $z_1 = y_1$ ,  $z_2 = y_2$ ,  $v_1 = \dot{y}_1$ ,  $v_2 = \dot{y}_2$  作为逆向系统的输入,则被控原系统 5 的逆向系统 8 的标准形式可写为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = v_1 \\ \dot{z}_2 = v_2 \\ \mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi}(z_1 \quad z_2 \quad v_1 \quad v_2) \end{cases} \quad (\text{v})$$

步骤 3:构造逆向系统。根据上式 (v) 得到的被控原系统 5 的逆向系统 8 的标准形式,可采用一个静态神经网络 6 加积分器 7 (两个  $s^{-1}$  环节)来构造逆向系统 8 此处其中逆向系

统 8 的第一个输入  $\bar{u}_1$  作为静态神经网络 6 的第一个输入  $P_1$ ,  $\bar{u}_1$  经积分器  $s^{-1}$  的输出  $P_3$  为静态神经网络 6 的第二个输入; 逆向系统 8 的第二个输入  $\bar{u}_2$  经积分器  $s^{-1}$  的输出  $P_4$  作为静态神经网络 6 的第三个输入, 逆向系统 8 的第二个输入  $\bar{u}_2$  直接为静态神经网络 6 的第四个输入  $P_2$ 。(如图 2 所示)。其中静态神经网络 6 采用包含输入层、隐含层和输出层的 BP 网络, 输入层节点数为 4, 隐含层节点数为 9, 输出层节点数为 2, BP 网络的输入层和隐含层采用 tansig 作为传递函数, 输出层采用 purelin 作为传递函数(如图 3 所示)。为了使构造的逆向系统 8 能准确逼近被控原系统 5 的逆向动力学特性, 将附图 8 中所示的两种激励信号  $\{\delta_r, M_z\}$  施加于被控原系统 5 的输入端(如图 4 所示), 以 10ms 的采样周期采集信号检测模块 16 的两个输出信号  $\beta$  和  $r$ , 并对采集到的  $\beta$  和  $r$  信号离线分别求其一阶导数得到  $\dot{\beta}$  和  $\dot{r}$ ; 对上述信号作归一化处理, 将  $\{\dot{\beta}, \beta, r, \dot{r}\}$  作为静态神经网络 6 的输入样本, 将  $\{\delta_r, M_z\}$  作为静态神经网络的输出样本, 利用 Levenberg-Marquardt 算法和上述样本数据对静态神经网络 6 进行训练, 并对训练好的静态神经网络的泛化能力进行检验。

[0020] 步骤 4: 形成复合被控系统。将上述建立并训练好的神经网络逆向系统 8 串联在原被控系统之前并一起构成复合被控系统 13(如图 5 所示), 其中逆向系统 8 的输出是原被控系统的输入, 逆向系统 8 的第一输出端接原被控系统 5 的第一输入端, 逆向系统 8 的第二输出端接原被控系统 5 的第二输入端。通过将逆向系统 8 与被控原系统 5 串联得到的复合被控系统, 等价于两个控制通道彼此解耦的一阶线性积分子系统(见附图 5 右图), 从而把对汽车 AFS 和 ESP 集成系统的复杂控制问题转化为对两个一阶线性积分子系统的独立控制问题。

[0021] 步骤 5: 设计闭环控制器。对由步骤 4 得到的复合被控 13 设计线性闭环控制器 11, 闭环控制器 11 由一个 AFS 控制器 9 和一个 ESP 控制器 10 组成(如图 6 所示)。线性闭环控制器采用线性系统理论中的 PID 控制、LQG 控制或  $H_2/H_\infty$  控制方法来设计, 在本发明给出的实施例中, AFS 控制器和 ESP 控制器均选用 PD 控制方法, 闭环控制器的结构为

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 & 52 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\beta(t) \\ e_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4.5 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_\beta(t) \\ \dot{e}_r(t) \end{bmatrix} \quad (\text{vi})$$

其中,  $e_\beta$ 、 $\dot{e}_\beta$  和  $e_r$ 、 $\dot{e}_r$  分别为汽车质心侧偏角和横摆角速度的实际值与期望值的偏差及偏差的变化率。质心侧偏角和横摆角度的期望值由汽车 2 自由度操纵力学模型获得, 在本发明中, 对 2 自由度操纵力学模型的建立以及质心侧偏角和横摆角速度期望值的计算, 可跳过。

[0022] 步骤 6: 设计信号检测模块。为了实现对汽车质心侧偏角  $\beta$  和横摆角速度  $r$  这两个状态的解耦控制, 需要实时检测汽车质心侧偏角和横摆角速度的实际值, 并与其期望值作比较以获得偏差信号  $e_\beta$  和  $e_r$ , 从而为下一步的设计的闭环控制器提供输入信号(如图 7

所示)。首先用汽车用陀螺仪检测汽车的横摆角速度 $r$ 、侧向加速度 $a_y$ ，侧倾角 $\varphi$ ，纵向加速度 $a_x$ ，并通过对 $a_x$ 在线积分获得汽车的纵向速度 $u$ ，见附图6；然后通过设计如下的质心侧偏角预估器来获得实际的质心侧偏角信号

$$\beta = \int \left( \frac{a_y + g\varphi}{u} - r \right) dt \quad (\text{vii})$$

步骤7：形成AFS和ESP解耦控制系统。将得到的闭环控制器11串联在逆向系统8之前并一起构成汽车AFS和ESP集成系统的解耦控制器12其中闭环控制器11的 $\mu_1$ 和 $\bar{\mu}_1$ 输出端分别连接逆向系统8相应的输入端，逆向系统8的 $\delta F$ 和MZ第一和第二输出端分别连接主动转向系统1和ESP执行机构控制模块4。（如图8所示），可根据具体的控制精度和成本采用不同的硬件和软件来实现。

[0023] 根据上述7个步骤，即可实现本发明。

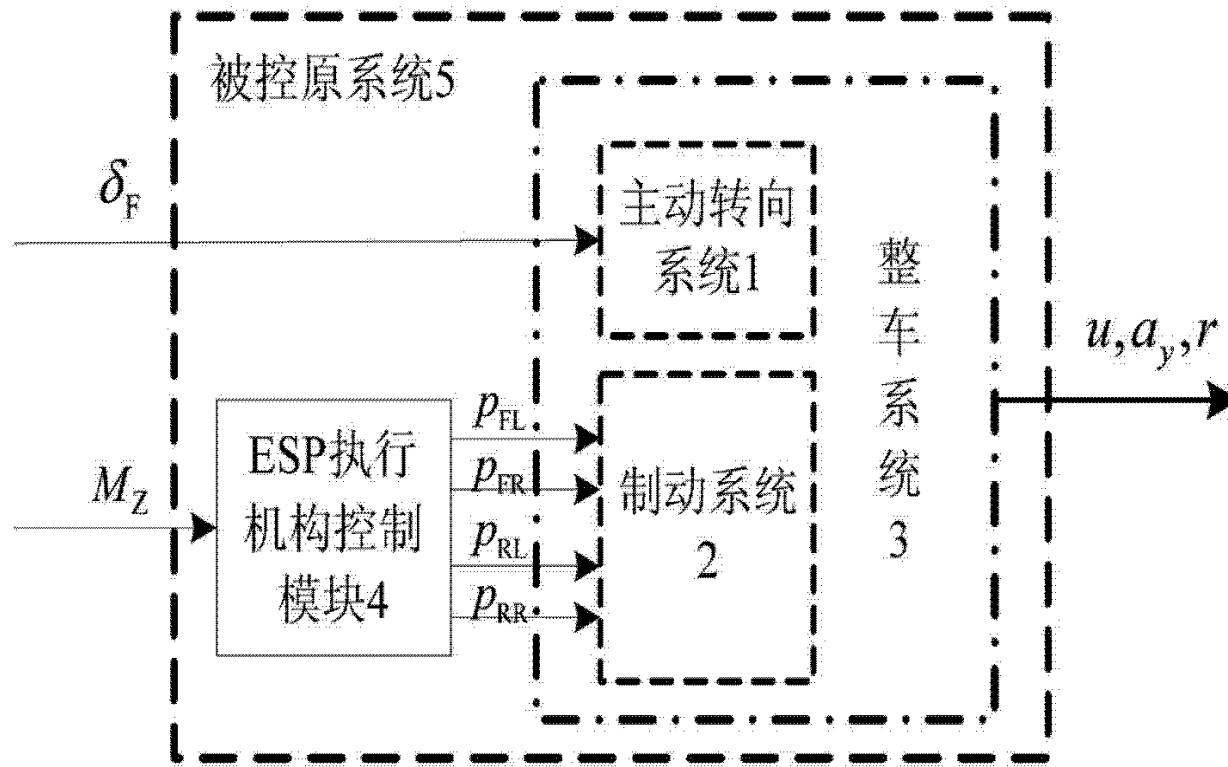


图 1

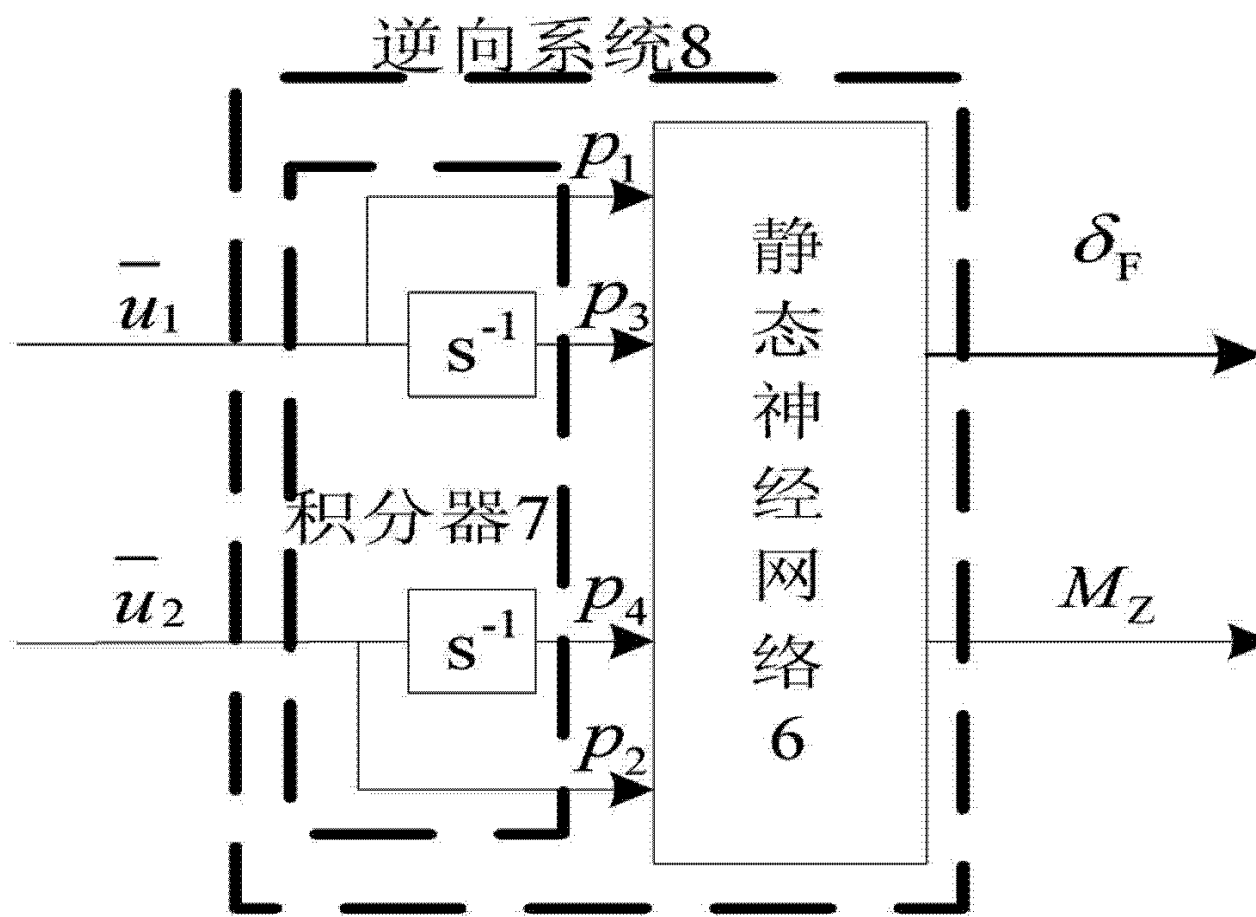


图 2



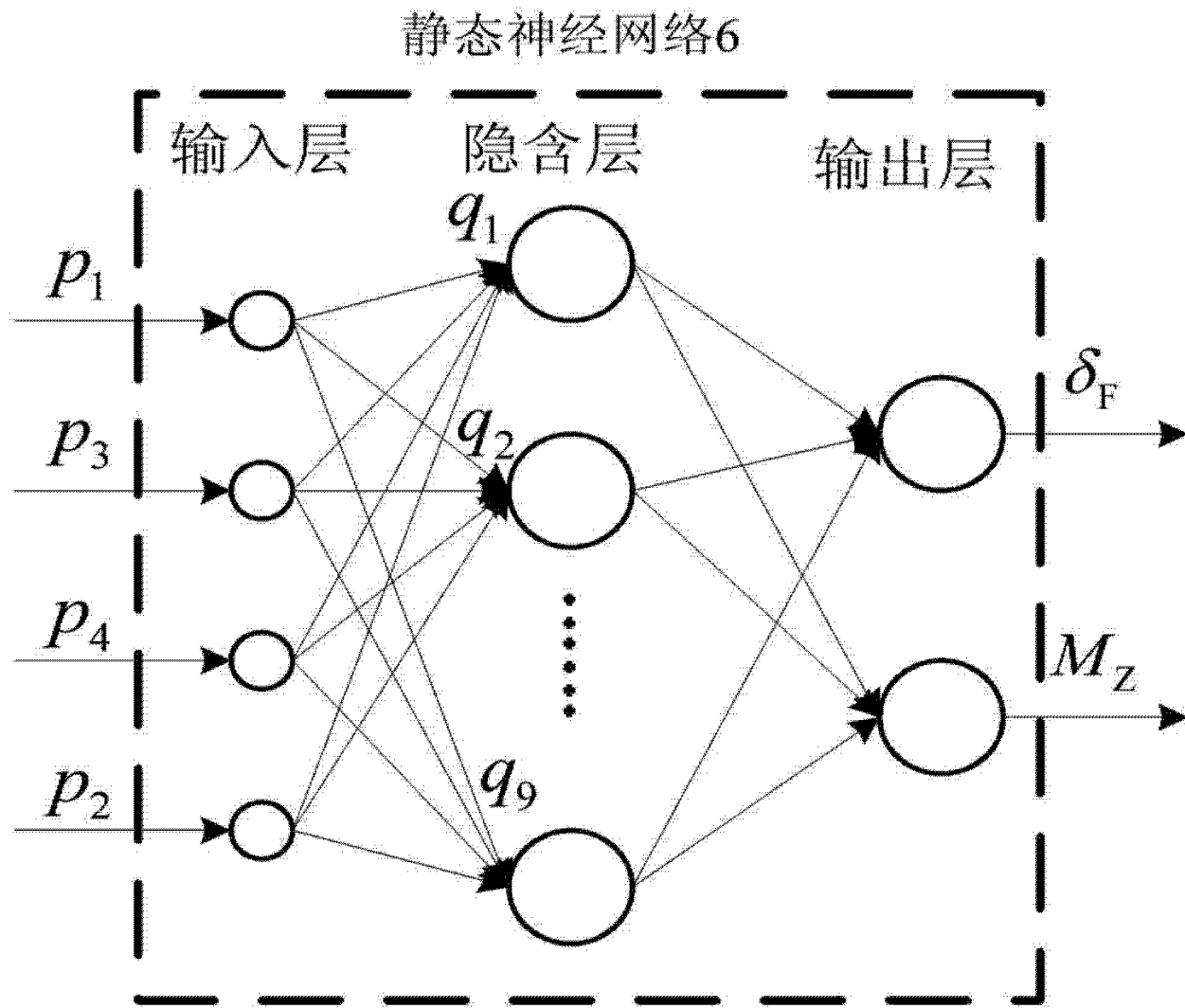


图 3

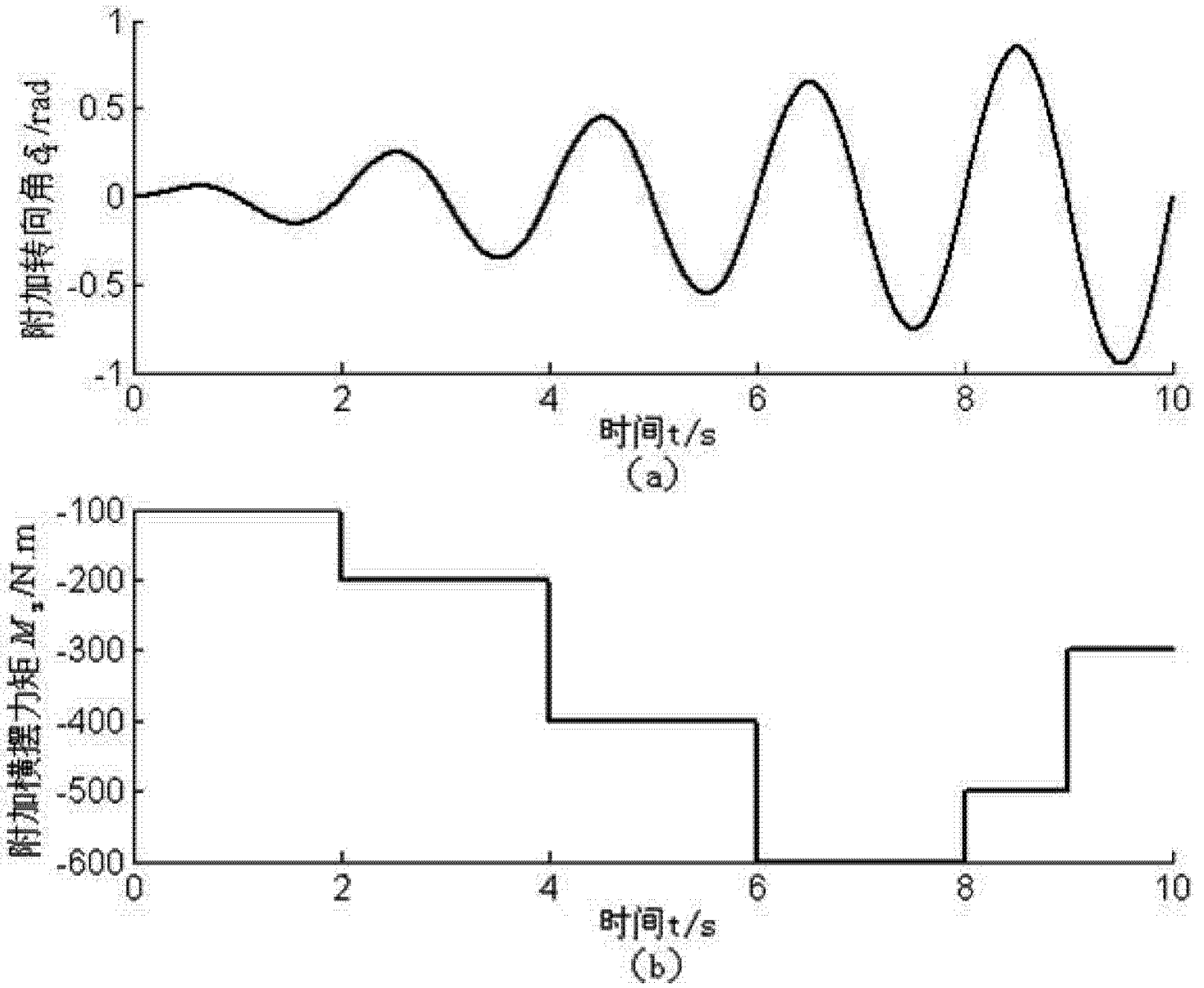


图 4

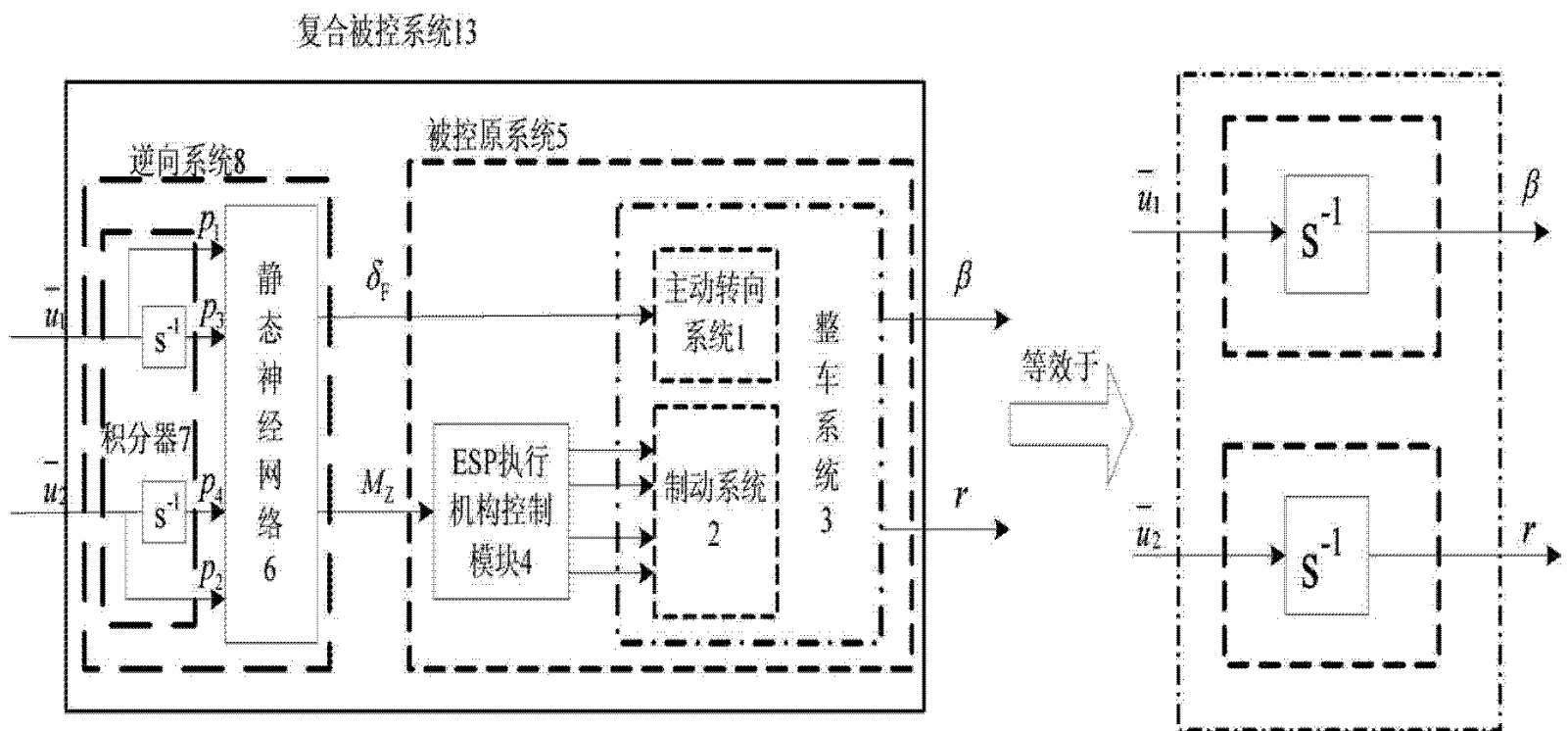


图 5

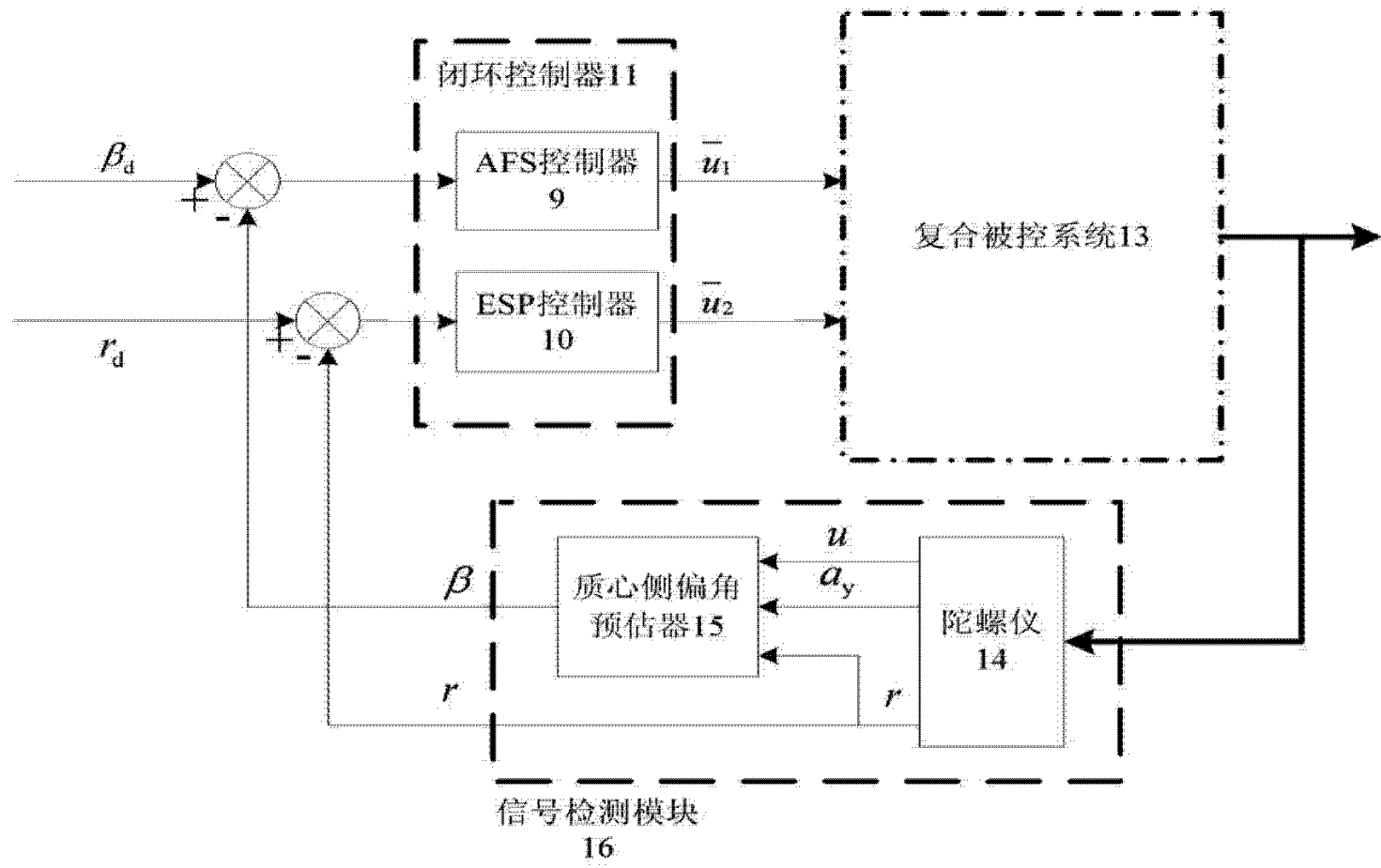


图 6

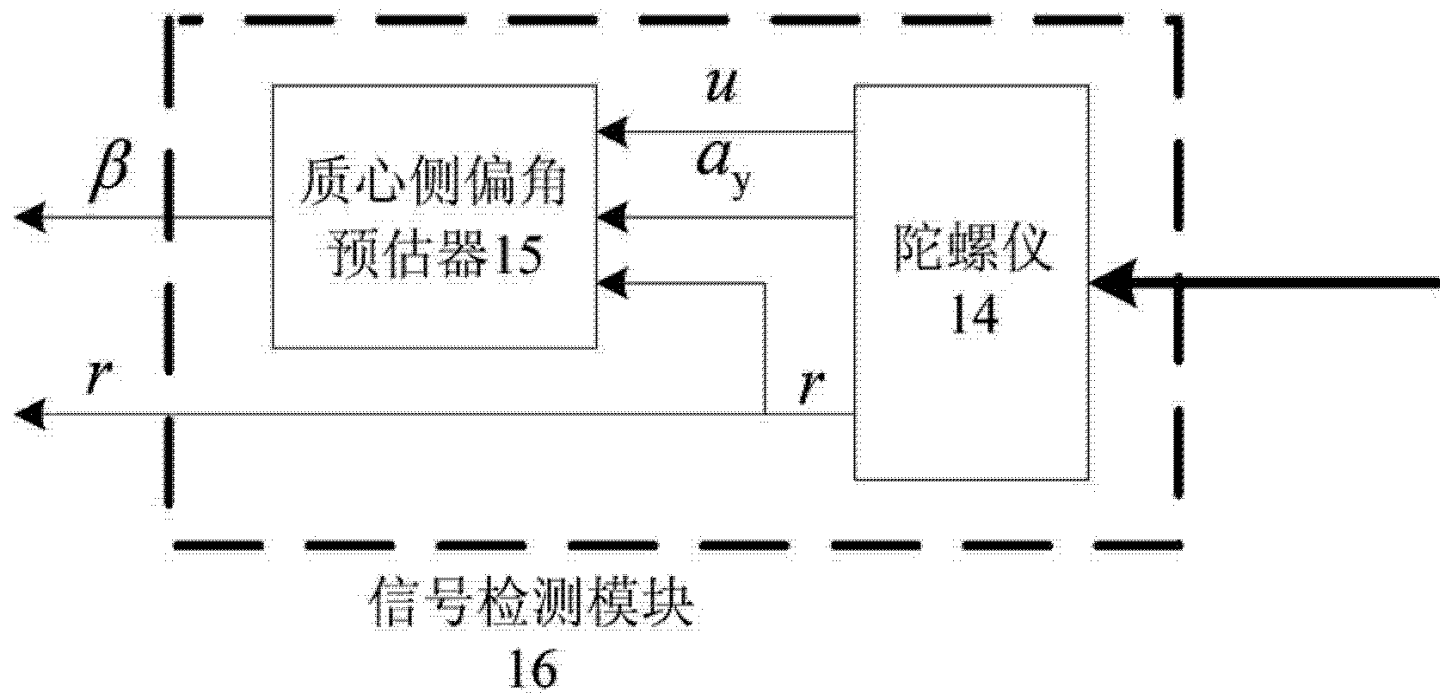


图 7

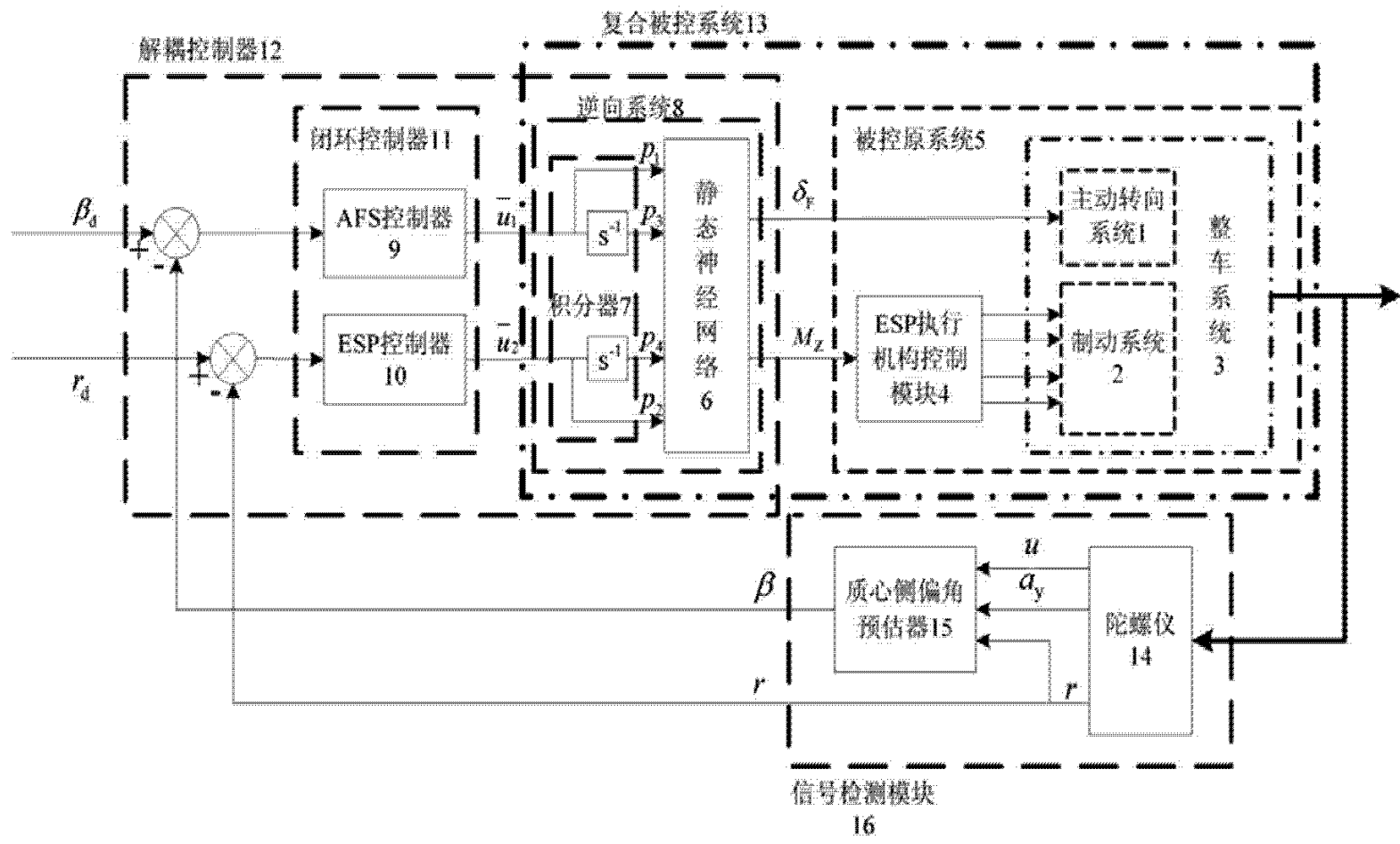


图 8