

# 高压巡检机器人下坡节能控速方法

杨智勇<sup>1</sup>, 吴功平<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 郭磊<sup>1</sup>, 杨守东<sup>3</sup>, 曹琪<sup>3</sup>, 张义杰<sup>1</sup>, 胡鹏<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072; 2. 广东科凯达智能机器人有限公司, 广东 佛山 528300; 3. 国家电网吉林省电力有限公司 白山供电公司, 吉林 白山 134300)

**摘要:**为了减少高压线路巡检机器人能量消耗并对下坡速度进行控制,提出了一种回馈制动与能耗制动相结合的无动力下坡控速方法。通过对下坡过程中机器人受力分析,设计了前轮回馈制动以及后轮能耗制动相结合的控速与能量回收方案。根据输电线路悬链线结构模型特征,提出了机器人无动力恒速下坡控制策略,依据对前后轮无动力恒速下坡特性分析,求解前轮直流电机能量回馈的转速范围,通过调节系统 PWM 波占空比实现对机器人后轮能耗控速。采用 RBF 神经网络控制方法对因传感器检测及线路工况等影响因素引起的控制系统 PWM 波占空比误差进行修正。通过在模拟高压线路和实际高压线路试验验证,结果表明该方法能够达到下坡控速和减少能耗的目的。

**关键词:**自动控制技术;巡检机器人;架空输电线路;能耗制动;回馈制动

**中图分类号:**TP242.6    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2017)02-0567-10

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb201702031

## Energy saving control method of downslope speed for high-voltage transmission line inspection robot

YANG Zhi-yong<sup>1</sup>, WU Gong-ping<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>1</sup>, YANG Shou-dong<sup>3</sup>, CAO Qi<sup>3</sup>, ZHANG Yi-jie<sup>1</sup>, HU Peng<sup>1</sup>

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangdong Keystar Intelligence Robot Co., Ltd., Foshan 528300, China; 3. Baishan Power Supply Bureau, State Grid Jilin Electric Power Co., Baishan 134300, China)

**Abstract:** In order to decrease the energy consumption of the inspection robot for high-voltage transmission lines and control the downslope speed, a speed control method without motive power is proposed. The proposed method combines the regenerative braking and dynamic braking. By analyzing the force of the robot in downslope process, speed control and energy recovery schemes are designed, which combine front wheel regenerative braking and rear wheel dynamic braking. According to the catenary construction feature of the lines, a strategy to control the robot at constant speed without motive power in the downslope process is presented. Based on characteristic analysis of the front and rear wheels when the robot is going downslope at constant speed without motive power, the range of speed of the direct current dynamo of front wheel for energy feedback is obtained. The speed control of the rear wheel energy consumption is realized by adjusting

收稿日期:2015-10-26.

基金项目:广东省智能机器人重大专项项目(2015B090922007);佛山市创新科研团队项目(2015IT100143);南方智谷引进团队项目(2015CXTD01).

作者简介:杨智勇(1987-),男,博士研究生.研究方向:电力作业机器人. E-mail:zhiyongyang@whu.edu.cn

通信作者:王伟(1978-),男,讲师,博士.研究方向:电力作业机器人. E-mail:whuww@whu.edu.cn

PWM wave duty cycle. The PWM wave duty cycle error of the control system, which is caused by the factors, such as sensor check and line working conditions, is corrected by adopting RBF neural network control model. Experiments are carried out on both simulated and real high-voltage transmission lines. Results show that the proposed method can achieve the purpose of downslope speed control and saving energy consumption.

**Key words:** automatic control technology; inspection robot; high-voltage transmission lines; energy braking; regenerative braking

## 0 引言

巡检机器人<sup>[1]</sup>可代替人工执行繁重巡线工作，并可巡检人工不易到达的跨越山区、江河湖泊以及原始森林的档段。能耗问题是影响巡检机器人巡检里程及续航能力的关键技术问题，目前主要通过“开源”和“节流”两种方式来减少机器人能耗，在“开源”方面主要利用载流线路电磁感应原理的取电方法<sup>[2,3]</sup>来补充电能，但此方法局限于沿导线巡检的机器人，并且装置重量较大，感应取得电量有限。在“节流”方面，主要通过优化机械结构及控制算法来实现，暂未发现有针对线路结构节能方法的研究。

大部分相邻两塔之间的高压输电线路为悬链线结构<sup>[4]</sup>，表现为先下坡，后上坡。将巡检机器人下坡巡检阶段切断蓄电池对行走电机及驱动器的供电，使机器人由重力驱动下坡的模式称为巡检机器人无动力下坡。巡检机器人无动力下坡能够节省下坡状态下电机及驱动器的电能消耗，但行走电机速度将不可控，当速度过高时，会造成电机损坏，并可能使机器人高速碰撞防震锤，造成机器人、线路及金具的损伤。因此，无动力下坡虽能利用线路结构特点减少能耗，但没有完善的控速方法，将会对机器人巡检造成重大的安全隐患。在汽车领域，制动能量回收是在保证车辆行驶稳定性的前提下，将电动汽车制动或减速的一部分机械能经再生系统转换为其他形式的能量，并经功率转化装置存储于储能单元中，同时产生一定的制动阻力使车辆减速制动<sup>[5]</sup>。目前在电动汽车技术研究中，再生制动已成为一种降低能耗、提高续驶里程的重要技术手段<sup>[6-8]</sup>，而在巡检机器人领域，相关研究甚少。

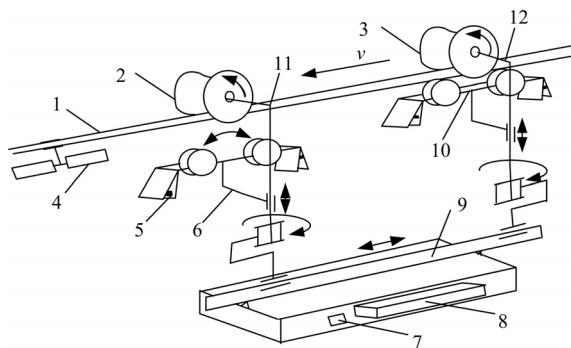
本文采用回馈制动与能耗制动相结合的方法控制巡检机器人无动力下坡速度。通过回馈制动将机器人无动力下坡产生的机械能转化为电能，储存于蓄电池内；结合脉宽调制控制方法<sup>[9]</sup>，定量

地控制能耗电阻的消耗，达到机器人速度实时控制的目的。基于线路模型提出下坡条件判断策略，针对传感器检测误差以及其他线路工况因素造成的误差，采用 RBF 神经网络<sup>[10]</sup>修正能耗制动 PWM 波占空比，实现了无动力下坡中实时、准确的速度控制。

## 1 巡检机器人线路工况及控速系统

### 1.1 巡检机器人及线路工况

高压巡检机器人采用轮臂复合的双臂对称悬挂移动机构，如图 1 所示。机器人依靠驱动前后两个行走轮在输电线上实现滚动行走，行走轮中各安装一套型号为 MAXON RE40 的有刷直流伺服电机。当机器人下坡时，可通过机器人控制系统将电路切换至无动力下坡模式。因直流电机的可逆原理，直流电机在被动运转时，两端产生感应电动势，在电机减速器允许的速度范围内，直流电机作为发电机产生电能并可为储能蓄电池充电，实现机器人无动力下坡过程中的能量回馈。



1-地线；2-前轮；3-后轮；4-防震锤；5-碰检传感器；6-前臂压紧机构；7-切换电路；8-储能蓄电池；9-机体；10-后臂压紧轮；11-前臂；12-后臂

图 1 机器人机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of robot

图 2 为巡检机器人运行线路工况示意图，档段间省略了悬垂线夹到防震锤之间较短的距离（一般为 1~3 m），防震锤之间线路多为无障碍路

段,其长度由数十米到数千米不等。机器人在档段内滚动行驶,当运行距离达到设定的档段距离时,机器人减速,以低速碰撞档段末端的防震锤,并结束该档段行走。由于绝大部分线路呈悬链线结构,巡检机器人在相邻两个杆塔之间的行驶轨迹基本为先下坡,后上坡。为保证可控性,目前研究中,机器人巡检时驱动器全程控制伺服电机运行。巡检机器人上坡与下坡交替的工况是实现无动力下坡前提条件。

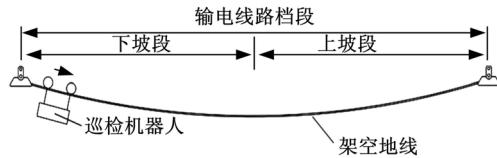


图 2 巡检机器人工况图

Fig. 2 Diagram of inspection robot working condition

此外,如果杆塔之间全部或者绝大部分处于下坡状态(部分杆塔全程下坡,对侧杆塔悬垂线夹倒挂),则机器人将以较高的速度碰撞另一侧杆塔防震锤,会对机器人机械结构和线路造成一定的损伤。因此,机器人在两杆塔间运行时,获取机器人所处位置以及是否处于下坡状态对机器人两行走轮工作模式的选择是非常有必要的。在无动力恒速下坡过程中,不考虑行走轮打滑的影响,可以通过编码器获得机器人速度信息,并通过积分求得机器人已行驶线长。据此,可根据杆塔信息建立数学模型并结合编码器信息得知机器人在线路中的位置  $x$  及坡度  $\theta_0$ 。

图 3 为架空地线模型图。A、B 分别为悬链线悬挂点,悬点 A 作为坐标原点,有斜抛物线方程为:

$$y = \frac{h}{l}x - \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos \beta} \quad (1)$$

式中:  $l$  为水平档距, m;  $h$  为两悬点的高度差, m, B 点高于 A 为正;  $\beta$  为过两悬点的直线与水平线的

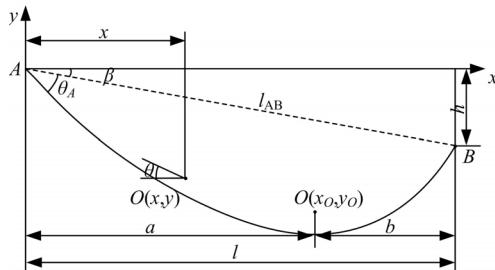


图 3 架空地线的模型图

Fig. 3 Model of overhead ground wire

夹角, B 点低于 A 为正;  $\gamma$  为线路比载,  $N/(m \cdot mm^2)$ ;  $\sigma_0$  为水平应力或最低点的应力,  $N/mm^2$ 。

由图 3 可知悬点 A( $x_A, y_A$ ) 的坐标为(0,0), 悬点 B( $x_B, y_B$ ) 的坐标为( $l, h$ )。对于地线上任意一点 C( $x, y$ ), 其斜率  $y'$  为:

$$y' = \tan \theta_0 = \frac{h}{l} - \frac{\gamma l - 2\gamma x}{2\sigma_0 \cos \beta} = \frac{h}{l} - \frac{\gamma l}{2\sigma_0 \cos \beta} + \frac{\gamma x}{\sigma_0 \cos \beta} \quad (2)$$

式中:  $\theta_0$  为地线上任意一点的坡度。

其距 A 点线长 L 可由弧长微分公式积分求得:

$$L = \int_0^x \sqrt{1 + \left[ \frac{dy}{dx} \right]^2} dx = \frac{1}{\cos \beta_0} \int_0^x \sqrt{1 + \left[ \left( \frac{\gamma(l-2x)}{2\sigma_0} \right)^2 - \frac{\gamma(l-2x)}{\sigma_0} \sin \beta \right]} dx \quad (3)$$

对式(3)进行简化求解, 可得:

$$L = -\frac{\gamma^2 \cos \beta}{6\sigma_0^2} x^3 + \left( \frac{1}{2\sigma_0 \cos \beta} - \frac{\gamma^2 l \cos \beta}{4\sigma_0^2} \right) x^2 + \left( \frac{1}{\cos \beta} - \frac{\gamma l \sin \beta}{2\sigma_0 \cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^2 \cos \beta}{8\sigma_0^2} \right) x \quad (4)$$

式(4)中, L 可由编码器速度积分得出, 采用截距法可求解  $x$  的值, 根选取原则为小于 L 的正根, 定为机器人所在位置的横坐标。

线路最低点 O( $x_0, y_0$ ) 的斜率  $y'$  为 0, 通过式(2)求得:

$$x_0 = \frac{l}{2} - \frac{h\sigma_0 \cos \beta}{l\gamma} \quad (5)$$

点 O( $x_0, y_0$ ) 为巡检机器人无动力下坡能够获得加速度的最低值, 为避免在  $x_0$  处由于运动惯性发生来回震荡, 需在  $x_0$  之前一段距离开始减速。同时避免在全程下坡时高速碰撞防震锤。在开始无动力下坡之前需对机器人所处位置  $x$  及线路坡度  $\theta_0$  进行检测, 当  $x < x_0$  或  $\theta_0 < 0$  时, 机器人系统切换至无动力下坡控速模式。

## 1.2 无动力下坡前后轮控速方案与力学模型

### 1.2.1 前后轮无动力制动控制方案

架空地线为柔性悬链线结构, 为便于分析, 将机器人所处的地线段假设为有一定坡度  $\theta$  的刚性斜坡, 坡度  $\theta$  随位置改变而变化。图 4 为机器人无动力下坡时的受力分析图, O 点为机器人重心。机器人沿地线切线方向无动力下坡的微分方程为:

$$F_{x1} + F_{x2} = G \sin \theta - \frac{\rho C_D A}{2} v^2 - m \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

式中:  $F_{X1}$  和  $F_{X2}$  分别为地线对机器人前后轮沿地线切向方向作用力,  $N$ ;  $G$  为机器人重力,  $N$ ;  $m$  为机器人质量,  $kg$ ;  $F_w$  为机器人下坡所受到的空气阻力 ( $F_w = \rho C_D A v^2 / 2$ ,  $C_D$  为空气阻力系数,  $A$  为机器人端面迎风面积,  $\rho$  为空气密度),  $N$ 。

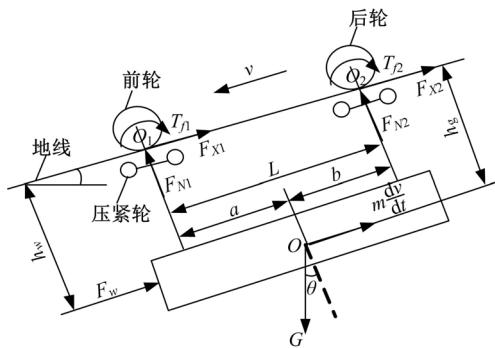


图 4 机器人无动力下坡的受力图

Fig. 4 Force analysis of unpowered downhill of inspection robot

机器人在巡检运行过程中, 机器人前后臂压紧轮处于护线状态, 即压紧轮与地线之间无相互作用力, 且防止行走轮在运行过程中脱离地线。机器人沿垂直于地线切线方向受力为:

$$F_{N1} + F_{N2} = G \cos \theta \quad (7)$$

令机器人前后轮受到滚动阻力矩分别为  $T_{f1}$  和  $T_{f2}$ , 则有:

$$T_{f1} + T_{f2} = (F_{N1} + F_{N2}) f = G f \cos \theta \quad (8)$$

式中:  $f$  为滚动摩阻系数。

将作用在机器人上诸力分别对前后轮与地线接触面中心  $o_1$  和  $o_2$  取力矩, 则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{N1} L + T_{f1} + T_{f2} + G h_g \sin \theta - G b \cos \theta - \\ F_w h_w - m \frac{dv}{dt} h_g = 0 \\ F_{N2} L - T_{f1} - T_{f2} - G h_g \sin \theta - G a \cos \theta + \\ F_w h_w + m \frac{dv}{dt} h_g = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

变换式(9)可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{N1} = \\ \frac{G \cos \theta (b - f r) - G h_g \sin \theta + m \frac{dv}{dt} h_g + F_w h_w}{L} \\ F_{N2} = \\ \frac{G \cos \theta (a + f r) + G h_g \sin \theta - m \frac{dv}{dt} h_g - F_w h_w}{L} \end{array} \right. \quad (10)$$

式(9)和(10)中:  $a$  和  $b$  分别为机器人重力  $G$  作用在  $o_1$  和  $o_2$  的力臂,  $m$ ;  $L$  为机器人两臂之间的距离,  $m$ ;  $h_g$  为机器人重心  $o$  与地线之间的距离,  $m$ ;  $h_w$  为空气阻力  $F_w$  与地线之间的距离,  $m$ ;  $r$  为机器人前后轮半径,  $m$ 。

当机器人无动力恒速下坡时,  $\frac{dv}{dt} = 0$ , 由式(6)和式(10)可知:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{X1} + F_{X2} = G \sin \theta - \frac{\rho C_D A}{2} v^2 \\ F_{N1} = \frac{G \cos \theta (b - f r) - G h_g \sin \theta + F_w h_w}{L} \\ F_{N2} = \frac{G \cos \theta (a + f r) + G h_g \sin \theta - F_w h_w}{L} \end{array} \right. \quad (11)$$

根据实验经验, 机器人无动力下坡过程中, 因电机、减速器所允许最大转速, 以及行走轮尺寸限制, 下坡速度控制在 3.2 km/h 以内, 因此空气阻力  $F_w$  和滚动阻力矩可忽略不计, 且由于机械设计和装配的要求, 重力  $G$  作用在  $O_1$  和  $O_2$  的力臂  $a$  和  $b$  近似相等, 且有  $a + b = L$ , 则式(11)可简化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{X1} + F_{X2} = G \sin \theta \\ F_{N1} = \frac{G \cos \theta - G h_g \sin \theta}{2} \\ F_{N2} = \frac{G \cos \theta + G h_g \sin \theta}{2} \end{array} \right. \quad (12)$$

由式(12)可知, 机器人无动力恒速下坡过程中, 地线对机器人后轮沿垂直于地线切线方向的作用力  $F_{N2}$  大于对前轮作用力  $F_{N1}$ ; 机器人前后轮与地线附着系数相同, 因此地线对后轮沿地线切线方向的最大作用力  $F_{X2\max}$  大于对前轮的最大作用力  $F_{X1\max}$ 。直流电机能耗制动模式能在任意速度下进行控制, 而回馈制动模式需在一定速度范围内工作。为保证无动力下坡过程中机器人安全, 机器人速度必须可控。因此, 在无动力下坡过程中, 机器人后轮采用能耗制动, 对机器人速度进行控制, 前轮采用回馈制动进行能量回收。

### 1.2.2 前后轮制动力矩模型

机器人通过前轮回馈制动和后轮能耗制动实现恒速无动力下坡, 图 5 为无动力下坡过程中机器人前后轮的受力分析。图 5(a)为机器人前轮受力分析,  $F_{P1}$  和  $F_{V1}$  分别为机器人前臂对前轮沿地线切线方向和垂直于地线方向作用力,  $N$ ;  $G_{wl}$  为前轮所受到的重力,  $N$ ; 前轮质量为  $m_1$ ,  $kg$ ;

$\omega_1$  为前轮角速度, rad/s;  $T_1$  为前轮能耗制动产生的制动转矩, N·m。图 5(b)为机器人后轮受力分析, 各参数含义与图 5(a)相同。

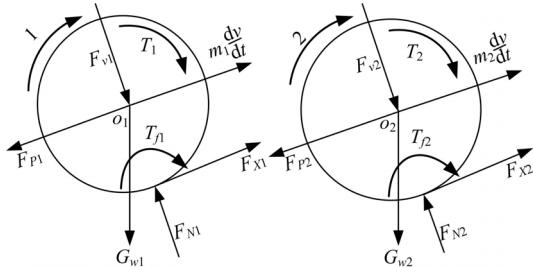


图 5 机器人前后轮受力分析

Fig. 5 Force analysis of two walking wheels

机器人前后轮对轮心  $o'_1, o'_2$  的转矩为:

$$\begin{cases} F_{x1}r - T_1 - T_{f1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ F_{x2}r - T_2 - T_{f2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $J_1$  和  $J_2$  分别为机器人前后轮的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 当机器人以恒速  $v$  无动力下坡, 不考虑机器人前后轮打滑的影响, 有  $\omega_1 = \omega_2 = \frac{n\pi}{30i} = \frac{v}{r}$  ( $i$  为前后轮直流电机减速器减速比,  $n$  为前后轮直流电机转速,  $\text{r}/\text{min}$ ),  $\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{d\omega_2}{dt} = 0$ , 由式(8)和式(13)可知机器人无动力恒速下坡前后轮产生的制动转矩总和为:

$$T_1 + T_2 = \left( \frac{G\tan\theta}{\sqrt{1+\tan^2\theta}} - \frac{Gf}{\sqrt{1+\tan^2\theta}} - \frac{\rho C_D A}{2} v^2 \right) r \quad (14)$$

由式(14)可知, 机器人前后轮在无动力恒速下坡过程中提供的制动力矩之和与机器人所处位置处线路坡度  $\theta$  及下坡速度  $v$  有关。

### 1.3 直流电机能耗控速与回馈储能下坡控速系统

图 6 为机器人能耗控速与回馈储能系统结构, 系统由驱动部分、能耗控速部分、能量回馈部分三部分组成。驱动部分按照能量传输方向依次由蓄电池、驱动器、切换电路、直流电机组成, 用于需要驱动器控制电机的场合; 能耗控速部分按照能量传输方向依次由后轮直流电机、脉宽调制器、能耗电阻组成, 实现机器人无动力下坡速度控制; 能量回馈部分按照能量传输方向依次由前轮直流电机、反向二级管、电流传感器、蓄电池, 实现机器

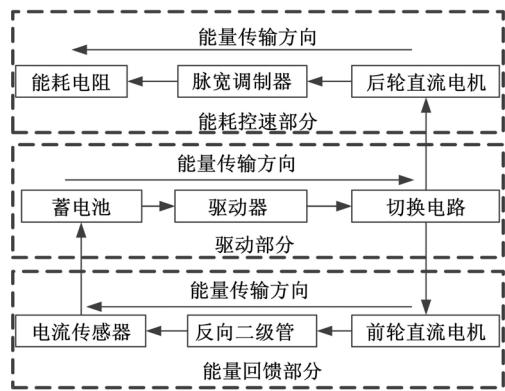


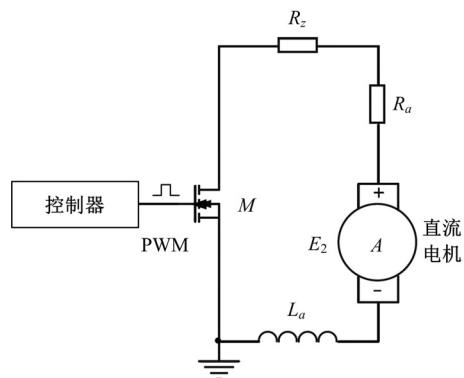
图 6 机器人能耗控速与回馈储能系统结构

Fig. 6 Structure of energy-consumed speed control and energy recovery system

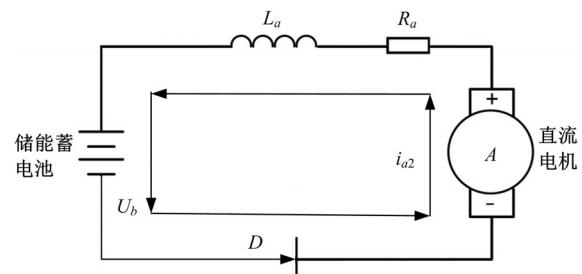
人无动力下坡的能量回馈。

图 7 为机器人前后轮直流电机无动力下坡控制原理图, 图 7(a)为后轮能耗控速电路原理图, 其中  $E_2$  为后轮直流电机下坡运行过程中产生的感应电动势,  $R_z$  与  $R_a$  分别为能耗电阻及电机电枢绕组内阻,  $L_a$  为电枢电感。通过调整控制器的 PWM 波占空比, 控制绝缘栅双极晶体管 M 的开合程度, 达到对机器人后轮转速控制的目的。

图 7(b)为机器人前轮回馈制动电路原理图,



(a) 后轮能耗控速电路原理图



(b) 前轮回馈储能电路原理图

图 7 机器人前后轮直流电机无动力下坡控制原理

Fig. 7 Control principle of two DC motors during unpowered downhill of inspection robot

其中  $E_1$  为前轮直流电机下坡运行过程中产生的感应电动势,  $U_b$  为蓄电池的端电压,  $i_{al}$  为直流电机给蓄电池的充电电流,  $D$  为反向二极管, 忽略反向二极管的压降, 前轮回馈储能制动存在如下关系:

$$E_1 + R_a i_{al} + L_a \frac{di_{al}}{dt} = U_b \quad (15)$$

机器人无动力恒速下坡时, 有  $\frac{di_{al}}{dt} = 0$ , 即:

$$i_{al} = \frac{U_b - E_1}{R_a} \quad (16)$$

当  $E_1 > U_b$  时,  $i_{al} < 0$ , 机器人无动力下坡前轮给蓄电池充电; 当  $E_1 < U_b$  时,  $i_{al} > 0$ , 反向二极管阻碍直流电机加速下坡。

## 2 基于线路模型的无动力恒速下坡控制策略

### 2.1 机器人下坡速度范围分析

根据直流电机电枢电动势与转速关系有  $E_1 = k_e n$  ( $k_e$  为电动势常数), 结合式(16)可得:

$$i_{al} = \frac{U_b - k_e n}{R_a} \quad (17)$$

(1) 当机器人前轮采用回馈制动给储能蓄电池充电时,  $i_{al} < 0$ , 根据式(17), 有:

$$n > \frac{U_b}{k_e} \quad (18)$$

(2) 充电过程中, 为避免充电电压过高对蓄电池造成损坏, 直流电机电枢电压应不高于蓄电池所容许的最高电压  $U_{max}$ , 即  $E_1 \leq U_{max}$ , 因此, 机器人前轮所允许的最高转速  $n_{max1} = U_{max}/k_e$ 。

(3) 前轮直流电机电枢绕组电流应不超过额定电流  $I_{Al}$ , 取蓄电池充电电流为  $I_{Al}$  时, 前轮直流电机的转速为  $n_{max2}$ 。

(4) 机器人运行过程中, 前后轮直流电机转速应不超过电机额定转速  $n_e$ 。

根据以上分析, 机器人无动力恒速下坡过程中, 电机最大转速  $n_{max} = \min(n_{max1}, n_{max2}, n_e)$ 。机器人前轮通过回馈制动对储能蓄电池进行充电, 行走轮转速应控制在  $\frac{U_b}{k_e} < n \leq n_{max}$  的范围内。

### 2.2 机器人无动力恒速下坡控制策略

机器人前轮回馈制动力矩  $T_1$  与前轮电机电磁力矩  $T_{ml}$  存在如下关系:

$$T_1 = i_{\eta_T} \eta_m T_{ml} \quad (19)$$

式中:  $\eta_T$  为电机减速器传动效率;  $\eta_m$  为电机工作

效率。通过电流传感器检测前轮给蓄电池的充电电流  $i_{al}$ , 由电机拖动原理可知  $T_{ml} = k_t i_{al}$  ( $k_t$  为转矩常数), 代入式(19)可得:

$$T_1 = i_{\eta_T} \eta_m k_t i_{al} \quad (20)$$

由式(14)和式(20)可知, 为保证机器人无动力恒速下坡, 机器人后轮能耗制动提供的制动力矩  $T_2$  为:

$$T_2 = (\frac{G \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} - \frac{G f}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} - \frac{\rho C_D A}{2} v^2) r - i_{\eta_T} \eta_m k_t i_{al} \quad (21)$$

机器人后轮采用能耗制动产生制动力矩控制下坡速度。当机器人后轮切换到能耗制动模式, 后轮在惯性作用下仍在旋转, 后轮直流电机电枢电流改变方向, 产生制动力矩阻碍机器人下坡加速运动。由图 6(a)可知后轮直流电机的电磁力矩  $T_{m2}$  为:

$$T_{m2} = k_t i_{al} = k_t \frac{u E_2}{R_a + R_z} = \frac{u k_t k_e n}{R_a + R_z} \quad (22)$$

式中:  $E_2$  为后轮电机产生的感应电动势;  $u$  为 PWM 波占空比。传递到后轮上的制动力矩为  $T_2$ ,  $T_2 = T_{m2} i_{\eta_T} \eta_m$ , 将式(22)代入可得:

$$T_2 = \frac{u i_{\eta_T} \eta_m k_t k_e n}{R_a + R_z} \quad (23)$$

由式(21)和式(23)可得, 机器人无动力恒速下坡时, 后轮能耗制动电路 PWM 波的占空比  $u_0$  为:

$$u_0 = \frac{(R_a + R_z)r}{i_{\eta_T} \eta_m k_t k_e n} \left( \frac{G \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} - \frac{G f}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} - \frac{\rho C_D A}{2} v^2 \right) - \frac{i_{al}}{k_e n} \quad (24)$$

通过控制 PWM 波的占空比  $u$  来调整机器人后轮能耗制动所需的制动转矩  $T'_2$ : ① 当  $u > u_0$  时, 有  $T'_2 > T_2$ , 后轮作减速运动, 从而降低机器人的无动力下坡速度; ② 当  $u < u_0$  时, 有  $T'_2 < T_2$ , 后轮作加速运动, 从而提高机器人无动力下坡速度。

由式(24)可知, 当已知地线坡度  $\theta$ , 前轮回馈制动充电电流  $i_{al}$ , 以及机器人无动力下坡电机转速  $n$ , 求解出机器人恒速下坡时后轮直流电机能耗制动电路 PWM 波占空比  $u_0$ 。通过调整占空比  $u$ , 控制机器人无动力下坡电机转速  $n$ , 进而控制蓄电池充电电流  $i_{al}$ 。

在下坡过程中, 机器人首先根据杆塔信息计算出所在线路中的位置  $x$  及坡度  $\theta_o$ , 当机器人处于下坡阶段 ( $\theta_o < 0$ )、且未到达档段间线路最低

点( $x < x_0$ )、同时所处位置线路坡度低于无动力下坡所能控制的最大坡度( $\theta_{\max}$ )时,机器人切换至无动力下坡控速模式,在无动力下坡控速阶段,需根据两行走轮的制动能力选择是否执行无动力下坡控速模式。当 $0 \leq u \leq u_{\max}$ 时( $u_{\max}$ 为后轮能耗制动系统PWM的极限最大占空比,即后轮能耗制动的最大制动能力),机器人运行无动力下坡控速模式,并通过调节能耗制动系统占空比 $u$ 将机器人速度调至指定值;当 $u < 0$ 或 $u > u_{\max}$ 时,机器人所处的线路坡度 $\theta$ 超过了机器人两行走轮的制动能力,机器人系统应切换至电机伺服驱动模式。图8为机器人无动力下坡条件控制策略流程图。

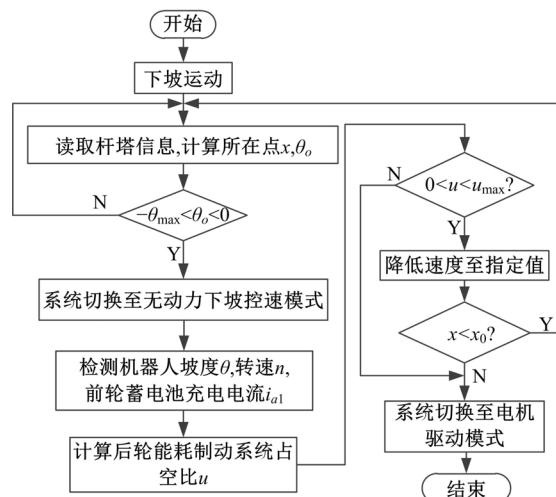


图8 无动力下坡条件控制算法

Fig. 8 Condition judgment algorithm of unpowered downhill

### 3 基于RBF神经网络的无动力下坡控速方法

由于地线为柔性的悬链线模型,机器人在无动力下坡过程中,一方面机器人通过传感器检测到前后轮转速 $n$ ,倾角 $\theta$ ,及前轮给蓄电池的充电电流 $i_{al}$ 均是动态变化的,且有一定误差;其次,下坡过程中的空气阻力较难确定;再者,线路长期暴露在野外,日晒雨淋,线路会产生锈蚀,从而使得摩擦系数发生变化,这些因素都会对后轮能耗控制电路的占空比 $u$ 造成影响。因此,需要对建立的占空比控制模型进行修正,修正后的占空比 $u'$ 控制模型如下:

$$u' = a_k u \quad (25)$$

其中 $a_k$ 是修正系数,用来补偿机器人因上述各种因素造成的误差。由于机器人通过传感器检测的

前后轮转速 $n$ 、坡度 $\theta$ 及前轮给蓄电池的充电电流 $i_{al}$ 与修正系数 $a_k$ 之间存在非线性映射关系,所以采用具有强大非线性映射能力的神经网络建立非线性映射关系。考虑到RBF神经网络具有简单的线性参数化结构和良好的逼近能力<sup>[11]</sup>,因此本文采用RBF神经网络方法建立非线性映射关系,图9为输入与输出的映射关系。

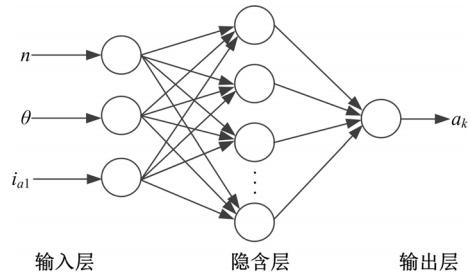


图9 输入与输出的映射关系

Fig. 9 Mapping relationship between input and output

径向基神经网络由输入层、隐含层和输出层组成。对于多输入单输出RBF神经网络,其输出可描述为<sup>[12]</sup>

$$a_k = \sum_{k=1}^K w_k \theta_k(\mathbf{x}) \quad (26)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T$ 是输入量, $w_k$ 是隐含层第 $k$ 个神经元与输出层神经元的连接权值, $k$ 是神经网络隐含层神经元数, $\theta_k$ 是隐含层第 $k$ 个神经元的输出,即:

$$\theta_k(\mathbf{x}) = \exp^{-\frac{|x - \mu_k|}{\sigma_k^2}} \quad (27)$$

式中: $\mu_k$ 和 $\sigma_k$ 分别为隐含层神经元 $k$ 的中心和方差。通过利用隐含层神经元的输出信息强度以及神经元间交互信息强度对神经网络隐含层神经元进行调节,从而修改神经网络的拓扑结构,以达到对输出值的调节。

### 4 试验研究

#### 4.1 模拟输电线路

依据实际线路坡度范围,在模拟杆塔上搭建坡度可在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 内调整的线路,用于验证下坡速度控制算法有效性,图10为模拟试验场景。取地线坡度为 $30^\circ$ ,设置机器人无动力下坡后轮目标转速为 $6000 \text{ r/min}$ (直流电机额定转速为 $6370 \text{ r/min}$ ),当转速达到设定值后,机器人前后轮分别切换到回馈制动和能耗制动模式,图11为后轮转速关系曲线,由图11可知,机器人无动力下坡后轮转速达到 $6000 \text{ r/min}$ 需耗时 $1.2 \text{ s}$ ,且在 $6000 \text{ r/min}$ 恒速运行过程中,采用RBF神经网络修正



图 10 模拟试验场景

Fig. 10 Simulated test environmental

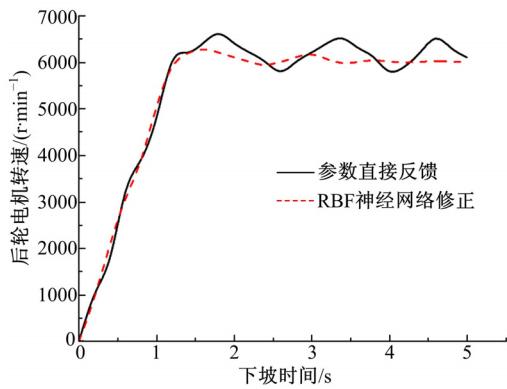


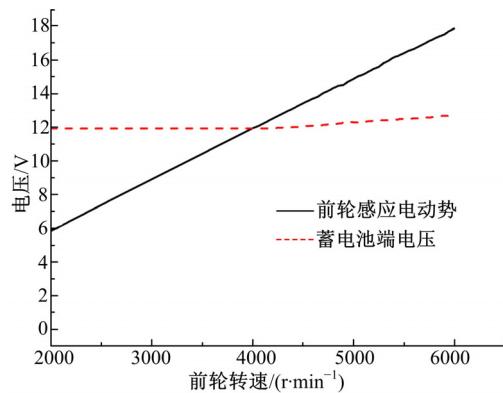
图 11 时间-转速关系曲线

Fig. 11 Curve of time-speed

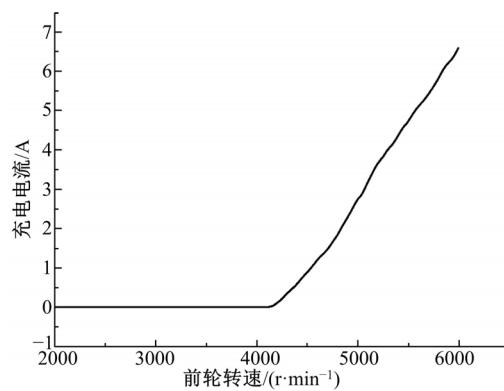
占空比比直接通过传感器参数反馈控制具有快速收敛,稳态性能好,速度控制更准确等优点。

图 12 为机器人前轮回馈制动与转速关系,如图 12(a)所示。前轮直流电机感应电动势  $E_1$  随转速正比增长,当机器人前轮转速达到 4000 r/min 以上时,前轮直流电机感应电动势高于蓄电池电压,能够给蓄电池充电。虚线为前轮切换到回馈制动模式蓄电池端电压与前轮转速变化曲线,可知蓄电池端电压随前轮转速增加缓慢增大。如图 12(b)所示,考虑到反向二极管电压压降,当前轮转速超过 4150 r/min 时,前轮直流电机开始回馈制动,并给蓄电池充电,蓄电池充电电流  $i_{a1}$  随转速增大正比增加。当前轮直流电机转速达到 5800 r/min 时,蓄电池充电电流为 5.77 A,而根据电机手册参数,所选直流电机额定电流为 5.77 A。因此,针对蓄电池不同状态,机器人无动力下坡时,应将机器人转速控制在蓄电池充电电流不大于电机额定电流的范围内。

机器人在不同转速恒速下坡时,后轮能耗制动控制电路 PWM 波占空比  $u$  与坡度关系曲线如图 13 所示,从图中可看出,以不同转速恒速下坡,



(a) 前轮感应电动势及蓄电池端电压与转速关系曲线



(b) 蓄电池充电电流与转速关系曲线

图 12 前轮回馈制动与转速关系

Fig. 12 Curve of voltage-speed and current-speed

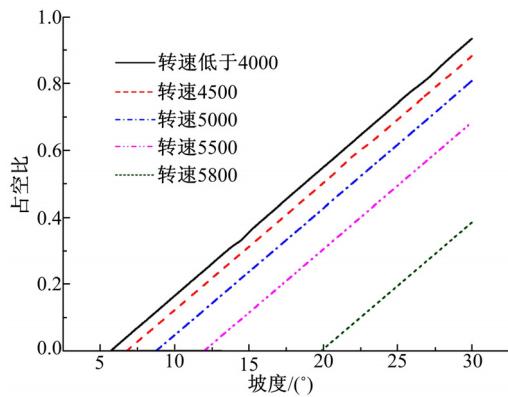


图 13 能耗制动占空比与坡度关系

Fig. 13 Relationship between PWM's duty cycle and wire's gradient

PWM 波占空比  $u$  随地线坡度增大近似线性增大。当机器人下坡转速低于 4000 r/min 时,机器人无动力下坡控速主要依靠后轮的能耗制动实现,且当地线坡度为 30° 时,能耗控制电路 PWM 波占空比达到 0.934,接近能耗制动电路控制极限。因此,对于地线坡度高于 30°,且需将机器人下坡速度控制 4000 r/min 以内时,应采用驱动器

控制机器人下坡的方式;当下坡转速高于 4000 r/min 时,机器人前轮回馈制动能够减轻后轮能耗制动负担,且转速越大,回馈制动产生的制动力矩越大,相应的能耗制动需提供制动力矩减少。

#### 4.2 现场试验运行

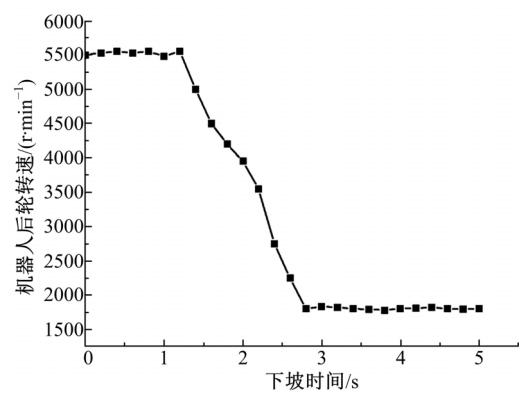
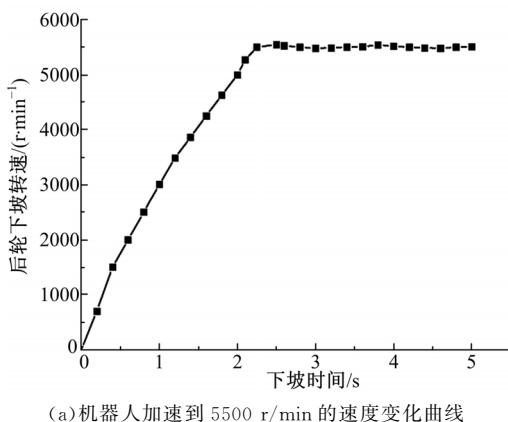
在吉林白山跨林区松长甲线 #114-#119 杆塔间进行试验,其中, #114-#115 杆塔高度差 36.7 m, 档距 240 m, 档段全程下坡,将此作为下坡控速试验档段,图 14 为机器人现场试验图。为避免流经前轮直流电机充电电流长时间超过电机额定电流,设定机器人最大行走电机转速为 5500 r/min, 图 15 为机器人无动力下坡速度变化曲线,图 15(a)为机器人加速到 5500 r/min 的速度变化曲线,由图可知,机器人从 #114 杆塔无动力下坡,当速度达到 5500 r/min 后,通过切换电路将前后轮分别切换到回馈制动和能耗制动模式,将机器人无动力下坡转速稳定在 5500 r/min 附近。

根据 #114-#115 档段间线路障碍物信息,机器人自主进行速度切换,图 15(b)为机器人碰检防震锤之前速度变化曲线,由图可知,机器人最终碰检对侧防震锤时电机转速为 1800 r/min,满足机器人安全碰检速度要求,从而验证该了无动力下坡控速方法的可行性。



图 14 现场无动力下坡试验图

Fig. 14 Unpowered downhill experiment on spot



(b) 机器人碰检防震锤之前速度变化曲线

图 15 机器人无动力下坡速度变化曲线

Fig. 15 Curve of velocity during unpower downhill of inspection robot

机器人在档段间运行时,需根据两杆塔间水平档距  $l$ 、两悬点高差  $h$  以及机器人行驶方向来规划机器人执行无动力下坡控速还是伺服驱动模式。当机器人处于下坡状态时,执行无动力下坡控速模式;当机器人处于爬坡状态时,执行伺服驱动模式。图 16 为巡检机器人在 #114-#119 杆塔间采用无动力下坡控速能耗对比图,其中,  $W_Q$  为档段间全程电机伺服驱动机器人能耗,  $W_P$  为机器人档段间采用无动力控速策略能耗。

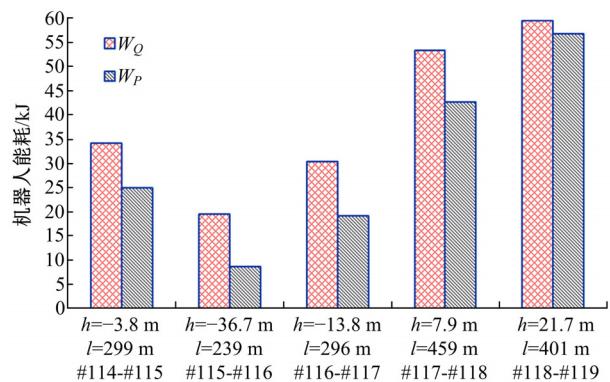


图 16 #114-#119 杆塔间能耗对比图

Fig. 16 Energy consumption contrast among #114-#119

从图 16 中可知,采用无动力下坡控速方法可以有效减少机器人巡检运行的能量消耗。当档段高度差为负,高度差的绝对值越大,节能效果越明显,如 #114-#115、#116-#117, #115-#116 三个档段的能耗对比,其中, #115-#116 档段间节省能耗达到了 55.64%。而当档段高度差为正,也能达到节省能耗的效果,但节能效果并不十分显著,如 #118-#119 档段间节省能耗为 4.61%,

这是因为机器人爬坡的里程变长,需要采用伺服驱动方式运行。

## 5 结 论

(1)通过机器人受力分析,采用前轮直流电机回馈制动与后轮直流电机能耗制动相结合的下坡控速方案。

(2)根据高压输电线路的悬链线模型,制定了机器人下坡速度变换策略。

(3)通过调节机器人后轮能耗控速控制电路 PWM 波占空比实现机器人下坡速度控制,并利用前轮直流电机回馈制动实现了无动力下坡过程中能量回收。

(4)针对传感器检测及线路工况影响因素引起的误差,通过 RBF 神经网络进行修正,实现了机器人平稳下坡。

(5)通过在模拟输电线路和实际输电线路试验运行,证明了该无动力下坡控制方法能够达到下坡控速和节省能耗的目的。

## 参考文献:

- [1] Pouliot N, Montambault S. Field - oriented developments for LineScout technology and its deployment on large water crossing transmission lines[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(1): 25-46.
- [2] Peng W, Feng L, Guanqun W, et al. Research on self-power supply system of inspection robot for high-voltage power transmission lines [C] // 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, IEEE, 2010: 244-247.
- [3] 白玉成, 吴功平, 肖华, 等. 输电线路感应取电装置参数匹配方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21):75-80.  
Bai Yu-cheng, Wu Gong-ping, Xiao Hua, et al. A parameter matching method for power induction devices on power transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21):75-80.
- [4] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京:中国电力出版社, 2007:62-67.
- [5] 边耀璋. 汽车新能源技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [6] 黄斐梨, 王耀明, 姜新建, 等. 电动汽车永磁无刷直流电机驱动系统低速能量回馈制动的研究[J]. 电工技术学报, 1995, 9(3):28-31.  
Huang Fei-li, Wang Yao-ming, Jiang Xin-jian, et al. Study on regenerative braking of permanent magnet brushless DC motor drive system at low speed for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1995, 9(3):28-31.
- [7] 王昕, 姜继海. 轮边驱动液压混合动力车辆再生制动控制策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(6):1544-1549.  
Wang Xin, Jiang Ji-hai. Regenerative braking control strategy for wheel drive hydraulic hybrid vehicle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(6): 1544-1549.
- [8] 何仁, 陈庆樟. 用双开关磁阻电机的汽车能量再生制动技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(5):1137-1141.  
He Ren, Chen Qing-zhang. The control strategy of energy regeneration for electric vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5):1137-1141.
- [9] 林海, 何瑞玲, 周海森, 等. 三相无刷直流电机改进型脉宽调制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6):79-83.  
Lin Hai, He Rui-ling, Zhou Hai-sen, et al. Improved PWM scheme for permanent magnet brushless DC motor drives[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6):79-83.
- [10] 徐庆宏, 戴先中. 基于在线学习 RBF 神经网络的汽门开度自适应补偿控制方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2):13-19.  
Xu Qing-hong, Dai Xian-zhong. Online learning RBF neural network-based adaptive compensative control scheme for governor system[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2):13-19.
- [11] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15):61-65.  
Yin Ming, Li Geng-yin, Zhang Jian-cheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15):61-65.
- [12] 韩红桂, 乔俊飞, 薄迎春. 基于信息强度的 RBF 神经网络结构设计研究[J]. 自动化学报, 2012, 38(7):1083-1090.  
Han Hong-gui, Qiao Jun-fei, Bo Ying-chun. On structure design for RBF neural network based on information strength [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(7):1083-1090.