

基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统的研究及设计

朱桂嵩, 胡岩

(沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 电梯作为高层建筑中重要的运输工具, 需要满足快速性和舒适性的基本要求。本文以无齿轮永磁同步电梯曳引机为研究对象, 在直接转矩控制原理的基础上, 结合空间矢量脉宽调制技术, 提出一种基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机直接转矩控制策略。然后, 利用模糊控制算法对传统的 PID 速度控制器进行优化, 将设计的模糊自适应 PID 速度控制器应用到电梯曳引机调速系统中, 并与传统 PID 控制下的调速系统进行比较。最后, 结合抛物线形电梯速度曲线对电梯曳引机调速系统进行分析。仿真结果显示采用模糊自适应 PID 控制的电梯曳引机调速系统具有较快的动态响应速度和较强的抗干扰能力, 对抛物线形电梯速度曲线具有较好的跟踪性, 验证了模糊自适应 PID 控制算法应用于电梯调速系统的可行性。

关键词: 电梯曳引机; SVPWM; 直接转矩控制; 模糊自适应控制; 电梯速度曲线

中图分类号: TU857

Research and Design of Fuzzy Direct Torque Control System for Gearless Permanent Magnet Synchronous Traction Machine Based on SVPWM

Zhu Guisong, Hu Yan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870)

Abstract: As an important means of transportation in high-rise buildings, elevators need to meet the basic requirements of speed and comfort. In this paper, the gearless permanent magnet synchronous traction machine for elevator is taken as the research object. Based on the principle of direct torque control and the space vector pulse width modulation technology, a direct torque control strategy based on SVPWM for gearless permanent magnet synchronous traction machine is proposed. Then, the fuzzy PID control algorithm is used to optimize the traditional PID speed controller, and the designed fuzzy adaptive PID speed controller is applied to the elevator traction machine speed control system and compared with the speed control system under the traditional PID control. Finally, combined with the parabolic elevator speed curve, the elevator traction machine speed control system is analyzed. The simulation results show that the elevator traction machine speed control system with fuzzy adaptive PID control has faster dynamic response speed and stronger anti-interference ability, and has better tracking performance for the parabolic elevator speed curve, which verifies the feasibility of the fuzzy adaptive PID control algorithm applied to the elevator speed control system.

Keywords: Elevator traction machine; SVPWM; Direct torque control; Fuzzy adaptive control; Elevator speed curve

0 引言

随着中国城市化进程和国民经济的快速发展, 电梯作为一种垂直的升降设备, 在人们生产和生活中得到广泛的应用和普及。目前, 我国电梯的保有量和生产量仍以较快的速度增长, 并保持着良好的发展势头, 电梯不仅在数量上有较大的需求, 在运行性能上也有较高的要求,

作者简介: 朱桂嵩 (1991—), 男, 硕士研究生, 特种电机及其控制

通信联系人: 胡岩 (1964—), 女, 教授, 特种电机及其控制. E-mail: huyansy@163.com

在运行性能方面，电梯不仅需要具有较快的动态响应速度，还要满足基本舒适度的要求。

电梯曳引机作为电梯的核心部件，提供电梯运行过程中所需的全部动力，其结构及控制策略的选取对电梯的运行性能具有较大的影响。电梯曳引机根据是否存在齿轮箱减速装置，可分为有齿轮曳引机和无齿轮曳引机^[1]。其中，无齿轮永磁同步曳引机采用曳引电机和曳引轮同轴的结构，具有低速、大转矩的特性，能够实现电梯的无机房无齿化传动^[2]。

目前，无齿轮永磁同步电梯曳引机控制系统普遍采用变频调压调速（VVVF）或矢量控制调速等控制策略并采用 PID 速度控制器，存在控制精度低、响应速度慢、转速超调量大，并存在明显抖动等问题，电梯的舒适度得不到保证。

为了提高电梯的运行性能并改善电梯乘坐的舒适度，本文结合直接转矩控制原理和空间矢量脉宽调制技术，提出一种基于 SVPWM 的直接转矩控制策略，并采用模糊自适应 PID 控制算法对系统中的速度控制器进行优化设计，并结合抛物线形电梯速度曲线，通过建模和仿真的方式，分别对系统的动态响应速度、抗干扰能力和对电梯速度曲线的跟踪性能进行研究，并验证所设计的电梯曳引机调速控制系统的可行性和有效性。

1 无齿轮永磁同步曳引机

1.1 无齿轮永磁同步曳引机的结构

如图 1 所示，无齿轮永磁同步曳引机主要由曳引轮、电磁制动器和曳引电机组成。曳引轮和曳引电机之间采用同轴直驱式结构，曳引电机能够通过曳引轮直接驱动电梯轿厢做垂直运动，不需要齿轮箱和蜗轮蜗杆等齿轮传动系统，使曳引机的结构和体积得到极大的简化，相对于有齿轮异步电机传动系统，无齿轮永磁同步传动方式具有结构简单、可靠性强、噪声低和传动效率高等特点^[3]。

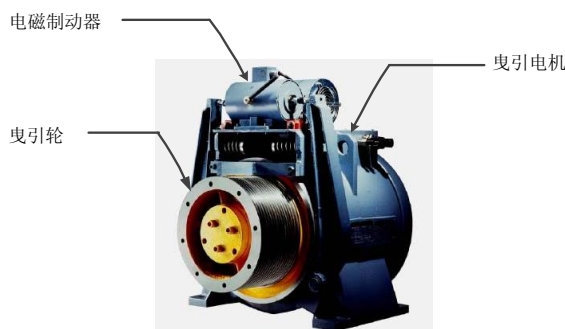


图 1 无齿轮永磁同步电梯曳引机结构图

高性能的曳引驱动电机是实现无机房无齿化电梯传动的基础，永磁同步曳引电机以其体积小、重量轻、转矩脉动小和气隙密度高的特点，在无齿轮电梯曳引机上得到普遍的应用^[4]。

永磁同步曳引电机主要由定子和转子两部分结构组成，其转子采用近似真空磁导率的稀土永磁材料做磁极，摒弃了绕线式转子同步电机中励磁绕组等结构，不需要利用无功电流进行励磁，使电机的功率因数得到提高并近似接近于 1，同时利用金属贴片技术方便实现多极数转子的制造，使永磁同步曳引机具有低转速的运行特性。另外，永磁同步曳引电机的转子和定子之间不仅具有较小的气隙，还具有较大的气隙直径，使永磁同步曳引电机具有较大的

转矩特性^[5]。

永磁同步曳引电机的定子部分主要由定子绕组和铁芯绕制而成,采用三相星形或角形的接线方式,输入的交流电压和电流满足三相对称的关系,且其内部的三相反电动势全部为标准的正弦波形,相对于绕线式转子同步电机中的反电动势,不会对电网造成谐波污染等影响。

1.2 无齿轮永磁同步曳引机的工作原理

在无齿轮永磁同步曳引机中,若给曳引机的定子绕组通入对称的三相正弦电流,则定子电流会产生一个以同步转速旋转的定子磁场,并与转子磁极产生的转子磁场进行相互作用,产生的电磁作用力拉动曳引机的转子以一定的速度进行旋转。

如图 2 所示,当转子的速度 n_r 达到定子磁场的同步旋转速度 n_s 时,曳引机进入稳定运行的状态。此时,转子磁链 ψ_r 与定子磁链 ψ_s 呈相对静止的位置关系,且两个磁场之间形成一个恒定的机械角度即转矩角 δ ,并产生维持曳引机运动所需的电磁转矩,实现电能和机械能之间的相互转换。

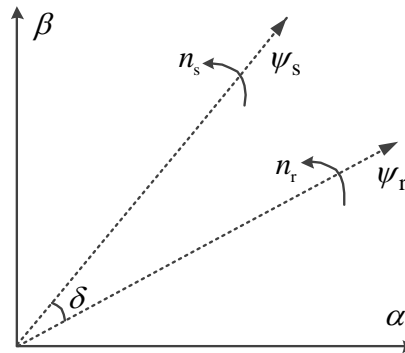


图 2 定子磁链和转子磁链的位置关系图

Fig. 2 The positional relationship diagram of stator flux linkage and rotor flux linkage

其中,永磁同步曳引机转子的旋转速度为:

$$n_r = n_s = \frac{60f}{p_n} \quad (1)$$

由式(1)可知,永磁同步曳引机转子的运行速度与定子绕组的输入频率 f 和曳引机的极对数 p_n 有关,而极对数 p_n 在曳引机本体设计过程中随槽数一起得到确定且保持不变。因此,只能通过改变定子绕组的输入频率 f ,实现对永磁同步曳引机调速的目的。

1.3 无齿轮永磁同步曳引机的数学模型

无齿轮永磁同步曳引机是一个高度耦合的非线性系统,为了实现对永磁同步曳引机的精确控制,需要利用坐标变换理论对电机的磁链、电流等相关参数进行解耦。在不计电机铁芯饱和、电机涡流和磁滞损耗等非线性因素的影响且曳引机的气隙磁场为正弦波的情况下,可以得到在两相旋转d-q坐标系下永磁同步曳引机的精确数学模型如下:

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd}i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq}i_{sq} \\ \psi_s = \sqrt{\psi_{sd}^2 + \psi_{sq}^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, L_{sd} 、 L_{sq} 为定子电感d-q轴分量; ψ_f 为转子磁链; ψ_s 为合成的定子磁链。

定子电压方程为：

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \frac{d\theta}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \psi_{sd} \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

其中， u_{sd} 、 u_{sq} 为定子电压的 d-q 轴分量； i_{sd} 、 i_{sq} 为定子电流的 d-q 轴分量； R_s 为定子绕组的电阻； θ 为电机转子的位置角。

电磁转矩方程为：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (4)$$

将公式 (2) 代入公式 (4) 中可以得到：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}] \quad (5)$$

其中， p_n 为曳引机的极对数； T_e 为电磁转矩。

曳引机的运动方程为：

$$J \frac{d\omega_e}{dt} + B_m \omega_e + T_L = T_e \quad (6)$$

其中， J 为曳引机的转动惯量； B_m 为粘滞摩擦系数； T_L 为负载转矩； ω_e 为转子角速度。

2 基于 SVPWM 调制的直接转矩控制策略

2.1 直接转矩控制的基本原理

在旋转 d-q 坐标系下，永磁同步曳引机的磁链满足如下的关系：

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \psi_s \cos \delta \\ \psi_{sq} = \psi_s \sin \delta \end{cases} \quad (7)$$

其中， ψ_s 为永磁同步曳引机的定子磁链； δ 为转矩角。

将公式 (7) 代入公式 (2) 中，可以得到曳引机的定子电流方程为：

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\psi_{sd} - \psi_f}{L_{sd}} = \frac{\psi_s \cos \delta - \psi_f}{L_{sd}} \\ i_{sq} = \frac{\psi_{sq}}{L_{sq}} = \frac{\psi_s \sin \delta}{L_{sq}} \end{cases} \quad (8)$$

将公式 (7)、公式 (8) 代入公式 (4) 中，可以得到曳引机的电磁转矩方程为：

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_d} |\psi_s| |\psi_f| \sin \delta + \frac{3(L_d - L_q)}{4L_d L_q} |\psi_s|^2 \sin 2\delta \quad (9)$$

在不考虑磁阻转矩的情况下，曳引机的电磁转矩可以简化表示为：

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p_n}{L_d} |\psi_s| |\psi_f| \sin \delta \quad (10)$$

由公式 (10) 可以得出永磁同步曳引机的电磁转矩 T_e ，与转子磁链 ψ_f 、定子磁链 ψ_s 和转矩角 δ 的大小有关。由于永磁同步曳引机的转子采用铁钕硼等永磁材料做磁极，则曳引机转子的磁链幅值 $|\psi_f|$ 保持恒定。若设定子磁链 ψ_s 的幅值为常数，利用定子磁场定向的原理，

通过改变转矩角 δ 的大小, 可以实现对曳引机电磁转矩控制的目的, 这是直接转矩控制的基本思想^[6]。

2.2 SVPWM 调制技术

2.2.1 三相电压型逆变器及空间电压矢量

如图 3 所示, 三相电压型逆变器采用两电平三桥臂的结构, 其中每相桥臂都由上下两个功率开关管 V_T 组成, 且每个桥臂中心点的位置分别与永磁同步曳引机的各相电路相连。根据上桥臂导通, 下桥臂关断的原则, 逆变器中每相桥臂的两个开关器件呈互补的关系, 则逆变器可以产生 2^3 种开关状态, 且逆变器的开关状态可以利用变量 S_a, S_b, S_c 进行表示, 且变量 S_i 满足的关系为^[7]:

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (11)$$

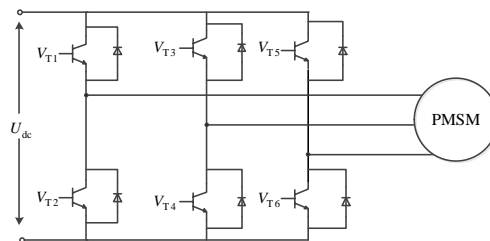


图 3 三相电压型逆变器结构图

Fig. 3 The structure diagram of three-phase voltage type inverter

因此, 三相电压型逆变器产生的八种开关状态分别为 000、100、110、010、011、001、101、111, 且逆变器的每种开关状态都与特定的电压空间矢量相对应, 且各电压空间矢量可以利用公式表示为

$$U_s = \frac{2}{3} U_{dc} (S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (12)$$

其中, U_{dc} 为直流母线侧的电压。

通常, 三相电压型逆变器产生的电压空间矢量 U_s , 主要包括 6 个基本电压空间矢量 $U_1(100)$ 、 $U_2(110)$ 、 $U_3(010)$ 、 $U_4(011)$ 、 $U_5(001)$ 、 $U_6(101)$ 和 2 个零电压空间矢量 $U_0(000)$ 、 $U_7(111)$ 。由式 (12) 可知, 各基本的电压空间矢量将复平面分为六个扇区, 且每个扇区中相邻的电压空间矢量互成 60° 角, 如图 4 所示。

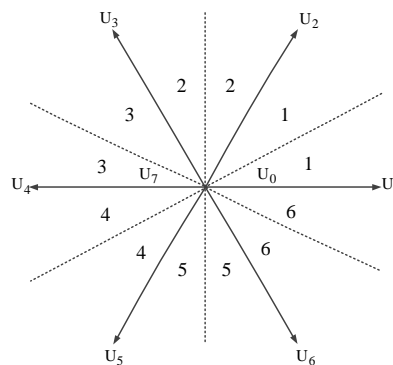


图 4 电压空间矢量的分布图

Fig. 4 The distribution map of voltage space vector

2.2.2 SVPWM 的调制原理

SVPWM 即电压空间矢量脉宽调制技术,它是在传统 PWM 控制技术基础上发展起来的新型控制技术。与传统的 PWM 控制技术不同,SVPWM 按照一定的规律控制逆变器开关器件的通断状态,实现对参考电压空间矢量的合成,利用合成的参考电压矢量对定子磁链的运动状态进行跟踪控制并得到圆形的磁链运动轨迹^[8]。

根据平均值等效的理论,某一扇区内的参考电压空间矢量 U_s ,可由该区域内相邻的两个基本电压空间矢量和零电压矢量按照不同的时间组合得到。以图 5 中的第 1 扇区为例,对参考电压空间矢量 U_s 的合成过程进行说明,可以得到如下的公式:

$$T_s U_s = T_1 U_1 + T_2 U_2 + T_0 U_0 \quad (13)$$

$$T_1 + T_2 + T_0 = T_s \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_{s1} = \frac{T_1}{T_s} U_1 \\ U_{s2} = \frac{T_2}{T_s} U_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\frac{|U_s|}{\sin \frac{2}{3}\pi} = \frac{|U_{s1}|}{\sin(\frac{\pi}{3} - \theta)} = \frac{|U_{s2}|}{\sin \theta} \quad (16)$$

$$|U_1| = |U_2| = \frac{2}{3} U_{dc} \quad (17)$$

其中, T_1 为基本电压矢量 U_1 的作用时间; T_2 为基本电压矢量 U_2 的作用时间; T_0 为零电压矢量 U_0 的作用时间; U_{s1}, U_{s2} 为参考电压矢量分量; θ 为合成的电压矢量 U_s 与相邻的基本电压矢量 U_1 的夹角。

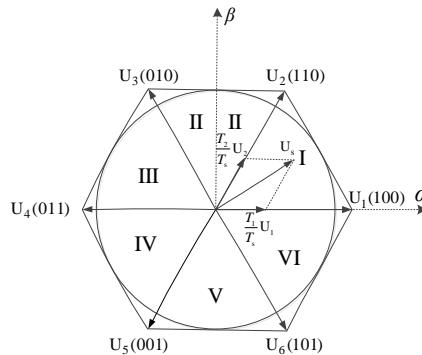


图 5 参考电压矢量的位置关系图

Fig. 5 The positional relationship diagram of reference voltage vector

将公式 (15)、公式 (17) 和公式 (14) 代入公式 (16) 中,可以得到扇区内各相邻电压空间矢量的作用时间如下:

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{3} \frac{U_m}{U_{dc}} T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ T_2 = \sqrt{3} \frac{U_m}{U_{dc}} T_s \sin \theta \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中, U_m 为参考电压矢量 U_s 的幅值。

在逆变器的调制周期 T_s 内, 根据每个扇区内相邻电压矢量的作用时间, 确定逆变器三个桥臂上每个开关的导通时间 T_a 、 T_b 和 T_c , 并与具有一定载波频率的三角波进行比较得到逆变器控制所需的 PWM 调制信号, 具体的开关导通时刻计算公式如下:

$$\begin{cases} T_a = (T_s - T_1 - T_2) / 4 \\ T_b = T_a + T_1 / 2 \\ T_c = T_b + T_2 / 2 \end{cases} \quad (19)$$

2.3 基于 SVPWM 的直接转矩控制系统结构及原理

如图 6 所示, 基于 SVPWM 的永磁同步曳引机直接转矩控制系统主要包括转速控制器、转矩控制器、磁链控制器、转矩和磁链估计模块、SVPWM 调制模块、逆变器和永磁同步曳引机等模块组成^[9]。

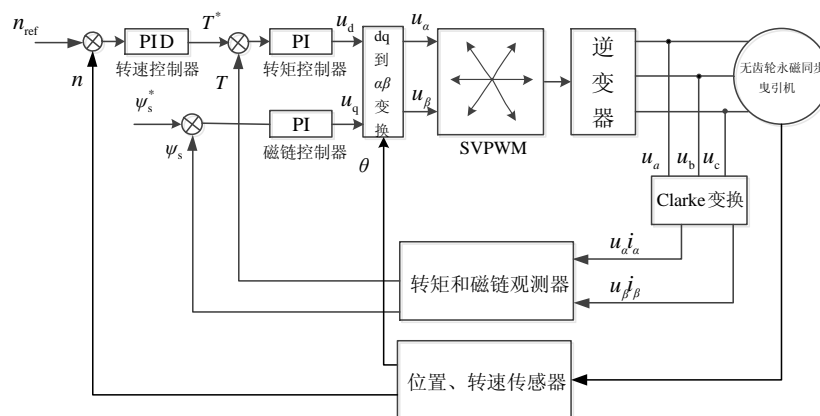


图 6 基于 SVPWM 的直接转矩控制系统原理图

Fig. 6 The schematic diagram of direct torque control system based on SVPWM

该控制系统采用转速控制器为外环, 转矩控制器和磁链控制器为内环的双闭环控制结构。控制系统将给定的速度信号 n_{ref} 与永磁同步曳引机的实际速度信号 n 进行比较, 将速度差值 Δn 送入速度 PID 控制器中, 得到一个转矩参考值 T_e^* 。随后, 转矩的参考值 T_e^* 与转矩的实际转矩值 T_e 进行比较, 将转矩的差值 ΔT_e 输入转矩 PI 控制器中得到交轴电压分量。设定子磁链的参考值为 ψ_s^* , 并与实际的定子磁链 ψ_s 进行比较, 将磁链的差值 $\Delta \psi_s$ 送入磁链 PI 控制器中, 得到直轴电压分量 u_d 。最后, 电压分量 u_d 、 u_q 和转子的位置角 θ 被送入 $dq/\alpha\beta$ 变换模块中并得到静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电压分量 u_α 、 u_β , 两个电压分量经过 SVPWM 模块的调制, 得到逆变器的开关控制信号, 并实现对永磁同步曳引机频率控制的目的。

3 模糊自适应速度控制器的设计

3.1 模糊自适应 PID 控制器的原理及结构

基于 SVPWM 的永磁同步曳引机直接转矩控制系统是非线性、多变量、强耦合的速度控制系统。由于传统的 PID 速度控制器的参数比较固定, 且控制器参数的整定过程需要依赖固定的数学模型, 无法根据控制对象的变化自适应地调节控制器的参数, 因此电梯曳引机的控制系统存在响应速度慢、抗干扰能力差和比较明显的转矩脉动等问题, 无法满足电梯控制系统对快速性和舒适性等方面的性能要求。

针对传统 PID 速度控制器存在的问题, 本文提出一种模糊自适应 PID 速度控制器, 并将其应用到基于 SVPWM 的永磁同步曳引机直接转矩控制系统中。模糊自适应 PID 控制器主要由模糊自适应控制和 PID 控制模块组成, 利用专家操作经验制定模糊控制规则, 运用模糊语言对模糊控制规则进行表达, 实现对无齿轮永磁同步曳引机等非线性对象的控制^[10]。

如图 7 所示, 模糊自适应 PID 控制器以速度偏差 e 和速度偏差变化率 ec 为输入, 经过模糊化、模糊推理和解模糊等过程, 输出 PID 控制器参数的变化量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d , 进而对 PID 控制器的参数进行整定, 并得到整定后的控制器参数表达式为:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (20)$$

其中, k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 控制器的初始参数值。

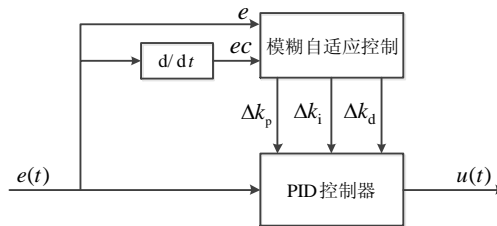


图 7 模糊自适应 PID 控制器的原理图

Fig. 7 The schematic diagram of fuzzy adaptive PID controller

最后, PID 控制器利用整定后的参数 k_p 、 k_i 和 k_d , 对某时刻系统的速度差值 $e(t)$ 进行运算, 并得到速度控制器的输出变量 $u(t)$ 为:

$$u(t) = (k_{p0} + \Delta k_p)e(t) + (k_{i0} + \Delta k_i) \int e(t) dt + (k_{d0} + \Delta k_d) \frac{de(t)}{dt} \quad (21)$$

其中, 输出变量 $u(t)$ 为控制系统中的转矩参考值 T_e^* 。

3.2 模糊自适应控制器的设计

模糊自适应控制器作为模糊自适应 PID 速度控制器中的核心模块, 采用两输入、三输出的结构, 定义模糊推理方法为 Mamdani 算法, 控制器的输入变量为转速偏差 e 和速度偏差变化率 ec , 输出变量为 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 。

设定输入变量 e 和 ec 的模糊子集均为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}, 分别对应于 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}, 且模糊论域 E 和论域 EC 的取值范围为 $[-6, 6]$, 并选取高斯型函数为隶属函数, 且该函数的表达式为:

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (22)$$

其中, c 为基函数的中心值; σ 为基函数的基宽参数。

同时, 输出变量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊子集为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}, 分别对应于 {正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大}, 其模糊论域的取值范围为 $[-3, 3]$, 并选取三角形函数为隶属函数。

在 MATLAB 仿真环境下, 利用 Fuzzy 逻辑编辑器进行模糊规则的设计, 分别制定输出变量 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 的模糊控制规则, 如表 1~表 3 所示。

表 1 输出变量 Δk_p 的模糊控制规则表
Tab. 1 The rule table of fuzzy control for Δk_p

Δk_p		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PM	PM	PS	NM	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

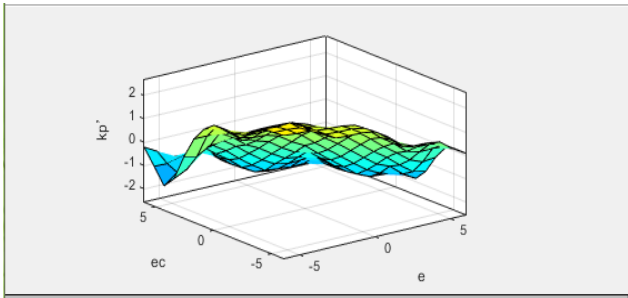
表 2 输出变量 Δk_i 的模糊控制规则表
Tab. 2 The rule table of fuzzy control for Δk_i

Δk_i		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 输出变量 Δk_d 的模糊控制规则表
Tab. 3 The rule table of fuzzy control for Δk_d

Δk_d		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PS	NS	NB	NB	NM	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	ZO	ZO	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

在模糊控制规则下,输入输出变量的模糊逻辑关系可用三维曲面进行表示,如图 8 所示。



(a) 输出变量 Δk_p 的模糊逻辑规则曲面图

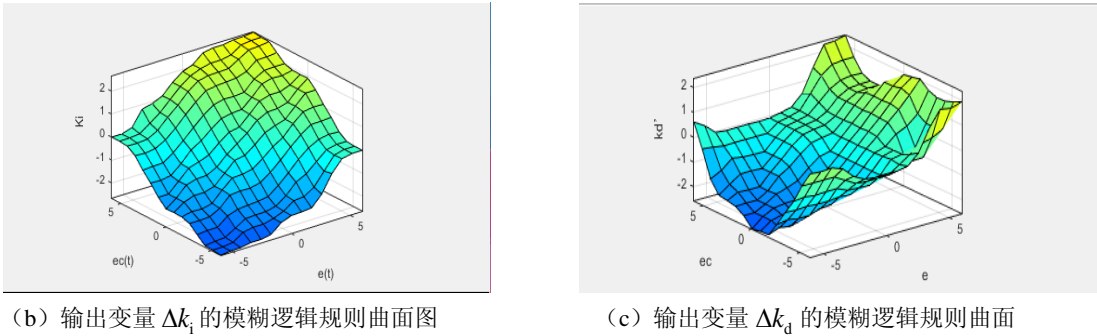


图 8 模糊逻辑规则的三维曲面图

Fig. 8 The 3D surface map of fuzzy logic rules

4 仿真模型的建立及结果分析

4.1 仿真模型的建立

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件，对无齿轮永磁同步曳引机调速控制系统进行建模和仿真，且无齿轮永磁同步曳引机的参数如表 4 所示。

表 4 无齿轮永磁同步曳引机参数

Tab. 4 The gearless magnet synchronous traction machine parameters			
参数变量	数值	参数变量	数值
额定功率 (P)	15kW	极对数 (p_n)	4
额定电压 (U_N)	380V	额定转速 (v_n)	165 r/min
定子电阻 (R_s)	1.875Ω	电梯额定载重量	1600kg
直轴电感 (L_d)	87.5mH	曳引比	2:1
交轴电感 (L_q)	87.5mH	曳引轮直径 (cm)	50

根据表 4 中无齿轮永磁同步曳引机的参数，并结合模糊自适应 PID 控制器和直接转矩控制系统的基本原理，搭建基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统的仿真模型，如图 9 所示。

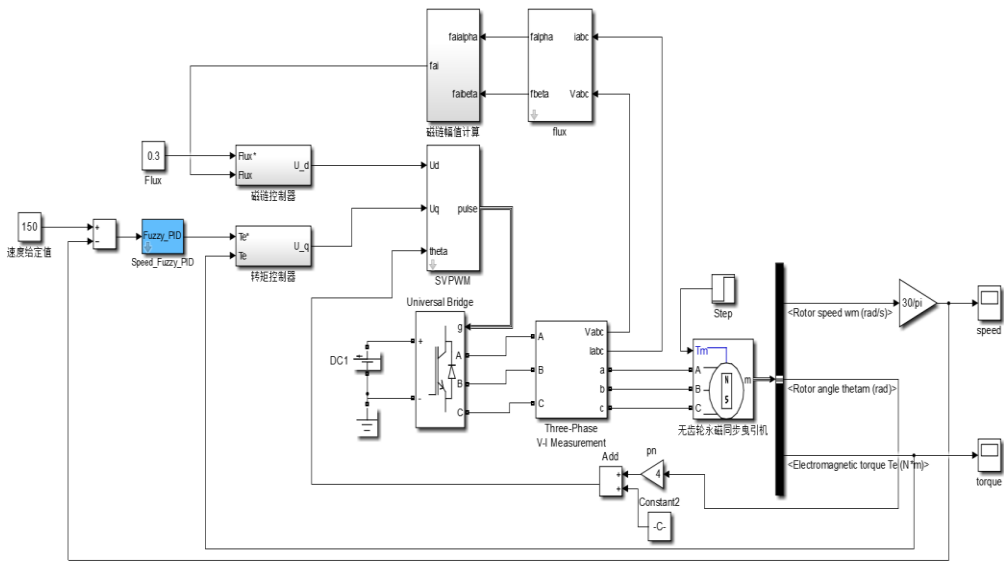


图 9 基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统

Fig. 9 The fuzzy direct torque control system for gearless permanent magnet synchronous traction machine based on SVPWM

4.2 仿真结果的分析

设系统的仿真时间为 0.3s，给定速度为 150r/min，在 0.1s 时刻，给系统施加 30N.m 的负载扰动，通过对曳引机的速度曲线和转矩曲线进行观测，将采用模糊自适应 PID 速度控制器的曳引机控制系统与采用传统的 PID 速度控制器的曳引机控制系统的仿真系统进行比较，并对永磁同步曳引机调速系统的动态性能进行分析，曳引机的给定速度为 150r/min，在 0.1s 时刻，给系统施加一个 30N.m 的负载扰动，将两种控制算法下的曳引机速度曲线进行比较，如图 10 所示。

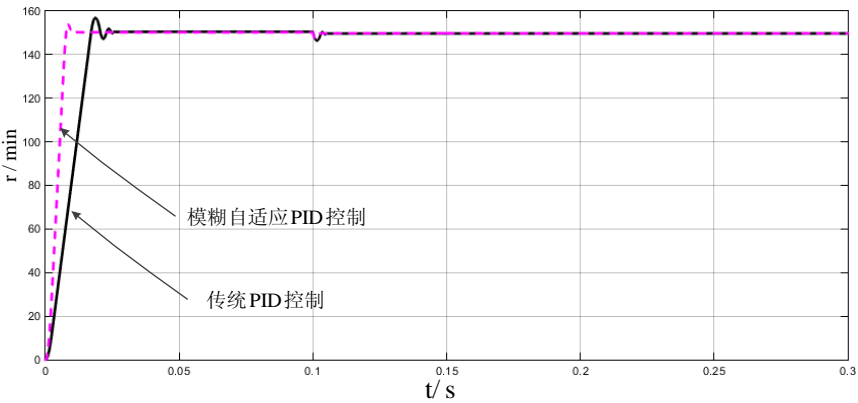


图 10 在两种控制算法下曳引机的速度曲线对比图

Fig. 14 The comparison of speed curves of traction machines under two control algorithms

通过对图 10 中两种控制算法下的速度曲线进行观测，可以得到永磁同步曳引机的各项动态性能指标，如表 5 所示。

表 5 永磁同步曳引机动态性能指标比较表

Tab. 5 The comparison table of permanent magnet synchronous traction machine dynamic performance index

性能指标参数	模糊自适应 PID 控制	经典 PID 控制
上升时间 (t_r / s)	0.0076	0.0170
峰值时间 (t_p / s)	0.0086	0.0187
调整时间 (t_s / s)	0.0112	0.0261
超调量 (M_p / %)	4.20	4.61

综上，在空载条件下，采用模糊自适应 PID 控制算法的曳引机调速系统，相对于采用经典 PID 控制算法下的调速系统，具有更短的转速调节时间，系统具有更快的动态响应速度，系统的超调量得到明显的减少，使系统的动态性能得到提升。

在突加负载的情况下，将两种控制算法下的曳引机速度曲线进行对比，如图 11 所示。

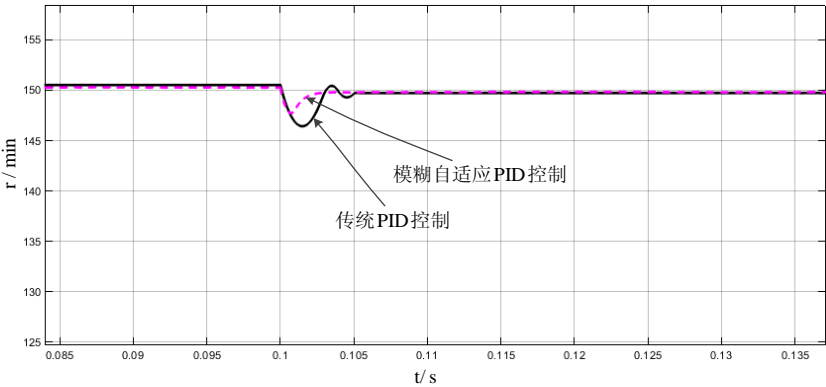


图 11 在负载扰动条件下曳引机速度曲线对比图

Fig. 11 The comparison of speed curves of traction machines under load disturbance conditions

根据图 11 可以得到在负载扰动条件下，采用两种不同控制算法的永磁同步曳引机调速控制系统的抗扰动性能指标，如表 6 所示。

表 6 永磁同步曳引机抗扰动性能指标比较表
Tab. 6 The comparison table of anti-disturbance performance of permanent magnet synchronous traction machine

性能指标参数	模糊自适应 PID 控制	经典 PID 控制
转速下降值 (m/s)	2.27	3.58
转速恢复时间 (t/s)	0.003	0.005

由表 6 可知，采用模糊自适应 PID 控制算法的曳引机调速系统，相对于经典 PID 控制算法的调速系统，其转速下降值得到减少，转速的恢复速度得到加快且转速恢复时间得到明显的缩短，具有较好的转速恢复能力和较强的抗负载扰动的能力，使系统的稳定性得到增强。

5 电梯舒适性和抛物线型速度曲线的研究

5.1 电梯速度曲线与舒适度要求

电梯作为一种垂直的升降工具，不仅需要具有快速、稳定的动态运行特性，还要满足电梯乘坐的舒适性。在电梯运行过程中，电梯的加速度和加加速度会对人体的生理状态造成较大的影响，在电梯上升或下降过程中，较大的加速度不仅会使人体产生超重或失重的感觉，而且过大的加加速度还会使人体产生头晕或呕吐的不适反应^[11]。

为了解决电梯加速度对人体造成的影响，根据国家 GB/T10058-2009 标准要求，对电梯启动和制动过程中的加速度和加加速度做出相应的规定，电梯的加速度不应大于 1.5m/s^2 ，电梯的加加速度不应大于 1.3m/s^3 ^[12]。

5.2 抛物线形电梯速度曲线的设计

根据电梯乘坐舒适性的原则，选取抛物线形电梯速度曲线为电梯曳引机控制系统的给定速度曲线，完成抛物线形电梯速度曲线的设计，并将其应用到无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统中。现给定电梯曳引机的运行速度为 150r/min ，同时电梯的运行时间为 8s ，设计抛物线形电梯速度曲线，如式（23）所示。

$$v(t)=\begin{cases} 75t^2 & 0\leq t<1\text{s} \\ 37.5+75(t-1) & 1\leq t<2\text{s} \\ 150-37.5(3-t)^2 & 2\leq t<3\text{s} \\ 150 & 3\leq t<5\text{s} \\ 150-37.5(t-5)^2 & 5\leq t<6\text{s} \\ 112.5-75(t-6) & 6\leq t<7\text{s} \\ 37.5(t-7)^2 & 7\leq t<8\text{s} \end{cases} \quad (23)$$

其中， $0\sim 1\text{s}$ 为电梯的正抛物线加速阶段； $1\sim 2\text{s}$ 为电梯匀加速阶段； $2\sim 3\text{s}$ 为电梯反抛物线减加速阶段； $3\sim 5\text{s}$ 为电梯匀速阶段； $5\sim 6\text{s}$ 为电梯反抛物线减速阶段； $6\sim 7\text{s}$ 为电梯匀减速阶段； $7\sim 8\text{s}$ 为电梯正抛物线减速阶段。由式（23）可以得到抛物线型电梯给定速度曲线，如图 12 所示。

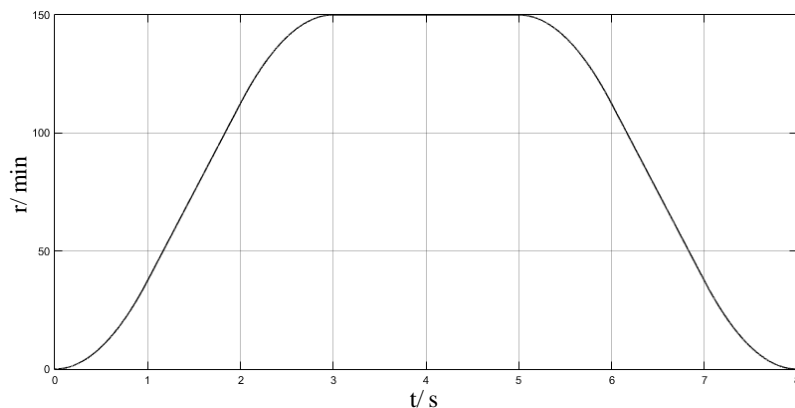


图 12 抛物线形电梯速度给定曲线

Fig. 12 The parabolic elevator speed reference curve

5.3 结合抛物线形速度曲线对电梯控制系统的研究

将抛物线形速度给定曲线作为给定速度输入到无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统中，并建立基于抛物线形电梯速度曲线的电梯控制系统，如图 13 所示。

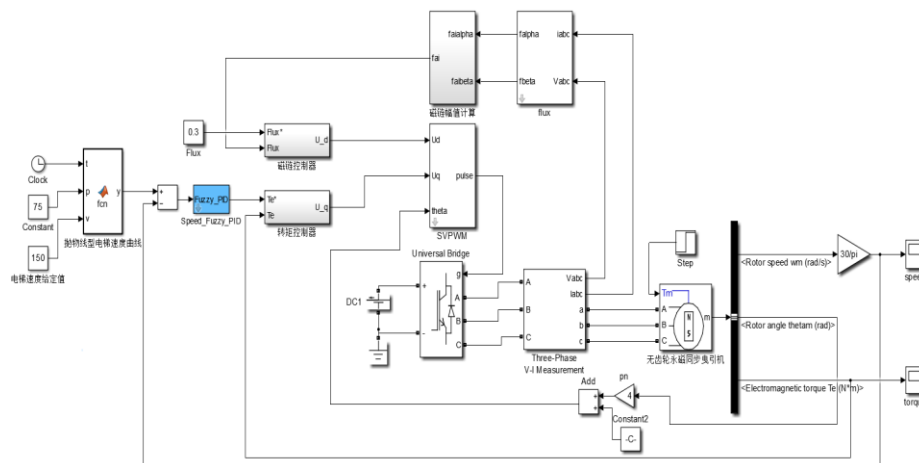


图 13 基于抛物线型电梯给定曲线的电梯控制系统

Fig. 13 Elevator control system based on parabola speed given curve

设定系统的仿真时间为 8s，并得到电梯控制系统的实际运行曲线，将电梯控制系统的实际运行速度曲线和抛物线型电梯速度给定曲线进行对比，对电梯控制系统的跟随性和舒适度进行研究，如图 14 所示。

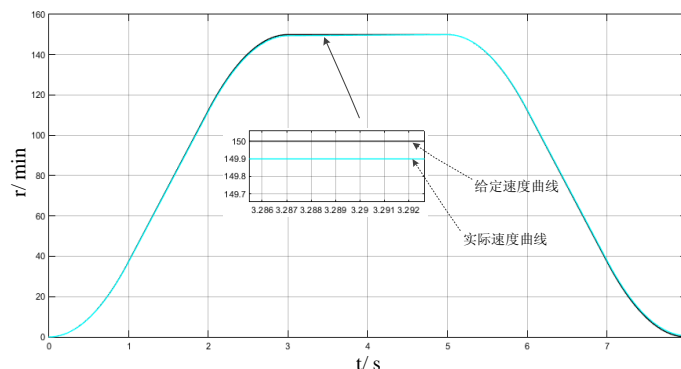


图 14 电梯控制系统的实际运行速度曲线

Fig. 14 The actual operating speed curve of elevator control system

由图 14 可知, 将抛物线形电梯速度曲线与基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统相结合构建的电梯控制系统对电梯速度给定曲线具有很好的跟随性, 使电梯满足舒适度的要求, 验证了所设计的电梯控制系统可行性。

6 结论

本文以无齿轮永磁同步曳引机为研究对象, 针对电梯运行过程中需要满足快速性和舒适性的要求, 采用基于 SVPWM 的直接转矩控制策略并结合模糊自适应 PID 控制算法, 设计了基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统, 并进行了仿真和研究。通过与采用经典 PID 控制算法的永磁同步曳引机调速系统进行对比, 结果表明基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统, 使系统的动态响应速度得到明显的提高, 转矩的脉动得到明显的减小, 并具有较强的抗负载扰动的能力, 使系统的稳定性和鲁棒性得到进一步的提高。通过抛物线形电梯速度曲线验证了基于 SVPWM 的无齿轮永磁同步曳引机模糊直接转矩控制系统对抛物线形电梯速度曲线具有较好的跟随性, 并验证了所设计的电梯控制系统的可行性。

[参考文献] (References)

- [1] 叶安丽. 电梯技术基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 唐斌. 无齿轮永磁同步电梯曳引机控制系统的设计与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3] 杜崇杰. 基于神经网络的电梯用无齿轮永磁同步曳引机速度控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2008.
- [4] 戴玉英. 永磁同步电动机在无齿轮曳引电梯中的应用前景[J]. 电机技术, 2002 (2): 18-25.
- [5] 杨国龙. 曳引机用外转子永磁同步电动机的分析与优化设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [6] Zhong L, Rahman M F, Hu Y W. Analysis of direct torque control in permanent synchronous motor drives[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-535.
- [7] 黄卫平, 谢运祥. 基于 TMS320F2812 的三电平逆变器的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 31-35.
- [8] 孙旭霞, 高沁源, 孙伟. 基于 SVPWM 的永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 电气传动, 2016, 11(46): 3-6.
- [9] 陈志成. 基于直接转矩的异步电机宽范围调速研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [10] Chia-Nan Ko, Tsong-Li Lee, Han-Tai Fan. Genetic auto-tuning and rule reduction of fuzzy PID controllers[C]. International Conference on Systems and Cybernetics, 2006: 1096-1101.
- [11] 刘丽. 基于 MATLAB 的电梯运行速度控制仿真[J]. 佳木斯大学学报, 2017, 35 (6): 885-888.
- [12] 陆鑫森, 赵国军, 邢海潇. 电梯运行速度曲线控制[J]. 轻工机械, 2010, 28 (6): 70-72.