

基于模糊控制的直流电机调速控制算法研究

杨少远，彭邦煌，熊斌，方旭，颜爱平，毕文佳
比亚迪汽车工程研究院

【摘要】本文以直流电机转速控制系统为研究对象，针对直流电机转速控制属于一种非线性时变得复杂控制系统，提出了一种基于模糊控制的直流电机调速控制算法。通过对直流电机调速控制系统的原理及控制思想进行分析，提出了基于目标转速自学习和模糊控制算法的电机调速控制策略。再根据模糊控制的基本原理，设计了模糊调速控制算法的输入、输出、隶属度函数以及建立模糊规则库。利用 Matlab 软件搭建了基于模糊控制的直流电机调速控制算法仿真模型，并通过设计不同的仿真实验方案对该模型进行仿真研究与结果分析，从算法的机理上验证了模糊控制算法的可行性。同时，将该调速控制算法应用到公司某车型台架上，并设计实验方案，实验结果验证了该模糊控制算法在直流调速控制系统中的控制效果。表明基于模糊调速控制算法能够较好地实现直流电机的转速控制，对电机平顺性技术方面的研究有一定的指导意义。

【关键词】 直流电机，调速控制系统，模糊控制，算法模型

Research on Speed Regulation Control Algorithm of DC Motor Based on Fuzzy Control

Yang Shaoyuan, Peng Banghuang, Xiong Bin, Fang Xu, Yan Aiping, Bi Wenjia
BYD Automotive Engineering Research Institute

Abstract: This paper takes DC motor speed control systems as the research object. Considering that DC motor speed control is an nonlinear time-varying complex control systems, a DC motor speed control algorithm based on fuzzy control is proposed. By analyzing the principle and control idea of DC motor speed regulation control system, a motor speed regulation control strategy based on target speed self-learning and fuzzy control algorithm is proposed. Then according to the basic principle of fuzzy control, the input, output and membership function of fuzzy speed control algorithm are designed and the fuzzy rule library is established. The simulation model of DC motor speed control algorithm based on fuzzy control is built by MATLAB software, and the simulation research and result analysis of the model are carried out by designing different simulation experiment schemes, and the feasibility of the fuzzy control algorithm is verified from the algorithm mechanism. At the same time, the speed control algorithm is applied to a car branch of our company, and the experimental scheme is designed. The experimental results verify the control effect of the fuzzy control algorithm in the DC speed control system. The results show that the speed control algorithm based on fuzzy speed control algorithm can realize the speed control of DC motor well, which has certain guiding significance to the research of motor ride comfort technology.

Key words: DC motor, speed control system, fuzzy control, algorithm model

引言

电机作为主要的机电能量转换装置，其应用范围遍及各个领域，尤其在工业上，中小功率的直流电机调速系统，在电动汽车运用更为广泛。电子技术的飞速发展，加速了直流电机调速从模拟化向数字化的转变，提高了调速系统的精度，也增强了抗干扰能力，从而步入了一个新阶段^[1-2]。

传统直流调速系统广泛采用 PID 控制器设计其转速调节器，虽然 PID 转速调节器具有结构简单、稳定性好以及可靠性高等优点，但也存在超调量大、负载自适应能力差、抗干扰能力不强及鲁棒性差等缺点^[3-4]。

本文将设计了一种基于模糊控制的直流调速控制算法，并在 Matlab/Simulink/Stateflow 仿真平台搭建了基于模糊控制的直流调速系统仿真模型，基于模型进行仿真实验，从算法机理上验证了模糊控制算法的可行性。并在公司某车型上

设计工程实验，采集数据进一步验证了该模糊控制算法在直流调速控制系统中的控制效果。结果表明，基于模糊控制的直流调速控制系统能实现直流电机的无级调速和平稳运行，具有较高的精度和较强的稳定性。

1 直流电机调速控制原理

1.1 直流电机调速系统结构

直流电机调速系统的结构如图 1 所示，整个系统是一个闭环结构，硬件结构包括：单片机、直流电机、编码器，软件算法上主要运用目标转速自学习算法和模糊控制算法。

通过不断采集电机的脉冲信号，计算电机的转速，以此作为检测的直流电机实际转速 $V_{\text{实际}}$ 与设计的目标转速值 $V_{\text{目标}}$ 作比较，由此计算转速偏差和转速偏差变化率，输入给模糊控制器，经调节后输出 PWM 信号控制电机的速度。

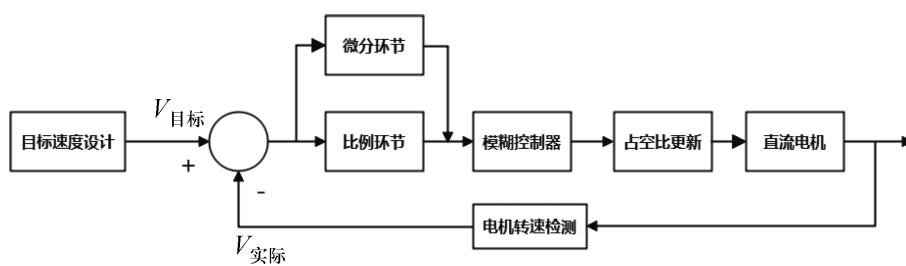


图 1 直流电机调速原理框图

1.2 直流电机 PWM 调速原理

目前直流电机的控制是研究热点，电机作为一个重要的控制元件和执行元件，它决定了实际的被控对象的控制效果。而 PWM 调速是应用最为广泛的控制策略，调速原理简单来说，就是通过控制功率开关管子的接通与关断的时间，这样就会改变直流电机电枢上电压的占空比，从而来改变电机上平均电压的大小，即 PWM 调压来控制电机的转速^[5]。本控制系统就是通过 PWM（脉冲宽调制）技术来实现的，PWM 波形的原理图如图 2 所示。

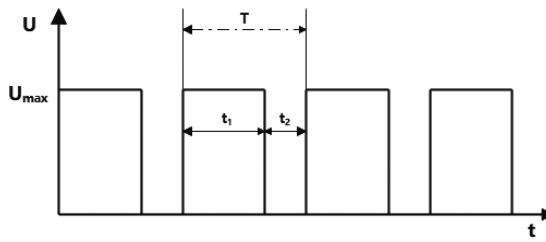


图 2 PWM 控制波形原理图

运用 PWM 调速，在电源电压不变的条件下，电枢电压 U_d 的大小取决于占空比的大小，因此通过对占空比的大小进行调节，直流电机两端的平均电压 U_d 就可以改变。由直流电机的转速公式，可知直流电压和电机的转速成正比关系，直流电压改变后，电机转速也随之改变，就可以实现对电机转速的控制。即通过对脉宽的周期进行修改而实现占空比的改变，以达到调速的目的，从而控制电机的转速。占空比和电机平均电压有如下关系式：

$$Duty = t_1/T \quad (1)$$

$$U_d = U_{max} Duty \quad (2)$$

式中，Duty 为占空比， U_{max} 为电机两端电压， U_d 为电机两端的平均电压。由上式公式可知：当我们改变 t_1 的值而 T 不变时，就可以得到不同的电机平均电压，从而达到改变电机转速的目的。

1.3 直流电机转速测量原理

直流电机采用的是双闭环控制，内环为电流环，外环为转速环，因此需要将电机的转速进行检测，作为反馈与参考转速进行比较从而进行调整，达到速度的精准控制。

为实现转速的控制，需将转速进行测量并反馈至控制器进行调节。转速的测量有多种方法，本文采用霍尔脉冲法进行速度测量的计算，它可由两相邻霍尔脉冲的时间间隔而简单地计算获得。

转速测量基本算法为：MCU 有捕捉功能，当 MCU 捕捉到第一个 HALL 信号上升沿时，计数器开始计数 n_1 当第二

次捕捉到 HALL 信号上升沿时，计数器的计数为 n_2 ，如果 MCU 晶振为 ΔT ，则一个 HALL 信号的周期：

$$T = (n_2 - n_1) \Delta T \quad (3)$$

设电机轴上的磁极数为 4，如果产生一个 HALL 信号，那么转子四分之一转，所以由 HALL 信号周期可推得转子的转速：

$$N_1 = \frac{1.510^4}{T} \quad (4)$$

1.4 直流电机转子位置检测原理

直流无刷电机的转子位置是控制的关键，因此需要精准地对其进行检测并反馈到芯片中进行处理。本文采用的霍尔电机，通过霍尔传感器作为电机转子位置的传感器，对霍尔信号的分析对电机转子的位置进行估算。当转子的磁极经过霍尔元件时，霍尔元件会输出对应的高低电平。规定输出高电平时，对应的输出值为 1，而当输出低电平时，对应的输出值为 0。通过将输出值进行排列，可得到脉冲波形，对脉冲进行计数，便可得知电机转子所在位置。

2 直流电机调速控制算法的设计

2.1 基于霍尔位置的目标转速自学习算法

根据电机转动的方向不同和电机转子位置的不同，需要给定电机在不同开、关状态下，转子在不同位置对应的电机目标转速，以至于精确控制转子在不同位置电机实际转速都能按照目标转速曲线逼近，达到电机转速的精确控制。

电机开方向目标速度设计为式 (5)、(6)：

$$k_1 = \frac{N - x_1}{N} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_1 = 15(x - x_1) - 300k \\ V_2 = 1200k \\ V_3 = 4(x_1 - x) + 4N * k - 400k \\ V_4 = 400 \end{cases} \quad (6)$$

电机关方向目标速度设计为式 (7)、(8)：

$$k_2 = \frac{x_1}{N} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V_1^1 = 4(x - x_1) + 4N * k - 400k \\ V_2^1 = 1200k \\ V_3^1 = 15(x_1 - x) - 300k \\ V_4^1 = 400 \end{cases} \quad (8)$$

式中， x 为转子当前位置、 x_1 为转子初始位置、 N 为全行程霍尔位置、 k_1 和 k_2 分别为电机开、关方向的位置比例系数，开方向的目标速度为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 ，关方向的目标速度为

$V_1^1, V_2^1, V_3^1, V_4^1$ 。

2.2 模糊控制算法

模糊控制是传统的规则专家系统、模糊集合论和控制理论结合的成果，它不用对被控对象建立定量的数学模型，而是根据被控领域的专家经验建立的控制模型^[6]。模糊控制实际上是应用模糊逻辑原理把人的经验、常识模糊化用语言变量的形式表达出来，成为计算机能够识别的控制模型，进而利用计算机来简化人为的操作，是对人类解决问题经验的模仿和应用，它是智能控制的一个重要研究领域^[7]。

2.2.1 模糊控制基本原理

模糊控制在使用过程中不需要建立精确的数学模型，它只需要把人的实际经验进行转换，制定合理的控制规则进而控制被控对象。实现这一过程的关键是对模糊控制器的设计，模糊控制器主要作用是把人的操作经验转换为计算机能识别的操作去控制被控对象^[8]。模糊控制实现的过程是：将模糊控制器输入的精确量由对应的隶属度函数模糊化为模糊变量，依据总结的语言控制规则进行模糊推理，给出模糊判决，然后把输出值通过解模糊化变为精确量去实现具体操作。模糊控制器系统框图如图 3 所示。

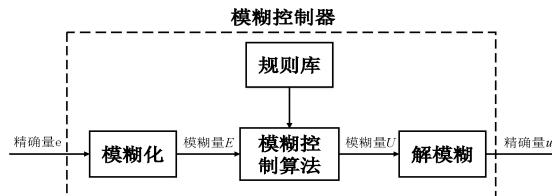


图 3 模糊控制器系统框图

2.2.2 模糊控制实现过程

控制算法的实现过程就是对模糊控制器的设计过程，模糊控制器的具体设计过程包括以下几个环节^[9]：

1) 模糊化：定义一个语言变量映射作为从数值域至语言域的模糊关系，从而在数值测量的基础上，将数值域中的数值信号映射到语言域上，为实现模糊推理奠定基础。

2) 模糊规则库：模糊规则库是由 if-then 规则集合组成的，是基于专家知识或手动操作熟练的人员长期积累的经验。

3) 模糊推理：根据系统的已转化为模糊值的输入量以及已提炼的控制规则，通过模糊蕴涵算子推理出控制量的模糊量。

4) 解模糊：模糊推理的结果一般都是模糊值，不能直接用来作为被控制对象的控制量，需要将其转换成一个可以被执行机构所实现的精确量。这个过程成为解模糊。解模糊方法一般包括：

- ① 重心法；
- ② 系数加权平均法；
- ③ 最大隶属度法；
- ④ 隶属度限幅元素平均法；
- ⑤ 中位数法；

2.2.3 模糊控制的特点

1) 模糊控制不需要被控对象的数学模型，它是以人对被控对象的控制经验为依据而设计的控制器。

2) 模糊控制是一种反映人类智慧的智能控制方法。模糊控制采用人类思维中的模糊量，如高、中、低、大、小

等，控制量由模糊推理导出。

3) 模糊规则构造容易，易于软件实现，鲁棒性和适应性好，可以对复杂的对象进行有效的控制。

2.3 模糊调速控制算法的设计

2.3.1 输入、输出参数及取值范围选取

模糊控制直流电机调速系统的工作过程是：设定一个目标转速值，根据检测到的电机实际转速值，计算目标转速与实际转速的误差 Δv ，再根据误差 Δv 计算得出误差变化 Δe 。由于此时的转速误差 Δv 和误差变化 Δe 都是精确值，需要经过模糊化处理，得到模糊量。模糊控制器根据输入变量（模糊量），按照模糊控制推理规则，计算得到控制量（模糊量）。最后，把输出的模糊控制量解模糊处理后变成精确的输出控制量占空比 $duty$ 。

$$\Delta v = V_{\text{目标}} - V_{\text{实际}} \quad (9)$$

$$\Delta e = \Delta v(t) - \Delta v(t-1) \quad (10)$$

在本次直流调试控制系统中，主要是针对电机的转速进行控制，以实现精准调速。因此以转速误差 Δv 和误差变化 Δe 作为模糊控制器的输入参数，占空比 $duty$ 作为模糊控制器的输出参数。本文仿真中所用模糊控制器为二维模糊控制器，如图 4 所示。

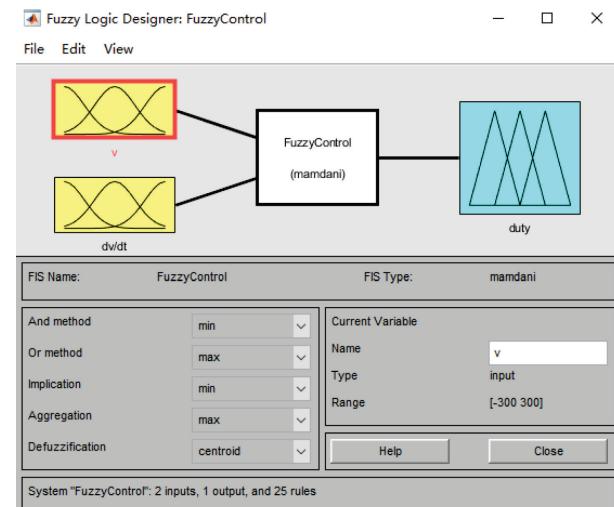


图 4 直流调速系统 FIS 编辑器

文本建立了 Mamdani 型模糊推理系统，这种推理，从每一个规则的结果中得到的模糊集通过聚类运算与结果模糊集相组合后，去模糊化（解模糊）以产生系统输出。解模糊的方法是重心法（centroid）。输入变量 Δv 的范围为 $[-2000, 2000]$ ；输入变量 Δe 的范围为 $[-80, 80]$ ；输出变量 $duty$ 的范围为 $[-0.004, 0.003]$ 。

2.3.2 模糊化及隶属函数

经分析得，模糊控制的输入变量为两个，分别为转速误差 Δv 和误差变化 Δe ，输出变量为占空比 $duty$ 。在利用模糊处理之前，需先将输入变量进行模糊化，否则模糊规则将无法适用。本文设定输入变量 Δv 的模糊集合数设计为 5，语言变量表示为 NB、NS、Normal、PS、PB；输入变量 Δe 的模糊集合数设计为 5，语言变量表示为 NB、NS、No_change、PS、PB；输出变量 $duty$ 模糊集合数设计为 7，语言变量表

示为 NB、NS、NS1、No_change、PS1、PS、PB。

在模糊阶段里最重要的是设计隶属函数，而隶属函数的外型就跟设计者要求的特性和工程经验有关，一般常见的是用三角形或梯形来描述隶属函数的外型。本文选择三角形和梯形隶属度函数对其选取输入、输出变量进行模糊化处理。输入变量 Δv 和 Δe 的隶属度函数如图 5、图 6 所示；输出变量 $duty$ 的隶属度函数如图 7 所示。

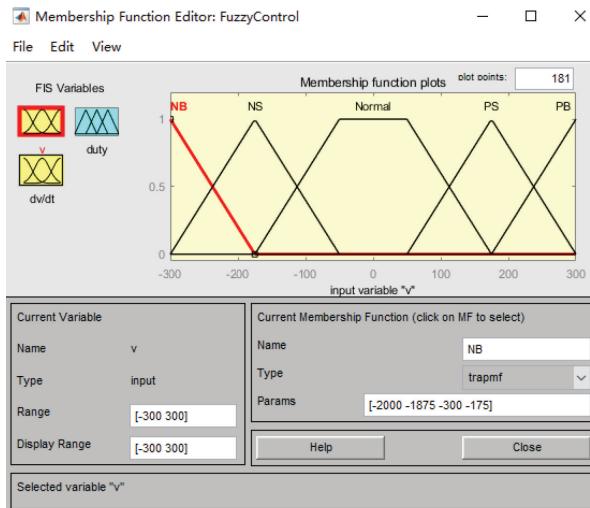


图 5 输入变量 Δv 的隶属度函数

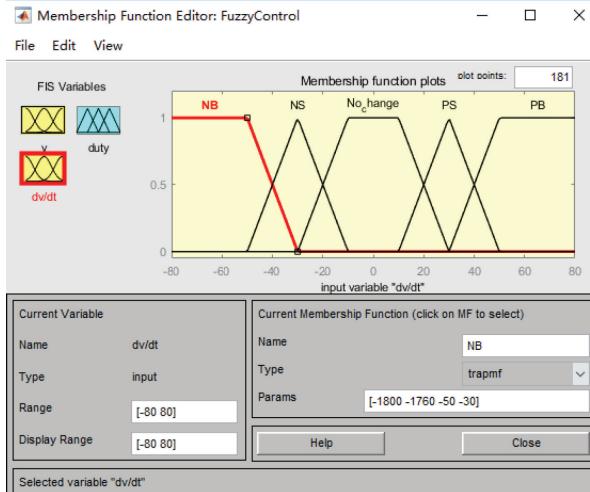


图 6 输入变量 Δe 的隶属度函数

2.3.3 模糊调速控制规则的设计

在设计模糊控制器中，规则库是最重要的一部分，因为所有的状态都必须根据我们所定义的规则库的规则进行操作，所以制定一个好的规则库是相当重要的，一般而言，规则库的产生方式主要有下面四点：

- 1) 由使用者的经验与控制行为获得。
- 2) 由专家的知识制定规则。
- 3) 根据被控系统的特性获得。
- 4) 由自我学习的方式获得。

规则库就是用来存放全部控制规则的，规则库中没有两条规则是完全一样的。如图 8 所示中第一列 If 为输入变量 Δv 语言变量，第二列 and 为输入变量 Δe 的语言变量，第三列 Then 为输出变量 $duty$ 的语言变量。本文针对直流电机调

速的过程，设计了 25 条模糊控制规则，模糊规则的编辑和观测如图 8~图 10 所示。

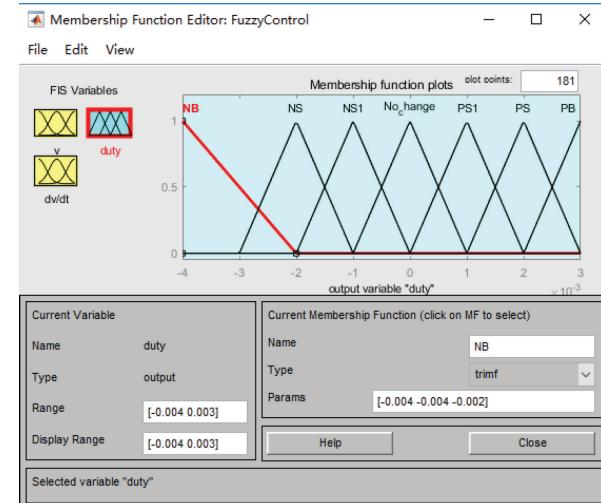


图 7 输出变量 $duty$ 的隶属度函数

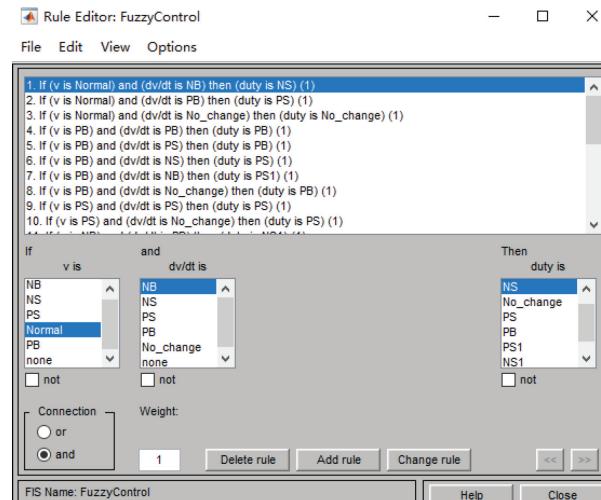


图 8 直流调速模糊规则编辑器

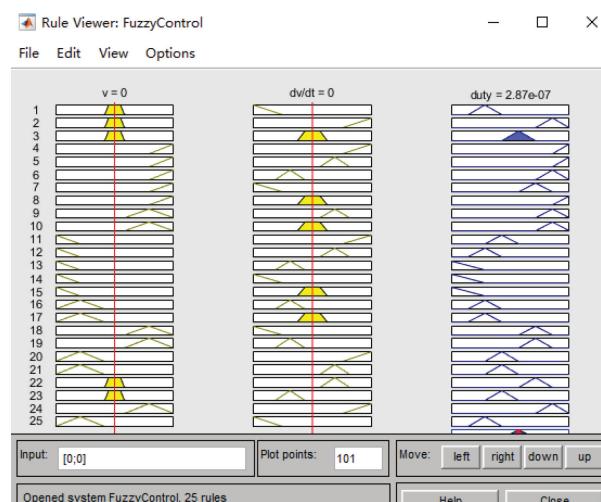


图 9 直流调速模糊规则观测

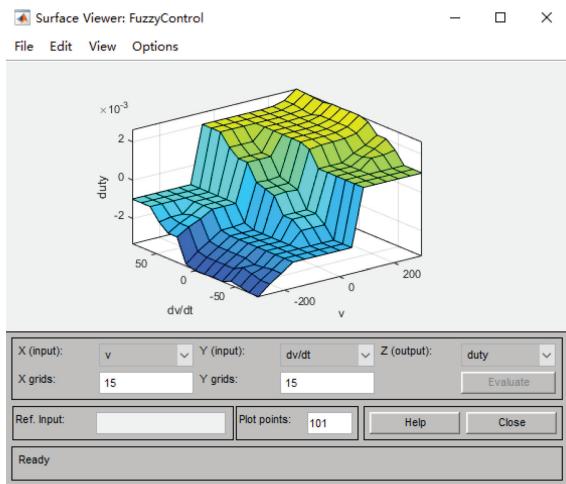


图 10 直流调速模糊控制器三维视图

3 直流电机调速控制算法建模与仿真

3.1 基于模糊控制的调速控制算法建模

根据前文对电机目标转速自学习算法和直流调速模糊控

制算法的理论研究进行推导与设计，利用 Matlab、Simulink 和 Stateflow 搭建基于模糊控制的直流电机调速控制算法仿真模型。调速控制算法仿真模型的输入和输出信号界面如图 11 所示，界面左侧为模型所需的输入信号，右侧为模型的输出结果。对此模型进行仿真选取的输入、输出主要参数见表 1。

表 1 输入、输出主要参数表

输入参数	输出参数
m_nDiBarCurPos	
DiBar_Motor_Average_Speed	
m_unCanVelcSlopeX	
m_nDiBar_OpState	
m_unDiBar_Target_Hall_Number	DiBar_Motor_DutyCycle
DiBar_Start_Position	
m_unCanVelcSpeed	
m_unDiBar_Hall_Number	
m_X_Emer	m_unCanVelcSlopeY

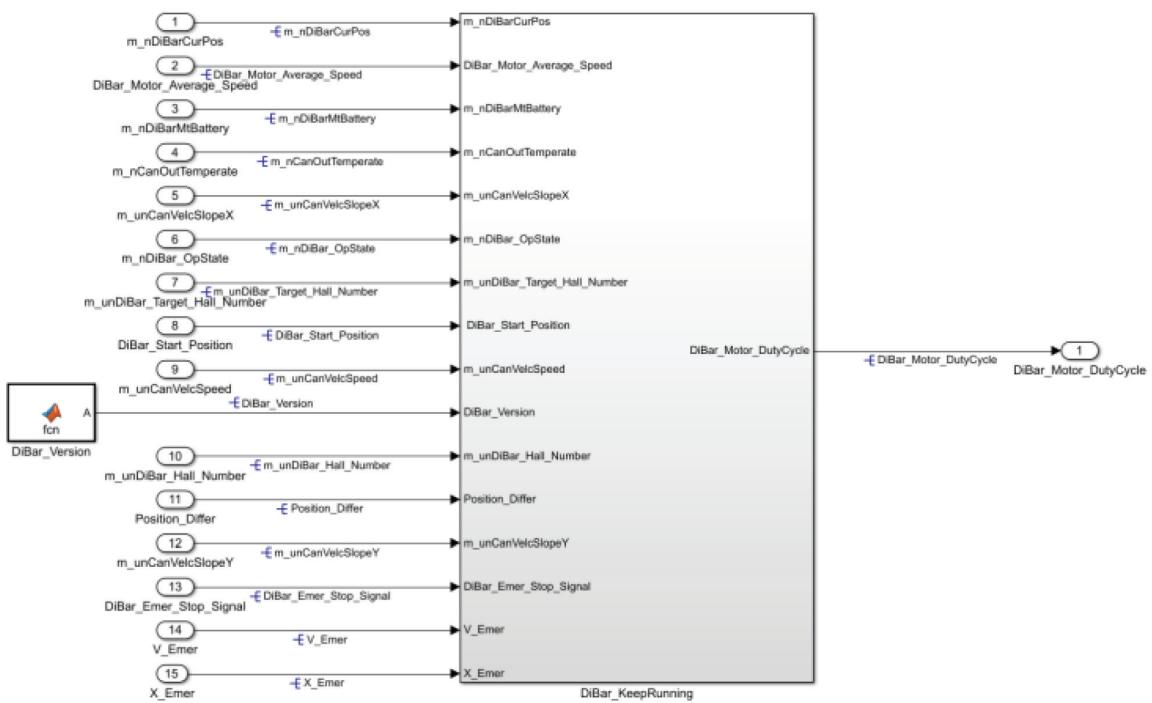


图 11 仿真模型输入、输出界面

在本文直流调速仿真控制系统中，主要是针对电机的转速进行监测、计算与控制，搭建了基于模糊控制的直流调速控制算法仿真模型如图 12 所示。该模型主要由以下几个模块构成：电机目标转速设计模型、目标转速选择模型、转速误差和误差变化的计算模型、模糊调速控制器的设计模型以及占空比输出模型。

电机目标转速设计模型如图 13 所示，该模型是根据转子当前所在的位置去计算当前位置下所对应的目标转速，由

此作为电机的当前位置下的目标转速设计输入。

电机目标转速选择模型如图 14 所示，该模型是根据目标转速设计模型所计算出的目标转速与电机当前的运行状态及撑杆当前所在的位置联合判断，选择出电机当前状态下所对应的目标转速。

模糊调速控制器的设计模型如图 15 所示，该模型是根据当前计算出的电机转速误差和误差变化值作为输入，经过模糊调速控制设计模块，输入电机占空比。

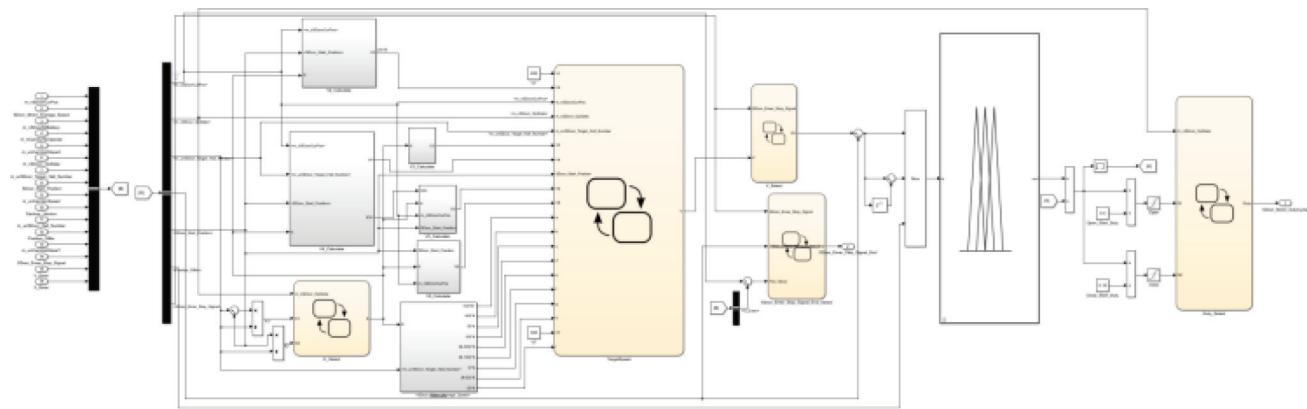


图 12 电机调速控制仿真模型

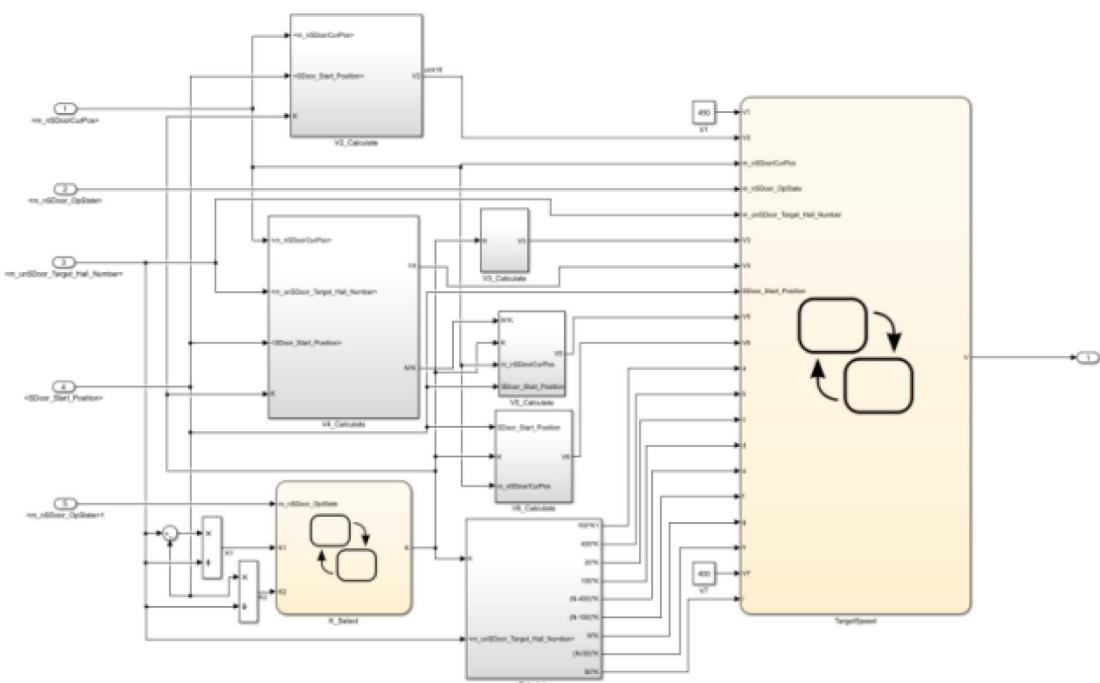


图 13 电机目标转速设计模型

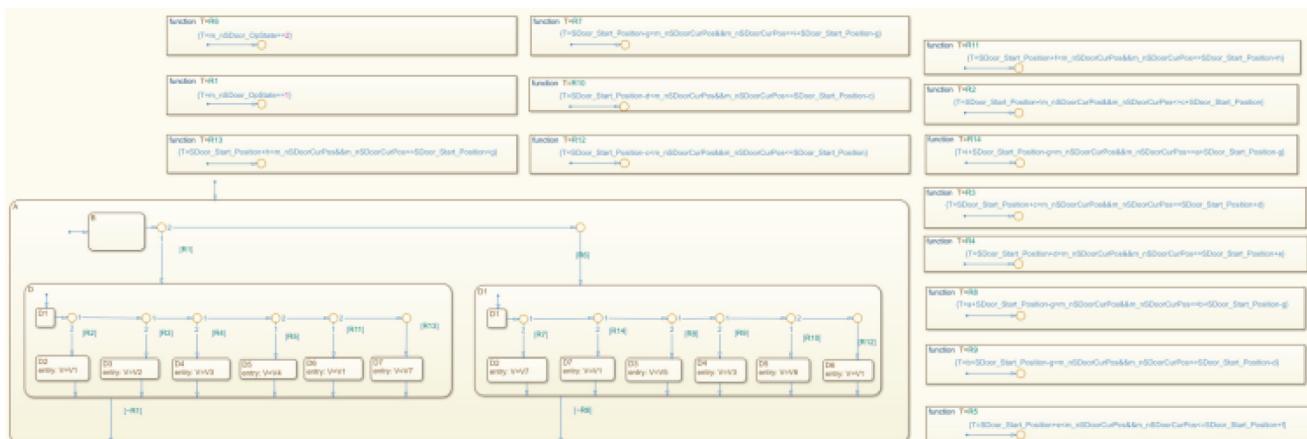


图 14 目标转速选择模型

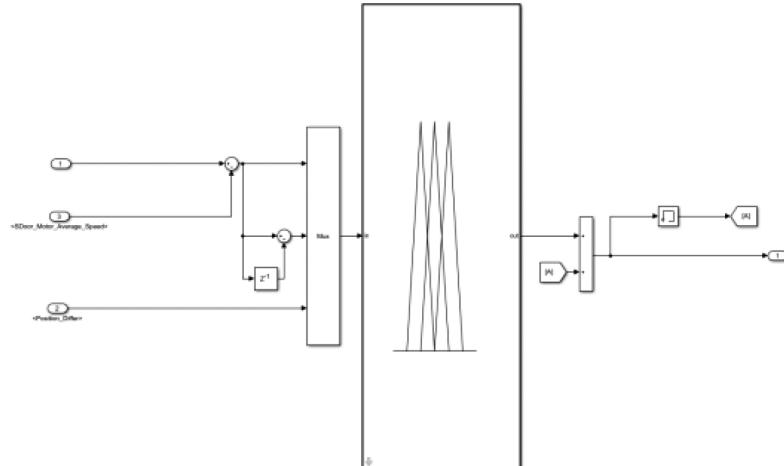


图 15 模糊调速控制器设计模型

3.2 模型仿真与结果分析

根据 Matlab/Simulink/Stateflow 搭建的直流电机模糊调速控制算法模型模拟仿真电机在运动过程中的目标转速、电机实际转速和电机占空比变化趋势。本文设计选取了不同的方案进行仿真实验，分别为：

- 1) 不同电压、无加载条件下，电机从全关运动到全开位置时，电机的目标转速、实际转速以及占空比的仿真数据。
- 2) 不同电压、有加载条件下，电机从全关运动到全开位置时，电机的目标转速、实际转速以及占空比的仿真数据。

实验仿真模型输入界面和仿真结果分别如图 16~图 21 所示：

从仿真结果数据图 17~图 21 可以看出本文所设计的模糊控制对在不同电压下、有无加载的工况下电机运动过程中，电机转速在上升阶段，均能按照设计的目标转速曲线快速且平稳的到达目标转速 1200n/min，稳定运行阶段，转速能稳定保持在目标转速 1200n/min 运行，转速下降阶段，也能平稳且快速的降到所设定的目标转速 400n/min；同时电机占空比上升阶段，也会随着不同的电压平稳增加，达到稳定后保持稳定占空比输出，最后占空比再平稳下降。通过以上仿真数据结果表明，本文所设计的模糊调试仿真控制算法均能实现对电机转速的快速响应和平稳的控制。

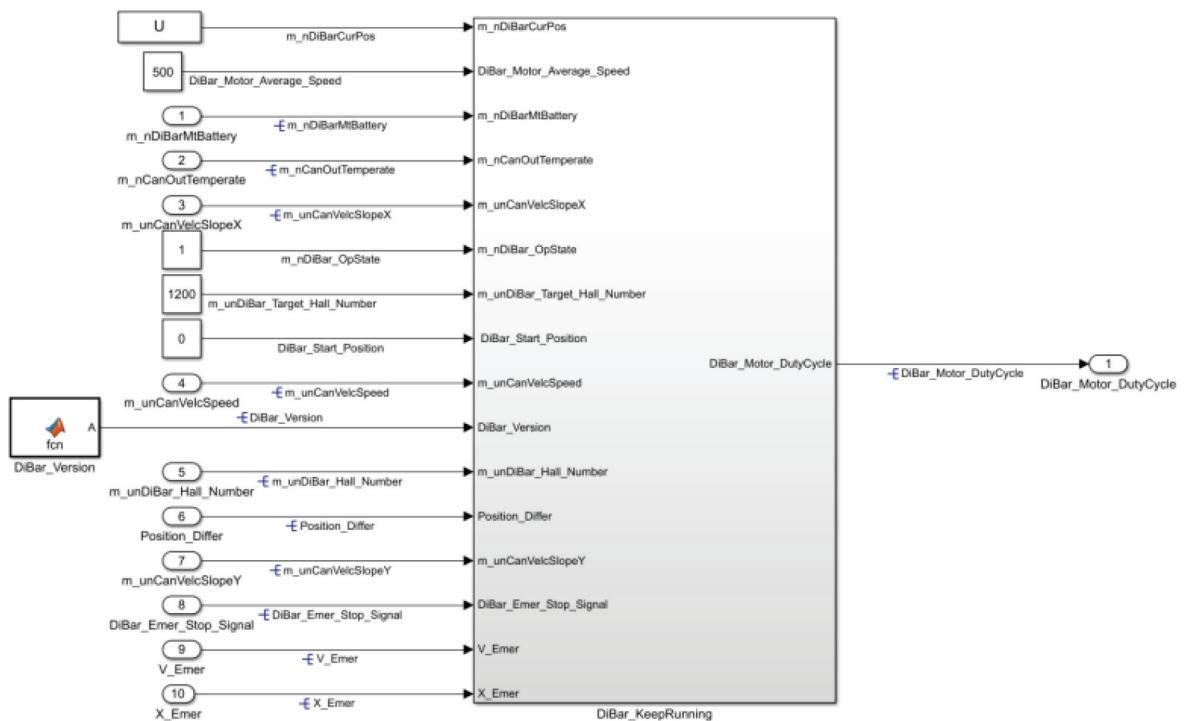


图 16 实验仿真模型输入界面



图 17 电机目标转速曲线

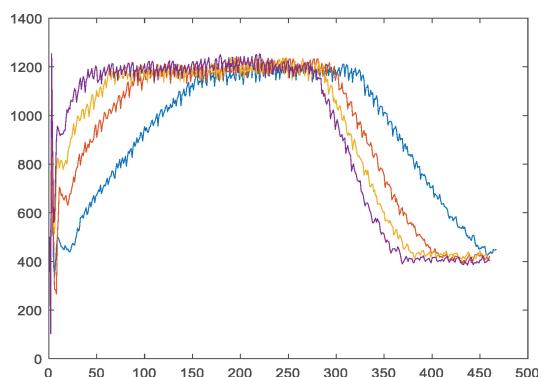


图 18 不同电压下不加载电机转速

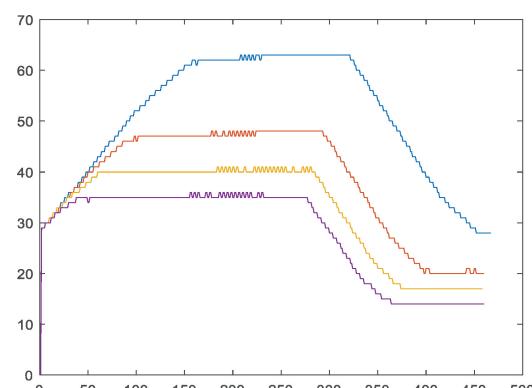


图 19 不同电压下不加载电机占空比

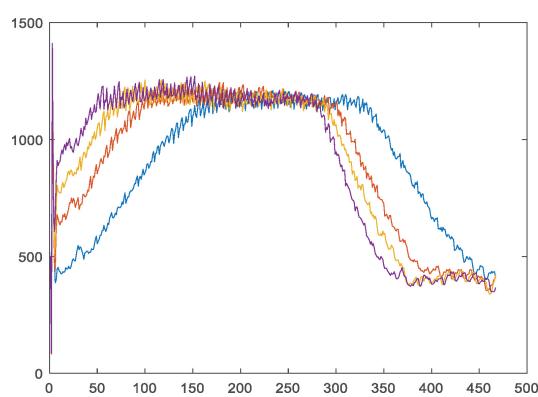


图 20 不同电压下加载电机转速

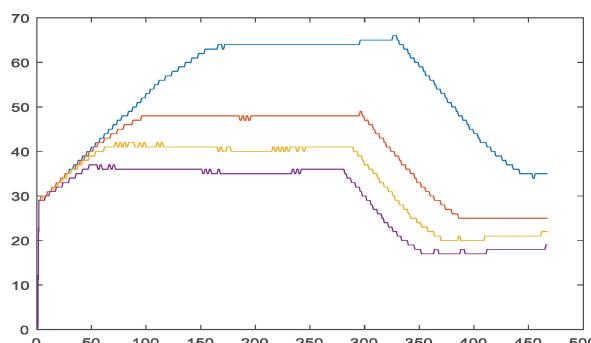


图 21 不同电压下加载电机占空比

4 基于模糊调速控制算法的实验设计与验证

4.1 实验设备与被控对象

实验设备选用我司某高端商务车型托盘台架、上位机和DC POWER SUPPLY KXN-3050D 直流电源，如图 22 和图 23 所示。实验通过直流电源给托盘台架电机供恒定电压，通过上位机检测电机实际转速与目标转速作比较，输出实时占空比，改变电机两端的实际平均电压，从而控制电机的实时转速，以达到设计的目标速度曲线。



图 22 托盘台架



图 23 上位机和电源

4.2 实验方案设计

本次实验通过给托盘台架电机有无载荷力、不同温度和不同的电压值作用下运行，监测电机实际转速和电机两端的实际占空比的变化曲线，分别采取在不同温度下，9V、12V、14V、16V 电压下的实验数据。实验方案见表 2。

表 2 实验方案

NO	工况	监测参数
1	常温 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下有无加载运行	电机实际转速与占空比变化曲线
2	低温 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下有无加载运行	电机实际转速与占空比变化曲线
3	高温 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下有无加载运行	电机实际转速与占空比变化曲线

4.3 实验结果与分析

常温下，分别给定托盘台架电机 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘无附加载荷作用下，电机实际转速和占空比的实验数据曲线如图 24 和图 25 所示。

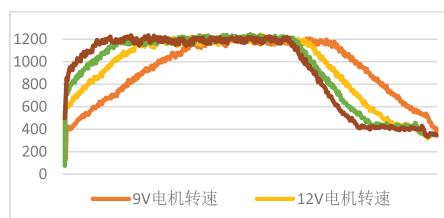


图 24 常温无加载不同电压下电机转速

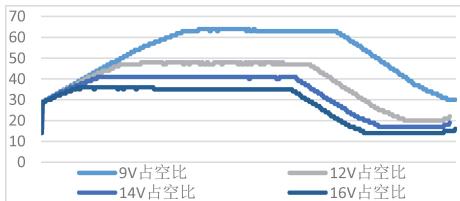


图 25 常温无加载不同电压下电机占空比

常温下，分别给定托盘台架 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘有附加载荷作用下，电机实际转速和占空比的实验数据曲线如图 26 和图 27 所示。

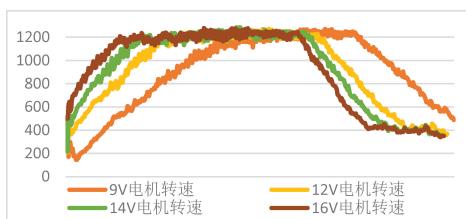


图 26 常温加载不同电压下电机转速

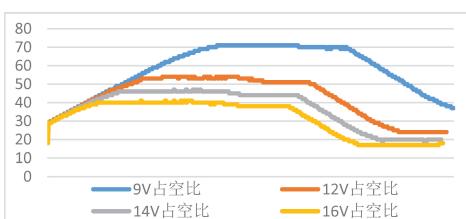


图 27 常温加载不同电压下电机占空比

低温下，分别给定托盘台架 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘无附加载荷作用下，电机实际转速和输出占空比的实验数据曲线如图 28 和图 29 所示。

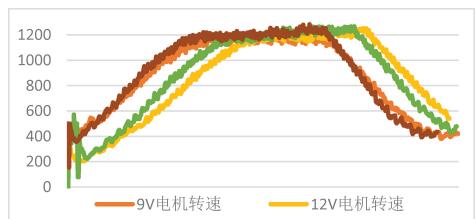


图 28 低温不加载不同电压下电机转速

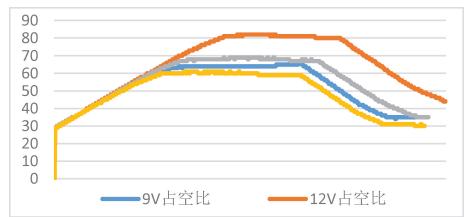


图 29 低温不加载不同电压下电机占空比

低温下，分别给定托盘台架 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘有附加载荷作用下，电机实际转速和输出占空比的实验数据曲线如图 30 和图 31 所示。

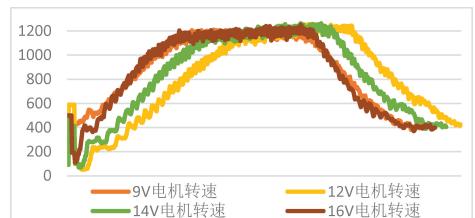


图 30 低温加载不同电压下电机转速

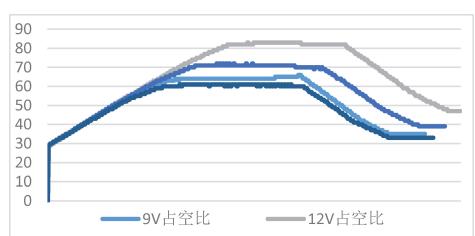


图 31 低温加载不同电压下电机占空比

高温下，分别给定托盘台架 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘无附加载荷作用下，电机实际转速和输出占空比的实验数据曲线如图 32 和图 33 所示。

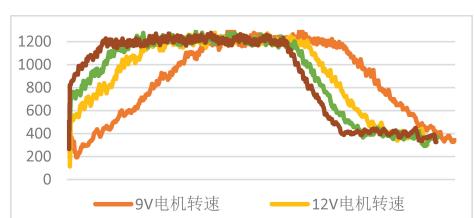


图 32 高温不加载不同电压下电机转速

高温下，分别给定托盘台架 9V、12V、14V 和 16V 电源电压下，托盘附加载荷作用下，电机实际转速和输出占空比的实验数据曲线如图 34 和图 35 所示。

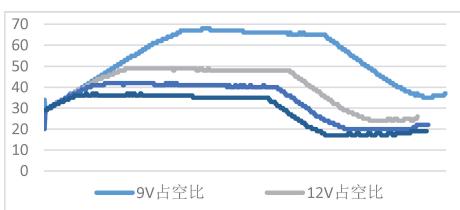


图 33 高温不加载不同电压下电机占空比

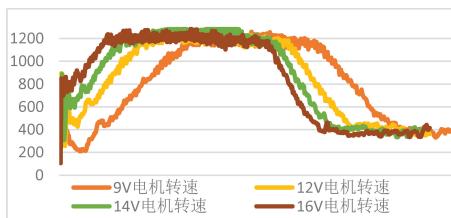


图 34 高温加载不同电压下电机转速

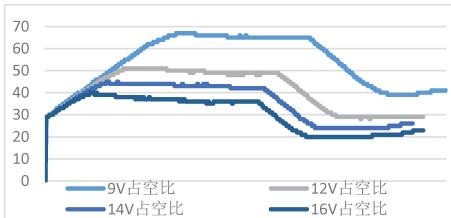


图 35 高温加载不同电压下电机占空比

分别通过托盘电机在常温、高温和低温，电压在 9V、12V、14V 和 16V 不同电压和有无加载作用下，设计以上实验所获得的数据进行分析所得，分别在不同电压、不同温度、有无载荷的工况下，托盘电机实际转速与占空比都会有比较平顺且快速的响应上升，在稳定运行阶段电机实际转速与占空比也能保持稳定，在下降阶段转速与占空比也能平稳且快速的响应下降。托盘在运动过程中也无噪声异响，且托盘上放置装满水的水杯运动时，水杯中的水能保持平稳不振荡、无水花溅出，控制效果理想。说明该模糊调试控制算法具有较高的智能性和可行性，对于电机调速控制具有较高的工程使用价值。

5 结论

本文通过对直流电机调速控制系统的原理及控制思想进行分析，提出了基于目标转速自学习和模糊控制算法的电机调速控制策略，设计了基于霍尔位置的目标速度自学习算法和模糊调速控制算法，利用 Matlab 软件搭建了基于模糊控制的直流电机调速控制算法仿真模型，并通过设计不同的仿真实验方案对该模型进行仿真研究与结果分析，从算法的机理上验证了模糊控制算法的可行性。同时，将该调速控制算法应用到公司某高端商务车型托盘台架上，并设计实验方案，实验结果验证了该模糊控制算法在直流调速控制系统中的控制效果，进一步证实了本文所设计的控制方案的有效性与合理性。

参 考 文 献

- [1] 杨靖. 用单片机控制的直流电机调速系统 [J]. 机床电器, 2008, 35 (1): 45~47.
- [2] 许又丹. 基于 IR2113 的直流电机调速系统 [J]. 科技视界, 2014 (15): 158~158.
- [3] 赵正黎, 于惠钧, 张发明, 等. 基于模糊 PID 控制的直流电机调速系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29 (2): 38~43.
- [4] 文小玲, 陈兵. 直流调速系统单神经元自适应速度控制方法 [J]. 武汉化工学院学报, 2004, 26 (3): 57~60.
- [5] 杨春旭, 林若波, 彭燕标. 基于 PWM 控制的直流电
机调速系统的设计 [J]. 齐齐哈尔大学学报 (自然科学版), 2011, 27 (3): 10-13.
- [6] 褚蕾蕾, 陈绥阳, 周梦. 计算智能的数学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 杨晓芳. 基于模糊控制的城市交通信号控制系统的研
究 [D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [8] 陈虹. 城市路口交通信号的自适应模糊控制策略研
究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [9] 张国良, 曾静, 柯熙政, 邓方林. 模糊控制及其 MAT-
LAB 应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002, 11. 24-28.