

# 民机舱室排气阀门无刷直流电机 制动控制研究

左泽轩\* 薛战东 张 瑶

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘 要:** 民用飞机的舱室排气阀门,通过调节开度大小,控制舱室排气流量,使舱室压力保持在目标值。舱室排气阀门的作动器,在手动模式下可由无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor,简称 BLDC)提供驱动力。由于舱室排气阀门的指令会频繁地“开-关”切换,因此 BLDC 工作时转速具有“正转-反转”循环的特点,需要在换向时频繁制动。为了提高电机的速度响应特性,重点对 BLDC 反接制动和回馈制动的控制过程进行了研究。首先设计了转速-电压双闭环控制下的 BLDC 转速调节系统,通过模拟目标转速正反向切换,实现了较为理想的升速过程。随后根据 BLDC 制动原理,设计驱动电路的控制模型,并比较了两种不同制动方式的效果。最后结合舱室排气阀门的工作环境提出了合理的制动策略。

**关键词:** 无刷直流电机(BLDC);制动;阀门;控制;仿真

中图分类号: V242.44

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

民用飞机在空中时,舱室排气阀门通过调节排出舱外的空调进气流量,使舱室的气压值保持在人体所能承受的安全和舒适范围内。由于机外的大气压力随着飞行高度而变化,舱室内由空调提供的进气量也非恒定,因此为保证座舱压力制度,舱室排气阀门的开度也需要动态调节。

舱室排气阀门的作动器,由电机提供动力,经由齿轮组和蜗轮蜗杆的机械设备,使阀门的阀瓣在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的范围内作动。为了保证民机产品安全性、可靠性的要求,排气阀门作动器包含了 2 套~3 套电机,用作不同的控制模式和功能备份。其中手动模式下,常用无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor,简称 BLDC)驱动阀门。BLDC 需要专门的驱动器电路和控制逻辑,实现调速、换向等功能<sup>[1-2]</sup>。

在排气阀门的手动模式下,飞行员通过手动调节阀开度,来实现对舱室气压变化率的控制。人

为操作下,无刷直流电机工作于“正转-反转”指令频繁切换的状态。BLDC 通过控制和驱动器,先制动再换向。对于排气阀门,如果 BLDC 的实际转速变化不能跟上指令,会影响舱室压力调节的快速响应。因此,有必要对 BLDC 驱动的减速及制动过程进行研究,并结合工程应用中常见的闭环控制系统,给出合理的 BLDC 制动控制策略。

## 1 无刷直流电机工作原理

对常用的三相六状态的 BLDC 进行工作原理说明,其定子线圈绕组和转子永磁体的结构、位置分布如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

假设电机转子上分布两对永磁体的磁极,定子绕组的三对线圈 A-X、B-Y、C-Z 按照星形连接,每极每相的间隔角度为 $60^{\circ}$ 。电机内部的转子轴和定子上还分别固定霍尔传感器的转子和定子,用于检测转子磁极的位置。BLDC 的定子线圈驱动电路如图 2 所示。

\* 通信作者. E-mail: zuozexuan@comac.cc

引用格式: 左泽轩,薛战东,张瑶. 民机舱室排气阀门无刷直流电机制动控制研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(3):86-93.  
ZUO Z X, XUE Z D, ZHANG Y. Braking control of brushless direct current motor for outflow valve of civil aircraft cabin [J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(3):86-93(in Chinese).

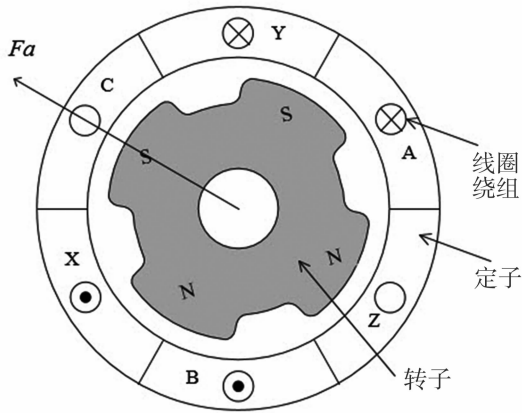


图1 无刷直流电机结构

BLDC 中 Y 接(星接)的三相绕组导通分为 6 个状态。任一个状态下均有两相绕组串联导通,剩余

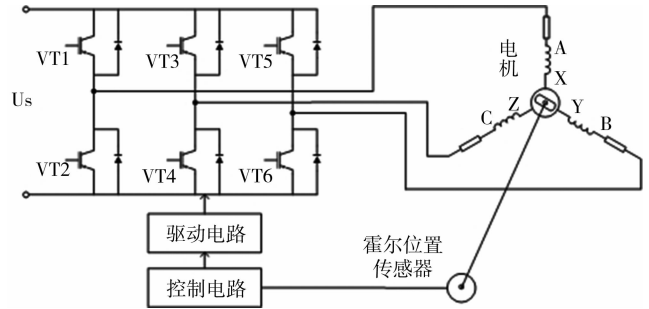


图2 无刷直流电机等效电路和控制系统

的一相绕组对应桥臂电路的功率器件均不导通。这样的目的,是使定子的永磁体跟随绕组的磁动势而运动,产生电机转子的电磁转矩。

根据电机转向来区分,在不同转子位置时的绕组相的工作规律如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表1 BLDC 绕组通电规律

通电顺序	顺时针					
转子位置电角度/°	0 ~ 60	60 ~ 120	120 ~ 180	180 ~ 240	240 ~ 300	300 ~ 360
开关管	1,6	1,4	5,4	5,2	3,2	3,6
A 相	+	+	N/A	-	-	N/A
B 相	-	N/A	+	+	N/A	-
C 相	N/A	-	-	N/A	+	+
通电顺序	逆时针					
转子位置电角度/°	360 ~ 300	300 ~ 240	240 ~ 180	180 ~ 120	120 ~ 60	60 ~ 0
开关管	5,4	1,4	1,6	3,6	3,1	5,2
A 相	N/A	+	+	N/A	-	-
B 相	+	N/A	-	-	N/A	+
C 相	-	-	N/A	+	+	N/A

## 2 无刷直流电机制动过程

在无刷直流电机运转中,如果收到停止指令,立即使驱动电路中的功率开关器件截止,那么转子由于惯性作用会继续运转。在此过程中,电机处于发电机的工作状态,但因为没形成电回路,绕组没有电流流过,电机到完全停止需要一段时间。

如果需要电机在正常运行时反转,为了防止烧坏电路,一般需要使电机转速下降到安全速度后,其反电动势降低,才能够驱动电机反转。为了提高正反转切换的速度,需要对 BLDC 的制动过程进行研究。

无刷直流电机,一般配备有专用的控制器或芯片实现速度/位置/转矩的闭环控制。同时, BLDC 的桥式驱动电路,直接控制电机定子线圈的通断特性,直接影响制动的效果,需要对其电路特性进行详细研究<sup>[5-6]</sup>。

## 3 BLDC 受控制动原理

### 3.1 耗能制动

耗能制动时,励磁电流通过电阻消耗能量,直至转子停转。耗能制动的本质是将电机的机械能被动转为了电阻发热,该制动方法操作简单,但是低速时制动转矩会很小,制动速度较慢,并且如果频繁制

动,则会大大增加电路发热。

对于舱室排气阀门,电机转轴的下游还连接有齿轮等机械结构。机械摩擦转矩及减速齿轮对转矩的放大作用,本质上同样是对电机的耗能制动。机械摩擦死区的存在,可以判别电机理论转速低于某个阈值时,转速已经降为 0。

### 3.2 反接制动

反接制动是利用反接工作绕组对应开关管的方式,实现电特性的制动:对图 2 的驱动电路,在发出制动信号的时刻,对工作的绕组切换桥臂上下的开关管<sup>[5]</sup>。

此时,电源的正负极与电机线圈产生的反电动势方向相反,绕组的电流迅速减小到 0。然后,电流反流,产生更强的制动转矩<sup>[7]</sup>。

反接制动能够使电机制动过程更加迅速,但在制动初期,反电动势与电源电压的叠加,如果电机转速较高容易造成绕组上流过的电流过大。因此反接制动时,电机转速不宜过高。

### 3.3 回馈制动

反接制动时,电源提供能量转化为制动力矩动能。而回馈制动,是将动能转化为电能的过程<sup>[8]</sup>。

回馈制动,要提供比电源更高的电压幅值,实现“充电”。而不受控制时,两相绕组反电势的幅值是低于电源电压的,需要通过绕组电感特性设计升压斩波电路来升压。具体原理是,半桥电路中的三个开关管始终截止,而另外半桥中的三个开关管通过 PWM 波控制。对于受控半桥的绕组回路, PWM 导通的时间内电感储能; PWM 切断时,绕组电流不能突变,产生自感电势。控制 PWM 的占空比,能使自感电势超过电源电压<sup>[9-10]</sup>。

回馈制动不会消耗电源能量,并且在电机转速较高时具有良好的制动效果,适合电机高转速时制动<sup>[11]</sup>。

## 4 BLDC 制动过程建模仿真

根据 BLDC 受控制动的原理,搭建闭环控制的电机调速系统,研究比较不同制动方式的效果差异。

### 4.1 转速-电压双闭环控制

通过多闭环控制,可以使无刷直流电机获得更好的控制精度。仿真中,搭建“转速-电压”的双闭环 BLDC 控制系统,其原理如图 3 所示。

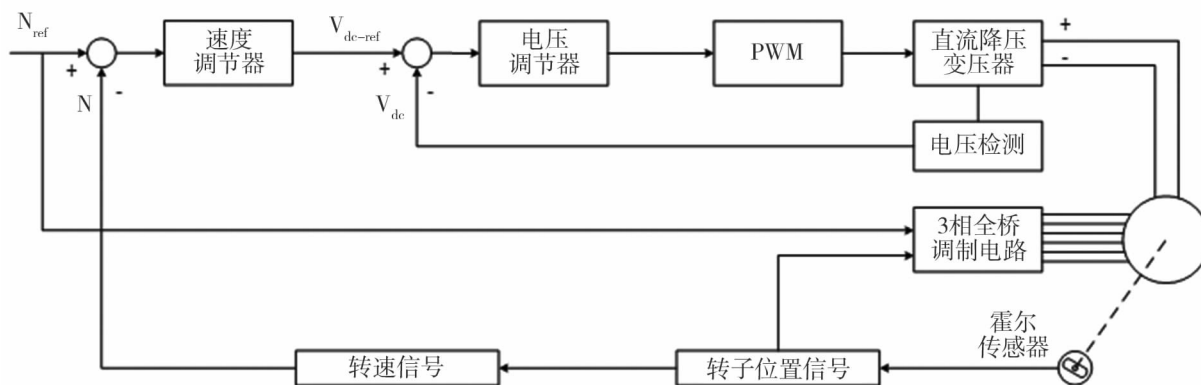


图 3 无刷直流电机闭环控制原理

电机转动时,速度调节器比较实际转速  $N$  与目标转速  $N_{ref}$  的差值,然后通过 PI (比例-积分) 调节,输出电压控制环的目标电压值  $V_{dc-ref}$ , 与采集到的电机电枢电压  $V_{dc}$  比较后,电压调节器通过 PI 调节进行校正和放大,然后输出的信号通过 PWM 波发生器,输出合适占空比的方波信号。PWM 输出的方波信号不直接作用于 BLDC 的桥臂上的功率开关器件,而是用于直流降压变压器内部的开关控制,实现 BLDC 供电电压的调制。

在电机控制的反馈环节上,由霍尔传感器提供

转子的位置信息,一方面用于测算电机转速,另一方面为全桥驱动电路提供换相信号。电枢实时电压检测后的结果还要经过低通滤波。

搭建的 BLDC 转速调节模型如图 4 所示,设定电机空载运行,仿真获得的转速曲线如图 5 所示。

建模仿真时,用符号表示转速的正/反向,绝对值表示转速大小。从图 5 中可以发现,在电机转速上升阶段,闭环 PI 调节后具有较好的跟随性能。但是在目标转速下降时,双闭环控制器无法使电机快速减速制动,存在明显的滞后。

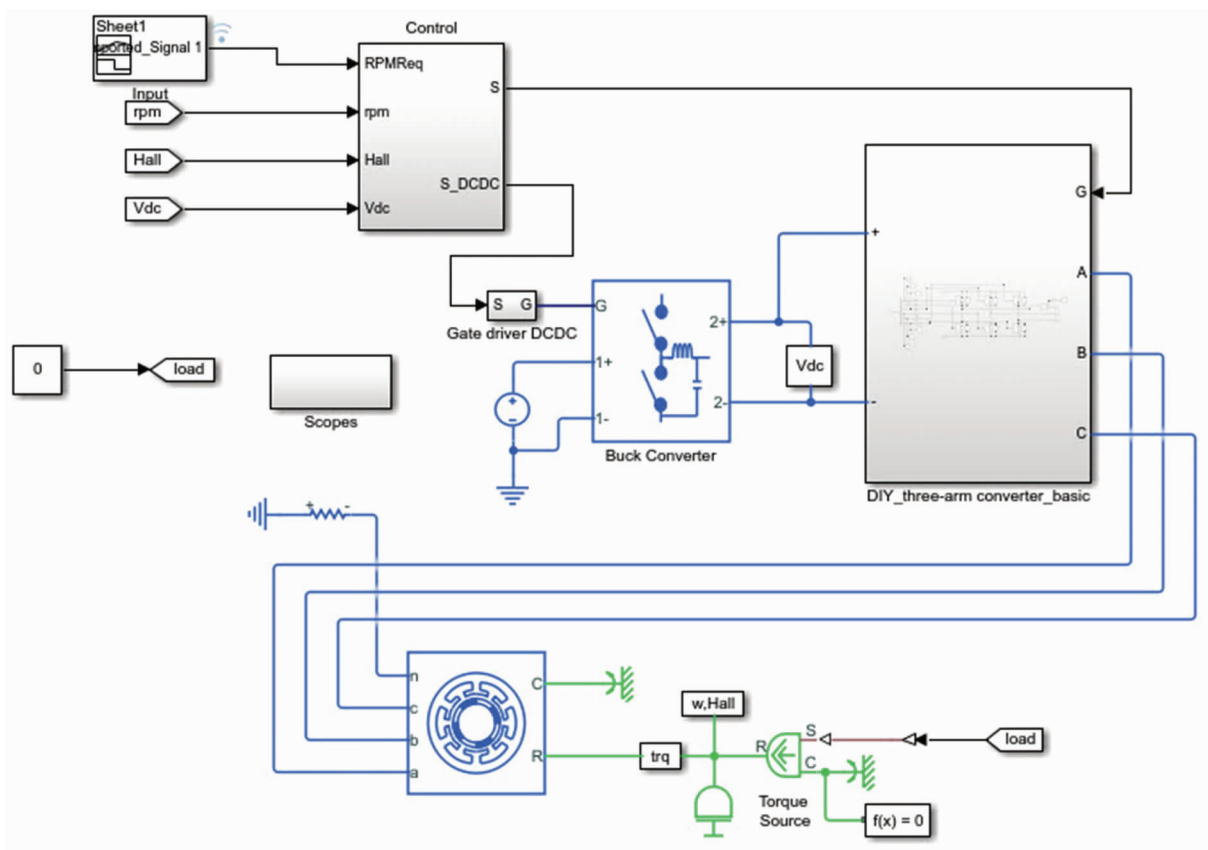


图 4 无刷直流电机转速调节模型

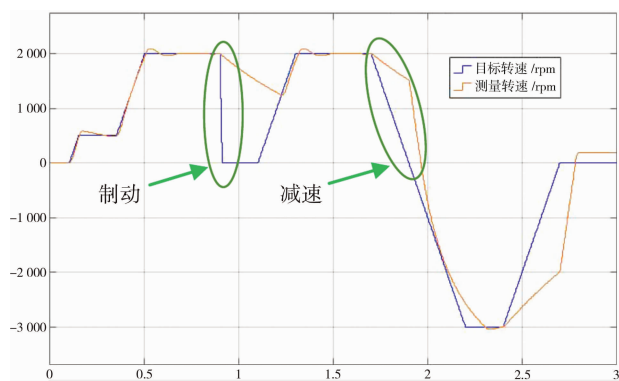


图 5 转速控制曲线

当目标转速某一时刻降至 0 附近,可以视作电机的制动过程,此时速度调节器与电压调节器输入端的偏差比较信号很大,使调节器进入了饱和状态,表现为电压调节器输出最小电压值,相当于无刷直流电机直接断电,电枢绕组没有电流流过,转子在自身惯性作用下继续转动,主要依靠机械摩擦减速。而对于减速调速的过程,电枢电压没有完全消失,闭环控制的调节器未进入饱和状态,此时电枢电压的 PI 控制,会与机械摩擦叠加作用,加快转子减速过程。

对于舱室排气阀门,电机处于频繁的正反转指令切换中,因此提高电机的减速制动性能对于提高阀门动态特性至关重要。因此,下面研究对 BLDC 的驱动电路进行优化。

#### 4.2 无刷直流电机反接制动

这里首先对减速和制动过程进行定义:对转速绝对值,如果下降速率低于 3 000 rpm/s,则触发电机的“Brake”信号。满足以下条件之一,则退出制动过程,“Brake”信号重置:

- 1) 电机速度降至 50 rpm 以下;
- 2) 电机开始加速。

在图 4 的仿真模型中,增加“Brake”信号,用于切换电机的正常调速和制动控制过程。对于全桥控制电路,模型采用如图 6 的搭建方法,用来实现制动瞬间的桥臂开关管状态切换。

在图 6 中,每个开关管均由专门的信号控制通断。当“Brake”信号为重置状态时,桥臂由控制器进行调速控制。当“Brake”信号触发时,调速信号不再参与开关管控制,桥臂信号采用的判断逻辑如图 7 所示。

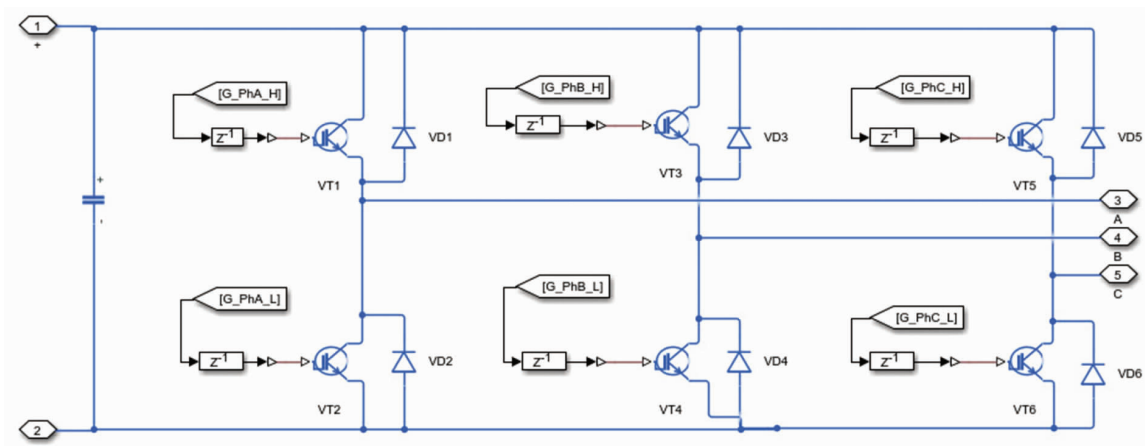


图 6 反接制动的桥臂电路模型

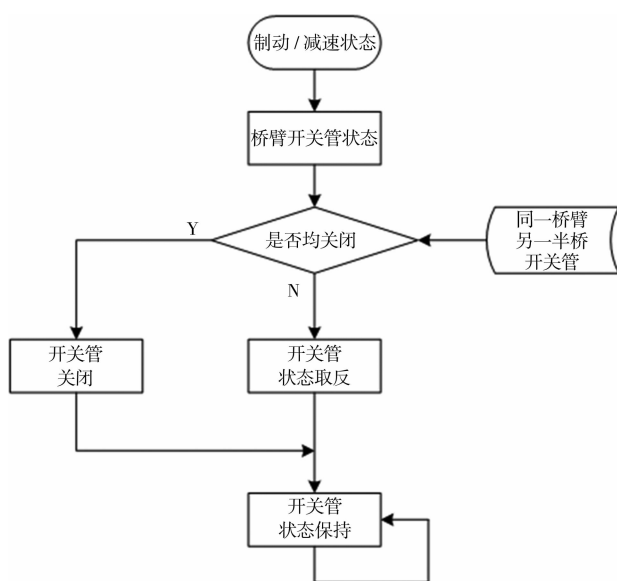


图 7 反接制动的开关管判断逻辑

将桥臂驱动电路增加反接制动相关的条件判断逻辑,其余仿真条件与图 4 的模型一致,获得的电机转速曲线如图 8 所示。

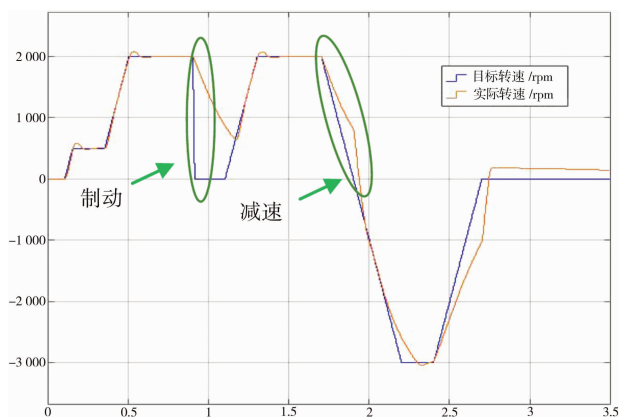


图 8 反接制动-调速曲线

对比图 5 和图 8,可以看出在目标转速的制动和减速阶段,无刷直流电机的减速效果明显。

### 4.3 无刷直流电机回馈制动

采用与 4.2 节相同的“Brake”信号定义。仿真时采用半桥斩波的方式,其核心控制逻辑是对全桥桥臂电路的上半桥开全管截止,下半桥的开关管通断,取决于制动前一刻的上半桥是否导通——如果导通,则在“Brake”信号触发期间,采用 PWM 波控制下半桥臂导通,否则保持下半桥臂始终截止。下半桥臂开关管的控制模型如图 9 所示。

其中,为了检测电机制动时各相的桥臂开关管的通断情况,并在制动控制期间保持,使用了由代码独立编写的“ManageResetSet”模块,作用是检测到上半桥臂开关管打开时,模块保持输出为 True 逻辑,直到“Brake”信号变成 False,使模块重置,输出变为 False。然后通过一个 PWM 波生成模块使得在制动控制期间,下半桥臂的开关管受控开或关。

在桥臂电路中,在电机供电电源端并入一个电容,用于模拟对电源的充电。如果检测到电容两端,随着 PWM 波的周期有明显的充电-放电过程,则认为回馈制动是有效的。

理论上,升压后作用在电容两端的电压为:

$$U_f = \frac{2E}{1-D} \quad (1)$$

式中,  $U_f$  为升压阶段,作用在电源端的电压, V; E 为每相绕组电感的反电动势, V; D 为 PWM 波的占空比(0~1)。

由式(1)可以看出,开关管的 PWM 波占空比越大,对电源端产生的升压越高,但是同时也说明了,如果反电动势不够大,则有可能升压  $U_f$  小于电源的

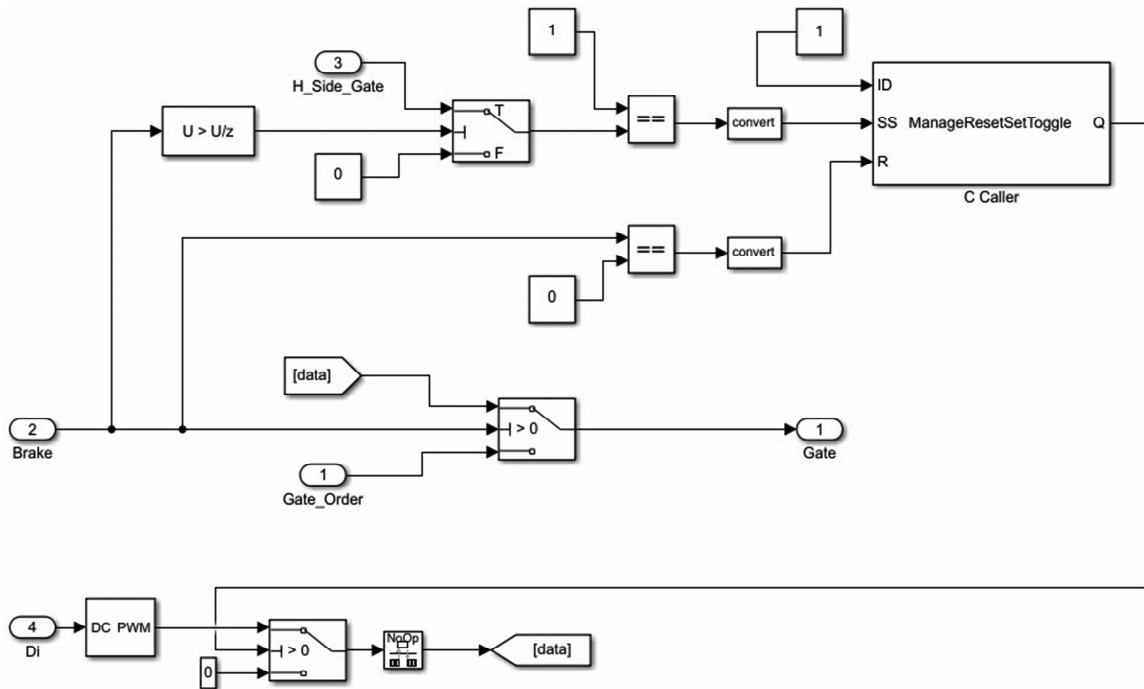


图9 半桥回馈制动-开关管控制

电压值,无法实现有效的回馈制动。

对于图3所示的转速-电压双闭环控制BLDC调速系统,在4.1节已经分析过,制动或减速阶段,经过电压调制环节,实际给到电机的电压很小,因此如果采用较大的占空比,理论上是能实现回馈制动的。这里,选取与4.2节相同的目标转速和转矩条件,并设置半桥开关管的PWM信号占空比为0.9,进行回馈制动控制方式的调速仿真,获得的转速曲线如图10所示。

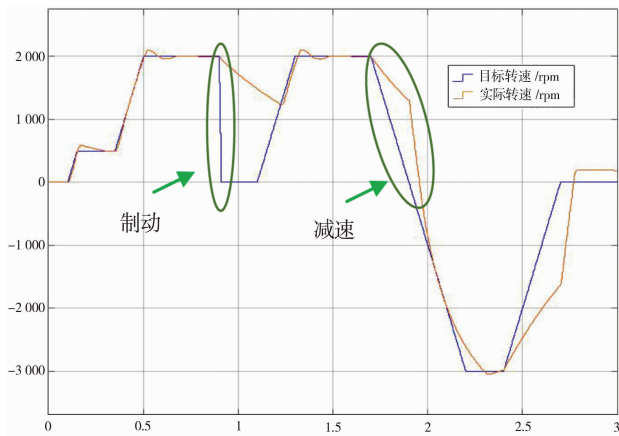
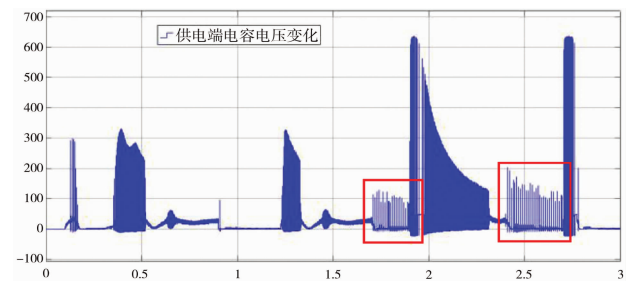


图10 回馈制动-调速曲线

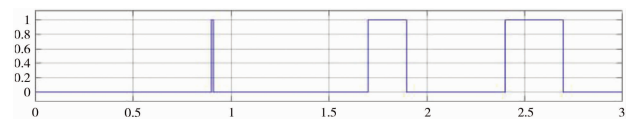
从图10的实际转速来看,对比图5电机的非受控减速过程,有了一定的制动效果,但是对比图8的

反接制动,制动速度明显变慢。分析原因如下:

1)反接制动过程,桥臂电路的上下桥臂开关管均参与了制动过程,通过电源的反接,输入电能用于抵抗电枢产生的反电动势,效果明显。而回馈制动过程,桥臂电路仅一个开关管参与制动过程,并且是一种被动的能量转换。电容端的电压变化如图11所示,有电压有明显的梳齿状充放电变化,证明实现了回馈制动。同时,回馈制动主要在PWM波使开关管截止时才能对电容充电,占空比越大,升压效果越明显,但是充电时间也短,使电压上升有限。



(a) 电容端电压变化



(b) “Brake”信号

图11 回馈制动-电容电压变化

2) 在仿真中,由于电机绕组的供电是由直流减压变压器实现的,在输出侧同样有一个电容,因此实际升值会受限于变压器的输出侧电容。

3) 在式(1)中给出了升值与反电动势的关系,而反电动势取决于制动时的转速。在高速时制动,回馈制动有较好的效果。

## 5 结论

本文对舱室排气阀门的作动设备——无刷直流电机,研究了其制动和减速过程的电特性,并通过仿真的方法,对速度-电压双闭环控制的 BLDC,进行了制动过程仿真研究。

仿真中,反接制动表现出了更快的“刹车”效果;但是在实际应用中,如果电机转速较高,反接制动接入的瞬间容易造成绕组上流过的电流过大,产生发热严重。相反,从回馈制动的原理上,电机转速较高时,反电动势较大,向电源端回馈电压也大,制动效果明显。因此建议在工程应用中,将两种制动方式结合,同时考虑无刷直流电机和控制电路的特性,选择合适的转速阈值,在较高转速下采用回馈制动,较低转速下采用反接制动。

对于舱室排气阀门,工作时具有频繁正反转切换的特点,考虑到排气阀门内部有机械减速机构,为了提高电机的使用寿命,防止电气元件的损耗,也可以考虑在电机转速较低时,切断电气控制,由阀门自身的摩擦实现机械制动减速。

### 参考文献:

[1] 谭建成,邵晓强. 永磁无刷直流电机技术[M]. 第二版. 北京:机械工业出版社,2019:1-17.

- [2] 高晗璿. 电机控制[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学工业出版社,2018:89-99.
- [3] ZHANG Q, LIN C P. Backstepping adaptive neural network control for electric braking systems of aircrafts[J]. Algorithms,2019,12(10):215.
- [4] 夏长亮,方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报,2012,(3):25-34.
- [5] 曹彦飞. 永磁无刷直流电机转矩控制策略研究[D]. 天津:天津大学,2019.
- [6] 刘佳伟,常振业,闫茜茜,等. 无刷直流电机全电子再生制动能量回收系统的设计[J]. 自动化与仪器仪表,2019(12):9-12.
- [7] 胡庆波,郑继文,吕征宇. 混合动力中无刷直流电机反接制动 PWM 调制方式的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):87-91.
- [8] 苏玉青. 汽车制动能量回收系统控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [9] 刘硕洋. 永磁无刷直流电机回馈制动控制技术[D]. 长沙:湖南大学,2013.
- [10] 边春元,段鹏飞,肖鸿权,等. 一种用于无刷直流电机回馈制动的 PWM 调制方式[J]. 中国电机工程学报,2019,39(17):5247-5256;27.
- [11] 向楠. 基于模糊神经网络的无刷直流电机再生制动控制系统研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2019.

### 作者简介

左泽轩 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机环控系统控制器软硬件及控制律。E-mail: zuozexuan@comac.cc

薛战东 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机环控系统控制和机载软件适航。E-mail: xuezhandong@comac.cc

张瑶 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机环控系统控制软件。E-mail: zhangyao@comac.cc

## Braking control of brushless direct current motor for outflow valve of civil aircraft cabin

ZUO Zexuan\* XUE Zhandong ZHANG Yao

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** For civil aircraft, the cabin pressure is kept in target range through adjusting outflow valve aperture. The actuator of the outflow valve can be driven by a brushless DC motor (BLDC) in manual mode. Since the command of the outflow valve is frequently switched between opening and closing, the BLDC operates with a “forward-reverse” cycle of rotational speed and requires frequent braking during the direction change. In order to improve the speed response of BLDC, this paper focuses on the control process of BLDC reverse braking and feed-back braking. Firstly, a BLDC speed regulation system with dual-closed-loop “speed-voltage” control was designed to achieve an ideal speed-up process by simulating the forward and reverse switching of the target speed. Then control model of the driving circuit was designed according to the BLDC braking principle, and the effects of two different braking methods were compared. Finally, a reasonable braking strategy was proposed in combination with the working environment of outflow valve.

**Keywords:** brushless direct current motor(BLDC); brake; valve; control; simulation

---

\* Corresponding author. E-mail: zuozexuan@comac.cc