

设计应用

PWM 调速对直流电机运行特性的影响研究

作者：余松科，方 方，李 婷

发布日期：2016-02-06

来源：2015 年微型机与应用第 13 期

摘 要： 直流电机 PWM 调速实质是利用电力半导体器件的开关特性控制直流电源的开通与关断时间来改变电机两端电压的大小，从而实现调速。但电机两端电压的变化不仅会改变转速，而且也会对电机转矩、机械特性造成影响。为了研究电机 PWM 调速对电机运行特性的影响，搭建了直流电机驱动电路进行实验，并根据实验数据的分析计算，得出 PWM 波影响直流电机运行特性的规律。

关键词： PWM 调速；直流电机；运行特性、

0 引言

PWM 即脉冲宽度调制，PWM 调速就是在固定的频率下，通过控制电力半导体器件在一周期内的开通与关断时间，调整直流电机两端的电压大小，从而调节电机转速[1]。PWM 调速具有控制方便、调速平滑、响应速度快等优点，因此在直流电机调速领域中被广泛采用[2-3]。PWM 调速主要靠电压的调整，而电压的变化对直流电机的转矩、机械特性也会造成影响。为研究这种影响的变化规律，设计直流电机驱动电路进行实验，通过调节 PWM 波的占空比和频率来进行对比试验，然后对实验数据分析计算，得到 PWM 调速对电机运行特性的影响。

1 直流电机运行特性

直流电机的运行特性主要包括转速特性、转矩特性、机械特性（转速-转矩特性）及效率特性。本文主要讨论前三种特性。

1.1 转速特性

转速特性是指在额定电压和额定电流的情况下，电机的转速 n 与电枢电流 I_a 之间的关系。

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (1)$$

式中， C_e 为电动势常数； Φ 为每一磁极总磁通量； U 为电枢端电压； I_a 为电枢电流； R_a 为电枢电路总电阻。

1.2 转矩特性

转矩特性是指在额定电压和额定电流下，电机的转矩 T_e 与电枢电流 I_a 之间的关系。

$$T_e = C_T \Phi I_a \quad (2)$$

式中， $C_T = \frac{60}{2\pi} C_e$ 为转矩常数。

1.3 机械特性

机械特性作为电机一个重要的特性，是指电机在额定电压和额定电流情况下，转速与转矩之间的关系。

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e = n_0' - \alpha T_e \quad (3)$$

式中， $n_0' = \frac{U}{C_e \Phi}$ 为理想空载转速， $\alpha = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$ 为机械特性斜率。

2 PWM 调速电路设计方案

根据直流电机的运行特性公式 (1) ~ (3) 可知, 直流电机的运行特性与 U 和 I_a 均有关。为准确分析 PWM 波对运行特性的影响, 直流电机驱动电路需采集电机的电流值和电机两端的电压值。总体设计框图如图 1 所示[4]。

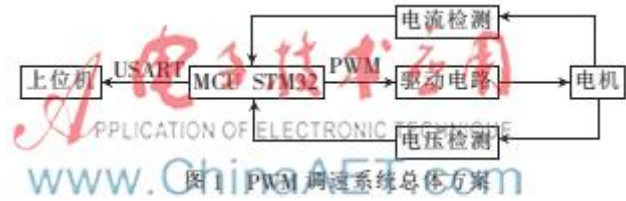


图 1 PWM 调速系统总体方案

2.1 驱动电路

驱动电路由 IR2110 驱动芯片和场效应管搭建的 H 桥电路组成。IR2110 是高电压、高功率 MOSFET 和 IGBT 驱动芯片, 具有独立的高端和低端输出通道, 其高压侧可承受 $500\text{ V} \sim 600\text{ V}$ 的电压[5]。图 2 为 H 桥驱动电路, MOSFET 选用 IRF540, 自举电容为 $0.47\text{ }\mu\text{F}$, 自举二极管为 1N5819。电机的控制信号为 PWM1、PWM2, 分别接 STM32 的 PB12、PB13。其中 PWM1 为正转控制信号, PWM2 为反转控制信号。PWM1 和 PWM2 同时输入时为能耗制动。

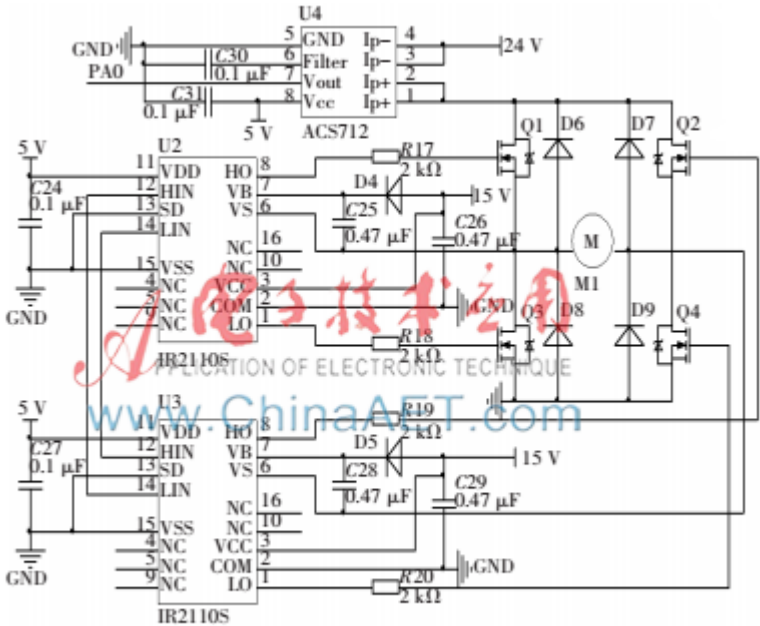


图 2 H 桥驱动电路

2.2 电流、电压检测电路

驱动电路电流检测选用线性电流传感器 ACS712，该器件输出电压与检测的电流有很好的线性[6]，将该芯片串接在 H 桥与电源之间，如图 2 所示。系统中 ACS712 输出与 STM32 的 PA0 相连。电压检测选用电阻分压的方式，将电机两端电压接 10 $k\Omega$ 和 1 $k\Omega$ 电阻接地，用 STM32 的 PA1 端口采集两电阻之间的电压。

2.3 STM32 及上位机

STM32 用于输出 PWM 波以及电机的电流、电压采集与转换，并将数据通过串口输出。测试中上位机为 PC，选用串口调试助手作为上位机软件。

3 数据采集

PWM 波主要参数为占空比和频率，为确保结果准确可靠，分别进行恒定频率不同占空比和恒定占空比不同频率实验。实验选用正科 ZYTD-60SRZ 的 24 V/36 W 永磁式电机，其空载转速 2 000 r/min，空载电流为 0.23 A。

3.1 恒定频率不同占空比

实验中 PWM 输出的频率不变，占空比逐渐增加，从上位机得到电机的电流值和电压值。为排除误差引入的干扰，得到准确的数据，选择 3 个不同频率进行实验。图 3 为不同频率下电机两端的电压变化曲线，表 1 为不同频率下电机的电流值。

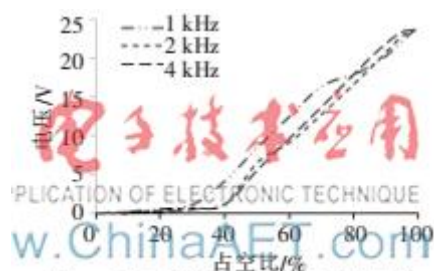


图 3 不同频率下输出电压变化曲线

表 1 不同频率下电机的电流值 (单位:A)

频率	占空比/%															
/kHz	1	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	85	90	95	99	
1	0.03	0.03	0.05	0.05	0.07	0.15	0.20	0.26	0.28	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.28	
2	0.06	0.05	0.07	0.06	0.08	0.11	0.13	0.15	0.20	0.23	0.21	0.26	0.22	0.24	0.25	
4	0.04	0.07	0.06	0.05	0.09	0.10	0.12	0.15	0.14	0.20	0.21	0.21	0.24	0.28	0.29	

由实验可知，在频率恒定，占空比达到一定值时，电机两端电流才会受到占空比的影响。且电机两端的电压与占空比呈线性关系变化。电机电流随占空比增加而增大，低占空比时增加缓慢，占空比达到一定值后电流快速增加，之后趋于稳定。

3.2 恒定占空比不同频率

为使数据准确可靠，选择占空比分别为 10%、30%、50%、70%、90%、99%进行实验。实验过程中，占空比不变，频率由低到高逐渐增加，得到电机的电流值和电压值，绘制图表如下。图 4 为恒定占空比下电机两端的电压变化曲线，表 2 为恒定占空比下电机的电流值。

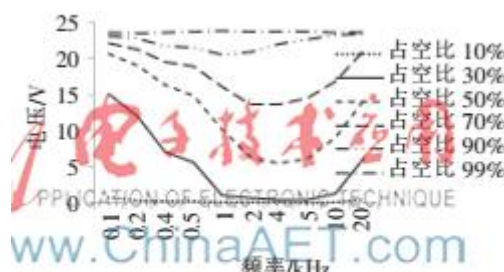


图 4 恒定占空比下输出电压变化曲线

表 2 恒定占空比下不同频率电机的电流值 (单位:A)

频率	占空比/%					
/Hz	10	30	50	70	90	99
100	0.12	0.23	0.26	0.31	0.22	0.26
200	0.1	0.25	0.3	0.27	0.23	0.24
400	0.04	0.19	0.34	0.3	0.22	0.23
500	0.07	0.15	0.22	0.25	0.22	0.24
1 k	0.07	0.15	0.21	0.22	0.22	0.23
2 k	0.07	0.09	0.19	0.22	0.25	0.24
4 k	0.07	0.09	0.19	0.2	0.24	0.23
5 k	0.07	0.11	0.17	0.2	0.24	0.24
10 k	0.07	0.19	0.18	0.2	0.25	0.21
20 k	0.07	0.21	0.24	0.24	0.27	0.24

由上述实验可知，在低占空比的情况下，频率对电机两端电压影响较大，而高占空比时，影响则小得多。但是低频时，电机运行会产生抖动，且噪声较大；高频时则运行平稳，且噪声小。该实验中，电机在 1 kHz 时运行平稳，噪声小。电机的电流与电压的变化规律几乎一致，且在同一频率下的电流变化正好印证了恒定频率不同占空比的实验。

4 验证实验

为了验证实验结果的正确性，便于对电机运行特性进行分析。选用强磁 24 V 直流电机验证。其结果如表 3、表 4。

表 3 频率为 1 kHz 时电机电流电压与占空比的关系

参数	占空比/%																
	1	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	85	90	95	99		
电流/A	0.07	0.08	0.27	0.4	1.26	1.17	1.66	1.7	1.78	1.66	1.52	1.45	1.7	1.57	1.74		
电压/V	0.0	0.1	0.2	1.9	15.0	18.5	20.1	21.1	21.6	22.0	22.1	22.1	22.1	22.2	22.2		

表 4 占空比 50% 时电机电流电压与频率的关系

参数	频率/kHz												
	100	200	400	500	1k	2k	4k	5k	10k	20k	37k	68k	
电流/A	1.31	1.26	1.35	1.28	1.74	1.69	1.41	1.26	1.63	1.28	1.54	1.5	
电压/V	14.7	17.9	20.3	20.6	21.1	20.1	18.5	17.9	16.1	15.2	19.5	19.8	

由表 3、表 4 的数据可得到与上述实验相同的结果，因此，可得到实验结果如下：

- （1）占空比达到一定值，电机两端电压才会增加，且与占空比近似线性；
- （2）电流在低占空比时电流较小，达到一定值时电流迅速增大，接近额定电流时，趋于稳定；
- （3）电机在低频运行时，会有抖动且噪声大，高频时运行平稳、噪声小；
- （4）频率对电机两端电压的影响与占空比有关，占空比高则影响小，占空比低则影响大；

(5) 电机的电流变化与电压的变化趋势大体一致。

5 运行特性分析

由实验可知，用 PWM 波控制电机时，占空比为影响电压、电流的主要因素，因此需要讨论占空比对运行特性的影响。该 24 V/36 W 直流电机的额定空载转速 $n'_0 = 2\,000\text{ r/min}$ ，可得：

$$C_e\Phi = \frac{24}{2\,000} = 0.012$$

$$\text{由 } C_T = \frac{60}{2\pi} C_e \text{ 可得：}$$

$$C_T\Phi = \frac{60}{2\pi} C_e\Phi = \frac{60}{2\pi} \times \frac{3}{250} = \frac{18}{50\pi}$$

在对电机运行特性进行分析时，可认为 $C_e\Phi$ 、 $C_T\Phi$ 恒定不变，则 $\alpha = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$ 也为定值。

将数据进行运算得到该直流电机运行特性随占空比的变化曲线，如图 5~7 所示。



(1) 转速特性

根据转速公式 (1)，在低占空比时，由于电压和电流变化较小，电机转速很小，当占空比超过一定值时，电压和电流均升高，在这一阶段转速开始上升，在占空比较高时，电机的电流和电压接近额定值，这时转速缓慢上升，直到达到最大值。

(2) 转矩特性

根据转矩公式（2），转矩主要由电机电流决定，因此转矩的变化趋势与电机电流相似，在低占空比时，转矩很小，随着占空比增加转矩也增加，在高占空比时，转矩逐渐趋于稳定。

（3）机械特性

由公式（3）可知，电机的机械特性与转速和转矩有关，计算时设空载转速为定值，因此机械特性主要决定因素为转矩。在低占空比时，转矩很小，机械特性最好，随着占空比增加转矩增加，机械特性逐步减小，在高占空比时，转矩逐渐趋于稳定，机械特性也趋于稳定。

6 结论

通过搭建直流电机驱动电路，分析 PWM 波的占空比、频率对直流电机两端电压和电流的影响，得出相关数据并进行分析得到一般性结论，然后验证结论的正确性。根据实验结论和直流电机运行特性的相关计算公式，分析电压、电流的变化对运行特性的影响，从而得到脉宽调制对直流电机运行特性的影响。

（1）PWM 波的占空比对运行特性的影响：电机转速与转矩变化趋势相似，在低占空比时，转速和转矩很小，当占空比超过一定值时，转速和转矩增加，在高占空比时，转矩逐渐趋于稳定；而机械特性在低占空比时最好，随着占空比增加机械特性逐步降低。

（2）PWM 波的频率对运行特性的影响：随着频率增加电机运行的抖动和噪声减小，但综合硬件设计，使用 PWM 控制电机时，应选取合适的频率。

参考文献

[1] 何存富，周龙，宋国荣，等. 基于 DSP 的直流电机驱动控制电路设计[J]. 测控技术，2007（1）：64-67.

[2] 解恩, 王璞. 一种新颖的直流电机 PWM 调制方式[J]. 电机与控制应用, 2012 (11): 29-32.

[3] 焦玉朋. 基于 51 单片机的 PWM 直流电机调速系统[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.

[4] 杨学存, 杨战社, 孔令红. 基于 ARM 的嵌入式直流电机 PWM 调速系统设计[J]. 煤矿机械, 2012 (4): 255-257.

[5] 伍洲, 方彦军. IR2110 在电机驱动器设计中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2008 (11): 88-90.

[6] 董建怀. 电流传感器 ACS712 的原理与应用[J]. 中国科技信息, 2010 (5): 92-93, 96.

原创声明: 此内容为 AET 网站原创, 未经授权禁止转载。

[PWM 调速](#) [直流电机](#) [运行特性](#) [占空比](#)

[AET 有奖征文——招募民间学术大神](#)

[电子技术应用杂志过刊一览](#)

[2023 中国（大湾区）工业互联网发展与安全峰会](#)

[《电子技术应用》全年合订本-电子版](#)

[点击了解 2023 年中国新能源汽车现状](#)



长按关注电子技术应用
获得更多资讯

Copyright © 2005-2020 《电子技术应用》版权所有 京 ICP 备 10017138 号

×

拖拽到此处完成下载

图片将完成下载

AIX 智能下载器

