

驱动电压过冲对舵控系统传导 EMI 影响及抑制

王 壮, 吕 弘, 陈 畅

(南京模拟技术研究所, 江苏 南京 210016)

[摘要] 无人机舵机控制系统广泛采用脉宽调制技术驱动电动舵机, 其驱动电路为 MOSFET 构成的桥式逆变电路, 工作中出现的门极驱动电压过冲现象, 将影响整个舵控制系统的传导 EMI 发射. 针对这一问题, 首先分析了驱动电压过冲机理及对系统的 EMI 影响, 然后提出了在驱动电路电源端加电容来抑制电压过冲. 最后, 结合仿真和实验分析, 证明了该措施抑制 EMI 噪声的有效性.

[关键词] 舵控系统, 门极驱动电压, 过冲, 噪声抑制

[中图分类号] TM464 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2019)04-0044-05

Influence and Suppression of Conducted EMI from Drive Voltage Overshoot on the Actuator Systems

Wang Zhuang, Lü Hong, Chen Yang

(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 20016, China)

Abstract: The actuator systems of UAV use PWM technology to drive electromechanical actuators, the drive circuit is to bridge inverter circuit composed of MOSFET. Drive voltage overshoot occurs during driving process, which can contribute conducted EMI emissions to the entire systems. To solve this problem, the mechanism of drive voltage overshoot and EMI to the actuator systems is analyzed firstly. Then, a method is proposed to add a capacitor at the power supply end of the driver circuit to suppress voltage overshoot. Finally, with the combination of simulations and an experiment, the effectiveness of the EMI suppression method is verified.

Key words: actuator systems, gate drive voltage, overshoot, noise suppression

无人机舵机控制系统由舵机控制器和驱动电路组成, 本文所研究的舵机驱动机构采用无刷直流电机. 该无刷直流电机通过 PWM 技术进行调制, 控制器控制 PWM 信号的产生, 为功率器件提供信号脉冲. 由于采用 PWM 技术, 驱动电路中功率器件高频开关动作会在电路中产生高 du/dt 和 di/dt , 在引起较大 EMI 噪声的同时, 可能给反馈信号及控制回路带来恶劣影响. 国外 Guttowski S, Zverev I 等学者提出了逆变器驱动电路产生的 EMI 噪声, 该方法不仅与开关过程中的门极驱动电压有关, 还与开关管门极杂散电容有很大联系^[1-5]. 同时国内学者们也分析了 PWM 电机驱动系统的 EMI 噪声机理, 并建立了逆变器共模电磁干扰模型^[6-7]. 上述国内外文献均讨论了 PWM 驱动电路中整体的 EMI 噪声, 然而忽视驱动电压过冲是控制系统一个重要传导 EMI 噪声源. 本文着重分析驱动电压过冲产生机理, 单独分析了驱动电压过冲对舵机控制系统传导 EMI 的影响, 提出了消除门极过冲、延缓脉冲上升沿来抑制 EMI 噪声的措施, 仿真分析和实验测试对所提出的方法进行了验证.

1 功率器件门极电压过冲

舵机控制系统逆变电路是由六只 MOSFET 构成的三相桥式电路^[8] (如图 1 所示), 控制器提供 PWM 波驱动功率 MOSFET, 驱动脉冲在低电平到高电平时会出现过冲现象, 实测门极驱动电压过冲如图 2 所示. 为分析门极驱动电压过冲现象, 建立如图 3 所示门极驱动电路模型, 其中 V_1 为 5 V 的电压源, L_1 和 L_2

表示导线上的寄生电感, R_1 和 R_3 分别为其寄生电阻, R_2 为门极信号线的等效电阻, C_3 代表了 MOSFET 的门极与源极之间的等效电容^[9-10].

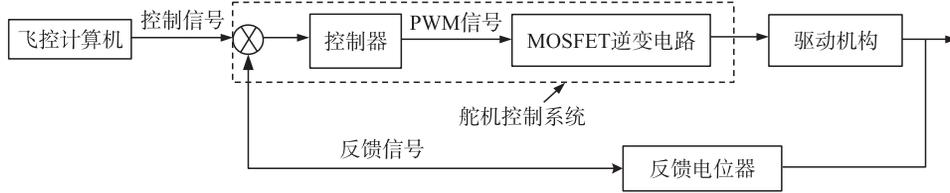


图 1 舵控系统结构图

Fig. 1 Actuator system structure diagram

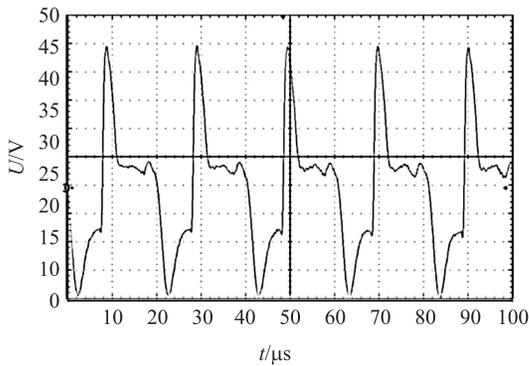


图 2 MOSFET 驱动电压过冲

Fig. 2 MOSFET drive voltage overshoot

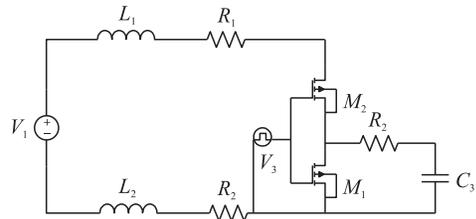


图 3 门极驱动等效模型

Fig. 3 Equivalent model of drive output

根据控制信号 V_3 的电平高低可以将驱动电路分为两种状态,其等效电路如图 4 所示. 图 4(b) 中, 开关开启后门极电容放电, 不会产生过冲. 而在图 4(a) 中, 电感、电阻和电容处于串联连接的, 在某些情况下就会产生振荡, 致使驱动电压由低电平上升到高电平时产生电压过冲, 将会造成系统 EMI 发射问题.

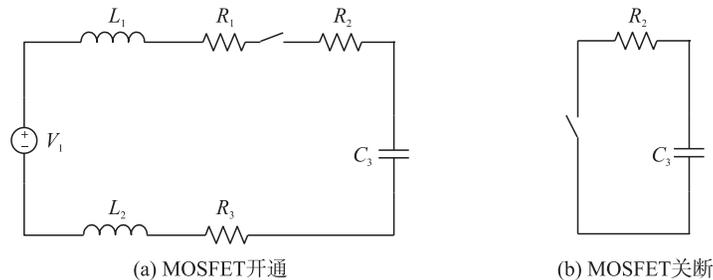


图 4 MOSFET 开通和关断时的模型

Fig. 4 Models when MOSFET open or shut down

2 PWM 驱动电压过冲对传导 EMI 噪声的影响

根据传导 EMI 噪声检测方法^[11], 由 PWM 驱动信号过冲引起的传导 EMI 噪声可以表示为

$$U = 20 \lg U_1 + 140. \quad (1)$$

式中, U 为 PWM 控制信号引起的传导 EMI 噪声, 单位为 $\text{dB}\mu\text{V}$; U_1 为 PWM 过冲电压, 单位为 V .

由图 2 可以看出, 驱动电压过冲局部形状同三角波相似, 为了研究 PWM 脉冲信号过冲对传导 EMI 噪声的影响, 本文构建 3 组三角波来模拟 PWM 驱动过冲电压. 通过选取不同幅度和上升时间分析 PWM 波信号过冲对传导 EMI 的影响. 三组过冲电压的上升沿时间为 1 ms 、 $1 \mu\text{s}$ 、 $0.1 \mu\text{s}$, 如图 5(a)、图 6(a)、图 7(a) 所示, 其过冲电压峰值选取 5 V 和 10 V 用于对比. 利用仿真软件分别对不同幅度和上升沿的 PWM 驱动电压过冲进行仿真, 其仿真频谱选取 $10 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$.

仿真结果如图 5、图 6、图 7 所示, 对比不同上升沿的 EMI 噪声可知, 过冲电压上升沿越陡, 其引起的传导 EMI 噪声越大. 对比不同幅值的过冲电压可知, 幅值越大, 造成的传导 EMI 噪声也越大.

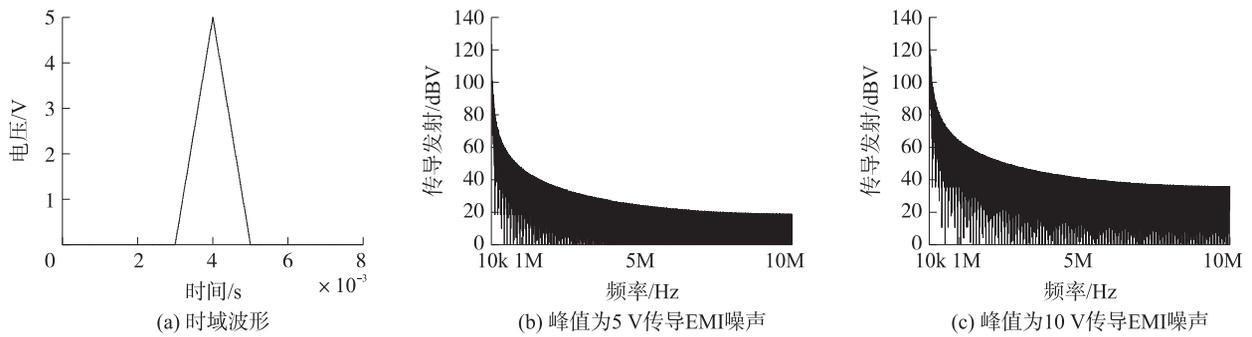


图 5 驱动电压过冲(上升沿 1 ms)

Fig. 5 Drive voltage overshoot(The rising edge is 1 ms)

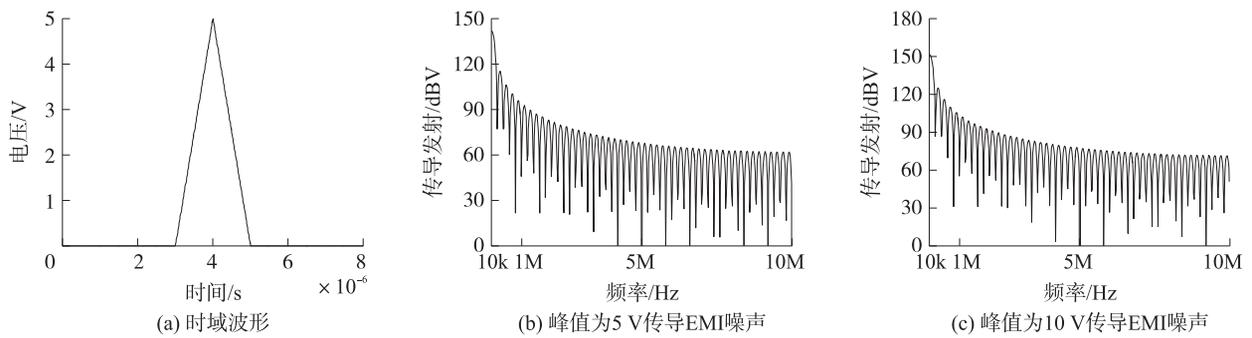


图 6 驱动电压过冲(上升沿 1 μs)

Fig. 6 Drive voltage overshoot(The rising edge is 1 μs)

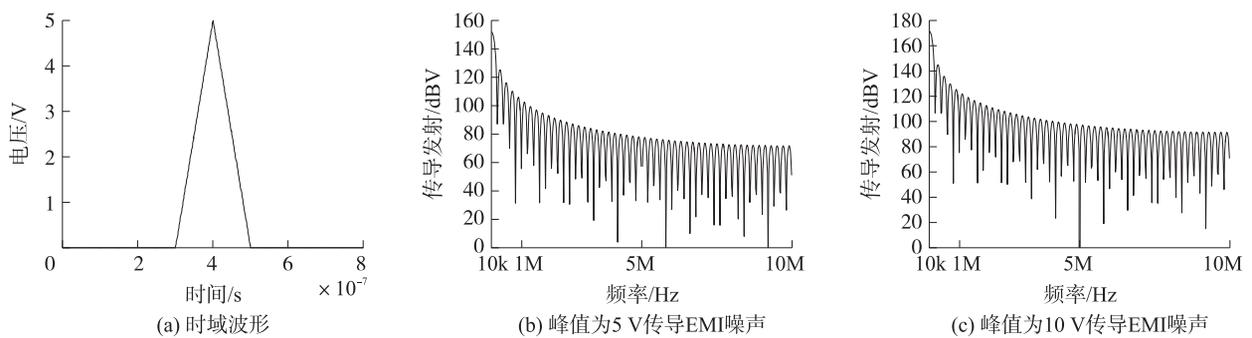


图 7 驱动电压过冲(上升沿 0.1 μs)

Fig. 7 Drive voltage overshoot(The rising edge is 0.1 μs)

3 EMI 噪声的抑制

前面提出 MOSFET 驱动信号由低电平升为高电平会出现电压过冲,图 4(a)的等效电路经过拉普拉斯变换得到如图 8 所示的简化等效电路^[11].

由图 8 可推出驱动电压的表达式为

$$U_c(s) = \frac{U}{s} \frac{\frac{1}{s}C}{sL+R+\frac{1}{s}C} = U \left(\frac{1}{s} - \frac{s+\frac{R}{L}}{s^2+\frac{R}{L}s+\frac{1}{LC}} \right). \quad (2)$$

如果 $R \leq 2\sqrt{L/C}$, $U_c(s)$ 通过拉普拉斯逆变换可以写成

$$U_c(t) = L^{-1}[U_c(s)] = U \left(1 - e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) - \frac{R}{2L\omega} e^{-\frac{R}{2L}t} \cos(\omega t) \right). \quad (3)$$

式中,

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}. \quad (4)$$

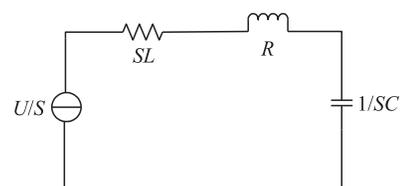


图 8 驱动电压为高电平时的等效模型

Fig. 8 Equivalent model when the drive voltage is high

进一步简化为

$$U_c(t) = U \left[1 - e^{-\frac{R}{2L}t} \sqrt{\frac{1}{1 - R^2 C / 4L}} \sin(\omega t + \varphi) \right]. \quad (5)$$

式(5)可以推出,当 $R \leq 2\sqrt{L/C}$ 时,驱动电压会形成振荡,引起过冲现象,从而造成 EMI 发射问题. 通过减小电容 C 的值可以起到抑制驱动信号电压过冲的现象,同时减缓 PWM 波的上升沿,起到抑制传导 EMI 发射的作用.

为分析 MOSFET 驱动电压 PWM 过冲对舵控系统传导 EMI 发射的影响,需测试系统仅控制部分通电的 EMI 频谱,如图 9 所示.

本文采用在驱动电路的供电端并联电容来抑制 PWM 驱动过冲,减缓上升沿,本文选用 $3.3 \mu\text{F}$ 电容,使得式(5)中的 $R > 2\sqrt{L/C}$ 过冲现象得到改善,加电容后的 MOSFET 驱动电压波形如图 10 所示. 再次测试仅给驱动电路供电情况下的 EMI 频谱,测试结果如图 11 所示,可以看到相比加电容前, $150 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ 频段内 EMI 噪声频谱有了明显的抑制. 可以看出对于该舵控系统, PWM 驱动过冲对于系统 EMI 发射主要贡献在 $150 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ 频段.

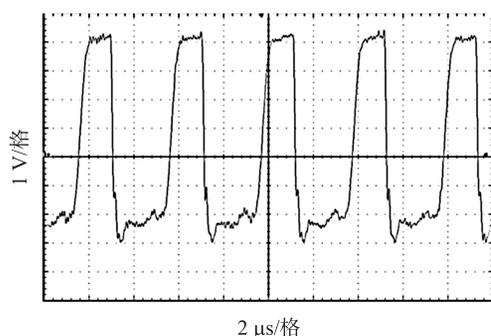


图 10 MOSFET 驱动电压波形(加措施)

Fig. 10 MOSFET drive voltage overshoot with measures

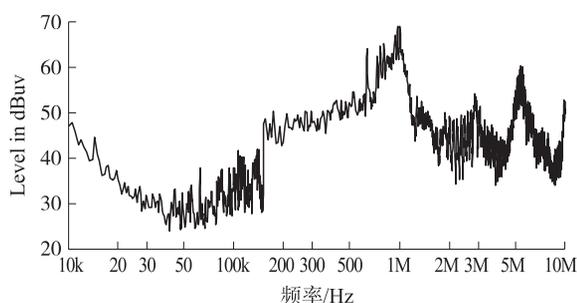


图 9 单独给控制电路供电

Fig. 9 Separate power to the control circuit

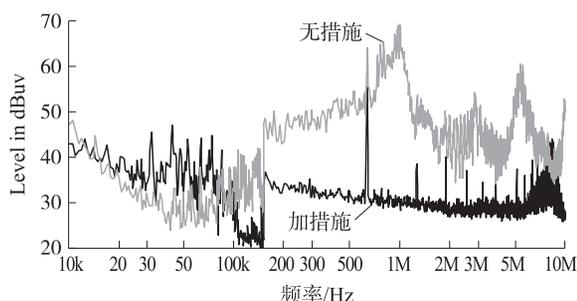


图 11 单独给控制电路供电(有无措施时对比)

Fig. 11 Separate power to the control circuit (Whether there is no comparison of measures)

4 结语

在舵控系统中, PWM 驱动电路是系统一个主要的 EMI 发射源,其 MOSFET 门极驱动电压过冲会在 $150 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ 频段引起较大 EMI 噪声. 本文分析了 MOSFET 驱动电压过冲形成机理,并建立三组三角波来模拟驱动电压过冲波进行仿真,结果表明过冲电压的上升沿及过冲幅度都会影响系统的传导 EMI 发射. 针对驱动电压过冲,本文通过驱动电路的供电端并联电容来抑制 PWM 驱动过冲,仿真和实验都验证了该措施的有效性.

[参考文献] (References)

- [1] GUTTOWSKI S, JORGENSEN H, KEUMANN K. The possibilities of reducing conducted line emissions by modifying the basic parameters of voltage-fed pulsed inverters[C]//PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Saint Louis, MO, USA, 1997.
- [2] ZVEREV I, KONRAD S, VOELKER H, et al. Influence of the gate drive techniques on the conducted EMI behavior of a power converter[C]//PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Saint Louis, MO, USA, 1997.
- [3] GRECO G, RACITI A, BELVERDE G, et al. Control of the switching transients of IGBTs series strings by high-performance

- drive units[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2001,48(3):482-490.
- [4] MIHALI F,KOS D. Reduced conducted EMI in switched-mode DC-DC power converters without EMI filters: PWM versus randomized PWM[J]. IEEE transactions on power electronics,2006,21(6):1783-1794.
- [5] OGASAWARA S,AYANO H,AKAGI H. Measurement and reduction of EMI radiated by a PWM inverter-fed AC motor drive system[J]. IEEE transactions on industry applications,1997,33(4):1019-1026.
- [6] 魏兆博. PWM 逆变器共模电磁干扰分析及抑制技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
WEI Z B. Analysis and suppression of common-mode electromagnetic interference in PWM inverter[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2015.(in Chinese)
- [7] 姜保军. PWM 电机驱动系统传导共模 EMI 抑制技术的研究现状[J]. 电气传动,2008,389(8):3-9.
JIANG B J. Research status of conducted common mode EMI restraint method in PWM motor drive system[J]. Electric drive,2008,389(8):3-9.(in Chinese)
- [8] 朱军伟. 舵机用无刷直流电机控制系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
ZHU J W. Dissertation for the master degree in engineering brushless DC control system for actuator[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2008.(in Chinese)
- [9] 陈恒林,凌光,黄华高,等. Boost 变流器门极驱动电路的 EMI 发射及抑制[J]. 电工技术学报,2010,25(5):98-102.
CHEN H L,LING G,HUANG H G,et al. Emission and Suppression of EMI from gate drive circuit of boost converter[J]. Transactions of China electrotechnical society,2010,25(5):98-102.(in Chinese)
- [10] 王壮. CRM Boost PFC 电路传导 EMI 分析及抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2018.
WANG Z. Research on conducted EMI analysis and suppression methods of CRM boost PFC circuit[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2018.(in Chinese)
- [11] 颜伟. 复杂电子系统电磁干扰噪声机理建模与抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2014.
YAN W. Research on modeling and suppression methods of electromagnetic interference noise mechanism in complex electronic systems[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2014.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第 43 页)

- [15] 孙荣平,成本茂,郭龙. 复杂电磁环境下机载电子设备的电磁兼容仿真研究[J]. 装备环境工程,2012,9(2):57-60.
SUN R P,CHENG B M,GUO L. Electromagnetic compatibility simulation of airborne electronic equipment in complex electromagnetic environment[J]. Equipment environmental engineering,2012,9(2):57-60.(in Chinese)
- [16] DEVENDER K,NAGESWARA R K,SURYANARAYANA S S,et al. Electromagnetic interference(EMI) suppression techniques—a case study[C]//Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. Bangalore,India,2002:221-225.
- [17] HADI S Q,EHKAN P,ANUAR M S,et al. Performance comparison of STBC-FT based OFDM wireless communication system using M-QAM and M-PSK modulation techniques[C]//2016 3rd International Conference on Electronic Design(ICED). Phuket,Thailand,2016:174-179.
- [18] 董照琦. 基于 FPGA 的 BPSK 调制解调算法的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
DONG Z Q. Research and implementation of BPSK modulation and demodulation algorithm based on FPGA[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2016.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]