

文章编号: 0258-8013 (2001) 11-0043-05

高频 PWM 脉冲波传输引起电机端子过电压的研究

万健如, 林志强, 禹华军

(天津大学电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

RESEARCH ON MOTOR TERMINAL OVER-VOLTAGE CAUSED BY HIGH-FREQUENCY PWM PULSE

WAN Jian-ru, LIN Zhi-qiang, YU Hua-jun

(School of Electrical Automation and Energy Engineering Tianjin University, 300072 Tianjin, China)

ABSTRACT: This paper investigates the principle of motor terminal over-voltage by analyzing the transmission and reflection of PWM pulse wave on cable using transmission line theory. The relations between the over-voltage and cable, carrier-frequency are established by simulations based on the system model in which the changes of cable and motor parameter are presented because of high frequency of reflected pulse wave. Finally, the designed impedance-matching Terminator effectively reduces the transient over-voltage.

KEY WORDS: PWM pulse; high-frequency; distributed capacitor; characteristic impedance.

摘要: 基于传输线理论, 在分析高频 PWM 脉冲波在电缆上的传输及反射过程基础上, 分析电机端子过电压产生机理; 建立高频下适于仿真电机端电压的系统仿真模型, 讨论反射波振荡频率对电缆和电机参数的影响, 通过仿真建立反射波峰值电压与电缆长度、载频等参数的关系, 提出在电机端并联阻抗匹配网络的方法抑制过电压。

关键词: PWM 脉冲; 高频; 分布电容; 特性阻抗

中图分类号: TM921.51 **文献标识码:** A

1 引言

电力电子器件的迅速发展使开关频率提高、上升时间缩短, 逆变器体积减小, 输出谐波和噪声降低, 大大提高了 PWM 逆变器的性能, 电压型 PWM 变频调速系统主电路如图 1 所示。但器件上升时间的缩短, 使电压变化率 dv/dt 增大, 当达 $6000 \text{ V}/\mu\text{s}$ 以上时, 对电机产生不良影响, 使绕组绝缘过早损坏, 电机寿命缩短, 甚至有些在试运行期间发生绝缘被击穿破坏^[1,2], 尤其在逆变器与电机之间长电缆连接情况下, PWM 脉冲波经电缆产生反射, 在电机

端子上引起过电压, 加重绕组绝缘的损坏; 系统地研究 PWM 脉冲电压在电机上的特性, 探讨电机绝缘过早损坏的机理, 对变频调速电机的设计、制造和应用, 以及变频调速技术的发展将有重要意义。本文根据传输线理论, 分析 PWM 脉冲在电缆上的传输反射过程, 建立适于仿真电机端电压的系统模型并对其进行分析。

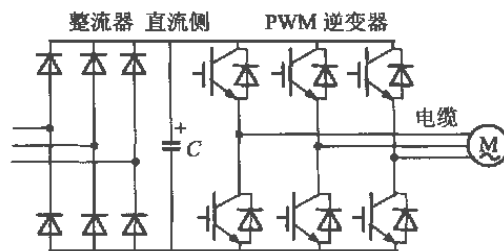


图 1 PWM 变频调速系统主电路

Fig. 1 Main circuit of PWM adjustable speed drive system

2 PWM 脉冲波在电缆上的传输反射过程

PWM 脉冲波在电缆上的传播速度依电缆结构和介质不同有所变化, 一般约为 $150 \sim 200 \text{ m}/\mu\text{s}$ ^[3], 电缆越长, 脉冲波在电缆上的传播时间越长, 当接近高频 PWM 脉冲波上升时间, 且电缆与电机的特性阻抗不匹配时, 脉冲电压波在电机端发生反射引起过电压, 此时电缆可认为是脉冲波的传输线^[4]; 下面基于传输线理论分析高频 PWM 脉冲波在电缆上的传输反射过程, 如图 2 所示。

高频 PWM 脉冲在逆变器与电机之间传输可看成是行波在传输线上传播, 当 PWM 电压脉冲波到达电机端后, 由于电缆与电机特性阻抗不匹配, 引发反射, 反射波幅值大小取决于两者特性阻抗的不匹配程度, 实验结果表明^[5]: 对于小功率电机, 特性阻

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目 (013602711)。

抗一般在 $1500 \sim 5000 \Omega$ 之间,对于中等功率电机,特性阻抗一般在 1000Ω 左右;电缆的特性阻抗随着结构及材质的变化,一般在 $50 \sim 200 \Omega$ 之间。为讨论方便,电缆特性阻抗取 100Ω ,电机特性阻抗取 2000Ω ,定义正向波为从逆变器端到电机端的传输脉冲波,反向波为从电机端到逆变器端传输的脉冲波。下面以一个脉冲波在有限长度电缆上的传播反射过程为例进行分析,图 2(a) 为传输线等效电路,脉冲电压波可看成一个幅值为 U_s 的直流电压源, Z_c 为电缆特性阻抗, Z_m 为电机特性阻抗,传播反射过程中 PWM 电压脉冲波在电缆上衰减较小,为讨论方便,电缆近似成无损传输线。把电缆和电机的特性阻抗值代入公式(1)可得出电机端反射系数 Γ 为 0.9,即电机端反射波电压为 $0.9 U_s$ 。

$$\Gamma = (Z_x - Z_c) / (Z_x + Z_c) \quad (1)$$

式中 Z_c 为电缆特性阻抗; Z_x 为反射端特性阻抗。

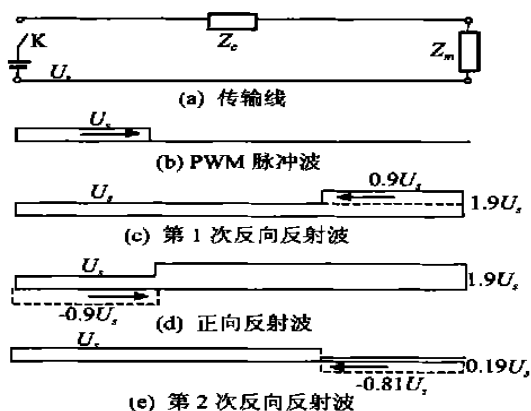


图2 PWM脉冲波传输反射过程
Fig.2 Transmission and reflection steps of PWM pulse wave

图 2(b) 表示某个 PWM 电压脉冲波向电机端开始传输。图 2(c) 表示电压脉冲波到达电机端时发生反射,反射电压与原来的电压波叠加形成了 $1.9 U_s$ 的电机端电压,此时反射电压波向逆变器端反向传播。当此反射波到达逆变器端时,由于电压型逆变器相当于一个电压源,特性阻抗接近于零,由式(1)可得出逆变器端反射系数 Γ 接近于 (-1) ,则从逆变器端反射一个幅值为 $(-0.9 U_s)$ 的正向反射波向电机端传播,如图 2(d) 所示。当到达电机端后发生第二次反射,反射系数仍为 0.9,则产生一个幅值为 $(-0.81 U_s)$ 的反向反射波,与正向传输电压 U_s 叠加之后电机端电压幅值变为 $0.19 U_s$,如图 2(e) 所示。幅值为 $(-0.81 U_s)$ 的反射波到达逆变器端后,发生第二次负反射,变成幅值为 $0.81 U_s$ 的正

向反射波,其传输反射过程与第一次类似,只是幅值有所减小,从而完成一个周期的反射传输。在一个周期内,脉冲波在电机端和逆变器端分别发生两次反射。设电压脉冲波在电缆上的传播或反射时间为 t_p ,脉冲波的上升时间为 t_{rise} ,当 $t_p = t_{rise}$ 时,电机端电压波形与传播时间的关系如图 3 所示。曲线①为初始传输脉冲波;②为电机端第一次反射产生的端电压;③为从逆变器端反射的正向反射波;④为③在电机端发生第二次反射产生的端电压;②和④叠加后得到一个周期内电机端电压波形⑤。同理可画出 $T2, T3 \dots$ 周期内的电机端电压波形,直到脉冲的下降沿,由此得到一个脉冲在电机端子上产生的电压波形,如图 3 中的粗线所示,幅值逐渐减小,振荡频率由传播时间决定。 $t_p = t_{rise}/2$ 为临界传播时间,当 $t_p \geq t_{rise}/2$ 时,在脉冲上升时间结束后,反射振荡波与原脉冲叠加,在电机端形成接近于 $2 U_s$ 的端电压,当 $t_p < t_{rise}/2$ 时,在脉冲上升时间结束前,电机端的脉冲幅值还没达到 U_s ,则叠加后的端电压小于 $2 U_s$ 。随电缆长度变短,传播或反射时间 t_p 变小,电机端子过电压幅值减小;振荡频率 f 由传播时间决定,与逆变器和电机参数无关。由图 3 可得出脉冲波传输反射周期为

$$T = 4 t_p = 4 \frac{x}{v} = 4 x \sqrt{L_0 C_0} \quad (2)$$

式中 x 为电缆长度; v 为脉冲波传播速度。

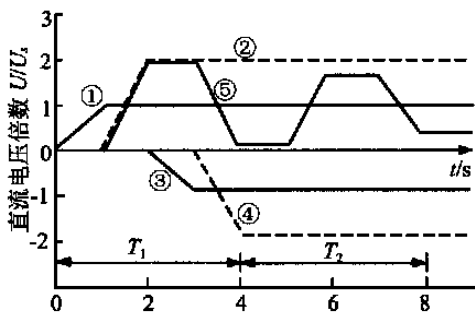


图3 $t_p = t_{rise}$ 时的电机端电压波形
Fig.3 Motor terminal voltage curve when $t_p = t_{rise}$

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} = \pm \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \pm \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (3)$$

式中 符号表示波的传播方向; L_0, C_0 分别为单位长度电缆上的漏电感和分布电容; μ, ϵ 分别为电缆的磁导率和介电常数。

则振荡频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 x \sqrt{L_0 C_0}} \quad (4)$$

由上式看出,振荡频率反比于电缆长度;随着电

缆结构、导体间距、绝缘材质的不同，单位长度上的漏电感、分布电容及磁导率和介电常数有所变化，从而影响反射波的传播速度和振荡频率。上述分析假定电缆为无损传输线，当考虑电缆的阻尼作用时，电机端电压的幅值衰减振荡过程加快。

3 反射波振荡频率对电缆参数的影响

进一步研究表明：由于反射波的高频作用，导体电阻发生变化，从而影响电机端电压的衰减程度。单位长度电缆等效电路如图 4 所示，其中 R_0 、 L_0 、 C_0 、 G_0 分别为电缆电阻、电感、电容和电导。高频作用下，由于集肤效应和邻近效应，反射波振荡频率反过来影响导体的交流电阻，从而影响电机端子过电压的振荡幅值。集肤效应对电流在导体上的流动和分布影响如图 5 所示；而邻近效应影响导体中电流密度的分布。对于绞线式电缆，邻近效应使电阻增大 1 倍^[6]，即邻近效应系数 $K_p=2$ 。集肤效应系数 K_s 为导体总横截面积除以实际导电面积，即

$$K_s = \frac{(\pi d_0^2)/4}{\pi(\gamma d_0 - \gamma^2)} \quad (5)$$

式中 γ 的大小与反射波振荡频率有关；渗透深度 δ 定义为导体径向方向上电流密度在 e^{-1} 时的深度。

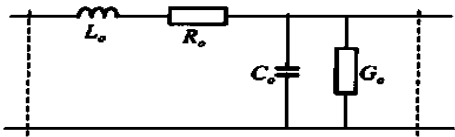


图 4 单位长度(dx)电缆等效电路
Fig.4 Equivalent circuit of unit-length(dx) cable

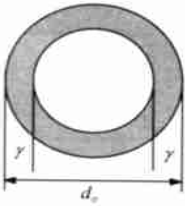


图 5 电流在导体横截面上的分布
Fig.5 Current distribution on conductor's cross section
对导体铜来说^[7]

$$\delta_{cu} = \frac{0.0661}{\sqrt{f}} \quad (6)$$

导体传输的高频功率为

$$P_\gamma \propto e^{-2\gamma/\delta} \quad (7)$$

取 $\gamma = \delta_{cu}/2$ 代入式(5) 得集肤效应系数与频率的关系

$$K_s(f) = \frac{d_0 \sqrt{f}}{2 \times 0.0661} \quad (8)$$

交流电阻 R_s 可用下式表示

$$R_s = K_p K_s(f) R_0 = (1.661 \times 10^{-9} \times K_p \sqrt{f}) / d_0 \quad (9)$$

对于幅值为 U_s 的脉冲电压在电缆传输过程中按指数形式衰减^[8]

$$U'_s / U_s = e^{-\frac{R_s x}{2Z_c}} \quad (10)$$

式中 U'_s 为经电缆传输衰减后的脉冲幅值。

将式(9)代入式(10)得

$$U'_s / U_s = e^{-\frac{K_p K_s(f) R_s x}{2Z_c}} \quad (11)$$

由此可看出：逆变器与电机之间电缆越短，反射波振荡频率越高，电缆对反射波的阻尼作用越强，影响下一个 PWM 脉冲来临前电缆上存储的电荷。另外，随着载波频率的提高，PWM 脉冲间隔变小，过电压衰减时间变短，电缆上存储的剩余电荷增多，当下一个脉冲来临时，两者共同作用使电机端电压大于 2 倍的直流侧电压 U_s 。

4 高频情况下电机的等效电路模型

由于 PWM 脉冲的高频作用，电机的硅钢片相当于磁挡板，绕组产生的大部分磁通是漏磁通，在电机转子上产生的高频涡流也使磁通不易穿过气隙。因此，电机模型参数与工频相比发生很大变化，要仿真此时电机端电压必须建立高频情况下的电机参数模型。高频情况下，描述绕组介质绝缘特性的分布电容存在于匝与匝之间、相与相之间、相与地之间等，它们对电机端电压的综合影响可等效成一个集中电容 C_h ，如图 6 所示。对于高频涡流引起的铁芯损耗，可用一个假想电阻 R_e 来代表，它并不是一个线性参数，而取决于电压 / 频率比，并依频率的变化而变化，可由下式表示^[9]。

$$R_e = K_r V_t^{0.8} f^{-2.5} \quad (12)$$

研究电机的高频时域响应发现，由于绕组电阻本身的阻尼作用小，须靠 R_e 的阻尼作用，因此代表涡流损耗的电阻 R_e 在等效电路中可以放在与绕组电感平行的位置，如图 6 所示。

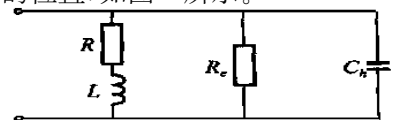


图 6 高频下定子绕组等效电路
Fig.6 Equivalent circuit of stator

5 过电压的抑制

由前述分析可知，由于电缆与电机阻抗不匹配

引起 PWM 电压脉冲波反射而产生电机端子过电压,如果在电缆末端并联一个电阻 R_t ,其阻值与电缆特性阻抗 Z_c 相等,根据公式(1)可知,此时电机端反射系数为

$$\Gamma_t = \frac{Z_t - Z_c}{Z_t + Z_c} = \frac{Z_m \parallel R_t - Z_c}{Z_m \parallel R_t + Z_c} \approx \frac{R_t - Z_c}{R_t + Z_c} \approx 0 \quad (13)$$

由于电机阻抗 $Z_m \gg R_t$, 并联阻抗 $Z_m \parallel R_t \approx R_t$ 。这样一来,电缆末端的负载阻抗与电缆的波阻抗相匹配,在电动机端不会产生电压波的全反射,也就不会形成过电压。选取 RC 网络如图 7 所示,并联在电机端以达到阻抗匹配。电容 C_t 的作用是让 PWM 脉冲波到达电机端时有足够时间进行缓冲,从而达到更好的阻抗匹配效果。未充电时电容对 PWM 脉冲尖峰部分相当于短路,而对直流相当于开路,从而减少功耗损失。电容的选择需考虑电阻功耗、脉冲上升时间及电机所能承受的最大电压等因素,当逆变器输出脉冲下降沿电压为零时,电容通过电阻放电。当脉冲来临时电容充电,要求在经过脉冲上升时间后,电容充电电压 V_{C_T} 不超过直流侧电压 U_s 的 10%, 另外电容的选择还须考虑 RC 终端网络的放电时间要小于 PWM 脉冲间隔,以保证在下一个脉冲来临之前电容电压为零。其值由下式求出。

$$V_{C_T} = (10\%) \times U_s = [1 - e^{-\frac{t_{rise}}{R_t C_t}}] \times U_s \quad (14)$$

对于选定电缆来说,特性阻抗已定,取 $R_t = Z_c$,

则可求出电容 C_t 的大小。本文以 JHXC-500V 硅橡胶绝缘电缆为例,其特性阻抗为 55Ω ,求得电容值为 $0.05177\mu F$ 。

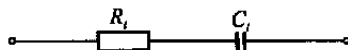


图 7 终端 RC 阻抗匹配网络
Fig. 7 RC impedance-matching terminator

6 仿真结果及其分析

在建立电缆分布参数模型和电机的高频集中参数模型基础上,通过 Matlab 仿真软件建立系统仿真模型,如图 8 所示,PWM source 代表逆变器输出的脉冲电压;设单位分布参数电路表示的电缆长度为 10m,则长度为 50m 的电缆可用 5 个单位分布参数电路串联表示;后半部分为高频下电机定子绕组等效电路模型;RC-match 为并联在电机终端的 RC 阻抗匹配网络。模型建立后,对不同情况下的电机端电压进行仿真分析,整个系统模型参数可以根据需要改变,选取上升和下降时间均为 300 ns 的 PWM 脉冲电压波、JHXC-500V 硅橡胶绝缘电缆、型号为 JO2-32-4 电机为例仿真前 2 个脉冲在电机端子产生的过电压,分别观察电缆长度、载频等参数变化时电机端电压波形以及在电机端并联阻抗适配网络后的过电压抑制效果。

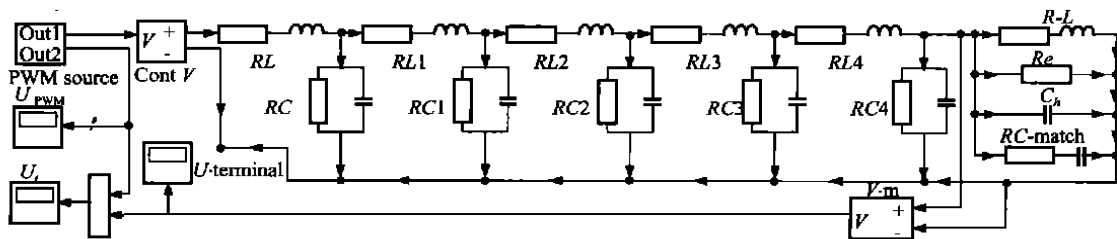


图 8 逆变器-电缆-电机系统仿真模型
Fig. 8 Simulation model of inverter-cable-motor system

由图 9 和图 10 的仿真结果看出:电缆未充电时,电机端电压接近 2 倍的直流侧电压。载频为 20 kHz 时,脉冲间隔较小,在第二个脉冲来临之前,电缆还有存储电荷,则下一个脉冲在电机端子上产生的电压约 $2.6 U_s$,超过 2 倍直流侧电压;并随电缆长度增加到 100m,电机端电压幅值增大,振荡频率减小。由图 9 和图 11 看出:当电缆长度不变,载波频率减小为 10kHz,脉冲间隔增大,过电压有足够时间衰减,则第二个脉冲对电机端电压的作用与第一个脉冲基本相当。图 12 为在电机端加装 RC 匹配网络后端电压波形,由图 12 可看出电机端电压仅为

1.1 U_s ,有效地抑制了过电压。图 13 为电缆长度 50m、载频 10kHz 时,测得一个脉冲作用下的电机端电压波形,图 14 为相同条件下,加入阻抗匹配网络后的电机端电压波形。

7 结论

本文讨论了电机模型以及电缆分布参数模型在高频情况下的参数变化,提高了电机端电压的仿真准确性;同时根据传输线理论分析 PWM 脉冲的传输反射过程,阐释电机端电压的产生机理,并据此设计 RC 阻抗匹配网络,有效地抑制过电压,仿真和实

验结果验证了理论分析的正确性。

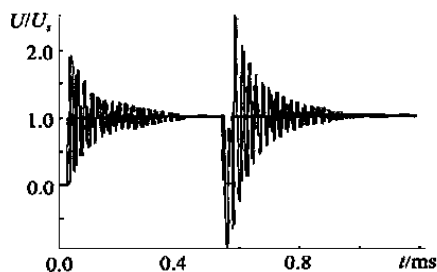


图 9 电缆长度为 50 m、载频为 20 kHz 时电机端电压波形

Fig. 9 Motor terminal voltage curve when cable length is 50 m and carrier-frequency is 20 kHz

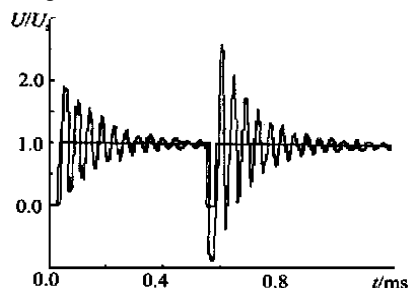


图 10 电缆长度为 100 m、载频为 20 kHz 时电机端电压波形

Fig. 10 Motor terminal voltage curve when cable length is 100 m and carrier-frequency is 20 kHz

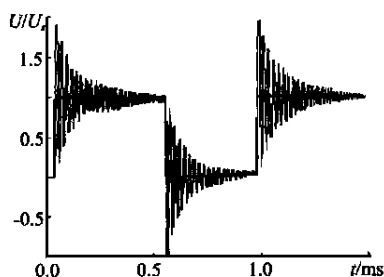


图 11 电缆长度为 50 m、载频为 10 kHz 时电机端电压波形

Fig. 11 Motor terminal voltage curve when cable length is 50 m and carrier-frequency is 10 kHz

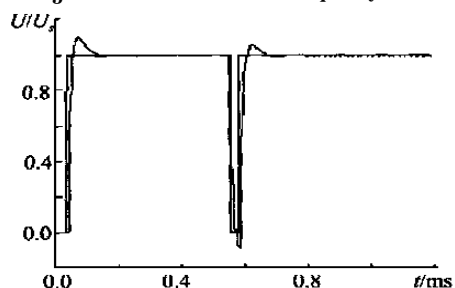


图 12 电缆长度为 50 m、载频为 20 kHz 阻抗匹配后电压波形

Fig. 12 Motor terminal voltage curve with impedance-matching terminator when cable length is 50 m and carrier-frequency is 20 kHz

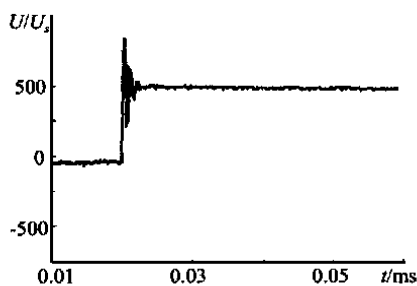


图 13 测得的电机端电压波形

Fig. 13 Measured motor terminal voltage waveform

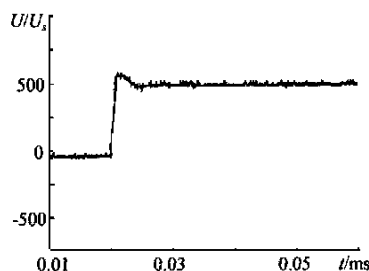


图 14 加匹配网络后的电机端电压波形

Fig. 14 Measured motor terminal voltage waveform after used matching network

参考文献:

- [1] Persson E. Transient effects in application of PWM inverters to induction motors[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1992, 28(5): 1095-1100.
- [2] 徐传骧, 刘学忠 (Xu Chuanxiang, Liu Xuezhong). PWM 变频电源应用对变频调速电机绝缘引起的新问题 (New problems of the inverter-fed motor insulation caused by the application of the PWM inverter sources) [C]. 上海: 中国电工技术学会电力电子年会论文集 (Shanghai: Conference record-Power Electronic Annual Meeting of China Electrtchical Society), 1998.
- [3] Jouanne A V, Enjeti P, Gray W. Application issues for PWM adjustable speed AC motor drives [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1996, 32(5): 1365-1370.
- [4] Jouanne A V, Enjeti P, Gray W. The effects of long motor leads on PWM inverter fed AC motor drives systems [C]. IEEE Trans on IA, 1997, 33(2): 342-358.
- [5] Bentley J M, Link P J. Evaluation of motor power cables for PWM AC drives [J]. IEEE Trans on IA, 1997, 32(2): 342-358.
- [6] Skibinski G, Divan D M. Design methodology and modeling of low inductance planar bus strutures [C]. EPE Conference, 1993.
- [7] [法] P. 格里维 ([French] Gliowi P). 高频传输线的物理基础 (Physics basis of high frequency transmission) [M]. 上海: 上海科学技术出版社 (Shanghai: Shanghai Science Technology Press), 1983.
- [8] Skibinski G, Leggate D. Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients [C]. IEEE IAS Conference Proceedings, 1997.
- [9] McPherson, Laramore R D. An introduction to electrical machines and transformers [D]. New York: John Wiley & Sons, 1990.

收稿日期: 2000-12-04; 改回日期: 2001-03-05.

作者简介:

万健如 (1950-), 男, 硕士, 副教授, 从事电力电子与电力传动方面的研究;

林志强 (1976-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子与电力传动方面的研究。

(责任编辑 丁玉瑜)