

远程大功率皮带式输送机变频器驱动系统

李继生¹, 张 Jianjian^{1,2}, 徐会真¹, 雷淑英¹

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2. 山东滨州渤海活塞股份有限公司, 滨州 256602)

摘要: 针对皮带式输送机功率日益增大这一情况, 对变频器驱动参数远距离传输控制皮带式输送机的方法进行的研究. 依据传输线理论建立远距离传输驱动线路电路模型, 借助 Matlab 对影响电动机端部过电压的各种因素进行仿真分析. 结果表明, 远距离长线传输变频器驱动皮带式输送机控制系统参数传送准确, 运行可靠, 系统不仅在运行时实现了节能, 而且可以兼顾安全和效率.

关键词: 皮带式输送机; 变频调速; 远距离传输

中图分类号: TP23

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2013)03-0060-06

Remote Power Converter Drive System of the Belt Conveyor

LI Jisheng¹, ZHANG Jianjian^{1,2}, XU Huizhen¹, LEI Shuying¹

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Shandong Binzhou Bohai Piston Co., Ltd., Binzhou 256602, China)

Abstract: Conventional inverter drive is now unable to meet the growing power requirements for belt conveyor. According to this situation, a design was proposed using long-range transmission of inverter drive parameters to control the belt conveyor. Based on the transmission line theory, a model of driving line circuit for long-distance transmission was established, and a simulating analysis was made on the factors that may affect the motor end voltage, using Matlab simulation software. The results show that the control system for driving belt conveyor based on the long-range transmission inverter can run reliably and transmit the parameters exactly. The system not only can save energy, but also certify safety and efficiency.

Key words: belt conveyor; frequency control; long-range transmission

目前我国煤矿井下皮带式输送机传动控制主要有软启动驱动和变频驱动控制方式. 近年来, 随着社会对能源的需求增加, 国内高产能的煤矿不断涌现, 皮带式输送机的单机功率也随煤矿产能的增加而增加, 因而以上两种传动方式已经无法满足煤矿的需求. 采用软启动驱动方式的皮带式输送机单机最大容量已达到 1 800 kW, 与此同时, 其散热和体积也成为系统设计过程中非常棘手的问题. 软启动驱动方式的散热系统损耗较大, 其效率却很低, 且系统结构复杂, 维护工作量大, 总体造价较高, 因而其经济效益较低^[1-2]. 采用变频驱动方式虽然具有系统运行可靠性高、性能稳定、节能效果好等多种优势, 但由于整个系统隔爆及散热问题使得其应用受到限制, 目前采用变频驱动控制方式的皮带式输送机系统最大容

量已达到 600 kW/1 140 V. 因此, 井下皮带式输送机系统急需一种新型的传动控制方式^[1-4].

本文依据传输线理论, 建立远距离传输驱动线路电路模型, 对影响电动机端部过电压的各种因素进行仿真分析, 为远距离长线传输变频器驱动皮带式输送机控制提供了理论依据.

1 远距离传输驱动线路电路模型

1.1 电力参数传输系统等效电路模型

图 1(a) 所示为输送机变频控制系统原理图. 为了分析系统暂态参量, 用等效的单相电路来替代系统变频电路^[1,5], 如图 1(b) 所示. $U_s(t)$ 为变频器采用脉宽调制(PWM)控制方式时逆变输出的电压参量. 图

中将电力传输线电缆看成是无限多的长度为无穷小的单相小段叠加而成, 每一段的长度为 dx , l 是传输线电缆的长度, Z_s 是变频器内部等效阻抗, Z_R 代表电动机等效阻抗, 上述参数都是在每相电路的工作点上测得; $u(x, t)$ 和 $i(x, t)$ 是指距离电源 x 处的电压和电流参量. 当高频时, 为了分析变频驱动控制系统远程传输线电缆的过电压抑制耦合作用, 分别用 R 、 L 、 C 和 G 代表单位长度传输线电缆等效的相电阻、相电感、相电容及相电导.

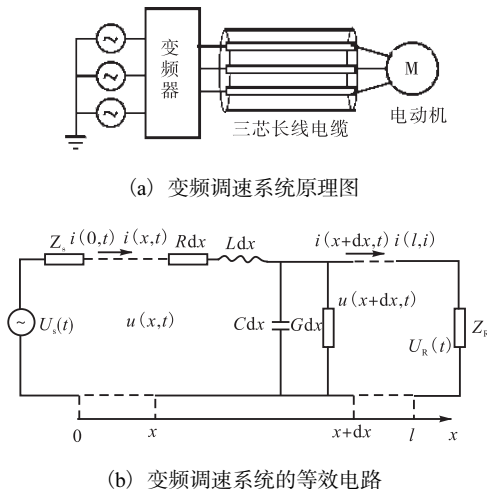


图 1 电力参数传输系统等效的电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of power transmission system

1.2 系统中各个参数的确定

采用 YRK-7.5 型三相异步电动机和 LG 公司的 IGSA 型变频器. 变频器参数为: 功率 1.1 kW, 频率 50 Hz, 额定电压 380 V, 额定电流 2.75 A, 额定转速 1 400 r/min, 功率因数 0.8; 电机参数为: 功率 7.5 kW, 最大工作电流 16 A, 输入电压 380 ~ 460 V, 变频范围 0.1 ~ 400 Hz.

对于图 1(b), 根据传输线理论对反射系数的定义, 可以分别定义变频器输出端和电动机端的反射系数 K_s 和 K_R .

$$\begin{cases} K_s = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \\ K_R = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_c 为电缆的传输阻抗.

1.2.1 变频器参数的确定

为了测量变频器阻抗 Z_s , 设定变频器的载波频率采用 5 kHz 的锯齿波, 输入电压是 380 V 的交流电, 传输线电缆长度为 100 m. 当控制开关断开, 即

电动机停运时, 测得变频器的母线电压为 540 V; 当控制开关闭合, 即电动机稳态运转时, 测得变频器的母线输出电压下降为 538 V, 此时测得对应的母线输出电流为 0.5 A, 由此可计算出 Z_s 约为 4 Ω .

由于由变频器产生的 PWM 波是由不同频率的多次谐波叠加而成, 所以变频器的高频参数与上升时间 t_r 有很大关系, 在一个波形周期内, 可由公式 $f_H \approx 1/(\pi t_r)$ 定义脉冲信号的等效频率. 根据经验数据^[5]可以计算, 脉冲的上升时间为 $t_r = 517.5$ ns, 则 $f_H = 0.62$ MHz.

1.2.2 电动机阻抗的测定

电动机阻抗通过电动机反射系数 K_R 计算. 根据电动机反射系数的计算公式可知, 当 $Z_R \gg 100 Z_c$ 时, 传输线电缆末端的电压峰值变化相对较小. 因此可以借助仿真软件, 通过改变 Z_R 的数值 ($100 Z_c \sim 1000 Z_c$), 对整个变频调速系统进行仿真. 根据仿真结果分析, 取电动机的阻抗为电缆特性阻抗的 100 倍.

1.2.3 电缆特性参数的确定

根据上述分析可得, 远程大功率皮带式输送机变频器驱动系统的电力电缆的工作频率是 0.62 MHz, 采用参数矩阵变换方式, 可测量并计算得到传输线电缆参数: 传输阻抗 0.02 Ω /m, 相电感 2.44×10^{-7} H/m, 相电容 1×10^{-10} F/m, 相电导 5.66×10^{-5} S/m.

借助均匀传输线理论, 为便于分析其电压、电流参数变化关系, 当电源频率很高时, 由于 $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$, 所以可以近似地取 $R = 0$ 、 $G = 0$. 此时, 可将传输线电缆称为无损传输线路. 其传输阻抗 Z_c 和传播系数 γ 的计算公式为

$$\begin{cases} Z_c \approx \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \\ \gamma = j\omega\sqrt{LC} \end{cases} \quad (2)$$

此时, 在传输线上对应的电磁波的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

根据上述分析计算, 最后可得传输线电缆的传输阻抗为 $Z_c = 49.3 \Omega$, 传输速度为 $v = 2.0 \times 10^8$ m/s.

1.3 建立 Matlab 仿真模型

根据电缆的分布参数和长度的变化, 电动机端部的过电压频率变化从几 kHz 至几 MHz. 在该频率范围内, 才能对传输线电路的传输特性进行有效地分析. 建立的电缆的传输模型必须能够正确地反映电缆的传输阻抗, 并且在此模型中能够近似观察到电缆线路中各点的电压和电流波形. 对于建立传输电缆

模型,国内外的相关文献较多,但是,多数只对传输线电缆首端及末端的电压和电流参数进行定性分析.依据在频域内电力传输线上电压和电流参量变化的数学表达式^[5-6]可以分析传输电缆上任一点的电压和电流参量随频率的变化情况,由于忽略了许多约束条件,存在一定的计算误差.本文借助 Matlab 仿真软件建立传输线电缆在高频工作条件下的系统仿真模型,从而进一步通过仿真分析远程传输线电缆变频传输系统中的过电压及过电流现象.

1.3.1 电缆模型

由均匀传输线理论,可以将电缆分布参数模型看成由无限多个长度为无穷小的单相小段叠加而成.如图 2(a)所示,这种等效方法称为 RLCG 等效.

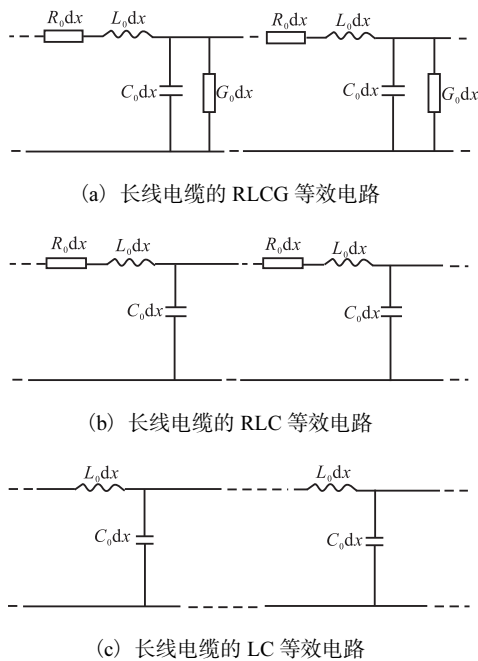


图 2 传输线电缆等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transmission cable

传输线路的电导 G_0 主要是由围绕传输线电缆外部绝缘外壳的漏电流大小和电晕现象的强弱所决定的.一般情况下,由于传输线电缆的绝缘等级较高,电流沿绝缘子泄漏很小,所以在分析计算时可以忽略不计.电晕现象的产生则跟传输线电缆本身及其周围空气的条件(空气中离子的数量、大小、电荷量等因素)有关.通常在制造电缆导线时,已经考虑如何避免电晕现象的发生,因此可认为电导 $G_0 \approx 0$.这样,传输线电缆的分布参数模型可以进一步简化成图 2(b)表示,此种等效方法称为电阻、电感及电容等效,即 RLC 等效.根据前面讨论的结论可知,在高频交流条件下工作时均匀传输线电阻的影响可以忽略不计,由

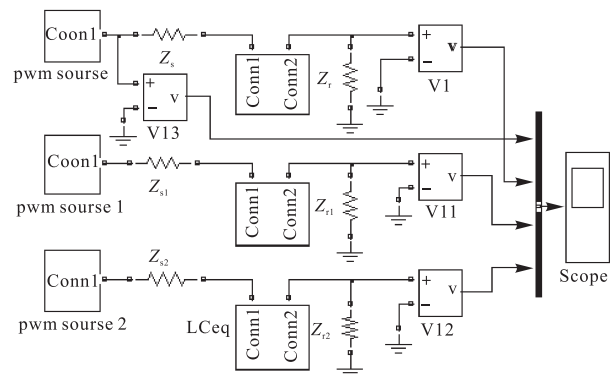
此可以得到图 2(c)所示的 LC 等效模型.

根据以上分析,采用 Matlab Sim Power Systems 模块描述传输线电缆分布特性的线路模型——Pi 模型,尽管其内部是由电感、电容及电阻等效,但据此建立的系统模型中的电路参数受最大频率带宽 $f_{\max}$ 的约束. $f_{\max} \ll Nv/8l$. 式中: N 为 Pi 电路模型数量; v 为电磁波传播速度; l 为传输线电缆长度.可见,当通过 Pi 模型建立系统仿真模型时,传输线电缆的固有频率将随着模型数量的增加而增大.由此可知,系统仿真模型越多,则时间步差越小,系统仿真的结果越精确.这种模型需要较长的仿真时间方能得到较准确的结果.

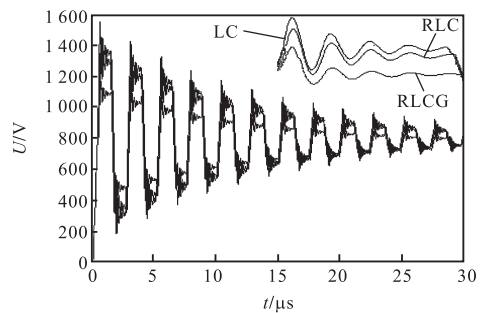
1.3.2 单相系统仿真

根据以上讨论建立的传输线电缆模型,借助 Matlab 对以下两组电路进行仿真实验和对比分析:

第一组:图 3(a)为系统仿真电路图.在建立模型时选用图 2 所示的电阻、电感、电容及电导分支、RLC 分支和电感、电容分支来表征传输线电缆的均匀分布特性,采用 50 个单元的分支模块来描述 100 m 长传输线电缆仿真模型.图 3(b)为传输线电缆终端的电压波形.



(a) 仿真电路

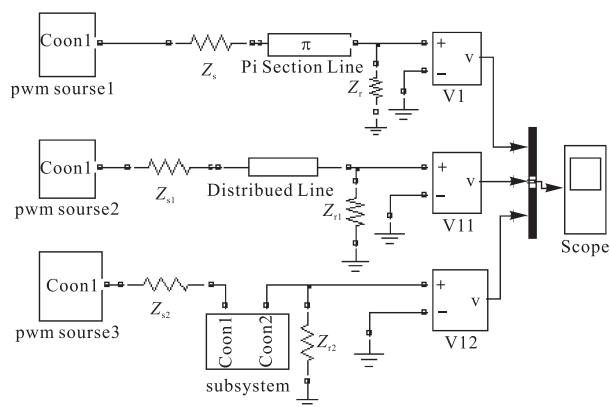


(b) 电缆终端的电压波形

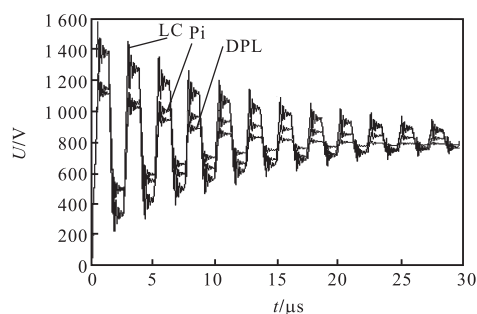
图 3 第 1 组仿真的电路及电压波形

Fig. 3 The first group of simulation circuit and waveform

第 2 组: 图 4(a) 为系统仿真电路图. 图中传输线电缆模型分别由 Pi 模块、DPL 模块及 50 个电感、电容分支组成的系统电路模型, 电路中各个参量表示与第 1 组相同. 图 4(b) 为传输线电缆终端的电压波形.



(a) 仿真电路



(b) 电缆终端的电压波形

图 4 第 2 组仿真的电路及电压波形

Fig. 4 The second group of simulation circuit and waveform

以上两组仿真实验都说明电缆终端在高频情况下会出现过电压这一现象, 图 5 为现场实验测得的电缆终端的电压波形, 通过对比可知, 上述两种模型能有效分析电缆终端过电压变化.

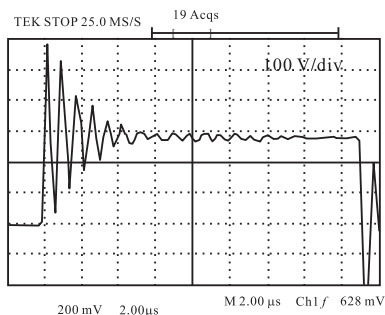


图 5 实际过电压波形图

Fig. 5 Actual voltage waveform

从图 3(b) 可以看出, 在第 1 组仿真实验中得到

的过电压的振荡波形的振荡周期相同, 然而在每个模块单元内电压参量仍波动很大, 在不同时间内, 其过电压幅值差异非常大, 由 RLCG 等效的系统仿真模型的电压幅值衰减最严重. 由此可见, LC 模型表征的传输电缆的系统模型的仿真结果与实际相吻合. 即在高频条件下建立传输线系统模型时, 可以忽略 R 、 G 的影响, 即可以把传输电缆看作是无损传输线.

由图 4(b) 可以看出, 在满足频率这一约束条件下, Matlab 自带的 Pi 模型的仿真效果比 LC 等效模型更理想, 但在每个单元内电压波动较大. 采用将电缆当作无损线来处理的 DPL 模型描述的传输线系统仿真结果表明, 每一个单元内电压几乎无脉动, 但是其过电压幅值比实际检测的结果误差较大. 从仿真实验中还可以看出, 第 2 组仿真中电压幅值达到稳定所需时间比第 1 组要长.

2 基于变频器输出侧滤波器的长线传输驱动

根据上述分析可知, 长线电缆传输线的电动机端过电压在高频条件下是逐渐振荡衰减的, 它的高频频率取决于电缆分布参数、电缆长度和脉冲的上升时间 3 个要素. 因此, 在实际工程中为了防止由变频器产生的 PWM 脉冲信号对末端电动机过电压的影响, 设计滤波器时采用以下两种措施^[1,5,7]: 一种是使传输线电缆的特性阻抗与电动机端部的阻抗相匹配, 从而消除或降低电压反射; 另一措施是通过低通滤波器滤出传输线电缆传输信号中的高频成分, 以达到降低电动机端部过电压的效果.

为了滤除输电电路中的高次谐波分量, 同时考虑井下防爆和散热等因素, 采用图 6 所示的滤波方式. 即在变频器输出端接入一个 RLC 低通滤波器, 通过该滤波器滤除变频器输出的高频谐波电压分量, 从而实现抑制电动机末端过电压目的.

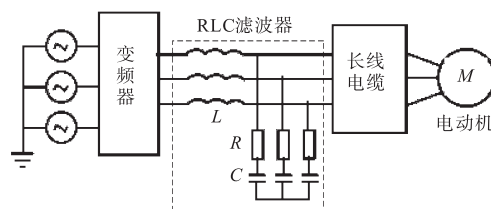


图 6 电动机端 R C 滤波器示意图

Fig. 6 RC filter diagram of the motor end

对于图 6 中的三相 RLC 低通滤波器, 为了计算方便, 取其中一相进行分析, 其结构示意图如图 7 所

示. 其对应的传递函数为

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_f C_f + 1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} = \frac{\frac{R_f}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f}}{s^2 + \frac{R_f}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (3)$$

将式(3)用二阶系统的标准形式表示, 有

$$H(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中: ξ 为阻尼比; ω_n 为无阻尼自然振荡频率. 比较式(3)和式(4), 可知 ξ 和 ω_n 满足: $2\xi\omega_n = R_f/L_f$, $\omega_n^2 = 1/\sqrt{L_f C_f}$. 因此, $\xi = \frac{R_f}{2} \sqrt{C_f/L_f}$. 由此可知 L_f 和 C_f 的数值主要由 R_f 、 ξ 和 ω_n 决定.

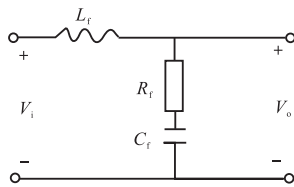


图7 变频器输出侧 RLC 滤波器示意图

Fig. 7 RLC filter diagram of the output side of the converter

电路的工作过程可描述为: 在变频器输出高频脉冲电压信号时, 滤波电容 C_f 近似为零, 即滤波电容短路, 当变频器与电动机通过长距离传输线电缆相连接时, 为了最大限度地吸收反射能量, 电缆的特性阻抗 Z_c 与低通滤波器电阻 R_f 应相等, 即有 $R_f = Z_c = \sqrt{L/C}$.

使用滤波器的作用是为给变频器输出的高频脉冲提供一个缓冲的上升时间, 即将高频电压参量 V_i 经过低通滤波器后得到一个缓慢上升的电压分量 V_o . 由二阶系统的阶跃响应特性可知, 当系统工作条件满足临界阻尼 (即 $\xi = 1$) 或过阻尼 ($\xi > 1$) 时, 其输出的响应满足系统要求, 此条件说明该系统是一个单调响应系统. 据此, 令 $\xi \geq 1$, 即 $\xi = \frac{R_f}{2} \sqrt{C_f/L_f} \geq 1$, 进一步化简得 $\frac{R_f}{2} \geq \sqrt{C_f/L_f}$.

假设图7所示系统的输入脉冲 V_i 为单位阶跃函数, 令 $\xi = 1$, 则系统输出的拉氏变换为

$$V_o(s) = \frac{2\omega_n s + \omega_n^2}{s(s + \omega_n)^2} = \frac{1}{s} + \frac{\omega_n}{(s + \omega_n)^2} - \frac{1}{s + \omega_n} \quad (5)$$

取 $V_o(s)$ 的拉氏反变换, 求得临界阻尼系统的单位阶跃响应为 $V_o(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 - \omega_n t)$.

设在单位阶跃输入时系统的输出稳态值为 $1 - e^{-\omega_n t} (1 - \omega_n t) = 0.9$, 从而得 $\omega_n t = 0.78$, 即 $t = 0.78/\omega_n$.

由上述分析可知, 当系统达到稳态值的 0.9 倍时, 所用时间 t 比 PWM 脉冲的临界上升时间 t_{cr} 长一些. 而系统在过阻尼状态下的脉冲上升时间比临界阻尼状态下需要的时间长, 因此当 $\xi \geq 1$ 时, 无阻尼状态时其振荡频率应满足 $0.78/\omega_n \geq t_{cr}$, 由此得

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \leq \frac{0.78}{t_{cr}}$$

为了计算滤波器的截止频率, 可依据滤波器的频率特性表达式, 即

$$H(j\omega) = \frac{j\omega R_f C_f + 1}{j\omega L_f C_f + 1 - \omega^2 R_f C_f} \quad (6)$$

根据巴特沃斯滤波器的特点, 为了满足低通滤波器的带宽, 应满足条件: $20 \lg \left| \frac{1}{H(j\omega_c)} \right| = 3 \text{ dB}$.

由于变频器输出的是 PWM 脉冲电压信号, 与方波相近似, 因方波信号的边沿上升率由其最高频谐波分量决定, 而最高频分量的周期 T_c 为临界上升时间 t_{cr} 的 2 倍, 即 $T_c = 2 t_{cr}$.

根据上述分析可得截止角频率为 $\omega_c = 2 \pi f_c = \pi/t_{cr}$. 最后, 依据上述关系式将变频系统参数代入, 可以确定滤波器的参数:

$$Z_c = \sqrt{L/C} = 50 \Omega$$

$$L_f = 0.26 \text{ mH}$$

$$C_f = 1 \mu\text{F}$$

3 现场运行分析

图8(a)为没有采取任何措施时实测的电动机端部线电压波形, 其末端电动机过电压峰值几乎达到变频器直流母线电压的 2 倍; 图8(b)是采用滤波措施后由实测的电动机端部线电压波形, 其输出的电压相对稳定. 由此可知, 对变频器控制参数远程驱动电动机系统中, 通过变频器输出端加入 RLC 低通滤波器能够明显地抑制由传输电缆分布特性引起的电动机端过电压现象. 在设计滤波器时, 其参数主要依据传输线电缆的分布参数、电缆的长度以及变频器 PWM 输出脉冲的上升时间来决定.

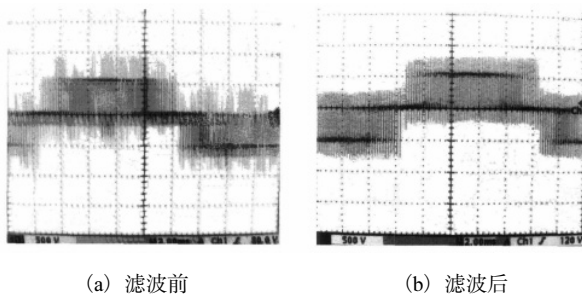


图 8 滤波前、后的电动机端部线电压波形

Fig. 8 Motor voltage waveform before and after filtering

4 结 语

本文依据传输线理论,建立远距离传输驱动线路电路模型,借助 Matlab 仿真软件对影响电动机端部过电压的各种因素进行了仿真分析,采用低通滤波器有效滤除了变频器输出的高频谐波电压分量,从而实现抑制电动机末端过电压目的。

该方法已成功应用于大同煤业集团某矿的皮带式输送机变频器驱动参数远距离控制系统,大大地提高了皮带式输送机的运行稳定性,降低了机械传动系统的磨损和电能浪费,达到了满意的效果,具有较高

的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 吕勇庆,蒋卫良,王国田,等. 井上式变频器长线传输驱动带式输送机[J]. 煤矿机械,2009,30(12):161-163.
- [2] 王松美,石强. 皮带运输机变频调速控制的应用实践[J]. 铜业工程,2001(4):42-43.
- [3] 龚永南,程俊峰,黎明柱. 皮带运输机混合型重载软起动方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(4):159-163.
- [4] 王光炳. 带式输送机可控软起动装置的研究[J]. 煤炭学报,2003,28(3):316-321.
- [5] 张珍. 变频系统长线缆的研究及过电压抑制[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [6] 万健如,林志强,禹华军. 电缆长度对 PWM 逆变器驱动电机端电压的影响[J]. 电力电子技术,2001,35(6):26-29.
- [7] 曲学基,曲敬销,于明扬,等. 电力电子滤波技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.

责任编辑:常涛