

# 电气化铁路造成的电能质量问题对电能计量用TDM的影响研究

周 轩, 钱敏慧, 赵剑锋

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 电铁的高速发展同时带来了严重的电能质量问题, 其中线性负荷下精度较高的时分割乘法器(TDM)在电铁的影响下是否会产生计量误差成为了供用电双方关注的问题。对TDM原理和电气化铁路的负荷特征进行了理论分析, 进而在simulink中搭建了电铁负荷模型, 在此基础上通过仿真实验研究了电铁负荷造成的谐波、冲击性以及电压波形突变等三个方面对TDM的影响, 同时分析了TDM采用不同的调制频率时在电铁负荷下的误差情况。并通过实际数据与数字式乘法器进行了对比。以上工作得出TDM在电铁负荷下会产生原理性负误差, 但在调制频率适当时可达到需要的精度, 且在原理上比数字式乘法器更适合用于电铁计量。这一结论为电气化铁路下的计量方式研究提供了参考。

**关键词:** 电能质量; 电气化铁路; 时分割乘法器; 谐波; 冲击性负荷; simulink 仿真

## The study of the TDM power meter precision change caused by electrified railway power quality problem

ZHOU Xuan, QIAN Min-hui, ZHAO Jian-feng

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the development of electrified railway nowadays, the electrified influence on time-division multiplier (TDM) is drawing more and more concern. The theory of TDM and the electrified railway load is analyzed in this article, and then an emulation model of electrified railway is constituted in Simulink. Using simulation result and operation data, a contrast is made between TDM and digital multiplier. As a result, the TDM shows negative error under the railway load, but the precision can reach the application requirement by using proper modulation frequency, and it is better than the precision of digital multiplier under the railway load. This conclusion is useful in further research of power measurement in electrified railway.

**Key words:** power quality; electrified railway; time-division multiplier; harmonic; surge load; simulink emulation

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0028-05

## 0 引言

电气化铁路因其节能、环保、高速等突出优点而得到了快速发展。但作为典型的大容量非线性负荷, 电气化铁路运行过程中产生的大量谐波和负序电流, 也对电网造成了多方面负面影响<sup>[1, 2]</sup>。其中, 电铁负荷下电能表能否准确计量成为了一个重要问题。采用时分割乘法器的电子式电能表是一种电铁牵引变电站常用电能表。大量研究已证明这类电能表在电能质量问题不严重的情况下有较好的精度, 但在电铁负荷下它的计量精度问题还有待进一步研究。本文在理论分析的基础上, 通过仿真实验和实测数据分析, 初步研究了电铁负荷对计量用时分割乘法器的影响。

## 1 电气化铁路负荷特征

我国的电气化铁路牵引负荷普遍采用单相交流

工频供电制式, 供电电压等级目前存在 110 kV 和 220 kV 两个等级。牵引变电站的接线方式有单相变、Y, d11 接线、平衡变等接线形式。电力机车是电气化铁路的最终负荷, 目前我国电气化铁路上运行的有进口机车以及国产的韶山-1 型、韶山-3 型、韶山-4 型、韶山-7 型、韶山-8 型。以韶山-4 型为例, 其主电路采用不对称不等分四段经济半控桥式整流电路, 列车具有三种工况: 惰行, 制动和牵引。惰行时, 列车依靠惯性运行; 机车制动采用电阻制动方式, 电动机改为发动机运行, 能量消耗在电阻上。在牵引工况下, 将产生大量的谐波<sup>[3]</sup>。电气化铁路负荷的主要特征可归纳为以下五个方面:

- 1) 单相移动负荷。
- 2) 随着电车的运行, 负荷剧烈变化, 并具有冲击性。
- 3) 牵引机车中采用的整流电路, 产生了大量谐波, 引起了波形的畸变。

4) 因其结构的不对称造成了电网中的大量负序电流。

5) 无功功率大, 功率因数低。

## 2 时分割乘法器精度变化理论分析

时分割乘法器是用来完成两个电量电压、电流相乘运算的器件, 是电子式电能表工作的核心关键部分, 也是产生计量系统误差的主要部分<sup>[4]</sup>。时分割乘法器的原理框图如图 1 所示。

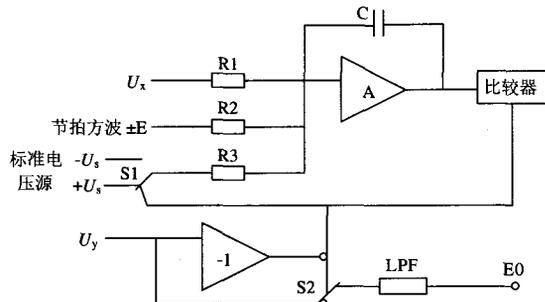


图 1 时分割乘法器原理框图

Fig.1 Principle diagram of the time-division multiplier

这种乘法器的工作原理是在节拍信号提供的周期内对其中一个被测信号  $U_s$ , 做脉冲调宽式转换, 再以此脉冲宽度控制另一被测信号  $U_y$  的积分时间而实现两个信号的相乘。两个准备相乘的输入量 ( $U_x, U_y$ ), 被一定的时间间隔  $\Delta t$  所分割, 在此分割期间进行乘法运算。由于  $\Delta t$  很小, 故输入量在此期间可以被认为是直流。在图中运算放大器 A 和积分电容 C 组成积分器,  $+U_s$  和  $-U_s$  是两个基准电压, S1 和 S2 是两个受比较器控制同时动作的模拟开关。输入信号与节拍方波 (+E、-E)、标准直流参考电源  $U_s$  同时加到积分器的输入端, 其输出端通过一个比较器对 S1 和 S2 的开闭进行控制。乘法器工作时  $U_s$  是固定的, 在  $\Delta t$  期间可以认为  $U_x$  不变, 由于这是一个闭环系统, 当达到平衡, 积分器积分电容充放电电荷在一个周期 T 中可以认为是平衡的, 即  $Q_1$  正,  $Q_2$  负。其中  $Q_1$  和  $Q_2$  分别为:

$$Q_1 = C \left( \frac{U_x}{R_1 C} + \frac{U_s}{R_3 C} \right) T_1 \quad (1)$$

$$Q_2 = \left( \frac{U_x}{R_1 C} - \frac{U_s}{R_3 C} \right) T_2 \quad (2)$$

式中:  $T_1$  为 S1 接通  $+U_s$  的时间;  $T_2$  为 S1 接通  $-U_s$  的时间。代入式  $Q_1 + Q_2 = 0$ , 且  $T = T_1 + T_2$ , 则可得

$$\frac{U_x}{R_1} + \frac{U_s T_1}{R_3 T} + \frac{-U_s T_2}{R_3 T} \approx 0 \quad (3)$$

经简化为

$$\frac{T_1 - T_2}{T} = \frac{R_3}{R_1 U_s} U_x \quad (4)$$

滤波器的输出  $E_0$  是由开关 S2 在 T 期间接  $+U_y$ , 在  $T_2$  期间接  $-U_y$ , 而得到的  $\pm U_y$  的平均值, 故

$$E_0 = \frac{U_y T_1}{T} + \frac{-U_y T_2}{T} = \frac{T_1 - T_2}{T} U_y \quad (5)$$

$$E_0 = -\frac{R_3}{R_1 U_s} U_x U_y \quad (6)$$

由以上原理可知, 当输入为直流信号时, 时分割乘法器可实现信号的准确相乘, 无运算误差产生。当输入交流信号时, 由于输入信号随时间变化, 乘法器不能实现交流信号的准确相乘, 就会产生交流测试原理性误差。但在输入信号为正弦工频交流信号时, 只要选择合适的调制频率, 时分割乘法器能够达到较高精度<sup>[5]</sup>。

在电铁负荷下, 因为整流电路的存在, 电流中含有大量的谐波, 所以进一步分析高次谐波下时分割乘法器误差变化的情况。

将输入信号  $U_x$  与  $U_y$  作傅立叶变换, 取其中的 21 次谐波作为高次谐波代表进行分析。

$$\text{不妨设 } U_x = U_y = \sqrt{2} \sin \omega t \quad (7)$$

其中:  $\omega$  为 21 次谐波的角频率, 则

$$U^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{2} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t) = 1 \quad (8)$$

设  $n$  为  $0 \sim 2\pi$  中的调制波将  $U_x$  的等分数, 则可以得输出值的表达式为

$$U_0 = \frac{2n}{\pi} \sum_{k=1}^{n/2} \left[ \cos \frac{(k-1)\pi}{n/2} - \cos \frac{k\pi}{n/2} \right] \quad (9)$$

由式 (9) 可以计算出同样设计的时分割乘法器在工频交流信号下的误差和在电铁负荷产生的 21 次谐波下的误差, 计算结果见表 1。以采用调制波频率 8 kHz 设计的电能表为例, 在电能质量问题不严重时, 误差极小为 -0.013%, 但在电能质量较差的情况, 如电铁负荷下会出现较大的负误差, 如计量 21 次谐波时误差为 -5.036%。

表 1 不同调制频率下误差的理论值

Tab.1 Theoretical value under different modulation frequency

调制波频率	4 kHz	8 kHz	100 kHz
工频信号的误差	-0.0515%	-0.013%	≈ 0
21 次谐波信号的误差	-19%	-5.036%	-0.033%

由以上分析可得，在电铁负荷下，采用时分割乘法器的电子式电能表的计量精度必定会受到影响，但由于电铁负荷中的高次谐波相对基波的含量较小，选取合适的调制频率后<sup>[6]</sup>，采用时分割乘法器的电子式电能表运用于电铁负荷后仍能达到一定的精度要求。

### 3 电铁负荷下时分割乘法器计量精度变化的仿真分析

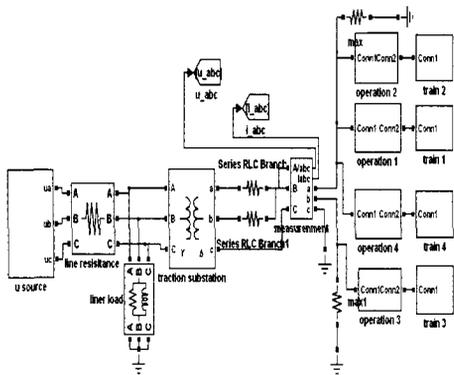


图 2 电铁负荷仿真模型结构图

Fig.2 emulation model of the electrified railway

根据电气化铁路的运行结构，本文在 SIMULINK 仿真环境中搭建了电铁牵引系统的原理性仿真模型（如图 2）。其中由控制模块（operation）和变流模块（train）组成机车的原理性仿真模型，其中控制模块简单模拟机车的投切，变流模块采用桥式半波整流电路模拟电铁谐波源，该模型中接入了四组机车（train1~4）。

设置控制模块和变流模块的参数以仿真电铁运行的各种情况，并取了其中一组谐波较大的情况进行了记录和实验。图 3 为这种情况下电压的局部波形图，可以看出电压波形出现了畸变，THD=2.26%，且只含有奇数次谐波，符合电铁负荷的实际情况。图 4 为局部的电流波形图，电流波形出现了较大的畸变，与电气化机车的整流器件的影响相符合，图中工况的 THD=22.94%，是一种谐波较大的极限情况。

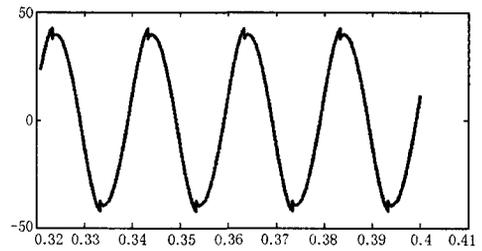


图 3 电压波形图

Fig3. Graph of voltage wave

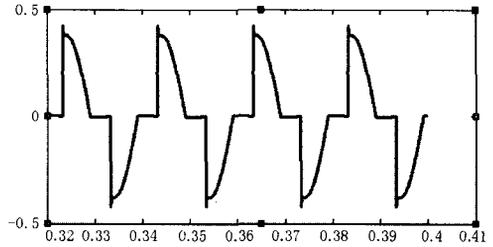


图 4 电流波形图

Fig4. Graph of current wave

将搭建的时分割乘法器模型接入电铁负荷模型中，采用 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz 的调制波信号进行仿真实验，得到电铁负荷下的一组计量误差数据。再将时分割乘法器接入理想工频正弦信号源，得到电能质量问题不存在时的另一组误差数据，结果见表 2。从仿真实验数据可以看出，在理想信号源下，时分割乘法器误差极小，在仿真电铁负荷下，时分割乘法器出现了明显的负误差，与理论计算的结果相仿。

表 2 时分割乘法器误差仿真结果

Tab.2 Emulation result about the error of TDM

调制波频率	5 kHz	10 kHz	20 kHz
正弦工频信号下	-0.037%	-0.01%	-0.001%
电铁负荷模型下	-0.6273%	-0.1893%	-0.0815%

电气化铁路是一个典型的冲击性负荷，它的功率波动大，随机性强，电气化机车的加速，制动，以及多辆列车的投切都会使功率带来很大的波动。同时一个周波内电压波形的突变，对计量仪表也带来了冲击。下面通过原理性仿真来分析负荷的冲击性对时分割乘法器的影响。

基于电铁原理性模型（见图 2）进行了实验，得到了电压波形（图 5（a）），可以看出由于电铁负荷的影响，加框部分电压发生了突变，突变值为 -6.98%。将其局部放大，得到局部图（图 5（b））。改变负荷参数，记录下时分割乘法器的误差并进行了比较，结果见表 3。可以看出电压波形的突变量越大，时分割乘法器的误差也相应增大，调整时分

割乘法器的调制频率可以使误差减小。

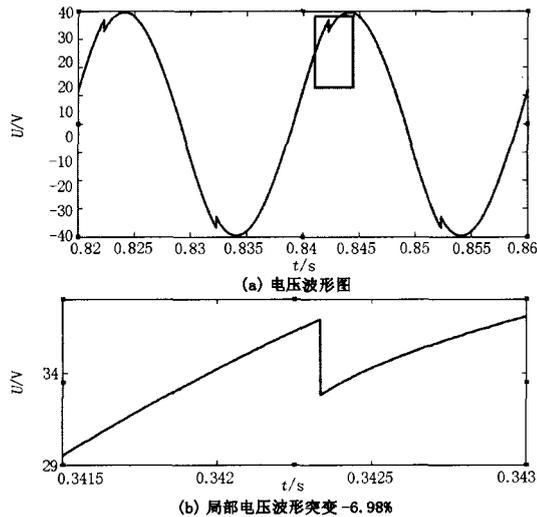


图 5 局部电压波形 突变-6.98%  
Fig.5 Part of voltage mutation-6.98%

表 3 各种电压突变下的计量误差

Tab.3 Error under different voltage mutation

局部电压突变值	-6.98%	-9.54%	11.01%	-12.37%
计量误差 (5 kHz)	-0.44%	-0.87%	-1.25%	-1.67%
计量误差 (10 kHz)	-0.20%	-0.31%	-0.38%	-0.42%

此外,在仿真模型中通过控制电车模块的投切,模拟了电车加速、制动时的功率变化,以此研究冲击负荷大小以及频度变化对时分割乘法器的影响。图 6(a)的负荷中冲击负荷在单位时间中出现了 5 次,幅值为正常负荷的 8 倍,图 6(b)反映的情况中,冲击负荷的幅值为正常负荷的 16 倍,图 6(c)中冲击负荷在单位时间中出现了 10 次。三种负荷下时分割乘法器的误差见表 4。从仿真实验的结果可见,冲击性负荷的幅值越大、出现的频率越高,时分割乘法器的误差越大。提高时分割乘法器的调制频率至 10 kHz 可以使误差减小。

表 4 三种负荷变化情况下的计量误差

Tab.4 Error under 3 different load

	A	B	C
计量误差	-0.1826%	-0.2931%	-0.1998%
计量误差 (5 kHz)	-0.1826%	-0.2931%	-0.1998%
计量误差 (10 kHz)	-0.0520%	-0.1035%	-0.0689%

#### 4 与数字式乘法器对比

从理论分析和仿真实验可以看出,用于电能计量的时分割乘法器在电铁负荷下虽然会出现误差,但能够达到一定精度要求。将模拟乘法器和数字式

乘法器作一对比,我们可以对电铁负荷对时分割乘法器的影响程度有更直观的认识。

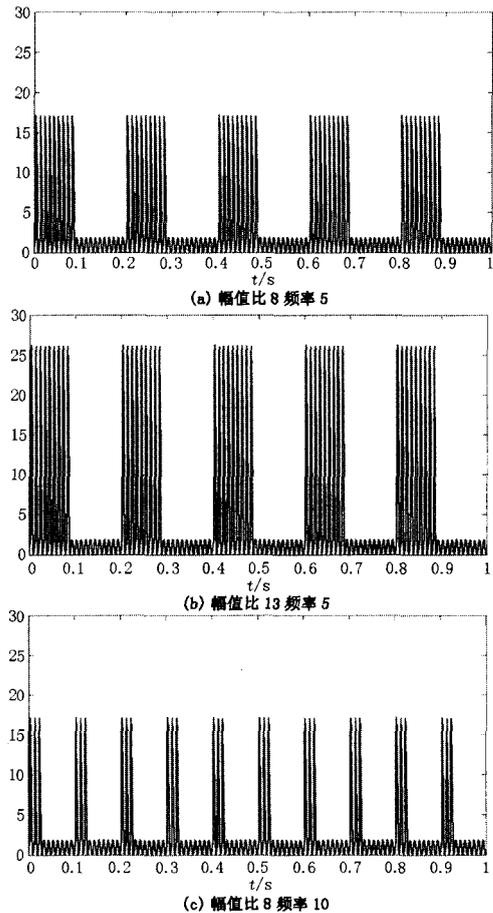


图 6 三种负荷的波形

Fig.6 Graphs of three binds of load wave

数字式电能表由于其中的采样和 A/D 环节会产生原理性的量化误差,而且由于电铁负荷带有冲击性和毛刺,使得采样误差也增大。同时,在测量信号随机变化性较大时,fft 算法的准确性也将收到影响。

在电铁负荷模型中加入数字乘法器模型(采用 12 阶精度的 A/D),记录下测量误差,并与调制频率为 20 kHz 的时分割乘法器进行对比,结果见表 5。

表 5 时分割乘法器和数字式乘法器仿真实验对比结果

Tab.5 Contrast of emulation result between TDM and digital multiplier

	时分割乘法器	数字式乘法器
理想正弦工频信号	-0.01%	-0.001%
电铁负荷模型	-0.1893%	-0.8411%

从表中可以看出,这两种乘法器在理想正弦工频信号下都有较高的精度,但在电铁负荷模型下,

均出现了负误差,相对数字式乘法器,时分割乘法器的误差较小。

文献[7]给出了使用数字式乘法器的 A 表和使用时分割乘法器的 B 表在四川两所牵引变电站的运用情况。将文献提供的数据进行总结可以得到表 6。

表 6 两种计量原理的电能表在电铁牵引站应用的实测数据

Tab.6 Data of two meters in traction transforms

	输入为正弦 工频信号时 的实验数据 误差	城南电铁 牵引站计 量值	新都石板滩 电铁牵引站 计量值
采用数字式乘法器的 表 A	$\leq 0.14\%$	239.499	173.869
采用时分割乘法器的 表 B	0	242.200	175.582

从牵引变电站实测数据可以看出,在工频正弦信号下,A 表和 B 表的误差均较小,与仿真实验的结果基本一致。而在牵引站的使用时,表 A 相对于表 B 出现了负误差,在两个牵引变电站的计量误差值分别为-1.115%和-0.976%,也验证了仿真实验结果。

由上可知,电铁负荷对时分割乘法器的计量精度影响相对较小。从计量原理上,时分割乘法器更适合用于电铁负荷的电能计量。

## 5 结论

通过以上理论分析和仿真实验,再结合牵引变电站的实测数据,可以得出如下结论:

1)电铁负荷由于其存在大量的谐波以及具有冲击性,会使电能计量用时分割乘法器误差增大。在正弦工频信号下误差很小的乘法器设计,当用于计量电铁负荷时,误差有增大的趋势。

2)通过改进乘法器的内部参数,如提高调制波频率,可以减小在电铁负荷下的误差。

3)将时分割乘法器和数字式乘法器做对比分析后可以发现,两者在电铁负荷下计量误差都会增大,但时分割乘法器误差较小。

综上,在电铁负荷的影响下,时分割乘法器的计量误差有增大趋势,但只要设计合理,能够完成电铁负荷准确计量的需要。

## 参考文献

[1] 陈邦达. 电气化铁路供电若干问题探讨[J].湖北电力,

2007.,31(1):21-23.

CHEN Bang-da, Discussion on the Problems Related to the Power Supply for Electrical Railway[J]. Hubei Electric Power 2007.,31(1):21-23

[2] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J].江苏电机工程, 2005,24 (3):8-11.

HAN Liu, TAN Shun-tao Power System Operation Affected by Electrification Railway and Its Improvement[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005,24 (3): 8-11.

[3] 王学伟 蒋圳等. 三角波调制式时分割交流功率测量误差的仿真估计[J].计量学报, 2002,23(2):139-143.

WANG Xue-wei, JIANG Zhen. The Error Estimation of AC Power Measurement Based on Triangular Modulated Time Division Multiplier[J]. Acta Metrologica Sinica, 2002, 23 (2): 139-143.

[4] 韩奕. SS4 型、SSI 型电力机车的动态模型及随机谐波电流计算(硕士学位论文)[D]. 西安交通大学,2000.

[5] Nmiljunic P. Sytematic Error of Time Division Wattmeters When Voltage and/or Current Distorter[J]. IEEE Trans,1987,IM-36(2):357-361.

[6] 钱伟康, 方仲达. 影响时分割乘法器准确度的主要因素分析[J].上海理工大学学报,2002,24(3):265-271.

QIAN Wei-kang FANG Zhong-da. Analysis on Main Factors Influencing Accuracy of Time-division Multiplier[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2002,24 (3):265-271.

[7] 向晓蕾, 唐广成, 李红柳. 两种新型电子式电能表在电铁牵引站的运用[J]. 四川电力技术,2007,30(5):67-69.

XIANG Xiao-lei, TANG Guang-cheng, LI Hong-liu. Application of Two New Electronic Watt-hour Meters to Traction Station of Electrified Railway and Its Analysis[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2007,30(5):67-69.

收稿日期: 2008-03-04

作者简介:

周 轩(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: zhouxuan408@sina.com

钱敏慧(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

赵剑锋(1972-), 男, 教授, 博导, 从事电能质量监测与电力电子在电力系统中的应用研究。