

固态磁铁控制技术的最新改进

安德鲁·塞克斯通

Cableform公司

地址：8845 Three Notch Road

Troy, Virginia 22974

电话：+1- (434) 589-8224

传真：+1- (434) 589-3803

电子邮件：Andrew.thexton@cableform.com

关键词：磁铁控制，绝缘栅双极性晶体管（IGBT），固态

简介

对磁铁控制器技术进行的重大改进提高了磁铁的性能及可靠性，并且降低了有关接触器-电阻器控制器的故障率和维护量。新型磁铁控制技术同时也消除了损坏磁铁的放电电压峰值。

装置技术验证和结果

这些重大改进源于Cableform公司作为技术验证试点于2004年2月首次安装的固态优化型（Solid-State OptimizerTM）磁铁控制器。这种优化型控制器没有接触器；不存在磨损或故障；利用电流进行控制而非电压控制；而且消除了会进入供电电源回路的损坏磁铁的放电电压峰值。自从安装在全天运行的废钢处理磁铁上之后，优化型控制器显示出以下几项优势：

- ✓ 磁铁运行温度降低
- ✓ 磁铁提升能力提高17%
- ✓ 废钢处理作业周期缩短
- ✓ 固态磁铁控制器停机时间为零
- ✓ 固态磁铁控制器免维护
- ✓ 由于安装了固态磁铁控制器，磁铁控制器的维护成本节约超过15000美元
- ✓ 磁铁实现零故障、零更换
- ✓ 磁铁电缆断开和/或短路对固态磁铁控制器无影响
- ✓ 消除了磁铁的放电电压峰值
- ✓ 耗电减少

优化型（OptimizerTM）固态磁铁控制器能够提高效率、提高产量并降低成本的特点包括：

- 磁铁电流控制和将磁铁温度降到最低
- 消除了磁铁放电电压峰值
- 不使用接触器、计时器和其它损耗部件
- 缩短磁铁充电时间并增大磁铁的提升能力
- 耗电减少
- 其它特点
 - 断电过渡
 - 接地故障检测
 - 电缆断开检测
 - 备用电池
- 磁铁制造商有机会设计专门采用电流控制的磁铁

为何要控制磁铁电流?

传统的磁铁控制由接触器和电阻器，它们用于将电压加载到磁铁上。施加的电压通过感应产生电流流经磁铁，这样磁铁的磁场强度就与磁铁的安培数—匝数¹成正比。对于给定的提升磁铁，其匝数（ N_m ）是个定值，这样磁铁所能完成的工作就与流经磁铁的电流（ I_m ）成正比。

$$(1) F = \alpha * I_m * N_m$$

这里 $F =$ 力， α 是个常数， $I_m =$ 磁铁电流，且 $N_m =$ 磁铁内的线圈匝数。

磁铁电流（ I_m ）的稳态电流强度，应用欧姆定律，就等于所加电压（ V_a ）除以磁铁的内部电阻（ R_m ）。²

$$(2) I_m = V_a / R_m$$

磁铁的内部电阻，由铜线或铝线缠绕而成，与磁铁的温度³（ T_m ）成正比，这样当磁铁绕组温度升高时，磁铁的电阻（ R_m ）增大，对于固定的电压来讲，当磁铁电流（ I_m ）减小时，就会造成磁铁运行的工作量减少。

$$(3) R_m = \beta * T_m$$

这里 $R_m =$ 磁铁电阻， β 是磁铁绕组电阻率的温度系数，且 $T_m =$ 磁铁温度

这样磁铁温度（ T_m ）就与 $I_m^2 R_m$ —磁铁内的电气热损失成比例。因此正常使用时⁴ 磁铁内部的热量与磁铁电流的平方成正比且与磁铁电阻直接成正比。

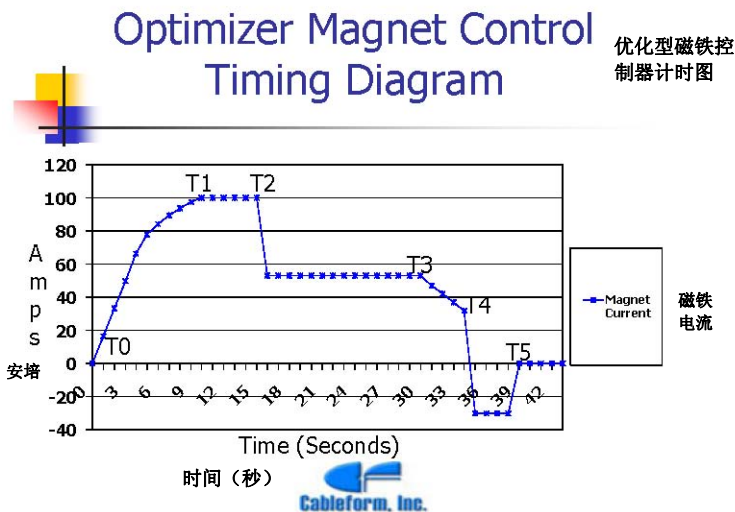
$$(4) T_m = \gamma * I_m^2 * R_m$$

这里 γ 是一个常数， $I_m =$ 磁铁电流，且 $R_m =$ 磁铁电阻

当采用接触器电阻器进行控制时，磁铁上所加电压是一个定值，当磁铁温度升高时，磁铁电阻增大，磁铁电流减小，这样磁铁的提升能力就会下降。

因此，如果控制磁铁电流来产生磁铁完成工作所需的磁力的话，同时会将磁铁内能够产生无用热量的过载电流降到最小，这样磁铁的提升能力就会得到优化。

磁铁电流控制



优化型 (OptimizerTM) 固态磁铁控制器

图 1

优化型控制器的计时图详细标出了典型的磁铁升降电流计时曲线。在T0时刻，系统接收到操作员发出的提升（LIFT）命令，给磁铁加全电压，磁铁电流按照与磁铁阻抗成正比的速率升高。程序控制的提升电流在达到T1时刻稳定下来直至自动降到T2时刻程序控制的吸附电流值。控制器一直保持吸附电流值直到T3时刻接收到操作员发出的降落（DROP）命令为止。一旦接到降落命令，就会产生程序控制的滴降（DRIBBLE）（T3-T4段）和放电/清除（DISCHARGE / CLEAN）（T4-T5段）的运行。

- 提升电流 – 最初提升时程序控制的最大电流，图中为100安培。
- 提升时间 – 从提升电流升高到吸附电流所需的时间。T0到T2
- 吸附电流 – 吸附电流值，图中为55安培。T2到T3
- 滴降 – 有控制地减小所施加的磁铁电流。T3到T4
- 降落 – 磁铁电流快速放电并加清除电流。T4到T5

用户可以对图表中每一个运行时间段的数值和持续时间进行调节，以便重新绘制提升/降落电流曲线图并优化所有给定的磁铁的性能。

绘制磁铁电流曲线以将磁铁运行温度降至最低

如上所述，固态磁铁控制通过降低磁铁内过多无用的热可以使磁铁在较低温度下运行。用户可调节软件参数以便自定义下图所示的230伏提升/降落作业周期。

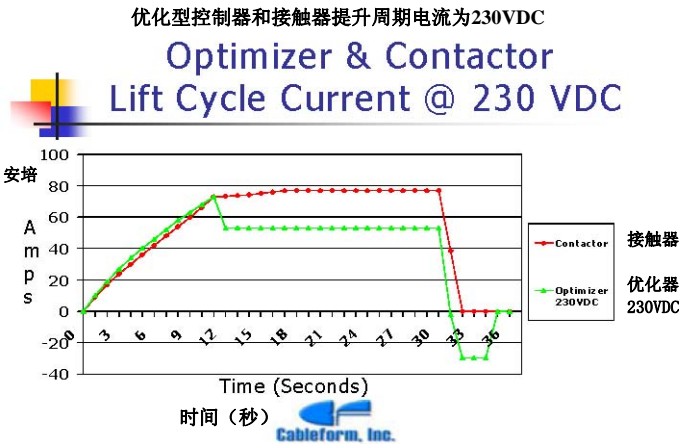


图 3

接触器控制的电流曲线用红线标出，在相同磁铁上应用固态磁铁控制的电流曲线用绿线标出。如图所示，使用固态控制之后，吸附电流在11秒之后自动减小，仅用远少于接触器控制的约24安培电流来保持吸附负载。在负载运送周期内，磁铁内减小24安培的电流相当于磁铁内降低约5KW的热损耗。降低磁铁内的热损耗可使磁铁以更低的温度运行，在一个操作班次内提升能力更大，产量更高。

绘制磁铁电流曲线以缩短作业周期且提升更多的物料

固态磁铁控制通过给磁铁加更高的电压在不升高磁铁温度的情况下即可提升更重的负载。参见图4和图5的285伏作业周期图，采用相同的磁铁，同时电流也相应增大。

优化型磁铁提升周期电流为285VDC

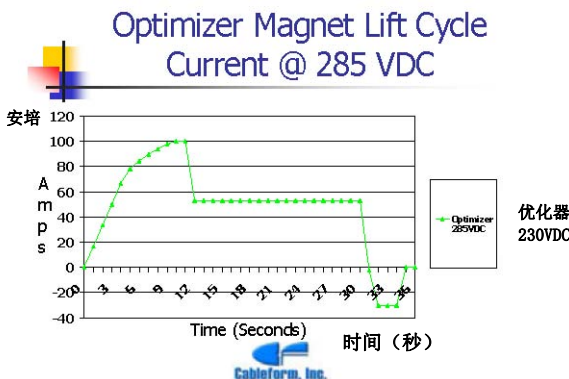


图 4

在230VDC下采用优化型控制器的磁铁运行状况

Magnet Operating Conditions with Optimizer™ @ 230 VDC

- Lifting Current 73 Amps
提升电流：73安培
- Time to 73 amps 11 Seconds
升到73安培所需时间：11秒
- Holding Current 53 Amps
吸附电流：53安培



图 2

在285VDC下采用优化型控制器的磁铁运行状况

Magnet Operating Conditions with Optimizer™ @ 285 VDC

- Lifting Current 100 Amps
提升电流：100安培
- Time to 73 amps 4.4 Seconds
升到73安培所需时间：4.4秒
- Holding Current 60 Amps
吸附电流：60安培



图 5

通过对比图6中230伏电流曲线与285伏电流曲线，可以发现230伏时升到73安培用时为11秒，而285伏减少为4.4秒。这样73安培的负载就会被提升得更快，从而缩短作业周期时间，并且提升电流增至100安培，可以增加提升能力。仅略微增大吸附电流以吸住所增加的负载，但一直能保持很高的热经济性且不需安装双电压整流器。

消除了磁铁放电电压峰值

传统的磁铁控制器是通过切换到磁铁的放电电阻来其泄放储存在磁铁中的电能。通常所用的放电电阻为电阻器或压敏电阻器。传统的磁铁控制器的问题是当切换串入磁铁的电阻时，磁铁内产生快速变换的电流（di/dt），从而在供电回路感应产生一个非常高的电压峰值。根据所用放电电阻的不同，这些放电电压峰值可从约800VDC直到1500VDC以上。

放电电压峰值可造成磁铁、磁铁控制器、以及任何与磁铁或天车供电电源相连接的其它设备损坏或者性能故障。

固态磁铁控制器利用放电电压控制电路来检测当磁铁断电时产生的供电电压的升高，并迅速反应切换到所需的串入磁铁的低阻抗放电电阻，以此保证电压稳定在用户可编程的电压值上，通常为320VDC。在对磁铁放电时线路电压进行监控的同时，对低阻抗放电负载进行快速循环和开关，以此在几伏的幅度内调节放电电压。这样，磁铁被快速地放电，同时也消除了放电电压峰值，整个天车的电气系统就会避免传统放电瞬态过电压的危险状况。

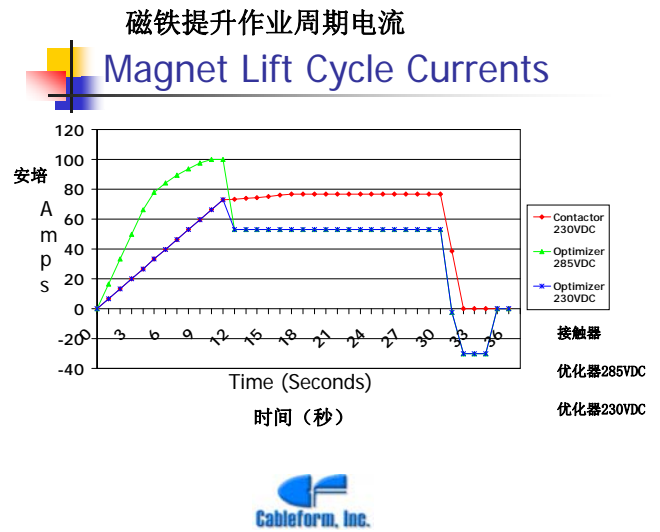


图 6



固态磁铁控制



吸起废钢负载的磁铁

断电过渡

传统的接触器控制在线路电压断电的情况下会立即松开卸掉磁铁上吸附的负载。当线路电压降到接触器线圈保持接触器吸合所需的最低电压以下时，控制系统就会启动正常的断电状态，磁铁线路切换进磁铁放电电阻，磁铁松开并扔掉负载。

使用固态磁铁控制时，在提升模式下当给磁铁控制供电的电源断电时，固态磁铁控制系统内的断电过渡就会启动。当检测到电压下降时，系统会重新配置和控制磁铁控制电路，利用储存在磁铁内的电能给磁铁控制器的控制电源和磁铁吸附载荷的电源同时供电，使磁铁仍然可以吸住载荷一段时间。系统是通过重新配置优化型磁铁控制器的绝缘栅双极性晶体管，使磁铁电流在一个低阻抗电路内循环流动，同时周期性地改变磁铁电流方向，为给磁铁控制器的控制电源供电的电容器的电容器组充电，以此来完成断电过渡或低电压过渡。

过渡期内，吸住负载时间的长短取决于储存在磁铁内电能的多少、吸住负载所需电能的量以及磁铁的自放电特性等因素。接触器控制和固态控制的本质区别在于接触器控制是将放电电阻切入到磁铁回路中，而固态控制是让电流在一个低阻抗电路内循环流动，这样磁铁内电流的衰减就取决于磁铁的自放电特性。固态控制的断电过渡可以使系统在不扔掉载荷的情况下迅速恢复瞬时的供电电压失电。

节约电能

固态控制通过两种不同的方法来实现节电。第一种方法是通过用户编程来把磁铁的提升电流自动减小到吸附电流来实现的。前面的示例表明，所需的吸附电流大约只是提升电流的三分之二，这样一来可节约三分之一。

第二种节电方法通过固态控制调节磁铁电流时对电流进行放大来实现。

电流放大有一个前提，就是磁铁内的感应电流要大于供电电路给磁铁提供的电流。在试验设备上，结果表明供电电源仅需供给磁铁15安培的电流就可以产生磁铁57安培的吸附电流。

电流放大概念的最佳解释如下：磁铁内的总电流等于当控制晶体管为“开”时供电电源向其提供的电流加上当控制晶体管为“关”时流经磁铁和飞轮电路的电流。这样，当晶体管连续“开”和“关”来调节磁铁电流时，流经磁铁的总电流就会远大于供电电源供给磁铁的电流。应用电流放大，流经磁铁的电流可以达到供电电源供给磁铁电流的七倍之高。由于晶体管来回切换以维持设定的磁铁电流，因此电流放大的倍数与晶体管“关”的时间除以晶体管“开”的时间得出的商成正比。

不管磁铁从正常供电电源获取还是从备用电池获取电能，电流放大都会起作用。因此，固态控制能够从电池组向磁铁提供吸附电流，同时，固态控制只从电池组获取能够吸住载荷的最少量电能。系统这样运行就可以在电池组不变的条件下可以获得更长的吸住负载时间，并且在所需的吸附时间一定的条件下可以安装更小、更轻的电池组。

小结

固态控制的使用实例表明，在废钢天车设备上强烈振动的环境下，固态控制器耐用而可靠。使用固态电路和电流控制来对磁铁进行控制证明可提高作业效率、减少维护并降低成本。另外，消除放电电压峰值、降低磁铁温度以及降低能耗可直接提高效率并且降低了磁铁、整流器以及所有与天车供电电源相连接的其它设备的电气损耗。

以电流控制器为基础的固态微处理器可以使磁铁的设计师和制造商能够设计和制造专用于电流控制的更高效的磁铁。