

文章编号:1671-251X(2009)07-0075-04

# 受电弓滑板与接触网导线相互作用规律分析<sup>\*</sup>

董 讷

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院,辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:**受电弓滑板与接触网导线是一对比较特殊的摩擦副,其工况条件有其显著的特点,摩擦磨损的形成机理较复杂,是机械作用、电气作用以及化学或电化学作用的综合结果。文章根据接触网与受电弓的物理模型建立了受电弓与接触网系统的动力学模型,然后分别建立了接触网和受电弓的运动方程,并确定了接触力的计算公式,从而得到了受电弓滑板与接触网导线之间的相互作用规律。

**关键词:**受电弓滑板;接触网导线;接触力;摩擦;磨损

**中图分类号:**U264.3      **文献标识码:**A

收稿日期:2009-02-17

\*基金项目:辽宁工程技术大学优秀青年基金资助项目  
(04A010013)

作者简介:董 讷(1976-),女,辽宁阜新人,硕士,讲师,现从事  
电器与电接触方面的教学与科研工作。E-mail:frog\_dn@163.com

## 0 引言

受电弓滑板是电力机车从接触网上获得电流的受流部件。受电弓滑板和接触网导线这一对滑动摩擦副在相对高速滑动过程中,既要保证接触受流良

$$w_i = w_i + w_j \quad (26)$$

合并后的输出偏移为

$$c_i = \frac{1}{2}(c_i + c_j) \quad (27)$$

然后再考虑删除问题。如果连续多个样本都无法激活某隐节点,即  $count > c_{max}$  时,应删除该隐节点,其中  $count$  为上次被激活到现在这段时间内隐节点未被激活的次数累计值。为防止误删,  $c_{max}$  可以取较大的值。

## 4 仿真研究

假设被控对象模型为<sup>[4]</sup>

$$y(k) = \frac{a(k)y(k-1) + u(k-1)}{1 + y(k-1)^2} \quad (28)$$

式中:  $a(k) = 1 - 0.1 \sin(10t)$ , 为变化相对较快的时变参数。

BP 神经网络隐层采用 5 个节点,即 4-5-3 结构,  $= 0.25$ ,  $= 0.05$ , 采样频率为 1 000 Hz,  $L = 5$ ,  $k = 1.5$ ,  $_{min} = 0.7$ ,  $_{min} = 0.01$ ,  $_{min} = 0.05$ ,  $_{min} = 0.1$ ,  $c_{max} = 100$ 。仿真结果如图 2 所示,分别取期望输入为阶跃信号和正弦信号  $r(t) = \sin(8t)$ 。

从图 2 可看出,基于神经网络的 PID 自整定控制系统响应快、动态性能和稳定性较好,且具有较强的鲁棒性和适应性。

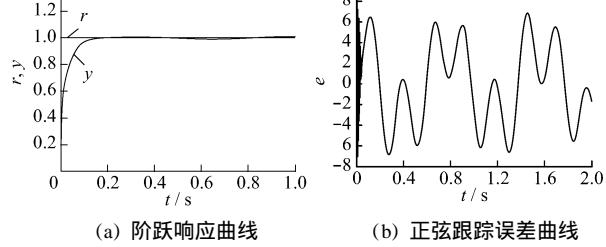


图 2 系统仿真结果图

## 5 结语

本文在 PID 控制基础上,应用 RBF 神经网络辨识被控对象的梯度信息并将其传递给 BP 神经网络,从而使 BP 神经网络在线优化 PID 控制参数。理论分析和仿真实验证明了对于参数扰动较大的非线性系统,应用该方法仍能得到满意的控制效果。

## 参考文献:

- [1] 杨炎. 基于自适应神经 PID 改进算法的非线性系统控制[J]. 南昌大学学报, 2007, 31(6): 116~118.
- [2] 何玉彬, 李新忠. 神经网络控制技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

好,又要保证对接触线的磨耗小,还要尽可能延长受电弓滑板的使用寿命,这对于保证电力机车安全可靠地运行具有十分重要的作用。受电弓滑板与接触网导线之间的作用十分复杂,二者之间的摩擦磨损受多种因素的综合影响,因此,难以得出二者的相互作用规律。笔者通过分析受电弓与接触网系统的动力学模型、建立受电弓与接触网的运动方程,得到了二者之间的接触力计算公式,为分析受电弓滑板与接触网导线之间的相互作用规律提供了一种方法。

## 1 受电弓滑板与接触网导线的工况特点

受电弓滑板与接触网导线是一对比较特殊的摩擦副,它们的工作条件具有以下显著特点<sup>[1]</sup>:

### (1) 载荷周期性随机变化

受电弓滑板与接触网导线分别属于2个独立的弹性系统——受电弓系统与接触网系统。这2个弹性系统相互接触,产生接触压力。电力机车在运行时,由于弓网的振动,使得受电弓滑板与接触网导线之间的接触压力呈随机变化的特征;又由于接触网按跨距布置,因此,这一随机变化的载荷具有一定的周期性。另外,受电弓滑板在经过接触网上的“硬点”时,例如在过分相、分段绝缘器、接触网导线硬弯及悬挂不平顺处,还会产生阶跃式的冲击,造成瞬间离线现象。

### (2) 接触时有强电流通过

目前电力机车的电流在400 A左右,高速机车的电流高达850 A。在强电流的作用下,弓网之间发生瞬间离线时将产生严重的拉电弧现象,造成受电弓滑板和接触网导线表面烧伤,从而使接触状况恶化。

### (3) 高滑动速度

准高速铁路的速度为160 km/h左右,对应的弓网相对滑动速度为44.4 m/s。在常规机械设计中,通常认为相对滑动速度超过30 m/s的摩擦副即为高速摩擦副。显然,弓网系统属于高速滑动摩擦磨损系统。

### (4) 环境条件复杂多变

弓网系统工作在野外露天环境。夏日高温、冬季严寒、雨雪、砂尘等都会影响其摩擦磨损性能和导电性能。

## 2 受电弓滑板与接触网导线的摩擦磨损机理

### 2.1 机械作用下的摩擦磨损

物体作相对运动时,其相互作用的表面之间将

产生摩擦,在无足够的润滑膜将2个表面隔开时,磨损是不可避免的。在机械作用下引起的摩擦通常与其所受的载荷、相对滑动速度、表面品质(包括表面形貌、表面材料硬度等)以及环境因素(如温度、湿度和腐蚀性介质等)有关。机械磨损主要包括粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损等形式。

在正常情况下,受电弓滑板与接触网导线间的机械磨损以粘着磨损为主。在载荷作用下,实际接触峰点处的应力可能达到受压屈服极限而形成粘着结点,滑动中粘着结点剪切断裂,被剪切的材料或脱落成磨屑,或由一个表面迁移到另一个表面,如图1所示。根据粘着结点的强度和破坏位置不同,粘着磨损又分为轻微粘着磨损、一般粘着磨损、擦伤磨损、胶合磨损等几种形式。粘着磨损的主要特征:沿滑动方向可见较明显的擦痕;表面上发现配对摩擦副材料的迁移等。

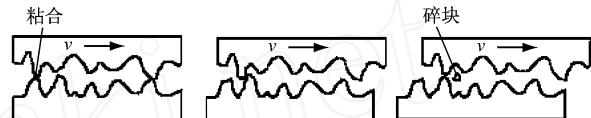


图1 粘着磨损示意图

当受电弓滑板工作在粉尘、风沙较大的环境中时,砂粒( $\text{SiO}_2$ )等硬颗粒附着在受电弓滑板或接触网导线上进入接触,将导致磨粒磨损的产生。其磨损形成机理:(1)磨粒对表面产生犁沟作用或称微切削、划伤表面;(2)磨粒压入表面,因挤压作用使表面材料塑性变形而脆化,从而在滑动时形成鳞片状的剥落碎屑。磨粒磨损如图2所示。

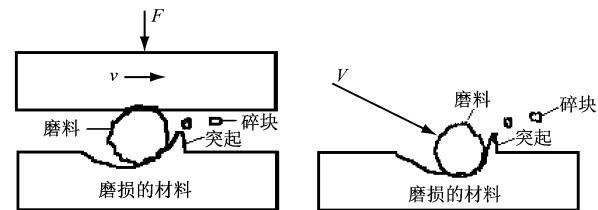


图2 磨粒磨损示意图

受电弓滑板在运行过程中经过接触网上硬点或缺陷处时,会受到冲击力的作用,对于韧性较差的材料(如碳滑板),也常有受电弓滑板材料崩裂或以脆性剥落为特征的冲击磨损发生,其特征是磨屑的颗粒度较大<sup>[1]</sup>。

疲劳磨损是指凸部在反复剪切力的作用下产生疲劳裂纹,最后导致凸部微粒脱落而引起的磨损。该机理的磨损问题不大。

### 2.2 强电流作用下的摩擦磨损

受电弓滑板与接触网导线的工作特性在本质上

属于电接触范畴,其磨损情况也明显表现出电磨损的特点<sup>[2]</sup>。受电弓滑板经过接触网上硬点时会产生较大的振动,当接触压力减小到零时,受电弓滑板就要离线,产生火花或稳定的电弧。在强电流作用下,一方面由于受电弓滑板与接触网导线接触不良和离线等原因引起的火花或电弧而造成电气磨损,另一方面在接触受流时由于电流通过引起温升,导致接触表面物理状态发生变化,造成附加的机械磨损,加大了总磨损。

在受电弓滑板离线过程中,接触点电流急剧增加产生的热量使接触点金属熔化,形成液桥,最后断开形成电弧。此时在高温及强电场作用下,电子对表面强烈轰击,使材料蒸发或产生材料转移,在工作表面出现凹坑或结瘤,从而加速磨损。在强电流的作用下,摩擦表面的温升是不同热源对滑板材料作用的结果,包括电弧热、接触电阻热、摩擦热及体电阻热等。在强电流作用下,表面接触温度将比机械摩擦副高出很多。表面接触温度过高会改变材料表面的组织结构和机械性能,从而影响材料的摩擦磨损性能。

另外,由于弓网系统处于野外环境并带电运行,受电弓滑板与接触网导线之间还存在以化学或电化学作用为主的氧化磨损或腐蚀磨损。氧化磨损和腐蚀磨损的共同特点是生成某些特殊的表面层,然后在机械作用影响下,表面层材料脱落。二者的不同之处是前者氧化表面层的生成具有两重性:一种是生成脆性层,与机体连结强度不高,易于剥落,使磨损加剧;另一种是形成对机体的保护层,有一定的减摩抗磨作用。而腐蚀磨损则只会加剧磨损,强电流作用是促使腐蚀磨损发生的主要因素。

由上述分析可知,受电弓滑板与接触网导线的摩擦磨损是机械作用和强电流作用的综合结果,二者相互影响,互为因果,这是弓网系统摩擦学研究的重要特征。

综上所述,受电弓滑板的磨损方式可分为机械磨损、电气磨损、化学磨损等,如表1所示<sup>[3]</sup>。

表1 受电弓滑板主要磨损方式分类表

磨损方式	具体分类
机械磨损	粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损
电气磨损	电弧熔损、电离子转移
化学磨损	腐蚀磨损、氧化磨损

### 3 受电弓滑板与接触网导线相互作用的模型

#### 3.1 物理模型

##### (1) 接触网物理模型

受电弓与接触网是一个不可完全分离的系统,二者通过受电弓滑板与接触网导线的动态接触联系在一起。接触网的类型较多,其中简单链型悬挂接触网因具有结构简单、调节方便、成本低等优点而得到广泛的应用<sup>[4]</sup>,其简化模型如图3所示。



图3 简单链型悬挂接触网的简化模型图

##### (2) 受电弓物理模型

受电弓的种类繁多,不同的受电弓因其适用的速度和场合的不同,其结构也不尽相同,目前在我国电力机车上使用的多为单臂受电弓。研究受电弓的模型常采用归算质量模型,即利用动能等效原理将原结构简化成几个具有集总质量的模型,根据集总质量的数目可分为一元模型、二元模型、三元模型等。图4为受电弓二元模型图。

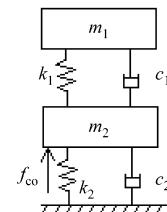


图4 受电弓二元模型图

图4为一个较完整的受电弓模型,上面的质量、弹簧和阻尼可直接由弓头参数转换而来,下面的质量、弹簧和阻尼则由框架部分的质量、各个构件的转动惯量、升弓力、重力、摩擦与阻尼等参数转换而来。如果将受电弓的各个构件看成刚体的话,受电弓确实有2个自由度<sup>[5]</sup>。

##### (3) 受电弓与接触网系统动力学模型

结合上述模型,笔者建立了受电弓与接触网系统动力学模型,如图5所示。接触网为简单链型悬挂接触网,受电弓考虑为二元线性化模型(忽略干摩擦的影响),受电弓与接触网系统通过接触力耦合在一起。

#### 3.2 数学模型分析

根据上述模型,建立接触网及受电弓的运动方程。

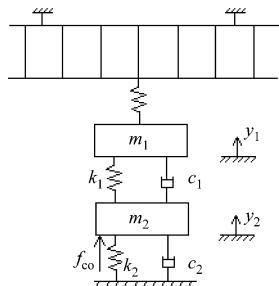


图 5 受电弓与接触网系统动力学模型

### (1) 接触网的运动方程

对简单链型悬挂接触网作离散化处理,如图 6 所示。

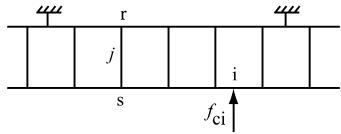


图 6 简单链型悬挂接触网离散化处理示意图

建立其运动方程<sup>[6]</sup>:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F - [0, \dots, f_{ci}, \dots, 0]^T \quad (1)$$

式中:  $M$  为接触悬挂的质量矩阵;  $C$  为接触悬挂的阻尼矩阵;  $K$  为接触悬挂的刚度矩阵;  $y$  为接触悬挂的位移矢量;  $F$  为作用在接触悬挂上的静载荷;  $f_{ci}$  为受电弓运行至  $i$  点时的接触力。

$M$  为对角阵,根据承力索与接触网导线的密度以及离散化分段长度,并考虑吊弦、支撑杆、定位器等的质量后构成。 $K$  为刚度矩阵:

$$K = K_L + K_D \quad (2)$$

式中:  $K_L = \begin{bmatrix} K_{11} & \\ & K_{22} \end{bmatrix}$ ,  $K_{11}$  和  $K_{22}$  分别为承力索与接触网导线的刚度矩阵;

$$K_D = \sum_{j=1}^m K_{Dj} = \sum_{j=1}^m \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & k_j & \dots & -k_j \\ & \dots & \ddots & \\ & -k_j & \dots & k_j \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $K_{Dj}$  为单根吊弦的刚度矩阵,由第  $j$  根吊弦的受拉刚度系数  $k_j$  和该吊弦两端节点  $r$ 、 $s$  的位置决定。

### (2) 受电弓的运动方程

受电弓原本是一个非线性系统,但在其工作点位置附近可作线性化处理,并用等效粘性阻尼代替库仑阻尼。简化后的受电弓力学模型如图 7 所示。

其运动方程:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ci} \\ -f_{co} \end{bmatrix} \quad (4)$$

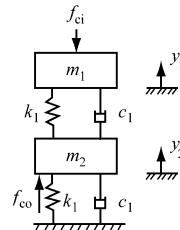


图 7 简化后的受电弓力学模型图

式中:  $m_1$ 、 $m_2$  分别为弓头、框架的质量;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为弓头、框架的阻尼;  $k_1$ 、 $k_2$  分别为弓头、框架的刚度;  $y_1$ 、 $y_2$  分别为弓头、框架的位移矢量;  $f_{ci}$  为升弓力。

当受电弓运行至  $i$  点、弓网系统保持接触时有

$$y_1 = y_i \quad (5)$$

这样便可对弓网系统的动态受流进行求解<sup>[6]</sup>。

### (3) 接触力的计算

弓网系统的接触力  $f_{ci}$  可按式(6)计算:

$$f_{ci} = m_1 \ddot{y}_1 + c_1 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 (y_1 - y_2) \quad (6)$$

通过上述动力学模型的建立,确定了受电弓滑板与接触网导线接触压力的计算公式。一般取接触网导线与受电弓滑板接触压力值为静态接触压力最佳值 70 N,这样就可以应用式(6)计算弓头的刚度  $k_1$ 。在保证  $f_{ci} = 70$  N 的前提下,确定合适的  $k_1$  值,使受电弓滑板与接触网导线达到良好接触。

## 4 结语

笔者采用建立受电弓与接触网的动力学模型、求解受电弓与接触网运动方程的方法分析受电弓滑板与接触网导线的相互作用规律。实际上,受电弓滑板与接触网导线之间的作用十分复杂,受多种因素的随机影响,必须通过大量的实验研究为理论研究提供依据。关于受电弓滑板与接触网导线之间的作用规律需要进一步深入分析。

## 参考文献:

- [1] 李娜,张弘,于正平.受电弓滑板—接触导线摩擦磨损机理与特性分析[J].中国铁道科学,1996,17(4).
- [2] 丁红卫,王永第,许富强,等.机车受电弓用新型粉末冶金滑板[J].电工材料,2002,(1):22~25.
- [3] 胡建红.铜基受电弓滑板成分优化及组织性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2004.
- [4] 梅桂明,张卫华,刘红娇.不同结构类型接触网动态特性[J].交通运输工程学报,2002,2(2):27~31.
- [5] 刘红娇.受电弓机构几何参数优化与主动控制的研究[D].成都:西南交通大学,2002.
- [6] 吴天行.弓-网高速动态受流仿真研究[J].铁道学报,1996,18(4):55~61.