

# 能流波动规律对电空制动电磁阀性能的影响

应之丁, 高伟航, 高立群

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 列车电空制动电磁阀的动态性能直接决定列车行车安全. 基于电磁阀作用过程电磁场能流波动的规律以及对电磁阀动态特性影响分析研究, 从提高其工作的灵敏度、稳定性和可靠性入手, 通过调整电磁阀衔铁间隙、线圈匝数和弹簧预紧力等主要结构参数, 控制电磁阀动态电磁场变化范围及优化性能参数, 减少了电磁场能量输出, 减缓了电磁阀工作温度的上升速度.

**关键词:** 列车制动; 电磁阀; 动态分析; 仿真优化

**中图分类号:** TM574.3

**文献标志码:** A

## Effect of Energy Fluctuation Law on Performance of Electro-pneumatic Brake

YING Zhiding, GAO Weihang, GAO Liqun

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In the electro-pneumatic braking system, the dynamic performance of the electro-pneumatic brake solenoid valve directly determines the train safety. To improve the sensitivity and reliability, the solenoid valve armature clearance, coil turns, spring preload and other major structural parameters were adjusted based on the law of electromagnetic wave energy flow fluctuation and its influence on the dynamic characteristics of valve during action process. The dynamic electromagnetic field range of changes was controlled, and the performance parameters were optimized. It is found that the electromagnetic field energy output was reduced and the operating temperature rising velocity was decreased.

**Key words:** train braking; solenoid valve; dynamic analysis; simulation and optimization

电磁阀实现电控制动指令转换为压力空气的制动力, 完成电空制动作用. 电磁阀的灵敏度以及长期高频度启闭的性能稳定性是列车制动系统要求的最重要的技术指标.

现阶段国产电空制动电磁阀还不能完全满足要求, 突出的问题是性能不稳定. 以往常规方法是采用控制励磁电流大小及线圈匝数以及选用电磁材料, 以提高电磁作用力和反应时间.

电磁场能量为电场强度和磁场强度的乘积, 而电磁力直接与电磁场能流密度矢量变化值有关, 控制电磁阀作用过程电磁能流变化, 减少不必要能量输出, 可有效降低电磁阀温度, 减缓磁性材料衰减.

## 1 电空制动电磁阀基本结构和电磁场仿真模型建立

电空制动电磁阀基本结构如图 1 所示. 当线圈通电励磁时, 固定铁芯吸合动铁芯, 克服弹簧作用力带动滑阀芯, 改变滑阀芯的位置, 从而打开一定流量压力空气; 当线圈断电时, 依靠弹簧弹力推动滑阀芯, 将动铁芯顶回原位置.

研究电磁场能流波动规律影响, 是根据电磁理论中电磁力形成要素和作用方向与磁场方向关系, 在电磁阀启动、稳定作用、关闭过程中仿真分析电磁阀结构参数, 包括衔铁间隙、线圈匝数、弹簧预紧力、动铁芯尺寸等对电磁场集聚及分散以及磁力线方向的影响<sup>[1-2]</sup>, 最大程度集聚电磁力和稳定电磁力及其方向, 从而提高电磁力, 减小铁芯之间的冲击, 减少不必要的电磁能输出, 增加电磁阀寿命, 确定最终的优化参数.

建立电磁阀二维仿真模型如图 2 所示. 分析电磁阀模型的动态过程电磁场的集聚和分散变化规律, 需考虑选取材料、确定基本电磁场作用范围, 划

电空转换用电磁阀是高速列车和城市轨道交通列车电空制动系统的核心部件. 列车制动系统通过

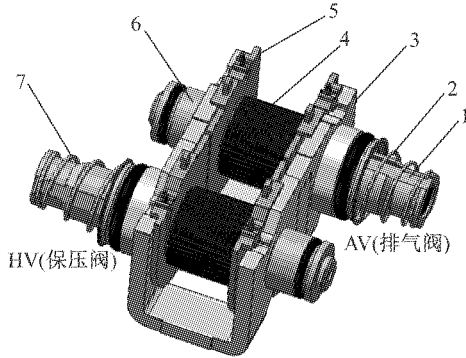
收稿日期: 2017-01-07

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1432000)

第一作者: 应之丁(1964—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为机车车辆、城市轨道交通车辆制动. E-mail: yingzhiding@tongji.edu.cn

通讯作者: 高伟航(1994—), 女, 硕士生, 主要研究方向为机车车辆制动. E-mail: 18817870132@163.com

分网格之后对动铁芯添加运动域<sup>[3]</sup>.



1—动铁芯组件;2—AV 动铁芯弹簧;3—导磁板;4—漆包线线圈;  
5—线架;6—静铁芯组件;7—HV 动铁芯弹簧等

图 1 制动电磁阀的整体结构

Fig.1 Overall structure of brake solenoid valve

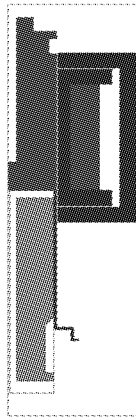


图 2 电磁阀二维模型

Fig.2 Two-dimensional model of solenoid valve

## 2 电磁阀电磁场动态变化规律及参数对性能的影响

### 2.1 电磁阀作用过程中电磁场变化与结构关系

电磁场能流密度矢量(poynting 矢量)面积分是单位时间从体积  $V$  流进的电磁场能量<sup>[4]</sup>.采用虚功原理来计算电磁力,受力面在虚位移  $s$  方向所受的力  $F$  可用下式表述:

$$F = \left( \frac{dW(s, i)}{ds} \right) |_{i = \text{const}} = \frac{\partial}{\partial s} \left[ \int_V \left( \int_0^H B dH \right) dV \right] \quad (1)$$

式中: $W(s, i)$ 为系统的磁场储能; $i$ 为建立磁场的电流,为恒定值; $B$ 为磁感应强度; $H$ 为磁场强度.

在电磁阀启动、稳定作用以及关闭过程中,线圈通电励磁产生的电磁场及其磁通密度变化如图 3 所示.由式(1)得出:励磁电流、衔铁间隙、线圈匝数、动

铁芯内径等直接影响电磁场能流波动形状,也影响了电磁力随时间的变化规律.设计合适的电磁场集聚和分散,尤其是接触过渡圆角,能减少电磁场突变,即减少电磁能损耗,提高电磁阀寿命.

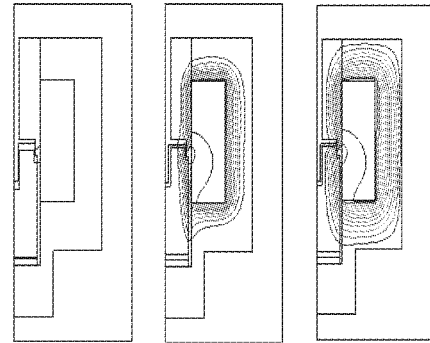


图 3 电磁阀内部磁场随时间的变化过程

Fig.3 Variation of electromagnetic valve internal magnetic field with time

### 2.2 初始衔铁间隙优化

在电磁阀开启与关闭阶段,初始衔铁间隙的大小对电磁阀响应时间有重要影响.设置衔铁间隙为变量,得到不同衔铁间隙对应的响应时间,以及动铁芯受力,分别如图 4 和图 5 所示.

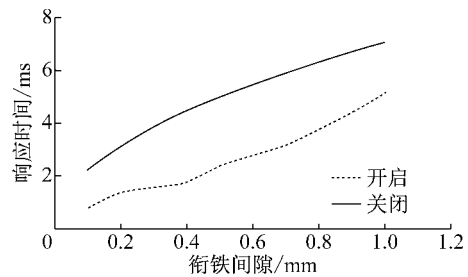


图 4 衔铁间隙对电磁阀响应时间的影响

Fig.4 Effect of armature gap on solenoid response time

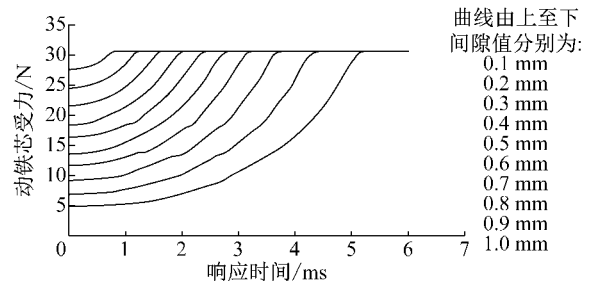


图 5 不同衔铁初始间隙值对动铁芯受力影响规律

Fig.5 Effect of initial clearance value of different armatures on force of moving core

当电磁阀开启时衔铁间隙越大,电磁场磁通量越分散,电磁力初始值越小;当动铁芯与静铁芯接触时达到最大值.动铁芯在加速过程中受力较平稳,对零件的冲击较小,动铁芯与静铁芯接触的一瞬间,产

生较大的冲击力.

综合考虑减少响应时间以提高灵敏度,同时减少零件间的冲击力,增加电磁阀寿命,初始衔铁间隙设定为 0.3~0.4 mm.

### 2.3 线圈匝数优化

设置线圈匝数为变量,得到不同线圈匝数对应的响应时间和动铁芯受力,如图 6 和图 7 所示.

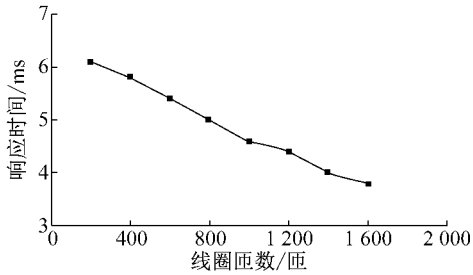


图 6 线圈匝数对电磁阀开启响应时间的影响

Fig.6 Effect of number of coil turns on response time of solenoid valve opening

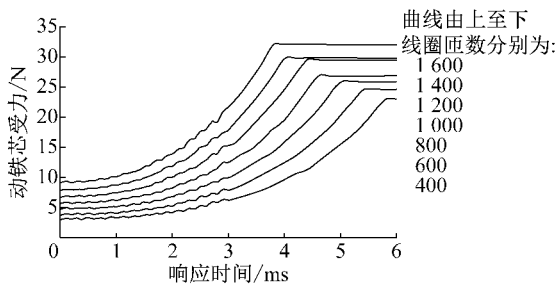


图 7 不同线圈匝数值对动铁芯受力影响规律

Fig.7 Effect of number of coil turns on force of moving core

不同线圈匝数时对应的动铁芯电磁力变化大体较平稳,无突增或突降情况.线圈匝数越多,电磁力初始值和最后对静铁芯产生的冲击力越大.因此,线圈匝数取为 800~1 200 匝较佳.

### 2.4 弹簧预紧力优化

电磁阀弹簧预紧力越小,在开启阶段,动铁芯响应时间越短,但在电磁阀关闭阶段,动铁芯响应时间越长,二者相互矛盾,因此需要对开启阶段和关闭阶段分别进行分析,找出最佳值.

将弹簧预紧力设为变量,得到不同弹簧预紧力对动铁芯受力和响应时间的影响规律,如图 8 和图 9 所示.

随着弹簧预紧力的增加,开启响应时间逐渐增加,关闭响应时间逐渐减小.弹簧预紧力增加,开启时电磁力与弹簧力的合力即加速度减小,而行程一定,因此响应时间增加;关闭时,仅受弹簧力作用,因

此加速度增加,响应时间减小.因此,取弹簧预紧力为 19~20 N.

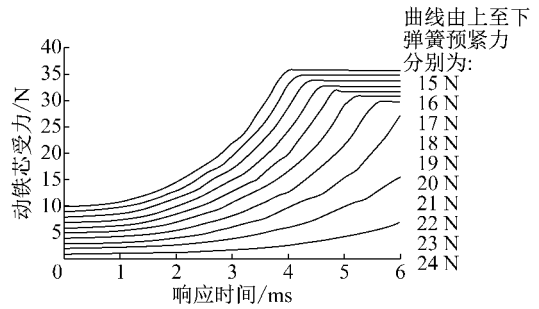


图 8 不同弹簧预紧力值对动铁芯受力影响规律

Fig.8 Effect of preload value of spring on force of moving core

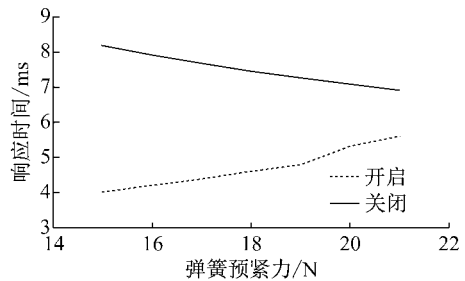


图 9 弹簧预紧力对电磁阀响应时间的影响

Fig.9 Effect of spring preload on response time of solenoid valve

## 3 正交试验仿真分析

表 1 列出了衔铁间隙、线圈匝数和弹簧预紧力的优化范围.

表 1 影响动态性能参数的优化范围

影响参数	衔铁间隙/mm	线圈匝数/匝	弹簧预紧力/N
优化结果	0.3~0.4	800~1 200	19~20

对于多种影响因素组合,采用正交试验法进行参数优化,如表 2 和表 3 所列.优化后启闭响应时间大大减少.

表 2 电磁阀参数优化结果

影响参数	衔铁间隙/mm	线圈匝数/匝	弹簧预紧力/N
优化结果	0.4	1 200	19

表 3 优化前后电磁阀响应时间对比

影响参数	优化前后	
优化结果	开启响应时间	关闭响应时间
优化前	4.1	7.1
优化后	2.2	4.5