

地铁车辆低落弓位受电弓线导板算法研究

贾 荣¹ 陈 超² 王俊勇³

(1. 北京中车赛德铁道电气科技有限公司, 100176, 北京; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海;
3. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都//第一作者, 助理工程师)

摘 要 在建立地铁车辆低落弓位受电弓结构数学模型的基础上, 以受电弓在工作高度范围内的静态接触压力保持恒定为目标, 基于恒定静态接触力下受电弓的平衡方程, 采用矩阵法建立了升弓转矩计算函数, 计算受电弓的升弓转矩。通过对升弓装置工作机理的深入研究, 对其进行简化, 建立了相应的计算模型, 提出了适用于地铁低落弓位受电弓线导板廓形的计算方法。利用 MATLAB 软件编写了计算程序。通过试验, 验证了算法的有效性。

关键词 地铁; 受电弓; 低落弓位; 线导板算法

中图分类号 TM922.61

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.08.021

Cam Algorithm on Metro Vehicle Pantograph with Lower Bow Height

JIA Rong, CHEN Chao, WANG Junyong

Abstract Based on a geometrical model of metro vehicle pantograph with lower bow height, and taking the constant static contact pressure of pantograph within the working height as target, a torque function of pantograph is built by using matrix method to calculate the bow-lifting torque, according to the pantograph equilibrium equation under constant static contact pressure. Then, through in-depth research on the operating mechanism of the bow-lifting device, which is simplified and a corresponding calculation model is established. Finally, a cam algorithm available for the calculation of pantograph wire guide plate profile with lower bow height is put forward. The calculation program is composed by MATLAB software and is verified by test results.

Key words metro; pantograph; lower bow height; cam algorithm

First-author's address Beijing CRRC CED Railway Electric Tech Co., Ltd., 100176, Beijing, China

根据地铁车辆受电弓的相关设计标准以及用户对受电弓的技术要求, 设计时要求受电弓在工作高度范围内的静态接触压力保持在 (120 ± 10) N。另一方面, 对受电弓的落弓高度也有要求。由于刚性接触网空间占用率低、免维护及安全可靠性高等

特点, 被广泛应用于地铁线路隧道区段。刚性接触网的高度通常较低, 因此要求地铁车辆受电弓的落弓高度尽可能降低, 以降低车辆的整体高度, 减少隧道的开挖量。地铁低落弓位受电弓采用空气弹簧侧置的方式, 可以将受电弓的落弓高度降至 300 mm 以下(基准为绝缘子安装面)。但是低落弓位受电弓驱动方式的改变却增大了其线导板的设计难度。

本文以受电弓与接触网的静态接触压力恒定为目标, 提出了适用于低落弓位受电弓线导板廓形的计算算法, 利用 MATLAB 软件编写了计算程序, 并通过试验, 验证了算法的正确性。

1 地铁低落弓位受电弓结构计算模型

1.1 受电弓框架结构计算模型

低落弓位受电弓是由底架、升弓装置、下臂、下导杆、上臂、上导杆、弓头等几部分组成的空间机构, 并通过绝缘子与车顶固定。受电弓可以在高度方向上大范围运动以适应接触网高度的变化。在实际研究中, 通常选择列车的纵剖面为研究平面, 将各部分向该平面投影, 简化为图 1 所示的计算模型。该模型为连杆机构。

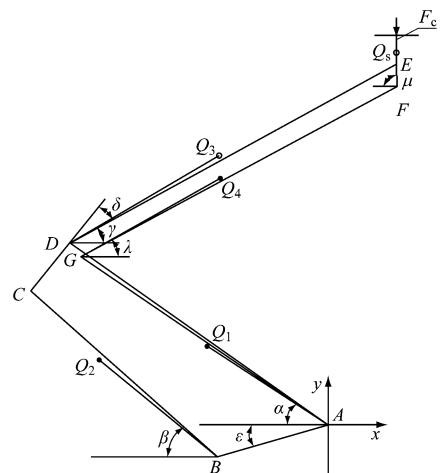


图 1 受电弓框架结构计算模型

图 1 中, A 为下臂与底架间铰点, B 为下导杆与

底架间绞点, C 为下导杆与上臂间绞点, D 为下臂与上臂间绞点, E 为上臂与弓头间绞点, F 为上导杆与弓头间绞点, G 为上导杆与下臂间绞点; F_c 为弓头滑板中心, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 分别为下臂、下导杆、上臂、上导杆及弓头组成的重心; $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \delta$ 分别为线段 AD, BC, DE, GF 与水平方向的夹角及 CD 与 DE 的夹角, 将 α 设为升弓角。

1.2 几何关系

以 A 为原点, 建立坐标系, 如图 1 所示。根据几何关系, 可得 AB 长度为:

$$l_{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$$

AB 与水平方向夹角为:

$$\varepsilon = \arctan[(y_A - y_B)/(x_A - x_B)]$$

BD 的长度为:

$$l_{BD} = \sqrt{l_{AB}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{AB}l_{AD}\cos(\alpha + \varepsilon)}$$

根据三角形内角与外角关系可得:

$$\gamma = \angle CBD + \angle BCD - \angle ADB - \alpha - \delta$$

$$\beta = \pi - \angle CBD - \angle ABD - \varepsilon$$

点 G 的坐标为:

$$\begin{cases} x_G = x_A - l_{AG}\cos(\alpha - \angle DAG) \\ y_G = y_A + l_{AG}\sin(\alpha - \angle DAG) \end{cases}$$

点 E 的坐标为:

$$\begin{cases} x_E = x_A - l_{AD}\cos\alpha + l_{DE}\cos\gamma \\ y_E = y_A + l_{AD}\sin\alpha + l_{DE}\sin\gamma \end{cases}$$

EG 的长度为:

$$l_{EG} = \sqrt{(x_G - x_E)^2 + (y_G - y_E)^2}$$

在 $\triangle EGF$ 中, 可以进一步求得:

$$\lambda = \arctan[(y_E - y_G)/(x_E - x_G)] - \angle EGF$$

得到点 F 的坐标为:

$$\begin{cases} x_F = x_G + l_{FG}\cos\lambda \\ y_F = y_G + l_{FG}\sin\lambda \end{cases}$$

由于受电弓运动时, 弓头几乎为水平状态, 且滑板在列车运行方向上关于 E 点对称安装。因此, 可以设静态接触力作用点 F_c 的坐标为:

$$\begin{cases} x_{F_c} = x_E \\ y_{F_c} = y_E + l_{F_cE} \end{cases}$$

其中, l_{F_cE} 表示上臂管轴中心与滑板平面的高度差, 为常数。

由上述几何关系可知, 受电弓框架结构的计算模型为单自由度模型, 若升弓角 α 已知, 则各点的位置即被确定。

1.3 受电弓升弓转矩函数的建立

受电弓的静态接触力由作用于下臂与底架间

绞点的升弓转矩提供, 各绞点润滑状态良好, 因此, 在计算升弓转矩时, 忽略绞点的摩擦阻力。采用矩阵法对受电弓的框架结构进行受力分析, 将受电弓的各部分分解出来建立计算模型, 如图 2 所示。

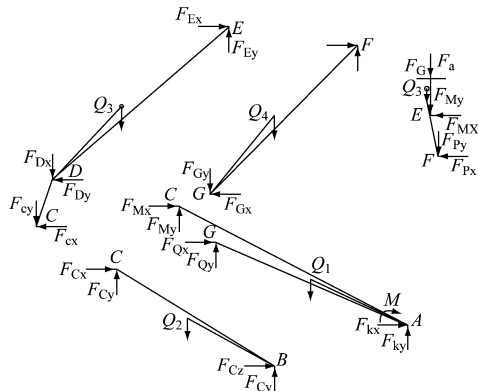


图2 受电弓各部分受力分析

根据受力分析, 列出整个受电弓的平衡方程, 并转化为计算矩阵; 对计算矩阵进行求解, 即可得到受电弓的升弓转矩 M 。通过对计算矩阵的分析可知, 当升弓角 α 确定时, 升弓转矩 M 即被唯一确定, 因此可将升弓转矩设为升弓角 α 的函数 $M(\alpha)$ 。根据几何关系和计算矩阵利用 MATLAB 软件编写计算函数 $M(\alpha)$, 以便于直接调用。根据计算结果, 受电弓在工作高度范围内的升弓转矩函数图像如图 3 所示。

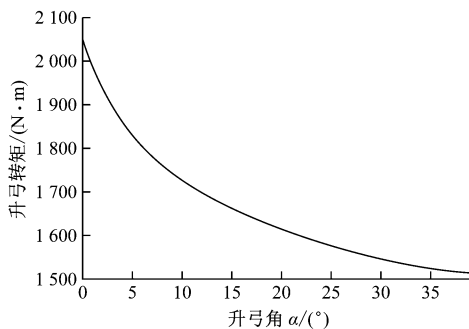


图3 升弓转矩函数图像

2 低落弓位受电弓升弓装置计算模型

地铁低落弓位受电弓的升弓装置采用空气弹簧驱动。为降低落弓高度, 将空气弹簧放置在下臂侧面, 如图 4 所示, 简化为如图 5 所示的计算模型。

图 5 中, 点 H 为升弓摆臂与底架间绞点; 点 K 为钢丝绳安装绞点; 点 J 为空气弹簧上端盖的中心; MN 表示空气弹簧下端盖平面。

空气弹簧的输出力由输入气压和弹簧上下两端盖间的高度差共同决定, 作用方向垂直于上端盖,

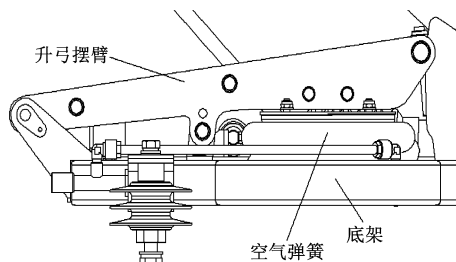


图4 低落弓位的受电弓升弓装置

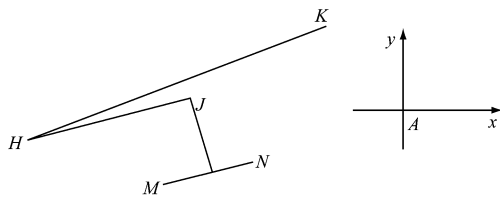


图5 升弓装置计算模型

空气弹簧的静态特征值如图6所示。空气弹簧工作时,上下端盖存在一定的夹角,但由于设计时将夹角限制在允许的范围内,因此,弹簧的输出力依然可以采用静态特征值进行计算。地铁受电弓空气弹簧的工作气压通常为0.4 MPa,两端盖间高度差 h 通常在100~200 mm间。在该范围内,空气弹簧的静态特征值曲线线性较好,因此进行线性差值计算,得到静态输出力 f 的函数 h 为:

$$f(h) = -0.062h + 22.7$$

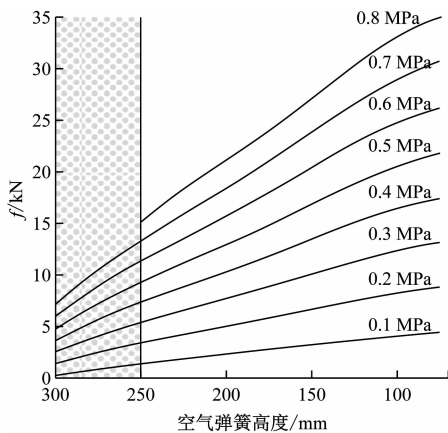


图6 空气弹簧静态特征图

3 地铁低落弓位受电弓线导板算法

3.1 受电弓工作状态计算模型

受电弓的升弓装置如图7所示。钢丝绳一端与升弓摆臂相连,另一端与安装于下臂的线导板固定,并缠绕在线导板上。通过线导板的调节作用,钢丝绳拉力产生满足升弓转矩要求的力矩。计算模型如图8所示,点 P 为钢丝绳与线导板轮廓线切点。

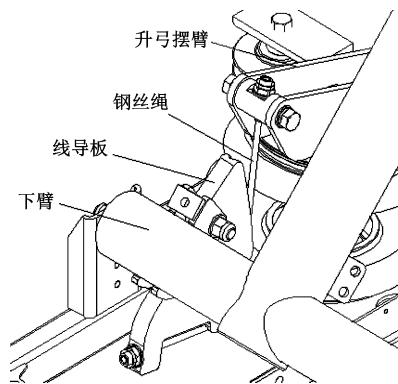


图7 升弓装置

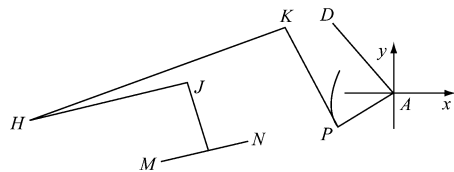


图8 受电弓工作状态计算模型

3.2 受电弓线导板算法

假设当升弓角为 α 时,受电弓整体处于平衡状态,静态接触压力为120 N,受电弓各部分状态如图9所示。为了模拟钢丝绳缠绕在线导板上的运动特性,线导板在计算时,将下臂杆 AD 逆时针旋转,对应于受电弓的降弓过程。

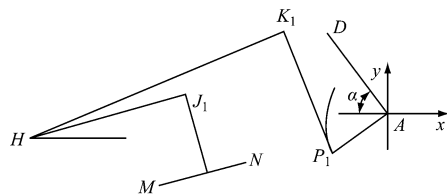


图9 受电弓平衡状态示意图

将下臂杆 AD 逆时针旋转 $\Delta\alpha$,升弓角变为 $\alpha - \Delta\alpha$,升弓角为 α 时对应的切点 P_1 旋转至点 P_2 处,如图10所示。

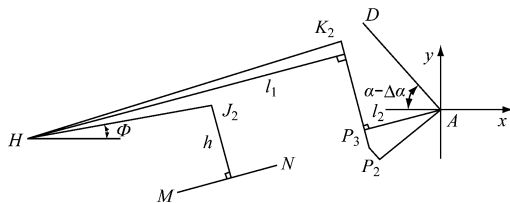


图10 旋转后受电弓平衡状态示意图

点 P_2 的坐标为:

$$\begin{cases} x_{P_2} = x_{P_1} \cos \Delta\alpha - y_{P_1} \sin \Delta\alpha \\ y_{P_2} = x_{P_1} \sin \Delta\alpha + y_{P_1} \cos \Delta\alpha \end{cases}$$

设旋转后,线导板与钢丝绳的切点为 P_3 ,图10中的点 K_1 、点 J_1 相应地分别运动到点 K_2 、 J_2 处,满

足 $\angle AP_2P_3 = \angle AP_1K_1$, 当 $\Delta\alpha$ 较小时, 可用直线段 P_2P_3 表示线导板的轮廓曲线。根据图 10 中的几何关系可知, HP_3 的长度为:

$$l_{HP_3} = \sqrt{(x_H - x_{P_3})^2 + (y_H - y_{P_3})^2}$$

在运动过程中钢丝绳总长不变, 可得 K_2P_3 的长度为:

$$l_{K_2P_3} = l_{K_1P_1} - l_{P_2P_3}$$

HJ_2 与水平方向夹角为:

$$\phi = \angle K_2HP_3 - \angle K_2HJ_2 - \arctg((y_H - y_{P_3}) / (x_H - x_{P_3}))$$

K_2 的坐标为:

$$\begin{cases} x_{K_2} = x_H + l_{HK_2} \cos(\phi + \angle K_2HJ_2) \\ y_{K_2} = y_H + l_{HK_2} \sin(\phi + \angle K_2HJ_2) \end{cases}$$

J_2 的坐标为:

$$\begin{cases} x_{J_2} = x_H + l_{HJ_2} \cos\phi \\ y_{J_2} = y_H + l_{HJ_2} \sin\phi \end{cases}$$

由于直线 K_2P_3 不经过原点 A , 因此, 设 K_2P_3 的表达式为:

$$ax + by + 1 = 0$$

求解如下方程:

$$\begin{cases} ax_{K_2} + by_{K_2} = -1 \\ ax_{P_3} + by_{P_3} = -1 \end{cases}$$

可得 a 和 b 的值。则点 H 到直线 K_2P_3 的距离 l_1 为:

$$l_1 = (ax_H + by_H + 1) / \sqrt{a^2 + b^2}$$

点 A 到直线 K_2P_3 的距离 l_2 为:

$$l_2 = 1 / \sqrt{a^2 + b^2}$$

同理, 求得 J_2 到 MN 的距离 h 。

通过计算可知, 当切点 P_3 坐标确定后, 受电弓升弓装置的状态即被确定。假设此时受电弓处于静态接触力为 120 N 的平衡状态, 平衡方程为:

$$\begin{cases} Tl_1 = f(h)l_{HJ_2} \\ Tl_2 = M(\alpha - \Delta\alpha) \end{cases}$$

式中:

T ——钢丝绳拉力;

$f(h)$ ——空气弹簧推力;

$M(\alpha - \Delta\alpha)$ ——升弓转矩。

将 T 消掉, 可得:

$$M(\alpha - \Delta\alpha) = f(h)l_{HJ_2}l_2/l_1$$

因此, 只需确定点 P_3 的坐标。利用 MATLAB 的模式搜索算法, 将对点 P_3 的坐标求解过程转化为

优化问题, 优化的初始点为点 P_2 。将几何关系和平衡方程转化为约束条件, 优化方向为 $l_{P_2P_3}$ 最小, 即可求得点 P_3 的坐标。在受电弓的工作高度范围内, 对上述过程进行多次循环, 当计算间隔足够小时, 可得线导板轮廓线上的点集, 进行光顺化, 即可得到符合要求的线导板轮廓曲线。

4 试验验证

通过以上算法, 得到线导板轮廓曲线, 根据该曲线进行工程化设计, 加工出线导板; 然后在受电弓静态试验台进行受电弓静态接触力试验, 试验结果如图 11 所示。

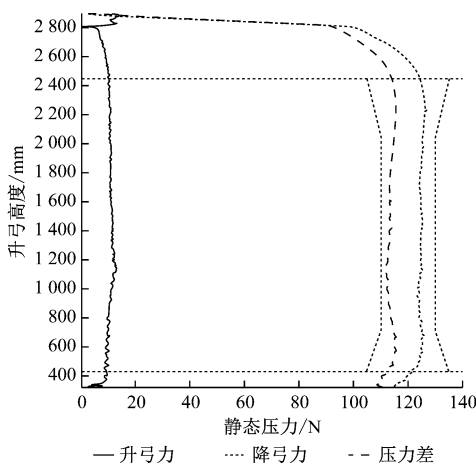


图 11 受电弓静态接触压力试验结果

由试验结果可知, 受电弓升降弓过程中的单向压差较小, 不超过 5 N, 升降弓压差为 12.2 N, 受电弓的升弓和降弓的静态接触力曲线近似于在 120 N 对称分布。试验结果验证了所提出的地铁低落弓位受电弓线导板算法理论的正确性与可行性。

参考文献

- [1] IEC. 轨道交通 机车车辆 受电弓 特性与实验 第 2 部分: 地铁与轻轨车辆受电弓: IEC 60494-2—2013 [S]. Geneva: IEC, 2013.
- [2] 陈明国, 许晓勤, 李军, 等. 城市轨道交通车辆单臂受电弓参数的优化设计与验证[J]. 城市轨道交通研究, 2009(11): 57.
- [3] 刘红娇, 张卫华, 李军, 等. 高速受电弓机构几何参数优化[J]. 铁道学报, 2001, 23(6): 16.
- [4] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [5] 梅桂明. 受电弓—接触网系统动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

(收稿日期: 2018-01-19)