

# 基于悬链线方程的铰接车辆车顶跨接 线缆长度计算方法及应用

陈碧阳 吴 君 刘 通

(北京轨道交通技术装备集团有限公司, 100160, 北京)

**摘 要** [目的]城市轨道交通多节编组车辆车顶跨接线缆长度的选取复杂而重要,有必要研究基于悬链线方程的铰接车辆车顶跨接线缆长度计算方法,以提高计算的简便性和准确性。[方法]详细阐述了基于悬链线方程的铰接车辆跨接线缆长度计算方法的原理及过程;并在此基础上提出了通过安装支架在车顶进行跨接时,支架高度的计算方法。为提高该方法的应用便捷性,根据该方法开发了计算软件,并在实际项目验证了该方法和软件的可行性。[结果及结论]基于悬链线方程模拟跨接线缆状态,根据沿轨道运行的铰接车辆相邻转向架间中心距不变,参考车辆可通过的最小曲线半径,确定了极限情况下的悬链方程式,进而算出跨接线缆长度,并以此为依据得到跨接线缆长度的最小值。考虑到线缆的最小弯曲半径要求,得到跨接线缆长度的最大值,最终的长度选取应在该范围内。确定线长后,根据悬链线方程可以得到跨接线缆最低点距离安装平面的高度,进而得出支架高度。实际项目应用效果验证了该方法的可行性。

**关键词** 城市轨道交通;跨接线缆长度;铰接车辆;悬链线方程;车顶跨接

**中图分类号** U270.38

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.04.021

proposed. In order to improve the application convenience of the method, a calculation software based on it is developed. The feasibility of the method and the software is verified in actual projects. [Result & Conclusion] State of the jumper cable is simulated based on catenary equation. According to the constant center distance between adjacent bogies of the articulated vehicle running along the track, the catenary equation under the limit condition is determined with reference to the minimum curve radius that the vehicle can pass through, and then JCL is calculated. The minimum JCL value is also obtained based on this. Taking into account the cable's minimum bending radius requirement, the maximum JCL value is also obtained. The final length selection is basically to fall within this range. After determining the cable length, the height of the jumper cable's lowest point from the installation plane can be obtained according to the catenary equation, thereby the bracket height can be obtained. The feasibility of the method is verified by actual project application effect.

**Key words** urban rail transit; jumper cable length; articulated vehicles; catenary equation; roof jumper

## Calculation Method and Application of Overhead Jumper Cable Length for Articulated Vehicles Based on the Catenary Equation

CHEN Biyang, WU Jun, LIU Tong

(Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd., 100160, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] The selection of the overhead JCL (jumper cable length) for multi-marshaling urban rail transit vehicles is both complex and important. It is necessary to study the calculation method of the overhead JCL for articulated vehicles based on the catenary equation, in order to improve the calculation simplicity and accuracy. [Method] The principles and process involved in the calculation method of the overhead JCL for articulated vehicles based on the catenary equation are elaborated in detail; on this basis, a height calculation method of the mounting bracket installed overhead for cable crossing is

城市轨道交通多节编组车辆需要在车端通过跨接线缆进行电气连接。对于跨接线缆长度的计算,目前主要采用软件法或悬链线方程法。

软件法借助二维或三维绘图软件进行计算<sup>[1]</sup>。该方法虽直观,但一方面,对设计人员的经验有较高的要求;另一方面,对于不同的项目,或是在相同项目模拟几种不同的线路条件时,计算工作量较大。

悬链线方程法即基于悬链线方程计算<sup>[2-3]</sup>。但目前该方法的研究对象均为车下跨接,没有涉及车顶跨接的情况,且车顶跨接与车下跨接约束条件不完全一致。

针对上述情况,本文基于悬链线方程研究铰接车辆在车顶跨接时跨接线缆长度的计算方法,并基于该方法通过 MATLAB 软件开发了一款人机交互界面(App Designer)计算软件,以期快速便捷地实

现该计算方法的应用。

## 1 跨接线缆长度理论计算

某型六轴铰接转向架轻轨车辆单元示意图如图1所示<sup>[4]</sup>。图1中,1个车辆单元包含2节车辆,车下跨接位置为铰接转向架,不具备跨接线缆的安装空间,因此该车型的跨接线缆常安装于车顶。

对图1所示的铰接车辆单元,在线路运行时,结合线缆安装相关标准<sup>[5]</sup>,车顶跨接线缆长度选取的约束条件如下:①跨接线缆不被拉直拉断;②跨接线缆不与车辆其他部件干涉;③线缆安装高度可保证线缆下垂最低点满足限界条件;④线缆弯曲半径始终在允许的范围内;⑤运动过程中,线缆不受过大的应力(过大应力会缩短线缆寿命)<sup>[2]</sup>。

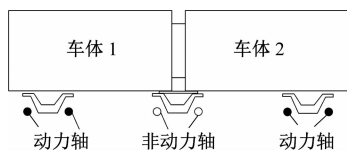


图1 六轴铰接转向架轻轨车辆单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a six-axle articulated bogie light rail vehicle unit

因此,需要先计算出列车在线路运行时,相邻两节车体车顶跨接线缆出线点之间可能的最大拉伸和压缩情况。

### 1.1 车顶跨接线缆最大拉伸和压缩情况

对于铰接轻轨车辆单元,铰接装置中心到车端

距离为定值。相邻两节车体在曲线轨道上运行时的情况示意简图如图2所示。其中, $R$ 为轨道的曲线半径, $d_{ij}$ 为车顶跨接线缆出线点间距。图2所示,假设跨接线缆出线点距车端和车体纵向中心线的距离分别为 $d_i$ 和 $d_j$ ,则此时相邻两节车跨接线缆出线点间直线距离的最小值 $d_{ij\_min}$ 和最大值 $d_{ij\_max}$ 分别为:

$$d_{ij\_min} = 2 \left[ b \sin \theta_1 - \left( d_j + \frac{d_i}{\tan \theta_2} \right) \cos \theta_2 + \frac{d_i}{\sin \theta_1} \right] \quad (1)$$

$$d_{ij\_max} = 2 \left[ b \sin \theta_1 + \left( d_j - \frac{d_i}{\tan \theta_2} \right) \cos \theta_2 + \frac{d_i}{\sin \theta_1} \right] \quad (2)$$

式中:

$b$ ——铰接装置中心与车端间距离;

$\theta_1$ ——车体纵向中心线与两节车位置对称轴间夹角;

$\theta_2$ ——两节车车端中心连线与车端面间夹角。

由式(1)及式(2)可见,当 $R$ 为线路最小转弯半径时,对应的 $d_{ij\_max}$ 和 $d_{ij\_min}$ 分别为车顶跨接线缆最大拉伸和压缩情况下出线点间的直线距离。

### 1.2 悬链线模型介绍

悬链线方程坐标系选取示意图如图3所示。

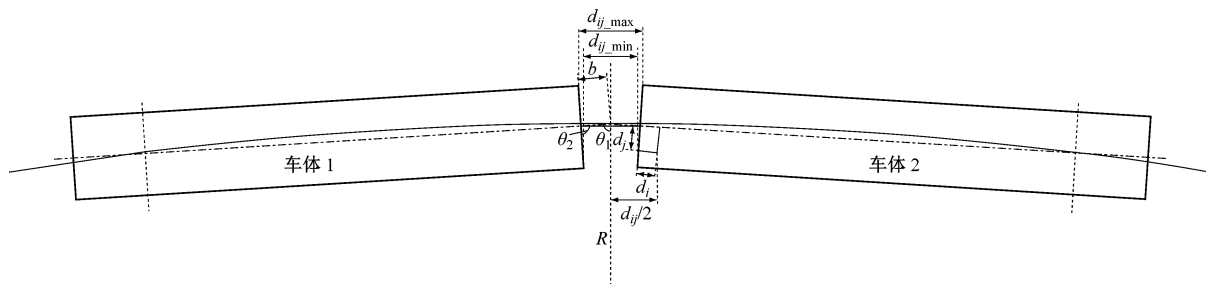
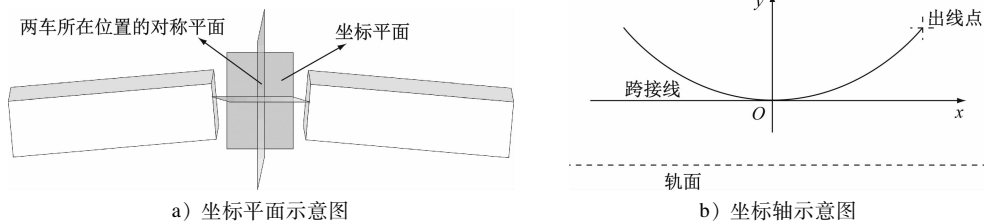


图2 相邻两节车体在曲线轨道上运行的情况示意简图

Fig. 2 Simplified schematic of two adjacent car bodies running on a curved track



注:示意图的长度比例关系与实际不同。

图3 悬链线方程坐标系选取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate system selection for catenary equation

图 3 中悬链线方程的形式为<sup>[6]</sup>:

$$y = k[\cosh(x/k) - 1] \quad (3)$$

式中:

$k$ ——悬链系数。

式(3)所示悬链线上某点 $(x, y)$ 到原点 $(0, 0)$ 的长度为 $L/2$ ,则有:

$$L = 2k \sinh(x/k) \quad (4)$$

### 1.3 跨接线缆长度确定

结合约束条件①及式(2),跨接线缆至少应比 $d_{ij\_max}$ 长。因此,在 $d_{ij\_max}$ 基础上留有一定的裕量,即可确定最小长度 $L_{min}$ 。

悬链线上某点 $(x, y)$ 处的曲率半径 $\rho$ 为:

$$\rho = (1 + y'^2)^{3/2} / |y''| \quad (5)$$

考虑约束条件④,将式(3)代入式(5)中,可得:

$$\rho = k \cosh^2(x/k) \quad (6)$$

由式(6)得,当 $x=0$ 时, $\rho$ 存在最小值,为 $k$ 。

对于两端横坐标固定的悬链线,由式(4)可知, $L$ 仅为 $k$ 的函数。根据数学推导, $k>0$ 时, $L$ 随着 $k$ 的增大而减小。由此,综合所有跨接线缆的弯曲半径,可以得到最大可能的弯曲半径最小值 $\rho_{min}$ ,此时 $\rho \geq \rho_{min}$ ,即 $k \geq \rho_{min}$ 。相应可得 $L$ 的上限 $L_{max}$ ,代入车顶跨接线缆的横坐标 $d_i$ 可得:

$$L_{max} = 2\rho_{min} \sinh\left(\frac{d_i}{2\rho_{min}}\right) \quad (7)$$

换言之,如果 $L$ 更长,将对应更小的 $k$ 值,则会在车辆运行时不满足部分跨接线缆的线缆弯曲半径要求<sup>[5]</sup>。

至此可以得到,车顶跨接时跨接线缆线长的选取范围为 $[L_{min}, L_{max}]$ 。结合约束条件⑤,考虑到该线长范围上限值为一极限值,且若跨接线缆过长既会提高车辆制造成本,又会增加超限界可能性,还会增加与其他设备或部件干涉的可能性。因此,线长应尽可能在 $L_{min}$ 附近选择。

### 1.4 支架高度确定

考虑约束条件②,车顶可以通过布置安装支架等方式来抬高跨接出线点安装高度,进而避开可能引起干涉的设备或部件。

对于确定线长的跨接线缆,在列车运行中,当线缆处于最大压缩情况时, $x = \min(d_i)$ ,线缆有最大的下垂高度 $h_{max}$ 。结合式(3)和式(4)计算可得 $h_{max}$ 。在 $h_{max}$ 的基础上,综合考虑车顶铰接装置高出支架安装面的距离及线径,并在上述基础上留有一定裕量,即可得到合适的跨接出线点安装高度。

进而校核约束条件③,即该高度是否满足车辆限界条件。如满足,则线长选择合理。

## 2 计算方法应用

### 2.1 跨接线缆长度计算软件

为了使基于悬链线方程计算跨接线缆长度的方法能更方便快捷地应用于实际项目,本研究以该方法为基础,借助 Matlab 软件 App Designer 模块开发了一款铰接车辆跨接线缆长度计算软件(以下简称“线缆长度软件”)。线缆长度软件的人机交互界面如图 4 所示。



图 4 线缆长度软件的人机交互界面

Fig. 4 Cable length software human-computer interaction interface

### 2.2 应用效果验证

本文以氢燃料混合动力铰接轻轨车研制项目(以下简称“案例项目”)车顶跨接线缆为例,通过线缆长度软件来验证基于悬链线方程跨接线缆长度计算方法的可行性。案例项目的车顶跨接线缆三维模型如图 5 所示。

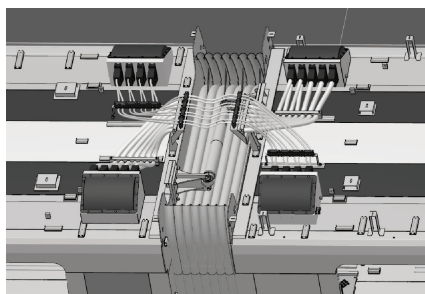


图 5 案例项目的车顶跨接线缆三维模型

Fig. 5 Roof jumper cable 3D model of the case project

案例项目的主要技术参数取值如表1所示。

表1 跨接相关的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters related to the jumper

参数	取值
车体宽度/mm	2 650
相邻两车端距离/mm	600
转向架中心距/mm	10 300
跨接线缆最小弯曲半径/mm	80
线路最小转弯半径/mm	150
跨接出线点距车体中心最大距离/mm	172
跨接出线点距车端最大距离(如位于两车体之间,则为负值)/mm	-21

将表1中的参数取值代入式(1)和式(2)中,可得: $d_{ij\_min} = 546 \text{ mm}$ ;  $d_{ij\_max} = 569 \text{ mm}$ 。

在 $d_{ij\_max}$ 的基础上,考虑线缆最小弯曲半径 $1/4$ 圆周裕量,得到 $L_{min} = 695 \text{ mm}$ 。

根据线缆最大的最小弯曲半径为 $80 \text{ mm}$ ,即悬链线最低点的弯曲半径最小允许值,结合式(4)可得 $L_{max} = 2\,424 \text{ mm}$ 。

由此,理论上案例项目线缆可取长度范围为 $[695 \text{ mm}, 2\,424 \text{ mm}]$ 。最终项目的实际选择跨接线缆长为 $700 \text{ mm}$ 。实际运行情况平稳,验证了本文线长计算方法的可行性。

对于跨接支架高度,按 $L = 700 \text{ mm}$ 的线缆,根据悬链线相关方程,计算可得最小间距时的线缆最低点距出线点高度为 $194 \text{ mm}$ 。经综合考虑:车顶铰接装置高出支架安装面的距离为 $53 \text{ mm}$ ,线径为 $44 \text{ mm}$ ,并预留 $60 \text{ mm}$ 裕量,即可得到最小的安装支架高度为 $350 \text{ mm}$ 。经项目验证该高度合理,具有可行性。

### 3 结语

本文给出了基于悬链线方程的铰接车辆跨接线缆长度计算的整体思路,并通过实际项目对计算方法进行了验证,填补了之前研究中对基于悬链线方程的车顶跨接情况长度计算的研究。此外,根据得到的跨接线缆长度确定了跨接线缆安装支架高

度。计算分析更简洁高效,且通过选择合理的安装支架高度,有利于车辆美观。此外,设计了一款基于MATLAB软件的人机交互界面,便于方法应用。最后通过实际项目验证了本文研究方法的可行性。

### 参考文献

- [1] 杨朋,陈爱军,李丰收,等. 轨道交通车辆及其车端跨接电缆长度计算方法: CN113806928A[P]. 2021-12-17.  
YANG Peng, CHEN Aijun, LI Fengshou, et al. Rail transit vehicle and calculation method for the length of roof jumper cables at vehicle ends: CN113806928A[P]. 2021-12-17.
- [2] 王长昌. 基于悬链线方程的跨接电缆长度计算[J]. 铁道车辆, 2013, 51(6): 4.  
WANG Changchang. Calculation of the length of jumper cable based on catenary equation[J]. Rolling Stock, 2013, 51(6): 4.
- [3] 李雁北,王子煜,王平,等. 地铁车辆跨接电缆长度计算软件的开发[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 94.  
LI Yanbei, WANG Ziyu, WANG Ping, et al. Software development for subway jumper cable length calculation[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 94.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通六轴铰接转向架轻轨车辆通用技术条件: GB/T 40075—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration of the People's Republic of China. General technical specification of six-axle light rail vehicle with articulated bogie for urban rail transit: GB/T 40075—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [5] IEC. Railway applications-Rolling stock-Rules for installation of cabling: DS/IEC 62995: 2018[S]. Geneva: IEC., 2018.
- [6] 姜广智. 悬链线方程在高压架空输电线路中的应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(8): 1960.  
JIANG Guangzhi. Application of catenary's curve equation in high-voltage overhead transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(8): 1960.

· 收稿日期: 2023-02-28 修回日期: 2023-04-28 出版日期: 2025-04-10  
Received: 2023-02-28 Revised: 2023-04-28 Published: 2025-04-10  
· 通信作者: 陈碧阳, 工程师, chenbiyang@rtte.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn