

城市轨道交通信号系统对曲线段速度要求的计算^{*}

黄克勇

(南京铁道职业技术学院通号学院, 210031, 南京//正高级工程师)

摘要 研究了城市轨道交通信号系统关于曲线路段最高运行速度的计算方法和流程。利用轨道专业和车辆专业等提供的标高、运营速度、车重等信息,以信号的安全制动模型为基础,在运营情况下,计算触发紧急制动后能达到的最高紧急制动触发速度,以及最高速度下的横向加速度和横向冲击率(Jerk)。如果计算出的这两项结果满足国家标准,则符合要求;如果计算结果不满足国家标准,通常采用的解决方法是让轨道专业或信号专业对相应数据进行调整。给出了详细的计算公式,并对一条实际的城市轨道交通运营线路的曲线段进行了计算。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 曲线最高速度; 加速度; 冲击率

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.005

Calculation of Curve Speed in Urban Rail Transit Signaling System

HUANG Keyong

Abstract The calculation method and process of the maximum running speed at curve section in urban rail transit signaling system is studied. Making use of the information of elevation, operation speed and vehicle weight provided by other specialties such as track specialty and vehicle specialty, taking the signaling safety braking model as base, the maximum emergency braking trigger speed and the maximum lateral acceleration and lateral impact rate (Jerk) after triggering emergency braking at operating speed are calculated. If these two calculated results meet the national standards, then the requirements are fulfilled. If the calculation results do not meet the requirements of the national standards, the common solution is for the track specialty or signal specialty to adjust relevant data accordingly. Detailed calculation formula is given and the curve section of an actual urban rail transit operation line is calculated.

Key words urban rail transit; signaling system; curve maximum velocity; acceleration; impact rate

Author's address College of Communication and Signa-

ling, Nanjing Institute of Railway Technology, 210031, Nanjing, China

在城市轨道交通中,列车行驶在曲线线路上时会产生离心力,使乘客产生不舒适感,并且有侧翻的危险。为了平衡离心力,在轨道上采用设置曲线超高来平衡离心力。曲线超高设置与速度等多个参数相关,设置不好可能造成列车侧翻。通常设置的曲线超高如不足或过大,会出现欠超高或过超高的现象,虽然增加的超高会平衡一部分离心加速度,但未被平衡的离心力仍然存在^[1]。针对未被平衡的离心加速度值,各国的要求和标准都不一样,但判定的原则都是按乘客无不良反应的值作为依据。我国城市轨道交通信号系统的标准中规定,在曲线处的离心加速度,即横向加速度应不大于 0.4 m/s^2 ,信号系统根据这个要求和其他相关专业给出的数据来计算在曲线处的最高速度是否合适^[2]。

在城市轨道交通的工程设计中,每个专业(如行车、土建、车辆和信号等专业)对正线路段的最高速度都有不同的要求。由于信号系统是保证列车运行安全、实现行车指挥和提高运输效率的关键系统设备,所以最终的最高限速需要信号专业进行控制和计算。其中,曲线路段的速度关系到整个轨道交通系统运营的安全,其计算涉及多个专业且计算过程相对复杂,因此对曲线段速度的计算是否合适,信号专业在完成招标后的工程设计阶段应根据各个专业提供的具体数据进行详细的计算和最终的确认^[3]。

1 曲线段最大速度的计算模型

1.1 信号专业与其他专业对列车运行速度的协调

信号专业对曲线段的列车速度计算通过以下方法和其他专业进行协调:在城市轨道交通的工程

^{*} 江苏省轨道交通控制工程技术研究开发中心开放基金资助项目(KFJ2002)

设计中,行车专业按列车每站停车原则进行牵引计算,得出全线曲线地段的理论运行速度;然后行车专业的牵引计算速度作为轨道专业的计算依据,确定曲线地段线路超高值;而线路专业是依据技术标准中确定的列车在曲线地段上运行的最高速度设置缓和曲线的长度。由于这些设计和计算出来的曲线段最高速度是在初步设计阶段已经完成,此时信号系统还没有开始招标。

在信号系统招标前,信号专业需根据行车专业提供的资料,结合国内地铁车辆的特性参数、各信号系统供货商提供的列车控制系统的控制水平,提出信号系统正常控制模式,即 ATO(列车自动运行)模式或 ATP(列车自动防护)模式下的列车运行触发紧急制动的速度值,以及触发紧急制动后综合考虑各种最不利条件下的列车瞬间最高运行速度值,作为配合土建专业设计的基础资料。

在信号系统招标后,信号专业根据其自身系统控制原理进行系统性能分析时,系统控制列车在曲线地段的实际运行速度(包括最高 ATO 推荐速度、紧急制动触发速度及可能达到的最高速度)。本文给出的紧急制动触发速度和可能达到的最高速度,与线路、轨道专业设计依据的速度值会有所不同,因而信号专业须重新计算列车在曲线地段线路上运行时,触发紧急制动后可能达到最高速度时的横向加速度值不应大于 0.4 m/s^2 ,其冲击率(Jerk)不应大于 0.3 m/s^3 。如果超过,则必须由轨道专业调整超高值,或由信号专业降低推荐的最高速度、紧急制动触发速度及可能达到的最高速度^[4]。

1.2 计算模型

列车在曲线段的运动受到离心力的影响会产生横向的加速度,受加速度变化率影响的横向冲击率也会发生变化,冲击率过大会严重影响到乘客乘坐的舒适性。为了确定曲线段的最大速度是否合适,采用安全制动模型,研究和计算在运营速度下列车在曲线段产生紧急制动的触发速度 v_{EBIC} 和可能达到的最高速度 v_{max} ,以保证曲线地段最高限制速度大于或等于信号 ATP 系统触发紧急制动后列车可能达到的最高速度^[5]。考虑到城市轨道交通信号系统中列车可以在同一线路上正、反方向双向运行,信号系统也提供列车双方向运行的 ATP 功能,因而对同一线路上正、反方向运行的列车都要进行计算。在对正方向运行的列车进行计算后,列车的横向加速度如果超过 0.4 m/s^2 ,冲击率超过 0.3 m/s^3

s^3 ,此时要降低信号系统的推荐最高速度及紧急制动触发速度,使列车在可能达到最高速度时的横向加速度不超过 0.4 m/s^2 ,横向冲击率不超过 0.3 m/s^3 。

对于曲线路段最高速度采用“安全制动模型”来计算,因为通过“安全制动模型”计算出来的紧急制动触发速度和可能最高速度可以反映出列车在曲线路段的最不利情况。列车在曲线路段的运行速度,需要满足小于列车紧急制动触发速度。

如图 1 所示,列车在触发紧急制动后分成最大牵引阶段(时间 T_t)、惰行阶段(时间 T_e)和制动阶段,最大牵引阶段的时长又分为牵引系统响应时间(T_{t1})和牵引切除时间(T_{t2})。在最大牵引阶段,列车会受到牵引力上升到最大,随后由于制动还没有响应,进入惰行阶段,惰行阶段结束后车辆才真正施加紧急制动。

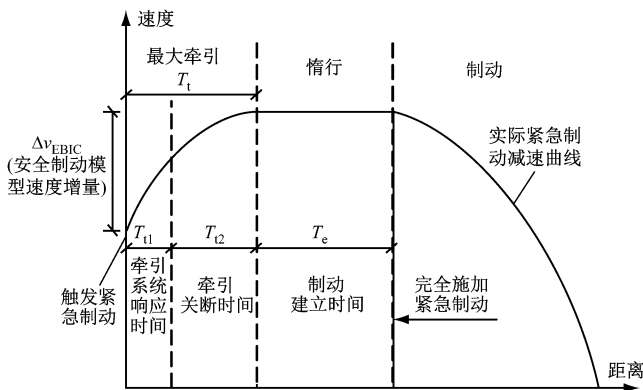


图1 安全制动模型

根据紧急制动减速曲线速度、安全制动模型产生的速度增量和速度裕量,计算得到紧急制动触发速度(v_{EBIC})。安全制动模型描述了紧急制动触发时,从车载 ATP 发出紧急制动指令直至紧急制动施加时最不利情况下的速度变化。具体根据车辆牵引系统响应时间 T_{t1} 、切除列车牵引所需时间 T_{t2} 、从牵引切除到制动系统建立保证制动率的紧急制动所需的时间 T_e 、当前速度下的最大牵引加速度 a_t 和坡度造成的附加加速度 a_{pmin} ,计算其产生的速度增量 Δv_{EBIC} ^[6]。

Δv_{EBIC} 计算公式如下:

$$\Delta v_{EBIC} = (a_t + |a_{pmin}|)T_t + |a_{pmin}|T_e \quad (1)$$

式中:

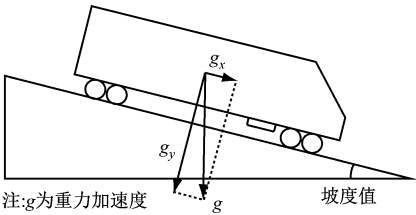
a_t ——当前速度下的最大牵引加速度;

T_t ——牵引系统响应和牵引切除延时;

$|a_{pmin}|$ ——根据当前坡度计算的重力分量对列

车的附加加速度。

坡度上的重力附加加速度如图 2 所示。



注:g 为重力加速度。

图 2 坡度上的重力附加加速度

根据坡度计算的重力附加加速度公式：

|a_{pmin}| = |gd| (2)

式中：

d——当前最大坡度。

在计算紧急制动触发速度时还需考虑速度裕量,该值与列车测速的误差有关。

2 曲线段的计算

2.1 曲线段计算

根据允许的横向加速度和横向冲击率,可得到曲线处的速度限制。根据我国地铁设计标准,横向加速度为 0.4 m/s²,冲击率为 0.3 m/s³。根据 v_{EBIC} 和 v_{max} 分别计算横向加速度以及冲击率为：

v_{max} = v_G + v_{pr} + v_{tc}
a = (v_{max}² / r) - (9.81 × (c / 1500))
j = (av_{max}) / l_{transit}

式中：

v_{max}——最坏情况下,可以达到的最大速度, m/s;

v_G——运营速度, m/s;

v_{pr}——速度余量, m/s;

v_{tc}——紧急制动命令后牵引和惰行阶段中的速度增长量, m/s;

c——曲线处的超高, m;

r——取决于 v_{max} 的曲线半径, m;

a——曲线引发的横向加速度, m/s²;

j——取决于 v_{max} 的横向冲击率, m/s³。

l_{transit}——缓和曲线长度。

列车质量 m_{total}: AW0(空载)为 151.506 t, AW1(满座)为 163.986 t, AW2(额定载荷)为 222.726 t, AW3(超载)为 252.666 t。

列车阻力 F_w 的计算公式为：

F_w = K₀ + K₂m_{total} + K₃m_{total} + K₄K_{tunnel}v_{tr}²

式中：

K₀——阻力的经验参数,取 3.096 × 10⁻³ N;

K₂——质量的经验参数,取 6.374 × 10⁻³ N/kg;

K₃——质量的经验参数,取 0.329 1 × 10⁻³/s;

K₄——速度的经验参数,取 11.187 kg/m;

K_{tunnel}——隧道的类型,取 2 个;

v_{tr}——列车速度。

如果在隧道外,列车阻力公式 K_{tunnel} 取值为 1。v_{EBIC} 包括速度控制裕量和速度误差,前者是预先设定的固定值, v_{err} 基于现有驾驶速度 v₀ 线性增加,且符合：

If (v₀ < 30 km/h), then v_{err} = 2 km/h

else v₀ = 2 km/h + (v₀ - 30 km/h)/47

由 F_w 可得到 v₀ 下曲线段允许的最大加速度,如表 1 所示。

表 1 根据 F_w 计算得到的不同 v₀ 下的曲线段最大允许加速度

v ₀ /(km/h)	最大加速度/(m/s ²)
0	1
5	1
10	1
15	1
20	1
25	1
30	1
35	1
40	1
45	1
50	1
58	1
60	0.85
65	0.85
70	0.75
75	0.68
80	0.64
83	0.60
84	0.60
85	0.60

2.2 曲线速度表

按照上述的计算方法,以实际线路苏州地铁 2 号线正线部分某区段计算出来的曲线速度表进行示例,根据其他专业提供的圆曲线半径、缓和曲线

长度、超高、坡度和 v_G , 计算出 v_{EBIC} 和 v_{max} ; 然后分别计算出这两个速度下的 a 和 j , 检查计算出的 a 是否小于 0.4 m/s^2 和 j 是否小于 0.3 m/s^3 。表 2 和表 3 的计算结果都满足这个结果, 且符合国家标准的要求。如果 a 超过 0.4 m/s^2 , j 超过 0.3 m/s^3 , 则需要

线路专业调整线路参数或者信号专业降低曲线段的运营速度^[8]。
对于不设缓和曲线的特殊曲线横向 j 不用计算。

表 2 苏州地铁 2 号线某区段左线的曲线段 a 和 j

曲线交点名称	圆曲线半径/m	缓和曲线长/m	外轨超高/mm	线路坡度/‰	v_G /(km/h)	根据 v_{EBIC} 计算			根据 v_{max} 计算		
						v_{EBIC} /(km/h)	a /(m/s^2)	j /(m/s^3)	v_{max} /(km/h)	a /(m/s^2)	j /(m/s^3)
JDZ1	500	70	100	28	71	78.75	0.31	0.10	81.36	0.37	0.12
JDZ2	495.992	70	80	9.07	66	73.67	0.33	0.10	75.31	0.36	0.11
JDZ3	1 004	45	55	-17	75	82.46	0.17	0.09	84.73	0.20	0.11
JDZ4	996	45	55	-17	75	82.46	0.17	0.09	84.73	0.20	0.11
JDZ5	2 004	20	15	4.997	75	83.10	0.17	0.20	84.09	0.18	0.22
JDZ6	3 004	0	20	3.001	76	83.21	0.05		84.98	0.06	
JDZ7	2 996	0	20	3.001	76	83.21	0.05		84.98	0.06	
JDZ8	3 004	0	15	3.001	76	83.21	0.08		84.98	0.09	
JDZ9	996	45	35	3.001	76	83.21	0.31	0.16	84.98	0.34	0.18
JDZ10	696	60	45	-4.096	69	76.94	0.37	0.14	78.00	0.39	0.15
JDZ11	2 004	20	25	-3.361	76	83.19	0.11	0.13	84.99	0.12	0.15
JDZ12	1 996	20	25	5	75	83.10	0.11	0.13	84.09	0.11	0.13
JDZ13	1 496	30	20	-28	74	81.86	0.22	0.17	84.32	0.24	0.19
JDZ14	3 000	0	20	-28	74	81.86	0.05		84.32	0.06	
JDZ15	350	60	120	-7.369	63	70.57	0.32	0.11	72.36	0.37	0.13
JDZ16	2 000	20	25	-22.5	74	82.16	0.10	0.12	84.03	0.11	0.13
JDZ17	450	70	115	22.443	70	78.05	0.30	0.10	80.05	0.35	0.12
JDZ18	400	65	60	22.443	53	60.49	0.32	0.09	63.24	0.38	0.11
JDZ19	358.5	60	105	-23.313	60	67.71	0.31	0.10	70.17	0.38	0.13
JDZ20	400	65	115	-26.4	66	73.73	0.30	0.10	76.27	0.38	0.13
JDZ21	450	70	115	-26.4	70	77.84	0.29	0.09	80.25	0.36	0.12
JDZ22	350	60	120	24.5	62	69.65	0.29	0.10	72.27	0.37	0.13
JDZ23	350	60	60	24.5	48	54.97	0.28	0.08	58.65	0.37	0.11
JDZ24	400	65	75	-23	56	63.46	0.29	0.08	66.33	0.36	0.11
JDZ25	450	70	115	25	70	77.92	0.29	0.09	80.17	0.35	0.12
JDZ26	2 000	20	25	-24.558	74	82.05	0.10	0.12	84.14	0.11	0.13
JDZ27	2 000	20	20	-24.558	74	82.05	0.13	0.15	84.14	0.15	0.18
JDZ28	350	60	50	-4	47	54.08	0.32	0.09	56.50	0.38	0.10
JDZ29	500	70	75	-3.8	65	72.95	0.34	0.10	74.01	0.36	0.11
JDZ30	500	70	60	9.158	61	68.48	0.34	0.10	70.40	0.38	0.11
JDZ31	550	60	65	6.079	66	73.83	0.34	0.12	75.16	0.37	0.13
JDZ32	650	60	65	3.012	73	81.10	0.36	0.14	81.92	0.38	0.15

表 3 苏州地铁 2 号线某区段右线的曲线段 a 和 j

曲线交 点名称	圆曲线 半径/m	缓和曲 线长/m	外轨超 高/mm	线路坡 度/‰	v_G / (km/h)	根据 v_{EBLC} 计算			根据 v_{\max} 计算		
						v_{EBIC} / (km/h)	a / (m/s^2)	j / (m/s^3)	v_{\max} / (km/h)	a / (m/s^2)	j / (m/s^3)
JDY1	1 500	30	25	-14.5	75	82.59	0.19	0.15	84.59	0.21	0.17
JDY2	500	70	115	28	74	81.86	0.29	0.10	84.32	0.35	0.12
JDY3	500	70	80	9	67	74.67	0.34	0.11	76.33	0.38	0.12
JDY4	1 000	45	50	-17	75	82.46	0.2	0.11	84.73	0.23	0.13
JDY5	1 000	45	55	-17	75	82.46	0.17	0.09	84.73	0.20	0.11
JDY6	2 000	20	15	5	75	83.10	0.17	0.20	84.09	0.18	0.22
JDY7	3 000	0	15	3	76	83.21	0.08		84.98	0.09	
JDY8	3 000	0	15	3	76	83.21	0.08		84.98	0.09	
JDY9	3 000	0	15	3	76	83.21	0.08		84.98	0.09	
JDY10	1 000	45	40	3	76	83.21	0.28	0.15	84.98	0.30	0.16
JDY11	700	60	40	-4.092	67	74.94	0.36	0.13	76.06	0.38	0.14
JDY12	2 000	20	15	-3.363	76	83.19	0.17	0.20	84.99	0.19	0.23
JDY13	2 000	20	25	5	75	83.10	0.11	0.13	84.09	0.11	0.13
JDY14	1 500	30	15	-28	74	81.86	0.25	0.19	84.32	0.27	0.22
JDY15	3 000	0	10	-28	74	81.86	0.11		84.32	0.12	
JDY16	350	60	120	-7.592	63	70.56	0.32	0.11	72.36	0.37	0.13
JDY17	2 000	20	25	-22.5	74	82.16	0.10	0.12	84.03	0.11	0.13
JDY18	450	70	115	22	70	78.08	0.30	0.10	80.02	0.35	0.12
JDY19	400	65	70	22	55	62.51	0.30	0.09	65.27	0.37	0.11
JDY20	350.7	35	105	-25	59	66.62	0.29	0.16	69.24	0.37	0.21
JDY21	410	65	110	-26	66	73.75	0.31	0.10	76.25	0.38	0.13
JDY22	450	70	115	-26	70	77.86	0.29	0.09	80.23	0.36	0.12

3 结语

本文从城市轨道交通信号专业角度,对曲线段最高速度的计算方法以及调整方法进行了研究和介绍。主要方法是以安全制动模型为计算依据,根据线路、轨道和车辆等其他专业提供的数据,计算出曲线段运营速度下的紧急制动触发速度和可能的最高速度,并分别计算这两种速度下的横向加速度和冲击率是否满足乘客舒适性的要求和相应的国家标准要求。

参考文献

[1] 易立富. 地铁系统列车最高运行速度分析[J]. 铁道通信信号, 2011(12):1.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[3] 中华人民共和国建设部. 城市轨道交通信号系统通用技术条件: GB/T 12758—2004[S]. 2004.

[4] 中华人民共和国建设部. 城市轨道交通工程项目建设标准: JB 104—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

[5] 宗明, 郇春海, 何燕. 基于 CBTC 控制的全自动驾驶系统[J]. 都市快轨交通, 2006(6): 34.

[6] 中国城市轨道交通协会. 城轨道交通列车运行速度限制与匹配技术标: T/CAMET 04015—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.

[7] 张标. 列车运行在曲线上产生横向加速度的原因分析[J]. 科学与财富, 2016(12): 17.

[8] 于春华, 杨其振. 城轨交通曲线未被平衡离心加速度容许值的探讨[J]. 铁道标准设计, 2007(8): 20.

(收稿日期: 2019-08-30)