

列车自动运行牵引策略在载荷变化时 对准点性的影响分析

曲健伟^{1,2}

(1. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都; 2. 南京恩瑞特实业有限公司, 211106, 南京//工程师)

摘 要 地铁列车自动运行(ATO)系统应保证列车在不同载荷下的区间运行时间均能满足准点性要求。研究了 ATO 系统两种牵引控制策略(按当前载荷下的最大牵引力控制、按 AW3(超常荷载)下的最大加速度控制)在不同的载荷下对准点性能的影响,并分别在最大能力运行场景和节能运行场景下对两种牵引控制策略下的区间运行时间进行了对比。计算结果表明,按 AW3 下的最大加速度控制这一牵引策略在载荷变化时的区间运行时间波动更小,且其波动范围小于 2%,可满足 ATO 对准点性的严格要求。

关键词 地铁; 列车自动运行; 牵引策略; 载荷; 准点

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.004

Influence of ATO Traction Strategies on System Punctuality with Varied Train Loads

QU Jianwei

Abstract The punctuality of the automatic train operation (ATO) system should be ensured under different train loads. In this paper, the influence of two different traction control strategies (maximum traction force control with current train load and maximum acceleration control with AW3 train load) on the system punctuation is studied, the interval operation times in the scenarios of maximum capacity operation and energy-efficient operation are compared. The results show that, the traction method of maximum acceleration control with AW3 train load can achieve less run time fluctuation (within 2% range), therefore satisfies the ATO system with strict punctuality requirement.

Key words metro; ATO; traction strategy; train load; punctuality

Author's address School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

地铁列车自动运行(ATO)系统要求为列车在区间的运行时间偏差不能超过 2%。ATO 根据列车自动监控(ATS)系统发来的区间运行时间,通过数

据库查询或在线计算出目标参考速度曲线或驾驶策略,并以此为基准进行速度跟踪控制。对于某个确定的运行区间,在固定的区间运行时间要求下,对所有的列车载重情况采用同样的驾驶策略。

ATO 在现场调试准点性能时,列车载荷一般都是空载,车上只有调试人员,而在正常运行时,列车的载荷范围在空载与最大载荷之间。故需要通过 ATO 调整控制策略,使列车在不同载荷下的区间运行时间尽可能接近,使现场调试的结果与实际运营时的区间运行时间偏差尽可能小。

地铁列车 ATO 在实际运营中有两种最常用的运行场景:最大能力运行和节能运行。在最大能力运行场景中,ATO 在不超出线路限速的前提下实施最大牵引、限速巡航和最大制动^[1];在节能运行场景中,根据节能运行原则^[2-3],ATO 实施最大牵引或限速巡航,在设置的惰行位置施加惰行,并在惰行结束之后转入限速巡航或最大制动。本文基于最大能力运行和节能运行两种场景,对 ATO 可采用的不同牵引控制策略在载荷波动情况下对区间运行准点性能的影响进行分析,以选择准点性能较好的 ATO 牵引控制策略。

1 载荷变化对区间运行时间的影响分析

令列车在区间的运行时间为 T , 距离为 S , 速度为 v , a 、 a_{trac} 、 a_{brak} 、 a_{baisc} 、 a_{line} 分别为列车加速度、列车牵引加速度、列车制动减速度、列车基本阻力减速度、线路附加阻力减速度。列车的区间运行遵循以下公式:

$$T = \int_{s=0}^S \frac{1}{v} dt \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = a = a_{\text{trac}} - a_{\text{brak}} - a_{\text{baisc}} - a_{\text{line}} \quad (2)$$

可见列车在区间的运行时间由其速度决定,而

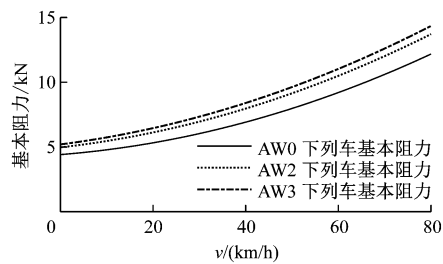
列车速度由加速度决定,列车加速度由牵引加速度、制动减速度、基本阻力减速度和线路附加阻力减速度决定。牵引加速度受载荷波动的影响在本文第2节展开分析,下面先分析除牵引加速度以外其他减速度受载荷波动的影响。

地铁列车的制动控制为减速度控制,可以保证在任意列车载荷和速度下实现特性内的目标减速度,故列车的减速度不受载荷波动影响。

令 M 为列车的动态质量,列车基本阻力减速度可表示为

$$a_{\text{baisc}} = \frac{c_0 + c_1 v + c_2 v^2}{M} \tag{3}$$

式中, c_0 、 c_1 、 c_2 为非负值常数系数,其数值与列车载荷有关。列车在不同载荷下的列车基本阻力特性如图1所示,不同载荷下的列车基本阻力减速度如图2所示。



注:AW0、AW2、AW3 分别表示列车载荷为空载、额定载荷和超常载荷的情况

图1 不同载荷下的列车基本阻力特性

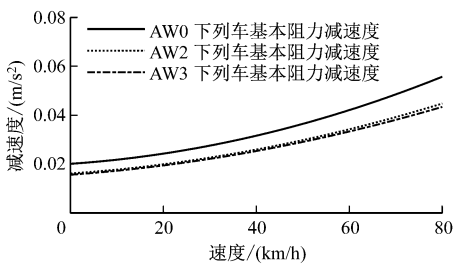


图2 不同载荷下的列车基本阻力减速度

令 M_{inertia} 为列车的惯性质量, ω_i 为单位线路附加阻力^[4], g 为重力加速度, M_{AW0} 为 AW0 下列车的质量, M_{AW3} 为 AW3 下列车的质量。则线路附加阻力减速度可表示为:

$$a_{\text{line}} = \frac{(M - M_{\text{inertia}})}{M} g \omega_i = \left(1 - \frac{M_{\text{inertia}}}{M}\right) g \omega_i \tag{4}$$

由于 $1 - \frac{M_{\text{inertia}}}{M_{\text{AW3}}} > 1 - \frac{M_{\text{inertia}}}{M_{\text{AW0}}}$,故载荷较大时的线路附加减速度较大。表1~表4 为两个实际地铁线

路区间的坡道和曲线数据,图3、图4 为这两个区间线路坡道和曲线数据下对应的线路附加阻力减速度随载荷波动的变化情况(计算方法见文献[5])。根据式(3)、式(4)可以得到列车载荷对阻力减速度的影响关系,但从图2~图4 可以看出,列车基本阻力减速度和线路附加阻力减速度随载荷波动的变

表1 区间1的坡道数据

坡道起点位置/m	坡道终点位置/m	坡度/% ₀
0	75.32	2.0
75.32	290.32	-21.0
290.32	580.39	-3.8
580.39	932.28	28.0
932.28	1 178.83	2.0

表2 区间1的曲线数据

曲线起点位置/m	曲线终点位置/m	曲线半径/m
13.69	174.66	350
329.96	435.05	2 500

表3 区间2的坡道数据

坡道起点位置/m	坡道终点位置/m	坡度/% ₀
0	90.45	2.0
90.45	245.45	17.6
245.45	525.45	28.0
525.45	698.11	2.0

表4 区间2的曲线数据

曲线起点位置/m	曲线终点位置/m	曲线半径/m
115.20	463.97	450

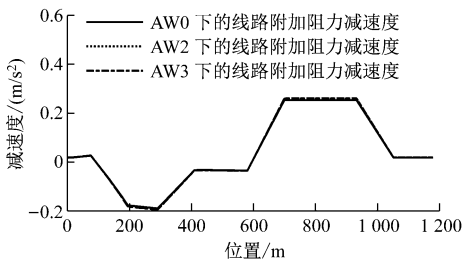


图3 区间1在不同载荷下的线路附加阻力减速度

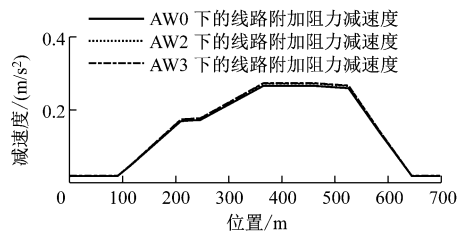


图4 区间2在不同载荷下的线路附加阻力减速度

化很小。

2 ATO 牵引控制策略

列车牵引加速度可表示为:

$$a_{\text{trac}} = \frac{f_{\text{trac}}}{M}, f_{\text{trac}} \leq F_{\text{trac}}(M, v) \tag{5}$$

式中:

f_{trac} ——列车施加的牵引力;
 $F_{\text{trac}}(M, v)$ ——列车当前载荷下的牵引力。
以 B 型地铁列车为例, AW0、AW2、AW3 下列车动态质量分别为 218.52 t、306.12 t、330.48 t。图 5 为该 B 型列车在 AW0、AW2、AW3 下的牵引特性曲线。从图 5 可以看出, 列车牵引特性受到列车载荷和速度的影响, 列车最大牵引力随载荷的增加逐渐减小。

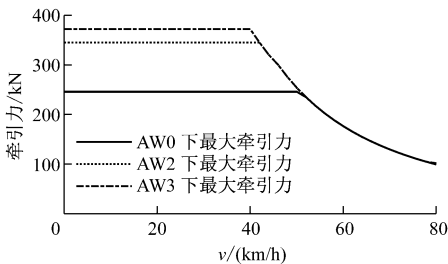


图 5 不同载荷下的牵引特性曲线

在牵引阶段, ATO 计算控制加速度, 并根据当前列车载荷和列车速度以及列车牵引特性, 将控制加速度转换为牵引数字量指令和电流环模拟量指令发送给车辆。其中, 电流环指令用于表示 ATO 控制加速度对应的牵引力与当前最大牵引力的百分比, 代表当前最大牵引能力的控制系数。

在牵引阶段, 目前存在两种可行的牵引控制策略:

1) 牵引策略 1: 按当前载荷下最大牵引能力控制, 最大牵引阶段 ATO 直接输出 100% 控制系数。列车在不同载荷下能够实现的最大牵引加速度如图 6 中牵引策略 1 对应的加速度曲线所示, 可见当列车速度超过 40 km/h 后, 随着载荷的增加, 最大牵引加速度逐渐减小。载荷为 AW3 时的最大牵引加速度要小于其他载荷的最大牵引加速度。

2) 牵引策略 2: 为保证在任何载荷下都能得到想要的加速效果, 按 AW3 下牵引特性对应的最大牵引加速度计算牵引力。ATO 需按该牵引力和当前载荷下的最大牵引力计算牵引控制系数。牵引策略 2 对应的最大牵引加速度如图 6 所示。

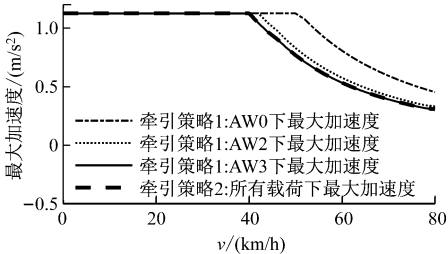


图 6 牵引策略 1 与牵引策略 2 的最大牵引加速度对比

由于列车基本阻力减速度和线路附加阻力减速度随载荷波动的变化很小, 对图 2~4 以及图 6 进行分析后可以得出, 影响列车区间运行时间的主要因素还是在于列车的牵引控制策略。

3 算例分析

从图 2~4 以及图 6 可以看出, 由于 AW2 与 AW3 比较接近, 两者的各种减速度也比较接近。为简化分析, 下文只对 AW0 和 AW3 进行对比。

算例中使用的区间 1 和区间 2 的坡道和曲线数据如表 1~4 所示, 限速数据如表 5、表 6 所示。算例中采用的牵引计算算法参见文献[5], 计算步长为 0.01 m。

表 5 区间 1 的限速数据

限速起点位置/m	限速终点位置/m	限速值/(km/h)
0	119.64	45
119.64	293.97	60
293.97	1 030.16	70
1030.16	1 178.83	45

表 6 区间 2 的限速数据

限速起点位置/m	限速终点位置/m	限速值/(km/h)
0	119.65	45
119.65	550.32	70
550.32	698.11	45

3.1 牵引策略 1 的算例分析

区间 1 在牵引策略 1 下的最大能力速度曲线及节能运行速度曲线分别如图 7、图 8 所示; 区间 2 在牵引策略 1 下的最大能力速度曲线及节能运行速度曲线分别如图 9、图 10 所示。以区间 1、2 在 AW3 下的运行时间为基准计算区间运行时间偏差, 如表 7 所示。

由图 7~10 及表 7 可知, 牵引策略 1 在节能运行时不同载荷下的时间偏差要大于最大能力运行时不同载荷的时间偏差, 且区间 2 在最大能力和节

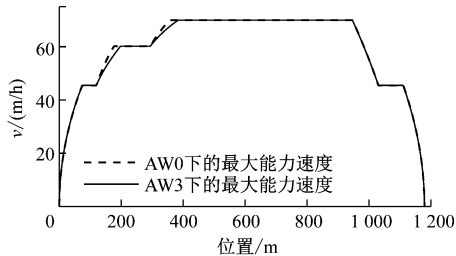


图 7 区间 1 的最大能力速度曲线(牵引策略 1)

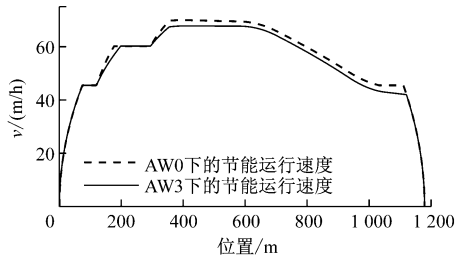


图 8 区间 1 的节能运行速度曲线(牵引策略 1)

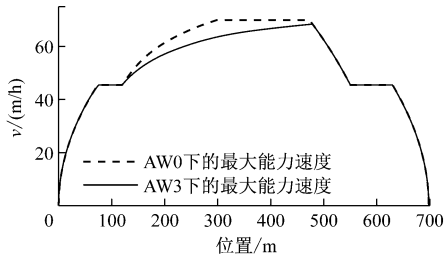


图 9 区间 2 的最大能力速度曲线(牵引策略 1)

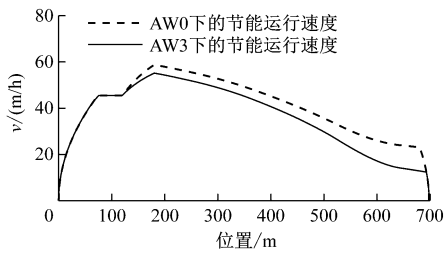


图 10 区间 2 的节能运行速度曲线(牵引策略 1)

表 7 牵引策略 1 下区间运行时间计算结果

运行模式	区间 1			区间 2		
	AW0 下区间运行时间/s	AW3 下区间运行时间/s	时间偏差/%	AW0 下区间运行时间/s	AW3 下区间运行时间/s	时间偏差/%
以最大能力速度运行	82.43	82.69	-0.30	56.94	58.16	-2.10
以节能速度运行	86.46	88.47	-2.27	72.82	88.66	-17.87

能运行时的时间偏差均比区间 1 大。

3.2 牵引策略 2 的算例分析

区间 1 在牵引策略 2 下的最大能力速度曲线及节能运行速度曲线分别如图 11、图 12 所示；区间 2 在牵引策略 2 下的最大能力速度曲线及节能运行速度曲线分别如图 13、图 14 所示。以区间 1、2 在 AW3 下的运行时间为基准计算区间运行时间偏差，如表 8 所示。

由图 11~14 及表 8 可知，与策略 1 相比，虽然牵引策略 2 在节能运行时不同载荷下的时间偏差依然大于最大能力运行时不同载荷下的时间偏差，且区间 2 在最大能力和节能运行时的时间偏差也比区间 1 大，但牵引策略 2 在载荷波动下的区间运行时

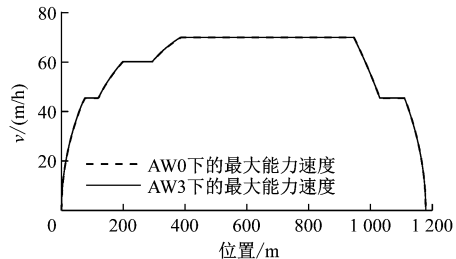


图 11 区间 1 最大能力速度曲线(牵引策略 2)

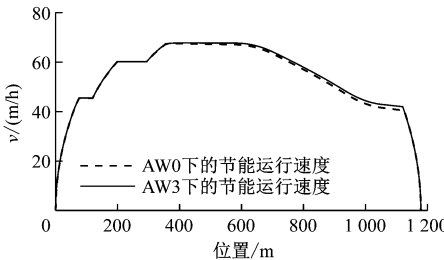


图 12 区间 1 节能运行速度曲线(牵引策略 2)

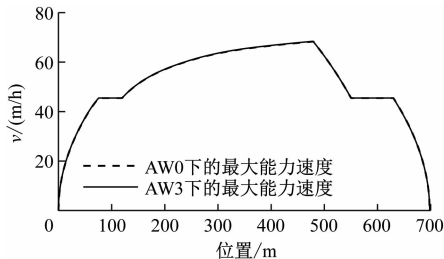


图 13 区间 2 最大能力速度曲线(牵引策略 2)

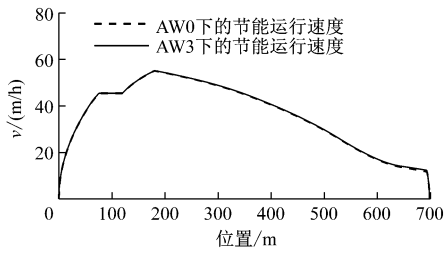


图 14 区间 2 节能运行速度曲线(牵引策略 2)

表 8 牵引策略 2 下区间运行时间计算结果

运行模式	区间 1			区间 2		
	AW0 下区间 运行时间/s	AW3 下区间 运行时间/s	时间偏差/%	AW0 下区间 运行时间/s	AW3 下区间 运行时间/s	时间偏差/%
以最大能力速度运行	82.70	82.69	0.01	58.19	58.16	0.05
以节能速度运行	89.36	88.47	1.01	89.60	88.66	1.06

间偏差均不超过 2% ,远小于牵引策略 1 下的时间偏差,可满足 ATO 对区间运行时间的准点性要求。

4 结论

本文通过 ATO 的牵引计算仿真,分析了按当前载荷下最大牵引能力控制以及按 AW3 下最大牵引加速度控制两种 ATO 牵引策略在不同的列车载荷下对区间运行时间的影响。仿真结果表明,按 AW3 下最大牵引加速度控制可以减少载荷变化对区间运行时间波动的影响,具有更好的准点性能。

参考文献

[1] 石红国,彭其渊,郭寒英.城市轨道交通牵引计算算法[J].

(上接第 13 页)

风险率(8.84%)。改进后工期增加了 2.9 d,为原工期的 0.21%;风险率降低了 7.25%,为原风险率的 45.06%。改进后的方法较大幅度地降低了延期风险,为施工进度方案的选择提供了依据。

2) 与传统 BN 方法相比,引入语言变量进行专家等级判断,便于分析计算经验概率,改善了专家评判存在的主观性、认知偏差等问题。BN-PERT 模型为地铁项目工期和风险率提供了便捷而准确的计算方法,为工程进度管理与安全控制提供了技术支撑。

参考文献

[1] 续晓春. PERT 网络在工程风险估计中的应用初探[J]. 太原理工大学学报,2000(1): 87.
[2] 王卓甫,杨高升,杨建基,等. 水利水电施工中应用 PERT 的完工概率问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002(1): 44.
[3] 张弘,申瑞臣,袁光杰,等. 基于贝叶斯网络的气井井筒完整性风险评价[J]. 中国安全生产科学技术,2017(9): 132.
[4] 汪涛,廖彬超,马昕,等. 基于贝叶斯网络的施工安全风险概率评估方法[J]. 土木工程学报,2010(增刊2): 384.
[5] 刘俊艳,王卓甫. 工程进度风险因素的非叠加性影响[J]. 系统工程理论与实践,2011(8): 1517.
[6] 刘俊艳. 基于 BN-CPM 的工程进度风险因素相关性分析[J]. 水力发电学报,2011(6): 199.
[7] 刘俊艳,STEVEN D. 基于 BN-CPM 的工程活动相关性分析

交通运输工程学报,2004,4(3):30.

[2] 荀径,杨欣,宁滨,等. 列车节能操纵优化求解方法综述[J]. 铁道学报,2014,36(4):14.
[3] YIN J, TANG T, YANG L, et al. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: a survey[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2017, 85:548.
[4] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 北京:中国铁道出版社,2010:24.
[5] 朱晓敏,徐振华. 基于单质点模型的城市轨道交通列车动力学仿真[J]. 铁道学报,2011,33(6):14.

(收稿日期:2018-08-08)

[J]. 水力发电学报,2012(5): 302.

[8] 张社荣,杜成波,撒文奇,等. 基于贝叶斯理论的地下洞室群时变施工进度风险预测方法[J]. 系统仿真学报,2014(5): 1131.
[9] 钟登华,闫玉亮,张隼,等. 耦合改进 PERT 和 BBNs 的堆石坝施工进度风险分析[J]. 水利学报,2017(1): 52.
[10] FOX C R, CLEMEN R T. Subjective probability assessment in decision analysis: Partition dependence and bias Toward the ignorance prior [J]. Management Science, 2005, 51(9): 1417.
[11] SPEIRS-BRIDGE A, FIDLER F, MCBRIDE M, et al. Reducing overconfidence in the interval judgments of experts [J]. Risk Analysis, 2010, 30(3): 512.
[12] FENTON N E, NEIL M, CABALLERO J G. Using ranked nodes to model qualitative judgments in bayesian networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2007, 19(10): 1420.
[13] LIN C T, WANG M. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 58(3): 205.
[14] 金朝光,林焰,纪卓尚. 基于模糊集理论事件树分析方法在风险分析中应用[J]. 大连理工大学学报,2003,43(1):97.
[15] 陆莹,李启明,周志鹏. 基于模糊贝叶斯网络的地铁运营安全风险预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010(5): 1110.
[16] LIOU T S, WANG M J J. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1992, 50(3): 247.
[17] PEARL J. Fusion, propagation and structuring in belief networks [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241.

(收稿日期:2018-08-20)