

有轨电车长大坡道线路牵引供电方案研究^{*}

刘 飞 胥 伟 向 往 陈立阳

(中铁二院工程集团有限责任公司地下铁道设计研究院, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

摘 要 结合丽江城市综合轨道交通项目一期工程 1 号线沿线自然坡度大、列车运行工况为持续爬坡和持续下坡的特点, 研究有轨电车长大坡道线路牵引供电方案。通过分析计算列车上下坡能耗数据的严重不对称性, 建议对正线上下行接触网在每个牵引供电区间中部并联一次, 并设置并联开关。分析长大坡道上下行接触网并联后, 牵引变电所的布点与接触网导线组合及重联列车追踪方式之间的关系。结果表明: 重联列车紧密追踪对牵引变电所的布点有较大影响, 同时接触网采用链形悬挂可以减少牵引变电所的设置。

关键词 有轨电车; 牵引供电; 长大坡道; 重联列车

中图分类号 U482.109

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.007

Study on Traction Power Supply Scheme for Long and Large Ramp Tram Line

LIU Fei, XU Wei, XIANG Wang, CHEN Liyang

Abstract The traction power supply scheme for long and large ramp tram line is studied based on the characteristics of large natural slope, the train operation conditions of continuous climbing and descending on Line 1, which is the first phase of Lijiang Urban Comprehensive Rail Transit Project. By analyzing and calculating the serious asymmetry of the energy consumption data in the process of train climbing and descending, it is suggested to connect the contact line in the middle of each traction power supply section on the front and the down lines, and set up a parallel switch. The relationship between the distribution points of traction substations, the combination of catenary conductors and the tracking mode of coupled train is analyzed after the parallel connection of up and down catenaries on the long ramp. The results show that the close tracking of the coupled train has a great influence on the layout of the traction substations, and the adoption of chain suspension catenary can reduce the setting number of traction substations.

Key words tram; traction power supply; long and large ramp; coupled train

Author's address China Railway Eryuan Engineering

Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

丽江城市综合轨道交通项目一期工程 1 号线(以下简称“1 号线”)南起游客中心站, 北至玉龙雪山站。线路全长 20.465 km, 其中高架线 0.828 km, 占线路全长的 4.05%; 地面线 19.637 km, 占线路全长的 95.95%^[1-2]。全线共设 5 座车站, 分别为游客中心站、白沙古镇站、玉水寨站、东巴谷站和玉龙雪山站, 均为地面站。最大站间距为 11.68 km, 最小站间距为 1.83 km, 平均站间距为 5.052 km。全线设游客中心车辆段一座。控制中心位于车辆段内。受地形地貌影响, 1 号线沿线自然坡度较大, 线路最大坡度为 55‰, 其中坡度为 20‰以上的线路为 16.46 km, 坡度为 40‰以上的线路为 8.57 km。线路最低点海拔(游客中心站)约 2 480 m, 最高点海拔约 3 080 m, 海拔高差约 600 m。列车运行工况为持续爬坡和持续下坡。

1 号线为中低运量的城市轨道交通线路, 采用 2 节编组、接触网式铰接高地板有轨电车。列车最高运行速度为 70 km/h, 旅行速度为 40 km/h。旅游旺季高峰小时列车运行交路如图 1 所示。

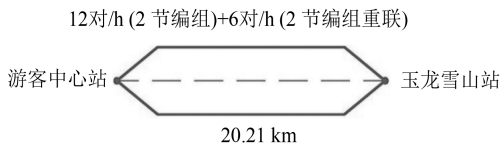


图 1 旺季高峰小时运行交路图

考虑到有轨电车工程负荷较轻, 结合国内已开通或在建有轨电车的情况, 从技术成熟的角度出发, 综合各经济技术因素, 推荐外部供电方式采用 10 kV 分散供电^[3]。根据车辆选型, 1 号线牵引供电采用 DC 1 500 V 架空接触网、走行轨回流方式。

^{*} 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KYY2018022(18-20); KYY2018023(18-20))

1 有轨电车牵引供电仿真模拟分析

根据车辆及线路资料,对 1 列 2 节编组列车在 1 号线线路运行时进行牵引性能仿真分析。

1.1 游客中心站—玉龙雪山站(上坡)

AW3(满座+9 人/m²,超常载荷)工况下,牵引供电系统采用 DC 1 500 V,制动供电采用 DC 1 650 V,再生制动能量按 100%吸收、50%吸收、0%吸收制动能量回收,且按照最大能力运行方式,对游客中心站—玉龙雪山站(上坡)以及玉龙雪山站—游客中心站(下坡)进行仿真模拟运行计算。结果如表 1 所示。上坡时网侧电流-里程曲线如图 2 所示。

由表 1 和图 2 的仿真数据可知,由于东巴谷站—玉龙雪山站之间线路的坡度大于游客中心站—东巴谷站之间的线路坡度,故前者的能耗数据大于后者。且列车在东巴谷站—玉龙雪山站区间运行时,存在 9 km 时接近满电流(600 A)持续取流

的情况,此时牵引网电流大,电能消耗大,牵引网的电压损失较大。

表 1 游客中心站—玉龙雪山站区间列车上坡时的仿真模拟计算数据

项目	区间	
	游客中心站—东巴谷站	东巴谷站—玉龙雪山站
区间距离/km	8.51	11.62
牵引 RMS 电流/A	82.24	83.43
再生制动 RMS 电流/A	76.12	74.88
总 RMS 电流/A	80.78	82.13
再生制动率	0.28	0.11
区间总能耗(100%吸收)/kWh	58.83	122.21
区间总能耗(50%吸收)/kWh	70.40	129.88
区间总能耗(0%吸收)/kWh	81.95	137.54
区间平均每公里耗电量(100%吸收)/(kWh/km)	6.92	10.52
区间平均每公里耗电量(50%吸收)/(kWh/km)	8.27	11.18
区间平均每公里耗电量(0%吸收)/(kWh/km)	9.63	11.84

注: RMS 代表均方根

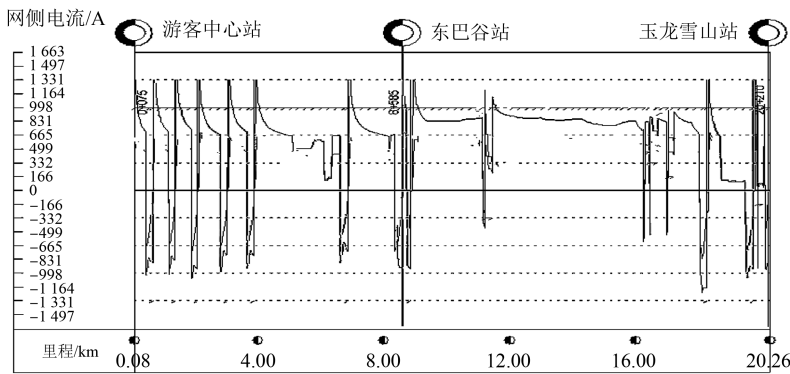


图 2 游客中心站—玉龙雪山站区间网侧电流-里程曲线

1.2 玉龙雪山站—游客中心站(下坡)

玉山雪山站—游客中心站区间列车下坡时的仿真模拟计算结果如表 2 所示。下坡时网侧电流-里程曲线如图 3 所示。由表 2 和图 3 的仿真数据可知,由于列车持续下坡,列车的势能转化为动能,列车的能耗数据较小,使得列车再生制动产生的电能向牵引网反馈。

1.3 列车往返运行结果

表 3 为游客中心站—玉龙雪山站列车往返运行结果。由表 3 可知,列车上坡与下坡相比,列车的总能耗、总平均公里耗电量数据出现严重的不对称,上坡时耗电量大,下坡时耗电量较小。针对 1 号线沿线自然坡度大、列车运行工况为持续爬坡和持续下坡的特点,从增大接触网的载流量、减小牵引网电压损失、改善上下行接触网的电流分布以及下

表 2 玉山雪山站—游客中心站区间列车下坡时的仿真模拟计算数据

项目	区间	
	玉龙雪山站—东巴谷站	东巴谷站—游客中心站
区间距离/km	11.62	8.51
再生制动率	81.40	98.80
牵引 RMS 电流/A	60.89	63.98
再生制动 RMS 电流/A	67.72	76.31
总 RMS 电流/A	2.36	1.19
区间总能耗(100%吸收)/kWh	44.59	-6.99
区间总能耗(50%吸收)/kWh	-5.90	15.00
区间总能耗(0%吸收)/kWh	32.80	36.99
区间平均每公里耗电量(100%吸收)/(kWh/km)	3.84	0.82
区间平均每公里耗电量(50%吸收)/(kWh/km)	-0.51	1.76
区间平均每公里耗电量(0%吸收)/(kWh/km)	2.82	4.35

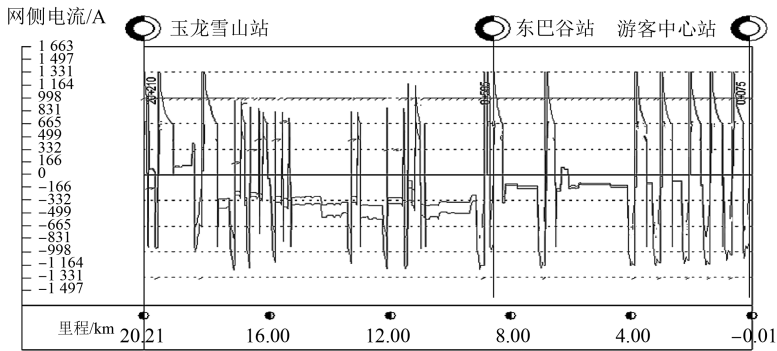


图3 玉山雪山站—游客中心站区间网侧电流-里程曲线

表3 列车往返运行结果

项目	游客中心站— 玉龙雪山站	玉龙雪山站— 游客中心站	往返 运行
总里程/km	20.50	20.50	41.00
折返时间/s	120.00	0	120.00
总运行时间/s	1 401.80	1 293.70	2 695.50
总旅行时间/s	1 431.70	1 323.60	2 875.30
平均运行速度/(km/h)	51.71	56.03	53.77
平均旅行速度/(km/h)	50.63	54.76	52.70
总再生率	0.18	1.74	0.55
牵引电压/V	1 500.00	1 500.00	1 500.00
再生制动电压/V	1 650.00	1 650.00	1 650.00
电机 RMS 电流(不停站)/A	81.54	71.73	76.64
电机 RMS 电流(停站)/A	80.68	70.92	75.80
总能耗(100%吸收)/kWh	181.06	-51.58	129.48
总能耗(50%吸收)/kWh	200.28	9.11	209.38
总能耗(0%吸收)/kWh	219.49	69.79	289.28
总平均公里耗电量(100%吸收)/(kWh/km)	8.99	-2.56	3.22
总平均公里耗电量(50%吸收)/(kWh/km)	9.95	0.45	5.20
总平均公里耗电量(0%吸收)/(kWh/km)	10.90	3.47	7.19

坡列车再生制动能量被上坡列车吸收等角度考虑^[4-5],对正线上下行接触网在每个牵引供电区间中部并联一次,并设置并联开关。

2 有轨电车牵引供电方案

在旅游旺季有轨电车行车对数为12对/h(2节编组)+6对/h(2节编组重联)。牵引变电所布点时需考虑以下两种情况:

- 1) 重联列车间隔追踪:即6对/h与12对/h交替发车,先发1对2节编组重联列车后,再发2对2节编组列车,依次交替;
- 2) 重联列车紧密追踪:考虑运营的不确定性,存在6对/h紧密发车的情况,即先将6对2节编组重联列车全部发完后,再发12对2节编组列车。

由于东巴谷站—玉龙雪山站区间存在较大的长大坡道,且列车存在持续9 km大电流取流的情

况,此区段电流的有效值约等于平均值,接触网采用单接触线的方案,接触网的载流量将会成为牵引变电所布点的限制因素。基于上述分析,提出以下3种接触网导线构成方式:①方式1:单接触线(CTA-150);②方式2:上坡接触网采用单承力索+单接触线(JTM-120+CTA-150),下坡接触网采用单接触线(CTA-150);③方式3:单承力索+单接触线(JTM-120+CTA-150)。本文对接触网3种导线构成方案的牵引变电所布点进行了分析。表4为上下行接触网并联后的载流量和牵引网的合成阻抗。

表4 上下行接触网并联后接触网的载流量和牵引网阻抗

接触网导线构成方式	载流量/A	牵引网阻抗/(Ω/km)
方式1	1 053	0.104
方式2	1 494	0.071
方式3	1 935	0.054

2.1 重联列车间隔追踪

1) 方案1:接触网采用单接触线时牵引变电所的布点如表5所示。该方案中,全线共设9座牵引变

表5 牵引变电所的布点(方案1)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变电 所名称	牵引 变电所 编号	故障双 边距离/ m	牵引整 流变容 量/(kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	2 800	1 600
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK3+010	白玉区间牵引 变电所1	Q2	5 985	1 600
YCK6+195	玉水寨站	Q3	5 730	1 600
YCK8+740	东巴谷站	Q4	4 765	1 600
YCK10+960	东玉区间牵引 变电所1	Q5	4 440	2 000
YCK13+180	东玉区间牵引 变电所2	Q6	4 440	2 000
YCK15+400	东玉区间牵引 变电所3	Q7	4 440	2 000
YCK17+620	东玉区间牵引 变电所4	Q8	5 020	1 600
YCK20+420	玉龙雪山站	Q9	2 800	1 600

注:每座牵引变电所设置1套12脉波牵引整流机组向接触网供电;表中白沙古镇站—玉水寨站区间简为“白玉区间”;东巴谷站—玉山寨站区间简为“东玉区间”

电所,由于东巴谷站—玉龙雪山站区间列车存在持续大电流取流的情况,接触网的载流量成为牵引变电所布点的限制因素,故此区段牵引变电所布点较密。

2) 方案 2:上坡接触网采用单承力索+单接触线、下坡接触网采用单接触线时,牵引变电所的布点如表 6 所示。该方案中全线共设 7 座牵引变电所,上坡接触网增加承力索后,接触网的载流量增大,同时牵引网的阻抗减小。牵引变电所数量较方案 1 减少 2 座。

表 6 牵引变电所的布点(方案 2)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变电所 名称	牵引 变电所 编号	故障大双 边距离/ m	牵引整流 变容量/ (kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	3 300	2 000
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK3+510	白玉区间牵引 变电所 1	Q2	7 485	2 000
YCK6+195	玉水寨站			
YCK7+695	玉东区间牵引变电所	Q3	7 750	2 000
YCK8+740	东巴谷站			
YCK11+260	东玉区间牵引 变电所 1	Q4	6 495	2 500
YCK14+190	东玉区间牵引 变电所 2	Q5	5 860	2 500
YCK17+120	东玉区间牵引 变电所 3	Q6	6 230	2 500
YCK20+420	玉龙雪山站	Q7	3 300	2 000

3) 方案 3:接触网采用单承力索+单接触线时,牵引变电所的布点如表 7 所示。该方案中,全线共设 6 座牵引变电所,上下行接触网采用单承力索+单接触线后,接触网的载流量进一步增大,牵引网阻抗减小。牵引变电所数量较方案 2 减少 1 座。

表 7 牵引变电所的布点(方案 3)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变电 所名称	牵引 变电所 编号	故障大 双边距离/ m	牵引整流 变容量/ (kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	4 200	2 000
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK4+410	白玉区间牵引 变电所 1	Q2	8 530	2 000
YCK6+195	玉水寨站			
YCK8+740	东巴谷站	Q3	8 230	2 500
YCK12+640	东玉区间牵引 变电所 1	Q4	7 800	2 500
YCK16+540	东玉区间牵引 变电所 2	Q5	7 780	2 500
YCK20+420	玉龙雪山站	Q6	3 880	2 000

2.2 重联列车紧密追踪

1) 方案 4:接触网采用单接触线时牵引变电所布点如表 8 所示。考虑到重联列车紧密追踪后,由于重联列车取流较大,重联列车紧密追踪会造成接

触网电流及牵引网电压损失增大。方案 4 的牵引变电所布点较方案 1 增加 1 座。

表 8 牵引变电所的布点(方案 4)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变 电所名称	牵引 变电所 编号	故障大 双边距离/ m	牵引整流 变容量/ (kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	2 900	1 600
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK3+110	白玉区间牵引变电所	Q2	5 985	1 600
YCK6+195	玉水寨站	Q3	5 630	1 600
YCK8+740	东巴谷站	Q4	4 495	1 600
YCK10+690	东玉区间牵引 变电所 1	Q5	3 900	2 000
YCK12+640	东玉区间牵引 变电所 2	Q6	3 900	2 000
YCK14+590	东玉区间牵引 变电所 3	Q7	3 900	2 000
YCK16+540	东玉区间牵引 变电所 4	Q8	3 900	2 000
YCK18+490	东玉区间牵引 变电所 5	Q9	3 880	2 000
YCK20+420	玉龙雪山站	Q10	1 930	1 600

2) 方案 5:上坡接触网采用单承单导、下坡接触网采用单接触线时,牵引变电所的布点如表 9 所示。该方案中,全线共设 8 座牵引变电所。同理,由于重联列车紧密追踪,造成方案 5 牵引变电所数量较方案 2 增加 1 座。

表 9 牵引变电所的布点(方案 5)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变 电所名称	牵引 变电所 编号	故障大 双边距离/ m	牵引整流 变容量/ (kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	2 900	1 600
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK3+110	白玉区间牵引变电所	Q2	5 985	1 600
YCK6+195	玉水寨站	Q3	5 630	1 600
YCK8+740	东巴谷站	Q4	5 525	2 500
YCK11+720	东玉区间牵引 变电所 1	Q5	5 880	2 500
YCK14+620	东玉区间牵引 变电所 2	Q6	5 800	2 500
YCK17+520	东玉区间牵引 变电所 3	Q7	5 800	2 500
YCK20+420	玉龙雪山站	Q8	2 900	1 600

3) 方案 6:接触网采用单承力索+单接触线时,牵引变电所的布点如表 10 所示。该方案中,全线共

表 10 牵引变电所的布点(方案 6)

车站/区间 牵引变电 所里程	车站/区间 牵引变 电所名称	牵引 变电所 编号	故障大 双边距离/ m	牵引整流 变容量/ (kVA)
YCK0+210	游客中心站	Q1	4 200	2 000
YCK2+040	白沙古镇站			
YCK4+410	白玉区间牵引变电所 1	Q2	8 530	2 000
YCK6+195	玉水寨站			
YCK8+740	东巴谷站	Q3	7 310	2 000
YCK11+720	东玉区间牵引 变电所 1	Q4	5 880	2 500
YCK14+620	东玉区间牵引 变电所 2	Q5	5 800	2 500
YCK17+520	东玉区间牵引 变电所 3	Q6	5 800	2 500
YCK20+420	玉龙雪山站	Q7	2 900	2 000

设 7 座牵引变电所。同理,由于重联列车紧密追踪,造成方案 6 牵引变电所数量较方案 3 增加 1 座。

3 牵引变电所布点方案经济性比较

表 11 为 6 种牵引变电所布点方案经济性对比。由表 11 可知,方案 3 经济性最好。但是方案 3 是建立在重联列车间隔追踪的情况下,为了给将来的运营预留更多的灵活性,本次牵引变电所布点推荐方案 6,即考虑重联列车紧密追踪,上下行接触网采用单承单导的方案。1 号线全线从电网引入 4 路 10

kV 外部电源,中压供电网络采用单环网接线型式。图 4 为采用方案 6 时 1 号线全线供电系统图。

表 11 牵引变电所布点方案经济性对比

方案	牵引变电所数量/座	牵引变电所投资/万元	接触网投资/万元	一次性投资/万元
方案 1	9	7 200	5 900	13 100
方案 2	7	5 600	6 500	12 100
方案 3	6	4 800	7 100	11 900
方案 4	10	8 000	5 900	13 900
方案 5	8	6 400	6 500	12 900
方案 6	7	5 600	7 100	12 700

注:牵引变电所按 800 万元/座考虑;表中只列出方案间有差异部分的投资

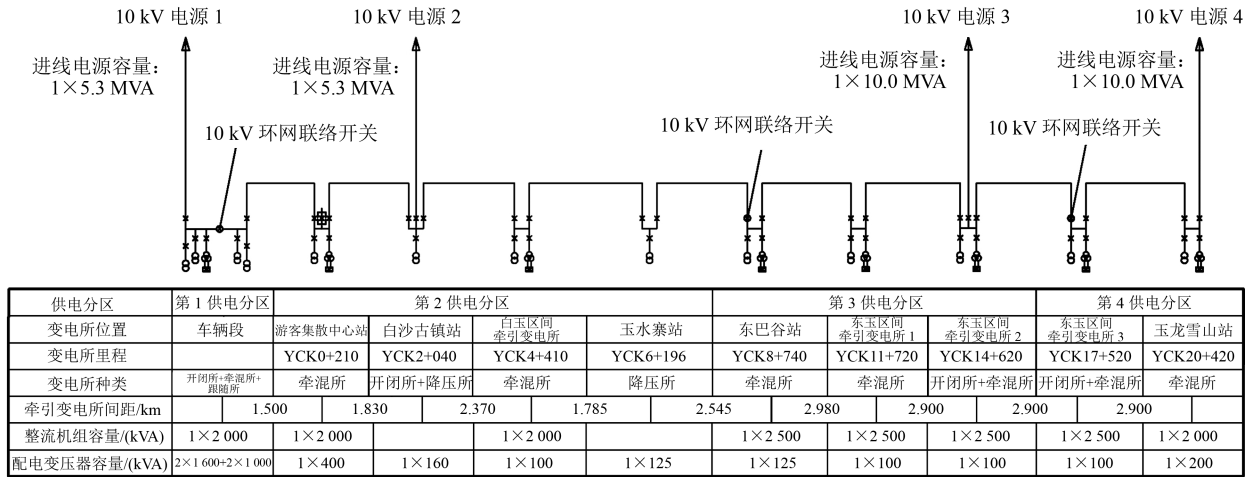


图 4 1 号线全线供电系统图

4 结论

- 1) 针对 1 号线列车上下坡能耗数据的严重不对称性,建议对正线上下行接触网在每个牵引供电区间中部并联一次,并设置并联开关;
- 2) 正线上下行接触网并联可以增大接触网的载流量,改善上下行牵引网的电流分布,减小牵引网的电压损失,同时有利于下坡列车再生制动能量被上坡列车吸收,提高了列车再生制动能量的利用率;
- 3) 针对旅游旺季存在重联列车和非重联列车混合运行的情况,建议按照重联列车紧密追踪的情况校核接触网的载流量和牵引网的电压损失;
- 4) 按照重联列车紧密追踪来进行牵引变电所布点,可以为列车运营预留更多的灵活性,供电系统的供电能力亦得到了较强的保障。

参考文献

[1] 中铁二院工程集团有限责任公司.丽江城市综合轨道交通项

目一期工程 1 号线可行性研究报告[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2018.

[2] 张海丽.丽江轨道交通运营组织方案研究[J].铁道运输与经济,2017(2): 90.

[3] 中华人民共和国建设部.城市无轨电车和有轨电车供电系统: CJ/T 1—1999[S].北京:中华人民共和国建设部,1999.

[4] 张开波.长大坡道区间牵引网上下行并联供电探讨[J].都市快轨交通,2015(4): 75.

[5] 张学军.地铁长大坡道设计相关问题的探讨[J].都市快轨交通,2005(5): 63.

[6] 何建枝.贵阳轨道交通 1 号线长大连续坡道及运营安全研究[J].都市快轨交通,2011(6): 29.

[7] 李涛,王维,王代富.山地城市轨道交通长大坡道路线方案研究[J].城市轨道交通研究,2016(11): 73.

[8] 王学贵.重庆地铁 6 号线长大坡道列车运行能力研究[J].中国铁路,2013(10): 61.

[9] 刘富.城市轨道交通连续长大单坡列车运行性能仿真分析[J].城市轨道交通研究,2018(6): 18.

(收稿日期:2019-08-13)