

地铁运营初期部分机电设备精细化运行 时间表制定策略

宋吉鹏

(青岛地铁集团有限公司运营分公司, 266100, 青岛 // 工程师)

摘 要 地铁机电设备运行时间表是调度员利用自动控制系统对地铁通风空调系统、照明系统等机电设备进行定时控制的重要工具。以青岛地铁2号线为例,针对地铁运营初期的实际情况,根据列车运营时刻表对各站首末班车时间进行了梳理划分;并通过查阅相关机电设备参数、车站和隧道空间参数等,对一次通风时间进行了相关计算;再综合地铁首末班车时间和相关环境条件等因素,详细阐述了地铁照明系统、车站大系统及隧道通风系统的精细化运行时间表制定策略。实际应用表明,精细化运行时间表具有较好的节能效果。

关键词 地铁; 机电设备; 运行时间表; 精细化运行

中图分类号 U291.1⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.09.033

Strategy for Formulating Refined Operation Schedule of Certain Mechanical and Electrical Equipment at Metro Operation Initial Stage

SONG Jipeng

Abstract The operation schedule of metro mechanical and electrical equipment is an important tool for the dispatcher to time control the ventilation and air conditioning system and lighting system with the automatic control system. Taking Qingdao Metro Line 2 as an example, in view of the actual situation of metro operation at initial stage, the first and last metro time of each station according to the train timetable are sorted, and the time of one ventilation is calculated by consulting relevant mechanical and electrical equipment parameters, station and tunnel space parameters. The strategy for formulating refined operation schedule of metro lighting system, ventilation and air conditioning system are expounded in detailed considering factors such as the first and last metro time and relevant environmental conditions. Actual implementation shows that the refined operation schedule has better energy saving effect.

Key words metro; mechanical and electrical equipment; operation schedule; refined operation

Author's address Operation Branch of Qingdao Metro

Group Co., Ltd., 266100, Qingdao, China

地铁通风空调系统、照明系统等机电设备运行费用在地铁运营成本中占比相当大,其运行能耗约占地铁总能耗的 $1/3 \sim 1/2$ ^[1-3],尤其在线路运营初期,此占比甚至会增加到 $1/2$ 。在运营服务时间内,通风空调系统、照明系统等机电设备的运行时间及运行模式,既会直接影响地铁运营时的乘车环境,又会直接影响其用电负荷。而机电设备运行时间表是地铁控制中心综合监控系统中用于编制所辖线路各站通风空调系统(包括车站大系统、车站小系统、隧道通风系统)、照明系统运行时间及执行模式的功能模块。因此,能否制定科学、合理、精细的机电设备运行时间表,不仅事关机电设备的智能运行情况,而且还会间接影响地铁运营时的服务水平和节能效果。目前国内鲜有对机电设备运行时间表的研究,本文将以青岛地铁2号线为例,根据线路运营初期的实际情况,阐述机电设备运行时间表的优化制定过程。

1 原机电设备运行时间表简介

青岛地铁2号线机电设备运行时间表主要是根据青岛市年平均气温变化趋势、单天气温变化特征及日出日落时间,并结合线路运营时间等来制定的。通风空调系统运行时间表的制定,首先是根据青岛市年平均气温变化趋势将其运行季划分为空调季、过渡季和冬季3个时段,然后再根据各运行季时段单天气温的变化特征及线路运营时间,制定其详细的运行时间表^[4]。照明系统的运行时间表则是直接根据日出日落时间及线路运营时间来制定的。青岛地铁2号线优化前的通风空调系统、照明系统运行时间表分别如表1、表2所示。

表 1 青岛地铁 2 号线通风空调系统运行时间表

运行季	隧道通风系统		车站大系统	
	运行时间	运行模式	运行时间	运行模式
空调季 (6 月 16 日—9 月 20 日)	00:00—00:30	F1	06:00—23:30	F3
	00:30—04:30	F2	23:30—次日 06:00	F2
	04:30—05:00	F1		
	05:00—次日 00:00	F4		
过渡季 (4 月 1 日—6 月 15 日, 9 月 21 日—11 月 15 日)	00:00—00:30	F1	06:00—23:30	F1
	00:30—04:30	F2	23:30—次日 06:00	F2
	04:30—05:00	F1		
	05:00—次日 00:00	F4		
冬季 (11 月 16 日— 次年 3 月 31 日)	00:00—00:30	F1	08:00—12:00	F3
	00:30—04:30	F2	12:00—15:00	F2
	04:30—05:00	F1	15:00—19:00	F3
	05:00—次日 00:00	F4	19:00—次日 08:00	F2

注:F1 为通风模式;F2 为停运模式;F3 为空调模式;F4 为正常工况模式。

表 2 青岛地铁 2 号线照明系统运行时间表

运行周期	运行时间	运行模式
6 月 1 日—8 月 31 日	05:30—18:30	Z1
	18:30—23:55	Z2
	23:55—次日 05:30	Z3
4 月 1 日—5 月 31 日, 9 月 1 日—11 月 15 日	05:30—17:30	Z1
	17:30—23:55	Z2
	23:55—次日 05:30	Z3
11 月 16 日— 次年 3 月 31 日	05:30—06:40	Z2
	06:40—16:30	Z1
	16:30—23:55	Z2
	23:55—次日 05:30	Z3

注:Z1 为日间节电模式;Z2 为夜间节电模式;Z3 为夜间停运模式。

表 3 青岛地铁 2 号线东段部分车站 2019 年首末班车时间统计

车站	上行首班车 到站时间	下行首班车 到站时间	最早 到站时间	上行末班车 离站时间	下行末班车 离站时间	最迟 离站时间
芝泉路站	06:21	06:41	06:21	22:55	23:14	23:14
五四广场站	06:25	06:38	06:25	22:58	23:11	23:11
浮山所站	06:27	06:36	06:27	23:00	23:09	23:09
燕儿岛路站	06:29	06:34	06:29	23:02	23:07	23:07
高雄路站	06:31	06:33	06:31	23:03	23:05	23:05
麦岛站	06:33	06:30	06:30	23:06	23:03	23:06
李村公园站	07:00	06:02	06:02	23:34	22:36	23:34

由表 3 可见,由于上下行列车相向而行,首班车最早到站时间为李村公园站,最迟到站时间为高雄

路站;末班车最早离站时间为高雄路站,最迟离站时间为李村公园站。相邻车站首末班车到站时间间隔,即列车在区间的运行时间,其范围在 1~5 min 之间,大部分到站时间间隔为 2 min。鉴于此,地铁机电设备运行时间表精细化制定的最小时间段应以 2 min 间隔起。考虑到车站的相关运作情况及设

计制定的便利性,本文以 10 min 间隔为最小时间段来制定。基于上述考虑,2 号线列车最早到站时间按 06:00、06:10、06:20、06:30 来设计制定,最迟离站时间按 23:10、23:20、23:30、23:40 来设计制定。各站列车最早到站时间和最迟离站时间统计归类分别如表 4、表 5 所示。

表 4 青岛地铁 2 号线各站的列车最早到站时间统计归类

最早到站时间	06:00—06:10	06:10—06:20	06:20—06:30	06:30—06:40
所含车站	李村公园站、李村站、枣山路站、华楼山路站	东韩站、辽阳东路站、同安路站、苗岭路站	石老人浴场站、海安路站、海川路站、海游路站、麦岛站、芝泉路站、五四广场站、浮山所站、燕儿岛路站	高雄路站

表 5 青岛地铁 2 号线各站的列车最迟离站时间统计归类

最迟离站时间	23:00—23:10	23:10—23:20	23:20—23:30	23:30—23:40
所含车站	高雄路站、燕儿岛路站、浮山所站、麦岛站、海游路站、海川路站	五四广场站、芝泉路站、海安路站、石老人浴场站、苗岭路站、同安路站	辽阳东路站、东韩站、华楼山路站、枣山路站	李村站、李村公园站

2.2 照明系统精细化运行时间表制定

通过查阅青岛市的日出日落时刻得出,2 号线东段所有车站所在区域的日出日落时刻相差不超过 1 min。此外通过观察得出,天气良好的情况下,天亮时刻比日出时刻通常早 25 min,天黑时刻比日落时刻通常晚 25 min;日出前 10 min 和日落后 10 min,天空亮度均可满足乘客进出站的亮度需求。同时为给站内人员提供巡查车站相关照明设备设施时间和运营前/后准备时间,需提前/延后约 30 min 开启/关闭车站照明。综合以上所有要求和条件,并结合各站列车最早到站时间和最迟离站时间统计归类表,精细化制定了照明系统运行时间表。其中冬天某个典型时间段的照明系统运行时间如表 6 所示。

由表 6 与表 2 相比较可知,车站照明关闭时间(即夜间停运模式时间)比之前延长 10 min、30 min、40 min、50 min、60 min、70 min 的车站分别有 2 个、2 个、2 个、4 个、5 个、1 个,合计总延长关闭时间为 730 min,相当于每天节省了一个车站三分之二的照明能耗。

2.3 通风空调系统精细化运行时间表制定

通风空调系统的运行时间与车站环境密切相关,需着重考虑车站的空气新鲜度和舒适度,下面就车站大系统和隧道通风系统运行时间表的精细

表 6 青岛地铁 2 号线冬天(1 月 1 日至 2 月 5 日)

某个典型时间段的照明系统精细化运行时间表

车站	运行时间	运行模式
李村公园站、李村站	05:30—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:55	Z2
	23:55—次日 05:30	Z3
枣山路站、华楼山路站	05:30—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:45	Z2
	23:45—次日 05:30	Z3
东韩站、辽阳东路站	05:50—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:45	Z2
	23:45—次日 05:50	Z3
同安路站、苗岭路站	05:50—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:35	Z2
	23:35—次日 05:50	Z3
五四广场站、芝泉路站、海安路站、石老人浴场站	06:00—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:35	Z2
	23:35—次日 06:00	Z3
海川路站、海游路站、麦岛站、浮山所站、燕儿岛路站	06:00—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:25	Z2
	23:25—次日 06:00	Z3
高雄路站	06:10—7:00	Z2
	7:00—17:00	Z1
	17:00—23:25	Z2
	23:25—次日 06:10	Z3

化制定进行分别介绍。

2.3.1 车站大系统

2.3.1.1 车站公共区一次换气时间计算

2 号线典型车站的大系统采用一次回风全空气系统,由空调新风机、组合式空调机组、回/排风机、排烟风机等设备以及相关的辅助设备组成。有关设备的相关参数为:组合式空调机组(AHU)A、B 端各 1 台,风机风量为 65 000 m³/h,功率为 22 kW;回/排风机(RAF-101、201)A、B 端各 1 台,风机风量为 48 000 m³/h,功率为 15 kW。

通过查阅设计资料得知,2 号线某车站站厅层公共区面积为 1 651 m²,站台层公共区面积为 1 205 m²;另一车站站厅层公共区面积为 1 592.4 m²,站台层公共区面积为 956 m²。为考虑通风余量,将每个站的站厅层公共区面积按 1 700 m² 计算,站台层公共区面积按 1 250 m² 计算。层高按装修高度计算,其中站厅层层高为 3.3 m,站台层层高为 3.0 m。据此计算车站公共区空间体积 $V_{\text{公共区}}=9\,360\text{ m}^3$,考虑到通风余量,将车站公共区空间按 9 500 m³ 计算。车站大系统正常运行时,送风量明显大于排风量,故按送风量计算

换气时间。车站大系统风机 50 Hz 频率运行时,按送风量 $Q_{\text{送}}$ 计算一次换气时间 $t=V_{\text{公共区}}/Q_{\text{送}}=263.1\text{ s}$,约 4.4 min;车站大系统风机 30 Hz 频率运行时,则 $t=438.5\text{ s}$,约 7.3 min。因此,风机按 50 Hz 频率运行时,车站公共区换一次新风大约需 5 min,若计算风道存风量,车站公共区换一次新风大约需 6 min;风机按 30 Hz 频率运行时,车站公共区换一次新风大约需 8 min,若计算风道存风量,车站公共区换一次新风大约需 9 min。

2.3.1.2 车站大系统精细化运行时间表

在过渡季阶段,应保证刚开始运营时能完成一次换气,因此大系统须在首班车到站前 10 min 开启通风,运营结束后停止通风即可;在空调季阶段,7:00 左右人流量开始进入高峰期,根据青岛气候特点,6:30 之前保持正常通风、6:30 之后开启冷水机组即可^[5],运营结束时提前 10 min 关停冷水机组即可;在冬季阶段,可以采取间歇性通风的方式,所有车站在早晚高峰时段及中午时段(7:00–9:00、12:00–15:00、17:00–19:00)运行通风模式,其余时间运行停运模式。据此制定的大系统精细化运行时间如表 7 所示。

表 7 青岛地铁 2 号线车站大系统精细化运行时间表

车站	空调季		过渡季	
	运行时间	运行模式	运行时间	运行模式
李村公园站、李村站	05:50—23:40	F3	05:50—23:40	F1
	23:40—次日 05:50	F2	23:40—次日 05:50	F2
枣山路站、华楼山路站	05:50—23:30	F3	05:50—23:30	F1
	23:30—次日 05:50	F2	23:30—次日 05:50	F2
东韩站、辽阳东路站	06:00—23:30	F3	06:00—23:30	F1
	23:30—次日 06:00	F2	23:30—次日 06:00	F2
同安路站、苗岭路站	06:00—23:20	F3	06:00—23:20	F1
	23:20—次日 06:00	F2	23:20—次日 06:00	F2
五四广场站、芝泉路站、海安路站、石老人浴场站	06:10—23:20	F3	06:10—23:20	F1
	23:20—次日 06:10	F2	23:20—次日 06:10	F2
海川路站、海游路站、麦岛站、浮山所站、燕儿岛路站	06:10—23:10	F3	06:10—23:10	F1
	23:10—次日 06:10	F2	23:10—次日 06:10	F2
高雄路站	06:20—23:10	F3	06:20—23:10	F1
	23:10—次日 06:20	F2	23:10—次日 06:20	F2

由表 7 与表 1 相比较可知,车站大系统停运时间比之前延长 10 min、20 min、30 min、40 min 的车站分别有 2 个、4 个、5 个、1 个,缩短 10 min、20 min

的车站分别各有 2 个,合计总延长停运时间为 230 min,相当于每天节省了 1 个车站四分之一的大系统运行能耗。

2.3.2 隧道通风系统

2.3.2.1 区间隧道一次换气时间计算

2 号线区间隧道通风系统由隧道风机、轨道排风机、射流风机等设备以及相关的辅助设备组成。其中,轨道排风机、射流风机不参与早晚隧道通风,不纳入计算范围。隧道风机的相关参数为:隧道风机(TVF)A、B 端各 2 台,风机风量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$,功率为 90 kW ,可正反转变频运行。

通过查阅设计资料得知,某区间 1、区间 2、区间 3、区间 4 分别为马蹄形隧道、圆形隧道、马蹄形隧道、马蹄形隧道,半径分别为 2.6 m 、 2.7 m 、 2.6 m 、 2.6 m ,区间长度分别为 610 m 、 915 m 、 760 m 、 850 m 。为计算方便,区间隧道横截面积统一按圆形计算。利用上述参数进行计算,圆形区间隧道横截面积为 21.24 m^2 ,马蹄形区间隧道横截面积为 22.90 m^2 ,为考虑通风余量,将区间隧道横截面积近似取值为 23 m^2 。按较长区间计算区间隧道空间,选取区间 2 以及区间 2 至区间 4(连续 3 个区间)进行计算,计算结果为:区间 2 隧道空间体积 $V_{\text{区间}2} = 21\,045 \text{ m}^3$;区间 2 至区间 4 隧道空间体积 $V_{\text{区间}2\sim4} = 61\,433 \text{ m}^3$ 。当每个车站 4 台隧道风机正常开启时,区间风量 $Q_{\text{隧}}$ 基本在 $57 \sim 59 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间;关闭连续 2 个车站所有隧道风机时,此区间风量 $Q_{\text{隧}1}$ 基本在 $50 \sim 55 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间^[5],取最小区间风量值对上述区间的一次换气时间进行计算,结果为:区间一次换气时间 $t_{\text{区间}2} = V_{\text{区间}2}/Q_{\text{隧}} \approx 369.2 \text{ s}$,约 6.2 min ;区间 2 至区间 4 一次换气时间 $t_{\text{区间}2\sim4} = V_{\text{区间}2\sim4}/Q_{\text{隧}1} =$

$1\,228.66 \text{ s}$,约 20.5 min 。由上述计算结果可知,单个区间一次换气可在 7 min 内完成,长区间(连续 3 个区间)一次换气时间可在 25 min 内完成。

2.3.2.2 隧道通风系统精细化运行时间表

GB 50157—2013《地铁设计规范》对区间隧道早晚通风情况并未做具体要求,只明确区间隧道内二氧化碳的日平均浓度应小于 1.5% ,区间隧道内的温度应在 $5 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。通过查阅相关文献,对隧道通风系统早晚通风的主要作用总结如下:利用室外空气对地铁隧道进行预冷却和通风,排除隧道内的余热和相关污染物;同时还可以检查隧道风机、风阀等设备的运行状况,确保区间发生火灾、阻塞事故时能及时投用^[6]。结合 2 号线区间隧道内环境参数可得出,在地铁运营初期隧道通风换气一次即可满足上述要求。

区间隧道早晚通风的常规做法是,每个站均开启所有隧道风机,相邻车站分别采取送风、排风模式间隔运行,形成推挽式的区间隧道通风,如图 1 所示。若考虑节能或减少噪声等因素,还可采取隔站开启隧道风机的模式,如图 2 所示^[6-7]。其缺点是若一个区间有环境问题则可能影响到相邻区间。隔站开启模式下,运行与停机的相关各站应在相同间隔时间里依次轮流更换状态模式,保证各站在每个周期(通常为一个月)内均开机运行过。此外可根据环网供电分区将车站划分为不同的大组,每个大组里相邻的两个车站为一小组,各个小组依次间隔 $30 \sim 60 \text{ s}$ 开启隧道风机,以减少启动时的线损。

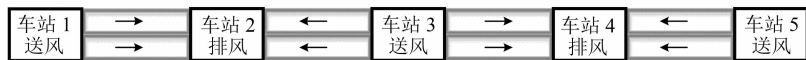


图 1 地铁隧道早晚通风各站隧道风机均开启的通风模式

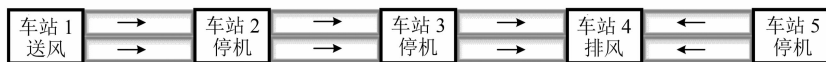


图 2 地铁隧道早晚通风隧道风机隔站开启的通风模式

考虑到青岛市靠近海边,整体湿度较大,地铁隧道通风时间越长,越会加重地铁隧道相关设备的腐蚀程度,因此应尽量缩短地铁隧道通风时间(或取消夜间地铁隧道通风,只保留运营前地铁隧道通风)。此外,考虑到夏天通风时间长会使地铁隧道内温度上升,冬天通风时间长则可能会使地铁隧道内温度过低,因此在夏冬季节也应适当缩短地铁隧道通风时间。据此制定的精细化隧道通风时间表

如表 8 所示。

由表 8 与表 1 相比较可知,隧道通风系统运行时间进行优化调整后,每天可节省一半以上的隧道通风系统运行能耗,节能效果显著。

3 运行时间表优化前后能耗对比分析

以过渡季典型日为例,青岛地铁 2 号线原时间表与精细化时间表下的总运营能耗,以及牵引、动

力及照明、线损、其他三方面的能耗及占比如表 9 所示。由表 9 可知,每天全线在动力及照明方面可节约能耗约 4 000 kWh。实践证明,运营初期的精细

化时间表运行效果良好,节能效果明显。此外,对地铁运营远期时的机电设备运行时间表还需做持续的深入研究。

表 8 青岛地铁 2 号线隧道通风系统精细化运行时间表

运行季	各站均开启隧道风机		隔两站开启隧道风机	
	运行时间	运行模式	运行时间	运行模式
空调季	04:30—04:40	F1	04:30—04:55	F1(运行站模式)
	06:00—23:50	F4	06:00—23:50	F4(每站运行模式)
	00:00—00:10	F1	00:00—00:25	F1(运行站模式)
	其余时间	F2	其余时间	F2
过渡季	04:30—04:40	F1	04:30—05:00	F1(运行站模式)
	04:40—00:00	F4	05:00—00:00	F4(每站运行模式)
	00:00—00:10	F1	00:00—00:30	F1(运行站模式)
	其余时间	F2	其余时间	F2
冬季	04:30—04:40	F1	04:30—04:55	F1(运行站模式)
	04:40—00:00	F4	04:55—00:00	F4(每站运行模式)
	00:00—00:10	F1	00:00—00:25	F1(运行站模式)
	其余时间	F2	其余时间	F2

表 9 青岛地铁 2 号线原时间表与精细化时间表下的单日能耗对比表

运行时间表(过渡季)	总运营能耗/kWh	牵引能耗		动力及照明能耗		线损及其他能耗	
		能耗/kWh	占比/%	能耗/kWh	占比/%	能耗/kWh	占比/%
原时间表	183 944	74 869	40.70	108 590	59.03	485	0.26
精细化时间表	180 056	75 160	41.74	103 968	57.74	928	0.52

4 结语

机电设备运行时间表是自动控制技术在地铁相关系统控制中的重要体现,其可替代车站人员每天的重复开关操作。制定合理、科学、精细的运行时间表,不仅有利于地铁相关机电设备系统的合理运行,还可达到良好的节能效果。本文根据青岛地铁 2 号线的相关设备参数、车站和隧道空间参数、运营首末班车时间等,并结合当地环境条件和一次通风时间等计算结果,在满足运营要求的条件下,制定了精细化、节能化的照明系统、通风空调系统运行时间表。该时间表既可满足各站的运营需求,又可避免不必要的电能浪费,有效降低全线的照明用电、动力用电等。

参考文献

[1] 朱培根,张宏,何志康,等. 地铁环控节能策略研究[J]. 制冷与空调,2010(5): 80.

[2] 江伟,齐群,赵泉发,等. 地铁环控系统整体节能控制策略研究[J]. 城市轨道交通研究,2014(5): 77.

[3] 穆广友,李晓龙,尹力明,等. 地铁车站照明系统能耗分析及节能对策[J]. 城市轨道交通研究,2010(8): 35.

[4] 宋吉鹏,孙涛. 浅谈地铁通风空调系统运行时间表制定[J]. 科技经济导刊,2017(5): 49.

[5] 李俊. 基于现场实测的地铁车站空调负荷计算方法研究[D]. 北京:清华大学,2009.

[6] 张鹏. 地铁隧道通风系统的节能运行优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.

[7] 王静伟,罗辉,罗燕萍. 地铁隧道早晚通风模式优化研究[J]. 都市快轨交通,2015(2): 38.

(收稿日期:2019-12-27)