

文章编号:1671-1637(2014)04-0089-09

# 城市轨道交通全寿命周期能耗计算方法

陈进杰<sup>1,2</sup>,高桂凤<sup>1,2</sup>,王兴举<sup>1,2</sup>,王祥琴<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院,河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 河北省交通安全与控制重点实验室,河北 石家庄 050043)

**摘要:**基于全寿命周期理论和城市轨道交通系统的特点,提出了城市轨道交通全寿命周期能耗概念,将全寿命周期划分为规划设计阶段、运营装备及建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段和报废拆除及处置5个阶段,建立了5个阶段的能耗数学模型,并对北方某大城市轨道交通5号线进行定量分析,计算其全寿命周期总能耗与各个阶段能耗。计算结果表明:在全寿命周期中,上述5个阶段的能耗比重依次为0.004%、24.391%、3.884%、68.613%和3.108%,运营维护阶段能耗最大,是全寿命周期能耗控制重点,运营装备及建材生产阶段能耗次之,绿色节能材料的使用对降低能耗具有重要作用。

**关键词:**城市轨道交通;全寿命周期;能耗分析;数学模型;清单分析

**中图分类号:**U491.227 **文献标志码:**A

## Calculation method of whole life-cycle energy consumption for urban rail transit

CHEN Jin-jie<sup>1,2</sup>, GAO Gui-feng<sup>1,2</sup>, WANG Xing-ju<sup>1,2</sup>, WANG Xiang-qin<sup>1,2</sup>

(1. School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Traffic Safety and Control of Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China)

**Abstract:** Based on the whole life-cycle theory and the characteristics of urban rail transit, the concept of whole life-cycle energy consumption was proposed, and the whole life-cycle of urban rail transit was divided into five stages, including plan and design stage, equipment and material production stage, construction stage, operation and maintenance stage, demolition and disposition stage. The mathematical models of energy consumption for 5 stages were set up, the energy consumption of No. 5 rail transit line in a northern big city of China was quantitatively analyzed by using the mathematical models, and the total energy consumption of whole life-cycle and the energy consumption in every stage were calculated. Calculation result shows that the energy consumption proportions at the five stages are 0.004%, 24.391%, 3.884%, 68.613% and 3.108% successively during whole life-cycle. The energy consumption of operation and maintenance stage is biggest, so the operation and maintenance stage is the key point of energy consumption control. The energy consumption of equipment and material production stage is the second biggest, the use of green energy saving materials can play an important role in reducing energy consumption. 7 tabs, 1 fig, 23 refs.

**Key words:** urban rail transit; whole life-cycle; energy consumption analysis; mathematical

收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51008201);河北省自然科学基金项目(E2014210152);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2014084)

作者简介:陈进杰(1963-),男,河北宁晋人,石家庄铁道大学教授,工学博士,从事城市轨道交通规划与管理研究。

model; inventory analysis

**Author resume:** CHEN Jin-jie(1963-), male, professor, PhD, +86-311-87939558, cjjwxq@126.com.

## 0 引 言

截至 2013 年 12 月 31 日,中国北京、上海、广州等 19 个城市共拥有 87 条城市轨道交通运营线路,总长 2 539 km。目前,中国大陆已批准建设轨道交通的城市有 36 个,到 2020 年,中国轨道交通里程将达到近 6 000 km,中国已成为世界上城市轨道交通发展速度最快的国家。

城市轨道交通系统在规划设计、运营装备及建材生产、施工建设、运营维护以及报废拆除及处置等过程都消耗了大量资源和能源<sup>[1]</sup>,分析城市轨道交通能耗是一项迫在眉睫的工作,运用全生命周期理论研究城市轨道交通能耗,对城市轨道交通节能减排工作具有重要意义。

目前,城市轨道交通能耗研究较多的是对其运营维护阶段的用电等能耗研究,而对其全生命周期其他阶段的能耗研究很少。事实上,城市轨道交通生命周期的每一个阶段,从规划设计、运营装备及建材生产、施工建设、运营维护至报废拆除及处置的过程中,都在不断地消耗能源<sup>[2]</sup>,因此,对城市轨道交通的能耗分析只考虑运营维护阶段的能耗是不全面的,还应当系统地考虑整个生命周期内其他阶段能耗。

20 世纪 90 年代初,西方一些学者在建筑能耗研究中引入生命周期思想,对建筑整个生命周期的能量消耗状况进行研究,建立了建筑生命周期能耗评估模型。Adalbert 等对北欧地区普通建筑能耗的研究表明,在建筑物 50 年的寿命中,材料消耗的能量占建筑物全生命周期总能耗的 10%~15%<sup>[2-3]</sup>;冯建学对建筑全生命周期各阶段能耗进行了分析,认为建筑能耗分为建筑过程能耗和建筑使用能耗,要降低建筑使用过程中的能耗就要大力推广节能建筑<sup>[4]</sup>;朱熾等研究认为建材开采生产与建筑施工两阶段能耗与各种环境排放在全生命周期能耗与排放中的比例最高达到 80%,节能减排潜力显著<sup>[5-6]</sup>;张燕燕建立了城市轨道交通系统牵引及车站能耗计算模型,用上海地铁线路运营的实际数据验证了城市轨道交通车载能耗的数学模型的可行性<sup>[7]</sup>;杨臻明等分析了城市轨道交通能耗结构,建立了城市轨道交通系统的能耗预测回归模型<sup>[8]</sup>;穆广友等通过理论分析和现场测试,对地铁车站的能耗分布和照明

系统进行了研究,为地铁车站照明设计和节能管理提供参考依据<sup>[9]</sup>;王玉明等研究了城市轨道交通能耗构成与影响因素的关联度,对城市轨道交通系统能耗影响因素进行了量化分析<sup>[10-11]</sup>。

国内外对于城市轨道交通全生命周期能耗的研究较少,主要原因是城市轨道交通是一个比较复杂的系统,要对其全生命周期进行系统分析,需要借助众多统计数据,数据量庞大而且获取困难,研究内容复杂;城市轨道交通能耗从规划设计、运营装备原材料加工、施工建设、运营维护、报废拆除及处置等整个生命周期阶段因地域性等差异性较大,能耗模型建立困难。

本文将全生命周期理论运用于城市轨道交通系统,对规划设计、运营装备及建材生产、施工建设、运营维护和报废拆除及处置 5 个阶段的能耗进行研究,有助于掌握中国城市轨道交通能耗水平、施工及运营用能状况,以期从更全面、更系统的层面分析不同生命周期阶段的能耗状况。

## 1 城市轨道交通全生命周期能耗的组成

### 1.1 城市轨道交通全生命周期阶段划分

城市轨道交通全生命周期是指城市轨道交通项目从规划设计、运营装备及建材生产、施工建设、运营维护和报废拆除及处置等整个过程。

为了便于分析城市轨道交通整个生命周期能耗,本文把整个生命周期划分为 5 个阶段,即城市轨道交通规划设计阶段、运营装备及建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段、报废拆除及处置阶段。

### 1.2 城市轨道交通全生命周期能耗

城市轨道交通全生命周期能耗是指其全生命周期内各阶段能源消耗总和,即城市轨道交通规划设计阶段、运营装备及建材生产阶段、施工建设阶段、运营维护阶段、报废拆除及处置阶段能耗总和,城市轨道交通全生命周期各阶段的能源消耗情况见表 1。

## 2 城市轨道交通全生命周期能耗模型

### 2.1 基本计算假定

城市轨道交通系统运营装备设备主要包括车辆、环控设备、自动扶梯、通信信号等,消耗的建筑材料如钢材、水泥、木材等可达数百种,在对城市轨道

表1 能源消耗情况

Tab.1 Energy consumption condition

寿命周期阶段	规划设计阶段	运营装备及建材生产阶段	施工建设阶段	运营维护阶段	报废拆除及处置阶段
能源消耗情况	前期规划、可行性研究、总体设计、勘察、初步设计及施工图设计等所需能耗	各种设备装备、建筑材料在生产、制造、加工过程中所消耗的能源	施工建设、安装调试及试运营过程中所需的能耗	轨道交通运营期间消耗的牵引、动力照明、通信、信号、维护材料等的能耗	轨道交通建筑物、构筑物、设备装备等报废拆除、废弃建筑垃圾处置及回收过程的能耗

交通寿命周期能耗进行计算时,需要收集大量数据,如各种建材生产的单位能耗、各种运输方式的单位能耗等<sup>[12]</sup>,本文只考虑主要的装备设备和主要建筑材料在生产、运输、安装、拆除等过程中的能耗。

## 2.2 城市轨道交通全寿命周期能耗模型

根据表1,城市轨道交通全寿命周期能耗模型为

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (1)$$

式中: $E_1$ 为城市轨道交通全寿命周期能耗(MJ); $E_2$ 为城市轨道交通规划设计阶段能耗(MJ); $E_3$ 为城市轨道交通运营装备及建材生产阶段能耗(MJ); $E_4$ 为城市轨道交通施工建设阶段能耗(MJ); $E_5$ 为城市轨道交通运营维护阶段能耗(MJ); $E_6$ 为城市轨道交通报废拆除及处置阶段能耗(MJ)。

## 3 城市轨道交通全寿命周期分阶段能耗模型

### 3.1 规划设计阶段能耗模型

城市轨道交通规划设计阶段需要完成项目前期规划、可行性研究、总体设计、勘察、初步设计及施工图设计等工作,其能耗主要包括勘察作业、办公能耗及交通能耗等,即

$$E_2 = E_7 + E_8 \quad (2)$$

式中: $E_7$ 为规划设计阶段勘察过程能耗(MJ); $E_8$ 为规划设计阶段办公及交通能耗(MJ)。

根据《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012),城市轨道交通岩土工程勘察分为可行性研究勘察、初步勘察和详细勘察,主要是查明场地范围内岩土层的类型、年代、成因、分布范围、工程特性,评价地基稳定性、均匀性和承载能力,为此需要进行勘探孔、静力触探、静三轴剪切试验、动三轴及共振柱试验、标贯试验、扁铲侧胀试验、十字板试验等。根据上述规范规定的勘察试验量,可计算出勘察设备的耗油量或耗电量。

办公能耗主要为办公区照明、空调设备以及其他耗能,并且需要考虑一定移动设备所消耗的能量。根据城市轨道交通勘察设计的相关规定,可计算出线路勘察设计定员状况,从而计算出办公区面积、耗电量及交通能耗等。

### 3.2 运营装备及建材生产阶段能耗模型

城市轨道交通运营装备及建材生产阶段的能耗计算式为

$$E_3 = E_9 + E_{10} \quad (3)$$

式中: $E_9$ 为城市轨道交通施工建设期间所使用的运营装备及建材生产的能耗(MJ); $E_{10}$ 为城市轨道交通更新改造过程中所使用的运营装备及建材生产能耗(MJ)。

#### 3.2.1 城市轨道交通施工建设期间所使用的运营装备及建材生产的能耗

施工建设期间所使用的运营装备及建材生产的能耗计算式为<sup>[13-16]</sup>

$$E_9 = \sum_i m_i U_i (1 + w_i / 100) \quad (4)$$

式中: $m_i$ 为城市轨道交通施工建设所使用运营装备及建筑材料*i*的消耗量; $w_i$ 为运营装备及建筑材料*i*在施工过程中的施工损耗(%); $U_i$ 为生产单位质量或单位体积的运营装备及建筑材料*i*的能耗(内含能量,包括原材料开采过程的间接能耗)。

#### 3.2.2 城市轨道交通更新改造过程中所使用的运营装备及建材生产能耗

通过城市轨道交通系统的使用寿命与各种运营装备及建筑材料的使用寿命的比值可计算出城市轨道交通更新改造过程中所使用的运营装备及建材生产能耗,计算式为

$$E_{10} = \sum_i m_i U_i (1 + w_i / 100) \left[ \frac{T}{T_i} - 1 \right] \quad (5)$$

式中: $T$ 为城市轨道交通系统使用寿命(年); $T_i$ 为更新改造过程所使用运营装备及建筑材料*i*的使用寿命(年); $\left[ \frac{T}{T_i} - 1 \right]$ 的运算结果取整数,表示在运营维护阶段因更新改造再次使用运营装备及建筑材料*i*的次数。

《城市轨道交通工程项目建设标准》(建标104—2008)规定的运营装备寿命周期见表2。

### 3.3 施工建设阶段能耗模型

城市轨道交通的施工建设阶段能耗主要由2部分组成,建筑材料由产地运输到施工现场的运输能耗,建筑物、构筑物施工过程及更新改造过程中的机

表 2 运营装备的寿命周期  
Tab. 2 Life-cycles of operating equipments

序号	工程名称	寿命周期/年
1	隧道	100
2	高架桥	50
3	房屋	35
4	车辆	30
5	轨道	25
6	供电与给排水设备	25
7	通风设备与自动扶梯	20
8	车辆基地的维修设备	18
9	通信、信号、环境监控、电力监控、防灾与报警等控制系统设备	15
10	自动售检票系统设备	10

械设备能耗,即

$$E_4 = E_{11} + E_{12} + E_{13} + E_{14} \quad (6)$$

式中: $E_{11}$ 为施工建设建筑材料从产地运输到施工现场的运输能耗(MJ); $E_{12}$ 为更新改造建筑材料从产地运输到施工现场的运输能耗(MJ); $E_{13}$ 为施工建设过程中的机械设备能耗(MJ); $E_{14}$ 为更新改造过程中的机械设备能耗(MJ)。

3.3.1 建筑材料从产地运输到施工现场的运输能耗

运输能耗与运输方式、运输距离、运输次数、运输能耗强度等因素有关,施工建设阶段建筑材料的运输能耗可以表示为

$$E_{11} = \sum_i m_i n_i d_i W_j (1 + w_i / 100) \quad (7)$$

式中: $d_i$ 为运营装备及建筑材料*i*从产地到施工现场的平均运输距离; $n_i$ 为运营装备及建筑材料*i*的运输次数; $W_j$ 为运输方式*j*的运输能耗强度(见表3)。

表 3 不同运输方式的单位能耗

Tab. 3 Unit energy consumptions of different transportation methods

序号	运输方式	能耗/[kJ · (t · km) <sup>-1</sup> ]
1	铁路	361.9
2	公路(汽油)	3 622.0
3	公路(柴油)	2 423.0
4	水路	468.0

建筑物构筑物更新改造所使用建筑材料的运输能耗的计算式为

$$E_{12} = \sum_i m_i n_i d_i W_j (1 + w_i / 100) \left[ \frac{T}{T_i} - 1 \right] \quad (8)$$

3.3.2 建筑物、构筑物新建及更新改造施工过程中的能耗

城市轨道交通建筑物、构筑物施工建设及更新改造过程中的能耗主要来自各种机械设备的运行,

其能耗与设备规格型号、运行的动力能源及时间等因素有关。

参照 2001 年的文件《全国统一施工机械台班费用定额》,工程项目所使用机械主要包括土石方及筑路机械、打桩机械、起重机械、水平运输机械、垂直运输机械、混凝土及砂浆机械、加工机械、泵类机械、焊接机械、动力机械、地下工程机械、其他机械共 12 种。施工过程的电力或油耗为

$$E_{13} = \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^b Q_j O_{ij} P_i \quad (9)$$

式中: $Q_j$ 为应用施工方法*J*的施工工程数量; $O_{ij}$ 为应用施工方法*J*与使用设备*I*的台班定额; $P_i$ 为设备*I*的台班能耗。

建筑更新改造所施工过程能耗  $E_{14}$  的计算式与  $E_{13}$  相似。

3.4 运营维护阶段能耗模型

城市轨道交通运营维护阶段能耗结构<sup>[7,17-25]</sup>见图 1。城市轨道交通运营维护阶段每年的能耗与城市轨道交通敷设方式、客运量大小、季节因素、车辆类型、环控系统类型等密切相关。由于城市轨道交通客运量是逐年增长的,因此,运营维护阶段第*t*年的年能耗也是逐年增长的,而并非常数。城市轨道交通运营维护阶段的总能耗为全寿命周期内各年度能耗之和。

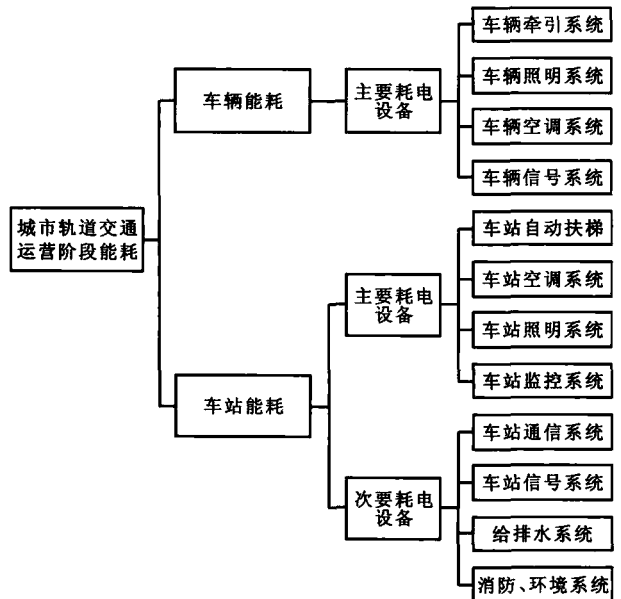


图 1 能耗结构

Fig. 1 Energy consumption structure

3.4.1 车辆能耗

根据对北方大城市轨道交通能耗数据统计,采用逐步回归分析方法,北方大城市轨道交通系统车

辆能耗数学模型为

$$q_1(t) = 1.2 \times 10^5 [-1\ 081.048\ 9 + 0.006\ 1X_1(t) + 0.038\ 5X_2(t) + 1.180\ 3X_3(t) + 124.742\ 5X_4(t) + 8.105\ 6X_5(t)] \quad (10)$$

式中:  $q_1(t)$  为第  $t$  年的车辆能耗 ( $10^4$  kW·h);  $X_1(t)$  为第  $t$  年的月平均客运量 (万人次);  $X_2(t)$  为第  $t$  年的月平均开行列车数;  $X_3(t)$  为第  $t$  年的列车自重 ( $t$ );  $X_4(t)$  为第  $t$  年上下行坡度大于 1% 的坡长的累计值 (km);  $X_5(t)$  为第  $t$  年的直线段里程 (km)。

### 3.4.2 车站能耗

(1) 自动扶梯能耗。自动扶梯运行功率只受满载率和运行速度的影响,通过分析自动扶梯上行时运行功率与运行速度和满载率的关系<sup>[7]</sup>,则有

$$Y = -1.488\ 3 + 6.9X_6(t, h) + 6.325\ 7X_7(t, h) \quad (11)$$

$$q_2(t) = 365r \int_0^{18} [-1.488\ 3 + 6.9X_6(t, h) + 6.325\ 7X_7(t, h)] dh \quad (12)$$

式中:  $Y$  为自动扶梯的运行功率 (kW);  $q_2(t)$  为自动扶梯第  $t$  年的耗电量 (kW·h);  $r$  为车站自动扶梯的数量;  $X_6(t, h)$  为第  $t$  年自动扶梯与运行时间  $h$  相关的运行速度 ( $m \cdot s^{-1}$ );  $X_7(t, h)$  为第  $t$  年自动扶梯与运行时间  $h$  相关的满载率 (%)。

(2) 通风空调系统能耗。通风空调系统的耗电量计算方法是在建立车站晚高峰小时热负荷和公共区面积的线性方程后,根据解决热负荷需要的风机和空调设备的功率系数,乘以热负荷和设备运行时间来得出耗电量。通风空调系统每天工作 18 h,则有

$$q_3(t) = \frac{365 \times 18 \times 1.7}{4} (-1\ 181.935 + 0.516\ 3X_8) \quad (13)$$

式中:  $q_3(t)$  为空调系统第  $t$  年的耗电量 (kW·h);  $X_8$  为车站面积 ( $m^2$ )。

(3) 地下车站照明系统耗电量。通过对上海地铁、北京地铁车站照明耗电量统计分析并依据照明功率密度和照度的要求计算车站公共区照明的耗电量,得出地下车站照明系统第  $t$  年的耗电量  $q_4(t)$  介于  $\frac{365 \times 500 X_8}{1\ 000}$  与  $\frac{365 \times 540 X_8}{1\ 000}$  之间。

(4) 车站监控、车站通信信号、给排水及其他消防环境系统能耗。车站监控、车站通信信号、给排水及其他消防环境系统能耗很小,全国多个城市轨道交通能耗统计研究表明,在车站能耗中,通风空调、电扶梯及照明系统能耗占总能耗的 49% 左右,车站监控、车站通信信号、给排水及其他消防环境系统占

6% 左右。故根据通风空调、电扶梯及照明系统能耗可以按统计比例计算出车站监控等能耗,即

$$q_5(t) = \frac{6}{49} [q_2(t) + q_3(t) + q_4(t)] \quad (14)$$

式中:  $q_5(t)$  为车站监控第  $t$  年的耗电量 (kW·h)。

(5) 车站能耗。根据以上分析,屏蔽门系统车站年能耗

$$q_6(t) = q_2(t) + q_3(t) + q_4(t) + q_5(t) \quad (15)$$

式中:  $q_6(t)$  为屏蔽门系统车站第  $t$  年耗电量 (kW·h)。

根据国家能源统计报表制度中的数据,每发 1 kW·h 的电约需 345 g 标准煤,标准煤的热值为 29.3 MJ·kg<sup>-1</sup>,则有

$$E_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^5 0.345 \times 29.3 q_k(t) \quad (16)$$

式中:  $q_k(t)$  为  $k$  系统运营维护阶段第  $t$  年的耗电量 (kW·h)。

### 3.5 报废拆除及处置阶段能耗模型

城市轨道交通系统在其寿命终期拆除会产生大量建筑垃圾,需要将这些垃圾回运到垃圾掩埋处或回收厂进行循环再利用,故此阶段的能耗包括报废拆除过程能耗和废旧装备、建材处置的能耗。计算模型为

$$E_6 = E_{15} + E_{16} \quad (17)$$

式中:  $E_{15}$  为报废拆除过程能耗 (MJ);  $E_{16}$  为废旧装备、建材处置能耗 (MJ)。

#### 3.5.1 报废拆除过程能耗

与施工建设阶段类似,以机械拆除方式为主的城市轨道交通建筑物、构筑物拆除其能耗主要体现在拆除机械设备的运行上,如挖掘机、液压锤等机械设备,这些设备的动力能源主要是柴油、汽油和电力,报废拆除阶段的能耗为

$$E_{15} = E_{13} \quad (18)$$

#### 3.5.2 处置能耗

城市轨道交通建筑物、构筑物、设备装备等废弃物分为可回收和不可回收 2 类。可回收物包括设备装备、钢轨、钢筋、玻璃、木材等;不可回收物包括废砖瓦、混凝土块等。不可回收物的处置能耗只是将其从建筑地点运往处置地点的运输能耗;可回收物的处置能耗包括从建筑地点运往处置地点的运输能耗和回收能耗,在计算废旧装备和建材回收能耗时,需要考虑蕴含的内涵能量即回收能源效益。

运输能耗包括不可回收垃圾的运输能耗和回收废旧装备、建材的运输能耗,计算方法与施工建设阶段运输能耗的计算方法相同。

废旧装备、建材处置能耗为

$$E_{16} = E_{17} - E_{18} \quad (19)$$

$$E_{17} = E_{11} \quad (20)$$

$$E_{18} = \sum_i m_i U_i R_i \left[ \frac{T}{T_i} \right] \quad (21)$$

式中:  $E_{17}$  为不可回收物及回收物运至处理场的运输能耗;  $E_{18}$  为扣除再循环、再利用等过程所涉及的运输及加工处理的能耗后, 所有回用材料的能源效益;  $R_i$  为废旧装备、建筑材料  $i$  的回收利用率。

按照式(2)将上述各阶段的寿命周期能耗相加, 便可得城市轨道交通全寿命周期能耗。

## 4 工程实例分析

### 4.1 工程概况与主要工程数量

北方某大城市城市轨道交通 5 号线线路全长 27.6 km, 2007 年 10 月投入运营。线路共设 23 个车站, 其中地下车站 16 个, 地面及高架车站 7 个, 10 个换乘站。地下线长 16.9 km, 地面及高架线长 10.7 km, 地下线路埋深一般为 9~23 m。

车站采用屏蔽门系统, 全线设扶梯 154 部, 水平自动的人行步道 4 个, 残疾人垂直电梯 35 部, 残疾人升降平台 28 个。车站公共区面积在 2 855~7 550 m<sup>2</sup> 之间。全线设车辆段一个, 停车场一个, 控制中心一个及其他附属设施, 车站、车辆段总建筑面积为 423 846.5 m<sup>2</sup>。全线共设牵引降压混合变电所 19 座(含车场 3 座), 设 46 座降压变电所。

列车自重 204 t, 采用 B 型地铁列车 6 辆编组, 选用变频变压车辆, 车辆宽 2.8 m, 采用耐候钢车体。信号采用列车自动控制系统, 即 ATC 系统。

区间隧道 5 个区间采用盾构法施工, 当埋深较浅或有特殊要求时, 则采用明挖法施工, 其他区间采用矿山法; 地下车站施工采用了明挖法、盖挖法、暗挖法等施工方法。高架区间及桥梁式车站一般现场浇筑墩台, 预制装配梁, 仅在有特殊要求的地段采用全现浇施工; 框架式车站均采用现浇施工。主要工程数量见表 4, 主要材料消耗见表 5, 地铁 5 号线开通运营以来历年运量与远期运量预测见表 6。

### 4.2 全寿命周期能耗计算结果分析

根据本文建立的全寿命周期能耗数学模型, 结合某北方大城市地铁 5 号线的基础数据, 可得到全寿命周期内各阶段能耗, 见表 7, 从中可以看出, 城市轨道交通全寿命周期能耗主要来源是运营维护阶段, 占 68.613%, 其次是运营装备及建材生产阶段, 占 24.391%, 二者之和达 93.004%。

## 5 结 语

本文将全寿命周期理论运用于城市轨道交通系统, 以全寿命周期能耗概念为基础, 对城市轨道交通的全寿命周期能耗进行了全面的分析, 分别从城市轨道交通规划设计、运营装备及建材生产、施工建设、运营维护以及报废拆除处置等 5 个阶段建立了能耗数学模型。本文提出的计算方法, 可以定量计算城市轨道交通系统全寿命周期能耗。

为了验证模型的适用性、有效性和准确性, 本文选取了北方某大城市地铁 5 号线进行实证分析, 结果表明运营维护阶段是能耗最大的阶段, 节能潜力巨大, 应重点研究线路节能坡设计、屏蔽门系统、车站照明、车辆节能及车站敷设方式等。在原材料使用时考虑使用绿色节能材料对于减少运营装备及建材生产阶段能耗有重大的意义。施工建设阶段考虑采用节能的施工方案, 报废拆除及处置阶段的能耗更多地依赖于建材的选择、拆除施工方案选择和回收利用。

规划设计阶段虽然是能耗最少的阶段, 但是由于其规划设计方案是项目后期材料机械使用、运营模式选择的依据, 因此, 规划设计阶段工作对整个全寿命周期能耗的影响是巨大的。

城市轨道交通全寿命周期能耗分析是一项复杂的系统工程, 今后需要做好如下 2 项工作, 一是城市轨道交通全寿命周期能耗边界划定, 建立中国不同区域、不同时期能耗因子数据库。进行全寿命周期各阶段能耗构成内容界定、辨识, 分析不同区域能耗因子、运输因子的差异, 收集城市轨道交通全寿命周期能耗基础数据, 并进行基础数据分析与演算。城市轨道交通全寿命周期能耗分析涉及到的运营装备、建筑材料种类繁多, 数量大, 全国不同区域不同时期各种运营装备建筑材料单位能耗(因子)不同, 能耗环节复杂, 分析城市轨道交通全寿命周期能耗需要巨大的基础统计数据, 是一项复杂的系统工程, 为此下一步需要建立一套适用于中国不同区域的完善的运营装备、建筑材料单位能耗基础数据库。二是城市轨道交通全寿命周期各阶段工程量清单分析。城市轨道全寿命周期长达数十年, 各阶段能耗与其工程量有关。为此需要收集中国城市轨道交通线路工程数量、线路长度、线路敷设方式、施工方法、工程材料用量、客流量及增长规律、开行列车数、车站类型及面积、车辆类型、供电方式、电梯使用情况、照明、通信信号系统、环控方式、运营耗电量等基础

表4 主要工程数量  
Tab.4 Main project quantities

项目名称		工程数量	项目名称		工程数量
暗挖区间主体	暗挖土石方/m <sup>3</sup>	404 899.8	暗挖盖挖车站	车站暗挖土石方/m <sup>3</sup>	329 069.87
	超前小导管/t	2 723.76		超前小导管/t	1 177.64
	大管棚/t	528.1		超前支护大管棚/t	575.61
	喷射混凝土/m <sup>3</sup>	69 580.64		初衬喷射混凝土 C20/m <sup>3</sup>	58 050.79
	格栅拱架/t	12 489.58		砂浆锚杆/t	2 851.02
	钢筋网/t	2 710.48		格栅拱架/t	9 256.87
	拆除钢筋混凝土/m <sup>3</sup>	9 964.41		钢筋网/t	1 916.27
	防水 C30 混凝土/m <sup>3</sup>	79 015.78		拆除钢筋混凝土/m <sup>3</sup>	29 359.44
	拱底填充混凝土 C20/m <sup>3</sup>	6 102.24		防水混凝土衬砌 C30/m <sup>3</sup>	66 900.83
	二衬钢筋/t	10 132.95		拱底填充混凝土中板/m <sup>3</sup>	21 324.28
	防水卷材/m <sup>2</sup>	211 464.26		混凝土梁 C30/m <sup>3</sup>	10 415.82
盾构区间	盾构吊装拆除/项	3	围护结构附属工程	主体结构钢筋/t	12 061.88
	盾构车架安装拆除/项	3		钢管柱/t	1 117.43
	负环段掘进/m	114		防水卷材/m <sup>3</sup>	89 788.24
	进洞出洞段掘进/m	700		围护结构土钉墙/m <sup>3</sup>	49 674.92
	正常段掘进/m	7 939.37		钻孔灌注桩混凝土/m <sup>3</sup>	36 078.1
	预制钢筋混凝土管片/m <sup>3</sup>	46 783.15		桩间喷射混凝土 C20 混凝土/m <sup>3</sup>	77 629.31
	厂制钢筋/t	6748.79		混凝土桩顶帽梁/m <sup>3</sup>	3 718.65
明挖高架区间	土方/m <sup>3</sup>	210 907.17	车站装修	围护结构钢筋/t	11 656.13
	土钉墙/m <sup>2</sup>	12 972.19		石材楼地面/m <sup>2</sup>	100 960.08
	钻孔灌注桩混凝土/m <sup>3</sup>	31 768.29		块料墙面(干挂)/m <sup>2</sup>	22 184.14
	桩间喷射 C20 混凝土/m <sup>3</sup>	5 626.84		块料墙面(湿贴)/m <sup>2</sup>	24 212.33
	混凝土顶板底板侧墙/m <sup>3</sup>	21 472.64		楼梯贴瓷砖/m <sup>2</sup>	3 469.99
	桥梁挡墙基础混凝土/m <sup>3</sup>	7 663.44		格栅吊顶/m <sup>2</sup>	78 674.23
	墩台柱混凝土/m <sup>3</sup>	8 471.65		天棚吊顶/m <sup>2</sup>	15 271.7
	现浇箱梁混凝土/m <sup>3</sup>	40 499.66		车辆/veh	366
	主梁混凝土/m <sup>3</sup>	2 367.25		通信线路工程/km	55.2
	主塔混凝土/m <sup>3</sup>	1 735.08		数字电话交换系统/套	23
明挖高架车站	主体结构钢筋/t	24 240.9	闭路电视监控系统/套	23	
	明挖、填土方/m <sup>3</sup>	843 171.7	车站广播系统/套	23	
	C25 承台基础/m <sup>3</sup>	2 697.95	信号线路工程/km	55.2	
	主体结构混凝土/m <sup>3</sup>	96 404.17	牵引降压混合变电所/座	19	
	混凝土梁/m <sup>3</sup>	16 322.85	降压变电所/座	46	
	混凝土柱/m <sup>3</sup>	46 801.83	接触轨/m	61 600	
	主体结构钢筋/t	38 380.18	智能与控制系统/套	23	
	防水/m <sup>2</sup>	133 414.93	屏蔽门系统/门单元	1 104	
拆除钢筋混凝土/m <sup>3</sup>	2 749.37	自动扶梯及电梯/部	212		

表5 主要材料消耗量

Tab. 5 Main material consumption quantities

序号	材料	数量
1	木材/m <sup>3</sup>	11 951.81
2	钢材总量/t	263 789.60
	钢筋/t	209 486.88
	钢管/t	15 944.37
	型钢/t	38 358.35
3	水泥/t	733 421.40
4	砂/t	907 788.72
5	碎石/t	1 162 412.40
6	柴油/kg	1 351 200.00
7	钢轨/t	8 064.00
8	防水卷材/m <sup>2</sup>	389 819.38
9	石材地面/m <sup>2</sup>	100 960.08
10	块料墙面(干挂)/m <sup>2</sup>	22 184.14
11	块料墙面(湿贴)/m <sup>2</sup>	24 212.33
12	楼梯贴瓷砖/m <sup>2</sup>	3 469.99
13	格栅吊顶/m <sup>2</sup>	78 674.23
14	天棚吊顶/m <sup>2</sup>	15 271.70
15	水/t	1 381 209.40
16	电/(kW·h)	35 883 925.00

表6 客运量

Tab. 6 Passenger transportation volumes

年度	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	远期
月客运量/ 万人次	1 302	1 467	1 958	2 241	2 612	2 825	4 030
月开行列 车数量	10 912	12 586	14 260	14 570	15 252	15 996	18 414

表7 分阶段能耗

Tab. 7 Energy consumption for every stage

全寿命周期阶段	能耗/10 <sup>3</sup> MJ	比例/%
规划设计阶段	3 910.0	0.004
运营装备及建材生产阶段	25 150 094.3	24.391
施工建设阶段	4 005 456.7	3.884
运营维护阶段	70 748 884.3	68.613
报废拆除及处置阶段	3 204 365.4	3.108
合计	103 112 710.7	100.000

数据,计算一条线路的全寿命周期能耗,既要对上述因素进行清单分析,又要对未来运营指标作出预测清单分析。

## 参考文献:

## References:

[1] 陈进杰,陈峰,梁青槐,等.城市轨道交通全寿命周期成本分

析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 82-87.

CHEN Jin-jie, CHEN Feng, LIANG Qing-huai, et al. Whole life-cycle cost analysis of urban rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 82-87. (in Chinese)

[2] ADALBERT H K. Energy use during the life cycle of single unit dwellings: examples[J]. Building and Environment, 1997, 32(4): 321-329.

[3] RAMESH T, PRAKASH R, SHUKLA K K. Life cycle energy analysis of buildings: an overview[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(12): 1592-1600.

[4] 冯建学. 基于全寿命周期能耗理论的建筑节能战略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2007.

FENG Jian-xue. Research on the building energy saving strategy of China based life-cycle energy analysis[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2007. (in Chinese)

[5] 朱熾, 陈莹. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放案例[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(3): 330-334.

ZHU Yan, CHEN Ying. Cases for life-cycle energy consumption and environmental emissions in residential buildings[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(3): 330-334. (in Chinese)

[6] 陈莹, 朱熾. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(3): 325-329.

CHEN Ying, ZHU Yan. Models for life-cycle energy consumption and environmental emissions in residential buildings[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(3): 325-329. (in Chinese)

[7] 张燕燕. 城市轨道交通系统牵引及车站能耗研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

ZHANG Yan-yan. Study on the power consumption of traction and station of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

[8] 杨臻明, 岳继光, 王晓保, 等. 基于回归模型的城市轨道交通能耗预测城市轨道交通研究[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(12): 22-25.

YANG Zhen-ming, YUE Ji-guang, WANG Xiao-bao, et al. Prediction of urban rail transit power consumption based on regression model[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(12): 22-25. (in Chinese)

[9] 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, 13(8): 35-39.

MU Guang-you, LI Xiao-long, YIN Li-ming, et al. Energy consumption and energy-saving of lighting system at subway stations[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(8): 35-39. (in Chinese)

[10] 王玉明. 城市轨道交通系统能耗影响因素的量化分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

WANG Yu-ming. Quantification analysis on the energy factors of the urban rail transit system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

[11] 陈爱侠, 关卫省, 陈宽民. 轨道交通建设对城市生态环境影响分析——以西安市城市轨道交通2号线为例[J]. 安全与环境

- 学报,2007,7(3):68-71.  
CHEN Ai-xia, GUAN Wei-sheng, CHEN Kuan-min. Analysis of impact of subway transit construction on urban eco-environment—taking Xi'an Urban Rail Transit Second Line as a sample[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(3): 68-71. (in Chinese)
- [12] 陈伟珂,罗方.基于全生命周期理论的建筑能耗问题研究[J].建筑科学,2008,24(10):23-27.  
CHEN Wei-ke, LUO Fang. Research on building energy consumption based on whole life cycle theory[J]. Building Science, 2008, 24(10): 23-27. (in Chinese)
- [13] 黄志甲.建筑物能量系统生命周期评价模型与案例研究[D].上海:同济大学,2003.  
HUANG Zhi-jia. The model and case study of the life cycle assessment of building energy systems[D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [14] 仲平.建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究[D].成都:四川大学,2005.  
ZHONG Ping. Study of building life-cycle energy use and relevant environmental impacts[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [15] YOHANIS Y G, NORTON B. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK[J]. Energy, 2000, 25(12): 1137-1148.
- [16] 顾道金,朱颖心,谷立静.中国建筑环境影响的生命周期评价[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(12):1953-1956.  
GU Dao-jin, ZHU Ying-xin, GU Li-jing. Life cycle assessment for China building environment impacts[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(12): 1953-1956. (in Chinese)
- [17] 王子甲,陈峰,施仲衡.北京城市轨道交通中远期能耗预测研究[J].中国铁道科学,2013,34(3):133-136.  
WANG Zi-jia, CHEN Feng, SHI Zhong-heng. Prediction on medium and long term energy consumption of urban rail transit network in Beijing[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 133-136. (in Chinese)
- [18] 袁宏伟,孔令洋.城市轨道交通能耗影响因素及测算研究[J].都市快轨交通,2012,25(2):41-44,73.  
YUAN Hong-wei, KONG Ling-yang. Study and calculation of influencing factors on urban rail transit energy consumption[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012, 25(2): 41-44, 73. (in Chinese)
- [19] 龙江英.城市交通体系碳排放测评模型及优化方法[D].武汉:华中科技大学,2012.  
LONG Jiang-ying. Evaluation model and optimization method of urban passenger transport system based on carbon emission target[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [20] 陈涛.高速列车运行能耗测算方法及其影响因素量化分析[D].北京:北京交通大学,2011.  
CHEN Tao. Traction energy consumption measuring methods study and quantification analysis on energy impact factors of high-speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [21] 柏赞,毛保华,周方明,等.基于功耗分析的货物列车节能运行控制方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2009,9(3):43-50.  
BAI Yun, MAO Bao-hua, ZHOU Fang-ming, et al. Energy-efficient driving strategy for freight trains based on power consumption analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(3): 43-50. (in Chinese)
- [22] LIAO Fei-xiong, ARENTZE T, TIMMERMANS H. Multi-state supernetworks: recent progress and prospects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 13-27.
- [23] 宋新启.地铁能源管理系统设计[J].城市轨道交通研究,2012,15(12):24-26.  
SONG Xin-qi. Design of electric energy management system of subway stations[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(12): 24-26. (in Chinese)
- [24] SEMEIDA A M. Derivation of travel demand forecasting models for low population areas: the case of Port Said Governorate, North East Egypt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 196-208.
- [25] 孔令洋,梁青槐,张岩,等.直线电机轮轨交通系统牵引能耗研究[J].铁道学报,2007,29(6):106-112.  
KONG Ling-yang, LIANG Qing-huai, ZHANG Yan, et al. Study on traction energy consumption of linear induction motor rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(6): 106-112. (in Chinese)