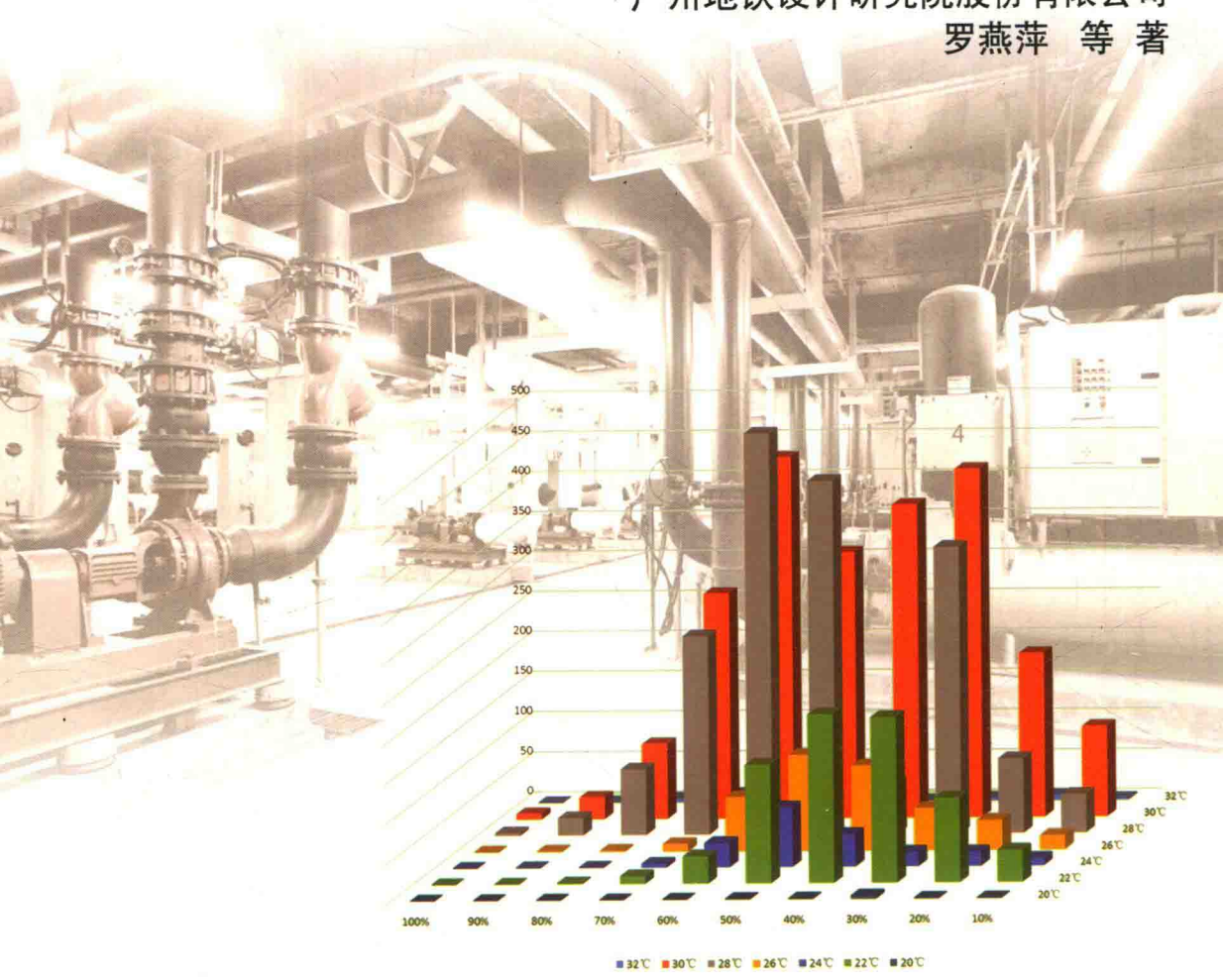




地铁车站高效空调系统 设计方法与能效评价

广州地铁设计研究院股份有限公司
罗燕萍 等著



中国建筑工业出版社

地铁车站高效空调系统设计 方法与能效评价

广州地铁设计研究院股份有限公司

罗燕萍 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地铁车站高效空调系统设计方法与能效评价/罗燕萍等著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 4
ISBN 978-7-112-23527-8

I. ①地… II. ①罗… III. ①地下铁道车站-空气调节系
统-系统设计 IV. ①U231.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 056690 号

在广州地铁建设高效空调系统成功经验的基础上, 结合广州地铁车陂南站实际运行、其他城市典型车站的测试数据与理论分析, 对地铁车站高效空调系统的评价参数、能效指标、建设标准、设计要点、运行管理与考核要求等进行深入研究论证后, 明确了相关标准与方法, 对规范设计、提高建设质量与运营水平具有较好的参考意义。

责任编辑: 曾 威

责任校对: 姜小莲

地铁车站高效空调系统设计方法与能效评价

广州地铁设计研究院股份有限公司

罗燕萍 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

天津翔远印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 213 千字

2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-23527-8

(33814)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编制组名单

主要作者：罗燕萍

其他作者：王迪军 王静伟 吴绍康

罗 辉 秦 旭 苏 醒

审 稿 人：张 旭 韩 瑶 黄力平

前 言

随着城市化进程的发展，城市规模的扩张与人口增长，作为城市公共交通骨干线的轨道交通工程也在飞速发展。截至 2018 年底，中国拥有城市快速轨道交通的城市共计 36 个，运营线路 169 条，运营线网总长度达 5494.9km，运营车站 3513 座。在 2008-2018 年间，中国内地共新增城市快速轨道交通运营线路长度 4325.7km，平均每年增长 432.6km；其中近 9 年来运营线路长度年均增量为 472.8km，约为 2008~2009 年年均增量的 6.8 倍。由此可见，从 2010 年起，中国内地进入了城市快速轨道交通快速发展的新阶段。

轨道交通线网规模的增长吸引了越来越多的客流量，但同时也产生了巨大的能耗。据 2017 年统计数据，年电耗超过 10 亿的城市共有 4 座，分别是北京、上海、广州、深圳，其中上海市以超过了 18 亿度为全国之首。在总能耗中，通风空调系统根据所处热工区域的不同占比约在 20%~40%之中，是除列车牵引之外的最大耗能专业；在地下车站的通风空调系统能耗中，空调水系统在空调季的占比一般在 70%左右，是站级能耗的重中之重。

相对于能耗的居高不下，轨道交通工程的空调系统，尤其是地下车站的空调水系统，一直存在着系统运行与理论计算偏离、缺乏实际运行数据等问题，通过实际测试获得的能效水平普遍偏低，部分车站的电冷源综合制冷性能系数（SCOP）甚至达不到《公共建筑节能设计标准》（GB 50189—2015）中要求的水平。而此时其他类民用建筑已开始研究集中空调高效制冷机房系统，并建成了成功案例。在这些案例中，普遍参照美国标准中冷冻机房全年平均效率（Annual Chiller Plant Efficiency）的定义，将系统的全年综合制冷性能系数（COP）的指标定在了 5.0。这个指标的建立对轨道交通工程是参考，同时也是压力，在地下车站中应用最多的空调水系统，需要在现有能效水平上做出较大的突破。

面对轨道交通车站是否也能建成高效空调水系统的质疑，我院在 2016 年底到 2017 年初，利用长期积累的设计与科研经验，经过对地铁高效空调的系统研究，对广州地铁 4、5 号线换乘站车陂南站进行了全面节能改造升级，成功将系统全年综合 COP 提升到 5.0 以上，成为我国轨道交通行业中第一座以接近设计

负荷工况在线运行的高效空调制冷机房。经第三方单位测试，从2016年6月至2018年3月，车陂南站冷水机房的年综合性能系数COP为5.56，相对于改造前综合节电率为45%，改造投资的回收期不到4年。

车陂南站虽然改造成功并验证了轨道交通车站建设高效空调水系统的可行性，但在全国的轨道交通行业里却还是个案，全面普及并提升整个行业水平依然任重道远。纵观目前业内的现状，亟须解决以下问题：

- (1) 明确车站高效空调水系统的评价参数，量化能效指标，推荐建设标准。
- (2) 建立高效空调的标准体系，梳理关键节能技术与动态调适策略。
- (3) 明确建设、运营考核标准与工作要求。

本书在车陂南站改造经验的基础上，结合通风空调行业设备的制造水平，以及轨道交通行业的建设与管理水平，努力对上述问题进行分析论述，形成合理可信的观点，并在下阶段进一步提炼形成《轨道交通车站高效空调系统技术标准》，为轨道交通车站高效空调水系统的设计、建设、运营与考核等提供参考。

车站空调系统建设的工程投资在城市轨道工程的总投资中的占比一般不到2%，运行能耗占比却普遍超过总能耗的20%。因此，提高车站空调系统能效虽然会在一定程度增加建设成本，但投资小而效益大，应大力推广。

目前，关于轨道交通车站高效空调系统的指导资料不多，而且缺乏系统运行的实际数据，仅有极少数项目的在线运行数据，以及近两年部分工程的短时测试数据，限于编者的水平和实践经验的局限性，书中尚有很多不完善之处，部分分析内容的论据不够充分，恳请广大同行和读者批评指正。

本书在编制过程中，王磊、刘黔奇等做了很多辅助性工作，也得到了广州地铁集团、深圳地铁集团、苏州轨道交通集团的大力支持，提供了不少设计资料与运营数据，并配合完成了典型车站的能效测试与数据分析，同时许多空调设备生产企业的朋友也提供了不少技术资料，他们是广东汉维科技有限公司的禡耀雄，特灵空调系统（中国）有限公司的胡旭东，广东新菱空调科技有限公司的谭小卫，深圳市勤达富流体机电设备有限公司的张亚军，在此一并表示感谢！

2019年4月

目 录

第 1 章 高效空调系统评价参数的选择	1
1.1 轨道交通车站空调系统概述	1
1.2 空调系统效能评价参数	2
1.2.1 用电量	2
1.2.2 节能率	6
1.2.3 能效比	6
1.2.3.1 冷水机组能效比	6
1.2.3.2 输配系统评价指标	9
1.2.3.3 冷水系统能效比	10
1.2.3.4 空调系统能效比	12
1.3 地铁车站空调系统效能评价参数选择	12
1.3.1 各种能效比参数的对比分析	12
1.3.2 地铁车站空调水系统评价要求	14
1.3.3 空调水系统综合 COP	15
1.4 本章小结	15
第 2 章 水系统能效比指标的确定	17
2.1 冷水机组的电耗占比分析	18
2.1.1 输配设备的电耗占比分析	18
2.1.2 冷水机组的电耗占比实测结果	20
2.1.3 冷水机组的电耗占比标准	23
2.2 冷水机组的能效水平支持	24
2.2.1 国标工况的能效水平	24
2.2.2 调适控制技术	26
2.2.3 国标工况的额定系统能效估算	28
2.3 工程条件下的高效指标	29
2.3.1 工程概况	29

2.3.2	全年运行情况	31
2.3.3	系统综合 COP 高效指标	35
2.4	不同热工区指标差异	38
2.4.1	室外湿球温度差异	39
2.4.2	冷却水温度差异	40
2.4.3	不同热工区的高效指标	41
2.5	高效指标分级设想	42
2.6	本章小结	43
第 3 章	水系统建设标准的选择	45
3.1	不同能效级别系统的建设成本	45
3.1.1	冷水机组配置分析	45
3.1.2	建设成本分析	48
3.2	不同能效级别系统的相对节能率	50
3.3	不同热工区系统的运行效益对比	52
3.3.1	典型车站 3 级能效系统年用电量	52
3.3.2	运行费用对比	54
3.4	建设标准的选择	55
3.4.1	回收期计算	55
3.4.2	建设标准选择	57
3.5	本章小结	57
第 4 章	系统设计与节能措施应用	59
4.1	节能措施应用建议	59
4.1.1	负荷分析	59
4.1.2	能耗分析	61
4.1.3	节能方向分析	62
4.1.4	技术措施建议	68
4.1.5	精细化设计	74
4.2	精确计算	75
4.2.1	负荷计算	75
4.2.1.1	额定工况计算	75
4.2.1.2	负荷率变化分析	85
4.2.2	水力计算	89
4.2.2.1	风系统水力计算	90

4.2.2.2 水系统水力计算	92
4.3 设备选型	94
4.3.1 一般要求	94
4.3.2 冷水机组	95
4.3.3 水泵	101
4.3.4 冷却塔	103
4.3.5 组合式空调器	104
4.4 工艺设计	105
4.4.1 监控对象	105
4.4.2 通风空调系统工况转换	106
4.4.2.1 转换条件	106
4.4.2.2 转换频率	109
4.4.2.3 单风机运行条件判断	109
4.4.2.4 工况切换时设备工作点转换要求	110
4.4.3 风系统调适控制要求	111
4.4.3.1 调适基本原则	111
4.4.3.2 变风量控制策略	111
4.4.3.3 定风量小系统控制策略	112
4.4.4 水系统调适控制要求	112
4.4.4.1 冷水机组控制策略	112
4.4.4.2 冷冻水泵变频控制策略	113
4.4.4.3 压差旁通装置控制需求	114
4.4.4.4 冷却水系统控制策略	114
4.5 智能调节	115
4.5.1 一般规定	115
4.5.2 控制元件要求	116
4.5.3 智能调节	118
4.5.4 控制系统硬件设备配置	119
4.5.5 控制系统软件要求	120
4.6 实施管理	121
4.6.1 传感器安装	121
4.6.2 精细化施工	124
4.6.3 精细化调试	125
4.6.4 系统验收	126
4.6.5 维护管理	126

4.7 本章小结	127
第5章 运行管理	128
5.1 空调能耗计量系统	128
5.1.1 能耗计量与评价	129
5.1.2 节能检测	129
5.2 空调水系统主要设备的常规运行管理	137
5.2.1 冷水机组的运行管理	137
5.2.2 水泵的运行管理	142
5.2.3 冷却塔的运行管理	144
5.2.4 重要监控元器件的运行管理	149
5.2.5 气象站的管理	153
5.2.6 在线清洗装置的运行管理	154
5.3 轨道交通通风空调智能运维系统	156
5.3.1 通风空调智能运维系统的总体构想	156
5.3.2 通风空调智能运维的主要功能要求	158
5.3.3 通风空调智能运维的发展建议	161
5.4 本章小结	162
第6章 能效验收考核方法	164
6.1 常用标准的考核要求	164
6.2 地铁工程现状	165
6.3 地铁空调水系统考核方法	166
6.3.1 项目分类	166
6.3.2 设计工况下的能效计算	166
6.3.3 非设计工况的能效转换	174
6.3.4 考核实施的注意事项	176
6.4 本章小结	178
参考文献	180

第 1 章 高效空调系统评价参数的选择

1.1 轨道交通车站空调系统概述

轨道交通车站通风空调系统按环境控制的区域不同一般分为：隧道通风系统、车站通风空调系统（含消防排烟）、空调水系统。对于设置了全封闭站台门的车站，隧道通风系统主要服务于区间隧道与车站范围的轨行区，一般以通风方式为主，不涉及空调的内容，因此不纳入本书的论述范围。通风空调系统根据服务区域可分为公共区大系统与设备管理用房区小系统，根据功能可分为通风系统与空调风系统，其中大系统为空调系统，小系统有空调系统与通风系统。带空调功能的风系统与空调水系统组成完整的车站空调系统。

由于城市用地紧张，绝大多数的城市轨道交通线路均采用地下敷设方式，车站的建造形式以地下明挖两层岛式车站最为典型，车站整体呈狭长形，两端为设备管理用房区，中部为公共区。大系统利用车站两端设备用房区分设两套系统，多采用双风机一次回风全空气系统；小系统结合设备管理用房的布局，将使用功能、环境控制参数、运行时段及消防等要求相同或相近的用房分类设置空调系统；水系统在车站大端设置冷水机房，集中采用一套一次泵系统为两端的空调风系统末端设备提供冷源。

典型的大系统与水系统见图 1.1-1、图 1.1-2。

一端大系统的主要设备包括组合式空调器、回排风机、排烟风机、小新风机各一台，以及相关电动风阀，系统正常运行模式设小新风空调、全新风空调、通风三种运行工况。根据节能要求，系统常通过风机变频等措施实现全年的变风量运行，并在空调运行工况时，同时通过调节空调器回水管上电动二通阀的开度，改变冷冻水流量以适配负荷需求。

水系统的主要设备包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔各 2 台，以及相关电动调节阀，系统根据末端负荷需求的变化，通过运行台数组合与变频等措施实现空调季节的变流量运行。

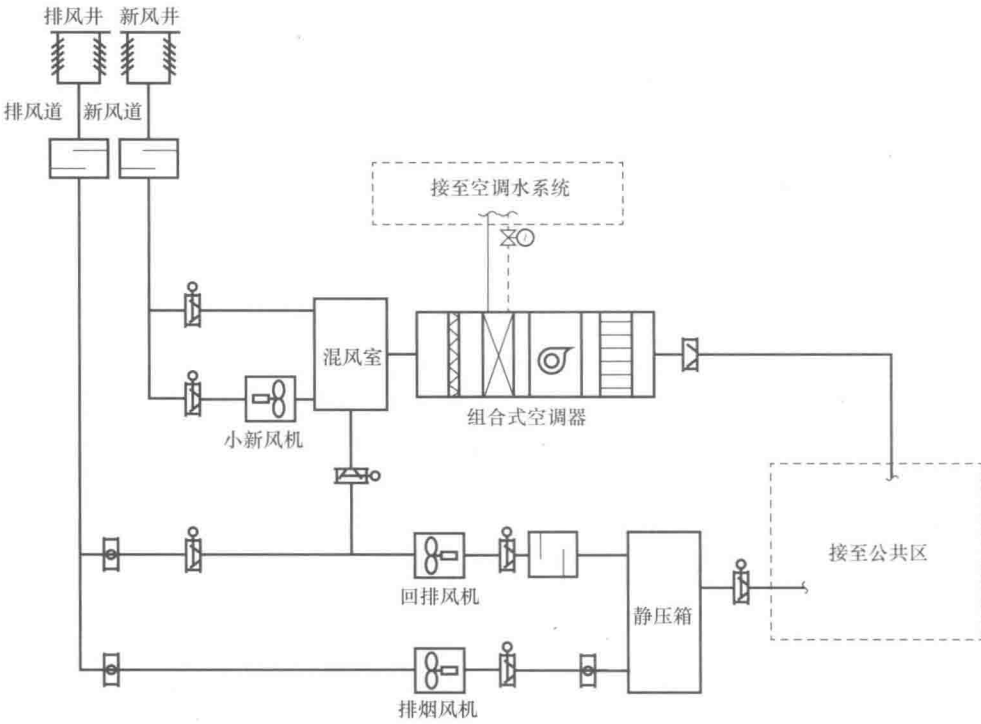


图 1.1-1 一端大系统示意图

1.2 空调系统效能评价参数

在轨道交通行业内，常用于描述车站空调系统节能运行状态的参数一般有用电量、节能率以及各类能效比等。

1.2.1 用电量

将一定时间窗口内的用电量用于评价车站空调系统的运行状态比较直观，如目前业内提倡的每座车站每年空调用电量不超过 100 万度的目标值。本参数在实际工程中计量与统计也相对容易落实，但用于具体工程的横向对比，存在以下问题。

1. 设计标准的影响

这里所指的设计标准主要为空调系统的室内、外设计参数。同在夏热冬暖地区的广州市与深圳市，同在夏热冬冷地区的苏州市与长沙市，设计参数均不相同。该参数的差异会同时影响到风系统与水系统的用电量。

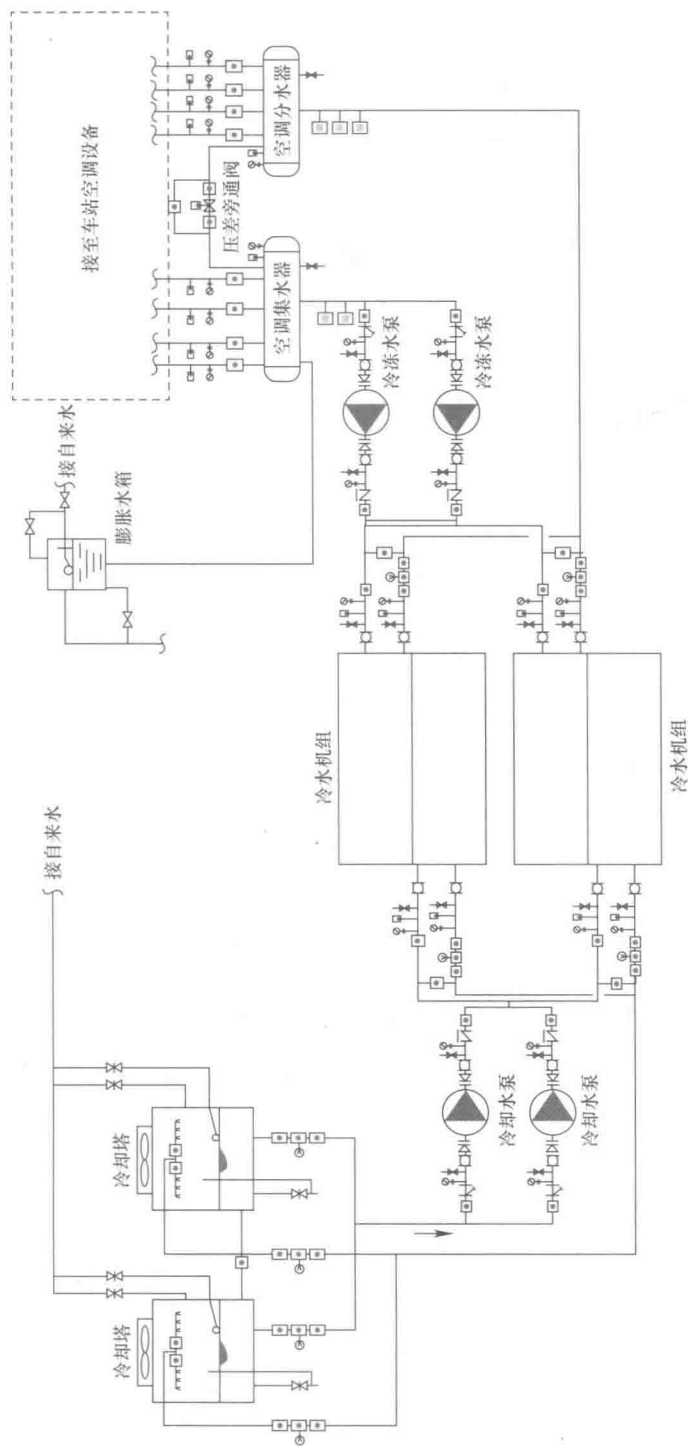


图 1.1-2 水系统示意图

空调系统设计参数表

表 1.2.1-1

城市	室内设计参数			室外设计参数	
	站厅温度 (°C)	站台温度 (°C)	相对湿度 (%)	干球温度 (°C)	湿球温度 (°C)
广州	29	27	40~70	32.5	26.9
深圳	30	28	40~65	33	26.4
苏州	30	28	40~70	33	28
长沙	30	28	40~65	32.8	26.5

以大系统为例，对相同室内余热余湿，即服务对象相当的车站，不同的室内外设计参数会有不同的系统负荷规模，直接影响到末端设备与水系统设备的配置容量，用电量也会相应不同。

取室内设计参数相同、室外设计参数不同的苏州和长沙进行大系统负荷计算比较，按相同的输入条件，负荷相差接近 5%。

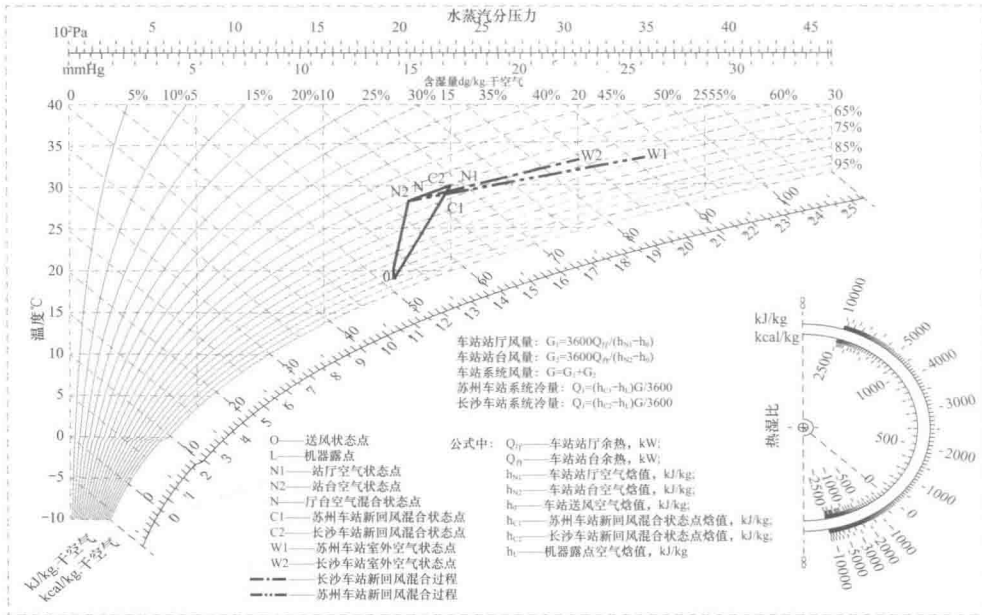


图 1.2.1-1 负荷计算过程与差异

输入条件：室内余热：428kW；余湿：0.039kg/s；新风比：10%；

计算结果：

风量：115720m³/h；

冷量：苏州车站 601kW；长沙车站冷量：575kW

2. 空调季室外运行环境对空调系统性能的影响

室外设计参数的差异源自当地气象条件，不同的气象条件除了影响到上述设计工况的系统规模以外，还会直接影响到系统实际运行的能耗。以制冷系统中

冷水机组为例，空调季节中每天不同的室外气象参数，会直接影响到冷却塔的出水温度，从而影响到冷水机组的冷凝温度，并最终影响到机组的用电量。

当室外空气湿球温度升高时，冷却塔的出水温度将升高，进而导致冷凝温度升高，膨胀阀的节流损失变大，如图 1.2.1-2 所示，单位制冷量由 q_0 减小到 q'_0 ，单位压缩功由 W_0 增大到 W'_0 ，此时如要维持室内稳定的供冷量，冷水机组需增加耗电量。冷凝温度降低时，变化情况正好相反。

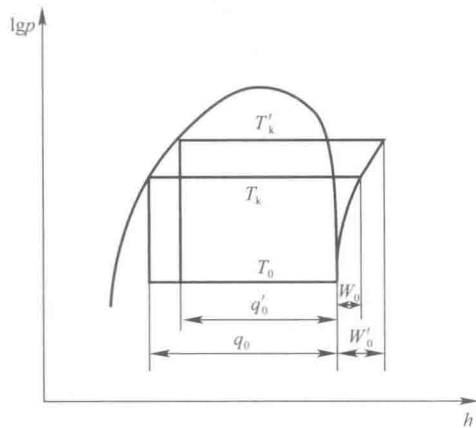


图 1.2.1-2 制冷过程与差异

由此可见，即使设计规模相同的系统，如所在区域实际气候条件变化不同，制冷机的实际运行耗电量也不同。

3. 全年空调季长度的影响

由于我国幅员辽阔，不同地区全年空调季的长度相差较大。如位于夏热冬暖区的广州，一年的空调季接近 8 个月，而位于夏热冬冷区的苏州，一年的空调季不到 4 个月，即使相同规模的系统、相当的空调季运行环境，全年的用电量也会因此相差一倍以上。

4. 车站规模的影响

除了空调专业本身的因素之外，车站规模也会直接影响到用电量。不同车站，由于使用的乘降客流量不同、交通组织功能需求不同、设置方案也会不同，客流量大、室内电气设施配置量大、建筑面积大、设备管理用房多的车站，系统负荷自然会偏大，用电量也会偏高。

综上，用电量可作为具有相同设计标准、相近气候条件、相当系统规模的车站间的横向对比，或同一车站的纵向对比，但不能直接用于对比不同城市、不同系统、不同车站间的运行水平。因此，上述对每座车站每年空调用电量不

超过100万度的目标，受其隐含的对应运行条件的制约，作为评价参数不具备全国通用性与适用性。

1.2.2 节能率

节能率多用于已建成车站系统改造的评价，采用改造前后的系统用电量进行对比得出。节能率公式如下：

$$\text{节能率} = \frac{\text{改造前用电量} - \text{改造后用电量}}{\text{改造前用电量}}$$

节能率是体现单个项目改造效果最直观的参数，但如用于不同项目之间的横向对比，则受系统改造前运行状态不同的影响。不同项目改造前系统的运行状态千差万别，即使改造后达到相同的能效水平，但改造前能效水平较差的项目会导致节能率较大，因此本参数也不具备横向对比的适用性。

1.2.3 能效比

用于描述空调系统能效比的参数有很多，包含了对空调系统整体以及主要组成部分的评价。在国标中最常使用的是性能系数 COP，能效比 EER；此外《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)还提到了电冷源综合制冷性能系数 SCOP、风道系统单位风量耗功率 W_s ；美国 ASHRAE 研究报告中还提到了机房全年平均效率 ACPE；以及目前业内使用的全年综合 COP 等。

1.2.3.1 冷水机组能效比

1. COP/EER

在不同的国家标准中，COP (coefficient of performance) 和 EER (energy efficiency ratio) 的定义存在一些差异，这里采用《民用建筑供暖通风与空气设计规范》(GB 50736—2012) 的定义。

COP：水冷式冷水机组名义工况制冷性能系数 (COP) 是指在冷冻水进水温度 12°C 、出水温度 7°C ，冷却水进水温度 30°C 的条件下，机组以同一单位标准的制冷量除以总输入电功率的比值。

国标中 COP 是在规定工况下定义的，但在实际工程应用中，运行工况是实时变化的，不可能稳定在国标工况，因此冷水机组的运行实时性能系数 COP，即制冷机的制冷量与其消耗能量之比，可按下式计算得出：

$$\text{COP} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot G \cdot \Delta t}{N_c \cdot 3600} \quad (1.2-1)$$

式中 C_p ——水的比热，取 $4.187\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

ρ ——水的密度，取 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ；

G ——冷水瞬时流量， m^3/h ；

Δt ——冷水的供回水温差， $^{\circ}\text{C}$ ；

N_c ——冷机的输入能量， kW 。

2. SEER/HSPF, APF

空调机组性能与季节变化关系密切，在工程应用中用某一指定工况的 COP 来评价明显不合适，用户关心的是机组全年的运行效率，而不是某一工况的效率。因此，为了评价机组运行的热力经济性与能效特性，提出了供冷季节能耗比 SEER 和供热季节性能系数 HSPF，其中供冷季节能耗比 SEER (seasonal energy efficiency ratio)：供冷季节期间，空调器进行制冷运行时从室内除去的热量总和与耗电量的总和之比。

2013 年 10 月 1 日，国家对变频空调能效等级实施新标准《转速可控型房间空气调节器能效限定值及能源效率等级》(GB 21455—2013)，引入了 APF 评价指标，既考虑了空调的制冷能力，又包含制热因素，一改以往考核变频空调的能效指标仅考核制冷季节内空调的能耗，APF 考核的是全年的能耗水平，对空调性能的评估更加全面。定义如下：

全年能源消耗效率 APF (Annual Performance Factor)：空调器在供冷季节和供热季节期间，从室内空气中除去的冷量与送入室内的热量的总和与同期间内耗电量的总和之比。

3. IPLV/NPLV

空调机组在运行过程中不一定处于满负荷状态，因此提出了机组部分负荷性能参数 IPLV/NPLV，更能反映机组实际运行的平均能效比。

在我国标准《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015) 中，第 2.0.8 条有综合部分负荷性能系数 (IPLV, integrated part load value) 定义：基于机组部分负荷时的性能系数值，按机组在各种负荷条件下的累积负荷百分比进行加权计算获得的表示空气调节用冷水机组部分负荷效率的单一数值。第 4.2.13 条规定：

电机驱动的蒸气压缩循环冷水（热泵）机组的综合部分负荷性能系数 (IPLV) 应按下式计算：

$$\text{IPLV} = 1.2\% \times A + 32.8\% \times B + 39.7\% \times C + 26.3\% \times D \quad (1.2-2)$$

式中 A ——100% 负荷时的性能系数 (W/W)，冷却水进水温度 30°C /冷凝器进气干球温度 35°C ；

B ——75% 负荷时的性能系数 (W/W)，冷却水进水温度 26°C /冷凝器进