



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



中德能源与能效合作
Energiepartnerschaft
DEUTSCHLAND - CHINA

机场国际能效及脱碳技术 最佳实践指南

中德重点用能行业能效技术指南系列五



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

编写说明

《机场公共建筑国际能效及脱碳技术最佳实践指南——中德重点用能行业能效技术指南系列》由德国国际合作机构（GIZ）在中德工业节能示范项目框架下发布。该示范项目是德国联邦经济与气候保护部（BMWK）与国家发展和改革委员会（NDRC）指导下中德能源与能效合作伙伴的一部分，由德国国际合作机构（GIZ）与国家节能中心（NECC）共同实施，致力于提供能效措施和最佳实践、加强中德企业间交流合作，助力重点用能行业能效提升与碳减排。本报告也得到由德国经济与气候保护部（BMWK）国际气候倡议（IKI）资助、德国国际合作机构（GIZ）与江苏省生态环境厅共同实施的“支持江苏省低碳发展项目（三期）”的支持。作为一家德国联邦企业，德国国际合作机构（GIZ）支持德国联邦政府通过国际合作实现可持续发展目标。

本报告系《中德重点用能行业能效技术指南系列》出版物的第五本，旨在借鉴德国及国际最佳实践，为包括公共建筑设施（如机场）、造纸、水泥、陶瓷和玻璃纤维行业提供能效技术分析与经验分享。



SUPPORTING THE LOW-CARBON DEVELOPMENT
OF JIANGSU PROVINCE
江苏低碳城市发展项目

发行方

中德工业节能示范项目
中德能源与能效合作伙伴
受德国联邦经济和气候保护部（BMWK）委托

北京市朝阳区亮马河南路14号
塔园外交办公楼2-5
邮编：100600

c/o

德国国际合作机构（GIZ）
Torsten Fritsche
Köthener Str. 2
柏林10963

研究负责人

Maximilian Ryssel（胡天）、原祯
德国国际合作机构（GIZ）

研究协调

Helmut Berger,
ALLPLAN GmbH



作者

Nushin Shahri, Thomas Eisenhut,
Manuela Farghadan, ALLPLAN GmbH

图片来源

Adobe Stock/Banana Republic（封面）

© 北京，2022年9月

本报告全文受版权保护。截至本研究报告发布前，德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。

前言

尊敬的读者朋友们，

近年来，尽管全球面临很多挑战，我们仍看到中国和德国在推动“能源转型”这一进程中的巨大进步。中国是全球可再生能源装机容量最大的国家，而在德国，可再生能源净发电量占比首次超过了 50%。尽管发展可再生能源对缓解气候变化带来的负面影响有重要作用，但仅依靠可再生能源并不足以保障人类拥有宜居的未来。为实现能源转型，我们必须提高建筑、工业和交通部门的能源效率。

作为德国能源转型的重要组成部分，德国联邦政府确定了至 2045 年所有领域实现碳中和的气候目标。到本世纪中期，德国的目标是减少 50% 的一次能源消耗（与 2008 年相比）。为了实现这个目标，德国采取了“能效优先”的原则，旨在尽可能地提升能源效率。

中国提出力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和的重大战略决策，节能提高能效是实现这一战略目标的重要一环。“十四五”的目标是到 2025 年，单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%。

在中德两国，公共建筑在建筑领域低碳转型进程中发挥着重要作用。政府可以对公共建筑（能源）设计决策产生直接影响，从而展示低能耗建筑的技术可行性和经济效益。机场作为大型公共建筑和交通枢纽的纽带，具有特别重要的意义，其能耗水平可与小型城市能耗水平相当。因此，提高机场能效可节约大量能源。

在这一背景下，中德两国间的国际合作可以为此作出一定贡献。本报告是中德能源与能效合作伙伴框架下中德工业节能示范项目（及中德重点用能单位节能诊断示范项目二期）与德国联邦经济和气候保护部国际气候倡议（IKI）资助的“支持江苏省低碳发展（三期）”项目共同发布。

本报告是《中德重点用能行业能效技术指南系列》报告的第五份报告，聚焦机场能效提升措施，介绍了包括供热、通风、空调（HVAC 系统）、能源供应和管理、内部运输和建筑等相关节能措施，并对措施的节能减排潜力和效果进行了分析。

在此感谢所有参与该报告编写的专家和合作伙伴的支持，特别感谢国家节能中心（NECC）和江苏省生态环境厅的大力支持。希望本指南可以带来更多的启发与灵感，帮助机场找到最优节能方案，引领我们走向更清洁的未来。



Martin Hofmann

可持续转型—投资于基础设施、
能源、交通、废弃物管理项目组主任
德国国际合作机构（GIZ）

目录

◆ 1 执行摘要	9
◆ 2 能源效率介绍	12
◆ 3 机场和能源消耗	16
3.1 部门能源效率的现状与发展	17
3.2 机场的能源消耗区域	19
3.3 暖通空调系统的重要性	20
◆ 4 行业能效提升措施	22
4.1 地下水冷却	24
4.1.1 基线情况和能耗说明	24
4.1.2 建议改进措施	24
4.1.3 节能和温室气体减排潜力	27
4.2 调节温度和湿度水平	28
4.2.1 基线情况和能耗说明	28
4.2.2 建议改进措施	28
4.2.3 节能和温室气体减排潜力	30
4.3 冷热储存（CHS）	31
4.3.1 基线情况和能耗说明	31
4.3.2 建议改进措施	31
4.3.3 节能和温室气体减排潜力	33
4.4 建筑分析技术	34
4.4.1 基线情况和能耗说明	34
4.4.2 建议改进措施	35
4.4.3 节能和温室气体减排潜力	37
4.5 可持续性评级系统	38
4.5.1 基线情况和能耗说明	38
4.5.2 建议改进措施	38
4.5.3 节能和温室气体减排潜力	42
4.6 地面支持设备的电气化（行李和旅客运输）	43
4.6.1 基线情况和能耗说明	43
4.6.2 建议改进措施	44
4.6.3 节能和温室气体减排潜力	47
4.7 高效的行李处理系统	48
4.7.1 基线情况和能耗说明	48
4.7.2 建议改进措施	48
4.7.3 节能和温室气体减排潜力	49
4.8 动力中心（热电联产、三联供）	50
4.8.1 基线情况和能耗说明	50
4.8.2 建议改进措施	50
4.8.3 节能和温室气体减排潜力	52

4.9	太阳能光伏和储能	53
4.9.1	基线情况和能耗说明	53
4.9.2	建议改进措施	53
4.9.3	节能和温室气体减排潜力.....	54
4.10	围护结构保温优化	55
4.10.1	基线情况和能耗说明.....	55
4.10.2	建议改进措施.....	56
4.10.3	节能和温室气体减排潜力.....	57
4.11	通过建筑设计选择实现的节能	58
4.11.1	基线情况和能耗说明.....	58
4.11.2	建议改进措施.....	58
4.11.3	节能和温室气体减排潜力.....	61
◆ 5	结论	64
◆ 6	参考文献	69

图目录

图 1: 二氧化碳减排比较	11
图 2: 2019 年维也纳机场终端能源消耗总量中的各部分占比	18
图 3: 法兰克福机场终端能源消耗总量中的各部分占比	18
图 4: 机场区域	19
图 5: 2011 年日本关西机场的能源消耗	20
图 6: 地下水制冷的主要系统设计	24
图 7: 开环回路系统	25
图 8: 闭环回路系统	26
图 9: 哥本哈根机场的含水层热能储存	26
图 10: 热舒适性指标	28
图 11: 冷热储存的地面储存方法	31
图 12: 苏黎世机场的冷热储存	32
图 13: 基于监测的试运行过程	35
图 14: 机场的排放源	41
图 15: 机场使用的牵引车的照片	45
图 16: 斯图加特机场的电动地面支持设备	46
图 17: 自动驾驶汽车	48
图 18: 行李控制系统	49
图 19: 三联供中央动力机房的主要组成部分	50
图 20: 采用动力中心的能量转移	51
图 21: 维也纳的光伏发电	54
图 22: 多保温层的收益递减	57
图 23: 绿色屋顶的一般结构	59
图 24: 与保温、形状和朝向相关的节能	61

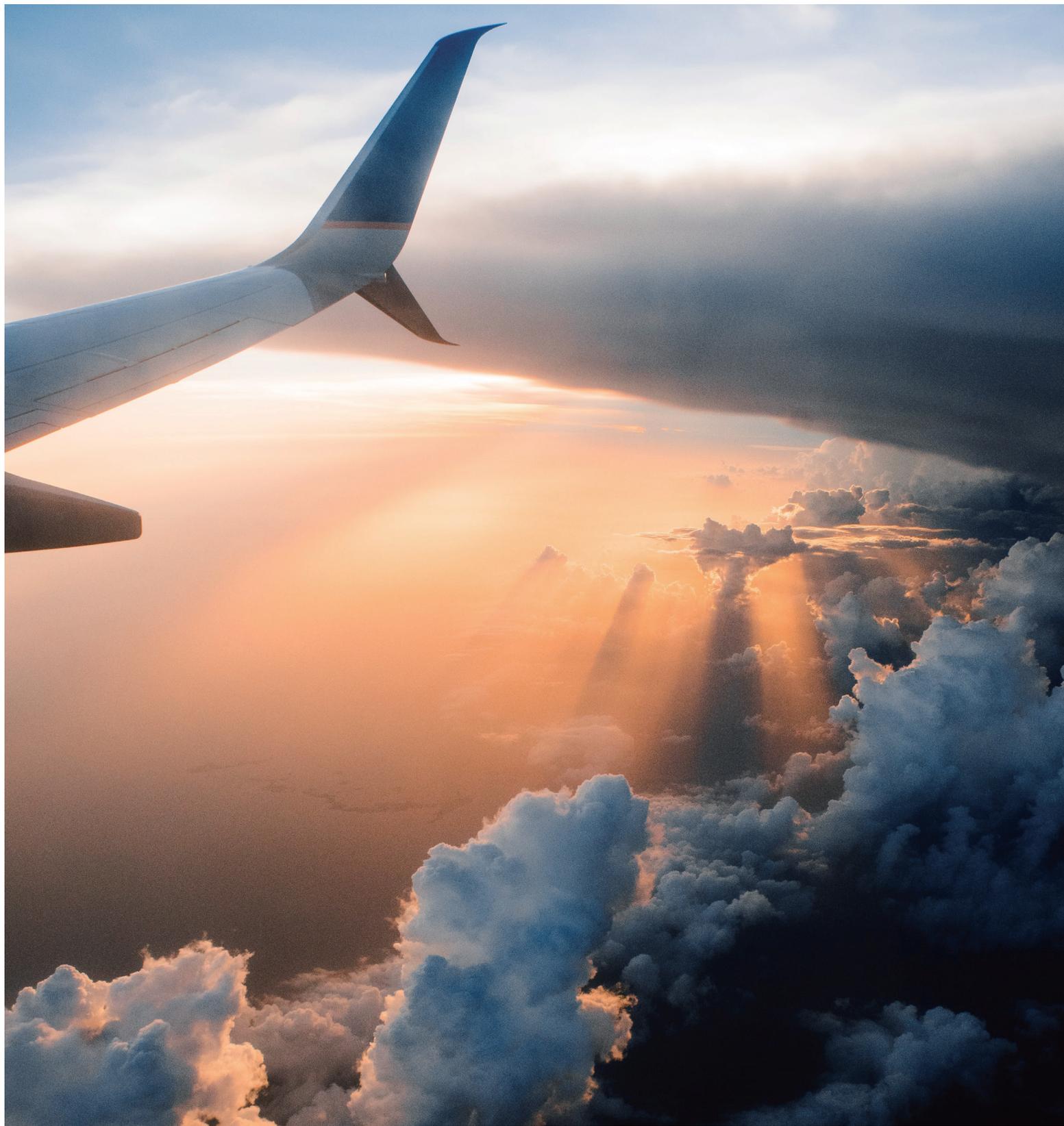
表目录

表 1: 奥地利的最低建筑要求	14
表 2: 维也纳机场的能源消耗数据	17
表 3: 机场的能效措施	23
表 4: 措施的关键信息——地下水制冷	27
表 5: 机场航站楼空间的推荐舒适度标准	29
表 6: 措施的关键信息——调节温度和湿度水平	30
表 7: 措施的关键信息——冷热储存	33
表 8: 能源信息系统、故障检测和诊断或者自动系统优化技术的应用总结	36
表 9: 措施的关键信息——建筑分析	37
表 10: 可持续性评级系统概述	39
表 11: 措施的关键信息——可持续性评级系统	42
表 12: 柴油巴士的燃料消耗	44
表 13: 措施的关键信息——地面支持设备的电气化	47
表 14: 措施的关键信息——高效的行李处理系统	49
表 15: 措施的关键信息——动力中心	52
表 16: 措施的关键信息——光伏发电和储存	54
表 17: 不同保温类型的特征和应用	55
表 18: 措施的关键信息——冷热储存	57
表 19: 不同建筑朝向的能耗比较	58
表 20: 通过具有不同保温的绿色屋顶实现的节能量	62
表 21: 措施的关键信息——建筑朝向	63
表 22: 措施的关键信息——自然采光	63
表 23: 措施的关键信息——绿色屋顶	63
表 24: 措施的关键信息——遮阳	63
表 25: 关键信息一览表	66

缩略语表

ACI	国际机场理事会
ACA	机场碳排放认证
ASO	自动化系统优化
BAT	最佳可行技术
BM	基准
BMS	建筑管理系统
BREF	最佳可行技术参考文件
BREEAM	英国建筑研究院（BRE）环境评估方法
CEFC	清洁能源金融公司
CUP	动力中心
DG	总局（总体方向）
EC	欧盟委员会
EPI	能源绩效指标
EEA	欧洲环境署
EIFS	外保温饰面系统
E(M)IS	能源（管理和）信息系统
ETS	碳排放交易体系
EU	欧盟
FDD	故障检测与诊断
GHG	温室气体
GJ	吉焦
GSE	地面支持设备
HVAC	暖通空调
ICAO	国际民航组织
IEA	国际能源署
IGES	全球环境战略研究所
ISO	国际标准化组织
JRC	欧盟委员会联合研究中心
kWh	千瓦时
LCC	生命周期成本
LEED	能源与环境设计先锋
MBCx	基于监测的试运行

MJ	兆焦
MWh	兆瓦时
NGO	非政府组织
O&M	运行维护
PAX	旅客
PTES	坑式热能储存
PV	太阳能光伏
RES	可再生能源
R&D	研究与开发
TFC	终端能源消费总量
TRL	技术就绪指数
TTES	罐式热能储存
TU	交通单位
UNEP	联合国环境规划署
WGTES	水砾石热能储存



1

执行摘要

本指南以机场作为大型公共建筑的范例，描述了提高机场能效的选项和措施。机场的能耗水平可与小型城市相当。例如，2019年法兰克福机场来往旅客7,100万人次，能耗约为1,300 GWh。机场有着其独特的能耗特征，其中最重要的就是很高的能耗波动性，这是因为空中交通和旅客流量水平的变化会导致热负荷的强烈波动。此种波动性对进行暖通空调（HVAC）系统的适当规划、确定容量和运行造成挑战。

总的来说，不同机场的能耗会受到以下要素的影响：机场规模（平方米）、外部气候条件（供热或制冷需求）、机场期望的舒适度水平、机场提供服务的范围、运营时间和旅客数量。鉴于存在这些变量，比较不同机场的能耗时应谨慎处理。可能采用的能源绩效指标（EPI）是旅客或者机场的规模（kWh/旅客或者 kWh/平方米）。例如，希腊不同机场的能源绩效指标在4到18 kWh/旅客之间或者200到270 kWh/平方米之间不等。

尽管不同机场的能耗构成各有不同，但电能在大多数机场的终端能耗中都占据着主导地位。在分析主要的能耗领域和过程时，可明显发现暖通空调系统的重要性。机场通常被分为空侧（不包括飞机的煤油消耗）和地侧：（1）空侧指的是与飞机运行相关的各个方面，包括着陆、起飞以及引导飞机至停机坪。典型的子系统包括控制系统、停机坪照明、无线电导航系统、消防建筑、飞机库和气象设施。（2）地侧能耗指的是旅客、行李和货物的移动、处理、组织和控制。所有机场都有的典型设施包括航站楼、货运楼和停车场。

以下领域的节能潜力最有发展前途：

- 节能型暖通空调系统；
- 建筑改善；
- 能源管理和控制；
- 能源供应效率和可再生能源；
- 旅客和行李的运输效率。

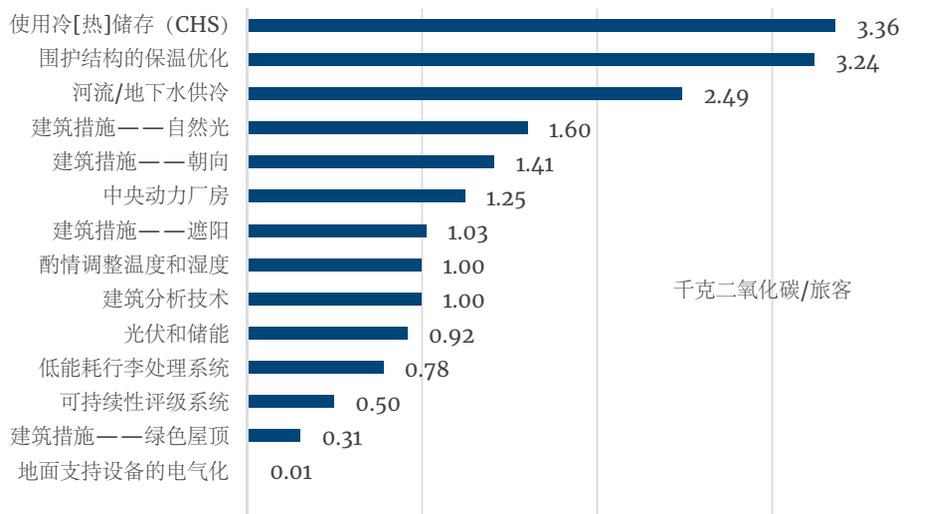
能源效率与温室气体减排潜力息息相关。但是，对二氧化碳排放的实际影响主要取决于被替代的燃料和 / 或用于发电的一次能源。旨在以电力系统取代化石燃料驱动工艺（运输、锅炉）的所有项目和措施都是如此。

比较潜在的节能措施时，可能出现误差，因为每一项措施都是针对特定机场假定了基线情况和不同的变量，应该基于具体案例具体分析。因此，我们强烈建议分析特定机场的实际节能潜力，并分别考虑供热、制冷或电力能耗方面的平均节能。但是，在本文中我们使用“人均碳减排量（千克二氧化碳 / 旅客）”这一基准作为概述及粗略比较不同节能措施的一项指标。¹

¹ 文献中提供的节能减排的可比较性有限，因为它们源自于不同的基准情况和机场条件。为了提供一个可比较的基础，我们将各机场的节能比例与关西机场（每位旅客7.85kg的二氧化碳排放）挂钩，以得出每位旅客的二氧化碳减排量。

基于这一前提，图 1 展示了可作为优先级排定依据的比较。通过比较可以发现针对制冷（和供热）采取的措施可能带来大幅减排。

图 1：二氧化碳减排比较 (kg/ 旅客)²



² 节能和二氧化碳节约量的计算是基于特定的假设（见各章节所述），如未另作规定，也是基于政府间气候变化专门委员会的天然气排放系数（0.202 吨二氧化碳 / 兆瓦时）。



2

能源效率介绍

本研究旨在识别机场通过节能措施或者使用可再生能源实现节能和温室气体减排的潜力。此章节将介绍欧洲和奥地利的相关政策，具体来说，就是建筑能效指令（EPBD）政策。

为了建立一个基准，需要明确尽管机场属于“建筑”这一能耗分类，但其能耗特征非常独特。机场的能耗与空中交通量息息相关，其能耗可能与一个小型城市的能耗水平相当。而空中交通往往并不是恒定的流量，而是由一系列高峰和低谷构成，是一种波动性非常高的能耗模式。关于机场内部及周围的能耗，对重要的适用法律和政策框架加以分析是非常关键的。在欧洲，分析的对象包括建筑能效框架、可再生能源框架以及大型企业的强制能源审计框架等。

针对**建筑能效**的欧洲指令最初于 2010 年通过并于 2018 年修正³，其目标是优化整个建筑部门的能源绩效，包括机场等大型建筑。此项指令要求成员国：

- 制定详细的计划，切实执行近零能耗建筑的定义；
- 针对建筑类型和气候带，找出具有成本效益的创新方式；
- 加速在 2050 年之前将现有建筑改造为超低能耗建筑的进程，保证自 2021 年起新建的建筑必须为超低能耗建筑；
- 通过智能技术支持所有建筑的现代化。（欧盟议会，2022）

³ 欧洲议会和理事会于 2010 年 5 月 19 日发布的关于建筑物能源性能的第 2010/31/EU 号指令，<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>，2018 年修正，（EU）2018/844 指令 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1529483556082&uri=CELEX%3A32018L0844>

为落实高能效目标，欧盟成员国设定了具体的最低标准。在奥地利，奥地利建筑工程研究院（OIB）的规则适用于新建工程或者大规模翻修。新建和翻新建筑必须满足 U 值，并提供符合要求的证明，以下数值适用于非住宅建筑，例如机场：⁴

表 1：奥地利的最低建筑要求

编号	建筑部分	U 值 (W/m ² K)
1	与户外空气接触的外墙	0.35
2	与无空调阁楼接触的隔墙	0.35
3	与无空调房间（不包括阁楼）和车库接触的隔墙	0.6
4	与土壤接触的墙体	0.4
5	居住单元或非居住单元或者空调楼梯间之间的墙体	1.30
6	与其他建筑接触的墙体	0.50
7	与空气接触的外窗、玻璃门	1.70
8	与空气垂直接触的其他透明的建筑外围护结构	1.70
9	与空气非垂直接触的其他透明的建筑外围护结构	2.00
10	与无空调房间垂直的其他透明建筑部件	2.50
11	与空气接触的阁楼窗户	1.70
12	与户外空气接触的非玻璃门	1.70
13	与无空调房间接触的非玻璃门	2.50
14	与户外空气接触的大门	2.50
15	与户外空气接触的屋顶	0.20
16	与无空调房间接触的天花板	0.40
17	与其他住宅单元或者非住宅单元接触的天花板	0.90
18	户外空气上方的天花板	0.20
19	与车库接触的天花板	0.30
20	与土壤接触的地板	0.40

来源：奥地利建筑工程研究院（OIB）

⁴ https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_6_12.04.19_1.pdf

为了实现长期碳减排目标，也需要对供热作出相应调整。根据欧盟建筑能效指令（第6条），对于新建筑，成员国应确保“在开始建造新建筑之前，考虑高效替代系统（如可用）的技术、环境和经济可行性”。其中包括基于可再生能源的分布式能源供应系统、热电联产、集中或区域供热或制冷，尤其是在完全或者部分基于可再生能源和热泵应用的情况下。

例如根据奥地利的现行政府协议，应该拟定具有法律基础的逐步计划，逐步取代用于室内供热的石油、煤炭和焦炭供热系统，其中应包括以下步骤：

- 禁止新建筑使用燃油系统供热（自2020年1月1日起）；
- 取代供热系统时，要以气候友好的替代品取代燃油系统（自2022年起）；
- 自2025年起，禁止新建筑使用化石燃料，并依次取代使用期限超过25年的燃油供热系统；
- 在2035年之前，关停所有燃油系统；
- 在2040年之前，所有供热都要实现脱碳。

第三个确保顺利转型为零碳经济的框架是强制性能源审计和能源管理系统。其目标是定期监测总体能源消耗、识别主要能源消费者并制定节能措施。大型企业要么必须实施能源（或环境）管理体系，要么必须每四年⁵执行一次定期能源审计，以满足《欧盟能源效率指令》（2012/27/EU号指令及其2018年修正案）的要求。⁶此规定也适用于经营机场的企业。总的来说，公共机构应该以身作则，优先考虑减少二氧化碳排放和能源消耗。

⁵ 奥地利的现状。目前，正在修改《能源效率法》，可能也将中小企业包含在内。（<https://www.monitoringstelle.at/aktuelles-services/uebergangsregelungen>）

⁶ 2018年12月11日，欧洲议会与欧洲理事会关于修订2012/27/EU号能源效率指令的2018/2002号（欧盟）指令（欧洲经济区适用文本）。



3

机场和能源消耗

这一章节介绍机场的总体能耗领域，提供欧洲机场相关数据的统计概述。如未另外标明，所有数据都不包括飞机的燃料消耗。

3.1 该领域能源效率的现状与发展

影响机场总能耗的一个重要因素是机场的规模。下文提供了按年旅客吞吐量排序的欧洲机场典型规模（数据源自 2019 年（疫情前），括号内为年处理旅客人次）：

- 欧洲最大的机场：伦敦希思罗机场（接近 8,100 万旅客）
- 巴黎夏尔·戴高乐机场（7,600 万）
- 阿姆斯特丹机场（7,200 万）
- 法兰克福机场（7,100 万）
- 伊斯坦布尔机场（6,900 万）。⁷

法兰克福机场是欧洲最大的机场之一。2019 年，该机场的能耗为 1,268 GWh，与小型城市的能耗类似。⁸

本报告还提供了机场具体能耗数据，例如下文中维也纳机场的数据。在新冠疫情之前，该机场年处理旅客大约 3,100 万人次。

表 2：维也纳国际机场的能源消耗数据

维也纳机场的关键能耗数据					
	单位	2017	2018	2019	2020
交通单位 (TU)	[-]	26,496,620	29,238,913	33,716,888	9,343,564
旅客	[-]	24,392,805	27,037,292	31,662,189	7,812,938
电能消耗	kWh/TU	3.52	3.24	2.72	7.13
电能消耗	MWh	93,358	94,739	91,855	66,583
热能消耗	kWh/TU	2.01	1.66	1.46	4.00
热能消耗	MWh	53,304	48,591	49,329	37,405
制冷消耗	kWh/TU	1.09	1.1	0.92	1.80
制冷消耗	MWh	28,846	32,146	30,967	16,812
燃料消耗	kWh/TU	1.20	1.15	1.07	1.90
燃料消耗	MWh	31,733	33,587	36,093	17,734
能源消耗总量	kWh/TU	6.73	6.05	5.26	13.03
能源消耗总量	MWh	178,395	176,918	177,277	121,722
能源消耗总量 / 可再生能源	kWh/TU	2.68	3.24	2.72	7.13
能源消耗总量 / 可再生能源	MWh	70,883	94,739	91,855	66,583
可再生能源在能源消耗总量中的占比	%	39.7%	53.5%	51.8%	54.7%

来源：(Flughafen Wien Gruppe, 2020)

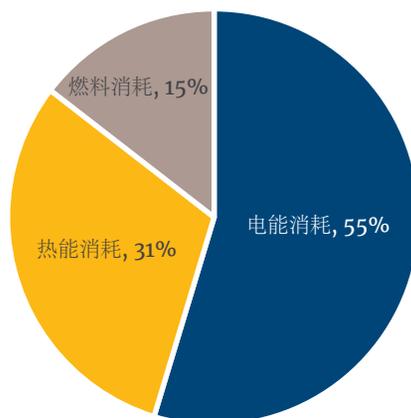
⁷ <https://www.flugplandaten.de/flughaefen-in-europa.htm>

⁸ 作为比较：城市内的人均能耗为 5 到 20 兆瓦时，取平均值 10 兆瓦时，则一个 10 万人口城市的能耗为 1000 吉瓦时。

“交通单位”(TU)的定义是一位旅客或者100 kg空运货物。单位能耗通常以能量单位/交通单位的形式展示。图2表明较低的空中交通量(因为2020年的疫情限制)不会导致能源消耗总量的成比例缩减。为了进一步的分析,我们使用疫情前的数据。在疫情之前,能源消耗总量的平均值为170到180GWh,相当于3 kWh/TU。在维也纳,能源消耗总量中有超过一半来自于可再生能源。

主要的能耗为电能消耗。主要的电能消费者之一是机场的制冷系统。

图 2: 2019 年维也纳机场终端能源消耗总量中的各部分占比

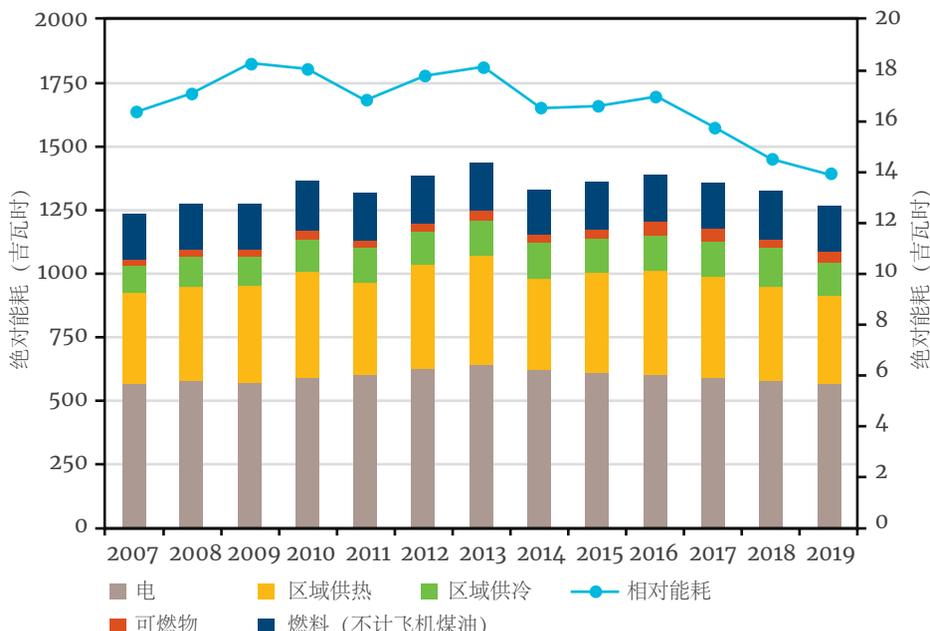


来源: 自制图表, 基于数据 (Flughafen Wien Gruppe, 2020)

作为比较, 法兰克福机场的能源消耗总量大约为维也纳的10倍, 单位能耗大约高出4倍(约12 kWh/TU)。两个机场总能耗中占主导地位的都是电能(终端能耗的50%左右)。

总的来说, 必须谨慎对待能源绩效指标的基准。数据可能发生显著变化, 并会受到多种因素的影响。机场的规模和能耗之间没有线性关系。即便是在同一区域, 能耗也表现出巨大差别, 例如希腊的一项研究分析了多个机场, 发现它们的能耗在4到18 kWh/旅客以及200到270 kWh/平方米的范围之间 (Sergio Ortega Alba, 2016)。

图 3: 法兰克福机场终端能源消耗总量中的各部分占比



来源: (Fraport AG, 2020)

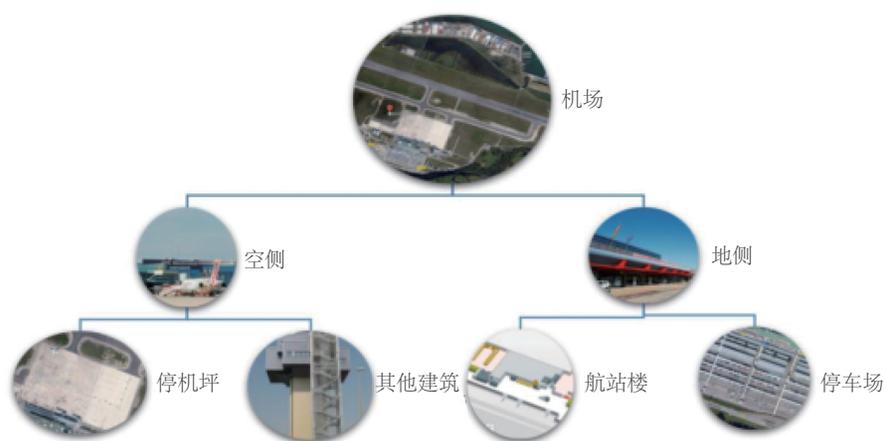
3.2 机场的能源消耗区域

总的来说，不同机场的能耗会受到以下要素的严重影响：机场规模（平方米）、外部气候条件（供热或制冷需求）、机场期望的舒适度水平、机场提供服务的范围、运营时间和旅客数量。（Akyüz, Sogüt, & Altuntas, 2017）

机场被分为空侧区域和地侧区域。空侧包括停机坪和其他建筑，地侧包括航站楼和停车场。地侧相关活动及能耗必须密切结合旅客情况审视，它们与旅客、行李和货物的移动、处理、组织和控制息息相关。所有机场都有的典型设施包括航站楼、货运楼和车辆停车场。

空侧指的是与飞机运行相关的各个方面，包括着陆、起飞和引导飞机至停机坪。空侧典型的子系统包括控制系统、机场照明、无线电导航系统、消防建筑、飞机库和天气设施。（Sergio Ortega Alba, 2016）

图 4：机场区域



来源：（Sergio Ortega Alba, 2016）

尽管机场在物理条件和运营方面各有不同，但航站楼通常是耗能最多的，也是最多被研究的部分。例如，在桑坦德机场，航站楼占到机场能源消耗总量的 75% 以上。

较大的能源消耗分别在（括号内给出了在桑坦德机场能源消耗总量中的相应占比）：

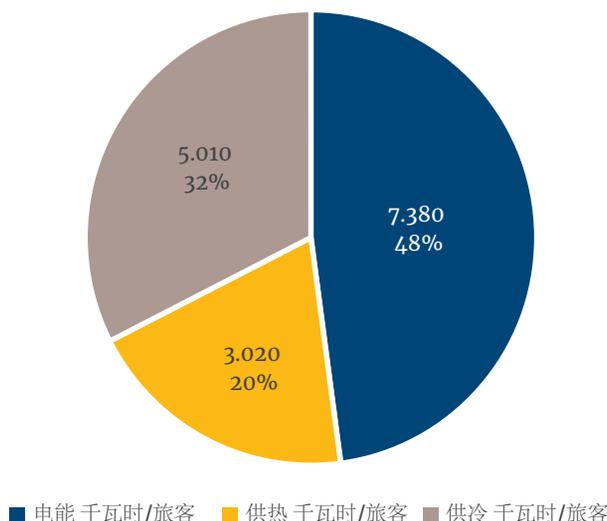
- 暖通空调系统（24.5%）；
- 照明（19.8%）；
- 外部公司（11.8%）；
- 信息和通信技术（18.3%）；
- 停机坪照明（6.9%）；
- 无线电导航系统（4.8%）；
- 机电设施（1.4%）；
- 其他（11.5%）。（Sergio Ortega Alba, 2016）

商铺或者餐厅等外部公司的能耗与暖通空调系统和照明相关。而对于并未在能源统计数据中区分机场消耗和外部公司的机场，暖通空调系统的总体占比相应地会更高。暖通空调系统的能源消耗状况最为重要，将在下一章节中更加详细地讨论。

3.3 暖通空调系统的重要性

暖通空调系统可能占到机场能源消耗总量的 50% 以上，具体多少取决于气候条件。(Malik, 2017) 下一章节以关西机场的能源需求为例，描述了后续节能计算的基准情况（针对从文献中无法获得改进措施的情况）。

图 5：2011 年日本关西机场的能源消耗



来源：基于 2018 年日本关西机场技术部门数据的自制图表

仅供热和制冷的能耗就占到了关西机场能源消耗总量的 52%（参见图 5）。在 2011 年，为提高能效采取的主要节能措施尚未得到落实，所以其能源需求与有待改进的机场类似。有鉴于此，本报告选择以 2011 年的能源消耗和碳排放作为基准，计算节能减排的潜力 (Kansai Airport - Technical Department, 2018)。因此得出的每位旅客的能源消耗位于上述范围的上限（16kWh/ 旅客）。

不同的机场，每位旅客相应的二氧化碳排放量也有所不同。以关西机场为例，总排放量为每位旅客 7.85 kg；暖通空调系统的排放量为每位旅客 4.1 kg⁹。作为比较，维也纳机场每位旅客的平均排放量仅为 2.85 kg 二氧化碳左右（总排放量）。

航站楼的温度和湿度控制面临着特殊的挑战。人们总是成群结队地抵达航站楼，而他们逗留的时间各有不同，所以人们在特定空间内释放的总能量是不断变化的。此外，旅客往往会携带不少重物，快速移动，因此可以假定一个人释放的热量可能在 200 瓦到 300 瓦之间，而不是办公楼内更正常的热量水平，即 80 到 100 瓦。每个人都释放相对较高的热量，这就导致制冷需求会发生更大的变化。

⁹ 基线能源消耗是基于源自现有关西机场的以下能耗数据：

- 已建成机场建筑总计：182,126.00 平方米
- 旅客：12,863,000
- 能源消耗总量：217,532.04 兆瓦时
- 天然气消耗：111,204.00 立方米
- 电能消耗：102,270 兆瓦时
- 制冷：69,421 兆瓦时
- 供热：44,729 兆瓦时
- 二氧化碳排放总量：427,000 吨
- 每位旅客的二氧化碳排放：7.85kg
- 每位旅客的暖通空调系统二氧化碳排放：4.10kg

因为这些因素，所以必须有灵活的暖通空调系统，能够对快速变化的制冷和供热负载做出快速响应。

暖通空调系统的典型能量来源是：

- 电网电力
- 用于供热的化石燃料或者热电联产
- 现场太阳能光伏设备生产的电力
- 现场地热能。

改进机场暖通空调系统的措施或简单或复杂，可能是改变温度设置的简单操作，也可能是采用储热（冷）等复杂的系统。

如前一章节所述，机场是复杂的建筑。因为这种复杂性以及各种不同因素，所以不存在适用于所有航站楼的万能解决方案。但是，共同的措施包括：

- 在登机桥内安装风幕机；
- 调整温度和湿度水平；
- 优化设定点，例如在周末或者非高峰期关闭空调系统；
- 在两个通风系统上安装变频器；
- 冷热储存（CHS）；
- 河流 / 地下水制冷；
- 热电联产（CHP）、冷热电三联供设备。（Costa, Keane, & Restoy, 2012）

其中一些措施相对简单，则未在此报告中进一步探究。



4

行业能效提升措施

下表概述了选定的能效措施，这些措施将在以下子章节中详细介绍。每一子章节的内容将首先介绍基线情况，并介绍能效提升措施及其在节约能源、减少温室气体排放方面的潜力。因篇幅所限，笔者聚焦于以下措施，这些措施被认为是具有高推广潜力的有效措施。

表 3：机场的能效措施

章节	措施	区域
4.1	地下水制冷	暖通空调系统
4.2	使用冷（热）储存（CHS）	暖通空调系统
4.3	温度和湿度水平调节	暖通空调系统和能源管理
4.4	建筑分析技术	能源管理
4.5	可持续性评级系统	能源管理
4.6	地面支持设备的电气化	交通运输
4.7	高效的行李处理系统	交通运输
4.8	动力中心（热电联产、三联供）	能源供应
4.9	太阳能光伏和储能	能源供应（可再生能源）
4.10	围护结构	建筑
4.11	通过建筑设计选择而实现的潜在节能	建筑

4.1 地下水冷却

4.1.1 基线情况和能耗说明

为确保热舒适性，要在机场内维持稳定的室内温度和空气质量，仅此一项，就在机场能源使用中占到了最大比重。

但是，从性能系数（COP）来看，传统的压缩机式冷水机组目前已被地下水热泵制冷系统所超越，后者利用了地下水的稳定温度水平，因此具有更恒定的运行条件。性能系数指的是从制冷系统中提取的能量与供应到压缩机的电力之间的关系。

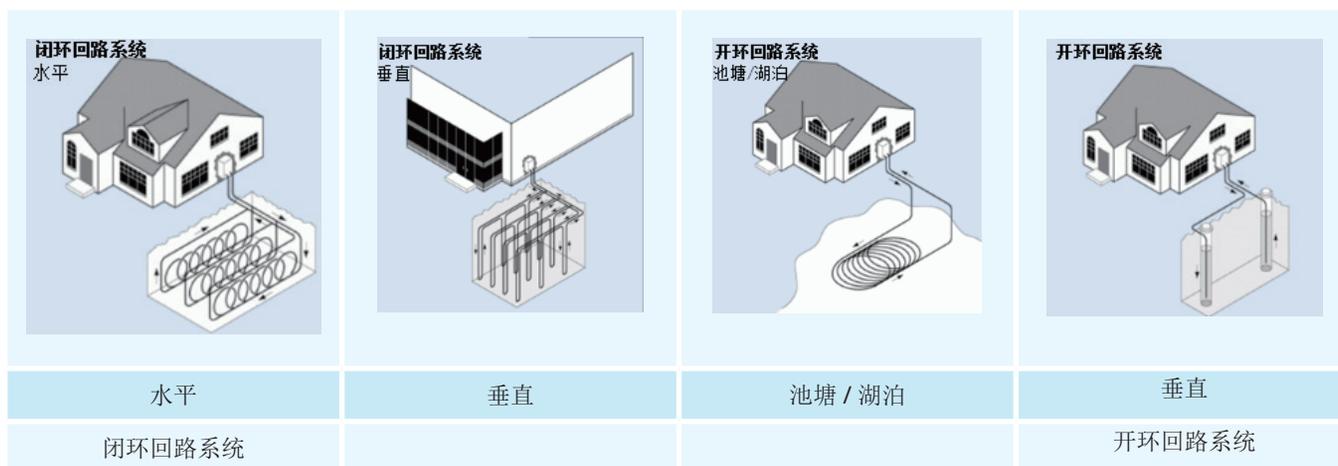
4.1.2 建议改进措施

此章节评估了在建筑内使用制冷技术、用水作为天然制冷来源的最佳实践。

使用地下水进行制冷的常用方法是热泵与开环或闭环地热回路的结合使用。地热回路系统的设计取决于各种不同因素，例如气候、土壤条件、可用的土地和地下水来源以及当地安装成本。（Sarbu & Sebarchievici, 2015）

地下（水）系统有四种基本类型，如下文所述。其中三种为闭环系统，即水平回路、垂直回路和池塘 / 湖泊回路。第四种类型是开环回路系统。

图 6：地下水制冷的系统设计



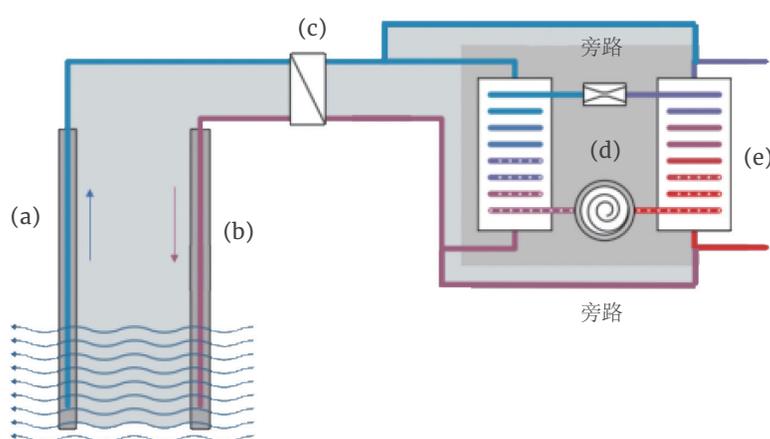
来源: greenmanual.rutgers.edu/nr-geothermal-heat-pumps/

闭环回路系统与开环回路系统仅在包含地热回路之时才有差别。开环系统用管道直接将地下水送入热泵，然后再送回到地下，而不是在闭环的地下散热器中循环使用冷却剂。

总的来说，使用开环回路系统进行的地下水制冷必须使用以下组成部分（参见图 7）：

- (a) 用于提取地下水的抽水井（冷井），
- (b) 将用过的地下水回注到地下水体的回灌井（温井），
- (c) 分离一次侧环路（地下水）与二次侧环路（建筑的制冷系统）的地理管换热器（GHE），
- (d) 切换一次侧环路和二次侧环路之间温度水平的热泵，和
- (e) 用于缓冲峰值负荷的短期热储存装置。

图 7：开环回路系统



来源：改编自：(Viessmann, 2022)

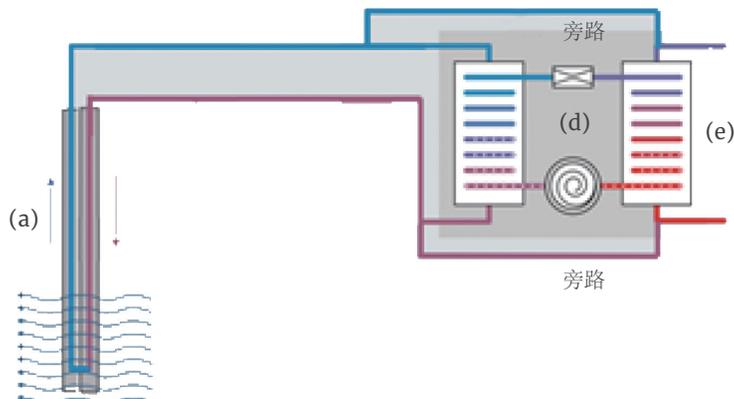
开环回路系统将水井中的地下水提取，冷却建筑内或者反向热泵过程中的介质，以利用冷却剂的热能。大多数情况下，其温度水平足以实现直接冷却，无需使用热泵。但是，热泵也可以用来主动冷却。

开环回路系统设计的一个具体类型是含水层热能储存（ATES）。含水层热能储存是一个双向系统，要用到至少一个地下水井，夏季主动储存过剩的热量，冬季储存过剩的冷量。含水层热能储存是适合向机场建筑供应大量冷热能量的技术。

若土壤（热汇）中的水质不佳，建议在地下水源中安装闭环回路系统的热交换器。在闭环回路系统中，热介质在插入地下的一个管道阵列中循环。热介质通常是水或者水与某种防冻液的混合物，它可能被直接用作建筑内的冷却介质 (Sarbu & Sebarchievici, 2015)。下图通过一个垂直回路象征性地呈现了管道阵列。

图 8 展示的组成部分是：（a）垂直回路；（d）切换一次侧环路和二次侧环路之间温度水平的热泵，和（e）用于缓冲峰值负荷的短期热储存装置。

图 8：闭环回路系统



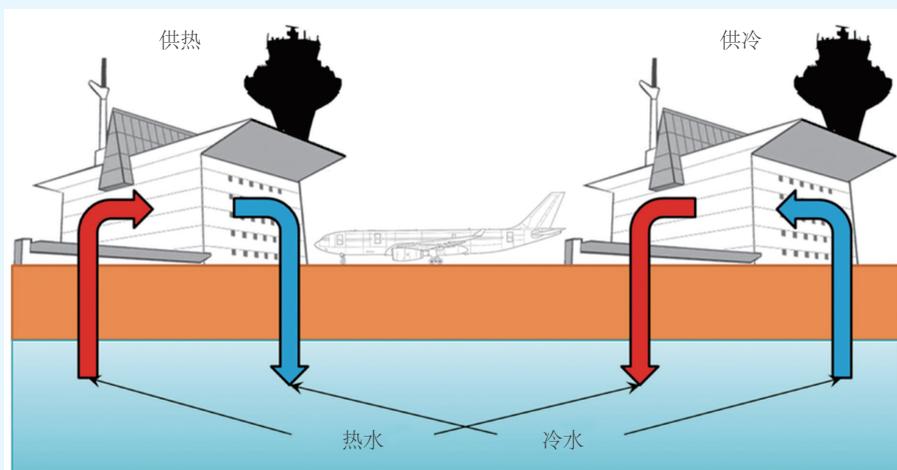
来源：改编自 (Viessmann, 2022)

哥本哈根机场的含水层热能储存

哥本哈根机场采用含水层热能储存（ATES）（地下水制冷）系统制冷。含水层热能储存系统的主要功能是在机场提供舒适的制冷，供热则是其次要功能。系统制冷的性能系数（COP）为 60。这意味着系统每消耗 1kWh 能量，就可制冷 60 kWh。自 2015 年起，在机场完成地下水制冷系统的抽水侧最终阶段后，系统每年可以制冷大约 400 万 kWh。

图 9 展示了哥本哈根机场含水层热能储存的原则：冬季，从偶极的高温侧（左）抽水，给机场供热；夏季，从偶极的低温侧（右）抽水，给机场制冷。图中的两个建筑展示的是同一建筑在冬季（左）和夏季（右）的情况。

图 9：哥本哈根机场的含水层热能储存



来源：(Baxter, Srisaeng, & Wild, 2018)

4.1.3 节能和温室气体减排潜力

与用于水泵的电能消耗相比，使用热泵的开环或闭环地下水源系统可以多生产三到四倍的供热或制冷能量。如果系统通过简单的热交换器制冷，未用到热泵，则总体能效会大幅提高，所交付的制冷能量与所消耗电能之间的比值可达 20 到 60。这意味着系统每消耗 1 kWh 能量，最多可制冷 60 kWh。(Baxter, Srisaeng, & Wild, 2018)

开环回路系统（含水层热能储存）范例的投资成本在 580 欧元 / 千瓦到 1,000 欧元 / 千瓦的范围之间。(Schüppler, Fleuchaus, & Blum, 2019)

表 4：措施的关键信息——地下水制冷

措施的关键信息——地下水制冷	
投资成本：	580 欧元 / 千瓦到 1,000 欧元 / 千瓦（针对开环回路系统，以含水层热能储存为例）
节能量：（热能）	-
节能量：（电能）	与标准冷水机组相比，不使用热泵（HP）逆循环制冷（开环回路系统）可节省 80%；使用热泵和任何地热回路系统可节省 20-30%
二氧化碳减排量：	最高 650 吨二氧化碳 / 兆瓦制冷能力
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 节约大量电能 • 投资回收期短，可能 < 2.7 年 • 维护成本低 • 可扩容，适合巨大的制冷负载 • 可用于供热和制冷
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 与标准冷水机组相比，资本成本更高

4.2 调节温度和湿度水平

4.2.1 基线情况和能耗说明

大多数机场航站楼的特征都是有空间巨大的开放大厅，且因为有巨大的玻璃立面，所以其热分布不均匀。除此之外，一系列不同的交替占用活动也加剧了此种不均匀性。因此，暖通空调系统耗费大量能量来做出快速响应，以在机场建筑内提供整体的热舒适条件。

4.2.2 建议改进措施

除了其他能效措施之外，通过优化对室内环境的控制，也可以减少用于调节室内热环境的能耗。

热舒适性本身是一个宽泛的概念。它并不是由单一因素决定的，而是人体基于综合的环境和个人指标形成的主观感受。这些指标如图 10 所示。环境指标体现的是热环境条件（即空气温度、空气速度、湿度），而个人指标包括代谢速率（我们的体力劳动）和人体隔热的类型（衣服对人体的影响）。

图 10：热舒适性指标



来源: (Kumar, 2019)

¹⁰ 美国采暖、制冷与空调工程师学会是一个旨在推进采暖、通风、空调和制冷（HVAC&R）系统设计与建造的美国专业协会。

¹¹ 因为对舒适性的个人感知不同，所以如果 80% 的人对普遍存在的条件感到满意，就可认为这是一种可接受的状态。

基于这些指标，可使用不同的控制理念评估特定环境下最适合的热舒适性条件。

根据对英国不同机场旅客和职员的研究和实地调查，冬季人们可接受的温度范围在 19.2 到 23.1°C 之间，夏季则在 23.9 到 27.3°C 之间。而美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHARE）¹⁰ 的设计规范建议冬季的温度在 23 到 26°C 之间，相对湿度在 30% 到 40% 之间，夏季的相对湿度在 40% 到 55% 之间。此外，为了实现 80% 可接受的舒适空间，机场航站楼内的空气流速应在 0.1 到 0.2 米 / 秒的范围之间¹¹。

但是，到达大厅和大门等一些地方可能超过此范围，最高可达到 0.3 米 / 秒。此外，在确定室内环境条件时，应考虑衣服隔热和代谢速率等个人因素。下表基于不同机场的现场调查，展示了机场航站楼空间的建议舒适度标准以及室内环境条件。建议的温度取决于季节（因为夏季和冬季的不同着装）和活动水平（休息室内最低，行李提取处最高），其概述如下。

表 5：机场航站楼空间的推荐舒适度标准

	夏季 ^a	冬季 ^a	活动（代谢当量）
	运行温度（°C）		
行李提取处	21-25	12-19	1.8
值机区域 ^c	21-23	18-20	1.4
大厅（无座位）	21-25	19-24	1.8
海关区	21-23	18-20	1.4
候机室	22-24	19-21	1.3

^a 夏季衣服隔热的克罗值（clo）为 0.65，冬季为 1.15。
^b 基于 ±0.5 的预测平均热感觉指标（PMV）。所有其他情况则基于 ±0.25 的预测平均热感觉指标。
^c 基于值机工作人员的舒适度要求。

来源：（Kotopouleas & Nikolopoulou, 2016）

基于上文所示的建议，在很多情况下，可以通过软件工具执行环境控制，并研究相关的参数，以实现最优解决方案，在满足最优运行条件的同时，也有利于节能策略的落实。（Kotopouleas & Nikolopoulou, Thermal comfort conditions in airport terminals: Indoor or transition spaces?, 2016）

另一项研究基于数据驱动的学习算法，研究了在预先定义的热舒适性水平下控制送风条件的适应性模型。此研究发现该等模型可以大幅改进舒适度水平，相比基于日常时间安排或者航班时刻表控制策略的比较模型，其能效提高了大约 14%。（Kapil, Nusrat, & Elangovan, 2019）

4.2.3 节能和温室气体减排潜力

调整温度和湿度的措施最多可节省 20% 的能耗，不仅能提高能效，也能改进热舒适性。

表 6：措施的关键信息——调节温度和湿度水平

措施的关键信息——调节温度和湿度	
投资成本：	大约 0.2 欧元 / 平方米的年度成本（软件和人力）
节能量：（热能）	供热能量最高节省 20%
节能量：（电能）	制冷能量最高节省 20%
二氧化碳减排量：	基线暖通空调系统相关二氧化碳排放最高节省 20%
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 易于落实预先设定的设置点 改进热舒适性和总效率
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 执行先进环境控制的数据收集和预处理过程比较耗费时间

4.3 冷热储存 (CHS)

4.3.1 基线情况和能耗说明

航站楼的暖通空调系统能耗巨大。地侧能耗总量中，有高达 50% 或以上的部分可能是由暖通空调系统造成的，取决于各种不同因素。

仅暖通空调系统一项，每位旅客的二氧化碳排放量大约为 4.1kg。取决于气候条件，制冷通常会造成最高的能耗，因此也会导致最高的排放量。

机场通常拥有集中式或分散式的供热和制冷系统。制冷是向需要消除热能的空间输入冷空气，以维持想要的温度。供热则是向需要能量的区域供应热水或蒸汽，以维持想要的温度。通常情况下，源自制冷空间的热量将通过热交换器和风机盘管释放到机场建筑之外的空气中，而空间供热所需的能量来源于电力或者燃料的燃烧。

4.3.2 建议改进措施

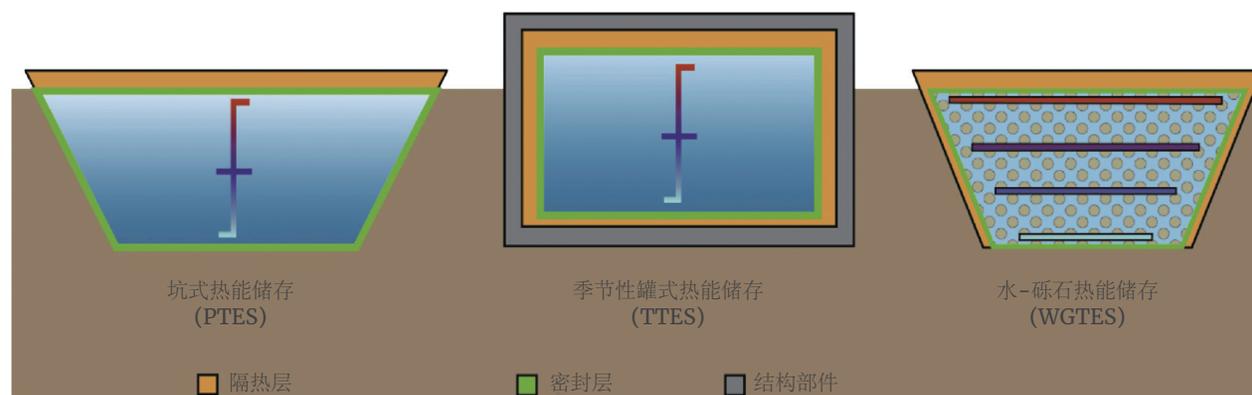
季节性能量储存提供了减少供热及制冷所需能量的一个解决方案。冷热储存的形式多样，可分为两类：地上 / 地表以及地表以下的冷热储存。其核心原则是夏季将建筑内的热量输送储存，冬季将储存的热量用于建筑供暖。通常会用到热泵来提高效率。常用的储存介质是水，但也可能是土壤。

对于在更高温度下运行的系统，也可以使用熔融物，可以加热到远超 1000℃ 的高温。(The Engineer, 2016)

地面储存通常包括热交换器，以及注满水和砾石的储存坑，如图 11 所示。罐式热能储存 (TTES) 在更高温度下保存热量，但也要求更复杂的构造，所以造价更加昂贵。坑式热能储存 (PTES) 构造最简单，但向周边土壤的热损失也最高。水 - 砾石热能储存 (WGTES) 在保热方面略胜一筹，但其主要优势在于水的分层。砾石使得水的流速变慢，因此底部温度较低的水与顶部温度较高的水混合较少。这有利于水 - 砾石热能储存装置与暖通空调系统的热交换过程。

目前，世界上使用此项技术的最大项目位于丹麦（沃延斯）。此项目包括 210,000 立方米的储存空间，储能容量为 12,180MWh，展现了此项技术的潜力。其充放容量为 38,500 千瓦。此项目的投资成本仅为 0.41 欧元 / kWh。(Solar Thermal World, 2022)

图 11: 冷热储存的地面储存方法



来源: (Bott, Dressel, & Bayer, 2019)

4.3.3 节能和温室气体减排潜力

使用地下水储能，制冷的节能量最高可达到 80%¹²，供热的节能量可能达到 30%¹³。总的来说，供热和制冷所需的能源总量大约可以节省三分之二。(Snijders)

冷热储存可以实现高达 1.5kg/ 旅客的减排。(苏黎世机场，2012)。它在中央气候区域效率最高，在最严寒的区域效率最低，因为制冷能耗的节省量远高于供热能耗的节省量。

表 7：措施的关键信息——冷热储存

措施的关键信息——冷热储存	
投资成本：	高度依赖于具体情况 例如，坑式储存为 0.4 欧元 /kWh 到 0.6 欧元 kWh
节能量：（热能）	最高 30%（供热）
节能量：（电能）	最高 80%（制冷）
二氧化碳减排量：	最高 2.8kg/ 旅客
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 大幅节省电能和热能 与产生余热的技术（例如太阳热能、热电联产）完美搭配 可扩展性
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 并非所有技术都可以改造 取决于系统，尤其是蓄热坑可能产生巨大的热损耗 并不适合寒冷区域

¹² 取代低效的电驱型标准冷水机组

¹³ 取代传统能源供应的热能

4.4 建筑分析技术

4.4.1 基线情况和能耗说明

大多数商业建筑已经使用建筑管理系统（BMS）来管理设施的日常运行。尽管建筑管理系统可提供警报、通知和计量仪表盘等功能，但能源管理和信息系统（EMIS）和相关软件平台更进一步，采用了融合智能控制算法的综合数据分析工具。

与建筑管理系统不同，能源管理和信息系统包含管理建筑能源使用的一套广泛的工具和服务。这些技术提供存储、展示和分析能源使用和系统数据的一系列能力，实施之后，可以提供机场暖通空调系统、照明及其他相关公共设施的控制。（Lin, Singla, & Granderson, 2017）

此措施的基线情况是一个没有安装任何先进建筑分析系统的机场。

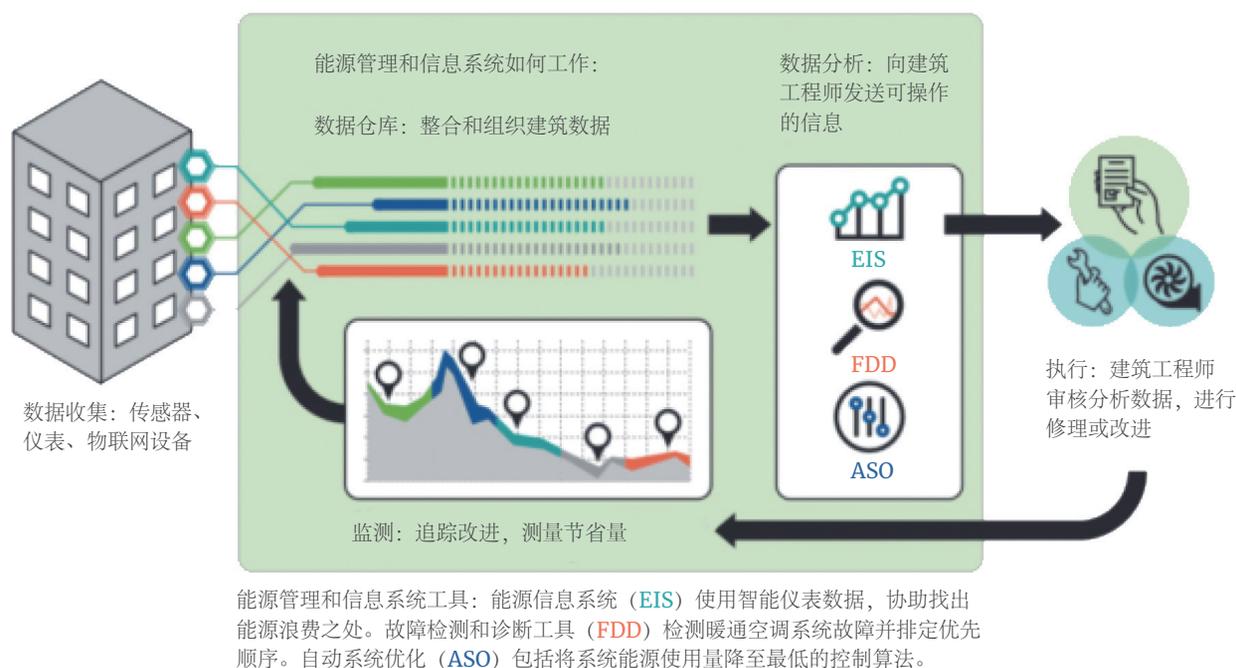
4.4.2 建议改进措施

能源管理和信息系统工具产生的所有数据都旨在实现更高效的建筑运行，同时提高使用者的舒适度。通过提供对公共设施能耗的深入见解和分析，可以实现这一点。能源管理和信息系统工具通常是在基于监测的调试（MBCx）过程中使用。基于监测的调试过程指的是落实持续的调试过程，聚焦于大量数据的持续监测和分析。各组成部分及其之间的相互作用如图 13 所示。

总的来说，在智能能耗分析中，能源管理和信息系统技术包括三个主要软件子集，具体如下：

- **能源信息系统（EIS）**的广泛定义为用于存储、分析和展示建筑能源数据的软件、数据采集硬件和通信系统。能源信息系统是能源管理和信息系统的一个子集，聚焦于仪表层面的监测（每小时或者更频繁）。
- **故障检测和诊断（FDD）**是一个软件，可以实现现实中的建筑系统和过程的故障监测自动化，帮助诊断潜在的故障原因。故障检测和诊断是能源管理和信息系统的一个子集，聚焦于使用建筑自动化系统（BAS）数据的系统层面的监测。
- **自动化系统优化（ASO）**持续分析和修正暖通空调系统能源使用相关的建筑自动化控制系统设定参数，同时维持使用者的舒适度。这些工具既可以读取建筑自动化系统的数据，也可以将优化的设置点自动发回到建筑自动化系统中，以基于记录的能源用量和能源价格信号等数据，来调整控制参数。（Kramer, Lin, Curtin, Crowe, & Granderson, 2020）

图 13：基于监测的调试过程



来源：(Kramer, Lin, Curtin, Crowe, & Granderson, 2020)

下表总结了能源信息系统、故障检测和诊断工具，或者自动系统优化技术可提供的应用以及常见的相关分析方法方法和数据要求。

表 8：能源信息系统、故障检测和诊断或者自动系统优化技术的应用总结

应用	适用的能源管理和信息系统类型	分析方法	常见的数据要求
时间安排	能源信息系统	负荷剖析	整栋建筑或者分项计量的能源使用量
		基础 - 峰值负荷比	
		热力图	
	故障检测和诊断	依赖工具	系统和设备状态：空气处理机组、暖通空调系统终端设备、冷却塔、冷水机组、锅炉；风机、泵
同时供热和制冷	能源信息系统	能耗特征	户外空气温度，整栋建筑或者分项计量的能源使用量
	故障检测和诊断	依赖工具	户外空气温度 暖通空调系统：供热、预供热和冷却盘管阀门开度；新风阀位置；终端设备：再热盘管阀门开度
新风使用量	故障检测和诊断	依赖工具	新风温度 暖通空调系统：混合空气温度、排风温度和设定点、回风温度、新风阀位置
空气侧设定点优化			暖通空调系统：排风温度和设定点、静压和设定点，区域供热和制冷温度和设定点
传感器故障			新风温度 暖通空调系统：排风、回风和混风温度；湿球温度或者相对湿度 区域：恒温器空间温度、二氧化碳 动力中心：热水、冷水和冷却塔冷凝水出水温度
组合优化	能源信息系统 / 自动系统优化	跨部门基准化分析	总楼面面积，整栋建筑或者分项计量的能源使用量
自动节约估算		节省的能源使用或能源成本	新风温度
持续的能耗异常检测		典型使用量 VS 实际使用量	持续的整栋建筑或者分项计量的能源使用量
峰值负荷管理		负荷剖析和负荷持续时间曲线	全楼宇电力需求

来源：(Kramer, Lin, Curtin, Crowe, & Granderson, 2020)

4.4.3 节能和温室气体减排潜力

研究表明整栋建筑能源消耗的 5% 到 30% 可归因于故障操作或者降级操作，其中一些可以使用故障检测和诊断工具辨识 (Kramer, Lin, Curtin, Crowe, & Granderson, 2020)。因此，我们假定使用建筑分析技术最多可以节省 20% 的能源——取决于相应建筑的实际状态。

案例研究一：澳大利亚阿德莱德机场¹⁴

阿德莱德机场使用先进的建筑分析技术，处理复杂的内部供热、通风和空调系统的低效问题。在部署了能源管理和信息系统之后，机场有望实现一年 600 吨二氧化碳当量和 933MWh 的节约，投资回报期仅为 7 个月。系统将继续通过机器学习等先进的控制算法，提高减排潜力，延长设备寿命周期。

案例研究二：支持气候适应和发展的社区安全行动项目 (CASCADE) 罗马 - 菲乌米奇诺机场和米兰 - 马尔彭萨机场¹⁵

在罗马 - 菲乌米奇诺机场和米兰 - 马尔彭萨机场执行的项目精确地找出了创新的解决方案，将现有的建筑自动化 / 建筑管理系统 (BAS/BMS) 与暖通空调系统的自动化故障检测和诊断系统融为一体，并与基于 ISO 50001 标准的能源行动计划挂钩。此解决方案发现两个机场都有巨大的节能潜力，可高达 20%。对菲乌米奇诺机场的一号航站楼来说，这代表每年可节省 363MWh 的电力、691MWh 的热能和 527MWh 的冷量，或者大约 90,000 欧元 / 年和 230 吨二氧化碳。

表 9：措施的关键信息——建筑分析

措施的关键信息——建筑分析技术	
投资成本：	年度成本：1.4 欧元 / 平方米（基准费用 + 年度劳工成本；中值 (Kramer, Lin, Curtin, Crowe, & Granderson, 2020)）
节能量：（热能）	20%
节能量：（电能）	20%
二氧化碳减排量：	20%
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 反映核心能源使用系统和设备的能效 加强沟通和培训，以提高员工的节能意识 与可能的不同环境管理系统相融合（ISO14000、ISO 50001） 提高用户的舒适度
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 与使用不同程度分析得出的真实成本和潜在节约相关的信息有限 将数据整合到能源管理和信息系统中的问题 对能源管理和信息系统产品之间的差异缺乏了解 缺少适当的既有计量

¹⁴ https://www.adelaideairport.com.au/corporate/wp-content/uploads/2020/06/090-NJ01311_MP_Final_-Digital_FA.pdf

¹⁵ 来源：<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/cascade-reducing-energy-use-airports>

4.5 可持续性评级系统

4.5.1 基线情况和能耗说明

此措施的基线情况是一个未应用可持续性评级系统的机场。

4.5.2 建议改进措施

除了声名遐迩的能源管理体系（ISO 50001）和环境管理体系（ISO 14001）之外，还存在各种国际公认的可持续性评级系统。这些系统大多针对建筑、建筑综合体和行业，部分也针对城市。此章节简要介绍了目前主要的可持续性评价系统。

这些理念包括与能源以及温室气体相关的主题，但往往会更加深入（参见下图）。对机场而言，机场碳排放认证（ACA）也制定了具体的计划。机场碳排放认证是一项全球性的机场行业碳管理标准。此项认证由国际机场理事会（ACI）全权负责。¹⁶ 一个独立的计划管理者通过申请流程为机场提供引导。通过认证有助于更好地理解机场排放，以实现量化减排，促进最佳实践的交流，加强机场行业所采取气候行动的公信力。（Airports Council International, 2021）

鉴于此项认证通常用于碳足迹分析，所以我们考虑了所有三个范围（来自受机场控制来源、来自购买的电力以及来自于机场活动相关的其他来源）的排放（参见图 14）。

¹⁶ <https://www.aci-europe.org/industry-topics/industry-topics/28-airport-sustainability.html>

表 10：可持续性评级系统概述，来源：自制表格

可持续性评级系统 / 主页	评级类别	主要评级环节	评估	范例
 BREEAM 英国建筑研究院 (BRE) 的环境评估方法。 http://www.breem.org	<ul style="list-style-type: none"> 突出 (前 1% 的非住宅建筑) 优秀 (前 10% 建筑的最佳实践) 很好 (英国前 20% 建筑的良好实践) 好 (前 50%) 通过 (前 75%, 标准良好实践) 未分级 	能源、材料、健康和福祉、管理、土地使用和生态、污染、创新、交通和水	由特许评估员按照质量评估流程进行评估	奥斯陆 (Oslo) 机场的“优秀”评级 https://avinor.no/en/corporate/airport/oslo/development/this-is-new/miljovennlige-valg 所采取的具体措施包括安装木桁屋顶以取代金属屋顶、使用被动节能标准的建筑、扩建火车站以增加公共运输以及使用污水和雪作为能源。 ¹⁷
 LEED 能源与环境设计先锋 https://www.usgbc.org/leed	<ul style="list-style-type: none"> 白金级 金级 银级 通过认证 	能源和大气、可持续场地、室内环境质量、材料和资源等。	由绿色建筑认证协会签发证书。	美国的多个机场，例如哈茨菲尔德-杰克逊亚特兰大国际机场 (Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport)、纳什维尔国际机场 (Nashville International Airport) 或者西雅图-塔科马国际机场 (Seattle-Tacoma International Airport) (https://www.usgbc.org/articles/leed-certified-airports-help-provide-safe-and-sustainable-travel)。
 绿色标志 (Green Mark) 由新加坡建筑管理学院 (BCA) 发起 https://www.mnd.gov.sg/our-work/greening-our-home/bca-green-mark	基于建筑的环境可持续性准则 <ul style="list-style-type: none"> 金级 超金级 白金级 	能效 (占 61% 的比重)，之后是环境保护	新加坡建筑管理学院和开发团队之间的过程	---

¹⁷ 回收乌伦萨克尔 (Ullensaker) 北部、南内斯塔 (Nannestad) 和奥斯陆机场的污水，用于供热。前一年冬季的雪将被用于为北码头制冷。机场有自己的区域供热系统，使用环保型热泵技术进行区域供热。

 <p>BEAM Plus 建筑环境评价方法</p> <p>https://www.hkgbc.org.hk/eng/beam-plus/beam-plus-new-buildings/index.jsp</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 铜级 • 银级 • 金级 • 白金级 <p>(针对新建筑、既有建筑和内装采取不同方案)</p>	<p>能源使用、现场方面和室内环境质量</p>	<p>由独立的评估人和 BEAM Society Limited 评估</p>	<p>机场被归类为特殊建筑（有限制的访问），可能遵守特定的指南。 https://www.hkgbc.org.hk/eng/news-events/news/2016/20160930.jsp。</p>
 <p>能源之星 (Energy Star) 由美国环境保护局 (US Environmental Protection Agency) 建立</p> <p>https://www.energystar.gov/</p>	<p>产品和建筑评级 评分为 75 或更高的商业建筑</p>	<p>---</p>	<p>能源之星 (Energy Star) 经理</p>	<p>此评级是针对具体建筑，而非机场等大型综合体。机场的范例包括区域内的具体建筑或酒店。 https://www.energystar.gov/buildings/reference/find-energy-star-certified-buildings-and-plants/registry-energy-star-certified-buildings</p>
 <p>机场碳排放认证 此项认证由国际机场理事会 (ACI) 全权负责。</p> <p>https://www.aci-europe.org/industry-topics/industry-topics/28-airport-sustainability.html</p>	<p>六级认证，对应不同的目标水平</p>	<p>一级 筹划：高级管理层的减排政策承诺、碳足迹的开发，包括范围 1 和 2 二级 减少：加上碳减排目标的设定以及实现目标的碳管理计划的开发 三级 优化：加上碳足迹，包括范围 3，制定利益相关方参与计划 三级 +：三级加上抵消剩余排放量 四级 转型：加上绝对节能的政策承诺、更全面的足迹和碳管理计划以及利益相关方伙伴计划的制定</p>	<p>独立的计划管理人员</p>	<p>一级：普吉岛国际机场 二级：巴林岛国际机场 三级：深圳宝安国际机场 三级 +：拉吉夫·甘地机场 四级：克赖斯特彻奇机场</p>

基于数据：(Airports Council International, 2021) 和：(Ove Arup & Partners Ltd., 2014)

下图总结了机场的典型排放源。

图 14：机场的排放源



来源：(Airports Council International, 2021)

机场碳排放认证：旧金山国际机场

旧金山国际机场每年处理大约 5700 万旅客，达到了三级（优化）标准。其提高可持续性的主要倡议包括三个主要项目。第一，他们将六辆 Proterra Catalyst E2 型号的全电动巴士投入运行，这些车辆可以在 4.5 个小时之内充满电。因其燃料价格和维护成本更低，所以预计每年可以节省 450 万美元，减少 10,500 吨的二氧化碳排放。第二，因为采用了随身行李系统、动态玻璃、辐射式暖通空调系统以及可进行热量回收的人行道，通过 Fitwel 认证¹⁸的哈维·米尔克（Harvey Milk）1 号航站楼的能耗仅为其前身的三分之一。第三，机场执行了零排放车辆就绪性研究，且正在进一步推进此主题。(Airports Council International, 2021)

¹⁸ Fitwel 是致力于为所有人缔造健康®的世界顶尖的认证体系

4.5.3 节能和温室气体减排潜力

与其他具体的节能 / 温室气体减排措施不同，落实可持续性系统本身并不会带来直接的节能。但是，对过程进行全面、结构化、定期的分析可以实现连续的改进。取决于相关计划的具体要求，需要实现预先设定目标，才能获颁特定的证书。

表 11：措施的关键信息——可持续性评级系统

措施的关键信息——可持续性评级系统	
投资成本：	取决于建筑的系统和规模，大约 16,000 欧元
节能量：（热能）	不详（假设 10-20%）
节能量：（电能）	不详（假设 10-20%）
二氧化碳减排量：	不详（假设 10-20%）
优点：	能源和资源效率各方面的全面分析 后续升级改进的动力 一目了然的评级
缺点：	实施困难

4.6 地面支持设备的电气化（行李和旅客运输）

4.6.1 基线情况和能耗说明

地面支持设备（GSE）指的是机场通常是停机坪¹⁹上配备的支持设备，用于为落在地面上的飞机提供服务。此种设备的作用通常涉及地面动力操作、飞机移动以及货物装载 / 旅客登机操作。（Wikipedia, 2022）

地面支持设备（GSE）指的是负责行李和旅客运输，飞机滑行和加油的所有设备和车辆。大型机场运行的空地地面支持设备（GSE）和车辆会多达数百台。（AECOM, 2020）

除了无动力地面支持设备（手推车、轮档、飞机三脚千斤顶以及飞机楼梯）以外，还存在以下类型的地面支持设备：

- 加燃料器：独立的加油车，或者消防车或推车；
- 拖车或牵引车：用于移动所有无法自行移动的设备，包括行李推车、可移动空调机组、空气启动机和厕所推车；
- 地面动力装置：能够为地面上停放的飞机提供动力的车辆；
- 巴士：用于将人员从一个航站楼移动到另一航站楼或者飞机；
- 行包箱装载机：也称为装货机或者“K型装载机”，用于将行包箱和托盘装入飞机或者从飞机上卸下；
- 运输车：装卸行包箱、运输货物的货物平台；
- 空气启动装置：用于启动飞机发动机的装置；
- 非饮用水运水车；
- 厕所服务车；
- 餐饮车；
- 带式装载机：配有用于往飞机上装卸行李和货物的传送带的车辆；
- 旅客登机台阶 / 楼梯；
- 后推拖车或牵引车：将准备离开的飞机推离大门。这些拖车动力非常强大，因为有巨大的发动机，所以有时被称为带轮子的发动机。后推拖车也可以用于在各种情况下拉动飞机，例如拉入飞机库；
- 除冰 / 防冰车辆；
- 飞机救援和消防设备。（Wikipedia, 2022）

此章节详细讨论了巴士、拖车和牵引车，因为几乎所有机场都会用到这些。

地面支持设备通常使用柴油或汽油燃料，这些占到了机场排放中的很大一部分，包括二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）、硫氧化物（SO_x）和颗粒物。（AECOM, 2020）。

¹⁹ 机场停机坪、停机线、活动舷梯或飞机跑道是飞机停放、装卸、加油、登机或者维护的机场区域。（维基百科定义）

举个例子，零坡度情况下，柴油巴士的典型燃料消耗量如下所示。

表 12：柴油巴士的燃料消耗

巴士类型	区域	交通流量			德国的平均值
		自由车流	密集车流	走走停停	
		升 /100 公里	升 /100 公里	升 /100 公里	
巴士车辆总重 < 15 吨 (例如中巴车)	城市	21.8	30.6	39.2	29.9
	陆路	23.0	23.5	34.1	23.0
	平均	22.8	30.2	38.7	27.2
巴士车辆总重 > 15-18 吨 (例如标准巴士)	城市	28.7	43.1	55.6	42.0
	陆路	29.3	31.3	48.1	29.5
	平均	29.2	42.5	54.9	37.0
巴士车辆总重 > 18 吨 (例如多车厢巴士)	城市	36.3	54.0	60.8	52.5
	陆路	37.5	41.0	56.5	37.8
	平均	37.3	53.3	60.4	46.6

来源：翻译自 (Schmied & Mottschall, 2014)

因此，对于中等大小、无需远行、仅在机场内进行非常短距离行驶的巴士，我们可以假设其数值大约为 40 升 /100 公里或者 400kWh/100 公里。

4.2.2 建议改进措施

使用化石燃料的地面支持设备技术可能被电动地面支持设备 (eGSE) 技术所取代。这些技术提供了使用可再生燃料的更清洁的替代方案，当使用可再生能源供电时，最多可减少 100% 的排放量。实际的温室气体减排取决于实际的电力构成 (包括太阳能光伏和电池蓄能；源自电网的可再生电力或者废弃物转制的能源)。(AECOM, 2020)

除了潜在的温室气体减排以外，燃料转换还能提供进一步的优势，例如：

- 改进当地的空气质量和降低噪音；
- 电动机的寿命长，维护成本低；
- 车辆可用作本地化的电池；
- 采用可再生能源供电时，范围 1 和 2 的排放减少；
- 运行排放减少——柴油发动机要花费时间预热，大多数地面支持设备都是短距离运行且会多次停靠，会造成过多的废气；(AECOM, 2020)

需要特别关注一个事实：充电的间隔时间必须与机场的运行时间相匹配。此外，考虑到整体的需求高峰，充电次数可能受限，也许要用到固定式蓄电池装置。

存在不同类型和规模的电动地面支持设备。例如，永恒力（Jungheinrich）的产品系列提供了一些范例²⁰。这些产品采用最先进的电池（目前为锂离子技术），可实现能耗的进一步优化。

下图展示了牵引力分别为 28 吨和 10 吨的牵引车。

图 15：机场使用的牵引车的照片（左：28 吨牵引车 EZS7280；右：10 吨牵引车 EZS 570=1000）



来源：永恒力（Jungheinrich）

以电动设备取代化石燃料设备实际能够节省多少终端能耗，取决于被取代的设备。在总体上，这可能与以电动车取代化石燃料车的情况类似。粗略计算，燃料（柴油）消耗量（单位为升）乘以系数十，就可以得到相应的消耗量（单位为 kWh）。可以假设节省燃料（终端能源）的比例在 30% 到 80% 之间。以上述柴油巴士的 400kWh/100 公里和电动巴士的约 100kWh/100 公里的数据计算，（NFZ-Messe, 2020）我们得出的当量净减少比例为 75%。

实际的温室气体减排取决于被取代燃料的排放系数（柴油大约为 2.64kg 二氧化碳 / 升）和所使用电力的来源。若使用可再生能源电力，温室气体减排可能高达 100%；若使用电网电力，节能量也可能为负。按绝对值计算的数字也取决于实际的运行小时数 / 公里数。举个例子，从柴油牵引车转变为锂离子叉车，每年每台牵引车可节省 220 欧元。²¹

²⁰ 产品系列和特征的范例：<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/804858/58097ff68d15870dea60a75a51b82797/ezs-brochure-en-gesamtprogramm-schlepper-pdf-data.pdf>

²¹ 永恒力（Jungheinrich）的计算：2022 年 2 月 21 日澳大利亚永恒力提供的信息，比较了 EFG 320（叉车）和 DFG 320，假设每升柴油 1.5 欧元和 1000 个运行小时数。

斯图加特机场改用电动地面支持设备

斯图加特机场是一个比较小的机场，每年处理 36,000 吨的航空邮件和货物，2018 年开始改用电动地面支持设备。首先，机场采购了零排放的电池供电技术，用以处理旅客和行李在停机坪上的移动。2019 年，机场在货运部门也推行了同样的改变，以零排放的戈尔德霍弗（Goldhofer）车辆取代柴油动力的货物牵引车。此外，自 2017 年起，机场就在用于消防或者冬季服务的特种车辆中使用了合成燃料，目前，还没有可用的电动替代品。与 2009 年相比，这种燃料切换措施的组合可使操作运营的温室气体排放量下降 80% 左右。（Randall, 2019）

图 16：斯图加特机场的电动地面支持设备



来源：(Randall, 2019)

布鲁塞尔机场改用电动巴士

布鲁塞尔机场的巴士车队改用三十辆电动巴士，在大门和飞机之间运送旅客。电动巴士没有任何（当地）二氧化碳排放，几乎没有噪音，预计每年可以节省大约 600 吨二氧化碳（每辆巴士 20 吨二氧化碳）。充电时间大约为 3 小时。巴士充满电可以行驶大约 150 公里。机场内的日常平均行驶距离大约为 12 公里。布鲁塞尔机场的总目标是在 2030 年之前，减少 40% 的二氧化碳排放（到 2018 年为止，它们离自己的目标还差 7%）。（AECOM, 2020）

4.6.3 节能和温室气体减排潜力

表 13：措施的关键信息——地面支持设备的电气化

措施的关键信息——地面支持设备的电气化	
投资成本：	取决于具体措施，标准尺寸电动巴士：550,000 欧元（在机场可能更少） ²² 牵引车（28 吨牵引力）：75,800 欧元（永恒力（Jungheinrich）EZS 7280） 牵引车（10 吨牵引力）：25,400 欧元（永恒力（Jungheinrich）EZS 770-1000） ²³
节能量：（热能）	一辆巴士的燃料（柴油）节省：取决于基线和日常公里数（12 公里，40 升 /100 公里）——1752 升，相当于 17,520kWh
节能量：（电能）	（一辆巴士的额外耗电量，取决于具体车辆），即 4380kWh
二氧化碳减排量：	最高为基线情况的 100%（针对以上范例：30 辆巴士 130 吨）
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料成本节省 • 如采用可再生能源电力运行，一次能源可大幅节省 • 节能型电动机，维护要求和运行成本更低、短距离行驶比柴油车辆更高效 • 噪音较少
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 充电策略需要考虑总体运行小时数和峰值需求 • 二氧化碳排放很大程度上取决于发电构成

²² <https://www.heagmobibus.de/de/faq-elektrobuse#6667>

²³ 2022 年 1 月 28 日从 Jungheinrich Austria Vertriebsges.m.b.H. 处收到的指示性价格

4.7 高效的行李处理系统

4.7.1 基线情况和能耗说明

大机场的年电力消耗量在 100 到 300GWh 之间。在机场航站楼（ATBs）内，行李处理系统（BHS）被归类为高能耗系统。行李处理系统中，输送设备是主要的能耗者（55% 到 70%）。(Enter, 2018)

行李处理系统大都是传送带系统，具有分拣行李并将行李运输到机场内正确目的地的功能。取决于机场的规模，传送带系统可能长达数千米。通常来说，传送带轨道由数百个小型电动机推动。行李处理系统最高占到机场总电力消耗量的 20% (AECOM, 2020)。使用上述数字计算，这意味着每年的电力消耗量为大约 20 到 60GWh。

4.7.2 建议改进措施

存在各种提高能效的选择，包括更高效的传送带、多段输送系统和更轻的行李托盘等。通过自动化的应用以及全面控制和监测系统的适应性变化，包括运行和空闲时间的优化，可以实现进一步的优化。进一步的发展应该是最终完全取代传送带，改用智能的自动驾驶汽车。用于此目的的自动驾驶汽车的范例如下所示。

图 17：自动驾驶汽车



来源：(ThorDrive, 2021)

最近，ThorDrive 在辛辛那提 / 北肯塔基国际机场（CVG）展示了其机场地面支持设备的无人驾驶技术。其所采用的技术使用独特的 LED 信号传递系统，证明牵引车可自主运行。

使用摄像头视觉探测颜色和物体，然后将其归类。光探测和测距（LiDAR）探测周围环境，使用激光形成区域的 3D 图像。软件使用这些 3D 图像堆栈，对遇到的物体做出适当的回应。(ThorDrive, 2021)

ThorDrive 在鹿特丹海牙机场实现了智能自动驾驶汽车的其他应用。2018 年开始的试验阶段已于 2019 年顺利完成，目前正在机场进一步推广。据报道，与传统的传送带系统相比，它最多可以实现 50% 的节能。(AECOM, 2020)

阿布扎比国际机场新建的米德菲尔德航站楼综合体应用了最先进的传送带系统²⁴。传送带的长度为 25 千米，每小时可以处理 19,200 个箱包。在节能量方面，传送带的电力需求可以从 520 瓦 / 米降低到 124 瓦 / 米，意味着相比传统方式实现了大约 75% 的节能。报告的投资成本额大约为 10,500 欧元 / 米。(AECOM, 2020)

在英国的斯坦斯特德机场，行李处理系统的升级包括购买更高效的传送带和滑道，使用 180 辆自动推车。系统升级也会导致系统的全面自动化，投资成本约为 8300 万欧元 (Turner, 2021)。

²⁴ 根据最新信息，航站楼尚未投入运行。(https://simpleflying.com/abu-dhabi-airport-contract-canceled/)

4.7.3 节能和温室气体减排潜力

通过使用更高效的组件，尤其是使用线性同步电动机取代标准线性电动机，可以部分实现节能。使用优化的控制系统，可实现进一步的节能。拣选分配计算机系统（SAC），或者监控与数据采集（SCADE）等高级控制系统，与可编程控制器（PLC）系统配合应用。

图 18：行李控制系统



来源：(BEUMER Group, 2022)

高效的行李处理系统会带来能效改进，提高行李处理速度，减少电动机怠速工作时间，还可以融入更进一步的安全检查和行李监测。因为使用了模块化系统，备件的进一步调整和提供也变得更加容易。使用传输监控工具，可以全面了解延迟进入、需要加速转移的行李，从而将航班之间的间隔时间降至最低。(BEUMER Group, 2022)

与所有的电力相关措施一样，实际的温室气体减排效果严重依赖于电力的来源。

表 14：措施的关键信息——高效的行李处理系统

措施的关键信息——高效的行李处理系统	
投资成本：	8300 万欧元（系统升级，购买 180 辆自动推车）(Turner, 2021)，最先进的传送带：10,500 欧元 / 米 (AECOM, 2020)
节能量：（热能）	-
节能量：（电能）	大约为传统系统的 50%
二氧化碳减排量：	9,000 吨二氧化碳，针对基线消耗量为 30 吉瓦的系统
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 全面系统优化 提高行李的处理速度、安全和控制（针对贯彻全面监控理念的系统） 减少电动机的怠速工作时间 更凉快的运行环境，因此有降低空调负荷的潜力
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 高投资成本 升级过程中的潜在问题（持续运行的并行双系统）

4.8 动力中心（热电联产、三联供）

4.8.1 基线情况和能耗说明

机场通常配有多个锅炉，为不同区域提供用于供热的水和生活热水。此外，大多数机场都有多个制冷机组，为不同区域供应冷空气。机场的规模决定了能源需求通常非常高，可能与一个小城镇的需求不相上下。

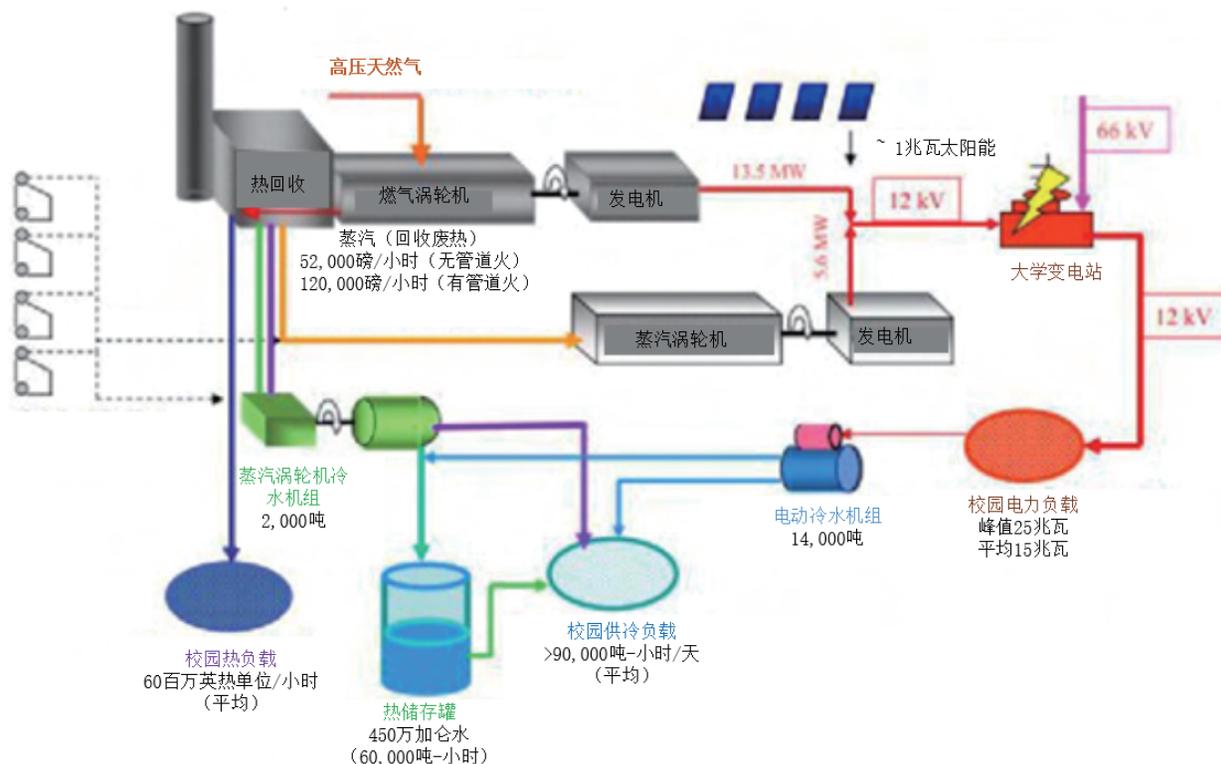
4.8.2 建议改进措施

动力中心(CUP)是一个可以替代多个分散式系统使用的集成化系统。动力中心为建筑提供电力、冷热水和蒸汽。其设计目的是通过规模经济实现效率最大化，从而大幅节省能源和运行成本。

动力中心的核心是热电联产机组或者三联供机组。热电联产机组使用天然气等能源生产电力，使用涡轮机排气给水加热，用于热分配；这一过程也被称为热电联供。三联供机组也能完成同样的工作，但还有部分热量被用于吸附式制冷机，以供应冷水。此机组可供应电力、供热和制冷。

下图展示了具有三联供功能的动力中心的布局。其中包括燃气涡轮机、用于供热和供冷的热回收装置，以及太阳能光伏设备，在可行的情况下，可以集成到动力中心中。燃气涡轮机排出的热量被回收并用于为蒸汽涡轮机和冷水机组提供动力，为现场建筑供热和制冷。下图是一个三联供动力中心布局的案例。

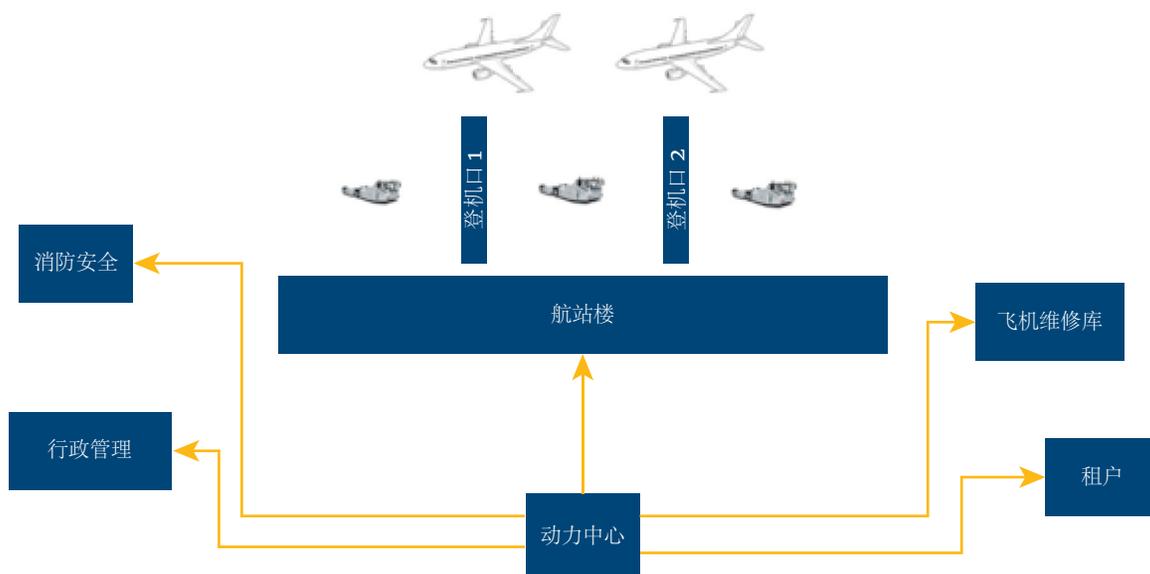
图 19：三联供中央动力机房的主要组成部分



来源：(Chandan & Brauwer, 2012)

新的中央动力机房可用于提高弹性，以应对停电和与气候变化相关的极端温度。尽管目前市场上的热电联产/三联供系统在很大程度上是基于电力和天然气，但通过使用可再生能源和生物质为动力中心提供动力，也有机会进一步减少排放量。针对大型机场，动力中心也提供了一个具有吸引力的选择，可实现更高效、独立的供能。典型的应用如下图所示。

图 20：通过动力中心的能量转移



来源：(ICAO, 2019)

2010年，洛杉矶国际机场（LAX）启动其动力中心项目。“动力中心的金属板和玻璃立面后有 20,000 冷吨的制冷能力，通过该动力中心为洛杉矶国际机场的所有八个航站楼供能，中心机房中包括电动离心式冷水机组、热回收锅炉、一次和二次冷水泵、冷却塔和热能储存机组。有一个由燃气涡轮机驱动的发电机组成的 8.4 兆瓦热电联产机组，提供电力[……]其排出的‘废热’也用于供热，并为其他蒸汽驱动的冷水机组提供动力。”(Arup, n.d.)

另一个有趣的项目是澳大利亚埃德蒙顿增设 4.2 兆瓦热电联产机组的项目。此项目总投资成本约为 980 万欧元，而其预计每年可节省 712,000 欧元。预计的年减排量在 7,000 吨到 8,000 吨二氧化碳当量之间。这种改造可大幅减少排放量（约 20%），投资回收期不到 14 年。(Atco, 2021)

4.8.3 节能和温室气体减排潜力

落实动力中心的节能主要来自于更高效的能量生产和储存过程。热电联产和三联供也确保了天然气的最大能量生产效率。

在同时需要热能和电能的情况下，热电联产总是理想的选择。动力中心可能专门用于满足机场的需求，因此能够在最高效的负荷水平下运行。大型系统通常比小型系统更加高效，因此动力中心通常比分散式锅炉和空调系统效率更高。

成本和能源的节省严重依赖于机场、能耗模式以及当前的能量生产与分配方式。如果机场拟建造新的航站楼，那么动力中心是一个可行的选择。但如果只是为了替换现有的暖通设备对机场进行改造而修建动力中心，这在经济上是不可行的。

表 15：措施的关键信息——动力中心

措施的关键信息——动力中心	
投资成本：	严重依赖于动力中心的容量和能量生成的方式。
节能量：（热能）	相比传统系统节省 ~25%，取决于机场的规模。
节能量：（热能和电能）	相比传统系统节省 ~25%，取决于机场的规模。
二氧化碳减排量：	最高 100%，取决于所选择的能源
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 提高应对电网故障的弹性 • 减少维护
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 高投资成本 • 长投资回收期 • 往往要求专门的动力中心建筑 • 可能需要专业维护

4.9 太阳能光伏和储能

4.9.1 基线情况和能耗说明

基线情况是机场目前相应的发电构成。电网排放系数或者机场电力构成的排放系数，确定了通过应用可再生能源可实现的二氧化碳和一次能源的潜在节约。各个国家的电网排放系数可以在 IGES 数据库中查找。

4.9.2 建议改进措施

切换到碳密集度较低的发电技术能够大幅减少一次能源消耗。光伏（PV）系统是机场最常用的可再生能源系统之一。全世界范围内，有超过 100 个机场安装了光伏系统。

机场有可以安装太阳能板的巨大水平面，因此非常适合安装光伏系统——这些区域很少用于其他目的，包括（航站楼）建筑、未投入使用或其他非生产性的机场物业。有些机场已经将其利用的太阳能与机场的出行理念（送电到地面车辆、或停车场区域内电动车辆的充电站）联系在一起。

过往这些年，光伏系统的成本大幅下降，已经成为一个具有经济吸引力和技术可行性的选择（ICAO）。在很多情况下，各国可以通过不同的激励措施提高此种系统的可行性。

除了将动力机房接入电网的实际可能性，在机场规划阶段必须考虑的重要限制性因素包括太阳眩光和一般运行安全影响方面的挑战，这会因具体位址及所提议项目而不同。需要在国家和当地层面上，评估当地利益相关方允许和接受的前提条件。

根据 ALLPLAN 的经验，以下主要关键事实可以用作初步指南：

- 安装：屋顶安装或者地面安装；采用屋顶安装时，通常是东西向安装，倾角大约为 10°；
- 空间要求：大约 8 平方米 / 千瓦_{峰值}（仅模块大约 5 平方米，对于更大的区域，可使用 70-80% 的面积）；
- 能量输出：1000-1500kWh / 千瓦_{峰值}（取决于所在地；可通过光伏地理信息系统（PVGIS）或者太阳能图集确定特定所在地的初步估计量）；
- 投资成本：600-800 欧元 / 千瓦_{峰值}（面积更大则此数值可能更低）

使用电池系统有助于在较高供应、较低需求时段储存多余电力。应由规划专家确定光伏系统和电池储存的精确容量。规划考量事项包括：机场的基础负荷和峰值负荷、机场的进一步发展 / 扩建计划、基线电力成本、融合出行理念的 plan（例如改用电动车辆和车队）以及使用电力热泵生成热量的选择。相关机场如果在夏季需要制冷，太阳能光伏往往是一个非常吸引人的选择。此种情况下，制冷的峰值需求和太阳能电厂的峰值产量同时发生，可实现电厂潜力的最优利用。

²⁵ <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/china>

案例研究——维也纳机场的光伏发电

维也纳机场已经在飞机库、货物中心、办公园区、停车场的屋顶上以及旧污水处理厂内安装了光伏系统。目前，正在建造一个容量为 24 兆瓦_{峰值}的地面安装的光伏发电厂，每年将交付 30GWh 的电力，满足机场大约三分之一的用电需求。总计将通过光伏发电满足大约 30% 的总电力消耗 (Vienna International Airport, 2021)。

图 21：维也纳的光伏发电



来源：<https://noe.orf.at/stories/3125754/>

4.9.3 节能和温室气体减排潜力

实际节能量和温室气体减排量取决于基线能源供应和电力来源。（大型）光伏发电厂的典型规模可满足大约 20% 的基线电力消耗。基于适用的电网排放系数，计算温室气体减排量。

表 16：措施的关键信息——光伏发电和储存

措施的关键信息——光伏发电和储存	
投资成本：	光伏：600-800 欧元 / 千瓦 _{峰值} ， 储存：200 欧元 / kWh（储存，不包括安装）（ALLPLAN 专家估算）
节能量：（热能）	-
节能量：（电能）	最高 100%（取决于光伏发电厂的规模）
二氧化碳减排量：	0.7kg 二氧化碳 / 旅客 ²⁶
优点：	光伏： <ul style="list-style-type: none"> 成熟技术 机场内无遮挡且未另作他用的空间有巨大潜力 越来越高的经济吸引力 可扩展性 包含出行和供热理念的选择 储存： <ul style="list-style-type: none"> 峰值电力消耗的减少 提高供能弹性 预期会实现进一步改进和经济吸引力
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 前期投入的成本相对较高 储存装置的巨大空间要求

²⁶ 假设太阳能光伏发电 20%、排放系数为 0.6 吨二氧化碳 / 兆瓦时

4.10 围护结构保温优化

4.10.1 基线情况和能耗说明

墙体、屋顶、地基和地板占据了建筑最大的外部面积，造成了建筑的大部分热损耗。适当的隔热可减少寒冷天气下的热损耗，隔绝炎热天气下的过量热，有助于维持舒适的室内环境。保温材料有很多种类型，其中某些类型更适合不同的应用。表 17 列示了各种保温类型以及与其性能和应用相关的更多信息。

表 17：不同保温类型的特征和应用

热性能水平	最高		高	中	低	应用/评论
	0	0.01	0.02	0.03	0.04	
真空绝热板 (VIP)	■					欧盟和北美正在研究如何使用胶合剂在发泡聚苯乙烯 (EPS) 或挤塑聚苯乙烯 (XPS) 中嵌入真空绝热板，作为外墙外保温系统的一部分，以避免紧固件贯穿。高材料成本。
气凝胶		■				对于高度封闭空间和热桥，例如墩柱和墩帽。正在对内壁板进行内部安装、以减少劳动力、降低系统层面成本的案例研究。高材料成本。
聚氨酯板和喷涂			■			在空间有限的情况下，广泛应用，以实现增值性能。屋顶板、教堂屋顶结构、墙面覆盖层、结构保温板、地下室、楼板边缘以及空腔喷射泡沫也提供气密方面的好处。更高溢价，有很多具有成本效益的应用。
挤塑聚苯乙烯 (XPS)			■			在空间有限的情况下，广泛应用，以实现增值性能。屋顶板、墙面覆盖层、结构保温板、地下室和楼板边缘也提供气密方面的好处。中等溢价，有很多具有成本效益的应用。
发泡聚苯乙烯 (EPS)				■		墙面覆盖层以及外墙外保温系统、结构保温板和保温混凝土模板的主要选择，以及内部应用。中等溢价，有很多具有成本效益的应用。
玻璃纤维				■		广泛用作腔保温，单独使用或与喷涂泡沫结合使用 (“flash and batt”)，以提供更可负担但密封的应用。用于阁楼中，通过空间限制性较低的应用，通常是成本较低、性能较低的应用。
石头纤维				■		在阁楼中用作空腔，通过空间限制性较低的应用，通常是成本较低、性能较低的应用。
纤维素				■		在阁楼中用作空腔，通过空间限制性较低的应用，通常是成本较低、性能较低的应用。掺杂了相变材料的新配方，通过防火等级测试，但市场非常有限。
木质纤维、亚麻、大麻、棉、其他					■	各种各样的保温应用，通常较低成本、性能较低。

注：W/mK = 瓦/米×开尔文；EIFS = EIFS 外保温饰面系统；SiPs = 结构保温板；ICFs = 隔热混凝土模板；PCM = 相变材料。

来源：(IEA, 2022)

随着能源成本的不断提高以及限制排放水平紧迫度的与日俱增，成本更高、效率更高的隔热变得越来越有吸引力。一定要记住成本中的很大一部分与保温材料本身无关，而是与保温相关作业有关。保温虽然花费不菲，但可能会产生长远的好处，因为它可以避免未来的重复作业。所有这些都表明：针对机场航站楼等大型建筑，需要进行精确的生命周期成本计算 (LCC)。确定最优保温水平的主要驱动因素是气候、能源成本、供热系统类型和效率，以及保温安装的成本。

在比较不同能效措施时，国际能源署将“先进的围护结构”列为建筑部门的最高优先级事项。(IEA, 2022)

4.10.2 建议改进措施

可保温的建筑区域是墙体、屋顶、地板和地基。现有建筑墙体和屋顶的保温相对容易，而出于显而易见等原因，地基应该保持其原样。

外墙保温是欧盟以及大多数发达国家的常见做法。理想情况下，墙体的保温是在建筑物上应用保温层，但应该在应用防水板覆层之前完成。对于欧洲的最新建筑以及北美服务类的建筑，一种很常见的方法是增加外保温饰面系统（EIFS），也称为外墙外保温系统（ETICS），即在灰泥或胶凝类型的饰面之下嵌入保温层。（IEA, 2022）

外保温可用于既有建筑。这种做法非常有效，但改造时要花费高昂的成本。通常只有在与其他措施结合使用时，例如减少空调设备，这种做法才具有经济可行性。应用于既有建筑时，可用的选择相当有限，通常是使用外保温饰面系统。外保温饰面系统通常是直接粘附到现有墙体上，但取决于墙体的材料，也可能要用到墙体螺钉。

屋顶可以分为两类：斜屋顶和平屋顶。机场建筑通常选择平屋顶。平屋顶有两类，保冷屋顶和保暖屋顶。保温的位置决定了所使用的类别。保冷屋顶将保温层置于椽子之间，而保暖屋顶的保温层位于结构层之上。保冷屋顶现在不太常见，因为有更多结构部件遭受到热效应，保温层可以提供保护。

可以在既有屋顶上增加保温，就和墙体一样，生命周期成本（LCC）将决定最优厚度和材料。因为检修门或者护墙的存在，其厚度可能受限。在改造既有屋顶时，建议确保气密性具有高优先级。

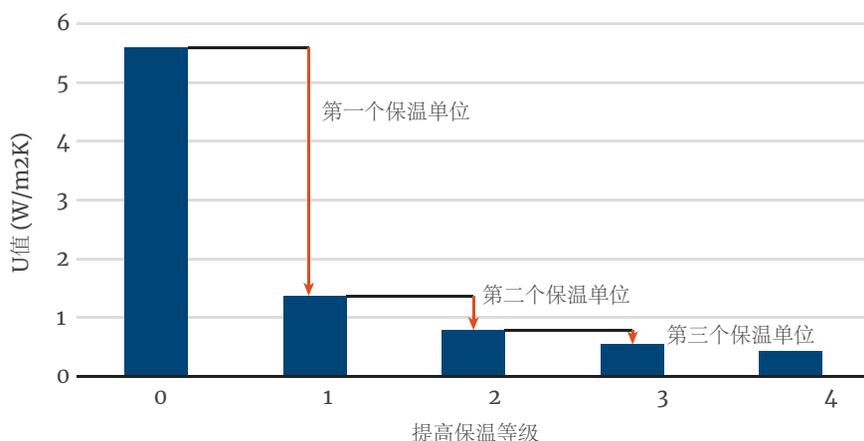
地基通常也要在外面做保温，与墙体很像。与炎热的气候相比，在较寒冷的气候条件下，隔绝土壤的保温更为重要，因为这里的土壤通常一整年都是冷的。对地基之上的地板进行保温改造要容易得多，这是寒冷气候条件下的建议措施。因为此种情况下隔汽和隔水要重要得多，所以保温往往并不是最优的做法。

建议集中精力处理屋顶和墙体，尤其是针对既有建筑。在需要改造时，屋顶和墙体可以提供更容易、更有效的改造解决方案。两个区域都要求基于生命周期成本确定最优保温水平，当然，也需要满足相关施工标准，如安全标准。

4.10.3 节能和温室气体减排潜力

建筑任何部分的保温都会随着保温等级的提高而收益递减。对不同规模的保温进行比较后发现，数量翻倍并不会带来节省量的翻倍。

图 22：保温水平提升的收益递减



来源：(IEA, 2022)

一项基本原则是在建造建筑或者改造既有建筑之时，应基于生命周期成本，落实合理的最高级别的保温。与总安装成本相比，安装更好保温的边际成本往往较低。如果安装了最低等级的保温，可能带来直接的效率提升，但无法实现巨大的节约，未来的改造也可能不具备成本效益。在新建或者深度改造期间，考虑到整个系统的影响，降低暖通空调设备的容量，也可以基于生命周期成本评价，合理采用更高等级的保温。(IEA, 2022)

表 18：措施的关键信息——建筑围护结构的保温

措施的关键信息——建筑围护结构的保温	
投资成本：	高度依赖于保温的材料和厚度，以及建筑本身。可以选择保温材料和厚度，以适应现有预算。
节能量：（热能）	取决于当前的保温和投资，通常在 30%（升级既有保温）和最高 90%（之前没有保温）之间变动。
节能量：（电能）	取决于当前的保温和投资，通常在所需制冷能量的 20%（升级既有保温）和最高 50%（之前没有保温）之间变动 (Ozel, 2013)。
二氧化碳减排量：	各有不同；因为暖通空调系统的原因，通常在 15% 到 65% 的二氧化碳排放量之间变动。
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 没有任何可能发生故障的活动件，可提高能效 有助于在建筑内实现更舒适的气候 记载详细且被广泛接受的技术 可以选择参数以实现与项目的最优匹配
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 如果操作不当，保温板之间的狭小空间可能吸收湿气，从而导致褪色以及对建筑的潜在破坏。 要求专家计算以避免过度投资或者投资不足

4.11 通过建筑设计比选实现的节能

4.11.1 基线情况和能耗说明

除了建筑围护结构之外，建筑师也可能通过多种不同方式影响建筑的能源需求。建筑通过辐射向周边区域的能量转移主要受到建筑总表面积、表面 U 值以及与周边区域的温差的影响。

建筑的实际布局可能有助于减少供热和制冷负荷，因为它定义了建筑的总表面积。除了建筑的总表面积之外，窗户也起到特别的作用，因为太阳辐照可能部分穿透窗户，加热内部空间。朝向、遮阳以及窗口区域的面积对维持恒定温度所需的能量有着强烈影响。

4.11.2 建议改进措施

建筑朝向

关于被动式太阳能技术的使用，大多数用户指南和手册都建议建筑面向南方，但越来越多的人达成了一项共识：最佳的选择是让建筑以 20 到 30 度的偏角面向南方，以将能源使用量降至最低。在此背景下，“面向”指的是建筑最大一侧的朝向。下表展示了基于建筑朝向和形状的节能变化。在此情况下，朝向是南、东和西，当朝向为南时，可实现最高节能²⁷。

朝向的另一个重要方面是玻璃表面的方向。玻璃表面主要是由窗户构成的，在较寒冷的月份，可以利用日光为建筑供热。

表 19：不同建筑朝向的能耗比较

	三个朝向的能耗 (kWh/年)					
	南	%	东	%	西	%
供热	186	0	231	24	219	18
制冷	281	0	286	2	369	31
总计	467	0	517	11	588	26
最高温度 (°C)	26.4		26.6		27.0	

来源：(Pacheco, Ordóñez, & Martínez)

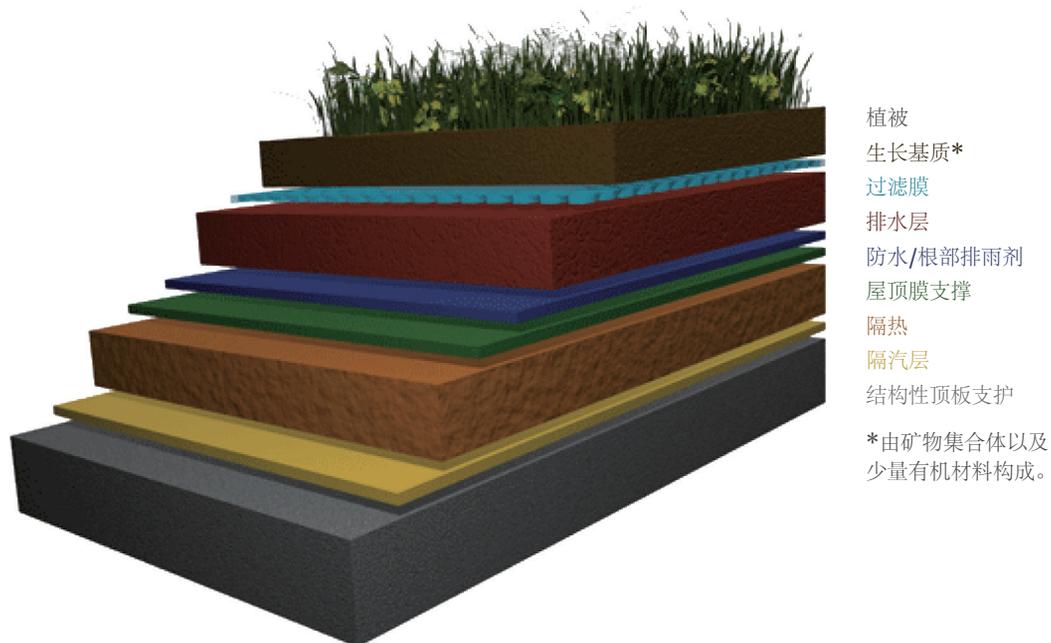
当地的地理条件也会发挥作用。例如，山脉可能严重影响特定时间段的日光直射量。(Pacheco, Ordóñez, & Martínez)。

²⁷ 最佳朝向是以 20 到 30 度的偏角面向南方，此处并未计算此角度。

绿色屋顶

“绿色屋顶”，即屋顶的植物，可大幅减少热吸收和热损失，从而减少能源需求。此外，它可以减少区域内的雨水径流和噪音污染。

图 23：绿色屋顶的一般结构



来源：(Services, 2022)

绿色屋顶可分为拓展型和密集型绿色屋顶。两种类别的主要差别在于土壤深度。拓展型屋顶的土壤层薄，因此只适合种植非常有限数量的植物。密集型绿色屋顶的土壤深得多，适合更多种类的植物。但是，密集型屋顶要求更多的专业设计知识，重量更大、成本也更高。

自然采光

可使用自然采光大幅减少照明负荷。自然采光与传感器和智能照明搭配，可以确保房间的充分照明，同时在阳光不够明亮的时间段，减少电气照明的使用。通过照明控制，可以在需要的时候使用电气照明作为辅助，无需全面启动所有照明设备。可以通过调光或者在特定亮度级别下启动一定数量的 LED 灯具，实现此目的。例如，早上太阳光照射为 500 勒克斯时，可能只须启动三分之一的 LED 灯具。之后的时间段，可以关闭部分不需要的 LED 灯具。再之后，再次启动灯具并逐步增加数量，直到夜间启动最多 100% 的 LED 灯具。

遮阳

外部遮阳板可减少建筑的制冷负荷。研究表明改造外部遮阳板可带来 20% 到 35% 的节能。最常见的改造措施是金属遮光栅格。还有多种其他选择，但固定式外部遮阳板的总体效率通常不够高，因为它不论冬夏，都会减少进入建筑的热量。在冬季，太阳辐照可减少供热负荷，因此是可以利用的。(Alhuwayil, Mujeebu, & Algar-ny, 2018) (Alam & Islam, 2016)

进一步措施

这里并未深入阐述进一步的建筑措施，因为它们的有效性通常较低，且大多数无法通过改造实现。但是，在建筑规划阶段，强烈建议深入了解以下技术：

- 具有低热透射率以及与气候相适应的太阳得热系数 (SHGC) 的高性能窗户；
- 炎热气候条件下的高度反光表面，包括白色和冷色屋顶和墙面；
- 适当密封的结构，以确保低空气渗透率和受控的新鲜空气通风；
- 热桥（易于导热 / 导冷的组成部分）的最小化，例如高导热紧固件和结构部件；
- 被动式太阳能设计，优化建筑的朝向以及窗户和遮阳板的布置，实现自然通风。(IEA)

总的来说，在适当的情况下，新建筑应该采用节能设计，减少表面面积。建筑本体也是一个重要因素，因为它可以发挥储热作用，有助于在短期内稳定建筑内的温度。

4.11.3 节能和温室气体减排潜力

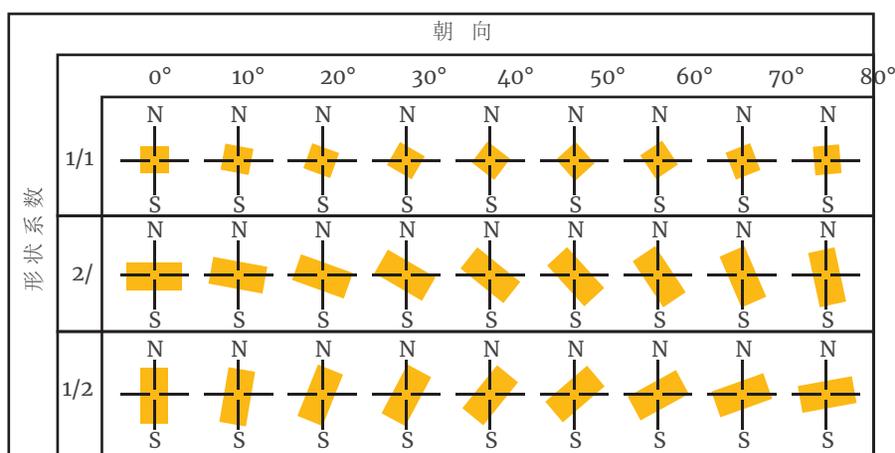
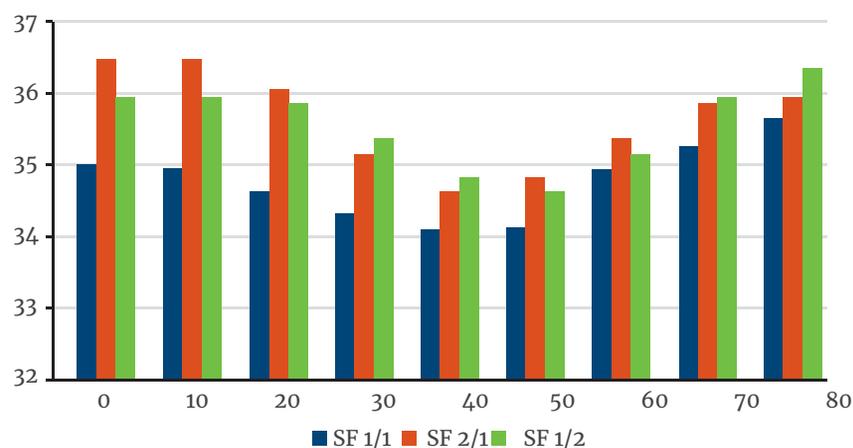
总的来说，通过适当的紧凑化、朝向和建筑围护结构，可以大幅减少能源要求。但是，考虑到对其他区域可能产生的交叉影响，应该视具体情况进行评估。

建筑朝向

图 25 中的表格展示了冬季太阳辐照 (y 轴) 和建筑角度 (x 轴) 带来的节热量的百分比。节能也取决于形状系数 (SF)。²⁸ 当最大的玻璃墙朝向南方或者南方 +10 度时，长方形建筑可以实现最高节能量。当朝向南方 -10 度时，方形建筑可以实现最高节能量。

图 24：与保温、形状和朝向相关的节能

年度供热能量节约比较：有保温和无保温的建筑 (%)



来源：(Pacheco, Ordóñez, & Martínez)

²⁸ SF 1/1、SF 2/1 和 SF 1/2 代表不同的形状系数，如图表中所示。SF 1/1 是方形建筑；SF 2/1 是更大墙面朝向南方的长方形建筑；SF 1/2 是更大墙面朝向东方的长方形建筑。

建筑的朝向是影响新建建筑能效的主要因素。图 25 展示了具有不同旋转角度的同一建筑的不同能耗。所提供的方向是玻璃表面（窗户最多的一面）的方向。南方之所以是最佳朝向，是因为在夏季月份，太阳大多数时候是从西方和上方照射到建筑，因此，最不可取的朝向是朝向西方。冬季的情况大相径庭，大多数阳光是从南方照过来，因为太阳升起的高度比夏季要低。此模拟中实现的节能量最多为能源消耗总量的 26%，其中制冷所需的电能最多可节省 31%。(Pacheco, Ordóñez, & Martínez)。假设在暖通空调系统方面，每位旅客的平均基线排放量为 4.1kg 二氧化碳——其中 1.54kg 二氧化碳 / 旅客用于供热、2.56kg 二氧化碳 / 旅客用于制冷²⁹，则减排量可达到 2.66kg 二氧化碳 / 旅客。

被视为理想的朝向为：长方形建筑朝向南方，偏角不超过 20 度；方形建筑朝向西南方，与南方的偏角大约为 45 度。这样可以在减少制冷及供热负荷之间实现理想的平衡。

绿色屋顶

绿色屋顶有促进节能的潜力，可以发挥（附加的）保温层的作用。即便是在更温暖的气候下，供热方面的节能通常也会高于制冷。对于未做保温、适度保温以及高度保温的屋顶，绿色屋顶改造可带来的节能量在 2% 到 44% 的范围之间。因此，从经济方面来看，在保温较少的屋顶上使用绿色屋顶更有吸引力。改造商业建筑的屋顶通常是可能实现的，因为仅有的限制因素就是增加的重量以及建筑能否承受这种重量，通常为 120 到 150kg/ 平方米左右。改造的成本取决于多项因素，例如屋顶的类型和适合气候条件的植物，但预计成本通常在 80 欧元 / 平方米到 120 欧元 / 平方米左右。(Castleton, Stovin, Beck, & Davison, 2010)

表 20：通过具有不同保温的绿色屋顶实现的节能量

屋顶建造	没有绿色屋顶的 U 值 (W/m²K)	有绿色屋顶的 U 值 (W/m²K)	供热的年节能量 %	制冷的年节能量 %	年度节能量总计
充分保温	0.26-0.4	0.24-0.34	8-9%	0	2%
适度保温	0.74-0.80	0.55-0.59	13%	0-4%	3-7%
无保温	7.76-18.18	1.73-1.99	45-46%	22-45%	31-44%

来源：(Castleton, Stovin, Beck, & Davison, 2010)

自然采光

自然采光被证明可以大幅减少照明所需电能。对中国一家香烟厂的模拟证明：在落实自然采光之后，照明所需的电能可以减少接近 50% (Zhu, Li, & Li, 2017)。可由此推断，其减少量低于具有不同运行时间的机场。

遮阳

在包括中国在内的所有主要地区，遮阳都表现出了巨大的节能潜力，应被视为一个重要的改造或安装选项，尤其是在炎热的气候条件下。通过模拟金属遮光栅格，遮阳可以实现平均 33% 的制冷节能。“基于多项研究，选择 0.5 米的金属遮光栅格以提升能效。金属遮光栅格具有成本效益、灵活可用性、耐用性和环保性。” (El-Darwish & Gomaa, 2017)

²⁹ 基于关西机场的范例

表 21：措施的关键信息——建筑朝向

措施的关键信息——建筑朝向	
投资成本：	高度依赖于总体规划
节能量：（热能）	31% 的供热能量
节能量：（电能）	24% 的制冷能量
二氧化碳减排量：	1.2kg/ 旅客
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 只需要规划，不需要任何其他资源
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 必须符合机场的一般概念，更长的运输距离可能产生额外的成本。

表 22：措施的关键信息——自然采光

措施的关键信息——自然采光	
投资成本：	视乎具体案例
节能量：（热能）	-
节能量：（电能）	最高 50% 的照明电能
二氧化碳减排量：	最高 1.3kg/ 旅客
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 自然光线被认为能更令人愉悦
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> -

表 23：措施的关键信息——绿色屋顶

措施的关键信息——绿色屋顶	
投资成本：	将普通屋顶改造为绿色屋顶的成本为 80 欧元 / 平方米到 120 欧元 / 平方米
节能量：（热能）	8% 到 47%，取决于所安装的保温
节能量：（电能）	制冷电耗的 0% 到 45%，取决于所安装的保温
二氧化碳减排量：	0.25kg/ 旅客，如果安装在适度保温的屋顶之上
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 可以减少暴雨径流，发挥有效的保温作用
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 屋顶上的额外负载

表 24：措施的关键信息——遮阳

措施的关键信息——遮阳	
投资成本：	60 欧元 / 平方米到 100 欧元 / 平方米外加安装
节能量：（热能）	-
节能量：（电能）	33% 的制冷能量
二氧化碳减排量：	0.84kg/ 旅客
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 减少紫外线，紫外线可损害某些材料。 更高的舒适度，因为减少了直射阳光的热量
缺点：	受控遮阳板的改造如施工不当，可能导致热桥



5 结论

机场建筑的能源密集度非常高，其年能耗总额可能与小城市的能耗水平相当，因此值得进行优化。

因为冷热负荷不断变化，一个重要方面就是确保暖通空调系统的正确设计和高效运行。在能源方面，能耗的一大部分往往是电能消耗。机场能耗取决于机场规模、周边气候条件、机场的总体舒适水平、机场提供服务的范围、运营时间和旅客数量。因此，对机场之间进行的所有比较，包括单位旅客能耗或单位面积能耗，需要谨慎对待。

以下领域的节能潜力最有发展前途：

- 节能的暖通空调系统；
- 建筑设计方面的改善；
- 能源管理和控制；
- 能源供应效率和可再生能源的使用；
- 旅客和行李的运输效率。

针对从燃料到电力的切换相关的所有措施，我们指出一定要考虑电力生产的实际来源以及由此造成的排放系数。只要电能很大程度上依赖于化石燃料，那么总体的温室效应就是负的。但是，未来随着可再生能源在电力结构中所占比重的日益提高，这一情况会发生改变。我们强烈提倡以能源管理和控制措施（也作为进一步优化的基础）作为短期及近期的解决方案。长远来看，对于基于电力的系统，例如暖通空调系统以及电动地面支持设备，现场太阳能光伏发电应该在这些系统的脱碳化过程中发挥重要作用。

图表 25 总结了本报告的主要发现。

表 25: 关键信息一览表

措施的关键信息					
措施	投资成本	节能量 (热能和电力)	二氧化碳减排量	优点	缺点
地下水制冷	开环系统 580 - 1,000 欧元 / 千瓦	与标准冷水机组相比, 不使用热泵 (HP) 逆循环的制冷, 配合开环回路系统可节省 80%。 相比使用热泵和任何地热能系统可节省 20-30%	最高 650 吨二氧化碳 / 兆瓦制冷能力	<ul style="list-style-type: none"> 节约大量电能 投资回收期短, 可能 < 2.7 年 维护成本低 可扩容, 适合巨大的制冷负荷 可用于供热和制冷 	<ul style="list-style-type: none"> 与标准冷水机组相比, 初始投资更高
调节温度和湿度水平	年成本约为 0.2 欧元 / 平米 (软件和人力)	供热能量最高节省 20% 制冷能量最高节省 20%	基线暖通空调系统相关二氧化碳排放最高节省 20%	<ul style="list-style-type: none"> 易于落实预先确定的设定点 改进热舒适性 and 总效率 	<ul style="list-style-type: none"> 先进环境控制的数据收集和预处理过程耗时
冷热储存	高度依赖于具体情况 例如: 坑式储能为 0.4-0.6 欧元 / kWh	供热能量最高节省 30% 制冷能量最高节省 80%	最高 2.8kg / 旅客	<ul style="list-style-type: none"> 大幅节省电能和热能 与产生余热的技术 (例如太阳能光热、热电联产) 完美搭配 可扩展性 	<ul style="list-style-type: none"> 并非所有技术都可以改造 取决于系统, 尤其是蓄热坑可能产生巨大的热损耗 并不适合寒冷区域
建筑分析技术	年成本: 1.4 欧元 / 平米 (基本成本 + 年人工成本)	20% (总能耗)	20%	<ul style="list-style-type: none"> 反映核心能源使用系统和设备的能效 加强沟通和培训, 以提高员工的节能意识 与不同环境管理系统相融合的可能性 (ISO14000、ISO 50001) 提高住户的舒适度 	<ul style="list-style-type: none"> 与使用不同程度分析得出的真实成本和潜在节约相关的信息有限 将数据整合到能源管理和信息系统中的问题 对能源管理和信息系统产品之间的差异缺乏了解 缺少适当的既有计量
可持续性评级系统	根据建筑系统的大小, 约 16,000 欧元	假设: 10% - 20%	假设: 10% - 20%	<ul style="list-style-type: none"> 能源和资源效率各方面的全面分析 后续升级改进的动力 一目了然的评级 	<ul style="list-style-type: none"> 实施困难

措施的关键信息				
措施	投资成本	节能量 (热能和电力)	二氧化碳减排量	优缺点
地面支持设备电气化	取决于具体措施: 标准尺寸电动巴士: 550,000 欧元; 牵引锂电池 (28 吨): 75,800 欧元 (10 吨): 25,400 欧元	一辆巴士的燃料 (柴油) 节省: 取决于基线和日常公里数 (12 公里, 40 升 /100 公里) ——1752 升, 相当于 17,520kWh; (一辆巴士的额外耗电量, 取决于具体车辆), 即 4380kWh	最高为基线情况的 100% (例如: 30 辆巴士 130 吨)	<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料成本节省 如采用可再生能源电力运行, 一次能源可大幅节省 节能型电动机, 维护要求和运行成本更低、短距离行驶比柴油车辆更高效 噪音较少 <p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none"> 充电策略需要考虑总体运行小时数和峰值需求 二氧化碳的影响很大程度上取决于发电构成
高效的行李处理系统	8300 万欧元 (系统升级, 购买 180 辆自动推车), 最先进的传送带: 10,500 欧元 / 米	大约为传统系统的 50% 如果基线消耗为 30GWh, 这将意味着节省量可达 15GWh	9,000 吨二氧化碳, 针对基线消耗量为 30 吉瓦的系统	<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none"> 全面系统优化 提高行李的处理速度、安全性和控制 (针对贯彻全面监控理念的系统) 减少电动机的怠速工作时间 更清凉的运行环境, 因此具有降低空调负荷的潜力 <p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none"> 高投资成本 升级过程中的潜在问题 (持续运行的并行双系统)
动力中心	严重依赖于动力中心的容量和能量生成的方式。成本预计在数千万欧元区间。	相比传统系统节省约 25%, 取决于机场的规模。	最高 100%, 取决于所选择的能源, 通常约 25% 来自于节能手段	<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none"> 提高应对电网故障的弹性 减少维护 <p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none"> 高投资成本 长投资回收期 往往要求专门的动力中心建筑 可能必须执行专业维护
光伏和储能	600-800 欧元 / 千瓦 ^{峰值} , 200 欧元 / 千瓦 (储能不包括安装)	最高 100% (取决于光伏发电厂的规模)	0.7kg 二氧化碳 / 旅客 (假设占基线用电量的 20%, 占比 20%, 排放系数为 0.6 吨二氧化碳 /MWh (全球环境战略研究所))	<p>优点</p> <ul style="list-style-type: none"> 成熟技术 机场内无遮挡且未另作他用的空间有巨大潜力 越来越高的经济性 可根据电力需求和可用空间进行扩展 包括由电力驱动的交通和供热概念选项 <p>缺点</p> <ul style="list-style-type: none"> 前期成本相对较高 储存装置的巨大空间要求 <p>储能:</p> <ul style="list-style-type: none"> 峰值电力消耗的减少 提高供能弹性 预期会实现进一步改进和更高的经济性

措施的关键信息					
措施	投资成本	节能量 (热能和电力)	二氧化碳减排量	优缺点	
建筑围护结构保温	高度依赖于保温的材料和厚度以及建筑。可以选择保温材料 and 厚度, 以适应现有预算	保温: 30% (升级既有保温) - 90% (之前没有保温) 冷负荷 20% (升级既有保温) - 50% (之前没有保温)	依据暖通空调系统不同, 在 15% 到 65% 的二氧化碳排放量之间变动	<ul style="list-style-type: none"> 没有任何可能发生故障的活性, 可提高能效 有助于在建筑内实现更舒适的气候 记载详细且被广泛接受的技术 可以选择参数以实现与项目的最优匹配 	<ul style="list-style-type: none"> 如果操作不当, 保温板之间的狭小空间可能吸收湿气, 从而导致褪色以及对建筑的潜在破坏。 要求专家计算以避免过度投资或者投资不足
建筑朝向	取决于总体规划	31% 的供热能量 24% 的制冷能量	1.2 kg/ 旅客	<ul style="list-style-type: none"> 不需要任何材料 	<ul style="list-style-type: none"> 必须符合机场的一般概念, 更长的运输距离可能产生额外的成本。
自然采光	依个例而定	可达照明电力的 50%	可达 1.3 kg/ 旅客	<ul style="list-style-type: none"> 自然光被认为更令人愉快 	<ul style="list-style-type: none"> 可能需要定期维护
绿色屋顶	80 - 120 欧元 / 平米	取决于所安装保温材料的不同, 8%-47% 的热能节约 取决于所安装保温材料的不同, 0%-45% 的制冷电力节约	如果安装在中度隔热屋顶上, 则为 0.25 kg/ 旅客	<ul style="list-style-type: none"> 可以减少雨水径流, 起到隔音作用 	<ul style="list-style-type: none"> 增加屋顶荷载
遮阳	60 - 100 欧元 / 平米, 另加安装	33% 的制冷电力	0.84 kg/ 旅客	<ul style="list-style-type: none"> 减少对某些材料有害的紫外线照射 由于减少了阳光直射产生的热量, 因此舒适度更高 	<ul style="list-style-type: none"> 如操作不当, 对受控遮阳装置的改造可能会形成热桥

参考文献

AECOM. (2020). 《清洁能源和基础设施：通往机场可持续发展之路，通过 15 项最佳实践举措使澳大利亚的机场过渡到低排放》. 华信能源 .

国际机场理事会 . (2021) . 《2019-2020 年机场碳认证中期报告》 .

Akyüz, M. K., Sogüt, M. Z., & Altuntas, Ö. (2017 年 10 月 18 日) . 机场航站楼墙体和屋顶保温的经济和环境优化 . 《可持续性》 .

Alam, M. J., & Islam, M. A. (2016 年 6 月) . 孟加拉国建筑外遮阳和窗户玻璃对能源消耗的影响 .

Alhuwayil, W. K., Mujeebu, M. A., & Algarny, A. M. (2018 年 12 月 12 日) . 外部遮阳策略对湿热气候下多层酒店建筑能源性能的影响 .

Ampofo, F., Maidment, G., & Missenden, J. (2006) . 伦敦地下水冷却系统 . 《国际低碳技术杂志》, S. 336-342.

奥雅纳公司 (Arup) . (日期不详) . 《洛杉矶国际机场中央公用设施工厂——奥雅纳公司》 . 取自 arup.com: <https://www.arup.com/projects/lax-central-utility-plant>

Atco. (2021) . 《埃德蒙顿国际机场热电联产厂》 . 参见 [www.atco.com](http://www.atco.com/en-ca/projects/edmonton-international-airport-cogen-plant.html): <https://www.atco.com/en-ca/projects/edmonton-international-airport-cogen-plant.html> abgerufen

Baxter, G., Srisaeng, P., & Wild, G. (2018) . 机场可持续性评估，第二部分——哥本哈根机场的能源管理 .

伯曼集团 . (2022 年 2 月 4 日) . 《赫尔辛基机场案例研究》 . 摘自 <https://www.beumergroup.com/app/uploads/2019/03/BEUMER-Helsinki-Airport-Case-Study.pdf>

Bott, C., Dressel, I., & Bayer, P. (2019) . 水基封闭季节性热能的技术现状回顾 . 《可再生和可持续能源评论 113》 .

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. (2010 年 5 月 2 日) . 《绿色屋顶：建筑节能和改造的潜力》 sciencedirect.com. 摘自 Sciencedirect.com: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271089/1-s2.0-S0378778810X00081/1-s2.0-S0378778810001453/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEHAaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIB-zC4hUsPgtoitbW7MdxU7U815H42UJ%2FT3oHYWVuHNZjAiBNJl5vpfA2%2Bxc6M9jH-faLrVUYrLT0%2FkyD71M%2F%2F>.

Chandan, V., & Brauwer, J. (2012) . 冷却、加热和发电厂联合系统的建模和优化 . 《美国控制会议论文集》 .

Costa, A., Keane, M., & Restoy, L. M. (2012 年 10 月) . 欧盟机场能源利益和信息通信技术、能源效率和加强建筑运行方面的优先事项审查 .

丹佛水务公司 . (日期不详) . Campus-diagram.png. 摘自 denverwater.org: <https://www.denverwater.org/file/17904>

El-Darwish, I., & Gomaa, M. (2017 年 5 月 31 日). 建筑围护结构提高能效的改造策略. 《亚历山大工程杂志》.

Enter, E. v. (2018). 《行李处理系统的能源消耗, 行李处理系统的能源消耗: 对在初步设计阶段考虑能源消耗的影响评估, 硕士学位论文》. 代尔夫特理工大学.

欧洲议会. (2022 年 2 月 1 日). 《能源效率》. 摘自 <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/69/energieeffizienz>.

欧盟委员会. (2018 年, 最后更新于 2020 年 12 月). 《所有欧洲人的清洁能源方案》. 摘自 https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en#energy-efficiency.

Fawkes, S. O. (2016). 《提高工业能源效率的最佳做法和案例研究—决策者介绍》. 哥本哈根: 联合国环境规划署丹麦技术大学伙伴关系.

维也纳机场集团 (2020). NHB2020 年关键数据. https://www.viennaairport.com/unternehmen__jobs/flughafen_wien_ag/umwelt__nachhaltigkeit/nachhaltigkeitsbericht.

苏黎世机场有限公司. (2012). 《码头 E 的环境成果》.

法兰克福机场股份公司. (2020). 位于法兰克福机场的法兰克福机场股份公司(法兰克福机场母公司), NICE, FCS, GCS 和 FraGround 等组织的 2019 年环境声明.

德国国际合作机构 (2016), 热电联产和三联产——如何有效地生产能源。新兴和发展中国家实用指南。Cogeneration & Trigeneration – How to Produce Energy Efficiently. A practical Guide for Experts in Emerging and Developing Economies.

国际民航组织. (2019). icao.int. 摘自生态机场工具包电子文集: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/ecoairports.aspx>.

国际民航组织. (日期不明). 《专注于机场现场可再生能源的生产, 生态机场工具包》.

国际能源署. (2018). 《国际能源署数据和统计》. 摘自 <https://www.iea.org/data-and-statistics>.

国际能源署. (2022 年 1 月). www.iea.org. 摘自向可持续建筑过渡——分析——国际能源署: <https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings>.

国际能源署. (日期不详). www.iea.org. 摘自向可持续建筑过渡——分析——国际能源署: <https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings>.

关西机场——技术部, S. I. (2018 年 1 月). kix_smartreport_2016. 摘自 kansai-airport.co.jp: http://www.kansai-airports.co.jp/en/efforts/environment/efforts/file/kix_smartreport_2016.pdf

Kapil, S., Nusrat, A., & Elangovan, R. (2019). 《用于预测机场航站楼暖通空调能源需求的基于主体的动态占用计划模型》. 10.26868/25222708.2019.211133.

Kotopouleas, A., & Nikolopoulou, M. (2014). 了解机场航站楼的热舒适性条件.

Kotopouleas, A., & Nikolopoulou, M. (2016). 机场航站楼的热舒适性条件：室内或过渡空间？《建筑与环境》，S. 184-199.

Kramer, H., Lin, G., Curtin, C., Crowe, E., & Granderson, J. (2020). 《证明建筑的商业案例》. 伯克利：劳伦斯伯克利国家实验室.

Kumar, P. (2019 年 1 月). www.simulationhub.com. 摘自 <https://www.simulationhub.com/blog/winter-is-coming-a-sneak-peek-into-the-upcoming-app-for-occupant-thermal-comfort>.

Lin, G., Singla, R., & Granderson, J. (2017). 《使用能源管理和信息系统确定商业建筑效率的首要机会》. 劳伦斯伯克利国家实验室.

Littlefair, P. (2001 年 2 月 5 日). Science Direct. 摘自 Scencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X00000992>.

Malik, K. (2017 年 11 月 24 日). 摘自 http://web.usm.my/jcdc/vol22_s1_2017/jcdc2017.22.s1.6.pdf.

Muthukrishna, M. (日期不详). ppmc.. 摘自巴黎交通和气候进程: <http://www.ppmc-transport.org/using-renewable-solar-energy-use-for-the-aviation-industry-part-of-the-airport-carbon-accreditation-aca-scheme/#:~:text=IGI%20Airport%20consumes%20on%20average,enterprises%20operating%20at%20IGI%20Airport>.

NFZ-Messe. (2020 年 8 月 9 日). 《研究：电动公共汽车的能耗》. 摘自 [https://www.nfz-messe.com/de/news/elektromobilitaet-studie-energieverbrauch-von-elektrobussen-2705.html#:~:text=%E2%80%9EBei%20normalen%20Temperaturen%20\(zwischen%2015,%E2%80%9C%20hei%C3%9Ft%20es%20im%20Bericht](https://www.nfz-messe.com/de/news/elektromobilitaet-studie-energieverbrauch-von-elektrobussen-2705.html#:~:text=%E2%80%9EBei%20normalen%20Temperaturen%20(zwischen%2015,%E2%80%9C%20hei%C3%9Ft%20es%20im%20Bericht).

Ove Arup & Partners Ltd. (2014). 《国际可持续发展系统比较，主要国际可持续发展系统：能源和节水要求》.

Ozel, M. (2013). Science Direct. 摘自 <https://www.sciencedirect.com/https://pdf.sciencedirectassets.com/271098/1-s2.0-S0196890412X00104/1-s2.0-S0196890412003846/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX-2VjECoaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQD%2BXKyU4g8ApNuEMz9bPFM%2FtM%-2Fu%2B%2BofsEoHVEMZ9sIFeGIgeU7hfIGN5G97Pr%2FOivqI2855Y5QvWYNk>.

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (日期不详). Scencedirect.com. 摘自《建筑节能设计：回顾》——Scencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112002286>.

Ramboll. (2022 年 1 月 26 日). stateofgreen.com 摘自 <https://stateofgreen.com/en/partners/ramboll/solutions/world-largest-thermal-pit-storage-in-vojens/>.

Randall, C. (2019 年 10 月). 《斯图加特机场扩大电动货运牵引车车队》. 摘自 <https://www.electrive.com/2019/10/30/stuttgart-airport-expands-electric-cargo-tractor-fleet/>.

Saisonalspeicher.de. (2022 年 1 月). 《历史——Saisonalspeicher.de》. 摘自 www.saisonalspeicher.de: <https://www.saisonalspeicher.de/home/grundlagen/historie/>.

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015 年 4 月). 《地热能最新进展》. 湖首大学: ISBN 978-953-51-2241-8. 摘自 <https://www.intechopen.com/chapters/49252>.

Schmied, M., & Mottschall, M. (2014). 《计算公共交通工具的能源消耗和温室气体排放》. 联邦交通和数字基础设施部.

Schüppler, S., Fleuchaus, P., & Blum, P. (2019). 德国含水层热能储存 (ATES) 的技术经济和环境分析. 《地热能 7, 11 (2019)》.

Sergio Ortega Alba, M. M. (2016). 《机场能源研究: 述评》.

Services, T. P. (2022). 《什么是绿色屋顶 - 技术保护服务》. 摘自 nps.gov: <https://www.nps.gov/tps/sustainability/new-technology/green-roofs/define.htm>.

Snijders, A. L. (日期不详). 摘自含水层热能储存 (ATES) 技术发展和欧洲主要应用: <https://trca.on.ca/dotAsset/16551.pdf>.

太阳能热世界. (2022 年 1 月 26 日). 《季节性坑道蓄热: 成本基准为 30 欧元 / 立方米》. 摘自 <https://solarthermalworld.org/>: <https://solarthermalworld.org/news/seasonal-pit-heat-storage-cost-benchmark-30-eurm3/>.

《工程师》杂志. (2016 年 10 月 18 日). theengineer.co.uk. 摘自 <https://www.theengineer.co.uk/molten-silicon-used-for-thermal-energy-storage/>.

ThorDrive. (2021 年 1 月 5 日). ThorDrive 在 CVG 演示无人驾驶 GSE 技术.

Turner, J. (2021 年 8 月 4 日). 《高效行李处理》. 摘自 <https://www.airport-technology.com/features/bags-innovation-inside-automated-baggage-handling-systems/>.

Vella, H. (2017 年 11 月 1 日). 《机场技术》. 摘自 <https://www.airport-technology.com/features/featuresustainable-success-oslo-airport-opens-worlds-greenest-terminal-5885304/>.

维也纳国际机场. (2021 年 3 月 17 日). 《维也纳国际机场建成迄今为止最大的光伏电站》. 摘自 https://www.viennaairport.com/jart/prj3/news_press/uploads/db-con_def-uploads/va-news//14_2021.pdf.

Viessmann. (2022). www.viessmann.co.uk. 摘自 <https://www.viessmann.co.uk/heating-advice/how-does-a-water-source-heat-pump-work>: <https://www.viessmann.co.uk/heating-advice/how-does-a-water-source-heat-pump-work>.

维基百科. (2022年2月3日). 《地面支持设备》. 摘自 https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_support_equipment.

Zhu, T., Li, C., & Li, R. (2017). 《自然采光模拟分析和能源研究》. Sciencedirect.com. 摘自 Sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817346532>.

www.energypartnership.cn

网站



微信

