



Exergy Analysis of Building Energy Systems

建筑用能系统焓分析

刘艳峰 李 洋/著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

建筑用能系统炯分析

Exergy Analysis of Building Energy Systems

刘艳峰 李 洋 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书由作者近年对于建筑用能系统优化研究成果积累而成,针对建筑用能系统的能源供应、传递路径和用能需求这一完整能量链,基于热力学第一、第二定律,通过统计分析和理论计算,并侧重于能源在数量和品质上的双高效利用,建立技术原理,形成优化设计和评价方法。内容主要包括三个方面:第一,能源供应方面,分析不同能源产品上游生成阶段的能量来源,并以焓作为无差异量化基准,得到能源产品的上游焓成本分析方法,可实现来源和层级不同的能源产品的同源化;第二,能量传递路径方面,建立能量传递和转换设备的模块库,并探讨模块单元不同组合形式下的焓效率分析方法;第三,用能需求方面,分析建筑中各用能项目的基本焓耗量以及设备系统输出焓量与建筑基本焓耗量之间的匹配关系。最终获得建筑用能系统由焓源输出到建筑物焓量耗散全过程的焓分析和节能评价方法。

本书可作为高等院校暖通空调和建筑节能等专业研究生教学参考用书,也可供从事建筑能源管理等科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑用能系统焓分析 = Exergy Analysis of Building Energy Systems / 刘艳峰, 李洋著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059723-6

I. ①建… II. ①刘… ②李… III. ①建筑—节能—研究 IV. ①TU111.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第262261号

责任编辑: 耿建业 武 洲 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 174 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



刘艳峰, 1971 年生, 西安建筑科技大学二级教授, 博士生导师。入选中组部“万人计划”领军人才、科技部中青年科技创新领军人才, “十三五”国家重点研发计划项目负责人, 陕西省“西北村镇太阳能光热综合利用”重点科技创新团队负责人, 国家自然科学基金创新群体学术骨干, 宝钢优秀教师, 荷兰代尔夫特理工大学访问学者。担任国际太阳能学会 (International Solar Energy Society, ISES) 委员、中国建筑学会零能耗建筑学术委员会副理事长、中国绿色建筑与节能专业委员会委员、中国建筑节能协会专家委员会委员、中国冶金教学学会与研究生教育研究分会副理事长兼秘书长、中国环境科学学会室内环境与健康分会理事、《暖通空调》编委等学术兼职。

长期致力于我国西部太阳能采暖基础科学问题和关键技术创新研究。主持“十三五”国家重点研发计划项目 1 项、国家自然科学基金重大项目课题 1 项、面上项目 5 项等; 发表科研论文 180 余篇, 其中 SCI 检索 40 余篇, 授权发明专利 18 项, 软件著作权 3 项; 出版《太阳能采暖设计原理与技术》等 7 部, 编写国家和行业标准 8 部; 获得 SCI 期刊 *Building and Environment* 2016 年度最佳论文奖、世界人居环境国际会议最佳论文奖; 荣获国家科技进步奖二等奖、教育部科技进步奖一等奖、陕西省科学技术奖一等奖等 9 项科研奖励。研究成果在西部高原地区得到广泛应用, 经济效益和社会效益显著。



李洋, 1989 年生, 博士, 2015 年毕业于西安建筑科技大学, 现任职于贵州中建建筑科研设计院有限公司。长期从事建筑用能系统优化、区域能源规划及绿色建筑技术方面的研究及设计工作。主持省部级科研项目 1 项, 参与国家科技支撑计划课题、贵州省科技攻关计划等科研项目 5 项, 公开发表 SCI/EI 检索论文 3 篇, 授权发明专利 2 项, 参与编写贵州省地方标准 3 部, 获得省部级科技奖励 1 次。

前 言

建筑节能的一个基本途径是提高能源的利用效率，而在分析建筑用能系统的能源效率时，目前广泛应用的基于能量守恒定律的能效分析存在以下弊端：首先，只考虑“能”在数量上的利用程度，忽略了“能”的品质差异，无法真实地表征“能”的有效利用程度，往往造成能质不合理耗散；其次，无法为来源和层级不同的能量提供统一分析基准，难以评判多能量形式输入的用能系统。融合热力学第一、第二定律而定义的“炯”代表能的最大做功能力，兼顾能的数量和品质，同时，对于不同形式的能量，炯可作为无差异量化标准，这为能源产品的同源化分析及能量链的综合用能效果分析提供了基础。

现有的一次能源效率分析方法已有统一能量基准的理念，但仍无法反映各种一次能源之间的品质差异以及能源获取过程的直接和间接能源成本。在建筑用能的炯分析方面，现有的研究多集中于单一设备或组合设备的热力学优化分析，忽略了能源供应和用能端炯量需求的匹配关系。而缺少对用能系统完整能量链的分析，将难以实现炯量的高效利用。

因此，建筑用能系统的炯分析，首先，需要获得不同能源产品的统一基准，同时分析建筑端的炯量需求，以确定合理的能源匹配方案；其次，在保证炯量传递效果的条件下，尽可能提高设备的炯传递效率，并降低设备炯耗量，最终实现用能系统的炯量高效利用。根据以上技术思路和炯量利用基本原理，本书重点介绍建筑用能系统的炯分析和节能设计方法。

本书由作者和作者的博士研究生李洋共同完成，主体内容以李洋在读博士期间的研究工作为基础，经过进一步积累完善而成。书稿形成过程中，需要大量的数据调查和分析计算，作者指导的历届研究生为此多有辛勤付出。感谢在本书写作过程中王登甲教授、王莹莹副教授在文字和图表处理等方面的贡献。

本书是由作者负责的国家“十三五”重点研发计划项目“藏区、西北及高原地区利用可再生能源采暖空调新技术(2016YFC0700400)”、国家自然科学基金重大项目课题“极端热湿气候区超低能耗建筑热环境营造系统(51590911)”的研究成果总结而得，并得到国家科学技术学术著作出版基金的资助，在此一并表示感谢！

限于作者的学识和水平，本书难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

1 建筑用能过程的热力学基础	3
1.1 建筑用能的发展	3
1.2 能源利用的热力学特性	5
1.3 建筑用能系统的定义	6
1.3.1 系统边界	6
1.3.2 环境状态	6
1.4 建筑用能系统焓分析理论基础	7
1.4.1 几种形式能量的焓	7
1.4.2 焓平衡方程	8
1.4.3 焓分析指标	9
参考文献	10
2 能量的统一量化基准	13
2.1 能量的来源	13
2.1.1 能源形成机理	13
2.1.2 能源再生性的量化分析	14
2.2 能量利用的焓分析基准	16
2.2.1 基础焓源分析	16
2.2.2 地球焓量资源变化特性	17
2.2.3 焓量可持续利用分析	18
2.3 能源产品上游阶段焓成本分析	19
2.3.1 焓成本分析模型的建立	19
2.3.2 焓成本模型计算方法	20
2.3.3 能源产品焓成本分析实践	26
参考文献	32
3 建筑设备系统焓效率研究	37
3.1 建筑设备系统模块化研究	37
3.2 能量转换单元热力学分析	38

3.2.1	能量的形态和转换特性	38
3.2.2	能量转换单元焓效率	39
3.3	能量传输单元焓分析模型	43
3.3.1	能量传输单元热效率	44
3.3.2	能量传输单元焓效率	45
3.4	末端单元焓分析模型	45
3.4.1	末端单元能量效率	46
3.4.2	末端单元焓效率	46
3.5	设备系统焓分析模型	48
3.5.1	串联组合焓分析	48
3.5.2	并串组合焓分析	49
3.6	建筑设备系统焓分析	50
3.6.1	设备系统主焓源效率	51
3.6.2	设备系统辅助能耗系数	51
3.6.3	设备系统总焓效率	52
	参考文献	53
4	建筑能耗特性分析	57
4.1	建筑物焓量平衡分析	57
4.2	建筑物焓量需求与设备系统焓量供应的匹配关系	63
4.3	中国城镇住宅建筑能源利用效果分析	67
4.3.1	建筑用能焓分析方法与数据来源	67
4.3.2	中国城镇住宅建筑能源利用效率分析	70
4.3.3	中国城镇住宅建筑能耗特性	80
4.4	中国典型气候区公共建筑能源利用效果分析	80
4.4.1	方法和数据来源	81
4.4.2	公用建筑能源利用效率分析	83
4.4.3	中国典型气候区公共建筑能耗特性	91
	参考文献	92
5	建筑能量系统焓分析评价指标体系	95
5.1	建筑能量系统焓分析基础	95
5.2	建筑能量系统焓分析目标	96
5.2.1	建筑低焓供能方案分析	96
5.2.2	低焓设备系统	98

5.2.3 低能耗建筑物	100
5.3 建筑能量系统节能评价指标体系	102
5.3.1 建筑能量系统总能耗效率	102
5.3.2 建筑能量系统能耗率	103
5.3.3 建筑用能项目能耗指标	105
参考文献	106
6 建筑能量系统能耗优化分析应用	109
6.1 建筑采暖系统能耗分析	109
6.1.1 集中采暖	109
6.1.2 分散采暖	116
6.1.3 建筑采暖用能效率	119
6.2 建筑空调系统能耗分析	120
6.2.1 电制冷与吸收式制冷	120
6.2.2 集中与分散空调	121
6.2.3 建筑空调用能效率	123
6.3 采暖空调系统低能耗优化建议	127
参考文献	128

量质合一方为“能”

热力学第一定律表明，能源利用过程中，能量总数保持不变，只是存在的形式和位置发生改变。

热力学第二定律指出，不同形式能量的做功能力存在差异，能量做功能力的大小反映其品质的高低。高品质能可自发地转变为低品质能，且这一过程在自然状态下不可逆。

能量转换、传递过程中，总数不变，做功能力不断减小，能量利用的本质是对其所包含的可用能部分(做功能力)的利用。

1 建筑用能过程的热力学基础

建筑是人们社会生活的主要场所，在营造适宜人工环境及维持人员活动时往往需要能源的投入，如采暖、空调及生活电器用能。随着城镇化进程的加快和人们生活水平的提升，我国建筑总面积及单位面积能耗量均持续增长，造成了建筑能耗总量的快速上升。

统计资料显示，我国建筑部分总能耗在社会能源总消费量中所占的比例已从 20 世纪 70 年代末的 10% 上升到近年的 25% 左右，根据发达国家的发展经验，这一比例将随着城镇化的快速发展而进一步上升。为了缓解建筑能耗需求增长与能源紧缺及环境之间的矛盾，有必要提高能源在建筑中的利用效率，从而控制建筑的能源消耗。为了实现这一目标，需要了解建筑用能的热力过程，查明建筑部分能源利用过程中存在的问题，进而深入开展节能工作。

1.1 建筑用能的发展

建筑部分的能源利用是跟随建筑功能转变而发展的。原始时期，人类的建造物主要用于安全防御，形成“树居”的居住方式，之后人类学会了用火，得以战胜野兽并占领洞穴，由“树居”过渡到“岩洞居”，岩洞相对而言热舒适性更好，反映出原始人类对居住物热舒适的需求。随着人类思考和动手能力的进一步提高，在寒冷地区出现了穴居方式，其不仅可以获得相对稳定的热环境，还具有良好的采光、排烟功能。考古研究发现，早期的穴居中已出现灶坑，表明当时的建筑已初步具备取暖和炊事的功能。此后，建筑居住形式由穴居经历了半穴居、地面建筑、下建台基的地面建筑。

农业文明时期的到来，极大地促进了建筑的发展，原始时期游猎的临时性洞穴转变为稳定的建筑形态。中国的古建筑发展历史悠久，形成了宫殿建筑、宗教建筑、陵墓建筑、园林建筑、民居建筑等多种形式。此时的建筑更加注重外形的美观与结构的牢固，同时建筑功能亦有发展。考古发现秦朝的宫殿中采用火墙进行取暖，北魏郦道元在其所著的《水经注》中记载了人们利用火炕取暖，而魏晋时人们则用火炉烘火取暖。一些古建筑亦有夏季防暑降温的功能，北魏时期洛阳华林园的“清凉殿”便采用天然冰来降温，唐太

宗所造的凉殿，利用水利机械装置设计了风扇和屋顶上注水“成帘飞洒”。原始穴居建筑中的烟囱演变成了古建筑中的窗，使建筑具备了通风、采光的功能，天井院落古建筑，如北京四合院、福建圆楼等，建造中都考虑了空气流通和室内光线的问题。

工业革命对建筑的发展产生了深远的影响，并促使欧美建筑迈入了近代建筑时期。新材料、新理念、新设备的发明和运用使得建筑的建造更加科学，结构更加稳定，功能更加完善。由于工商业的迅速发展以及社会体系的完善，城市中除了原有的居住建筑外，开始涌现出一批功能集中的公共建筑，如医院、办公楼、商场、学校、体育馆等。与居住建筑相比，公共建筑对建筑环境的要求更高，因此，公共建筑的发展离不开建筑设备的发展。第一次工业革命中，锅炉技术的成熟为人类利用“水暖”打下基础，与此同时，人类创造出了第一代金属散热器。第二次工业革命使人类由“蒸汽时代”进入了“电气时代”。自1866年西门子制成了发电机后，各种电气机械应运而生，如压缩机、电动水泵、风机等。将各类机械设备组合成系统广泛地应用到建筑中，使建筑功能多样化。诞生于20世纪初的空调系统，成为调节室内温度、湿度重要措施。除此之外，逐步形成的其他设备系统还包括建筑给排水系统、建筑采暖系统、建筑照明系统、建筑消防系统等。

近代建筑的功能系统已经比较完善，而现代建筑并不止于此，伴随着计算机信息技术的进步，现代建筑的功能内涵又有了新的定义。现代建筑正不断地朝着智能化的方向迈进，主要表现在对建筑内的各种设备系统的实时检测和自动化管理，具体来说是对建筑内的空调系统、给排水系统、消防系统、照明系统、电梯系统等全面监测与自动控制。现代建筑的智能化赋予了建筑安全、高效、舒适、节能的显著优点，例如，现代建筑营造室内环境时，不只简单的采暖降温，一方面，精细化地调节环境参数使室内的活动人员感到舒适，且不损害人体健康，同时又能提高人员的工作效率；另一方面，在营造这样的室内环境的同时，按需调节，避免了浪费，一定程度上节约了能源。现代建筑在满足人类活动需求的同时，所消耗的能源总量越来越多，能源供应负担的加剧迫使人们不仅要寻求新的替代能源，还应改革已有的用能机制。

由于建筑功能的发展，建筑消耗的能源种类和耗能总量也在不断地变化。“树居”和“岩洞居”时期，建筑几乎不消耗能源，“穴居”时期，通过在坑灶内直接燃烧草、木柴获得能量用于取暖、炊事。古代建筑时期，建筑用能的目的是炊事、采暖以及照明，能源的利用形式也是以燃烧木柴、秸秆、蜡

烛为主, 附以少量的煤炭。近代与现代建筑时期, 建筑用能目的多样, 一般包括: 室内环境营造(温度、湿度、空气品质)、生活用水、炊事、消防、照明、娱乐办公、储藏食品等。建筑的用能类型主要包括电、天然气、石油、煤和生物质能, 此外, 部分新能源也加入到了建筑用能的行列中, 如太阳能、地热能等。

建筑用能的发展还体现在建筑用能过程的变化。原始的用能过程非常简单, 即将燃料燃烧取热, 这种用能过程最突出的问题是功能单一、效率低下、卫生条件差。如此的用能过程难以适应人类社会和城市的发展, 因此, 锅炉诞生后, 这种方式便慢慢被淘汰。锅炉将产热部分从建筑本体中分离出来, 锅炉燃烧燃料产生的热水或蒸汽通过管道输送至建筑以便人们采暖等使用, 慢慢就演化成了当今城市的集中供热系统, 这种系统配备大型高效的锅炉, 极大地提高了燃料的燃烧效率, 但缺点是热网输送热能的过程中会产生输配能耗。电能属于高品位的能源, 利用它可以实现建筑的全部功能, 而且电能使用过程中无污染, 输配能耗少, 特别受人们的青睐, 占住宅用能的 40%~70%。发电的方式众多, 如火力发电、水力发电、风力发电、核能发电等, 在我国, 火力发电量约占总发电量的 70%。以火力发电为例来分析建筑用电能的过程, 首先将化石燃料转化为热能, 发电机将热能转化为电能, 再通过电线将电能输送到建筑, 最后建筑设备系统利用电能实现各项建筑功能。建筑用电的整个过程中能量经过多次转化, 耗能的次数增加, 但单次转化的效率却大大提高。

总体来说, 建筑用能的发展经历了由维持基本生存需求到多样化用能, 由“天赐”到精细控制的过程。伴随建筑用能场景的增多以及精细化、智能化的调控需求, 无论是能源供应形式还是用能设备, 都发生了巨大的变化, 由此形成了从能源供应到设备传递, 直至满足末端能量需求的建筑用能系统。

1.2 能源利用的热力学特性

能量守恒定律表明, 在能源利用过程中, 能量总数保持不变, 只是存在的形式和位置改变, 这是一个由有序到无序的过程, 相应的, 能量系统的熵增加。而熵反应的是动力学方面不能做功的能量总数。也就是说, 能源利用是可做功的能量总数不断减少的过程。随着能量完全耗散于环境, 最终全部变为不可做功的能。

焓代表能量的可做功能力, 是衡量能量品质高低的参数, 焓从“量”和

“质”两个方面规定了能量的“价值”^[1], 解决了热力学中长期以来没有一个参数可以单独评价能量价值的问题, 改变了人们对能的性质、能的损失和能的转换效率等问题的传统看法。

现实中, 能源利用所历经的转化、传递等过程均不可逆, 因而存在不可逆引起的损失, 体现在可用功向不可用功的转变, 即焓量的减少。可以看出, 能源利用的本质是对其包含焓量的利用。实现能源资源的节约, 需要兼顾能源在“数量”和“品质”方面的高效利用。

1.3 建筑用能系统的定义

建筑实现能量利用时, 首先需要能源的供应, 多数情况下, 为了匹配建筑能量需求的形式及空间分布, 能源需经过设备转换和输配, 最终满足建筑用能需求。因此, 研究认为由能源供应开始, 包含能量设备系统转换传递, 直至在建筑中利用这一整体为建筑用能系统。

1.3.1 系统边界

完整能量系统包含了焓量的输入、设备投入以及人员作用下的建筑用能需求。其中, 焓量的输入分两方面: ①主焓源的焓量输入, 用于满足建筑需求的焓量; ②辅助焓量输入, 主焓量利用时辅助过程的焓量消耗。设备在能源利用过程中主要起能量转换及输配作用, 现有建筑设备系统方案分析时, 经济因素往往占据主导地位, 然而经济性优的设备系统并不一定符合人类社会整体和长远的发展利益, 因此, 研究中并不涉及设备系统成本方面的分析, 仅以能源的可持续发展为基本目标。主焓源输入的焓量到达建筑端, 在满足用能需求后逐渐在建筑中耗散, 最终以热量传递、扩散等方式转变为室外环境中的无用能。综合以上分析, 研究确定建筑能量系统焓分析边界: 以自然界焓量资源输入为起点, 追踪焓量在设备系统中的传递过程及在建筑中的利用, 直至主焓量输入完全转变为无用能。另外, 研究考虑辅助焓量的消耗以及各焓量上游的间接焓耗, 从而为建筑能量系统用能过程的完全焓耗分析提供基础。

1.3.2 环境状态

合理确定环境状态参数有利于系统焓值的准确计算。一般认为与环境平衡的系统只含有焓, 系统与环境的平衡包含热平衡、力平衡和化学平衡, 所

涉及的参数分别为温度、压力和物质分布，与各环境状态参数偏离的系统则相应的有热量烟、压力烟和扩散烟。现有技术条件下，能量系统的扩散烟尚难以利用，因此，分析能量系统烟值时，忽略扩散烟，主要关注由温度和压力决定的热量烟和压力烟。

由于各用能项目发生的位置和时间存在差异，即使同一建筑中的用能项目，也可能对应不同的环境状态。各用能项目的环境状态是指该项用能需求得到满足时周围环境的状态。不考虑建筑中与生产工艺有关的能量需求，建筑物的主要用能项目包括：采暖、空调、照明、炊事、生活热水以及其他电器设备。其中，建筑物的采暖和空调需求取决于环境状况，存在季节性差异，而其他用能项目受室外环境影响很小，在全年中保持在稳定范围。显然，对于建筑中不同的用能项目，不能取统一的环境状态。本研究在分析各用能项目的时间分布及所处环境的基础上，确定了各用能项目环境状态参数的取值方法，具体如表 1.1 所示。

考虑到采暖用能在整个采暖期通常是连续进行的，因此，其基准环境温度取采暖期室外平均空气温度。而空调多为昼间使用，人们可按需调节，其基准环境温度可近似取夏季空调室外计算温度。

表 1.1 建筑各用能项目环境状态参数取值方法

用能项目	T_0/K	p_0/Pa
采暖	采暖期室外平均空气温度	采暖期室外平均大气压力
空调	夏季空调室外计算温度	空调期室外平均大气压力
照明、炊事、生活热水、其他设备	全年室外平均空气温度	全年室外平均大气压力

1.4 建筑用能系统烟分析理论基础

1.4.1 几种形式能量的烟

建筑用能过程中涉及的主要能量形式包含以下几方面。

(1) 机械形式能量的烟：运动系统所具有的宏观动能和位能理论上能够全部转换为烟，可以分别称之为动能烟和位能烟。

(2) 热量烟和冷量烟：系统所传递的热量在给定环境条件下用可逆方式所能做出的最大有用功称为该热量的烟。冷量也是热量，冷量烟也就是温度低于环境温度的热量烟。

(3) 稳定流动系统的熵: 稳定物流从任一给定状态流经开口系统以可逆方式转变到环境状态, 并只与环境交换热量时所能做出的最大有用功。

(4) 燃料的化学熵: 物质通过可逆的化学反应过程和可逆的浓度变化过程达到与环境完全平衡的约束性死态时, 对外提供的最大有用功就是该物质的化学熵。不同形态化学燃料的熵估算式见表 1.2。

表 1.2 几种形式能量的熵^[1,2]

名称	计算公式
热量熵和冷量熵	$E_Q = \delta Q(1 - T_0 / T)$
稳定流动系统的熵	$E = H - H_0 - T_0(S - S_0) + 1/2mv^2 + mgz$
气体燃料化学熵	$E_g = \Delta H_{u,l}$
液体燃料化学熵	$E_l = 0.975 \Delta H_{u,h}$
固体燃料化学熵	$E_s = \Delta H_{u,h}$

注: δQ 为热量或冷量, kJ; T_0 、 T 为环境、系统的温度, $^{\circ}\text{C}$; S 、 S_0 为系统、环境状态下的熵, kJ/K; H 、 H_0 为系统、环境状态下的焓, kJ; m 、 v 、 z 分别为稳流系统的流量、流速及位势, 单位分别为 kg/s、m/s 及 m; g 为重力系数, 9.8N/kg; $\Delta H_{u,l}$ 、 $\Delta H_{u,h}$ 为燃料的低位、高位发热值, kJ/kg。

从熵的概念出发, 根据可逆过程和不可逆过程的定义, 可以发现: 在任何可逆过程中, 熵的总量保持不变; 对于任何不可逆过程必然会发生熵向熵的转变, 并使熵的总量减少, 这种减少称为不可逆过程的熵损失。

1.4.2 熵平衡方程

随着熵分析方法的发展, 研究者分别建立了孤立系统、封闭系统、开口系统、稳流系统的熵平衡方程, 并对各系统中典型过程的熵损失机理和计算方法进行了探讨。

实际自然界发生的热过程都是不可逆的, 也不存在熵的守恒规律, 能量的转换都伴随着熵向熵的转化, 而能量中的熵部分是不可能转变为有用功那部分能量, 随着能量转换过程的进行, 最终它将转移给自然环境。不可逆过程中熵量减少的部分, 即为熵损失, 该损失在热平衡中并无反映。

与热平衡方程式不同, 系统在一个不可逆过程中各项熵的变化是不满足平衡关系式的。只有像建立熵平衡方程式那样, 附加一项熵损失才能给一个系统或过程建立熵平衡方程式。输入系统的熵为 $\sum E_{in}$, 输出熵为 $\sum E_{out}$, 系统各项内部熵损失为 E_L , 系统熵的变化为 ΔE , 则它们的平衡关系为

$$\sum E_{\text{in}} = \sum E_{\text{out}} + E_{\text{L}} + \Delta E$$

在考虑熵平衡时，需要记入各项不可逆熵损失才能保持平衡。典型的不可逆熵损失过程是：有限温差下传热过程引起的熵损失，功摩擦变热过程引起熵的损失，绝热节流过程引起熵的损失。

1.4.3 熵分析指标

1968年，Beach对熵效率的定义作了系统的研究，探讨了定义熵效率的一般规律。研究明确指出，在熵的定义式中，每种熵流不可能同时出现在分子和分母上，并且分母与分子的差值应等于熵损失。不管怎样定义熵效率，其范围都应该在0~1之间。

在满足熵效率一般规律的前提下，还可以有许多不同形式的熵效率。1981年，杨东华提出了物质系统熵和熵的统一表达式，并给出了四种工程意义明确的熵效率的定义^[3]。其他文献中也提出过各种不同形式的熵效率表达式^[4]。经过综合归纳发现，不同作者提议的各种常用的熵效率基本上可以归纳为两种形式——普遍熵效率与目的熵效率。普遍熵效率反映系统或设备的输出熵与输入熵之比，适用于那些难以明确定义出“收益”或“目的”的过程，凡有“惰性”熵量存在的过程，不宜使用普遍熵效率。

目的熵效率表示以代价熵为基准时，收益熵所占的比例，能够反映热工设备或装置的热力完善度。国内外大量关于热工设备或装置的目的熵效率研究按照设备功能分为以下几类：①能量生产和转换，研究对象包含锅炉设备、集热器、热泵装置、制冷机以及换热器等；②能量输配装置，如管路、泵和风机等；③末端设备，如散热器、风机盘管。研究发现，能量生产和转换过程的熵效率普遍较低，是节能的重点部位，能量输配装置的熵效率相对较高，熵损失主要由散热和压降引起，末端设备的熵效率取决于设备中能量与用户所需能量的品质差，该差别越小，熵效率越高。

熵效率与能量转换效率有类似的定义，所不同的是，熵效率为系统或过程收益熵 E_{gain} 与支付熵 E_{pay} 的比值，即

$$\eta_e = \frac{E_{\text{gain}}}{E_{\text{pay}}}$$

根据热力学第二定律，任何系统或过程的熵效率不可能大于1。对于理想的可逆过程，由于熵损失为零，故其效率等于1。可逆过程是热力学上最完善