



[美] Jeffrey H. Lang 著

刘欢 刘卫国 等译

Multi-Wafer Rotating MEMS Machines

—Turbines, Generator and Engines

MEMS多晶圆旋转机械

——涡轮机、发电机和发动机



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

西安工业大学专著出版基金资助

Multi-Wafer Rotating MEMS Machines
—Turbines, Generator and Engines

MEMS 多晶圆旋转机械
——涡轮机、发电机和发动机

[美] Jeffrey H. Lang 著

刘 欢 刘卫国 段正勇 吴 恒 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-090 号

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 多晶圆旋转机械—涡轮机、发电机和发动机/
(美)杰弗里·H. 朗(Jeffrey H. Lang)著;刘欢译. —
北京:国防工业出版社,2016. 6

书名原文:Multi-Wafer Rotating MEMS Machines
ISBN 978-7-118-10543-8

I. ①M... II. ①杰... ②刘... III. ①微电机 IV.
①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 118011 号

Translation from English language edition:

Multi - Wafer Rotating MEMS Machines

by Jeffrey H. Lang

Copyright © 2010, Springer US

Springer US is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 23½ 字数 456 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 120.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

《MEMS 多晶圆旋转机械——涡轮机,发电机和发动机》作为 PowerMEMS 领域的一本里程碑式的著作,是由麻省理工学院牵头、历时 13 年的 MEMS 微发动机项目研究成果的一个总结。该项目涉及了多个学科的理论与技术,涵盖微制造、薄膜技术、材料科学、结构学、燃烧与传热学、电机科学等多个领域,除麻省理工学院之外还有佐治亚理工学院、克拉克亚特兰大大学、马里兰大学帕克分校等机构一百余名科研人员参与了该项目的研究。

PowerMEMS 的最终目的是建立微型发电系统,以代替部分现有的常规化学电池系统。便携式电子设备在民用及军事领域的日益普及和发展,致使常规化学电池在能量密度、质量、尺寸等方面成为这类设备的制约因素,实际应用迫切需要一种体积和质量更小的高能量密度电源系统。随着无线无源传感器网络、微型机器人、微型无人机等装置的不断发展,同样需要微型的高能动力装置或独立微型电源来克服现有电池系统的体积重量较大、能量密度低的缺陷。MEMS 技术在加工能力,特别是体硅加工与封装工艺方面的日益进步,使得利用 MEMS 技术制作微型动力装置成为可能,并由此形成了全新的 PowerMEMS 研究方向。虽然微发动机项目研究仍然任重道远,但是 MEMS 多晶圆旋转机械中对 MEMS 工艺,尤其是体硅工艺的研究极具深度与广度,值得 MEMS 其它领域参考借鉴。

本书第 1、5、9 章由西安工业大学刘欢老师翻译,第 2、4 章由西安工业大学卫国教授翻译,第 6、7 章由南阳理工学院机械与汽车工程学院段正勇老师翻译,第 3、8 章由西安石油大学机械工程学院吴恒老师翻译。全书由刘欢统稿。

在本书的翻译及对译文的修改过程中得到西安电子科技大学机电工程学院刘岩老师、西安交通大学机械工程学院杨树明教授、美国佐治亚理工学院方续东博士、英国帝国理工学院孙禄博士的鼎力相助。在全书的翻译、审校、出版过程中得到西安交通大学机械学院蒋庄德院士的悉心指导。译者在此对他们表示衷心的感谢。

本书的出版,得到西安工业大学译著出版基金、装备科技译著出版基金的大力支持,在此表示由衷的感谢。

由于译者水平有限,书中难免有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

2016 年 1 月 11 日于西安工业大学未央湖校区

译者

前 言

本书是麻省理工学院微发动机项目的产物。1995 年秋天,该项目在麻省理工学院启动,后来通过与佐治亚理工学院、克拉克亚特兰大大学和马里兰大学帕克分校的合作不断扩大。该项目在 2008 年夏天,即项目启动后的将近 13 年后结束,它涉及了包括教职员工、博士后研究人员和学生在内的共 100 余位科研人员。

微发动机项目的总体目标是基于 MEMS 制造技术开发一个小型化、功率密度高的燃气涡轮发电机。因此,该项目需要开发一个基于燃烧燃料的喷气发动机,以驱动发电机产生可满足一般用途的电。沿着这条科研道路,本项目将会推动 MEMS 相关领域中很多科学和工程技术的发展。本书的目的是将这些研究成果以简洁并相对完整的方式集成在一起。

从本质上讲,微发动机研究是一个多学科交叉的项目,涵盖材料、结构、制造、燃烧、热传递、涡轮机、轴承和电机学等学科,而且都在 MEMS 尺度下。这些学科中的大部分关键内容在本书中都进行了讨论。首先,从项目的实用性、科学性和工程原理上讲,第 1 章和第 2 章是该项目的基础。第 3 章讨论了材料、结构和封装。第 4 章和第 5 章重点介绍 MEMS 工艺,特别介绍了用于加工像微发动机一样复杂的器件的工艺。第 4 章的重点为硅加工工艺,而第 5 章侧重于电镀磁性元件,如线圈和磁芯,以形成一个硅超级结构。第 6 章介绍了超高速空气轴承的研究进展。第 7 章介绍了热流体和涡轮机的研究工作。第 8 章研究了涉及 MEMS 发电机的电机学问题。最后,第 9 章的重点为 MEMS 尺度下的燃烧。

作为本项目的一员,过去的 13 年乃至以后,我很荣幸能够与本书的众多参与者和很多项目涉及的职员、博士后和学生等进行合作。感谢他们在项目开始之初到本书完成的热情工作。没有他们的努力,本书是无法面世的。

目 录

第 1 章 动力微机电系统 (PowerMEMS) 简介	1
1.1 紧凑的便携式能源	1
1.2 化学能源	3
1.3 功率系统设计因素	5
1.4 总结	6
参考文献	6
第 2 章 系统设计和器件综述	7
2.1 简介	7
2.2 热力学和尺度效应	7
2.2.1 机械学尺度效应	9
2.3 MEMS 燃气轮机的设计概述	10
2.4 轴承和转子动力学	12
2.5 涡轮机械流体力学	13
2.6 结构和材料	15
2.6.1 材料	15
2.6.2 结构设计	15
2.7 燃烧	16
2.8 发动机控制及配件	18
2.8.1 发动机控制	18
2.8.2 传感器	18
2.8.3 燃料控制阀	19
2.8.4 起动器 - 发电机	20
2.9 发动机设计、元件集成、设计演进	22
2.9.1 电动微马达 - 压缩机和涡轮机 - 发电机	23
2.10 总结	24
参考文献	24

第3章 材料、结构和封装	26
3.1 引言	26
3.2 尺度效应与材料选择	27
3.2.1 尺度效应	27
3.2.2 材料选择	27
3.3 室温下的强度设计	28
3.3.1 力学测试	28
3.3.2 结构设计	29
3.4 高温下的强度设计	31
3.4.1 硅的高温材料模型	32
3.5 硅的碳化物在混合结构中的使用	33
3.5.1 SiC/Si 混合结构的机械特性	34
3.5.2 SiC/Si 混合结构的制作工艺	35
3.5.3 机械测试结果	37
3.6 封装	39
3.7 总结	41
参考文献	41
第4章 微发动机的加工	43
4.1 前言	43
4.2 微发动机	43
4.2.1 轴承测试台	44
4.2.2 燃烧室	44
4.2.3 涡轮增压机	45
4.2.4 自激型发动机(SSE)	45
4.3 微加工基础工艺	46
4.3.1 微发动机材料	47
4.3.2 光刻	49
4.3.3 特殊光刻工艺	53
4.3.4 湿法腐蚀工艺	54
4.3.5 干法刻蚀工艺:反应离子刻蚀(RIE)	55
4.3.6 深反应离子刻蚀(DRIE)	55
4.3.7 熔融键合	61
4.3.8 阳极键合	64
4.4 微发动机的特有加工	64

4.4.1	进气增压孔和喷嘴的制作	65
4.4.2	转子释放方法	69
4.4.3	径向轴承的工艺开发	75
4.4.4	叶片加工过程	85
4.4.5	键合工艺	96
4.5	SSE 的制作	102
4.5.1	简介	102
4.5.2	转子工艺: $L_3 \sim L_8$	103
4.5.3	L_1 和 L_{10} 的制作	117
4.5.4	L_2 和 L_9 的制作	117
4.5.5	最终组装	118
4.6	总结和展望	120
	参考文献	121
第 5 章	微尺度旋转磁场机械的加工	124
5.1	引言	124
5.2	基本原理/结构	125
5.3	微尺度磁力机械的挑战	125
5.3.1	机械设计问题	126
5.3.2	加工工艺问题	127
5.4	线圈	127
5.4.1	基本工艺	128
5.4.2	多级线圈	129
5.5	软磁体	130
5.5.1	加工	132
5.5.2	叠层	133
5.6	硬磁体	133
5.6.1	加工	134
5.6.2	磁化	137
5.7	多晶圆硅片的集成	138
5.8	装置示例	140
5.8.1	感应电机	140
5.8.2	永磁体机	143
5.9	总结	146
	参考文献	147

第 6 章 微型涡轮机械中的高速气体轴承	150
6.1 简介	150
6.2 相关工作	151
6.3 挑战和未知领域	152
6.4 MEMS 涡轮机械的转子动力学考虑	154
6.5 静压气体径向轴承分析	157
6.5.1 流体静力学模型	158
6.5.2 流体动力学模型	159
6.5.3 阻尼力模型	160
6.5.4 建模的局限性	160
6.5.5 超短静压气体轴承的比例准则	161
6.6 超短径向气体轴承的涡动不稳定性	166
6.6.1 涡动不稳定出现的简化原则	166
6.6.2 不稳定流量对气体轴承动态行为的影响	169
6.6.3 增强涡动稳定的轴承各向异性刚度	176
6.7 静压推力气体轴承分析	185
6.7.1 静压推力气体轴承的稳态特性模型	187
6.7.2 转子倾斜对推力轴承性能的影响	190
6.7.3 动态稳定性考虑	198
6.8 环形密封	203
6.8.1 环形平面密封的负径向刚度	203
6.8.2 平面密封径向刚度模型	204
6.8.3 环形迷宫密封模型	206
6.9 试验考虑	209
6.9.1 测试设备及诊断	209
6.9.2 穿过固有频率和加速到高转速的运行策略	212
6.9.3 高 DN 轴承运行实例	214
6.10 设计内涵	215
6.10.1 轴承各向异性的影响	216
6.10.2 轴承性能和制造误差的关系	216
6.11 总结	218
参考文献	220
第 7 章 热流体和涡轮机械	223
7.1 绪论	223

7.2	尺度的含义	225
7.2.1	物理效应	225
7.2.2	制造约束影响	232
7.3	微型压缩机设计与分析	236
7.3.1	宏观压缩机试验台——一个用于研究绝热微尺度压缩机性能 的放大设备	236
7.3.2	非绝热微型压缩机的性能	246
7.4	微涡轮机的设计	250
7.5	MEMS 涡轮增压器	251
7.5.1	设计	251
7.5.2	结果	253
7.5.3	燃气涡轮机测试	255
7.6	总结	256
	参考文献	257
第8章	发动机与发电机	259
8.1	背景	259
8.1.1	新颖之处	260
8.1.2	相同之处	265
8.1.3	电磁机械类型、属性和选择	265
8.1.4	小结	266
8.2	模型的简化	267
8.3	电感应机	268
8.3.1	分析	270
8.3.2	设计和性能	273
8.3.3	功率电子学和控制	278
8.3.4	特殊制造问题	280
8.3.5	试验	283
8.3.6	小结	287
8.4	永磁同步电机	288
8.4.1	建模	290
8.4.2	设计	300
8.4.3	功率电子	304
8.4.4	试验	310
8.4.5	小结	317
8.5	总结	318

参考文献	319
第9章 旋转机械的微燃烧室	323
9.1 绪论	323
9.2 燃烧的基本概念	324
9.2.1 燃烧的化学反应	324
9.2.2 当量比	325
9.2.3 化学动力学	325
9.2.4 微型燃烧室效率的定义	326
9.2.5 燃烧方法	327
9.3 微型燃烧室面临的挑战	328
9.3.1 停留时间的限制	328
9.3.2 热传递和流体结构耦合	330
9.3.3 材料限制	331
9.3.4 设计空间	331
9.4 均匀气相微燃烧室的研究	332
9.4.1 早期微燃烧室概述	332
9.4.2 贝塞尔六晶圆气相微燃烧室	333
9.4.3 回流区和燃烧稳定性	335
9.4.4 燃料注射和燃料空气混合	337
9.4.5 双区域微燃烧室	338
9.4.6 碳氢燃烧	339
9.4.7 燃烧空间	341
9.4.8 设计方法建议	342
9.5 均匀催化微燃烧室的研究	343
9.5.1 点火技术和特征	344
9.5.2 贝塞尔催化微燃烧室的性能	345
9.5.3 扩散和时间尺度	346
9.5.4 压力损耗	348
9.5.5 等温多孔活塞流体反应器模型	349
9.5.6 催化微燃烧室的运行空间	353
9.6 加工和封装	354
9.6.1 基本工艺	354
9.6.2 催化元件	356
9.6.3 催化微燃烧室的组装和键合	358
9.6.4 封装	359

9.7 总结..... 359

9.7.1 设计指南 359

9.7.2 未来工作展望 360

参考文献 361

第1章 动力微机电系统(PowerMEMS)简介

PowerMEMS 的概念最早是由 Epstein 和 Senturia (Stephen D. Senturia, 麻省理工学院电子系著名教授)^[1] 在 1996 年提出的, 它描述了可以产生功率或传递热量的微系统。研究人员最初的兴趣主要是 MEMS 热力发动机, 特别是布雷顿循环 (如气体涡轮机) 及其子系统。研究人员认为未来微系统的能量密度会等于甚至超过宏观系统的能量密度。在此之后, PowerMEMS 逐渐演变成为一个更广泛的概念, 涵盖了其他的传统热力循环、新型热力发动机 (这些发动机可能只在微尺度下具有吸引力)、能源收集方案, 以及微型燃料电池——这些都是基于 MEMS 技术的。

热力循环和热力发动机 (如朗肯、布雷顿、奥托柴油机等) 是工业革命的核心。这种发动机可以将化学能转换成热能, 进而转换为机械做功。这种机械能可直接用于汽车推进、液体输送或转换成电能。提供推进力是 MEMS 喷气发动机和火箭发动机的目标之一, 而 MEMS 燃气涡轮机、MEMS 蒸汽机和 MEMS 内燃机则用来给发电机提供动力以产生电能。通过输入电能、机械能或热能, MEMS 热力发动机可以像人们熟悉的传统热泵、冷却机和冰箱一样工作。PowerMEMS 还包括将化学能直接转换成电能的热机, 这种热机一般采用热电效应。这些器件可能主要用于发电, 或其他不同功能, 比如燃料电池的主要功能为燃料重整, 动力输出或排气是次要功能。PowerMEMS 还包括将机械能直接转换成电能的装置, 如自动充电手表和脚踏发电机。

小巧和便携电子产品如计算机、数字助理 (PDA 个人数字助理)、手机、GPS 接收机等的需求, 需要更多更小的能源供应。现在最好的电池不能满足这些电子产品的能量需求和功率密度。能源缺乏促使人们努力追求更高效节能的电子设计方法。同样地, 微电子学的持续发展使得移动设备的电子系统进一步缩小, 如小动物尺寸级别的地面机器人和飞行器。这些小型移动系统, 在某些情况下需要非常小, 需要更加紧凑的动力和推进系统。因此可以看出, 人们对 PowerMEMS 的兴趣源于当前的实际应用和技术的推动。本书主要描述: ①便携式电源; ②小型飞行器的推进系统。但其方法和技术适用于上面所讨论的其他应用。

1.1 紧凑的便携式能源

便携式电子产品的能量供应需要满足许多要求。这些要求对一个特定的技术

来说往往是冲突的,因此需要折中设计。能量可以以各种形式存储——化学能、机械能(如弹簧)、流体(加压的气体)、势能(如在重力场中的液体)或核能。本节以化学能为重点,因为目前化学能能量密度远超过其他已知的非核动力源。这些能量供应要求包括以下的因素:

能量密度——这一主要指标是满足所需的能量对应的质量和体积。这包括主要能量来源(化学反应),容纳其所需要的结构(油箱、压力容器等),能量转换器(发动机、燃料电池等)。进行化学反应所需结构的尺寸与能量转换器的尺寸的相对比取决于所需的峰值功率、需要的总能量(平均功率乘以持续时间)和能量源。俘能器中几乎全是能量转换器,而电池可认为全是化学成分(虽然实际上电池现在接近60%~80%)。

功率密度——产生电力系统需要供给的功率(单位时间内的能量)对应能源的质量和体积也是同样重要的。峰值功率可能决定电源转换系统的尺寸大小。例如,设计要求使用时间长,但功耗非常低的电池(如手表所用电池),其能量密度是高峰值功率的电池(如电动工具所用电池)的两倍。同样,对于机械发电机,考虑到固定的系统总重量(发电机加燃料),输出功率较大的发电机的重量将比去掉设计要求的燃料重量的发电机大。总之,系统设计者必须处理好能量密度和功率密度的关系。

效率——化学能转化为电能的比例反映了总能量密度的大小。显然,主要能量源的尺寸与效率成反比。未传送给用户的能量以热量的形式排放出去。对于某些设备,这种热排放是一个主要设计要素,它影响能源系统的大小、重量和复杂性。

安全——一个苹果大小的电池含有的化学能比一枚手榴弹多,所以安全是重要的考虑因素。除了爆炸和着火,毒性、热损伤和对环境的影响也是重要因素。例如,在无人机和军事应用中使用的电池,其能量密度是工业或零售中安全电池能量密度的两倍以上。

环境——储存和使用环境也会影响能源/电力系统的设计。典型户外应用的环境温度为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。对于常见化学电池,这是一个很大的温度范围。在高温下,需要降低能量密度以保证安全。在低温下,多数电池的输出电量不足。事实上,在寒冷的气候,经验丰富的徒步旅行者和士兵经常带着电池睡在睡袋里,以保持电池温暖。使用液态水的电池系统,如一些燃料电池系统,需要特殊的保护措施,以保证在低于冰点的条件下存储、启动和使用。随温度上升,热力发动机由于流经发动机的空气质量下降、工作效率降低,产生的功率也随之减少。系统工作的海拔高度对于发动机和燃料电池来说是一个重要的考虑因素,因为这些吸气系统依赖大气中的氧气含量。随着海拔的升高,氧气浓度快速下降,在3000m高度时下降约30%。除非使用涡轮增压器或类似设备,否则系统输出功率将随海拔增加持续下降。显然,吸气装置不能在水下工作。灰尘、气溶胶(在海洋环境中存在的问题)和雨或雪等污染需要引起设计人员的关注。环境的挑战还包括机械因素,

如方向(右侧朝上、倒置),振动(慢跑、车辆运动)和冲击(从 2m 高度跌落到坚硬的地板上,可能会给设备 5000g 的冲击)。

综合起来,对于便携式能源来说,能量密度和功率密度是重要要求,然而,还有很多其他因素会影响一个特定技术的性能和效用。许多这样的因素是针对具体应用的,可能也决定着最佳的设计方案。

1.2 化学能源

表 1.1 比较了几种化学能源单位质量含有的化学能和以当前或近期的转换效率为假设所估计的净能量输出。锂离子电池理论上含有的化学能量密度与 TNT 一样。表中给出了两种目前实用的锂离子电池 LiSO_2 和 LiSOCl_2 。虽然与 LiSO_2 相比, LiSOCl_2 电池有两倍以上的能量密度,但目前的电池系统,对于商业甚至军事和航空航天应用,并不足够安全。两者都是一次性使用的原电池。与之相比,可充电电池的能量密度减少了 30%~50%。电池由于广泛使用、价廉,因而是重要的,代表了所有便携式电源的基准,因此 PowerMEMS 必须具有与之媲美的价值。

表 1.1 化学能源

能源种类	潜在的能量 密度 ^① /(W·h/kg)	实际的能量密度/(W·h/kg) ^② (考虑了器件的转换效率)
锂电池	1400	175(LiSO_2) 300(LiSOCl_2)
TNT	1400	NA
糖	4700	NA
甲醇	6200	1500~3100
柴油燃料	13200	1320~5000
氢气	33000	1150~23000
①基于焓; ②(系统转换效率)×(燃料中能量)		

与其他化学能源相比,锂离子电池和炸药的能量密度较低,一个原因是它们同时包含燃料和氧化剂,而其他的化学能源以大气中的氧气作为氧化剂,因此不需要携带氧化剂(除非在水下或在太空使用)。

氢气的化学能量密度最高,但在标准条件下是气体,因此必须储存在容器中。目前的储存方法中,容器质量大大超过其包含的氢气。常用的储存方法包括储存为金属氢化物、高压气体和液体,这 3 种情况下的净能量密度都比液态的碳氢化合物(如柴油或甲醇燃料)要低得多。糖,作为一种生物“燃料”,它的能量密度约为柴油的 1/3。

图 1.1 以重力能量密度与体积能量密度的形式显示了燃料的能量密度信息。图(a)可以看出 3 种含氢燃料的能量密度与锂离子电池化学能相当,比液体燃料中能量密度最高的柴油低一个量级。

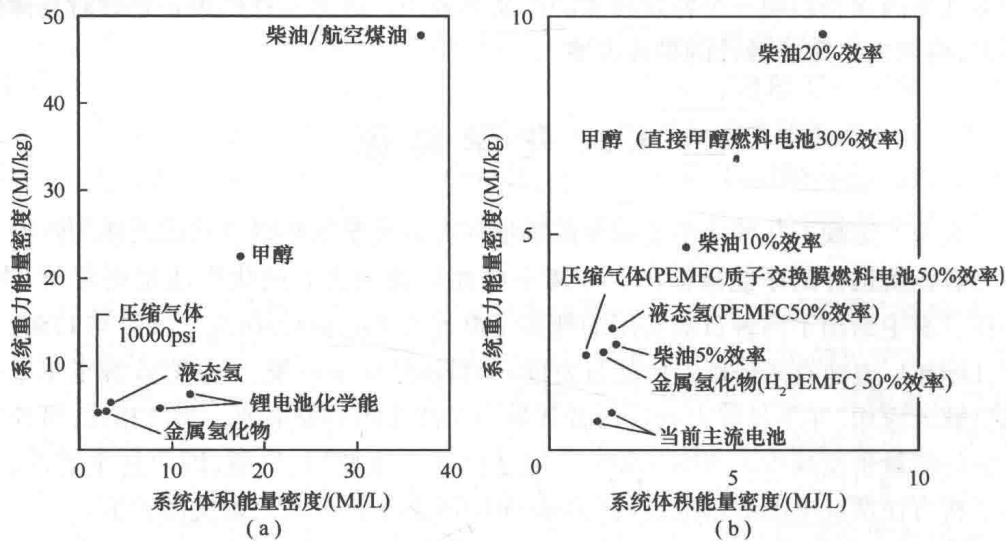


图 1.1 常见便携式能源的能量密度(a)及考虑了转换效率的净能量密度(b)

图(b)显示了相同的数据,但考虑了功率转换器的假定效率(而不是其质量或体积)。目前一次性锂电池可传输的功率比其理论值低了一个数量级。质子交换膜(PEM)燃料电池以氢为原料,并以 50% 左右的净效率工作。当前的甲醇燃料电池(DMFC)效率约为 30%。低于 10kW 的便携式柴油发电机组的效率为 20% ~ 30% ,此效率随机组规模的增加而提高。

图 1.2 将图 1.1 中的数据和目前大型能源转换系统的效率值在更大的范围中进行了重新绘制。大型燃气轮机的效率为 45% ~ 55%。现代大型(大于 100MW)燃气涡轮与蒸汽循环结合的发电厂最高效率可以达到 60%。大型柴油机的效率为 40% ~ 50% ,而汽车发动机接近 30%。目前最好的燃料电池的效率约为 50%。系统效率可以通过收集和利用废热来进一步提高,如用废热进行加热或冷却。

如图 1.1 和图 1.2 所示,在空气中燃烧的碳氢化合物的能量密度是目前最好锂化学电池的 20 ~ 30 倍,因此燃料系统只需要较低的效率就可以与电池媲美。两图还表明,氢气由于非常低的净密度(氢和容器)难以作为许多应用的便携式燃料。因此,以氢为原料的便携式转换器,如质子交换膜燃料电池,可能需要用能量密集的碳氢化合物制造氢气,但这个过程,大大提高了设备的复杂性并导致降低了整体效率。这意味着,如果热力发动机或燃烧碳氢化合物的固体氧化物燃料电池可以满足需要的尺寸和效率,它们将是很有吸引力的替代品。

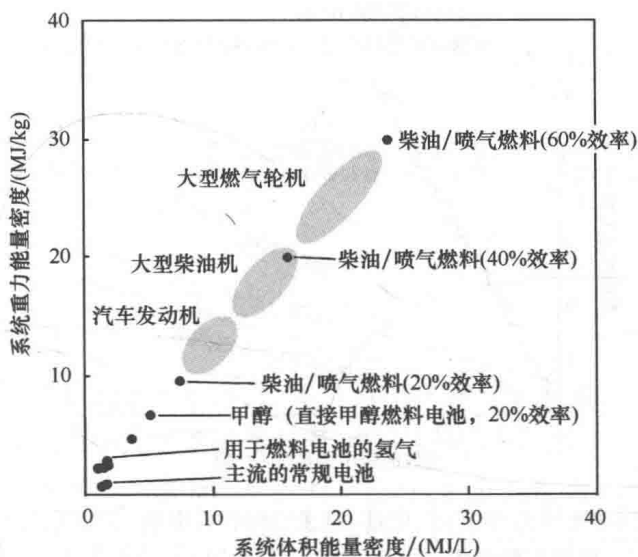


图 1.2 考虑了转换效率的净的燃料能量密度以及常规尺寸设备的转换效率

1.3 功率系统设计因素

由于功率转换器的尺寸和效率取决于所用的技术和燃料的能量密度,而燃料的能量密度又大大不同,因此最佳的设计方案是针对具体应用而言的。如果功率需求大,但能量需求不是很高,那么功率转换器决定整个系统的质量。在这种情况下,紧凑型功率转换器受到青睐,尽管它效率较低,并使用能量密度低的燃料。相反,当总能量需求很大时,高效的电源转换器往往使用能量密度高的燃料,即使转换器的体积比较大。

图 1.3 通过例子显示了功率密度和能量密度之间的关系。这里绘制了总能量对应的燃料质量相对总能量的曲线,能量通过 3 种技术手段提供: LiSO_2 原电池、效率超过 20% 的 DMFC 和理想的 MEMS 热发动机。3 种设计要求提供 50W 的功率。一个 BA 5590 电池质量约 1kg,可输出 $170\text{W} \cdot \text{h}$ 的能量(一个大笔记本电脑电池能量的两倍左右)。如果需要的能量超过 $170\text{W} \cdot \text{h}$,必须添加第二块电池。这种离散性产生了图 1.3 中的楼梯状的电池曲线图。在 20% 转换效率时,甲醇的能量密度比电池高,因此 DMFC 的曲线斜率比电池小(曲线上显示的燃料的能量密度是系统效率和甲醇浓度的综合效果)。一个无燃料的燃料电池质量为 2kg,所以基于这些假设,如果需要的能量低于 $170\text{W} \cdot \text{h}$,电池是一种较轻的方案。当需要的能量增加时,燃料电池看起来更有吸引力。图中显示了整体效率为 5% 和 10% 时,理想的 50g 柴油微热发动机的动力系统。由于具有很高的功率密度,微型热发动机总是优于电池。如果能量需求小于 $2000\text{W} \cdot \text{h}$,整体效率为 5% 的微热发