

微型热光电系统中一维光子晶体过滤器改进设计*

唐爱坤 潘剑锋 邵霞 刘杨先 胡松

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为进一步提高微型热光电系统的能量转化效率, 在系统中设置了一维 Si/SiO₂ 光子晶体过滤器, 以实现长波辐射能的回收利用。根据光学薄膜设计理论以及传输矩阵的方法, 获取了过滤器的基本结构及光学特性, 并针对其第一反射带宽度过窄的缺点, 采用多层膜叠加的方法, 获得了一个改进结构的过滤器 $[1.10(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[1.10(L/2HL/2)][0.95(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[0.95(L/2HL/2)]$, 其第一反射带宽度被拓展至 2~4 μm, 同时在通带内也具有 0.95 的透射率。利用完善后的系统能量转换计算模型进行了相关对比分析, 其结果表明, 过滤器可在有效缓解电池冷却负荷的同时, 通过提高辐射壁面的温度达到提升系统输出性能的效果, 在 1 500 mL/min 的总流量下, 采用改进结构过滤器的系统输出功率达到了 5.46 W, 效率为 2.6%, 比采用基本结构过滤器提高了 5.7%。

关键词: 光子晶体过滤器 微型热光电系统 改进设计 性能分析

中图分类号: TM914; O734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0279-05

Improving Design of 1-D Photonic Crystal Filter in Micro-thermophotovoltaic System

Tang Aikun Pan Jianfeng Shao Xia Liu Yangxian Hu Song

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To further increase energy conversion efficiency of micro-thermophotovoltaic system, a 1-D Si/SiO₂ photonic crystal filter was set in the system to ensure recycle of long wavelength radiation energy. The basic structure design and corresponding optical characteristics were obtained through optical thin film theory and transmission matrix method, and an improved design $[1.10(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[1.10(L/2HL/2)][0.95(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[0.95(L/2HL/2)]$ was developed according to the narrower first reflection band of basic structure by method of multilayered film superposition, which could extend the first reflection band to 2~4 μm and also had a transmission of 0.95 in the pass band. By perfecting the energy transition computational model, calculation results showed that the using of filter could effectively lower the burden of cell cooling, while at the same time boosted the temperature of radiation wall so as to raise system output performance. System output power density and total efficiency reached to 5.46 W and 2.6% when using the improved structure filter at mixture flux of 1 500 mL/min, which was 5.7% higher than the result of using basic structure filter.

Key words: Photonic crystal filter Micro thermophotovoltaic system Improved design Performance analysis

收稿日期: 2012-08-23 修回日期: 2012-10-11

* 国家自然科学基金资助项目(51206066)、江苏六大人才高峰第八批资助项目(装备制造 201127)、江苏高校优势学科建设工程资助项目和江苏大学高级专业人才培养启动基金资助项目(11JDC139)

作者简介: 唐爱坤, 讲师, 博士, 主要从事微尺度燃烧和微动力系统研究, E-mail: tycoon@ujs.edu.cn

通讯作者: 潘剑锋, 教授, 主要从事动力机械燃烧过程和微动力系统研究, E-mail: mike@ujs.edu.cn

引言

近年来,为提高热光电(Thermophotovoltaic, TPV)系统的整体输出性能,加速装置实际应用的进程,针对该系统的光谱控制技术得到了迅速发展。TPV光谱控制的方法主要集中在选择性辐射表面和光学过滤器的运用上,其中光学过滤器的设置较为容易,技术也较成熟,主要包括干涉过滤器、等离子过滤器、共振阵列过滤器以及背面反射器等几种^[1]。

目前在TPV系统中,干涉过滤器的研究最多,其中又以一维周期性Si/SiO₂光子晶体最为常见。Sullivan等^[2]采用传输矩阵的方法设计了由5个Si/SiO₂基本单元构成的一维周期性光子晶体过滤器,获得了与试验测试吻合较好的光学特性。Liu等^[3]综合考虑了滤光器与高温壁面辐射光谱分布以及电池量子效率两方面的匹配性,通过优化设计获得了一个8层Si/SiO₂光子晶体过滤器的结构;Mao等^[4]针对光子晶体通带内特征波长附近存在较大反射波峰的问题,根据等效折射率的理论,提出了相应的改进方案。

一维光子晶体过滤器结构简单,加工方便,但反射带宽有限的缺点会造成部分远红外光子不能被反射利用,这点在设计时也应引起重视。因此,本文在前期微型热光电系统研究的基础上,通过对过滤器反射带宽进行拓宽,来获取一个改进的结构型式,并利用完善后的系统能量转换计算模型,对比分析该过滤器的设置对提高系统输出性能所起的作用。

1 光子晶体过滤器的基本设计

光学过滤器的作用是将光伏电池不能进行光电转换的光子反射回辐射壁面,一方面可提高能量的利用效率,另一方面也能降低电池工作温度。一维周期性光子晶体是一种采用溅射镀膜等方法在玻璃基体上交替形成的多层薄膜,入射光在其内部传播时会产生干涉现象,进而形成按波长区分的高反射带和高透射带。因此,研究光子晶体的实质是掌握光在不同结构的周期介质中的传播规律,这种传播可以用麦克斯韦方程及相应的边界条件进行求解。

设计一维光子晶体过滤器的基本要求是:在保证通带内较好的透射率的同时,要形成较宽的禁带,其中一级禁带的带宽 $\Delta\lambda$ 为^[5]

$$\Delta\lambda = \frac{4}{\pi} \left(\arcsin \left| \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right| \right) \lambda_0 \quad (1)$$

式中 n_H ——高折射率 n_L ——低折射率
 λ_0 ——一级禁带的中心波长

基于较好的光学特性、折射率匹配、来源广泛以及耐高温等优势条件,Si和SiO₂的组合成为制造TPV光子晶体过滤器的首选材料,其中Si的折射率为3.45,SiO₂的折射率为1.5。

一级禁带的中心波长计算式为

$$\lambda_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2 + \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}}{2 - \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}} \right) \lambda_g \quad (2)$$

式中 λ_g ——光电池的截止波长,对于GaSb电池,可取为1.78 μm

研究表明^[6]:当每层介质光学厚度为 $\lambda_0/4$ 时,过滤器可获得最大的反射带宽和透射带宽。另外,根据等效折射率概念,可将晶体结构的最外层和最内层的介质厚度减半,即将这两层的光学厚度调整为 $\lambda_0/8$ 时,可使光子晶体与基体以及最外层空气达到较好的阻抗匹配^[7]。

为避免通带内振荡程度加强引起的透射性能下降,周期性一维光子晶体的介质层不能太多,这里选择了由5个基本单元组成的11层Si/SiO₂光子晶体,其结构为(L/2H/L/2)₅。结合传输矩阵法^[6]并通过编写Matlab光谱特性程序,可获得该结构下光子晶体的透射率以及反射率曲线,如图1所示。

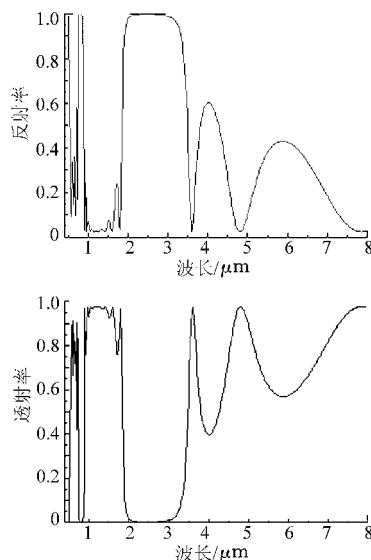


图1 基本结构Si/SiO₂光子晶体的光学特性

Fig. 1 Optical characteristics of Si/SiO₂ photonic crystal with basic structure

从图中的光谱特性可以看出:在0~8 μm 范围内,(L/2H/L/2)₅结构一维Si/SiO₂光子晶体的透射带为1~1.78 μm ,平均透射率达到0.9以上,但在通带内1.5~1.78 μm 这个波段出现了一个明显的反射峰;在2~3 μm 内具有接近1的反射率,而在波

长 $3\ \mu\text{m}$ 过后则呈现出低反射高透射的振荡特性,平均透射率接近 0.7。

图 1 通带内出现反射峰的区域正对应 GaSb 光电电池进行光电转换最好的光子,它的存在将会给系统的输出性能造成一定的影响。为此, Mao 等^[4]根据等效折射率的理论,在考虑光子晶体与入射媒介和石英基片的过渡后,对原有的 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构作了改进,使其结构为 $[1.10(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[1.10(L/2HL/2)]$,从而使过滤器在特征波长附近的透射率有了较大的提高。

2 光子晶体过滤器的改进设计

过滤器在设计时,除了要保证通带较高的透射率以外,反射带的宽度以及反射率也应当引起足够的重视。文献[8]指出,对于一个热光伏系统,由于辐射能被反射利用,采用光子晶体过滤器后辐射壁面的温度比未采用时高了约 300 K,这对增加系统电能输出非常有帮助。 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构的过滤器,其光谱特性也只是在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 内具有较高的反射率,反射带宽度相对较窄(见图 1),因此若能对其进行适当的拓宽,便可以使得更多的无效辐射能被回收利用,从而可通过提升壁面温度来提高系统输出性能。

为此,本文拟采用周期性多层膜叠加的方法^[7],实现对过滤器反射带的拓宽。

叠加时,首先选取两个中心波长不同的多层膜,其中一个膜的中心波长与 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构保持一致,即 $2.34\ \mu\text{m}$,另一个则采用 $3.30\ \mu\text{m}$,两种膜均采用上述的 $[1.10(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[1.10(L/2HL/2)]$ 结构。图 2 和图 3 分别给出了两种多层膜各自的反射率以及叠加后的反射率曲线。从图 3 组合过滤器的反射特性来看,叠加的作用使得第一反射带明显拓宽,其宽度从原先 $(L/2HL/2)_5$ 结构的 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 扩展到 $2\sim 4.5\ \mu\text{m}$,效果非常明显,基本达到了改进设计的目的。但同时应该注意到,叠加后透射带内 $1.5\ \mu\text{m}$ 之前的光子透射性能变得很差,不仅透射率很低而且存在很强烈的振荡。

对照图 2 中心波长 $3.30\ \mu\text{m}$ 多层膜的反射曲线,发现其在 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 范围内有着相同的透射特性,因此在与中心波长 $2.34\ \mu\text{m}$ 的多层膜叠加时这个缺点也被完全复制进来,这也说明 $3.30\ \mu\text{m}$ 的中心波长略显靠后。为此,将第 2 个多层膜的中心波长调整至 $3.0\ \mu\text{m}$,并通过计算得到叠加后的反射率曲线,如图 4 所示。对比图 3 和图 4 可发现,当第 2 个多层膜的中心波长前移后,组合过滤器的主反射

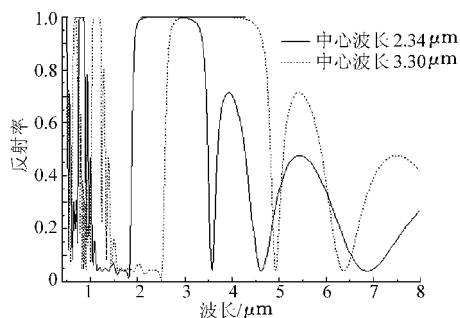


图 2 中心波长 $2.34\ \mu\text{m}$ 和 $3.30\ \mu\text{m}$ 的多层膜各自反射率随波长的变化曲线

Fig. 2 Reflectance of multilayer dielectric stack for central wavelength $2.34\ \mu\text{m}$ and $3.30\ \mu\text{m}$

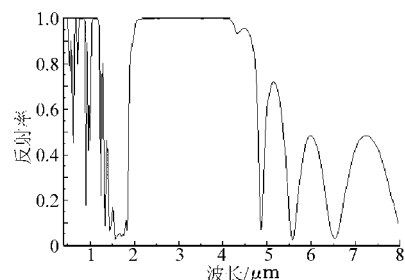


图 3 中心波长 $2.34\ \mu\text{m}$ 和 $3.30\ \mu\text{m}$ 的多层膜叠加后的过滤器反射率随波长的变化曲线

Fig. 3 Reflectance of superimposed filter by central wavelength $2.34\ \mu\text{m}$ and $3.30\ \mu\text{m}$ multilayer dielectric stack

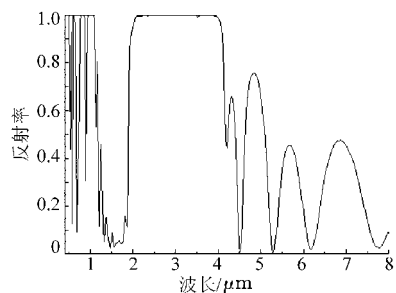


图 4 中心波长 $2.34\ \mu\text{m}$ 和 $3.0\ \mu\text{m}$ 的多层膜叠加后的过滤器反射率随波长的变化曲线

Fig. 4 Reflectance of superimposed filter by central wavelength $2.34\ \mu\text{m}$ and $3.0\ \mu\text{m}$ multilayer dielectric stack

带的宽度也缩至 $2\sim 4\ \mu\text{m}$,而通带内 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 范围内的透射情况也有了一定的改善,但仍存在两个明显的反射峰。对此,可根据等效层理论,将第 2 个多层膜结构微调为 $[0.95(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[0.95(L/2HL/2)]$,并得出图 5 所示的反射率曲线。

从图 5 中可发现,调整后的过滤器在 $1.1\sim 1.78\ \mu\text{m}$ 内具有非常好的透射性,平均透射率达到了 0.95,而在 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 范围内反射率接近 1,在 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内的反射率也比先前的 $(L/2HL/2)_5$ 结构有所提高,相比之下,呈现出更适用于 TPV 系统运行的光学特性。

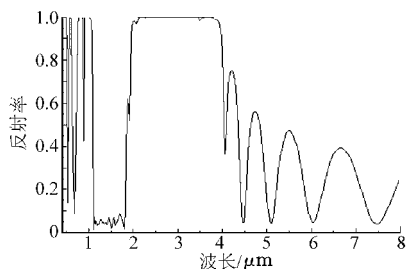


图5 改进结构的过滤器光学特性

Fig.5 Optical characteristics of improved structure photonic crystal

3 系统能量转换模型

为评价上述优化结构过滤器的设置对热光电系统工作性能的影响,将其运用在一种微型热光电系统(Micro-thermophotovoltaic system, MTPV System)中。MTPV系统是一种典型的基于微尺度燃烧的微型动力装置,可充当微型机械和机电产品的动力供给部分。前期已对该系统中的燃烧过程做了大量的实验和数值模拟研究,并在考虑辐射壁面温度分布不均匀性的前提下构建了从化学能输入到电能输出的能量转换整体计算模型^[9~11],但该模型尚未涉及光学过滤器的子模块。因此,本文首先对这一系统能量转换计算模型进行完善和修正。

在计算中,采用如图6所示的结构,其中微燃烧器设计成矩形通道型式,过滤器、光电池以及电池冷却通道等也设计成平板结构,并同辐射壁面对中平行放置,光子晶体过滤器则直接镀在电池表面;燃烧器外部整体长(x 方向)10 mm、宽(y 方向)8 mm、高度(z 方向)1 mm,通道高度0.6 mm,壁厚0.2 mm;电池(过滤器)外观尺寸与燃烧器相同,其间距为1 mm。

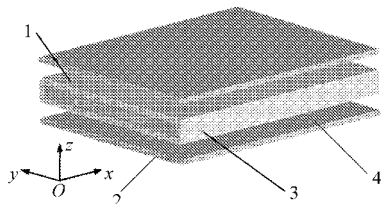


图6 计算对象结构示意图

Fig.6 Structure diagram of computation object

1. 辐射壁面 2. 光电池 3. 平板式微燃烧器 4. 过滤器

MTPV系统能量转换模型构建见文献[11],但由于加入了过滤器,此时系统的总效率 η_{MTPV} 应修正为微燃烧器的燃烧辐射效率 η_{rs} 、过滤层的光谱效率 η_{sp} 以及电池效率 η_{ce} 的乘积,即^[12]

$$\eta_{MTPV} = \eta_{rs} \eta_{sp} \eta_{ce} \quad (3)$$

其中

$$\eta_{rs} = \frac{P_{in}}{Q_f} \quad (4)$$

$$\eta_{sp} = \frac{P_{en}}{P_{in}} \quad (5)$$

$$\eta_{ce} = \frac{P_{el}}{P_{en}} \quad (6)$$

式中 Q_f ——输入燃料的化学能

P_{in} ——辐射表面发出的净辐射能

P_{en} ——通过过滤器的大于电池禁带宽度的辐射能

P_{el} ——输出电能

辐射表面发出的净辐射能等详细计算公式也可参见文献[11]。同样,由于在系统中加入了过滤器,其中通过过滤器的大于电池禁带宽度的辐射能、短路电流密度等计算公式中均需加入过滤器的光谱透射率函数。另外,光电池的冷却负荷定义为通过过滤器的辐射能与光电池的最大输出电能的差值。

在进行系统燃烧、传热过程模拟计算时,为正确考察过滤器对不可用辐射能的回收利用,根据Matlab计算出的过滤器光学特性,在Fluent辐射模型中设置了不同波长区间的10个灰带,随后又将自行编写的反射率自定义函数“DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY”导入,以正确计算此时辐射壁面温度分布。其余模型设置见文献[13]。

4 系统性能对比分析

表1分别给出了没有采用过滤器、采用 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构过滤器以及采用不同中心波长多层膜叠加的改进结构过滤器时各参数的计算值。计算时,选用氢气和氧气的预混合气体,当量比为1、流量为1500 mL/min。

表1 采用不同结构过滤器时的系统性能参数的对比

Tab.1 System performance parameters comparison using different structure filters

结构 型式	辐射表 面平均 温度/K	表面辐 射能 /W	燃烧辐 射效率 /%	光谱效率 或辐射传 热效率/%	电池 效率 /%	系统总 效率 /%
无过滤器	1516	48.57	23.15	18.88	19.14	0.84
基本结构	1840	100.15	47.74	25.76	20.01	2.46
改进结构	1889	113.66	54.18	23.22	20.68	2.60

从表中可以看出,一维Si/SiO₂光子晶体过滤器的设置对于提升系统整体性能的作用非常明显。以 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构过滤器为例,相对于无过滤器时,辐射表面平均温度提高了324 K,壁面辐射能也增加了1倍,这与文献[8]的结果是吻合的,某种程度上也验证了带有过滤器计算模型的正确性,而壁面辐射能的增加对于系统电能输出的提高也很明显,5.163 W的功率几乎达到了无过滤器时1.756 W

的3倍;从冷却负荷的数值来看,采用基本结构过滤器的系统仅比无过滤器的系统少了3 W,改善的效果似乎并不明显,但只要计算一下两种情况下冷却负荷与表面辐射能的比值,就很容易发现过滤器的设置所带来的减轻电池冷却负担的积极作用。

对于改进结构的过滤器,由于透射带的宽度略微变窄,其光谱效率比采用基本结构时低了2个百分点,但由于第一反射带的拓宽作用,不能进行光电转换的辐射能被回收利用,从而不仅使电池冷却负荷得到了适度的缓解,更重要的是使得辐射表面平均温度比之高出49 K,表面辐射能增加了近14 W,这也带来了燃烧辐射效率、电池效率不同程度的提高,因此系统总效率达到了2.6%,比采用基本结构过滤器时提高了5.7%,其体积功率密度也达到了 15.86 W/cm^3 ,这些数据充分表明了改进过滤器对于提升系统性能的积极作用。

5 结束语

针对热光电系统中常用的一维周期性 Si/SiO₂

光子晶体过滤器,根据传输矩阵的方法和光学薄膜的设计理论,获取了 $(L/2HL/2)_5$ 基本结构过滤器的光学特性;考虑该结构第一反射带宽度较窄的缺点,采用将两个不同中心波长多层膜叠加的方法,获得了一个改进结构的过滤器型式 $[1.10(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[1.10(L/2HL/2)][0.95(L/2HL/2)](L/2HL/2)_3[0.95(L/2HL/2)]$,其第一反射带的宽度被拓展至 $2 \sim 4 \mu\text{m}$,同时在 $1.1 \sim 1.78 \mu\text{m}$ 内也具有0.95的透射率。

通过对 MTPV 系统能量转换计算模型的完善,计算分析得出:改进的 Si/SiO₂光子晶体过滤器可以大幅提升系统的工作性能,在 1500 mL/min 的进气流量下,壁面平均温度比无过滤器时提高了373 K,比采用 $(L/2HL/2)_5$ 结构过滤器时也提高近50 K,系统总效率达到2.6%,比采用基本结构过滤器提高了5.7%,效果较为明显。

参 考 文 献

- 陈雪,宣益民.热光伏技术基本原理与研究进展[J].半导体光电,2006,27(4):353~358.
Chen Xue, Xuan Yimin. Principle and progress on thermophotovoltaic technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(4):353~358. (in Chinese)
- Sullivan F O, Celanovic I, Jovanovic N, et al. Optical characteristics of one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystals for thermophotovoltaic applications[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(3):033529.
- Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge, et al. Investigation of one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystals for thermophotovoltaic filter[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(11):2031~2039.
- Mao Lei, Ye Hong. New development of one-dimensional Si/SiO₂ photonic crystals filter for thermophotovoltaic applications[J]. Renewable Energy, 2010, 35(1):249~256.
- 陈军.现代光学及技术[M].杭州:浙江大学出版社,1996.
- Born M, Wolf E.光学原理(上)[M].7th ed.北京:电子工业出版社,2005.
- 唐晋发,顾培夫,刘旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006.
- Chen Xue, Xuan Yimin, Han Yuge. Investigation on performance of a solar thermophotovoltaic system[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(12):2285~2294.
- 潘剑锋,周俊,唐爱坤,等.微尺度燃烧过程中传热强度准则数分析[J].农业机械学报,2011,42(12):197~201.
Pan Jianfeng, Zhou Jun, Tang Aikun, et al. Analysis of criterion number of heat transfer in micro combustion process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12):197~201. (in Chinese)
- Pan J F, Yang W M, Tang A K, et al. Micro combustion in sub-millimeter channels for novel modular thermophotovoltaic power generators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(12):125021.
- 唐爱坤,潘剑锋,薛宏,等.燃烧室结构对微热光电系统能量转换的影响分析[J].兵工学报,2011,32(7):866~871.
Tang Aikun, Pan Jianfeng, Xue Hong, et al. Analysis on effect of combustor structure on energy transition in micro-thermophotovoltaic system [J]. Introducing Journal of China Ordnance, 2011, 32(7):866~871. (in Chinese)
- 范爱武,姚洪,刘伟.微小尺度燃烧[M].北京:科学出版社,2012.
- 潘剑锋,李晓春,唐爱坤,等.亚毫米平板式微燃烧室的影响因素研究[J].中国机械工程,2010,21(17):2119~2122.
Pan Jianfeng, Li Xiaochun, Tang Aikun, et al. Research on some effective factors of sub-millimeter plane cell micro combustor [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17):2119~2122. (in Chinese)