文章编号：1007-1180(2011)09-0038-07

太阳辐射传感器件

梁中翥
（中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室，吉林 长春 130033）

摘 要：太阳辐射测量将对预测长期的气候变化提供重要依据。为了获得更加精确的太阳辐出度数据，研制微型化、高精度的绝对辐射计是今后太阳辐射探测的重要研究方向。介绍了目前研究的几种典型的太阳辐射传感器件，重点阐述了几种常用的热电型辐射探测器，对它们的特点进行了分析和比较。

关键词：太阳辐射；绝对辐射计；镍磷吸收膜；MEMS
中图分类号：P111.45 **文献标识码**：A
DOI：10.3788/OMEI20112809.0038

Radiometer Chips for Measuring Solar Irradiance

LIANG Zhong-zhu
(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: The solar irradiance measuring is very important for forecasting long-term movement of the climate in the earth. To meet the demands of high performance and microminiaturization of solar irradiance measuring instrument, study of micro device of absolute radiometer is an important future research direction of solar radiation detection. The present research of several typical solar radiometer devices was introduced in this paper. Especially, several thermoelectricity solar radiometer devices in common use were described, and their features were analyzed and compared.

Keywords: solar irradiance; absolute radiometer; NiP absorbent films; MEMS

*基金项目：国家自然科学基金项目（编号：61007023）；吉林省科技发展计划项目（编号：20090351，20080122）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

太阳以辐射的形式向四周释放能量，其中约十亿分之一的能量（10^{17} W）到达地球。太阳辐射到达大气上端的能量密度（即太阳常数）为 1 366 W/m^2，主要包括太阳大气层向宇宙空间发射的电磁波和粒子流，通常是电磁辐射，99.9%以上的能量都集中在 0.2~10 μm 的波段内，最大辐射强度位于 0.48 μm 处[1-2]。太阳辐射是地球能量的主要来源，是气候演变的主要动力，而气候的变化将直接影响地球的生态环境，进而在能源、资源等方面影响着人类社会。因此，研究太阳辐射的时间分布、地域分布对于短期的天气预报、长期的全球性气候变化等都有着根本性的意义。

对太阳辐射的地面观测已经有很长的历史[3]。1990 年在日内瓦召开的第二次世界气候大会上，各国科学家提出了制订“全球气候观测系统（GCOS）计划”的建议。1992 年，世界气象组织（WMO）等国际组织发起了该计划，其目的就是提供各类气象观测资料。随着辐射测量方面的地面辐射基准站网（BSRN）的出现，地面辐射测量开始全球系统化，各种不同用途的辐射表相继出现，其中包括总日射表、直接日射表、地球辐射表、全辐射表、紫外辐射表等等。

总日射表是测量平面接收器上半球日照辐射的仪器。直接日射表可分为绝对直接日射表和相对直接日射表，前者在仪器中进行辐射功率和电功率热效应的比较，热效应一致则表明两者功率相同，因而不用标定，即有自校准功能。直接日射表有 Angstrom 补偿式、H-F 自校准腔体式、PMO6 型绝对腔体辐射表以及长春光机所研制的 SIAR 型太阳绝对辐射计等几种。地球辐射表测量的是地球对外的辐射，因而是长波辐射测量。全辐射表测量覆盖了 0.3~100 μm 内的太阳辐射以及地球辐射。紫外辐射表常用的有 Eppley 实验室的 TUVR 型、Kipp & Zonen 的 CUV4 型、澳大利亚 Middleton 公司的 UVR1-T 型、美国 Yankee 环境公司的 UVB-1 型和 Solar Light 公司的 SL-501 型，国产的有北京师范大学光电仪器厂生产的 OUV-B 型等等[4-5]。

由于大气的吸收，地面辐射探测数据不足以得出太阳辐射对地球气候的影响，而早在 1978 年，Nimbus-7/ERB 就开始在卫星上测量太阳辐照度。基于太空观测得出的数据表明太阳“常数”不是一个常数[6-7]，其变化对气候变化有重要影响。由此可见，在卫星上测量太阳辐射有其特定的意义，不可缺少。

绝对太阳辐射计是直接用电功率标定光功率的热电型探测器[8]，它的早期发展可追溯到 Angstrsm 的日射计和 Smithsonian 水流式日射计（1913 年）。但是，它真正成为现代测量仪器是从本世纪 60 年代开始的。最早研制的现代绝对测辐射热计是平面型热电阻辐射计。绝对测辐射热计的工作原理是：把照射到绝对测辐射热计上的未知辐射照度的热效应同已知电功率（测定加热电流强度和电压）的热效应进行比较，使加热的电功率等效于接收的辐射功率，用电功率再现的方法标定辐射标度。目前已经研究的绝对测辐射热计主要基于一层或多层具有宽光谱波段吸收功能的热辐射吸收材料，吸收波段在 300~4 000 nm 之间。

2 辐射传感器件

在卫星上搭载的太阳绝对测辐射热计，由于受测量时间等客观条件的限制，在性能上要求具有快的响应速度、高灵敏度和高精度，在结构上要求体积小、重量轻以及基本的机械稳定性[9]。反映在测辐射热计的核心器件——辐射传感器上，则要求传感器的辐射吸收材料在宽光谱范围内吸收率高、热导率高、热容小、与基底的附着性好等。辐射传感器的基本原理都是利用传感器将辐射能转变成其他形式便于测量的物理量，然后根据该物理量同辐射量之间的关系得到被测辐射量的值。辐射传感器有多个门类，包括按照原理和外形等分类方式。辐射探测器按原理可分为热电型和光电型两大类，热电型

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传感器利用的是辐射的热效应，它又分为平面型和腔体型两大类；而光电传感器则利用辐射的电效应。

2.1 热电型传感器件

热电型传感器一般利用传感器表面的黑色涂层吸收辐射能并转换为热能，进而利用温度上升引起的传感器电参数的变化进行测量。由于黑色涂层对各种波长的辐射能得到基本一致的吸收性能，因此，在日射测量中热电型传感器一直居主导地位，而在热电型传感器中，基于热电堆结构的传感器更为普遍。

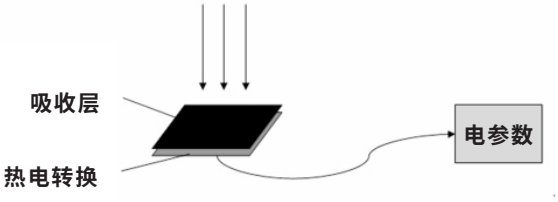


图 1 热电型传感器原理示意图

在两种导体或半导体组成的闭合回路中，如果两个对接点的温度不同，回路中就会形成电势，即塞贝克电势。当闭合回路确定后，塞贝克电势的大小就仅与两接点的温度差有关。由一组导体组成的热电偶的塞贝克电势一般比较小，而用很多个热电偶串联形成的热电堆则可以有很高的灵敏度。热电堆传感器按制作方式的不同，可分为如下几种[10]。

焊接式。利用这种工艺制作的热电堆，不同的温差是依靠不同颜色的涂料形成的。热接点在黑色涂料下吸收太阳辐射能后温度升高，冷接点在白色涂料下反射太阳辐射能后温度相对降低。这种类型仪器的最大优点是结构简单，零点漂移现象极小，不足之处在于黑、白块分布和老化的关系，角度响应较差且灵敏度变化较大。Moll 型热电堆的冷热接点处在一致的黑色涂料下，其温差形成靠的是冷、热处热导率的不同。两种金属材料的厚度可以很小，热容因而很小，响应速度极快[10]。

电镀式。将绕在绝缘骨架上的康铜丝的一半保护好，另一半放入电镀槽内镀铜。Eppley 实验室最

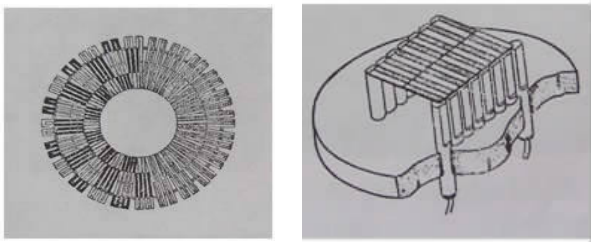


图 2 焊接式黑白型及 Moll 型热电堆

先采用了这种工艺。20 世纪 80 年代后，我国研制的辐射仪器也采用了这种工艺。

绕线式。在绝缘环上绕制多对辐射状排列的热电偶。其接点一个在内圆，形成热点，一个在外圆，形成冷端。这种热电堆一般应用在腔体型传感器中。

补偿式。将两个利用上述任一种方法制作的热电堆反向串接起来，将其中的一个用于接收辐射，另一个闲置，用于抵消环境温度变化引起的干扰电势，可提高测量准确度。

热电型传感器件按外形又可分为平面型和腔体型两大类。

（1）平面型辐射传感器

平面型热电辐射传感器是大多数太阳辐射测量仪器所采用的传感器外形[11]。此类测辐射热计的优点是结构简单，工艺易于实现且其体积可控，可远小于腔体型的辐射探测器。辐射探测器体积愈小，其热惯性愈小，器件的平衡时间愈短；由于其表面涂覆质地优良、性能完好的黑色涂料，可以近似地认为其接近朗伯体，对于各方向入射光的吸收比较均

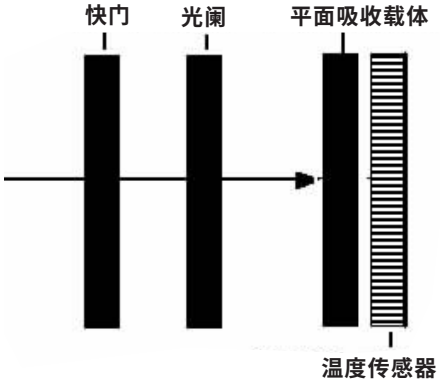


图 3 平面型辐射计示意图

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

匀[10]。平面型传感器对入射辐射仅吸收一次，对于测量不确定度要求高的标准辐射仪器，单次吸收率并不能满足要求，所以，提高平面辐射传感器的黑色辐射吸收层吸收率、降低其反射能量成为提高平面辐射传感器性能的主要途径之一。

图4（a）是荷兰Kipp&Zonen公司生产的CMP系列总日射表，它的传感器是在一侧涂成黑色的基底圆片上由厚膜技术制作的多个热电偶构成的热电堆。处于日射表上表面的黑色涂层具有十分粗糙的结构，包含许多微孔洞，可以将光“陷入”其中，并且其光谱选择性低于2%，因此，该涂层在宽光谱范围内吸收率高达97%。黑色涂层非选择性地吸收热辐射能量并由热电堆探测温度变化。热量通过热阻流向热沉（辐射计主体）。探测器热阻的温度变动转换成电压，它与吸收的太阳辐射呈线性函数关系。温度信号很容易被风、雨和对环境的热辐射损失所影响，所以辐射计由两层半球玻璃覆盖。半球玻璃使得各个方向的辐射都有着相同的透过率。这种日射表的平衡时间为5 s，工作温度范围–40~+80 ℃，测量光谱范围为0.2~3.6 μm[10]。

（a）CMP系列总日射表

（b）STAR黑白型总日射表

图4　两种平面型绝对辐射计

图4（b）是由德国的Dirmhirn设计的STAR黑白型总日射表。这种日射表应用广泛，并且是世界气象组织推荐为适宜测量地球和天空辐射的仪器。它的接收器由12个小铜板构成，每个0.05 mm厚，其中6个为黑色，另外6个由白色高反射涂层覆盖。这两组黑白铜片交替扇形呈星状排列构成，形成平面圆盘，直径约5 cm，黑白区域之间是隔热的，并且它们同仪器主底盘隔热。温敏元件热电堆是由康铜-铜或锰铜-铜与铜片焊接组成。接收器上面由2~3 mm厚70 mm直径的抛光玻璃半球罩住。这种日射表的测量工作原理是基于黑白区域在测量时产生的温差，由于采用该方法，环境温度的变动对测量的影响可以抵消。环境产生的光对系统的影响可以由抛光的半球罩消除。这种日射表的平衡时间为25 s，工作温度范围–40~+60 ℃，测量光谱范围为0.3~30 μm[10]。

（2）腔体型辐射传感器

腔体型辐射传感器利用一个内部涂覆黑色涂料的腔体来吸收辐射。腔体的形式多样，如方形腔、正立锥腔、倒立锥腔等[12–17]。图5为锥形腔体辐射传感器的示意图。这种测辐射热计的优点是由于采用腔形体吸收辐射，腔体内部涂覆的黑色涂料对其有效吸收率影响减小，只要腔型设计合理，就会多次反射、多次吸收辐射，有效吸收率能得到提高。但是，腔体型辐射传感器的体积一般比较大，热容量大，因而响应时间不如平面型传感器快，且其高吸收率与辐射入射方向依赖性较大[18]。腔体型传感器过去多采用无光黑漆作涂料，认为无光黑漆是漫反射，损失小，然而，近年尝试结果表明，用有光黑漆效果更佳，因为有光黑漆不是漫反射，其反射次数可

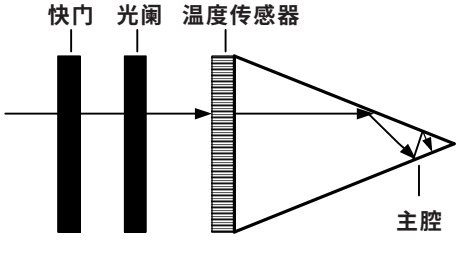


图5　腔体型辐射计示意图

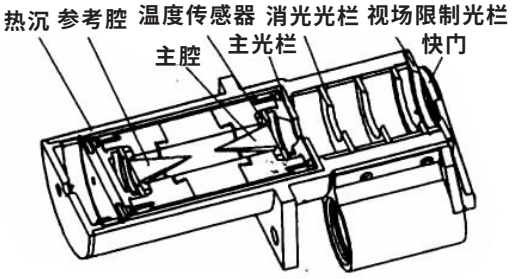
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

通过腔体设计控制。

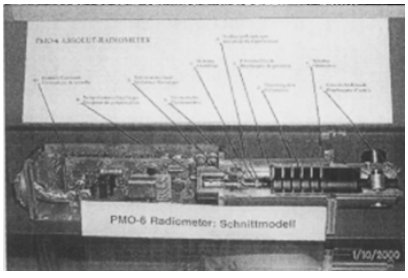
除了热电堆型的热电传感器外，还有利用导体或半导体的电阻随温度升高而显著变化的原理制成的热敏电阻传感器。常用的金属材料有铜和铂，用铂制成的测温元件已成为测量温度的标准器具。在辐射测量中，总是希望传感器的热容小，随着光刻技术的发展，已制成体积极小的薄膜铂电阻，用半导体制成的珠状热敏电阻也可满足部分仪器的使用要求[10]。

针对腔体型绝对辐射计的研究很多，例如美国的PACRADⅢ型、比利时的CROM型、瑞士的PMO型以及国内的双腔补偿型绝对辐射计。这类辐射计可以通过优化腔型设计来获得较高的响应度。

图6（a）为中科院长春光机所研制的双腔补偿型绝对测辐射热计，其辐射吸收载体选用银质锥腔，辐射吸收膜层采用在腔的内表面涂覆一层薄的特制镜向反射黑漆吸收涂料，该涂料在0.2~40 μm波段范围内呈中性[18]。在锥腔壁内双线无感绕制加热丝，锥腔开口处由电镀工艺制作热电堆温度传感器。这种辐射计的测量光谱范围为0.2~40 μm[19]。



（a）SIARs双腔补偿型绝对辐射计



（b）PMO6型绝对腔体辐射表

图6 两种腔体型绝对辐射计

PMO6型绝对腔体辐射表是瑞士达沃斯物理气象台制作的，图6（b）是其结构剖面图，吸收光辐射的倒锥腔表面涂覆镜面反射黑漆，双腔背对背放置，前腔用做测量，后腔用于补偿热沉温漂的影响。其快门关41 s，开58 s，每99 s获得一辐照度值[10]。

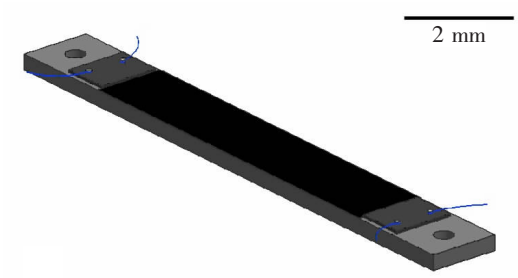
2.2 光电型传感器

光电型传感器是利用某些材料受辐射照射后，引起材料电学性质的改变从而产生光电效应制成的器件。光电效应过程比起物体受辐射发热的过程要快得多，因此，响应时间短是光电型传感器的一大优点。按光电效应的不同表现形式，光电传感器可分为3种类型：（1）光伏型，利用的是光生伏特效应，一些半导体PN结就有这种效应。（2）光电导型，利用半导体受光照后导电性能显著变化的现象制成。由PN结制成的称为光电二极管，其瞬态响应时间通常<10 μs。（3）光电子发射型，利用某些物质在辐射照射下会发射电子的现象。发射出的光电子在电场的作用下可形成电流。由于物质的电子发射率一般不高，可利用已发射的电子打到倍增极上，以形成二次电子，如此循环，可显著提高响应速度。光电型传感器的最大缺点是光谱响应随波长变化较大，很难在较宽的波长范围内找出光谱响应一致的光电器件[20-24]。

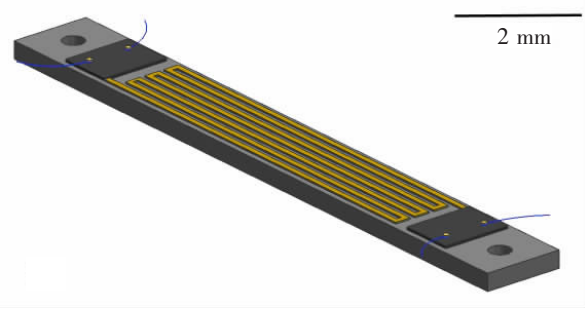
2.3 微型条状辐射传感器

辐射传感器是太阳辐射计的核心，它直接决定了太阳辐射计的结构与性能。研制体积小、响应时间短、灵敏度较高的辐射传感器，对于太阳辐射测量，特别是星载太阳辐射测量，具有十分重要的意义。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了一种基于MOEMS技术的条状微型辐射探测芯片作为微型辐射传感器[11]，其基本结构如图7所示。辐射探测芯片由长方体金刚石基底、金属薄膜电阻加热丝、镍磷黑吸收膜及热敏电阻组成。金属薄膜电阻加热丝和镍磷黑吸收膜分别附着在金刚石基底的两侧，并在镍磷吸收膜的两端集成热敏电阻构成芯

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）器件正面：黑色镍磷吸收膜，两端集成热敏电阻



（b）器件背面：MOEMS 薄膜加热电阻

图 7 微型条状绝对测辐射热器件模型示意图

片来探测太阳辐射。采用电镀方法在金刚石基片上制备了镍磷黑吸收膜；采用 MEMS 技术在高纯金刚石基片表面制作了金属薄膜电阻加热丝；选择微型热敏电阻芯片作为温度传感器，并将其集成于条形辐射探测芯片上。

测试表明，镍磷黑吸收膜表面比较粗糙，具有 50 nm~1.5 μm 范围的微结构，红外吸收率在 0.99 以上，适合辐射吸收；吸收黑膜层在-20~100 ℃范围内吸收率基本不变，膜层未发生灰化、脆化及脱落现象；薄膜加热丝同基底粘附良好，无脱离现象。微型条状辐射探测芯片的性能测试将结合电路设计及配套光路和机械部分进一步完成。

3 总 结

绝对辐射计能够实现长期的、不间断的太阳辐射测量，获取高精度的太阳辐射数据。进一步研究太阳辐出度变化周期、规律、趋势及其对气候改变的影响，将对预测长期的气候变化提供重要依据。为了获得更加精确的太阳辐出度数据，研制微型化、高精度的绝对辐射计是今后太阳辐射探测的重要研究方向之一。目前，对于微型平板型绝对辐射计的研究尚处于起步阶段，一些技术问题还有待于进一步解决。

参考文献

[1] Richard C, Willson, Hudson H S. The sun's luminosity over a complete solar cycle[J]. *Nature*, 1991, 351: 42-44.

[2] Fang Wei, Yu Bingxi. Easily performed method of solar total irradiance measurement in space[J]. *SPIE International Society For Optical*, 1998, 3501: 469-474.

[3] Frohlich C. History of solar radiometry and the world radiometric reference[J]. *Metrologia*, 1991, 28(3): 111-115.

[4] 谢伟. 太阳辐射计技术分析[J]. 红外, 2003, 24(3): 9-15.

[5] 赵志刚. 太阳辐射计[J]. 红外, 2006, 27(6): 35-40.

[6] Rechard C W. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22[J]. *Science*, 1997, 277(5334): 1963-1965.

[7] Chapman G A, Cookson A M, Dobias J J. Variations in total solar irradiance during solar cycle 22[J] *Geophys Res.*, 1996, 101(A6): 541-548.

[8] Brusa R W, Frhlich C. Absolute radiometers (PMO6) and their experimental characterization[J]. *Applied optics*, 1986, 25(22): 4173-4180.

[9] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京：宇航出版社, 2005.

[10] 王炳忠, 莫月琴, 杨云. 现代气象辐射测量技术[M]. 北京：气象出版社, 2008.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[11] 李亚楠，梁中翥，梁静秋，等. 辐射探测芯片吸收膜理论设计及镍磷黑膜制备[J]. 物理学报，2010, 59(7)：4530-4534.

[12] 金轸裕，段惠芬，禹秉熙. 铜箔锥型腔的研制[J]. 光学机械，1990(5)：62-64.

[13] 方伟，王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响[J]. 光学 精密工程，2006，14(5)：775-780.

[14] 方伟，金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. 太阳能学报，1992，13(4)：406-411.

[15] 方伟. 双锥腔互补偿型绝对辐射计(DCICAR)[D]. 长春：中科院长春光机所博士学位论文，2005.

[16] Fang Wei，Wang Yupeng，Yu Bingxi. The full hemisphere integrating measurement of the reflectance of black cavity[J]. *SPIE*，2005，6033：60330G-1-60330G-8.

[17] Willson R C. Active cavity radiometer type V[J]. *Applied Optics*，1980，19(19)：3256-3257.

[18] 禹秉熙，方伟，王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. 光学 精密工程，2004，12(4)：353-358.

[19] 方伟，金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. 太阳能学报，1992，13(4)：406-411.

[20] Anderson T N，Duke M，Morrison G L，*et al*. Performance of a building integrated photovoltaic/thermal(BIPVT) solar collector[J]. *Solar Energy*，2009，83：445-455.

[21] Du Liang，Wang Hui. Infrared laser induced lateral photovoltaic effect observed in Cu_2O nanoscale film[J]. *Optics Express*，2010，18(9)：9113-9118.

[22] Johnston D. Functional requirements for component films in a solar thin-film photovoltaic/thermal panel[J]. *Solar Energy*，2010，84：384-389.

[23] Zhu Hongwei，Wei Jinquan，Wang Kunlin，*et al*. Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells[J]. *Solar Energy Material and Solar Cells*，2009，93：1461-1470.

[24] Chow T T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology[J]. *Applied Energy*，2010，87：365-379.

作者简介：梁中翥（1978-），**男，汉族，四川广安人，博士，副研究员，2007年于吉林大学获得博士学位，主要从事微光机电系统、光谱仪器及光学材料等方面的研究**。E-mail：liangzz@ciomp.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net