

生物质粉体燃烧炉的研究探讨

李世军

(开封大学, 河南开封, 475000)

摘要：为广大农村农作物秸秆再利用，解决各类秸秆原料运输成本高、造粒困难及颗粒燃料供应不足等问题，应用生物质直接燃烧技术，研究出生物质粉体燃烧炉及其控制器，采用多级配风、螺旋悬浮燃烧和二次燃烧，使生物质燃料的燃烧效率达到90%以上；在热风炉烟囱处增加粉尘拦截网，达到洁净排放。应用自动控制技术，实现自动点火、自动进料、自动配风，是烘干热风炉热源的最佳选择。

引言

在广大农村，各类农作物秸秆遍地皆是，已经成为农民朋友的心头之患。将农林的废弃物加工成颗粒燃料，能够解决农村的废物污染问题，还能为颗粒燃烧机提供燃料，但要将农林的废弃物加工成颗粒燃料，不仅要粉碎、烘干还要有添加剂才能造粒，必须工厂化运作。

农林废弃物的运输成本高，造粒工厂的储存场地必须很大，所以颗粒燃料的价格一直居高不下，且随着劳动力成本的提高，生物质颗粒燃料价格必然再次飙升，同时造粒还可能带来再次污染。将小颗粒农林废弃物如稻壳、油菜壳、玉米芯、锯末、刨花、松子壳等直接使用，其它的生物质原料经粉碎后直接使用，可以极大地降低生物质燃料的使用成本。

目前，生物质燃料直接燃烧方式主要包括炉排层燃、颗粒燃烧和悬浮燃烧。炉排层燃只适用于大颗粒或块状生物质燃料，且还存在诸多问题。流化床燃烧和颗粒燃烧器都使用颗粒燃烧，具有燃烧效率高，污染低等优点，但造粒成本高，对生物质原料的燃烧性能也有更高的要求。悬浮燃烧是将粉体燃料喷入炉膛直接进行燃烧，包括燃料的挥发分和固定碳都可以充分燃烧，能解决燃烧生物质燃料冒黑烟问题。近些年来，我国在生物质悬浮燃烧的利用方面取得了很多成果，郭献军等利用生物质粉体燃料燃烧炉实验研究，说明在一定的条件下，粉体燃料能稳定燃烧，且温度可达1150~1249℃。肖波等进行了生物质粉体燃烧技术的研究，提出了悬浮燃烧一次风和二次风的风量关系。刘洪福等设计了一种适应与锅炉的悬浮燃烧器，燃烧效率达到98.26%，排放符合工业锅炉污染物排放标准的要求。贾煜等研发了多级配风稻壳旋浮燃烧热风炉，用于大型热风炉，解决了稻壳挥发分迅速析出、固定碳难于燃尽的不足。刘巍设计了具有沉降室的生物质热风炉，设计参数与测试数据比较接近，可以应用于工业设计。

本文研发的生物质粉体燃烧炉是基于悬浮燃烧的燃烧炉，应用生物质化学转换技术，采用三级配风，实现螺旋悬浮燃烧、二次燃烧，达到生物质粉体燃料燃烧彻底，实现洁净排放；利用自动控制技术，实现自动点火、自动送料、自动配风。这种形式的燃烧炉在烘干领域具有很好的推广价值。

1设计依据

1.1生物质粉体燃烧特性

根据相关资料统计分析，常见生物质燃料的工业分析成分、元素组成和低位热值见表1。

表 1 常见生物质燃料的工业分析、元素组成和低位热值
Tab. 1 Industrial analysis, element composition and low calorific value of common biomass fuels

燃料	工业元素/%				元素组成/%					Q_{DW} /(kJ·kg ⁻¹)
	W^i	A^i	V^i	C_{td}^i	H^i	C^i	S^i	N^i	O^i	
玉米秸	6.10	4.70	76	13.2	5.45	42.17	0.12	0.74	43.60	15 550
玉米芯	4.87	5.93	71.45	17.75	6.00	47.20	0.01	0.48	46.10	17 730
稻草	4.97	13.86	65.11	16.06	5.06	38.32	0.11	0.63	42.2	13 980
稻壳	5.62	17.82	62.61	13.95	6.20	49.40	0.40	0.30	43.70	16 017
麦秸	4.39	8.90	67.36	19.35	5.31	41.28	0.18	0.65	43.40	15 374
花生壳	7.88	1.60	68.10	22.42	6.70	54.90	0.10	1.37	36.90	21 417
棉秸	6.78	3.97	68.54	20.71	5.70	49.80	0.22	0.69	43.10	18 089

注： W^i —水分， A^i —灰分， V^i —挥发分， C_{td}^i —固定碳

从表1可以看出，生物质燃料中含碳量平均不足50%，挥发分平均接近70%，含氢量稍多，所以生物质燃料易点火、易冒黑烟，不耐烧；含氧量多，热值低，说明在设计燃烧器时可相对减少供应空气量；含硫量低，只有稻壳和棉秸相对偏高，说明燃烧时不必设置气体脱硫装置，有利于环境保护。

生物质燃料密度小，结构比较松散，迎风面积大，容易被吹起产生悬浮燃烧，但如果悬浮燃烧不彻底，挥发分析出燃尽后受到灰烬包裹和空气渗透困难的影响，焦炭颗粒燃烧速度缓慢，燃尽困难，所以保持良好的悬浮燃烧是解决燃尽率的重要措施。

1.2设计参数

1.2.1燃料需求量

生物质粉体燃烧器的燃料需求量与设计额定热功率成正比，与生物质燃料的热值和燃烧效率成反比。生物质粉体燃烧器单位时间内的进料能力应满足

$$M \geq \frac{4.186N}{Q_{DW}\eta} \quad (1)$$

式中： M ——送料装置的送料能力，kg/h；

N ——额定热功率，kcal；

Q_{DW} ——粉体燃料的低位热值，kJ/kg；

η ——燃烧效率。

对于100000kcal的生物质粉体燃烧器，粉体燃料的低位热值按玉米秸的低位热值15550kJ/kg，燃烧效率取0.9，则100000kcal生物质粉体燃烧器的燃料需求量为30kg/h。

1.2.2实际需要空气量

1kg生物质燃料燃烧需要的理论氧气量按下式计算

$$V_{o_2}^0 = 1.866 \frac{C'}{100} + 0.7 \frac{S'}{100} + 5.56 \frac{H'}{100} - 0.7 \frac{O'}{100} \quad (2)$$

空气中氧气的含量占21%，所以1kg燃料燃烧所需的理论空气量

$$V^0 = \frac{V_{o_2}^0}{0.21} \quad (3)$$

式中： $V_{o_2}^0$ ——1kg 燃料燃烧所需的理论氧气量；

V^0 ——1kg 燃料燃烧所需的理论空气量；

C' ——燃料中碳元素收到基的含量；

S' ——燃料中硫元素收到基的含量；

H' ——燃料中氢元素收到基的含量；

O' ——燃料中氧元素收到基的含量。

为了保证燃料的充分燃烧，通常取1.2~1.5的过量空气系数。由于生物质粉体燃料十分蓬松，燃烧速度非常快；要保证螺旋悬浮燃烧，就要增大空气流量，使得粉体燃料与空气充分接触，但空气流量过大时，容易降低燃烧器内的温度而不利于激发二次燃烧。因此设计时过量空气系数设定为1.3，并结合其控制器的设计，实际需求空气量通过控制器进行调节，以适应各种生物质粉体燃料。

100000kcal的生物质粉体燃烧器，实际需要空气量为147.45m³/h。

2结构设计

生物质粉体燃烧器主要由支架、燃烧系统、配风系统、送料装置、控制装置组成，总体结构如图1所示。

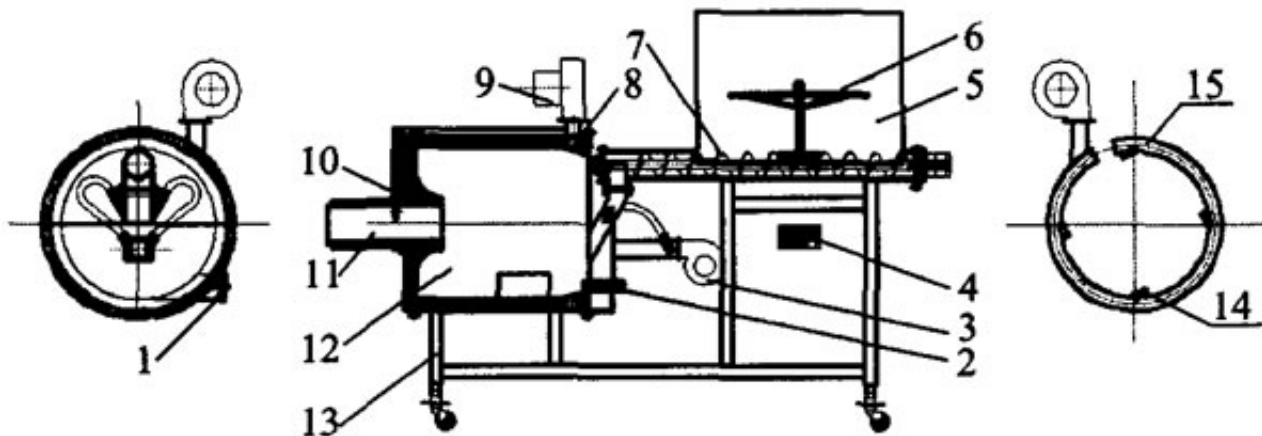


图 1 生物质粉体燃烧器的总体结构

Fig. 1 Overall structure of the biomass powder burner

1. 清灰门 2. 点火器 3. 一次助燃风机 4. 控制器 5. 料仓
6. 防棚料机构 7. 送料装置 8. 二次风风管
9. 二次助燃风机 10. 三次风风管 11. 喷火嘴 12. 炉膛
13. 机架 14. 二次风出风口 15. 二次风主风管

采取整体可移动的结构形式，高度通过支脚的丝杆调节，以适应不同的应用场合。喷火嘴采用圆筒型结构，使用时喷火嘴插入用火处，使用封火盖密封。

2.1 进料结构设计

进料系统由料仓、防棚料机构和送料装置组成，送料装置包括进料螺旋、送料电机等。生物质粉体燃料由料仓经进料螺旋送入下料管，经下料管与空气混合喷入炉膛主燃烧室。这种送料方式能够根据不同火势需求，控制送料电机间歇运转，实现送料量的控制。

水平螺旋绞龙送料能力按公式(4)计算

$$Q = \left[\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \right] \pi r n S \phi \frac{60}{1\ 000} \quad (4)$$

式中：Q——送料能力，kg/h；

D_1 ——螺旋绞龙有效外径，cm；

D_0 ——绞龙轴直径，cm；

r ——颗粒密度，g/cm³，粉体燃料密度^[6, 10]0.1～0.13g/cm³，本设计取 $r=0.1\text{g/cm}^3$ ；

n ——绞龙转速，r/min；

S ——绞龙导程，cm；

ϕ ——物料充填系数，本设计取 $\phi=0.5$ 。

针对100000kcal的生物质粉体燃烧器，螺旋绞龙的有效外径取10cm，绞龙轴直径取4cm，送料电机转速取20r/min，绞龙导程取10cm，计算结果为Q=39.58kg/h。实际送料能力是送料需求量(30kg/h)的1.32倍，便于控制装置对进料量的调节控制。

防棚料装置对于粉体燃烧器是很重要的，本设计的防棚料装置是由送料绞龙带动拨料翅间歇转动实现拨料。具体结构如图2所示。

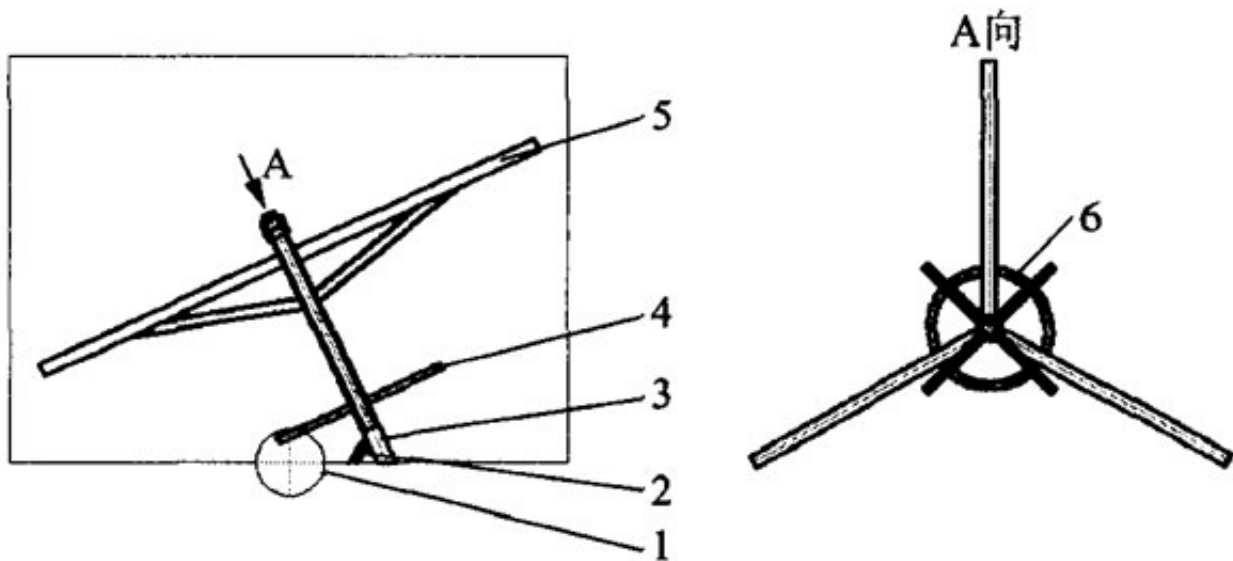


图2 防棚料机构

Fig. 2 Biomass powder feed device

1. 送料螺旋 2. 加强筋 3. 固定转轴 4. 下拨料翅
5. 上拨料翅 6. 加强圈

在防棚料机构中, 固定转轴倾斜地焊接在料仓底上, 由于受力偏置, 所以焊接3个加强筋。上拨料翅和下拨料翅焊接在套管上, 套管套在固定转轴上可以转动, 其上端用2个螺母锁紧, 保证拨料翅转动灵活。下拨料翅在送料螺旋的带动下作间歇运动, 实现防棚料目标。实践证明该装置结构简单, 防棚料效果良好。

2.2配风结构设计

该生物质粉体燃烧器的供风系统有2个助燃风机, 实现三级配风。一次助燃风由一次助燃风机提供, 通过向落料管吹风进入主燃烧室, 从点火器套管靠近炉膛端开设的进风孔进入主燃烧室, 通过燃烧室后端面开设的进风孔进入主燃烧室, 一次风的风量保持在总风量的10%~15%。二次助燃风机提供的风经二次风主管进入, 从4个二次风出风口切向进入主燃烧室, 在燃烧室形成旋转风, 并在一次风的推动下风螺旋向喷火嘴移动, 带动粉体燃料螺旋悬浮燃烧。二次助燃风机提供的风经三次风风管分出一部分成为三次风, 三次风切向进入喷火嘴的夹层, 通过喷火嘴内壁上的小孔均匀进入喷火嘴副燃烧室, 为粉体燃料的二次燃烧提供助燃风, 三次风的风量占总风量的5%~10%。

生物质粉体燃料粒径小, 要在炉膛内完全燃烧, 需要燃料和风量匹配。风量过大, 燃料未充分燃烧就会被吹出喷火嘴, 增加了燃烧热损失, 并且降低了烟气温度, 二次燃烧难以激发; 风量过小悬浮燃烧减弱, 灰渣会在燃烧室内堆积, 形成结渣, 严重时会影响燃烧器的正常使用。不同的生物质粉体燃料密度和组成成分有较大差异, 为了适应各种粉体燃料的应用, 风机的选型留有较大储备。理论计算的送风量是基础, 实际上对不同粉体燃料所需风量靠控制器调节风机的风量实现。本设计选用的燃烧风机是交流调速风机, 且对两个助燃风机分别控制, 以适应于不同的粉体燃料。

2.3燃烧系统设计

生物质粉体燃烧器燃烧系统由主燃烧室、副燃烧室和后盖组成, 主燃烧室是圆筒形结构, 内衬耐火材料, 副燃烧室是有夹层的圆筒结构, 后盖为带法兰半圆形结构, 三者通过法兰加耐火岩棉密封连接, 见图3。

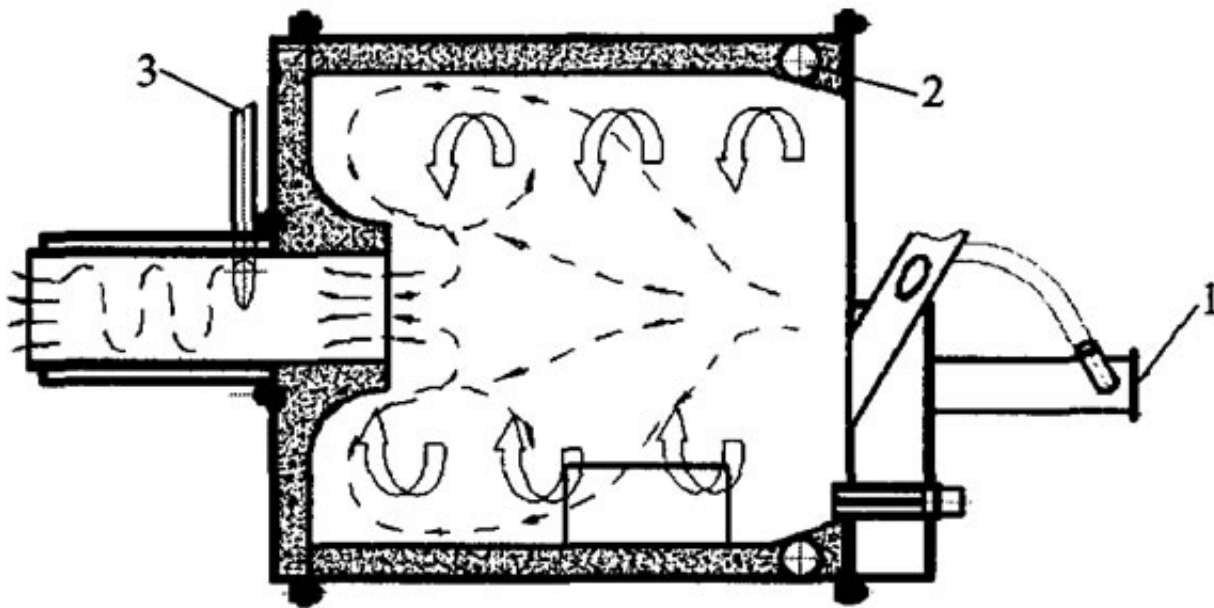


图 3 燃烧室结构

Fig. 3 Combustor structure

1. 一次风进风口 2. 二次风进风口 3. 三次风进风口

一次风将粉体燃料吹入主燃烧室，由点火器点火，除点火时冒烟外正常燃烧不冒烟。二次风以较高的速度沿主燃烧室内壁切向喷入，旋风保证粉体燃料与空气良好混合，延长了燃烧的粉体燃料在主燃烧室的时间，保证燃料的一次燃烧相对彻底。在主燃烧室的前端设置喇叭口，前端形成环形燃烧室。在主燃烧室内，由于一次风和二次风的综合作用，气流一面旋转一面向前端行进，在进入前环室之后又退回来，退回来的环形旋转气流遇到近中心的向前运动的气流时，烟气和灰烬流出主燃烧室，进入副燃烧室，而未燃尽的粉体颗粒燃料又回向环室进一步燃烧。副燃烧室具有很高的温度，在三次风作用下产生二次燃烧，使粉体燃料燃烧完全彻底，灰烬从喷火嘴逸出。

主燃烧室的结构形式借鉴了旋风炉结构，主燃烧室容积按公式(5)计算。

$$V = 0.278BQ_{DW}/q_v \quad (5)$$

式中: V ——主燃烧室容积, m^3 ;

B ——燃料消耗量, kg/h ;

q_v ——主燃烧室容积热强度, 取 $300\text{kW}/\text{m}^3$;

Q_{DW} ——粉体燃料的低位热值, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 。

选取 $Q_{DW} = 15\,550\text{kJ}/\text{kg} = 4.32\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$, $B = 30\text{kg/h}$, 带入式(5)计算得 $V = 0.12\text{m}^3$ 。取主燃烧室内径 500mm , 则主燃烧室的长度计算量为 611mm , 考虑到喇叭口部分占去的体积, 取主燃烧室的长度为 630mm 。

3控制方法

3.1控制依据和执行部件

本设计的生物质粉体燃烧器主要应用于烘干场合, 取代烧煤烘干并实现自动控制。用于烘干场合时, 控制信号来自烘干室的温度信号, 升温时要加大火力, 稳温时要保持火力。控制执行部件包括送料电机、一次助燃风机和二次助燃风机。进料蛟龙运动特性是进料、停料循环, 助燃风机是交流调速风机, 根据燃料燃烧特性由控制器调整供风量。

3.2控制方法

3.2.1自动控制原理

进料量取决于火势需求, 供风量的大小取决于进料量, 在合理配风前提下, 进料量和供风量要匹配。所以, 把进料量和供风量均划分12个档位, 1档最低(进料量和进风量最小), 12档最高(进料量和供风量最大)。对于不同的生物质粉体燃料, 达到同样发热功率其供料量和供风量是不同的, 所以要根据实际使用燃料调节供料量、一次风机风量和二次风机风量。

本设计的生物质粉体燃烧器的控制器是基于单片机的控制装置。烘干室温度相应的滞后和非线型比较严重, 难以建立数学模型, 从而采用模糊控制较合适。模糊控制是一种自动控制, 以模糊数学、模糊语言和模糊逻辑为理论基础。模糊控制系统是一种具有闭环结构的数字控制系统。

设 E_t 为烘干室内温度的温度偏差 ($E_t = T_t - T$, T_t 为目标温度, T 为当前实测温度), E_t' 为温度偏差随时间的变化率。将 E_t 分为 4 个模糊子集: B (大)、 M (中)、 S (小)、 N (负), 对应偏差的取值范围为: $d[(T_t - T)$ 、 $0 < (T_t - T) < d$ 、 $-d < (T_t - T) < 0$ 、 $(T_t - T) < -d]$, 其中 d 为设定的回差值。将 E_t' 分为三个模糊子集: P (正)、 Z (零)、 N (负), 其中对应偏差变化量取值范围是 $(T_n - T_{n-1}) > 0$ 、 $(T_n - T_{n-1}) = 0$ 、 $(T_n - T_{n-1}) < 0$, T_n 为本次采样测得的温度值, T_{n-1} 为上次采样测得的温度值。设 C_t 为加热输出, 将其分为 3 个模糊子集 B' (风量和进料加档)、 M' (风量和进料保持)、 S' (风量和进料减档)。温度模糊控制规则如表 2。

表 2 烘干室温度模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy control rule of the temperature in the barn

E_t	E_t'		
	P	Z	N
B	B'	B'	B'
M	S'	M'	B'
S	S'	M'	B'
N	S'	S'	S'

3.2.2 参数设置与手动控制

在控制器上设置有参数设置和手动操作功能。需要设置的参数包括每个进料档位的进料时间、停料时间, 一次助燃风机电压和二次助燃风机电压, 点火的预进料时间和点火器得电点火时间, 以及温度回差值(预测的温度过冲量)。控制器上预设相应的参数值, 使用中能根据不同的应用场合和燃料调整这些参数值。在运行状态和待机状态均可设置

，设置后控制器自动按新设置参数运行。

在控制器上设置有手动控制和自动控制切换按键、一次助燃风机风量加减档键、二次助燃风机风量加减档键和进料量加减档键。手动控制模式下，可以随时改变供风量和进料量的大小。

4应用情况

该生物质粉体燃烧器研究成功后，于2017年7~9月在四川省广元市剑阁镇青树烟叶烘烤工厂进行了较长时间的运行试用，将燃烧器的喷火嘴插入原烤房加热器的加煤门，用燃烧生物质碎料取代烧煤，取得良好效果，收到国家烟叶总公司领导的高度评价。最初试用时，由于燃尽的灰烬特别轻，从烤房加热器的烟囱出口飞出有粉尘，为此在原加热器的烟囱上增加了金属纱窗拦截网，飞灰得到了抑制。在现场使用的燃料有锯末、刨花、玉米芯和烟杆粉体，总体燃烧效率在90%以上，未发生结渣现象。与使用生物质颗粒燃料和烧煤相比，所用粉体燃料的成本(按市场价计算)是生物质颗粒燃料的三分之一，是燃煤成本的二分之一。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/134453.html>