

核磁共振技术的历史及应用

张 云

(云南农业大学基础与信息工程学院 云南 昆明 650201)

【摘 要】核磁共振是能够深入到物质内部而不破坏被测量对象的一种分析物质构造的现代技术,它通过利用原子核在磁场中的能量变化来获得关于原子核的信息,具有迅速、准确、分辨率高等优点,因而在科研和生产中获得了广泛的应用。作为新世纪的大学生显然很有必要掌握核磁共振的原理,并且初步了解核磁共振技术在现代生活中的一些应用。本文简要介绍了核磁共振的发展历史、实验原理、科研及生活中的应用来与学生共同学习和掌握这门新兴的技术。

【关键词】核磁共振;原子核;自旋;磁矩

The History of Nuclear Magnetic Resonance Technology and Its Application

【Abstract】Nuclear magnetic resonance are deep into the material can damage the internal rather than a measured analysis of the target material structure of modern technology, it is through the use of nuclear energy in the magnetic field changes the information on the atomic nucleus, with the rapid, accurate, high resolution, which in scientific research and the production of a wide range of applications received. University Students, as the new century is clearly necessary to master the principles of nuclear magnetic resonance and nuclear magnetic resonance technique in a preliminary understanding of modern life in some applications. This paper introduces the history of the development of nuclear magnetic resonance, experimental theory, scientific research and the application of life together with the students study and master this emerging technology.

【Key words】Nuclear magnetic resonance ;Nuclear Spin ;Magnetic moment

0 引言

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)是一种物质与低频电磁波(通常为 1000MHz 的无线电波)相互作用的基本物理现象。1939 年,拉比(I.Rabi)通过试验高温蒸发后的物质观测到了核磁共振现象,但是这种高温蒸发过程破坏了凝聚物质的宏观结构,因而在实际应用中受到了很大的限制。尽管如此,拉比还是因为这一发现获得了 1944 年的诺贝尔物理学奖。1945 年底,美国哈佛大学珀塞尔(E.M. Purcell)在石蜡样品中观测到稳态的核磁共振信号。几乎在同一时间(1946 年初),斯坦福大学布洛赫(F. Block)在水中观测到了稳态的核磁共振现象。两人因为这一发现而分享了 1952 年诺贝尔物理学奖。从此,核磁共振技术彻底实现了在不破坏物质结构的前提下迅速、准确地了解物质内部结构的测量目标,为工农业生产、地质勘探、生物科技、医疗保健等领域的发展提供了有力的手段。核磁共振试验的成功在近代物理学史上也占有极其重要的一席,它直接论证了核子自旋的存在,并且验证了量子力学的一些基本原理。核磁共振实验还为激光技术的产生和发展奠定了坚实的理论和实验基础,因为该实验首次实现了能级反转。经过过去半个多世纪的深入研究,核磁共振已经发展成为一门具有坚实理论基础的综合性学科,并且被广泛应用于工业、农业、化工、生物科技和医疗等诸多领域。一大批在核磁共振研究领域作出杰出贡献的科学家相继获得了物理学界至高无上的荣誉——诺贝尔奖。继 I.Rabi(1944 年,注:此处年号为授予诺贝尔奖时间,下同)、F. Block 和 E.M. Purcell(1952 年)之后, W.E. Lamb 和 P. Kusch(1955 年)、C.H. Townes(1964 年)、A. Kastler(1966 年)、J.H. Van Vleck(1977 年)、N. Bloembergen(1981 年)、H. Taube(1983 年)、N.F. Ramsey(1989 年)、R.R. Ernst(1991 年)在随后的几十年间相继因为他们在核磁共振方面的杰出贡献而获得了诺贝尔奖。通过这一大批科学家的深入研究,核磁共振技术不断获得改进和创新,目前已经发展出一系列具有特殊用途的核磁共振技术,比如核磁双共振、二维核磁共振、核磁共振成像技术、魔角旋转技术、极化转移技术等。这些技术的完善和成熟使得核磁共振技术在生产、生活、科研当中获得了广泛的应用^[1,2,3,4,5]。

1 核磁共振原理^[6]

大家都很清楚,组成物质的原子是由原子核和核外电子构成的,核外电子的分布规律是严格遵守泡利不相容原理的,即在同一个原子中间,不可能稳定存在两个量子数完全相同的电子。占据同一条轨道的两个电子它们的自旋必然相反,否则这一对占据同一轨道的电子是无法稳定存在的。电子的自旋使得电子具有自旋角动量和磁矩。与核外电子相同的是,居于原子中央的原子核也具有自旋角动量和磁矩。这些自旋角动量和磁矩是由组成原子核的质子和中子的自旋叠加所引起的。二十世纪初期,原子物理学家发现原子光谱具有超精细的结构,这些超精细结构利用当时现成的有关原子结构的理论无法给出合理解释,泡利为了解释这些新出现的现象,提出了原子核应该具有自

旋角动量和磁矩的假设。这些假设在随后的实验过程中得到了不断的证实,从此原子光谱的超精细结构得到了合理的解释。长期的实验结果显示,自然界中有 105 种同位素的核具有不为零的角动量和磁矩。

核自旋角动量 P 与核磁矩 μ 之间存在如下的正比关系 $\mu = g_N \frac{e}{2m_p} P = \gamma P$ (1) 式中 g_N 和 m_p 分别为核朗德因子,电子电荷和质子质量。

$\gamma = g_N \frac{e}{2m_p}$ 是用来简明表述核磁矩与核自旋角动量之间正比关系的比例常数,被称为回磁比。当核磁矩 μ 在稳恒外磁场 B_0 中运动时,满足运动方程 $\frac{dP}{dt} = \mu \times B_0$ (2) 式中 $\frac{dP}{dt}$ 表示核子自旋角动量的变化, $\mu \times B_0$ 表示核子所受的磁力矩。联立式(1)和(2)得到 $\frac{dP}{dt} = \gamma \mu \times B_0$ (3) 求

解方程式(3),可知核磁矩在磁场 B_0 中作圆频率为 $\omega_0 = \gamma B_0$ (4) 的拉莫旋进运动。稳恒外磁场在驱动核磁矩作拉莫旋进的同时,还会引起核子的磁位能发生变化,磁位能的变化量为二者的标量积 $E = \mu \cdot B_0 = \mu_z B_0$ (5) 其中 μ_z 为核磁矩在磁场 B_0 方向上的投影。根据量子力学理论,微观粒子的角动量和磁矩在空间的取向都是量子化的,自旋角动量 P 与核磁矩 μ 在磁场方向上的投影只取一系列分立值 $P_z = m\hbar$, $\mu_z = \gamma m\hbar$ (5) 式中 m 为磁量子数,只取整数或者半整数。那么表示磁位能变化量的式(5)就可表示为 $E = \gamma m\hbar B_0$ (6) 磁量子 m 取不同的值时对应于不同的塞曼能级。分布于不同塞曼能级的核子要发生跃迁必须遵循磁偶极跃迁中的选择定则,即 $\Delta m = \pm 1$,也就是说只有相邻能级之间的跃迁才会发生。那么对应于相邻能级发生跃迁时所发射或吸收的光子能量 $h\nu (=h\omega)$ 应该就是相邻能级的能量差 $\Delta E = \gamma\hbar B_0$ 。由此可见核磁共振的条件为 $\omega = \gamma B_0$ (7) 该条件表明只有当外部辐射场的圆频率等于核子在稳恒磁场中的拉莫频率时,核磁共振才能够发生。当外加辐射场满足核磁共振的频率条件式(7)时,核子从低能级不断跃迁到高能级,最后使得高、低能级的核子数趋于均等而达到饱和状态,这是共振吸收信号将逐渐消失。然而,跃迁到高能级的核子不稳定,会与晶格发生相互作用,一部分处于高能级的核子自旋能量转化为晶格内能而跃迁无辐射地跃迁回低能级。这种物质内部相互作用引起的无辐射跃迁使得核子粒子数分布从非平衡态恢复到平衡态的过程被称为弛豫过程。弛豫作用越强,则恢复到平衡态的时间越短。为了使得核磁共振实验现象明显,在实验中应该尽可能地增强弛豫作用,从而降低恢复平衡态的时间,达到共振吸收信号明显的目的。为了获得增强弛豫作用的效果,在制备样品时需要加入少量的含顺磁离子的物质,如三氯化铁、硫酸铜等。

在生产生活中,水是我们最常见的一种物质,也是构成生物体的最重要成分,它的分子由一个氧原子和两个氢原子组成。氢原子的核子数为 1,自旋量子数为 1/2。一旦把带有核磁矩的水放入到外加磁场 B_0 中间时,氢原子核的能级就分裂为两个塞曼能级 $E_1 = -\frac{1}{2}\gamma\hbar B_0$ 和

$E_2 = -\frac{1}{2}\gamma\hbar B_0$, 如图 1 所示。这两个能级之差为 $\Delta E = E_2 - E_1 = \gamma\hbar B_0 = \hbar\omega_0$ 式中 $\gamma = 267.52\text{MHz/T}$ 为氢原子的回磁比。那么当外加恒定磁场为 1 特斯拉时, 如果在垂直于该磁场方向施加一个圆频率为 267.52MHz (频率为 42.58MHz) 的射频电磁波, 水将在该射频电磁波的交变磁场作用下发生核磁共振。

水的核磁共振技术为人们探索人体组织器官的结构和活动机能开辟了一片广阔的天地。人们可以在不对生物体造成任何伤害的前提下实现医疗诊断、研究生理活动过程中人体物质化学变化的过程和特征, 从而有可能探索人脑思维的发生机制和信息传递的机制。为了通过核磁共振技术获取样品的三维图像, 美国科学家 Paul C. Lauterbur (保罗·劳特布尔) 和英国科学家 Peter Mansfield (彼得·曼斯菲尔德) 把样本置于一个存在梯度的不均匀磁场内, 并用适当的电磁波作用于样本上, 从而实现根据物体释放出的电磁波特征绘制出样本的内部三维图像的目的, 他们二人因为这一重要成果而荣获了 2003 年度诺贝尔医学奖。目前这种核磁共振三维成像技术除了被广泛地应用于医疗诊断当中外, 还广泛地应用于化工生产、地质探矿当中。

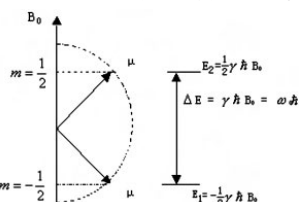


图 1 $m=1/2$ 的粒子磁矩在磁场中的取向及能级

2 核磁共振的应用

经过过去半个多世纪的深入研究和飞速发展, 核磁共振技术在科学研究中不断取得了突破, 形成一门具有完整理论基础、用途广泛的新学科。一系列完备的核磁共振方法与技术是深入分析物质内部细微结构的强有力手段。由于核磁共振技术能够在不破坏物质内部结构的前提下迅速、准确地分析物质结构, 因而在科研和生产生活中得到了广泛的应用, 从最初的物理学研究领域很快渗透到包括化学、生物学^[2,3]、地质学^[4,10,11,12]、医疗保健^[2,3,5,7]在内的各种学科之中, 并在使用过程中促进了相关学科的飞速发展。在化学化工产业中主要应用于分子的结构测定、元素的定量分析、有机化合物的结构解析、有机化合物中异构体的区分和确定、大分子化学结构的分析等领域, 在生物学及医疗保健中则广泛应用于诸如生物膜和脂质的多形性研究、脂质双分子层的脂质分子动态结构确定、生物膜蛋白质与脂质之间的互相作用研究、压力作用下血红蛋白结构的变化研究、生命组织研究等领域, 核磁共振在地质学中的应用则主要体现在油气田的勘探、地下水资源的找寻、原油的定性鉴定和结构分析等方面。下面主要介绍一下核磁共振在医疗诊断和地质探矿中的几个应用。

2.1 在医疗诊断方面的应用

众所周知, 人体中的水约占体重的三分之二, 而且不同组织器官中水的比重存在很大的差异, 而且水分子中的氢元素的核磁共振信号特别明显, 因此通过核磁共振成像技术能够方便地探测各个人体器官之间、甚至是同一器官的不同部分之间的分界。而且一旦人体组织器官发生病变, 器官中含水量一般会发生变动, 这种含水量变化量即使只有 1%, 核磁共振成像也会精确地检测出来, 从而为了解病因和探寻治疗方法提供有力的帮助。目前, 核磁共振成像技术由于它对人体无创伤、无辐射、精确、高效等诸多优点而使其在医学领域中获得了广泛的应用。据不完全统计, 在 2002 年全世界有二万二千多核磁共振成像仪处于工作状态, 这些仪器在一年当中进行的核磁共振成像检测总已超过六千万人次, 为无数患者得到及时的治疗赢得了宝贵的时间。美国科学家 Paul C. Lauterbur (保罗·劳特布尔) 和英国科学家 Peter Mansfield (彼得·曼斯菲尔德) 因为在核磁共振成像领域的特殊贡献而荣获了 2003 年度诺贝尔医学奖。他们的主要贡献是解决了核磁共振本身不能展示样本内部结构的这一难题。长期的研究结果表明, 要想得到样本的内部图像, 需要将不同梯度的磁场加以结合, 即改变穿过样本的磁场强度, 从而得到样本无数二维的图像, 彼此重叠后就得到样本内部空间的三维图像。劳特布尔和曼斯菲尔德正是在这一重要思想指导下获得杰出研究成果的, 在放置于稳定磁场内的样本上叠加一

个不均匀的磁场(即有梯度的磁场), 并用适当的电磁波作用于样本上, 从而根据物体释放出的电磁波特征绘制出样本的内部三维图像。劳特布尔和曼斯菲尔德的这些杰出工作为核磁共振技术最终转换成能够实际应用的无痛诊断仪器——核磁共振成像仪的发明奠定了坚实的基础。

通过与迅速发展起来的计算机技术、电子电路技术和超导技术的结合, 核磁共振成像技术在很短的时间内就顺利地应用到人体内部各器官的精确成像, 为医学诊断技术开辟了一片全新的领域, 极大地推动了医学、神经生理学和认知神经科学的迅速发展。需要着重指出的是, 在核磁共振成像技术获得实用之前, 诊断人体内部器官结构的技术有普通 X 射线成像技术和 CT 扫描成像技术 (computerized tomography, 计算机层析成像)。这两项技术都存在一个巨大的缺点, 即他们都将人体暴露在高能电磁辐射当中, 这些辐射都会对人体细胞造成不同程度的损伤。此外, X 射线只能提供极好的人体骨骼和牙齿图片, 而无法得到清晰的人体软组织器官结构图像。而新兴的核磁共振成像技术克服了这些缺点, 它能够在不对人体造成任何伤害的前提下安全、快速、准确地诊断包括脑部、胸部、脊髓、关节在内的各种人体器官的高清晰三维结构, 是否出现了病变, 从而使得患者得到及时的治疗。核磁共振技术所获得的图像分辨率极高, 能够给出人体各种组织器官的高精细结构, 客观具体地显示人体组织之间的相互关系, 从而大大提高了医生的诊断效率, 避免使用容易给人体带来创伤的剖胸或剖腹探查诊断手术。目前, 有关人体器官生理机能的实现过程还存在着许多奥秘, 核磁共振技术在解开这些奥秘过程中都将有可能发挥至关重要的作用。比如 (1) 人体器官在实现其生理机能时, 运动速度远比现有的核磁共振成像速度快, 要探索这些器官的运作机制, 就需要研究和应用核磁共振快速扫描技术; (2) 要想理解血管在传输血液的过程中的动作机制就需要核磁共振血液快速成像技术, 从而利用血液流动空效应使得血管形态在核磁共振图像上得以鲜明呈现, 进而测定血管中血液的流向和流速; (3) 新兴的核磁共振波谱分析技术可以获得人体局部组织在高磁场环境下的波谱, 从而提高疾病的诊断信息量; (5) 人脑如何思维一直是科学家力图解开的谜, 核磁共振成像技术的发展有可能帮助人们理解人脑思维的发生机制及信息传递过程中人脑物质的化学变化, 从而揭示生命的诸多奥秘。

2.2 核磁共振在化工、航天、探矿放面的应用

核磁共振技术除了在医疗领域中获得了广泛的应用外, 在化学化工领域中的应用也同样广泛。当前化工行业中高分子材料在日常生产中起着极其重要的作用。为了提高高分子材料的性能及产量, 在生产过程中需要准确把握聚合物种溶剂的扩散特征、聚合物均匀性、固态产物生长的空间取向等诸多因素。这些高分子材料的生产要求都给核磁共振技术提供了广阔的应用场所。金属陶瓷的生产过程中容易出现一些严重影响材料性能的砂眼, 这也需要采用核磁共振技术来检测。航天工业对火箭燃料的装填要求非常苛刻, 通过核磁共振技术可以准确探测固体燃料中的缺陷以及填充物、推进剂、增塑剂的分布情况。

此外, 核磁共振技术在地质探矿领域中也获得了广泛的应用。石油是一种碳氢化合物。在对固定区域勘探石油时, 只要在被探测区域施加一个合理的固定磁场, 地层中的各种原子核就会吸收能量从低能态跃迁到高能态。这些跃迁过程对不同的物质所需要的弛豫时间是不一样的。核磁共振仪利用岩石空隙中氢原子核磁共振的弛豫时间长短来确定岩石的空隙度和渗透率, 从而实现油气田勘探开发的目的。实践表明, 油气区岩石的空隙度越小, 弛豫时间越长。核磁共振技术在探矿中的这些特征使得它能够对矿区岩石进行快速的无损检测, 从而实现快速、经济、连续地评价油气储层的物理性质的目的, 正因为如此, 核磁共振技术在油气田的勘探开发和生产中发挥越来越大的作用。核磁共振技术在应用于石油勘探方面的同时, 还经常用来寻找地下水, 以便解决那些缺水地区的困难。与石油相似的是, 水的主要成分也是氢元素, 因此在寻找地下水的过程中采取的技术和方法几乎与勘探石油的完全一样。找水的基本原理就是利用放置于地面的核磁共振找水仪产生合适的磁场和电磁波同时施加到目标区域, 然后接收目标区域反馈回来的核磁共振信号。通过观测分析研究地层中氢核产生的核磁共振信号的变化规律来确定含水层的深度、厚度、含水量及地层空隙度等信息, 从而帮助我们解决水资源匮乏的难题。这种新型的找水技术在我国投入使用后获得了初步的成功, 过去被常规找水法认定为“无水区”或缺水区的地方在应用该技术之后“重新”找到了地下水。这

种找水技术已经逐步应用到绘制水文地质图、快速圈定找水远景区、评价地下水资源丰度、确定水井最佳位置等工作当中。此外,核磁共振技术还可在水环境监测、工程无损检测等方面发挥积极作用。

3 总结

核磁共振技术在近代物理史上曾经书写了光辉的一页,它不但成功地帮助人们理解了原子光谱超精细结构的物理本质,成为人们揭开原子核内部结构的强力工具,极大促进了近代物理学的发展,而且由于该技术能够在不破坏被测量对象内部结构的前提下迅速准确地了解被测量对象的内部结构,从而在现代生产生活中得到了广泛的应用。自从 1939 年拉比观测到核磁共振现象之后,众多的理论物理学家以及理论与物理学相交叉的医药学家、化学家相继在核磁共振技术的理论研究和应用方面作出了杰出的贡献,前后有十几位科学家因为在这一领域的杰出贡献而荣获诺贝尔奖。由此也可看出,核磁共振技术在近代物理的发展史上以及生产生活中应用的重要地位。目前,该技术在经过半个多世纪的发展之后,已经发展成为一门具有坚实理论基础的综合性学科,一系列极具实用前景的特殊分支,如核磁双共振、二维核磁共振、核磁共振成像技术、魔角旋转技术、极化转移技术等都在使用过程中得到不断的完善和发展,使得核磁共振技术在生产、生活、科研当中获得了越来越广泛的应用。其中核磁共振成像技术是核磁共振技术应用领域中最闪亮的一颗明珠,科学家保罗·劳特布尔和彼得·曼斯菲尔德因为在实现核磁共振成像领域的特殊贡献而荣获了 2003 年度诺贝尔医学奖。他们通过对放置于稳定但具有梯度的磁场内的样本进行核磁共振试验,从而成功绘制出样本的内部三维图像。这一杰出工作成就在发展过程中不断与新兴的计算机技术、电子电路技术和超导技术相结合,最终制造出能够精确成像人体内部器官的核磁共振成像仪,为医学诊断技术开辟了一片全新的领域,极大地推动了医学、神经生理学和认知神经科学的迅速发展,为探索人体器官

生理机制、理解生命奥妙提供了一条便捷的途径。

核磁共振在探索物质内部精细结构所具有快速、准确、无损被测量对象等诸多优点不但为医疗保健行业提供了一条方便快捷的检测方法,而且在化学化工行业、生物制药行业、生命组织研究领域、航空航天工业、油气资源勘探行业、地下水资源的寻找等各个行业中也得到广泛的应用。因此我们应该在理论学习和实验操作来深入掌握核磁共振技术的物理本质,并且了解该技术的优点及应用前景。

【参考文献】

- [1]金永君,艾延宝.核磁共振技术及应用.物理与工程,2002,(01):48-49.
- [2]刘东华,李显耀,孙朝晖.核磁共振成像.大学物理,1997,(10):36-39,29.
- [3]别业广,吕梓.再谈核磁共振在医学方面的应用.物理与工程,2004,(02):34,61.
- [4]阮萍.核磁共振成像及其医学应用.广西物理,1999,(02):50-53,28.
- [5]黄卫华.走近核磁共振.医药与保健,2004,(03):15.
- [6]林木欣,等.近代物理实验教程.北京:科学出版社,2006.
- [7]田建广,等.磁共振成像的安全性.波谱学杂志,2002,(06):505-511.
- [8]周口.师范高等专科学校学报,1999,(16):5:52-55.
- [9]潘玉玲.地面核磁共振找水理论和方法.武汉:中国地质大学出版社,2000:19-22.
- [10]万乐.利用核磁共振方法探查岩溶水.CT理论与应用研究,1999,(8):3:15-19.
- [11]潘玉玲,袁照令.核磁共振找水方法的现状和发展趋势.地质科技情报,2000,(19):1:105-108.
- [12]李振宇,潘玉玲.地面核磁共振找水方法的应用效果研究.地球科学,2001,(26):34-36.

作者简介:张云(1966—),女,云南开远人,中学高级教师、大学本科,现主要从事普通物理教学工作。

[责任编辑:曹明明]

(上接第 89 页)煤气流量调节回路,助燃空气流量调节回路和拱顶温度调节回路。煤气量和空燃比由操作人员设定,煤气量的大小关系到拱顶的升温速度。

在快速燃烧期,助燃空气量根据煤气量和空燃比自动配给,较小的助燃空气量促使拱顶温度尽快升高。拱顶温度达到设定值后进入蓄热期,由助燃空气调节回路和拱顶温度调节回路经过高选器控制助燃空气调节阀。拱顶温度超过设定值时,拱顶温度调节回路输出快速增大,当其超过助燃空气调节回路的输出时,由拱顶温度调节回路控制助燃空气调节阀;拱顶温度下降或略低于设定值时,拱顶温度调节回路的输出下降,当低于助燃空气控制回路的输出时,重新由助燃空气控制回路按空燃比控制助燃空气调节阀。为避免助燃空气调节回路进入积分饱和状态,在拱顶温度调节回路控制助燃空气调节阀时,需将助燃空气调节回路强制为手动状态。该控制方案达到较好的控制效果,并减少了煤气用量和电能消耗。

3 控制系统的特点

梅钢 4# 高炉热风炉控制系统采用的 PLC 系统具有模块化的、可扩充的结构,该系列 PLC 是 RCOKWELL 公司推出的综合自动化平台,所有的模块都能带电插拔,消除了模块缺少槽位的限制,特别适合工业及生产过程的实时控制。

该 PLC 控制系统包括以下特点:

3.1 控 PLC 制系统选用的控制器实时性好,可靠性高,数据处理速度

快,处于国内先进水平;

3.2 采用基于同轴电缆方案的远程 I/O 的体系结构,并且系统扩展方便,可随时增加节点;

3.3 A-B 系列控制柜内的通讯网络速度快,传输速率高,可靠性高,并且具有较高的安全性;

3.4 操作员站界面直观友好,操作简便,功能齐全,并且具有实时报警监视、安全确认机制和数据记录功能。

3.5 多种操作方式综合应用,集中联动、集中手动、就地手动等多种控制方式的组合,使系统操作灵活可靠。

4 结束语

梅钢 4# 高炉热风炉新型自动控制系统于 2009 年 5 月 12 日投产运行,功能强大,实行性高,在一定程度上提高了热利用率,减少了能耗。同时降低了操作人员的劳动强度,提高了系统运行的安全性和稳定性。该系统在确保了高炉生产的顺利进行的的同时,确保经济效益增加,在目前钢铁企业中具有一定的推广价值。

作者简介:张德炎(1981—),男,本科,2004 年毕业于安徽工业大学电气自动化专业。

[责任编辑:张艳芳]

(上接第 114 页)价值,是中国传统建筑文化中一抹亮丽的色彩。

【参考文献】

- [1]李仲谋.徽州文化综览.安徽教育出版社.
- [2]卞利.徽州民俗—徽州文化全书.安徽人民出版社,2005 年 05 月.
- [3]朱永春.徽州建筑—徽州文化全书.安徽人民出版社,2005 年 05 月.

[4]洪振秋.徽州古园林——中国文化遗珍.徽州卷.辽宁人民出版社,2004 年 01 月.

作者简介:王子琳,武汉理工大学工程硕士,任职于安徽工商职业学院。

[责任编辑:曹明明]