

特约专栏

我国核电站老化与寿命管理数据质量的表征

童小燕, 李 正, 陈刘定

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 老化与寿命管理技术研究是进行核电站寿命与安全分析的重要手段。数据是开展具体研究的核心纽带, 而数据质量的问题严重制约了相关研究技术的推进与发展。本文从我国核电站老化与寿命管理的起因及相关技术研究的现状出发, 系统地梳理了核电站老化数据的来源与特点, 利用层次分析的观点, 引入数据全生命周期的概念, 提出影响数据质量的主要因素以及数据表征的体系结构, 为开展核电站老化与寿命管理数据质量问题的研究提供重要参考。

关键词: 核电; 老化与寿命管理; 数据质量; 层次分析; 全生命周期

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2011)05-0027-06

Characterization of Aging and Life Management Data Quality of China's Nuclear Power Station

TONG Xiaoyan, LI Zheng, CHEN Liuding

(National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Research of aging and life management technique is an important approach for life and safety analysis of nuclear power station. Data is the key point for carrying out detailed work. But problem concerning data quality has restricted the advances of related research. Starting from the current research of aging and life management of china's nuclear power station, we systemically described the origins and characteristics of aging data of nuclear power station. Based on hierarchical analysis and introducing the concept of data life cycle, the major factors that can severely affect the data quality and the data characterization system are proposed, thus providing important references for related problems research about aging and life management of china's nuclear power station.

Key words: nuclear power; aging and life management; data quality; hierarchical analysis; life cycle

1 前 言

安全是核电站运行的首要目标。核电站系统、结构和部件(SSCs)在实际服役过程中, 随着运行时间的延长, 性能逐步劣化是必然趋势。核电厂的运行经验表明, 由于高温、高压、辐照或循环载荷等因素引起的材料脆化、机械断裂、腐蚀、疲劳、蠕变以及磨损等劣化过程导致设备的退化和故障时有发生。人们将核电站系统、结构和部件的物理特性和(或)其构成物质的结构或成分随时间或使用逐步退化的过程称为老化^[1]。因此, 核电站的安全受到其组成部分老化的影响。

上世纪90年代以来, 随着国际上越来越多的核电厂进入服役末期, 核电厂的老化和寿命管理也逐渐成为运营者和核安全管理当局关心的重要问题。核电安全问

题的产生, 主要是由核电厂运营单位及其技术支持单位在设计、制造和管理过程中, 在选址、设计、建造、运行和管理等一个或多个环节中产生的隐患和缺陷, 随运行时间的逐步累积而形成的。核电站 SSCs 的老化分析和管理应贯穿于核电站整个寿命周期, 在电站的设计、制造、建造、调试、运行(包括延寿运行和延期停堆)和退役阶段都要开展老化技术分析和寿命管理的研究。而开展老化管理工作的基础之一是建立全面、完善的老化管理信息数据库。因此, 数据必然成为核电站老化与寿命管理的重要基础。

我国的核电经过20多年的发展, 在相关领域的研究开发方面具备了相当的基础。尤其是自本世纪之初开始老化研究以来, 已经从不同的技术方面开展了大量的老化试验, 积累了一定的数据资源。由于数据产生的客观背景千差万别, 数据收集和记录过程多种多样, 再加上数据产生和收集过程中人为因素的影响, 导致在记录数据、处理数据和用数据来交流相关的科学信息时, 出

收稿日期: 2011-1-15

基金项目: 科技部973计划项目(2011CB610501)

通信作者: 童小燕, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师

现了数据不可靠、数据不完整、数据重复、数据遗漏、表达二义性等多种多样的数据质量问题,致使大量已有的老化研究数据无法合理描述和使用。

因此,有必要从核电站老化与寿命管理的起因与相关技术研究的现状出发,开展核电站老化数据的系统分析,探讨数据质量问题的来源与具体的表征方法,为深入开展核电站老化与寿命管理数据质量问题的分析与评估,实现数据的有效利用提供一定的技术基础。

2 我国核电站老化与寿命管理的现状

参照国际原子能机构(IAEA)的规定,老化管理过程包括:安全重要设备筛选、老化机理分析、监测与减缓设备老化方法的开发以及老化管理活动的实施^[2]。老化管理是通过设计、运行和维修等相关活动或行动将核电站系统、结构和部件的老化降质控制在可接受限值内。而寿命管理是将老化管理与经济规划进行集成。

上世纪末至本世纪初,鉴于秦山一期核电厂和大亚湾核电厂首次 10 年的安全审查,国内各核电厂和研究单位第一次接触到了老化与寿命管理的概念。随后,在 IAEA 的推动下,比照国外老化管理和安全监督方面的经验和方法,国内陆续开展了老化和寿命管理技术的研究与相关管理实践的探索。

经过了近十年的发展,我国已在老化和寿命管理方法学、材料老化行为研究、材料老化降质监督监测检查缓解控制、材料老化降质评价和设备寿命评估、设备老化和寿命信息管理、承压容器和管道结构完整性评定、新技术在核电厂老化与寿命管理中的应用(包括概率安全评价 PSA, RCM, RI-ISI 等)、核电厂定期安全审查、经验反馈体系等领域设立了多项研究项目,国内的系统化的老化和寿命管理技术体系正在逐步建立^[3]。在老化和寿命技术研究的同时,借鉴 IAEA 的寿命管理和监管模式,秦山、大亚湾、岭澳等核电站建立了老化管理大纲,开展了一系列的老化和寿命管理活动,取得了一些实质性成果。纵观国内核电站老化和寿命管理的现状,我们认为:国内对于老化和寿命管理仍处于借鉴和探索阶段,还无法建立系统的管理体系和方法。尤其随着核电厂老化和寿命管理研究的不断深入,国内在核电厂老化和寿命管理基础研究方面的不足日渐显现,特别是金属材料和非金属材料(主要指混凝土和电缆等)在高辐照、高温、高湿度和多相介质等恶劣环境下的老化形成机制和降质速度预测的基础研究方面的不足尤为突出,基础研究的不足严重影响了核电厂关键设备老化状态评估和寿命预测技术的建立,也严重制约了相关管理措施

和监督导则的制定。

近年来,我国的核电事业呈现良好发展态势。截至目前,国务院已核准 34 台核电机组,装机容量 3 692 万 kW,其中已开工在建机组达 25 台,2 773 万 kW,是全球核电在建规模最大的国家^[4]。而如何开展运行核电站的定期安全审查和老化寿命评估,如何确定在建核电站的寿命和老化管理程序以及如何规划拟建核电站的寿命和安全问题,这些都需要完善的老化研究基础。

任何材料和设备均存在自然老化的现象。核电设备如果存在着设计缺陷与变更、改造、环境改变、操作不当等因素,还会加速老化。因此老化包括材料老化(有形老化)、技术陈旧(无形老化)和人因问题。关于老化问题的研究是一项庞大的系统工程,任何一方面的研究突破和成果取得都需要相当数据量的支撑。我国核电站在多年的运行过程中已积累和正在形成大量的现场数据,而且,各核电厂及相关研究机构已不同程度地开展了包括材料及材料性质、制造方法、受力及运行条件、老化机理、退化部位、老化影响、老化规律、状态指标、运行经验反馈等方面的研究,积累了大量的基础数据。这些数据必然成为我们开展老化研究和建立寿命管理体系的重要基础资源。然而,由于核电领域的特殊性以及老化研究的历史阶段性,目前主要还是集中在数据量的积累上,对于如何将数据形成有用的资源,尤其是对于数据质量的问题还缺乏系统的研究。因此,如何正确看待数据、如何再现数据反映客观的能力以及如何有效利用数据就成为老化和寿命管理研究亟需面对的一个重要问题。

3 数据来源与质量特点

从拟建、在建到投入使用,在选址、设计、建造、运行和管理等各个环节的数据都是核电站寿命信息的具体记录,因此老化数据来源于核电站的全寿命周期。数据的内容包括材料的基础数据(包括成分及基本性能)、寿命及老化试验数据(包括试样状态、试验条件、试验结果以及监检测数据等试验过程的原始信息)、电厂部件的原始数据(包括设计、制造、设备鉴定和调试)、运行历史数据(运行性能、工艺/系统和环境条件等)、维修历史数据(事故描述、失效形式及原因、改进措施等)、定期安全评估数据和现存记录等等。数据类型涉及数字、字符、文本以及图片等。因此,系统复杂,研究领域广泛的特点,决定了与核电站寿命和老化相关的数据来源广泛,记录形式多种多样。

由于核电厂造价昂贵、运行寿命长,实际服役数

据经历的时间跨度大,几乎无法实现状态的重现,从结构到环境等方方面面的服役数据无疑对开展老化研究弥足珍贵。再加上数据来源的广泛性和数据实验手段的多样性,使数据信息的表现形式多样、数量巨大、关系复杂等,如果没有规范化、系统化和通用化的数据表达形式,很难将核电站不同寿命阶段以及老化研究不同领域所形成的点点滴滴的成果进行系统梳理,也就很难形成有用的数据资源。这涉及到数据质量的问题。

从数据的来源可以看出,数据是多维度的,其本身的多维性决定了数据质量也是一个多维度的概念,而且对不同用途的数据,人们对数据质量的定义也不尽相

同。尽管对数据质量的含义有不同的看法,数据质量是层次分类的概念被普遍接受,每个质量类可以分解成具体的数据质量维度。比较全面和普遍适用的框架是 Richard Y. Wang 和 Diane M. Strong 在 1996 年确立的 4 类共 15 个数据质量维度的框架。该框架含固有质量、可访问性质量、关联性和表达性质量 4 大类。固有质量包括准确性、可信性、客观性、可靠性 4 个数据质量维度。可访问性包括数据可访问的程度与数据的安全性 2 个数据质量维度。关联性包括相关性、可用性、完整性、及时性以及合适的数量 5 个数据质量维度。表达性包括可解释性、易懂性、简洁性、一致性 4 个数据质量维度^[5](如图 1 所示)。

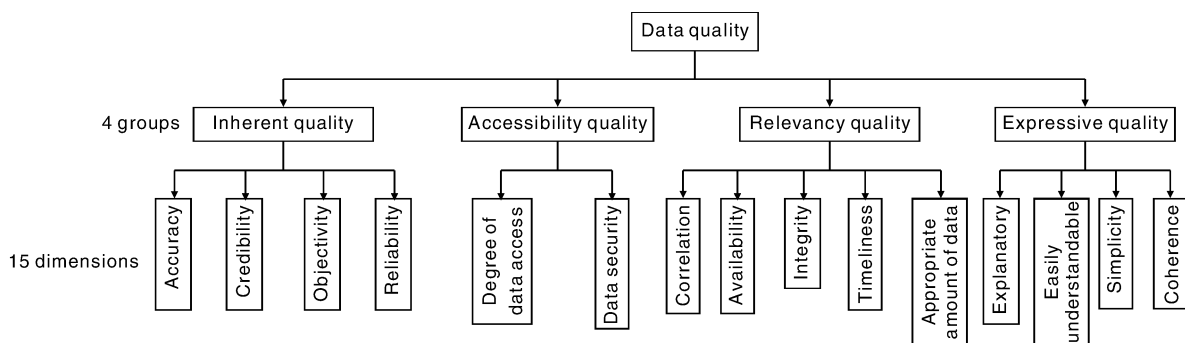


图 1 数据质量类及质量维度框架

Fig. 1 Framework of data quality groups and quality dimensions

由此我们看出,数据质量存在于数据的整个生命周期。这就要求数据使用者明确核电数据质量的各因素的概念及其特点,明确影响数据质量的各因素的特点和要求,对数据进行综合分析,尽量多地抽取有用信息,以形成有用的数据资源。基于核电老化研究与寿命管理的目的,我们认为:核电数据质量是数据的一组固有特性满足核电领域客观发展要求的程度。相应地,就数据本身而言,数据质量应具有准确性(数据正确、没有错误的程度)、可信性(数据被认为准确和可信的程度)、客观性(数据的公正程度)和可靠性(数据来源的可靠程度)。也就是说,数据本身应该具有普遍认可的客观、准确反映核电领域老化与寿命研究的发展程度和要求的能力。这个能力被体现的程度,需要可访问性质量、关联性质量和表达性质量来保证。

4 核电数据质量的层级分析及表征

4.1 核电数据质量影响因素的层级分析

从数据的生命周期来看,可以划分为数据的产生、收集、整理、记录和使用 5 个环节,每个环节都要经历人员交互、计算、传输等操作步骤,每一项参与数据相

关的事物都可能对数据的质量产生影响,导致数据质量问题。由于数据质量的影响因素较多,即使是同一种因素,在数据寿命周期的不同状态,对数据质量的影响也不同。因此,从数据产生的全过程考虑,数据质量应该是由多因素、多关联模式组成的复杂的逻辑关系系统。

从数据反映的对象来看,数据包含了核电站、核电设备、部件以及材料等不同层级的实体对象;从数据反映的信息来看,数据包括了各实体对象的基本信息、服役状态信息、试验信息、环境信息等;从数据反映的阶段来看,数据承载了核电站全寿命周期的任何阶段;……。本文基于对数据产生的时间轴和主要事项的综合分析,利用层次分析的观点,提出核电老化与寿命管理数据质量表征的方法框架。

基于前面对数据质量特点的分析,以数据产生过程为主线,按照数据产生环节中对数据质量可能产生影响的因素,建立数据质量因素类,每个质量因素类可以分解成具体的数据质量因素。具体的分类方法如图 2 所示。

当然,任何一个层次的任何一类因素,还可以分解出多个具体的影响因素集,而每个因素集又可以细分为

多种因素。如此一层一层分解, 就可以剖分出影响核电数据质量的所有因素。这里需要特别注意的是, 对于数据产生的不同阶段, 不同因素对数据质量的影响程度不

同, 即使是同一种因素, 针对不同数据反映老化与寿命不同阶段以及不同技术领域的特点, 其对数据质量的影响程度也不尽相同。

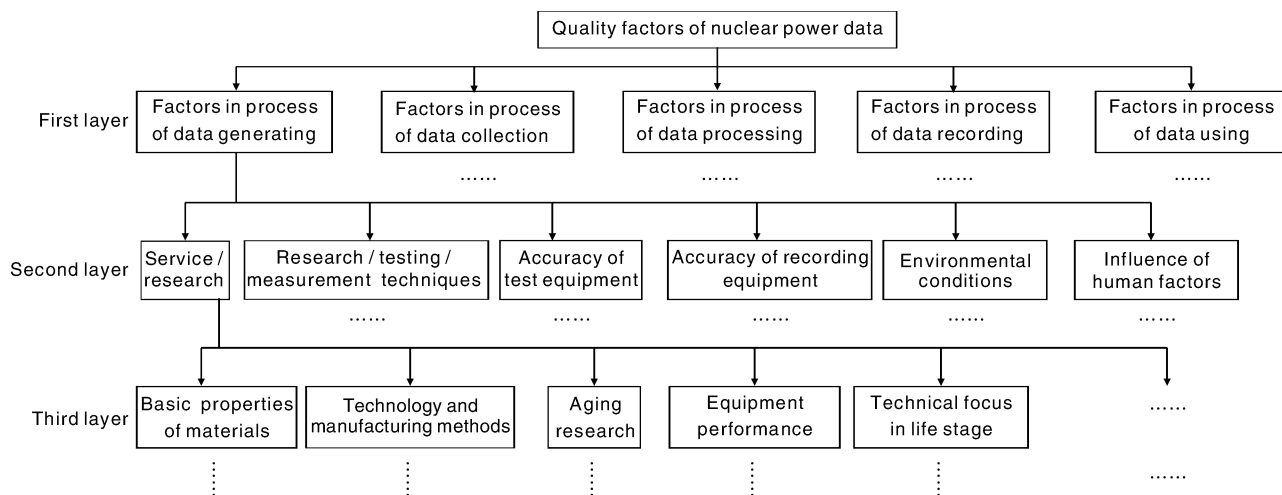


图 2 影响核电数据质量的因素体系(层间关系)

Fig. 2 The factors system that affects the quality of nuclear data (relations between layers)

此外, 由于数据从产生到使用, 是一个顺序完成的过程, 数据产生过程中前一阶段的数据质量会影响后续阶段数据质量水平。因此, 即使在数据质量因素的同一层级内, 各因素之间也可能存在着相关性, 在层间纵向层级分析的同时, 还要对层内存在相关性的因素集进行层内层级分析(如图 3 所示)。因此, 这就需要考虑数据质量因素对数据质量影响的等级和重要度问题。

4.2 核电数据质量的表征

Wang 和 Strong 提出的 4 类共 15 个数据质量维度的框架被认为是比较全面和普遍适用的, 对核电数据质量的表征, 本文沿用这一数据质量评估框架。结合对图 2 和图 3 所示的影响核电数据质量的因素体系的层间和层内关系的分析, 建立了如图 4 所示的核电数据质量水平表征体系。该体系依然借用较明了的层次分析方法, 按照不同属性分组, 每组作为一个层次, 再按照最高层(数据质量水平)、第 2 层(数据质量类, 如固有质量、可访问性质量、关联性质量和表达性质量 4 大类)、第 3 层(每一个数据质量类包含的数据质量维度)和第 4 层(每个数据质量维度所涉及的质量因素)等等层次排列起来, 构成多层次质量表征的因素体系。在准确给出第 4 层中数据维度所涉及的质量影响因素时, 需要借助数据固有质量类中准确性、可信性、客观性和可靠性的定义:

数据准确性: 描述数据是否与其对应的客观实体的

特征相一致, 吻合度越高, 准确性越高, 完全不一致即为错误数据。主要由数据产生过程决定。

数据可信性: 当无法判断已知信息的正确和客观的时候, 通过其它因素, 比如常识、经历、承诺等来判断信息的可信程度, 因此数据信息是否完整应作为可信性评判的标准。主要由数据收集和整理的过程决定。

数据客观性: 主要受人为因素的影响。如果按事物的本来面目去考察, 与任何个人感情、偏见或意见都无关, 表示数据是完全客观的。与数据产生全过程的人为因素有关。

数据可靠性: 数据产生的任何一个环节都会对其来源的可靠程度产生影响, 因此数据可靠性与数据产生的全过程有关。

图 4 中用 Q , $q \in [0, 1]$ 表示数据质量, $\omega \in [0, 1]$ 表示数据维度对数据质量的影响程度。每一层级的数据质量由该层内各因素本身的数据质量以及各数据维度对数据质量的影响程度来决定, 可以用公式表示如下:

最高层: 数据质量水平;

$$\text{第 2 层: } Q = \sum_{i=1}^4 Q_i \omega_i, \text{ 其中 } \sum_{i=1}^4 \omega_i = 1; \quad (1)$$

$$\text{第 3 层: } Q_i = \sum_{j=1}^4 Q_{ij} \omega_{ij}, \text{ 其中 } \sum_{j=1}^4 \omega_{ij} = 1; \quad (2)$$

$$\text{第 4 层: } Q_{i1} = \prod_{k=1}^1 q_{i1k}, Q_{i2} = \prod_{k=1}^2 q_{i2k}, \\ Q_{i3} = \prod_{k=1}^5 q_{i3k}, Q_{i4} = \prod_{k=1}^5 q_{i4k}; \quad (3)$$

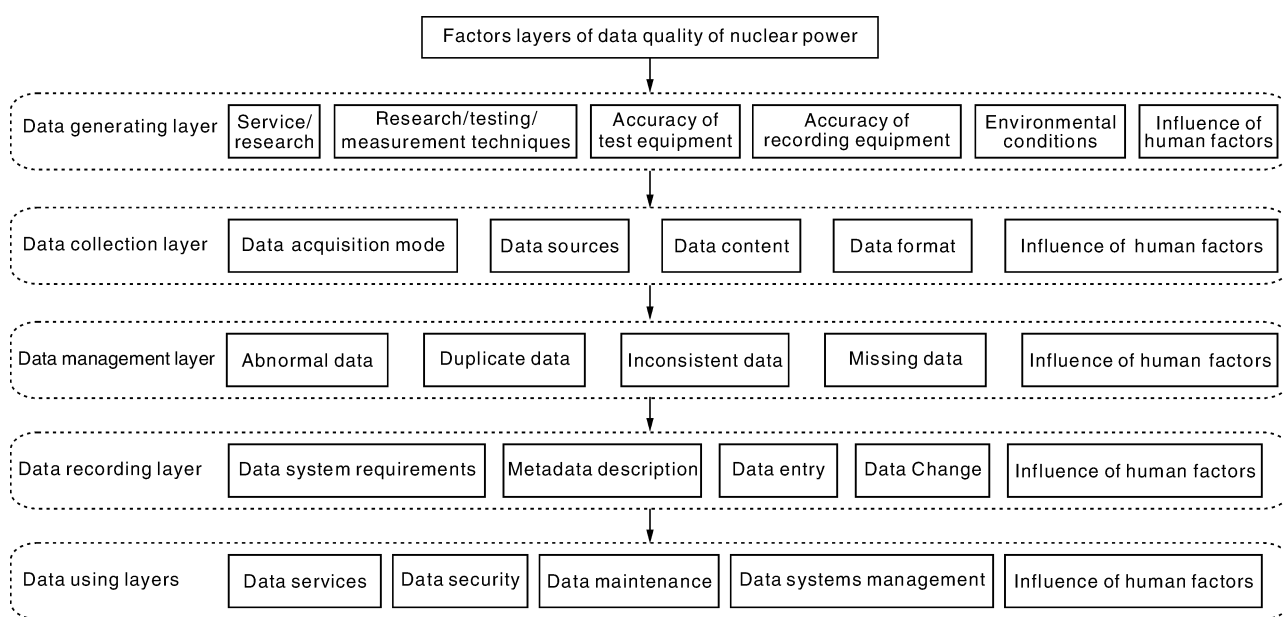


图3 影响核电数据质量的因素体系(层内关系)

Fig. 3 The factors system that affects the quality of nuclear data (relations in layers)

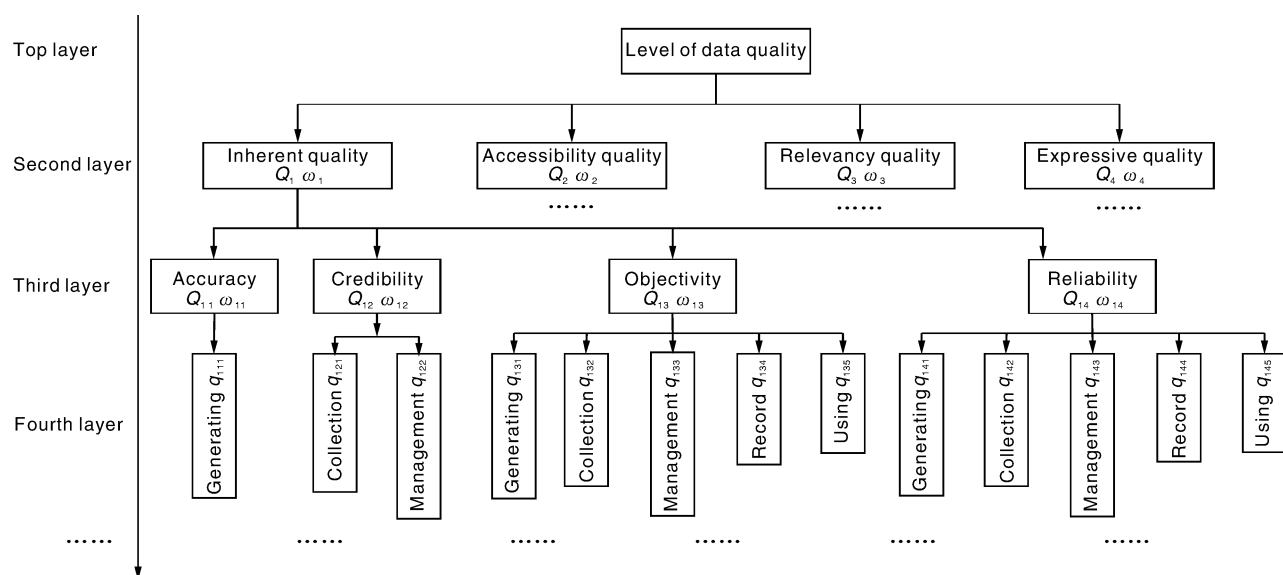


图4 核电数据质量水平表征体系

Fig. 4 The characterization system of data quality level of nuclear power

以下各层的表达式可以按照第4层依次类推, 这样我们就得到了用各个层表征的不同的核电数据质量水平表达式。

5 结论

本文引入数据全生命周期的概念, 分析了核电老化和寿命管理全生命周期各个阶段的各个影响因素对总体数据质量水平的影响。基于数据质量维度框架和层次分析的观点, 建立了核电老化和寿命管理数据质量水平的

表征方法, 预期该方法可为此课题研究提供重要参考。但该方法是在同一层次各个因素之间互不包含且具有绝对的时间继承性的基础上, 与工程实际还有一定的差距, 在下一步的研究中需要对因素之间的相互关系做出更精确地描述, 并据此建立更普遍适用的表征方法。

参考文献 References

- [1] IAEA-TECDOC-540. *Safety Aspects of Nuclear Power Plant Ageing*

- [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1990.
- [2] IAEA. *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Vessel Internals* [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999.
- [3] Liu Hongyun (刘鸿运), Gui Chun (贵春), Wang Xianyuan (王先元), et al. *Inspiration of EU Research Project NULIFE to the Aging and Life Management Studies of Nuclear Power Plants in China* (欧盟 NULIFE 研究计划对中国核电厂老化和寿命管理研究的启示) [R]. Wuhan: China Nuclear Industry, 2010.
- [4] Zhang Guobao (张国宝). *Accelerate the Development of Nuclear Power is the Inevitable Choice for China's Energy Structure Adjustment* (加快发展核电是调整我国能源结构必然选择) [EB/OL]. <http://www.China-nei.cn/>.
- [5] Wang R Y, Strong D M. Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers [J]. *Journal of Management Information Systems*, 1996, 12(4): 5-34.

New Carbon Allotrope Could Have a Variety of Applications

Carbon comes in many different forms, and now scientists have predicted another new form, or allotrope, of carbon. The new form of carbon, which they call T-carbon, has very intriguing physical properties that suggest that it could have a wide variety of applications.

The scientists, Xian-Lei Sheng, Qing-Bo Yan, Fei Ye, Qing-Rong Zheng, and Gang Su, from the Graduate University of Chinese Academy of Sciences in Beijing, China, have published their study on the first-principles calculations of T-carbon in a recent issue of *Physical Review Letters*.

Allotropes are formed when the atoms in a substance that contains only one type of atom are arranged differently. Although many substances have multiple allotropes, carbon has the greatest number of known allotropes. The three best-known carbon allotropes are amorphous carbon (such as coal and soot), graphite, and diamond. Since the 1980s, scientists have been synthesizing newer allotropes, including carbon nanotubes, graphene, and fullerenes, all of which have had a significant scientific and technological impact.

With more recent advances in synthetic tools, scientists have been investigating a wide variety of new-and sometimes elusive-carbon allotropes. In light of these investigations, Sheng, et al., write in their study that it appears that we might be entering the era of carbon allotropes.

Here, the scientists explained how to obtain a new carbon allotrope by substituting each carbon atom in diamond with a carbon tetrahedron (hence the name "T-carbon"). They were inspired by the substitution of each carbon atom in methane with a carbon tetrahedron, which forms tetrahedrane.

"[Our study] adds a possible new allotrope of carbon with amazing properties," Su told PhysOrg. com. "T-carbon has bond angles different from graphite and diamond, but the interesting structure is still quite stable and has the same group symmetry as diamond, thereby widening people's vision and knowledge on carbon bonding."

Each unit cell of the T-carbon structure contains two tetrahedrons with eight carbon atoms. As the scientists' calculations showed, T-carbon is thermodynamically stable at ambient pressure and is a semiconductor. T-carbon is one-third softer than diamond, which is the hardest known natural material. The new carbon allotrope also has a much lower density than diamond, making it "fluffy."

The scientists also calculated that T-carbon has large interspaces between atoms compared to other forms of carbon, which could make it potentially useful for hydrogen storage. In addition, the unique physical properties of this new carbon allotrope make it a promising material for photocatalysis, adsorption, and aerospace applications.

"We believe that, if obtained, T-carbon is so fluffy that it can be used to store hydrogen, lithium, and other small molecules for energy purposes," Su said. "It can be used as photocatalysis for water-splitting to generate hydrogen, or as an adsorption material for environmental protection. As it has very low density but a high modulus and hardness, it is quite suitable for aerospace materials, sports materials like a tennis racket, golf club, etc., and cruiser skin, and so forth."

The scientists also noted that T-carbon could have astronomical implications as a potential component of interstellar dust and carbon exoplanets.

"There is a long-standing puzzle in astronomy known as the 'carbon crisis' in interstellar dust," Su said. "Observations by the Hubble telescope revealed that the carbon budget in dust is deep in the red, and there is not sufficient carbon in dust to account for the light distortions."

In addition, the exoplanet WASP-12b has recently been found to have a large amount of carbon, making it the first carbon-rich exoplanet ever discovered. Since the structure of the carbon in WASP-12b is still unclear, T-carbon might also be one of possible candidates for this carbon planet.

To investigate T-carbon further, the researchers would like to synthesize the new allotrope in the lab, although they say that this would likely be very difficult.

"A synthesis of T-carbon in the lab poses a great challenge for materials scientists and chemists," Su said. "We suggest the following ways: using the CVD technique under a negative pressure environment; detonation on diamond or graphite; crystallization of amorphous tetragonal carbon; or stretching cubic diamond under extremely large strength."

More information: Xian-Lei Sheng, et al. "T-Carbon: A Novel Carbon Allotrope." *Physical Review Letters* 106, 155703 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.155703

(From: <http://www.physorg.com/news/2011-04-carbon-allotrope-variety-applications.html>)