

文章编号: 1000-582X(2012)10-038-06

## 无线智能网络的钢结构疲劳损伤监测

崔定宇<sup>1</sup>, B F Spencer Jr<sup>2</sup>, 辛克贵<sup>1</sup>, 刘宇飞<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 伊利诺伊大学香槟分校, 美国 61801)

**摘要:** 利用美国伊利诺伊大学结构健康监测项目组研制的应变无线智能传感器(SHM-S)结合雨流周期计数法, 对钢结构疲劳寿命进行监测。通过分布式数据采集的办法, 无线智能传感器将应变的振幅和均值用三维直方图进行传输, 压缩原始应变数据, 提高了信号传输的效率并降低了传感器发射的能源消耗, 使长期疲劳寿命监测成为可能。通过钢结构悬臂梁实验验证了基于无线智能网络的钢结构疲劳寿命监测方法的可行性。

**关键词:** 健康监测; 无线智能传感器; 雨流周期计数; 分布式数据采集; 疲劳寿命

**中图分类号:** TU311.3

**文献标志码:** A

## Fatigue monitoring of metallic structures by wireless smart sensor networks

CUI Dingyu<sup>1</sup>, B F Spencer Jr<sup>2</sup>, XIN Kegui<sup>1</sup>, LIU Yufei<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, UIUC, Urbana 61801, USA)

**Abstract:** Recent advanced sensor technology has enabled wireless smart sensor network (WSSN) for structural health monitoring (SHM). Because of many attractive features such as wireless communication, battery powered, on board computation, and low cost, the WSSN makes the dense array of sensors feasible for engineering practice. In this study, a method for fatigue life monitoring using wireless smart sensor networks is explored by implementing Rainflow cycle counting algorithm in the sensor network, which extracts the loading features including the number of each load cycles, amplitude and mean of strain. Instead of sending back raw strain data to basestation, only the onboard processed histogram of the strain data is transmitted, which tremendously reduces the amount of data and the associated energy consumption in the wireless smart sensor networks. In addition, the feasibility of the method is experimentally verified through lab-scale tests.

**Key words:** structural health monitoring; wireless smart sensor; rainflow cycle counting; decentralized data aggregation; fatigue life

**收稿日期:** 2012-04-19

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50878117); 国家自然科学基金重点项目(51038006); 清华大学自主科研计划资助项目(2010081766)

**作者简介:** 崔定宇(1985-), 男, 清华大学博士研究生, 主要从事结构工程及健康监测研究,

(E-mail) cdy2008310043@gmail.com。

循环荷载作用或者重复的应力加载,导致桥梁、房屋、飞行器等材料中出现疲劳损伤。特别在交通运输日益繁忙的情况下,疲劳损伤过程加速了结构构件的老化,降低了设计承载力,严重危害到结构的安全。因此,针对现有基础设施老化的状况,为防止大规模安全事故的发生,疲劳损伤必须成为重点的健康监测目标。

近年来,随着基础设施的大量老化,如何实时准确地对结构及构件进行健康监测成为当前研究的热点<sup>[1]</sup>。在过去的十几年中,传统的有线监测系统被大量地使用,但在实际工程应用中,有线系统不可避免的存在一些问题:铺设施工困难、系统成本昂贵等<sup>[2-3]</sup>。相比之下,无线智能传感器网络一方面不需要繁琐的有线传输路径,另一方面随着硬件技术的提高其成本得到充分降低,这使得无线传感器网络技术的实际应用价值大为凸显<sup>[4-5]</sup>。

在疲劳破坏的监测中,需要密布型的传感器网络,如果测量数据不经处理直接进行无线网络传输,会占用宝贵的带宽资源,同时会导致传感器电源的快速消耗。分布式数据采集方式采用了局部数据处理和数据压缩技术,比传统的集中数据采集减少了数据通信量,节省了时间,效率明显提高<sup>[6]</sup>。

笔者利用美国伊利诺伊大学结构健康监测项目组研发的无线应变智能传感器(SHM-S)结合传感器平台 Imote2,植入雨流计数算法,进行疲劳实时监测。监测系统通过疲劳实验进行了验证。实验中测量的无规律的原始应变数据,通过雨流计数算法压缩为三维直方图。该操作主要通过每个传感器的分布式计算完成,处理结果仅将循环荷载下结构的应变振幅和平均值计入三维直方图。由于需要传输的信息量经过压缩已大为减少,传输功耗也相应降低,从而使无线智能传感器网络对疲劳损伤的长期监测成为可能。通过一个缩尺铝镁合金悬臂梁实验,对植入雨流计数算法的无线智能传感器网络进行疲劳测试,并对集中式数据采集与分布式数据采集的数据结果进行了对比分析。

## 1 疲劳损伤计算方法

### 1.1 结构疲劳寿命

结构和构件的加载历史、应力集中、材料的本构关系,都会对其疲劳损伤的计算产生影响。文中用测量到的应变均值和幅度来检测疲劳损伤,通过国内外大量实验证明疲劳抗力曲线如图 1 所示。在 log-log 图上,弹性应变幅值与塑性应变幅值均是线

性的,总应变幅值为它们的加和。

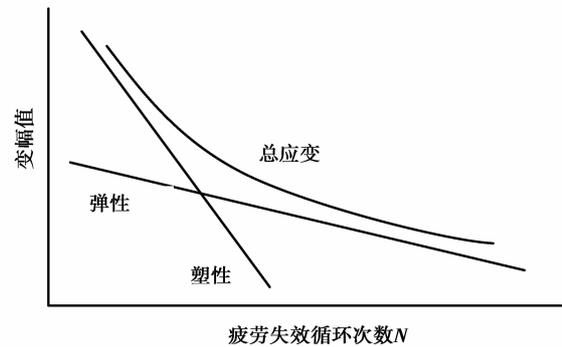


图 1 疲劳抗力曲线

总应变与疲劳强度的拟合公式如下<sup>[7]</sup>

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1)$$

其中： $\frac{\Delta \epsilon}{2}$  为应变幅值； $E$  为弹性模量； $2N$  为疲劳失效循环次数； $\sigma'_f$ 、 $b$ 、 $c$  为疲劳失效相关系数。考虑到应变均值对疲劳寿命的影响<sup>[8-9]</sup>，以及铝镁合金的相关系数，采用如下的疲劳寿命经验公式

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = 1.67 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^{-0.95} + 0.35 (2N_f)^{-0.69}. \quad (2)$$

得到常幅应变幅值作用下的疲劳失效循环次数之后,使用 Palmgren-Miner 线性积累损伤法则(式(3)),对结构的疲劳寿命进行估算<sup>[10-11]</sup>。

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i}, \quad (3)$$

式中： $D$  为累积损伤； $K$  为应力(应变)幅值种类； $n_i$  为常应力(应变)作用水平下的加载次数； $N_i$  为常应力(应变)作用水平下的疲劳失效循环次数。当各加载次数与加载寿命比之和等于 1 时,表示结构已经达到了疲劳寿命。

### 1.2 雨流计数法

在一个复杂的循环疲劳加载时程中提取应力(应变)周期,是疲劳寿命监测中至关重要的一个环节。为解决该问题,M. Matsuiski 与 T. Endo 提出了在不规则疲劳加载历史中提取应力(应变)周期、幅值以及均值的雨流计数法<sup>[12]</sup>。该方法遵循 Palmgren-Miner 的疲劳预测准则,可以有效地对结构的疲劳寿命进行预测。雨流计数法的原理是通过将应变加载历史转化为应力(应变)滞回曲线,以封闭环和半封闭环的数量对荷载周期进行计数。图 2 表示了一段加载历史的计数处理方法:A-D, B-C, E-F,以及 G-H 均表示着 1 个封闭的滞回环,即 1 个加载周期。

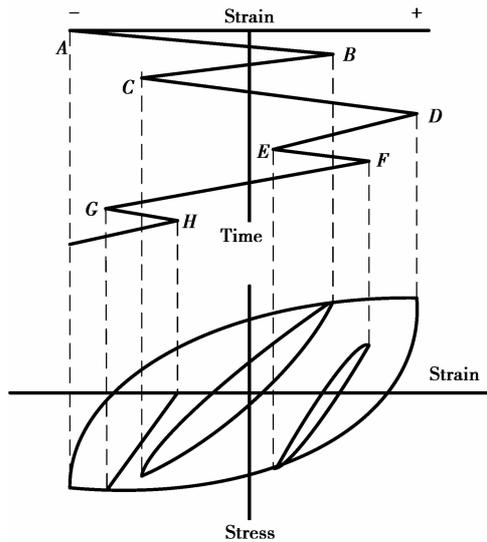


图 2 雨流周期计数原理

雨流计数法要求在计数处理之前,整个加载时程历史是已知的,并不符合实时监测的特点,而且无线智能传感器有限的存储空间很难记录整个加载历史。即时雨流计数法则克服了运算前需要整个加载历史的缺点,更适合在健康监测模块中使用。该算法由 Downing 提出并经 Okamura<sup>[13-14]</sup>改进,算法原理是通过使用一维数组记录全周期与半周期的应力应变滞回环,在每个滞回环中进行应变幅值与均值的识别。即时雨流计数法不需要重新调整加载历史即可完成对应变幅值、均值的识别,因此更加适合在实时健康监测的模块中使用。

### 1.3 三维直方图

基于无线智能传感器网络进行的实时疲劳监测会积累大量应变时程数据,在监测中使用即时雨流计数法,把应变幅值与中值进行提取并存储于三维直方图中(见图 3),可以实现对测量数据的大幅度

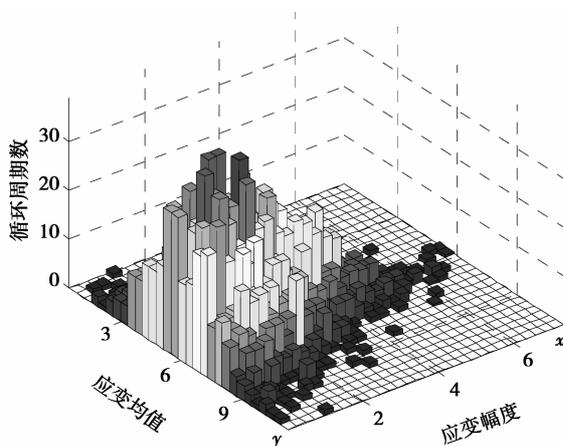


图 3 雨流计数法的直方图

压缩。在三维直方图中, $x$ 轴表示应变幅度, $y$ 轴表示应变均值,柱高表示应变循环周期数。文中采用先验分配方法决定直方图的尺寸大小,尽可能小地占用无线传感器的可用内存,从而实现长期、连续的实时疲劳损伤监测。

## 2 无线智能传感器网络

伊利诺伊大学结构健康监测项目(ISHMP),基于面向对象服务,设计出开源的健康监测软件系统,提供了实现数据同步、无线网络传输、遥控采集数据、数据分布式处理等程序。ISHMP 使用 Imote2 作为无线传感器节点平台,研发出多功能无线传感器(SHM-A)及应变无线传感器(SHM-S),实现了高质量的无线智能传感器网络健康监测。将用于疲劳寿命监测的雨流计数法植入基于 Imote2 平台的应变无线传感器(SHM-S),进行疲劳损伤的监测。算法中使用了 ISHMP 软件系统的相关程序,同时自身也列入了 ISHMP 的定制软件库,可以在网站 <http://shm.cs.uiuc.edu> 下载。

### 2.1 无线传感器平台

图 4 所示为 Imote2 无线传感器平台,包括 1 枚用于控制电能分配的低功耗 CPU(PXA27X),Chipcon 无线电设备和天线以及板载内存。Imote2 传感器平台的板载内存使之与其它智能传感器平台相比具有更多功能,如可以实现动力实验中的高频采样等。板载内存具有 256 kB 的集成 RAM,32 MB 的外置 SDRAM 以及 2 MB 的闪存<sup>[15]</sup>。

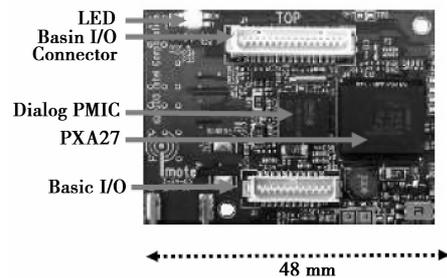


图 4 Imote2 传感器平台

Imote2 传感器平台使用 TinyOS 操作系统进行驱动。TinyOS 属于事件驱动系统,是专门为硬件资源受限的传感器网络节点设计的。系统的执行语言为 nesC(C 语言的一种扩展语言)。目前 TinyOS 操作系统在全球范围内被广泛应用于无线智能传感器<sup>[16]</sup>。

### 2.2 应变无线传感器

作为 ISHMP 系统的一部分,SHM-S 传感器电路板(见图 5)被改装为可与 Imote2 智能传感器平台兼容工作。SHM-S 传感器电路板包括 1 个惠斯通电桥,1 个信号放大器以及 1 个终端接口,接口可与外置的  $350\ \Omega$  应变计或任何需要信号放大器的直流输出模拟传感器连接。SHM-S 传感器电路板的主要特点是其可精确调控的惠斯通电桥电路:惠斯通电桥电路可在信号处理前,将原始应变信号进行校正,使之与信号放大器的输出范围相匹配。电桥的精确调控主要是通过可控数字电位器来实现的。这种没有模数转换(ADC)的传感器电路板,需要与基于 ISHMP 开发的数据采集板配合工作。通过电桥电路调控后的信号,与 SHM-A 板的第 4 通道或 SHM-DAQ 板的第 1 通道相连,进行无线传输。

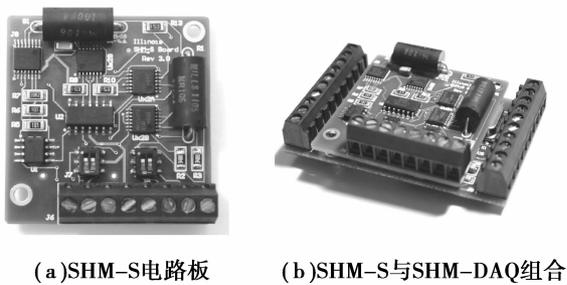


图 5 应变无线传感器

### 2.3 无线智能网络设计

采用分布式的数据采集方式,将雨流计数法植入无线智能传感器网络,利用每个叶节点的传感器自身计算能力将处理后的数据传回基本节点(见图 6)。在网络中,叶节点同时负责数据采集和数据处理,将应变原始数据转化为带有循环周期数、应变幅度、应变均值信息的三维直方图,并等待基本节点的提取。这种方法大大减少了数据传输量,降低了疲劳监测中的能量消耗<sup>[17]</sup>。

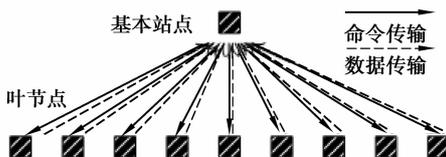


图 6 分布式无线智能传感器网络

“RainflowCounting”是植入叶节点传感器设备的程序,其与基本节点配合进行雨流计数的运算流程如图 7 所示。具体步骤如下。

1)基本节点向叶节点发送疲劳监测命令及参数,包括节点 ID、通道标号、采样点数、采样频率、三维直方图尺寸以及应变校正系数。

2)叶节点利用无线智能应变传感器开始疲劳监测。

3)一段时间的监测结束后,叶节点开始计算疲劳损伤的相关数据。

4)基站节点向叶节点发出回收数据请求,得到由叶节点发送处理后数据。完成之后,基站节点打印数据,为进一步监测提供依据。

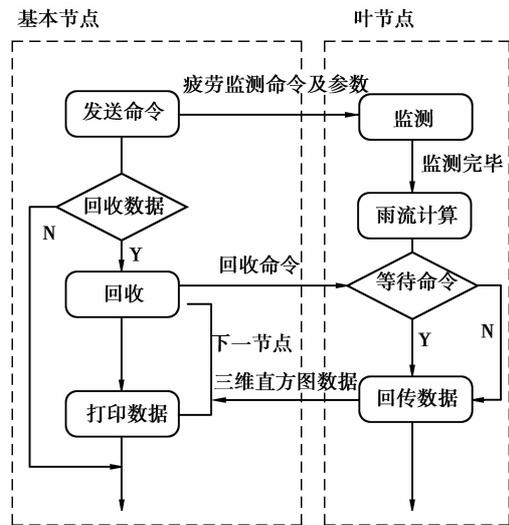


图 7 分布式疲劳损伤监测流程图

## 3 实验应用

实验在美国伊利诺伊大学智能结构技术实验室进行。利用无线智能应变传感器以及“Rainflow Counting”程序,在实验室规模的铝镁合金悬臂梁上进行疲劳检测验证。试件如图 8 所示,长 4.5 m,宽 0.45 m 英尺,厚 0.075 m,相关物理参数查阅 ASM Material Data Sheet<sup>[18]</sup>。在悬臂梁的固接端进行抛光处理,并粘贴  $350\ \Omega$  应变片。

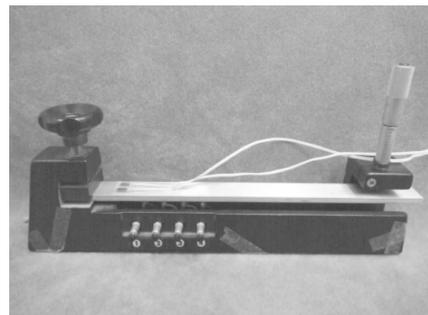


图 8 铝镁合金悬臂梁

试验中循环荷载由橡胶冲击锤提供,应变传感器的采样频率为 100 Hz,前 10 s 原始应变数据见图 9。三维直方图的尺寸定为  $20 \times 20$  和  $30 \times 30$ 。

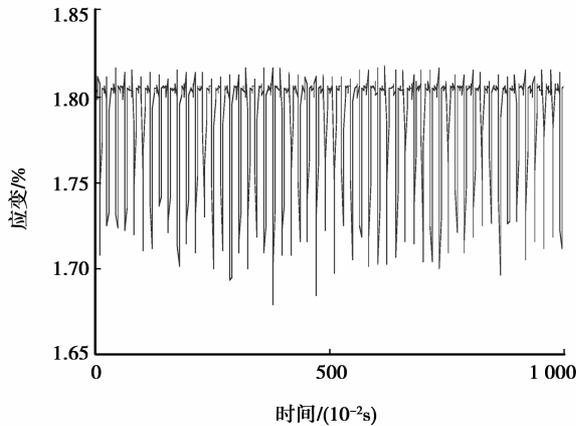


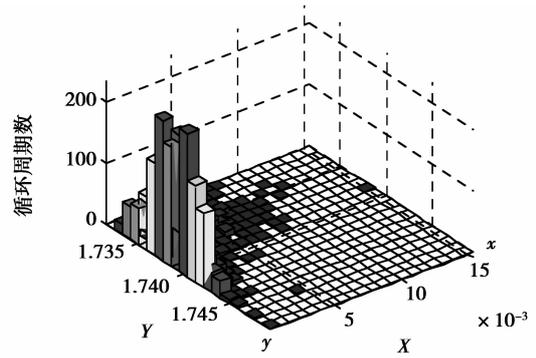
图 9 前 10 s 原始应变数据

表 1 展示了连续 10 min 采集数据的结果,将传统的集中数据采集方式和分布式数据采集方式进行了对比,分布式的数据处理方式大大减小了无线数据传输量。

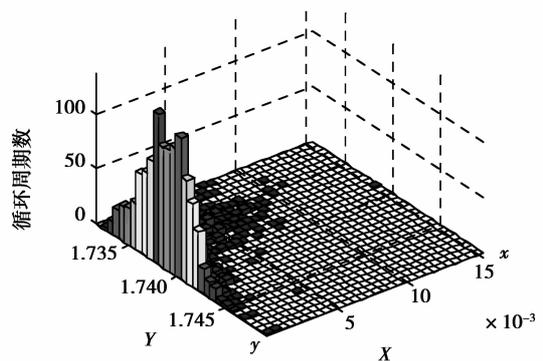
表 1 疲劳寿命监测数据传输量对比

集中式	$60\,000 \times 4\text{ b} = 240\text{ kb}$
分布式	$10\,023 \times 4\text{ b} = 40\text{ kb}$
直方图尺寸 ( $20 \times 20$ )	压缩率:83%
分布式	$15\,021 \times 4\text{ b} = 60\text{ kb}$
直方图尺寸 ( $30 \times 30$ )	压缩率:75%

图 10 显示了在 2 h 的疲劳损伤监测中形成的三维直方图。直方图所需的数据被无线智能传感器的叶节点连续不断的计算。集中式数据采集方式的数据传输量会随着时间推移线性增加,分布式数据采集方式仅在基本节点回收直方图数据时增加,基本维持稳定,其数据压缩量最长达 98%,并且在更长期的疲劳监测中数据压缩的效果更加明显。使用 Palmgren-Miner 线性积累损伤法则对悬臂梁的疲劳寿命进行预测,结果见表 2 所示。



(a)直方图尺寸( $20 \times 20$ )



(b)直方图尺寸( $30 \times 30$ )

图 10 疲劳测试 2 h 监测的数据直方图

表 2 疲劳寿命预测

参量	积累损伤	误差/%
集中式	0.004 03	—
分布式		
直方图尺寸 ( $20 \times 20$ )	0.004 25	5.4
分布式		
直方图尺寸 ( $30 \times 30$ )	0.003 82	5.2

## 4 结 论

提出一种基于无线智能应变传感器网络的钢结构疲劳损伤监测的方法。采用分布式数据采集方式,压缩原始数据,减少数据传输量,降低能源消耗,使长期无线疲劳健康监测成为可能。缩尺悬臂钢梁实验证实集中式与分布式疲劳寿命预测相近,预测结果可靠,表明了无线智能应变传感器网络在疲劳损伤监测领域的应用有理论基础及工程价值。

## 参考文献:

- [1] Farrar C R, Worden K. An introduction to structural health monitoring [J]. *Philosophical Transactions of Royal Society A*, 2007, 365: 303-315.
- [2] Celebi M. Seismic instrumentation of buildings: with emphasis on federal buildings[R]. United States: U. S. Geological Survey, 2002.
- [3] Nagayama T, Spencer Jr B F, Rice J A. Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2009, 16(7/8): 842-859.
- [4] Spencer B F, Ruiz-Sandoval M E, Kurata N. Smart sensing technology: opportunities and challenges[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2004, 11(4): 349-368.
- [5] Gao Y, Spencer B F. Structural health monitoring strategies for smart sensor networks [R]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008.
- [6] Sim S H, Spencer Jr B F. Decentralized strategies for monitoring structures using wireless smart sensor networks[R]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [7] Bannantine J A, Comer J J, Handrock J L. *Fundamentals of metal fatigue analysis* [M]. NJ: Prentice Hall Press, 1990
- [8] Ohji K, Miller W R, Marin J. Cumulative damage and effect of mean strain in low-cycle fatigue of a 2024-T351 aluminum alloy[M]. U. S. : American Society of Mechanical Engineering, 1965.
- [9] Park J H, Song J H. Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties [J]. *International Journal of Fatigue*, 1995, 17(5):365-373.
- [10] Palmgren A. Durability of ball bearings [J]. *ZVDI*, 1924, 68(14): 339-341.
- [11] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12: 159-164.
- [12] Matsuishi M, Endo T. Fatigue of metals subjected to varying stress [J]. *Japan Society of Mechanical Engineers*, 1968, 68(2):37.
- [13] Downing S, Galliard D, Berenyi T. A Neuber's rule fatigue analysis procedure for use with a mobile computer[C] // *Proceedings of the SAE Automobile Engineering and Manufacturing Meeting*, October 18-22, 1976, Detroit, Michigan. [S. l.]: SAE Paper, 1976: 760317.
- [14] Okamura H, Sakai S, Susuki I. Cumulative fatigue damage under random loads[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1979, 1(4): 409-419.
- [15] Intel Corporation Research. Intel Mote2 Overview, Version 3.0[M]. Santa Clara, CA: Intel Corporation Research, 2005.
- [16] Gay D, Levis P, Culler D, et al. 1 Introduction nesC 1.1 Language Reference Manual[J/OL]. Citeulike, 2003: 5262543 [2012-06-03]. <http://www.citeulike.org/user/pbk/article/5262543>.
- [17] Sim S H, Spencer Jr B F. Decentralized strategies for monitoring structures using wireless smart sensor networks[R]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
- [18] ASM Aerospace Specification Metals Inc. ASM Material Data Sheet [EB/OL]. [2012-06-15]. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T3>.

(编辑 陈移峰)