

便携式变压器振动监测与故障诊断系统设计

王泽波¹, 周建平², 刘江明², 郑 婧¹, 郑 宏³

(1. 浙江大学仪器科学与工程学系, 杭州 310013; 2. 浙江省电力公司检修分公司, 杭州 310007;
3. 杭州柯林电力设备有限公司, 杭州 310005)

摘 要: 设计一种基于嵌入式 Windows 系统的便携式变压器振动监测与故障诊断系统。介绍系统设计与实现的关键技术, 包括信号采集、信号调理、A/D 转换等硬件模块以及数据库、故障诊断算法、用户界面等软件模块的开发过程。该系统通过采集变压器的振动、电流、电压等信号对变压器状态及其故障进行分析与诊断, 使用多种分析诊断算法, 包括谱分析、幅值分析等常规方法, 以及周期性诊断算法、模型诊断算法等新的分析诊断方法, 用于及时发现变压器的异常并发出警报。应用结果表明, 该系统能够方便、有效地实现变压器运行状态及其故障的带电监测。

关键词: 嵌入式系统; 便携式; 电力变压器; 振动分析法; 带电监测; 故障诊断

中文引用格式: 王泽波, 周建平, 刘江明, 等. 便携式变压器振动监测与故障诊断系统设计[J]. 计算机工程, 2014, 40(11): 292-296.

英文引用格式: Wang Zebo, Zhou Jianping, Liu Jiangming, et al. Design of Portable Transformer Vibration Monitoring and Fault Diagnosis System[J]. Computer Engineering, 2014, 40(11): 292-296.

Design of Portable Transformer Vibration Monitoring and Fault Diagnosis System

WANG Zebo¹, ZHOU Jianping², LIU Jiangming², ZHENG Jing¹, ZHENG Hong³

(1. Department of Instrumentation Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China;
2. Branch Overhaul, Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China;
3. Hangzhou KeLinPower Device Co., Ltd., Hangzhou 310005, China)

【Abstract】 This paper designs a portable transformer condition monitoring and fault diagnosis system based on vibration analysis method. The system designs and offers pivotal technologies, including hardware and software modules such as signal sampling and conditioning, A/D converting, database, fault diagnosis algorithms and user interface. This system can analyze the condition of transformer based on monitoring transformer signals including vibration, current, voltage and temperature. It contains fault diagnosis algorithms, besides normal signal processing method such as spectrum analysis and amplitude analysis. There are also new diagnosis methods like periodicity diagnosis algorithm and the diagnosis algorithm based on transformer vibration modeling. The methods are used for detecting the transformer abnormal and sending alarm. The test result shows that this system conveniently and effectively realizes live monitoring of transformer condition and fault.

【Key words】 embedded system; portable; power transformer; vibration analysis method; electriferous monitoring; fault diagnosis
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2014.11.058

1 概述

电力变压器的状态监测和故障诊断研究对维护电网的健康运行有重要意义。目前电力变压器在线

监测方法主要有油色谱分析法和振动分析法。其中, 油色谱分析法相对成熟, 能够有效地检测油浸式变压器早期潜伏性故障。但是油色谱分析法主要针对过热和放电等会引起绝缘油变化的故障类型, 所以对于

基金项目: 浙江省电力公司科技基金资助项目(ZB13-026B-039); 浙江省科技厅公益类基金资助项目(2013C31008)。

作者简介: 王泽波(1986-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 故障诊断系统, 变压器振动在线监测; 周建平、刘江明, 工程师; 郑 婧, 博士研究生; 郑 宏, 工程师。

收稿日期: 2013-11-18 **修回日期:** 2013-12-24 **E-mail:** langkebobo@163.com

绕组的机械故障反应不灵敏,而且油色谱分析仪设备大多存在着成本高、安装不便等限制^[1]。相比于油色谱分析,基于振动分析的监测方法能有效和灵敏地反映变压器机械结构的变化,如文献[2-4]利用振动法研究变压器绕组故障,文献[5]利用变压器振动信号判断有载分接开关的状态,文献[6-7]分析了铁芯的振动特征并根据铁芯振动监测铁芯压紧力,文献[8]还研究了变压器偏磁状态下的振动特性。

本文在现有的振动监测系统^[9]基础上,研制了一种基于振动的便携式变压器状态监测与故障诊断系统(PTCMS)。本文将主要叙述该系统的设计与实现,以及系统内置的诊断算法。

2 系统设计

系统的研发工作主要包含硬件设计与实现、软件设计与开发以及诊断算法研究 3 个部分。

2.1 硬件设计

本系统硬件部分包含信号采集部分(传感器)、信号调理模块、数据采集模块、CPU 模块、电源模块、数据存储模块以及输入/显示模块。硬件部分设计如图 1 所示。

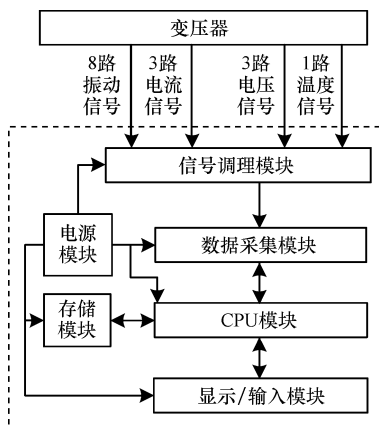


图 1 系统硬件结构

2.1.1 传感器选择

本文系统能够同时采集 3 路电流信号、3 路电压信号以及 8 路振动信号,并预留 1 路温度信号扩展通道。

振动信号采集的精度在很大程度上影响着系统的分析结果。考虑到在变压器周围磁场干扰较大,位移传感器在磁场干扰较大的情况下精度无法保证,同时一般速度传感器的测量范围(10 Hz ~ 1 000 Hz)无法完全覆盖变压器振动频率范围。因此,本文系统选择 ICP 加速度传感器,传感器的频率范围为 5 Hz ~ 10 000 Hz,灵敏度为 500 mV/g,基本满足变压器振动信号的采集要求,同时所有连接传感器的电缆应采用屏蔽同轴电缆^[9]。

同时电流信号由电流互感器从 CT 端子测得,电压信号则由 PT100 直接引出。

2.1.2 信号调理模块

信号调理模块包括振动、电流、电压、温度信号的调理电路。

由于系统使用 ICP 加速度传感器,振动信号调理电路中包含 ICP 传感器的恒流供电电路、振动信号放大电路以及抗混叠滤波电路。

电流信号由电流互感器采集得到,为交流电流信号,电流信号需要经过电流/电压转换电路、放大电路以及抗混叠滤波电路。

电压信号调理模块包含电压互感电路(电压衰减)以及抗混叠滤波电路。

预留直流温度信号输入,其调理电路主要为电压幅值调整。

2.1.3 数据采集模块和 CPU 模块

考虑到变压器振动的频域范围在 0 ~ 2 000 Hz 甚至更高,同时需要兼顾抗电磁干扰性能,本文系统选用北京阿尔泰公司生产的 PCH2153 数据采集卡。该采集卡采用 PC/104 + 总线与 CPU 模块通信,共 32 通道(单端采样),精度为 16 bit,量程为[-10 V, +10 V],最高系统采样频率为 250 kHz,17 通道采样时最高采样频率为 14.7 kHz。

CPU 模块选用研华公司生产的嵌入式主板 PCM3362,该模块同样支持 PC/104 + 总线,支持 -40℃ ~ 85℃ 温度下工作,支持 Window 及 Linux 系统,同时支持 USB、以太网等常用接口。

2.1.4 数据存储

由于在采集时间较长的情况下需要存储较大的数据量,同时考虑到便携式设备特性,需要有一定抗震能力,因此本文系统配有一个 16 GB 固态硬盘存储数据。系统自带液晶显示屏和键盘,同时由于系统使用 Windows Embedded 操作系统,因此可以外接鼠标及其他 USB 设备。

2.2 软件设计

由于本文系统对数据采集及通讯的实时性要求并不是很高,因此采用了嵌入式 Windows 系统,在操作系统上运行 LabVIEW 开发的应用软件。软件主要包括数据采集程序、分析诊断模块、数据库以及用户界面,其组织结构如图 2 所示。其中,分析诊断模块是根据笔者所在课题组多年来研究并提出的变压器振动监测诊断方法编程实现的。

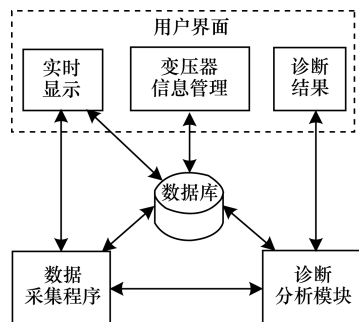


图 2 系统软件结构

2.2.1 数据采集程序设计

数据采集模块可分为实时采样和瞬时采样,其中,实时采样用于采集变压器稳态运行时的信号;瞬时采样则用于采集变压器进行上下电、投切等操作时以及进行突发短路冲击时的瞬态信号。实时采样和瞬时采样切换以及数据采集流程如图 3 所示。

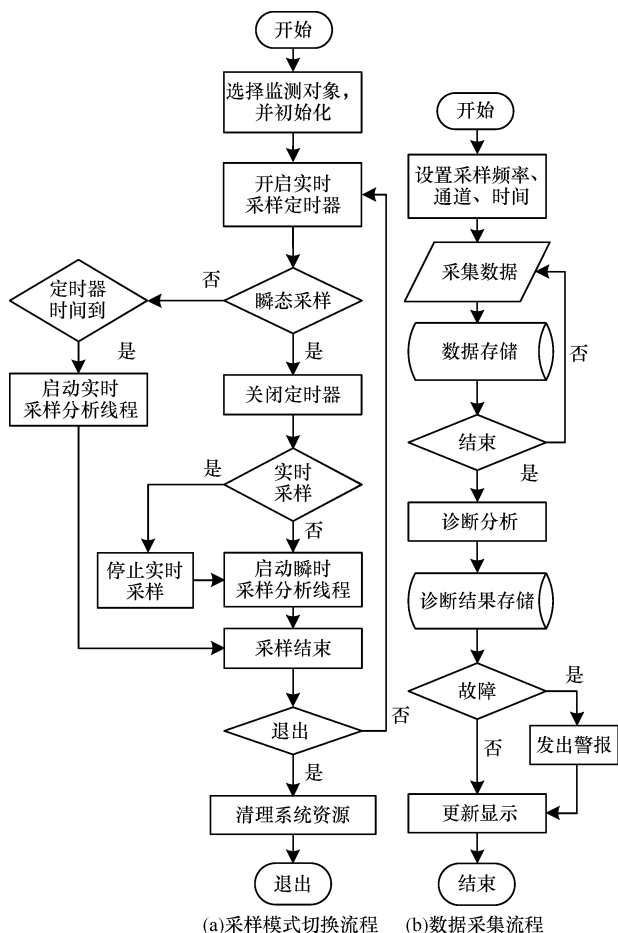


图 3 采样模式切换及数据采集流程

实时采样为周期性采样,采样频率 8 192 Hz,每 10 s 采样一次,每次采样时间为 1 s。瞬时采样则只采样一次,用户可以设置瞬时采样的采样频率、采样时间,设定完成后开始连续采样,瞬时采样时会中断实时采样。

2.2.2 数据库设计

系统采用微软的 SQL Server 2008,软件通过 ADO 技术访问数据库。数据库主要包括:变压器信息表,原始数据表,诊断结果表,传感器参数表等。其中,变压器信息表用于记录监测变压器的 ID、型号、生产厂家、投运日期、测点位置信息等基本信息;原始数据表用于保存每次采样数据、采样时间、类型(实时和瞬时)、变压器 ID 等信息;诊断结果表则记录各诊断算法结果,并记录对应原始数据 ID、诊断时间等相关信息;传感器参数表用于记录传感器灵敏度、量程等信息用于传感器标定。

2.2.3 用户界面设计

本文系统的用户界面以实用为原则,包括变压器信息管理、实时数据显示、诊断结果显示以及其他设置页面,如实时采样和瞬时采样切换、瞬时采样设置等。

2.3 诊断算法

分析诊断算法是本文系统的核心部分,有效的诊断算法可以及时地发现变压器的异常并发出警报,从而降低因变压器故障带来的经济损失。

本文系统中内置多种分析诊断算法,这些诊断算法是笔者所在课题组多年来研究并提出的。算法可以根据是否依赖于监测对象的历史数据分为非先验性算法和先验性算法。

非先验性算法包括常见的时域分析和频域分析,如频谱分析和振动幅值分析等,同时还包含频率复杂度诊断算法和周期性诊断算法^[10-11]:

(1) 频率复杂度诊断算法是根据变压器振动的频率成分的分布及各频率峰值来计算振动频率复杂程度,并以此衡量变压器是否故障。其原理是变压器绕组在正常情况下其频率成分相对简单,而绕组故障后一般绕组振动频率成分就会增加,从而导致变压器振动谐波的复杂度上升。

(2) 周期性诊断算法通过检测振动信号的周期性是否被破坏来判断变压器异常与否,正常状态下的变压器振动信号为周期性信号^[10-11]。

非先验性算法因为不依赖于监测对象的历史数据,所以可以直接应用于大部分变压器。不过非先验性诊断算法可检测出的故障类型比较少,如周期性诊断算法只有在变压器故障后导致振动信号的周期被破坏时发出警报,但是很多变压器故障后振动信号还是周期性的。而且实际运行的变压器由于型号、油箱结构、运行年限、负载的不同使得各变压器振动的相差较大,因此非先验性诊断算法的阈值也较难确定。

先验性算法需要根据监测对象的历史数据训练得到变压器正常状态下的特征参数,并以此分析当前测得的数据是否正常。先验性算法包括模型诊断算法、相似度诊断算法等,本文以模型诊断算法为例介绍先验性算法的诊断流程。

模型诊断算法流程如下:

(1) 根据变压器振动原理、多项式逼近以及多元线性回归方法得到变压器的电-振动模型,模型公式如下:

$$v_f = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_{s+r} x_{s+r} + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

其中, v_f 表示变压器油箱壁振动频率为 f 的分量; $\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_{s+r}$ 表示多元线性回归模型系数; $x_1, x_2, \cdots, x_{s+r}$ 为回归模型自变量。且 $x_k = i^{2k}, k = 1, 2, \cdots, s$ 为电流平方的高次项, $x_{s+j} = u^{2j}, j = 1, 2, \cdots, r$ 为电压平

方的高次项。 ε 表示满足方差为 σ 的标准正态分布的随机误差项。

考虑变压器油箱壁不同位置振动的关系以及振动各次谐波之间的相关性等,将模型扩展成多测点多谐波的矩阵表示形式,如式(2)所示:

$$\mathbf{V}_{(p \times m) \times 1} = \mathbf{B}_{(p \times m) \times (s+r+1)} \mathbf{X}_{(s+r+1) \times 1} + \mathbf{E}_{(p \times m) \times 1} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{V}_{(p \times m) \times 1} = [V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m]^T$, 表示第1个~第 m 个测点振动, $V_i = [v_{i,f1}, v_{i,f2}, \dots, v_{i,fp}]^T$ 表示第 i 测点的频率为 $f1, f2, \dots, fp$ 的谐波; $\mathbf{B}_{(p \times m) \times (s+r+1)}$ 为模型的系数矩阵; $\mathbf{X}_{(s+r+1) \times 1}$ 表示模型自变量; $\mathbf{E}_{(p \times m) \times 1}$ 表示误差矩阵。

(2)采集正常数据训练模型参数,并将计算得到的模型参数保存。考虑模型有多因变量多自变量,且自变量之间存在高度相关性,因此,本文在计算模型参数时采用偏最小二乘回归法^[12],并利用交叉验证法确定偏最小二乘法的成分数目。

(3)利用回归分析中的F检验和T检验以及训练数据对模型进行显著性检验,以确定回归模型的有效性。若不能通过模型的显著性检验,则放弃使用模型诊断算法。

(4)将模型诊断算法应用于在线监测,将实时监测采集数据(电流和电压信号)输入模型可计算得到模型的振动预测值。

(5)通过比较分析模型的预测值和实际采集得到的振动来判断变压器运行是否正常,本文系统采用模型预测值和实际测量值之间的相对误差来分析变压器状态。系统对一段时间内采样得到的数据进行模型诊断分析,平均多次计算结果后给出诊断信息。

本文系统中还包括其他先验性诊断算法,如相似度诊断算法,限于篇幅本文不再叙述。先验性算法虽然需要数据训练,且训练所得参数基本只能针对某一台监测变压器,但是相比于非先验性算法,这些算法的诊断分析准确性更高,其诊断结果更有参考价值。

3 系统实现

设计的PTCMS实物如图4所示,PTCMS带有17个通道的传感器插座,方便传感器安装。



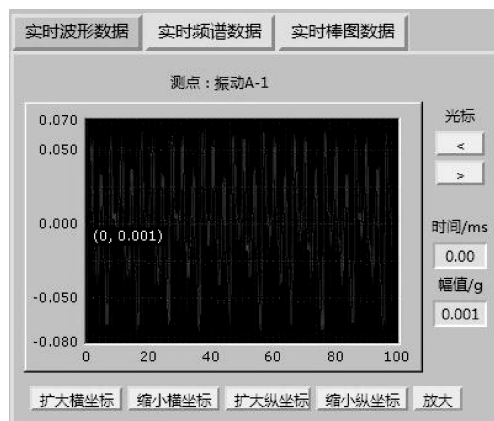
图4 PTCMS照片

PTCMS在浙北变1000 kV#4主变上试运行,测试现场照片如图5所示。测试结果表明,通过PTCMS系统现场工作人员可以快速、有效地监测变压器状态。

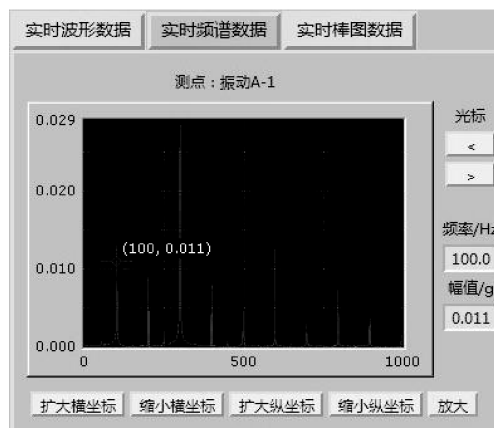


图5 PTCMS测试现场

图6为PCTMS时间采样时的数据显示界面,界面中可以显示4个通道的实时信号波形或者频谱等形式。图6(a)为实时信号波形界面,图6(b)为实时信号频谱界面。图7为变压器信息管理中的振动测点选择界面,用户可以选择测点位置及个数,并根据测点分布图将传感器安置在变压器油箱上。图8为诊断分析界面,显示几种诊断算法的诊断结果,若某种诊断算法不适用则放弃该算法结果。



(a)实时信号波形界面



(b)实时信号频谱界面

图6 实时显示信号界面

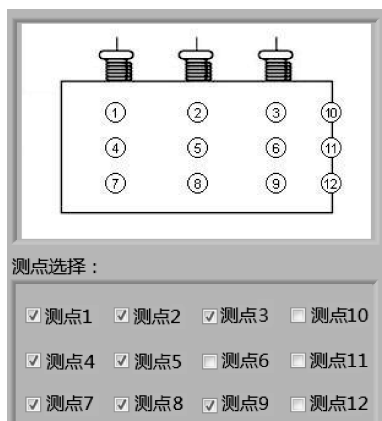


图 7 振动测点选择界面

分析诊断		诊断报告	
2013-12-18 14:18:34			
诊断方法	阈值范围	诊断结果	说明
谐波比重分析	小于1.0	0.68	小于阈值, 变压器状况良好
频率复杂度	小于2.5	1.39	小于阈值, 变压器状况良好
振动分布相似度	小于1.2	0.77	小于阈值, 变压器状况良好
信号周期性	大于0.3	0.63	大于阈值, 变压器状况良好

图 8 诊断分析界面

4 结束语

本文设计了一种基于振动的便携式电力变压器状态监测与故障诊断系统(PTCMS),描述了系统的硬件和软件的设计,同时介绍了本文系统的主要诊断算法。该系统可以带电采集并分析变压器稳态和瞬态运行时的振动信号,根据内置的诊断算法对变压器状态进行诊断,若诊断结果为变压器异常则发出警报。在浙北变电站现场的试用结果表明,该系统可以方便、有效地实现对变压器振动、电流、电压等信号的采集和变压器运行状态的分析诊断工作,为工作人员提供了一种监测变压器运行状态的便捷手段。今后,需要对PTCMS做进一步的结构优化,减小其体积和重量,同时还需对诊断算法进行深入研究,以提高系统对变压器状态诊断的准确性。

参考文献

- [1] 廖怀东. 变压器油色谱分析及故障判断[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 112-113.
- [2] Garcia B, Burgos J C, Alonso A M. Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations——Part I: Theoretical Foundation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 157-163.
- [3] Garcia B, Burgos J C, Alonso A M. Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations——Part II: Experimental Verification [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 164-169.
- [4] 洪凯星, 潘再平, 黄海. 电力变压器绕组轴向振动的建模与分析[J]. 变压器, 2010, 47(12): 32-37.
- [5] 郑婧, 何婷婷, 郭洁, 等. 基于独立成分分析和端点检测的变压器有载分接开关振动信号自适应分离[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 208-213.
- [6] 陈祥献, 王婧, 黄海, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电力变压器铁芯压紧力监测方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 9-12.
- [7] 黄海, 潘家强, 郑婧. 基于切贝雪夫-里兹法的大型电力变压器铁芯三维自由振动分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 138-143.
- [8] 郭洁, 黄海, 唐昕, 等. 500 kV 电力变压器偏磁振动分析[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 70-75.
- [9] 李晓兰, 黄海, 陈祥献, 等. 基于振动法的电力变压器在线状态监测系统的设计[J]. 变压器, 2008, 45(12): 60-63.
- [10] 郭洁. 电力变压器振动及故障特征提取研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [11] 郭洁, 陈祥献, 黄海. 交叉递归图在变压器铁芯压紧力变化检测中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2731-2738.
- [12] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

编辑 顾逸斐

(上接第 291 页)

- [7] Gonzalez R C, Wintz P. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. New York, USA: Academic Press, 1987.
- [8] Yang J, Tian M. Denoising of Coal Flotation Froth Image Using Opening and Closing Filters with Area Reconstruction and Alternating Order Filtering [M]// Deng Hepu, Miao Duoqian, Lei Jingsheng. Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Berlin, Germany: Springer, 2011: 376-382.
- [9] Rane M A. Fast Morphological Image Processing on GPU Using CUDA [D]. Pune, India: Pune University, 2013.
- [10] Han Bo, Zhou Bingfeng. Efficient Video Decoding on GPUs by Point Based Rendering [C]//Proc. of Eurographics Symposium on Graphics Hardware.

Vienna, Austria: ACM Press, 2006: 79-86.

- [11] Wang Guohui, Wu M, Sun Yang, et al. A Massively Parallel Implementation of QC-LDPC Decoder on GPU [C]//Proc. of the 9th Symposium on Application Specific Processors. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 82-85.
- [12] NVIDIA. CUDA Programming Guide Version 2.1 [M]. Santa Clara, USA: NVIDIA Corporation, 2009.
- [13] Rao Chao, Liu Shuoqi. Research of CUDA in Intelligent Visual Surveillance Algorithms [C]//Proc. of the 3rd Chinese Conference on Intelligent Visual Surveillance. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 73-76.
- [14] NVIDIA. The CUDA Compiler Driver NVCC [M]. Santa Clara, USA: NVIDIA Corporation, 2009.

编辑 顾逸斐