

文章编号:1007-2780(2010)01-0124-06

基于 DMD 的真三维显示系统及其三维成像引擎设计

韩 刚,耿 征

(中国科学院 自动化研究所,北京 100190,E-mail:gang.han@ia.ac.cn)

摘 要: 结合在体元式三维显示(Volumetric 3D display)中比较有代表性的 3 种显示系统,在说明了体元式真三维显示系统的实现思路和方法的基础上,从应用的角度解析以 DMD 为核心构成的三维成像引擎在体元式真三维显示系统中的应用,并给出 3 种基于 DMD 的三维成像引擎架构,能够在不同层次上很好地满足真三维显示对海量数据实时、高速、精确处理的要求。

关 键 词: 真三维显示系统;数字微镜芯片组;真三维成像引擎

中图分类号: TN141; TP334.1 **文献标识码:** A

DMD True 3D Display System and 3D Display Engine Design

HAN Gang,GENG Zheng

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, E-mail: gang.han@ia.ac.cn)

Abstract: This paper summarizes three main 3D volumetric systems and explains the principle and methods to carry them out, then analyzes the key technology of DMD and brings forward some example to use DMD as a volumetric 3D display engine. Those DMD engines have been proved by experiment and can satisfy some applications to process massive data in real-time, high speedily and precisely in different level.

Key words: true 3D display system; digital micro-mirror device chipset; 3D display engine

1 引 言

近年来,三维显示技术获得了飞速的发展。一方面,随着生活质量的不断提高,人们不再满足于二维的显示世界,希望还三维的自然世界于本源;另一方面,计算机技术、电子技术、制造业等的蓬勃发展,也使得这一希望逐渐成为现实。在各国科研人员的不断努力之下,现在真三维显示已取得了阶段性的成果,出现了各种三维显示系统,获得了良好的显示效果。真三维显示可以有多种方法实现,从技术上每种方法又有不同的实现路径^[1]。就目前而言,体元式真三维显示(Volumetric 3D display)和全息真三维显示(Holographic 3D display)

具有广泛应用前景,发展迅速,其中体元式真三维显示系统已接近商业化成熟产品。

体元式真三维显示的难点在于要对海量数据进行高速传输、实时处理和精确控制。本文总结了在体元式三维显示中比较有代表性的 3 种系统,说明了真三维显示的实现思路和方法,结合 DMD 芯片的特点给出了 3 种成像引擎。实际应用证明,这 3 种基于 DMD 的三维成像引擎能够在不同层次上很好地满足真三维显示的要求,实现简单,便于与系统集成。

2 真三维显示概念、特点及实现思路

三维物理世界中,所有物体都具有三维(长、

宽、高)物理尺寸。然而,迄今为止所有商业化信息显示器(CRT、LCD、投影仪等)都只能显示二维图像和文字,人们无法从被显示的图像上获得物体的三维信息或感受到物体的物理深度。所谓“真三维显示”,是指被显示图像的每一个三维像素点(又称为“三维体素”或“体元”,Voxel)位于三维物理空间中的真实位置,每个体元的亮度和色彩可控,体元之间的相对空间位置关系被真实地体现在三维显示系统中,从而组成真正意义上的三维空间图像。观察者可以通过变换观察位置从不同角度看到被显示图像的不同侧面。多个观看者可以同时从不同角度观察同一被显示三维物体,如同观察真实的三维物体一样。真三维显示能够向观察者提供完备的心理和生理的三维感知信息,为理解三维图像和其中物体之间的空间关系提供了独特的手段。从基本原理上讲,真三维显示就是要在三维空间中显示三维体素。

真三维显示为了给观察者提供物理景深,首先需要建立三维成像空间或三维显示空间,即通常所说的显示屏。对于三维成像空间要求均匀一致,利用率高,水平视场和垂直视场要尽可能大;其次,为了控制三维体素在三维显示空间中准确高速寻址,完成三维体素的激活,需要高质量的真三维成像引擎(Engine),它是真三维显示系统的核心,本文后半部分将详细介绍。对于体元式真三维显示(Volumetric 3D display)系统又可以分为扫描显示屏^[2-4](Swept screen)和静态显示屏^[5](Static screen)两种,本文主要涉及前者,DepthCube 系统采用后者。总结目前具有代表性的几种三维显示系统,其三维显示空间如图 1 所示。在图 1 中,从左至右依次为 Actuality systems 公司的 Perspecta™ Spatial 3-D Display 系统^[6]、南加州大学的交互式 360°光场显示^[7]、中科院自动化研究所自行研制的旋转螺旋面 Helix 3D display 系统^[8]。Spatial 3D 系统可以实现 8 级灰度彩色显示,768×768 分辨率,198 个切片图像,目前版本刷新率可达 24 Hz,水平视场 360°,垂直视场 270°。应该指出南加州大学的交互式 360°光场显示系统并非严格意义上的真三维,属于多视角显示。

在真三维体扫描三维显示中常用到的“切片投影”原理可以描述如下:设 M 表示一个三维模型,将 M 沿着某个方向(如 z 轴)切成 t 个分辨率为 $p \times q$ 像素的二维图像或帧(Frame),分别记作

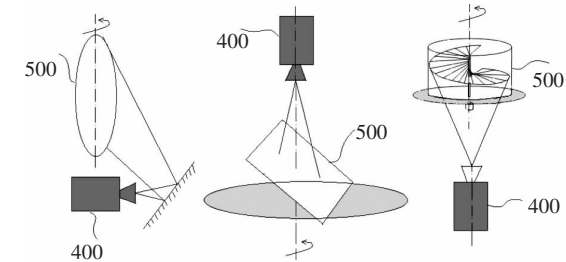


图 1 三维显示成像空间与投影引擎示意图(400 表示投影引擎;500 表示旋转投影面,其高速旋转构成三维成像空间)

Fig. 1 3D display space and display engine (400 denotes engine;500 denotes translucent screen, it's spinning to create a 3D display space)

$M_1, M_2, \dots, M_t$, 这样三维模型 M 表示成向量的形式为: $M = \{M_1, M_2, \dots, M_t\}$, 其中 $M_k = \{m_{i,j}^{(k)} \mid i, j, k \in N, 1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq q, 1 \leq k \leq t\}$, $m_{i,j}^{(k)}$ 表示第 k 帧切片位于 (i, j) 处的二维像素。可以用三维体元数目 $p \times q \times t$ 来表示三维显示系统的分辨率。真三维显示简单来说就是当屏幕旋转到某个位置时将相应位置的切片以一定的速度投影上去,由于人眼具有视觉暂留迟滞效应的特点,会将整个切片序列组合成一个三维模型。在具体应用中由于旋转屏的不同,具体的切片会有所差别。图 2 表示了在平面和螺旋屏下的三维模型切片的示意图。为了保证一定的分辨率和刷新率,真三维显示要求从数据处理到传输,再到显示都要高速进行。对于刷新率可以用下面的公式计算:

$$f = \frac{nv}{60}$$

其中 f 表示刷新率,单位 Hz; v 为投影屏转速,单位 r/min; n 为投影屏每旋转一周刷新次数,当投影屏有对称结构时一般取偶数,通常 $n=2$,无对称结构时通常 $n=1$, n 的大小还取决于三维引擎投影速度。可见,为了减少闪烁,得到稳定舒服的三维图像,屏幕必须以近 1 000 r/min 的速度高速旋转,这对系统的机械部分提出了很高的要求,这也决定了体扫描这种方式存在缺点。

下面以我们研制的 Helix 3D 真三维显示系统为例说明按照体扫描方式实现体立体真三维显示的工程实现方法^[8]。整个 helix 3D 系统框图如图 3,从图中可以看出这是一个复杂的光机电一体化装置,涉及计算机科学、图形图像处理、虚拟现实、微电子技术、机械、材料、精密光学、自动控制等多个学科。在各个组成部分中,DMD 真三维

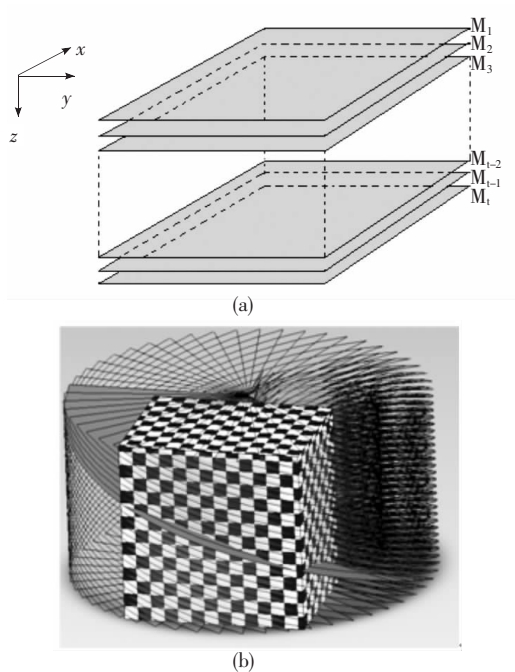


图 2 三维模型切片原理示意图

Fig. 2 Principle of slices of 3D model

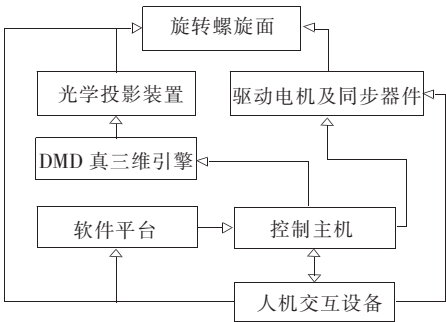


图 3 Helix 3D 真三维显示系统组成框图

Fig. 3 Block diagram of Helix 3D volumetric 3D display system

引擎是核心单元,下面将对此进行特别介绍。本系统投影屏旋转转速为 480 r/min,体元数为 $1\,024 \times 768 \times 66$,刷新率为 16 Hz,显示效果良好。此系统采用基于 USB2.0 传输的 DMD 真三维成像引擎。

3 DMD 的微机械、微电子结构及 DMD 芯片组

真三维成像引擎完成三维体元的激活,就被动光成像方式而言,目前有 DMD 和激光两种方式。德国的 FELIX 3D 显示系统采用 RGB 3 束激光完成体元的激活。DMD 相对激光方式而言有一定优势,可以将图像的二维切片信息一次投

影至旋转投影面,从而降低了每个体素点的调整时间,提高了显示的精度。

数字微镜 DMD^[9]是 TI 的专利产品,全世界只有 TI 可以生产,是非常精密的微电子、微机械装置。本节主要从应用的角度阐述 DMD 的结构及其芯片组,相关部分可以参考 TI 相关专利文献和数据手册。DMD 芯片经过 20 多年的发展,从最初的只能偏转 $\pm 10^\circ$ 发展到现在可以偏转 $\pm 12^\circ$;在传输数据速率上也不断提高,从早期的 SDR DMD 到 DDR DMD 到 LVDS DMD,现在已发展到 $2 \times$ LVDS DMD;可选类型有 13.97 mm (0.55 in)、17.78 mm (0.7 in)、22.86 mm (0.9 in) 和 24.13 mm (0.95 in),另外还有用于可见光和紫外线的 DMD 芯片。

把 DMD 单个像素点展开,从上到下可分 4 层,分别为镜片层、轭架铰链层、金属层和 CMOS SRAM 层。对 DMD 完成一次操作需要顺序 6 个步骤:准备 memory、复位、解锁、区分、寻址和锁存、刷新 memory^[9]。为了充分利用 DMD 芯片, TI 开发了 DMD 芯片组方便用户使用。DMD 芯片组由 3 个主要芯片组成: DMD 芯片、DAD 电源和复位驱动、DDC 数字控制器 (FPGA)。图 4(a) 为各个芯片之间的信号连接,其中 DAD 电源和复位驱动产生 DMD 镜片 16 个块的复位控制信

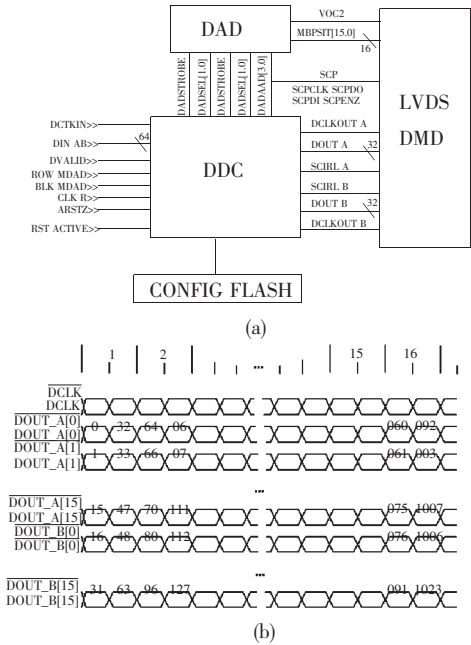


图 4 DMD 芯片组各个芯片之间的信号通信(a)及 XGA LVDS DMD 输入总线时序图(b)

Fig. 4 Schematics of DMD chipset (a) and XGA LVDS DMD input data bus (b)

号;DDC 数字控制器为用户提供高速 LVDS 数据和控制接口到 DMD,也为 DAD 芯片提供复位和时序信息,它支持随机行寻址^[10]。

以 1 024×768 XGA LVDS DMD 为例,完成一行 1 024 个像素点的数据加载需要 16 个时钟周期,输入数据和控制信号在时钟的上升沿和下降沿同时触发,如图 4(b)所示,16 位差分信号 A 和 16 位差分信号 B 同一时刻传输 32 位像素数据。为了充分利用 DMD 的带宽,整个 DMD 像素被分为 16 个区(Block)。

4 基于 DMD 的真三维成像引擎

真三维成像引擎是整个真三维显示系统的硬件系统核心,它的性能直接决定了真三维显示的效果。基于 DMD 的真三维成像引擎是目前体扫描真三维显示领域所常用的。真三维成像引擎设计的难点是需对海量三维数据进行高速实时处理。

基于 DMD 的真三维成像引擎通用架构如图 5 所示。主处理器一般由 FPGA 或 DSP 组成,挂载 DDR2/3 SDRAM 存储器、SRAM 帧缓存以及一些高速用户接口,直接与 DMD 芯片组通信;辅处理器由 CPLD 或 MCU 组成,与主处理器协同工作,可挂载 Flash 闪存,与用户低速接口相连。

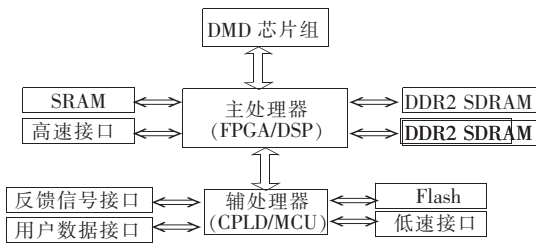


图 5 通用 DMD 真三维成像引擎架构图

Fig. 5 Block diagram of universal 3D display engine

根据信号传输方式、难易程度以及应用环境的不同,基于 DMD 的真三维成像引擎大体可以分为 3 种:一是利用 PCI-E 总线传输的真三维成像引擎;二是利用 USB2.0 传输的真三维成像引擎;三是利用 DVI 接口传输的真三维成像引擎。

4.1 利用 PCI-E 总线传输的真三维成像引擎

这种引擎的特点是具有很高的数据传输速率,PCI-E X16 的传输数据带宽可以达到 4 GB/s,配合 GPU 的强大图形处理功能,能够实现一定

灰度级的彩色真三维显示。这种引擎的难点在于软硬件设计比较复杂。图 6 为一种能够实现 8 灰度级彩色真三维显示的成像引擎,其中 DAD、DDC、LVDS DMD 组成 DMD 芯片组。压缩的三维模型切片数据通过 PCI-E 总线传输给引擎,引擎在 FPGA 的控制下,对输入数据解压缩,并对每个二维像素进行解码,分解出 RGB 3 个分量,分别缓存到 3 个 DDR2 SDRAM 中,然后引擎会从各个 SDRAM 中读取数据到 DMD 芯片组以备显示。

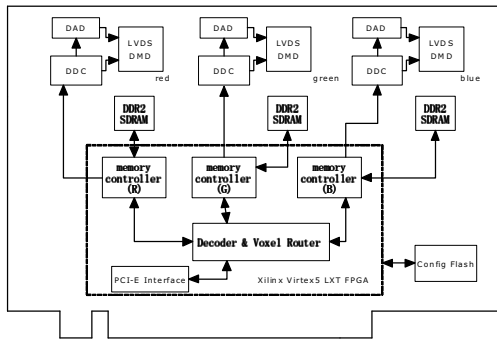


图 6 一种能够实现 8 灰度级彩色真三维显示的成像引擎

Fig. 6 Block diagram of a 3D display engine which can render 8 bit grayscale color image

4.2 利用 USB2.0 传输的真三维成像引擎

这种引擎的特点是通用性较强,实现起来简单,并可以很方便地与普通计算机即时连接,缺点是数据传输率慢,USB2.0 传输速率最高为 480 Mbit/s,无法完成实时处理传输。通常这种引擎都配备较大的数据存储器(Memory),在显示前现将数据下载至本地存储器中,再从本地存储器中调用数据显示。图 7 为一种利用 USB2.0 传输的真三维成像引擎,主要组成有 USB2.0 接口及其控制器、主处理器 FPGA、DDR2 SDRAM 以及 DMD 芯片组。如若采用两个 SDRAM 也可实现

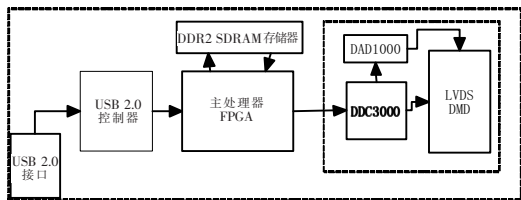


图 7 一种利用 USB2.0 传输的真三维成像引擎

Fig. 7 Block diagram of a 3D engine using USB2.0 interface to transfer voxel data

边下载边显示。USB2.0 控制器可以采用Cypress 的 CY7C68013。

4.3 利用 DVI 接口传输的真三维成像引擎

这种引擎的特点是在不增加额外设备的条件下,利用 DVI(Digital Video Interface)接口传输数据的特点,采用一种独特的算法能够实现实时交互式显示。具体原理为:先在主机上利用 GPU 将 24 幅连续的三维模型切片二值图像合成为一幅 24 bit 彩色图像,然后通过 DVI 电缆传输至 DMD 三维成像引擎,在引擎内部利用 FPGA 的高速处理能力将这幅 24 bit 彩色图像分解为连续的 24 幅三维模型二值切片图像,这样如果 DVI 传输帧频为 200 Hz,则投影帧频可以达到 4 800

帧/s,在一定程度上能够实现实时交互式显示^[7]。利用 DVI 接口传输的真三维成像引擎,主要组成有主机、显卡、DVI 接口及其接收器,主控制器 FPGA,SRAM 图像缓存、DDR2 SDRAM 存储器以及 DMD 芯片组,图 8 为这种引擎主要部分组成框图,其中 200 为主处理器,221,222 和 223 为 DMD 芯片组。为了达到更高的性能,在设计引擎时需要采用一些先进的处理方法,如对 SRAM 图像缓存进行乒乓操作,对显示的图像进行并行流水处理等。图 9 为 OpenGL 自带的 teapot 模型在主机上合成后的一幅图像和引擎分解出的 24 帧不同角度图像。我们新一代的成像引擎将采用这种结构,同时为了扩大应用配备有 USB2.0 接口。

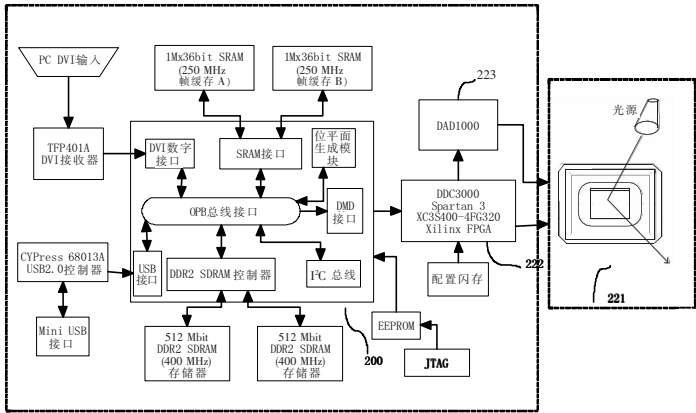


图 8 利用 DVI 接口传输的真三维成像引擎

Fig. 8 Block diagram of 3D display engine using digital video interface to transfer voxel data

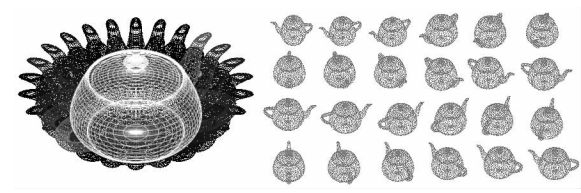


图 9 图像合成编码及位平面分解示例

Fig. 9 Image produced in host computer and 24 bit-planes split by the engine

5 结 论

真三维显示技术发展迅速,现已有少量成熟产品应用于医药、科研等领域。基于体扫描的体元式真三维显发展的相对比较成熟,本文就其核心的关键技术点进行了讨论,以期启迪新思维,开发新系统。应该指出,目前真三维显示仍然受制于计算机软硬件、材料、精密加工等技术,走向商品化民用仍需假以时日。

参 考 文 献:

[1] Blundell B G, Schwarz A J. The classification of volumetric display systems; characteristics and predictability [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2002,8(1):66-75.

[2] Favalora G E, Napoli Joshua, Hall Deirdre M, et al. 100 Million-voxel volumetric display [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002,4712:300-312.

[3] Favalora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure [J]. *IEEE Computer*, 2005,38(8):37-44.

[4] Langhans Knut,Cuill christian, Rieper Elisabeth, *et al.* Silid FELIX: A static volume 3D-laser display [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003,5006:161-274.

[5] 耿征. 真三维高清晰度显示技术——信息显示领域的重要发展方向 [J]. 科技导报,2007,25(20):21-26.

[6] Chun Won-Suk, Napoli Joshua, Oliver S, *et al.* Spatial 3-D infrastructure: Display-independent software framework, high-speed rendering electronics, and several new displays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5664:302-312.

[7] Jones Andrew, McDowall Ian, Yamada Hideshi, *et al.* Rendering for an interactive 360° light filed display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007,26(3):1-10.

[8] Geng Jason. Volumetric 3D display for radiation therapy planning [J]. *Journal of Display Technology*, 2008,4 (4):437-450.

[9] Hornbeck L J. Digital light processing for high-brightness, high resolution applications [J]. *Proc. SPIE*,1997, 3013:27-41.

[10] Texas Instruments. DMD Discovery™ 3000 digital controller (DDC3000) strarter kit technical reference manua [R/OL].[2007-04-20]. http://focus.ti.com/download/dlpdmd/Discovery_3000_Sheet.pdf.



SI 单位的倍数单位

SI 单位的倍数单位是由 SI 词头与 SI 基本单位和 SI 导出单位构成。倍数单位的选取一般应量的数值处于 0.1~1 000 之间。

- SI 词头是用于构成倍数单位的因数符合,不能单独使用。
- 词头符号与所紧接着的单位符号应作为一个整体对待,它们共同组成一个新单位(十进倍数或分数单位),并具有相同的幂次。例如: $10\text{ hm}^2=10\times(100\text{ m})^2=10^5\text{ m}^2$; $1\text{ cm}^3=(10^{-2}\text{ m})^3=10^{-6}\text{ m}^3$ 。
- 词头不能重叠使用,即不能使用由几个词头并列组成的组合词头。例如:不能用 $\text{m}\mu\text{s}$ (毫微秒),正确的为 ns (纳秒)。
- 摄氏度、平面角和时间单位(s 除外)及 kg 等不得使用词头的倍数单位。例如:“mh”(毫小时),“hkg”(百公斤)是不规范的。

数值范围的表示法

1. 数值范围采用波浪号“~”。
2. 书写百分数范围,每个百分数后面的“%”都要重复写出。例如“10 %~20 %”不能写成“10~20 %”。
3. 书写用万或亿表示的数值范围,每个数值中的万或亿不得省略。例如 2 万~5 万,不能写成 2~5 万。
4. 书写具有相同幂次的数值范围,每个数值中的幂次都要重复写出。例如“ $3\times10^5\sim5\times10^5$ ”不能写成“ $3\sim5\times10^5$ ”,但可以写“ $(3\sim5)\times10^5$ ”。
5. 单位相同的量值范围,前一个量值的单位可以省略,只需在后一个量值上写出。例如:“5 mm~8 mm”应写作“5~8 mm”。
6. 单位不完全相同的量值范围,每个量值的单位应全部写出。例如:2 h~2 h30 min(但最好改为“2~2.5 h”)。