

实现计算机藏文快速输入的关键问题研究

尼玛扎西^{1,2}, 李志蜀¹, 拥措², 群诺², 普顿²

(1. 四川大学计算机学院 成都 610065; 2. 西藏大学现代教育技术中心 拉萨 850012)

【摘要】通过对藏文文法的深入分析研究,利用藏文字符在藏文语法上的排斥性,在通用计算机键盘键有限的键位上合理安排了所有基本藏文字符,并结合藏文字符字频统计、计算机键盘布局理论以及藏文字母与英文字母在发音上的近似性,设计了无重码藏文输入法键盘键位布局,解决了在不使用上档键和冗余键的情况下实现计算机藏文快速输入的难题;通过对藏文编码标准的分析研究,实现了基于《信息技术信息交换用藏文编码字符集 基本集》和《信息技术藏文编码字符集 扩充集A(B)》国际/国家标准的快速藏文输入法。

关键词 中文信息处理; 藏文; 编码; 计算机键盘布局; 输入法; 藏文
中图分类号 TP311 文献标识码 A

Research on Key Issues of Implementing Computer Tibetan Fast Input

NYIMA Trashi^{1,2}, LI Zhi-shu¹, YONG Tso², QUN Nuo², and PU Dun²

(1. School of Computer, Sichuan University Chengdu 610065; 2. Modern Education Technology Centre, Tibet University Lhasa 850012)

Abstract By utilizing the repellency of Tibetan characters in the Tibetan grammar, all the basic Tibetan characters are reasonably assigned to the limited keyboard keys of the universal computer. A non-repeated code Tibetan keyboard layout is designed according to the similarity in pronunciation of English and Tibetan alphabet and the rules of computer keyboard layout. And a non-repeated code fast Tibetan input method in accordance with international and national Tibetan character coding standards is implemented on the base of the analysis of Tibetan coding standards. The problem achieving fast Tibetan input without using shift or redundancy keys is also resolved.

Key words Chinese information processing; coding; computer keyboard layout; input method; Tibetan

藏文输入法研究是藏文信息处理研究的基础和重要组成部分,对推动藏文信息处理技术的发展,促进民族地区的经济社会发展具有特别重要的意义。文献[1]介绍了对《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本中藏文构件、字符和字的频率的统计分析结果。文献[2]研究了国内藏文信息处理技术的研究现状,对藏文操作系统、藏文信息技术标准、藏语信息处理、综合应用等进行了分析。文献[3]研究了基于大型藏文语料库的藏文字符、部件、音节、词汇频度与通用度统计分析的理论与方法,实现了大规模藏文词汇频度与通用度统计原型。文献[4]研究了藏文字符集的特点,实现了符合ISO/IEC 14651标准语义的藏文字典序排序的方法。文献[5]在总结现有Linux国际化框架层次结构的基础上,分析了Windows核心系统国际化的关键问题。文献[6]提出了基于

ISO/IEC 10646的藏文字符集标准和音节划分、使用OpenType字体及相应的文本引擎,结合藏文正字法要求,解决藏文“叠加”字符显示的方法。文献[7]利用图论和概率方法求出藏字构件的极大独立集,使键位归并所产生的重码现象降到最低,并结合工程心理学方法,实现了藏字构件合理布局至标准键盘上。文献[8]基于藏文语料库的字符、部件、音节、词汇统计数据,遵循藏语语法规则及其特殊性,对键盘键位的属性进行专门研究,研制出了“一键多符”和“一键到位”的智能化藏文计算机通用键盘布局与输入法。文献[9]研究了基于藏文音节的手机输入方法,并在Windows CE上实现。文献[10]介绍了在移动电话上实现藏文输入/输出和短消息编码/解码的方法。本文在继承以上文献的研究方法和成果的基础上,通过对藏文语法及构字特点等关键问

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2008-11-05

基金项目: 电子信息产业发展基金(信部运[2005]429号)

作者简介: 尼玛扎西(1964-),男,博士生,主要从事计算机网络、藏文信息处理等方面的研究。

题的研究, 设计了无重码藏文键盘键位布局, 开发了基于藏文编码国际/国家标准的阳光藏文输入法, 实现了藏文的快速输入。目前, 该藏文输入法已由西藏自治区相关部门在全区推广应用。

1 藏文简介

藏文是一种历史悠久的拼音文字, 属辅音文字型, 包括辅音字母、元音符号和标点符号3个部分。藏文字(音节)以一个辅音字母(基字)为核心, 其余辅音字母均以此为基础前后附加和上下叠加, 组合成一个完整的字表结构。藏文字形结构最少为一个辅音字母(即单独由一个基字构成), 最多由7个辅音字母与元音符号构成。藏文30个辅音字母均可作基字, 其中5个辅音字母可以作为前加字; 10个辅音字母可以作为后加字; 2个辅音字母可以作为再后加字; 3个辅音字母可以作为上加字; 4个辅音字母可以作为下加字。上加字和下加字字形会发生一定变化。藏文不仅有横向拼写性, 还有纵向拼写性。藏文的拼写顺序为: [前加字][上加字]基字[下加字][元音][后加字][再后加字]。藏文中还有大量的梵文的藏文转写字。

1.1 术语定义

为了便于本文对藏文文法、构字特点和编码的描述和理解, 特定义如下术语:

定义 1 纵向组合字符 (vertical combing character, VCC): 以藏文辅音字母为核心(称为基字), 在基字的上部叠加称之为上加字的特定藏文辅音字母; 在基字的下部叠加称之为下加字的特定藏文辅音字母, 在基字上部或下部、或上加字上部、或下加字下部叠加藏文元音符号, 按照该叠加规则组合形成的字母和符号组, 称为藏文纵向组合字符, 简称纵向组合字符。

定义 2 藏文字符 (Tibetan character): 藏文辅音字母、藏文符号、藏文数码及VCC统称为藏文字符。

定义 3 藏文字 (Tibetan word): 由前加字、基字、VCC、后加字以及再后加字, 按照藏文拼写规则进行横向拼写构成的一个音节, 称为藏文字。

1.2 藏文拉丁转写系统

为了方便对藏文的引用和描述, 本文采用通用的威利(Wylie)藏文转写方案, 如图1所示。零韵母 ཨ 未被转写, 以元音开头的音节都含有这个字母, 可以通过这个特征来准确判断它的存在。

ཀ-k	ཁ-kh	ག-g	ང-ng	ཅ-c	ཆ-ch	ཇ-j	ཉ-ny
ཏ-t	ཐ-th	ད-d	ན-n	པ-p	ཕ-ph	བ-b	མ-m
ཙ-ts	ཚ-tsh	ལ-dz	ཞ-w	ཧ-zh	མ-z	འ-'	ཡ-y
	ར-r	ལ-l	ཤ-sh	ས-s	ཧ-h		
		ཇ-i	ཉ-u	ཇ-e	ཇ-o		

图1 藏文拉丁转写系统

2 藏文编码标准

2.1 藏文编码国际标准

1997年由我国提交的《信息交换用藏文编码字符集》提案经过ISO相关机构逐级审查正式成为ISO/IEC 10646国际标准, 与该标准相应的《信息技术 信息交换用藏文编码字符集 基本集》(以下简称《基本集》)国家标准于1998年元月起颁布实施, 2000年该标准收入Unicode标准第二版。该标准规定了藏文基本字符的集合及其编码表示, 没有对任何藏文纵向组合字符(VCC)进行编码, 另外, 该标准还规定了3个实现规则, 编码字符集位于Unicode(ISO/IEC 10646 BMP) U+0F00~U+0FBF。

2.2 藏文编码国家标准

为了减少藏文信息处理技术的复杂性, 我国在《基本集》国家标准的基础上又制定并通过了《信息技术 藏文编码字符集 扩充集A》(以下简称《扩充集A》)国家标准, 该标准收录1 536个藏文的纵向组合字符(VCC), 所有字符在GB 13000.1-1993的专用用户区编码, 编码位置是0xF300~0xF8FF, 每个字符的编码是2个字节;《信息技术 藏文编码字符集 扩充集B》(以下简称《扩充集B》)国家标准正在报批过程中, 还未正式颁布, 该标准收录了5 702个梵文的藏文转写字, 所有字符在GB13000.1-1993的专用字面0F上编码, 编码位置是0xF0000-0xF1645, 每个字符的编码是3个字节。

3 藏文输入法研究现状及存在的问题

目前常见的基于Windows的藏文输入法开发模式有以下3种: (1) 直接应用层面开发。(2) 挂在现有的英汉文Windows下。(3) 建立keyboard layout文件, 将键码直接映射为藏文字符。微软Windows Vista提供的藏文输入法采用第3种模式, 其余的藏文输入法大都在应用层面上开发或在汉英文

Windows下挂接实现。在藏文编码标准的应用方面,微软Windows Vista提供的藏文输入法采用了藏文的Unicode编码,其他绝大多数藏文输入法都没有采用藏文的国际、国家编码标准,使得藏文信息无法交互和共享。在藏文的输入效率方面,由于缺乏对藏文文法的深入研究,所以绝大多数藏文输入法无法实现盲打输入,即在藏文键盘布局中,相同的键位对应多个藏文字符时,用户必须按数字键选择需要的藏文字符;一些输入法虽然能够实现盲打,但是使用了大量的上档键或冗余键,大大降低了藏文的输入速度。

4 快速藏文输入法的实现方法

4.1 藏文字符编码

Windows系统内核采用Unicode编码,即所有的字符都为双字节。Unicode对应于ISO/IEC 10646的BMP平面,所以对于扩充集A中的VCC可以直接处理。而对于扩充集B中的字符必须用UTF16进行转换。在ISO/IEC 10646 BMP(basic multi-lingual plane)中,U+D800~U+DFFF区规定为S区(surrogates area),用于UTF-16(UCS transformation format)。UTF-16以16位为单元对UCS(universal multiple~octet coded character Set)进行编码,对于小于0xFFFF的UCS码,UTF-16编码等同于UCS编码对应的16位无符号整数,对于编码为0x01000~0x10FFFF之间的字符使用双字表示,高字的取值范围为U+D800~U+DBFF,低字的取值范围为U+DC00~U+DFFF,即:1101 10xx xxxx xxxx 1101 11xx xxxx xxxx。假定c的编码大于0xFFFF,则具体算法如下:

高字节=(0xD7C0 + (c >> 10))

低字节=(0xDC00 | c & 0x3FF)

下面是一些编码结果:

\uD800\uDC00=U-00010000

\uD800\uDC01=U-00010001

\uD801\uDC01=U-00010401

\uDBFF\uDFFF=U-0010FFFF

4.2 藏文键盘键位布局

设计藏文键盘键位布局须对藏文字符的字频统计、计算机键盘布局理论、藏文文法以及藏文字母与英文字母发音上的近似性等方面进行综合分析和研究。

4.2.1 藏文字符频率统计分析

“《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本字频统计分析”一文介绍了对《丹珠尔》中藏文构件、字符和

字的频率统计分析结果。该文所述的“藏文构件”和“藏文字符”与本文所定义的“藏文字符”概念相同,本文从以下两个方面对该文统计结果的准确性进行了进一步的验证:

(1) 从藏文文法角度看,由于10个后加字中包含了所有的前加字和再后加字,又都可以做基字,所以这10个字母一定是30个字母中使用频率最高的。另外,每个藏文字都须使用音节分隔符分隔,所以该字符的使用频率也非常高。这一分析结果与“《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本字频统计分析”一文的藏文字频统计结果基本一致。

(2) 由于藏文字符频率统计结果受被统计文本类型的影响较大,所以本文对《新编藏文字典》中4317个藏文字中的字符频率进行了统计分析,结果也与“《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本字频统计分析”一文的藏文字频统计结果基本一致。

为此,本文将“《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本字频统计分析”一文的藏文字符频率统计分析结果作为藏文键盘键位布局的依据之一。

4.2.2 计算机键盘布局理论

“藏文计算机通用键盘布局与输入法研究”一文介绍了美国华盛顿大学的效率专家德沃拉克(August Dvorak)博士在键盘布局理论方面的研究成果。德沃拉克博士采用高速摄影的方法,研究分析了英文机械打字机打字快慢和出错的原因,提出了一套合理的英文键盘布局理论。德沃拉克英文键盘布局理论是从英文键盘键位方便指数的测试结果中得出的,如图2所示。本文将该方便指数作为键盘键位属性研究和藏文键位布局的依据之一。

[a]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	-	=
[b]	81	85	90	91	90	89	101	113	101	90	108	101
[c]	46	45	41	40	41	44	34	23	34	41	31	34
[a]	Q	W	E	R	T	Y	U	I	O	P		[]
[b]	107	108	111	110	112	113	126	134	131	129	115	112
[c]	33	31	29	30	26	23	13	9	11	12	19	26
[a]	A	S	D	F	G	H	J	K	L	:	:	,
[b]	232	262	274	264	115	134	318	326	292	238	122	112
[c]	8	6	4	5	19	9	2	1	3	7	14	26
[a]	Z	X	C	V	B	N	M	,				
[b]	100	113	114	99	96	121	118	117	122	144		
[c]	37	23	21	38	39	16	17	18	14	21		

图2 英文(QWERT)键盘键位击键方便指数(次/min)

4.2.3 与藏文键盘键位布局相关的藏文文法

在设计藏文键盘键位布局时,如果能够为30个

辅音字母、4个元音符号、3个上加字, 4个下加字、10个数码、音节分隔符、文头符和长元音符号均安排独立的下挡键键位, 那么任何一个键码序列必定只对应一个藏文字符, 从而可实现藏文的无重码快速输入。但是通用键盘只有47个下挡键键位, 而实际需要54个下挡键键位, 就必须使7个下挡键键位分别对应两个藏文字符, 输入藏文时不产生二义性。所以本文对相关的藏文语法进行了深入的分析, 总结出以下相关的藏文语法性质。

性质1 根据藏文语法, 任意一个辅音字母均可作基字并与后加字拼写, 因此, 上加字不能与辅音字母共用一个键位, 否则, 输入时就会在基字+后加字或者上加字+基字之间产生二义性。

性质2 根据藏文语法, 任意一个辅音字母均可作基字并与后加字拼写, 所以, 下加字不能与后加字共占一个键位, 否则, 输入时就会在基字+后加字或基字+下加字之间产生二义性。

性质3 根据藏文语法, 如果一个辅音字母既可以作为前加字的基字, 又可以作为下加字的基字, 那么该字母不能和下加字共占一个键位, 否则, 输入时就会在前加字+基字或基字+下加字之间产生二义性。

性质4 根据藏文语法, 如果一个藏文辅音字母只能够作为某些前加字的基字, 而且这些前加字又不能够作为某个下加字的基字, 那么这个辅音字母可以与该下加字共占一个键位, 输入时不会产生二义性。根据上述性质1~4, 可以作以下键位安排:

- (1) 下加字 r 与字母 ph 共享同一个键码。
- (2) 下加字 l 可以与字母 kh、ch、th、p、ph、tsh 中的任意一个共享同一个键码, 选择 l 与 kh 共享同一个键码。
- (3) 下加字 y 可以与字母 p、ph 中的任意一个共享同一个键码, 选择 y 与 p 共享同一个键码。
- (4) 下加字 w 可以与字母 kh、ch、j、th、ph、tsh 中的任意一个共享同一个键码, 选择 w 与 ch 共享同一个键码。
- (5) 安排元音符号 i、u、e 分别与字母 w、h 和 ཨ 共享同一个键码, 元音符号 o 单独占一个键码。
- (6) 安排上加字 r、l、s 各自单独占一个键码。

以上键位安排通过利用藏文字符在语法上的排斥性, 解决了上述的下挡键键位不够用的难题。

在综合考虑藏文字符的字频统计结果、德沃拉克键盘键位击键方便指数、藏文语法以及藏文字母与英文字母发音上的近似性的基础上, 设计了能够实现无重码快速藏文输入的藏文键盘键位布局, 如

图3所示。



图3 藏文键盘键位布局

由于藏文语法不适用于梵文的藏文转写字, 所以无法根据藏文语法设计出梵文的藏文转写字的键盘键位布局。为此, 在综合考虑藏文字符的字频统计结果、德沃拉克键盘键位击键方便指数, 以及藏文字母与英文字母发音上的近似性的基础上, 设计了梵文的藏文转写字键盘键位布局, 如图4所示。



图4 梵文的藏文转写字键盘键位布局

4.2.4 输入法的实现

实现输入法最规范、最有效的方式之一是利用Windows所提供的输入法管理器(IMM)和输入法编辑器(IME)进行输入法编程。IMM-IME结构是Windows多语言支持的核心组件之一。

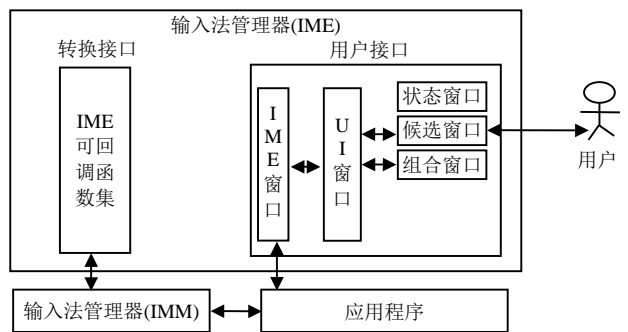


图5 IME结构

在支持多语言的Windows中, 操作系统无法将键盘按键码直接转换为藏文这样的复杂字符, 所以当操作系统收到按键信息后会将这些信息通过IMM发送给IME, IME再将用户的按键码“翻译”为藏文字, 并最终通过消息机制发送给目标窗口。消息机制是Windows系统与应用以及进程间通信的基础。

Windows的所有应用程序都是基于窗口的，而每一个窗口都具有一个唯一的句柄，利用该句柄就可以给窗口发送任何消息，IMM中会保存当前窗口的句柄以此实现与当前窗口的通信。Windows的IME主要由两个部分组成：用户接口和转换接口，其详细结构如图5所示。

Windows中的输入法实际上是一个动态链接库，在该库中必须导出一系列函数供IMM调用，即IME的转换接口。藏文输入法须在IME中主要实现下面两个函数：

(1) ImeProcessKey按键预处理函数。通过该函数输入法判别IME是否需要处理用户在键盘上按下的键。函数返回True表明输入法将处理该按键，此时系统不再将该按键信息发送给目标窗口，取而代之会立刻调用输入法的另一个接口ImeToAsciiEx，否则系统发送按键信息到目标窗口。

```

BOOL WINAPI ImeProcessKey (
HIMC hIMC, //当前输入法的上下文结构
UINT vKey, //按键扫描码
LPARAM lKeyData, //由vKey确定
CONST LPBYTE lpbKeyState //指向一个
数组，该数组中每一位与一个按键相对应，
如果该键被按下则置1
)

```

(2) ImeToAsciiEx 函数。该函数是输入法实现中

最重要的一个函数，它实现了输入法引擎，负责将键位码转换为藏文字符并输出。

```

UINT WINAPI ImeToAsciiEx (
UINT uVKey, //按键软扫描码
UINT uScanCode, //按键的硬件扫描码
CONST LPBYTE lpbKeyState, //指向一个
数组，该数组中每一位与一个按键相对应，如
果该键被按下则置1
LPDWORD lpdwTransKey, //指向返回消息结
构的指针
UINT fuState, //活动菜单标志
HIMC hIMC //当前输入法的上下文结构
)

```

以上两个函数须放入输入法接口文件中，备IMM直接调用。此外，输入法还须实现输入法动态链接库入口、UI窗口、输入法键盘映射以及英文字符到藏文字符的转换函数等。IME还须维护输入法上下文、组合字符串、候选字符串等结构。输入法上下文结构保存输入法所有的上下文信息，如目标窗口句柄等，该结构被所有的IME接口调用。组合字符串保存用户输入的字符以及被转换后的藏文字符信息。候选字符串保存候选项信息。后两个结构的句柄都保存在输入法上下文结构中。藏文输入法框架流程如图6所示。

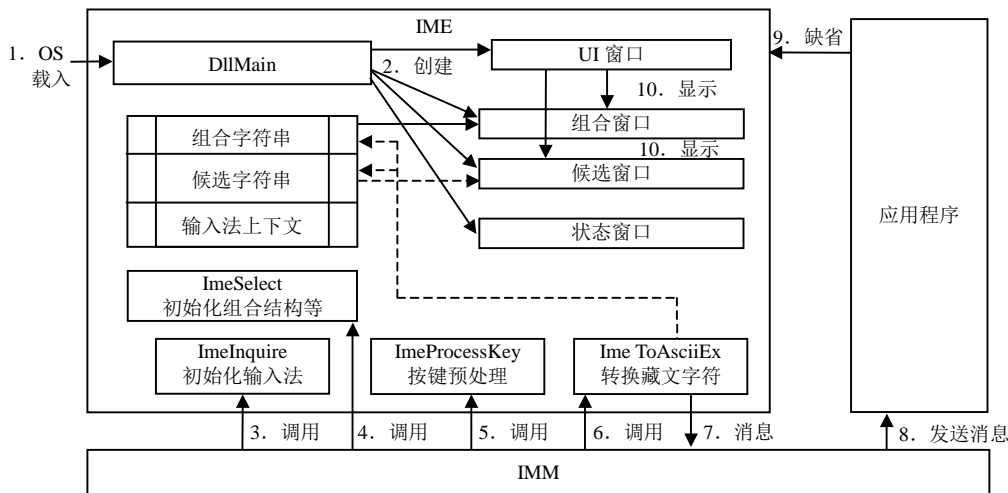


图6 输入法框架流程图

5 结 论

在对藏文语法进行分析研究的基础上设计的无重码藏文键盘键位布局，解决了在不使用上档键和冗余键的情况下实现计算机藏文快速输入的难题。应用无重码藏文键盘键位布局开发的藏文输入法，

除了能够实现藏文的盲打输入，还具备一定的文法检查功能，即如果藏文输入符合语法规则，则能够正常录入，否则，输入法会分别列出输入的字符并提示有文法错误。

参 考 文 献

[1] 扎西次仁. 《中华大藏经丹珠尔》藏文对勘本字频统计分

- 析[J]. 中国藏学, 1997, (2): 122-133.
ZHAXI Ciren. An analysis on the Tibetan character frequency statistics of China Tripitaka Bstan-vgyur[J]. China Tibetology, 1997, (2): 122-133.
- [2] 陈玉忠, 俞士汶. 藏文信息处理技术的研究现状与展望[J]. 中国藏学, 2003, (4): 97-105.
CHEN Yu-zhong, YU Shi-wen. Tibetan information processing: past, present, and future[J]. China Tibetology, 2003, (4): 97-105.
- [3] 林河水, 程伟, 曹晖, 等. 一种符合ISO 14651 语义的藏文排序实现方法[J]. 中文信息学报, 2004, 18(5): 36-41.
LIN He-shui, CHENG Wei, CAO Hui, et al. A method for ordering Tibetan text in accord with ISO 14651[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2004, 18(5): 36-41.
- [4] 卢亚军, 马少平, 张敏, 等. 基于大型藏文语料库的藏文字符、部件、音节、词汇频度与通用度统计及其应用研究[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2005, 24(2): 32-42.
LU Ya-jun, MA Shao-ping, ZHANG Min, et al. Researches of calculations of Tibetan characters, pieces, syllables, vocabulary and universal frequency and its applications[J]. Journal of Northwest University for Nationalists (Natural Science), 2005, 24(2): 32-42.
- [5] 谢谦, 吴健, 孙玉芳. X Window核心系统的民文支持[J]. 中文信息学报, 2005, 19(4): 97-104.
XIE Qian, WU Jiang, SUN Yu-fang. Ethnic language support in X Window core system[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2005, 19(4): 97-104.
- [6] 芮建武, 吴健, 孙玉芳. 基于ISO/IEC 10646 标准的藏文操作系统若干问题研究[J]. 中文信息学报, 2005, 19(5): 97-104.
RUI Jian-wu, WU Jian, SUN Yu-fang. Study on implementing Tibetan operating system based on ISO/IEC10646[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2005, 19(5): 97-104.
- [7] 高定国, 龚育昌. 藏文键盘布局的优化设计方法[J]. 中文信息学报, 2005, 19(6): 92-97.
GAO Ding-guo, GONG Yu-chang. The optimal arrangement of tibetan character onto keyboard[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2005, 19(6): 92-97.
- [8] 卢亚军. 藏文计算机通用键盘布局与输入法研究[J]. 中文信息学报, 2006, 20(2): 78-86.
LU Ya-jun. A study of layout and input method of a general Tibetan computer keyboard[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2006, 20(2): 78-86.
- [9] LIN Sen, DONG Yuan, WANG Sheng-yuan, et al. A Tibetan input method based on syllable word for mobile phone[C]//Second International Conference on Embedded Software and System. Xian, China: [s.n.], 2005: 16-18.
- [10] TRASHI N, SHU L Z, NUO Q, et al. A Tibetan mobile phone based on CDMA system[C]//Communication Systems and Networks, IASTED Asia(CSN2007). Phuket, Thailand: ACTA Press, 2007: 24-28.

编辑 熊思亮

(上接第101页)

参 考 文 献

- [1] DUAN Zhen-hua, YANG Xiao-xiao, KOUTNY M. Framed temporal logic programming[J]. Science of Computer Programming, 2008, 70(1): 31-61.
- [2] MOSZKOWSKI B C. Executing temporal logic programs [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [3] DUAN Zhen-hua, WANG Xiao-bing. Implementing pointer in temporal logic programming languages[C]//Proceedings of Brazilian Symposium on Formal Methods. Natal, Brazil: The Brazilian Symposium on Formal Methods, 2006: 171-184.
- [4] MA Yong-tao, DUAN Zhen-hua, WANG Xiao-bing, et al. An interpreter for Framed Tempura and its application[C]// Proceeding of The First Joint IEEE/IFIP Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering. Shanghai: IEEE Press, 2007: 251-260.
- [5] ZHU H, ZHOU M C. Object-oriented programming with C++: a project-based approach[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [6] FISHER M. METATEM: the story so far[J]. Programming multi-agent systems, 2006, 3862(2006): 3-22.
- [7] ROEGEL D. Specifying almost-real concurrent object-oriented programs[C]//Proceeding of The Fourth EuroMicro Workshop on Parallel and Distributed Processing. Portugal: IEEE Computer Society, 1996: 94-101.
- [8] 唐稚松. 时序逻辑程序设计与软件工程[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
TANG Zhi-song. Temporal logic programming and software engineering[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [9] 郭亮, 唐稚松. XYZ/E面向对象程序语义概述[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 356-361.
GUO Liang, TANG Zhi-song. An overview towards the semantics of XYZ/E object-oriented programs[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 356-361.
- [10] EDMUND C, ORNA G, DORON P. Model checking[M]. Cambridge: MIT Press, 1999.
- [11] PIERCE B C. Types and programming languages[M]. Cambridge: MIT Press, 2002.

编辑 熊思亮