

井下运输系统调度联锁过程的建模

刘殿军¹ 杨鸿瑞² 齐文海² 高宪文²

(鞍钢集团弓长岭矿业公司 辽阳 111007)¹ (东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)²

摘要 在现阶段,矿山运输调度中通常使用的调度策略是根据历史经验和工作方式人为设置的,对生产运输实际情况缺乏适应性和灵活性。针对这一状况,选取着色 Petri 网这一适应典型离散事件动态系统的方法进行建模。在充分研究井下调度联锁基本规则后,建立并定义适用于本系统的颜色集、库所和变迁。将机车在一个完整工作路径中的运行按顺序分 6 种情况进行理论建模,最后得出机车完整的调度联锁过程模型。

关键词 运输调度,离散事件,调度联锁,着色 Petri 网

中图法分类号 TP271 文献标识码 A

Modeling of Dispatching Interlocking Process of Underground Transportation System

LIU Dian-jun¹ YANG Hong-rui² QI Wen-hai² GAO Xian-wen²

(Gongchangling Mineral Company, Ansteel Group Coproration, Liaoyang 111007, China)¹

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)²

Abstract At present, the artificial settings of scheduling strategy are commonly based on historical experience and work manners, which lack of adaptability and flexibility to production transportation situation. Considering this, the article selected the colored Petri nets, which is adapted to the typical discrete event dynamic system. After fully researching the basic underground dispatching interlocking rules, the article defined color sets, places and transitions which are suitable for the system. The theoretical model in the complete working path was considered and divided into six conditions in sequence. Finally, it is concluded that the complete interlocking system dispatching model is obtained.

Keywords Transportation dispatching, Discrete event, Dispatching interlocking, Colored Petri net

1 绪论

矿山运输调度控制系统是一类典型的离散事件动态系统。多组机车在井底车场和各采区车场之间往返运行,对公用的运输轨道进行申请使用,调度的主要过程有进路的申请与占用、区段的申请与占用、信号和道岔的联锁处理,具备同步、并发、冲突、互斥、资源共享、资源竞争等特点^[1]。选用规范的离散事件系统的形式化的建模方法对其进行建模,有助于调度控制系统的开发。近些年, Petri 网由于具有强大的描述能力和成熟的数学分析方法,十分适合离散事件动态系统的建模^[2]以及对联锁软件的安全性进行分析。目前应用 Petri 网对矿井机车的运输调度系统进行建模的研究有一些成果^[3-5],但是通过建模过程对运输调度系统的相关性质和优化调度研究却很鲜见。

2 调度联锁过程建模

2.1 井下机车运输调度联锁规则

根据国家标准《煤矿井下机车运输信号设计规范》和实际情况需求,通常情况下机车运输调度联锁的规则主要有以下

几点:

(1) 占用申请

当机车运行到某路段末端时,系统向联锁主机发出申请,主机在联锁条件满足的情况下为机车开通下一路段。

(2) 主机联锁运算

主机收到机车的占用申请时,根据机车的联锁条件进行判断,以确定此申请能否被响应。

(3) 占用满足开通下一路段

当收到允许开通占用路段的标识后,系统为机车开通下一路段,令其进入。

(4) 意外情况处理

当机车占用申请被允许准备进入下一路段时,由于误操作致使占用申请失效,应立刻回收允许机车进入的信号,并令机车处于等待状态,直到故障被解除再重新进行申请及开通路段。

2.2 模型的选取

Petri 网理论是联邦德国的 Carl Adam Petri 于 1962 年作为过程建模和分析的工具初次提出的,主要研究系统及其相互之间的关系。Petri 网作为一种较好形式化的描述工具,已

本文受国家自然科学基金(61034005)资助。

刘殿军(1973—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为矿山机电控制系统;杨鸿瑞(1992—),男,硕士生,主要研究方向为复杂工业控制系统建模;齐文海(1986—),男,博士生,主要研究方向为随机系统的控制;高宪文(1955—),男,博士,教授,主要研究方向为复杂工业控制系统建模以及随机系统的控制。

在工作流建模^[6]与分析中获得了广泛应用,基本 Petri 网的元素包括库所(Place)、变迁(Transition)、有向弧(Connection)和托肯(Token)等。

着色 Petri 网(CPN)扩展了普通 Petri 网的特性及对建模的描述能力^[7,8],同时比基本 Petri 网多了一个要素——声明。着色 Petri 网的着色主要体现在托肯和库所上,使得库所和变迁的数量大为减少,图形更加简约,并能限定库所中托肯所能取的颜色范围^[9,10]。

定义着色 Petri 网为一个六元组 $CPN = \{P, T, F, C, I, M_0\}$,其中^[11]:

(1) $\{P, T, F\}$ 为有向网,也称为基网;

(2) C 是颜色集,对 $\forall p \in P, C(p)$ 是库所 p 上所有可能的托肯色集,对 $\forall t \in T, C(t)$ 是变迁 t 上所有可能的出现色集;

(3) I 为托肯数, $I = I_+ - I_-$,其中 I_+ 和 I_- 是变迁的输出和输入函数,用来确定变迁发生后库所中托肯的变化;

(4) M_0 为初始标识,集合 C 上所有的有限多重集组成的集合表示为 C_{MS} ,并满足条件 $\forall p \in P: M_0(p) \in C(p)_{MS}$ 。

2.3 模型的建立

2.3.1 颜色集

(1) 基本色集

C_1 : 路段(内含道岔)号编号, C_2 : 缓冲区(内含道岔)号编号, C_3 : 机车号编号, C_4 : 机车任务编号, C_5 : 机车号及任务(C_3C_4 复合)编号。

(2) 复合色集

I_1 : 包含 $C_1C_2C_5$ 的机车复合色, I_2 : 包含 $C_1C_2C_5$ 的出现异常运行情况时的机车复合色, I_3 : 包含 C_5 的不涉及具体路段的机车复合色。

2.3.2 库所

P : 路段库所,需要标明机车编号、机车任务编号、机车运行所在的路段编号,颜色集是 I_1 ;

Reach: 机车抵达,表示系统检测到机车抵达路段后,生成机车的位置,颜色集是 I_1 ;

Pass: 机车通过,表示系统检测到机车离开路段后,生成机车的位置,颜色集是 I_1 ;

Path-open: 路段解锁,路段号由托肯色标识,颜色集是 C_1 ;

Control: 占用申请控制(每个路段不能同一时间内多次申请),颜色集是 C_1 ;

Frame: 联锁主机,接收系统的联锁运算申请,颜色集是 I_3 ;

Path-lock: 路段闭锁,路段号由托肯色标识,颜色集是 C_1 ;

Fork-right: 道岔位置正确,道岔置于机车运行所需要的方向,颜色集是 I_3 ;

Allow: 申请允许,联锁运算允许占用申请后,主机生成可占用路段的标识,颜色集是 I_3 ;

Green: 信号置绿,系统开通占用路段,信号机显示绿灯,颜色集是 I_3 ;

Buffer: 缓冲区库所,需要标明机车编号、机车任务编号、机车运行所在位置前方最近的缓冲区编号,颜色集是 I_2 ;

Overtake-allow: 超车允许,系统允许超车,主机生成可超车的标识,颜色集是 I_3 ;

Buffer-open: 缓冲区道岔开放,道岔号由托肯色标识,颜

色集是 C_2 ;

Wrong: 非法占用,当机车出现异常运行情况时,脱离系统控制,颜色集是 I_1 ;

Red: 信号置红,系统关闭占用路段,信号机显示红灯,颜色集是 I_3 ;

Fork-wrong: 道岔位置错误,岔置于机车运行所需要的反方向,颜色集是 I_3 ;

Wait: 机车等待,颜色集是 I_3 ;

Handle: 异常情况处理,当异常情况排除时,正在等待的机车重新进行申请并生成托肯,颜色集是 I_3 。

2.3.3 变迁

Enter-next: 进入下一路段,表示机车在路段末端运行进入下一路段,颜色集是 I_3 ;

Leave-current: 离开当前路段,表示机车在路段末端运行完全离开当前路段,颜色集是 I_3 ;

Apply: 占用申请,表示机车进行占用申请,颜色集是 I_3 ;

Interlock-operation: 联锁运算,表示主机进行联锁运算以确定是否可以开通占用路段,颜色集是 I_3 ;

Signal: 信号灯控制,表示信号灯根据申请情况显示绿灯或红灯,以开通或关闭路段,颜色集是 I_3 ;

Overtake: 机车超车,表示系统允许后车对前车实现超车,颜色集是 I_3 ;

Way-wrong: 机车运行路线错误,表示由于人为误扳道岔使机车进入其他错误的路线,颜色集是 I_3 ;

Run-red: 路段内机车闯红灯,表示机车未按信号灯显示(信号灯置红)进入下一路段,颜色集是 I_3 ;

Reach-wrong: 机车运行至错误路段,表示当机车运行错误后,系统解锁原定任务路线中闭锁的路段,颜色集是 I_3 ;

Position-ensure: 机车后续运行方向,表示异常运行的机车在路段中的位置,并以此判断机车后续运行路段,颜色集是 I_2 ;

Close: 信号灯关闭,表示当出现误操作使占用失效时,关闭占用进路,颜色集是 I_2 ;

Recover: 异常解除,表示当联锁条件再次满足时,重新生成机车对被意外关闭路段的占用允许,颜色集是 I_2 。

2.3.4 调度联锁过程的着色 Petri 网建模

系统的调度联锁过程模型如图 1 所示。

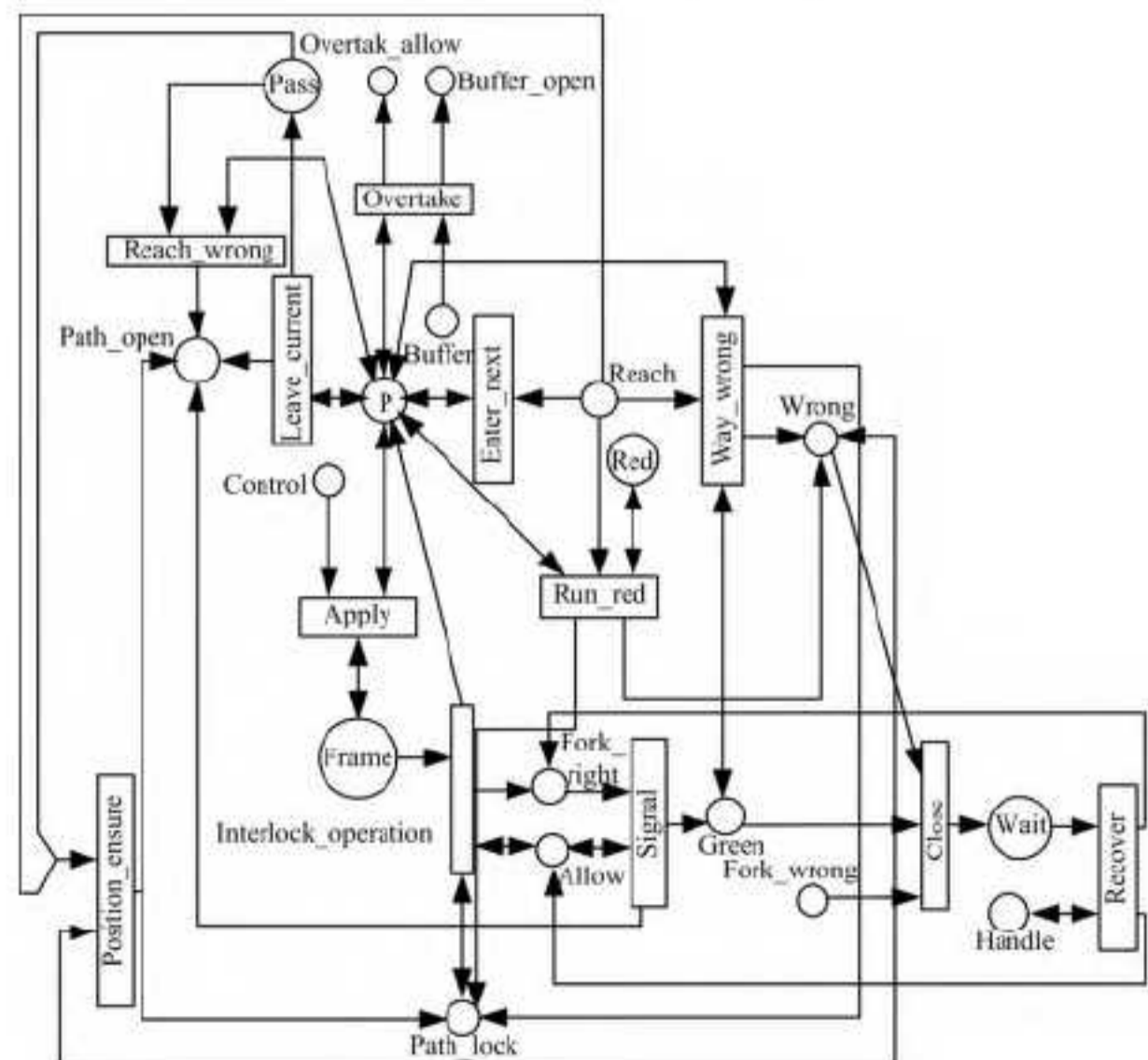


图 1 调度规则的 Petri 网建模

(1) 路段间运行模型(涉及变迁 Enter-next 及 Leave-current)

1) 当机车在某路段末端准备进入下一路段时,系统收到机车抵达的信息。变迁 Enter-next 点火,消耗此抵达信息,而库所 P 中生成机车的颜色,表示机车已抵达该路段。由于机车并未完全驶离当前运行的路段,因此库所中暂不消耗机车的颜色托肯。

2) 一段时间后机车完全进入下一路段。此时系统收到机车通过的信息,为其它机车解锁该机车驶离的路段,消耗此路段机车的颜色托肯和通过信息。

(2) 路段间调度模型(涉及变迁 Apply)

机车需要在运行到下一路段前对下一路段进行占用申请,然后主机通过联锁运算判断该申请是否可被响应,最后根据判断结果做出相应的动作。

机车运行到某路段末端时,需向系统申请进入下一路段。如果下一路段已经被申请,则 Apply 不能点火。机车等待至申请控制库所的托肯重新生成即申请允许时,变迁点火,消耗该托肯,联锁主机进行联锁运算,判断申请能否被响应。

(3) 联锁运算模型(涉及变迁 Interlock-operation)

1) 当机车运行的下一路段未被闭锁时,机车发出占用申请。首先,联锁主机收到申请,判断下一路段的闭锁情况,如果 Path-lock 中没有下一路段的托肯色,Interlocked-operation 变迁点火,开始占用下一路段。

2) Interlocked-operation 发生后,消耗占用申请,生成下一路段的托肯色以闭锁下一路段,之后为系统设置下一路段的道岔,使其在机车运行所要求的方向上。最后,系统生成申请允许标识,机车正式占用下一路段。

(4) 信号灯控制模型(涉及变迁 Signal)

当信号灯显示绿灯时,机车被允许进入该信号灯范围内的路段。联锁运算后,系统根据运算结果来控制信号灯显示绿灯或红灯。

当下一路段的道岔按要求放置无误且占用申请通过后,机车运行的下一路段开通,变迁 Signal 点火,消耗机车对路段的占用申请、道岔方向正确的标识,并闭锁道岔。之后,开通下一路段,信号灯显示绿灯,允许机车通行。

(5) 异常情况运行模型(涉及变迁 Overtake, Way-wrong, Run-red)

机车的异常运行情况分为机车超车、机车运行路线错误和路段内机车闯红灯 3 类。

1) 在井下铁路的运输中,会发生如下状况:一条路段内,前后同时有快车和慢车运行,若快车在慢车之后,需存在超车的情况,此时慢车应给快车让路;一条路段内,前后同时有重车和轻车运行,若重车在轻车之后或重车和轻车需同时进入同一路段,此时轻车应给重车让路。当有超车情况出现时,系统显示机车位置及机车运行路线前方距机车最近的缓冲区位置及道岔信息,Overtake 变迁点火。缓冲区道岔应及时扳动到可以实现错车的位置,消耗缓冲区道岔库所颜色托肯,系统给出允许超车的提示,缓冲区道岔位置扳动至需求方向。

2) 机车即将到达某一路段时,系统收到机车抵达的信息。当由于人为误扳动道岔致使机车运行至错误路段时,Way-wrong 变迁点火,生成非法占用信息,主机闭锁错误路段,消耗机车抵达信息。

3) 在信号灯显示红灯时,若由于司机误操作出现机车闯红灯状态,Run-red 变迁点火。此时仍应按正常运行情况对机车运行的路段进行解、闭锁。此过程生成非法占用信息,消

耗机车抵达信息。

(6) 机车运行路线错误处理模型(涉及变迁 Reach-wrong, Position-ensure, Close, Recover)

当机车出现运行路线错误情况时,需及时闭锁该错误路段,同时确定机车的位置,并以此重新判断其它机车的联锁条件。若该路段为其它机车的占用路段,需将其它机车置为等待状态直至错误解除后再解锁路段。

1) 确定机车运行至错误路段。出现路线错误情况后,系统应解锁错误机车之前预占用的路段。系统收到机车的通过信息后,Reach-wrong 变迁点火,消耗此通过信息和之前运行路段的机车颜色托肯,并为其它机车解锁剩余的闭锁路段。

2) 确定机车后续运行方位。系统收到错误机车的机车抵达信息后,可以根据该颜色判断机车的具体位置,Position-ensure 变迁点火,此时闭锁机车当前的路段,当系统收到错误机车的机车通过信息后,可以根据该颜色判断机车进入下一路段,Position-ensure 变迁点火,此时解锁机车刚刚离开的路段,消耗机车通过信息及异常占用库所的颜色托肯。

3) 异常情况的处理。当出现机车运行路线错误时,其它机车即将进入的路段被意外占用,系统需重新对其它机车进行联锁运算。Close 变迁点火,及时锁闭路段,消耗其它机车的信号开放托肯,将机车置于等待状态。当错误机车驶出非法占用路段后,系统重新为其它机车开通路段并重置道岔,重新生成申请允许标识并准备进行联锁运算。

结束语 本文主要阐述了现阶段井下运输系统的现状,并基于着色 Petri 网对此系统的调度联锁规则建立数学模型。

目前本系统建模仅提出理论分析,今后还有很多工作需进一步改进与完善。例如在后续工作中,可通过蚁群算法、CPN Tools 工具等进行求解及仿真运算。

参考文献

- [1] Liu J Y, Li X L. Application of colored Petri net in command and control system[C] // 2009 International Conference on Intelligent Human-Machine System and Cybernetics. 2009:323-326
- [2] Cordova F M, Canete L, Quezada L E, et al. Simulation model linked to a knowledge based system for evaluationg policies in the operation of an underground mine[J]. International Journal of Computers, Communications & Control, 2008:223-227
- [3] 赵业清. 基于时间 Petri 网的铁水物流运输系统建模[J]. 物流技术, 2014, 33:400-402
- [4] 方欢. Petri 网的优化协调控制理论及其应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2013
- [5] Zhao X H, Wang Q Q. Research of coal mine safety-production dispatching based on multilayer Petri net[C] // Sixth International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery. Tianjin: IEEE Computer Society Press, 2009:332-337
- [6] Sun P, Jiang C J. Analysis of Workflow Dynamic Changes Based on Petri Net[J]. Information and Software Technology, 2009, 51:284-292
- [7] Wang L L, Meng X J, Ni Y. Modeling and verification of colored Petri net in stop and wait protocol[C] // 2010 International Conference on Computer Design And Applications. IEEE Inc, 2010, 5:24-28
- [8] Lv Y Q, Lee C K M. Application of hierarchical colored Petri net in distributed manufacturing network[C] // Proceedings of 2010 IEEE IEEM. IEEE Inc, 2010:575-579

(下转第 78 页)

到稳定值,识别率为 98.3%。由表 3 可以看出,静音与清浊音之间互相识别错误率很低,而清音识别成浊音的错误率大约为 1.5%,浊音识别成清音的误识率大约为 3%,其原因可能在于某些清音在发音上的浊化或某些能量较小的浊音段等本身容易相互混淆,且清浊与浊音的交界处不能完全准确地判断可能导致了标注信息中的一部分错误。总的来说,实验结果证明了深度神经网络用于 $s/u/v$ 判别的有效性。

4.2 DNN 参数转换语音合成实验

该实验在于验证基于深度神经网络的参数转换对于频谱参数如 LSF 的有效性,并合成验证其能提高合成语音音质。首先根据测试语料的标注在训练语料和合成语料中匹配对应的音节信息,并取出相应语料的对应音节所在帧区间的参数 LSF,得到各音节对应的平行语料组 $dnn-in, dnn-out$ 用于训练深度神经网络,每组平行语料的帧数为 200—5000 不等,然后进行深度神经网络的训练。实验深度神经网络参数设定如表 4 所列。

表 4 深度神经网络参数设置

网络结构	80	60	60
batchsizes	10	α	1
dnn- α umepochs	10	bp- α umepochs	500

实验结果发现,16 维参数的转换效果在主观评测上的表现并不是十分理想,原因在于维度过少导致频谱细节体现不足,同时在再次合成的过程中的失真进一步加大;48 维的参数转换略好于 16 维,主要还是在于频谱细节转换得更多,但另一方面码本映射的影响导致的语音的不稳定也在一定程度上影响了听感。高 24 维的转换效果较好,在保留了低维部分后声音的自然度有较大改善。总体来说,该结果表明了基于深度神经网络的参数转换语音合成系统能有效提高合成的音质。

4.3 事件向量转换的 DNN 参数转换的语音合成实验

暂时分解的参数分别选用 16 维和 48 维的 LSF 参数,并同样进行针对 48 维 LSF 高 24 维的特征转换实验。先将测试语料的 LSF 参数进行暂时分解,得到一组事件向量 a_0 和一组事件函数 $\Phi_0(n)$,平均组数为 40 组/秒。保留事件函数不变,根据标注信息,挑选出每一组事件向量所对应的转换网络,并将转换参数与训练语料和合成语料中对应的参数统一归一化,作为深度神经网络的输入;输出转换参数经过转换/替换过程后再进行反归一化和得到最终的转换事件向量,与之前保留的事件函数重新合成 LSF 参数,再用 SPTK 工具包从 LSF 参数中重新提取出频谱参数 s_p ,与之前保存的基频 (f_0)、非周期特征 (αp) 一起合成转换后的语音。

客观评价采用相关系数,比较转换前后的 LSF 参数与训练语料 LSF 参数的相关系数。主观评价同一实验采用 A/B 偏好测试。其主观评测结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,使用事件向量进行的转换在主观评测上的得分都高于直接进行频谱参数转换的得分,这也证实了

暂时分解中我们没有转换的事件函数能保留语音的可懂度,而转换的事件向量改善了频谱细节部分,提高了音质。在暂时分解的 3 个结果中,16 维的结果相对较差,原因还是在于维度相对少导致的频谱表现不够且失真较大,48 维的表现最好,而高 24 维的表现和 16 维的差不多,原因应该是暂时分解在一定程度上减少了直接码本映射导致的音质下降。总体来说,基于深度神经网络的暂时分解参数转换语音合成能更好地提升合成音质。

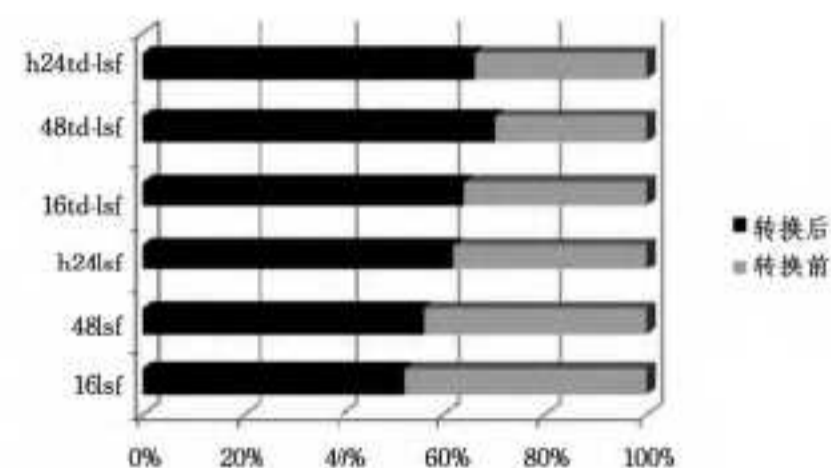


图 8 各参数转换主观评测结果

结束语 为了提高基于统计参数训练建模的 HTS 的合成效果,本文结合深度神经网络在语音合成中的应用,从参数转换的角度出发,提出一种新的合成系统,并通过实验证实了该系统的有效性,为 HTS 系统的发展以及多样化、深度神经网络及其在语音合成方面的研究奠定了基础。实验表明,该系统在性能上优于直接对频谱参数的转换,并能有效提高音质。由于本文采用的是一种码本映射的方法,该方法的缺点在于转换结果可能会出现不稳定等因素,因此在下一步的研究中,还需考虑进行其它如模型参数的转换,以弥补码本映射的不足。

参考文献

- [1] 井晓阳,罗飞,王亚棋.汉语语音合成技术综述[J].计算机科学,2012,39(Z3):386-391
- [2] 赵鸿图,刘云.改进粒子群算法的小波神经网络语音去噪[J].计算机测量与控制,2013,21(10):2799-2802
- [3] 赵建东,高光来,飞龙.蒙古语语音合成语料库标注规则的设计[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2013,44(3):51-55
- [4] 胡郁,凌震华,王仁华,等.基于声学统计建模的语音合成技术研究[J].中文信息学报,2011,25(6):275-279
- [5] 宋阳.基于统计声学建模的单元挑选语音合成方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014
- [6] 赵力.语音信号处理(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2011
- [7] 孙志军,薛磊,许阳,等.深度学习研究综述[J].计算机应用研究,2012,29(8):2806-2810
- [8] Nandasena A, Nguyen P C, Akagi M. Spectral stability based event localizing temporal decomposition [J]. Computer Speech and Language, 2011, 15(4): 381-401
- [9] 殷力昂.一种在深度结构中学习原型的分类方法[D].上海:上海交通大学,2012

(上接第 47 页)

- [9] Wang C, Feng X J, Li X, et al. Colored Petri net model with automatic parallelization on real-time multicore architectures[J]. Journal of Systems Architecture, 2014, 60: 293-304
- [10] Santana-Robles F, Medina-Marin J, Montano-Arango O, et al.

- Modeling and simulation of textile supply chain through colored Petri nets [J]. Intelligent Information Management, 2012, 4 (5A): 261-268
- [11] 马良荔,陈杰,汪丽华.模糊有色 Petri 网的形式化推理算法研究[J].计算机科学,2012,39:256-258