

改进的疏散时间计算模型在奥运赛场中的应用

张青松, 刘 茂, 赵国敏

(南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

[摘要] 基于人群流动理论和离散计算方法对传统疏散时间计算公式进行了改进, 并提出了疏散离散时间计算模型 (EDTM)。运用此改进模型对天津奥林匹克中心体育场某看台出口人群疏散时间计算, 并与 BuildingEXODUS 计算机模拟、传统公式计算结果对比分析表明, 此改进模型计算结果与计算机模拟结果非常接近, 且比传统疏散时间计算公式更为精确和符合实际情况, 可代替传统疏散时间计算公式用于体育场尤其是北京奥运赛场人群疏散时间计算及进行赛场性能化设计的依据。

[关键词] 疏散时间; 人群流动系数; 出口; 计算机模拟; 奥运赛场

[中图分类号] X928 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2007) 04-0064-06

1 引言

事故灾害一旦发生, 保证建筑内的人群及时疏散到安全地带具有重要的意义, 英国、美国、澳大利亚和中国等国家的建筑防火设计规范中都给出了人群安全疏散所需的时间要求及计算公式。目前研究一般把建筑内的人员疏散时间分为两部分即人员的预先反应时间和移动时间^[1], 后一部分移动时间根据人员疏散时经过通道的性质不同对于疏散时间的计算方法也不同, 一般来说可以把通道分为三类: 水平通道、楼梯通道和出口^[2]。恐慌状态下的人群在疏散过程中经过出口时, 必然发生堵塞现象, 这一阶段的人群疏散时间也比较难以计算。

目前相关建筑标准规范或设计指导书中提到的疏散时间的计算公式基本上是依据大量的实际观测得到的一些经验公式, 其中包括日本的 K. Togawa^[3], 加拿大 Pauls^[4], 前苏联的 Predtechenski 和 Milinski^[5], 美国 J. Fruin^[6], Stahl^[7], Nelson and MacLennan^[8], B. Poyner^[9], 英国 D. A. Purser^[10] 等针对不同建筑类型提出了相关的疏散时间计算公

式, 这些计算公式使用方便、应用广泛, 但它不能反映在人员众多的情况下可能发生拥挤的现象。虽然目前对人群在建筑物内的移动过程可以应用计算机模拟方法得到, 但由于计算机模拟主要是针对模拟过程以及人员特性等的设置来对建筑进行性能化评估, 疏散时间只是其中输出结果之一。而且对于不同的建筑物应用不同的疏散软件得出的结果也不尽相同。目前各国设计规范中仍在沿用传统的手工计算公式, 并辅以计算机模拟对建筑进行性能化设计, 因此利用手工计算对建筑疏散时间进行初步估计具有广泛的应用价值。

随着我国经济的腾飞和 2008 年申奥成功, 除了北京改扩建 32 个场馆外, 其他奥运协办城市天津、沈阳、上海、秦皇岛、青岛都已经开展了奥运场馆的建设^[11], 各个省市也相应的上了一批体育建设项目。体育赛场事故灾害相对于其他事故灾害来说是很少的, 但仅国际足联有记载自 1902—2000 年间, 世界各地共发生了 23 起球迷伤亡事件, 死亡的总人数至少有 1 380 人。另据新西兰 Kristin, 加拿大 Fruin 等事故资料统计在世界范围内体育赛场

[收稿日期] 2006-05-16; 修回日期 2006-07-13

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (70373031)

[作者简介] 张青松 (1977-), 男, 河北晋州市人, 南开大学城市公共安全研究中心博士研究生

最近 10 年内大概有 3000 多人伤亡，伤亡概率比那些经常发生的事件（如汽车碰撞）的还要大^[12]。笔者通过对 1902—2005 年间有重大人员伤亡的 34 起体育场事故原因进行了统计分析，其中涉及到出口问题的有 10 起，占总的 29%，伤亡人数 2 177 人，占总的 20%。事故灾害类型主要为出口处的人群拥挤踩踏事故，笔者提出的改进的疏散时间计算模型不仅可以对赛场出口疏散时间进行准确估计，而且可以通过滞留人数与疏散人数对比来对出口处人群拥挤踩踏事故致因进行分析，为奥运会场馆人性化设计提供依据，保障奥运安全。

2 改进的疏散离散时间模型的提出

2.1 传统疏散时间计算公式

依据日本 Togawa 推导的疏散时间公式^[3]，温丽敏等^[13]提出火灾中群集流动模型，从而对人群疏散理论进行了较为详细的阐述，即：假设聚集人群可以看做一个均质流体，那么在人群疏散方向上取一基准断面 P ，则向断面 P 前进的人群称为流入群集；流出断面 P 继续前进的人群为流出群集，如果由于某种原因，例如通路变窄，或遇到门，楼梯，台阶等通道性质的改变，便容易引起人群在基准断面 P 处的滞留与混乱，在断面 P 处滞留的人群称为滞留群集，它等于流入群集与流出群集人数之差。依据此理论推导得到人群疏散时间计算公式如下：

$$T = \frac{1}{fB} \left[N_a - \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^T f_i(t) B_i(t) dt \right] + T_0 \quad (1)$$

目前各国标准规范包括我国《体育建筑设计规范》(JGJ31-2003)及其他相关的建筑防火规范对于疏散时间的计算公式都是式(1)的简化表达式(即忽略在 $T_0 - T$ 时刻从各入口进入的人数)，只是其中符号表示不同，疏散时间简化计算式如下。

$$T = N_a / fB + k_s / v \quad (2)$$

式中 T 为疏散时间 (s)； f 为门或走道的人群流动系数 (人/人·s⁻¹)； B 为门或走道宽度 (m)； N_a 为建筑内需要疏散的总的人数； k_s 为待疏散的人群中第一个人移动到门或走道的距离 (m)； v 为人群移动速度 (m/s)。

式(2)中人群流动系数 f 是影响疏散时间的重要参量，在利用上式对建筑疏散时间进行计算过程中，通常按照通道性质设定人群流动系数为一经验常数。但在实际人群疏散尤其是恐慌人群疏散过

程中，出口或通道狭窄处通常会出现堵塞，人群流动系数并不是常量，而是随人群密度不断变化的。

2.2 人群流动系数与人群密度关系分析

人群移动速度与密度的关系许多学者都进行了大量的观测研究，除了前面对疏散时间计算公式的研究者外还包括英国的 Keith Still^[14]，荷兰的 W. Daamen 和 Hoogendoorn^[15]，香港的 S. M. Lo 等^[16]以及国内刘禹等人^[17]。其中许多研究都有相似之处，选取有代表性的研究总结如图 1 所示。

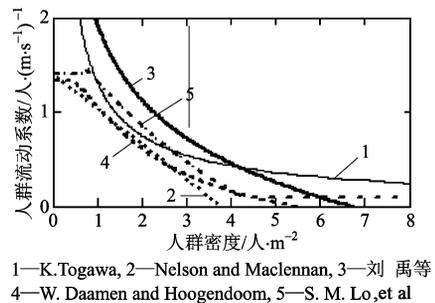


图 1 人群移动速度与人群密度经验关系总结
Fig.1 Relationship of crowd density and velocity

而人群流动系数通常表示为人群密度和人群移动速度的函数，因此根据图 1 可以得到人群流动系数与人群密度的关系如图 2 所示。

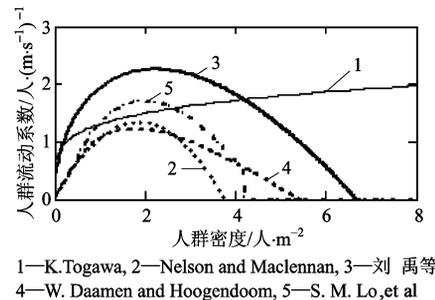


图 2 人群流动系数与人群密度的经验关系总结
Fig.2 Relationship of crowd flow rate and velocity

由图 1 和图 2 可知，由于研究对象及现场观测方法等的不同得出的关系曲线也存在一定的差异。一般来说可以将人群密度和移动速度的关系描述成对数关系，也可以描述成指数甚至线性关系。但所有研究表明，如果人员的移动速度大，必然要求的人口密度小，而相应的人群流量不一定大，反之，人群密度大，但速度又会降下来，流量也不一定大，人群流量只有在某一人口密度的条件下达到最大。

2.3 改进的疏散离散时间模型

基于人群流动理论和离散计算方法对传统疏散时间公式进行了改进,提出了疏散离散时间模型(EDTM, evacuation discrete time model)原理如下:

1) 人群流动系数依据人群密度随时间变化,其变化关系依据人群流动系数与人群密度经验关系(图 2)。

2) EDTM 模型离散时间间隔依据研究对象出口处的人群流量设定,因为人数表示为正整数,则单位时间内的人群流量也应为正整数,如《体育建筑设计规范》中规定看台出口人群流量取 40 人/min (2/3 人/s),也就是每 1.5 s 从看台出口走出一个人,因此设定离散时间间隔为 1.5 s。

3) EDTM 计算与出口区域的最大允许的人群密度有关,如果在设定的最大人群密度时的出口人群流动系数已经为零,也就是出口完全堵塞,此模型可以计算总的滞留人数以及在出口完全堵塞前的总的疏散人数;如果在设定的最大人群密度时的人群流动系数不为零,当出口处人群密度达到这一密度时,人群流动系数为一定值,即出口处的人群可以全部疏散。EDTM 虽然没有直接给出疏散时间计算公式,但其给出了疏散人数随疏散时间的变化关系,一旦疏散结束,此时的时间即为总的疏散时间。

3 改进的疏散离散时间模型在体育赛场中的应用

天津奥林匹克中心体育场为 6 层结构,南北长 380 m,东西长 270 m,标高 53 m,占地约 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,设有主席台座位 518 个,记者席座位 272 个,观众席座位 6×10^4 个,可同时容纳 8×10^4 人观看比赛。研究中选取中心体育场西看台某一出口作为研究对象,出口结构示意图如图 3 所示。

3.1 EDTM 计算表达式

3.1.1 初始参数设置 EDTM 模型计算不考虑观众从看台座席到纵走道的疏散,只考虑人员从看台纵走道出口进入看台横走道(区域 A),然后经此通道从出口疏散(图 3)。则模型相关参数初始设置如下:

1) 人流宽度设定。看台纵走道宽度 w_l 设为两股人流宽度(单股人流为 0.5 m)^[18],横走道宽度 w_b 设为四股人流宽度($w_b = 2.0 \text{ m}$),出口通道宽度设为 W 。

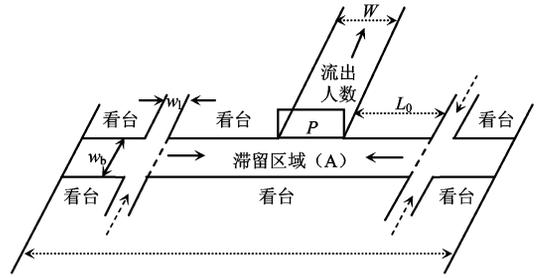


图 3 中心体育场西看台某出口结构示意图

Fig.3 Stand passage egress structure and crowd flow sketch map of Center Stadium

2) 距离和面积设定。出口与最近的看台通道距离 L_0 按 15 个座位来算为 15×0.6 (座位宽) = 9 m,出口附近区域面积 $A = w_b(2L_0 + W) \text{ (m}^2\text{)}$ 。

3) 纵走道出口人群流量设定。《体育建筑设计规范》中单股人群流量设为 40~42 人/min,研究人群流量 F' 取 40 人/min (2/3 人/s)。

4) 离散时间间隔。由式(3)可知每 1.5 s 单股人流从看台纵走道走出一个人,所以设此模型的时间间隔 $\Delta t = 1.5 \text{ s}$,疏散时间 $t = 1.5n$ ($n = 1, 2, \dots, n$)。

5) 看台人数设定。看台总的疏散人数设定为 980 人。

3.1.2 计算表达式 英国关于体育赛场安全的“绿色指导书”^[19]中以 4 人/ m^2 作为赛场人群密度的限定条件,而在 Building EXODUS 疏散软件中,人群最大密度同样也为 4 人/ m^2 ,为了进行对比分析,研究中设定 4 人/ m^2 为 EDTM 允许的最大密度,则 EDTM 计算表达式如下:

$$1) D \leq 4 \text{ 人}/\text{m}^2$$

$$N_s(n) = \sum_{i=1}^k \int_0^{t(n)} f_i w_i dt - \int_{\tau_0}^{t(n)} f W dt =$$

$$N_s(n-1) + 1.5 \alpha k F' - 1.5 W f \left[\frac{N_s(n-1)}{w_b(2L_0 + W)} \right],$$

$$N_c(n) = \int_{\tau_0}^{t(n)} f W dt =$$

$$N_c(n-1) + 1.5 W f \left[\frac{N_s(n-1)}{w_b(2L_0 + W)} \right] \quad (3)$$

$$2) D > 4 \text{ 人}/\text{m}^2$$

$$N_s(n) = \sum_{i=1}^k \int_0^{t(n)} f_i w_i dt - \int_{\tau}^{t(n)} f W dt =$$

$$N_s(n-1) + 1.5 \alpha k F' - 1.5 W f [4],$$

$$N_c(n) = \int_{t_0}^{t(n)} fWdt = N_c(n-1) + 1.5 Wf[4] \tag{4}$$

式中 $N_s(n)$ 为出口区域 A 在时刻 $t(n)$ 时的滞留人群数, $N_c(n)$ 为出口区域 A 在时刻 $t(n)$ 时的疏散人群数, $N_c(n-1)$ 为出口区域 A 在时刻 $t(n-1)$ 时的滞留人群数, $N_c(n-1)$ 为出口区域 A 在时刻 $t(n-1)$ 时的疏散人群数, $a = 2$ 为看台纵走道出口人流股数, $k = 4$ 为看台总走道出口数并假设纵走道出口人群流动系数相等。

3.2 Building EXODUS 疏散软件应用

目前开发用以描述建筑疏散特性的模拟软件已有 20 余种, 主要包括 Buildig EXODUS, EXIT89, Simulex, GRISP, EGRESS, EXITT 等。模拟选用的 Building EXODUS 疏散模拟软件是当前应用比较广泛的人员疏散计算机模拟软件之一, 是一种细网格的过程模拟软件, 可以通过不同的初始设置来确定瓶颈位置、疏散速度、疏散初始时间和终止时间以及疏散人数与疏散时间的关系等结果。

为了进行对比分析, 模拟场景设置如 EDM, 即 7 个看台的观众从看台纵走道经看台横走道从横走道出口疏散 (图 3), 在模拟软件初始设置中所有人个体特征设为默认值。

3.3 结果分析

通过与计算机模拟和传统公式计算结果对比来对改进的疏散离散时间模型 (EDTM) 进行的验证, 人群流动系数和出口宽度是影响此改进模型的重要参数。

3.3.1 模型验证 EDM 应用对象为体育赛场, 刘禹等^[17]对于人群流动系数与人群密度的关系推导是基于体育场结构特征及赛场人群特性, 因此 EDM 模型采用刘禹等推导的人群流动系数关系式。Building EXODUS 疏散软件对于出口人群流动系数默认设置的最大值为 $1.33 \text{ 人/m}\cdot\text{s}^{-1}$, 传统疏散时间计算公式也同样采用此值。EDTM 计算结果与计算机模拟、传统公式计算结果对比如图 4 所示。

由图 4 可知, EDM 计算结果与计算机模拟结果比传统公式计算结果更为接近, 且疏散人数随时间变化并不是线性增长的, 在 120 s 处有一个比较明显的弯曲, 而其它两条曲线几乎为一条直线, 因此 EDM 计算结果更符合实际人群疏散情况。

3.3.2 基于不同人群流动系数与人群密度关系的

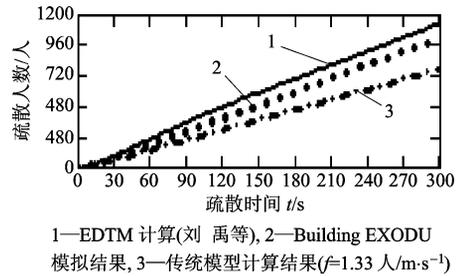


图 4 EDM、计算机模拟及传统公式计算对比
Fig.4 The compared analysis with EDM, previous model and building EXODUS simulation

对比分析 为了更好的说明人群流动系数对 EDM 计算结果的影响, 根据人群流动系数与人群密度经验关系总结 (图 2), 并代入 EDM 计算式, 与计算机模拟和传统计算公式进行对比分析如图 5。

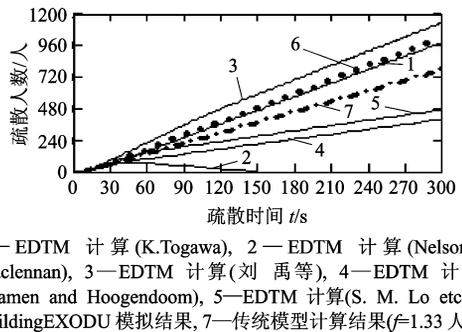


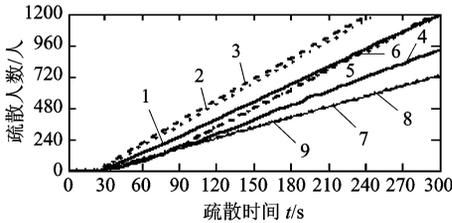
图 5 EDM、计算机模拟及传统公式计算对比
Fig.5 The compared analysis with EDM, previous model and building EXODUS simulation

从图 5 可以看出不同研究者推导出的人群流动系数与人群密度的关系带入 EDM 模型所得的计算结果差异很大, 其中刘禹等人和 K. Togawa 推导的关系计算与模拟结果比较接近, 而其他由于根据不同的场所的人群流动系数与人群密度的关系推导导致了与体育场特定场所人群疏散计算机模拟结果的差异, 因此 EDM 的应用一定要注意选取针对特定场所的人群流动系数与人群密度关系的经验公式。

另外从图 5 可以看出依据 Nelson & Maclellan 关系计算的疏散人数并不随时间增长而增加, 这是因为研究是以 4 人/m^2 作为最大允许的人群密度, 而 Nelson & Maclellan 推导关系式中当人群密度小于 4 人/m^2 时出口人群流动系数已经为零, 因此 EDM 计算结果随着疏散时间的增长疏散人数先增

加然后逐步减少,直至出口完全堵塞为止。

3.3.3 基于不同出口宽度的对比分析 出口宽度是影响人群流量的一个重要参数,分别设定2 m, 3 m, 4 m宽度的赛场看台横走道出口利用EDTM进行计算(人群流动系数取值基于刘禹等推导的关系式),并与设定不同宽度的计算机模拟和传统计算公式计算结果对比分析如图6所示。



1—EDTM 计算(2 m 宽出口), 2—EDTM 计算(3 m 宽出口), 3—EDTM 计算(4 m 宽出口), 4—Building EXODUS 计算(2 m 宽出口), 5—Building EXODUS 计算(3 m 宽出口), 6—Building EXODUS 计算(4 m 宽出口), 7—传统模型计算(2 m 宽出口), 8—传统模型计算(3 m 宽出口), 9—传统模型计算(4 m 宽出口)

图6 EDTM、计算机模拟及传统公式计算对比

Fig.6 The compared analysis with EDTM, previous model and building EXODUS simulation

由图6可知,传统的计算公式对于不同宽度出口疏散时间与疏散人数关系曲线是重合的,而EDTM计算和Building EXODUS模拟结果对于不同宽度出口变化趋势是相同的,进一步说明了EDTM应用于疏散时间计算的准确性,并且更能反映实际人群疏散情景。

4 结论

笔者提出了一个改进的疏散离散时间模型EDTM,通过奥运赛场实例分析可得出如下结论:

1) 传统疏散时间计算公式只是一个简化模型,人流流动系数设置为常数。但实际上出口或狭窄通道处的人群流动系数是随人群密度不断变化的,如果在传统的计算公式中人群流动系数设置相对小的话,所得的疏散时间会比实际结果要长,反之亦然。这是传统计算公式的缺陷,但这点恰恰是EDTM模型的优势,依据经验人群流动系数关系式计算疏散时间、计算结果与计算机模拟结果非常接近。

2) EDTM模型不仅可以计算疏散时间,从其推导原理可知,通过设定不同的密度条件可以得到不同时刻出口处的滞留人数,目前经常发生的人群

拥挤踩踏事故的主要致因为出口或通道狭窄处的人群高度聚集,因此通过对特定时刻滞留人数与疏散人数的对比可以解释人群拥挤踩踏事故致因机理问题。

其他变量如横走道人流宽度,纵走道出口人群流量及人流宽度等都对出口人群疏散时间存在一定的影响。

参考文献

- [1] Spearpoint M. The effect of pre-evacuation distributions on evacuation times in the simulex model [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, 14: 12~14
- [2] 袁理明, 范维澄. 建筑火灾中人员安全疏散时间的预测[J]. *自然灾害学报*, 1977, 6(2): 28~33
- [3] Togawa K. Study of Fire Escapes Basing on the Observations of Multiple Currents [R]. Tokyo: Report No.14, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, 1995
- [4] Pauls J L. Effective width model for evacuation flow in buildings [A]. *Proceedings of Workshop on Engineering Applications of Fire Technology* [C]. National Bureau of Standards, 1980. 215~232
- [5] Predtechensk V M, Milinsk A I. Planning for Foot Traffic Flow in Buildings [M]. New Delhi: Amerind Publishing, 1978
- [6] Fruin J. Pedestrian Planning and Design [M]. The Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners. New York, 1971
- [7] Stahl F. BFIRE II: A Behavior-based Computer Simulation of Emergency Egress During Fires [J], *Fire Technology*, 1982, 18(1): 49~65
- [8] Nelson H E, MacLennan H A. Emergency Movement, SFPE Handbook of fire Protection Engineering [M]. NFPA Quincy MA, USA, 1988
- [9] Poyner B, Robinson D, Hughes N, et al. Safety in Football Stadia: A Method of Assessment [R]. London: Scicon Scientific Control Systems Limited, 1972
- [10] Purser D A, Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations [J], *Safety Science*, 2001, 26, 157~182
- [11] 第29届奥林匹克运动会组织委员会. 北京奥运行动规划(BOCOG) [EB/OL]. <http://en.beijing-2008.org/76/29/column211612976.shtml>, 2002-03-28
- [12] Hoskin K. Fire Protection and Evacuation Procedures of Stadia Venues in New Zealand [D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 2004. 3~7
- [13] 温丽敏, 陈全, 陈宝智. 火灾中群集疏散的设计方法及计算机仿真[J]. *东北大学学报, 自然科学版*, 1998, 19(5): 445~447

- [14] Still G. K. Crowd Dynamics [D/OL]. Coventry, UK; University of Warwick, <http://www.crowddynamics.com/Thesis/Chapter%205.htm>, 2000
- [15] Daamen W. H. Controlled experiments to derive walking behaviour [J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2003, 3(1): 39~59
- [16] Lo S M, Z. Fang Z, P. Lin P, et al. An evacuation model: the SGEM package [J], Fire Safety Journal, 2004, 39: 169~190
- [17] 刘禹, 林威, 李德志. 奥运场馆人群疏散定量模型[R]. 哈尔滨工业大学奥林匹克数学竞赛, 2002
- [18] 曾涛, 体育建筑设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 114~114
- [19] Stationery Office/ DCMS/The Scottish Office. Guide to Safety at Sports Grounds (the Green Guide) (Fourth Edition) [C]. 1997

A Modification of Evacuation Time Computational Model and Simulation Comparison Analyses With Olympic Stadium

Zhang Qingsong, Liu Mao, Zhao Guomin

(Research Center of Urban Public Safety, Nankai University, Tianjin 300071, China)

[Abstract] In this paper, a computational evacuation discrete time model (EDTM) has been presented to analyze the building egress evacuation time problem with previous works, and discusses the advantages of the use of the modified model over the use of the previous model. EDTM uses crowd flow theory and discrete computational methods to identify various width of egress that are available to the occupants for movement, which is more accurate and practicable because the crowd flow rate is variable, while the crowd flow rate as the function of crowd density based on the empirical relations between density and velocity of crowd movement. A case of stadium stand egress is chosen for the validity of EDTM, and a comparison of EDTM with previous model and computer simulation indicates that both the EDTM and the simulation curves are found to give better predictions than the previous model. Based upon the results, EDTM shows great value in dealing with stadium, especially the 2008 Beijing Olympic stadium, evacuation time calculation, egress performance design, selecting and optimizing of routes and so on.

[Key words] evacuation time; crowd flow rate; egress; simulation; Olympic stadium