

地铁施工阶段险兆事件危险源系统结构研究*

文艳芳 刘嘉欣

(西安科技大学建筑与土木工程学院,710054,西安//第一作者,副教授)

摘要 为了提高地铁施工风险预控管理水平,以地铁施工阶段险兆事件的危险源为研究对象,从人-物-环境-管理4个方面对危险源进行分类,明确险兆事件的致因因素,基于解释结构模型法对地铁施工阶段险兆事件危险源结构进行系统研究。研究结果表明:利用解释结构模型法分析地铁施工阶段险兆事件危险源系统结构是可行的,分析结果与三类危险源理论相契合,并且与实际情况一致。

关键词 地铁施工;险兆事件;危险源;解释结构模型

中图分类号 TU714:U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2017.12.009

Study of Near-miss Hazard System Structure in Subway Construction Stage

WEN Yanfang, LIU Jiabin

Abstract In order to improve the level of risk pre-control management in subway construction stage, near-miss hazard in subway construction is selected as the research object. Hazards are classified from aspects of man, object, environment and management to detect factors that cause near-miss, and the structure of near-miss hazard in subway construction is studied systematically based on ISM. The results show that it is feasible to use ISM for the analysis of near-miss hazard system structure in subway construction stage. The analysis result corresponds to the theory of three hazard sources, and consistent with the actual situation.

Key words subway construction; near-miss; hazard source; interpretative structural modeling (ISM)

Author's address School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

地铁建设在我国蓬勃发展,与此同时,各种类型的地铁事故也频频发生,这些事故的发生不仅造成了巨大的人员、经济损失,而且也造成了恶劣的社会影响^[1]。所以,加强地铁安全管理,防止地铁事故的发生具有重要意义。

任何事故发生前都有征兆可循。在一起严重事故发生之前,会出现许多微小的无伤害、无损失或只有轻微伤害、损失的事件,即险兆事件^[2]。海因里希法则^[3]表明:要消除重伤事故,须从消除险兆事件着手。但在目前的地铁安全管理中,大多只研究事故致因机理,忽略了险兆事件,是一种被动的管理方法,无法从事件源头上预防事故的发生。

险兆事件的研究遍布于航空^[4]、化工^[5]、医疗^[6]和消防^[7]等高危行业,而对地铁工程中险兆事件的研究却很少。在我国,文献[8]第一次将险兆事件概念引入地铁施工安全管理中,构建了适用于地铁施工安全管理的险兆事件管理系统。文献[9]针对地铁施工的安全管理问题,构建出地铁工程的险兆事件知识库。在此基础上,文献[10]对险兆事件管理系统在地铁运营阶段轨行区施工中的应用进行了初步探讨。由此可见,险兆事件在地铁工程中的研究大多限于险兆事件管理方面,对险兆事件致因分析尚没有研究。因此,本文通过对地铁施工阶段的险兆事件危险源进行分类,采用解释结构模型法,对地铁施工阶段的险兆事件危险源系统结构和要素之间的影响关系进行分析和研究,明确导致险兆事件发生的根本原因和直接原因,旨在提高地铁施工风险预控水平,为从根本上解决地铁施工安全管理问题提供一种新方法。

1 危险源要素分析

本文根据 GB/T 13861—2009《生产过程危险和有害因素分类与代码》的规定,将地铁施工阶段险兆事件的危险源分为人的因素、物的因素、环境因素和管理因素4类。

(1) 人的因素。是指由于施工人员的不安全行为导致在地铁施工中发生的各类安全事故。如:特殊作业施工人员无证操作、疲劳操作等违规操作;

* 国家自然科学基金项目(51374165);西安科技大学博士科研启动基金项目(2014QDJ028)

施工人员缺乏安全施工意识,对安全施工不够重视;施工人员不熟悉操作规程,技术素质低等。

(2) 物的因素。是指物的不安全状态,包括施工材料的不安全状态和设备的不安全状态。施工材料的不安全状态包括使用不合格的材料、有缺陷的构配件和预制件、有质量问题的施工材料等因素。比如,不合格材料常会挥发有毒、有害气体,对环境和施工人员造成危害,并且腐蚀性材料还会导致施工机械结构受损。设备的不安全状态包括施工机械故障和安全防护设施缺陷。比如,施工机械设备陈旧老化,施工机械设备的维护不够使得设备性能低下,施工人员安全防护用品佩戴不全等。

(3) 环境因素。是指施工现场的自然环境和作业环境不良,如施工现场存在地裂缝、邻近建筑物、地下管线和地下水等。

(4) 管理因素。是指管理缺陷,包括内部管理失误和外部监管不到位。内部管理失误是指管理者在决策、管理和组织过程中出现问题,如安全规章制度不健全、奖惩不明和安全教育不够等。外部监管不到位是指相关部门疏于对施工过程的监管,如对施工现场安全检查力度不够或检查流于形式,未落到实处等。

上述危险源之间相互影响,共同组成地铁施工阶段险兆事件的危险源系统结构。一般情况下,当这些危险源交互作用,就有可能导致险兆事件发生。

2 危险源系统结构建模

2.1 解释结构模型法的建模步骤

解释结构模型法(Interpretative Structural Modeling, 简称为 ISM)将复杂系统分解为若干子系统(要素),利用人们的实践经验和知识,以及电子计算机的帮助,逐步明确若干要素间的结构关系,最终将系统构成一个多级递阶的结构模型。

鉴于 ISM 的以上特征,本文将引入地铁施工阶段险兆事件的分析中,研究地铁施工阶段险兆事件危险源系统结构及其系统要素对地铁施工阶段险兆事件的影响关系。其基本步骤如下:

- (1) 选择系统要素,制定系统要素明细表。
- (2) 根据系统要素明细表,建立系统要素关系表。
- (3) 根据系统要素关系表,构造有向连接图,并建立邻接矩阵。

邻接矩阵用 A 表示,其元素 a_{ij} 的值是:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当箭杆从 } P_i \text{ 指向 } P_j \text{ 时} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

(4) 通过矩阵运算求出该系统的可达矩阵。

定义可达矩阵 M 满足如下运算:

$$A_1 \neq A_2 \neq A_3 \neq A_4 \neq \dots \neq A_{n-1} = A_n = M$$

其中, $A_r = (A+I)^r$, 符合布尔运算法则; $r \leq n$, n 为系统节点总数; I 为单位矩阵。

将要素 P_i 可以到达的要素集合定义为要素 P_i 的可达集,用 $R(P_i)$ 表示。

$$R(P_i) = \{P_j \in N \mid m_{ij} = 1\}$$

式中:

$R(P_i)$ ——由可达矩阵中的第 P_i 行中所有矩阵元素为 1 的列对应的要素集合而成;

N ——所有节点的集合;

m_{ij} —— i 节点到 j 节点的关联(可达)值, $m_{ij} = 1$ 表示 i 关联 j 。

将要到达要素 P_i 的要素集合定义为要素 P_i 的前因集,用 $A(P_i)$ 表示。

$$A(P_i) = \{P_j \in N \mid m_{ji} = 1\}$$

式中:

$A(P_i)$ ——由可达矩阵中的第 P_i 列中所有矩阵元素为 1 的行对应的要素集合而成。

(5) 对可达矩阵进行分解。

对可达矩阵进行分解即级别划分。若 P_i 是最上一级要素,它必须满足下列条件:

$$R(P_i) = R(P_i) \cap A(P_i)$$

这样,就可用这一条件,确定出结构的最上一级要素。然后,暂时去掉它们,再利用这个条件,便可求得结构的次一级要素,一直做下去,就能把各要素一级一级划分开。

(6) 建立解释结构模型。

2.2 求解解释结构模型

2.2.1 选择系统要素

结合上述从人-物-环境-管理 4 个方面对危险源的划分,采用文献收集、调研访谈等方法,针对地铁施工阶段险兆事件进行致因分析,归纳出地铁施工阶段险兆事件危险源的系统要素,并制定系统要素明细表,如表 1 所示。

解释结构模型中系统要素为:外部监管不到位 P_1 ,安全管理失误 P_2 ,安全规章制度缺陷 P_3 ,施工材料不安全状态 P_4 ,排水系统不佳 P_5 ,施工人员的不安全行为 P_6 ,安全防护设施缺陷 P_7 ,施工环境不良 P_8 ,施工机械故障 P_9 ,施工阶段险兆事件 P_{10} 。

表 1 地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素明细表

危险源类别	地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素
人的因素	施工人员的不安全行为
物的因素	施工机械故障,安全防护设施缺陷,施工材料不安全状态,排水系统不佳
环境因素	施工环境不良
管理因素	安全管理失误,安全规章制度缺陷,外部监管不到位

2.2.2 建立系统要素关系表

列出地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素之间的作用关系,建立系统要素关系表,如表 2 所示。

表 2 地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素关系表

P_i	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
P_1		导致								
P_2			导致							
P_3				导致						
P_4						导致	导致	导致	导致	导致
P_5				导致		导致	导致	导致	导致	导致
P_6				导致				导致	导致	导致
P_7				导致		导致		导致		导致
P_8						导致				导致
P_9				导致		导致				导致
P_{10}										

根据系统要素关系表,作出系统要素有向连接图,如图 1 所示。

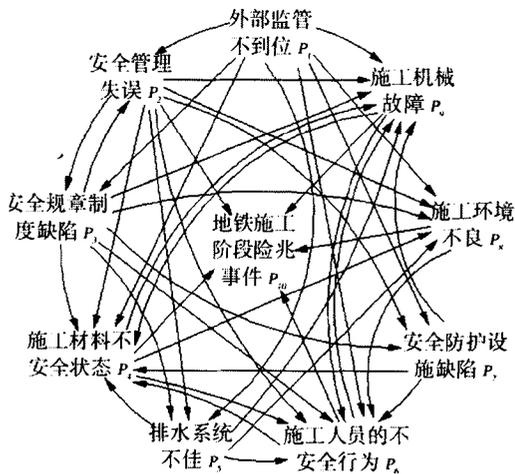


图 1 地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素有向连接图

由表 2 和图 1 易得各系统要素之间的相互影响关系,但是无法得知各系统要素之间的级别关系。所以,仍需对数据进行进一步处理。

2.2.3 建立邻接矩阵

根据图 1 所构造的有向连接图,建立邻接矩阵 A 。

$$A = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 & P_9 & P_{10} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2.2.4 求解可达矩阵

运用 MATLAB7.0 软件对邻接矩阵 A 进行计算,可以求得可达矩阵 M 。

$$M = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 & P_9 & P_{10} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

2.2.5 分解可达矩阵

对可达矩阵 M 进行分析,分别求出每个要素的可达集 $R(P_i)$,前因集 $A(P_i)$ 及其交集 $R(P_i) \cap A(P_i)$,如表 3 所示。

表 3 第一级可达集、前因集及其交集

P_i	$R(P_i)$	$A(P_i)$	$R(P_i) \cap A(P_i)$
P_1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	1	1
P_2	2,3,4,5,6,7,8,9,10	1,2,3	2,3
P_3	2,3,4,5,6,7,8,9,10	1,2,3	2,3
P_4	4,6,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_5	4,5,6,8,9,10	1,2,3,5	5
P_6	4,6,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_7	4,6,7,8,9,10	1,2,3,7	7
P_8	4,6,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_9	4,6,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_{10}	10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,1	10

由表 3 可知, $R(P_{10})=R(P_{10}) \cap A(P_{10}),P_{10}$ 符合

条件,因此 P_{10} 为第一级要素。然后在可达矩阵 M 中去掉 P_{10} 所在的行和列,得到第二级可达集、前因集及其交集,如表 4 所示。

表 4 第二级可达集、前因集及其交集

P_i	$R(P_i)$	$A(P_i)$	$R(P_i) \cap A(P_i)$
P_1	1,2,3,4,5,6,7,8,9	1	1
P_2	2,3,4,5,6,7,8,9	1,2,3	2,3
P_3	2,3,4,5,6,7,8,9	1,2,3	2,3
P_4	4,6,8,9	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_5	4,5,6,8,9	1,2,3,5	5
P_6	4,6,8,9	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_7	4,6,7,8,9	1,2,3,7	7
P_8	4,6,8,9	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9
P_9	4,6,8,9	1,2,3,4,5,6,7,8,9	4,6,8,9

同上,可得第二级要素: P_4 、 P_6 、 P_8 、 P_9 。然后在可达矩阵 M 中去掉 P_4 、 P_6 、 P_8 、 P_9 所在的行和列,得到第三级可达集、前因集及其交集,如表 5 所示。

表 5 第三级可达集、前因集及其交集

P_i	$R(P_i)$	$A(P_i)$	$R(P_i) \cap A(P_i)$
P_1	1,2,3,5,7	1	1
P_2	2,3,5,7	1,2,3	2,3
P_3	2,3,5,7	1,2,3	2,3
P_5	5	1,2,3,5	5
P_7	7	1,2,3,7	7

同上,可得第三级要素: P_5 、 P_7 。然后在可达矩阵 M 中去掉 P_5 、 P_7 所在的行和列,得到第四级可达集、前因集及其交集,如表 6 所示。

表 6 第四级可达集、前因集及其交集

P_i	$R(P_i)$	$A(P_i)$	$R(P_i) \cap A(P_i)$
P_1	1,2,3	1	1
P_2	2,3	1,2,3	2,3
P_3	2,3	1,2,3	2,3

同上,可得第四级要素: P_2 、 P_3 。然后在可达矩阵 M 中去掉 P_2 、 P_3 所在的行和列,得到第五级可达集、前因集及其交集,如表 7 所示。

表 7 第五级可达集、前因集及其交集

P_i	$R(P_i)$	$A(P_i)$	$R(P_i) \cap A(P_i)$
P_1	1	1	1

同上,可得第五级要素: P_1 。

2.2.6 建立解释结构模型

根据上述级别划分结果和可达矩阵 M ,建立地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素解释结构模型,如图 2 所示。

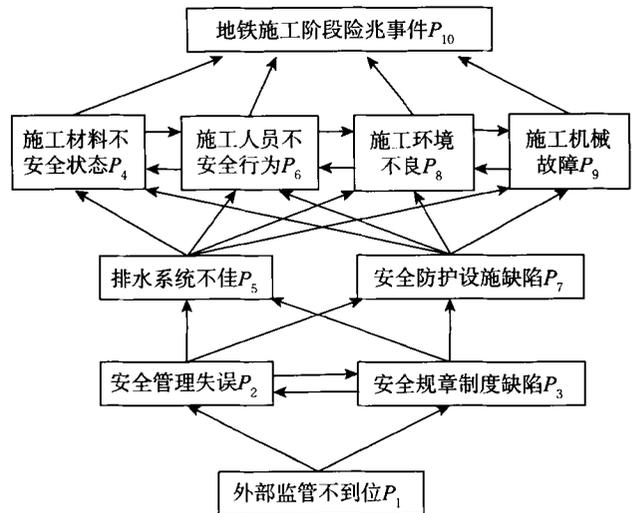


图 2 地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素解释结构模型

3 危险源系统要素级别分析

通过级别划分建立的地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素解释结构模型,清晰地表达了系统中各要素之间的级别关系,最上一级表示系统的最终目标,往下各级分别表示上一级的原因。

地铁施工阶段险兆事件危险源系统要素解释结构模型的建立,将危险源系统要素分为 5 级。第 1 级为系统的最终的目标——地铁施工阶段险兆事件。从第 2 级到第 5 级的系统要素对地铁施工阶段险兆事件的影响逐步由直接原因过渡到根本原因,即导致地铁施工阶段险兆事件发生的根本原因是安全管理失误、安全规章制度缺陷和外部监管不到位等管理监督型危险源,而不是施工材料不安全状态、施工人员的不安全行为、施工环境不良和施工机械故障等现场作业型危险源。

从图 2 可以看出,在地铁施工阶段险兆事件危险源系统各要素之间,不仅级与级之间存在着影响关系,而且各级要素之间也存在着影响关系,这些要素的交互作用最终导致地铁施工阶段险兆事件的发生。由于外部的监管不到位,在一定程度上为施工单位的不安全行为提供保护,使得施工单位的安全管理组织为了追求经济利益或追赶工期疏于安全管理,导致安全管理规章制度缺陷,并且使已有的安全规章制度形同虚设,进而可能使安全防护设备等安全保障型要素在施工过程中失效。此时,施工人员行为等现场作业型要素如果发生偏差,那么在层层防御失效的情况下,就会直接导致地铁施工阶段险兆事件的发生。

结合文献[11]的三类危险源理论,在图2中,施工材料不安全状态属于第一类危险源;施工机械故障、排水系统不佳、安全防护设施缺陷、施工环境不良和施工人员的不安全行为属于第二类危险源;安全管理失误、安全规章制度缺陷和外部监管不到位属于第三类危险源。由图2可知,导致地铁施工阶段险兆事件发生的根本原因是安全管理失误、安全规章制度缺陷和外部监管不到位等第三类危险源,这与三类危险源理论中重点强调第三类危险源的识别与控制是相契合的。因此,为预防地铁施工阶段险兆事件的发生,可引入文献[12]提出的预防事故“三双手”理论,从安全技术、安全装备、安全管理、规章制度、安全文化、哲学等方面加以管理和控制。

4 结语

(1) 利用解释结构模型法来分析地铁施工阶段险兆事件危险源系统结构是可行的,根据建立的解释结构模型可以将危险源系统结构进行级别划分,结果与三类危险源理论相契合,并与实际情况一致。

(2) 导致地铁施工阶段险兆事件发生的根本原因是安全管理失误、安全规章制度缺陷和外部监管不到位等管理监督型危险源,而不是施工材料不安全状态、施工人员的不安全行为、施工环境不良和施工机械故障等现场作业型危险源。

(3) 在地铁安全管理中不仅要加强“硬支撑”管理如安全防护设备等,而且应重视运用安全理念等“软支撑”对施工人员进行全面教育,增强施工人员的安全意识,形成先进的安全文化和安全理念。只有将两者相互结合,才能从根本上避免险兆事件的发生。

(4) 解释结构模型法假定各级要素间是一种递

阶结构关系,不存在级间反馈回路,而实际问题却常存在反馈关系。另外,ISM法常采用两两要素间的关系符号,有时仅看两两要素间关系而不从整体考虑,得出结果也会有片面性,这是解释结构模型法的一些不足之处。

参考文献

- [1] 阳光.地铁工程施工危险源辨识研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [2] 秦风竹.美国化工行业未遂事件管理(上)[J].安全、健康和环境,2007,7(7):2.
- [3] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1948.
- [4] DELMAR M, MARK F, JOHN M. Migrating an incident reporting system to a CCPS process safety metric model [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011(24): 819.
- [5] JAMES R P, ULKU O. Near-miss incident management in the chemical process industry [J]. Risk Analysis, 2003, 23(3): 445.
- [6] CAPRICE C G. Learning from adverse events and Near-misses [J]. Journal of Gastrointest Surgery, 2009(13):3.
- [7] RITWIK U. Risk-based approach to near miss [J]. Hydrocarbon Processing, 2002(10):93.
- [8] 周志鹏,李启明,邓小鹏,等.险兆事件管理系统在地铁施工安全管理中的应用 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6):597.
- [9] 邓小鹏,周志鹏,李启明,等.地铁工程 Near-miss 知识库构建 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5):1103.
- [10] 戴姝婷,郑瑛.险兆事件管理系统在地铁轨行区施工中的应用 [J]. 现代交通技术, 2014, 11(3):80.
- [11] 田水承.第三类危险源辨识与控制研究[D].北京:北京理工大学,2001.
- [12] 田水承,冯长根,李红霞,等.对安全科学体系及其与相关学科关系的探讨[J].煤炭学报,1999,24(6):664.

(收稿日期:2017-06-17)

《铁路“十三五”发展规划》发布

国家发展改革委11月24日公布的《铁路“十三五”发展规划》指出,到2020年,中国铁路营业里程达到15万km,其中高速铁路3万km,复线率和电气化率分别达到60%和70%左右。东部干线路网持续优化完善,中西部路网规模继续扩大,达到9万km左右,西部与东中部联系通道进一步拓展,区域内部联系更加紧密。对外通道建设有序推进,与周边国家铁路互联互通取得积极进展。城际、市域(郊)铁路有序推进,经济发达、人口稠密、城镇密集地区形成城际、市域(郊)铁路骨干网络,城际和市域(郊)铁路规模达到2000km左右。综合枢纽配套衔接,建成一批设施设备配套完善、现代高效的综合交通枢纽。建设支线铁路约3000km,基本实现客运“零距离”换乘和货运“无缝化”衔接。在运输服务方面,规划提出三方面要求:一是覆盖范围更为广泛,全国铁路网基本覆盖城区常住人口20万以上城市,高速铁路网覆盖80%以上的大城市。二是旅客出行更为便捷,动车组列车承担旅客运量比重达到65%。实现北京至大部分省会城市之间2~8h通达,相邻大中城市1~4h快速联系,主要城市群内0.5~2h便捷通勤。三是货物运输更为高效,货运能力基本满足跨区域能源、资源等物资运输需要,“门到门”、快速送达的全程物流服务体系初步形成。

(摘自中新社2017年11月24日电讯稿,记者周锐报道)