

伦敦地铁隧道网的维护

Gleig Frazer

(Tube Lines Limited, London)

摘要 当要全面考虑伦敦地铁的维护或将来的发展时,若对伦敦地铁历史(见附录)有个初步的了解将会是很有帮助的。这个系统的发展已经超过 100 年了,并且只是最近才改由一个独立的机构来管理。本文将部分地解释不同线间施工差异的复杂性。

伦敦地下结构的大部分是地铁隧道,其中一些隧道自从在 19 世纪被建造以来还从来没有被完全评估过。当时,他们所使用的材料的物理性质和耐久性还不是完全地被人们所了解;如果这些隧道真是被“设计”的话,而且人们也只是按照经验来设计这些隧道的。

当在 1998 年公私合营企业(PPP)刺激该程序最早开始实施的时候,隧道资产中的一些竖井和其它一些部分似乎已经被遗忘或丢失了。

当前维护计划的一个主要部分就是确定需要维护和改善的大约 178 km 的地铁隧道资产现在所处的状况。

关键词 伦敦地铁维护 评估程序 检测方法

维护的根本问题

在维护理念上主要的改变是指从“修修补补尽量利用原有的东西”到“评价、维护和改进资产价值”。“修修补补尽量利用原有的东西”这个过程是要求充分地观察隧道中的缺陷,因此仅仅只能保持线路的运行安全。它要求大量的“工程判断和经验”,并且取得了惊人的成果,但是它却不能够改进隧道工程。

而“评价、维护和改进资产价值”这个过程对于投资和发展系统是很有必要推广和实施的。它建立了一个正确的有关当前情况的记录,从而可以提供一条准线评估进步和改善之处。它也使我们通过鉴别当前的问题区域和预测将来的问题区域从而有能力去规划我们的维护工作。它要求我们去探测(检测)、测量、试验、了解使用材料的物理性能和化学性能,了解土壤环境和需要进行的调查。

其它的维护问题在于基本的结构问题。例如,在已有隧道的的影响范围内或附近维护一条新的旁通道,或者在已有隧道下方再建一条新的 LUL 隧道,或者被外部结构所影响(如一个新建的多层的桩基础建筑对隧道的影响),这些都影响了原来的隧道,

从而产生了结构问题。

评估程序

分析

这篇文章不是只想强调评定或分析隧道的一种方法。作者的观点是,提供一种理性的、一致的方法,从而得出合适的安全系数,用这个安全系数来进行分析,就会提供一个合理的条件、安全指标、维修的必要性和优先维修的区域指标。

在采用的分析方法中,所使用的参数的合理选择无论怎样都是有意义的,并且必须通过检测、取样和测试来确定。

当前地铁公司所采用的方法在附录 A“地铁公司工程项目”中已简要说明。

检测(过去)

过去伦敦地铁轨道每 24 小时就检查一次,并且每 12 年做一次隧道铸铁衬砌。这些周期不是随便决定的,它们是按照经验根据隧道损坏速率和保证地铁正常运营来确定的。当要对隧道进行评估时,进行特别的辅助检查显然是必要的,这样可以了解哪些部位因特殊事件而发生了改变。

很显然传统程序需要更改。传统过程不仅意味着在地铁线路按预期应该承担责任的 11 年时间里,一些隧道可能没有被检查,而且在地铁线路的整个“使用期限”内,一些隧道仅仅只要求进行两次检查。传统程序就是一个不能对改进进行估量的程序,这也是它不再被人们所接受的原因。

除了报告中提及的部位需进行特别检查外,在隧道内检查一般都是从头到尾,边走边看。如:水位的上升,保护层的开裂,通过检查就可发现的明显位移或结构的其他破损迹象。

“老街”(“Old Street”)就是一个例子,它显示了检测的好与坏两方面,并且说明了对最初的发现坚持到底地进行下去及在得出一个合适的结论之前需要详细考虑事情的原因的必要性。

检测(目前)

基于以上原因,有必要在衬砌做好后确定工程当前的状态评估整体价值。不仅要确定其目前是稳定的,还要评定其剩余的使用年限(如:在必须进行维修或替换之前,地铁各个部分还能使用多久)。

前边已经讨论过在商业和投资上的原因,下边,有必要详述检查体系中的一些疏漏之处。

目前的检测需要提供自 2003 年起,7.5 年内详细分级的地铁隧道资产的情况,这段时间内,将进入需对地铁线路承担责任的时期。这需要全面检测和评定地铁线路关闭导致的地铁各部分的资产的损失,检测包括隧道(车站和区间)、接头、旁通道和钢支撑、每个竖井(包括电梯竖井)、端头墙等等在内的各个部分的情况。对于每个部分所使用的材料也应进行类似的审查,如周边的土体、回填注浆环境、地下水水位(目前的和预测的)等。

必须利用好每一个机会,如在轨道封闭(track closure)、车站升级时清除了表面保护层后我们将能看到 100 年来都没被人看到的区域。

对于岩石取样、钻探或其他具有破坏性的测试应提出一定的要求。

在检测中推荐使用类似超声波检测、通过泥浆护壁取样、试验等无破坏性的检测方式。

在可能出现问题的区域,应抓紧进行检测。这样可以保证全面的检测工作与必要的或可能必要的紧急准备工作同时展开。

一旦出现预计的情况,我们将能迅速地作出评定,讨论并实施维护和改进方案。

检测(将来)

我们得到的关于未来地铁设计的一个主要经验就是:履行英国的结构设计和规范(CDM)。从本质上说,安全措施就是为了结构物在使用过程中进行检测而准备的。同样的,规范也要求建立一套针对即将达到使用年限日趋超旧的结构的安全系统。

将来车站完工后,必须提供有关结构检测的鉴定材料,甚至可能需要提供隧道内每隔一段距离的土样及线路检测材料。显然,这将有助于“安全文件”中数据的系统保存。

通过初步尝试将前边提出的检测方案应用于伦敦地铁,将使地铁运营更为安全。通过 7.5 年来的专题研究,我们将能评定百年来隧道中的磨损和裂缝所产生的后果。另外,我们有希望为后继者提供一些合理的措施,以保证所做的尝试是安全的。通过以上这些措施,将能够记录我们所发现的全部内容。

当代科技能为我们提供智能化的地铁系统。当代应变超标或某一传感器与相邻传感器相隔太远时将发射信号(可能是一长串呻吟声、尖叫声或求救声)。

评估

过去,只有确定问题存在或某处结构需要改变的时候才对其进行评估。我们不需要过多的考虑之前的变化过程,虽然最终对隧道采取的措施需要考虑一系列的变化因素。

推荐的分析评估过程见附录 A。最值得注意的是,任何评估程序,分析方法和假定及所有背景都必须是已记录的或可获取的。

分析的方式随各国而异,也随时间变化。但提供的记录必须是可靠的。

结论

通过以往及目前的实践,可以得出以下经验:

- 精确记录当前情况,包括:发现问题时的环境、位置,采取的检测措施,分析的过程及相关成果。
- 提供评估报告无论是否可行,这样将来的检测将更趋安全。并且不必除去车站区域。

应考虑到,或许未来将需要更大的隧道和列车,并尝试预测将会出现的难题。

将来应该向 CDM / HMRI 规范靠拢。隧道不可能永久使用,当它陈旧、破损、功能丧失后,我们该怎么样处理它?

附录 A 地铁线路工程

1 概述

按照伦敦地下工程公司 (LUL) 和地铁公司 (TLL) 之间达成的 PPP 协议, 地铁公司需按照 LUL 工程标准 (E3322 A2) “深埋隧道和竖井评估” 和 “优良工业标准” 对隧道进行评估。这个评估要求在第一阶段完成。另外地铁公司直到 2008 年底这个期间应尽可能地提高他们对深层地铁隧道资产的认识和了解, 这是改进增加地铁工程的需要。

在 2003 年的 1 月份出版了一个研究和调查报告, 在报告中列举了要完成这个评估所需掌握的知识, 以及应该完成的一些评估样本。目前, 地铁公司的项目部正在对伦敦运营的大约 178 km 的 Jubilee、Northern 和 Piccadilly 线进行初期的评估。第一阶段的评估主要是针对隧道结构、衬砌类型、已有破坏情况、深度、地质情况和相关的岩土参数的初步研究。初步评估按照标准 E3322A2 进行。

从研究、调查和初步的评估报告来看, 对深埋地铁隧道的资产评估是可行的。

2 目的和目标

目的:

启动对深埋地铁隧道的资产评估和 PPP 协议中的表 3 所列的工作计划。

目标:

(1) 提出完成区间地铁隧道评估的方法;

(2) 把这种方法运用到轻轨、车站广场和深层通道评估;

(3) 把这种方法运用到竖井包括自动电梯的评估中;

(4) 总结并解释所提出的方法是怎样满足 LUL 的 E3322A2 “深埋地铁隧道和竖井评估” 标准和 PPP 协议中 (表 3) 的计划要求的。

3 区间隧道

地铁 Northern 和 Piccadilly 线大部分都建在伦敦的粘土土层中, 并且隧道衬砌是栓接的铸铁结构。尽管伦敦的土层具有一定的变异性 (variability), 但隧道的大概情况还是可以进行土层描述的, 初步的评估也可以通过运用连续弹性介质方法作出来。在连续弹性介质方法中仅需的重要参数也就是深度和隧道所在土层的弹性模量 (随深度变化)。

对于伦敦粘土中的大部分是铸铁结构的双向运行隧道进行通常的评估即可, 这种评估一般可以借助岩土咨询集团开发的数值分析软件进行。同样, 类似的混凝土隧道也可以通过这种方法评估。相对于这种通常的评估, 还有一些诸如部分损坏的隧道、变形超过 1% 的隧道、特殊结构形状的隧道 (如上下重叠形的)、交叉的人行通道、污水坑道和盾构室等这样的结构, 比较难于进行评估。图 1 中是一个隧道剖面, 里面包含了以上的特殊情况。

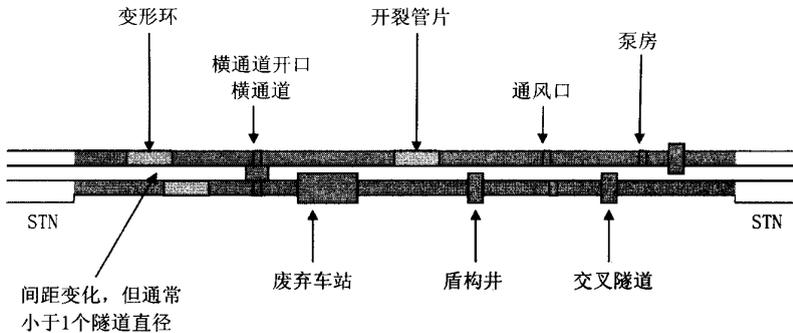


图 1 A 类隧道纵剖面

对于这些特殊设备的管理可以通过图 2 中的流程图来描述。对于未被破坏的标准的区间隧道的评估可以通过图中中间的路径来表示, 最初它为蓝色, 如果通过第一阶段的评估, 则表示为绿色。在第一阶段的评估中要对隧道的几何形状、隧道长度和土层情况进行一些模糊假设, 通过这些假设可以对隧道作出一个保守的评估。只要针对 “B” 范畴的现场检

测工作可以进行, 就可以验证第一阶段评估中所作的假设是不是偏于保守, 这些检测工作包括圆度 (椭圆度) 检查、非破坏性测试、岩心检测和材料检测。如果这些检测结果令人满意的话, 最终的评估报告将认为这些隧道处于 “A” 状态, 如果这些隧道没有产生垢 (encrustation) 或渗漏等结构方面的问题, 则可以把这些隧道划为 “B” 类。

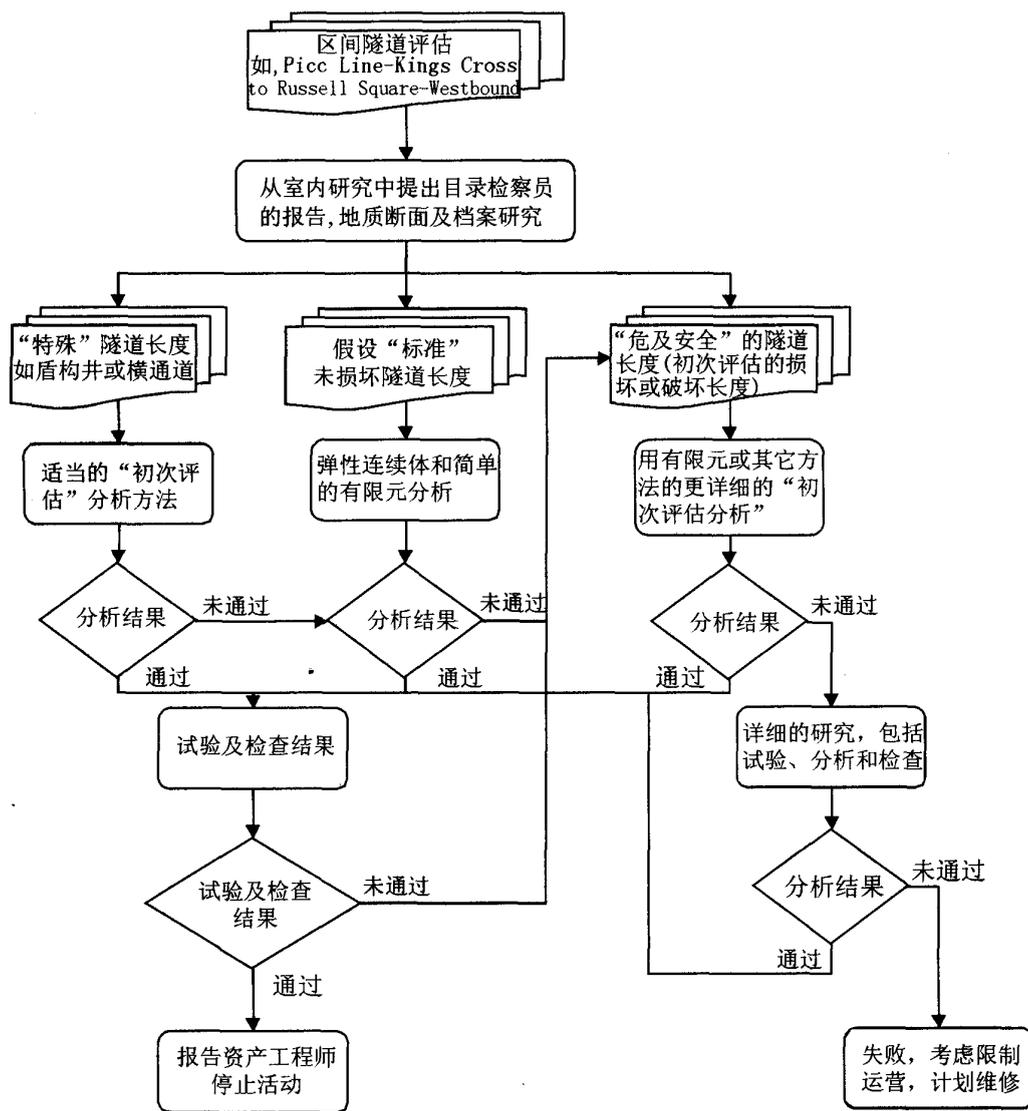


图 2 区间隧道评估流程图

对于标准隧道, 如果其被毁坏或变形超过直径的 1% 或没有通过第一阶段的评估, 则把这些归为“危险”隧道, 按照右边的橙色路径进行评估, 这样需要对隧道结构进行更细致的分析, 包括有限元分析。如果它通过了这种详细的分析, 它们的颜色就可以改为绿色并且临时性地划入“B”范畴, 如果它们没有通过这种评估, 就得划为“D”或“E”范畴, 然后进行一次最终的详细调查研究, 包括必要的材料检测, 最终确定是否安全。如果被确定为不安全, 就把它划为“E”范畴, 这样地铁公司就需要按照 PPP 协议对隧道进行适当的监测或采取一些补救措施; 否则它们被划为“D”范畴, 同样需采取适当的监测

或其他的检查系统。

对于特殊结构也要选出一个合适的评估方法并且按之进行评估。这种评估需具有通用性, 例如类似于双层的“十”字人行通道的评估。如果通过了评估, 这些特殊结构归为“绿色范畴”, 如果通过检测证实, 可以进一步划入“A”范畴或“B”范畴; 如果评估结果不理想, 则划入为橙色的“危险”隧道评估路径, 做更为详细的检测。

4 车站隧道

车站隧道比区间隧道和竖井更加复杂, 一般面对的是普通乘客和车站工作人员。然而, 由于保护层的存在, 车站的内部结构通常是不可见的。为了

评估这些车站隧道,拟广泛采用与区间隧道一样的方法进行分析。

站台隧道是特别重要的,因为那里有开放的轨道和乘客,并且在很大范围内包含大量的开口。这些隧道在接头处总是采用滚环(“rolled” rings),交错排列,使得隧道结构刚度更大。假如适当的话,从总属上说,站台隧道是可以评估的。但是,对站台隧道上那些为数众多的开口要特别对待。在某种程度上,可以采用弹性连续介质的方法进行分析,但是,相邻结构的耦合效应更可能影响细部数值方法。

已经建立的土工技术方法和隧道专家是工作流程中必不可少的一部分。由于受到保护层掩盖,衬砌的所有破损变得模糊,只有极少数破损是可以看得到的。除非由于车站现代化的需要暂时暴露内部结构,不然就假定结构是不曾动过的。但是,采用 NDT 和 BEM 方法以及可能的取芯作业所得到的结论比区间隧道更为全面。在区间隧道中,大多数损伤是明显的,可以从检查报告和别的地基情况勘测报告中获悉。圆度勘测很复杂,为了确定车站保护层内结构的深度从而获得结构衬砌本身而不是车站保护层的圆度,需要采用覆盖测量仪(covermeter)勘测。在取芯作业前,应要求承包商除去保护层,之后,立即进行临时的高质量修补并尽快进行最终修补,从而避免车站周围环境的恶化。

在车站广场和别的乘客通道连接处可进行一般的分析,以及使用超声波或者简单的覆盖测量仪器确认结构的形状。

5 竖井

竖井分析比隧道分析简单,因为土荷载方向往往都是指向竖井中心的。由于不对称注浆或者地基土层不均匀导致不平衡荷载,也要估计分类结果是橙色还是灰色的。在分类中包括钢索和通风井,有些通风井实际上就是水平隧道。竖井覆盖板层按照结构进行评估,而通风井上部结构和底板层是作为隧道评估工程的一部分来估计的。

电梯井的评估更加困难些,因为它是倾斜的,并且设有敏感性强的机器设备。从背面和侧面看,电梯下面的大部分电梯竖井结构是不可见的。

6 现场试验和勘测

完好的标准区间隧道需要满足如下标准:

- (a) 隧道圆周率偏离小于 1%;
- (b) 衬砌厚度已知;

- (c) 土层资料和排水条件已知(最低值);
- (d) 衬砌应力已知;
- (e) 衬砌材料强度已知。

对标准(a),在区间隧道中,每 5m 就要进行一次非常完整的圆度检测;对标准(b),取样或用 NDT 法应该是适当的。标准(c)需要隧道外面的土样,而标准(d)要采用再取样作业或 NDT 方法。对标准(e),要对土样做试验。

对“危险”隧道断面,更关注标准(a)到标准(d)的校核,并且这是必不可少的。“特殊”区间隧道断面只要求一个很简单的结构评估(象标准区间隧道一样),但是要求进行更多分析和试验(象“危险的”隧道一样)

车站隧道

由于保护层的原因,对站台隧道,进行一系列隧道试验要比对区间隧道所作的相同试验要困难的多,有可能需要结合激光和宽带电磁体进行圆度测量。宽带电磁体能够穿过保护层测得衬砌的厚度。

衬砌应力的确定以及人工测量衬砌厚度时要求清除车站保护层,之后还要修复,这是可行的,也往往能降低事故发生率。另外还有一个选择方案:设计一个与车站的现代化相适应的评估系统,即在曾经清除保护层的地方,对结构进行仔细的检查。除此之外,对已废弃的车站隧道进行这种试验和勘测也有助于对所有的车站隧道作出全面的评估。

竖井

总的来说,竖井的结构是外露的。为了验证结果,可以做与区间隧道相似的试验。

由于电梯下面的人口处限制非常严格,电梯井的检测极为困难。在检测时必须清除电梯上面的车站保护层。而且,要完成电梯上面的人口处的检测,必须利用架设在电梯自身上的临时支撑。尽管如此,在电梯上进行检测是必须的,也是可行的。

7 相位调整

表 1 说明了隧道评估的待选相位。

第一阶段是当前的初步研究,在图 2 中用蓝色代表,包括物料量和对“标准”、“危险”、“特殊”的定义,以及对“标准”隧道和竖井的初次评估。

第二阶段开始于 2003 年 9 月,将持续 18 个月,包括:对“特殊”、“危险”隧道和竖井的初次评估;评估方法的验证;对隧道和竖井的试点部位(大约占总量的 10%)进行现场试验,并对试点部位做最后的评估报告。

表 1 评估阶段

第一阶段 2003 - 03 ~ 2003 - 09	第二阶段 2003 - 10 ~ 2005 - 04	第三阶段 2005 - 04 ~ 2008 - 10
初步研究物料清单	“危险”、“特殊”隧道和竖井的初次评估	按要求进行详细的研究
隧道和竖井分“标准”、“危险”、“特殊”三种定义	评估程序的合法性	对所有留下的资产 (assets) 进行试验验证 (不包括试点部分)
“标准”隧道和竖井的初次评估	对隧道和竖井的试点现场试验验证 (大约 10%)	对剩下部分的隧道和竖井做最终评估
无法通过初次评估的“标准”隧道归为“危险”	试点隧道和竖井的最终评估	

最后阶段,即第三阶段将继续三年时间,包括对任何无法完成初次评估的“特殊”、“危险”隧道竖井进行详细的研究,对所有留下的资产进行重点试验并完成最后的评估。

8 结 论

本文提出了地铁公司隧道和竖井的评估过程,这个过程与 LUL 标准以及 PPP 协议相匹配。

应该指出的是,相关的 LUL 标准和 PPP 协议不能精确地确定如何进行隧道和竖井的评估。在本文中对其范围给出了大量的解释,这些解释所遵循的指导原则是以尽可能小的代价获得最好的成果。目前已经用于评估中,其结果令地铁公司专业隧道工程师满意,却不用做大量的分析、试验以及验证。反过来它也使 LUL 和地铁公司资产工程师确信,该评估报告降低了区间铁路风险,使之达到了 ALARP 水平。

附录 B 伦敦地铁历史概况

1843 年 由 Brunels 修建的泰晤士隧道开通,1856 年被东伦敦铁路公司花 20 万英镑买下。首列车于 1869 通过隧道。现在隧道是东伦敦线的组成部分。它采用的是砖砌结构。

1863 年 元月 10 日 Metropolitan 铁路——世界上第一条地下铁路开通,把 Main Line 车站与锡蒂连接起来,长 6 km,明挖法施工,用砖砌(砖砌拱)结构或带顶篷的车站结构。

1868 年 开通南肯辛顿与威斯敏斯特之间的 Metropolitan District 铁路,现在属于 District 线和 Circle 线的组成部分

1870 年 从陶尔至伯蒙德西的第一条地铁隧道开通,先是用于缆车,后又用于行人,于 1894

年塔桥开通时被关闭。

1884 年 现今的 Circle 线竣工。

1890 年 开通城市和南伦敦铁路——第一条大理深电气化铁路,自泰晤士河下的乔治威廉至斯托克韦尔 (Stockwell)。

1898 年 开通滑铁卢和锡蒂“*The Drain*”线(它直至 1994 年才正式并入伦敦地铁)。

1900 年 由 HRH 威尔士王子开通自谢泼兹布尔至锡班克“的两便士地铁”。它现在属于森特勒线的组成部分。

1902 年 伦敦电气化地下铁路公司(地铁集团)合并了除 Metropolitan 线(1914 年合并)以外的所有线路。

1905 年 District 线和 Circle 线电气化改造。

1906 年 自 Baker 街至肯宁顿路的 Baker Street 和 Waterloo 铁路。开通哈默史密斯与芬斯伯里公园之间的 Great Northern, Piccadily 和 Brompton 线路。它现在属于 Piccadily 线的组成部分。

1907 年 开通自查灵克罗斯至格尔德斯格林和海格特(如今的 Archway)的查灵克罗斯、尤斯顿和汉普斯特德铁路。它现在属 Northern 线的组成部分。Albert Stanley(后来是 Lord Ashfield)被任命为伦敦电气化地下铁路有限公司的总经理。

1908 年 采用“Underground”(地下铁)名称,引用电动票务机设备。

1911 年 首次用电扶梯(在厄尔斯考特车站)

1913 年 首次出现著名的图标。

1923 年 大修中心车辆段在阿克顿投入使用。

1929 年 最后的手动车门更换为机械式车门。

1933 年 引入 Harry Beck 地铁图。

- 1933年 伦敦客运局(London Passenger Transport Board)——在伦敦地区的 Metropolitan 铁路,地铁集团和 170 个铁路、有轨电车、无轨电车及客运运输公司。
- 1940年 自 9 月地铁车站均用作防空洞,直至 1945 年 5 月,Aldwych 支线用作存放不列颠博物馆的财宝,关闭到 1946 年。
- 1948年 伦敦客运局正式国有化,变成交通执委会,也是管辖不列颠铁路、码头、运河、航空和道路货运的不列颠交通委员会的组成部分。
- 1952年 引入首列铝材列车。
- 1955年 在卡姆登(伦敦)市引入了程序机械式信号。
- 1961年 伦敦交通的旅客列车终止用蒸汽式和电动机车牵引。
- 1962年 在斯坦福与 Ravenscourt 公园之间的 District 线上首次进行列车自动控制试验。
- 1963年 伦敦交通委员会改为伦敦交通局并直接向交通部长报告。
- 1968年 9 月维多利亚线分期开通。
- 1970年 地下铁道和大伦敦区域大巴车网络移交给伦敦交通委员会,并向现今已不存在的大伦敦理事会报告。
- 1971年 最后的蒸汽式调车机和货运机车撤出运营。维多利亚线延伸到布里克斯顿。
- 1975年 在 Moorgate 发生的致命性事故(43 人丧命)之后采用新的安全措施。
- 1977年 女王伊里莎白二世陛下为希思罗线开通剪彩。
- 1979年 查尔斯王子为 Jubilee 线开通剪彩。
- 1983年 站台上引入点阵式指示器。
- 1984年 创建伦敦区域交通(简称 LRT),向交通国务大臣报告。伦敦区域交通法案包含成立子公司来管理地下铁道和大巴士运营。哈默史密斯和锡蒂及 Circle 线列车转给一个体经营。
- 1985年 合并地下铁道有限公司——LRT 完全拥有的子公司。
- 1986年 修建 Piccadilly 线终点站 4 号延伸线。
- 1987年 在金斯罗斯发生灾难性火灾,31 人丧命。在整个系统中引入新型的自动售票机。
- 1988年 创建个体经营单位来管理不同的地铁线路。先试用新的旅客安全措施,再推广全系统采用。投入 5.55 亿启动 Central 线的现代化改造,包括新列车和信号系统。
- 1989年 在对金斯罗斯火灾的 Fennell 报告发布之后,引入了防火条例(地铁车站)。
- 1992年 发布伦敦地下铁道乘客规章。
- 1993年 7 千万英镑 Angel 站重建竣工。格林公园至斯特拉特福的 Jubilee 线延伸线投入 26 亿英镑(概算!!)的工程开工。
- 1994年 引入惩罚性票价。
- 伦敦地铁接管了 Waterloo 和锡蒂线并负责 District 线上(帕特尼桥至温布尔顿公园)的车站。
- Aldwych 车站和埃平至 Ongar 的 Central 线的支线被关闭。
- 1998年 3 月 20 日约翰普雷斯科特政府公私合营(PPP)规划实施:
- 对于经营伦敦地铁在国营部门保持一个单一的统一体。
 - 以 PPP 方式利用私营界财力和施工能力以克服投资缺口并授予一个或多个合同来对地铁的基础设施进行维护和现代化改造,私营界据此筹集投资所需的大量资金。
- 2000年 伦敦交通(简称" TfL ")把伦敦所有的交通系统置于"一个帽檐下",即:伦敦市长。
- 2003年 随着 1998 ~ 2003"影子运行(Shadow Running)"期过后,PPP 最终引入经营集团如下:
- 国营运营公司伦敦地铁有限公司
 - 三家私营集团
- Tube Lines 集团(主要负责 Jubilee, Northern 和 Piccadilly 各线以及 Docklands 轻轨铁路);
- Metronet BCV 集团(负责 Bakerloo, Central 和维多利亚各线);
- Metronet SSL 集团(主要负责那些连接各干线铁路的"地下线路"——Metropolitan, District, Circle、哈默史密斯及锡蒂线)。