

ICS 号: ')&(\$)\$

中国标准文献分类号: D+

H# %&(\$&- \$\$ *%/%\$%&7' *) \$&&&&

团 体 标 准

H#G5+H5 '\$\$(1&&&

HU cbca ncZXf]]p[U lca U]cb Zcf g.)YXa UW]pY

发布

实施

发布



24012315444575

目 次

前 言	.....
引 言	.....
1 范围	.....
2 规范性引用文件	.....
3 术语和定义	.....
4 驾驶自动化划分原则	.....
4.1 划分依据	.....
4.2 等级划分	.....
5 驾驶自动化划分要素	.....
5.1 自动化程度判定要素	.....
5.2 情境限制	.....
5.3 自主决策	.....
5.4 任务执行	.....
5.5 安全监管	.....
5.6 人工介入	.....
5.7 等级描述	.....
5.8 技术条件	.....
6 驾驶自动化实施要求	.....
6.1 应用范围限制	.....
6.2 盾构机技术要求	.....
附 录 A （规范性） 盾构驾驶自动化等级划分与要素关系表	.....
附 录 B （资料性） 盾构驾驶自动化等级特征表	.....
参 考 文 献	.....

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由上海市人工智能技术协会提出。

本文件由上海市人工智能技术协会归口。

本文件起草单位：上海隧道工程有限公司、上海大学、上海城建隧道装备有限公司、上海地铁盾构设备工程有限公司、同济大学、上海申通地铁建设集团有限公司、上海城投公路投资（集团）有限公司、上海申铁投资有限公司、上海人工智能研究院有限公司、上海智越领航科技有限公司。

本文件首批执行单位：上海隧道工程有限公司、上海大学、上海城建隧道装备有限公司、上海地铁盾构设备工程有限公司、同济大学、上海申通地铁建设集团有限公司、上海城投公路投资（集团）有限公司、上海申铁投资有限公司、上海人工智能研究院有限公司、上海智越领航科技有限公司。

本文件主要起草人：吴惠明、裴烈烽、胡珉、赵剑、李章林、李刚、翟一欣、张恒、毕欣、王秀志、刘艳滨、杜峰、王资凯、徐镇江、朱灵圣、陈刚、吴兆宇、陈传林、郑洁、秦元、朱叶艇、王延年、唐子淇。

引 言

盾构机驾驶自动化指盾构机通过感知、评价和自主决策等一系列手段，自动执行岩土开挖、盾构掘进、同步注浆和盾尾油脂压注等作业环节，在确保工程安全的情况下完成隧道轴线控制和地面沉降控制任务。盾构机驾驶自动化是当前地下掘进设备研发和智能施工的研究热点，也是未来地下工程智能化发展的必然趋势。本标准填补我国在盾构机自动驾驶标准化领域建设的空白，可为研究人员明确研究目标和方向，有助于推动盾构行业技术创新，有利于盾构机自动驾驶的研究成果应用落地，实现盾构产业生态的能级提升。

本文件规定了盾构机驾驶自动化等级划分标准，适用于各类土压平衡盾构机和泥水平衡盾构机的驾驶自动化等级划分。明确了盾构机驾驶自动化L0-L4五级划分原则；提出了情境限制、自主决策、任务执行、安全监管、人工介入五项驾驶自动化判定要素；确定了驾驶自动化等级划分的技术条件；规定了驾驶自动化实施要求和盾构机技术要求；形成了盾构驾驶自动化等级划分与要素关系表及盾构驾驶自动化等级特征表。

盾构机驾驶自动化分级

1 范围

本文件规定了盾构机驾驶自动化划分要素、等级划分和实施要求。

本文件适用于各类土压平衡盾构机和泥水平衡盾构机的驾驶自动化等级划分，不涉及管片拼装和渣土运输等作业环节。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 34354-2017 全断面隧道掘进机 术语和商业规格
- GB/T 34651-2017 全断面隧道掘进机—土压平衡盾构机
- GB/T 35019-2018 全断面隧道掘进机—泥水平衡盾构机
- GB/T 50446-2017 盾构法隧道施工及验收规范
- GB/T 51438-2021 盾构隧道工程设计标准

3 术语和定义

GB/T 34354-2017 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

盾构机 Shield machine

在钢壳体保护下完成隧道掘进、出渣、管片拼装等作业，由主机和后配套设备组成的全断面推进式隧道施工机械设备，也称盾构。根据开挖面的稳定方式，分为土压平衡式盾构、泥水平衡式盾构、敞开式盾构和气压平衡式盾构。

3.2

盾构机驾驶自动化 Shield machine driving automation

盾构机在掘进过程中通过感知评估自主规划掘进策略，自动完成岩土挖排、盾构掘进、姿态纠偏、同步注浆和盾尾油脂压注、渣土改良等作业过程，实现对隧道轴线、地面沉降和工程安全的有效控制。

3.3

盾构掘进 Shield Advancing

盾构机驾驶自动化作业之一，指盾构机根据规划的路径前行，推进油缸自动执行相应动作，通过位置移动和姿态校正，满足隧道工程轴线设计要求。

3.4

岩土挖排 Rock and Soil Excavation

盾构机驾驶自动化作业之一，指通过刀盘切削前方的岩石或土体、保持切削面的平衡和将渣土排出等。

3.5

盾构姿态纠偏 Shield machine Attitude rectification

盾构机驾驶自动化作业之一，指盾构机根据决策阶段设定位置和姿态控制目标，通过调节盾构机各区域推进压力或千斤顶推进压力等姿态控制装置纠偏，使得盾构机按照规划路径前进。

3.6

同步注浆 Synchronous Grouting

盾构机驾驶自动化作业之一，指盾构机按照决策所设定浆液配比和注浆分布，在盾构掘进的同时，调节各注入点的注入速度，达到设定的注浆量和注浆压力要求。

3.7

渣土改良 Muck conditioning

土压平衡盾构机驾驶自动化中的作业之一，指盾构机在掘进过程，通过在开挖面注入膨润土或泡沫等添加剂，改善开挖面岩土特性，保持开挖面稳定，并提高掘进的效率。

3.8

隧道轴线控制 Tunnel Axis Control

盾构机驾驶自动化任务之一，对隧道纵向中心线路位置进行控制，使其与设计要求相一致。轴线控制涉及的作业任务包括：盾构掘进和盾构姿态纠偏。

3.9

地面沉降控制 Settlement Control

盾构机驾驶自动化任务之一，对盾构掘进影响区域的土体变形程度进行控制，使地表变形值在施工安全允许的范围内。沉降控制涉及的作业包括：岩土挖排、同步注浆和渣土改良。

3.10

工程情境 Engineering Scenario

盾构机掘进过程中，所面对的隧道设计轴线线形、构筑物保护要求、覆土厚度、隧道所处位置的工程地质和水文地质等工况条件。

3.11

人工介入 Human Intervention

盾构机自动驾驶过程中，因自动驾驶性能或安全不能满足或存在无法满足工程需求的可能性时，需由人工代替驾驶自动化控制系统完成相应的任务。

3.12

安全监管 Safety Supervision

盾构机自动驾驶过程中，利用感知和测量设备，对盾构机本体、周边环境、隧道本体的安全情况进行监视、分析，评估其风险状态，给出相应报警，从风险可接受原则出发，改变控制参数，在必要时进行停止自动驾驶的动作。

3.13

感知和评价 Sensing and Evaluation

盾构机驾驶自动化关键步骤之一，采用各种传感设备和监测手段及时获取盾构掘进过程的盾构姿态、隧道轴线、地面变形和隧道渗漏等状态变化，以感知信息为基础，对轴线、沉降和密封的控制情况进行评价。

3.14

自主决策 Self-Decision Making

盾构机驾驶自动化关键步骤之一，采用人工智能的方法，对盾构掘进阶段策略及目标进行自主决策和规划，包括：盾构掘进路径和阶段沉降控制量设计，切口压力、刀盘转速、分区油压、推进速度、出渣量和注浆量等核心控制子系统目标值设定。

3.15

任务执行 Task Completion

通过执行盾构机各作业任务，包括但不限于：盾构掘进、岩土挖排、盾构姿态纠偏、同步注浆、盾尾油脂压注及渣土改良，完成地面沉降控制、隧道轴线控制和隧道密封控制的目标。

4 驾驶自动化划分原则

4.1 划分依据

盾构驾驶自动化等级依据5.1的自动化程度判定要素及其等级组合进行划分。

4.2 等级划分

盾构驾驶自动化等级分为五级：

- a) 自动化等级 0 级，简称 L0；
- b) 自动化等级 1 级，简称 L1；
- c) 自动化等级 2 级，简称 L2；
- d) 自动化等级 3 级，简称 L3；
- e) 自动化等级 4 级，简称 L4。

5 驾驶自动化划分要素

5.1 自动化程度判定要素

盾构驾驶自动化基于下列自动化程度判定要素进行等级划分：

- a) 情境限制；
- b) 自主决策；
- c) 任务执行；
- d) 安全监管；
- e) 人工介入。

5.2 情境限制

5.2.1 搭载盾构驾驶自动化控制系统的盾构机允许应用的工程情境。

5.2.2 情境限制分为三个等级（R1-R3），情境限制等级宜参照表 1 执行。

表 1 情境限制等级表

R1	R2	R3
常规工程情境	常规和已知特殊工程情境	所有情境
<p>注1：常规工程情境是指隧道工程设计时已确认不属于特殊地段的作业环境。</p> <p>注2：已知特殊工程情境是指在隧道工程设计时已确认的特殊作业环境，且此类作业环境已有盾构法隧道施工成功完成的经验或报道。特殊地段见GB/T 50446-2017《盾构法隧道施工及验收规范》。</p> <p>注3：所有情境是指隧道工程施工时，盾构机开挖面临的所有工程情境。</p>		

5.3 自主决策

5.3.1 根据盾构自动驾驶系统是否能够根据设计要求、实际环境感知和盾构特性进行核心控制目标规划和动态调整，确定其自主决策程度。

5.3.2 自主决策分为四个等级（D0-D3），自主决策等级宜参照表 2 执行。

表 2 自主决策等级表

D0	D1	D2	D3
人工决策	人工决策为主，盾构自动驾驶系统决策为辅	盾构自动驾驶系统决策为主，人工决策为辅	盾构自动驾驶系统决策

表 2 自主决策等级表（续）

- 注1:** 自主决策等级宜按照自动决策率进行划分：
注2: D0等级是指未采用自动掘进。
注3: D1等级是指采用盾构机驾驶自动化系统，完成自主决策环数比例小于等于50%。
注4: D2等级是指采用盾构机驾驶自动化系统，完成自主决策环数比例大于50%且小于等于95%。
注5: D3等级是指采用盾构机驾驶自动化系统，完成自主决策环数比例大于95%。
注6: 自主决策率按照盾构掘进目标设定时的自主决策环数占总环数的比例进行计算。

5.4 任务执行

5.4.1 根据盾构是否具备持续执行驾驶自动化任务、确保隧道轴线控制、地面沉降控制和隧道密封控制在工程规范允许的范围之内的能力，确定其任务执行的等级。

5.4.2 任务执行分为三个等级（T0-T2），任务执行等级宜参照表3执行。

表3 任务执行等级表

T0	T1	T2
无	断续完成任务	连续完成任务
<p>注1: 任务执行等级宜按照任务中断次数进行划分。 注2: T0等级是指未采用盾构机驾驶自动化系统或者采用盾构机驾驶自动化系统每百米中断次数大于5次。 注3: T1等级是指采用盾构机驾驶自动化系统，每百米中断次数大于1次且小于等于5次。 注4: T2等级是指采用盾构机驾驶自动化系统，每百米中断次数小于等于1次。 注5: 中断次数是指自动掘进模式转换为人工模式的次数，每切换一次记为一次。</p>		

5.5 安全监管

5.5.1 根据盾构是否具备对盾构本体、环境和隧道实施状态进行风险探测和安全性评价、并在出现危险时采取保护性处置措施的能力，确定其安全监管的等级。

5.5.2 安全监管分为三个等级（S0-S2），安全监管等级宜参照表4执行。

表4 安全监管等级表

S0	S1	S2
无	自动安全评估和警示	自动安全评估、警示和最小风险策略执行

5.6 人工介入

5.6.1 根据盾构驾驶自动化对人员监管和处置的责任要求，确定其人工介入的程度。

5.6.2 人工介入程度分为四个等级（M0-M3），人工介入等级宜参照表5执行。

表5 人工介入等级表

M0	M1	M2	M3
人工驾驶	间歇发生人工介入	偶尔发生人工介入	极少发生人工介入

表5 人工介入等级表（续）

注1: 人工介入程度按照驾驶自动化率宜进行如下划分:

注2: M0等级是指未采用自动驾驶系统或使用驾驶系统但驾驶自动化率小于等于50%。

注3: M1等级是指采用盾构机驾驶自动化系统, 驾驶自动化率大于50%且小于等于80%。

注3: M2等级是指采用盾构机驾驶自动化系统, 驾驶自动化率大于80%且小于等于95%。

注4: M3等级是指采用盾构机驾驶自动化系统, 驾驶自动化率大于95%。

注5: 驾驶自动化率按照自动驾驶环数除以盾构总掘进环数进行计算。

5.7 等级描述

5.7.1 L0 级驾驶自动化

人工驾驶。所有工程情境下, 盾构掘进主要任务的决策和执行由人完成。盾构机具备基础的执行动态驾驶任务中目标的探测与响应能力, 但不具备感知盾构掘进风险的能力。

5.7.2 L1 级驾驶自动化

辅助驾驶。所有工程情境下, 盾构掘进主要任务的决策由人完成。盾构机具备执行动态驾驶任务中目标的探测与响应能力, 能够感知盾构掘进风险, 并具备实时报警、提出建议的交互能力。

5.7.3 L2 级驾驶自动化

有条件自动驾驶。在常规工程情境下, 盾构掘进所有任务由盾构机决策并通过持续作业完成, 盾构机具备执行动态驾驶任务中目标的最小风险策略。当无法实现控制目标时, 需要人工介入操作。

5.7.4 L3 级驾驶自动化

高度自动驾驶。常规和已知特殊工程情境下, 盾构掘进所有任务由盾构机决策并通过持续作业完成, 盾构机具备执行动态驾驶任务中目标的最小风险策略, 并具备自主处置能力。当无法实现控制目标时, 需要人工介入操作。

5.7.5 L4 级驾驶自动化

完全自动驾驶。所有工程情境下, 盾构掘进所有任务的决策由盾构机完成, 盾构机具备执行动态驾驶任务中目标的最小风险策略, 并具备自适应处置能力。无需人工介入操作。

5.8 技术条件

驾驶自动化等级划分的技术条件应符合表A.1的规定。

5.8.1 L0 级自动驾驶

人工控制。

5.8.2 L1 级自动驾驶

- a) 自主决策等级达到 D1 级;
- b) 任务执行等级达到 T1 级;
- c) 安全监管等级达到 S1 级。

5.8.3 L2 级自动驾驶

- a) 情境限制等级达到 R1 级;
- b) 自主决策等级达到 D2 级;
- c) 任务执行等级达到 T1 级;
- d) 安全监管等级达到 S2 级;
- e) 人工介入等级达到 M1 级。

5.8.4 L3 级自动驾驶

- a) 情境限制等级达到 R2 级；
- b) 自主决策等级达到 D2 级；
- c) 任务执行等级达到 T2 级；
- d) 安全监管等级达到 S2 级；
- e) 人工介入等级达到 M2 级。

5.8.5 L4 级自动驾驶

- a) 情境限制等级达到 R3 级；
- b) 自主决策等级达到 D3 级；
- c) 任务执行等级达到 T2 级；
- d) 安全监管等级达到 S2 级；
- e) 人工介入等级达到 M3 级。

6 驾驶自动化实施要求

6.1 应用范围限制

启用盾构自动驾驶功能前，适用条件应同时满足：

- a) 盾构机本体允许的设计范围；
- b) 驾驶自动化控制系统允许使用的工程情境。

应依据盾构驾驶自动化正常运行的技术要求，评估盾构驾驶自动化控制系统和盾构机连接后各个要素的等级程度，依据表A.1确定盾构驾驶自动化所能达到的最高等级，并依据表A.2确定允许的应用情景。

6.2 盾构机技术要求

当盾构驾驶自动化控制系统与盾构机连接时，除了就6.1条核对以外，应对执行机构性能、信息和控制权交互进行核对。包括但不限于：

- a) 盾构机本体数据采集单元能提供驾驶自动化控制系统所需要的信息，参数、格式、采样频率、精度、延迟时间都能满足要求；
- b) 盾构机本体执行单元能执行驾驶控制系统指令，其准确性、响应速度和稳定性满足驾驶自动化控制系统的控制需求；
- c) 盾构机本体与外置驾驶自动化控制系统失去联系时，盾构机应能启动自动保护机制，确保设备不受损害，工程处于安全可靠的状态。

附录 A

(规范性)

盾构驾驶自动化等级划分与要素关系表

表A.1 规定了盾构驾驶自动化等级划分与要素关系表。

表 A.1 盾构驾驶自动化等级划分与要素关系表

等级要素	L0 级	L1 级	L2 级	L3 级	L4 级
情境限制	/	/	R1	R2	R3
自主决策	D0	D1	D2	D2	D3
任务执行	T0	T1	T1	T2	T2
安全监管	S0	S1	S2	S2	S2
人工介入	M0	M0	M1	M2	M3

附录 B

(资料性)

盾构驾驶自动化等级特征表

表B.1 给出了盾构驾驶自动化等级特征表。

表 B.1 盾构驾驶自动化等级特征表

等级	等级名称	决策者	操作者	工程评估	安全接管 执行者	应用情境
L0级	人工驾驶	人类	人类	人类	人类	所有情境
L1级	辅助驾驶	人类为主 盾构辅助	人类	人类 盾构监管	人类	所有情境
L2级	有条件自 动驾驶	盾构为主 人类辅助	盾构	盾构 人类监管	人类	常规工程情境
L3级	高度自动 驾驶	盾构为主 人类辅助	盾构	盾构 人类监管	盾构 特殊情况 下人类	常规和已知特 殊工程情境
L4级	完全自动 驾驶	盾构	盾构	盾构	盾构	所有情境

参 考 文 献

- [1]GB / T 40429-2021 汽车驾驶自动分级
[2]MH / T 2013-2022 民用无人驾驶航空器系统分布式操作运行等级划分

