

破解海运锂电安全困局： 风险评估与防控路径



1 引言

随着锂离子电池技术的广泛应用，其发生严重故障的风险也可能相应上升。作为电动汽车和混合动力汽车主要的储能装置，锂离子电池的安全性日益受到关注。近期海运行业中出现的数起事故，凸显出对港口作业期间存储或使用的锂离子电池，在其全生命周期的各个阶段制完善指导规范、开展安全风险评估的迫切必要性。

一些值得注意的案例：

- 2025年6月，货轮“Morning Midas”号发生火灾。该船全长600英尺，当时共装载70辆纯电动汽车、681辆混合动力汽车以及2000余辆燃油汽车。火势持续数周，最终导致该船在太平洋沉没，整船货物全部损毁。
- 2023年7月，货轮“Fremantle Highway”号在北海航行期间起火。该船全长650英尺，船上载有3,783辆汽车，其中约500辆为电动汽车。事故迫使部分船员跳海逃生，造成一人死亡、十六人受伤。
- 2022年2月，货轮“Felicity Ace”号在运输途中起火。该船全长656英尺，船上3,965辆汽车中有大量电动汽车。全体船员紧急撤离，火灾持续两周以上，最终船舶与货物全部沉没。
- 2025年7月14日，美国海岸警卫队发布第14-25号海事安全警报，针对船舶锂离子电池系统安装提出警示。该警报指出，一艘受检客船的集成锂离子电池组因接线片压接松动导致过热起火。

为应对锂离子电池事故频发的态势，集装箱航运公司 Matson 与 Alailand 分别于 2025 年 7 月和 8 月以火灾风险为由暂停了电动汽车的运输业务。目前，包括 Havila Kystruten 在内的多家航运企业已相继宣布禁运电动汽车。

现行法律法规与标准规范往往滞后于技术创新的速度。目前，针对电动汽车及消费电子产品所含锂电池的规范化处置，尚缺乏完善的法律约束或系统性的标准指引。尽管锂电池在生产阶段通常能满足基本安全要求，但在后续搬运、运输及充电等环节中，多重风险因素的叠加显著提高了灾难性事故发生的可能性。此外，废旧锂电池的报废处理风险也日益凸显，亟待相关政策引导与行业监管。目前，电子垃圾运输已面临与电动汽车同等严格的管控，许多航运服务商已明确拒绝承运此类电子废弃物。

在相关监管法规尚处空白阶段时，开展全面、深入的风险评估，并从历史事故中汲取经验教训，成为控制运营风险的关键举措。为确保评估结果的准确性，并科学、合理地配置资源以落实风险缓解措施，必须由具备专业资质的安全工程师主导此项评估工作。



2 背景

2.1 锂离子电池基础知识

锂离子电池在基础构造上与传统的碱性电池相似。每节电池由负极、正极以及用于输送锂离子的电解液组成。正极与负极之间通过隔膜分离，以控制离子在电池内部的流动。多个单体电芯可组合成电池组，以提高整体能量储存能力。

为提高安全性，锂离子电芯及电池组内部通常集成了多重保护机制，旨在最大程度降低发生灾难性故障的风险。常见的安全保护措施包括：

- **泄压装置**：电芯设有排气孔，用于在内部压力积聚时释放气体。
- **过流保护**：通过限制电流，防止在故障状态下发生能量的快速吸收或释放。
- **保险丝或温度监测装置**：可在电池出现过热时触发额外冷却措施（例如液冷、强制风冷等）。

若受到外部因素影响，锂离子电池可能发生**热失控**现象。这是一个链式反应过程：电池内部产生的热量引起温度升高，而温升又进一步加速热量生成，形成持续自增强的正反馈循环，最终导致电池温度急剧上升。

一旦进入热失控状态，若不及时控制，电池可能引发火灾，并释放出爆炸性气体。该状态下的火灾往往极为难以扑灭。

2.2 锂离子电池危险因素

锂离子电池在其生命周期的任何阶段，一旦暴露于特定危险条件下，均可能发生灾难性故障。这些危险可归为三类：机械损伤、电气损伤与热力损伤。

1. 机械损伤

指电池遭受物理破坏，如挤压、弯曲、撞击或穿刺。这类损伤易导致内部结构受损，可能引发电池短路，进而造成能量迅速释放，产生高温与火花。

2. 电气损伤

主要由过充、内部短路或放电电流过大引起。此类故障通常源于电池管理系统或相关电子元件运行异常，其构成与功能随具体应用场景有所不同。

3. 热力损伤

因电池过热所引发。简言之，过热可触发热失控过程，最终导致灾难性故障。在该过程中，电池内部热量积累速度超过散热能力，形成自增强的反馈循环，不断产生更多热量，直至电池失效。

3 法规

目前，锂离子电池在应用及安全方面的法律法规和标准体系尚不完善。相关监管尚未全面覆盖电动汽车及消费电子产品领域，但针对这一监管空白的技术标准与规范已在陆续制定中。

3.1 现行法规

UN DOT 38.3

《联合国试验和标准手册》针对锂离子电池明确规定了运输安全要求及相关测试方法，其内容涵盖以下八项必要测试：

1. 高度模拟测试
2. 热测试
3. 振动测试
4. 冲击测试
5. 外部短路测试
6. 冲击 / 挤压测试
7. 过充测试（适用于可充电电池）
8. 强制放电测试

国际海事组织《国际海运危险货物规则》 (IMDG Code)

根据 IMO《国际海运危险货物规则》(IMDG) 要求，运输的锂离子电池必须符合 UN38.3 规定的各项测试标准，具体包括：

- 废弃电池及可能含有锂离子电池的废弃物品的运输要求
- 电池类型及其他相关信息的随附文件记录
- 电池自身状态（如荷电状态、完整性等）
- 电池的包装形式（如散装运输或安装在电子设备中）

例如，拟作为废弃物处理或进行回收的电池，必须按规定张贴相应的联合国危险货物标识，并加注“报废”状态的额外标记。具体包装要求可参照 P908 与 P909 包装指令执行。

NFPA 505-工业机动车辆消防安全标准，包括类型指定、使用区域、改装、维护和操作

NFPA 505 适用于由电动机或燃机驱动的叉车、牵引车、升降平台车、步行式搬运车及其他各类工业特种车辆。

除其他规定外，该标准明确指出：

- 电池充电设施应设置在专用指定区域内。该区域应保持整洁，不得存放与充电作业无关的可燃物。
- 现场应配备以下设施：
 1. 电解液泄漏冲洗装置
 2. 消防保护设备
 3. 车辆意外碰撞防护装置，以保护充电设备
 4. 足够有效的通风系统，用于及时驱散电池释放的气体

3.2 拟议法规

美国国家消防协会（NFPA）正在制定一项全新的标准——NFPA 800《电池安全规范》。该规范正式发布后，将成为首部覆盖电池全生命周期的综合性安全准则，其范围将具体涵盖以下七个方面：

1. 电池制造与存储
2. 电池运输
3. 含电池产品的制造
4. 电池安装、使用与维护
5. 作业人员安全
6. 应急响应程序
7. 电池的再利用、回收与最终处置

目前，美国国家消防协会（NFPA）已正式发布 **NFPA 855《固定式储能系统安装标准》**。该标准全面涵盖了固定式储能系统（ESS）从设计、建造、安装、调试、运行、维护直至退役的全过程，并将其定义为“由一个或多个组件集成、能够存储能量以备后续供电的系统”。

尽管这一标准为储能系统的安全管理提供了重要框架，但其适用范围存在一定局限：首先，它并未专门涉及电动汽车或海事应用场景下的安全细则；其次，对于电池在储存或运输过程中荷电状态（SOC）应保持的最低或最高限值，标准中也未提供明确指引。

国际海事组织船舶系统与设备分委会 (SSE)

2025年2月，国际海事组织（IMO）船舶系统与设备分委会（SSE）正式将一项新议程纳入讨论，内容为：“评估车辆甲板、特种舱室及滚装处所的防火、火灾探测与灭火措施是否充分，以降低运输新能源汽车船舶的火灾风险”。此项补充性规章提案旨在确保《国际消防安全系统规则》（FSS Code）能更精准地应对货船舱室与货甲板的火灾风险，提升火灾探测能力并强化火灾控制措施。

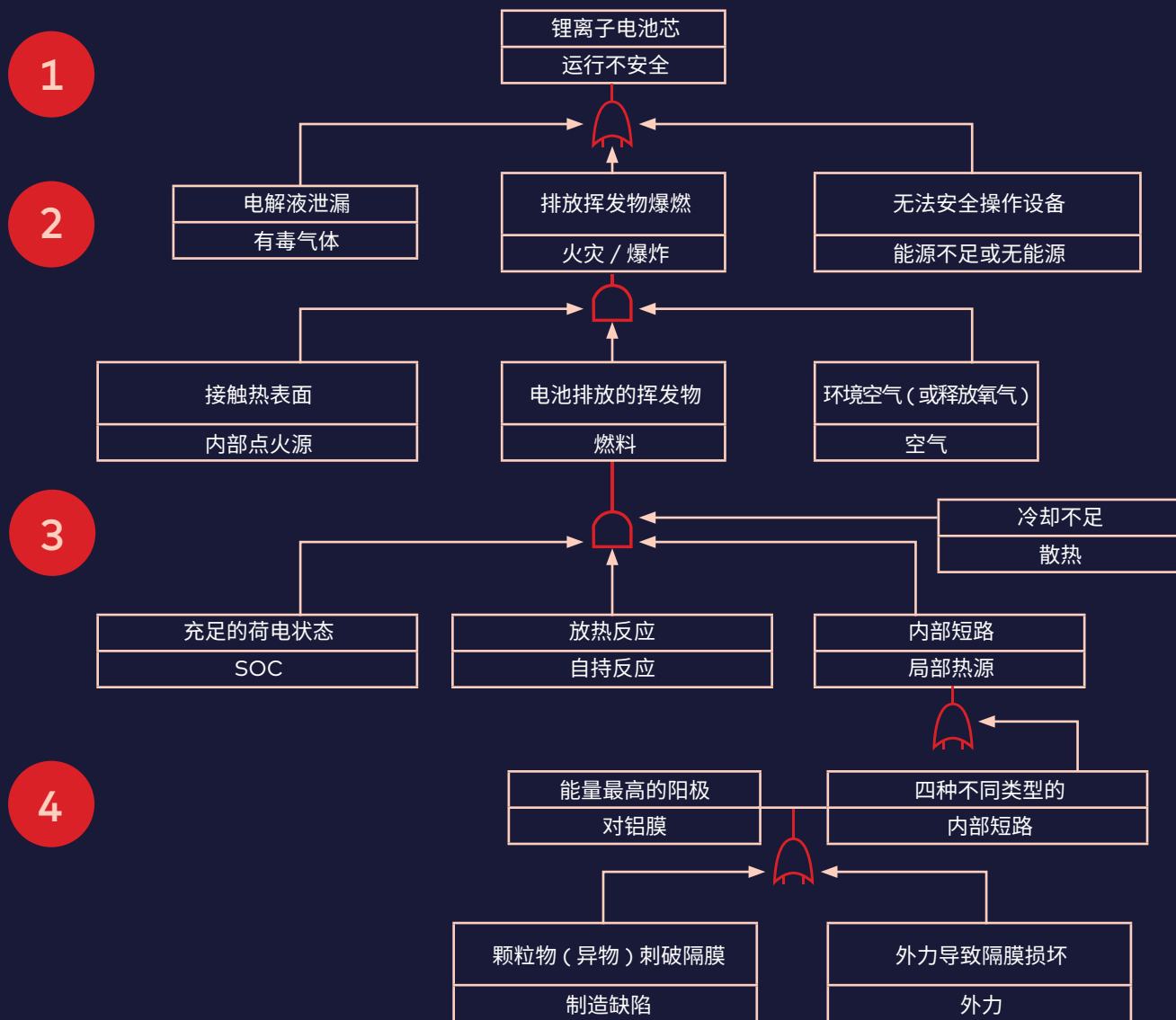
3.3 指导意见和推荐做法

目前，各类组织已发布多项指导文件及推荐实践。尽管这些内容不具法规强制性，但行业普遍认为，**将其与通用的消防工程最佳实践相结合，是有效降低风险的关键策略。**

例如，《**UL 2580-电动汽车用电池标准**》于2020年发布，并于2022年完成修订。该标准属于**自愿性采用**的制造规范。通过此项认证的电池，表明其已满足UL针对特定应用场景的安全要求。此外，标准还基于UL识别的典型失效模式，明确了电动汽车电池应满足的各项技术指标。UL也在《可持续能源杂志》上发布了相关的故障树分析（见图1）。



图 1: UL 进行的故障树分析结果



UL 1642《锂电池标准》针对可充电及不可充电锂电池单体，规定了统一的技术要求。该标准明确了各类滥用试验与失效模式的判定准则，并列出了电池产品获得 UL 列名认证必须满足的全部条件。通过此认证，即表明该电池已具备符合规范的安全防护设计。

4 风险管理

海运及港口运营本身带有固有的风险属性。考虑到燃油补给、货物装卸、设备操作以及潜在危险品存储等多个环节中存在的复杂危险因素，完全消除风险既不现实也不可能。因此，本分析的目的并非追求风险的彻底消除，而在于识别并界定一个在现实中**可接受且切实可行的风险水平**。通过对风险进行系统量化，管理者能够更科学地分配资源，从而实现**对关键风险点的精准管控**。

定量风险管理框架贯穿于锂离子电池的**整个生命周期**。该方法会综合考虑电池在不同状态（如存储、运输、充电、使用、废弃）下的各类危险因素，并对其进行系统的**分级与评估**。

对于海运行业，定量风险管理应重点关注以下与锂离子电池相关的关键环节：

- **船舶推进系统**：使用锂离子电池作为船舶动力的能源。
- **储能系统操作**：船上相关储能系统的充电与放电过程。
- **电池货物运输**：各类含锂离子电池产品（包括消费电子产品及电子废弃物）的海上运输。
- **电动汽车运输**：作为货物的电动汽车在船上的积载与运输。
- **港口作业设备**：在港口用于货物搬运的电动机械与车辆，例如叉车、集装箱搬运车等。

4.1 风险评估

通过严谨、正式且系统化的方法进行危险识别。该方法能够在方案落地前，预先评估潜在后果并制定必要的缓解策略，从而有助于实现资源的有效优先配置。

MIL-STD-882E 标准（如图 2 所示）详细阐述了这一流程，其目的在于系统识别引入新型锂离子电池相关危险后，可能导致的结果及其发生的可能性。在采取任何缓解措施前，需首先记录并确定风险的**“初始风险等级”**。随后，基于此提出针对性的缓解建议，并在相关措施实施后对风险进行重新评估，以确定**“剩余风险”**水平。

4.1.1 缓解措施

针对锂离子电池相关风险的防控策略正处于持续演进之中。在更具约束力的标准与法规尚待完善的现阶段，积极采纳并实施行业公认的**最佳实践**，已成为普遍采用的核心应对方式。

海运作业中涉及的锂离子电池风险，可系统性地归纳为以下四大核心类别，每一类均需采取针对性的缓解措施：

1. **船舶动力储能系统**（用于推进）
2. **含锂离子电池产品**（包括消费电子及电子废弃物）
3. **电动汽车运输**
4. **电动工业设备**（港口作业机械等）

尽管不同类别的风险防控在原则与基础措施上存在共性，但基于其各自的应用场景与风险特性，仍需制定并实施**特定的缓解策略**。下文将对此展开具体阐述。

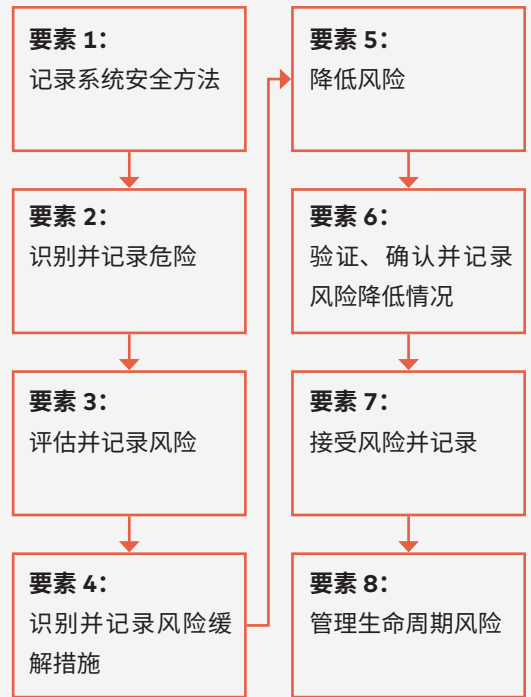


图 2：MIL-STD-882E 系统安全流程的八个要素

用于推进的锂离子储能系统

为船舶推进提供巨大动力，高度依赖大容量的储能系统。针对此类大规模储能系统发生灾难性失效的防控，通常需要投入大量的资金与专业化设施。

尽管 NFPA 855 标准并非为船用环境设计，但其核心理念，例如要求室内储能系统采用限容式的独立电池柜，在海运场景中仍具有重要参考价值。将这一策略应用于船舶的密闭空间，能够有效限制该区域内存储的总能量，从而控制潜在风险。

具体而言，实施能量限制意味着电池系统将由多个分散布置在可用区域内的小型模块构成，而非采用集中式的大型电池组。这种分散化布置有助于降低局部区域的火灾负荷，并使灭火等应急响应措施更具针对性。相较之下，其他一些储能标准（如部分建筑规范）则侧重于规定电池组之间必须保持一定的“安全间距”，其目的既是为了防止热量过度积聚，也是为了阻断单个电池失效可能引发的热失控连锁反应。

此外，在船舶上配备如 AFFF 泡沫或细水雾等经过验证的专用锂离子电池灭火系统，对于控制火势蔓延速率、抑制有毒可燃蒸汽的释放至关重要。此类系统必须经过严格的设计与测试，以确保其不仅适用于该环境，且具备足以抑制热失控的持续冷却能力。同时，系统设计还必须充分考虑灭火介质的导电性可能带来的额外电击风险，以及对高压系统的有效隔离。

含锂离子电池产品和电子垃圾

新产品中的锂离子电池本身故障率并不高，但市场上含此类电池的产品种类极为繁多，这为相关风险的管控带来了显著挑战，主要体现在两方面：

1. **产品的准确识别**：精准辨别哪些物品内含锂离子电池。
2. **流程的全程追踪**：在运输与存储全过程中对其进行有效监控。

尽管联合国及美国交通部的法规要求相关产品必须强制张贴标识，但在实际操作中，**标识不清或标签缺失**的情况仍十分常见。手机、电动滑板车或自行车等物品的电池相对容易识别，但许多其他商品，如集成了灯光、音响和充电功能的背包等日常用品，其内部可能使用了无明确标识的锂电池。

上述规定同样适用于已报废、转为**电子垃圾**或进入**回收流程**的锂电池。这类电池必须额外加注“**废弃物**”或“**存在缺陷**”等标识，以警示其发生灾难性失效的风险已大幅升高。要降低失效频率，核心策略之一是在整个物流链中对含锂电池产品实施严格的**审计与全程追踪**。提单信息遗漏或标签错误，都极易导致货物被误操作或不当处置。

在**降低事故后果**方面，常用策略包括限制设备的**荷电状态**。然而，关于何种电量水平能提供最低风险，目前行业数据仍存在矛盾，尚无定论。此外，小规模的主动防控手段（如专用灭火器）若应用及时，也能有效控制初期火情。对锂电池产品实施**局部集中存储**，有助于在运输期间配套部署额外的自动灭火系统。同时，**被动防火措施**同样关键，例如设置防火分区、使用指定耐火容器，以及采取隔离策略（确保锂电池存储区远离其他易燃易爆物）。

锂离子电动汽车运输

在运输含有锂离子电池的电动汽车时，原则上应严格遵循制造商的技术建议。然而，关于电动汽车的**长期存储**及电池的安全管理，各方的指导建议却存在**矛盾**。

例如：

- **特斯拉 Model Y** 车主手册建议，若车辆需闲置数周，应保持**插电状态**，否则系统日耗电可能导致荷电状态（SOC）下降高达 1%。
- **福特** 建议在存储期间将电池 SOC 保持在 **50%**。
- **宝马** 则建议停放时 SOC 应处于 **30% 至 50% 之间**，且**严禁连接充电电缆**。

鉴于海运过程中无法保持充电连接，且车辆必须保留一定电量以供港口调度，行业亟需**统一的标准**来解决这些分歧。国际航空运输协会（IATA）在相关指导文件中建议：运输时锂离子电池的 SOC **不应超过额定容量的 30%**。这一低电量状态既限制了诱发热失控的初始能量，又能确保车辆具备基本的移动能力。遗憾的是，并非所有航运商都采纳此标准，部分甚至要求车辆**充电至 100%**。

在**灭火措施**方面，**灭火毯**曾被认为是对抗电动汽车火灾的有效手段。但美国国家消防协会（NFPA）近期指南指出，灭火毯虽能扑灭明火，但电池内部积聚的热量仍可能产生易燃蒸汽，若被困在毯下，**反而存在爆炸风险**。因此，应对大规模储能风险时，必须对灭火等应急策略进行**全面评估**。

为降低事故后果，应将电动汽车存放于**独立区域**，远离可燃物及关键作业区。同时，设立一个远离其他物体的**安全“临时堆放区”**，以便在发生事故时迅速移置失效车辆，是防止火势蔓延、控制风险升级的有效手段。

锂离子动力工业设备

针对锂电池驱动的工业动力设备，其核心风险管控原则与电动汽车大体相同。然而，工业设备在日常运营中存在显著差异：**充放电循环极为频繁**，且常在复杂工况下作业，相比处于静态存储的电动汽车，其**遭受撞击、挤压等物理损伤的概率也更高**。

因此，相关的风险缓解措施需更具针对性：

- **充电区管理**：充电站点必须设置于远离其他设施及核心作业区的独立位置。在充电区加装**专用的自动灭火系统**，是降低此类高风险作业环节潜在后果的有效手段。
- **车载主动防护**：相比通用型手提灭火器，为设备配备**车载自动火灾抑制系统**能更直接、快速地遏制初期热失控蔓延。这类系统必须根据具体的设备型号与工况进行**定制化设计与验证**，仅配置通用的 ABC 类干粉灭火器通常难以有效应对电池火灾。
- **分级防护要求**：以电动叉车为例，应优先考虑配备集成式的自动火灾抑制系统。对于更大型的工业设备，则应强制要求安装**车载火灾探测器**及与之联动的**主动式灭火装置**。同时，所选用的灭火药剂必须具备针对性，确保能有效抑制由电池储能系统失效引发的特种火灾。

4.1.2 应急响应和一线工人培训

制定并有效执行**应急响应预案（ERP）**，是降低锂离子电池安全风险的一项高效且经济的关键举措。预案编制必须系统评估引入锂电池技术所带来的**新型致灾因素**，并针对潜在突发状况设计具体、有效的控制措施，以最大程度地减轻事故后果。

预案的覆盖范围需全面，应包含从大规模的电动汽车或工业设备火灾，到小规模含锂电池商品火情的**各类场景**。为此，强烈建议采取以下措施：

- **开展专项培训与演练**：对一线应急人员进行**现场专项培训**，并定期组织强制性的**船上应急演练**。实践证明，通过模拟真实事故场景进行演练，能显著提升团队的实战响应与风险控制能力。
- **强化基层风险意识**：加强对所有基层员工的**锂电安全基础教育**，使其掌握识别电池鼓胀、异味、异常发热等早期隐患的能力。这是实现**早期干预**、防止险情扩大与事故升级的**关键防线**。

4.2 安全认证

安全与安认证（SSC）流程是系统记录设施变更及新组件引入情况的有效管理工具。在美国公共交通等行业，该流程已被广泛用于对安全风险进行**前瞻性主动管理**。它基于安全管理体系（SMS）的核心原则，构建了一套用于识别、评估及缓解风险的标准化程序。通过执行该流程，相关责任方能够落实既定的风险管理要求，确保各项安全隐患与风险处于受控状态，并最终根据安全目标将其降低至**可接受的水平**。

SSC 流程的核心价值在于，它要求在任何项目实施之前，对其“安全就绪状态”进行**系统性预审**。这涉及对系统全生命周期（包括需求定义、设计研发、施工建设、运营维护直至报废处理）中各项风险防控措施的有效性进行**验证与确认**。美国公共交通协会（APTA）特别警示：若子系统或关键部件未能满足预设的安全与安保目标，新建或改建的安全关键系统就可能导致严重的伤亡事故或重大财产损失。因此，各机构必须采用**正式的、自上而下的系统化模式**来管控安全与安保风险。

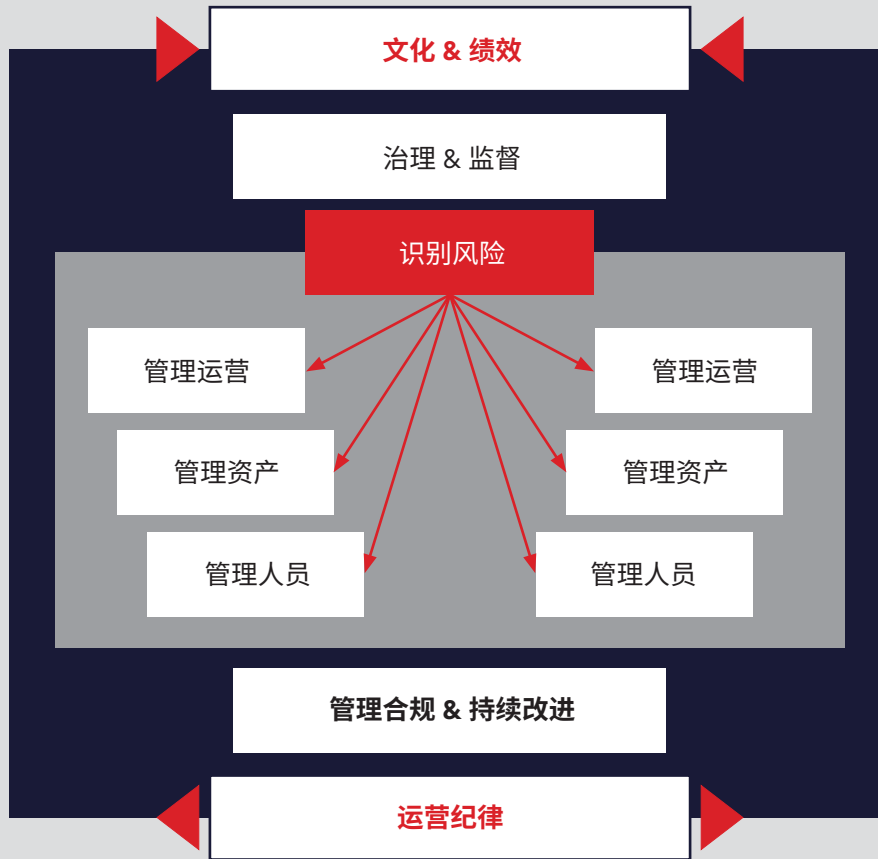
SSC 流程的实施通常推荐以下十个步骤：

1. **识别可认证要素**
2. **制定安全和安保设计标准**
3. **制定并完成设计标准符合性检查表**
4. **执行施工规范符合性检查**
5. **识别额外的安全和安保测试要求**
6. **执行支持 SSC 计划的测试和验证**
7. **管理 SSC 计划的集成测试**
8. **管理 SSC 计划中的“未决项”**
9. **验证运营准备情况**
10. **最终确定项目就绪状态，颁发安全与安认证**



5 结论

dss+ 框架 基于风险的安全管理系统



文化与领导力	风险治理与持续改进	技术流程与能力
界定组织与个人的思维模式及行为准则，涵盖其思考、行动及运作方式。	建立健全组织架构与治理机制，通过保障体系和持续改进流程，确保风险管理技术流程的有效落地与长效运行。这涵盖了绩效考核指标（KPI）及配套激励机制等管理手段。	建立并实施风险评估与管理所需的技术程序，涵盖火灾风险特征分析、标准制定、安全操作规程、关键设备完整性与可靠性管理等。同时，注重相关专业能力的建设，积极引入技术手段及数字化解决方案。

随着锂离子电池技术的广泛应用和全球电气化进程加速，预计其发生灾难性失效的频率将有所增加。目前，针对海运及港口作业中锂电池安全的强制性法规仍不完善，甚至存在明显的监管空白。在相关规范体系健全之前，**在全设施范围内开展系统性的风险评估，并深入汲取历史事故的经验教训**，是当前阶段管控安全风险最为务实和有效的路径。



Mark Davis

North America Principal: Transportation, dss+
Mark.Davis@consultdss.com



Jason Sergent

North America Principal: Transportation, dss+
Jason.Sergent@consultdss.com



Derek Engel

Senior Consultant, dss+
dengel@consultdss.us.com

关于 dss+

dss+ 作为一家领先的运营管理咨询服务提供商，以拯救生命和创造可持续发展的未来为宗旨。

dss+ 有着多年的咨询经验，勇于创新，以满足客户不断变化的需求。我们帮助企业建立组织和人员能力，管理风险，实现可持续发展和 ESG 目标，并更负责地运营。

dss+ 凭借深厚的行业和管理专业知识以及多元化的团队，通过将企业发展与可持续发展目标紧密结合，不断开发符合中国市场需求的解决方案，提供包括企业运营风险管理、卓越运营管理、创新与研发、环保以及数字化等解决方案，帮助合作伙伴实现一流的安全业绩和卓越的可持续运营。

更多信息请访问网站 www.consultdss.com



更多关于 dss+ 解决方案, 欢迎联系我们

021 5068 2805
info.cn@consultdss.com
www.consultdss.com

