

doi: 10.7690/bgzdh.2025.08.004

基于精益设计的陆军大型弹药通用吊具评价方法

张鑫磊, 王 婷, 邹 坚, 曹庆国, 马文国
(中国人民解放军 32228 部队 25 分队, 南京 211133)

摘要: 为解决对吊具产品的结构优化程度以及操作便捷性缺乏科学的可量化评价方法的问题, 提出梳理精益设计理论和精益设计工具方法。分析陆军大型弹药结构特点和勤务作业要求, 明确陆军大型弹药通用吊具需求, 提出陆军大型弹药通用吊具评价方法, 实现了对吊具产品结构优化程度和操作便捷性的量化评价。结果表明: 该方法对明确吊具产品的研究和开发需求具有一定的指导意义, 为吊具产品的优化设计提供了量化对比依据, 对类似产品的评价指标建立和优化设计指导也具有借鉴价值。

关键词: 精益设计; 弹药吊具; 评价方法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Army Large Ammunition Universal Hoist Based on Lean Design

Zhang Xinlei, Wang Ting, Zou Jian, Cao Qingguo, Ma Wenguo
(No. 25 Team, No. 32228 Unit of PLA, Nanjing 211133, China)

Abstract: In order to solve the problem of the lack of scientific and quantifiable evaluation method for the structural optimization degree and operation convenience of the sling product, the lean design theory and the lean design tool method are proposed. The structural characteristics and service operation requirements of army large ammunition were analyzed, the requirements of army large ammunition universal spreader were defined, and the evaluation method of army large ammunition universal spreader was put forward, which realized the quantitative evaluation of spreader product structure optimization degree and operation convenience. The results show that the method has a certain guiding significance to clarify the research and development needs of the sling products, provides a quantitative comparison basis for the optimization design of the sling products, and also has a reference value for the establishment of evaluation index and optimization design guidance of similar products.

Keywords: lean design; ammunition sling; evaluation method

0 引言

近年来, 大型火箭弹、导弹不断列装陆军部队, 这些弹药普遍存在着结构尺寸大、质量重、价值高等特点, 在收发、装卸等勤务作业时采用吊装设备进行辅助。目前, 陆军大型弹药吊具存在以下不足: 1) 通用性不足, 存在一种吊具只能适用一种弹药的情况; 2) 可靠性不足, 有些弹种吊具采用尼龙绳等设计, 存在不耐磨损、寿命较短、可靠性低的情况; 3) 结构优化不足, 部分弹种吊具尺寸偏大, 在库房内部作业时, 在空间受限的情况下, 较大的结构尺寸会导致堆码难以达到规定高度、库容难以全部挖潜等问题; 4) 吊装过程对作业人员体能消耗较大^[1], 影响持续作业能力和作业效率; 5) 对作业者具有较高的专业素质要求, 需要开展大量系统的前期培训^[2]。

针对上述问题, 研发一款能够适用于陆军大型弹药的通用吊具, 具有重要现实意义。该通用吊具应当在具有足够的通用性、可靠性的同时, 尽量减小结构尺寸, 具有较优的操作便捷性, 可以降低作业人员劳动强度, 降低对作业人员专业能力要求, 在最短时间内通过结构调节满足不同弹药吊装作业需求。

军方作为产品的需求和使用部门, 应当围绕备战打仗需要, 基于科学的评价方法, 提出对吊具产品的明确需求, 以便更好地指导兵器工业部门进行技术研究和产品开发。弹药吊具的通用性可以用适用弹种的数量和范围大小来评价, 其评价方法较为直观, 且具有较好的可操作性; 对于可靠性, 弹药吊具可以看成是一种特殊的起重运输机械, 起重运输机械领域具有较为成熟的评价方法^[3], 弹药吊具可以借鉴使用; 对于结构优化程度方面, 部分学者

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-25

基金项目: 陆军武器装备军内科研基金(LJ2022C030006)

第一作者: 张鑫磊(1989—), 男, 内蒙古人, 硕士。

虽然开展了大量研究工作^[4-11]，但往往是针对某一特定产品或特定结构开展结构优化设计或自动化改造，偏重于产品的设计和优化，且均为一事一案式的研究工作，并未系统地形成对某一类产品进行量化评价的方法；对于安装和拆卸操作便捷性方面，目前军方在提出具体要求时，往往以作业时间为量化要求指标，例如某弹药吊具的开发技术协议中，军方提出“安装或拆除可调式吊梁本身时间不应超过 30 min”，但作业时长与作业人员的业务素养及操作熟练程度具有极大的关联性，以作业时间作为操作便捷性的评价方法，客观性难以保证。产品拆装使用的便利性与快捷性，在众多民用产品领域，也得到了学者和技术人员的重点关注，陈睿^[12]通过资料检索收集与实地调研的方式，对家具产品的免工具拆装结构进行了系统分析，总结了结构特点，对比了结构优劣，并基于 Triz 理论对结构的发展方向进行了合理推测，从多维度提出了免工具拆装结构的设计要求，对于非战争军事作业装备^[9]的设计起到了很好的借鉴作用，但也未能进一步建立起系统的评价方法。

笔者基于精益设计理论方法，围绕陆军大型弹药通用吊具勤务作业需求和特点，提出陆军大型弹药通用吊具评价方法，以期解决军方在提出相应产品需求时无法对结构优劣、操作便捷性等提出明确、客观、量化的评价指标的问题，以便更好地指导技术研究和产品开发工作开展，缩短产品研发周期，提高产品性能，更好地服务备战打仗需要。

1 精益设计

1.1 精益设计在国内外的研究和应用

精益设计是美国工程师桑迪蒙罗在受戴明博士的启发后，于 20 世纪 80 年代提出的一套产品设计开发理念^[12]。蒙罗将其引入福特的发动机生产线后获得了巨大成功，极大地节约了福特公司的生产制造成本，提高了生产质量，缩短了产品开发周期，并由此引起业界关注。

蒙罗对于精益设计的定义十分简单，即更少的零件，更高的质量。精益设计强调关注产品的简化设计和成本的降低，从设计端对产品进行优化，并着重强调设计端应当考虑包括工艺可制造型、售后维修等在内的产品全寿命周期产品需求。精益设计的理念经过近半个世纪的发展，已被广泛应用于国外的汽车制造、航空航天、电子电器等领域。

国内对精益设计的研究起步较晚，但近年来随

着我国制造业不断向大向强发展，国内高校和企业对精益设计的研究和实践运用都发展迅猛。顾新建、齐二石、陈睿等^[12-14]对精益设计开展了大量的研究，为精益设计理念的实践运用铺垫了理论基础；国内企业对于精益设计的实践运用以家电行业最具代表性，如奥克斯、海信、美的等公司，都基于自身企业特点，引入、消化精益设计理念，指导产品开发和管理^[15-16]。以美的集团为例，2018 年美的与美国蒙罗公司建立合作关系，在全集团研发和制造体系开展精益设计理念导入，建立基于精益设计的产品管理体系和技术人员资格认证体系，开展体系和人才队伍建设，重点以提升产品装配可制造性为抓手，实现产品设计和制造能力提升，并取得了长足进步。

1.2 精益设计方法

广义来说，产品的装配可制造性包括了对产品结构优劣的评价，产品装配可制造性是精益设计关注的重点，为评价设计的可制造性，精益设计提出零部件价值挑战、综合成本思维、为 BOB 设计 3 大方法以及罚分的概念。

孟子博^[17]针对建筑行业的预制构件领域进行的精益设计与评价研究，就是从装配式建筑视角研究精益设计在建筑行业的实践运用，陆军大型弹药通用吊具可以借鉴相关理念，即将吊具的各个组件看作是产品生产过程中的零部件，将吊具的展开、撤收以及换型调节看作装配作业过程，进而可借鉴精益设计的 3 大方法和罚分对吊具的组件结构优劣、作业便捷性进行评价。

1.2.1 零部件价值挑战

开展零部件价值挑战，首先要思考的问题就是什么零部件是最便宜的，什么零部件是最好生产最好装配的。精益设计给出的答案是不存在的零件，不存在的零件没有成本，不会损坏，没有质量风险，不需要装配。零部件价值挑战的核心思想，就是要针对产品的零部件逐个进行分析，思考每个零部件存在的价值，思考合并或者去除该零件的一切可能性。

为开展零部件价值挑战，蒙罗引出了 2 min 法则，对于待评价零部件，在 2 min 内回答 3 个问题：1) 这个零件，是否必须与其他零件有相对移动；2) 这个零件，是否必须与其他零件用不同材料；3) 这个零件，合并或取消后是否影响整体的装配。对于

3 个问题, 如果任意一条的回答为“是”, 则这是一个好零件, 应当予以保留; 若 3 个问题的答案均为“否”, 则该零件为坏零件, 要想方设法将其消除。

1.2.2 综合成本

精益设计提出综合成本的概念, 即将生产中的所有活动(物料、生产、品质)都折算成成本, 也称为总制造成本。精益设计的分析中一般不考虑供应商利润和物流成本, 只关心应当成本(should cost)。

由综合成本的定义可知, 综合成本的组成如图 1 所示。

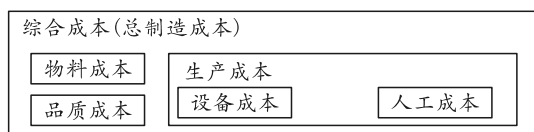


图 1 综合成本组成

综合成本=材料成本+人工成本+设备成本+质量成本。

1) 材料成本为单一物料的成本;

2) 人工成本为生产工时与人工费率的乘积: 人工成本=生产时间×人工费率;

3) 设备成本包括设备的投资成本折旧和设备能耗: 设备成本=生产时间×设备费率;

4) 质量成本包括失效后维修的成本与失效后更换的成本: 质量成本=Σ(失效概率×维修成本)=Σ(失效概率×维修工时×维修费率)。

1.2.3 为 BOB 设计

为更直观地对产品可制造性进行量化评价, 蒙罗提出了为 BOB 设计的理念。BOB 是一个虚拟的人物, 其名称为“蒙眼、独臂的建造师”(blindfolded, one-arm, builder)的英文首字母缩写, 其形象与机械手臂有异曲同工之处, 即为 BOB 设计的产品结构, 如图 2 所示。必然是具有较优装配可制造性的, 是可以实现自动化装配的产品。

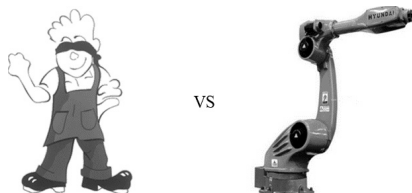


图 2 为 BOB 设计

1.2.4 精益设计罚分

从定义上来看, 精益设计属于面向装配和制造设计(design for manufacture and assembly, DFMA)的技术范畴^[18]。蒙罗的成功之处在于, 为实现精益

设计的目的, 引入了罚分的概念。罚分是用来评判产品设计优劣的量化指标, 可制造性越差则罚分越高。罚分在成本分析时等价转化为“生产时间”, 这并非真正的时间, 只是为衡量差劲的设计带来的“成本”。

精益设计的罚分从 3 个维度进行: 1) 零件是否方便拿取; 2) 零件是否容易操作; 3) 该零件与其他零件是否容易安装。针对每个维度, 精益设计穷举所有可能出现的情况, 并分别赋予不同的罚分分值。以零件是否方便拿取这个维度为例, 精益设计给出 3 种情况及相应的罚分规则: 使用单手拿取零件 2 分, 使用双手拿取零件 3 分, 使用辅助起重设备拿取零件 30 分, 如图 3 和表 1 所示。在对产品结构进行评价时, 从 3 个维度依次依据罚分规则进行罚分, 罚分越低, 则越符合精益设计的理念, 其装配可制造性则越优。



图 3 操作方法

表 1 罚分规则

操作	分值	大小/m	质量/kg
单手	2	<0.5	<4.5
双手	3	>0.5	>4.5
起重机	30	-	>19

2 陆军大型弹药通用吊具评价方法

2.1 精益设计在国内外的研究和应用

目前陆军列装的大型弹药主要为大型火箭弹和大型防空导弹等, 笔者列举分析 3 种较为典型的大型弹药, 其中, A 弹药采用铁笼式储运箱的包装形式, 每箱 2 发, 包装质量约 2.0 t, 最大堆码高度 2 080 mm, 地面载荷为 10.18 kPa; B 弹药采用贮运发箱的包装形式, 每箱 4 发, 包装质量约 7.0 t, 最大堆码高度 3 390 mm, 地面载荷为 22.00 kPa; C 弹药采用筒弹集装架的包装形式, 每架 3 发, 质量约 4.0 t, 最大堆码高度 1 400 mm, 地面载荷为 6.63 kPa。

根据勤务作业要求, 进行弹药吊运时, A 弹药要求吊具额定载荷不小于 2.65 t, B 弹药要求吊具额定载荷不小于 10 t, C 弹药要求吊具额定载荷不小于 6.5 t。

3 种弹药的各项基本参数汇总如表 2 所示。

表 2 弹药基本参数

弹药名称	包装质量/t	最大堆码高度/mm	最大地面载荷/kPa	吊具额定载荷/t
A	2.00	2 080	10.18	2.65
B	7.00	3 390	22.00	10.00
C	4.00	1 400	6.63	6.50

A 弹药使用专用吊具，单发吊运与箱组吊运形式一致，如图 4 所示。B 弹药与 C 弹药吊具的结构形式基本一致，即由起吊环和吊带(链)2 部分组成，其中起吊环与起重设备连接，并通过吊带(链)与弹药连接，如图 5—6 所示。



图 4 A 弹药吊具



图 5 B 弹药吊具



图 6 C 弹药吊具

3 种弹药的起吊点位置如表 3 所示。

表 3 起吊点位置 mm

弹药名称	前后距离	左右距离
A	1 100	700
B	2 200	1 140
C	2 115	860

根据国军标 GJB5151A—2018《后方军械仓库设计规范》，用于存储通用弹药、火箭弹及导弹的地面库房和覆土库房，其建筑层高为 4 000~6 000 mm，地面载荷范围为 20~50 kPa^[19]。可以看出：对于前

述几种陆军广泛装备的大型弹药而言，当前标准下的库房地面载荷，是可以满足其最大层高堆码要求的。最大层高堆码时，B 弹药所需高度最大，为 3 390 mm。当库房高度取标准下限时，弹药堆垛顶部空间较小，仅 610 mm。

为满足陆军大型弹药的吊装需求，吊具应当在尽量小的竖直空间范围内(610 mm)，亦即应当尽量优化结构设计，采用尽可能小的结构尺寸，在长度方向满足 1 100~2 200 mm 的调节范围需求，在宽度方向满足 700~1 140 mm 的调节范围需求，且应当可以在使用尽量少人力的情况下，实现尽量快速的转型切换。

2.2 评价方法

基于陆军大型弹药吊具需求和精益设计方法，提出陆军大型弹药通用吊具评价方法，流程如图 7 所示。

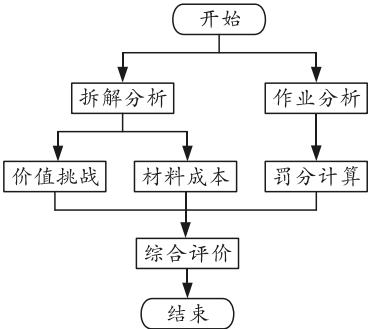


图 7 通用吊具评价流程

2.2.1 拆解分析

对于待评价的吊具，首先进行拆解分析。拆解分析并不是物理意义上的将产品拆分，而是以产品实际展开和撤收作业中的最小可拆分组件为研究对象，对产品进行分析和评价。如图 5 所示的吊具，应当分别对吊环和 4 个吊带共计 5 个组件进行分析，而对于图 4 所示的吊具，则应将其看成 1 个组件进行分析。

拆解分析主要包括价值挑战 and 材料成本 2 方面的内容。

价值挑战采用 1.2.1 节所述的 2 min 原则，判定每个组件的好坏。

材料成本亦即分析每个组件的成本，这里的成本并非真正的采购成本，而是为对产品进行评价而定义的成本，其核心在于统一相同物料、相同工艺的成本，以实现在同一标准下对不同产品进行较为客观、公正的评价。表 4 和 5 列举了部分物料和工艺的成本。

表 4 物料质量

材料	Q235	45 钢	钛合金	铝合金	PP	铸铁
计量	6	5	500	22	1.3	4

表 5 工艺成本

材料	铸造/kg	焊接/kg	机加工/h	注塑/kg	喷漆/mm ²
计量	0.50	1.50	60.00	0.30	0.01

2.2.2 作业分析

作业分析是通过罚分的方式对吊具的作业过程逐步进行分析评价,包括拿取、安装、操作 3 个维度,罚分明细如表 6—8 所示。

表 6 罚分明细-拿取

事项	分值	说明
单手	2	尺寸<500 mm,质量<4.5 kg
双手	3	尺寸>500 mm,质量<19 kg
起重设备	30	质量>19 kg

表 7 罚分明细-安装

事项	分值	说明
不稳定的组件	1	在自重下弯曲或者容易散落
拉开组件	1	涉及嵌套、缠绕、钩在一起
需要小心处理	1	易坏易碎
过小的组件	1	尺寸较小,易丢失
脏污的组件	1	油脂、脏污
戴手套作业	1	需要戴手套作业
需拆除包装	10	安装前需要拆除包装箱、带或护套
具有作业危险	5	锋利尖锐、易夹手或划伤等

表 8 罚分明细-操作

事项	分值	说明
抵抗重力	1	非由上至下安装
复杂动作	1	需要一个以上动作,如多点对齐
视线受阻	2	需要通过感觉安装,无法通过视觉完成作业
通路受限	2	操作者的手或者工具没有足够空间或在狭窄的位置作业
依赖作业人员经验	2	无自定位,需要作业人员具有相应经验
按住	2	需要操作人员施压按紧方可完成作业
人体工学风险	5	需要高空作业、大型起重设备、使用指力、重复性运动、弯腰、90°侧向运动等
使用通用工具	2	使用扳手、螺丝刀等通用工具
使用专用工具	4	使用定制的专用工具
防呆防错问题	×2	存在防呆防错问题的,所有罚分翻倍

依据吊具实际作业过程中的展开和撤收顺序,依次对每个组件分别从 3 个维度进行罚分,罚分时,要从 BOB 的角度出发考虑安装和作业情况。值得注意的是,如果待罚分组件的设计存在防呆防错问题,则需将该组件的所有罚分翻倍。

2.2.3 综合评价

基于精益设计方法,以综合成本的概念来评估产品的设计。定义综合成本为 P ,材料成本为 P_1 ,权重系数为 a ,作业成本为 P_2 ,权重系数为 b ,则有:

$$P=a \cdot P_1+b \cdot 10 P_2。$$
 (1)

若待评价产品由 n 个组件组成,定义每个组件的物料成本和工艺成本为 W_i 、 $G_i(i=1, 2, \cdots, n)$,则:

$$P_1=\sum\left(W_i+G_i\right) \quad(i=1, 2, \cdots, n)。$$
 (2)

若待评价产品共有 m 个坏组件,定义每个组件的罚分为 $F_i(i=1, 2, \cdots, n)$,则:

$$P_2=\sum F_i+5 \cdot m \quad(i=1, 2, \cdots, n)。$$
 (3)

与前述精益设计罚分的概念类似,此处的成本并非现实意义上的成本,而是为评价产品的设计而定义出来的一种量化指标。

权重系数是用来定义材料成本和作业成本在评价指标中的重要程度,若需要综合考虑产品的成本和作业便捷性,可将 2 个权重系数均定义为 1,即表明材料成本和作业便捷性同等重要;极端情况下,如只考虑吊具产品的操作便捷性而不考虑其成本,则可将 a 定义为 0, b 定义为 1,亦即不考虑材料成本。

综合成本 P 的数值越小,则产品的设计越优。

2.3 应用实例

吊具评价方法的实施以图 4 和 6 所示的吊具为例,将权重系数 a 定义为 0, b 定义为 1。

2.3.1 A 弹药吊具

进行拆解分析,该吊具可以拆分 1 个组件,故无坏组件。

对照表 6—8 对该组件进行罚分:双手拿取,3 分;抵抗重力,1 分;防呆防错问题,分数翻倍;合计 8 分。

由上可知:

$$P_A=10 \times P_{2A}=10 \times 8=80。$$
 (4)

2.3.2 C 弹药吊具

进行拆解分析,该吊具可以拆分为 1 个吊环和 4 个吊带。分别对 5 个组件进行零部件价值挑战:

1) 吊环:吊环必须要与起重设备发生相对移动,且取消吊环会影响整个吊具的功能,故吊环为 1 个好组件;

2) 吊带:吊带与吊环可以不发生相对移动,不是必须与吊环采用不同材质,与吊环合并取消后不影响吊具功能,故 4 个吊带均为坏组件。

对照表 6—8 分别对吊环和吊带进行罚分:

1) 吊环:单手拿取,2 分;抵抗重力,1 分;按住,2 分;合计 5 分。

2) 吊带:双手拿取,3 分;不稳定的组件,1

分；抵抗重力，1 分；按住，2 分；防呆防错问题，分数翻倍；合计 14 分。

由上可知：

$$P_C = 10 \times P_{2C} = 10 \times (5 + 4 \times 14 + 5 \times 4) = 810. \quad (5)$$

对比 2 种吊具的综合成本 P_A 和 P_C ，可以看出：A 弹药吊具在操作便捷性和结构优化设计上，要明显优于 C 弹药。此外，由上述分析，也可以得出 C 弹药吊具的优化方向，即可以更换吊带材料，使用结构钢与吊环做成一体式刚性结构，从而减少了坏组件数量，避免防呆防错问题，提升结构优化程度和操作便捷性。

3 结束语

笔者研究梳理了精益设计理论方法，分析了陆军典型的大型弹药结构特点以及勤务作业要求，明确了陆军大型弹药通用吊具的研究和开发需求，基于精益设计理论方法建立陆军大型弹药通用吊具评价方法，解决了对于该类型产品的结构优化程度和操作便捷性缺乏科学的量化评价指标的问题，并以 A、C 2 种弹药吊具为例，进行了量化对比评价，证明了该评价方法具有较大的实用性和工程指导意义。笔者提出的评价方法对于其他非战争军事装备的评价也可以起到一定的借鉴作用。

参考文献：

- [1] 何晓晖, 王强, 曾繁琦, 等. 基于无人化技术的军用工程机械吊装作业研究[J]. 装备制造技术, 2016(1): 195-198.
- [2] AN J Q, CHEN F, CHEN X, et al. Three Dimensional Hoisting Simulation System Based on Virtual Reality for Truck Crane[C]. Proceedings of the 34th Chinese Control Conference. IEEE, 2015: 8893-8897.
- [3] 中国标准出版社. 起重机设计规范: GBT3811—2008[S]. 北京: 国家标准局出版社, 2008.
- [4] 张红梅. 大型提梁机结构有限元分析与优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [5] 张东宝. 单梁双吊钩门式起重机结构分析与优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [6] 缪东辉, 马张健, 李佳圣, 等. 导弹运输装填发射车吊装稳定性仿真研究[J]. 空天防御, 2018, 1(4): 58-64.
- [7] 邱奇, 张雷, 高运平, 等. 吊具的参数化设计与有限元分析[J]. 金属加工(冷加工), 2017, 12: 57-58.
- [8] 高飞. 重型卡车底盘起重吊具的优化设计[J]. 机械工程师, 2017(7): 58-59, 62.
- [9] 姜龙, 李林杰, 王广欣, 等. 基于 ABAQUS 的吊具工装强度分析及优化设计[J]. 机械, 2015, 42(1): 29-31.
- [10] 曾令梦. 储运发箱的高精度自动吊装方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [11] 周瑾. 直驱式吊装机械臂手腕设计及其控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [12] 陈睿. A 汽车零部件企业精益设计的实践研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [13] 顾新建, 祁国宁. 德国的精益管理的思想[J]. 工程建设与设计, 2018, 76(2): 40-42.
- [14] 王永升, 齐二石. 从精益生产到精益设计[J]. 现代管理科学, 2010, 95(3): 6-7.
- [15] 崔军. 面向家电制造企业的精益设计管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [16] 吴建军. 精益设计技术在家电设计中的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(1): 8-10.
- [17] 孟子博. 预制构件厂精益设计与评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [18] 钟元. 面向制造和装配的产品设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 10-18.
- [19] 后方军械仓库设计规范: GJB5151A—2018[S]. 北京: 中央军委后勤保障部, 2018: 18-22.