

团 体 标 准

T/CMES XXXX—2025
代替 T/CMES XXXX—201X

汽车起重机可靠性试验规范 及可靠性评价方法

Reliability Test Specifications and Evaluation Methods
for Truck Cranes

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

目 次.....	II
前 言.....	III
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 试验样机与试验条件.....	2
4.1 试验样机.....	2
4.2 实验条件.....	2
5 试验方法.....	2
6 试验结论.....	2
7 故障分类.....	2
7.1 一般要求.....	2
7.2 故障判别原则.....	2
8 试验报告.....	3
9 汽车起重机可靠性评价体系的建立.....	3
9.1 遵循的一般原则.....	3
9.2 三维模型建立.....	3
9.3 技术路线确定.....	4
10 汽车起重机整机可靠性评价.....	5
10.1 汽车起重机整机结构性能分析及评价.....	5
10.2 汽车起重机整机可靠性评价指标.....	5
11 关键子系统可靠性评价.....	7
11.1 汽车起重机机械结构可靠性评价.....	7
11.2 汽车起重机液压系统可靠性评价.....	9
11.3 汽车起重机电气系统可靠性评价.....	11

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。中国机械工程学会不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出。

本文件由中国机械工程学会***分会/工作组归口管理。

本文件起草单位：XXXXXXXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX。

本文件主要起草人：XXX, XXX, XXX, XXX, XXX, XXX。

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会标准征求意见稿

汽车起重机可靠性试验规范及可靠性评价方法

1 范围

本文件规定了汽车起重机可靠性试验的试验样机与试验条件、试验方法、试验结论、故障分类以及可靠性评价等内容。

本文件适用于汽车起重机的可靠性试验，旨在评估起重机在规定的使用条件下，完成规定功能的能力。

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 6068-2021 汽车起重机和轮胎起重机试验规范
- JB/T 4030.1-2000 汽车起重机和轮胎起重机试验规范 作业可靠性试验
- GB/T 5905-2011 起重机 试验规范和程序
- Q/Q2 J01.316-2016 重型机床可靠性评价方法
- GB/T4882-2001 数据的统计处理和解释 正态性检验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

故障 fault

起重机整机或零部件不能完成其规定功能，或其性能指标恶化至规定范围以外的状态。

3.2

基本故障 base fault

起重机整机零部件本身内在缺陷或不满足使用要求而引起的故障。

3.3

从属故障 man-made fault

由于操作人员违章操作，未按规定使用条件所造成的，或明显人为因素造成的故障。

3.4

致命故障 vital fault

危及作业安全、导致人身伤亡、引起主要零部件报废，造成重大经济损失或对周围环境造成严重危害的故障。

3.5

严重故障 serious fault

影响作业安全，导致主要零部件损坏或性能显著降低，且不能用随机工具及易损备件在短时间内修复，修理费用高的故障。

3.6

一般故障 general fault

造成作业中断或性能下降，但不会导致主要零部件损坏，并可用随机工具和易损备件在短时间能够排除的故障。

3.7

轻微故障 slight fault

暂时不会导致作业中断，不需更换零件，用随机工具在短时间内能排除的故障。

3.8

故障排除时间 trouble-shooting time

出现故障开始到排除故障恢复正常工作为止，包括故障诊断、检修设备、修理、更换、调整、试运转等时间。不包括由于人为或自然等因素而耽误的时间及等备件的时间。

4 试验样机与试验条件

4.1 试验样机

试验样机应是按照 GB/T6068 的规定进行出厂检验合格的汽车起重机。供作业可靠性试验的试验样机，应是从当季正常入库的产品中随机抽取一台。对最大起重量不大于 160t 的起重机抽样基数不少于两台，对最大起重量大于 160t 的起重机抽样基数不少于一台。若为用户处抽取样机时，则抽样基数不限。

4.2 试验条件

起重机作业可靠性试验条件应符合 GB/T6068 的规定^[1]。

5 试验方法

汽车起重机的作业可靠性试验应符合 JB/T 4030.1 的规定^[2]。

6 试验结论

试验期间，样机如出现致命故障，本次试验中止，不计算可靠性指标。对变型起重机在作业可靠性试验期间，如果未发现 1 类~3 类的故障，则可靠性指标可引用变型前试验报告的数据。可靠性指标计算在下文展示。

7 故障分类

7.1 一般要求

汽车起重机试验中只计算基本故障，不计算因违规操作造成的从属故障。按故障性质、危害程度、维修的难易，对功能影响大小，将故障分为致命故障、严重故障、一般故障和轻微故障四类，见表 1。

表1 故障分类表

类别	故障分类	故障危害度系数 ε
1	致命故障	100
2	严重故障	10
3	一般故障	1
4	轻微故障	0.2

7.2 故障判别原则

- a) 从属故障不计算故障次数。
- b) 按定义判断起重机基本故障类别时，各类故障互不相容的，即对某一基本故障，只判定为四类基本故障中的一类。
- c) 基本故障判别，应以其造成的现场后果划分故障类别。
- d) 同时发生的相关故障作为一次故障，同时发生的不相关的故障分别计数。

8 试验报告

作业可靠性试验完成后，按 GB/T5905—2011 中第 6 章的要求出具试验报告^[3]。

9 汽车起重机可靠性评价体系的建立

9.1 遵循的一般原则

汽车起重机可靠性评价体系的建立需遵循全面性原则、重要性原则以及可行性原则。所谓全面性，即覆盖“全寿命周期+全系统+多维度”，避免遗漏；所谓重要性，即聚焦机械结构、液压、电气等关键子系统，优先解决高影响故障；所谓可行性，即通过低成本传感、模块化设计、数据驱动方法确保落地。三者协同形成“全面覆盖—重点突破—高效实施”的闭环，最终实现汽车起重机高可靠、低维护、长寿命的目标。

9.1.1 全面性原则

可靠性评价体系应覆盖汽车起重机的整个系统。汽车起重机是由机械结构、液压系统、电气系统、传动系统、安全保护系统以及辅助系统等多个子系统组成的复杂工程机械，各子系统共同保障其高效、安全地完成吊装作业。这些系统中影响可靠性的因素众多，往往一个小的局部问题会影响整机的正常使用，因此所选的可靠性评价指标不仅要覆盖汽车起重机的关键系统，还应包括一些辅助系统。

可靠性评价体系应贯穿汽车起重机的全寿命周期。可靠性评价体系应该贯穿汽车起重机的设计、制造、使用及报废等各个寿命周期，可靠性评价指标还应充分反映汽车起重机稳定性强、可用度高、易于维护、回收利用度高等任务需求。

可靠性评价体系需要包含汽车起重机的多维度可靠性指标，这些指标包含某些定量指标以及定性指标，通过多维度指标来考察汽车起重机的可靠性。

9.1.2 重要性原则

可靠性评价体系应注重研究汽车起重机的某些关键子系统，聚焦对整机可靠性影响最大的关键子系统，优化资源配置。具体可利用帕累托分析方法，即根据历史故障数据中的 80% 的故障由 20% 的关键部件引发，最终可得关键子系统并优先进行优化。另外可通过故障树分析识别导致整机失效的最小割集，聚焦薄弱环节。从而得出汽车起重机的关键子系统进行可靠性研究分析，最终实现投入较小的成本得到较大的可靠度提升。

9.1.3 可行性原则

可靠性评价指标验证时应满足技术可行性，保证所提出的可靠性评价指标在技术上既有现实基础，又有一定的先进性，例如可以利用仿真软件进行仿真实验，从而减少一定的实验成本。可靠性评价体系的建立要有一定的经济可行性。汽车起重机可靠性评价是影响寿命周期费用的重要因素，论证时应对可能获得的经费投入和实际需要的研制采购和使用保障经费进行认真的估算，并将两者比较，通过比较得出经济可行性分析结论。可靠性评价体系确保评价体系可落地、低成本、易操作，避免理论化与过度复杂。

9.2 三维模型建立

汽车起重机的全寿命周期主要包括设计、制造、使用、报废等阶段。影响汽车起重机可靠性的因素随着时间的后移而增加，因此，在不同的寿命周期所选取的可靠性评价指标应该是不同的。针对汽车起重机的系统划分，分别从整机、机械结构、液压系统及电气系统等方面进行可靠性分析。

针对可靠性评价要素，可分别从可靠性、维修性、可用性以及其他方面进行可靠性分析。针对汽车起重机的主要结构功能特点，结合汽车起重机在工艺、性能、寿命、维修性、经济性等方面的特性和要求，从汽车起重机整机及关键子系统、寿命周期和可靠性评价要素三个维度建立汽车起重机可靠性评价体系三维模型^[4]，见图1。

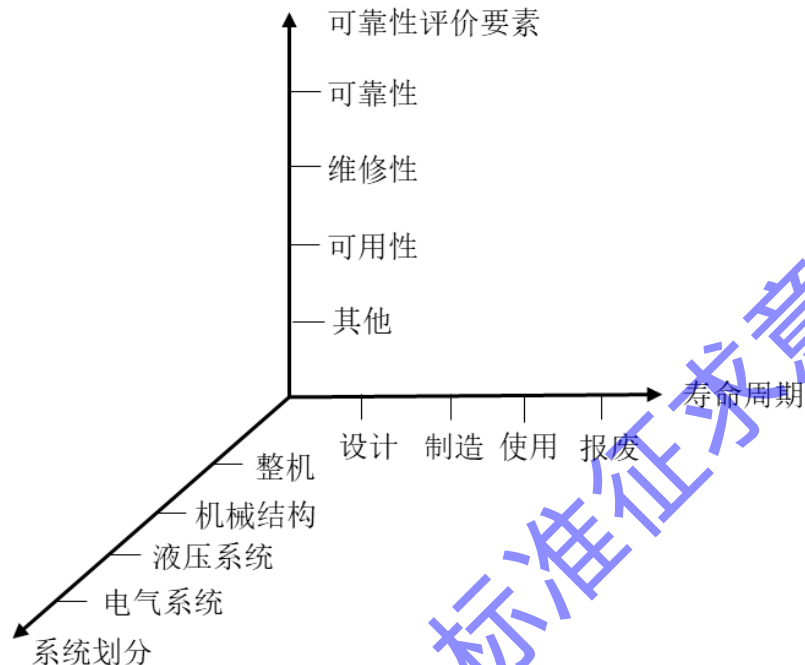


图1 汽车起重机可靠性评价体系三维模型

9.2.1 系统划分维

通过对汽车起重机的结构功能及故障数据分析，我们得知机械结构、液压系统、电气系统是汽车起重机的三个关键子系统，即集中了大多数失效模式、失效次数最多、危害程度最大的三个子系统。因此我们在给出汽车起重机整机可靠性评价指标的同时，重点分析机械结构及传动系统、液压系统、电气系统三个关键子系统在各个寿命周期的可靠性影响因素。

9.2.2 寿命周期维

汽车起重机的全寿命周期主要包括设计、制造、使用以及报废等阶段，不同的寿命周期内影响汽车起重机的可靠性因素不同，针对不同的寿命周期选择不同的可靠性评价指标可以实现对汽车起重机全寿命周期的可靠性控制。

9.2.3 可靠性评价要素维

建立可靠性评价体系的目的在于对汽车起重机的可靠性进行一个全面的评价考核并为后期的可靠性增长提供依据。以往单一的可靠性评价指标难以对汽车起重机的可靠性进行全面评价，在汽车起重机可靠性评价体系中，除考虑汽车起重机产品的可靠程度、维修难易程度、可用度外，还要考虑由于基础件变形、环境温度影响、整机装配工艺和用户用工况等多因素造成的性能退化，以及汽车起重机零部件在加工装配过程中由于可靠性管理不当带来的可靠性问题。

9.3 技术路线确定

按照可靠性评价体系三维模型的建立思想，针对汽车起重机整机及关键子系统的性能需求及主要故障模式，建立汽车起重机在全寿命周期内的可靠性评价体系的技术路线，如图2所示。

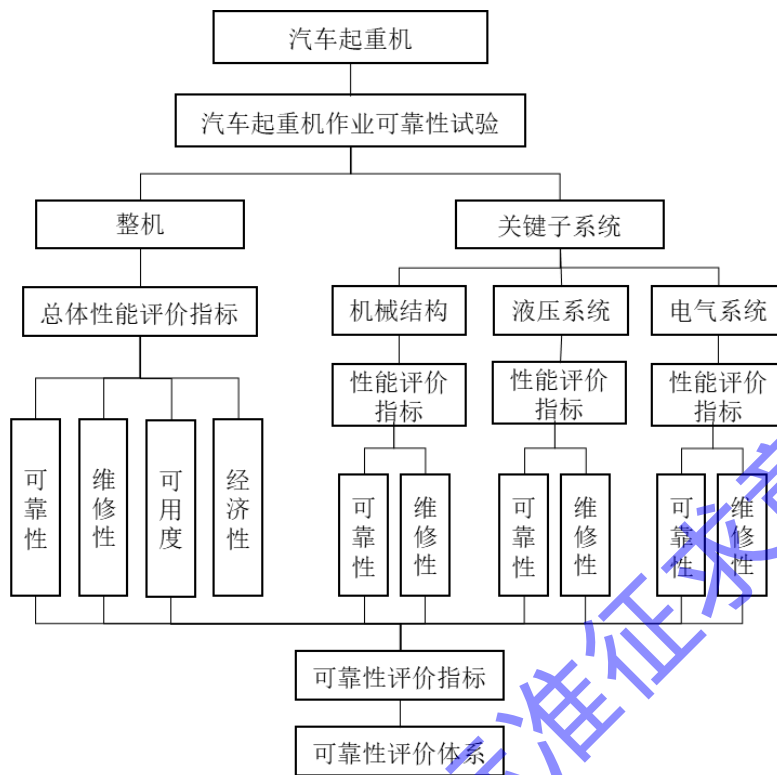


图2 汽车起重机可靠性评价体系研究技术路线

10 汽车起重机整机可靠性评价

10.1 汽车起重机整机结构性能分析及评价

10.1.1 汽车起重机整机主要潜在的性能问题

- 长期超载、频繁使用或材料缺陷可能导致起重臂局部应力集中，引发裂纹或永久性变形；
- 长期高频次作业后，焊接点或关键连接部件可能因疲劳失效；
- 支腿支撑不均匀或地面沉降可能导致整车倾斜，甚至倾覆；
- 在强风环境下，起重臂受风力影响可能加剧晃动，降低作业安全性；
- 未经培训的操作员可能因操作不当（如急停、猛摆）加速设备损耗；
- 自制关键零部件在加工、装配时的工艺问题。

10.1.2 汽车起重机整机技术性能指标

汽车起重机整机技术性能指标见表 2。

表2 汽车起重机整机技术性能指标

评价项目	技术性能指标
汽车起重机整机	可用性、稳定性、易维修性、耐磨损、安全性、回收利用率高

10.2 汽车起重机整机可靠性评价指标

10.2.1 设计阶段

10.2.1.1 可靠度 $R(t)$

汽车起重机的可靠度 $R(t)$ 是指汽车起重机在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。在设计阶段，与新产品相关的客观数据较少，可以根据相似比较法来预计新产品的可靠度，计

算公式为:

$$R(t) = R_1(t)R_2(t)\cdots R_i(t) \quad (1)$$

式中:

$R(t)$: 汽车起重机整机的可靠度。

$R_i(t)$: 汽车起重机第 i 个子系统的可靠度。

用另一种表达方式, 可以得出:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (2)$$

式中, $\lambda(t)$ 为整机的故障率, $\lambda_i(t)$ 为起重机第 i 个子系统的故障率。即整机故障率等于各子系统故障率之和。

10.2.2 使用阶段

10.2.2.1 首次故障前平均时间 MTTF

首次故障前平均时间 (Mean Time To First Failure, MTTF) 表示设备或系统从开始使用到首次发生故障的平均时间。它是可靠性工程中的关键指标, 主要用于评估新产品或部件的初期可靠性。其计算公式为:

$$MTTF = \frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^{n-r} t_j \right) \quad (3)$$

式中,

n : 被调查或被试汽车起重机台数;

r : 被调查或被试汽车起重机在考核期内出现首次故障的台数;

t_i : 第 i 台汽车起重机在考核期内出现首次故障时的累计工作时间, h ;

t_j : 在考核期结束时, 未发生首次故障的第 j 台汽车起重机累计工作时间, h 。

10.2.2.2 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 是衡量可修复设备或系统可靠性的关键指标, 表示在正常条件下, 两次相邻故障之间的平均运行时间。其计算公式为:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{r_f} \quad (4)$$

式中,

n : 被调查或被试汽车起重机台数;

r_f : 被调查或被试汽车起重机在考核期内出现的故障总次数;

t_i : 第 i 台汽车起重机在考核期内的累计工作时间, h ;

10.2.2.3 可用度 A

可用度是指产品在任意时刻需要和开始执行任务时, 处于可工作或可使用的状态的程度。其计算公式为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (5)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

T_i ：第 i 台汽车起重机在考核期内的累计工作时间， h ；

τ_i ：第 i 台汽车起重机在考核期内的累计维修时间， h ；

10.2.2.4 单位时间的维修费 C

单位时间的维修费是指所有被试汽车起重机在考核期间的工作单位时间的维修费用。其计算公式为：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (6)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

C_i ：第 i 台汽车起重机在考核期内的累计维修费用，元；

T_i ：第 i 台汽车起重机在考核期内的累计工作时间， h 。

10.2.2.5 当量故障率 D

当评价汽车起重机的可靠性时，不同级别的故障对汽车起重机的危害程度是不同的，轻微故障一般不影响汽车起重机运行，但仍需要维修，因此我们需要考虑不同级别的故障发生的次数。当量故障系数 ε 代表的不同级别的故障转化为一般故障的一个度量，其赋值如下：致命故障=100，严重故障=10，一般故障=1，轻微故障=0.2。当量故障率 D 表示的是汽车起重机在 1000 h 内发生一般故障的次数：

$$D = 1000 \times \frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i \gamma_i}{nt} \quad (7)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机总台数；

m ：故障模式的个数；

t ：考核期的总时间；

γ_i ：在考核期内第 i 类故障发生的次数；

ε_i ：第 i 类故障的当量故障系数。

11 关键子系统可靠性评价

11.1 汽车起重机机械结构可靠性评价

11.1.1 汽车起重机机械结构性能分析及评价

11.1.1.1 汽车起重机机械结构主要潜在的性能问题

- 超载作业、材料强度不足、设计应力分布不均（如局部应力集中）。
- 地面承载力不足（如松软地面）、支腿底板设计过小或液压锁失效。
- 滑块磨损、润滑不足、液压缸推力不均或导槽变形。
- 齿轮啮合间隙过大、齿面疲劳点蚀或断齿（材料热处理不当）。
- 行驶路况恶劣（如频繁过沟坎）、超载吊装导致车架承受额外弯矩。
- 吊钩部分材料韧性不足或锻造缺陷。

11.1.1.2 汽车起重机机械结构技术性能指标

汽车起重机机械结构技术性能指标见表 3。

表3 汽车起重机机械结构技术性能指标

评价项目	技术性能指标
汽车起重机机械结构	耐磨损、抗疲劳、不易断裂、稳定性好、易维修

11.1.2 汽车起重机机械结构可靠性评价指标

11.1.2.1 性能可靠度 R_D

在汽车起重机机械结构中,研究机械零部件的性能退化是十分必要的。设产品的性能参数为 $x(t)$,性能可靠度是指产品在规定的条件下和规定时间内,性能参数 $x(t)$ 保持在规定范围 $[X_L, X_U]$ 内的概率,用公式可以表示为:

$$R_D = P(X_L \leq x(t) \leq X_U) \quad (8)$$

在某一时刻, $x(t)$ 一般服从正态分布 $N(\mu(t), \sigma^2(t))$, 根据性能参数要求类型不同,性能可靠度可分别表示为:

对下限有要求的性能可靠度

$$R_D = P(x(t) \geq X_L) = 1 - \Phi\left(\frac{X_L - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (9)$$

对上限有要求的性能可靠度

$$R_D = P(x(t) \leq X_U) = 1 - \Phi\left(\frac{X_U - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (10)$$

对上、下限均有要求的性能可靠度

$$R_D = P(X_L \leq x(t) \leq X_U) = \Phi\left(\frac{X_U - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) - \Phi\left(\frac{X_L - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) \quad (11)$$

11.1.2.2 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 是衡量可修复设备或系统可靠性的关键指标,表示在正常条件下,两次相邻故障之间的平均运行时间。其计算公式为:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{r_f} \quad (12)$$

式中,

n : 被调查或被试汽车起重机台数;

r_f : 被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内 (包括磨合和性能试验期间) 出现的故障 (轻度故障除外) 总数;

t_{ci} : 第 i 台汽车起重机的累计工作时间, h ;

11.1.2.3 平均维修时间 MTTR

MTTR (Mean Time To Repair, MTTR) 表示平均修复时间,是衡量设备或系统在发生故障后恢

复至正常运行状态所需平均时间的指标。其核心含义是反映维修团队或系统的故障响应和修复效率。其计算公式为：

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{mi}}{r_m} \quad (13)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

r_m ：被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内（包括磨合和性能试验期间）出现的维修次数总数；

t_{mi} ：第*i*台汽车起重机的累计工作时间， h ；

11.1.2.4 可用性

可用性是衡量设备或系统在需要时能够正常运行的概率，反映其“随时可用”的能力。在工程领域，可用性结合了可靠性（少出故障）和可维护性（快速修复），是评估设备综合性能的核心指标。其计算公式为：

$$\text{可用性} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \text{ 或 } \frac{MTBM}{MTBM + MTTR} \quad (14)$$

11.2 汽车起重机液压系统可靠性评价

11.2.1 汽车起重机液压系统结构性能分析及评价

汽车起重机的液压系统是其核心动力与控制系统，直接影响起重作业的稳定性、精度、效率及安全性。汽车起重机液压系统通过动力转换、精准控制、安全防护、散热管理及智能优化等功能，确保起重机高效、稳定、安全地完成吊装作业。其功能设计不仅需满足高负载、高频率的工程需求，还需适应极端环境（如高低温、多尘）下的可靠运行，是现代工程机械智能化与绿色化发展的关键技术载体。

11.2.1.1 汽车起重机液压系统主要潜在的性能问题

- a) 连续超负荷作业、散热器故障或环境温度过高；
- b) 液压元件故障；
- c) 液压油阻塞、渗漏问题；
- d) 液压系统没有压力或者压力不足；
- e) 多执行机构复合动作时，因泵流量分配不均导致动作冲突（如起升与回转同时操作时速度骤降）。

11.2.1.2 汽车起重机液压系统技术性能指标

汽车起重机液压系统技术性能指标见表4。

表4 汽车起重机液压系统技术性能指标

评价项目	技术性能指标
汽车起重机液压系统	耐磨损、液压油性能好、密封性好、易维修

11.2.2 汽车起重机液压系统可靠性评价指标

11.2.2.1 液压系统压力可靠度 R_p

汽车起重机的液压系统通过液压传动原理将发动机的机械能转换为液压能，并精准控制其传递路径，驱动各执行机构完成起重、伸缩、回转等动作。由此可以看出，液压系统压力不足或者没有压力的主要原因在于液压泵，因此我们采用液压泵压力可靠度来表征液压泵的可靠性程度，其计算

公式为：

$$R_p = P(\bar{p} - s_p k_p \geq p) \quad (15)$$

其中，

\bar{p} ：经 m 次试验测得的压力平均值，

s_p ：经 m 次试验测得的压力标准差

k_p ：裕度系数，与液压泵的转速、液压系统的规定可靠度及设定的置信区间有关，可以通过标准 GB/T4882-2001^[5]中的方法计算得到。

11.2.2.2 故障探测度

液压系统产生故障的因素是多方面和复杂的，也因故障的潜伏期长和隐蔽较深之故，不易被发现，因此我们拟采用故障探测度来表征液压系统故障的难易程度。故障探测度主要根据专家意见或工程师经验打分来评定，故障探测难易程度等级表如表 5 所示。

表5 故障探测难易程度等级表

等级	故障探测难易程度	
1, 2	非常低	故障可以在早期通过观察或测试被检测出来
3, 4	低	故障有很大机会在早期通过观察或测试被检测出来
5, 6	中等	故障可能通过观察或者测试被检测出来
7, 8	高	故障不大可能通过观察或者测试被检测出来
9	非常高	故障不可能通过观察或者测试被检测出来
10	无法检测	故障绝不可能通过观察或者测试被检测出来

11.2.2.3 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 是衡量可修复设备或系统可靠性的关键指标，表示在正常条件下，两次相邻故障之间的平均运行时间。其计算公式为：

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{r_f} \quad (16)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

r_f ：被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内（包括磨合和性能试验期间）出现的故障（轻度故障除外）总数；

t_{ci} ：第 i 台汽车起重机的累计工作时间， h ；

11.2.2.4 平均维修时间 MTTR

MTTR (Mean Time To Repair, MTTR) 表示平均修复时间，是衡量设备或系统在发生故障后恢复至正常运行状态所需平均时间的指标。其核心含义是反映维修团队或系统的故障响应和修复效率。其计算公式为：

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{mi}}{r_m} \quad (17)$$

式中，

n : 被调查或被试汽车起重机台数;

r_m : 被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内 (包括磨合和性能试验期间) 出现的维修次数总数;

t_{mi} : 第 i 台汽车起重机的累计工作时间, h ;

11.3 汽车起重机电气系统可靠性评价

11.3.1 汽车起重机电气系统结构性能分析及评价

汽车起重机的电气系统是其实现精准控制、安全保护、状态监测与智能化操作的核心, 其结构性能直接影响整机的作业效率和可靠性。汽车起重机的电气系统主要由电源与配电系统、控制与信号处理系统、传感器与监测系统、执行机构与驱动系统、安全保护系统、通信与智能化模块等部分组成。

11.3.1.1 汽车起重机电气系统主要潜在的问题

- a) 配电保护失效;
- b) 控制精度下降或者响应延迟;
- c) 电器元器件损坏;
- d) 线路电缆连接不良;
- e) 运动部件无动作;
- f) 回零不准。

11.3.1.2 汽车起重机电气系统技术性能指标

汽车起重机电气系统技术性能指标见表 6。

表6 汽车起重机电气系统技术性能指标

评价项目	技术性能指标
汽车起重机电气系统	电磁兼容、操作方便、易维修、耐磨损、易维修

11.3.2 汽车起重机电气系统可靠性评价指标

11.3.2.1 关键元器件故障率 $\lambda(t)$

电气系统关键零部件故障率 $\lambda(t)$ 是指工作到某一时刻尚未发生失效的元件, 在该时刻后单位时间内发生失效的概率, 其计算公式为:

$$\lambda(t) = \frac{dr(t)}{N_s(t)dt} \quad (18)$$

其中,

$r(t)$: t 时刻后, dt 时间内失效的产品数;

$N_s(t)$: t 时刻尚未失效的产品数。

11.3.2.2 串联系统可靠度

若所有组件正常工作系统才正常, 代表该系统为串联系统。其计算公式为:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (19)$$

式中,

n : 所有串联的组件总数;

$R_i(t)$: 第 i 个组件在 t 时刻的可靠度;

11.3.2.3 并联冗余系统可靠度

若所有组件至少有一个正常工作，则系统正常，代表该系统为并联系统。其计算公式为：

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (20)$$

式中，

n ：所有并联的组件总数；

$R_i(t)$ ：第 i 个组件在 t 时刻的可靠度；

11.3.2.4 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间（Mean Time Between Failures, MTBF）是衡量可修复设备或系统可靠性的关键指标，表示在正常条件下，两次相邻故障之间的平均运行时间。其计算公式为：

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{r_f} \quad (21)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

r_f ：被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内（包括磨合和性能试验期间）出现的故障（轻度故障除外）总数；

t_{ci} ：第 i 台汽车起重机的累计工作时间， h ；

11.3.2.5 平均维修时间 MTTR

MTTR（Mean Time To Repair, MTTR）表示平均修复时间，是衡量设备或系统在发生故障后恢复至正常运行状态所需平均时间的指标。其核心含义是反映维修团队或系统的故障响应和修复效率。其计算公式为：

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_{mi}}{r_m} \quad (22)$$

式中，

n ：被调查或被试汽车起重机台数；

r_m ：被调查或被试汽车起重机在使用或试验时间内（包括磨合和性能试验期间）出现的维修次数总数；

t_{mi} ：第 i 台汽车起重机的累计工作时间， h ；

参 考 文 献

- [1] GB/T 6068-2021 汽车起重机和轮胎起重机试验规范
- [2] JB/T 4030.1-2000 汽车起重机和轮胎起重机试验规范 作业可靠性试验
- [3] GB/T 5905-2011 起重机 试验规范和程序
- [4] Q/Q2 J01.316-2016 重型机床可靠性评价方法
- [5] GB/T4882-2001 数据的统计处理 and 解释 正态性检验

中国机械工程学会标准征求意见稿