

doi: 10.7690/bgzd.2024.11.001

基于 FMEA 和 FTA 的火炮随动系统可靠性分析

李杰¹, 丁锋¹, 韩崇伟²

(1. 西安工业大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 针对某型火炮随动系统的故障数据, 对火炮随动系统进行可靠性分析。采用故障模式与影响分析 (failure modes and effect analysis, FMEA), 通过统计存在的故障模式及原因分析, 得到造成火炮随动系统故障的主要原因, 提出针对性的改善措施; 根据 FMEA 结果, 建立火炮随动系统故障树, 计算火炮随动系统故障的最小割集, 将其分为 6 类, 针对不同的底事件故障类别提出改善措施。结果表明: 该分析可为提高火炮随动系统的可靠性提供数据支撑, 为火炮随动系统的设计和预防维修提供理论依据。

关键词: 火炮随动系统; 可靠性分析; 故障模式与影响分析 (FMEA); 故障树分析

中图分类号: TJ301 **文献标志码:** A

Reliability Analysis of Artillery Servo System Based on FMEA and FTA

Li Jie¹, Ding Feng¹, Han Chongwei²

(1. School of Mechanical and Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: According to the failure data of a certain type of artillery servo system, the reliability of the artillery servo system was analyzed. By means of failure modes and effect analysis (FMEA), the main reasons for the failure of artillery servo system are obtained through the statistical analysis of the existing failure modes and causes, and the corresponding improvement measures are put forward; According to the results of FMEA, the fault tree of artillery servo system is established, and the minimum cut sets of artillery servo system faults are calculated, which are divided into six categories, and the improvement measures are proposed for different types of bottom event faults. The results show that the analysis can provide data support for improving the reliability of artillery servo system, and provide theoretical basis for the design and preventive maintenance of artillery servo system.

Keywords: artillery servo system; reliability analysis; FMEA; FTA

0 引言

可靠性作为产品的基本属性, 是衡量产品质量的重要指标。火炮作为一种部队广泛装备的常规火力武器, 影响着战术的发挥和战争的进程。火炮随动系统是关系到操瞄与装填自动化程度、调炮精度控制和快速反应能力的关键子系统^[1]。

文献[2-4]阐述故障模式与影响分析 (FMEA) 的概念, 可根据火炮系统的结构, 建立系统的可靠性框图, 分析系统中部件的潜在故障模式, 找到故障模式的发生缘由, 这些故障模式对各部件及系统都会产生不同程度的影响, 应当判定其在系统中的严酷度等级。

文献[5-8]应用故障树分析 (fault tree analysis, FTA) 方法。其中文献[5]采用 FTA 得到火炮底盘系统的叶节点故障概率; 文献[6]提出一种非概率可靠性指标, 将系统安全标准应用到某型飞机襟翼机构不对称运动故障树分析中; Gjorgiev 等^[7]基于故障

树的自动生成, 故障树估计了从终端/存储到需求节点的气体传输中断的可能性; 曲玉琨等^[8]基于模糊集理论将底事件发生概率描述为模糊数, 计算得到整个系统的模糊故障率。

赵雷等^[9]采用 FTA 和 FMEA 结合的方法, 简化了诊断的搜索机制, 并且建立了故障字典, 提高了诊断效率, 进而提高了电子设备的可靠性。姚灿江等^[10]运用 FTA 和 FMEA 对 RV 减速器的行星齿轮和摆线轮的关重件进行分析。陈亚亚等^[11]建立 GW16 型隔离开关可靠性模型和 FTA, 得到 FMEA 的综合分析结果。范晋伟等^[12]对数控磨床的故障数据进行 FMECA 分析, 再对冷却系统进行 FTA 分析, 根据求解的最小割集找到故障发生的原因。

对火炮随动系统进行可靠性分析, 能有效提高整个系统的可靠性。对随动系统进行 FMEA 和 FTA 分析, 确定引起故障的原因, 针对故障原因提出改善措施, 从而提高随动系统的可靠性。

收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-07-20

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2023-JC-YB-347)

第一作者: 李杰 (1997—), 女, 陕西人, 硕士。

1 火炮随动系统 FMEA 分析

根据某火炮故障数据可知，随动系统是火炮的薄弱环节，随动系统是操瞄与装填自动化程度、调炮精度控制和快速反应能力能否满足要求的关键分系统；因此，对此系统进行 FMEA，通过统计存在的故障及产生的原因，提出针对性的改善措施。

1.1 故障模式分析

某火炮随动系统主要组成部分为随动控制器、驱动设备、执行机构、传感器和减速机构等。火炮随动系统是以机械参数为控制对象的闭环反馈自动控制系统，控制机械参数自动快速、准确地跟随输入命令量的变化。

随动控制器用于接收调炮主令并通过角传感器检测发射装置的实际角位置，进行误差求解、控制规律计算等，通过驱动设备将信号放大，以带动执行机构、减速机构按照一定规律运动，实现高精度调炮或瞄准。

驱动设备分为功率电机驱动器和伺服功率放大器 2 种。电机驱动器用于驱动伺服电机，伺服功率放大器用于驱动电液伺服阀、电液比例阀、电机扩大机等。

执行机构主要为电机，减速机构用于执行机构减速、放大执行动力机构的力矩。角传感器有受信仪、惯性定位定向装置 2 种，惯性定位定向装置可与发射架捷联安装，用以检测发射装置的火炮线相对大地坐标系的角位移，也可用过车体平面安装，用以检测车体相对大地坐标系的角位移。

如表 1 所示，根据收集到的故障数据，对火炮随动系统部件的故障模式进行了整理。

表 1 随动系统中部件的故障模式

子系统名称	部件名称	部件模式
随动控制器子系统	控制板	短路断路
	驱动板	短路断路
	电源板	短路断路
驱动控制器子系统	支撑电容	故障
	IGBT	失效
驱动电机子系统	绕组	断线损坏
	永磁体	失效破损
减速器子系统	轴承	塑性变形失效断裂
	曲柄轴	弯曲失效裂纹
	针齿	齿面点蚀磨损胶合
	行星齿轮	折断点蚀磨损塑变
	摆轮线	齿面点蚀磨损胶合
	轴承	疲劳胶合磨损断裂
	壳体	开裂
传感器子系统	谐振系统	漏气裂纹有污染
	吸气剂	掉灰

1.2 故障原因分析

结合 GJB1391—2006 的严酷度划分明细，判定各种故障模式的严酷度等级，如表 2 所示。

表 2 随动系统严酷度判别标准

严酷度等级	严酷度类别	标准明细
I	灾难故障	随动系统彻底损坏，导致火炮损坏
II	严重故障	随动系统子系统严重损坏
III	一般故障	部件轻度损坏，系统功能下降
IV	轻度故障	部件基本无影响

以随动系统 RV 减速器中“轴承磨损”为例。对自身造成的影响是滚动体与内外圈接触面增大，磨损率提高，影响轴承工作效率，导致寿命减少；对中间层 RV 减速器造成的影响是工作效率下降；对随动系统造成的影响导致随动系统无法正常工作，轻度损坏。对“轴承磨损”的严酷度判定为 III 级。

火炮随动系统故障原因统计结果如表 3 所示。

表 3 随动系统故障原因统计结果

故障原因	频数	频率/%	严酷度
粗糙度	13	34.5	II
退化失效	12	32.0	III
设计不合理	9	23.6	III
胶合方式不当	2	5.0	IV
绝缘形变	2	5.0	IV

由上表可知，粗糙度和退化失效是造成火炮随动系统故障的主要原因，故障率为 34.4%、32%；其次是设计的不合理、胶合方式不当、绝缘形变，分别占比为 23.6%、5%、5%。这些故障划分的严酷度也不同，其中粗糙度的故障原因为严重故障。针对不同的故障原因采取针对的改善措施，改善润滑或者选取选择合适润滑脂；设计阶段选取更符合要求的零部件，保证加工精度和加强清洗工序控制。此外，对火炮随动系统进行定期维护检测，对潜在的故障可以及时的发现和改进。

2 随动系统的 FTA 分析

根据 FMEA 结果，建立火炮随动系统故障树。在分析过程中，顶事件为火炮随动系统不能正常工作，G 表示顶事件，中间事件可用 $M(i=1, 2, 3, \dots, 15)$ 来表示，第 2、3 层事件如表 4、5 所示。

表 4 第 2 层中间事件及代号

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
M_1	RV 减速器故障	M_3	电机故障
M_2	传感器故障	M_4	控制驱动器故障

表 5 第 3 层中间事件及代号

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
M_5	曲柄轴故障	M_{11}	绕组故障
M_6	行星齿轮故障	M_{12}	轴系统故障
M_7	摆轮线故障	M_{13}	永磁铁故障
M_8	轴承故障	M_{14}	控制器故障
M_9	平面反射镜故障	M_{15}	驱动器故障
M_{10}	槽片故障	—	—

底事件可用 $x(i=1, 2, 3, \dots, 38)$ 表示。底事件对应如表 6 所示。

图 1 所示为建立的故障树，通过布尔代数表达可得：

$$G = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10} + M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14} + M_{15} = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{38} \quad (1)$$

表 6 底事件及代号

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
x_1	曲柄轴弯曲	x_{20}	胶合处有漏点
x_2	曲柄轴折断	x_{21}	槽片漏气
x_3	针齿折断	x_{22}	槽片槽底裂
x_4	行星齿轮断裂	x_{23}	吸气剂掉灰
x_5	行星齿轮齿面点蚀	x_{24}	增益气体漏气
x_6	行星齿轮齿面胶合	x_{25}	绕组绝缘形变
x_7	行星齿轮齿面磨损	x_{26}	绕组断线
x_8	壳体塑性变形	x_{27}	转子铁芯局部过热
x_9	摆轮线点蚀	x_{28}	轴承塑性变形
x_{10}	摆轮线疲劳断裂	x_{29}	轴系统磨损失效
x_{11}	摆轮线齿面磨损	x_{30}	轴系统断裂
x_{12}	轴承胶合	x_{31}	定子铁芯局部过热
x_{13}	轴承疲劳损伤	x_{32}	永磁铁机械破损
x_{14}	轴承磨损	x_{33}	永磁铁失磁
x_{15}	透光块变形	x_{34}	控制板短路断路
x_{16}	合光棱镜变形	x_{35}	驱动板短路断路
x_{17}	平面反射镜漏气	x_{36}	电源板短路断路
x_{18}	反射膜面有污染	x_{37}	支撑电容失效
x_{19}	谐振腔漏气	x_{38}	IGBT 失效

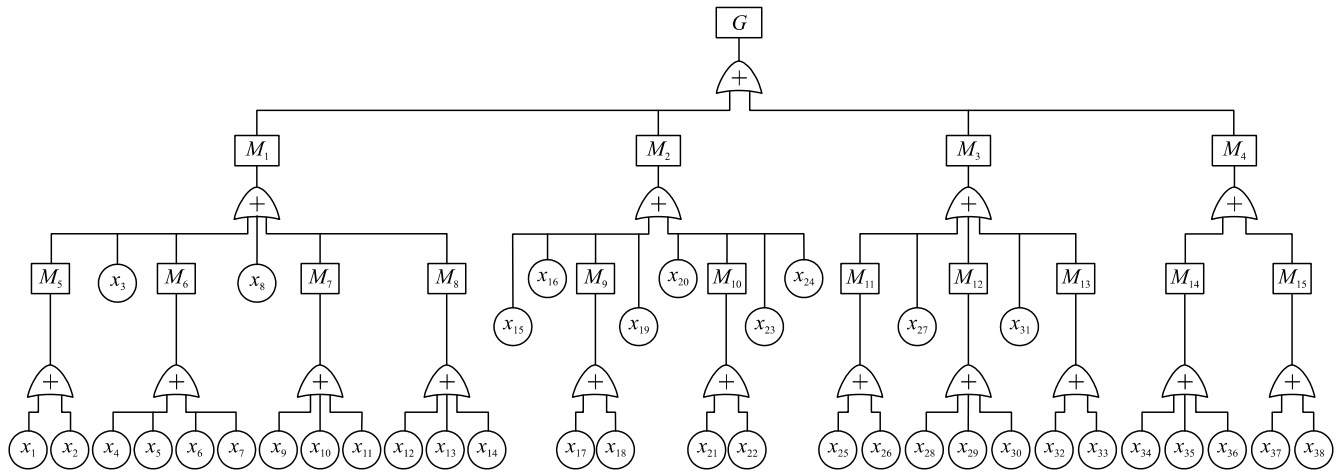


图 1 故障树

火炮随动系统 FTA 中共有 38 个一阶割集，均为最小割集，其分别为：

$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\}, \{x_{10}\}, \{x_{11}\}, \{x_{12}\}, \{x_{13}\}, \{x_{14}\}, \{x_{15}\}, \{x_{16}\}, \{x_{17}\}, \{x_{18}\}, \{x_{19}\}, \{x_{20}\}, \{x_{21}\}, \{x_{22}\}, \{x_{23}\}, \{x_{24}\}, \{x_{25}\}, \{x_{26}\}, \{x_{27}\}, \{x_{28}\}, \{x_{29}\}, \{x_{30}\}, \{x_{31}\}, \{x_{32}\}, \{x_{33}\}, \{x_{34}\}, \{x_{35}\}, \{x_{36}\}, \{x_{37}\}, \{x_{38}\}$ 。从而得到造成火炮随动系统的故障原因，这些底事件中，任何底事件的发生都会导致随动系统故障。

针对火炮随动系统的 38 个割集可分为 6 类，如表 7 所示。

针对表 7 中 6 类需要防范问题，提出改善措施：

第 1 类，部件应力过大断裂。在设计阶段，选取刚度更合适的部件。

第 2 类，部件质量有问题，及时发现问题，在设计阶段保证加工精度。

第 3 类，导致部件高温磨损，在设计阶段考虑增加部件的硬度，也可选用合适的润滑脂。

第 4 类，部件弯曲变形，是因为局部应力过大所导致，应该在设计阶段考虑应力分布。

第 5 类，导致部件腐蚀、点蚀和胶合。在设计时选择合适的防腐蚀材料。

第 6 类，导致部件疲劳损伤，加工过程中，降低粗糙度，改善润滑脂，提高硬度。

表 7 火炮随动系统故障树割集分类

类别	故障树底事件	底事件类别
1	$x_2, x_3, x_4, x_{10}, x_{22}, x_{26}, x_{30}, x_{34}, x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38}$	应力过大故障
2	$x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{23}, x_{24}, x_{33}$	本身质量有缺陷
3	$x_7, x_{11}, x_{14}, x_{29}, x_{27}, x_{31}$	磨损
4	$x_1, x_{15}, x_{16}, x_{25}, x_{28}$	弯曲变形
5	x_5, x_6, x_9, x_{12}	腐蚀、胶合、点蚀
6	x_8, x_{13}, x_{32}	疲劳破坏