

小型高可靠分体式多冗余线位移传感器研制

熊伟¹, 刘小勇², 张洋¹, 孙楠¹, 高秀敏¹

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076; 2. 火箭军驻长控公司军事代表室, 北京 100076)

摘要: 为了满足新型战略导弹武器的研制需求, 要求伺服机构结构紧凑, 集成度高, 并能够适应恶劣的工作环境和有限的空间结构, 实现伺服作动器齿条位移的测量及反馈; 一种小型高可靠分体式多冗余线位移传感器的研制, 在传统的分体式线位移传感器的基础上, 通过四冗余的结构设计, 印制电阻膜的设计, 零位输出可调的设计, 多指型电刷受力的优化设计, 实现了线位移传感器的结构小型化和紧凑化的冗余功能, 能够耐高温, 工作寿命长, 线性精度高的性能; 试验和仿真分析表明设计技术方案有效可行, 能够满足伺服系统的要求。

关键词: 分体式; 线位移; 冗余

Development of Split Multi—redundant Line Displacement Transducer with Small and Highly Reliable

Xiong Wei¹, Liu Xiaoyong², Zhang Yang¹, Sun Nan¹, Gao Xiumin¹

(1. Beijing Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076, China;

2. Military Representative Office of The Rocket Force in Long Match Aerospace Controlling

Engineering Company of China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to meet the development demand of the new type of strategic missile weapon, the servo mechanism is required to be compact in structure and highly integrated, and capable of adapting to the harsh working environment and the limited space structure, so as to measure and feedback the displacement of the servo actuator rack. Based on the traditional split type linear displacement sensor, the design of a four—redundant structure, the design of printed resistance film, the adjustable design of zero output. The optimized design of multi—fingered brush enables the structure of the linear displacement sensor to be miniaturized and compact. It has high temperature resistance, long working life and high linear accuracy. Experimental and simulation analysis shows that the design of technical solutions is effective and can meet the requirements of the servo system.

Keywords: split; line displacement; redundant

0 引言

随着新型战略导弹武器的立项研制, 要求伺服机构结构紧凑, 集成度高, 并能够适应恶劣的工作环境和有限的空间结构, 同时为了满足总体滚控伺服作动器齿条位移的测量及反馈, 需要将位移传感器测得的数据信号引入伺服闭环控制系统, 伺服系统对配套使用的特种伺服位移传感器提出新的更高要求: 结构更加小巧、精度更高、可靠性更高、环境适应性更好、寿命更长。

由于位移传感器广泛应用于伺服作动器位移测量与反馈, 其可靠性直接影响伺服系统的性能及可靠性。随着伺服系统对产品可靠性要求越来越高, 为了满足航天伺服产品的高可靠性和安全性的要求, 在滚控伺服作动器齿条位移的测量及反馈中, 对位移传感器在结构空间和重量的提出了非常严格的限制, 要求长度方向在 53 mm 的空间里实现±22.5 mm 位移的测量, 安装方式和外形要根据型号要求设计, 并且产品总重量不能大于 50 g, 现有的线位移传感器无法满足要求, 因此需进行小型多冗余分体式结构新技术研究以及产品结构可靠性的研

究和试验已满足系统性能指标要求^[1]。

1 分体式多冗余位移传感器原理和结构

1.1 工作原理

分体式多冗余线位移传感器是电阻分压原理, 在电阻膜两端分别施加正负直流电源, 同时在零位位置设置中心抽头(即电源地)^[2], 电刷在电阻膜上滑动, 实现测量正负位移的功能。正负电源和接地导线由铆钉连接, 铆钉与电阻膜间由导电银带连接。为了提高可靠性, 采用三冗余设计的同时, 将三组正负电源及地端分别引出, 输出采用双点双线, 工作原理见图 1。

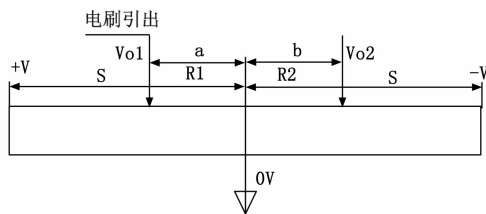


图 1 位移传感器的工作原理图

分体式多冗余线位移传感器主要用于运载和战略型号伺服机构信号测量和反馈, 在外部供电的情况下将机械直线位移信号转换为电信号输出。分体式多冗余线位移传感器并联四冗余

收稿日期:2018-01-18; 修回日期:2018-02-21。

作者简介:熊伟(1982-),男,湖北,硕士,工程师,主要从事伺服电子技术方向的研究。

直线式电位计式线位移传感器。位移传感器骨架上的电阻膜印制导电塑料而制成。导电条与电阻膜同样是利用导电塑料平行印制在骨架上,用于输出信号的引出。在电阻膜两端分别施加正负直流电源,同时在电阻膜的中心位置设置零位中心抽头(即电源地),电刷在电阻膜上滑动,实现测量直线位移信号。正负输入电源和接地导线由铆钉铆接。为了提高产品的可靠性和适应系统表决功能,采用四冗余设计方案,将四组正负电源及地端分别引出,输出采用双点双线。并联四冗余线位移传感器结构上采用四冗余设计,将两个印制有电阻膜和导电条的骨架在结构上进行分体式设计,每两个通道在一个骨架上。功能上实现了并联的紧凑型、分体式四冗余线位移传感器,并最终实现伺服机构线位移的测量和反馈功能。

设总电阻为 $2R$,行程 $\pm S$,电源 $\pm V$,带中心抽头(地),电刷从零位向左滑动距离 a ,与地间电阻为 R_1 ,全行程范围电阻与线位移成线性关系。由分压原理知,输出 V_{01} 为^[3]:

$$V_{01} = \frac{R_1}{R}V = \frac{a}{S}V$$

同样地,电刷从零位向左滑动距离 b 时,与地间电阻为 R_2 ,输出 V_{02} 为:

$$V_{02} = -\frac{R_2}{R}V = -\frac{b}{S}V$$

在电源电压恒定的情况下,输出电压与电刷滑动的距离成正比。

1.2 结构组成

分体式多余线位移传感器主要由上电阻组件,下电阻组件,上刷握组件,下刷握组件组成如图2所示。实现了四个通道电气相互独立的电位计结构。分体式位移传感器采用四冗余设计,系统可以根据需要选择不同的通道,或者四个通道同时使用。每个通道均含一个直线式印制精密导电塑料式电位计。上电阻组件和下电阻组件主要由印制电阻膜和导电条和骨架组成,上刷握组件和下刷握组件都是主要由刷握,导电片,电刷组成。与以往的分体式线位移传感器相比实现多余冗余设计,电阻膜采用印制导电塑料比喷膜式电阻膜更加耐磨,寿命长,精度高。多余冗余分体式位移传感器的刷握采用了对称式结构设计可以提高设计、装配过程的容错率。

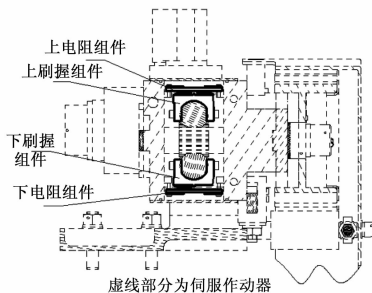


图2 分体式线位移传感器的结构简图

2 分体多余冗余位移传感器关键技术实现

2.1 分体式四冗余设计结构实现

一种小型新型分体式、多余冗余线位移传感器由两个双冗余分体直线式位移传感器相对安装(最大可实现四冗余),主要由电阻组件和刷握组件组成,其结构如图2所示。

电阻组件安装于滚控作动器壳体上下两侧中间部位,电阻组件由骨架、电阻体和导电条组成。电阻体由导电液印制在聚酰亚胺层压板做成的骨架上,经多次干燥和聚合等工序,制成电阻体。导电条是为引出信号而专门设立的,为避免使用运动的导线来引出信号,在电阻体旁印制一层银带,电位计的电刷横跨电阻体和导电条,将电压信号引到导电条上,然后,通过两端的金属化孔焊线引出。

刷握组件由刷握、导电片和电刷丝组成,电位计的电刷组件安装在伺服作动器柱塞的齿条上,与柱塞运动状态完全一致。刷握组件的作用为支承电刷,电刷用来拾取与齿条位移成比例的电压,它耐磨且富有弹性,在受振动、冲击的情况下,能可靠地工作。镀青铜导电片上焊有电刷丝,通过螺钉固定在刷握上。柱塞通过刷握组件带动电刷相对于壳体直线运动,实现滚控柱塞的直线位移量测量。

2.2 耐高温高精度技术实现

一种小型新型分体式、多余冗余线位移传感器的电压拾取是通过电刷组件在电阻组件上平行滑动实现的,本传感器的电阻组件由骨架、电阻体和导电条组成,其中电阻体和导电条同时印制在骨架上,电阻体由高温导电塑料制成。电阻体的长度即为传感器的电气行程。骨架材料选用了XXX科技有限公司生产的刚性热固性聚酰亚胺板D764X(Q/XXXXX/41-2012)。聚酰亚胺是一种新型的芳杂环高聚物,它具有优异的机械、介电、耐磨、耐高低温、耐辐射等综合性能,供货渠道可靠、稳定。导电条与电阻膜同时印制在刚性热固性聚酰亚胺板D764X上。导电条是为引出信号而专门设立的,从而避免了使用运动的导线来引出信号。传感器的电刷横跨电阻体和导电条,将电压信号引到导电条上,然后,通过与之相连的导线引出。

采用高温高精度导电塑料传感器技术与传统的的喷膜式传感器设计相比,具有耐高温(短时可以达到 200°C ,能够在工作温度为 150°C 情况下正常工作,温漂小于 50mV)、高寿命,线性度高(初始线性度即可满足要求小于 1%)、工艺简单,同时缩短了产品的生产周期。

2.3 结构紧凑零位输出可调技术实现

分体式多余冗余位移传感器配合滚控伺服作动器的工作方式及结构特点进行设计,采用了一种新颖便捷的零位微调节设计方案,攻克了分体多余冗余位移传感器零位调节的难题,保证零位不重合度不大于 20mV ;满足系统零位输出一致性要求,提高测量和反馈的精度,减化整机系统软件补偿工作^[4]。

多余冗余分体式位移传感器因其分体结构特点,必然存在各自独立输出的传感器零位重合性差问题,传感器各通道零位电压输出测量值偏差在 200mV 左右(伺服系统的设计零位电压输出偏差范围是不大于 20mV),优化设计的零位微调节装置,将导电片和刷握的安装孔设计成腰形孔,在工装上将刷握固定,通过电刷组件的前后微调节,从而实现电刷零位输出的一致性,来满足系统零位输出电压的性能指标值。优化设计前后的导电片的结构如图3、4所示。

改进后的电刷零位安装结构在实验室进行零位微调节试验。在给传感器加电压后,通过调节导电片的前后位置,改变零位的输出电压,直到在 20mV 之内,改进后零位输出电压可以实现 2.76mV 输出。

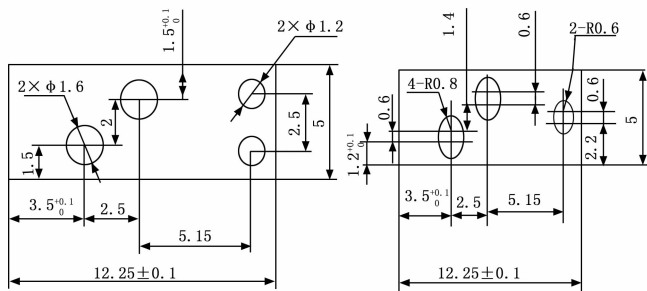


图 3 导电片 (改进前) 图 4 导电片 (改进后)

2.4 电刷优化设计

电刷组件由电刷、刷握等组成，刷握安装在伺服作动器齿条上，用以支承电刷，电刷用来拾取与齿条位移成比例的电电压，它应耐磨，富有弹性，在受振动、冲击的情况下，应能可靠地工作。采用多指型电刷丝提高电刷的可靠性^[5]，在根部采用无铅焊锡焊接，电刷结构如图 5 所示。

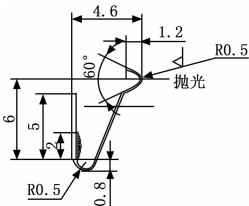


图 5 电刷结构图

为了计算电刷的接触压力，电刷的弹性变形量取为 1 mm，电刷材料的弹性模量 153000 N/mm²，材料为 PdIr18 合金丝，电刷丝直径 0.2 mm)，理论计算的电刷的接触压力为 0.0458 N，远远小于设计值 0.1 N 的设计要求，满足设计要求。

电刷接触压力是影响电位计使用寿命的关键因素，在电刷材料的弹性模量固定的前提下，通过最佳电刷压缩量计算（即在保证电刷与膜面接触可靠性又要减少电刷对导电塑料电阻膜的磨损的前提下最佳接触压力设计）后，优化电刷的刚度以及刷丝的压缩量。但是，电刷组件的实际受力和约束状况比较复杂，不能用悬臂梁弯曲状态进行近似，因此利用 Ansys11.0 软件进行整体受力分析，电刷组件受力情况如图 6 所示。

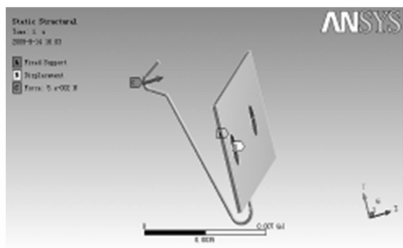


图 6 电刷组件受力情况示意图

在 A 处电刷组件安装孔位置受固定约束，在 B 处受 Z 轴方向上的位移约束，在 C 处即电刷与电阻片接触的地方受沿 Z 轴方向上 0.15 N 的力。

如图 7 和图 8 所示，电刷与电阻片接触点在 Z 轴方向上的位移为 1.8 mm，在电刷下端的弯折处内应力最大，为 684 MPa，小于钽铱合金丝的抗拉强度 905 MPa。因此，当电刷与电阻片接触点沿 Z 轴方向位动 1.8 mm 时，其接触压力为 0.15

N，满足设计要求。

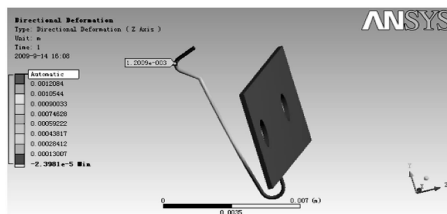


图 7 电刷在 Z 轴方向的位移图

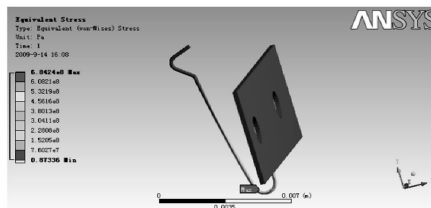


图 8 电刷内应力图

为了解决滚控线位移特性测量过程中都出现了零位电压输出滞后的现象，零位电压输出滞后直接影响伺服系统中影响伺服系统静、动态性能指标。系统作动器的试验数据图像记载如图 9 所示。

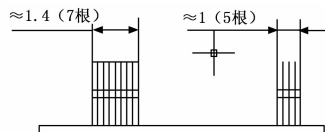


图 9 优化设计后的电刷示意图

通过分析此问题主要是由于电刷丝的宽度过宽造成了电刷丝在运动的过程中和中心抽头相碰，造成了电刷丝的劈开，从而使传感器在零位附近输出异常，针对这种现象对电刷进行了优化设计。通过电阻膜的宽度和公差的范围的计算分析如下，电阻膜印制在骨架上，如图 2 中的电阻组件上，电阻膜的宽度为 5，-0.18 的公差，两个中心抽头深入电阻膜的长度分别为 1 mm，由操作者老保证，无法给出具体的公差范围。

电刷的宽度尺寸为 2，公差无法给出，由焊接工装来保证，单边的设计余量为：

$$(5 - 1 - 1 - 2) / 2 = 0.5$$

$$(5_{-0.18}^0 - 1_{-0.1}^{+0.1} - 1_{-0.1}^{+0.1} - 2_{-0.1}^{+0.1}) / 2 = 0.5_{-0.24}^{+0.15}$$

优化设计后电刷的宽度尺寸为 1.4，由以前的 10 根丝变成了 7 根丝，电刷宽度由 2 mm 变成 1.4 mm。单边的设计余量为：

$$(5 - 1 - 1 - 1.4) / 2 = 0.8$$

$$(5_{-0.18}^0 - 1_{-0.1}^{+0.1} - 1_{-0.1}^{+0.1} - 1.4_{-0.1}^{+0.1}) / 2 = 0.8_{-0.24}^{+0.15}$$

改进电刷后的优化设计滚控线位移特性曲线如图 10 所示，改进后的设计滚控位移特性性能明显提高，改善了伺服系统的输出性能，有助于战略型号的可靠性提高。

3 实验结果与分析

多冗余分体式线位移传感器在传统式的分体式线位移传感器的设计的基础上进行了优化设计，可以实现四冗余可靠结构，采用印制导电塑料式电阻膜，主要技术指标实验数据见表

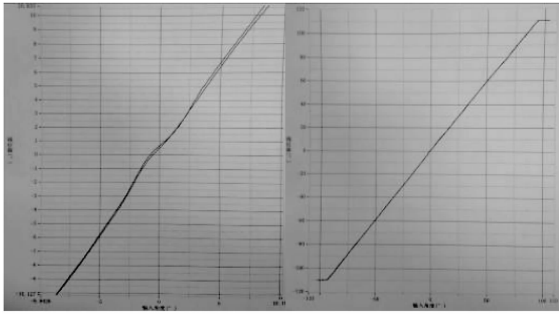


图 10 滚空线位移特性图像 (散丝—无散丝)

1 所示。

表 1 分体式冗余位移传感器主要技术指标

序号	试验项目	技术要求	试验结果
1	绝缘电阻	绝缘电阻 $\geq 50M\Omega$	∞
2	绝缘介电强度	250V, 50 ± 5 Hz, 1 min 抗电不跳火无击穿	合格
3	电气行程/mm	$\pm 22.5\pm 0.4$	22.35~22.63
4	不对称电阻/ Ω	$ R_{左}-R_{右} \leq 15$	1~7
5	零位不重合/mV	≤ 20	10~15
6	线性度	≤ 1	0.09~0.89
7	反馈梯度 /(mV/mm)	400(1 $\pm 1\%$)	397.38-402
8	电阻值	2000 ± 200	1876~2137
9	寿命	≥ 20 万次	合格
10	可靠指标	0.99998	0.99999

通过实验数据分析: 导电塑料电阻膜线性度可以实现 0.09~0.89 范围内大部主要集中在 0.09~0.50 的范围内, 远远优于传统的喷膜式电阻膜的线性度, 且导电塑料分体式线位移传感器高温可以达到 200 $^{\circ}C$, 在 150 $^{\circ}C$ 高温环境下可以正常工作, 同时传感器的温漂小于 50 mV^[6], 其耐高温性能提高。通过灵位可调的结构设计实现零位输出电压小于 20 mV, 零位输出电压可控可大大地提高了系统可靠性, 多指点数结构优

化设计后, 提高了传感器的寿命, 其他性能指标均满足系统设计的要求。

4 结论

小型高可靠分体式冗余位移传感器研制是由于传统的分体式电位计难以满足新型运载和战略型号的发展需求, 在传统的基础上进行的改进性优化设计用于伺服系统的配套测量和反馈。小型高可靠分体式冗余位移传感器采用了四冗余结构设计, 印制导电塑料电阻膜, 新型零位可调设计, 优化电刷设计提高线位移传感器的可靠性, 耐高温性, 高精度性, 试验验证了改进设计方案的有效性。对伺服系统的可靠性和环境适应性大幅提高, 对战略系统的可靠性和实现全方位发射具有重要意义, 从而具有重大的社会、经济效益和推广价值。

参考文献:

[1] 袁希光. 传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
 [2] 刘迎春, 叶湘滨. 现代新型传感器原理与应用 [D]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
 [3] 南京航空学院, 北京航空学院合编, 传感器原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
 [4] 栾桂冬, 张金铎, 金欢阳. 传感器及其应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
 [5] 李丹佳, 陈 娣, 郭薇妮, 等. 超小型高可靠三冗余角位移传感器研制 [J]. 宇航计测技术, 2015 (2): 1-5.
 [6] 郭薇妮, 李梦雪, 李丹佳. 一种改进型导电塑料电位计研制 [J]. 宇航计测技术, 2016, 36 (1): 52-56.
 [7] 杨明锦, 陆长征. 结构与复合型导电塑料研究进展 [J]. 塑料, 2005, 34 (3): 15-18.
 [8] 刘艳丽, 井元良, 石海平, 等. 导电塑料在航天领域的应用展望 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31 (6): 676-681.
 [9] 陈 勇, 官建国, 谢洪泉. 导电塑料的研究进展 [J]. 弹性体, 2008, 18 (2): 75-81.
 [10] 石明辉. 导电塑料在电子领域中的应用 [J]. 广东化工, 2007, 34 (169): 43-45.
 [11] 李振宇, 薛 闵, 等. 导电塑料的研发及应用进展 [J]. 塑料科技, 2013, 41 (2): 96-101.
 [12] 熊 浩. 动态车辆路径问题的分区灵活分批 TSP 策略 [J]. 控制与决策, 2013, 28 (10): 1454-1458.
 [13] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
 [14] Michael S. The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 250 (1): 101-119.
 [15] Briseida S, Karl F D, Verena S, et al. Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem [J]. Annals of Operations Research, 2016, 236 (2): 425-461.
 [16] Engin A, Haluk R T, Murat E. Hyper-heuristics for online UAV path planning under imperfect information [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 1 (1): 741-752.
 [17] 王正元, 朱 昱, 宋建社, 等. 动态维修任务调度的优化方法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44 (1): 92-97.
 [18] 王正元, 严小琴, 朱 昱, 等. 一种考虑专业的动态维修任务调度的优化方法 [J]. 兵工学报, 2009, 30 (2): 252-256.
 [19] 郭 军, 宋建社, 杨 檬, 等. 基于证据理论的多任务抢修重要度决策 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (3): 581-584.
 [20] 陈伟龙, 陈春良, 史宪铭, 等. 基于变体 GA 的进攻作战抢修任务动态调度 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39 (3): 577-583.
 [21] 咎 翔, 陈春良, 张仕新, 等. 多约束条件下战时装备维修任务分配方法 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (8): 1603-1609.
 [22] 陈春良, 陈伟龙, 陈康柱, 等. 考虑非遍历的抢修任务多目标动态调度 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (8): 1593-1602.
 [23] 王艳玲. 取货车辆动态调度问题研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 36-37.
 [24] 王 君. 不确定因素下车辆路径问题建模及优化方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011: 106-108.
 [25] 谢志强, 王有为, 辛 宇, 等. 利用工序迁移时间的两车间设备驱动综合调度算法 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50 (6): 929-935.

(上接第 263 页)
 [8] Michael S. The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 250 (1): 101-119.
 [9] Briseida S, Karl F D, Verena S, et al. Variable neighborhood search for the stochastic and dynamic vehicle routing problem [J]. Annals of Operations Research, 2016, 236 (2): 425-461.
 [10] Engin A, Haluk R T, Murat E. Hyper-heuristics for online UAV path planning under imperfect information [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 1 (1): 741-752.
 [11] 王正元, 朱 昱, 宋建社, 等. 动态维修任务调度的优化方法 [J]. 机械工程学报, 2008, 44 (1): 92-97.
 [12] 王正元, 严小琴, 朱 昱, 等. 一种考虑专业的动态维修任务调度的优化方法 [J]. 兵工学报, 2009, 30 (2): 252-256.
 [13] 郭 军, 宋建社, 杨 檬, 等. 基于证据理论的多任务抢修重要度决策 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (3): 581-584.
 [14] 陈伟龙, 陈春良, 史宪铭, 等. 基于变体 GA 的进攻作战抢修任务动态调度 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39 (3): 577-583.