

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.035

基于 Hopcroft-Karp 算法的阀门零件批量选配系统

许哲, 刘祥, 乔红娟, 赵健鹏

(四川航天长征装备制造有限公司, 四川 成都 636371)

摘 要:为减少阀门装配过程中的零件选配时间,提高零件利用率及阀门批量生产效率,开发一种基于 Hopcroft-Karp (HK)算法的阀门零件批量选配系统。在系统内部建立阀门的配合公差数据库,以最大匹配数为目标,利用 HK 算法进行最大匹配计算,同时将 Labview 平台图形化编程优势和 Python 编程语言数据处理结合,提高系统开发效率以及灵活性,增强工程应用性。通过某批次配合间隙要求为 0.055 mm~0.075 mm 减压器产品的选配进行验证。分别选配 200 件、500 件、1 000 件零件时,满足阀门产品的配合间隙要求下,各用时为 10 s、30 s、50 s,选配成功套数为 195 套、419 套、871 套。该智能选配系统与现有的人工零件匹配方式进行比较,可明显提高生产效率,同时可为阀门批量制造提供智能化的选配手段。

关键词: 阀门零件;大批量选配;Hopcroft-Karp 算法;系统开发

中图分类号: TP274 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0180-06

A Batch Matching System for Valve Parts Based on Hopcroft-Karp Algorithm

XU Zhe, LIU Xiang, QIAO Hongjuan, ZHAO Jianpeng

(Sichuan Aerospace Long March Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 636371, China)

Abstract: In order to reduce part selection time in valve assembly process, increase spare parts rate and improve valve mass production efficiency, a valve part batch selection system based on HK algorithm was developed. The value fitting tolerance database was established inside the system, targeting at the maximum mathing number, the maximum matching was calculated using HK algorithm, and the advantages of graphic programming of Labview platform and data processing of Python programming language were combined to improve the efficiency and flexibility of system development and enhance engineering application. A batch of matching clearance requirements of 0.055 mm to 0.075 mm pressure reducer selection were verified. It took the system 10 s, 30 s and 50 s respectively choosing 200, 500 and 1000 parts in line with the matching clearance requirements, successfully matching the number of sets as 195, 419 and 871. Compared with the existing manual parts matching method, the results show that the intelligent matching system can improve the production efficiency, and provides intelligent means for batch manufacturing of valve.

Keywords: valve parts; batch selection; Hopcroft-Karp algorithm; system development

0 引言

随着我国航天事业的快速发展,2023 年中国航天发射次数有望达到 80 次左右,较 2022 年有大幅增长^[1-3]。但随着火箭发射任务的逐年递增,对阀门数量需求也进一步提高,因此提升阀门工作性能以及生产效率,对于促进我国航天事业的发展 and 保障火箭发射任务的顺利完成,都具有重要意义。

阀门零件的生产质量直接影响到阀门动作的顺畅性、响应时间、启闭压力等多方面的性能,而阀门零件的选配是影响阀门组件生产质量的一个重要方面^[4-6]。为解决类似的机械零件选配问

题,张海生等^[7]采用 NSGA-II 多目标遗传算法对 RV 减速器进行选配优化;史天亮、尹璐等^[8-9]提出了一种铁路大型养路机械轮对选配方法;邢世雄、王鹏飞等^[10-11]针对紧固螺栓松动导致汽缸泄漏的问题,提出了基于蚁群算法的汽缸螺纹连接质量选配优化。马彦根^[12]介绍了一种面向高铁动车组和减速器零件利用率的选配技术,在零件选配中表现优异。

以上选配算法在一定程度上为阀门零件的选配研究提供了思路,但是编程难度较大,需要调整的参数较多,距离实际生产仍有一定的距离。目前针对航天领域的阀门零件选配还无相关研究,因为一方面发火箭上应用的阀门种类较多,配合

第一作者简介: 许哲 (1994—),男,河北邯郸人,工程师,硕士,研究方向为航天活门智能制造、活门制动器装配设备,2823385738@qq.com。

间隙关系复杂,阀门制造厂家采用的人工选配方式,工作量大、易存在潜在的质量问题,且装配过程中剩余较多零件,造成零件浪费。利用现有阀门零件选配工艺特点,结合航天阀门极其严苛的制造要求,在建立阀门配合公差数据库的基础上,开发了一种航天阀门零件批量选配系统,用于指导阀门零件的配对,解决人工选配的弊端,进一步提升航天阀门制造装配质量及其效率;另一方面,Python 与 Labview 的混编也为该类系统的开发提供了一种新思路,提高了系统的开发效率,为该类系统的实用性以及推广性奠定了基础。

1 基于阀门选配系统的阀门加工工艺

阀门配合要求的导向盘和活阀基本结构如图 1 所示。如果配合间隙过大,则会造成导向性较差,甚至出现密封性能不达标等现象;而配合间隙过小,则会出现活阀运动卡滞,开启压力增大等现象。

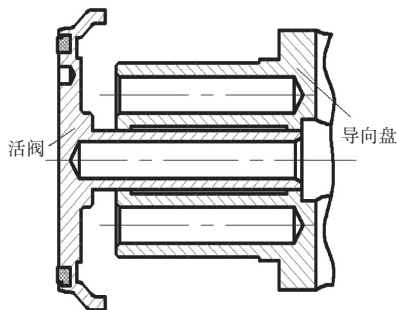


图 1 活阀与导向盘的导向配合结构

关于阀门零件配合间隙的控制,目前主要采用两种工艺方案,一种是根据阀门零件的配合类型进行基孔制或者基轴制配车,以基孔制为例,即先加工好孔形零件,根据孔形零件选配车轴。该工艺方法效率较低,且在车削过程中容错率较小,无法实现大批量生产;另一种采用严控加工误差,从而保证配合公差。由于阀门配合间隙要求较为严格,因此轴、孔的加工公差带较窄,对机加工设备以及人员操作水平要求较高,但是实际上仍然存在加工误差较大情况,依旧需要进行人工选配,且生产成本较高,无法实现较大批量生产,且看似是减少了零件选配时间,实则加长了零件的加工时间^[13-15]。

为提高阀门装配质量以及生产效率,本文提出了一种高效的选配方法,适用于阀门的较大批量生产。以图 1 配合结构为例,该选配方法的阀门零件选配流程如图 2 所示。通过图 2 可以看出,加工过程中,孔类与轴类零件按照相应的尺寸

独立进行加工,严格按照图纸工艺要求控制加工误差,可有效地提高生产效率。加工完毕后,检验人员将相关参数导入选配系统中,最后通过阀门零件选配系统进行选配,方便大批量阀门零件的匹配,得到最大的配对数量,减少零件的剩余量。

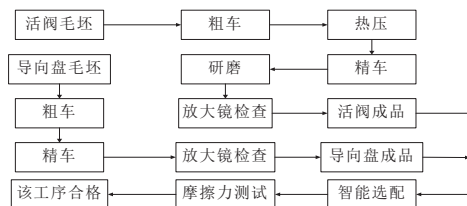


图 2 阀门选配系统的阀门零件选配流程

2 选配系统建模及内部算法

2.1 选配原则

为在获得最大匹配数量的同时保证阀门间隙的配合,确定以下选配原则。

1) 比对原则。在数据库中建立阀门需要进行公差配合的零件名称以及配合公差,规定零件的配合间隙只有在该配合公差带之间才合格;并且为了保证数据库的安全性,设置权限,只有工艺师及以上级别可以对其配合间隙公差进行修改。

2) 最大选配原则。以获得阀门最大选配数为目标,通过算法对需配合的零件尺寸进行筛选匹配。

2.2 零件选配流程

1) 建立数据查询库

针对不同阀门不同零件的配合公差要求,首先建立阀门配合公差查询数据库,通过该数据库查询到阀门中活阀与导向盘的配合公差 e^+ 上和 e^- 下,同时遍历活阀和导向盘的尺寸与编号,构建如图 3 所示的配合间隙误差,得到每两件的合作间隙(图中“x”即为两个零件的配合间隙值),方便构建二分图中匹配边的查询建立。

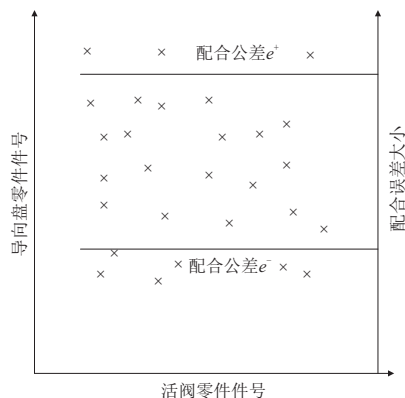


图 3 配合误差图

2) 构建二分图

阀门中的配合问题可以理解成旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP), 它是图论中的一个经典的组合优化问题, 因此为解决阀门中的零件尺寸配合问题, 需要首先构建基于零件名称和尺寸的二分图, 这样就将求解阀门零件的最大配对数问题转化为了求解二分图的最大匹配问题。

对活阀和导向盘的名称与尺寸进行整合, 设为 $G(V, E)$ 以构建二分图。其中 V 为所有零件的编号的集合, 即 $(A_1, A_2, \dots, A_i, B_1, B_2, \dots, B_i)$, A 表示活阀编号, B 表示导向盘编号; E 表示其匹配边集合 $(E_1, E_2, \dots, E_i)$, 即 B 与 A 两者尺寸的配合间隙在数据库中所规定的配合公差内, 则 B 与 A 构建匹配边 E_i 。然后将 V 中集合按照零件名称切割为两个互不相交的集合 A, B , 如图 4 所示。

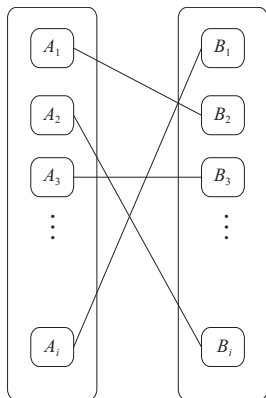


图 4 阀门零件配合二分图

3) 零件选配算法

本文采用 Hopcroft-Karp (HK) 算法来解决此类二分图最大匹配问题。该算法是由 HOPCROFT 与 KARP 一起提出的, 是对 Hungarian 算法 (匈牙利算法) 的优化, 相比于遗传算法、粒子群算法等, HK 算法无需调整参数, 不会陷入局部最优^[16-17]。

将 HK 算法和零件选配结合的具体方法如下:

a) 将活阀和导向盘作为交错图的顶点, 对于活阀 (二分图的左侧) 的每个零件与可以匹配的导向盘进行相连;

b) 初始化, 将所有未匹配零件标为未匹配点;

c) 寻找增广路径, 从一个未匹配点开始, 寻找二分图中的增广路径 (即从一条未匹配的边开始, 交替连接未匹配点和已匹配点的边);

d) 标记交错树中的节点, 将路径中的未匹配

点和已匹配点交替标记为已匹配点和未匹配状态, 直到无法找到增广路径为止;

e) 将所有已匹配的边作为匹配方案输出, 计算匹配数量并结束算法。

该方法的核心思想就是通过应用广度优先搜索或者深度优先搜索不断从由零件数据构成的二分图中寻找增广路径, 直到找不到增广路径为止, 又由于其使用增广路径的方法进行不断优化匹配, 即每一次寻找一条路径来增加匹配数量, 直到无法找到增广路径为止, 因此也不会陷入局部最优, 具有全局最优的特点。

4) 基于该算法的阀门零件选配流程

首先获取需要匹配的零件编号以及尺寸信息, 然后对该批零件进行遍历, 获得配合误差图, 同时将零件尺寸按名称分为 A, B 两类; 第 2 步, 将误差图中的元素按照比对原则同数据库中的对应公差进行比对; 第 3 步, 如若满足公差要求, 则将合格的配对添加匹配边, 构建二分图; 第 4 步, 调用 HK 算法, 按照最大选配原则进行计算, 获得最大匹配数量和匹配结果, 选配流程如图 5 所示。

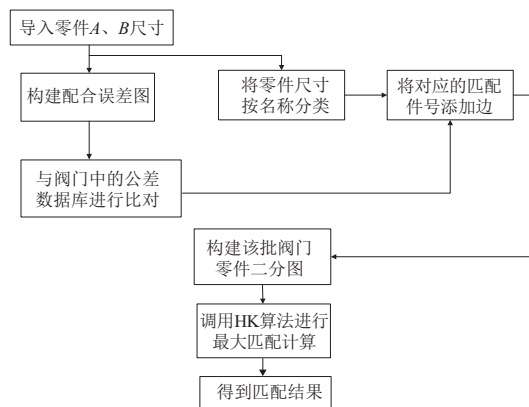


图 5 选配算法流程图

3 阀门零件批量选配系统框架

3.1 HK 算法的 Python 实现

HK 算法虽然不会陷入局部最优, 无需调整参数, 但是整个流程较为复杂, 利用 Matlab、VB 等编程难度较大, 不利于实际工程应用以及推广。为快速满足生产需要, 本文提出利用 Python 有丰富的第三方支持库特点, 在数据处理、协议解析等方面的优势, 进行 HK 算法编写。其部分代码如下所示:

```
#初始化误差矩阵
error_matrix = [[0 for _ in range(len(a))] for _ in range(len(b))]
aq_matrix = [0 for _ in range(len(b))]
```

```

#计算每个零件之间的误差
for i, (bid, bqty) in enumerate(b.items()):
    for j, (aid, aqty) in enumerate(a.items()):
        error_matrix[i][j] = bqty - aqty
#输出误差矩阵
Print ( ' ', end='')
for aid in a.keys():
    print (aid, end='')
    print ( )
for i, row in enumerate(error_matrix):
    print(list(b.keys())[i], row)
#构建二分图
Similarity_matrix = np. Array (error_matrix)
tolup = aa
toldown = bb
G = nx.Graph()
for i in range(len(bvalues)):
    for j in range(len(avalues)):
        if toldown < similarity_matrix[i][j] < tolup:
            G.add_edge(bvalues[i], avalues[j])
#求解最大匹配
matching = nx.algorithms.matching.maximal_matching(G)

```

由以上代码可知 Python 中的 `nx.algorithms.matching.Maximal_matching(G)` 函数即零件匹配系统中的 HK 算法最大匹配功能,编程也相对简单。

3.2 系统平台构建

根据选配原则以及建立的模型,本文采用 Labview 与 Python 混编的方式实现系统的搭建,其中 Python 在系统中实现 HK 算法功能,利用 Labview 自带 `Vi(System Exec.vi)` 即可实现对 Python

程序的调用(但注意必须先用 Python 生成相应的 exe,才可实现调用),而由于 Labview 是图形化编程,其与数据库接口的搭建以及界面设计较为容易实现。其结构框图如图 6 所示。

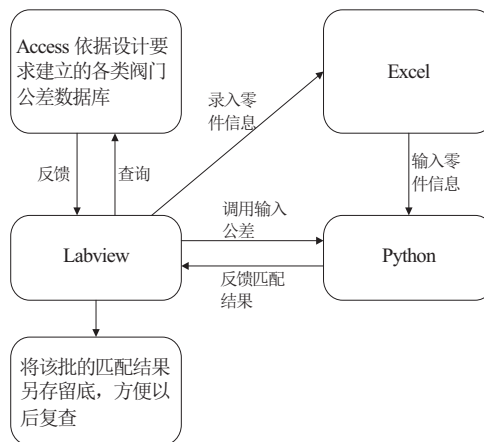


图 6 系统结构图

Labview 通过 ADO 模块与 Access 数据库进行连接,实现阀门公差的查询,并将该配合公差信息传递给 Python 中的 HK 算法,得出最大匹配结果,将其结果保存到 Excel 中,同时在界面显示出来配合间隙分布情况,方便工艺人员对该批阀门的生产质量进行把握。该系统主要分为零件数据录入(也可以通过质量管理体系(QMS)中直接导入数据)、配合公差查询、最大间隙以及最小间隙配对结果显示、保存选配结果、零件误差图表显示等 5 部分,其界面如图 7 所示。

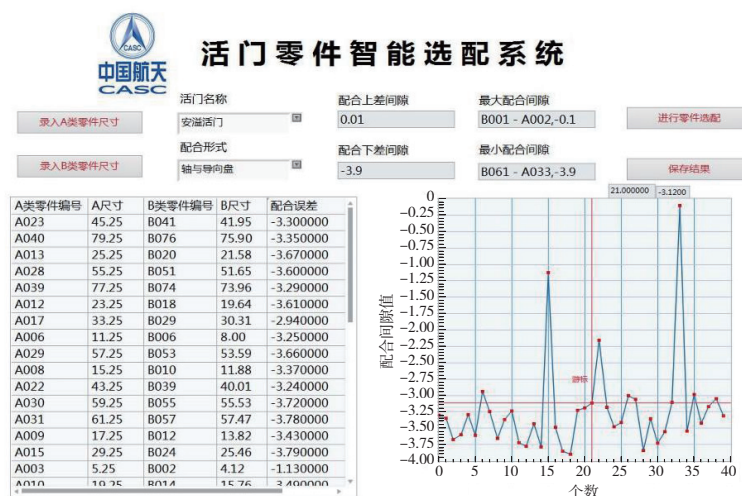


图 7 活门零件智能选配系统界面

4 选配结果及验证

火箭中的减压器是用来调节流体或气体的压

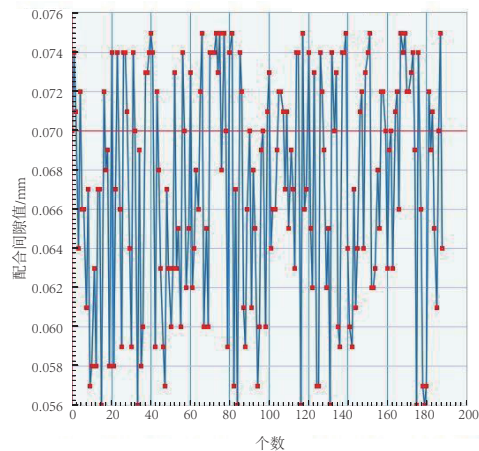
力,保证系统内部压力不超过设计范围,从而保护其他设备正常运行。在火箭装配过程中,因为液体燃料一般是在低温高压下储存,所以在燃料和

氧化剂混合前需要使用减压器将两种储存气体进行匹配与混合,以防止过快的混合和不安全爆炸事故,再加上火箭发射的高功率、复杂性和瞬间性,因此进一步增加了减压器的数量需求。

以选择减压器为例,不仅因为其数量较多,且

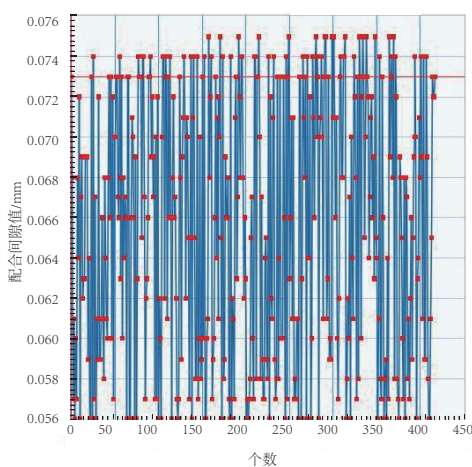
质量要求也较为严格。将某批次减压器壳体与活阀各 200 件、500 件、1 000 件的尺寸信息输入到系统中进行配对,其配合间隙要求为 0.055 mm ~ 0.075 mm,选配结果以及配合间隙分布如图 8 所示。

A类零件编号	A尺寸	B类零件编号	B尺寸	配合公差
A152	34.947	B139	35.017	0.070000
A126	34.959	B049	35.033	0.074000
A013	34.958	B008	35.029	0.071000
A026	34.939	B027	35.003	0.064000
A133	34.947	B128	35.019	0.072000
A159	34.956	B196	35.022	0.066000
A127	34.945	B124	35.011	0.066000
A074	34.959	B030	35.020	0.061000
A021	34.944	B022	35.011	0.067000
A056	34.95	B073	35.007	0.057000
A177	34.945	B159	35.003	0.058000
A150	34.956	B192	35.019	0.063000
A065	34.957	B024	35.015	0.058000
A050	34.957	B023	35.024	0.067000
A044	34.939	B063	35.006	0.067000
A085	34.947	B097	35.003	0.056000
A104	34.957	B041	35.020	0.072000



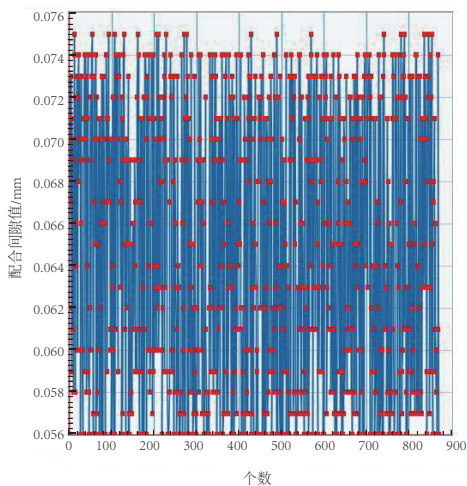
(a) 200 件

A类零件编号	A尺寸	B类零件编号	B尺寸	配合公差
A438	34.958	B222	35.031	0.073000
A387	34.959	B206	35.027	0.068000
A013	34.945	B037	35.002	0.057000
A169	34.943	B351	35.004	0.061000
A359	34.955	B191	35.011	0.056000
A429	34.959	B216	35.019	0.060000
A163	34.953	B092	35.010	0.057000
A281	34.955	B145	35.023	0.068000
A476	34.954	B250	35.018	0.064000
A250	34.943	B404	35.015	0.072000
A367	34.956	B195	35.012	0.056000
A377	34.95	B199	35.017	0.067000
A164	34.94	B346	35.009	0.069000
A317	34.939	B460	35.001	0.062000
A202	34.949	B262	35.012	0.063000
A303	34.959	B159	35.022	0.063000
A274	34.940	B274	35.018	0.060000



(b) 500 件

A类零件编号	A尺寸	B类零件编号	B尺寸	配合公差
A750	34.952	B554	35.008	0.056000
A161	34.947	B114	35.009	0.062000
A558	34.944	B977	35.017	0.073000
A813	34.951	B589	35.024	0.073000
A626	34.953	B471	35.020	0.067000
A424	34.941	B905	35.014	0.073000
A123	34.949	B090	35.008	0.059000
A272	34.949	B187	35.020	0.071000
A335	34.952	B241	35.013	0.061000
A257	34.948	B179	35.018	0.070000
A240	34.958	B171	35.027	0.069000
A464	34.943	B930	35.001	0.058000
A046	34.947	B036	35.022	0.075000
A279	34.947	B196	35.021	0.074000
A386	34.958	B277	35.016	0.058000
A436	34.955	B315	35.027	0.072000
A092	34.940	B050	35.012	0.064000



(c) 1000 件

图 8 选配结果以及配合间隙分布

该系统在选配 200 件、500 件、1 000 件零件时,用时分别为 10 s、30 s、50 s,选配套数分别为 195 套、419 套、871 套。通过图 8 可知所配套零件全都符合减压器阀门配合公差要求,而该批阀门在生产阶段时装配效率为 40 套/周,其中人工选配该 40 套阀门的时间约为半天,且每批选配后,有大量零件剩余,造成严重浪费,且在装配过程中会偶尔出现选配错误等情况,影响阀门质量。

该系统从生产效率角度来看,至少缩短生产周期 30% 以上,且通过计算机进行匹配,有效地降低了由于人为因素造成间隙配对不合格的概率。

5 结语

本文针对航天阀门制造过程中阀门种类多、零件配合公差繁杂等特点,通过建立阀门配合公差数据库,Python 与 Labview 混编等手段开发了一种基于 Hopcroft-Karp 算法的零件智能选配系统,用于需要配合的零部件选配工序中,最大选配数量为 1 000 件,可根据实际需求更改最大选配数。通过某批次配合间隙要求为 0.055 mm ~ 0.075 mm 的减压器产品的选配进行验证,系统在选配 200 件、500 件、1 000 件零件时,用时分别为 10 s、30 s、50 s,选配套数分别为 195 套、419 套、871 套。验证分析结果表明:该系统具备实际的工程应用条件,且相较于传统的人工选配,其效率得到较大提高,缩短生产周期 30% 以上,较大程度上优化了现阶段的工艺方案,后续该系统可接入检验系统,方便检验人员的检查,降低潜在的质量风险。

参考文献:

- [1] 王宇虹. 中国航天科技活动蓝皮书(2022 年)[J]. 导弹与航天运载技术(中英文),2023(1):20.
- [2] 李航,张伟. 2023 年中国航天发射任务态势分析与展望[J]. 中国航天,2023(5):12-18.
- [3] 陈光明,刘洋. 商业航天助推中国高频次发射的路径研究[J]. 宇航学报,2022,43(8):1055-1064.
- [4] 孙海鹏,马飞,崔景芝,等. 阻塞效应对安溢活门性能影响分析[J]. 航天制造技术,2016(1):49-51.
- [5] 张立军,王振华,刘伟. 阀门零件加工精度对密封性能的影响分析[J]. 流体机械,2022,50(8):45-50.
- [6] 陈志强,李红梅. 基于装配一致性的阀门零件选配方法研究[J]. 机械工程学报,2023,59(12):112-120.
- [7] 张海生,黄炳,罗利敏,等. 基于多目标遗传算法 NSGA-II 的 RV 减压器选配优化及实现[J]. 机械设计与研究,2022,38(5):112-116,121.
- [8] 史天亮,唐志文. 铁路大型养路机械轮对大批量选配[J]. 现代制造工程,2021(9):47-51.
- [9] 尹璐. 再制造机床零部件选配与质量控制研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2023.
- [10] 邢世雄,江志刚,朱硕,等. 尺寸精度约束下再制造产品零部件选配优化方法研究[J]. 机械工程学报,2022,58(19):221-228.
- [11] 王鹏飞,胡小锋. 基于蚁群算法的汽缸螺纹连接质量选配优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(7):1-4.
- [12] 马彦根. 装备设计选型技术模块化方法研究:一种工程项目零部件选配组合优化方法[J]. 石油石化设备技术,2019,40(6):61-66,10.
- [13] 王强,李伟,张明远. 基于基孔制的阀门零件精密配车工艺优化研究[J]. 机械设计与制造,2022,60(5):78-82.
- [14] 刘建华,赵志刚,孙立峰. 高精度阀门轴孔配合公差优化与加工误差控制[J]. 制造技术与机床,2023,72(3):45-50.
- [15] 陈刚,周永华,吴晓峰. 阀门零件批量生产中选配工艺的替代方案研究[J]. 流体机械,2023,51(7):33-38.
- [16] ZHANG Y, WANG L. Hopcroft-karp algorithm vs. metaheuristics: a comparative study on bipartite graph matching[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2023, 27(2):345-358.
- [17] CHEN X, LIU H. Accelerating hungarian algorithm using hopcroft-karp optimization for large-scale assignments[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2022, 44(3):1125-1140.

收稿日期:2023-08-11