

圆盘抑制火箭贮箱内液面塌陷数值仿真研究

黄仁建,夏晨

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:在液体火箭推进剂贮箱出流的过程中,液面会出现塌陷夹气现象,通常使用圆盘装置来抑制液面塌陷。对贮箱出流过程进行数值模拟,并基于塌陷现象分析出口流速、圆盘装置、过载对液面塌陷的影响规律。结果表明:圆盘装置、大过载有利于延迟液面发生塌陷的时间,减少推进剂的剩余量;出口流速、圆盘安装高度、直径变化对液面塌陷有较大的影响。

关键词:火箭贮箱;液面塌陷;圆盘;过载;数值模拟

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0108-05

Numerical Simulation of Liquid Surface Collapse in Rocket Tank Restrained by Disk

HUANG Renjian, XIA Chen

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In view of liquid level collapse and gas pipe trapping during the outflow of the liquid rocket propellant tank, usually restrained by disk device, the process of outflow from the propellant tank is numerically simulated. Based on the collapse phenomenon, the influences of export speed, the disk device and overload on the liquid level collapse are respectively analyzed. The results show disk device and large overload are beneficial to delaying the time of liquid surface collapse and can reduce the remaining amount of propellant, and export speed, the installation height and diameter of the disk have great influence on the liquid level collapse.

Keywords: rocket tank; liquid level collapse; disk; overload; numerical simulation

0 引言

现代火箭发动机中液体火箭发动机凭借其推力大、适应性好、可靠性高等方面的优点而成为运载火箭的主要动力装置^[1]。火箭推进剂贮箱是推进剂唯一的贮存及运输装置,在贮箱出流末期,随着液面塌陷现象的发展,会导致输送管内夹入气体,可能引起涡轮泵气蚀,剩余的推进剂将不能使用,增加“死质量”,影响火箭运载能力。故对塌陷现象进行研究,采取措施减少推进剂的剩余量^[2-4],具有重要意义。

针对推进剂贮箱出流的塌陷现象,国内外研究人员对此都展开过各方面的研究。TAM W^[5]分析了贮箱结构对塌陷现象的影响。杨魏、王坤、黄晓宁等^[6-8]基于数值模拟,分别分析了火箭贮箱自由液面的塌陷现象、贮箱出流塌陷过程的流动特性以及出流流量、周向扰动和晃动对塌陷夹气过程的影响、出流口结构及隔板对液面塌陷的影响。

针对推进剂贮箱塌陷现象,一般采用出口挡板(圆盘、隔板)等装置来推迟液面塌陷,黄晓宁等^[8]分析了隔板长度、高度等对液面塌陷的影响,而圆盘装置的影响还未形成系统性的规律。本文针对液体火箭发动机的典型贮箱结构,采用数值仿真方法,对其液面塌陷过程进行了分析,并进一步研究了圆盘直径、安装高度及过载对液面

塌陷的影响,得到了其影响规律。

1 数值计算方法

1.1 计算模型与网格划分

本文以液体火箭发动机的典型贮箱结构为研究对象,图1显示了该贮箱的结构及计算网格。整个模型由贮箱、输送管及防漩防塌装置(圆盘、十字隔板)组成,推进剂贮箱直径3.35 m,输送管通径320 mm,圆盘十字隔板结构安装在输送管口的正上方。计算采用了icem进行网格划分,采用结构化网格,网格节点数180~860万(不同密度网格以验证网格无关性,详见1.3节),圆盘及十字隔板部分网格如图1(c)所示。

1.2 边界条件

计算模型中,贮箱进口为空气,作为增压气体。设定压力进口边界条件,压力值为0.103 MPa,输送管出口设定为速度出口边界条件,速度值为5.65 m/s。初始时刻液面高度为1.2 m(液位高度是指液面距离贮箱底部弧形面理论顶点的高度)。贮箱出流为气液两相非定常流动,因涉及到多相流模拟,多相流模型采用均相流模型,界面传递模型采用自由表面模型,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。

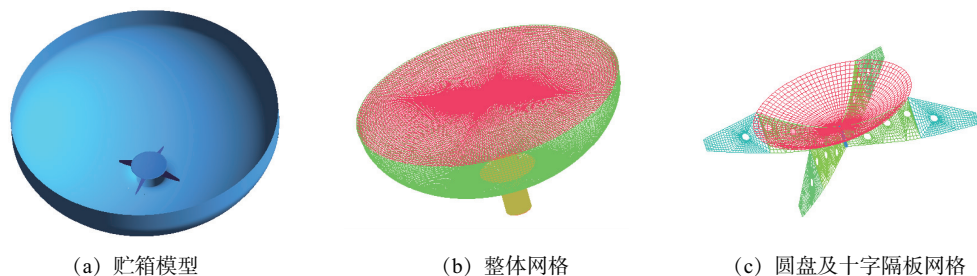


图1 贮箱结构及计算网格

1.3 网格无关性校验

网格的疏密程度会对数值模拟结果造成明显的影响,本文分别取网格数180万、420万、630万、860万4种密度进行网格无关性校验。表1为4种网格密度下的夹气时刻(出口出现气体成分的时刻)及贮箱内液体的剩余量。随着网格数的增加,夹气时刻增大,剩余量减少。当网格数量增加到630万以上时,计算结果的差异基本可忽略,流场的分布基本类似(图2),因此本文将在630万网格密度下对贮箱出流进行计算分析。

表1 不同网格数下夹气时刻和液体的剩余量

网格数/万	180	420	630	860
夹气时刻/s	12.94	13.03	13.06	13.07
剩余量/ m^3	0.362	0.315	0.300	0.295

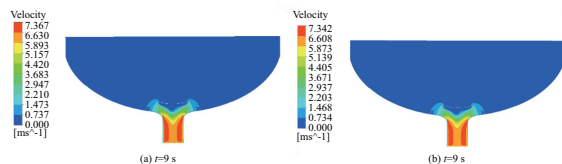
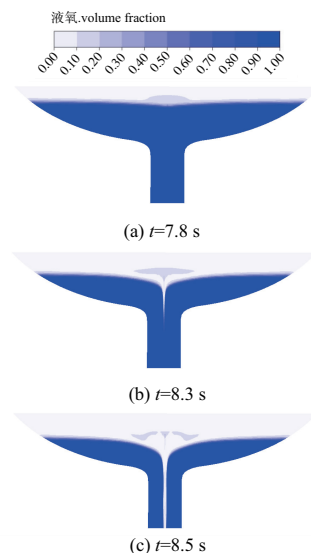


图2 630万、860万网格密度下流场图(9 s)

2 贮箱出流液面塌陷现象及抑制措施

2.1 液面塌陷现象分析

根据推进剂贮箱出流的流动情况,选取了出流末期几个时刻的气液两相体积分数分布云图,用来描述整个贮箱出流末期自由液面的塌陷发展过程。如图3所示。黑色部分为液氧,白色部分为氧气,其余为气液交界面的情况,气液交界面捕捉较为清晰。在 $t=7.8\text{ s}$,自由液面出现了凹陷;8.3 s时液面已经完全塌陷,塌陷液面发展到了输送管内,气体已经完全深入到输送管内,但还未达到出口处;8.5 s时气体已经贯通输送管,在输送管中心形成了一股气柱。贮箱出流流动过程中,出口流量较大或出口相对较大时,液面中间的流速快,边缘处的液体来不及补充造成液面发生塌陷。贮箱出流的夹气时刻为8.34 s,液氧剩余量占比11.8%。

图3 $X=0$ 平面处液氧体积分数分布云图

进一步分析出口流速对液面塌陷的影响。图4为出口流速分别为2.8 m/s、4.2 m/s、5.6 m/s时的塌陷过程示意图,分别在 $t=12\text{ s}$ 、 $t=8\text{ s}$ 、 $t=6\text{ s}$ 时。按照出口流量,3种工况下贮箱内液面的高度基本持平。从图中可见,3个出口流速下液面出现些许下凹现象,出口流速较小时,仅在输送管正上方液面中心处出现下凹,出口流速增大到5.6 m/s后,液面下凹的范围较出口流速为4.2 m/s时变大。出口流速越大,夹气时刻相对出现更早,中心液面的下凹越为明显,中心处气柱、液面凹陷范围增大,塌陷得更剧烈。

2.2 圆盘装置对液面塌陷影响

前面分析提到,液面塌陷是由于液面中心流速快,边缘处的液体来不及补充导致。流速越大,塌陷得越剧烈。常用的圆盘装置能有效地减小中心处液氧的流速,延缓液面的塌陷,即推迟夹气时刻^[4],并且其直径、安装高度变化都会影响贮箱内推进剂流往输送管的流通面积,进而影响液面塌陷。圆盘装置的防塌陷效果虽已得到广泛验证,但其影响规律还未有系统的总结,为此本文选取了3种不同直径圆盘,圆盘直径 d 分别取 $0.5D$ 、 $1.0D$ 及 $1.5D$ (D 为输送管通径),分别改变圆盘的安装高度 H (指圆盘边缘至贮箱理论弧面的垂直距离)进行数值模拟计算,研究圆盘直径、安装高度等因素对液面塌陷的影响,如图5-图6所示。

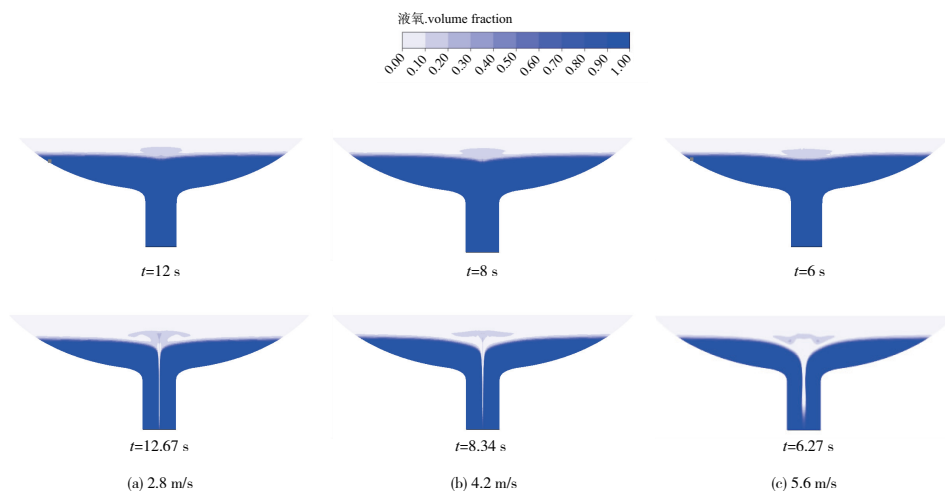
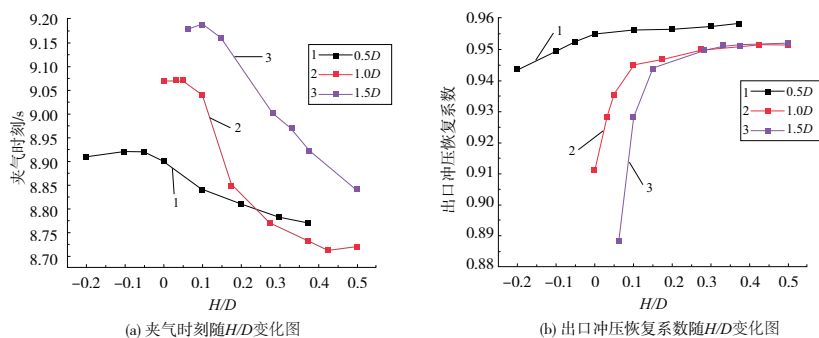
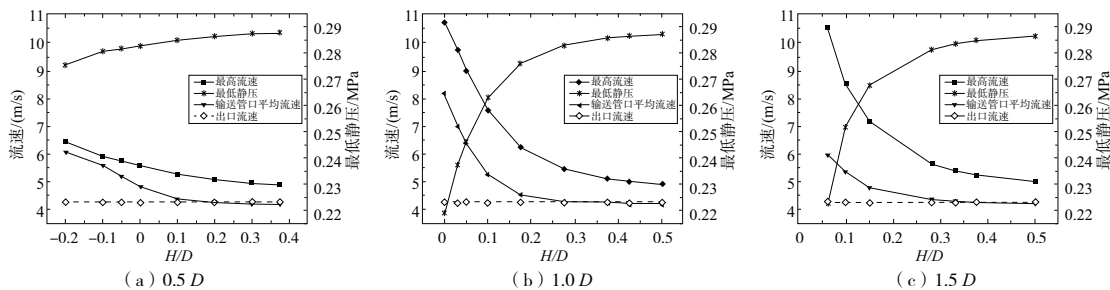


图4 不同出口流速下塌陷过程图

图5 不同圆盘直径夹气时刻、出口总压恢复系数随 H/D 变化图图6 不同圆盘直径最低静压、最高流速及输送管口平均流速随 H/D 变化图

从图5、图6可见, H/D 减小,能有效延迟夹气时刻,减少推进剂剩余量。但最高流速,输送管口平均流速增大,最低静压、出口总压恢复系数减小,即流动损失增大。在圆盘比较接近输送管口时,夹气时刻会延后0.01s或保持不变;总压恢复系数在 H/D 较大时基本保持稳定。 H/D 减小至一定大小后,总压恢复系数会大幅度下降。直径为0.5D时, $H/D=0$;直径为1.0D时, $H/D=0.1$;直径为1.5D时, $H/D=0.15$,幅度最大达7.3%。最高流速、输送管口平均流速、最低静压在 H/D 较大时也基本保持稳定。其中输送管口平均流速与出口流速基本持平,在 H/D 减小至一定大小后,流速迅速增大,最低静压降低。直径为0.5D时, $H/D=0.1$;直径为1.0D时, $H/D=0.18$;直径为1.5D时, $H/D=0.28$,输送管内的流动差异性增大。

圆盘直径从0.5D增至1.5D,夹气时刻出现了较大幅度的延迟,有效地减少了推进剂的剩余量,但出口总压恢复系数减小,即流动损失增大。圆盘直径为0.5D、1.0D的夹气时刻在 $H/D=0.25$ 之前,直径增大夹气时刻推迟,而在此之后,直径增大夹气时刻出现了提前的现象。圆盘直径为1.0D、1.5D的出口总压恢复系数在 $H/D=0.3$ 之后基本相同,而在此之前,直径增大,出口总压恢复系数减小。圆盘直径越大,最低静压、最高流速及输送管口平均流速随 H/D 变化的幅度越大。

图7为6s时刻圆盘直径为0.5D、1.0D、1.5D时的流场图及静压分布图,圆盘安装高度 $H/D=0.1$ 。随着圆盘直径增大,圆盘的束流作用增强,圆盘下方的低速区逐渐上移至圆盘盘面,贮箱和输送管连接拐角处高速区的速度

值及区域都有了较大的提升,整个输送管内的速度分布差值增大,流动的状态更紊乱;流经圆盘后静压的下降幅度增大,贮箱与输送管连接拐角处的低压区压力下降,整个输送管内压力分布的差值增大,分布更加不均匀。

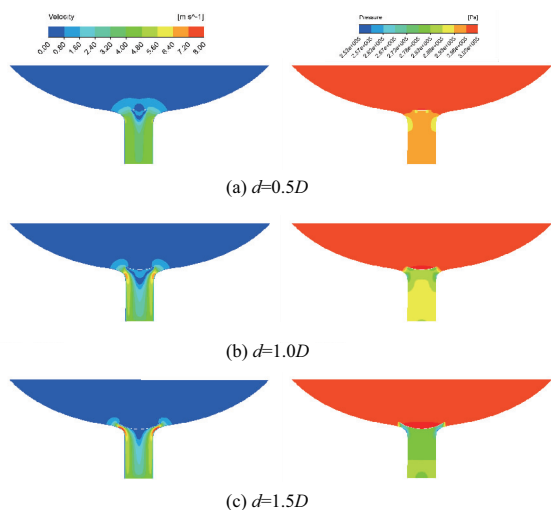


图7 圆盘直径变化 $X=0$ 面流场及静压分布图 ($t=6$ s)

2.3 过载对液面塌陷影响

液体运载火箭在运行的过程中,通常会有较大的变过载(超重)工况。过载利于塌陷的减少或消除^[4],给定典型变过载 $g_b = (0.0714t + 4.0326) \times g$ (t 为时间, g 为重力加速度, m/s^2),与常过载 ($1g$) 工况下对比,分析不同过载条件下 H/D 变化对液面塌陷的影响效果。

图8为8.5 s时 $X=0$ 平面常过载、大变过载两种工况下的静压及流场分布图。由图8可见在贮箱出流流动的整个过程中,在经过了圆盘阻流作用后两者静压都降低,与常过载工况相比,大的变过载工况在同一高度位置的静压都明显更大,且靠近输送管出口,静压上升得很明显,推进剂空化风险降低;由于圆盘的束流作用,两工况下贮箱与输送管连接拐角处都出现了局部的高速流动区,且该区域都延伸到了输送管内近壁面处,在贮箱出流流动的整个过程中,与常过载工况相比,大变过载工况下输送管高速流动的区域减小,输送管内的流动差异性相对更小,流动有所改善。

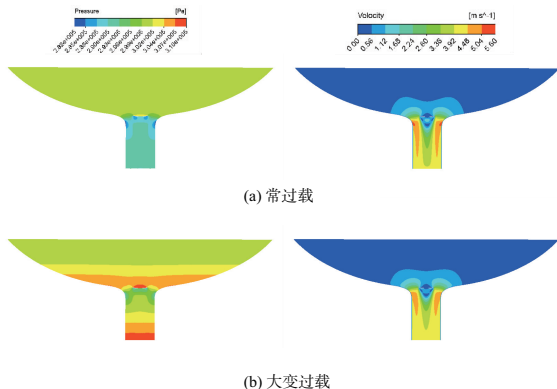


图8 8.5 s 时常过载、大变过载下静压、速度分布云图

图9为常过载、大变过载工况下夹气时刻随 H/D 的变化示意图。与常过载工况相比,大变过载工况下的夹气时刻明显有了较大的推迟。这是由于液面塌陷时,液面下凹,大的变过载工况下四周的液体受大过载力作用下能向中心填补,延缓液面的塌陷。但两种工况下夹气时刻随 H/D 的变化趋势基本相同,随着 H/D 减小,夹气时刻基本上延后。大变过载较常过载下夹气时刻有了大幅度的延后,能有效减小贮箱内推进剂的剩余量。

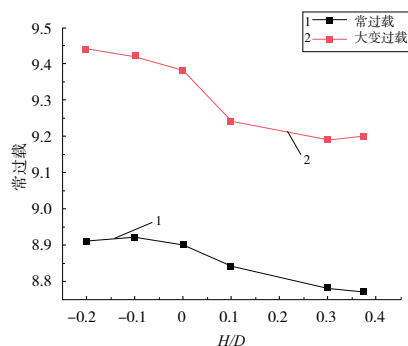


图9 常过载、大变过载下夹气时刻随 H/D 变化图

从图10中可以看出,常过载、大变过载工况下最高流速及输送管口平均流速随圆盘安装高度 H/D 的变化趋势基本一致。随着 H/D 增大,最高流速下降, H/D 增至0.3后,下降趋势变缓,输送管口平均流速也经历了一个下降的过程。 $H/D=0.1$ 是输送管口平均流速的一个转折点,此时流速已经下降到接近出口流速。整个过程中大变过载工况下最高流速及输送管口平均流速都更低,流动差异性更小。

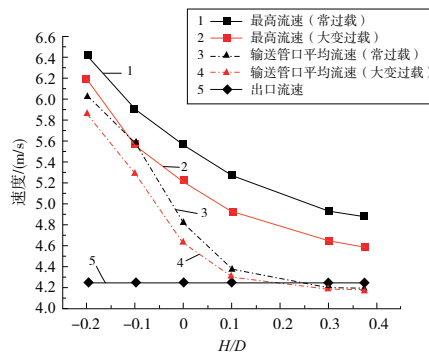


图10 常过载、大变过载下最高流速、输送管口平均流速及出口流速随 H/D 变化图

3 结语

本文通过CFD软件进行数值模拟,对贮箱出流液面塌陷现象进行了分析,研究了圆盘装置及过载对液面塌陷的影响,得到了以下结论。

1) 出口流速对液面塌陷有显著影响。出口流速越大,夹气时刻相对出现更早,出口夹气时中心液面的下凹越为明显,塌陷得更剧烈。

2) 圆盘安装高度对液面塌陷有显著影响。圆盘安装高

度减小,夹气时刻大体推迟,即推进剂剩余量减小,贮箱出流的流动状态变差,最高流速、输送管口平均流速大幅度提高,出口总压恢复系数减小幅度达 7.3%,流动损失增大。

3)圆盘直径对液面塌陷有显著影响。随着圆盘直径从 $0.5D$ 增至 $1.5D$ 后,夹气时刻得到了较大幅度的推迟,即液面塌陷延缓,推进剂剩余量减小,贮箱出口总压恢复系数减小,流动损失增大,输送管内流动差异性增大。

4)大变过载(超重)工况下夹气时刻随 H/D 的变化趋势与常过载($1g$)工况基本相同,但大变过载有利于延迟液面发生塌陷的时间,减少液氧的剩余量,且大变过载下输送管内的流动差异性减小,输送管内的流动状况有所改善。

参考文献:

- [1] 胡平信,刘国球. 液体火箭发动机的技术与展望[J]. 导弹与航天运载技术,1998(2):3-12.
- [2] 邵业涛,邓新宇,黄兵等. 低温火箭贮箱防漩防塌装置数值模拟研究[C]//第十届全国低温工程大会暨中国航天低温专

业信息网 2011 年度学术交流会,兰州:[s.n.],2011:448-452.

- [3] 北京宇航系统工程研究所出流装置研制 QC 小组. 减少火箭不可用推进剂量[J]. 中国质量,2015(11):32-37.
- [4] 孙礼杰,褚洪杰,王振剑,等. 液体火箭漩渦与塌陷现象的机理及其抑制措施[J]. 上海航天,2016,33(1):80-84,89.
- [5] TAM W, DREY M, JAECKLE D Jr, et al. Design and manufacture of an oxidizer tank assembly [C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City, UT, USA. Reston, Virginia: AIAA, 2001.
- [6] 杨魏,吴玉林,刘树红. 部分充液贮箱自由液面塌陷的数值研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(3):423-426.
- [7] 王坤. 液体火箭发动机燃料贮箱出流塌陷夹气现象的研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [8] 黄晓宁,王磊,毛红威,等. 火箭升空低温推进剂出流特性仿真研究[J]. 制冷学报,2020,41(4):136-143,166.

收稿日期:2021-02-08

(上接第 99 页)

测准确率由 80.18%提升至 90.38%,模型损失(二元交叉熵)由 0.198 2 下降至 0.020 6,从而证明了数据质量管理的有效性。

表 5 数据质量管理效果对比验证

对比项	预测准确率/%	损失
数据质量管理前	80.18	0.198 2
数据质量管理后	90.38	0.020 6

4 结语

本文梳理了工业时序数据质量问题的主要表现,引入风险评估机制以完善数据质量评价标准,给出了工业时序数据质量管理方法。提出了一种基于 LSTM 神经网络的数据质量分析方法,并通过实际数据集进行了验证。后期研究需要将工业时序数据质量管理方法模块化、系统化,提高实用性,使其真正服务于工业大数据。

参考文献:

- [1] WANG R Y. A product perspective on total data quality management[J]. Communications of the ACM, 1998, 41(2): 58-65.
- [2] JEUSFELD M A, QUIX C, JARKE M. Design and analysis of quality information for data warehouses [C]//Conceptual Modeling - ER '98, 1998. DOI:10.1007/978-3-540-49524-6_28.

- [3] BATINI C, SCANNAPIECO M. Data quality: Concepts, methodologies and techniques[M]. [S.l.]:Springer, 2006.
- [4] BATINI C, CAPPIELLO C, FRANCALANCI C, et al. Methodologies for data quality assessment and improvement[J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(3):1-52.
- [5] 方幼林,杨冬青,唐世渭,等. 数据仓库中数据质量控制研究[J]. 计算机工程与应用,2003,39(13):1-4.
- [6] 杨青云,赵培英,杨冬青,等. 数据质量评估方法研究[J]. 计算机工程与应用,2004,40(9):3-4,15.
- [7] 颜宏文,陈鹏. 基于云模型的电网统计数据质量评估方法研究[J]. 计算机应用与软件,2014,31(12):100-103.
- [8] 袁满,刘峰,曾超,等. 数据质量维度与框架研究综述[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2018,36(4):444-451.
- [9] 周艳红. 基于大数据的数据质量评估方法研究[J]. 现代信息科技,2020,4(8):86-89.
- [10] 苏佳轩. 面向工业大数据的高维时间序列清洗系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [11] HAN J, KAMBER M, PEI J. Data mining: concepts and techniques, third edition[M]. Waltham, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2011.
- [12] 丁小欧,王宏志,于晨健. 工业时序大数据质量管理[J]. 大数据,2019,5(6):1-11.
- [13] 丁盼,庞晓平,陈进. 基于长短期记忆网络的挖掘机器人视觉跟踪系统设计[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):145-148.

收稿日期:2021-05-23