

# 端壁吸气控制平面叶栅密流比研究

陈劲帆,周正贵

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**以大弯角静子叶型叶栅为对象,构造多种端壁吸气方案。引入密流比分布差作为衡量叶中截面流动二维性的新指标,在0.7马赫数下采用数值模拟方法研究吸气方案对平面叶栅叶中截面流动二维性的影响规律。研究结果表明:不同端壁吸气方案吸气使叶中截面总密流比为1时,叶片表面等熵马赫数分布与二维流动相差很小,但不同方案密流比分布与二维流动差异较大;端壁弦向槽位于叶片尾缘处,可有效控制角区分离,进而有效控制叶中截面密流比,并且达到较小密流比分布差。这种吸气方案可实现叶中截面流动与二维流动较好的一致性。

**关键词:**密流比;流动控制;平面叶栅;压气机

**中图分类号:**V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0191-05

## Control of Axial Velocity Density Ratio in Compressor Cascade by Endwall Boundary Layer Suction

CHEN Jinfan, ZHOU Zhenggui

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

**Abstract:** With large angle stator cascade as the research subject, a series of endwall suction schemes were designed. A new parameter defined by distance of AVDR distribution between three-dimensional and two-dimensional flow field was introduced to measure two-dimensionality of mid-span flow. Numerical simulations were carried out for the linear compressor cascade to investigate effects of different suction schemes on two-dimensionality of mid-span flow with Mach number at 0.7. The research results show that blade surface Mach number distributions change little and are similar to two-dimensional flow in different suction schemes when total AVDR is controlled to 1, while AVDR distributions change greatly and differ from two-dimensional flow. Corner separation is effectively decreased by endwall chord suction slot located near trailing edge in order to control mid-span total AVDR and gain smaller AVDR distribution close to two-dimensional flow. The optimal scheme can achieve good consistency between mid-span flow and two-dimensional flow.

**Keywords:** axial velocity density ratio; flow control; plane cascade; compressor cascade

## 0 引言

平面叶栅端壁附面层及其诱发的角区分离造成叶中附近流道收缩,使叶中截面密流比(axial velocity density ratio, AVDR) $>1$ 。其中密流比 AVDR 定义为出口轴向密流和进口轴向密流的比,即

$$A_{\text{VDR}} = \frac{\int_0^t \rho_2 V_{z,2} du}{\rho_1 V_{z,1}} \quad (1)$$

式中:下标1指进口截面参数;下标2指出口截面参数。在平面二维流动中密流比为1,在三维流动中,密流比大小取决于展弦比、扩压度等参数。密流比越大,叶中截面流管收缩程度越大、扩压度越小<sup>[1-3]</sup>。POLLARD D等<sup>[4]</sup>通过低速风洞试验发现,展弦比越大,叶中截面流动端壁附面层影响越小。而随着马赫数增加,保证叶中截面流动不受端壁区流动影响需要更大的展弦比。

工程实际中,三维叶片通道内流动密流比通常 $>1$ 。密流比越大,总压损失越小、叶片表面等熵马赫数越大。为了采用平面叶栅试验准确模拟真实的密流比, SCHREIBER H A等<sup>[5]</sup>对跨音速平面叶栅进行试验,采用端壁开弦向吸气槽吸气的方式控制密流比。在进口马赫数从0.8~1.1、正攻角和负攻角大分离边界范围进行了试验。叶栅试验测得的总压损失数据与跨音速压气机转子的对应径向位置叶型获得的总压损失数据吻合较好。SCHREIBER H A等<sup>[6]</sup>采用平面叶栅试验研究雷诺数和来流湍流度对压气机叶栅边界层转捩的影响时,通过端壁开设多道弦向吸气槽吸气来控制密流比,试验得到的叶片表面等熵马赫数分布与计算值吻合很好。WEBER A等<sup>[7]</sup>认为端壁附面层吸除有助于减小叶中截面密流比;并与 SONG B等<sup>[8]</sup>收集归纳了密流比对平面叶栅试验结果的影响规律。

除端壁附面层外,角区分离也是密流比增加的重要原因,抑制角区分离可有效降低平面叶栅密流比。

**基金项目:**国家科技重大专项(2017-II-0001-0013)

**第一作者简介:**陈劲帆(1996—),男,陕西汉中,硕士研究生,研究方向为叶轮气体动力学。

GBADEBO S A 等<sup>[9]</sup>指出在端壁吸力面附近开弦向吸气槽抑制角区分离效果较好,弦向吸气槽形状由吸力面型线平移得到,吸气槽不宜过短。SCHREIBER H A 等<sup>[10]</sup>认为在叶片吸力面端壁开弦向吸气槽可以提高流场质量。CHEN P P 等<sup>[11]</sup>发现弦向吸气槽吸气时存在一最佳吸气量可以使总压损失大幅减小。李清华等<sup>[12]</sup>通过数值模拟计算发现 Gbadebo 选用的弦向吸气槽在抑制角区分离、降低总压损失方面比其他长度的弦向吸气槽更好。刘波团队<sup>[13]</sup>在研究附面层抽吸控制角区分离时也采用了弦向吸气槽的方式,其研究发现弦向吸气槽靠近吸力面能够更好地抑制角区分离,但同时研究也指出抑制角区分离有可能会对叶中截面流场产生负面影响。

本文针对平面叶栅试验,引入密流比分布差作为衡量叶中截面流动二维性的新指标,研究多种端壁面吸气方案对平面叶栅叶中截面流动二维性的影响规律。

## 1 平面叶栅流场计算方法

本文平面叶栅主要参数见表 1,图 1 展示了叶型及表 1 中对应符号示意图。

表 1 叶栅设计参数

参数	值
进口马赫数 $Ma_1$	0.70
进口气流角 $\beta_1 / (^\circ)$	45.5
气流转角 $\Delta\beta / (^\circ)$	39.9
弦长 $c / \text{mm}$	80.0
稠度 $\tau$	1.765
展弦比 $\lambda$	1.375

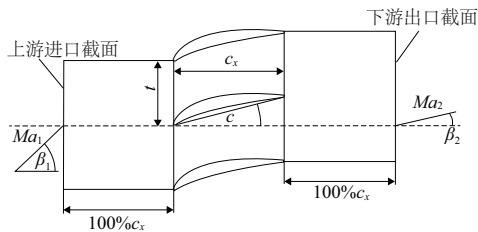


图 1 叶栅结构图

本文采用 NUMECA 软件进行流场数值计算,选用 RANS 控制方程、S-A 紊流模型、二阶逆风差分格式。叶片附近网格采用 O4H 型拓扑结构;进出口段和吸气槽网格采用 H 型网格,如图 2 所示。

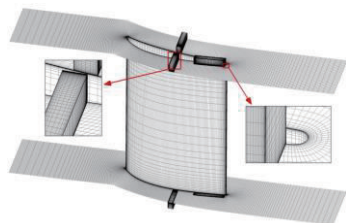


图 2 带组合吸气槽的叶栅网格结构

## 2 吸气槽结构方案

本文采用叶栅端壁面吸气控制叶中截面密流比,通过吸气量调节,实现叶中截面密流比 = 1。吸气槽有弦向吸气槽、周向吸气槽及两者组合,由起始轴向位置  $p_1$ 、终止轴向位置  $p_2$  和槽宽  $b$  设计确定,如图 3 所示。3 种吸气槽设计方案见表 2,其中  $c_x$  为轴向弦长。

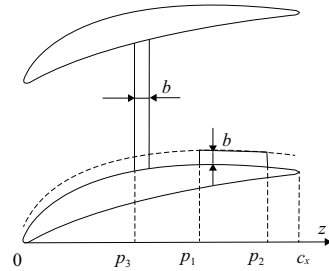


图 3 吸气槽参数示意图

表 2 吸气槽参数

方案	$p_1$	$p_2$	$p_3$
SA1	$0.5c_x$	$0.99c_x$	—
SA2	$0.7c_x$	$0.99c_x$	—
SB1	—	—	$0.2c_x$
SB2	—	—	$0.5c_x$
SB3	—	—	$0.9c_x$
SC1	$0.5c_x$	$0.99c_x$	$0.2c_x$
SC2	$0.5c_x$	$0.99c_x$	$0.5c_x$
SC3	$0.5c_x$	$0.99c_x$	$0.9c_x$

## 3 端壁吸气控制密流比结果分析

### 3.1 弦向槽吸气结果

在设计马赫数  $Ma_1 = 0.7$ 、攻角  $i = 0^\circ$  下,采用弦向吸气槽方案 SA1 和 SA2,通过改变槽出口反压调节吸气量,控制叶中截面密流比为 1。图 4 给出叶片吸力面极限流线,表明不吸气时叶片吸力面存在较大角区分离;吸气可有效控制角区分离。

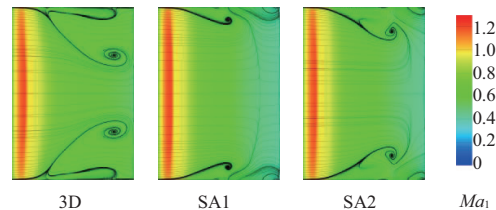


图 4 弦向吸气槽吸气和不吸气叶片吸力面极限流线与等熵马赫数云图

表 3 中列出总压损失系数 (total pressure loss

coefficient, TPLC)、气流转角 $\Delta\beta$ 、相对吸气流 $\dot{m}_{\text{sicA}}/\dot{m}_1$ 。其中2D指二维流场计算结果;3D指不吸气时三维叶栅计算结果,总压损失系数 $T_{\text{PLC}} = (P_1^* - P_2^*) / (P_1^* - P_1)$ ,式中 $P_1^*$ 为进口来流总压, $P_1$ 为进口来流静压, $P_2^*$ 为出口平均总压。表3表明吸气控制端壁附面层可以使叶中截面密流比达到1,但与二维流动比较,不同吸气方案气流转角和总压损失系数数值存在差异;SA1损失略大、气流转角减小;SA2损失略小。虽然两种吸气方案都可实现密流比1.0,但SA2更接近二维流动。

表3 弦向吸气槽吸气叶中截面流动参数

方案	$T_{\text{PLC}}/\%$	$\Delta\beta/(\circ)$	$(\dot{m}_{\text{sicA}}/\dot{m}_1)/\%$	$A_{\text{VDR}}$
2D	2.59	39.30	—	1.00
3D	2.01	39.87	—	1.12
SA1	2.69	38.94	2.17	1.00
SA2	2.45	39.33	2.49	1.00

引入密流比分布表达式如下:

$$A_{\text{VDR}} = \frac{A_{\text{VD}i,\text{outlet}}}{A_{\text{VD}i,\text{inlet}}} = \frac{\rho_i V_{zi} |_{\text{outlet}}}{\rho V_z |_{\text{inlet}}} \quad (2)$$

式中 $\rho_i$ 和 $V_{zi}$ 为叶栅出口叶中截面上沿切向第*i*点处密度和轴向速度,二者乘积 $\rho_i V_{zi}$ 与进口平均密流 $\rho V_z$ 的比值定义了出口截面一点处的密流比分布值。

图5给出叶栅出口叶中截面密流比和气流角沿切向分布。图5(a)表明,在总密流比为1时,尾迹区由于流速低密流比相应较低;相比与SA1、SA2,密流比分布更接近二维流动密流比沿切向分布。图5(b)表明,SA2吸气方案更接近二维流动。

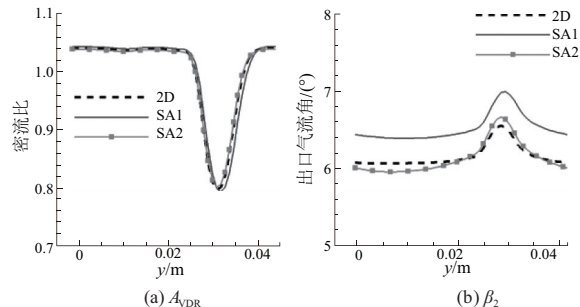


图5 弦向吸气槽叶栅出口流动参数沿切向分布

图6给出叶中截面等熵马赫数分布。在吸气控制密流比为1后,SA1和SA2叶片表面等熵马赫数分布一致,与二维流动吻合较好。

### 3.2 周向槽吸气结果

表4给出SB1、SB2、SB3方案下叶中截面流场参数。SB2、SB3方案无法控制密流比为1,表中仅展示其吸气流最大所能达到的最小密流比。

图7给出SB2吸气方案吸力面和端壁面等熵马赫数和极限流线。SB2周向槽位于分离角区中,由于吸气槽产生的负压形成回流,加剧了角区流动分离,因此叶中截面密流比无法降至1.0。SB3吸气方案与SB2类似。

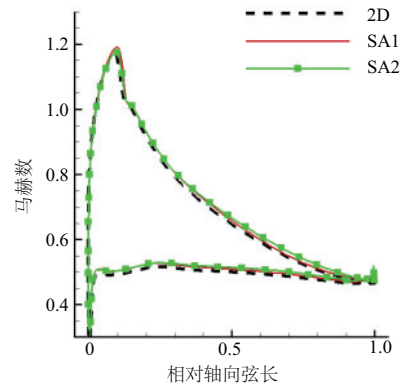


图6 弦向吸气槽叶栅叶中截面等熵马赫数分布

表4 周向吸气槽吸气叶中截面流动参数

方案	$T_{\text{PLC}}/\%$	$\Delta\beta/(\circ)$	$(\dot{m}_{\text{sicB}}/\dot{m}_1)/\%$	$A_{\text{VDR}}$
2D	2.59	39.30	—	1.00
SB1	2.20	39.41	3.41	1.00
SB2	2.14	39.70	3.60	1.15
SB3	2.04	39.34	4.64	1.08

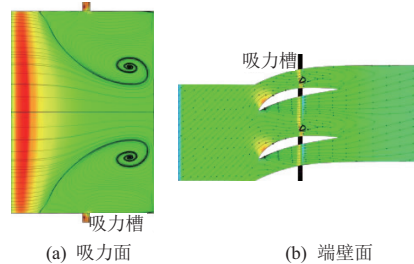


图7 SB2吸气方案吸力面和端壁面等熵马赫数和极限流线

图8、图9分别为周向吸气槽叶栅出口流动参数沿切向分布图和叶栅叶中截面等熵马赫数分布图。图8(a)表明,在SB1方案吸气控制总密流比为1时,势流区流速变低,密流比相应变低;尾迹区变窄,流速提高,密流比相应稍高,而总体密流比仍为1。图8(b)中气流角分布与二维流动差别较大;图9说明叶片表面等熵马赫数分布与二维流动一致性较好。

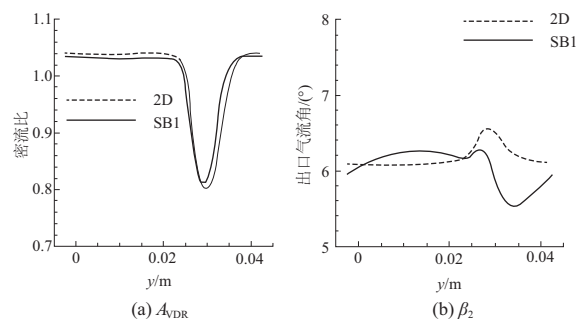


图8 周向吸气槽叶栅出口流动参数沿切向分布图

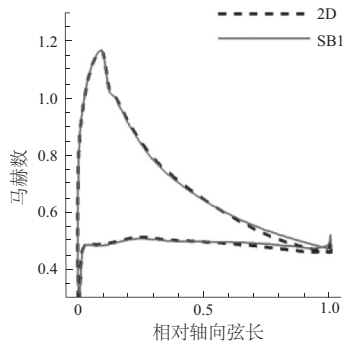


图9 周向吸气槽叶栅叶中截面等熵马赫数分布图

### 3.3 组合槽吸气结果

表5给出SC1、SC2、SC3方案下叶中截面流场参数。在组合吸气槽中控制密流比为1时,周向吸气槽吸气量较小。

表5 组合吸气槽吸气叶中截面流场参数比较

方案	$T_{PLC}/\%$	$\Delta\beta/(\circ)$	$(\dot{m}_{sueA}/\dot{m}_1)/\%$	$(\dot{m}_{sueB}/\dot{m}_1)/\%$	$A_{VDR}$
2D	2.59	39.30	—	—	1.00
SC1	2.39	39.16	3.90	0.37	1.00
SC2	2.46	39.29	2.22	0.61	1.00
SC3	2.75	38.75	2.19	0.39	0.99

图10、图11分别为组向吸气槽叶栅出口流动参数沿切向分布图和叶中截面等熵马赫数分布图。

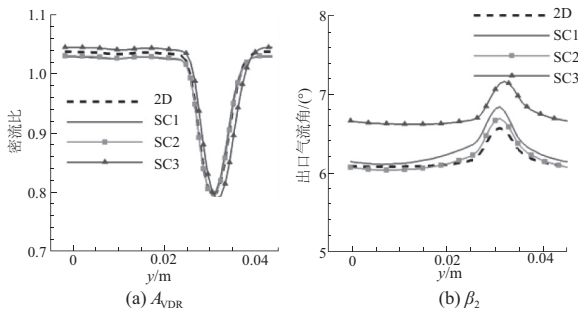


图10 组向吸气槽叶栅出口流动参数沿切向分布图

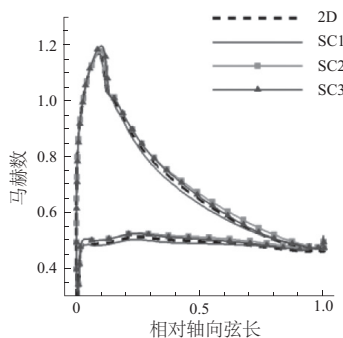


图11 组向吸气槽叶栅叶中截面等熵马赫数分布图

图10(a)表明SC1和SC2密流比分布与二维流动吻合更好,SC3差别较大。图10(b)说明SC3气流角分布与二维流动差别也最大。图11中3种组合吸气槽方案下,等熵马赫数分布一致,都与二维流动吻合较好。

## 4 不同吸气方案密流比分布差比较

采用不同吸气槽方案吸气均可吸除端壁附面层,使叶中截面密流比达到1(即与二维流动相同);但以密流比和气流角切向分布表征的叶中截面流场与二维流动却存在差别。

在此定义密流比分布差  $|\overline{\Delta A_{VDR}}|_{suc}$  和气流角分布差  $|\overline{\Delta\beta_2}|_{suc}$ :

$$|\overline{\Delta A_{VDR}}|_{suc} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_{VDR,sue,i} - A_{VDR,2D,i}| \Delta y_i}{\sum_{i=1}^n \Delta y_i} / A_{VDR,2D} \quad (3)$$

$$|\overline{\Delta\beta_2}|_{suc} = \frac{\sum_{i=1}^n |\beta_{2,sue,i} - \beta_{2,2D,i}| \Delta y_i}{\sum_{i=1}^n \Delta y_i} / \beta_{2,2D} \quad (4)$$

式中: $A_{VDR,2D,i}$ 为二维叶型流场中叶栅出口沿切向第*i*点处密流比分布值; $A_{VDR,sue,i}$ 为吸气后三维流场中叶栅出口叶中截面沿切向第*i*点处密流比分布值; $y_i$ 为第*i*点处周向方向坐标; $A_{VDR,2D}$ 为二维流动下总密流比,数值为1.0; $|\overline{\Delta\beta_2}|_{suc}$ 定义方法与 $|\overline{\Delta A_{VDR}}|_{suc}$ 相同。只有当密流比分布和气流角分布与二维流动完全一致时, $|\overline{\Delta A_{VDR}}|_{suc}$ 和 $|\overline{\Delta\beta_2}|_{suc}$ 为0。

对于不同吸气槽吸气方案,通过吸气使总密流比为1后,叶栅出口叶中截面密流比分布差和气流角分布差如图12所示。

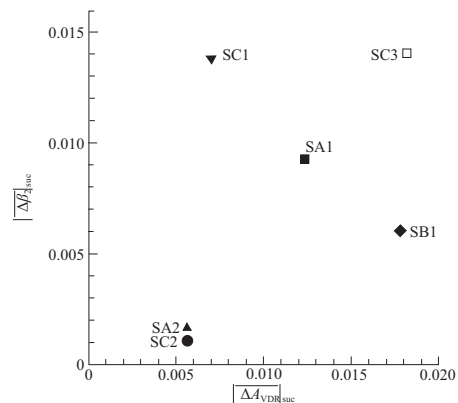


图12 各吸气方案吸气控制密流比后叶中截面流场二维性比较

图12表明,密流比分布差较小,气流角分布差也较小;密流比分布差较大,气流角分布差也较大。因此,控制密流比分布差是实际平面叶栅叶中截面流动与二维流动一致性的关键。吸气方案SA2和SC2控制密流比和气流分布差效果较好。



## 5 结语

平面叶栅密流比是影响叶栅气动性能的关键参数。本文引入密流比分布差作为密流比的二级指标,针对大弯角静子叶型平面叶栅试验,采用多种端壁面吸气方案,研究密流比分布差对平面叶栅叶中截面流动二维性的影响规律。结果表明:

1)不同端壁吸气方案吸气使叶中截面总密流比为1时,叶片表面等熵马赫数分布与二维流动相差很小;但不同方案密流比分布与二维流动差异较大;

2)端壁弦向槽位于叶片尾缘处,可有效控制角区分流进而有效控制叶中截面密流比;并且达到较小密流比分布差,因此这种吸气方案可实现叶中截面流动与二维流动较好的一致性;

3)叶栅端壁周向槽位于角区分流区中,吸气产生回流加大角区分流,难以实现对叶中截面密流比有效控制。

### 参考文献:

- [1] GOSTELOW J P. Cascade aerodynamics [M]. New York: Pergamon Press, 1984.
- [2] 刘占民. 压气机叶栅密流比效应试验研究[J]. 热能动力工程,1987,2(6):9-17.
- [3] 刘前智,严汝群. 轴向密流比对叶栅性能的影响[J]. 航空动力学报,1989,4(2):161-164,196.
- [4] POLLARD D, GOSTELOW J P. Some experiments at low speed on compressor cascades[J]. Journal of Engineering for Power, 1967,89(3):427-436.
- [5] SCHREIBER H A, STARKEN H. Experimental cascade analysis of a transonic compressor rotor blade section [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(2):288-

294.

- [6] SCHREIBER H A, STEINERT W, KU...STERS B. Effects of Reynolds number and free-stream turbulence on boundary layer transition in a compressor cascade [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(1):1-9.
- [7] WEBER A, SCHREIBER H A, FUCHS R, et al. 3-D transonic flow in a compressor cascade with shock-induced corner stall [J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(3):358-366.
- [8] SONG B, WING F N. The role of AVDR in linear cascade testing [J]. 航空动力学报, 2007, 22(6):933-944.
- [9] GBADEBO S A, CUMPSTY N A, HYNES T P. Control of three-dimensional separations in axial compressors by tailored boundary layer suction [J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1):01104-01111.
- [10] SCHREIBER H A, STEINERT W, SONODA T, et al. Advanced high turning compressor airfoils for low Reynolds number condition; part 2-experimental and numerical analysis [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, Collocated With the 2003 International Joint Power Generation Conference, Atlanta, Georgia, USA: 2009:451-463.
- [11] CHEN P P, QIAO W Y, LIESNER K, et al. Location effect of boundary layer suction on compressor hub-corner separation [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany: 2014.
- [12] 李清华,曹志远,胡骏. 端壁吸/吹气对超声速压气机叶栅流场影响机理的对比研究[J]. 推进技术, 2019, 40(9):1991-2002.
- [13] 梁田,刘波,茅晓晨. 附面层抽吸对叶栅角区分流流动的控制研究[J]. 推进技术, 2019, 40(9):1972-1981.

收稿日期:2021-02-01

### (上接第154页)

- [5] JAWADEKAR A, PARASKAR S, JADHAV S, et al. Artificial neural network-based induction motor fault classifier using continuous wavelet transform [J]. Systems Science & Control Engineering, 2014, 2(1):684-690.
- [6] LECUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition [J]. Neural Computation, 1989, 1(4):541-551.
- [7] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6):84-90.
- [8] KALCHBRENNER N, GREFFENSTETTE E, BLUNSON P. A convolutional neural network for modelling sentences [C]// Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for

Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). Baltimore, Maryland, Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2014.

- [9] HU B T, LU Z D, LI H, et al. Convolutional neural network architectures for matching natural language sentences [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 3(1):2042-2050.
- [10] JANSSENS O, SLAVKOVIKJ V, VERVISCH B, et al. Convolutional neural network based fault detection for rotating machinery [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 377:331-345.

收稿日期:2021-02-24