

产品设计制造环节的结构有序性测度研究

甘屹, 岳彩晨

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了定量评价产品设计制造环节信息流结构的有序性, 建立了产品设计制造环节信息流结构的有序度和结构熵模型, 在此基础上, 计算了设计与制造环节信息流结构的时效熵和质量熵, 定量分析了一种仿人型机器人左腿模型的设计与制造环节两者之间的信息流结构有序性, 为分析产品设计与制造环节之间信息的演化提供了依据。

关键词: 设计制造; 信息演化; 结构有序度; 结构熵

中图分类号: TH 166 **文献标志码:** A

Structure Order of Product Design and Manufacturing

GAN Yi, YUE Caichen

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the order degree of the information flow structure of product design and manufacturing, the effective entropy and quality entropy of the information flow structure of design and manufacturing links were calculated. The order degree of the information flow in product design and manufacturing of left leg of robot model were evaluated quantitatively. The study provides a way for analyzing the evolution of the information between the design and manufacturing of products.

Keywords: design and manufacturing; information evolution; structure order degree; structure entropy

产品的设计制造过程伴随着信息的流动、演化, 是信息的采集、传递、加工和利用的演化过程^[1]。面对市场无限多样的个性化需求与单个企业有限的资源和能力, 企业必须是由合理、有序的信息流、物流、资金流、价值流以及服务流组成跨越时空及思维的有机统一体, 能够迅速有效地处理大量复杂信息^[2]。关于定量分析产品的设计信息的研究, 文献[3-4]提出了一种采用自顶向下设

计方法构建的产品 TBS(top basic skeleton)模型, 并对模型中产品的信息状态进行了分析和测度。文献[5]提出了一种基于本体的多团队协同设计产品的知识建模方法, 构建了协同设计知识本体的框架。对于分析产品制造系统内部的信息而言, 文献[6]从人因工程的角度分析了制造过程的复杂性。文献[7]在分析动态制造系统排队行为的基础上, 提出了两种基于信息熵的制造系统复杂性测

收稿日期: 2017-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375314)

第一作者: 甘屹(1974-), 男, 教授。研究方向: 先进制造技术。E-mail: ganyi@usst.edu.cn

度模型。

目前对于开发新产品的研究都是单独以设计或制造环节的信息为研究对象,缺乏对设计制造信息流结构的整体性和连贯性的研究。

本文从制造信息学^[1]角度将设计与制造两个环节视作整体进行分析,并充分考虑设计信息与制造信息之间的相互影响,从理论上建立具有一般性的产品信息流结构的有序度和结构熵模型,在实践上定量分析反馈作用对于产品有序度的影响,进一步对产品设计制造信息流进行研究。

1 制造信息学相关理论

1.1 信息熵

在物理学中,熵是表征系统运动复杂程度或系统状态丰富程度的物理量;而在信息论中,熵一般用来描述系统的不确定性和有序程度。按照信息论对熵的定义^[8],设离散型随机变量 X 具有 n 种可能的取值 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,且各值的概率分别为 $(P_1, P_2, \dots, P_n)$,离散型随机变量 X 的信息熵定义为

$$E(X) = - \sum_{i=1}^n P_i \lg P_i \quad (1)$$

其中, $P_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$, $\lg \sum_{i=1}^n P_i = 0$, 信息熵的单位取决于对数底数的选取,通常取2,记作 $\lg$,此时单位是bit。信息熵越大,系统的不确定性也越大。

1.2 信息流结构的有序度定义

熵作为一个系统状态的混乱性或无序性的测度,将系统的实时结构熵 E 与其最大熵 $E_{\max}$ 之比定义为系统结构的无序度,因此,系统结构的有序度

$$O = 1 - E/E_{\max} \quad (2)$$

其中, O 越大,表明系统的有序化程度越高。

影响产品设计制造模型的信息流流通的主要指标是流通的时效性和准确性,并且这两者互为消长^[9]。用时效度 O_e 来表示产品设计制造模型的信息流结构在流通时效性方面的有序度,用质量度 O_a 来表示信息流结构在流通准确性方面的有序度。设这两部分彼此独立,具有可加性,则系统结构的综合有序度

$$O = eO_e + aO_a \quad (3)$$

式中: e, a 分别为时效和质量关于系统结构的权

重系数^[10]。

为了计算出 O_e 和 O_a ,需要先对产品设计制造模型的信息流的时效性和质量性进行测度,即得到设计制造信息流的时效熵和质量熵,进而计算出系统的有序度。

2 产品设计制造信息流的时效性与质量性测度

为了保证产品设计制造信息的整体质量,必须了解产品设计信息以及制造信息。在云制造环境中,产品的设计制造信息处于分散式的网络环境中。信息的传递包括信息发送与信息反馈。假设信源 A 发出的信息 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$,其概率空间为

$$P(x) = \{P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_m)\} \quad (4)$$

任意1个信息 x_i 的变更将会影响到信源 A 的整体质量。

信宿 B 接受信息 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,其概率空间

$$P(y) = \{P(y_1), P(y_2), \dots, P(y_n)\} \quad (5)$$

同样地,任意1个信宿 y_i 的变更会影响到信宿 B 的整体质量。

在多数情况下, $P(x_1) = P(y_1), P(x_2) = P(y_2), \dots, P(x_n) = P(y_n)$,但是,由于传递信息的过程中存在不确定性和干扰信息,导致 $P(x_1) \neq P(y_1)$ 。设计制造环节作为复杂开放系统,其状态以及信息传送具有不确定性。对这种不确定性进行测度,需要计算出时效熵和质量熵。

2.1 产品设计制造信息流及结构熵模型

设产品设计环节的信息流共有 n 个信息要素。根据信息论原理,以设计环节各个信息要素为信源,其对应的信宿为制造环节的信息要素。设计环节每1个信源在制造环节中都必然有至少1个与之对应的信宿。在某时段内,设计环节向制造环节发出信息,直至制造环节接收到这些信息并对之作出相应处理,此过程中的不确定性称为信息流模型的时效熵,记作 E_e 。在该时段内,制造环节对信息处理后所发出的反馈信息与原接收信息相一致的不确定性称为设计制造系统信息传递的准确性,该不确定性的测度称为信息流模型的质量熵,记作 E_a 。

现从产品设计制造过程中信息流演化的时效性和准确性两方面来构建表征设计制造内部信息流结构不确定性的结构熵模型。

在时间段 t_i 内, 设计环节提供的信息集合为 $X(t_i, 1)$, 即

$$X(t_i, 1) = \{x_i(t_i, 1) | i = 1, \dots, n\}$$

设 $X(t_i, 1, j)$ 表示信源 D_1 (设计环节) 向信宿 M_j (制造环节) 发出的信息的集合, $Q(t_i, 1, k)$ 表示设计环节信源 D_1 向制造系统 M_k 发出的信息的次数。根据古典概率中的古典概型, 有

$$P[X(t_i, 1, i)] = Q(t_i, 1, i) / \sum_{i=2}^k Q(t_i, 1, i) \quad (6)$$

式中: $\sum_{i=2}^k Q(t_i, 1, i)$ 为信源 D_1 向所有信宿发出的信息次数总和; $Q(t_i, 1, i)$ 为信源 D_1 向信宿 M_i 发出的信息次数; $P[X(t_i, 1, i)]$ 表示 t_i 时间段内信源 D_1 向信宿 M_i 发出信息的概率。

又设同一时间段内, 信源 D_1 收到的制造环节各信宿节点反馈的信息集合为 Y 。

$$Y(t_i, 1) = \{y_i(t_i, 1) | i = 1, \dots, n\}$$

制造环节反馈的信息为 $F(x_i) \in \{0, 1\}$ 。当取 $F(x_i)=0$ 时, 表示信息状态未发生改变, 即开环系统; 当 $F(x_i)=1$ 时, 表示信息状态发生改变, 需返回计算上一环节该信息状态下对应的概率, 即设计环节接收到制造环节的反馈后, 需要及时作出处理。信息流结构熵模型的构建过程中同时考虑了信息传播的时效性与准确性这两个方面, 具有动态性。利用结构熵算式可计算出信息传递的时效熵或质量熵。

2.2 信息流结构熵的计算

产品设计制造模型的信息流结构中任意 2 个信源与信宿的状态实现概率, 就是信源到达信宿的流程长度占有所有信息流动的流程长度的概率。事实上, 产品设计制造环节中的信源与信宿交换信息时是两两交互的。信源与相应的信宿之间的时效熵

$$E_e = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_e'(i, j) \lg P_e'(i, j) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S_{ij}/S_e) \lg (S_{ij}/S_e) \quad (7)$$

式中: S_{ij} 为信源 x_i 传递信息至信宿 y_j 所走的路程; S_e 为信源 x_i 向信宿 y_j 传递信息的总路程; $P_e'(i, j)$ 为信源 x_i 传递信息至信宿 y_j 的概率。

在计算 S_{ij} 时, 若信源 x_1 传送信息到 y_1 , 则认为信息传送完毕。若信源 x_2 发送信息到信宿 y_2 , 则需先发送信息到信宿 y_1 , 认为此时 $S_{ij}=2$, 该信

息发送过程终结。以此类推, $S_{ij}=j$, 当 $i=j$ 时, 发送事件终结。对于时效度而言, 信源传递信息至信宿期间走过的路程随信宿数目的增多而增大, 反映了信息流通的复杂性。通常情况下, 各个信源与信宿之间都会进行信息流动。

$$S_e = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (8)$$

只考虑发送事件时, 质量熵表示在信息传递中出错机会的不确定性。因此, 任意 2 个信源与信宿之间的信息传递的状态实现概率是产品设计制造中该信息传递的联系跨度占整个信息流结构中总联系跨度的概率。任意信源到信宿 y_1 的跨度均为 0, 到 y_2 的跨度为 1, 以此类推。对于质量度而言, 信宿与信源之间的跨度反映了信宿对于特定信源的重要程度。跨度越大, 表示该信宿对信源的重要程度越小。

$$E_a = - \sum_{i=1}^n [P_a(i) \lg P_a(i)] = - \sum_{i=1}^n (M_i/M_a) \lg (M_i/M_a) \quad (9)$$

式中: M_i 为信源 x_i 发送信息的联系跨度; M_a 为信息传递过程中的总联系跨度; $P_a(i)$ 为信源 x_i 发送信息成功的概率。

$$M_a = \sum_{i=1}^n M_i \quad (10)$$

将 E_e , E_a 分别代入式(2)和式(3)中, 即可得到产品设计制造信息流结构的有序度。

3 应用分析

3.1 结构有序度计算案例

现以典型产品仿人型机器人^[11]腿部的设计和制造环节为例, 详细分析该产品在整个设计与制造环节中的信息流结构。该机器人腿部能够实现站立、走直线、弯腰及转弯等 4 个功能。通过构建腿部信息流有序度模型, 定量评价设计与制造环节信息流结构的相互关联性。不失一般性, 其中左腿部分可以分解为 2 个功能模块: 机械结构和驱动机构。驱动机构的动力靠舵机实现。机械结构如图 1 所示, 舵机安置于各个关节处。根据人体工学数据以及云平台^[12]提供的最优资源组合, 设计环节信息以及其概率空间如表 1 所示。设计环节初步的信息状态集 $DI=\{\text{形状, 高度, 位}$

置精度, 材料, 生产速度}={仿人型, 70 mm, 1.5 mm, ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯), 3}, 即信息 $X=\{\text{仿人型}, 70 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, \text{ABS}, 3\}$ 。根据式(4)可得概率空间: $P(x)=\{0.3, 0.4, 0.3, 0.5, 1\}$ 。

制造环节的操作人员收到产品的设计信息, 根据生产条件决定采用某型号 3D 打印机完成机器人样机的加工。这种 3D 打印机工作台尺寸固定, 为 280 mm×180 mm, 具有工业打印和生活打印两种用途, 并可打印曲面比较复杂的零件。该 3D 打印机可设置不同的精度数值, 包括 1.0, 1.5, 2.0 mm; 与该型号打印机配套使用的材料有 ABS, PLA(聚乳酸), PVA(聚乙烯醇)。制造环

节可以设置的打印速度为 40, 45, 50 mm/s。因此, 制造环节信息状态集及其概率空间如表 2 所示。

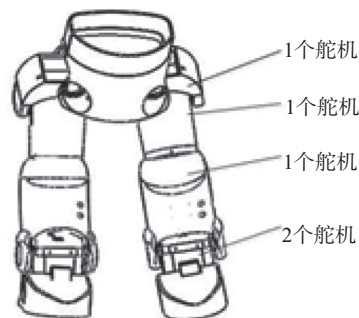


图 1 机器人腿部模型

Fig.1 Robot leg model

表 1 设计环节信息状态及概率空间

Tab.1 Design information status and probability space

状态	形状	高度/mm	位置精度/mm	材料	生产速度/(mm·s ⁻¹)
	方形,圆柱体,仿人型	60, 70, 80	1, 1.5, 2	ABS, PLA	40
概率	0.3, 0.4, 0.3	0.2, 0.4, 0.4	0.6, 0.3, 0.1	0.5, 0.5	1

表 2 制造环节信息状态及概率空间

Tab.2 Manufacturing information status and probability space

状态	形状	高度/mm	位置精度/mm	材料	生产速度/(mm·s ⁻¹)
	方形,圆柱体,仿人型	60, 70, 80	1, 1.5, 2	ABS, PLA, PVA	40, 45, 50
概率	0.3, 0.2, 0.5	0.2, 0.4, 0.4	0.6, 0.3, 0.1	0.3, 0.2, 0.5	0.6, 0.2, 0.2

在产品样机的制作过程中, 设置生产配置 $MI=\{\text{形状}, \text{高度}, \text{位置精度}, \text{材料}, \text{生产速度}\}=\{\text{仿人型}, 70 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, \text{ABS}, 40 \text{ mm/s}\}$, 此时 3D 打印机工作状态良好, 但是, 所获得的产品易碎。故调整 $MI=\{\text{仿人型}, 70 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, \text{PLA}, 40 \text{ mm/s}\}$, 所获得的产品质量符合要求。将该信息反馈到设计环节, 则设计环节的信息状态集更改为 $DI=\{\text{仿人型}, 70 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, \text{PLA},$

40 mm/s}。在这个信息传递过程中, 设计环节向制造环节传递信息的开环路程、闭环路程、跨度如表 3 和表 4 所示, 其中, 定义信源 x_1 向信宿 y_1 发送信息时, 路程为 1, 跨度为 0, 依次类推。

根据式(8)与表 3 提供的数据计算出 $S_e=15$, $S_{11}=1$, $S_{22}=2$, $S_{33}=3$, $S_{44}=4$, $S_{55}=5$ 。

因此, 时效熵和最大时效熵分别为

$$E_e = -\left(\frac{1}{15}\text{lb}\frac{1}{15} + \frac{2}{15}\text{lb}\frac{2}{15} + \frac{3}{15}\text{lb}\frac{3}{15} + \frac{4}{15}\text{lb}\frac{4}{15} + \frac{5}{15}\text{lb}\frac{5}{15}\right) = 2.149$$

$$E_{e\max} = -\left[5 \times \left(\frac{1}{35}\text{lb}\frac{1}{35}\right) + 4 \times \left(\frac{2}{35}\text{lb}\frac{2}{35}\right) + 3 \times \left(\frac{3}{35}\text{lb}\frac{3}{35}\right) + 2 \times \left(\frac{4}{35}\text{lb}\frac{4}{35}\right) + \left(\frac{5}{35}\text{lb}\frac{5}{35}\right)\right] = 3.704$$

根据式(8)与表 3 所提供的数据计算出 $S'_e = 15$, $S'_{11} = 1$, $S'_{22} = 4$, $S'_{33} = 3$, $S'_{44} = 4$, $S'_{55} = 5$ 。 S'_e 表示加入反馈后信源 x_i 向信宿 y_j 传递信息的总路程。

$$E'_e = \left(\frac{1}{17}\text{lb}\frac{1}{17}\right) + \left(\frac{4}{17}\text{lb}\frac{4}{17}\right) + \left(\frac{2}{17}\text{lb}\frac{2}{17}\right) + \left(\frac{3}{17}\text{lb}\frac{3}{17}\right) + \left(\frac{4}{17}\text{lb}\frac{4}{17}\right) + \left(\frac{5}{17}\text{lb}\frac{5}{17}\right) = 2.547$$

$$E'_{e\max} = -\left[5 \times \left(\frac{1}{37}\text{lb}\frac{1}{37}\right) + 4 \times \left(\frac{2}{37}\text{lb}\frac{2}{37}\right) + 3 \times \left(\frac{3}{37}\text{lb}\frac{3}{37}\right) + 2 \times \left(\frac{4}{37}\text{lb}\frac{4}{37}\right) + \left(\frac{5}{37}\text{lb}\frac{5}{37}\right)\right] = 3.147$$

表 3 设计制造信息流路程表

Tab.3 Schedule of the design and manufacturing information flow

路程 S_{ij}	开环传递					闭环传递				
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
x_1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
x_2	0	2	0	0	0	0	4	0	0	0
x_3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0
x_4	0	0	0	4	0	0	0	0	4	0
x_5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5

表 4 设计制造信息流跨度表

Tab.4 Span schedule of the design and manufacturing information flow

跨度 M_{ij}	开环传递					闭环传递				
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
x_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_2	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0
x_3	0	1	2	0	0	0	1	2	0	0
x_4	0	1	2	3	0	0	1	2	3	0
x_5	0	1	3	3	4	0	1	2	3	4

表 5 案例腿部设计制造信息流有序度比较

Tab.5 Order degree comparison of the design and manufacturing information flow in the leg case

信息流形式	时效熵 E_e	质量熵 E_a	时效度 O_e	质量度 O_a	有序度 $O=eO_e+aO_a$
无反馈	2.149	1.647	0.420	0.191	0.306
有反馈	2.547	1.750	0.177	0.125	0.151

3.2 分析与讨论

产品设计制造内部信息流结构的复杂度体现了产品结构的复杂性。通过本文的实例可以看出,应用结构有序度和结构熵模型可以定量地描述产品设计制造内部环节之间的信息流。

在上例中,开环与闭环信息流传递的过程基本相似,主要不同的是闭环信息流传递过程中加入了反馈环节,使得结构有序度降低了 $(0.306\sim 0.151)/0.151\times 100\%\approx 1.066\%$ 。虽然信息流结构有序度与开环时相比降低 1%,但是,所获的产品质量更满足要求。闭环传递的产品信息流流经的路程长度是开环传递的 117.3%,其时效度比开环传递降低了 $(0.420\sim 0.177)/0.177\times 100\%\approx 1.373\%$,但是,产品质量得到保证。闭环传递的产品信息流流经的跨度与开环传递的基本相等,但其信息传

根据式(10)与表 4 所提供的数据,可知 $M_a=M_1+M_2+M_3+M_4+M_5=20$ 。 M_y 表示信源 x_i 向信宿 y_j 发送信息的跨度。

由式(9)可计算出设计制造信息流结构的质量熵和最大质量熵

$$E_a = -\left(\frac{0}{20}\text{lb}\frac{0}{20} + \frac{1}{20}\text{lb}\frac{1}{20} + \frac{3}{20}\text{lb}\frac{3}{20} + \frac{6}{20}\text{lb}\frac{6}{20} + \frac{10}{20}\text{lb}\frac{10}{20}\right) = 1.647$$
$$E_{amax} = -\left[4\times\left(\frac{10}{40}\text{lb}\frac{10}{40}\right)\right] = 2.000$$

根据式(10)与表 4 所提供的数据可计算出设计制造信息流结构加入反馈后的质量熵和最大质量熵

$$E'_a = -\left(\frac{0}{21}\text{lb}\frac{0}{21} + \frac{2}{21}\text{lb}\frac{2}{21} + \frac{3}{21}\text{lb}\frac{3}{21} + \frac{6}{21}\text{lb}\frac{6}{21} + \frac{10}{21}\text{lb}\frac{10}{21}\right) = 1.750$$
$$E'_{amax} = -\left[\frac{11}{41}\text{lb}\frac{11}{41} + 3\times\left(\frac{10}{41}\text{lb}\frac{10}{41}\right)\right] = 1.999$$

取 $e=a=0.5$, 根据式(4)计算信息流有序度,如表 5 所示。

递的质量度比开环的降低了 $(1.191\sim 1.125)/1.125\times 100\%\approx 0.059\%$ 。信息闭环传递的质量度基本没变。也就是说,本例中信息的闭环传递在可接受的范围内牺牲了信息流有序度,但能保持信息传递的质量度,更能保证产品质量。

4 结束语

从信息论角度将设计与制造环节的信息状态空间从整体上考虑,提出了一种基于信息熵理论的产品设计制造环节的有序性建模与评价方法,对其复杂性进行测度。通过建立整个环节的信息流结构有序性模型,定量分析了从设计到制造过程中产品信息流的流动状态。通过建立制造环节对设计环节的反馈机制,分别计算了闭环传递和

开环传递的信息流有序度,反映了信息反馈对于产品设计制造信息演化的作用。

参考文献:

- [1] 张伯鹏. 制造信息学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 祁国宁, 杨青海. 大批量定制生产模式综述[J]. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1240–1245.
- [3] 甘屹, 陈烁烁, 张雪梅. 基于 TBS 建模设计中的产品信息状态及其测度分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(16): 2131–2135.
- [4] GAN Y, HE W M, IHARA T. Analysis for the structure of product manufacturing information flow of cloud manufacturing based on information measurement[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2015, 9(3): JAMDSM0043.
- [5] 王有远, 王发麟, 乐承毅, 等. 基于本体的多设计团队协同产品设计知识建模[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2720–2725.
- [6] EIMARAGHY W H, URBANIC R J. Assessment of manufacturing operational complexity[J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 401–406.
- [7] FRIZELLE G, SUHOV Y M. An entropic measurement of queueing behaviour in a class of manufacturing operations[J]. Proceedings of the Royal Society A-Mathematical, Physical and Engineering Science, 2001, 457(2011): 1579–1601.
- [8] 张志峰, DAVID J. 基于信息熵的单元化制造系统状态度量[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(1): 109–115.
- [9] 张志峰, 肖人彬. 基于结构熵的生产系统有序性评价的实证研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 62–67.
- [10] RONEN B, KARP A. An information entropy approach to the small-lot concept[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2003, 41(1): 88–92.
- [11] 张茂川, 蔚伟, 刘丽丽. 仿人机器人理论研究综述[J]. 机械设计与制造, 2010(4): 166–168.
- [12] 张霖, 罗永亮, 范文慧, 等. 云制造及相关先进制造模式分析[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 458–468.

(编辑: 石 瑛)

(上接第 170 页)

- [13] 张晶晶, 范学良, 蔡小舒. 单帧单曝光图像法测量气固两相流速度场[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(1): 79–82.
- [14] 周骛, 胡嘉睿, 蔡小舒. 管道内稀疏颗粒相图像法多参数测量[J]. 工程热物理学报, 2015(3): 541–544.
- [15] CHINNAYYA A, CHTAB A, SHAO J Q, et al. Characterization of pneumatic transportation of pulverised coal in a horizontal pipeline through measurement and computational modelling[J]. Fuel, 2009, 88(12): 2348–2356.
- [16] 张弘, 蔡小舒, 尚志涛, 等. 单帧图像二次水滴粒径、速度和流动角度测量方法研究[J]. 热力透平, 2008, 37(1): 26–29.
- [17] 刘浩, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于 RGB 三波段消光法和单帧单曝光图像法的汽轮机湿蒸汽测量实验研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(10): 816–823.
- [18] 刘阳, 陈岚, 邹珺, 等. 单帧单曝光图像法评价粉雾剂吸入装置的分散性能[J]. 中国医药工业杂志, 2016, 47(5): 592–596.
- [19] 陈晶丽, 李琛, 蔡小舒, 等. 流动多参数场的单帧图像法测量方法研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(6): 67–73.
- [20] 张琮昌, 吴学成, 吴迎春, 等. 煤粉颗粒速度和粒径在线测量的轨迹成像法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S1): 108–113.

(编辑: 石 瑛)