

离心风机平板直叶片调节门的实验研究

张义云, 祁大同, 谭佳健, 毛义军
(西安交通大学流体机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了改进风机调节门的性能和作用, 采用五孔探针对平板直叶片调节门前后的流动进行了详细的测量, 得到了流动参数沿流动方向的衰减变化规律. 实验分析结果表明: 调节门导致其下游流动沿半径方向的分布很不均匀, 而沿圆周方向的分布比较均匀, 对其上游流动的分布形态影响很小; 阻力系数和预旋系数随调节门叶片角度的增大而增大, 但在叶片角度大于 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时阻力系数的增加明显快于预旋系数. 针对风机调节门的流动特性, 采用预旋系数、阻力系数做为全面评价风机调节门性能的主要指标是可行的. 从兼顾流动均匀性和预旋两方面因素考虑, 从调节门出口到叶轮进口之间的最佳距离约为叶片平均弦长的 4~8 倍. 根据调节门流动参数沿径向、周向和沿轴向的分布特点, 提出了加大调节门流道中心处叶片的弦长、改进平板直叶片叶型及优化最佳叶栅稠度等参数的建议.

关键词: 离心风机; 调节门; 性能

中图分类号: TH43 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1044-05

Experimental Study on Inlet Guide Vane with Straight Blade in a Centrifugal Fan

Zhang Yiyun, Qi Datong, Tan Jiajian, Mao Yijun
(The Institute of Fluid Machinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The upstream and downstream flowfields of a straight blade inlet guide vane (IGV) for a centrifugal fan were measured with a five-hole probe. The result shows that the radial distribution of the flowfield is unsymmetrical, while the circumferential distribution of flow is nearly symmetrical, and that IGV has nearly no influence on distribution of upstream flow. The resistance coefficient and the prerotation coefficient increase with the increment of the pitch angles of IGV. Moreover, the increment of resistance coefficient is much greater than that of prerotation coefficient when the pitch angles exceeds $40^\circ - 50^\circ$. Therefore the prerotation coefficient and the resistance coefficient could be used as major parameters to evaluate the performance of IGV. The optimal gap between IGV and the impeller is about 4 - 8 times the length of the blade chord considering the symmetry and prerotation of the flow field. Based on the characteristics of the radial, circumferential and axial distribution of the flow field, some proposals are provided to enhance the performance of IGV, such as the increment of the blade chord at the center of IGV, improvement for the airfoil shape, and optimization of the cascade solidity.

Keywords: centrifugal fan; inlet guide vane; performance

符 号 表

C_f	阻力系数	v	速度, m/s	ρ	气体密度, kg/m ³
Δp_{IGV}	调节门前后的全压差, Pa	α	气流角, $\alpha = \arctan(v_\theta/v_z)$	v_θ	切向分速度, m/s

C_r	预旋系数	IGV	调节门	z	轴向位置坐标, m
Q	流量, m^3/s	v_z	轴向分速度, m/s	β_A	调节门叶片角度, $(^\circ)$
θ	圆周方向角坐标, $(^\circ)$	C_{rf}	旋阻比	v_r	径向分速度, m/s
β	气流角, $\beta = \arctan(v_r/v_z)$	r	半径或径向坐标, m	v_{avg}	平均速度, m/s

多数通风机都是在一个变化的工况范围内而不是只在一个固定工况下工作,所以改进风机在变工况时的调节性能对于节能有重要意义^[1-7]。

本文对一个花瓣式、平板直叶片、来流为轴向进气的调节门的性能进行了初步研究。首先,建议增加了几个调节门性能的主要评价指标。其次,重点对不同叶片角度下调节门之后的流动进行了详细测量和分析。最后,对实验结果进行了分析,对如何改进调节门的性能提出了参考性建议。

1 实验装置

整个实验装置由在标准通风机性能实验装置^[8](进气试验)上加上调节门和测量段组成,主要包括锥形集流器、风管、调节门、测量段及通风机等。实验风管的直径为 0.4 m。流动测量使用五孔探针,测试系统由 MGS 试验数据采集系统和五孔探针数据处理系统等组成,测量系统中使用的传感器精度为 0.5%,流动测量结果的不确定度为 1.25%。调节门的直径 D 为 0.4 m,轴向长度为 0.18 m,叶片数为 9,研究时采用 $r-\theta-z$ 圆柱坐标系(见图 1)。在对调节门后的流动进行测量时,在调节门后加两段 0.4 m 长的风管,实验时两段可以前后互换,其中一段在风管壁面上沿轴向开测试槽,并带有密封装置防止实验时漏气。流动测点位置的 z 坐标分别为 -0.215、0.035、0.200、0.365、0.600 和 0.765 m,不同圆周位置的 θ 坐标为 0° 、 10° 、 20° 和 30° ,调节门叶片角度 β_A 在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 范围内变化。

2 调节门性能评价的分析与建议

同所有固定元件一样,流动损失小、效率高,应是评价调节门性能的指标之一。调节门通过改变自

身可调叶片的安装角度 β_A 使气流经过调节门后改变方向,在叶轮叶片进口产生预旋从而改变叶轮的做功能力,实现对离心风机运行工况的调节。因此,从调节门的工作机理考虑,产生预期预旋的能力也应是评价调节门性能的指标之一。

对于反映流动损失的评价指标,由于在其他条件相同的情况下,气流速度大,通常流动损失就相对较大,所以当 2 个调节门内部气流速度差别较大时,单纯用流动效率去评价它们的性能就显得不够全面。为比较合理地考虑流速差别的影响,本文建议在使用效率指标的同时,也使用阻力系数(或称全压损失系数)作为调节门流动损失大小的另一个评价指标。阻力系数定义如下

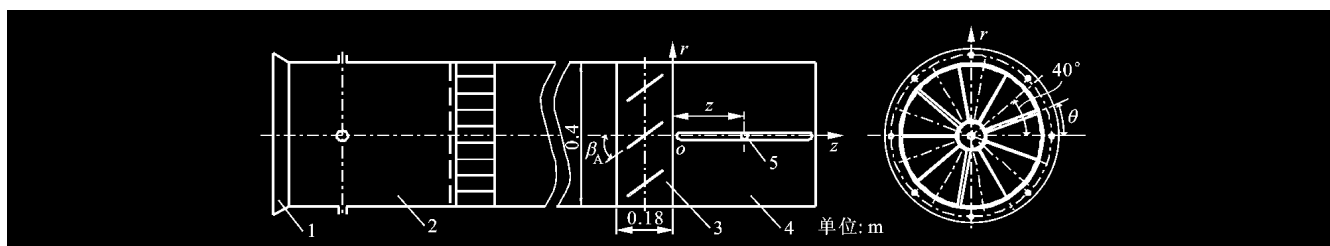
$$C_t = \frac{2\Delta p_{\text{IGV}}}{\rho v_{\text{avg}}^2} \quad (1)$$

当调节门前后的流动分布不均匀时,特别是在调节门叶片角度 β_A 较大的情况下,本文通过全面测量调节门前后的速度和压力分布,按流量平均的方法获得截面上的平均值,然后再计算出调节门的阻力系数。

为了反映气流经过调节门后产生预旋的能力,本文建议引入预旋系数 C_r 作为评价指标,定义如下

$$C_r = \frac{\int v_\theta^2 dQ}{v_{\text{avg}}^2 Q} \quad (2)$$

由于调节门后的流动通常不均匀,所以计算式(2)时, dQ 取 v_θ 所在半径处通过该微元环面积的质量流量,然后沿半径进行积分,最后再除以总的质量流量。由于本文研究对象是通风机,密度变化很小,因此按质量流量积分可通过直接按容积流量积分来得到。



1:锥形集流器;2:风管;3:调节门;4:流动测量段;5:五孔探针安装位置

图1 调节门结构和测量段测点位置示意图

从图2中可以看出,随着 β_A 增加, C_f 和 C_r 都明显增大,但在叶片角度 β_A 大于 50° 时, C_f 的增加明显快于 C_r 。

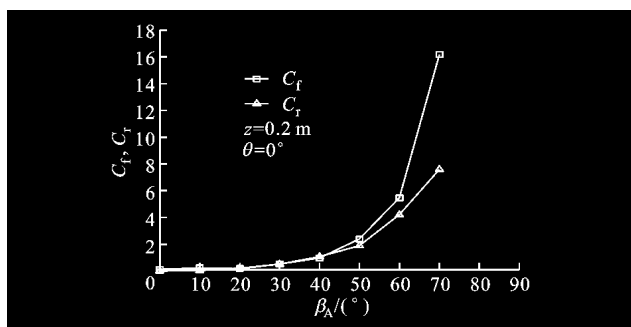


图2 调节门的叶片角度 β_A 与阻力系数 C_f 、预旋系数 C_r 的变化关系

3 调节门前后的流动测量结果

3.1 调节门后的流动沿径向变化的测量结果

从图3可以看出,流动沿径向的分布不均匀,随调节门叶片角度 β_A 的增加,不均匀性增大,其中在较大的调节门叶片角度 β_A 下,切向速度分量 v_θ 和

气流角 α 的分布趋势总体上都表现为在小半径处的数值较小。

3.2 相同轴向位置处的不同圆周位置调节门后的流动测量结果

由图1可知,在 $r-\theta$ 平面上2个调节门叶片之间的夹角为 40° 。为了考察调节门后的流动沿圆周方向的变化,在 $z=0.2$ m的轴向位置处,针对调节门叶片角度 $\beta_A=30^\circ$ 和 50° 两种情况,对 $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 几个圆周角度位置沿径向对调节门后的流动进行了测量。 $\beta_A=30^\circ, 50^\circ$ 两种情况下的测量结果有相同的分布规律,因此文中只给出了 $\beta_A=50^\circ$ 的测量结果(见图4和图5)。由图4、图5可以看出,与流动参数沿径向的分布相比(见图3),不同圆周位置的流动分布差别不大,表明调节门后的流动沿圆周方向分布比较均匀。

3.3 不同轴向位置处调节门后的流动测量结果

调节门后流动沿轴向(即沿流动方向)的变化情况见图6和图7,结果表明,气流离开调节门后在距离很近的位置处,流动沿径向的不均匀性较大,如

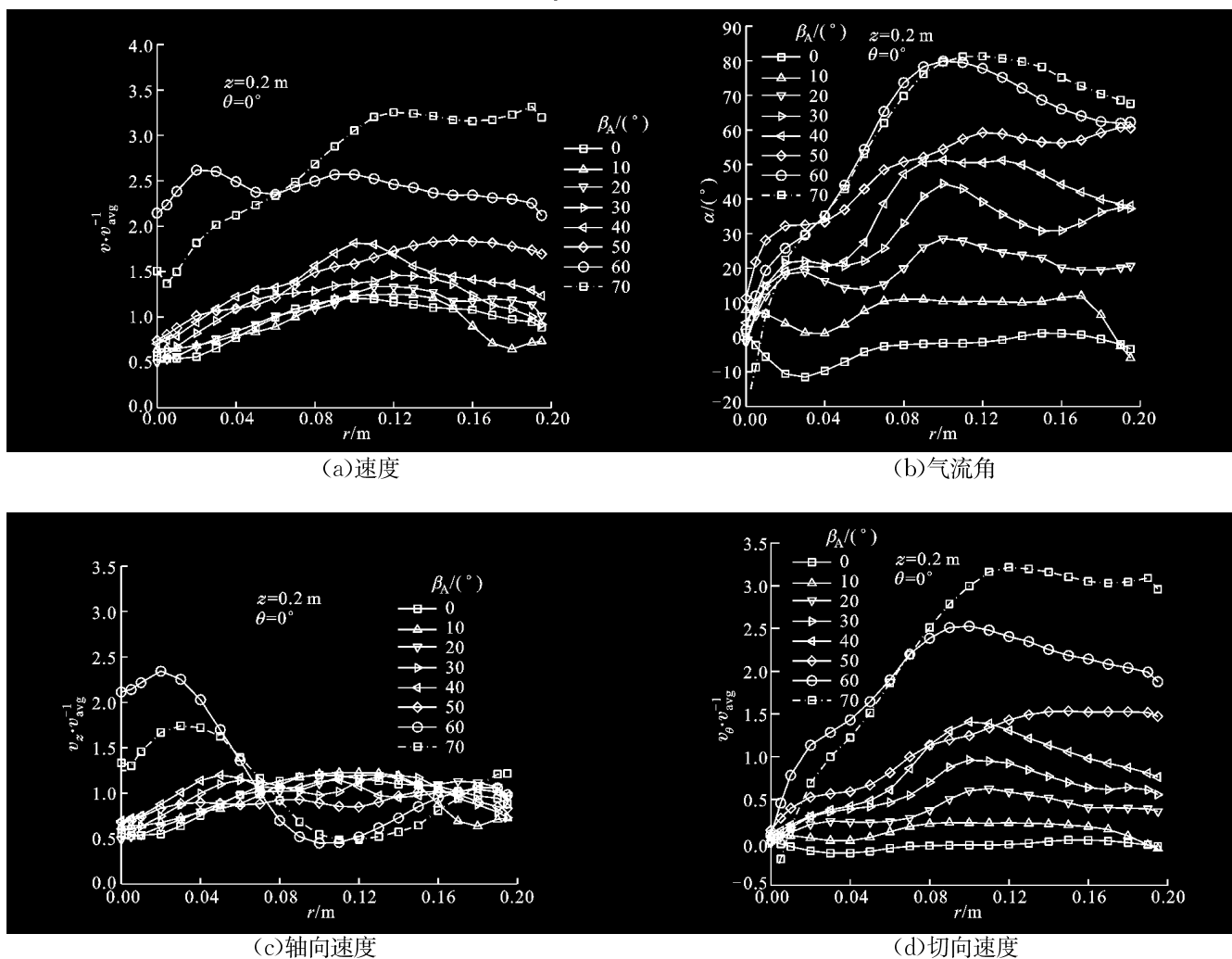


图3 调节门的叶片角度不同时调节门后的流动测量结果

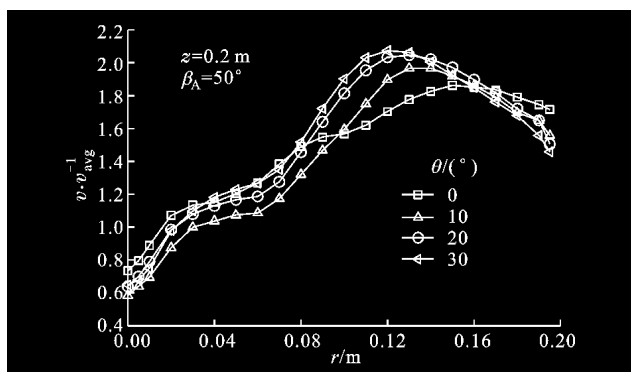


图4 不同圆周位置处的测量结果

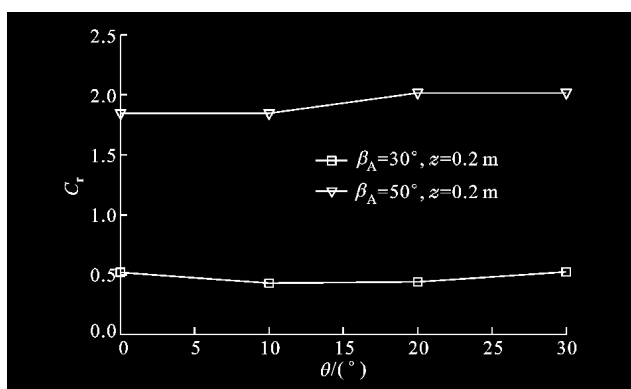


图5 不同圆周位置处的预旋系数分布

$z=0.035, 0.200$ m 位置处. 随着气流离开调节门后的距离增加, 气流的不均匀性逐渐变小. 当气流离开调节门后的距离继续增大时, 气流的均匀性基本不再变化, 但由于黏性作用, 气流的切向分速度 v_θ 逐步减小, 表现为预旋系数 C_r 下降. 因此, 在调节门出口到叶轮进口之间一定有一个最佳距离或距离范围能够兼顾流动的均匀性及产生预旋作用两个方面. 从实验结果分析可知, 在调节门叶片角度 $\beta_A=50^\circ$ 时, $z=0.365\sim 0.600$ m 应该是在本文实验条件下调节门出口到叶轮进口之间的最佳距离范围, 即此最佳距离约是叶片平均弦长的 4~8 倍. 实验结果还表明, 当调节门叶片角度 β_A 较小时, C_r 沿流动方向衰减不明显, 而当调节门叶片角度 β_A 较大时, C_r 的衰减则明显些. 需要说明的是, 在调节门后距离很近的位置 ($z=0.035$ m) 处, 由于调节门中心处支撑机构的影响, 在半径 $r<0.04$ m 的位置因流动出现回流而无法准确测量, 故图 6 中 $z=0.035$ m 的曲线没给出 $r<0.04$ m 的部分.

3.4 调节门之前流动的测量结果

由于在 $\beta_A=60^\circ, 70^\circ$ 时调节门后的轴向速度沿半径分布很不均匀, 为考察调节门之前的流动, 在 $z=-0.215$ m 的轴向位置 (距调节门的实际距离为 0.035 m) 和 $\theta=0^\circ$ 的圆周位置处, 针对调节门叶片

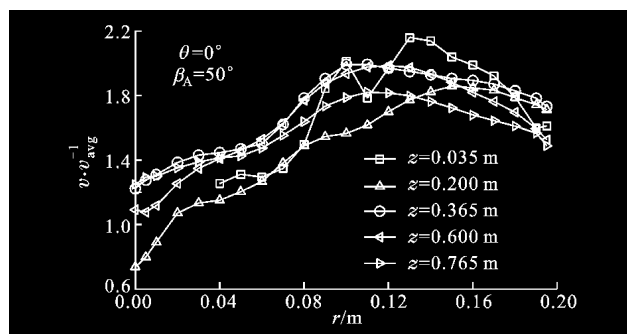


图6 不同轴向位置处的测量结果

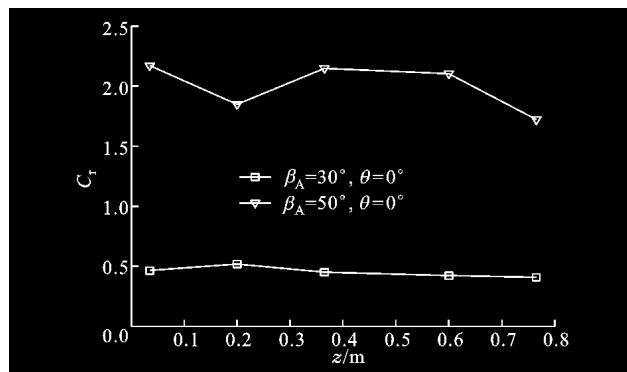


图7 不同轴向位置处的预旋系数分布

角度 $\beta_A=30^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 的几种情况, 对调节门上游的流动沿径向进行了测量. 从测试结果可看出, 除壁面附近之外, 速度分布 (v_z/v_{avg}) 沿径向变化很小, 而且对于不同的调节门叶片角度, 速度比值的分布曲线基本一样. 气流角 α 的情况也大致类似, 除壁面附近之外, α 都基本接近 0° . 这说明调节门对上游来流的分布形态影响不大.

4 分析与讨论

(1) 在常用调节范围内, 调节门在调节过程中 (即调节门叶片角度变化时) 对其前方来流的分布形态影响很小.

(2) 在常用调节范围内, 当来流均匀时, 本文这种结构形式的调节门之后的流动沿圆周方向的分布比较均匀, 沿半径方向的分布则很不均匀, 这也是该类调节门目前存在的问题之一.

(3) 调节门后的流动沿流动方向 (轴向) 由不均匀逐渐变得比较均匀, 但由于黏性影响, 随着流动距离增加, 气流的切向速度分量 v_θ 会下降, 预旋系数 C_r 也相应变小, 从而减小了在叶轮进口处产生的预旋. 从兼顾流动均匀和产生预旋作用两个方面考虑, 从调节门出口到叶轮进口之间的距离并非越长越好, 应该有个最佳范围, 在本试验条件下, 这个最佳长度约为叶片平均弦长的 4~8 倍, 最佳范围有助于使现有调节门发挥其最好的性能.

(4) 本文建议增加阻力系数、预旋系数和旋阻比作为调节门性能的主要评价指标. 初步实践表明, 使用这几个指标有助于在研究中较好地兼顾到两个方面: 既要提高调节门自身的流动效率, 又要在叶轮进口产生预旋作用. 实验表明, 随着调节门叶片角度 β_A 的增加, C_f 和 C_r 都明显增大, 但在叶片角度 β_A 大于 50° 时, 阻力系数 C_f 的增加明显快于预旋系数 C_r .

(5) 从图 3 可以看出, 在调节门后面圆管的横截面上, 流动参数分布很不均匀, 圆心附近区域的切向速度分量 v_θ 和气流角 α 都小于其余区域, 调节门叶片角度 β_A 越大, 这种不均匀性也越大. 造成圆管中心区域产生预旋小的主要原因是传统调节门叶片的整体轮廓是扇形(见图 1), 同一个叶片在半径越小的位置处叶片弦长越短, 改变气流方向的能力越差. 建议改变调节门叶片原有的扇形轮廓形状, 加长小半径处叶片的弦长, 提高其改变气流方向的能力, 从而既可增大圆管中心区域的 C_r , 又可促使管道横截面内不同半径处的流动参数更趋均匀.

(6) 曾有不少风机用户和生产厂家反映, 当调节门叶片角度较小时, 调节门的调节不起作用. 本文图 2 基本验证了这一说法: 在调节门叶片角度较小时, 调节门预旋系数很小, 调节作用确实不大. 因此, 欲使调节门的调节作用更加明显, 主要应设法增大调节门叶片角度较小时的预旋系数. 建议在不过多增加工艺成本的前提下对原平板直叶片叶型进行适当改进, 同时考虑利用最佳叶栅稠度的概念对调节门叶栅进行优化, 争取能够提高调节门叶片角度较小时的预旋系数, 降低相应的阻力系数, 进一步提高该类调节门的综合性能.

参考文献:

- [1] 刘家钰. 电站风机改造与可靠性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 31-56.
- [2] 李庆宜. 通风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 230-246.
- [3] Coppinger M, Swain E. Performance prediction of an industrial centrifugal compressor inlet guide vane system[J]. Proc Instn Mech Engrs: Part A, 2000, 214: 153-164.
- [4] Chan W K, Wong Y W, Yu S C M, et al. A computational study of the effects of inlet guide vanes on the performance of a centrifugal blood pump[J]. Artif Organs, 2002, 26(6): 534-542.
- [5] Soranna F, Chow Y C, Uzol O. The effect of inlet guide vanes wake impingement on the flow structure and turbulence around a rotor blade[J]. ASME J of Turbomachinery, 2006, 128(1): 82-95.
- [6] 温庭栋, 马素霞. 离心式风机导流器调节的经济性分析[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 406-408.
Wen Tingdong, Ma Suxia. Economical analysis of axial guide vane for centrifugal fan [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(4): 406-408.
- [7] 罗晟, 祁大同, 赵复荣, 等. 离心风机叶轮进口预旋的测量和分析[J]. 流体机械, 2002, 30(8): 6-7.
Luo Sheng, Qi Datong, Zhao Furong, et al. Measurement and analysis of impeller inlet prewhirl flow in a centrifugal fan[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(8): 6-7.
- [8] 沈阳鼓风机研究所. GB/T1236-2000 工业通风机用标准化风道进行性能试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 122-141.

(编辑 王焕雪)

[文摘预览]

基于多色集合的贝叶斯诊断网络构造方法研究

李果, 高建民, 陈富民, 高智勇

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

为了解决贝叶斯诊断网络知识表达不一致的问题, 构建了故障模式和物理组件之间的映射框架, 并提出了一种基于结构分解的层级式多重故障结构模型. 引入多色集合理论, 对这种结构模型的底层框架进行形式化描述, 使得模型便于计算机表达和操作. 通过对多色集合的推理矩阵进行迭代搜索实现贝叶斯诊断网络(BDN)自动生成, 并给出了具体的推理步骤. 以汽轮机设备为例对提出的方法进行了有效性验证, 结果表明该方法有助于 BDN 知识表达的规范化和构造过程自动化程度的提高.