

文章编号:1000-582X(2002)05-0025-04

基于信息熵的诊断过程认知信息流分析

马笑潇, 黄席樾, 黄敏, 倪霖

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

摘要:从认识论和广义信息论的角度,认为故障诊断过程是一个认知主体借助多种认知工具进行状态辨识的过程,围绕故障认知的有关基本问题,可以从信息熵的传递过程加以解释。运用信息熵进行了数学推导,并阐明了诊断过程的认知信息流的流动过程。最后提出了建立多征兆域综合特征知识体的思路,以解决诊断信息先天获取不足和认知能力随复杂性降低的诊断知识获取问题。

关键词:故障诊断;信息熵;多征兆域综合特征知识体

中图分类号:TP165.3

文献标识码:A

以传感器技术为基础、信息处理技术为手段的“现代设备诊断技术”已经历了30多年的发展和应用过程,取得了明显的经济效益。特别是,基于知识的故障诊断系统,由于充分利用了领域专家的诊断知识和先进的人工智能理论与应用成果,在近10年来取得了更为广泛的应用^[1-3]。然而由于在诊断技术的长期发展和应用中,人们强调的是该技术的“针对性”和“应用价值”,以及诊断技术应用的广泛性。但却忽视了对这些基本概念本质的认识,认为没有必要,甚至不可能为诊断技术建立和发展一种系统化的理论体系,致使人们在运用基于知识的诊断推理技术解决实际问题时,产生概念上的混淆和误解^[1](1992,杨叔子)。笔者从认识论的角度,认为故障诊断过程是一个认知主体借助多种认知工具进行状态认知的过程。运用信息熵推导并阐明了诊断过程认知信息流的流动过程,这是对诊断过程概念内涵的一个深入剖析。最后,提出了建立多征兆域综合特征知识体的概念,以解决诊断信息获取不足和认知能力受限这两个制约诊断智能化的本质问题。

1 故障诊断过程的信息、知识和智能辨证关系

把信息提炼成知识并把知识激活成智能,是信息学的核心和灵魂^[4]。信息、知识、智能之间的关系可以

表达为^[4-5](2001,钟义信):信息是基本资源;知识是对信息进行加工所得到的抽象化产物;智能是利用信息资源加工生成知识、进而激活知识生成解决问题的策略信息,并在策略信息引导下解决具体问题的能力。探讨故障诊断过程的本质,不难发现,对待诊断系统建立特征空间描述的过程,应是一个从待定状态系统中进行信息抽取的过程,并且存在一个信息流的采掘问题,可以进行定性量化描述。特征征兆域的形成是一个信息加工提炼成知识的过程,存在一个信息量的转化问题。而特征信息的抽取、特征知识的转化,以及由征兆域知识进行系统状态的估计和推理都需要智能。笔者将运用广义信息论的有关理论,试图揭示故障诊断过程中信息流地挖掘、传输、转化的量化模型。

2 诊断过程中的信息流的熵描述

2.1 熵的有关概念

熵的概念最早源于物理学中德国人 Clausius 提出的热力学第二定理,它被用于度量热力学系统的紊乱程度。1948年美国 Shannon 在其论著《通信的数学理论》中,提出了信息的熵公式,正式开创了经典信息论^[6-7]。之后,Shannon 信息论被不断扩大延伸到更广泛范围内的信息:语义信息、感觉信息、测量信号信息、甚

• 收稿日期:2002-01-10

基金项目:国家高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(99061116)

作者简介:马笑潇(1975-),男,山东临沂人,重庆大学博士研究生,从事人工智能与知识工程、图象处理与模式识别、复杂系统故障诊断与预测等方面的研究。

至手段和目的之间的信息。涉及控制论、系统论、生物学、哲学等众多领域的信息称为广义信息论。

首先给出熵的有关定义^[6-7]：

定义 1 假定事物 X 具有 N_X 个可能的运动状态，即 $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_{N_X}\}$ ，各个状态变化的方式是：它们以如下的概率分布出现：

$$P(X) = \{p(x_1), \dots, p(x_i), p(x_{N_X})\} = P$$

则该事物所包含的不确定性，可以用该事物所含的信息熵 $H(X)$ 来表征，

$$H(X) = - \sum_{i=1}^{N_X} p(x_i) \log p(x_i)$$

当认识主体获得了事物 X 的全部信息(即得知究竟哪一个状态实际出现)时，上述不确定性 $H(X)$ 就被完全消除了。这时主体所获得的语法信息量 $I(X)$ ，就等于它所消除的不定性数量 $H(X)$ ： $I(X) = H(X)$ 。

信息熵具有对称性、非负性、确定性、连续性、扩展性、可加性、强可加性、递推性等特点^[6-7]。为叙述简捷，本文中约定事物 Δ 的个数或可能运动状态的数目记为 N_Δ 。

定义 2 假定事物 X 具有 N_X 个可能的运动状态的概率空间为：

$$[X \circ P] : \begin{cases} x_1 & x_2 \cdots x_i \cdots x_{N_X} \\ p(x_1) & p(x_2) \cdots p(x_i) \cdots p(x_{N_X}) \end{cases}$$

认识主体通过各种认识工具获得任一系统状态 x_i 的特征信号为 y_j ，认识主体从 y_j 中获得的关于 x_i 信息量记为 $I(x_i; y_j)$ ，称为交互信息量。由于认识工具精度的差异和各种干扰因素的影响， y_j 不可能包含 x_i 的全部信息。则有

$$I(x_i; y_j) = I(x_i) - I(x_i | y_j) = (-\log p(x_i)) - (-\log(p(x_i | y_j)))$$

y_j 代表的概率空间表示为：

$$[Y \circ P] : \begin{cases} y_1 & y_2 \cdots y_i \cdots y_{N_Y} \\ p(y_1) & p(y_2) \cdots p(y_i) \cdots p(y_{N_Y}) \end{cases}$$

认识主体从 Y 中获取的平均交互信息量记为 $I(X; Y)$ ，获知 Y 后仍然对 X 的不确定度称为条件熵，记为 $H(X | Y)$ 。并有以下结论：

$$H(X | Y) = - \sum_{i=1}^{N_X} \sum_{j=1}^{N_Y} p(x_i, y_j) \log p(x_i | y_j) \\ I(X; Y) = H(X) - H(X | Y)$$

对于一个待诊断系统而言，由于系统状态并非严格概率可测，为了借信息熵的理论定性描述这一过程中的信息流。作如下假设：

假设 1 假定待诊断系统状态空间的每个子空间状态是遵循某种概率分布的，即系统状态是概率可测的。其自信息熵值固定不变为 H_S 。

2.2 诊断过程中的信息 - 知识流的熵描述

给定诊断问题模型的形式系统 $P = \langle S, FS, SYM', K \rangle$ ， $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\}$ ，是一个非空的系统状态集合，所含信息量为 H_S ， K 是关于诊断对象的领域知识的描述。系统处于 S_i 状态对应的系统特征信号为向量 $FS = [FS_1, FS_2, \dots, FS_{N_{FS}}]$ ，任一特征信号 FS_j 具有概率空间

$$[FS_j \circ P] : \begin{cases} FS_{j1} \cdots FS_{jk} \cdots FS_{jN_{FS}} \\ p(FS_{j1}) \cdots p(FS_{jk}) \cdots p(FS_{jN_{FS}}) \end{cases}$$

系统自信息量经由 FS 传输到单纯特征征兆(没有加入领域知识情形下的征兆)向量 $SYM' = [SYM'_{j1}, SYM'_{j2}, \dots, SYM'_{jN_{FS}}]$ ，任一单纯征兆 SYM'_{j1} 具有概率空间分布

$$[SYM'_{j1} \circ P] : \begin{cases} SYM'_{j11} \cdots SYM'_{j1k} \cdots SYM'_{j1N_{SYM}} \\ p(SYM'_{j11}) \cdots p(SYM'_{j1k}) \cdots p(SYM'_{j1N_{SYM}}) \end{cases}$$

根据信息熵的有关传输原理，有以下推导：

1) 特征信号 FS 携带的系统状态的信息量 FS 携带的系统状态的信息量可记为 $I(S; FS)$ ，有

$$I(S; FS) = H(S) - H(S | FS) = H(S) - H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}})$$

$$H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) =$$

$$- \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{k=1}^{N_{FS_1}} \cdots \sum_{k=1}^{N_{FS_{N_{FS}}}} p(FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot$$

$$p(S_i | FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot \log p(S_i | FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) =$$

$$\sum_{k=1}^{N_{FS_1}} \cdots \sum_{k=1}^{N_{FS_{N_{FS}}}} p(FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^{N_S} (p(S_i | FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot \log p(S_i | FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}))$$

$$\text{考虑到 } \sum_{i=1}^{N_S} p(S_i | FS_{1k} FS_{2k} \cdots FS_{N_{FS}k}) = 1; \sum_{i=1}^{N_S} p(S_i |$$

$$FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{(N_{FS}-1)k} = 1$$

根据熵函数的极值性^[6-7],有

$$H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) \leq \sum_{1k=1}^{N_{FS}} \cdots \sum_{N_{FS}k=1}^{N_{FS}} p(FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot \left\{ - \sum_{i=1}^{N_S} p(S_i | FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot \log p(S_i | FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{(N_{FS}-1)k}) \right\} = - \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{1k=1}^{N_{FS}} \sum_{N_{FS}k=1}^{N_{FS}} p(S_i FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{N_{FS}k}) \cdot \log p(S_i | FS_{1k}FS_{2k}\cdots FS_{(N_{FS}-1)k}) = H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}})$$

所以有： $H(S) - H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) \geq H(S) - H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}-1})$

亦即：

$$I(S; FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) \geq I(S; FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}-1})$$

且

$$I(S; FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) - I(S; FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}-1}) = H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}-1}) - H(S | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}) = I(S; FS_{N_{FS}} | FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}-1})$$

上述推导在数学意义上,证明了人们的常识经验:对待诊断系统,增加有效检测元件获取更多的特征信号,可以增加从系统中获得的信息量。在 N 维矢量的取值域 B^N 中,用恰当的方法将其分割成互不相交的 S_N 组,当 $N \rightarrow \infty$ 时,可使系统处于状态 S_i 时,特征信号 $FS = FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}$ 落在 B_N 中的第 i 组的概率接近 1,成为确定的一一对应关系。也就是从理论上讲,可以从特征信号 $FS = FS_1 FS_2 \cdots FS_{N_{FS}}$ 中获取系统状态的全部信息。

已知,交互信息量 $I(S_i; FS_j)$ 不满足非负性^[7],即如果第 j 个检测器发生故障,则它不仅不能传递关于 S_i 的正确信息,反而会带来虚假信息量,妨碍状态辨识。但是,平均交互信息量却具有非负性(这是在概率意义上的),即平均信息量是“负熵”。

由于实际上,特征信号的数目是非常少的,因此由 S_i 到 FS_j 表示的信息损失是非常大的,这从根本上阐明了故障诊断的最终困难,在于获知的系统状态信息

量太少。也就证明了采用多传感器融合的方法,和多角度、多手段获得特征信号对故障诊断的意义所在。

2) 特征信号到征兆知识的信息传递

特征信号 FS 到纯特征征兆 SYM' 的传输过程中,信息的损失具有同样的结论和类似的推导过程,这里直接给出结论:

$$I(FS; SYM') = H(FS) - H(FS | SYM') \\ H(FS | SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{N_{SYM}}) \leq H(FS | SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{(N_{SYM}-1)}) \\ I(FS; SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{N_{SYM}}) \geq I(FS; SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{(N_{SYM}-1)}) \\ I(FS; SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{N_{SYM}}) - I(FS; SYM' | SYM'_1 SYM'_2 \cdots SYM'_{(N_{SYM}-1)}) = I(FS; SYM' / SYM'_1, SYM'_2, \cdots, SYM'_{N_{SYM}-1})$$

综合 1.2 的推导,纯特征征兆集携带的系统状态信息量为 $I(S; FS; SYM')$:

$$I(S; FS; SYM') = H(S) - (H(S) - I(S; FS)) - (H(FS) - I(FS; SYM')) = H(S) - H(S | FS) - H(FS | SYM')$$

根据熵的有关性质,当 N_{FS}, N_{SYM} 较少时,纯特征征兆集携带的系统状态信息量将很小,如果不加入领域知识,进行系统故障的可诊断性是非常小的。

3) 知识对特征征兆信息量的双重作用

令人遗憾的是,目前有关信息提炼成知识、知识的形成机理、知识的量化等有关知识论的理论成果几乎是一片空白。事实上,在信息论与智能论之间应当以知识论作为桥梁。然而,知识论却长期成为一段空白。这种状况已经成为一个瓶颈,使信息论和智能论的发展受到了严重的制约^[4-5]。因此,研究和建立知识论已经成为一项十分迫切的任务。知识论的建立,将沟通信息论与智能论之间的联系,形成信息、知识、智能的统一理论,为创制智能工具系统提供坚实的理论基础。据笔者查阅的资料来看,国外最近出现了知识获取和发现的研究,但还相当局限,远未形成体系。国内真正探讨知识论的也只有钟义信教授的几篇文献^[4-5]和杨叔子院士在其著作《基于知识的故障推理》^[1]等文献中略有提及。知识论的研究远远落后于信息论、智能论的研究,甚至远远落后于人类利用知识的研究。

不同侧面的领域知识对特征征兆的作用体现在两个方面:

1) 领域知识将从信息量和效用度上对特征征兆产生放大作用,因此使诊断系统状态成为可能,称这种作用为正作用;

2) 从认知的角度,过于冗杂的知识体系,掩盖了问题的本质,增加了发现有用特征和规则的难度,使不确定的诊断问题变得更加模糊,降低了诊断准确率和效率。称这一过程为领域知识的主观反作用(这一点只能从广义信息论上得出)。

3 结 论

根据前文对诊断问题信息流的分析可知,要实现一个求解能力强的诊断系统,必须从系统中获得尽可能多的特征信号,但另一方面受人类认知能力特点的限制,过于复杂和细化的特征信号,又容易使认知主体陷入冗杂的数据当中,难以抽取出有效的征兆知识。目前智能故障诊断面临的主要问题在于基于知识的诊断系统难于突破知识获取的瓶颈、学习能力差,缺乏完备、一致的知识集,而基于模型知识的诊断,又有搜索空间大、推理速度慢、建模困难等问题^[1]。

针对上述矛盾和问题,作者提出了建立多征兆域综合特征知识体(Multi-Symptom Domains Comprehensive Feature Knowledge,简称MSDCFK)的概念。在形式上,MSDCFK是异构、多维立体的空间结构,强调特征知识的模块化、集成化、多侧面化和认知的多角度化;在内容上,重视不同层次、不同来源、不同表示形式地深浅知识的综合利用;在利用特征知识的方法论上,强调不

同侧面、不同层次、不同领域的特征知识的相互激发,以达到有利于刺激不同认知水平和认知背景的认知主体,产生联想记忆式的征兆证据规则的目的;在与推理方法相结合上,MSDCFK依赖于多种不同推理方法与不同侧面特征知识体的相适应的策略。例如MSDCFK反应的因果知识侧面适于采用因果推理的方法;经验性知识适于经验推理;操作员的直观感觉适于直觉推理;不能量化的系统行为适于定性推理等等(限于篇幅只能另文给出)。

参考文献:

- [1] 杨叔子,丁洪,史铁林,等.基于知识的诊断推理[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [2] WILLSKY A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems[J]. Automatica, 1976, 12: 601 - 611.
- [3] GERTLER J J. Survey of model based failure detection and isolation in complex plants[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1988, 8(6): 3 - 11.
- [4] 钟义信.“知识论”基础研究[J].电子学报, 2001, 29(1): 96 - 102.
- [5] 钟义信.知识论:核心问题——信息-知识-智能的统一理论[J].电子学报, 2001, 29(4): 526 - 530.
- [6] MCELIECE R J. The theory of information and coding[M]. Addison - Wesley Publishing Company, 1977.
- [7] 姜丹.信息理论与编码(上册)[M].合肥:中国科学技术大学出版社, 1992.

Analysis of Information Flow Based on Entropy of Fault Diagnosis

MA Xiao-xiao, HUANG Xi-yue, HUANG Min, NI Lin

(College of Automation Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Under the pointview of epistemology and generalized information theory, fault diagnosis can be regarded as the state identification process by dint of various cognitive tools. Therefore, information Entropy can be employed to explain the transfer of information during identifying the faults. The mathematical deduction of information Entropy is given and the idea of Multi-Symptom Domains Comprehensive Feature Knowledge to solve fault diagnosis problems caused by insufficient knowledge and lower cogniving ability for complex knowledge system is presented.

Key words: fault diagnosis; information entropy; multi-symptom domains comprehensive feature knowledge

(责任编辑 吕赛英)