

现场总线控制系统信息通道结构分析与优化设计*

吴斌** 王昕

(西南工学院信息与控制工程系 四川 绵阳 621002)

【摘要】 分析了现场总线控制系统的典型拓扑结构及信息通道结构的能通性、可靠性和经济性,并采用广义自适应遗传算法对信息结构进行了优化设计,从而为现场总线控制系统的结构设计和分析提供了一种新方法。

关键词 现场总线; 信息结构; 遗传算法; 优化设计

中图分类号 TP273

现场总线是用于过程、制造、楼宇自动化等领域的现场仪表和控制室仪表的全数字化、双向、多站的互连通信网络,可以提高系统的可靠性、精确度和抗干扰能力,同时延长了信息传输的距离^[1~5],沟通了生产过程现场各控制设备之间及其与更高控制管理层之间的联系。现场总线控制系统(FCS)既是一个开放通信网络,又是一种全分布控制系统,是一种新型的网络集成自动化系统,它把挂接在总线上相关的网络节点组成自动化系统,实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、综合自动化等多项功能。

信息通道结构能通性既反应了控制系统的结构特性^[6],又反应了控制系统的基本技术性能要求。因此,控制系统的信息通道结构能通性是其最基本的结构特性和整个系统能否正常工作的必要结构条件。

1 信息通道结构模型

1.1 信息通道结构模型

控制系统的信息通道结构模型由信息通道结构图和信息通道结构阵来表示。

1.1.1 信息通道结构图

信息通道结构图是有向图,由信点和信道的集合组成

$$G = \{N, R\} \quad (1)$$

式中 信点集为 $N = \{n_0, n_1, \dots, n_k\}$; 信道集为 $R = \{r_0, r_1, \dots, r_m\}$ 。

对于简单的控制系统,一个物理控制节点就可以是一个信点,对于复杂系统则可以将一个(或一级)控制子系统作为一个信点。在信道结构图中,信点用结点表示,用有向支路表示信道,信道表示信息流通的方向。

1.1.2 信息通道结构阵

信息通道结构阵是信息通道结构图的相邻矩阵,简称为信息结构阵

$$S = [s_{ij}] \quad (2)$$

式中 若 $s_{ij} = 1 (i \neq j)$, 表示信点 $N_i \sim N_j$ 有信道; 如果 $s_{ij} = 0 (i \neq j)$, 则意味信点 $N_i \sim N_j$ 无信道。 s_{ii} 的取值表示第 i 个信点能否正常工作, 1为正常, 0为有故障。

1999年11月22日收稿

* 四川省应用基础研究专项经费和高等学校骨干教师资助计划资助项目

** 男 34岁 博士 副教授

1.2 信息通道的拓扑结构

现场总线控制系统具有几种不同的典型拓扑结构,如星型、总线型、树型和菊花型等,而实际控制系统是这些典型拓扑结构的集成,其对应的信息结构模型就是这些拓扑结构信息结构模型的有机集成。

星型拓扑结构如图1所示,信息通道结构如图2所示,其中结点 N_0 表示通信控制装置,结点 N_1, N_2, \dots, N_k 表示各现场设备,各支路代表控制信息与观测信息流,对应的信息通道结构阵为

$$S_s = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & \dots & k \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

式中 $s_{ii} = 1, i = 0, 1, 2, \dots, k$ 表示各信点内部信道; $s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0k} = 1$ 表示通信控制装置发出的控制信息通道; $s_{10}, s_{20}, \dots, s_{k0} = 1$ 表示通信控制装置接受的观测信息通道; $s_{ij} = 0, i \neq 0, j \neq 0, i \neq j$ 表示各现场设备间无直接信息传递。同样,可以建立其他典型拓扑结构的信息通道模型。

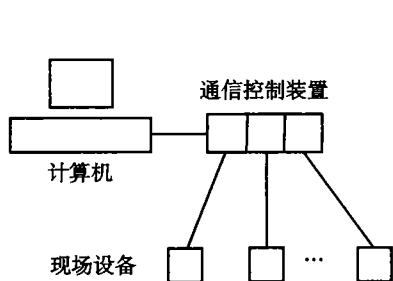


图1 星型拓扑结构

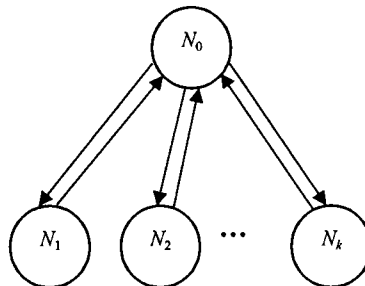


图2 星型拓扑结构的信息通道结构

2 信息通道结构能通性分析

2.1 信息结构阵的分解

信息结构阵 S 可以分解为表示信点内部工作状况(由 S 中对角线上元素的值表示)的内部信息结构阵 SI 和反应各信点间信息流通状况(由 S 中对角线之外的元素的值表示)的外部信息结构阵 SO , 由 S 中对角线之外的元素的值反映, 即信息结构阵 S 可表示为

$$S = SI \oplus SO \quad (4)$$

式中 $SI = [s_{ij}]$ 为内部信息结构阵; $SO = [s_{0j}]$ 为外部信息结构阵; \oplus 为矩阵逻辑加运算, 各元素间按布尔代数的加法(或)运算。

在内部信息结构阵 SI 中, $s_{ij} = 0, i \neq j$ 。如果 $s_{ii} = 1$, 表示控制系统中第 i 个节点正常; 若 $s_{ii} = 0$, 则表示控制系统中第 i 个节点有故障, 不能进行信息交流。

在外部信息结构阵 SO 中, $s_{0i} = 0$ 。如果 $s_{ij} = 1 (i \neq j)$, 表示节点 $i \sim j$ 的信息支路畅通; 相反, 如果 $s_{ij} = 0 (i \neq j)$, 则表示节点 $i \sim j$ 没有信息支路, 即信息不能从节点 i 流到节点 j 。现场总线控制系统各典型拓扑结构对应的信息通道结构阵可按式(4)分解。

2.2 信息通道结构能通性判据

2.2.1 内部信息结构能通性判据

判据1 如果控制系统(或控制子系统)的内部信息结构阵 SI 是单位结构阵, 则该系统(或子系统)的内部信息结构阵能通。

2.2.2 外部信息结构能通性判据

在外部信息通道结构阵 SO 中又包含两部分: 1) 直接信息通道: 即各信点间由系统总线直接提供的信息通道; 2) 间接信息通道: 即通过中间一级或几级信点(即信点的串联)传递而构成的间接信息通道。

判据2 若外部信息通道结构阵 SO 满行(或满列), 即外部信息结构阵中无全零行(或零列), 其非零行(或零列)数等于信点数量, 则系统的外部信息通道结构阵是能通的。

若系统的外部信息通道结构阵是能通的, 则每一个信点至少有一条直接或间接信息通道接受其他信点的信息和向其他信点发出信息。

2.2.3 信息结构能通性判据

判据3 若控制系统的内部信息通道结构阵 SI 和外部信息通道结构阵 SO 都是能通的, 该系统的信息通道结构阵是能通的。

3 信息结构可靠性与经济性比较分析

信息结构可靠性与经济性分析针对的是外部信息通道结构阵 SO 。

3.1 信息通道结构强度

外部信息通道结构阵 SO 中每行的非零元素个数表示该行对应信点与若干个信点间有直接信息通道, 同时也反映该信点还可以通过若干信点串联而构成间接信息通道。如果一个信点与所有信点都没有直接信息通道, 则不会有间接信息通道。

定义 系统信息通道的结构强度 $Q(S)$ 为信息通道结构阵中直接信息通道的总和

$$Q(S) = \sum_{i=0}^k Q_i(SO)$$

式中 $Q_i(SO)$ 为外部信息通道结构阵 SO 第 i 行中“非零元”个数; $(k+1)$ 为信点总数。

3.2 可靠性指标

3.2.1 平均信息通道结构强度 $\bar{Q}(S)$

平均信息通道结构强度 $\bar{Q}(S)$ 表示系统中每一个信点平均拥有的直接信息通道数量, 表示为

$$\bar{Q}(S) = \frac{1}{k+1} Q(S) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k Q_i(SO)$$

3.2.2 信息通道结构分布方差 $\sigma(S)$

信息通道结构分布方差 $\sigma(S)$ 反应直接信息通道分布在各信点的不均匀性, 即

$$\sigma(S) = \sum_{i=0}^k [\bar{Q}(S) - Q_i(SO)]^2$$

当平均信息通道结构强度 $\bar{Q}(S)$ 大, 而信息通道结构分布方差 $\sigma(S)$ 小时, 说明系统各信点都具有较多的直接信息通道, 因此系统的信息通道结构可靠性高; 如果 $\bar{Q}(S)$ 大, 而 $\sigma(S)$ 也大, 表明虽有较多的直接信息通道, 但分布不均匀, 有的信点多, 而有的少, 甚至没有, 因而系统的信

息通道结构可靠性不高；同样，如果 $\bar{Q}(S)$ 小， $\sigma(S)$ 也小，意味着直接信息通道数量少，即使分布再均匀，系统信息通道结构的可靠性也不会高。

3.3 可靠性分析

现场总线控制系统各典型拓扑结构的信息通道结构可靠性可按上述方法分析，如星型拓扑结构的信息通道结构可靠性分析为

$$Q(S_s) = \sum_{i=0}^k Q_i(SO_s) = 2k$$

$$\bar{Q}(S_s) = \frac{1}{k+1} Q(S_s) = \frac{2k}{k+1}$$

$$\sigma(S_s) = \sum_{i=0}^k (\bar{Q}(S_s) - Q_i(SO_s))^2 = \frac{k(k-1)^2}{k+1}$$

在一般情况下，各典型拓扑结构信息通道结构的可靠性比较如下

$$Q(S_b) > Q(S_l) > Q(S_d) = Q(S_s) \quad (5)$$

$$\bar{Q}(S_b) > \bar{Q}(S_l) > \bar{Q}(S_d) = \bar{Q}(S_s) \quad (6)$$

$$\sigma(S_b) < \sigma(S_d) < \sigma(S_l) < \sigma(S_s) \quad (7)$$

式中 $Q(S_s)$ 、 $\bar{Q}(S_s)$ 、 $\sigma(S_s)$ 为星型拓扑结构的信息通道结构强度、平均强度和分布方差； $Q(S_b)$ 、 $\bar{Q}(S_b)$ 、 $\sigma(S_b)$ 为总线型拓扑结构的信息通道结构强度、平均强度和分布方差； $Q(S_d)$ 、 $\bar{Q}(S_d)$ 、 $\sigma(S_d)$ 为菊花型拓扑结构的信息通道结构强度、平均强度和分布方差； $Q(S_l)$ 、 $\bar{Q}(S_l)$ 、 $\sigma(S_l)$ 为树型拓扑结构的信息通道结构强度、平均强度和分布方差。这里的“一般情况”是指 $l > 2$ 。从式(5)~(7)可得出如下结论：在现场总线控制系统的四种典型拓扑结构中，总线型拓扑结构的逻辑信息通道结构可靠性最高，星型拓扑结构的逻辑信息通道结构可靠性最差，而树型和菊花型两种拓扑结构的可靠性居于两者之间。

3.4 经济性分析

通过前面对现场总线控制系统的各种典型拓扑结构的信息通道结构分析，可以发现：

1) 由于星型拓扑结构中的每个现场设备与通信控制装置间都有网络线连接，而相互间无网络线，对应的信息通道结构可靠性较低。因此，当现场需控制的设备较多而控制系统复杂时，网络的硬件投资增加。同时，为了实现各现场设备间的通信，通信控制装置的任务也相应复杂，需增加投入，即这种拓扑结构的经济性相对较差。

2) 在总线型拓扑结构中，各现场设备、通信控制装置间都是通过一组网络总线连接，相互间都存在直接信息通道，对应的信息通道结构可靠性最高，网络硬件投资少，各现场设备间的通信无须通过通信控制装置中转，通信控制装置简单，投入少。

3) 由于菊花链型的通信控制装置、各现场设备间通过网络线形成链式结构，信息的传递需层层中转，对应的信息通道结构可靠性低，虽然网络硬件投入较少，但每个现场设备都需为“过境”的信息提供服务，增加了投资，其经济性也受到影响。

4) 对于树型拓扑结构，可以看作是星型拓扑结构和总线型拓扑结构的结合，其对应的信息通道结构可靠性也居于两者之间，网络硬件投入低于星型拓扑结构，但高于总线型和菊花链型，而用于信息流通的费用高于总线型和星型，但低于菊花链型。

由此可以得出结论：可靠性高的拓扑结构，其经济性好；反之，相应的经济性则不理想。

在四种典型拓扑结构中，总线型拓扑结构的信息通道结构经济性最好，而星型拓扑结构的信息通道结构经济性最差，树型和菊花链型拓扑结构的信息通道结构经济性在两者之间。

4 优化方法

利用智能优化方法——广义自适应遗传算法 GSAGA 对现场总线控制系统的信息通道结构进行优化设计^[7], 在保证信息通道结构能通和其他要求的前提下, 使系统的信息通道结构可靠性和经济性达到最优或次最优。

4.1 GSAGA 编码的确定

4.1.1 编码形式

在系统的信息通道结构阵中, 各元素的取值仅为0和1, 因此 GSAGA 种群中的个体编码采用二进制, 一个个体就对应一个逻辑信息通道结构阵 S 。在每个个体的编码中, 各位的取值代表了一个信点与另一个信点间是否有直接信息通道, 若为1, 则有信道; 若为0, 则没有信道。

4.1.2 编码长度

系统的信息通道结构阵是以主对角线为对称轴的对称矩阵, 个体编码中只需反映矩阵的上(或下)三角矩阵即可。当系统的信点个数为 k 时, 个体编码的长度为

$$L = \frac{k(k+1)}{2}$$

种群中每个个体的编码构成了控制系统的外部信息通道结构阵, 优化设计得到的是系统的外部信息通道结构。对于系统的内部信息通道结构阵, 为了保证系统的信息正常流通, 应该为一个单位阵, 故不必进行优化设计。

4.2 适应度函数 f 的选择

系统信息通道结构的可靠性和经济性是密切相关的, 可靠性越高, 经济性也就越好。故适应度函数 f 设定为

$$f = \frac{\bar{Q}(S)}{\sigma(S) + \varepsilon} \quad (8)$$

式中 $\bar{Q}(S)$ 为种群中各个体对应构成的信息通道结构阵 S 的平均信息通道结构强度; $\sigma(S)$ 为相应的信息通道结构分布方差; ε 为一个系数, 是为了避免当 $\sigma(S)$ 为0时, f 的分母为0, 其取值范围为开区间(0,1)。

4.3 约束条件及其处理

现场总线控制系统信息通道结构优化设计的前提是必须保证信息通道结构是能通的, 即优化后的信息通道结构要满足判据3, 其内部和外部信息通道结构都是能通的。除了满足信息通道结构能通性的条件外, 在实际设计应用中可能还会有其他一些约束条件, 如对系统拓扑结构及其规模的限制等。考虑信息通道结构优化设计的相关约束条件后, 对算法的适应度函数 f 进行修正后有:

$$f = \begin{cases} \frac{\bar{Q}(S)}{\sigma(S) + \varepsilon} & S \text{ 满足所有约束条件} \\ 0 & S \text{ 不满足所有约束条件} \end{cases}$$

另外, 种群的大小和算法结束的迭代次数将按实际优化的控制系统的控制规模来决定。

5 结束语

本文分析了基于计算机网络的现场总线控制系统几种典型拓扑结构形式的信息结构能通的可靠性和经济性, 提出了利用广义自适应遗传算法 GSAGA 进行控制系统结构优化设计的方法, 为计算机网络及现场总线控制系统的设计和分析提供了一种新方法, 对现场总线技术在理论上进行了探讨。

参 考 文 献

- 1 马少梅. 现场总线与分散控制系统. 化工自动化与仪表, 1997, 24(4): 3~6
- 2 阳宪惠, 金以慧. 企业网络系统中的现场总线技术. 自动化与仪表, 1998, 13(1): 1~7
- 3 刘 文, 费敏锐. 现场通信技术及其对我国传统产业改造的影响. 上海大学学报(自然科学版), 1997, 3(增刊): 248~252
- 4 陈铁君. 九五期间现场总线及其开放自动化系统规划要点和发展方针. 微计算机信息, 1997, 13(3): 4~6
- 5 张广川. 现场总线基金会及现场总线网络标准. 微计算机信息, 1996, 12(4): 5~9
- 6 涂序彦. 大系统控制论. 北京: 国防工业出版社, 1994
- 7 吴 斌, 吴 坚, 涂序彦. 广义自适应遗传算法. 电子科技大学学报, 1999, 28(1): 49~53

Analysis and Optimization of Information Tunnel in Fieldbus Control System

Wu Bin Wang Xin

(Dept. of Information and Control Engineering, SWIT Sichuan Mianyang 621002)

Abstract In this paper, the circulation ability, reliability and economical features of the typical topology structures for the fieldbus control system are analyzed. By exploiting GSAGA, the information structure is optimized. A new method for the structure design and analysis of the fieldbus control system are proposed.

Key words fieldbus; information structure; genetic algorithm; optimal design

· 科研成果介绍 ·

铝电解电容器宽温度高压工作电解液

主研人员: 石静山 王偕恕 张红丽 朱仁龙

铝电解电容器宽温度高压工作电解液主要用于250~400 V的产品中, 其工作温度为105℃, 高温负荷特性为2 000 h, 高温贮存特性达1 000 h。该工作电解液生产的铝电解电容器可广泛应用于彩电、电子计算机和节能灯电路器。其主要技术指标如下:

比电阻 $\rho=600\pm 50 \Omega \cdot \text{cm}(30^\circ\text{C})$;

闪火电压 $U_s \geq 460 \text{ V}(85^\circ\text{C})$

酸碱度 $\text{pH}=6.5\sim 7.5$

· 科 下 ·