

无线传感器网络中参数设定的双层规划模型及算法^{*}

赵彤⁺, 杨文国, 郭田德

(中国科学院 研究生院 数学科学学院, 北京 100049)

A Bi-Level Programming Model and Solution Algorithm on Optimal Parameter Setting in Wireless Sensor Networks

ZHAO Tong⁺, YANG Wen-Guo, GUO Tian-De

(School of Mathematical Sciences, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-88256306, Fax: +86-10-88256256, E-mail: zhaotong@gucas.ac.cn, <http://math.gucas.ac.cn>

Zhao T, Yang WG, Guo TD. A bi-level programming model and solution algorithm on optimal parameter setting in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(12):3124-3130. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/3124.htm>

Abstract: Both energy efficiency and robustness are critical design challenges to large scales wireless sensor networks. Applications such as query propagation rely regularly on network-wide flooding as a robust way while frequent flooding consumes too much energy and bandwidth. The effect of packet size on the energy efficiency, and the impact of the transmission radius on the average settling time in which all nodes finish transmitting the flooded packet are analyzed in this paper. A bi-level programming model is imported: the upper level model aims to minimize the average settling time of flooding and the lower level model maximizes the energy efficiency of the whole network. Furthermore, one numerical example is introduced to validate the programming model which shows that the result is feasible and efficient.

Key words: wireless sensor network; bi-level programming model; optimal packet size; optimal transmission radius

摘要: 能效及健壮性一直是大规模无线传感器网络研究的重点.当应用程序在基站进行广播查询时,通常采用泛洪这种鲁棒性强的方法对每个节点发送数据包.泛洪传播不仅会在较长时间内占用整个网络通信信道,影响正常的数据传输,它还将消耗大量的能量.在分析节点传输半径对泛洪平均建立时间(此时,网络中的所有节点都传输完泛洪数据包)以及数据包长度对传感器网络能效影响的基础上,提出了一个双层规划模型.上层模型的目标是设定最优节点传输半径,使泛洪平均建立时间最小;下层模型在上层模型的影响下,通过设定最优数据包长度使网络的能效达到最大.最后,通过数值分析说明了双层规划模型模拟泛洪传播及设定最优数据包长度是可行并且有效的.

关键词: 无线传感器网络;双层规划模型;最优数据包长度;最优传输半径

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

^{*} Supported by the Presidential Foundation of the Graduate University of the Chinese Academy of Sciences under Grant No.yzjj200503 (中国科学院研究生院院长基金); the Scientific Research Startup Foundation of the Graduate University of the Chinese Academy of Sciences under Grant Nos.055101A, KYQD200502 (中国科学院研究生院科研启动基金)

Received 2006-05-09; Accepted 2006-10-10

无线传感器网络包含着大量装备有嵌入式处理器、传感器以及无线电收发部件的节点.这些节点相互协作共同完成诸如环境监测、空间探测等任务^[1].在很多应用中,传感器网络与 Ad hoc 网络一样无须规划,它们以自组织方式形成多跳的无线通信网络.

在传感器网络中,应用程序通常采用泛洪(flooding)方式将信息传播到整个网络中.尽管泛洪有其独特的优势^[2]——它可以保证网络中所有可达节点都接收到数据包,但其缺点也非常明显,文献[3]讨论了网络风暴问题,并指出了其危害.因此,尽可能地减小泛洪数据包的平均占用信道时间是至关重要的.文献[4]考虑了泛洪方式下的最优节点传输半径问题,并将泛洪平均建立时间作为衡量节点最优传输半径的指标.此外,文献[5]对加大或者减小传输半径作了讨论:减小传输半径将减少邻居节点竞争信道的冲突,加大传输半径将减少源节点到 sink 节点的跳数.另有一些学者研究了在通信网络中如何设定最优数据包长度的问题^[6],文献[7]针对传感器网络的最优包长问题提出应将能效作为考虑的重点,并作了深入的分析.但多数文献未将网络系统参数(如节点传输半径、数据包长度)综合在一起考虑,本文拟通过设定最优节点传输半径以及数据包长度来尽可能地最小化泛洪数据包占用信道时间及最大化节点传输能效.

本文假定:(1) 每个节点有确定且相同的传输半径,并以静态格子网络方式排布在一个矩形区域中;(2) 节点采用固定长度的数据包进行数据传输.在大规模传感器网络中,我们可以不考虑以下两种特殊情况:(1) 节点采用仅保证网络连通的最小传输半径;(2) 节点采用可以覆盖整个网络的最大传输半径.

本文第 1 节分析网络泛洪中的各种时间及其表达式,建立双层规划模型的上层模型,目标是使泛洪数据包的建立时间 T_S 最短.第 2 节给出双层规划模型的下层规划模型,目标是使网络的能效在上层模型的限制下最大.第 3 节分析双层规划模型的求解方法并给出明确的启发式求解算法.第 4 节在上述章节的基础上作数值分析并验证所建的模型是可行并且有效的.第 5 节得出结论并给出进一步的工作.

1 网络泛洪时间分析及上层规划模型

网络泛洪有如下时间定义^[4]:(1) 接收时间(T_R):表示网络中的所有节点都接收到泛洪包的平均时间;(2) 竞争信道时间(T_C):表示网络中所有节点从接收到泛洪数据包到转发数据包之间的平均时间;(3) 建立时间(T_S):表示网络中所有节点都转发完泛洪数据包所用的平均时间.因此有如下的表达式 $T_S=T_R+T_C$.文献[4]分析了传输半径 R 和接收时间 T_R 之间的关系,指出 T_R 与传感器网络矩形区域的边长 S 成正比,与节点传输半径 R 成反比.在此基础上,当考虑数据包长度对 T_R 的影响时,可以得到如下的表达式:

$$T_R = k_1 L \frac{S}{R} \quad (1)$$

其中, k_1 为常数.而在格子网络中,当假定所有节点个数为 N 时,可知邻居节点个数 $\bar{m} = \pi \frac{R^2}{S^2} N$ ^[4],以及竞争信道时间 $T_C = k_2 \ln^2 \left(\pi \frac{R^2}{S^2} N \right)$ ^[4],其中 k_2 为固定的常数.

又由等式 $T_S=T_R+T_C$,可以构造上层规划模型为

$$(U) \quad \min_R T_S = k_1 L \frac{S}{R} + k_2 \ln^2 \left(\pi \frac{R^2}{S^2} N \right) \quad (2)$$

上层规划模型(U)中有两个未知量,分别为 R 和 $L(L=l+\alpha)$.上层规划模型(U)仅能控制变量 R ,而 L 是通过下层规划模型(L)传递上来的,此是已知的参数.因此,上层规划模型(U)表示在给定的数据包长度 L 下,通过优化 R 寻找使泛洪对传感器网络中 T_S 最小的策略.

2 节点、信道中的能耗及下层规划模型

数据链路层的数据包是无线传感器网络中相邻节点通信的最基本的传输实体.数据包一般包括一个 α 比特长度的包头、 l 比特长度的有效负荷以及 τ 比特长的包尾.包头一般包括:事件/地点/事件属性等信息,有效负荷包

含了传感器节点采集到的信息,包尾内容包括错误控制编码等内容.当数据包不采用错误控制编码(如 BCH 编码)而仅采用 CRC 检验时,可以近似地认为 $\tau=0$ ^[7].由文献[8]可知,当传输 1bit 数据时,节点传输能量 E_{tx} 有以下结果: $E_{tx}=E_{ele}+E_{amp}$.其中, E_{ele} 为非发射设备(频率合成器、混频器、滤波器等)所消耗的能量,当选用的传感器节点确定后, E_{ele} 也就随之确定. E_{amp} 为发射设备所消耗的能量,其大小由 $E_{amp} = \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}}$ ^[8] 确定.其中, β 是与硬件有关的一个常数,当传感器节点选定后,其值确定. γ 表示路径衰减因子,而 η_{amp} 表示发射器的放大率.因此,网络中节点单跳传输所消耗的能量为(默认 $\tau=0$):

$$E_{1hop} = (l + \alpha)(E_{tx} + E_{rx}) = (l + \alpha) \left(E_{ele} + \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}} + E_{rx} \right) \tag{3}$$

其中, E_{rx} 为节点接收 1bit 信息所需能量,当传感器节点选定后其值确定.在常见的 MAC 协议中,如 S-MAC^[9], T-MAC^[10] 等主要采用 RTS-CTS-ACK 方式确保两节点间数据的可靠传输.当需要传输总量为 n 比特信息时, MAC 层协议会将这些信息分装到 $\lceil \frac{n}{l} \rceil$ 个数据包中,并采用突发方式进行传输^[9,10](如图 1 所示).即在发射方发送完一个 RTS 包和接收方接收一个 CTS 包后,进入数据传输状态.当发送方传输完一个数据包后,接收方均需发出 ACK 包确认已经收到该数据包,然后发送方发出下一个数据包.在整个传输的过程中,其他邻居节点根据数据包上的剩余时间位全部转入休眠,并在所有数据突发传输完成后再次进入侦听状态.因此在考虑能量消耗时,仅需考虑传输双方的能量消耗.

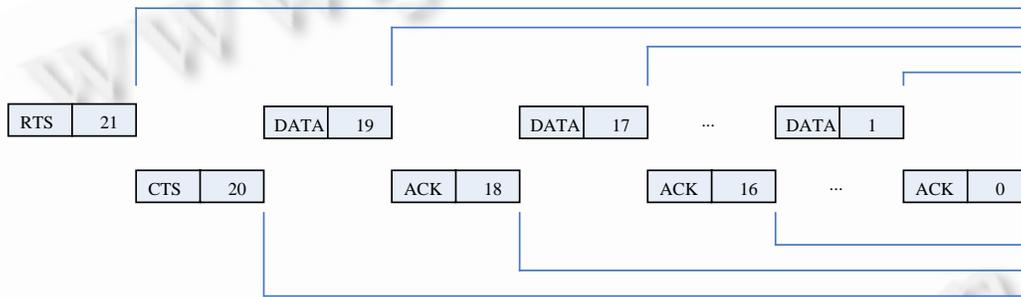


Fig.1 Message passing

图 1 数据包传输

设 RTS,CTS 以及 ACK 数据包的有效负荷长度均为 ρ ,则在传输 n 比特的数据时,控制包所需能量 $E_{control}$ 为

$$E_{control} = \left(2 + \left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil \right) \left[(l + \rho) \left(E_{ele} + \frac{(\beta)R^\gamma}{\eta_{amp}} + E_{rx} \right) \right] \tag{4}$$

在式(3)和式(4)的基础上可知,当需要传输 n 比特的数据时,总的能量消耗 E_{total} 为

$$E_{total} = E_{data} + E_{control} = \left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil E_{1hop} + \left(2 + \left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil \right) \left[(l + \rho) \left(E_{ele} + \frac{(\beta)R^\gamma}{\eta_{amp}} + E_{rx} \right) \right] \tag{5}$$

无线传感器网络中,当数据在信道中传输时,有某些比特位可能会出现错误,此时,正确接收数据包的概率为 $(1-p)^{l+\alpha}$ ^[7],其中, p 为突发错误率(burst error rate).以 RFM-TR1000 无线接收机^[11]为例, p 与邻居节点的距离(传输半径)有关,本文则采用经验公式^[11]: $p = \frac{1}{570 - 10\beta_1 \log(R)}$,其中, $\beta_1=4$ 为路径衰减因子(室内使用为 $\beta_1=3.5$,在室外使用 $\beta_1=4$).

为了使数据传输能效最大,在式(5)的基础上,构造下层规划模型(L)为

$$(L) \quad \max_l \eta = \frac{n \left(E_{ele} + \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}} \right)}{E_{total}} (1-p)^{l+\alpha} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad l=8t, \text{ integer } t \geq 0 \quad (7)$$

在规划模型(L)中,未知的变量为 R 和 l ,且规划模型(L)仅能控制变量 l , R 为上层规划模型(U)传递下来的此时已知的参数.因此,目标函数式(6)要求在给定的传输半径 R 下,传输过程中能量损失最小;式(7)要求有效负荷的长度 l 以字节(8bit)为计算单位.

3 双层规划模型求解分析及其算法设计

双层规划问题是主从递阶决策问题中的一个特例,仅考虑只有两层决策者的情形.它最初是由 Von Stackelberg 于 1952 年在研究市场经济问题时提出来的,因此,该问题有时也称为 Stackelberg 问题.在综合以上两节提出的规划模型的基础上,可以用如下的双层规划模型集中表述:

$$(P)(U) \quad \min_R T_s = k_1 L \frac{S}{R} + k_2 \ln^2 \left(\pi \frac{R^2}{S^2} N \right),$$

其中,上层规划模型中的 L 可以通过反应函数 $L(R)$ 得到.

$$(L) \quad \max_l \eta = \frac{n \left(E_{ele} + \frac{\beta R^\gamma}{\eta_{amp}} \right)}{E_{total}} (1-p)^{l+\alpha},$$

$$\text{s.t.} \quad l=8t, \text{ integer } t \geq 0.$$

双层规划模型(P)的上层规划模型(U)是一个无约束规划问题,若对其求解,则可令 $\frac{d(T_s)}{dR} = 0$,此时

$$k_1 L \frac{S}{R^*} = 4k_2 \ln \left(\pi \frac{R^{*2}}{S^2} N \right) \quad (8)$$

当求解式(8)后,即可以得到最优半径 R^* 的表达式.

双层规划模型(P)的下层规划模型(L)是一个非线性整数约束优化模型,一般不易求得该模型的精确解.综合考虑模型求解(L)的求解开销与解的精度后,可以对模型(L)做近似转化.将模型(L)中的整数约束部分松弛,取消约束条件式(7),进而用一个无约束非线性优化模型代替原问题,并认为近似问题的最优解即为原问题的最优解.此时对式(6)求导,令 $\frac{d(\eta)}{dl} = 0$,从而得到模型(L)的近似最优解.由于 $\left\lfloor \frac{n}{l} \right\rfloor$ 在求导过程中不方便计算,可以将

$\left\lfloor \frac{n}{l} \right\rfloor \approx \frac{n}{l}$ 处理(该处理不影响最终结果^[8]).处理后的结果为

$$\frac{d(\eta)}{dl} = - \frac{l(1-p)^{l+\alpha} (R^\gamma \beta + E_{ele} \eta) (2l^2 - n\alpha - n\rho)}{(R^\gamma \beta + E_{ele} \eta + E_{rx} \eta) (2l^2 - 2nl + n\alpha + 2l\rho + n\rho)^2} + \frac{l(1-p)^{l+\alpha} (R^\gamma \beta + E_{ele} \eta) [1 + l \log(1-p)]}{(R^\gamma \beta + E_{ele} \eta + E_{rx} \eta) (2l^2 - 2nl + n\alpha + 2l\rho + n\rho)} \quad (9)$$

由于式(9)的代数表达式过长,无法对式(9)直接求解方程并得到最优解 $l^* > 0$ 的代数表达式.当 $E_{ele}, E_{rx}, \beta, n, \alpha, \rho$ 以及 p 等参数确定后再对式(9)求解就有可能得到 l^* 的较为简单的代数表达式.

对于双层规划问题,最关键的任务就是构造下层问题对上层问题的反应函数 $L(R)$,将这种函数对应关系代入上层模型中,即可求解出上层模型的最优解 R^* .由于本文中的上层规划模型(U)很特殊,在求解时可以直接得到式(8),进一步可以得到如下关系表达式:

$$L = 4 \frac{k_2}{k_1 S} R^* \ln \left(\pi \frac{R^{*2}}{S^2} n \right) \tag{10}$$

此时可认为式(10)为双层规划模型(P)的反应函数.当下层模型(L)确定一个最优解 L^* 后,由式(10)可以得到一个上层模型的 R^* 与之——对应.

以上我们分析了各层规划模型的求解方法,因此,可以针对双层规划问题(P)构造如下启发式求解算法:

具体计算步骤如下:

第 1 步:设定一个初始解 R^0 ,令迭代次数 $k=0$;

第 2 步:对于给定的 R^0 ,求解下层问题(L),得到 L^k ;

第 3 步:将 $L=\alpha+L^k$ 代入式(10),求解后得到新的 R^{k+1} 值;

第 4 步:如果 $|T_S^{k+1} - T_S^k| \leq \varepsilon$,则停止;否则,令 $k=k+1$,转第 1 步.其中, ε 为迭代精度.

4 数值分析

为了验证前面几节提出的模型及求解算法,我们进行数值分析.表 1 给出了数值实验所需的各种参数^[4,8,11].

Table 1 Parameters used in the numerical example

表 1 数值实验所需各种参数

Parameter	Value	Parameter	Value
E_{ele}	3.63 μ J/bit	α	16bit
E_{rx}	11.13 μ J/bit	ρ	16bit
η_{amp}	0.2	β	$10^{-1.882}$
γ	2	n	640bit
S	1 000meter	k_1	1.2×10^{-5}
k_2	0.031	N	500

分别采用 Matlab 软件对模型(U)、(L)以及双层规划模型(P)进行分析:

(1) 在仅考虑上层模型(U)时,可对模型的接收时间、竞争时间以及建立时间进行分析(如图 2 所示):当固定数据包长度 L 时,可以看出:随着节点传输半径 R 的增大,接收时间 T_R 逐渐下降,竞争时间 T_C 逐渐上升.建立时间 T_S 可以得到一个全局最小值 T_S^* .

(2) 而针对(L)模型,当固定节点传输半径 R 后,可以产生如图 3 所示的单峰曲线,进而可以得到能效的最大值.

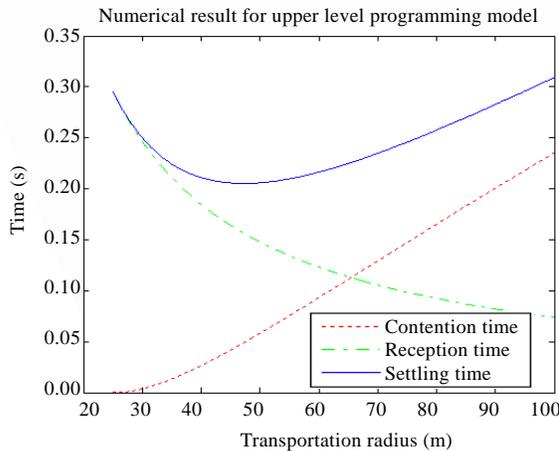


Fig.2 Numerical analyze for upper level programming model (U)

图 2 上层规划模型(U)的数值分析结果

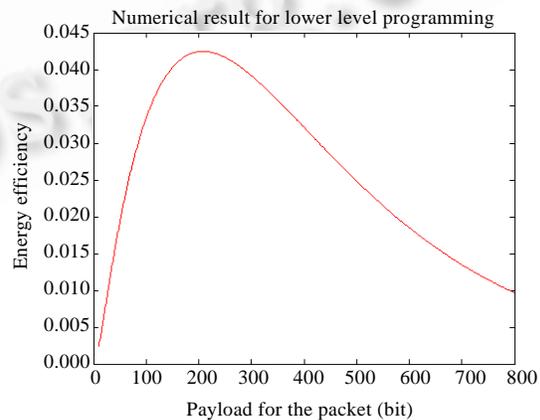


Fig.3 Numerical analyze for lower level programming model (L)

图 3 下层规划模型(L)的数值分析结果

(3) 若不固定模型(U)的数据包长度 L 及模型(L)的节点传输半径 R 时,利用上节的双层规划求解算法对大规模无线传感器网络的泛洪传播进行模型求解,模型的迭代结果见表 2.

Table 2 Iterations and solution results of the bi-level programming model with different initial setting

表 2 双层规划模型迭代步骤及求解结果

Initial setting	$R^0=20$		$R^0=50$		$R^0=80$		$R^0=110$	
Iteration 0	—	$l^0=320.867$	—	$l^0=301.551$	—	$l^0=291.401$	—	$l^0=284.425$
Iteration 1	$R^1=38.5218$	$l^1=307.111$	$R^1=37.8610$	$l^1=307.478$	$R^1=37.5105$	$l^1=307.675$	$R^1=37.2683$	$l^1=307.813$
Iteration 2	$R^2=38.0521$	$l^2=307.371$	$R^2=38.0646$	$l^2=307.364$	$R^2=38.0714$	$l^2=307.361$	$R^2=38.0761$	$l^2=307.358$
Iteration 3	$R^3=38.0610$		$R^3=38.0607$		$R^3=38.0606$		$R^3=38.0605$	

在表 2 中,模型采用了不同的传输半径初始值($R^0=20,50,80,110$)进行迭代计算,均可得到相同的最优值($R^*=38.06$).由此可知,该种启发式求解算法可以收敛于最优解.此时,最优传输半径 $R^*=38\text{m}$,最优传输包长为 $L^*\approx 41\text{Byte}$.

5 结 论

无线传感器网络一直是研究的热点问题.一些学者研究了泛洪在网络中传播的方式及性质,希望泛洪在网络中传播的时间尽可能地短,一些学者研究了传感器网络的能效问题,希望网络能效尽可能地大.本文则综合考虑了泛洪网络传播时间以及网络传输能效问题,给出了一个双层规划模型以及求解算法.最后通过数值分析说明该模型及算法是可行并且有效的.

在下一步的研究工作中,我们将完善优化模型(P),寻找更好的求解算法以及用仿真和物理实现的方法验证传感器网络系统参数之间的关系.

References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8):102–114.
- [2] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: Pichholtz R, ed. Proc. of the 6th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2000. 56–67.
- [3] Ni S, Tseng Y, Chen Y, Chen J. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. In: Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. Seattle: ACM Press, 1999. 151–162.
- [4] Zuniga ZM, Krishnamachari B. Optimal transmission radius for flooding in large scale wireless sensor networks. Journal of Cluster Computing, 2005,8(2-3):167–178.
- [5] Takagi H, Kleinrock K. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. IEEE Trans. on Communications, 1984,COM-32(3):246–257.
- [6] Akyildiz IF, Joe I. A new ATM adaptation layer for TCP/IP over wireless ATM networks. Wireless Networks, 2000,6(3):191–199.
- [7] Sankarasubramanian Y, Akyildiz IF, McLaughlin SW. Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA). Anchorage: IEEE CS Press, 2003. 1–8.
- [8] Chen P, Dea BO, Callaway E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless Ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. New York: IEEE CS Press, 2002. 945–952.
- [9] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the INFOCOM 2002. San Francisco: IEEE CS Press, 2002. 1567–1576.
- [10] Dam TV, Langendoen K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the SenSys 2003. Los Angeles: ACM Press, 2003. 171–180.

[11] ASH Transceiver Designer's Guide. 2004. www.rfm.com/products/tr_des24.pdf



赵彤(1976—),男,湖北武汉人,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络优化与设计,城市交通网络分析与设计.



郭田德(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,模式识别与计算机通信.



杨文国(1974—),男,博士,讲师,主要研究领域为无线传感器网络优化,交通网络流分析.

中国科学院软件研究所筹建国内首家软件博物馆

近日,中国科学院软件研究所发起建设我国首家以计算机软件为主题的软件博物馆。

软件博物馆旨在记录软件发展历程,展示软件发展成就,传播软件科技知识,宣传软件科学文化。软件博物馆将以丰富而翔实的史料及珍贵的实物,将计算机软件从起步到现在的发展状况以及未来发展趋势生动、直观地展示给大众。通过各种展示手段,追溯软件的发展历程,发掘软件文化内涵,弘扬科学精神,普及科技知识。

软件博物馆计划于2008年中期向公众开放。目前,正面向社会各界广泛征集能够反映国内、外软件发展历程和软件发展成就的实物、照片、回忆文章、模型、成果展示材料等。有捐赠意向的单位及个人请与软件博物馆建设办公室联系。

联系地址:北京市中关村南四街4号中科院软件园区5号楼202室

邮政编码:100080

联系人:李洁

E-mail: rjbwg@iscas.ac.cn

电话:86-10-62661035

传真:86-10-62661035