

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211480

基于 M/M/1/N/∞ 排队模型的低功耗 输电铁塔组立监测系统^{*}

张龙斌¹ 刘少波³ 唐波^{1,2} 高智宇¹ 刘思煜¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002;

3. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司 宜昌 443002)

摘要: 传统输电铁塔组立监测系统存在无效能耗的数据传输空闲状态,致使其续航时间难以满足实际工程需求。为此,本文基于将空闲时间段的传感器转为低功耗休眠状态的思想,提出了一种适用于输电铁塔组立监测系统数据传输的 M/M/1/N/∞ 排队模型,推导了监测系统中数据传输的分布方程,通过求解监测数据等待队长与有效输入率的比值和确定对应的数据传输轮换次数,确定了各传感器的数据传输空闲时间,实现了将处于空闲时间段的传感器转为休眠状态的低功耗工作模式。据此方法,研制的输电铁塔组立监测系统在周宁~宁德 500 kV 线路工程 6 天的实际监测过程中共耗电 24%,续航时间与传统方法相比提升了 1.9 倍,满足监测系统续航时间大于单基铁塔组立施工周期的工程需求。

关键词: 输电铁塔组立监测系统; M/M/1/N/∞ 排队模型; 数据传输空闲时间; 休眠状态

中图分类号: TM7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.7

Low-power transmission tower assembly monitoring system based on M/M/1/N/∞ queuing model

Zhang Longbin¹ Liu Shaobo³ Tang Bo^{1,2} Shang Zhiyu¹ Liu Siyu¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China;

3. Yichang Electric Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443002, China)

Abstract: The traditional transmission tower assembly monitoring system has the idle state of data transmission with invalid energy consumption, which makes its life time difficult to meet the engineering needs. Therefore, based on the idea of turning the sensors in the idle time period into low-power sleep state, this paper proposes an M/M/1/N/∞ queuing model suitable for data transmission of transmission tower assembly monitoring system, deduces the distribution equation of data transmission in the monitoring system, and determines the corresponding rotation times of data transmission by solving the ratio of monitoring data waiting length to effective input rate. The idle time of data transmission of each sensor is determined, and the low-power working mode of turning the sensor in the idle time period into sleep is realized. According to this method, the developed transmission tower assembly monitoring system consumes 24% of power in the 6-day actual monitoring process of Zhouning Ningde 500 kV Line Project, and the endurance time is increased by 1.9 times compared with the traditional method, meeting the engineering demand that the endurance time of the monitoring system is greater than the construction cycle of single base tower assembly.

Keywords: monitoring system of the power transmission tower assembly; M/M/1/N/∞ queuing model; data transmission idle time; sleep state

0 引言

随着电力物联网的发展,在线监测技术开始逐步应用

在输电铁塔组立施工领域。但施工现场常位于无稳定电源的野外,且施工周期一般要持续 10 余日^[1]。并且,位于高空施工用绳索和器具上的监测设备一旦安装,难以拆卸

收稿日期:2022-09-21

^{*} 基金项目:湖北省重点研发计划项目(2020BAB110)、国网福建省电力有限公司科技项目(52130T200001)资助

充电。因此,续航能力已成为制约输电铁塔组立监测系统发展的关键。

输电铁塔组立施工现场在荒郊野外,电源线路难以搭接且易发生损坏,监测系统多采用电池供电^[2]。电池需嵌于铁塔组立施工绳索和器具内部,监测系统的电池体积不可能过大以致蓄电容量有限,致使监测系统续航时间无法达到单基铁塔组立所需的施工周期。如文献[3]研制的组塔施工绳索受力测控仪的续航时间仅为 8 h,导致施工过程中供电电源需要反复拆装,严重影响组塔施工效率。为延长系统续航时间,文献[4]提出了加装太阳能电池板的方法,以完成系统电能的持续补充,但太阳能电池板在野外组塔施工中容易损坏,且供电效果受环境影响欠佳。另外,在输电在线监测设备上也有采用感应取电的获能方法^[5],但该技术需要设备空间周围具有一次电流,无法在输电铁塔组立等前期施工监测中应用。因此,单纯从硬件设计层面难以较大幅度提高输电组塔监测系统的续航能力。

现有研究表明,监测系统的大部分能量消耗在数据传输上^[6]。为减少监测系统在数据传输过程中的能量消耗,陆续出现了 MAC 协议^[7]和 S-MAC 协议^[8]等低功耗的数据传输方式。这些方式的基本思想是将处于数据传输空闲时间段的传感器转为低功耗的休眠状态,但该思想仅局限于应用在类似室外温度监测等仅具有单一传感器的监测系统。而对于输电铁塔组立等多监测点系统,多个传感器之间复杂的数据传输空闲时间就很难设定,以至于无法明确系统中各传感器何时转为低功耗的休眠状态。因此,对于输电铁塔组立监测系统来说,若采用低功耗的休眠策略,首先必须精准确定系统内各传感器的数据传输空闲时间。

考虑到监测系统中各传感器采集的数据经信道传输到达终端的过程与顾客排队购票等过程类似,排队理论被广泛应用在复杂数据传输的相关研究中^[9]。如文献[10]将排队理论应用于战术通信空闲时间的研究。这实际上对确定输电铁塔组立监测系统各传感器数据传输空闲时间提供了参考。因此,本文针对输电铁塔组立监测系统的数据传输特性,基于将空闲时间段的传感器转为休眠状态的思想,提出了一种适用于输电铁塔组立监测系统数据传输的排队模型,确定了各传感器的数据传输空闲时间,实现了将处于空闲时间段的传感器转为休眠状态的低功耗工作模式,完成了输电铁塔组立监测系统的低功耗设计。

1 监测系统的低功耗需求及解决思路

1.1 输电铁塔组立监测系统的低功耗需求

输电铁塔组立施工的流程为地面施工人员借助牵引系统将已组装好的塔片从地面起吊至高空;高空作业人员将塔片安装在已组塔段上,并在相关组塔构件上安装辅助绳索维持其受力平衡,依次逐段完成输电铁塔组立施工^[11]。单基输电铁塔组立施工周期一般为 10 余天,如遇到风雨等恶劣天气,施工周期会大幅度延长。

为确保组塔施工的安全进行,工程中一般要求使用施工监测系统,其核心装置是采集施工风险点数据的多种类型传感器。各传感器需要电能供应才能正常工作,但因输电组塔施工多位于山区且施工现场器具复杂,有线电源线路不仅难以搭接而且容易折断,各传感器只能通过内嵌锂电池完成电能供应。同时,组塔施工又涉及大量高空作业,各传感器需随待监测的组塔构件安装于空中,当传感器内的电池电能耗尽后,需要施工人员攀登至高空监测点更换电池,严重影响施工安全和效率。输电铁塔组立施工常用的内悬浮抱杆组塔施工现场布置示意图如图 1 所示。

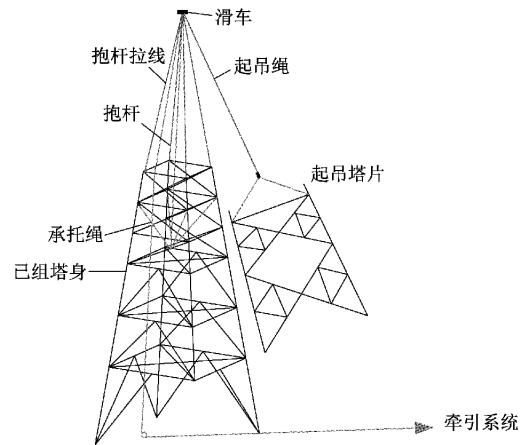


图 1 内悬浮抱杆组塔施工现场布置示意图

综上所述,由于输电铁塔组立施工环境的复杂和施工方式的特殊,其对监测系统在低功耗性能方面有着天然性的需求。为不干扰组塔施工的正常进行,输电铁塔组立监测系统从初始安装好后,续航时间应大于单基铁塔组立的施工周期。

1.2 监测系统的数据传输模式

输电铁塔组立监测系统工作时,若多组数据同时传输将会相互干扰,导致接收到的数据杂乱有误。因此,系统通常采用多采集数据的轮询传输^[12],即各传感器采集数据轮换占用传输信道,依次循环完成数据传输,该数据传输模式如图 2 所示。在这种情况下,传感器从完成一轮数据传输为止到下一轮数据传输开始,完全处于空闲状态。处于空闲状态的传感器虽没有进行有效监测数据的传输,却以一定的功率消耗电能,导致系统总体能耗严重。

因此,若想降低系统中各传感器处于空闲状态的能耗,可将处于空闲时间段的传感器转为低功耗休眠状态。然而,采用此种低功耗技术时必须精确确定各传感器何时完成数据传输,即进入空闲状态。目前,一般是通过数据传输量与传输速率的比值确定各监测传感器何时完成数据传输后进入空闲状态。但实际数据传输过程中往往存在数据传输延迟^[13],并且数据传输延迟时间难以确定,以至于无法精确确定各传感器的数据传输空闲时间。如果求得的空闲时间过短,则无法将全部空闲时间段的传感器转为低功耗

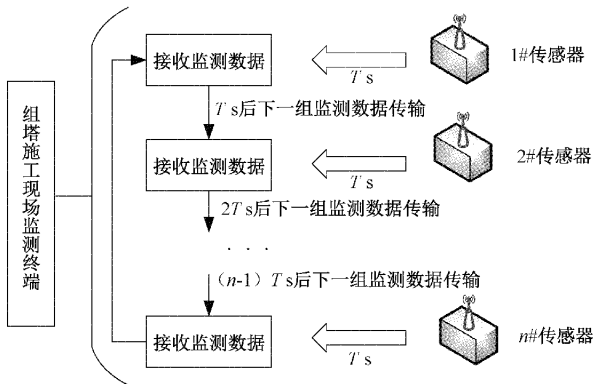


图 2 监测系统采集数据的轮询传输

休眠状态, 致使其节能效果欠佳; 但如果求得的空闲时间过长, 传感器不能在应进行数据传输时被唤醒, 监测终端得到的数据将产生缺失, 致使监测人员不能全面监测施工的风险信息。因此, 精确确定各传感器的数据传输空闲时间对输电铁塔组立监测系统的低功耗运行至关重要。

1.3 基于排队论的数据传输空闲时间确定

输电铁塔组立监测系统中, 监测数据自传感器传输至监测终端的过程可以分为 3 部分, 分别是各传感器采集数据的输入, 输入的监测量经信道传输到达监测终端, 监测终端对数据的接受与处理。

系统各监测数据经信道传输到达监测终端的过程, 可看作具有一定规律的大量数据经有序排列向前行进的过程, 这与顾客排队购票等排队过程十分类似。这样, 传感器采集数据的输入可视为具有一定到达规律的顾客源; 输入的监测量经信道传输到达监测终端可视为顾客经过排队等待到达服务台; 监测终端对数据的接受与处理可视为服务台处理排队顾客的服务需求。因此, 系统中各传感器的数据传输过程与排队过程高度类似, 故可将输电铁塔组立监测系统各传感器的数据传输延迟时间类比为顾客在排队过程中的等待时间。那么, 采用一种适用于输电铁塔组立监测系统数据传输的排队模型, 即可确定系统中各传感器何时完成数据传输, 再结合其需要等待的轮换次数, 从而得到系统中各传感器具体的数据传输空闲时间。

确定各传感器的数据传输空闲时间后, 即可将此段时间的传感器转为低功耗休眠状态, 在空闲时间结束后通过时钟定时唤醒, 以提高输电铁塔组立监测系统的续航时间。

2 基于 M/M/1/N/∞ 排队模型的数据传输空闲时间计算

2.1 M/M/1/N/∞ 排队模型的确定

排队论是运筹学的分支学科, 通过对服务对象到来及服务时间的研究, 得到服务对象排队长度、等待时间等排队指标的相关规律^[14]。一个完整的排队模型应由顾客到达时间间隔、服务时间、服务台个数、系统容量、顾客源数量和服务规则, 共 6 要素组成。这 6 个要素依次用 X/Y/Z/A/

B/C 表示, 即可表示整个排队模型。从现有研究来看, 6 个要素具有多种表达类型^[15]。为便于通过排队论模型求得输电铁塔组立监测系统中各传感器的数据传输空闲时间, 需根据监测系统的数据传输特性确定排队论模型 X/Y/Z/A/B/C 中 6 个要素的具体形式。

对于时间间隔 X 和服务时间 Y 的表达类型, 在文献[16]中明确指出在无线监测系统的数据传输过程中, 各数据相继到达监测终端的时间间隔 X 和监测终端完成数据处理时间 Y 均服从负指数分布, 通常均用 M 表示。对于服务台个数 Z 的表达类型, 考虑到监测系统是多组监测数据传输至同一个监测终端, 故其数量为 1。对于系统容量 A 的表达类型, 因监测系统的数据容量是确定的具体数值, 可用自然数 N 表示。对于顾客源数量 B 的表达类型, 由于监测系统在组塔工作时将不断地采集实时组塔施工数据, 因此对应的顾客源数目为无穷多个。对于服务规则 C 的表达类型, 监测系统中各传感器先输入的数据将先被监测终端接受和处理, 对应着排队论中较为普遍的先到先服务 (first come first served) 规则, 在监测系统的实际应用中不进行表示。

综上所述, 输电铁塔组立监测系统最终采用 M/M/1/N/∞ 排队模型进行数据传输空闲时间的计算。排队论模型在输电铁塔组立监测系统中的具体的对应关系如图 3 所示。

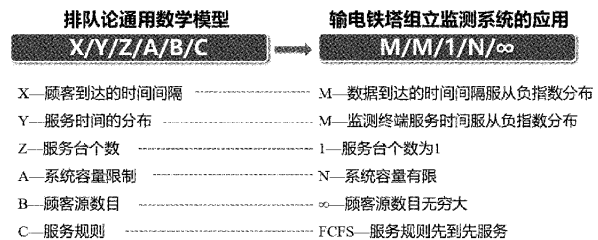


图 3 排队论在输电组塔监测系统中的应用形式

2.2 数据传输空闲时间的计算

计算监测系统中各传感器的数据传输空闲时间时, 首先需要明确其何时完成数据传输, 以及对应的数据传输轮换次数。对于轮换次数可直接由监测系统中传感器的数量确定; 复杂的是确定各传感器数据传输完成的过程, 这需要考虑数据传输过程中的延迟时间。此时, 就需要采用排队论的基本思想, 即通过各数据到达监测终端的时间间隔和监测终端完成数据处理时间的分布特性, 确定系统中存有若干传输数据的概率分布方程, 进而求解数据传输延迟时间。

因在输电铁塔组立监测系统中, 数据相继到达监测终端的时间间隔和监测终端完成数据处理时间均服从负指数分布 M, 参考对应的 M/M/1 排队论模型中有顾客 k 个排队的概率分布方程^[17], 可得到系统中有 k 个传输数据的概率分布方程:

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{(n\rho)^k \pi_0}{k!}, k = 1, 2, \dots, n-1 \\ \frac{n^n \rho^k \pi_0}{n!}, k = n, n+1, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

$$\pi_0 = \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{(n\rho)^k}{k!} + \frac{(n\rho)^n}{n!(1-\rho)} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: $\rho = \lambda/\mu$; π_k 为系统中有 k 个传输数据的概率; ρ 为服务强度; λ 为数据输入率; μ 为数据处理率; n 为数据接收端的个数。

因输电铁塔组立监测系统对应的 M/M/1/N/∞ 排队模型, 数据接收端的个数 $n=1$, 可将系统中有 k 个传输数据概率的分布方程简化:

$$\pi_k = (1-\rho)(\rho)^k \quad (3)$$

与排队论中排队顾客的概率分布方程存在区别的是, 监测系统的数据容量 N 是有限的。当系统中现有数据量达到数据容量 N 值时, 后续输入的监测数据无法排队进入系统接收处理。因此, 在计算监测系统中有 k 个数据的概率时, 不应以全概率 1 作为基准值, 全概率是系统中现有数据量未达到 N 值时的所有情况。因此, 系统中有 k 个传输数据的概率分布方程应在式(3)的基础上做适当调整:

$$\pi_k = \frac{(1-\rho)(\rho)^k}{1-(\rho)^{N+1}} \quad (4)$$

在明确系统有 k 个传输数据的概率后, 可利用统计学方法, 计算系统中监测数据等待队长 L_s 的期望值 $E(L_s)$ 。但需要注意的是, 当有 k 个传输数据排队等待时, 系统中有 $k+1$ 个数据:

$$E(L_s) = \sum_{k=1}^N k\pi_{k+1} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(N+1)\rho^{N+1}}{1-\rho^{N+1}} \quad (5)$$

根据排队论中顾客排队等待时间等于排队队长与顾客有效到达率比值的结论^[18], 可得各监测数据的等待时间, 即数据传输延迟时间 T_D :

$$T_D = \frac{E(L_s)}{\lambda_1} \quad (6)$$

因为当系统数据容量已满时, 数据的实际到达率为 0。因此在计算数据的传输延迟时间时, 不能直接用数据的输入率 λ 进行计算, 而应采用数据的有效输入率 λ_1 。系统处于稳定状态时, 数据的有效输入率 λ_1 与系统中存在非零个数据的处理率相等, 据此得到 λ_1 的表达式为:

$$\lambda_1 = \mu(1-\pi_0) = \mu \left[1 - \frac{(1-\rho)}{1-(\rho)^{N+1}} \right] \quad (7)$$

系统中一个传感器完成数据传输后即进入空闲状态。因此, 一个传感器相对上一个传感器的数据传输空闲时间 T_R 为数据传输时间 T_T 和传输延迟时间 T_D 两部分之和:

$$T_R = T_T + T_D \quad (8)$$

数据传输时间 T_T 可通过传输数据字节长度 L 和无线传输速率 V 的比值计算, 结合式(6)、可得式(8)的具体表达式形式:

$$T_R = \frac{L}{V} + \frac{E(L_s)}{\lambda_1} \quad (9)$$

计算系统中各传感器数据传输空闲时间 T_F 时需考虑数据传输的轮询次数, 数据传输的轮询次数比系统中传感器数量 m 少 1。同时, 还应减去传感器进行数据采集时间 T_C 。据此, 可得系统中各传感器的数据传输空闲时间 T_F 的最后计算公式:

$$T_F = (m-1) \left[\frac{L}{V} + \frac{E(L_s)}{\lambda_1} \right] - T_C \quad (10)$$

在确定各传感器的数据传输空闲时间后, 即可将此段时间的传感器转为低功耗休眠状态。最后, 为实现对铁塔组立施工的实时监测, 还需进行配套的系统软硬件设计。

3 输电铁塔组立监测系统的设计

3.1 系统设计思路

系统功能的实现一方面需要硬件模块作为载体, 另一方面需要软件程序推动硬件模块运行, 因此, 系统的设计可分为硬件和软件两大部分进行设计。

在输电组塔施工监测的过程中, 系统需依次完成监测数据的采集、处理、传输和人机交互, 由此系统的硬件可分为数据采集模块、数据处理模块、数据传输模块和人机交互模块, 同时需要供电模块对上述模块供电。在确定 5 大硬件模块后, 需根据各模块工作流程进行集成化设计。

在进行系统的软件程序设计时, 需依照前文所述计算系统中各传感器的数据传输空闲时间。系统对监测数据的采集在塔上完成, 数据的人机交互却在施工现场地面。因此, 将系统的软件程序分为两部分, 一部分是高空采集端数据的采集、处理和发送, 另一部分是地面显示端数据的接受与人机交互。

综上, 系统总体设计流程如图 4 所示。

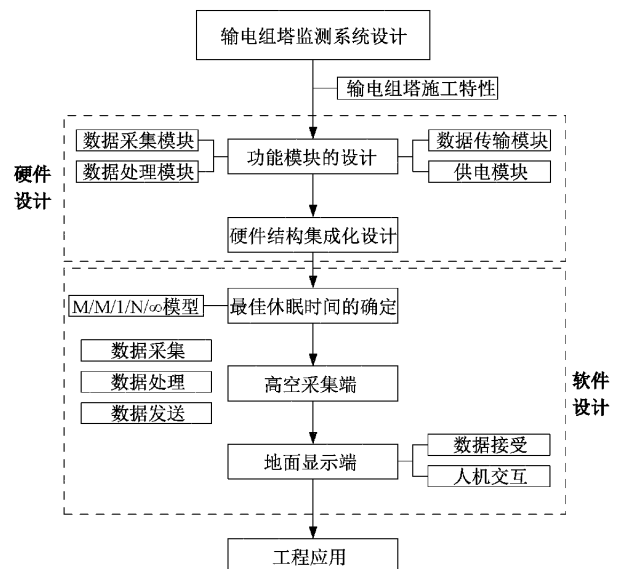


图 4 系统总体设计流程

3.2 系统的硬件设计

输电组塔施工有内悬浮抱杆组塔、内摇臂抱杆组塔等多种施工方式,不同的施工方式需要监测的施工危险点不同,因此在数据采集模块设计时,需根据具体施工方式选择合适的敏感元件,完成组塔施工危险点数据的采集。采集得到的数据经模数转换器 ADS1232 转换为数字量后即可通过单片机完成数据处理。系统选用单片机 STC12LE5616AD,根据确定的各传感器的数据传输空闲时间,通过内部的时钟计时,控制系统以休眠唤醒的低功耗工作模式进行工作。

经采集与处理后的数据,需借助传输模块传至监测终端。ZigBee 技术具有低功耗的特性,被广泛应用在无线监测系统的数据传输中^[19]。ZigBee 技术的传输速率 $V = 200 \text{ kbps}$,传输芯片具有 256 kB 的 Flash,根据设定的每组监测数据的字节长度 $L = 42 \text{ Byte}$,可得到系统的数据容量 $N = 6\ 095$ 。人机交互模块分为现场和远程人机交互模块两部分,分别以平板和电脑作为显示载体,负责接受显示和显示监测数据。当监测数据达到施工人员设定的预警值时,扬声器会自动发出预警响应。同时,各模块的工作运行均需要供电模块对其供电。

各硬件模块集成的监测系统硬件整体结构如图 5 所示。

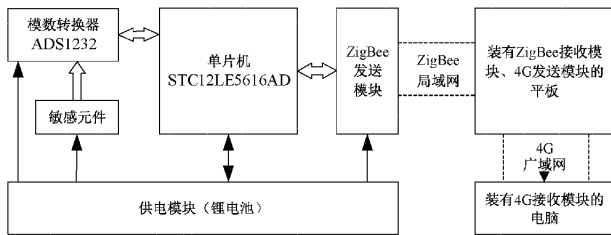


图 5 监测系统硬件整体结构

4 系统的软件设计

高空采集端程序的作用是控制系统完成数据的采集、处理和发送。为使系统能够在组塔施工出现异常情况时及时发出预警,采用占用内存小且简便的汇编语言进行编程。数据采集端程序根据确定的各传感器的数据传输空闲时间,控制其完成工作状态和低功耗休眠状态的切换。当各传感器完成一次数据传输后即进入低功耗休眠状态,时钟开始计时,当时间达到设定的数据传输空闲时间,单片机将传感器唤醒进行下一组监测数据的传输。同时,为避免高空采集端程序在数据采集过程中出现偶然误差,将 10 ms 采集数据均值作为一个标准值传给地面显示端。据此,可得设定的传感器数据采集时间 $T_c = 10 \text{ ms}$ 。同时,因每 10 ms 产生一组数据,系统的数据输入率 $\lambda = 100$ 。

地面显示端程序的作用是控制系统完成数据的接受处理和人机交互。为方便搭建人机交互窗口与快速驱动预警响应,地面显示端采用事件驱动方式的 VB 语言进行编

程。经测试,地面显示端完成一组数据的接受处理时间为 4 ms,对应系统的数据处理率 $\mu = 250$ 。当接受的监测数据大于设定的预警值时,系统将自发驱动报警装置,提醒施工人员进行相应的施工调整。对于各监测变量的预警值,施工技术人员应结合各施工方案的具体要求进行确定。

系统的软件程序流程如图 6 所示。

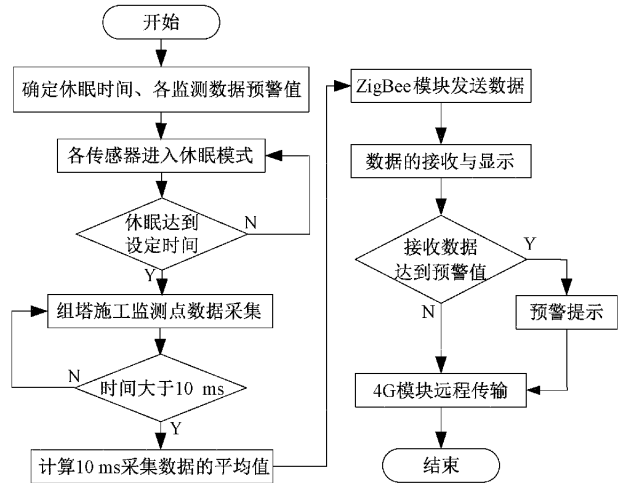


图 6 系统软件程序流程

5 内悬浮抱杆组塔监测系统的具体应用

5.1 系统简介与现场工程应用

不同的输电铁塔组立方式需要监测的危险点数量存在区别。以常用的内悬浮抱杆组塔施工为例,根据相关力学分析和工程要求^[20],需要监测 1 根起吊绳受力、4 根抱杆拉线受力、抱杆倾角、抱杆悬浮高度、塔片起吊高度和施工现场风速,共计对 9 个量进行监测。设计的内悬浮抱杆铁塔组立监测系统如图 7 所示。



图 7 内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统

根据系统软硬设计过程中确定的参数和内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统中传感器的数量,通过式(10)计算得

到的各传感器的数据传输空闲时间 $T_F=57.2$ ms。因需将数据传输空闲时间段的传感器转为低功耗休眠状态,各传感器的休眠时间 $T_H=57.2$ ms。传感器的工作时间 T_W 为数据采集时间 T_C 、数据传输时间 T_T 和传输延迟时间 T_D 三者之和, $T_W=18.4$ ms。经测试,研制的内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统中传感器处于数据传输工作状态的平均电流 $I_w=89$ mA,休眠状态时的休眠电流 $I_H=12$ mA。系统的供电模块由3节锂电池组成,每节锂电池的容量 $C=2\ 500$ mAh。

系统采用休眠唤醒的工作模式时,应计算传感器工作时的平均电流 I_A ,其中锂电池的放电系数计算取值一般为80%^[21]。

$$I_A = \frac{I_w \times T_w + I_H \times T_H}{T_w + T_H} = 30.74 \text{ mA} \quad (11)$$

在确定休眠唤醒工作模式下传感器的平均电流 I_A 后,即可计算传感器的续航时间:

$$t_2 = \frac{3C \times 80\%}{I_A} \text{ h} = \frac{3 \times 2\ 500 \times 80\%}{30.74} \text{ h} = 195.2 \text{ h} \quad (12)$$

该系统于2021年3月10日~15日在福建省周宁~宁德500 kV线路工程5A2Z-ZBC4输电铁塔组立过程中得以成功应用,现场实际应用情况如图8所示。



图8 内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统现场应用

5.2 系统功耗分析

因各监测传感器的软硬件模块大体一致,实际应用过程中的耗电情况基本相同。以系统中起吊绳受力监测传感器的电能消耗情况为例,其工作时长与电能消耗情况如表1所示。由表1中数据可知,在6天42h的监测过程中,起吊绳受力监测传感器共耗电24%。按照比例计算,监测系统中各传感器的续航时长为175h,可连续进行25天的组塔施工监测,满足输电铁塔组立监测系统续航时间大于

单基铁塔组立施工周期的功能需求。系统中各传感器在实际应用中的续航时间175h略小于理论计算值195.2h,是因为在实际工程中,受温度、气压等环境因素的影响,锂电池的放电系数往往会略低于80%。

表1 内悬浮抱杆组塔监测系统电量消耗情况

日期	监测时长/h	耗电量/%
3月10日	7	4
3月11日	8	4
3月12日	7	4
3月13日	8	5
3月14日	8	4
3月15日	4	3
总耗电量:24		

若系统不采用休眠唤醒的工作模式,则传感器一直处于工作状态,此种状态下传感器的续航时间:

$$t_1 = \frac{3C \times 80\%}{I_w} = \frac{3 \times 2\ 500 \times 80\%}{89} \text{ h} = 67.4 \text{ h} \quad (13)$$

对于设计的内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统,以传统的工作模式进行工作时,各传感器续航时间 $t_1=67.4$ h。当以休眠唤醒的低功耗策略进行工作时,其续航时间 $t_2=195.2$ h,续航能力提高了1.9倍。

6 结 论

本文基于将空闲时间段的传感器转为休眠状态的思想,提出了一种适用于输电铁塔组立监测系统数据传输的M/M/1/N/∞排队模型,推导了监测系统中传输数据的分布方程,确定了各传感器数据的数据传输空闲时间,实现了将空闲时间段的传感器转为休眠状态的低功耗运行。

设计的内悬浮抱杆输电铁塔组立监测系统在福建周宁到宁德500 kV线路工程中成功应用。系统内各传感器在6天的监测过程中耗电24%左右,续航能力与传统方法相比提升了1.9倍,满足监测系统续航时间大于单基铁塔组立施工周期的工程需求。

本文提出的M/M/1/N/∞排队模型不仅可用于低功耗输电铁塔组立监测系统的研制,对于塔吊、起重机等类似施工作业监测系统的研制仍有广泛的应用空间与研究意义。

参考文献

- [1] 张福轩,万建成,程更生,等.架空输电线路铁塔组立施工技术标准体系优化研究与建议[J].中国电力,2017,50(11):59-64.
- [2] 朱永灿,黄新波,张冠军,等.输电线路在线监测设备供电电源应用分析[J].高压电器,2018,54(7):231-236.
- [3] 张毅军.无线测控安全报警系统在特高压铁塔组立施工中的应用[J].通讯世界,2020,27(7):131-133.
- [4] 崔粟晋,王雪.基于长时记忆太阳能无线传感节点能

- 量预测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 147-154.
- [5] 王黎明, 李宗, 孟晓波, 等. 基于电场感应的低功率在线监测传感器的供电技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 538-545.
- [6] WANG K, GAO H, XU X L, et al. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4051-4062.
- [7] 李瑞, 范玉刚, 张光辉. 基于 LoRa 基站的滚动轴承运行状态远程监测系统[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 65-70.
- [8] RAO Y, CAO Y M, DENG C, et al. Performance analysis and simulation verification of S-MAC for wireless sensor networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2016, DOI:10.1016/j.compeleceng.2015.11.031, 56:468-484.
- [9] 张睿, 郑国莘, 解钧捷. LTE-M 用于轨道交通 CBTC 的时延分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(2): 180-188.
- [10] 郭喆. 基于排队论的战术通信混合接入方法[J]. 电讯技术, 2021, 61(1): 58-62.
- [11] 甘凤林, 李光辉. 高压架空输电线路施工[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 110-118.
- [12] 李岩, 滕云, 冷欧阳, 等. 数据驱动的输电线路在线监测装置可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4410-4419, 4641.
- [13] CUI Y L, XU L L. Networked control for linear systems with forward and backward channels in presence of data transmission delays, consecutive packet dropouts and disordering [J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(8): 4121-4140.
- [14] PARK S W, LEE M K, PARK Y S. Analysis and improvement of communications in port areas using the queuing theory [J]. Journal of Navigation, 2020, 73(4): 912-931.
- [15] 崔凯, 王洁, 周宽久, 等. 嵌入式系统中断服务可靠性评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(8): 878-884.
- [16] 陶志勇, 王和章, 刘影. 大规模无线传感网基于 CFSFDP 和泊松混合模型的分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2017, 30(11): 1719-1728.
- [17] 盛友招. 排队论及其在现代通信中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 85-106.
- [18] 杨小龙, 谭学治, 关凯. 认知无线网络中基于抢占式排队论的频谱切换模型[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 379-388.
- [19] 贾登, 骆学理, 刘成, 等. 基于 ZigBee 的无线压力采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(11): 114-119.
- [20] 徐国庆, 吕超英, 肖贵成, 等. 悬浮抱杆组塔全程监控系统的应用[J]. 电力建设, 2012, 33(9): 106-108.
- [21] 周利明, 韦崇峰, 苑严伟, 等. 基于无线传感网络的改碱暗管排盐监控系统[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 89-97.

作者简介

张龙斌, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电工程及其在线监测。

E-mail: 1396464101@qq.com

刘少波, 高级工程师, 主要研究方向为电工装备安全与评估。

E-mail: liushaobo@foxmail.com

唐波(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为输变电工程电磁环境及其在线监测。

E-mail: tangboemail@sina.com

尚智宇, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电工程及其在线监测。

E-mail: 1064091568@qq.com

刘思煜, 硕士研究生, 主要研究方向为输变电工程及其在线监测。

E-mail: 1070123064@qq.com