

文章编号 1004-924X(2014)09-2389-10

热电耦合无线传感能量管理系统及其 在精密主轴热监测中的应用

李 晟¹, 姚鑫骅², 傅建中², 陈子辰²

(1 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018;

2 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对无线传感器热电耦合自供能存在的输出电量低和电压波动等问题,提出一种新型能量管理系统电路拓扑结构及基于最优时间的充放电控制策略,以保证自供能无线传感器在各种主轴转速条件下稳定工作。建立了机床主轴的热网络模型,分析了热发电能量管理系统输入特性。然后,设计了能量管理系统的多电容电路拓扑结构,并通过电容充放电时间参数的优化计算,获取最优的热发电平均输出功率。实验研究证实了在主轴不同转速下热发电构件及能量管理系统可以使无线传感器稳定的工作。对不同的电容充电和放电时间设置方案进行了比对,验证了最优时间控制策略的优越性。最后,利用热电耦合自供能无线传感器和传统有线传感器所监测的温度数据分别进行了主轴轴向热变形建模实验,结果表明:采用无线传感器可以监测有线传感器难以配置的主轴核心部件,从而获取和主轴热变形具有更高相关性的温度数据,使所建热变形预测模型的误差减少约40%以上。

关键词:数控机床;能量管理系统;无线传感器;主轴;机床;热控制

中图分类号: TG659; TH161 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2389

Power management system for thermoelectric coupling wireless sensing and its application to thermal monitoring of precision spindle

LI Sheng¹, YAO Xin-hua², FU Jian-zhong², CHEN Zi-chen²

(1. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: ttaidttaid@163.com

Abstract: As the thermoelectric coupling self-powering of a wireless sensor has a lower power and a fluctuated voltage, this paper proposes a new Power Management System(PMS) and its optimal time control strategy to allow the self-power wireless sensor to work stably at different spindle speeds. A thermal network model for the tool spindle was established and the input characteristics of thermal generating power management system was analyzed. Then, a circuit topology with more capacitances for the power management system was designed, and the optimized average output power from thermal generating power was obtained by calculating the charging/discharging time parameters of capacitors. An experiment was performed, and it verifies that the wireless sensor works stably at

收稿日期:2014-01-16;修订日期:2014-03-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105336;No. 61100101)

different spindle speeds driven by thermal power generation devices and the power management system. Several schemes for setting charging/discharging time of capacitors were compared, and the superiority of the time control strategy was verified. Finally, the spindle axial thermal deformation models were established for the data from the thermoelectric coupling self-powering wireless sensor and the traditional wired sensor. The results indicate that the wireless sensor monitors the key part of the spindle that the traditional ones can not be installed in, by which the more directional temperature data relative to the thermal deformation of prediction are obtained, and the error of thermal deformation prediction model is decreased about 40%.

Key words: Numerical Control Machine(NCM); power manager system; wireless sensor; spindle; machine tool; thermal control

1 引言

在影响数控机床加工精度的因素中,机床内部热源和外部环境引起的机床热误差是数控机床等精密加工机械的最大误差源,占总制造误差的40%~70%^[1-3]。精密主轴是数控机床的关键部件,它在加工过程中的热变形情况直接影响机床的加工精度。因此,对机床主轴进行热监测一直是机床误差研究的重点。目前,热监测所采用的技术手段基本局限于传统的有线传感器,其配置需要在主轴外壳加工穿孔,由外壳的配线通道配置电源线和信号线。由于监测系统往往需要多个传感器,因此,在主轴外壳需配置多条线路,但线路往往因复杂多变的工况(如振动等)发生短路或断路使传感器失效,或降低信号传输的可靠度。为解决这一问题,无线传感器作为一种小型化、低成本、灵活易配置的新型技术手段,在主轴等旋转机械结构的监测中受到广泛关注^[4-6]。

和传统的有线监控系统相比,无线传感器所具有的灵活性适合于机床主轴恶劣监测环境(运行转速高,加工工况复杂多变、干涉因素众多、结构封闭、测量空间狭小)下的应用。但是,如何保证无线传感器在轴系工作状况下长时间可靠地传输热信号,仍缺乏系统、有效的解决方案。其中,无线传感器供能是有待解决的关键问题之一。由于电主轴的封闭性和精密性,安装在轴壳内部的无线传感器在电池能量耗尽后难以更换,一般的电池供电方式难以适用,必须考虑其它的能量获取手段。文献[7-10]提出的基于热捕获的发电方法为无线传感器提供了持久电力的可行性,所采用的热电模块由热发电构件和能量管理系统

(Power Management System, PMS)两部分组成,其中,PMS起到储能、升压、稳定输出功率的关键作用,是机床热电耦合自供能无线传感器稳定工作的基础^[8-11]。本文提出了一种新型能量管理系统电路拓扑结构,以及基于最优时间的充放电控制策略,保证了自供能无线传感器可以在各种主轴转速下稳定工作。

2 热发电能量管理系统研究现状

能量管理系统用来储存热发电所产生的电量并间歇性地驱动自供能无线传感器,一般由直流电压升压转换器(DC/DC Boost Converter)以及多个可以用来作为临时储能单元的电容组成。采用电容储能,主要是因为它具有较长的使用寿命并可以在短时间内提供高电流输出^[11-13]。最简单的PMS结构是在热发电构件输出端直接添加电容来控制输出电压^[12-14],如图1(a)所示。此结构电容电压值受到热发电构件输出电压控制的限制。为了克服这种限制,文献[11]提出了如图1(b)所示的结构,解决了电能储存能力限制的缺点,但是电压泵会造成电容充电和放电周期过长。针对此问题,文献[15]提出了如图1(c)所示的变压器式能量管理模块。

在研究中,电容充放电优化受到广泛关注。一般电容充电与放电周期的控制都是基于充电及放电电压的^[16-17],但在机床主轴的热发电过程中,由于所能提供的热能大小取决于机床转速,所以采用固定电容电压作为电容充放电的标准并不合适。不仅如此,在测试电容电压时必须添加额外的电路,这又增加了无线传感器系统的体积和

能耗。因此,本文开展了基于机床主轴热特性的自供能无线传感器热发电能量管理系统及其控制策略的研究,提出基于最优时间的充放电控制新策略。

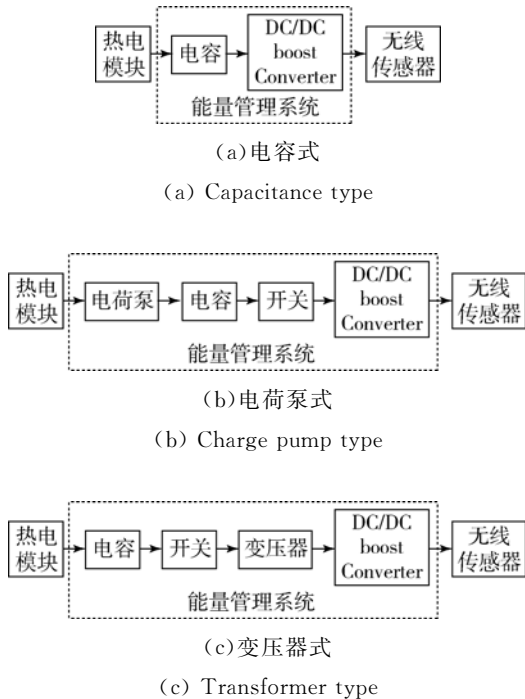


图1 能量管理系统

Fig. 1 Power management systems

3 主轴热发电能量管理系统输入特性研究

3.1 机床主轴热电耦合无线传感监测实验平台热结构分析

热发电能量管理系统的输入特性是指机床主轴热发电构件的热电转换特性,其特征决定了能量管理系统的功能和性能需求。文中对机床主轴热电耦合无线传感监测实验平台进行了分析,其结构如图2所示。

主轴是通过带传动带动的,最高转速可以达到3 000 r/min。考虑到轴承是主轴在工作时的最主要发热源,所以热电机片被安装在与轴承直接接触的导热片上。热发电构件产生的电能通过导线传出至热发电能量管理系统,能量管理系统经过处理后给无线传感器进行供能。其中,热发电能量管理系统以及无线传感器模块都被安装在主轴上,在主轴工作时跟随主轴旋转。

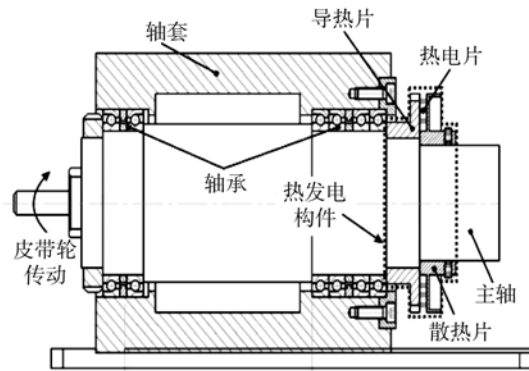


图2 机床主轴热电耦合无线传感监测实验平台

Fig. 2 Platform of thermoelectric coupling wireless sensing monitoring in spindle of machine tool

实验平台如图3所示,为主轴和电机的俯视图。其中能量管理模块以及无线传感器安装于主轴前段(图中右半部分),热发电构件安装于轴承盖处。

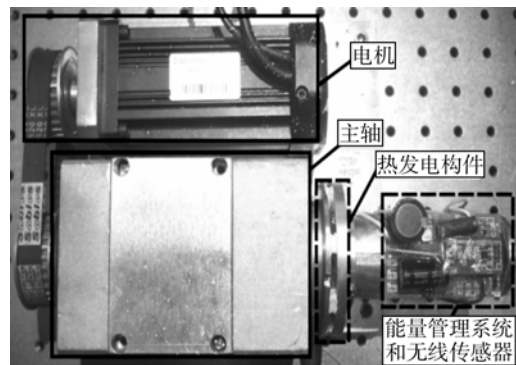


图3 实验平台实物图

Fig. 3 Picture of experimental platform

3.2 主轴热发电 PMS 输入特性建模

基于热网络理论对 PMS 输入特性(热发电构件的热电转换输出特性)进行建模分析,特征模型如图4所示。图中 Q_b 为输入热流, T_{air} 为环境温度, T_h 和 T_c 分别为热电机片热端和冷端的温度。 R_{th} 为热电机片热阻, R_o 为主轴其他结构的总热阻。主轴其它结构和空气之间的热阻为 R_{c-air} , 热电机片与空气之间的热阻为 R_{th-air} , R 为热电机片内阻。 V_s 为热电机片开路输出电压, C_t 为整体结构的综合热容。

根据热电理论可得:

$$V_s = S(T_h - T_c), \quad (1)$$

式中: S 为塞贝克系数。同时, Q_b 可以表示为^[18]:

$$Q_b = 1.047 \times 10^{-4} Mn, \quad (2)$$

式中: M 为轴承的摩擦力矩, n 为主轴的旋转速度。 M 和 n 的单位分别为 $N \cdot mm$ 和 r/min 。

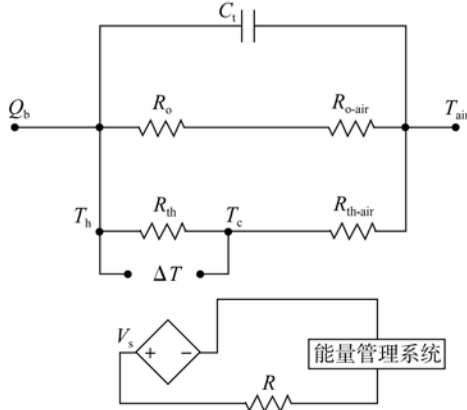


图 4 热发电能量管理系统输入特性模型

Fig. 4 Input characteristic model of thermal generating power management system

根据热发电能量管理系统输入特性模型可得:

$$\begin{cases} Q_{C_t} = C_t \frac{dT_{C_t}(t)}{dt} \\ T_{C_t}(t) = T_h(t) - T_{air} \\ T_h(t) - T_{air} = Q_o(R_o + R_{o-air}) \\ T_h(t) - T_{air} = Q_{th}(R_{th} + R_{th-air}), \\ Q_{C_t} + Q_o + Q_{th} = Q_b \\ [T_h(t) - T_c(t)]/R_{th} = \\ [T_c(t) - T_{air}]/R_{th-air} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{C_t} , Q_o 和 Q_{th} 分别为通过 C_t , R_o 和 R_{th} 的热流, $T_{C_t}(t)$ 为热容热端和空气的温度差。所有的温度均为时间 t 的函数, 当 $t=0$ 时温度等于 T_{air} 。根据热网络理论以及式(3), 可以得到如图 5 所示的热发电能量管理系统输入特性曲线, 主轴在 0 min 时刻转动, 在 140 min 时刻停转。可以看到当转速为 3 000 和 1 500 r/min 时, 热发电构件的输出电压值相差 1 倍, 且输出电压存在波动。在这种情况下, 若以电容电压作为电容充放电标准, 则对于不同转速或同一转速条件下的不同电压输出, 需要实时设置不同的电容电压来控制电容的充放电, 这是难以实现的。因此, 必须设计一种适

合于主轴热特性监测的能量管理系统及其有效的控制策略来保证传感器能量的稳定供给。

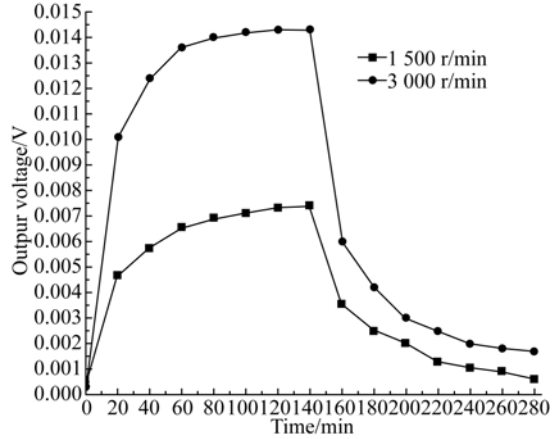


图 5 热发电能量管理系统输入特性

Fig. 5 Input characteristics of thermal generating power management system

4 热发电能量管理系统电路拓扑结构以及控制策略

根据热发电能量管理系统输入特性, 本文提出了能量管理系统的电路拓扑结构及相应的基于时间的控制策略, 电路原理如图 6 所示。在热发电能量管理系统结构设计的基础上, 提出了基于时间的控制策略, 其流程如图 7 所示, 包括初始化过程、 C_1 充电过程、 C_2 充电过程以及无线传感器发送过程。当无线传感系统启动时, 就进入初始化过程。当充电时间达到 t_{c1} 时, 开关 S_1 开启, 进入 C_2 充电过程。当 S_1 开启时间达到 t_{c2} 后, 表示 C_2 充电完成, 随即关闭 S_1 , 然后看是否总的 C_2 充电时间到达 t_{c3} , 如没有达到继续进入 C_1 充电过程, 如果到达则进入无线传感器发送过程。进入无线传感器发送过程后, 关闭开关 S_1 和打开 S_2 , 这时 C_2 给 C_3 充电同时控制器进行数据采集然后启动无线发送。

从上述流程中可以看到, 基于时间的控制策略主要控制 3 个参数: t_{c1} 、 t_{c2} 和 t_{c3} 。这 3 个参数的确定需要借助 3 个过程的等效电路, 如图 8 所示。根据图 8(a) 可得:

$$\begin{cases} I_{C_1} = C_1 \frac{dU_{C_1}(t)}{dt} \\ U_{C_1}(t) = V_s - RI_{C_1}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{C_1} 表示通过 C_1 的电流, $U_{C_1}(t)$ 表示电容两端的电压值, 它是关于时间的函数。 V_s 和 R 分别为热电片的输出电压以及其内阻。根据式(3)可以进一步得到 $U_{C_1}(t)$ 的表达式:

$$\begin{cases} U_{C_1}(t) = V_s - \Delta V e^{-\frac{t}{RC_1}} \\ \Delta V = V_s - U_{C_1}(t_0), \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{C_1}(t_0)$ 表示的是电容 C_1 的在初始时间 t_0 时刻的电压值, 即初始电压。之后, 根据电容能量公式可以得到电容 C_1 在充电期间的平均功率

$$P_a(a, t_{C_1}) = \frac{V_s^2 C_1}{2 t_{C_1}} [(1 - a e^{-\frac{t_{C_1}}{RC_1}})^2 - (1 - a)^2]. \quad (7)$$

然后, 设 $b = t_{C_1} / RC_1$ 可以修改式(7)得到:

$$P_a(a, b) = \frac{V_s^2 R}{2b} [(1 - a e^{-b})^2 - (1 - a)^2], \quad (8)$$

其中: R 为常数, $0 < a < 1, b > 0$ 。由式(8)可以看到需要求解的 t_{C_1} 和热发电构件输出电压 V_s 无关, 而 $P_a(a, b)$ 存在一个最大值点, 其值为 $P_a(0.53, 0.08)$, 通过计算可以得到最优值 $\Delta V = 0.53 V_s$ 和 $t_{C_1} = 0.08 RC_1$, 由于 R 为常数, C_1 为

(P_a) 的表达式:

$$P_a = \frac{1}{2 t_{C_1}} C_1 \{ [U_{C_1}(t_{C_1})]^2 - [U_{C_1}(t_0)]^2 \}. \quad (5)$$

根据式(4)以及式(5), 可以得到平均功率的修改形式:

$$P_a = \frac{1}{2 t_{C_1}} C_1 [(V_s - \Delta V e^{-\frac{t_{C_1}}{RC_1}})^2 - (V_s - \Delta V)^2]. \quad (6)$$

当平均功率(P_a)达到最大时, 热发电构件达到最佳工作状态, 为了取得最大平均功率时的最佳控制时间 t_{C_1} , 设 $\Delta V = a V_s$, 带入式(6)可得平均功率(P_a)关于 a 和 t_{C_1} 的函数:

固定容值, 所以就可以得到最优充电时间的 t_{C_1} 使得平均输出功率最大。

在确定了 t_{C_1} 之后, 根据等效电路图 8(b) 所示, 可以得到 C_1 的初始电压($U_{C_1}(t_0)$) 和充电电压($U_{C_1}(t_{C_1})$) 的关系:

$$U_{C_1}(t_0) = \frac{R_{Con}}{R + R_{Con}} V_s - \left(\frac{R_{Con}}{R + R_{Con}} V_s - U_{C_1}(t_{C_1}) \right) e^{-\frac{t_{C_2}}{\frac{R R_{Con}}{R + R_{Con}} C_1}}. \quad (9)$$

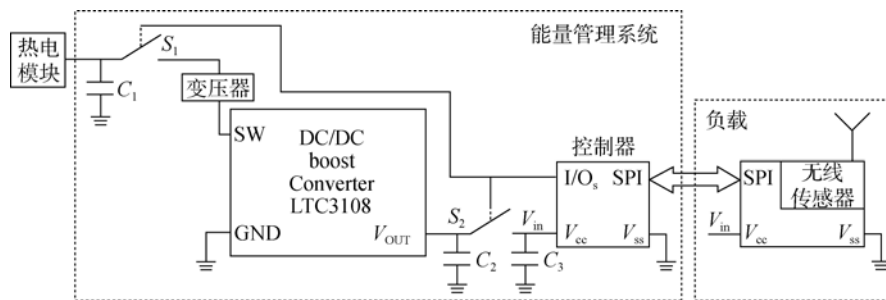


图 6 热发电能量管理系统电路原理图

Fig. 6 Schematic circuit diagram of thermal generating power management system

式中: R_{Con} 为直流升压转换器的等效电阻。根据 C_1 的初始电压($U_{C_1}(t_0)$) 以及充电电压($U_{C_1}(t_{C_1})$) 可

以得到 t_{C_2} 的值。如果 t_{C_2} 值是根据最优充电时间 t_{C_1} 计算所得的, 则 t_{C_2} 值为最优放电时间。

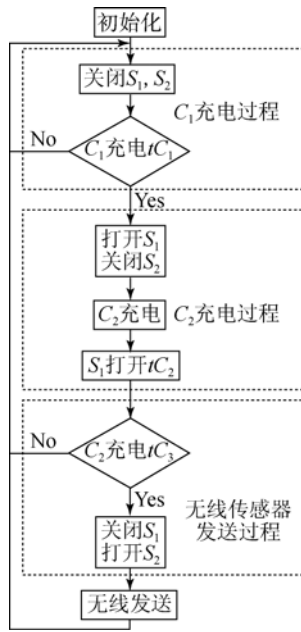


图 7 热发电能量管理系统控制策略流程图

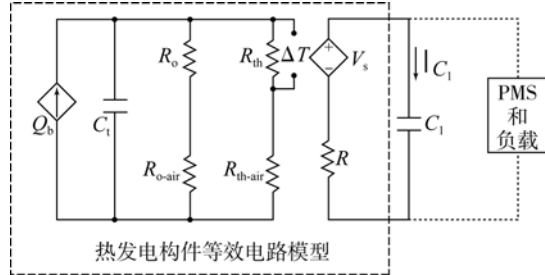
Fig. 7 Control strategy process of thermal generating power management system

最后,根据无线传感器发送过程的等效电路如图 8(c)所示,得到 C_2 和 C_3 的关系式为:

$$\begin{cases} \Delta E_2 = \frac{C_2}{2} (U_{C_2C}^2 - U_{C_2D}^2) \\ \Delta E_3 = \frac{C_3}{2} (U_{C_3C}^2 - U_{C_3D}^2) \\ \Delta E_3 = P_{\text{Controller}} t_{C_3} + E_{\text{Load}} \\ \Delta E_2 = \Delta E_3 \\ U_{C_2D} = U_{C_3C} \\ U_{C_3D} > U_{\text{Drive}} \\ U_{C_2C} < U_{\text{Max_Output}} \end{cases}, \quad (9)$$

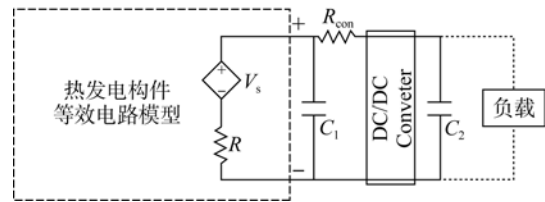
式中: ΔE_2 和 ΔE_3 分别为 C_2 和 C_3 的充电能量, U_{C_2C} 和 U_{C_2D} 分别为 C_2 充电后以及放电后的电压值。同理, U_{C_3C} 和 U_{C_3D} 为 C_3 充电后和放电后的电压值。 $P_{\text{Controller}}$ 是控制器所消耗的功率, t_{C_3} 为无线传感器发送的周期, E_{Load} 为负载在每次启动后所消耗的能量。 U_{Drive} 和 $U_{\text{Max_Output}}$ 分别为无线传感器的最低驱动电压以及直流升压转换器所输出的最大电压。 ΔE_2 也是在 C_2 为 C_3 充电时所消耗的能量, ΔE_3 是控制器以及负载所消耗的能量总和。因为在每个周期中负载只工作一次,所以 E_{Load} 为常数。同时, t_{C_3} 也是无线传感器的采样周期以及数据的发送周期。式(9)给出了整个主轴热监测无线传感系统正常工作的条件。在工作时

t_{C_3} 的选择只要满足式(9)就能保证系统正常工作。这样就确定了热发电能量管理系统的基于时间的控制策略中的 3 个控制参数: t_{C_1} 、 t_{C_2} 和 t_{C_3} 。



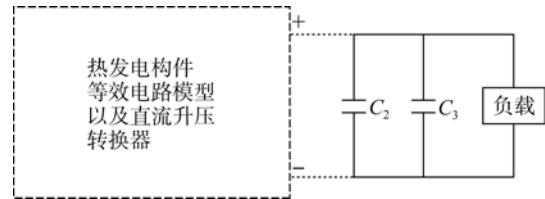
(a) C_1 充电过程

(a) C_1 charging process



(b) C_2 充电过程

(b) C_2 charging process



(c) 无线传感器发送过程

(c) Sending process of wireless sensor data

图 8 热发电能量管理系统等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram of thermal generating power management system

4 实验与分析

4.1 热发电能量管理系统性能测试实验及其分析

在实验平台上开展热发电能量管理系统的性能试验,以验证设计理论的正确性。实验中 PMS 的电路图如图 9 所示,控制器采用美国德州仪器生产的 MSP430F149 单片机,无线模块采用相同厂家生产的无线芯片 CC1101。其中开关 S_1 和 S_{2B} 采用日本罗姆公司 1.5 V 驱动的半导体场效应晶体管(MOSFET),其型号为 RQ1C075UN,而开关 S_{2A} 采用的为相同生产厂家的 P 型场效应晶体管,型号为 RQ1A070ZP。而电路图中二极管 D_1 的型号为 1N4007,它用来保证在工作时电

容 C_1 只给电容 C_2 充电,而不会出现电容 C_2 给电容 C_1 充电的情况。各个元器件的具体参数如表 1 所示。

表 1 热发电能量管理系统中元器件的关键参数
Tabl. 1 Key parameters of components in thermal generating power management system

参数	值	单位
C_1	1	F
C_2	1 500	μF
C_3	4 700	μF
R	27	Ω
R_{Con}	22	Ω
$P_{\text{Controller}}$	50	μW
E_{Load}	0.2	mJ
U_{Drive}	2.2	V
$U_{\text{Max_Output}}$	4.1	V

实验中,为了测试基于时间的控制策略中最优时间 $t_{C_1} = 2\text{ s}$ 和 $t_{C_2} = 13\text{ s}$ (根据表 1 中的数据可以直接计算最优充电时间 t_{C_1} ,而 t_{C_2} 则是根据 t_{C_1} 计算得到的放电时间)的有效性,设立 3 组不同时间的比对实验,其时间分别为:(1) $t_{C_1} = 2\text{ s}$, $t_{C_2} = 13\text{ s}$; (2) $t_{C_1} = 4\text{ s}$, $t_{C_2} = 17\text{ s}$; (3) $t_{C_1} = 6\text{ s}$, $t_{C_2} = 22\text{ s}$ 。每组实验都给稳定电压 100 mV 的输入,然后测量电容 C_2 上的从 2.1~4.1 V 的充电电压随时间的变化过程,其过程如图 10 所示。比

对 3 种不同控制策略的充电曲线,可以看到,第 1 组实验为最优充放电时间设置,约 2.8 min 完成一次充电;第 2 组、第 3 组的实验都没有采用最优时间,完成充电所需时间约为 3.3~3.5 min。说明最佳充电时间的方案可以提高能量的使用效率,从而有效提高对电容 C_2 的充电效率。

通过不同主轴转速条件下热发电构件所产生的电能对能量管理系统进行了性能测试,其中 $t_{C_1} = 2\text{ s}$ 、 $t_{C_2} = 13\text{ s}$ 以及 $t_{C_3} = 100\text{ s}$ 。电容 C_2 和电容 C_3 的电压值随时间的变化如图 11 所示。在初始状态,电容 C_2 的电压值为 3.5 V,电容 C_3 的电压值为 3 V。从图中可以看到,不管转速多少,两个电容的电压都在上下波动,而且波动周期为采样周期,这是因为每次采样前,电容 C_2 为电容 C_3 充电,导致电容 C_2 电压迅速下降,电容 C_3 的电压迅速上升,在充电完成后进行无线传输。同时,电容 C_2 为电容 C_3 这两个电容的压差主要是由于二极管上的压降决定的。在主轴转速为 1 500 r/min 时,电容 C_2 的电压缓慢上升,逐渐接近平缓但仍存在上升趋势,电容 C_3 的电压上升缓慢。电容 C_2 的电压最终基本维持在 3.6~3.9 V,而电容 C_3 的电压基本维持在 2.9 V~3.1 V。在主轴转速为 3 000 r/min 时,电容 C_2 的电压迅速上升,基本维持在最大电压 4.1 V 左右,其波动为 3.8~4.1 V,而电容 C_3 的电压在 3.0~3.2 V 之间波动。从图中可以看出,3 000 和 1 500 r/min 的情况下,无线传感器监测系统都可以稳定的工作,这是因为工作情况满足式(9)的要求。

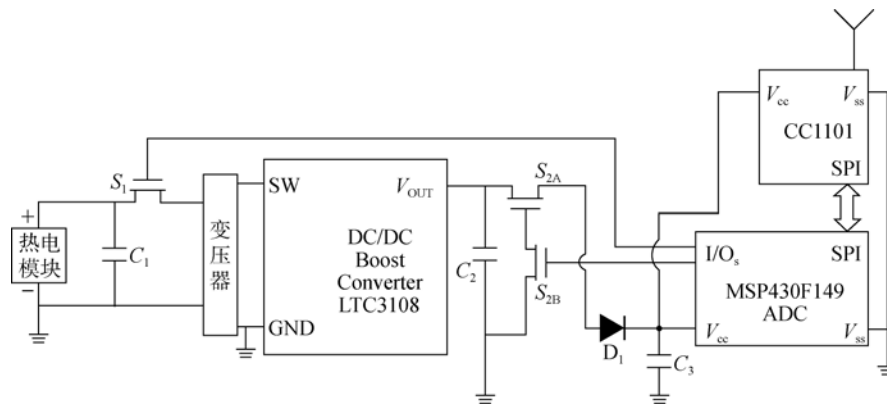


图 9 热发电能量管理系统的电路图

Fig. 9 Circuit diagram of thermal generating power management system

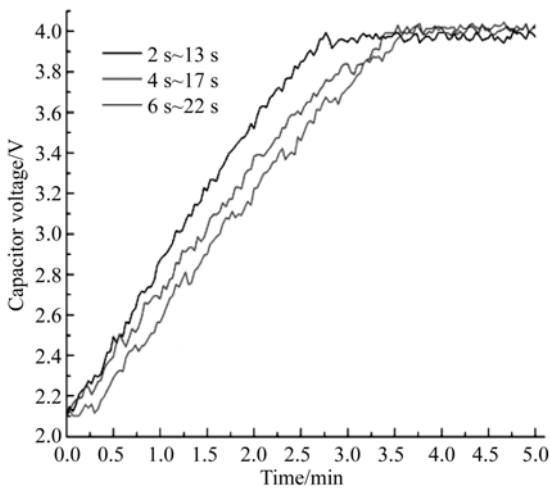


图 10 热发电能量管理系统中不同控制时间充电效果比较
Fig. 10 Charging effect comparison of using different control time in thermal generating power management system

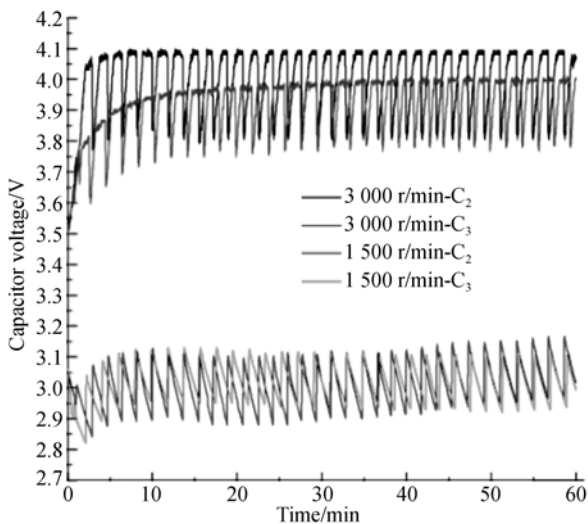


图 11 主轴不同转速下热发电能量管理系统工作情况
Fig. 11 Performance of thermal generating power management system under different spindle speeds

4.2 基于热电耦合无线传感的主轴热特性监测与建模实验

首先在主轴内外共选取 9 个点作为温度监测位置,其中温度传感器都采用 NTC503。为方便测量及安装,实验平台中主轴轴套设计成中部可开合的形式,其实际位置如图 12 所示。图 12(a)为布置在主轴旋转轴上的 A 组无线传感器测温点,编号为 A₁、A₂ 和 A₃。图 12(b)为布置在主轴轴套的 6 个有线传感器测温点。在主轴轴套的上方设置的 B 组测温点编号分别为 B₁、B₂ 和 B₃,同时设置在主轴轴套侧面的 C 组测温点编号分别

为 C₁、C₂ 和 C₃。

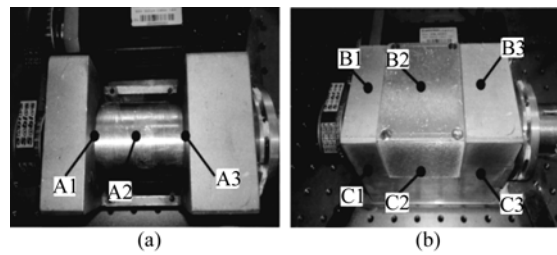


图 12 主轴测温点布置

Fig. 12 Placement of the temperature measuring points on spindle

在实验中,主轴转速设为 3 000 r/min,同时检测 9 个点在 2 h 内的温度数据和 Z 轴方向上的热变形数据。然后通过 A、B、C 3 组温度数据以及热变形数据用最小二乘法分别建立 3 组热变形预测模型,并比对各组模型预测值与实际热变形数据之间的残差,其值如图 13 所示。可以看到,采用无线传感器 A 组的模型残差明显小于采用传统有线传感器数据所建模型的残差。残差计算得到 A、B、C 3 组模型的平均残差为 0.003 8、0.017 8 和 0.011 3 mm, A 组模型的平均残差比其余两组的小 0.007 mm 左右,即减少误差 40% 以上。这是因为无线传感器布置在有线传感器难以布置的旋转轴上,而旋转轴上所测得的温度数据和主轴热变形之间具有更高的相关性,这正是热电耦合无线传感器在主轴热监测应用中的优势所在。

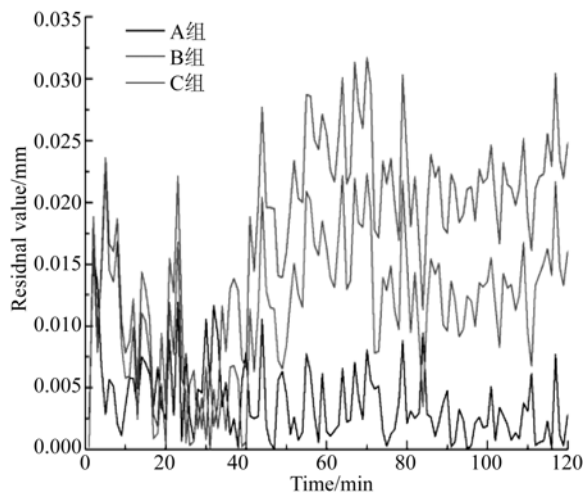


图 13 各组模型的残差值

Fig. 13 Residual value of each model

5 结 论

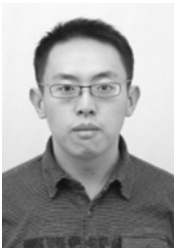
针对数控机床精密主轴热监测中无线传感器所存在的供能问题,展开了热发电能量管理系统及其最优时间控制策略的研究。对主轴热电转换特性进行了分析,给出了热发电能量管理系统的输入特性,设计了适用于主轴热环境的热发电能量管理系统的电路拓扑结构以及相应的时间控制策略。在实验中,验证了基于最优时间的充放电

控制策略的有效性和优越性,并证实了在主轴不同转速下热发电构件及能量管理系统可以驱动无线传感器稳定的工作。进一步开展了主轴热特性监测与建模实验,利用热电耦合自供能无线传感器和传统有线传感器所监测的温度数据分别进行了主轴轴向热变形建模。实验结果表明,采用无线传感器可以监测有线传感器难以配置的主轴核心部件,从而获取和主轴热变形之间具有更高相关性的温度数据,提高所建模型精度,和传统有线传感器数据所建模型相比减少误差40%以上。

参考文献:

- [1] BRYAN J. International status of thermal error research [J]. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39(2):645-656.
- [2] VYROUBAL J. Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(1):121-127.
- [3] 倪军. 数控机床误差补偿研究的回顾及展望[J]. *中国机械工程*, 1997, 8(1):29-33.
- NI J. A perspective review of CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation [J]. *China Mechanical Engineering*, 1997(1):151-155. (in Chinese)
- [4] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.*. Wireless sensor networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4):393-422.
- [5] TANG L, WANG K C, HUANG Y. Study of speed-dependent packet error rate for wireless sensor on rotating mechanical structures [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013.
- [6] 李晟,姚鑫骅,傅建中. 基于通信质量约束的主轴热监测无线传感器布点优化[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2013, 47(7):21-28.
- LI SH, YAO X, FU J. Communication quality constraint-based location optimization of wireless sensor in thermal monitoring of spindle [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(7):21-28. (in Chinese)
- [7] HUDAK N S, AMATUCCI G G. Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(10):101301-1-24.
- [8] DALLAGO E, DANIONI A, MARCHESI M, *et al.*. An autonomous power supply system supporting low-power wireless sensors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(10):4272-4280.
- [9] TAN Y K, PANDA S K. Optimized wind energy harvesting system using resistance emulator and active rectifier for wireless sensor nodes [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(1):38-50.
- [10] 朱文,杨君友,崔昆,等. 热电材料在发电和制冷方面的应用前景及研究进展[J]. *材料科学与工程*, 2002, 20(4):585-588.
- ZHU W, YANG J, CUI K, *et al.*. Application perspective in power generation and cooling and research status of thermoelectric materials [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2002, 20(4):585-548. (in Chinese)
- [11] MEEHAN A, GAO H, LEWANDOWSKI Z. Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system [J]. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2011, 26(1):176-181.
- [12] SHANTARAM A, BEYENAL H, VELUCHAMY R R A, *et al.*. Wireless sensors powered by microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(13):5037-5042.
- [13] DONOVAN C, DEWAN A, HEO D, *et al.*. Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(22):8591-8596.
- [14] 贾朝波,李平,文玉梅,等. 一种新型磁电自供电无线传感器供能电路研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(3):55-58.
- JIA C, LI P, WEN Y, *et al.*. Study on new power-supply circuit of magnetoelectric self-powered

- wireless sensor [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2010, 29(3):55-58. (in Chinese)
- [15] YANG F, ZHANG D, SHIMOTORI T, *et al.*. Study of transformer-based power management system and its performance optimization for microbial fuel cells [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 205:86-92.
- [16] DEWAN A, DONOVAN C, HEO D, *et al.*. Evaluating the performance of microbial fuel cells powering electronic devices [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(1):90-96.
- [17] PERETZ M M, BEN-YAAKOV S. *A heuristic digital control method for optimal capacitor charging* [C]. *Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE*, 2009:1118-1125.
- [18] HARRIS T A, KOTZALAS M N. *Essential Concepts of Bearing Technology* [M]. New York, 2007.

作者简介:

李 晟 (1985—), 男, 浙江杭州人, 讲师, 2008 年于浙江工业大学获得学士学位, 2013 年于浙江大学获得博士学位, 主要从事制造过程监测、无线传感器技术等研究工作。E-mail: ttaidttaid@163.com

导师简介:

傅建中 (1968—), 男, 浙江衢州人, 教授, 博士生导师, 1990 年、1992 年、1996 年于浙江大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事精密机械、智能制造技术与装备等方面的研究。E-mail: fjz@zju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)