

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.012

数控机床进给系统功率模型及空载功率特性

胡韶华^{1,2}, 刘飞¹, 胡桐¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044; 2. 中国航天科技集团川南机械厂, 四川 泸州 646003)

摘要:在分析机床进给系统各部件功率特性的基础上建立了进给系统的功率模型,并运用此模型分析了进给系统的空载功率特性及其主要影响因素。理论分析表明,进给系统的空载功率是关于进给速度的单调递增二次函数,同时分析表明进给速度和负载质量均影响进给系统的空载功率,但负载质量对空载功率的影响极小。最后在 3 轴数控铣床上进行了实验研究,结果表明理论分析的有效性。

关键词:机床;进给;永磁同步电机;功率消耗

中图分类号:TH11

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-074-07

Power model and tarepower characteristic of CNC machine tool feed system

HU Shaohua^{1,2}, LIU Fei¹, HU Tong¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanic Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Chuannan Machinery Manufacturing Plant of China Aerospace Science and Technology Corporation, Luzhou Sichuan, 646003, China)

Abstract: A power model of a CNC machine tool feed system is proposed based on analyzing the power characteristic of each component in the CNC machine tool feed system. And the tarepower characteristic and its dominant affecting factors are analyzed by using the power model. The analysis results show that the tarepower of feed system is a monotone increasing quadratic function in term of the feed speed. Meanwhile, the feed speed and load mass both affect tarepower, but the influence of load mass is minuteness. Some experiments are conducted on a 3-axis CNC milling and the experimental results justify the theoretical analysis.

Key words: machine tools; feeding; permanent magnet synchronous motor; power consumption

中国机械加工系统量大,耗电总量惊人^[1]; Gutowski 的研究表明机床能量消耗总量所带来的环境排放十分巨大^[2],因此对机床的能量消耗研究具有十分重要的意义。由文献^[1,3]可知,机床能耗包括机床空载能耗、切削能耗和附加载荷损耗 3 大部

分,其中空载能耗在机床空载运行和加工过程中均存在,深入了解机床空载能耗特性是研究整个机床能耗特性的主要课题之一。在机床空载能耗研究方面,刘飞等人^[1]建立了普通机床主传动系统的功率模型,揭示了普通机床主传动系统的空载功率与转

收稿日期:2013-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075416);高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20100191120004);中央高校基本科研业务费资助项目(No. CDJZR10110013)

作者简介:胡韶华(1979-),男,博士研究生,主要从事绿色制造,数控系统等研究。

刘飞(联系人),男,重庆大学教授、博导,主要从事绿色制造、制造系统工程等研究,(E-mail)fliu@cqu.edu.cn。

速近似成二次函数关系;施金良^[4]对数控机床变频调速运行过程中的能量特性进行了研究,建立了变频调速主轴系统的功率平衡方程;但是上述研究都是针对机床主传动系统的空载功率特性。

对机床进给系统而言,国内外目前主要集中在进给系统的动力学分析^[5-6]、热变形分析^[7-8],以及摩擦特性及补偿^[9]等方面,关于进给系统的能耗特性研究较少。现代数控机床进给系统具有能耗源多,能耗环节多的特点。能耗源多的特点主要表现在数控机床通常有 3 个以上进给轴电机;能耗环节多的特点表现在每个轴通常由控制系统,交流伺服电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以及机械传动系统等环节组成,其中每个环节能耗规律均十分复杂。Kordonowy^[10]运用统计方法对不同类型机床的进给系统能耗进行了统计分析,得出了进给系统占机床总能耗的统计结果,但是没有对机床进给系统的每个环节能耗规律进行定量分析。一般而言,提高进给轴速度可以缩短机床加工时间,提高效率,但是进给速度的改变也影响了机床进给轴的功率特性。实时监控机床进给系统的能耗效率需要其空载功率的定量特性信息,因此对进给系统的功率特性建模和空载特性研究十分重要。

针对数控机床进给系统功率特性由于能耗环节多能耗规律复杂导致难以建模的问题,笔者在结合 PMSM 电机功率特性,机械传动系统动力学特性的基础上,推导出整个进给系统的功率消耗模型,并运用此模型分析了影响空载功率的主要因素。最后在 3 轴数控铣床进行了测试,实验结果证明了理论分析的有效性。

1 进给系统的功率模型

数控机床进给系统的典型结构包含永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)和机械传动部分,如图 1 所示,其中传动部分包括联轴器、滚珠丝杠、螺母、导轨、工作台等。因此,进给系统是一个典型的机电一体化系统,能耗环节多,每个功率环节复杂,其中伺服电机就包含定子铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗等^[11],机械传动部分包含库伦摩擦损耗和黏性摩擦损耗等^[1]。本节在分析各个功率消耗环节的基础上提出进给系统的总体功率模型。

1.1 伺服电机的功率模型

伺服电机^[11-12]的功率流如图 2 所示,可以得到

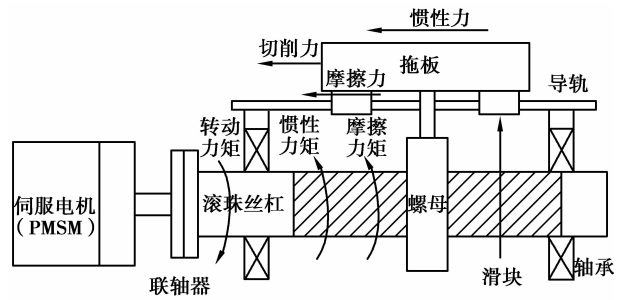


图 1 数控机床进给系统结构示意图

$$P_{in} = P_c + P_i + P_m + P_s + P_{out}$$

$$= R_a (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\omega_e^2 (\psi_d^2 + \psi_q^2)}{R_i} + \omega_e K_e i_q, \quad (1)$$

$$\omega_e K_e i_q = P_m + P_s + P_{out}, \quad (2)$$

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{3} I_s, \quad (3)$$

式中: R_a 为定子绕组电阻; i_d 为定子电流直轴分量; i_q 为定子电流交轴分量; I_s 为定子相电流有效值; K_e 为电磁转矩系数; ω_e 为电机电磁场角速度; ψ_d 为磁通量直轴分量; ψ_q 为磁通量交轴分量; P_c 为定子铜损; P_i 为定子铁损; P_m 为电机机械损耗; P_s 为电机杂散损耗; P_{out} 为电机输出功率。

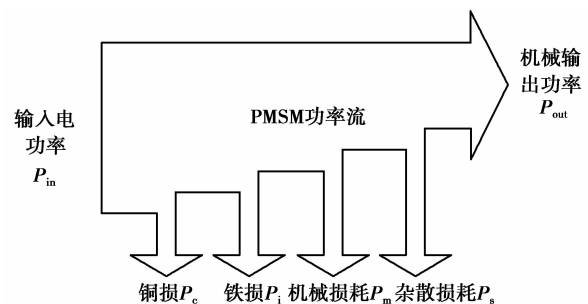


图 2 PMSM 的功率模型^[10]

由式(1)~(3)可知,式(1)中第 1 项表示伺服电机的定子铜损,第 2 项表示伺服电机的铁损,第 3 项表示伺服电机的电磁功率(包含了电机的机械损耗、杂散损耗输出功率)。

1.2 进给轴机械传动系统的功率模型

数控机床的进给传动系统如图 1 所示,在分析其力学、运动学关系^[13]的基础上建立其功率模型。

对电机轴建立动力学方程为

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_l, \quad (4)$$

对联轴器建立动力学方程为

$$T_l = J_a \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{1}{K_g} T_{ls}, \quad (5)$$

式(4)、(5)中: B_m 为电机阻尼系数; J_m 为电机转动惯量; ω_m 为电机轴转速; T_1 为驱动联轴器的扭矩; J_a 为联轴器等价转动惯量; T_{ls} 为驱动滚珠丝杠的扭矩; K_g 为联轴器的传动比。

对滚珠丝杠建立动力学方程为

$$T_{ls} = J_{ls} \frac{d\omega_{ls}}{dt} + T_1, \quad (6)$$

滚珠丝杠的负载扭矩可表示为

$$T_1 = \frac{P}{2\pi} F_t, \quad (7)$$

式(6)、(7)中: ω_{ls} 为滚珠丝杠的角速度; F_t 为工作台受的力, 包括切削力、惯性力, 以及摩擦力; T_1 为克服轴力 F_t 产生的力矩。

工作台的受力情况表示为

$$F_t = (M_t + M_{load}) \frac{dv}{dt} + F_{friction} + F_{ext}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F_{friction} &= \mu_v \cdot v + f_c \cdot \text{sgn}(v) \\ &= \mu_v \cdot v + \mu_c \text{sgn}(v) |F_N|, \end{aligned} \quad (9)$$

式(8)、(9)中: v 为工作台的进给速度; $F_{friction}$ 为工作台与导轨间摩擦力; F_{ext} 为加在工作台上的切削力; F_N 为加载在导轨上的正压力; μ_v 为黏性摩擦系数; μ_c 为库伦摩擦系数; $\text{sgn}(v)$ 为符号函数, 当 v 为正时, $\text{sgn}(v)=1$; 当 v 为负时, $\text{sgn}(v)=-1$; 当 v 为 0 时, $\text{sgn}(v)$ 为 0。

工作台进给速度与滚珠丝杠转速之间的关系为

$$v = P \frac{\omega_{ls}}{2\pi}, \quad (10)$$

联轴器的传动比为 K_g , 则:

$$\omega_m = K_g \omega_{ls}, \quad (11)$$

由方程(10)、(11)可得:

$$\begin{aligned} T_m &= J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_1 \\ &= (J_m + J_a) \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + \\ &\quad \frac{1}{K_g} \left(J_{ls} \frac{1}{K_g} \frac{d\omega_m}{dt} + \right. \\ &\quad \left. \frac{P}{2\pi} \left((M_t + M_{load}) \frac{P}{2\pi K_g} \frac{d\omega_m}{dt} + F_{friction} + F_{ext} \right) \right) = \\ &\quad \left(J_m + J_a + \frac{J_{ls}}{K_g^2} + \frac{P^2}{4\pi^2 K_g^2} (M_t + M_{load}) \right) \frac{d\omega_m}{dt} + \\ &\quad B_m \omega_m + \frac{P}{2\pi K_g} (F_{friction} + F_{ext}). \end{aligned} \quad (12)$$

工作台受到的正压力为工作台与工件的重

力, 即

$$\begin{aligned} F_{friction} &= \mu_v \cdot v + f_c \cdot \text{sgn}v \\ &= \mu_v \cdot v + \mu_c (M_t + M_{load}) \text{sgn}v, \end{aligned} \quad (13)$$

式中: M_t 为工作台的质量; M_{load} 为工作台上负载工件质量。

将方程(11)带入式(12)可得电机输出扭矩模型:

$$\begin{aligned} T_m &= \left[J_m + J_a + \frac{J_{ls}}{K_g^2} + \frac{P^2}{4\pi^2 K_g^2} (M_t + M_{load}) \right] \frac{d\omega_m}{dt} + \\ &\quad \left(B_m + \frac{P^2 \mu_v}{4\pi^2 K_g^2} \right) \omega_m + \frac{P \mu_c \text{sgn}(\omega_m)}{2\pi K_g} (M_t + M_{load}) + \frac{P F_{ext}}{2\pi K_g}. \end{aligned} \quad (14)$$

当机床的进给速度稳定时 ($\frac{d\omega_m}{dt}=0$), 可以得到机械传动系统的输入功率(伺服电机的输出功率):

$$\begin{aligned} P_{out} &= T_m \cdot \omega_m = \\ &\quad \left(B_m + \frac{P^2 \mu_v}{4\pi^2 K_g^2} \right) \omega_m^2 + \\ &\quad \left[\frac{P \mu_c \text{sgn}(\omega_m)}{2\pi K_g} (M_t + M_{load}) + \frac{P F_{ext}}{2\pi K_g} \right] \omega_m. \end{aligned} \quad (15)$$

1.3 进给系统的总体功率模型

由式(1)~(3)、(15)可得:

$$P_{in} = 3R_a I_s^2 + \frac{\omega_e^2 (\psi_d^2 + \psi_q^2)}{R_i} + \omega_e K_e i_q. \quad (16)$$

式(16)中第2项是铁损功率, 第3项电磁功率包含了机械损失功率、杂散损耗和机械输出功率。但是2项的参数 R_i 、 ψ_d 、 ψ_q 、 i_q 均不可以直接测量, 为此需进行转换。

在工程实践以及电机技术说明书中^[14], 电机扭矩系数表示的是电磁转矩和相电流有效值之比, 而且电磁转矩 T_{eN} 包含了电机机械损失、杂散损耗、机械输出转矩和铁损转矩。同时, 在伺服电机的矢量控制中, 直轴电流近似为 0^[15]。

因此将式(16)写成

$$P_{in} = 3R_a I_s^2 + \omega_m T_{eN}. \quad (17)$$

电机的电磁转矩与电流有如下关系:

$$T_{eN} = K_T I_s, \quad (18)$$

$$\text{式中: } T_{eN} = T_m + T_0, \quad (19)$$

式中: T_0 为电机内部机械损耗转矩、铁损耗转矩、杂散损耗转矩; K_T 为扭矩系数。

由式(18)、(19)可得:

$$I_s = \frac{1}{K_T} \left[\left(B_m + \frac{P^2 \mu_v}{4\pi^2 K_g^2} \right) \omega_m + \frac{P \mu_c \operatorname{sgn}(\omega_m)}{2\pi K_g} (M_t + M_{\text{load}}) + T_0 + \frac{PF_{\text{ext}}}{2\pi K_g} \right]. \quad (20)$$

其中,令

$$B'_m = \frac{1}{K_T} \left(B_m + \frac{P^2 \mu_v}{4\pi^2 K_g^2} \right),$$

$$K'_{\text{eq}} = \frac{P \mu_c}{2\pi K_g K_T},$$

$$T'_0 = \frac{T_0}{K_T},$$

$$T_c = \frac{PF_{\text{ext}}}{K_T 2\pi K_g}.$$

在实际应用中,通常以 ω_m 方向为正方向,则式(20)可转变为

$$I_s = B'_m \omega_m + K'_{\text{eq}} (M_t + M_{\text{load}}) + T'_0 + T_c. \quad (21)$$

将式(21)带入式(17)可得进给系统功率模型:

$$P_{\text{in}} = (3R_a B_m'^2 + K_T B_m') \omega_m^2 + [6R_a B_m' + K_T] [K'_{\text{eq}} (M_t + M_{\text{load}}) + T'_0 + T_c] \omega_m + 3R_a [K'_{\text{eq}} (M_t + M_{\text{load}}) + T'_0 + T_c]^2. \quad (22)$$

当切削矩 T_c 等于零时,就可以得到机床进给系统的空载功率:

$$P_{\text{in}} = (3R_a B_m' + K'_T) B_m' \omega_m^2 + (6R_a B_m' + K'_T) [K'_{\text{eq}} (M_t + M_{\text{load}}) + T'_0] \omega_m + 3R_a [K'_{\text{eq}} (M_t + M_{\text{load}}) + T'_0]^2. \quad (23)$$

2 影响空载功率的因素分析

由进给系统空载功率表达式(23)可知:机床进给系统的空载功率随着进给速度和工作台载荷工件质量的变化而变化。

2.1 进给系统空载功率与伺服电机角速度的关系

由式(23)可知,进给系统功率 P_{in} 是转速 ω_m 的二次函数。功率对转速求导可得:

$$\frac{\partial P_u}{\partial \omega_m} = \frac{\partial P_u}{\partial I_s} \cdot \frac{\partial I_s}{\partial \omega_m} = B'_m (6I_s R_a + K_T \omega_m). \quad (24)$$

当 $\omega_m > 0$ 时, $\frac{\partial P_u}{\partial \omega_m} > 0$, 则输入功率 P_u 随着 ω_m 的增加而单调递增。

2.2 进给系统空载功率与负载工件质量的关系

由式(23)可知,进给系统功率 P_u 是载荷质量

M_{load} 的一次函数。功率对载荷质量求导可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_u}{\partial M_{\text{load}}} &= \frac{\partial P_u}{\partial I_s} \cdot \frac{\partial I_s}{\partial M_{\text{load}}} \\ &= K'_{\text{eq}} (6I_s R_a + K_T \omega_m) > 0. \end{aligned} \quad (25)$$

式(24)表明输入功率 P_u 随着 M_{load} 的增加而单调递增。 $K'_{\text{eq}} = \frac{P \mu_c}{2\pi K_g K_T}$, 在一般情况下,润滑的钢对钢的润滑表面的摩擦系数 μ_c 为 $0.05 \sim 0.1$ ^[16]。对一般的数控机床,可推算出 K'_{eq} 的取值数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 。可见负载工件质量对功率消耗的影响较小。

2.3 进给系统空载功率与螺距的关系

由式(10)、式(11)、式(25)可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_u}{\partial M_{\text{load}}} &= K'_{\text{eq}} (6I_s R_a + K_T \omega_m) \\ &= K'_{\text{eq}} (6I_s R_a + K_T \cdot K_g \cdot \frac{2\pi}{P} \cdot v) \\ &= 6K'_{\text{eq}} I_s R_a + \mu_c \cdot v. \end{aligned}$$

由此可知,空载功率随负载质量变化取决于 $6K'_{\text{eq}} I_s R_a$, 而 $\mu_c \cdot v$ 不变。其中 $K'_{\text{eq}} = \frac{P \mu_c}{2\pi K_g K_T}$ 是螺距 P 的函数。对一般的数控机床,可推算出 K'_{eq} 的取值数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 。即使 P 变化 10 倍导致 I_s 变化 10 倍,对于功率大小而言,最多也不会大于 10^{-2} (即 1%)。因此螺距的变化导致负载对功率变化的影响极小。

3 仿真分析及实验研究

3.1 仿真分析

对一台数控机床(PL700) X 轴进给系统进行仿真分析,该机床的基本参数如表 1 所示。

表 1 PL700X 轴的伺服电机以及进给系统的相关参数

参数	数值	
额定功率/kW	1.2	
额定转速/(r · min ⁻¹)	2 000	
伺服电机	额定电压/V	220/380
相关参数	扭矩系数 $K_T^*/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	1.17
	电枢电阻 R_a/Ω	1
	极对数	4

续表

	参数	数值
机械系统	X 方向螺距 P/mm	16
	联轴器传动比 K_g	1
相关参数	工作台质量 M_t/kg	190

伺服电机型号为 FANUC SERVO MOTOR $\beta 8/3000$ is

** 表示电磁转矩与电枢相电流有效值比值

由于式(22)中 B'_m, K'_{eq}, T'_0 等参数无法预先已知或者不准确,影响功率的仿真研究。笔者利用电流与转速的关系对参数 B'_m, K'_{eq}, T'_0 进行辨识。下面对 B'_m, K'_{eq}, T'_0 参数辨识的原理进行简要介绍。

由于空载电流 I_s 与转速 ω_m 满足如下关系:

$$I_{s0} = B'_m \omega_m + K'_{eq} (M_t + M_{load}) + T'_0 \quad (25)$$

将式(25)改写成矩阵格式有:

$$\begin{bmatrix} \omega_{m1} & M_t + M_{load1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B'_m \\ K'_{eq} \\ T'_0 \end{bmatrix} = I_{s0} \quad (26)$$

通过多组实验,用式(27)、式(28)最小二乘法辨识出 B'_m, K'_{eq}, T'_0 。

$$A_{n \times l} \theta = b_{n \times 1} \quad (27)$$

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (28)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \omega_{m1} & M_t + M_{load1} & 1 \\ \omega_{m2} & M_t + M_{load1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \omega_{mn} & M_t + M_{load1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \omega_{m1} & M_t + M_{loadl} & 1 \\ \omega_{m2} & M_t + M_{loadl} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \omega_{mn} & M_t + M_{loadl} & 1 \end{bmatrix} \quad (n \geq 3, l \geq 3)$$

$$b = [I_{s0,11} \quad I_{s0,21} \quad \dots \quad I_{s0,n1} \quad \dots \quad I_{s0,11} \quad I_{s0,21} \quad \dots \quad I_{s0,n1}]^T$$

在本次实验中,分别取 $n=26$ (进给速度的取值范围为从 150~3 900 mm/min。150 mm/min 为一档), $l=4$ (工作台无负载、负载 10 kg 工件、负载 30 kg 工件,负载 50 kg),做了 26×4 次实验。电流与转速的曲线如图 3 所示,辨识出该机床的参数分别为: $B'_m=0.191, K'_{eq}=3.4 \times 10^{-5}, T'_0=0.802$ 。

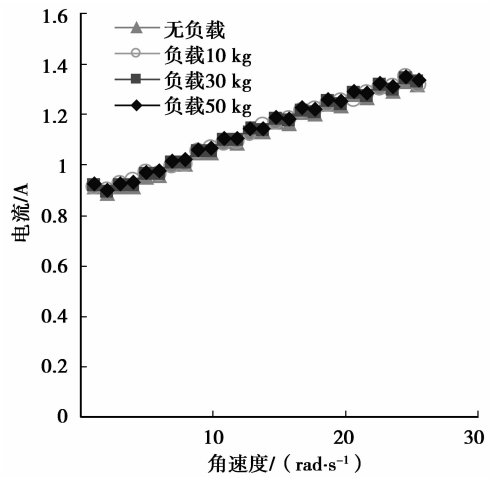


图 3 不同工件质量下电流-角速度曲线

通过辨识结果可以看出, K'_{eq} 是一个很小的数,因此可以近似认为 $K'_{eq} (M_t + M_{load})$ 为 0,功率消耗受质量变化影响不大,符合 3.2 节推算出 K'_{eq} 的取值数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 的结论。根据辨识出来的 B'_m, K'_{eq}, T'_0 及方程(22),对该机床进行仿真分析,如图 4 所示,从图 4 中可以看出,进给系统的功率消耗值随着进给速度的变化成二次递增关系,同时可以看出,功率消耗受负载影响很小。

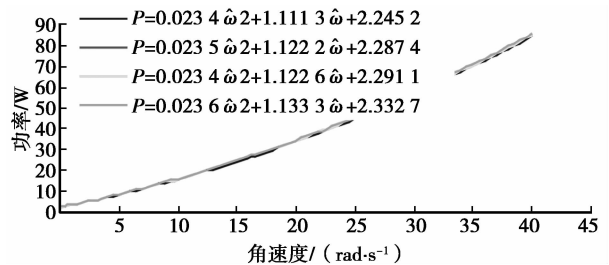


图 4 进给系统的功率仿真曲线

3.2 实验结果及其分析

本次实验以上述数控机床 PL700 为测试对象做验证实验,该机床进给系统电机以及机械传动部分具体参数见表 1。功率测试的仪器为日置 3390 宽频功率分析仪。

1) 实验将进给速度 v 在 150~3 900 mm/min 内(以 150 mm/min 为一档)测试,每档运行距离为导轨最大运行范围内做一来回运动。重复 3 次实验,结果取其平均值(如图 5 所示)。从图 5 可以看出,进给系统与进给速度呈二次函数关系,与 1.3 节式(22)的表达吻合。

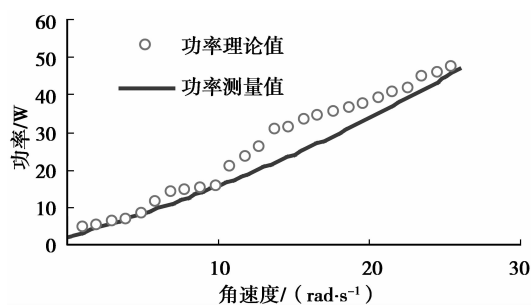


图 5 进给系统的功率理论值与测量值比较

2)为了验证进给系统功率消耗与负载质量的关系,对负载做了扰动实验(无负载,负载质量 10,30,50 kg)。实验结果如图 6 所示,从实验结果可以看出,进给系统功率消耗值随进给速度的增加而单调递增。当工作台上负载变化时,功率的消耗值并没有太大的变化,与仿真时得出的结果一致,同时可以看出,功率消耗受负载影响很小,符合 2.2 节负载质量对功率消耗影响较小的分析。

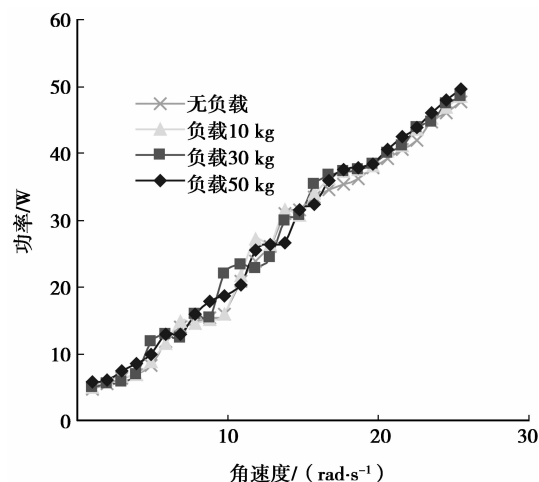


图 6 不同负载下的进给系统功率

4 结 论

笔者首先建立了数控机床进给系统的功率模型,然后分析了空载功率与进给速度,负载质量的关系,得出了以下结论:

1)数控机床进给系统功率是关于进给速度和切削矩(或切削力)的二次函数,如式(22)所示。可以通过不同转速不同切削参数的实验确定此函数关系。

2)数控机床进给系统的空载功率与进给速度呈

单调递增的二次函数关系,如式(23)所示。在工程应用中,可以通过测量不同转速不同负载质量时的空载功率拟合出该二次曲线。一旦辨识出此特性函数,只要知道进给速度就可以确定进给系统的空载功率,进而实时监控机床进给系统的能耗效率等。

3)理论分析和实验结果均表明负载质量与对进给系统空载功率影响很小,其影响系数在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 之间。在一定条件下可以忽略质量变化对空载功率的影响。

5 致 谢

感谢成都普瑞斯数控机床有限公司和北京法朗克公司为本研究提供的机床和伺服电机的相关技术参数。

参考文献:

- [1] 刘飞,徐宗俊,但斌. 机械加工系统能量特性及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] GUTOWSKI T, DAHMUS J, THIRIEZ A. Electrical energy requirements for manufacturing processes[EB/OL]//Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 31-June 2, 2006, Leuven, Belgium. [2011-05-21] <http://web.mit.edu/2.813/www/readings/Gutowski-CIRP.pdf>
- [3] HU S H, LIU F, HE Y, et al. Characteristics of additional load losses of spindle system of machine tools[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2010, 4(7):1221-1233.
- [4] 施金良,刘飞,许弟建,等. 变频调速数控机床主传动系统的功率平衡方程[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 118-124.
SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Power balance equation about the numerical control machine tool's main driver system driven by variable voltage variable frequency[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3):118-124.
- [5] WHALLEY R, EBRHAIMI M, AMMER A A A. Machine tool axis dynamics [J]. Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(4):403-419.
- [6] 丁文正,黄筱调,汪木兰. 面向大型机床再制造的进给系统动态特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 135-140.

- DING Wenzheng, HUANG Xiaodiao, WANG Mulan. Dynamic characteristics of feed system for large-scale machine tool remanufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 46(3): 135-140.
- [7] 夏军勇, 胡友民, 吴波, 等. 热弹性效应分析与机床进给系统热动态特性建模 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 191-198.
- XIA Junyong, HU Youmin, WU Bo, et al. Analysis on thermoelastic domino effect and modeling on thermal dynamic characteristic of machine tools feed system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 191-198.
- [8] WU C H, KUNG Y T. Thermal analysis for the feed drive system of a CNC machine center [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2003, 43(15): 1521-1528.
- [9] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design. Part II: modeling and identification of feed drives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(10): 1487-1509.
- [10] KORDONOWY D N. A power assessment of machining tools [EB/OL]. Massachusetts Institute of Technology, 2002 [2011-05-12]. <http://18.7.29.232/handle/1721.1/31108#files-area>.
- [11] SENJYU T, KUWAE Y, URASAKI N, et al. Accurate parameter measurement for high speed permanent magnet synchronous motors [C]// Proceedings of the 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2001, Vancouver, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2001(2): 772-777.
- [12] URASAKI N, SENJYU T, UEZATOK. A novel calculation method for iron loss resistance suitable in modeling permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 41-47.
- [13] JEONG Y H, MIN B K, CHO D W, et al. Motor current prediction of a machine tool feed drive using a component-based simulation model [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(4): 597-606.
- [14] 段卫国, 杨飞中, 程智, 等. 交流伺服电动机的电势系数和转矩系数一样本数据的解读 [J]. 伺服控制, 2007(3): 20-22, 26.
- DUAN Weiguo, YANG Feizhong, CHENG Zhi, et al. AC servo motor's potential coefficient and torque coefficient -the interpretation of sample data [J]. Servo Control, 2007(3): 20-22, 26.
- [15] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] 机械工程手册 电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1997.

(编辑 王维朗)