

文章编号:1671-6833(2007)02-0088-05

## 冷铣刨机功率自适应控制参数研究

马鹏宇, 胡永彪, 张新荣

(长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 根据对冷铣刨机消耗功率和发动机输出功率影响因素的理论分析, 选择了机器的作业速度作为功率自适应控制参数. 在此基础上建立了系统的仿真模型, 对使用自适应控制系统前后铣刨机发动机功率的使用情况及其作业效率进行了模拟分析和验证. 结果表明: 选择以机器作业速度作为功率自适应控制参数是合理有效的; 该功率自适应系统能够将机器自动调节在发动机额定功率附近工作, 使机器在给定条件下的额定功率利用率和作业效率分别提高了 10.2% 和 6.32% 以上. 该研究为合理利用发动机功率和提高机器作业效率提供了参考.

**关键词:** 冷铣刨机; 功率自适应; 控制参数选择

**中图分类号:** U 415.52 **文献标识码:** A

### 0 引言

目前关于冷铣刨机的研究工作主要集中在铣刨机的性能参数匹配优化及作业性能<sup>[1-2]</sup>、铣刨机铣削机构的研究<sup>[3-5]</sup>, 而缺乏关于铣刨机功率自适应控制方面的理论研究.

沥青路面铣刨机在作业的过程中, 其外负荷是动态变化的, 传统的手动控制方式很难保证铣刨机能够根据外负荷的变化合理有效利用发动机的额定功率, 使机器一直高效可靠地作业. 因此, 就需要一种能够根据铣刨机外负荷的变化做出自适应调节的控制系统来满足上述要求, 然而在铣刨机功率自适应调节的过程中, 有很多控制参数可供调节, 只有对少数的参数调节是最简单有效的. 笔者对这些控制参数进行了分析选择, 并在此基础上设计出的功率自适应控制系统进行了仿真实验分析.

### 1 控制参数分析

铣刨机功率自适应控制是利用自适应控制的原理对机器消耗的功率进行合理有效调节, 从而使机器工作在最佳状态(最大功率或最高效率下的功率). 而铣刨机所消耗的功率主要分为两部分: 行走机构所消耗的功率  $P_k$  和铣刨转子系统所消耗功率  $P_m$ . 那么, 铣刨机功率自适应调节也就

是主要完成对这两部分功率消耗的控制.

#### 1.1 行走机构所消耗功率的影响因素分析

行走系统所消耗的功率主要取决于机器的理论行驶速度和铣刨机的牵引力  $F_k$ , 其计算公式可表示为<sup>[6]</sup>

$$P_{ek} = \frac{F_k v}{\eta_t} \quad (1)$$

式中:  $\eta_t$  为行走机构的总效率. 而  $F_k$  等于其滚动阻力  $F_f$  与铣刨机作业时的水平阻力  $F_H$  之和, 即<sup>[6]</sup>

$$F_k = F_f + F_H \quad (2)$$

并且,  $F_H$  也是一个随铣刨机行驶速度变化的函数<sup>[2]</sup>

$$F_H = \frac{k \tau_s a_c a_p Z v}{R \omega} \quad (3)$$

式中:  $k$  为常数;  $a_c$  为铣削厚度;  $Z$  为铣刨鼓上刀头的个数;  $R$  为铣刨鼓的半径  $\omega$  为铣刨鼓的角速度. 将公式(2)和(3)代入式(1)中, 可得

$$P_{ek} = \frac{F_f R \omega v + k \tau_s a_c a_p Z v^2}{R \eta_t \omega} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 行走机构所消耗的功率与铣刨机行驶速度  $v$  是二次函数关系.

#### 1.2 铣刨转子系统所消耗功率的影响因素

铣刨转子系统铣削路面每齿进给量  $f_z$ 、铣刨鼓刀尖上的切削速度  $v_T$  以及所消耗的功率  $P_m$  表示为<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2006-12-23; 修订日期: 2007-03-10

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2004E233)

作者简介: 马鹏宇(1980-), 男, 河南信阳人, 长安大学博士研究生, 主要研究方向为机电液一体化.

$$f_z = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (5)$$

$$v_T = \sqrt{v^2 + 2vR\omega\cos\omega t + R^2\omega^2} \quad (6)$$

$$P_m = \left( \frac{\cos\gamma_0}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2}\right)} + \frac{\sin\beta}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma_0}{2}\right)} \right) \cdot \frac{\tau_s v_T a_p a_s f_z Z}{2R\omega\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma_0}{2}\right)} \quad (7)$$

将公式(5)、(6)代入(7)中整理可得

$$P_m = \frac{Z\tau_s \pi a_s a_p \sqrt{v^4 + 2v^3 R\omega\cos\omega t + v^2 R^2\omega^2}}{R\omega\cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma_0}{2}\right)} \cdot \left( \frac{\cos\gamma_0}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_0}{2}\right)} + \frac{\sin\beta}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma_0}{2}\right)} \right) \quad (8)$$

式中: $\beta$ 为铣刀前刀面摩擦角; $\gamma_0$ 为铣刨刀具实际切削前角; $\tau_s$ 为被铣刨材料的劈裂破坏强度; $a_p$ 为单把刀头的铣削宽度。

由式(8)可以看出,铣削功率要受诸多因素的影响,既与铣刨机自身的参数有关,又与作业对象有关系,还与铣刨机的作业状态有关。然而铣刀前刀面摩擦角、铣刨刀具实际切削前角、铣刨鼓直径以及铣刨鼓上刀头的个数在铣刨作业的过程中通常是一定的,可看成常量。被铣刨材料的剪切屈服强度随被铣刨沥青路面的状况而定,亦可视为不变量。在铣刨机工作的过程中能比较容易实现人为控制的参数只有铣刨鼓转速以及机器的作业速度。为保证系统的传动效率,铣刨转子通常采用机械传动,这使得对铣刨转子转速 $\omega$ 的连续调节很难实现。那么,就只有对铣刨机行驶速度的自动调节容易实现,并且铣刨机工作的过程中其铣刨作业所消耗的功率 $P_m$ 与其行驶速 $v$ 也是二次函数关系。因此,通过调节铣刨机作业速度而实现调节发动机功率是有效的。

### 1.3 发动机输出功率的影响因素

当发动机的油门位置一定时,其调速特性也随之确定。由发动机的功率 $P_e = c \cdot M_e \cdot n$ ( $c$ 为常数)可知<sup>[6]</sup>,当发动机的油门位置一定,如果外负荷所需的扭矩 $M_e$ 波动超出发动机的调速范围,就势必造成发动机转速 $n$ 有较大变化。由发动机外特性曲线(图1)可以看出,发动机转速 $n$ 的波动会造成发动机 $P_e$ 的变化。这样就可以通过调节发动机的外负荷实现对发动机输出功率的调节,从而实现铣刨机对发动机输出功率的合理利用。

万方数据

而铣刨机所消耗的功率的调节可以通过调节其作业速度实现,并且铣刨机作业速度的变化对其用于铣刨作业以及行走所消耗的功率有显著的影响。由此可以看出,可以通过调节铣刨机的行驶速度来调节其外负荷,最终实现对油门位置固定的铣刨机发动机输出功率的调节。

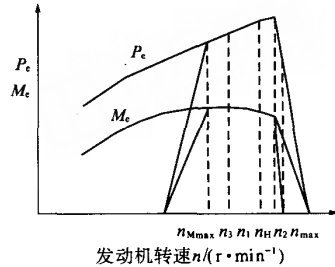


图1 发动机外特性曲线

Fig.1 The engine full load feature curves

## 2 控制参数选择

通过以上的分析可以看出,铣刨机所消耗的功率与其作业速度均出现了二次关系。所以在可调节的参数中,对铣刨机的行驶速度的调节既对转子铣削功率有非常显著的影响,又对行走功率影响显著。这样,转子系统功率、行走系统功率和发动机输出功率之间通过铣刨机的作业速度联系了起来。通过调节铣刨机的作业速度既可以调节行走系统,又可以调节转子系统消耗的功率,从而有效调节发动机的输出功率,并且技术可行。因此,选择铣刨机的作业速度作为功率自适应控制的调节参数。

## 3 仿真实验分析

### 3.1 仿真实验方法

#### 3.1.1 系统的模型以及原理

根据铣刨机主要功率消耗机构的特点,建立了铣刨机系统的模型。该模型中的发动机以实际的发动机转矩和转速变化规律为参考。动力由发动机传出,经过减速齿轮分为两部分,一部分传给铣刨鼓,一部分传给行走机构,图2中液压部分为行走驱动系统。这里传给加载离合器的是转矩值,其与加载离合器转速之积即为相应机构所消耗的功率。系统中使用的是简易PID自适应调节器进行调节<sup>[7]</sup>。

#### 3.1.2 系统加载规律的确定

根据所设计仿真系统的特点,把整机所消耗的功率转化成转矩的形式进行输入。根据

公式<sup>[6]</sup>:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (9)$$

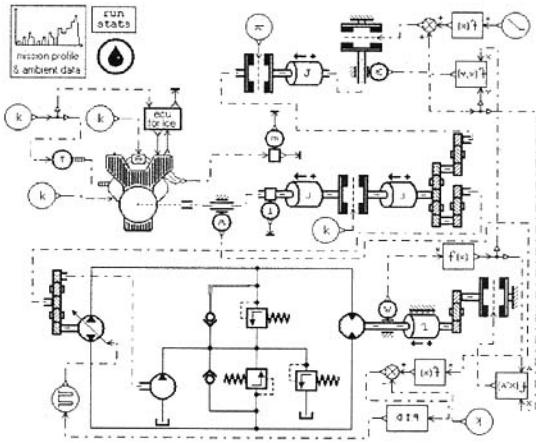


图2 铣刨机行走及铣削作业机构系统模型

Fig. 2 The drive system and work system model of a cold milling machine

一般取  $\beta = 10^\circ$ ,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\eta_1 = 0.6$ ,  $a_p = \frac{B}{Z}$ , 将这些参数代入式(4)和(8), 并且忽略外界的高频干扰, 式(4)和(8)简化成对应的转矩公式分别为

$$M_1 = 1.6 \cdot (F_t R_0 + \frac{k B a_c \tau_a R_0 \omega_0}{R \omega}) \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{2 \tau_a B a_c R_0 \omega_0 \sqrt{(R_0 \omega_0)^2 + (R \omega)^2}}{R \omega^2} \quad (11)$$

式中:  $R_0$  为行走驱动轮半径;  $\omega_0$  为行走驱动轮的转速. 这样就确定了系统转矩的加载规律, 照此规律对系统进行加载仿真实验.

### 3.1.3 加载函数参数的确定

因为待铣削沥青混凝土路面的上面层已经老化或者已经被破坏, 其劈裂破坏强度相对较低, 而随着铣削深度的加大, 其劈裂破坏强度有所增加, 对于一般的城市道路, 当铣削深度为 16 cm 时可能已经铣到水泥砾石的稳定层, 其劈裂破坏强度会更大一些, 据此结合铣刨机设计、性能测试参数及参考文献对铣削深度为 4 cm、8 cm、16 cm 时的沥青混凝土材料的劈裂破坏强度进行了取值<sup>[4,8,9]</sup>, 其它参数随铣刨机而定, 对于本模型其参数同沥青混凝土路面劈裂破坏强度一并如表 1 所示.

### 3.1.4 加载模拟实验

干扰负荷随时间的变化曲线见图 3, 并选择

了铣削深度为 4 cm 且外负荷的变化会使发动机过载或者小负荷工作的这一典型工况的曲线进行分析, 其它铣削深度的工作参数如表 2 所示.

### 3.2 仿真实验结果分析

根据使用功率自适应控制系统前后所采集到的实验数据如表 2 所示, 结合这些数据与相应的曲线对实验现象进行分析. 从图 4 和图 6 可以看出, 机器在未使用功率自适应控制系统前, 当外负荷的变化造成发动机转速波动时, 铣刨机的作业速度与外负荷的变化趋势相同, 平均作业速度为 10.44 m/min, 但作业速度的变化幅度只有 1 m/min; 图 5 中发动机输出功率波动为 42 kW, 使其平均有效输出功率只有 115.56 kW, 发动机额定功率利用率为 87.5%. 机器在使用功率自适应控制系统后, 图 6 显示铣刨机行驶速度出现 3.5 m/min 的较大幅度波动, 平均作业速度为 11.11 m/min; 图 4 中发动机转速相对比较平稳, 转速波动幅度只有 5 r/min 比未使用功率自适应控制系统的 117 r/min 小得多; 图 5 中发动机的输出功率波动只有 8 kW, 比未使用功率自适应调节系统小很多, 发动机额定功率利用率提高到 97.7%, 发动机额定功率利用率比未使用功率自适应控制系统时提升 10.2%, 发动机的平均有效输出功率显著提高. 使用功率自适应系统前后铣刨机的平均作业速度只相差 0.67 m/min, 而发动机平均有效输出功率却相差 13.44 kW 之多, 由此可以看出, 只要铣刨机行驶速度有小幅增加或减少, 就会对发动机的输出功率有显著影响. 从表 2 也可以看出, 在不同的作业状况下, 机器的作业效率至少提高了 6.32%. 出现这些现象主要有以下原因:

(1) 未使用功率自适应系统前, 铣刨机外负荷的变化直接反映到发动机转速的波动上, 无论外负荷的增加还是减少, 在发动机油门位置及铣刨机档位一定时, 铣刨机的作业速度只能依靠发动机的转速降低或者增加而出现相同的变化趋势 (不考虑车轮的滑转), 从而改变铣刨机所消耗的功率, 这种作业速度的波动主要是由发动机转速的波动引起的. 因为外负荷是变化的, 所设定的作业速度不一定能使发动机的功率被充分利用, 使发动机出现过载或者小负荷工况; 并且发动机在变负荷的情况下作业其输出功率也会用不同程度的下降.

表1 加载规律函数参数表

Tab.1 The parameters of the load functions

$\tau_s$ /MPa	$n_{max}$ /( $r \cdot \min^{-1}$ )	$n_H$ /( $r \cdot \min^{-1}$ )	$n_{Mmax}$ /( $r \cdot \min^{-1}$ )	$M_{max}$ /( $N \cdot m$ )	$M_H$ /( $N \cdot m$ )	$P_H$ /kW	$F_f$ /N	$R_0$ /m	$B$ /m	$k$	$R$ /m
1, 1.3, 1.4	2 500	2 200	1 600	660	573	132	2 800	0.36	1	0.607	0.35

说明: $n_{max}$ 为发动机最高转速, $n_H$ 为发动机额定转速, $n_{Mmax}$ 为发动机最大转矩对应的转速, $M_{max}$ 为发动机最大转矩, $M_H$ 为发动机最大转矩。

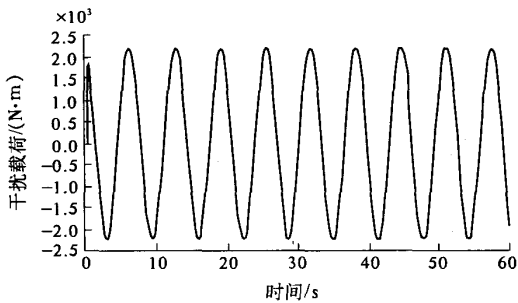


图3 系统所加载的干扰负荷  
Fig.3 The interferential load curve

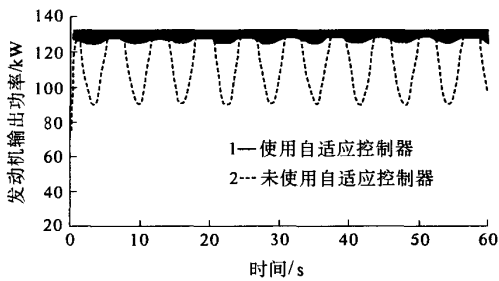


图5 使用功率自适应控制前后发动机输出功率变化曲线  
Fig.5 The engine output power changing curves with a power control system and without it

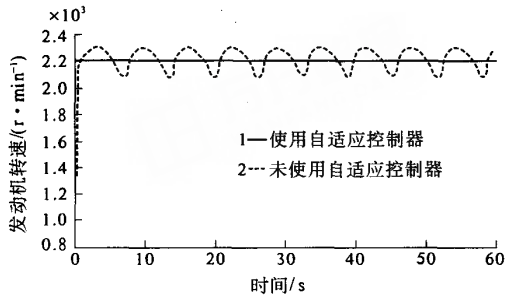


图4 使用功率自适应控制前后发动机转速变化曲线  
Fig.4 The engine speed changing cwues with power adaptive control system and without it

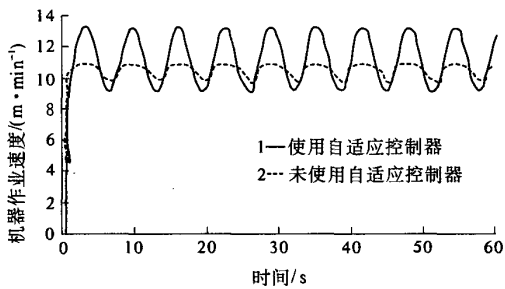


图6 使用功率自适应控制前后机器作业速度变化曲线  
Fig.6 The machine work speed changing curves with a power adaptive control system and without it

表2 使用自适应调节前后机器性能参数对比

Tab.2 The machine performance parameter comparison with a power adaptive control system to without the system

$a_p$ / cm	$\bar{n}_1$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	$\bar{n}_2$ / ( $r \cdot \min^{-1}$ )	$\bar{P}_1$ / kW	$\bar{P}_2$ / kW	$K_{B1}$ / %	$K_{B2}$ / %	$\bar{v}_1$ / ( $m \cdot \min^{-1}$ )	$\bar{v}_2$ / ( $m \cdot \min^{-1}$ )	$\bar{v}_3$ / ( $m \cdot \min^{-1}$ )	$\eta$ / %
4	2 210	2 201	115.56	129	87.5	97.7	10.44	11.11	10.2	6.32
8	2 198	2 200	115.76	130.1	87.7	98.6	4.51	4.88	4.25	8.2
16	2 195	2 199	116.00	131.1	87.9	99.3	2.34	2.56	2.29	9.4

说明: $\bar{n}_1$ 、 $\bar{P}_1$ 、 $\bar{v}_1$ 、 $K_{B1}$ 、 $\bar{n}_2$ 、 $\bar{P}_2$ 、 $\bar{v}_2$ 、 $K_{B2}$ 分别为使用功率自适应调节前后对应的发动机平均转速、平均有效输出功率、平均作业速度和发动机额定功率利用率的仿真值; $\bar{v}_3$ 为某配置参数相当的铣刨机未使用功率自适应调节作业速度实测值; $\eta$ 为使用功率自适应控制系统后机器作业效率提升值。

(2) 当使用功率自适应控制系统进行调节时,系统自动调整外负荷,这时铣刨机的档位不会再是固定的,而是可以根据外负荷的变化做出无级调速,这种调节的结果就会使发动机的输出功率基本恒定,而使铣刨机的行驶速度出现波动,以此达到了调节铣刨机外负荷之目的,这样就使发动机的额定功率利用率大大提高;

(3) 由发动机的外负荷特性曲线可以看出,

当发动机的转速偏离其额定转速时,发动机的输出功率都有不同程度的下降,在本系统中当发动机外负荷变化使发动机小负荷工作时,发动机转速超过额定转速,其输出功率最大下降了42 kW,过载时下降5 kW.在未使用功率自适应调节系统时,外负荷较大的波动带来了发动机转速的波动从而造成了发动机输出功率下降;使用该系统后,发动机基本在额定转速附近持续工作,发动机转

速波动小,输出功率下降值低,这样发动机的输出功率接近其额定功率。

实验结果表明选择铣刨机的行驶速度作为功率自适应控制的调节参数不仅能够有效地调节铣刨机的外负荷使之稳定,而且可以使机器进行自我调节做到发动机的额定功率利用率最高。但值得指出的是,当机器铣刨作业负荷较小时,发动机转速将会一直高出  $n_2$ ,功率自适应调节系统会不断激励行走泵伺服系统将泵排量逐渐提高到最大,这时铣刨机会以最高作业速度工作,而不是以最大功率(额定功率)工作。尽管如此,此时铣刨机作业效率是最高的。由表 2 可以看出,当铣刨深度加大时,铣刨机的外负荷也随之加大,外负荷的变化也更加剧烈,以速度为调节参数的功率自适应的调节所起的作用也更加明显。

### 3 结论

(1)以铣刨机的作业速度作为控制系统的调节参数是合理有效可行的,功率自适应系统能使铣刨机完成对外负荷的自动调节,使铣刨机合理充分利用发动机的额定功率,提高整机的作业效率。该功率自适应系统能够将机器自动调节在发动机额定功率附近工作,使机器在给定条件下的额定功率利用率和作业效率分别提高了 10.2% 和 6.32% 以上。

(2)总结出了铣刨机铣刨作业以及行走系统所消耗功率的实用计算公式,利用这些公式可以对这两部分所消耗的功率进行了计算。这些结论不仅对铣刨机的数控系统设计具有一定的理论参

考和应用价值,也能为其它相似工程机械及其数控系统的设计提供一定的参考依据。

### 参考文献:

- [1] 王国安,刘洪海. 沥青混凝土路面冷铣刨机的性能试验与参数优化[J]. 筑路机械与施工机械化, 1992, (3): 3-61.
- [2] 曾卫兵,赵敏,何挺继. 沥青路面铣刨机作业性能分析与验证[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(3): 58-61.
- [3] 杨贺来,孙善萍. 沥青路面冷铣刨机刀具设计及失效分析[J]. 工程机械, 1995, (6): 4-101.
- [4] 田晋跃,向华荣. 路面铣刨机铣削阻力及其参数影响规律分析[J]. 江苏大学学报(自然科学), 2004, 25(5): 380-384.
- [5] 赵伟民,藤翼,徐六庆,等. 路面铣削装置的设计分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2000, (6): 6-71.
- [6] 姚怀新. 工程机械底盘及其液压传动理论[M]. 北京:人民交通出版社, 2002: 80-146.
- [7] HAYAKAWA T. Direct Adaptive Control for Nonlinear Uncertain Dynamical Systems[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2003: 143-186.
- [8] YANG Tzung-Cheng. Adaptive control of a flexible manipulator with unknown changing loads[D]. Maryland: University of Maryland College, 1989: 90-113.
- [9] 王旭东,沙爱民,许志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京:人民交通出版社, 2002: 115-117.
- [10] 樊统江. 不同级配沥青混合料的力学性能和路用性能的影响[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(1): 22-25.

## Research on Adaptive Power Control Parameter of a Cold Milling Machine

MA Peng-yu, HU Yong-biao, ZHANG Xin-rong

(Construction Machinery School, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The influence factors in the power consumption of the cold milling machine and the load feature of the engine are firstly analyzed in this paper. And the machine work speed is selected as the power adaptive parameter. Based on these analyses, a simulation model of the cold milling machine is designed with the software. Whether the engine power utilization of the cold milling machine is reasonable or not is verified through simulation which uses the adaptive power control system. The results show that using the work velocity of the cold milling machine as the control parameter is reasonable and effective. The engine of the milling machine can be set to work at its rated power by the self-adjustment of adaptive power control system. In this case, the rated power utilization ratio of the engine is improved more than 10.2% and the machine efficiency is raised at least 6.32% in various work conditions. The theoretical basis and novel practical methodology can be provided for making good use of the engine power and increasing the machine work efficiency.

**Key words:** cold milling machine; adaptive power; selection of control parameter