

基于数值积分与功率损耗测试的冷轧电机功率模型

陈树宗, 李旭, 彭文, 张殿华
(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 为提高冷轧电机功率的计算精度,提出了一种新型的电机功率在线计算模型,模型中将电机功率分为轧制功率和机械功率损耗.其中,轧制功率采用基于简易有限元的数值积分方法计算获得,而电机机械功率损耗采用实验测试回归方法获得.基于本文设计的测试方案和模型结构,通过对某1450 mm五机架冷连轧机组的现场测试,回归得到了功率损耗模型中的系数,并将其应用到了该机组中.现场实际应用表明该电机功率模型的计算偏差可控制在±5%以内,证明该模型具有较高的计算精度,符合现场控制要求,具有广泛的应用前景.

关 键 词: 冷轧;轧制力矩;轧制功率;简易有限元;功率损耗测试;数学模型
中图分类号: TG 335.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0361-05

Motor Power Model of Cold Rolling Based on Numerical Integration and Power Loss Test

CHEN Shu-zong, LI Xu, PENG Wen, ZHANG Dian-hua
(State Key Laboratory of Rolling Technology & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: CHEN Shu-zong, E-mail: chenshuzong10@163.com)

Abstract: A new online motor power model was put forward to improve the motor power calculation accuracy. In the model, the motor power was divided into two parts: rolling power and mechanical power loss. The rolling power was calculated by the simple finite element numerical integration method, and the mechanical power loss of the motor was obtained through field test and the regression method. Based on the proposed test scheme and model structure, the coefficients of the power loss model were obtained by using the actual test data of a 1450 mm 5-stand tandem cold mill. The proposed power model was applied to the 5-stand tandem cold mill. The application results showed that this model is accurate and the relative error of motor power prediction is within ±5%, which can meet the requirement of online process control and has a good application prospect.

Key words: cold rolling; rolling torque; rolling power; simple finite element; power loss test; mathematical model

在冷轧轧制过程中,主电机功率是重要的力能参数之一,主要应用于主电机容量选取、设备校核以及轧制规程设定等^[1].例如,对于冷连轧机组而言,通常选取各机架按功率成比例的方式进行负荷分配,从而可以使电机能力得到充分发挥以获得机组最大生产率^[2-3];同时,在轧机速度设定和工艺参数极限检查中,都需要计算电机功率.因此,电机功率的计算精度在板带材轧制过程控

制模型设定系统中是至关重要的.

为了计算主电机功率,首先需要确定主电机轴端的力矩.在稳定轧制时,主电机轴端所需力矩除轧制力矩外,还包括摩擦力矩、空转力矩等.在主电机输出力矩中,轧制力矩最大,该项可以通过理论模型计算获得,进而求出轧制功率;而轧制过程中损失力矩的理论计算非常复杂、模型参数难以确定,因此轧制过程中的机械损失功率的计算

难以通过理论模型获得。目前,在冷轧轧制模型系统中一般通过电机效率补偿系数来修正电机功率^[4-6]。但在实际生产中,由于轧制速度、轧制力等参数会发生变化,轧制过程的机械损失功率并不为固定值,因此传统计算轧机电机功率的模型具有一定局限性。

为了提高冷轧电机功率计算精度,本文提出了一种理论计算与电机机械功率损耗测试回归相结合的计算模型,将冷轧机的电机输出功率分为轧制功率和机械功率损耗。其中,轧制功率采用简易有限元方法计算得到,而电机机械功率损耗采用实验测试数据回归方法获得。该电机功率计算模型已应用于某厂 1 450 mm 五机架冷连轧机组上,现场数据表明该模型具有较高的计算精度。

1 轧制力矩和轧制功率的理论模型

为了计算轧制力矩、轧制功率等参数,首先需要确定轧件变形区内的垂直压应力(即单位轧制压力)沿接触弧的分布。本文采用简易有限元的方法求解卡尔曼微分方程,将带钢与轧辊的塑性变形区划分为一定数量的单元,通过对微单元进行受力分析,利用边界条件可求出塑性变形区的垂直应力分布。通过对每个微单元进行积分求和,最终可求解出轧制力矩和轧制功率^[7-9]。

1.1 冷轧变形区微单元划分及几何参数计算

将带钢变形区按照变形性质的不同分为:弹性压缩区、塑性区和弹性恢复区^[10]。如图 1 所示,沿轧件轧制方向将塑性变形区等分为 m 份。其中,后滑区各微单元的编号记为 $j=1, \dots, N$; 前滑区各微单元的编号记为 $j=m, \dots, N$; 入口弹性变形区和出口弹性变形区的微单元编号分别定义为 $0, m+1$ 。

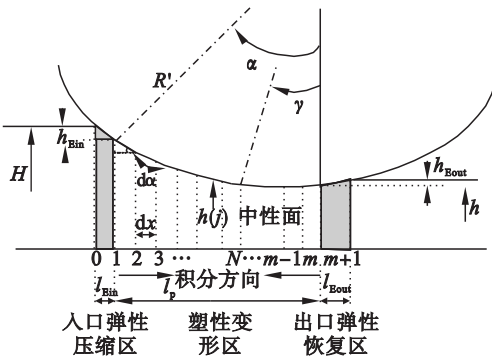


图 1 冷轧带钢变形区微元体的划分

Fig. 1 Division of deformation zones for cold rolled strip

1) 咬入角 α :

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{R'}\right) - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h}{R'}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\Delta h = H - h. \quad (2)$$

式中: Δh 为压下量, mm; H, h 分别为带钢入口厚度、出口厚度, mm; R' 为轧辊压扁半径, mm。

2) 微单元的几何参数:

$$h(j) = h + \Delta h \cdot \left(\frac{m+1-j}{m}\right)^2. \quad (3)$$

式中 $h(j)$ 为第 j 个微单元的厚度, mm。

变形区各微单元的接触弧角度为 $\Delta\alpha = \alpha/m$, 各个微单元的接触弧长近似为 $dx = R' \cdot \Delta\alpha$ 。

3) 入、出口弹性区几何参数。入口弹性变形区的变形量 Δh_{Ein} 、出口弹性变形区的变形量 Δh_{Eout} 的计算公式分别为

$$\Delta h_{\text{Ein}} = \frac{(kf_{\text{in}} - t_b) \cdot H}{E_B}, \quad (4)$$

$$\Delta h_{\text{Eout}} = \frac{(kf_{\text{out}} - t_f) \cdot h}{E_B}. \quad (5)$$

式中: E_B 为带钢弹性模量, MPa; $kf_{\text{in}}, kf_{\text{out}}$ 分别为带钢入口变形抗力、带钢出口变形抗力, MPa; t_b, t_f 分别为带钢入口张应力、出口张应力, MPa。

入、出口弹性区的接触弧长计算公式分别为

$$l_{\text{Ein}} = \sqrt{R' \cdot (\Delta h + \Delta h_{\text{Ein}})} - \sqrt{R' \cdot \Delta h}, \quad (6)$$

$$l_{\text{Eout}} = \sqrt{R' \cdot \Delta h_{\text{Eout}}}. \quad (7)$$

式中, $l_{\text{Ein}}, l_{\text{Eout}}$ 分别为入口弹性区的接触弧长、出口弹性区的接触弧长, mm。

4) 轧辊弹性压扁半径。采用 Hitchcock 公式计算轧辊弹性压扁半径 R' :

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{16 \cdot F \cdot (1 - \nu_R)^2}{\pi \cdot E_R \cdot W \cdot (H - h)}\right). \quad (8)$$

式中: R 为工作辊半径, mm; F 为轧制力, kN; W 为带钢宽度, mm; ν_R 为工作辊泊松比; E_R 为工作辊弹性模量, MPa。

1.2 微单元垂直压应力的计算

由于前滑区和后滑区的受力情况不同,将轧件变形区以中性面为界,分别计算前滑区和后滑区中各微单元的垂直压应力。

1) 后滑区垂直压应力。后滑区第 j 微单元的垂直压应力 $\sigma_Y(j)$ 为

$$\sigma_Y(j) = \frac{2}{\sqrt{3}} kf(j) + \frac{\sum_{i=1}^j F_R(i) - \sum_{i=1}^j F_Q(i) - t_b \cdot H}{h(j)}. \quad (9)$$

式中: $kf(j)$ 为第 j 微单元的带钢变形抗力, MPa; $F_R(i)$ 为第 i 微单元带钢所受的单位宽度摩擦力, N/mm; $F_Q(i)$ 为第 i 微单元所受的单位宽度水平挤压力, N/mm; t_b 为入口带钢张应力, MPa。

2) 前滑区垂直压应力。由于作用在前滑区内

微单元的摩擦力与后滑区相反,因此第 j 个微单元的垂直压应力 $\sigma_y(j)$ 为

$$\sigma_y(j)=\frac{2}{\sqrt{3}}kf(j)+\frac{\sum_{i=m+1}^jF_R(i)+\sum_{i=m+1}^jF_Q(i)-t_fh}{h(j)}.$$

(10)

式中, t_f 为出口带钢张应力,MPa.

1.3 轧制力矩和轧制功率的计算

在变形区内,轧制力矩为微单元对轧辊所产生的力矩之和,即

$$M_{R_0}=2\times\frac{1}{10^6}\times W\cdot R\cdot\sum_{j=1}^m\left(\sigma_y(j)\cdot\left(\alpha-j\cdot\Delta\alpha+\frac{\Delta\alpha}{2}\right)\cdot dx\right).$$

(11)

式中, M_{R_0} 为轧制力产生的力矩, $\text{kN}\cdot\text{m}$.

在水平方向上,带钢受到前张力和后张力作用,因此总力矩还包括带钢前后张力所产生的力矩.其中,后张力使轧制力矩增大,而前张力使轧制力矩减小.因此,考虑张力作用的轧制力矩为

$$M_R=M_{R_0}+\frac{1}{10^6}\times(t_bH-t_fh)\cdot R\cdot W.$$

(12)

式中 M_R 为总轧制力矩, $\text{kN}\cdot\text{m}$.

在计算出轧制力矩后,便可计算轧制功率:

$$P_R=M_R\cdot\frac{v_R}{R}.$$

(13)

式中: P_R 为轧制功率, kW ; v_R 为轧辊线速度, m/s .

2 电机机械功率损耗的回归模型

2.1 电机功率损耗模型结构的设计

在稳速生产时,轧机的电机机械功率损耗主要包括传动机构、轧辊轴承等设备的摩擦功率损耗以及轧辊空转所消耗功率.根据轧制理论可知,电机的机械功率损耗主要受轧制力和轧辊转速等因素的影响,将模型的结构设计为

$$P_L=a_p+\omega_r\cdot(b_p+c_p\cdot F).$$

(14)

式中: ω_r 为工作辊转速, rad/s ; a_p 为电机功率损耗模型中常数项, kW ; b_p 为电机功率损耗模型的系数, $\text{kW}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; c_p 为轧制力相关的功率损耗系数, $\text{kW}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kN}^{-1})$.

2.2 电机机械功率损耗测试

轧机在无带钢压靠转动时的轧制力矩为零,因此可认为在该状态时,电机的输出功率即为损失功率.根据式(14)可知,在轧机无带钢压靠过程中,采集不同轧制力、不同轧辊转速以及相应的电机输出功率(即电机机械功率损耗值),通过数

据回归便可以获得模型中的系数 a_p , b_p 和 c_p .

基于以上原理,设计了一种电机机械功率损耗的测试方案,如图2所示.具体步骤如下:

步骤1 以一定的转速运转冷轧电机,使整个传动及机械设备均达到正常运转的热状态,保证测试过程中的传动机械设备和正常轧制时状态相同;

步骤2 分别按照不同的轧制速度进行压靠,并实时采集不同轧制速度下的轧制力及轧机的电机输出功率;

步骤3 模型计算的电机功率为稳速时的功率,因此需要对采集的数据进行数据处理,剔除加速、减速过程中采集的数据;

步骤4 利用最小二乘法对采集的数据进行回归,获得冷轧电机机械功率损耗回归模型中的 a_p , b_p 和 c_p .

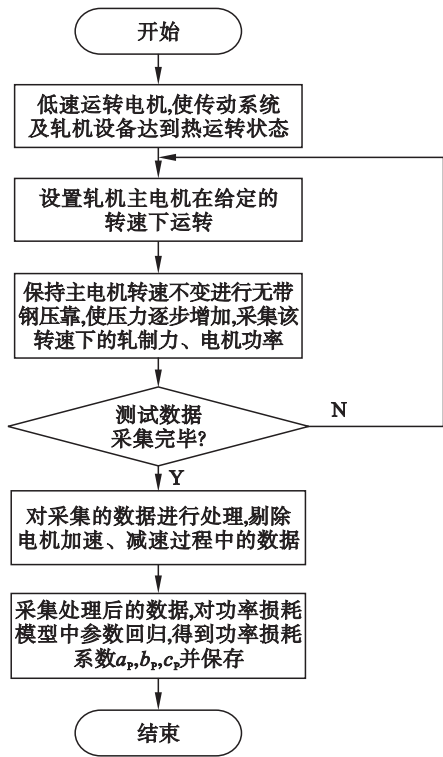


图2 电机功率损耗测试流程图
Fig. 2 Flow chart of motor power loss test

3 现场应用与算例分析

本文提出的电机功率计算模型算法已通过C++语言编程实现,并已经成功应用在某1450mm五机架冷连轧机组的过程控制模型设定系统中.在轧制规程制定和极限检查时,模型系统会通过该模型计算电机功率.现以具体算例和现场测试结果说明该模型的实际应用情况.

3.1 轧制力矩和轧制功率的计算实例

计算选取的轧件钢种牌号为 SPCC,带钢宽度为 1 200 mm,来料厚度为 2.00 mm,成品厚度为 0.40 mm,轧制功率模型计算时所采用的其他相关参数如表 1 所示.

表 1 模型计算采用的相关参数
Table 1 Parameter values used in model calculation

机架	出口厚度 mm	出口张应力 MPa	轧制速度 ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	辊径 mm	轧辊粗糙度 μm
入口	2.00	55.0	270		
1	1.43	127.8	378	425	0.90
2	0.97	142.3	560	425	0.92
3	0.68	149.8	800	425	0.68
4	0.49	152.0	1 104	425	0.64
5	0.40	60.0	1 350	425	0.52

利用微单元模型计算轧制力时,将轧制变形划分为 20 个微单元,1~5 机架的轧制压应力沿接触弧的分布计算结果如图 3 所示.

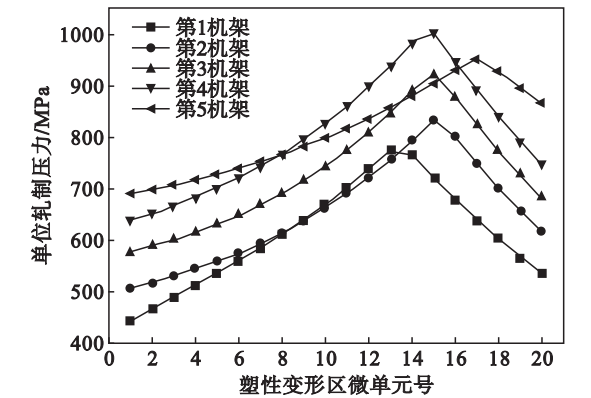


图 3 单位轧制压力沿接触弧的分布
Fig. 3 Rolling pressure distribution along the contact arc

利用微单元模型对上述算例进行计算,所计算的轧制力矩、轧制功率等参数如表 2 所示.

表 2 简易有限元模型的计算结果
Table 2 Calculation result of the simple finite element model

机架	摩擦系数	压扁半径 mm	接触弧长 mm	轧制力 kN	轧制力矩 $\text{kN}\cdot\text{m}$	轧制功率 kW
1	0.069	270	12.5	9 394	64.6	1 915
2	0.054	283	11.5	9 287	82.7	3 632
3	0.044	317	9.6	8 760	59.6	3 739
4	0.035	366	8.3	8 328	42.5	3 680
5	0.021	453	6.4	6 752	30.4	3 218

3.2 电机功率损耗测试结果

依据 2.2 节提出的方法,对某 1 450 mm 五机架冷轧机组的电机功率损耗进行了测试并拟合

出了机械功率损耗模型中的系数. 连轧机组中各个机架均采用了相同的方法测定功率损耗,下面给出第 3 机架的电机功率测试及数据拟合情况.

在测试过程中,采样周期设置为 100 ms,分别测量了 2.35、4.7、15 和 35 rad/s 四组冷轧轧机转速下的不同轧制力和电机功率,所得到的测量数据和拟合数据如图 4 所示.

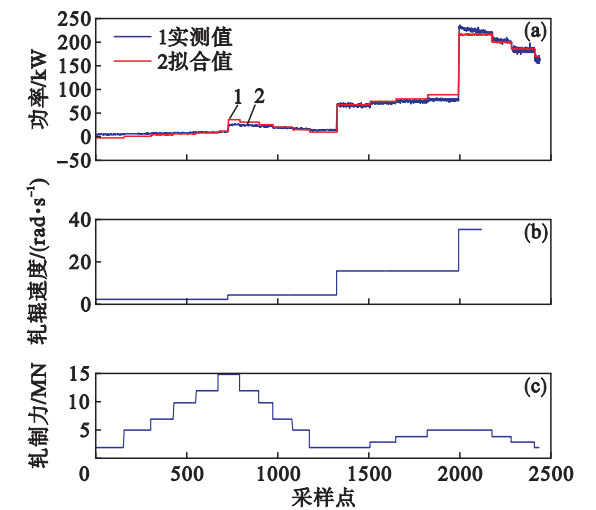


图 4 电机机械功率损耗测量结果
Fig. 4 Test results of motor power loss
(a) —电机机械功率损耗实测曲线和拟合曲线;
(b) —轧辊速度实测曲线; (c) —轧制力测试曲线.

对采集数据进行预处理,通过最小二乘法对式中的参数进行拟合得到 $a_p = -14.1814$, $c_p = 0.00044146$. 电机机械功率损耗与轧制力、轧制速度之间的关系如图 5 所示,电机机械功率损耗与轧制力、轧制速度之间的关系式为

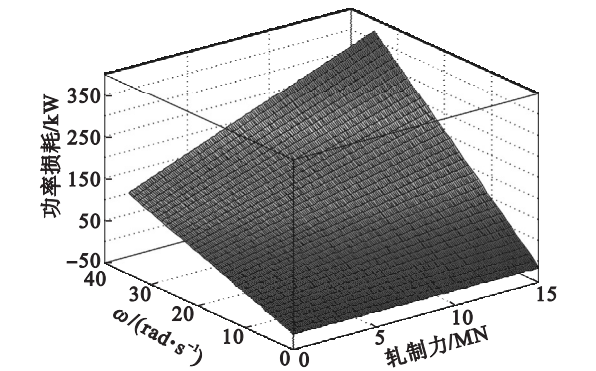
$$P_L = -14.1814 + \omega_r \cdot (4.4181 + 0.00044146 \cdot F). \quad (15)$$


图 5 电机功率损耗与轧制速度、轧制力之间的关系曲线
Fig. 5 Curve of motor power loss versus speed & force

分析图 5,可以看出电机的功率损耗与轧辊转速和轧制力成正比,当轧机在低速、低轧制力运行时,电机的功率损耗仅有数十千瓦;而轧机在高

速、高轧制力运行时,电机功率损耗可达 400 kW 以上,占整个电机功率输出的比例可达到 10% 以上. 因此,在电机功率计算中,由于轧制力、轧制速度等轧制参数的变化,轧制过程的功率损耗变化范围较大.

3.3 电机功率模型的计算精度

为了提高电机功率的计算精度,根据现场测试数据拟合了各机架电机机械功率损耗模型参数,同时采用了模型自适应算法. 图 6 给出了上述算例中电机功率模型计算值和现场实际值的对比结果. 通过对现场轧制数据的统计和分析可知,电机功率模型的计算偏差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,满足控制要求.

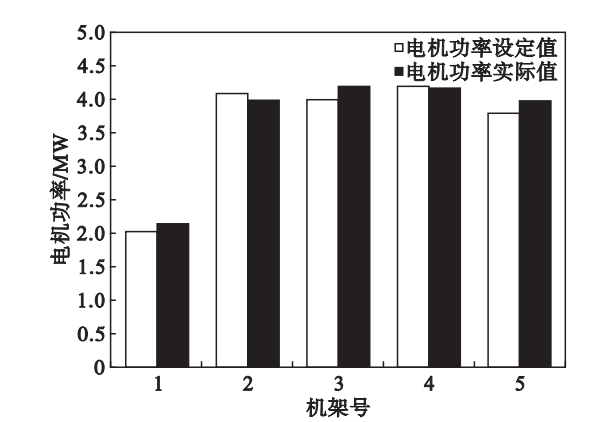


图 6 电机功率的模型精度
Fig. 6 Motor power model accuracy

4 结 论

- 1) 建立了一种轧制功率理论计算与电机功率损耗实验测试回归相结合的新型冷轧电机功率在线计算模型.
- 2) 根据现场电机功率损耗测试数据,回归得到了电机机械功率损耗模型中的系数. 测试结果表明,由于轧制力、轧制速度等轧制参数的变化,轧制过程中的功率损耗变化范围较大.
- 3) 开发的电机功率计算模型已成功应用于某 1 450 mm 五机架冷连轧机组中,通过具体算例

验证该模型具有较高的精度,计算偏差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,满足在线控制要求.

参考文献:

[1] Fiebig E,Zander H. Automation of cold-rolling tandem mills [J]. *Metallurgical Plant and Technology*, 1982, 5 (3) : 88 - 97.

[2] Lin S,Nan Y R. Optimization of rolling schedule in tandem cold mill based on QPSO algorithm[J]. *Advanced Materials Research*,2011,145:165 - 170.

[3] Wang D D,Tieu A K,de Boer F G,et al. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000,13(4) :397 - 406.

[4] Avila Pires de C T,Ferreira H C,Sales R M. Adaptation for tandem cold mill models[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2009,209(7) :3592 - 3596.

[5] 李维刚,谭树彬,李家波,等. 热连轧机轧制力和轧制力矩模型研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2011,32(5) : 622 - 625.
(Li Wei-gang, Tan Shu-bin, Li Jia-bo, et al. Modelling rolling force and rolling torque in a hot strip mill[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2011, 32(5) : 622 - 625.)

[6] 白金兰,李东辉,王国栋,等. 可逆冷轧机过程控制功率计算及其自适应学习[J]. *冶金设备*,2006,157(3) :1 - 4.
(Bai Jin-lan, Li Dong-hui, Wang Guo-dong, et al. Power calculation and adaptive learning of process control in reversible cold rolling mill [J]. *Metallurgical Equipment*, 2006,157(3) :1 - 4.)

[7] Datta A K, Das G, De P K, et al. Finite element modeling of rolling process and optimization of process parameter [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 426 (1/2) : 11 - 20.

[8] Chen S Z,Zhang D H,Sun J,et al. Online calculation model of rolling force for cold rolling mill based on numerical integration [C]// *Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference*. Taiyuan, 2012: 3951 - 3955.

[9] Stone M D. Rolling of thin strip [J]. *Iron and Steel Engineer*,1956,29(12) :34 - 38.

[10] Bland D R,Ford H. An approximate treatment of the elastic compression of the strip in rolling mills [J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*,1952,172:245 - 249.