

交流电动控制技术在叉车中的应用研究

徐丽芳, 宋文斌

(浙江杭叉工程机械股份有限公司, 浙江 杭州 311300)

摘要:交流控制器是交流电动叉车的核心, 如何选择并应用好交流控制器非常重要。针对因交流控制器选型不当而出现的“电机及控制器频繁热保护, 比直流系统更加费电”的问题, 从目前叉车常用驱动和控制技术入手, 通过理论和实际应用, 分析了不同控制技术的优缺点, 为交流叉车控制系统的合理应用提出了可供参考的意见。试验结果表明, 矢量控制技术在牵引控制系统中有明显优势, 而起重系统中可以采用滑差控制技术, 但滑差控制器的参数一定要与电机匹配好。

关键词:叉车; 转差频率控制; 矢量控制; 交流控制器

中图分类号:TH39; TH246

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)11-0057-04

Application research of AC inverter technology in electrical forklift truck

XV Li-fang, SONG Wen-bin

(Zhejiang Hangcha Engineering Machinery Co., Ltd., Hangzhou 311300, China)

Abstract: AC controller is the core part of AC electric forklift trucks. It is very important on choosing the proper AC controller. Aiming at the condition when forklift is installed with improper AC controller, which will result in frequent heat protection of motor and controller as well as more energy consuming than the DC forklift, beginning from the normal driving and controlling technology of AC forklift trucks, by analyzing the advantages and disadvantages of different controlling technology from theory and actual practice, certain suggestions concerning the proper utilization of controlling system on electric forklift truck were provided. According to the research experiment, more apparent advantages can be witnessed on the utilization of vector controlling technique in truck's driving control system. Slip controlling technique is suggested to be applied on lifting system. Special attention should be paid to the match between data from slip controller and the electric motor.

Key words: forklift truck; slip control; vector control; AC controller

0 引言

交流电机以其优越的性能, 广泛应用于国民经济各领域, 但因为叉车的电源是铅酸蓄电池, 需要逆变成三相交流电, 受功率半导体器件成本和晶体管散热的影响^[1], 直到 1997 年, 瑞典 BT 公司在大量试验的基础上才推出了全球首款交流传动系统的前移式叉车, 叉车才算真正进入交流控制的年代。

交流电机没有电刷, 因而没有最大电流的限制, 这意味着可向电机馈入比直流电机更大的电流, 电机可有更大的输出扭矩, 而且它可在更高的转速上运行, 所以整车设计时加速度和最高车速可以大大提高, 性能

上甚至可以接近内燃叉车的水平, 为电动叉车完全替代内燃叉车提供了技术保证。在交流电机上, 热量主要在定子线圈上产生, 即在电机外壳上产生, 这使得冷却更容易, 另外交流电机没有磨损, 不需定期检查更换零件, 是一种免维护电机, 所以可以将电机全封闭, 杜绝灰尘和异物进入电机, 大大延长电机的使用寿命。

交流电机良好的动力性能使其在同样的时间内有更高的效率, 维护成本比直流系统又大大降低, 叉车的操控又比直流系统更平滑, 更重要的是整车的成本经过多年的努力已经接近直流叉车, 所以交流技术已经被越来越多的用户所接受。欧洲销售的电叉 90% 以上已经采用交流控制系统, 国内各个叉车生产厂家也

都推出了全系列的交流叉车。交流控制器是交流叉车的核心,如何正确地选择及应用好交流控制器是交流叉车设计中的一个难点,设计不当会出现“电机控制器频繁热保护,比直流系统更加费电”等等问题。

目前叉车用交流控制器生产厂家有 CURTIS、DANAHER、MEIDEN、PG、SME、ZAPI 等,控制方式有转差频率控制、矢量控制、无编码器矢量控制等。由于当前存在太多的控制器品种,对于如何正确的选择叉车控制系统可能会产生迷茫,本研究主要讨论目前应用比较多的转差频率控制和矢量控制两种控制方式,通过联系控制原理及实际应用分析两种控制方式的长处和不足,为交流叉车控制系统的合理应用提供参考。

1 转差频率控制原理

转差频率控制的基本思想是通过协调控制电机电压和供电频率,调节电机转速和扭矩,以满足负载的要求,根据感应电机基本工作原理,可得感应电动机的转速控制方程为^[2]:

$$RPM = \frac{2f \times 60}{p} \quad (1)$$

式中 RPM —电动机转子每分钟的转速; f —三相交流电供电频率,Hz; p —电机定子的极数。

公式(1)表明转差频率控制是通过改变 f 值来获得不同转速的。

转差频率控制的转矩控制方程为^[3]:

$$T_e = K_m \Phi_m^2 \frac{\omega_s R'_2}{R'^2_2 + (\omega_s L'_{12})^2} \quad (2)$$

式中 T_e —电磁转矩; K_m —电机转矩的结构常数; Φ_m —每根气隙磁通量; ω_s —转差角频率, $\omega_s = s \times \omega_1$,其中 s 为转差率, ω_1 为角速度; R'_2 —折合到定子侧的转子每相电阻; L'_{12} —折合到定子侧的转子每相漏感。

公式(2)表明转差频率控制通过改变 ω_s 转差角频率以改变电磁转矩,其不足之处主要有以下几点:

(1) 忽略异步电机中旋转电动势对动态性能的影响。

(2) 转差频率控制无法实时获取 Φ_m 值,所以实际运算时只能认为在叉车运行过程中 Φ_m 不变,根据电机和应用车型的不同取一个常量,但叉车在实际运行中 Φ_m 是变化的。

(3) 忽略动态电流相位的延时。

基于以上原因,系统的实际动态性能较差,属于稳态控制的范围,而叉车的使用工况很复杂,牵引电机扭矩波动很大。另外如采用开环控制,机械特性较软,负载变化时的静差率太大,这使转差频率控制无法在车

辆上得到应用。为了克服这些缺陷,能让转差频率控制应用在车辆上,转差频率控制必须引入速度闭环,就是在电机上增加一个速度传感器,用以实时监测电机的旋转速度和旋转方向。这样就可以实时监测 s 转差率的值,使转速变化频率与实际转速同步上升或下降,提高了动态响应能力,另外也有助于对车辆速度进行精确控制。但由于部分参数仍无法准确获得,电机动态性能不佳仍是其主要缺陷。转差频率控制的好处是控制器设计相对简单,易于实现,所以成本低^[4-5]。

2 矢量控制原理

1971 年德国西门子公司 F. Blaschke 提出了基于交流电机坐标交换的交流电机矢量控制原理,应用坐标变换将三相系统等效为两相系统,再经过按转子磁场定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量和转矩分量间的解耦,从而达到对交流电动机磁链和转矩的分别控制。同时为了解决转子磁链的精确估算,采用自适应控制理论进行转子磁链的参数辨识,使交流电机调速达到并超过传统的直流电机调速性能^[6]。

1968 年 Darmstader 工科大学的 Hasse 博士初步提出了磁场定向控制理论,对于鼠笼型三相异步电机转子磁场定向的数学模型如下^[7]:

$$\begin{bmatrix} U_{m1} \\ U_{\alpha 1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + L_s P & -\omega_1 L_s & L_m P & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & R_1 + L_s P & \omega_1 L_m & L_m P \\ L_m P & 0 & R_2 + L_r P & 0 \\ \omega_1 L_m & 0 & \omega_1 L_r & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \iota_{m1} \\ \iota_{\alpha 1} \\ \iota_{m2} \\ \iota_{\alpha 2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此可得出定子电流励磁分量控制方程为:

$$\iota_{m1} = \frac{T_2 P + 1}{L_m} \psi_2 \quad (4)$$

式中 ι_{m1} —定子电流的励磁分量; T_2 —转子励磁时间常数, $T_2 = L_r / R_2$; L_r —转子漏感; R_2 —转子每相电阻; P —拉氏变换变量 s ; ψ_2 —转子磁链, $\psi_2 = L_m \iota_{m1} + L_r \iota_{m2}$ 。

通过式(4)可以得出: ι_{m1} 是定子电流的励磁分量,转子磁链 ψ_2 仅由 ι_{m1} 产生, ψ_2 与 ι_{m1} 之间的传递函数是一阶惯性环节,使得 ι_{m1} 在动态中获得强迫励磁效应,从而克服实际磁通的滞后。

矢量控制的转矩控制方程为:

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \iota_{\alpha 1} \psi_2 \quad (5)$$

式中 T_e —电磁转矩; $\iota_{\alpha 1}$ —定子电流的转矩分量; n_p —电机定子的极数; L_m —互感; L_r —转子漏感。

式(5)表明,当 ι_{m1} 不变,即 ψ_2 不变时,如果 $\iota_{\alpha 1}$ 变

化,转矩 T_e 立即随之成正比变化,没有任何滞后,所以矢量控制获得的动态性能比转差频率控制大大提高。

矢量控制也都引入速度闭环,安装速度传感器,因为这可以降低系统的复杂度,提高速度控制的精确度。近几年来,各国学者和技术人员还致力于无速度传感器矢量控制系统的研究,利用检测定子电压、电流等易于测量的量进行速度估算以取代传感器,但技术上还有很多难点,应用也不多,所以本研究所说的矢量控制都是指引入速度闭环的系统^[8]。

由于需要处理大量的数据,矢量控制器需要强大的运算器,控制器要比转差频率控制器复杂很多。随着微电子技术的快速发展,微处理器的应用使得矢量控制器的功能更强大且成本也不断下降,矢量控制器的价格也在可承受的范围内了^[9]。

3 实验结果及分析

为了验证转差频率控制和矢量控制在实际应用中的不同效果,本研究选取了 1 台 2.5 t 起升重量的叉车并安装不同的系统进行试验。安装不同的控制系统后,都按如表 1 所示的整车性能参数调试好车辆。由于牵引电机和蓄电池的不同可能会对试验结果有影响,所有试验均在同一辆车上完成并采用相同的牵引电机和蓄电池。速度传感器选用轴承编码器,安装在电机轴上,每转 64 个脉冲数。蓄电池选用铅酸蓄电池,由 24 个单体串联而成,容量为 630 A·h。控制器均安装在车体上,没有强制散热措施。

表 1 整车性能参数	
项目	参数
叉车起升重量/kg	2 500
轮胎半径/mm	338
轮胎类型	实心胎
空载时自重/kg	4 250(含电池)
满载时自重/kg	6 750(含电池)
空载时驱动轮负载/kg	1 740(含电池)
满载时驱动轮负载/kg	5 730
电机功率/kW	9
蓄电池电压/V	48
满载爬坡度 i (5 分钟工作制)	12%
满载爬坡速度/(km/h)	6
满载爬坡时需要的扭矩/(kg·m)	211.3
空载时需要的扭矩/(kg·m)	17.7
空载速度/(km/h)	14
空载时 0~10 m 加速时间/s	5.9
满载时需要的扭矩/(kg·m)	25.8
满载速度/(km/h)	13
满载时 0~10 m 加速时间/s	6.3

在控制器的选择上本研究分别选取了来自不同厂家的 4 个转差频率控制器和 2 个矢量控制器。由于目前矢量控制器生产的厂家较少,只选到了两个样品,但不会影响到对试验结果的判断。试验样品都为同一规格(最大电流 550 A),试验控制器样品情况如表 2 所示。

表 2 样品情况			
样品编号	样品规格(最大电流/A)	控制方式	厂家
1 号	550	转差频率控制	A
2 号	550	转差频率控制	B
3 号	550	转差频率控制	C
4 号	550	转差频率控制	D
5 号	550	矢量控制	A
6 号	550	矢量控制	B

为了使试验条件相同,按 JB/T3300-92《平衡重式叉车 整机试验方法》的试验方法进行各种状态下的电流峰值测试^[10]。这使得各测试样品都在相同工况下进行测试,用测得电流的峰值来判断不同控制器在此工况下的最低效率,测得的电流峰值越小说明效率越高。峰值的降低也有利于提高铅酸蓄电池的放电量和使用寿命。实测结果如表 3 所示。

表 3 各种运行状态下的电流峰值						
测试项目	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
平路空载加速时电流峰值/A	344	355	348	351	340	332
平路满载加速时电流峰值/A	456	450	455	459	441	435
平路空载最大速度时电流峰值/A	105	105	108	107	104	105
平路满载最大速度时电流峰值/A	129	130	126	128	127	127
空载爬坡电流峰值/A	301	300	298	295	285	281
满载爬坡电流峰值/A	528	530	520	515	503	503

通过表 3 可以看出,矢量控制在大扭矩突变输出时性能较优,而平路稳态输出时矢量控制与转差频率控制的电流相差不大。

由于实际作业时电流的变化值是连续波动的,光有峰值的评估还无法完全判断控制器的整体性能,还需要模拟实际作业对连续作业进行评估。试验方法按照 JB/T3300-92《平衡重式叉车 整机试验方法》中热平衡试验的要求进行测试。通过连续作业,可以获得“电机温升”、“控制器温升”、“作业循环次数”等数据。其中“作业循环次数”是指铅酸蓄电池放电至剩余 20% 电量时所测得的循环次数。作业循环次数越多,说明整体效率越高,更节能。电机和控制器的温升越低,说明系统发热越小,电能转换成机械能的转换率高。温升越低,电机和控制器的寿命越长。控制器温升值的大小也为控制器的选型及安装提供参考。热平衡实测结果如表 4 所示。(下转第 70 页)

[7] [作者不详]. IEEE Std 802. 15. 4 – 2003: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)[EB/OL]. [日期不详]. <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html>.

[8] 瞿 雷,刘盛德,胡咸斌. Zigbee 技术及应用[M]. 1 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.

[9] TUBAISHAT M, MADRIS S. Sensor networks: an overview[J]. **IEEE Potentials**,2003,22(2):20–23.

[10] SOHRABI K, POTTIE G J. Performance of a Novel Self-organization Protocol for Wireless Ad Hoc Sensor Networks[C]//Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam: [s. n.],1999:1222–1226.

[11] 周武斌,罗大庸. Zigbee 路由协议的研究[J]. 计算机工程与科学,2009,31(6):12–14,29.

[编辑:李 辉]

(上接第 59 页)

表 4 热平衡试验数据

测试项目	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
电机温升/K	60	61	59	59	49	48
控制器温升/K	37	31	26	32	24	22
作业循环次数	133	132	134	134	141	142

通过表 4 可以看到,无论是在电机温升还是作业时间上矢量控制明显优于转差频率控制。虽然 3 号控制器的温升较低,这是由于控制器做得比较大,即与本身的散热铝板较大有关,可以排除。叉车在实际作业时,会频繁起制动,所以扭矩波动很大,转差频率控制对于扭矩的波动响应不够,降低了整体运行效率。而矢量控制很好地解决了这个问题,对扭矩的波动及时响应,提高了运行效率,降低了电机与控制器的发热。

4 结束语

(1) 叉车的牵引使用工况比较复杂,扭矩波动大,用矢量控制可以获得更高的效率,更加省电,所以矢量控制器更适合于作叉车的牵引控制。

(2) 对于扭矩连续波动很小的工况,转差频率控制与矢量控制效率相差不大。叉车的门架起升系统扭矩连续波动很小,就属于这种工况。转差频率控制的优点是控制器相对简单、成本低,所以可以将转差频率控制器应用于门架起升系统控制,以降低整车的成本。

(3) 由于转差频率控制技术对很多电机参数不能测试,这些参数的设置只能根据电机的性能人工进行录入,而参数的设置是否合理也直接影响运行效率,在实际应用时应充分考虑到这一点,控制器参数一定要与电机匹配好。

(4) 通过热平衡试验的数据可以得出转差控制器的发热量要比矢量控制大得多,所以在选择转差控制器和电机时,要比矢量控制放更大的富余量,因而需要更大尺寸的控制器和电机,或者通过强制散热来降低温升。

参考文献(References):

[1] BOSE B K. Power Electronics and AC Drives[M]. Prentice-Hall,1986.

[2] YAMAMURA S. AC Motor for High-performance Applications(Analysis and Control)[M]. Newyork Marcel Dekker, 1986.

[3] 朱平平,陈伯时. 转差频率控制的动态改进[J]. 电气自动化,1990(5):10–14.

[4] DEPENBROCK M. Direct self control(DSC) of inverter-fed induction machines[J]. **IEEE Trans. PE.**,1988,3(4):420–429.

[5] BORD D M, NOVOTNY D W. Current control of VSI-PWM inverter[J]. **IEEE Trans. IA.**,1985,21(2):562–570.

[6] 李发海,王 岩. 电机与拖动基础[M]. 北京:清华大学出版社,1994.

[7] 郭庆鼎,王成元. 异步电动机的矢量变换控制原理及应用[M]. 沈阳:辽宁民族出版社,1988.

[8] 孙树勤. 无功补偿的矢量控制[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

[9] PLUNKETT A B. Direct flux and torque regulation in a PWM inverter-in-duction motor drive[J]. **IEEE Trans. IA.**,1977(2):139–146.

[10] 机械电子工业部. JB/T3300–92 平衡重式叉车 整机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1992.

[编辑:李 辉]