

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.017

有刷直流电机振动转矩的解析与实验研究

曾 华¹, 冯 浩^{1,2}, 赵 浩³

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江工业大学 信息工程学院; 浙江 杭州 310014; 3. 嘉兴学院 南湖学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘 要:为了验证和剖析有刷直流电机振动转矩存在的客观性,采用角加速度测速发电机进行了振动转矩的检测,实验表明,有刷直流电机负载运行时存在明显的振动转矩。从元件的换向过程和气隙磁场的分布进行了分析和仿真,表明这两者是产生振动转矩的主要原因。

关 键 词:有刷直流电机;换向过程;气隙磁场;振动转矩

中图分类号:TM303 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)01-0070-05

Analysis and Experiment Research of Vibration Torque for Brush DC Motor

ZENG Hua¹, FENG Hao^{1,2}, ZHAO Hao³

(1. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
3. Nanhu College, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

Abstract: In order to verify and analyze the objectivity of vibration torque existence in brush DC motor, the vibration torque was detected by angular acceleration tachometer generator. The experiments results show that brush DC motor has obvious vibration torque when running with load. The air-gap magnetic field distribution and commutation process of elements were analyzed and simulated, the results show they are the main causes of vibration torque produced in the brush DC motor.

Key words: brush DC motor; commutation process; air-gap magnetic field; vibration torque

直流电动机是发明和使用最早的电机之一,由于其调速性能很好,起动转矩较大,特别是调速性能为交流电动机所不及,所以,在工业生产和家用电器中,至今仍得到广泛应用。随着使用场合和驱动对象运行性能要求的提高,电动机的振动与噪声已成为主要关注的参数之一,这是因为直流电机振动与噪声传动系统的振动对噪声影响很大,因此,长期以来引起电机的振动与噪声的原因及测量的研究一直是产业界和学术界关心和研究的热点之一。

过去对于直流电动机的振动与噪声的研究,一方面是针对有刷直流电动机振动与噪声的研究,主要研究直流电机主磁极的主磁场与电枢转子一阶齿谐波磁场相互作用所产生的力波引起的电机电磁噪声和振动

的主要成份,同时,研究电刷振动及摩擦所引起的噪声^[1];另一方面,因为测量由角加速度引起的轴上振动转矩的实用传感器研究相对滞后^[2-10],缺少实用的能方便地测量振动转矩的测量系统,所以,测量振动的方法一般都以直线加速度为基础的电机外壳振动作为研究测量对象。由此可见,对于电机轴上产生的振动转矩情况研究很少。

实验中通过一种能直接测量旋转系统旋转角加速度的传感器,开展了对有刷直流电动机轴上振动转矩的研究与测量,验证了有刷直流电机输出转矩中的振动转矩分量的客观存在性,并从电机的工作原理和电磁模型出发,从理论上分析证明了产生这一振动转矩的原因,为下一步降低这一转矩产生的影响提供了帮助。

收稿日期:2013-09-04;修回日期:2013-12-13

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201226082);嘉兴市科技计划项目(2012AY1021)

作者简介:曾华(1987),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为电机检测与控制。E-mail:iwanttostudy111@126.com

1 有刷直流电机轴上振动转矩的理论分析

当电枢旋转时,组成电枢绕组每条支路的元件在依次循环地换向。由于流过每条支路的电流方向是不变的,相邻支路中电流方向相对绕组的闭合回路来说是相反的,因此直流电机在工作时,绕组元件连续不断地从一条支路退出而进入相邻的支路。在元件由一条支路转入另一条支路的过程中,元件中的电流就要改变一次方向。这一元件内电流方向改变的过程,就是所谓换向^[11]。

直流电机换向过程中,电机电枢绕组并联支路中的元件数不断变化,同时并联支路中的电流也发生变化,这就导致电枢绕组的输出转矩存在振动分量。

1.1 理论分析

首先以两极电机($p=1$)单叠绕组为例,建立直流电机模型。直流电机换向是一个过渡过程,存在2种情况:

初始状态①的电路图如图1(a)所示,此时,电刷将元件1,元件25短路,每条并联支路的元件数从24变到23,此时的电路方程为

$$23R_i + 23L \frac{di}{dt} + e' = u - 2\Delta U_c \quad (1)$$

其中: R 为单个元件的内阻; i 为一条并联支路中的电流; L 为单个元件的电感值; e' 为单条并联支路中的电枢反电势; u 为电枢两端所加电压; ΔU_c 为石墨电刷的接触电压降。

初始状态②的电路图如图1(b)所示,此时,元件1,25刚离开被电刷短路的状态,支路元件数从23变到24。此时的电路方程为

$$24R_i + 24L \frac{di}{dt} + e = u - 2\Delta U_c \quad (2)$$

电流 $i(t)$ 随时间 t 变化的波形如图2所示。

假设 $R=1.6\ \Omega$, $L=8\ \text{mH}$, $u(t)=220\ \text{V}$,支路中电枢反电势 $e=0.95u$,一对正负石墨电刷的总接触电压降为 $2\Delta U_c=2\ \text{V}$,换向片数 $K=48$,转速 $n=1\ 800\ \text{r/min}$,则换向周期 $t_k = \frac{1}{48 \times (1\ 800/60)} = \frac{1}{1\ 440}\ \text{s}$;电枢铁心长度 $l_a=0.075\ \text{m}$,电枢直径 $D_a=0.05\ \text{m}$,相邻两主极之间的距离(即极距) $\tau=0.078\ 5\ \text{m}$ 。

由(1)式得

$$i_1(t) = 0.481\ 2 - 0.123\ 4e^{-200t} (\text{A}),$$

由(2)式得

$$i_2(t) = 0.234\ 4 + 0.141\ 2e^{-200t} (\text{A}),$$

又电磁力 $f=Bl i$,则电磁转矩 $T=f \cdot \frac{D_a}{2} = Bl i \cdot \frac{D_a}{2}$ 。

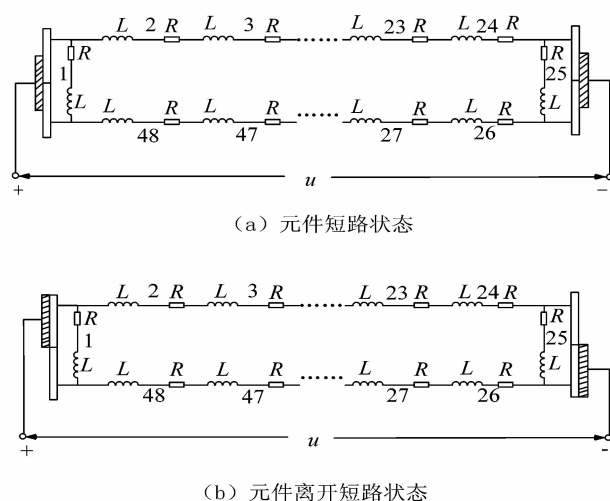


图1 元件工作状态单叠绕组电路图

Figure 1 Single lap winding circuit diagram in the working state

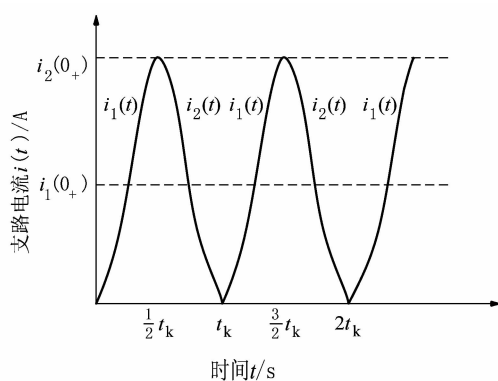


图2 支路电流 $i(t)$ 随时间 t 变化的曲线

Figure 2 Branch current $i(t)$ curve versus time t

气隙磁场分布按2种情况分析:

1) 气隙磁场分布均匀时,设磁感应强度 $B=1\ \text{T}$,磁感应强度 B 随移动距离 x 变化曲线如图3(a)所示。则在状态①下的转矩方程为

$$T_1 = 0.018\ 05 - 0.004\ 628e^{-200t} / (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3)$$

状态②下的转矩方程为

$$T_2 = 0.008\ 790 + 0.005\ 295e^{-200t} / (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4)$$

2) 磁场分布不均匀时,磁感应强度 B 随时间 t 变化的曲线为等腰梯形,其曲线如图3(b)所示。

磁感应强度 B 随时间 t 变化曲线为等腰梯形的实际分析图如图4所示。

其中 x 为第 k 个元件边在电枢表面所处的位置($k=0$ 时, $x=0$; $k=24$ 时, $x=\tau$)。电枢表面线速度 v 可用电机转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 表示为 $v=2p\tau \frac{n}{60}$,则移动距

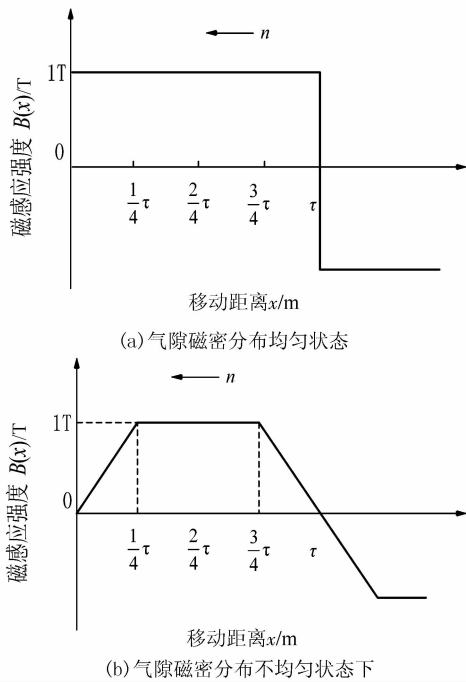


图3 气隙磁密分布不同状态下磁感应强度 B 随移动距离 x 变化的曲线

Figure 3 Magnetic induction B curve versus time t in the flux density distribution different state

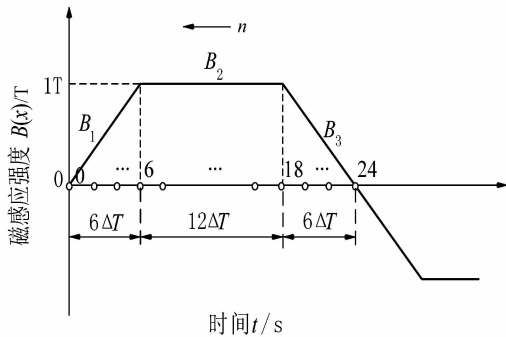


图4 气隙磁密分布不均匀状态时的实际分析图

Figure 4 Actual analysis chart in the flux density uneven distribution state

离 $x = v \cdot t = 2p\tau \frac{n}{60}t$, τ 为极距, 极对数 $p = 1$, 仍认为电枢表面是光滑的, 电刷放在几何中性线上。由于气隙磁密分布是不均匀的, 所以每个元件所受的电磁力的大小也各不相同。设气隙中某处的径向磁密为 $B(x)$, 单个元件匝数为 N_y , 则单个元件边中含有 N_y 根导线, 单个元件边有效长度 $l = l_a^{[12]}$ 。

又 $x = v \cdot t = 2p\tau \frac{n}{60}t$, 代入数据得 $x = 4.71t$ 。

相邻两个元件对应边之间的间隔 $\Delta x = \frac{2p\tau}{48} =$

$0.003\ 271\text{ m}$, 则时间间隔

$$\Delta T = \frac{\Delta x}{v} = \frac{1}{1\ 440}\text{ s} = t_k$$

则由图4得磁感应强度函数 $B(x)$ 为

$$B(x) = \begin{cases} B_1(x) = \frac{4}{\tau}x \\ B_2(x) = 1 \\ B_3(x) = -\frac{4}{\tau}x + 4 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} B_1(x) = 50.96x, (0 \leq x < 6\Delta x) \\ B_2(x) = 1, (6\Delta x \leq x < 18\Delta x) \\ B_3(x) = -50.96x + 4, (18\Delta x < x \leq 24\Delta x) \end{cases} \quad (5)$$

又 $x = 4.71t$, $N_y = 20$, 则

磁感应强度函数

$$B(t) = \begin{cases} B_1(t) = 240t, (0 \leq t < 1/240) \\ B_2(t) = 1, (1/240 \leq t \leq 3/240) \\ B_3(t) = -240t + 4, (3/240 < t \leq 4/240) \end{cases} \quad (6)$$

以导线0所在位置为 $t = 0$ 时刻, 则此时各导线所受的电磁转矩为

$$T_0 = N_y B(x) li(t) \frac{D_a}{2}$$

$$T_1 = N_y B(x + \Delta x) li(t) \frac{D_a}{2}$$

$$T_2 = N_y B(x + 2\Delta x) li(t) \frac{D_a}{2}$$

...

$$T_{23} = N_y B(x + 23\Delta x) li(t) \frac{D_a}{2}$$

则合成电磁转矩 $T = \sum_{j=0}^{23} T_j = N_y \cdot [B(x) + B(x +$

$$\Delta x) + \dots + B(x + 23\Delta x)] \cdot l \cdot i(t) \cdot \frac{D_a}{2}$$

$$= 0.612\ 4i(t) = \begin{cases} 0.294\ 7 - 0.075\ 57e^{-200t}/(\text{N} \cdot \text{m}) \\ 0.143\ 5 + 0.086\ 47e^{-200t}/(\text{N} \cdot \text{m}) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 直流电机轴上振动测量实验仿真图例

支路电流 $i(t)$ 随时间 t 变化的仿真波形如图5所示:

1) 气隙磁场分布均匀时, 电磁转矩 T 随时间 t 变化的仿真波形图如图6所示;

2) 磁场分布不均匀时, 磁感应强度 B 随时间 t 变化的仿真波形如图7所示; 电磁转矩 T 随时间 t 变化的仿真波形如图8所示。

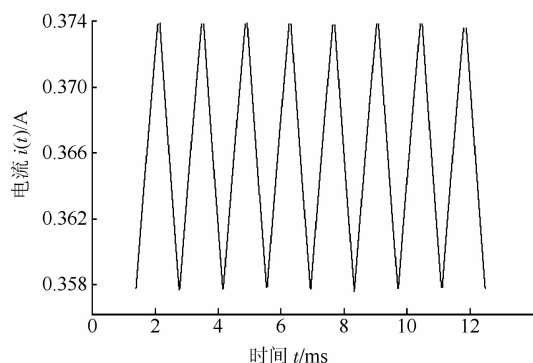


图5 支路电流 $i(t)$ 随时间 t 变化的仿真曲线
Figure 5 Branch current $i(t)$ versus time t simulation curve

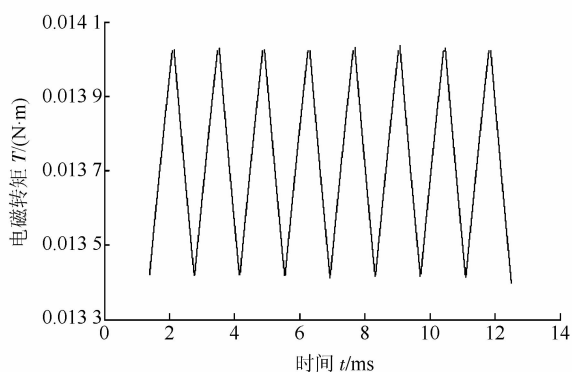


图6 理想情况下电磁转矩 T 随时间 t 变化的仿真波形

Figure 6 Electromagnetic torque T versus time t simulation waveform in the ideal case

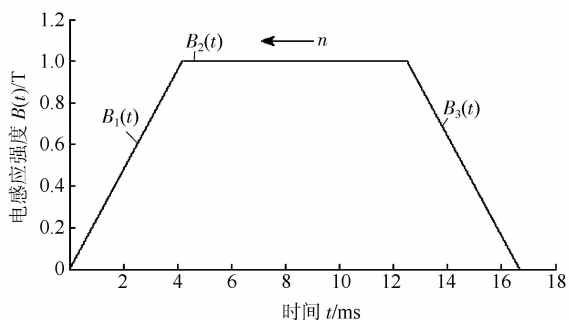


图7 气隙磁场分布不均匀时磁感应强度 $B(t)$ 随时间 t 变化的仿真曲线

Figure 7 Magnetic induction B curve versus time t in the flux density uneven distribution state

2 直流电机轴上振动的测量方法与实验

2.1 直流电机轴上振动的测量方法

由于有刷直流电动机换向过程存在振动电磁转矩,在负载恒定的情况下势必引起转速的波动变化,所

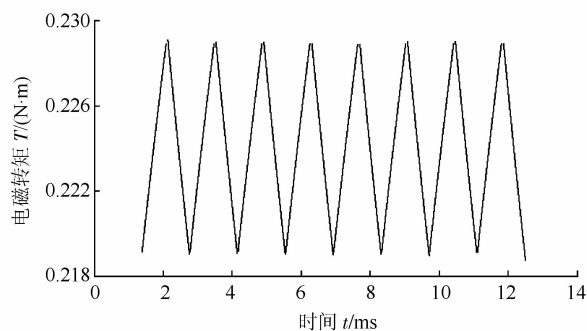


图8 实际情况下电磁转矩 T 随时间 t 变化的仿真波形

Figure 8 Electromagnetic torque T versus time t simulation waveform in the practical case

以可以通过电动机轴上的机械角加速度的变化情况来观察振动电磁转矩的存在。本实验采用项目组研制旋转变角加速度测速发电机来测量机械角加速度。实验中所使用的测量系统如图9所示。



图9 实验测量系统

Figure 9 System of the experimental measurement

2.2 实验测量结果

为了可以比较准确地对实验结果进行比较,在示波器上采用相同的显示模式。实验中测得的波形的横坐标为时间,单位是每格 25.0 ms,纵坐标为电压,单位是每格 50.0 mV。根据图9所示的实验测量系统,通过测量得到单台有刷直流电机空载时振动转矩波形如图10所示,单台有刷直流电机负载时振动转矩波形如图11所示。

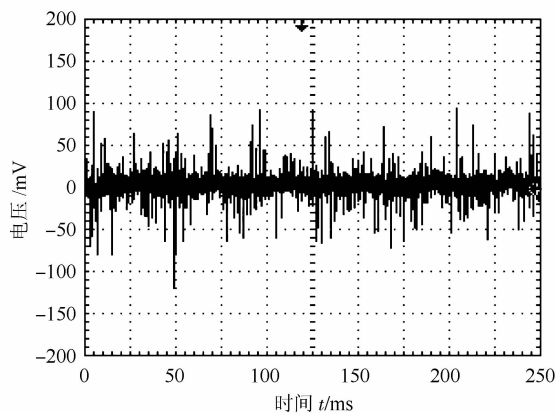


图10 单台有刷直流电机空载时振动转矩波形

Figure 10 Single brush DC motor vibration torque waveform at no load

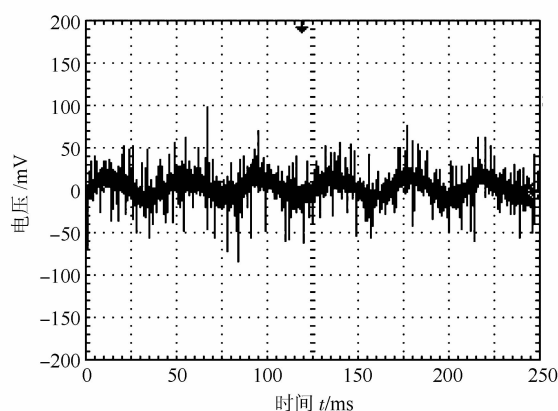


图 11 单台有刷直流电机负载时振动转矩波形

Figure 11 Single brush DC motor vibration torque waveform at the load

实验证明:有刷直流电动机确实存在换向振动转矩,而且,随着负载的增大振动转矩也随之增大,与理论分析相符。

3 结语

针对有刷直流电机轴上振动转矩,从产生原因到理论解析及实验测量都进行了具体分析研究,提出了理论解析方法和实验测量方法。理论分析和实验测量取得了一致的结果,从而证明了该分析方法和实验方法的正确性。同时通过理论分析和实验测量可知,有刷直流电机由于存在换向过程,所以输出轴客观存在

振动转矩,而且振动转矩随输出负载的增大而增大。这一振动转矩不仅仅对电机转轴产生影响,还对传动系统造成影响,因此克服和降低这一振动转矩需要后续的课题研究。

参考文献:

- [1] 陈永校,诸自强,应善成. 电机噪声的分析与控制[M]. 杭州:浙江大学出版社,1987:36-51.
- [2] 费维,刘正士,郑传荣. 几种角加速度传感器的工作原理及其应用[J]. 机床与液压,2005(1):145-146.
- [3] 孙甲丰,彭军. 角加速度测量[J]. 计测技术,2007(2):1-3.
- [4] 孙慧明,于泉,方伟林,等. 压阻式振动角加速度传感器[J]. 传感技术学报,2001(1):64-67.
- [5] 唐富荣,薛大同. 六轴加速度计的结构原理与阻尼振动设计[J]. 传感技术学报,2002(4):287-292.
- [6] 袁刚,王代华. 一种压电式六维加速度传感器的快速原型及其特性[J]. 仪器仪表学报,2011,32(2):356-362.
- [7] 吴校生,陈文元. 角加速度计发展综述[J]. 中国惯性技术学报,2007(4):458-463.
- [8] 李建利,房建成,盛蔚. 一种新型力平衡扭摆式硅 MEMS 角加速度传感器[J]. 仪器仪表学报,2008(1):73-78.
- [9] 薛前,宋彦峰. 非接触式直流角加速度传感器[J]. 黑龙江电子技术,1998(1):33-35.
- [10] 汪鑫,刘鑫. 转轴角加速度测量及其 USB 数据采集[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007(9):33-35.
- [11] 顾绳谷. 电机及拖动基础[M]. 北京:机械工业出版社,2007:19-52.
- [12] 辜承林. 电机学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005:70-72.

[信息·简讯]

· 产品介绍 ·

● 西门子推出新一代高端工业 PC

西门子工业自动化集团近日推出了适用于恶劣工业环境的新一代高端 Simatic IPC 系列 D 代高端工控机。该系列产品配备了强大的 Intel Xeon 多核处理器和第 4 代 Intel Core i3 ~ Core i7 处理器,是市场上同类箱式、机架式和面板式工业 PC 中首次采用该配置的工控机。相比 C 代产品,D 代系列产品的 CPU 性能提高了 60% ~ 180%。此外,具有优秀动态频率性能的 CPU 中集成有高清显卡,使新产品的图像处理能力提高了 3 倍。所有全新工控机均采用免维护设计,具有超长使用寿命和强大的工业功能,可 24 小时连续运行,耐高温、抗振动、抗冲击、电磁兼容性强。

全新 D 代 Simatic IPC 包括:紧凑型箱式 PC Simatic IPC627D、通用可扩展箱式 PC Simatic IPC827D 和面板式 PC Simatic IPC677D。3 款 IPC 均配有 22 寸全高清宽屏显示器,适用于快速仪表检测和控制任务,并使操作员能够在机器上直接控制和监视。全面可扩展的 Simatic IPC847D 和紧凑型 Simatic IPC647D 机架式 PC 系列均采用 19 寸机柜安装设计,适用于快速处理海量数据,如仪器仪表、测试台数据或工业图像处理。

(赵海英)

● 台达电梯一体机 IED-G 系列新品上市

台达 IED-G 系列新生代电梯一体机近期上市,作为台达在电梯行业的主打产品——IED 系列一体机的升级版,IED-G 系列在承袭台达先进的变频驱动技术的基础上,不断提高人性化、高智能化设计以及核心控制技术,为用户提供舒适、安全、节能、长寿的电梯控制解决方案。

相比上一代产品,IED-G 系列在控制技术、驱动技术及节能性、易用性方面均有明显进步,更贴近行业应用。其技术特色包括:1)双 MCU 冗余设计,整合电梯控制与驱动一体化,超强抗干扰能力,功能 I/O 端口可自由定义,降低产品应用成本,丰富的控制功能与自我安全检测。2)先进矢量控制技术,支持多样式编码器信号与感应马达闭环控制,驱动感应与永磁曳引机,乘感平顺、舒适。3)免脱负载,并道自学习及静态自学习马达参数,指引式菜单轻松、安全。4)多功能接口板、群控卡(支持 8 台群控)、语音播报模块等丰富的周边配件,同时可搭配符合环保节能趋势的有源前端 AFE 系列和电能反馈单元 REG 系列,实现高效节能。

(任彩玲)