

文章编号: 1000-582X(2003)01-0050-04

# 单轨行车新型供电方式及相关技术分析

戴欣, 孙跃

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:**在单轨行车物料搬运系统中,传统接触供电方式带来的如不规则火花、碳积、不安全等问题,限制了其在一些如铸造、清洗、喷漆等一些环境条件恶劣的车间中的应用。笔者介绍了一种基于电磁感应耦合的单轨行车电力传输系统,并针对这种系统的若干关键技术问题,如工作频率的选定、多负载控制问题、效率特性、谐波影响等,作了全面系统的分析和探讨,并给出了相应的解决方案。通过此技术的应用可以在恶劣的生产环境下实现向单轨行车提供干净、稳定、安全的电能传输,有效减少其受环境影响的程度。

**关键词:**单轨行车;感应电能传输技术;谐振

**中图分类号:**TH211.5

**文献标识码:**A

单轨行车作为一种车间内小容量物料运输设备,广泛应用在大批量、多品种的流水生产线中。其架空导轨可以在车间内根据生产需要灵活布置,构成复杂的输送线路,其所需驱动功率小,运行稳定,设备占地面积小,在输送的同时可进行多种工艺操作,是实现车间物料搬运系统综合机械化和自动化的一种有力工具。从结构上讲,它主要由固定导轨、移动小车、驱动机构3个部分组成<sup>[1]</sup>。为了简化传动机构,移动小车通常采用直接电气驱动的方式,其电气驱动机构一般安置在移动机构上。因该部分通常处于大距离移动状态,其供电常采用滑动接触方式。但这种供电方式带来诸如不规则接触火花、碳积、不安全等问题,从而限制了其在如铸造、清理、清洗、喷漆等一些环境条件恶劣的车间中的应用。为了寻求适应于这类环境下移动设备的可靠有效的供电方式,许多科技工作者和工程技术人员做了大量的工作,但始终未能很好地解决。

感应耦合电能传输技术(Inductive Coupled Power Transfer,即ICPT)作为一种适用于恶劣环境的大距离移动供电技术已开始引起人们的广泛关注。它是由新西兰奥克兰大学波依斯(Prof. Boys)教授以及由他领导的课题组率先提出并为此做了大量的研究工作。该技术基于电磁感应原理,应用大功率电力变换技术(包括谐振变换技术、软开关切换技术等),借助现代控制理论和方法,实现了电能从静止电源设备向移动设备

的非接触传递<sup>[2]</sup>。

90年代,日本、德国等国家相继投入了一定的经费从事ICPT的研究和实用化产品开发,已获得一定的技术突破和相应的实用产品,如日本大阪富库公司的无电瓶运货车、德国奥姆富尔(WAMPELER)公司的200 kW载人电动火车、新西兰奇思(UNISERVICIS)公司的30 kW电动汽车系统<sup>[2]</sup>。但由于其设备制造昂贵,此项技术的应用仍处在起步阶段。而在我国,由于未引起足够的关注,该技术的应用尚待研究和产业化开发。

由于ICPT系统对环境的适应性,在车间内货物移动吊装设备中有很广阔的应用前景。但ICPT要进入真正的产业化阶段,还必须首先解决诸如多负载运行、负载突变、大移动距离、低噪声、低功耗等问题。笔者通过研究近年来发表在国际电力电子刊物上的相关技术文献,在对ICPT技术基本结构及工作原理作了介绍的基础上,探讨了ICPT技术在应用中所涉及到的工作频率选定、负载控制、效率要素、谐波影响等几个关键问题,并得出了相关结论。

## 1 ICPT基本结构及工作原理

ICPT系统可看作一种以空气为磁介质的变压器,故其耦合系数相当低(大约 $<0.1\%$ ),最有效的改进措施是提高电流频率以达到高效率传输能量目的。一种

• 收稿日期:2002-09-09

作者简介:戴欣(1978-),男,四川眉山人,重庆大学硕士研究生。主要从事新型电源技术的研究。

典型的 ICPT 系统框图如图 1 所示<sup>[3]</sup>,它是由 4 个部分组成:大功率能量变换装置(I)、高频载流导轨(II)、能量拾取机构(III)和能量调节装置(IV)。前两部分构成原边一次侧能量发射电源,也称为初级回路,后 2 部分构成二次侧能量接收和解调系统,也称为次级回路。两个系统相对独立但又是通过磁场耦合具有能量相关性,通常一个原边发射电源带动多个拾取部分,从而为多机构同时供电。

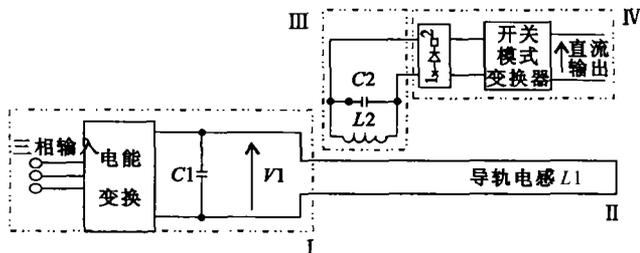


图 1 典型 ICPT 系统框图

初级回路用于实现电力变换,产生相应的高频导轨电流,其电路实现模式有多种。新西兰奥克兰大学波依斯教授提出一种基于谐振原理的 ICPT 系统,其系统拓补结构如图 2 所示<sup>[4]</sup>,它的初级回路(I, II 部分)可看作是由电流源激励的并联 LC 谐振回路,其中功率开关管  $S_1$ 、 $S_2$  采用推挽方式工作,用于将直流电流激励  $I_d$  转化为高频方波电流的形式提供给  $L_1$ 、 $C_1$  组成的谐振回路。根据正弦电路原理,该回路里将会产生正弦电流和电压,并在导轨周围的空间里形成交变磁场。

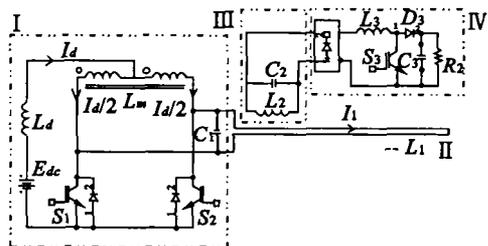


图 2 一种基于谐振原理的 ICPT 系统拓补

在初级回路中,由于开关管工作在大电流、高频上,从而产生了一系列问题。首先,开关管开关损耗随着开关频率的升高而迅速增加,降低了系统的效率;其次,由于  $\frac{di}{dt}$  过大将会带来严重的电磁干扰。为了解决这些问题,该电路采用了软开关技术,使开关管  $S_1$ 、 $S_2$  在谐振回路中电容  $C_1$  电压自然过零时进行切换,这样在理论上其开关损耗为零,  $\frac{di}{dt}$  也近似为零,从而使系统的射频干扰(RFI)维持在较低的水平。

对于移动部分(III, IV 部分),拾取线圈从交变磁

场中感应出电流并在  $L_2$ 、 $C_2$  构成的谐振回路中形成共振,其输出的正弦谐振电压整流后经过一个倍增(boost)调压电路( $S_3$ 、 $D_3$  构成)后在  $C_2$  上形成恒定的电压供应,带动负载运行。

## 2 关键技术分析

ICPT 技术及系统目前尚未能在诸如车间行车供电中得到广泛应用的主要原因是人们对于系统内部的有关问题,如最优传输频率、能量传输效率、电力谐波、负载问题、大功率高频电力变换等,尚未能充分认识和很好解决。以下就这些问题作一些简要的论述:

### 2.1 工作频率

根据电磁感应原理,在能量拾取机构拾取线圈  $L_2$  中感应的谐振电压  $V_2$  和线圈短路电流  $I_{sc}$  可由下式计算<sup>[5]</sup>:

$$V_2 = \omega M I_1 Q_2, I_{sc} = \frac{M}{L_2} I_1 \quad (1)$$

式(1)中  $M$  为互感系数,  $I_1$  为导轨电流,  $Q_2 = \omega_0 C_2 R_2$  为副边谐振回路品质因数,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}$  为副边谐振回路固有谐振频率。

那么一个拾取线圈所能获得的最大功率可计算为<sup>[5]</sup>:

$$P_2 = |V_2 I_{sc}| = \frac{\omega I_1^2 M^2 Q_2}{L_2} \quad (2)$$

从式(2)可看出,要提高最大拾取功率,可以通过改变  $\omega$ ,  $I_1$ ,  $M$ ,  $Q_2$ ,  $L_2$  来得到。其中改变  $M$  和  $L_2$  受到材料价格和器件体积的限制,允许变化的范围通常不会太大,而在电力系统中,如果  $Q_2$  的值大于 10,将会使系统对器件的参数波动过于敏感,因此其最大功率主要取决于  $\omega I_1^2$ <sup>[3]</sup>。在此可以看到,要获得相应的输出功率,所需要的频率与导轨电流的平方成反比。众所周知,导轨

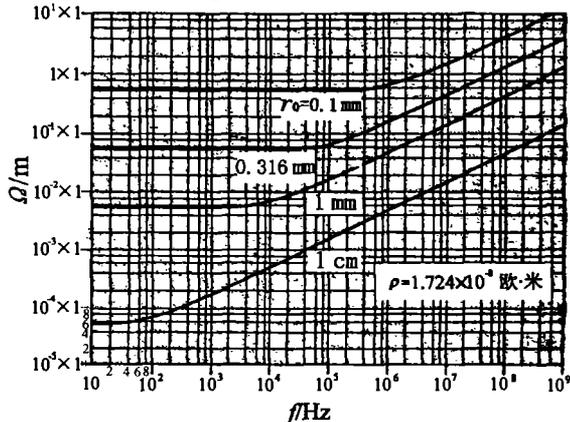


图 3 不同半径纯铜导线趋肤电阻与频率的关系

电流越大,其所需的材料及带来的损耗、温升也会迅速攀升,为了减小导轨电流,理论上讲,频率越高越好。但是,当导轨电流频率提升到一定程度后,趋肤效应所带来的损耗也将成为一个不可忽视的因素<sup>[4]</sup>,从图3中可以看到在纯铜线的条件下其趋肤电阻随频率的变化情况。

基于以上考虑,其工作频率设定在10-50 kHz为宜<sup>[7]</sup>。

## 2.2 电能传输效率

在基于ICPT技术的单轨行车供电系统中,从电源输入到功率输出,其效率受着多种因素影响。归纳起来,其效率主要取决于以下几个要素:

### 1) 副边负载影响。

ICPT系统中,通常一条导轨上可能有多个负载在同时运行,而且其负载有轻有重,为了获得稳定的输出电压同时避免因负载过轻导致的系统频率不稳定<sup>[8]</sup>,有必要对负载进行控制。

在图2所示的电路中,由于互感,副边线圈会在原边导轨中产生反射电压 $V_r$ <sup>[4]</sup>:

$$|V_r| = \frac{M^2}{L_2^2} I_1 R_2 \quad (3)$$

其中 $R_2$ 是负载电阻,从式中可见如 $R_2$ 太大将会使导轨中反射电压 $V_r$ 变得很大,阻碍电能向其它线圈流动<sup>[4]</sup>,使系统效率大大下降。

在单轨行车的应用中,可以规定一个输出电压允许波动的范围 $\pm(5\% \sim 10\%)$ ,当输出电压超过上界时,即轻载时,可控制 $S_3$ 为持续导通,这时拾取线圈被短路,实现拾取线圈的解耦以调低输出电压,而当输出电压低于下界时,即超载时,这时可控制 $S_3$ 为持续关断以抬高输出电压,同时辅以控制电机控制器降低转矩和转速以减小电能需求。而当输出电压处于给定范围内运行时, $S_3$ 可工作在高频斩波模式,其输出电压则可保持恒定且含有较小的低频谐波分量。此时,由于 $S_3$ 导通时谐振储能电路内电能会全部散失,为了降低能量散失,它的开关频率应在保证电压稳定的条件下尽可能地低,大约在10 kHz左右为宜<sup>[4]</sup>。通过3种模式的交替便可向负载提供稳定的电能供应。

### 2) 多拾取机构的拾取线圈个数。

很明显,因为每个拾取线圈所能承载的最大功率容量有限,拾取线圈越多,系统的效率就会越高,但是为了保证谐振以及频率稳定,拾取线圈的个数受以下条件的约束<sup>[7]</sup>。

$$N \leq \frac{L_1 L_2}{M^2 Q_2^2} \quad (4)$$

考虑到设备的的体积和价格,在典型的ICPT系统中, $N$ 取值通常应不大于 $10^{[7]}$ 。

### 3) 趋肤效应造成的损耗。

在采用高频电流时,如给定导轨半径 $r_0$ 、电流大小 $I_1$ 及直流电阻 $R_{dc}$ ,则导轨中的趋肤效应损耗可由下式计算<sup>[6]</sup>:

$$P_f = I_1^2 R_{dc} \left( \frac{r_0}{2\delta} - 1 \right) \quad (5)$$

式(5)中 $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ 为趋肤深度, $\Omega$ 为电流频率, $M$ 为介质电导率, $\sigma$ 为介质磁导率。

从式(5)中可以看到,趋肤损耗的大小主要取决于导线半径 $r_0$ 和趋肤深度 $\delta$ 之比 $\frac{r_0}{\delta}$ ,为使趋肤损耗不至太大,其值通常不应超过 $2^{[6]}$ 。但在实用中如果采用绞合的李兹线(Litz)构成导轨则可以使趋肤损耗进一步减小。

## 2.3 谐波影响

在初级回路中,谐波所带来的最大影响是给开关管造成了较大的电压应力<sup>[9]</sup>,从图2的电路中可以看到此电压应力是来自于当开关管关断时,谐振电容 $C_1$ 电压对其施加的谐波峰值。通过求解该电容电压的状态方程,其 $n$ 次谐波的峰值可由文献[9]中给出的公式来描述:

$$V_{cn} = \frac{2i_d}{\pi C\omega_0} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{4Q_1^2}\right)} \sqrt{\left\{ \left[1 - n^2 \left(1 - \frac{1}{4Q_1^2}\right)\right]^2 + n^2 \left[\frac{1}{Q_1^2} - \frac{1}{4Q_1^4}\right] \right\}} \quad (6)$$

其中 $Q_1$ 为初级谐振回路的品质因数,当 $Q_1 > 2$ 时,3次谐波幅值仅为基波幅值的6%,因此3次及其以上的谐波对实际波形不会带来太大的影响<sup>[9]</sup>,此时开关管所承载的电压应力主要来自基波峰值。假设环流在 $L_2$ 和 $C_2$ 之间产生的损耗为零,近似可得其电压应力约为其输入电压 $E_{dc}$ 的 $\pi$ 倍<sup>[9]</sup>。譬如对于400 V的输入电压其电压峰值可达1300 V左右,这对开关器件提出了较高的要求。

## 3 结论

感应耦合电能传输技术通过磁场耦合来实现电能传输,这种技术由于克服了机械磨损、接触火花、碳积和不安全裸露导体等传统供电方式无法克服的弱点,从而为在恶劣的生产环境下实现干净、稳定、安全的电能传输提供了一种有效的解决途径。文中介绍了这种

电力传输系统的基本原理并对其相关关键技术问题作了综合分析。同时,本文所涉及的技术对于电动汽车的供电问题也具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 安阁英. 机械工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1989.
- [2] 李宏. 感应电能传输 - 电力电子及电气自动化的新领域[J]. 电气传动, 2001, 31(2):62-64.
- [3] BOYS J T, GREEN A W. Inductively coupled power transmission concept - design and application[J]. IPENZ Trans, 1995, 22(1):1-9.
- [4] BOYS J T, COVIC G A, GREEN A W. Stability and control of inductively coupled power transfer systems[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 2000, 147(1):37-43.
- [5] ELLIOTT G A J, BOYS J T, GREEN A W. Magnetically coupled systems for power transfer to electric vehicles [A].

Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems [C]. Singapore Polytechnic, 1995. 797 - 801.

- [6] [美]R.E.马蒂克. 数学与通讯网络中的传输线[M]. 北京:科学出版社, 1982.
- [7] GREEN A W, BOYS J T. 10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control [A]. IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference Publication [C], 1994. 694 - 699.
- [8] BOYS J T, HU A P, COVIC G A. Critical Q analysis of a current - fed resonant converter for ICPT applications [J]. Electronics Letters, 2000, 36(17):1 440 - 1 442.
- [9] GREEN A W. Modeling a push-pull parallel resonant converter using generalized state-space averaging method [J]. IEE Proceedings Part B: Electric Power Application, 1993, 140(6): 350 - 356.

## Novel Power Supply Method and Technology Analysis for Electrified Monorail System

DAI Xin, SUN Yue

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The problems of industry monorail conveying system brought by tradition physical contact such as irregular contact spark, carbon laydown and unsafe, narrow the area which the material handling system can apply to in awful industry environment, e. g. forge, cleaning, lacquering. A novel monorail power supply method based on electromagnetic coupling theory is presented. Discussions are made on several problems such as frequency selection, load control, efficiency elements and harmonic effects at the same time. Moreover, solutions are brought about according to them. The monorail application of this technology provides clean, stable and safe power supply, and immunes to environment interference such as dust, water as well.

**Key words:** electrified monorail system; ICPT; resonant

(责任编辑 吕赛英)