

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101269661 B

(45) 授权公告日 2010.09.08

(21) 申请号 200810104587.5

B61C 3/00 (2006.01)

(22) 申请日 2008.04.22

B60L 9/00 (2006.01)

B60L 15/20 (2006.01)

(73) 专利权人 北京交通大学

地址 100044 北京市西直门外上园村 3 号

专利权人 北京链奕通易轨道交通科技有限
公司

审查员 田远

(72) 发明人 刘志刚 李哲峰 刁利军 林文立

赵明花 卢西伟 狄威 贾利民

牟富强 沈茂盛 张钢 王磊

梅樱 罗荣娅

(74) 专利代理机构 北京市商泰律师事务所

11255

代理人 毛燕生

(51) Int. Cl.

B61C 9/38 (2006.01)

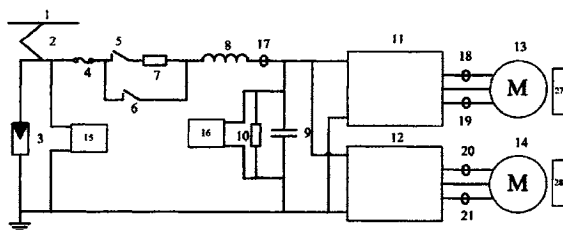
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

100%低地板车独立轮牵引传动系统与控制方法

(57) 摘要

100%低地板车独立轮牵引传动系统与控制方法,针对电机纵向布置,双端输出,驱动同侧前后车轮的 100%低地板车传动方式,该装置把车辆直道对中和弯道控制由转向架的机械耦合控制转到电气耦合控制。这样 100%低地板车的优势可以发挥,从电气上解决直道对中、曲线导向的问题。由于该种 100%低地板车特殊的驱动方式——驱动同侧的车轮,它没有传统转向架丧失 1/2 动力的情况,如果出现故障则同一转向架上两个电机同时失去动力。发明了逆变器前端的滤波电路和接触器公用一套的电路。这样,当一台逆变器故障时,可以通过一个接触器断开一个转向架上的所有电路,提高可靠性。



1. 一种 100%低地板车独立轮牵引传动系统,其特征是:用两台逆变器对两侧不同的牵引电机供电,牵引电机通过齿轮箱连接车轮端轴;每个牵引电机配备了一台相应的逆变器;这样一台转向架上布置两台逆变器分别给驱动同侧车轮的牵引电机供电,所述牵引电机由所述逆变器驱动;

所述牵引传动系统还包括:由受电弓、浪涌吸收器与熔断器连接构成的网侧电路;由充电接触器、线路接触器、充电电阻与电容放电电阻连接构成的充、放电电路;由直流滤波电感与直流母线电容连接构成的直流滤波电路。

2. 根据权利要求 1 所述的 100%低地板车独立轮牵引传动系统,其特征为由直流滤波电感与直流母线电容连接构成的直流滤波电路,限制直流侧电压波动和避免高次谐波对电网及轨道信号的影响。

3. 根据权利要求 1 所述的 100%低地板车独立轮牵引传动系统,其特征为两台逆变器共用一套充、放电电路和直流滤波电路。

4. 根据权利要求 1 所述的 100%低地板车独立轮牵引传动系统,其特征为:两台逆变器由至少 6 个半导体开关器件连接构成电压源逆变器,包括制动电路,逆变器将直流电变换成变压变频的交流来驱动牵引电机。

5. 一种 100%低地板车独立轮牵引传动控制方法,其特征是:根据列车运行路况和两侧电机转速、拖车转速,分别控制两侧独立轮的转速,使列车能在平直轨道上进行轮径补偿,在弯道上进行过弯控制;

包括步骤如下:

步骤 1:根据运行线路情况,确定列车是在直道上行驶还是曲线上行驶;

步骤 2:采集拖车转速 n_t 、动力转向架上两侧电机转速 n_{m1} 、 n_{m2} 和拖车车轮直径 D_t 、动车两侧车轮直径 D_{m1} 、 D_{m2} ,计算列车行驶速度 V ;

步骤 3:如果列车是在直道上行驶,根据列车行驶速度 V 和动车两侧车轮直径 D_{m1} 、 D_{m2} ,算出轮径补偿时两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* ;

步骤 4:如果列车是在弯道上行驶,根据线路情况和转弯半径 R 、过曲线的列车行驶速度 V ,算出列车过曲线时两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* ;

步骤 5:根据两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* 、电机的实际转速 n_{m1} 、 n_{m2} 和逆变器直流母线电压、电机电流利用电机矢量控制算法,使电机的实际转速达到要求转速,这样就可以满足列车过直道和弯道控制要求并能进行轮径补偿。

6. 根据权利要求 5 所述的一种 100%低地板车独立轮牵引传动控制方法,其特征是:根据拖车车轮转速和轮径,根据动车两侧车轮转速和轮径,计算出两侧电机要求的转速。

7. 根据权利要求 5 所述的一种 100%低地板车独立轮牵引传动控制方法,其特征是:根据电机的要求的转速和实际转速利用电机矢量控制使其实际转速达到要求的转速,完成独立轮控制。

100%低地板车独立轮牵引传动系统与控制方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及为牵引电动机供电的传动系统与控制方法，适合于城市轨道交通牵引传动，特别是牵引电动机纵向布置、双端输出、驱动同侧前后车轮的 100%低地板车独立轮牵引传动逆变器。

背景技术：

[0002] 为改善轻轨车辆的传统高地板（轻轨车的地板面距轨面在 800mm ~ 1000mm 之间为高地板）所造成的上下车不便与运行与时间延迟的问题，近年来皆多采取低地板（轻轨车的地板面距轨面在 250mm ~ 350mm 之间为低地板）的设计。低地板轻轨车辆提供给乘客更舒适的乘坐特性，它不需要高的站台，方便残疾人、老人、小孩上下车，减小城市景观冲击。低地板车可以减小换乘时间，提高旅行速度，具有实际的经济应用价值。

[0003] 传统轨道车辆的动力转向架上左右两个车轮固定压装在同一根传动车轴上，牵引电机驱动该传动车轴从而带动左右两个车轮旋转。但是车辆地板面距轨面的高度难以降低，如图 1a 所示。为了达成 100%低地板车的设计，必须将动力转向架的地板通道空间保留，因此要求取消传统动力转向架上的传动车轴，如图 1b 所示。取消动力传动车轴后，整车的低地板面占到地板面的 100%，车轮上突出的部分可以安放座椅，如图 2 所示。

[0004] 100%低地板车取消了传动车轴，左右车轮解耦，使其能够分别独立旋转，这种左右车轮可以相互各自独立地绕车轴旋转的轮对称为独立轮对。为了驱动 100%低地板车的独立轮对，就要采用特殊的牵引传动方式。一种 100%低地板车传动方式采用内侧悬挂式动力转向架。转向架有 4 只相互独立的车轮，对称地布置于转向架的两侧。牵引电动机纵向布置、双端输出，通过一对螺旋圆锥齿轮构成的减速器和含有橡胶弹性原件的联轴器，驱动着一前一后的两只车轮。一个动力转向架上配置两台电动机。这样的布置既可使左右车轮中间的位置设置成低地板，还由于驱动装置的可接近性好，所有检修工作不必在地沟中进行，使得拆卸和维修均很方便，该传动方式如图 3 所示。

[0005] 传统车辆的动力转向架上布置两台牵引电机，同一转向架上的两个牵引电机由一个牵引逆变器驱动。列车在平直轨道上行进时，两个牵引电机受到同一频率，同一电压的牵引逆变器供电，产生同样的转速，在平直轨道上行进。但是当列车过曲线时，由于内外侧轨道半径不同，所以会造成内外侧车轮线速度不一致，进而要求内外侧电机转速不同。内外侧转速差如公式 (1) 所示，该公式的推导可以参考发明内容中的相关公式。

$$[0006] \quad \Delta n = \frac{d \cdot V \cdot 60 \cdot u}{D_m \cdot \pi \cdot R} = K \frac{V}{R} \quad (1)$$

[0007] 其中： Δn 为内外侧转速差， d 为轨距， V 为列车速度， u 为齿轮减速比， D_m 为动车轮直径， R 为曲线半径。当车辆选定后，轨距 d ，齿轮减速比 u ，动车轮直径 D_m 分别为常数，则列车过曲线时，内外侧转速差 Δn 与列车速度 V 和曲线半径 R 有关系。曲线半径越小，内外侧转速差越大；过曲线时列车速度越高，内外侧转速差越大。但是内外侧牵引电机是由同一逆

变器供电,内外侧牵引电机的转速相同,为了满足过曲线的要求,就要把车轮的踏面设计成圆台型曲线,外侧转弯半径大的车轮和轨道接触圆半径大于内侧转弯半径小的轮轨接触圆半径。这样当内外侧车轮转速一样的情况下可以利用车轮踏面形状来解决转弯问题,如图4所示。

[0008] 但是,这种驱动牵引电机的方式存在列车过曲线时速度不能太高,转弯半径不能太小等缺点。而且当列车速度过高或转弯半径过小,仅靠车轮踏面不同半径的滚动圆不能完全弥补,故在轮轨间将产生较大的滑动,从而加剧了轮轨之间的磨耗和噪声。受轨道不平顺和轮对加工时安装误差的影响,车轮对在运行过程中一旦偏移,便难以自动回到轨道中心。若轮轨关系匹配不好,轮缘磨耗较严重;低速时可能产生明显的摇头振动。

发明内容:

[0009] 针对电机纵向布置,双端输出,驱动同侧前后车轮的100%低地板车传动方式,要求在直道上两侧电机转速同步控制,在弯道上两侧电机转速过弯控制,过弯时车速不能太高、转弯半径不能等缺点,同时考虑到轨道不平顺和轮对加工时安装误差的影响、空转/滑行再粘着控制的需要、轮径补偿等要求发明了100%低地板车独立轮牵引传动系统。

[0010] 100%低地板车独立轮牵引传动系统,用两个逆变器对两侧不同的牵引电机供电,牵引电机通过齿轮箱连接独立轮的端轴。

[0011] 这样在平直轨道上两个逆变器提供相同频率的电源,可以满足两侧牵引电机同步速度控制;在弯道上,逆变器根据车辆速度和转弯半径确定内外侧牵引电机的供电频率。这样即使在转弯半径比较小的时候,也能完成过弯控制,轮轨间磨耗减小。而且,实际应用中的两侧车轮都有差别,这样可以根据实际中两侧车轮直径,控制两侧逆变器的供电频率,实时补偿两侧车轮因加工或磨损时造成的速度差。

[0012] 100%低地板车独立轮牵引传动系统,包括:由受电弓、浪涌吸收器与熔断器连接构成的网侧电路;由充电接触器、线路接触器、充电电阻与电容放电电阻连接构成的充、放电电路;由直流滤波电感与直流母线电容连接构成的直流滤波电路和驱动两个交流电动机的两台逆变器。

[0013] 当逆变器发生故障时,直流滤波电感限制直流电流的上升率,以便在检测到逆变器故障时,有时间让直流高速开关在电流限值内分断,以避免逆变器短路对电网产生的冲击。由直流滤波电感与直流母线电容连接构成的直流滤波电路,限制直流侧电压波动和避免高次谐波对电网及轨道信号的影响。

[0014] 两台逆变器的充、放电电路和直流滤波电路合并为一。这样可以减小体积和成本而且当一台逆变器故障时,可以通过一个接触器断开一个转向架上的所有电路,提高可靠性。

[0015] 两台逆变器由至少6个半导体开关器件连接构成电压源逆变器,包括制动电路。逆变器将直流电转换成变压变频的交流来驱动两个交流电动机。

[0016] 该装置有两套逆变器分别给转向架上左右两台电动机供电以满足在直道和弯道上的控制要求;在平直轨道上具有自动对中能力,在弯道上具有曲线导向能力。而且当左右轮径不相同,两个逆变器可以方便进行轮径补偿。由于该种100%低地板车特殊的驱动方式——驱动同侧的车轮,它没有传统转向架丧失1/2动力的情况,如果出现故障则同一

转向架上两个电机同时失去动力。发明了逆变器前端的滤波电路和接触电路公用一套的电路。这样,可以减小体积和成本而且当一台逆变器故障时,可以通过一个接触器断开一个转向架上的所有电路,提高可靠性。

[0017] 100%低地板车独立轮牵引传动系统的控制方法,包括步骤如下;

[0018] 步骤1:根据运行线路情况,确定列车是在直道上行驶还是曲线上行驶。

[0019] 步骤2:采集拖车转速 n_t 、动力转向架上两侧电机转速 n_{m1} 、 n_{m2} 和拖车车轮直径 D_t 、动车两侧车轮直径 D_{m1} 、 D_{m2} 。计算列车行驶速度 V 。

[0020] 步骤3:如果列车是在直道上行驶,根据列车速度 V 、和动车两侧车轮直径 D_{m1} 、 D_{m2} ,算出轮径补偿时两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* 。

[0021] 步骤4:如果列车是在弯道上行驶,根据线路情况和转弯半径 R 、列车过曲线的速度 V ,算出列车过曲线时两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* 。

[0022] 步骤5:根据两侧电机要求的转速 n_{m1}^* 和 n_{m2}^* 、电机的实际转速 n_{m1} 、 n_{m2} 和逆变器直流母线电压、电机电流利用电机矢量控制算法,使电机的实际转速达到要求转速。这样就可以满足列车过直道和弯道控制要求并能进行轮径补偿。

[0023] 说明如下:

[0024] 当列车行进时,拖车车轮不存在空转和滑行,它的磨损很小,所以列车行驶速度 V 可以由拖车转速和拖车轮径算出。根据拖车速度传感器测量的速度 n_t (rpm),拖车车轮直径为 D_t (m),列车速度 V (m/s) 为:

$$[0025] \quad V = n_t * D_t * \pi / 60 \quad (2)$$

[0026] 假设动车车轮以线速度 V (m/s) 行进,齿轮箱减速比为 u ($u > 1$),动车车轮直径为 D_m (m),则牵引电机的转速 n_m (rpm):

$$[0027] \quad n_m^* = V * 60 * u / (D_m * \pi) \quad (3)$$

[0028] 控制电机以这个转速运行就可以让列车以速度 V 行进。如果两侧车轮的轮径不一致,可以根据公式 (3),进行轮径补偿。若两侧车轮直径分别为 D_{m1} 和 D_{m2} ,根据公式 (3) 可以得到电机两侧参考转速分别为:

$$[0029] \quad n_{m1}^* = V * 60 * u / D_{m1} * \pi \quad (4)$$

$$[0030] \quad n_{m2}^* = V * 60 * u / D_{m2} * \pi \quad (5)$$

[0031] 假设列车过曲线的角速度为 ω (rad/s),曲线内外侧半径分别为 $R2$ (m) 和 $R1$ (m),如图 4 所示。则动车两侧车轮线速度分别为 $\omega * R1$ (m/s) 和 $\omega * R2$ (m/s),两侧电机的转速差为

$$[0032] \quad n_{m1} - n_{m2} = \Delta n = (R1 - R2) * \omega * 60 * u / (D_m * \pi) \quad (6)$$

[0033] 把列车看成质点,列车以速度 V (m/s) 过曲线,则列车过曲线的角速度为 ω (rad/s) = V/R , R 为曲线半径,代入 (6) 式,可得:

$$[0034] \quad \Delta n = (R1 - R2) * V * 60 * u / (D_m * \pi) / R \quad (7)$$

[0035] 可见列车过曲线时,电机两侧速度差和过曲线速度和曲线半径有关。且 $(R1 - R2)$ 是轨距,对于标准轨 $d = 1.435$ m,所以:

$$[0036] \quad \Delta n = d * V * 60 * u / (D_m * \pi * R) \quad (8)$$

[0037] 所以过曲线时,曲线半径越小,转速差越大;当过曲线时速度越高,转速差越大。

[0038] 当列车在弯道上行进时,如图 4 所示,这时可以根据列车的速度 V 和曲线半径 R 确

定内外侧电机转速。列车的速度可以由公式 (2) 得出,曲线半径可以由路况得出。内侧电机参考转速为 n_{m2}^* 根据公式 (3) 可得:

$$[0039] \quad n_{m2}^* = V*60*u / (D_m * \pi) \quad (9)$$

[0040] 外侧电机参考转速 n_{m1}^* 为:

$$[0041] \quad n_{m1}^* = n_{m2}^* + \Delta n = V*60*u / (D_m * \pi) + d*V*60*u / (D_m * \pi * R) = n_{m2}^* (1+d/R) \quad (10)$$

[0042] 在直道上列车两侧电机参考转速按公式 (4、5) 控制,在弯道上两侧电机的参考转速按公式 (9、10) 控制。这样列车不论是在直道还是弯道上都能正常行进,减小了车轮和轨道的摩擦、噪声等问题,而且对于过小的转弯半径也能以较高的速度行进,这样可以减小维护,提高效率,减小运行成本。

[0043] 针对牵引电动机纵向布置、双端输出、驱动同侧前后车轮的传动方式,其特征是取消传统的传动轴,采用独立轮驱动方式。该装置把车辆直道对中和弯道控制由转向架的机械耦合控制转到电气耦合控制。这样 100% 低地板车的优势可以发挥,从电气上解决直道对中、曲线导向的问题。

[0044] 该发明可以解决列车过小转弯半径弯道,并能有一定的速度,提高运行效率、减小轮轨间磨耗。车轮加工或安装误差带来的轮径偏差可以通过控制两侧电机转速进行轮径补偿,减少维护。

附图说明

[0045] 图 1a 说明传统车辆与低地板车地板面示意图。

[0046] 图 1b 说明传统车辆与低地板车地板面示意图。

[0047] 图 2 说明 100% 低地板车低地板面构成图。

[0048] 图 3 说明牵引电动机纵向布置、双端输出、驱动同侧前后车轮的 100% 低地板车独立轮牵引传动方式。

[0049] 图 4 说明列车过曲线示意图,轨道内外侧半径和曲线半径示意图。

[0050] 图 5 说明本发明 100% 低地板车独立轮牵引传动系统构成图。

[0051] 图 6 说明逆变器装置构成图。

[0052] 图 7 说明控制系统构成图。

[0053] 图 8 说明电机矢量控制原理图。

[0054] 图 3 中转向架 301,牵引电机 302,齿轮减速器 303。

[0055] 图 4 中外侧转弯半径大的轮轨接触圆大 401,内侧转弯半径小的轮轨接触圆小 402。

[0056] 图 5 中:直流接触网 1,受电弓 2,浪涌吸收器 3,熔断器 4,充电接触器 5,线路接触器 6,充电电阻 7,直流滤波电感 8,直流母线电容 9,电容放电电阻 10,逆变器 11,逆变器 12,电动机 13,电动机 14,电网电压测量 15,直流母线电压测量 16,直流电流测量 17,电机电流 A 相测量 18,电机电流 C 相测量 19,电机电流 A 相测量 20,电机电流 C 相测量 21,电机速度传感器 27,电机速度传感器 28。

[0057] 图 6 中:制动开关管 22,续流二极管 23,制动电阻 24,三相逆变器 25,制动电流测量 26。

具体实施方式

[0058] 下面参照图 5 对本发明所述的 100%低地板车独立轮牵引传动系统的实施方式进行说明。

[0059] 如图 5 所示,本发明所述的 100%低地板车独立轮牵引传动系统包括:由受电弓 2、浪涌吸收器 3 与熔断器 4 所构成的网侧电路;由充电接触器 5、线路接触器 6、充电电阻 7 与电容放电电阻 10 构成的充、放电电路;由直流滤波电感 8 与直流母线电容 9 构成的直流滤波电路;驱动交流电动机 13、14 的逆变器 11、12。

[0060] 由直流滤波电感 8 与直流母线电容 9 构成的直流滤波电路,限制直流侧电压波动和避免高次谐波对电网及轨道信号的影响。

[0061] 当逆变器发生故障时,直流滤波电感 8 限制直流电流的上升率,以便在检测到逆变器故障时,有时间让直流高速开关在电流限值内分断,以避免逆变器短路对电网产生的冲击。

[0062] 两台逆变器 11、12 的充、放电电路和直流滤波电路合并为一,这样可以减小体积和成本而且当一台逆变器故障时,可以通过一个接触器断开一个转向架上的所有电路,提高可靠性。

[0063] 逆变器 11、12 由多个半导体开关器件构成电压源逆变器包括制动电路,将直流电转换成变压变频的交流来驱动交流电动机 13、14。

[0064] 图 6 以一种半导体开关器件 IGBT 说明逆变器的构成。

[0065] 由制动开关管 22、续流二极管 23 与制动电阻 24 构成的制动吸收电路实现电传动系统主电路直流过压抑制;在电网不能接受由牵引电动机反馈的电能时,通过制动斩波电路对牵引电动机反馈的电能由制动电阻进行吸收;续流电路主要保证在接触器分断及直流高速开关分断时不至于造成电流突然中断而引起直流电压回路过压。该电路的另一个功能是作过压保护用。如果在逆变器的直流回路中有短时的过电压,则斩波器工作,通过它对制动电阻放电,待过电压消除后斩波器截至。

[0066] 三相逆变器 25 采用两电平三相桥式电路由六个 IGBT(绝缘门极双极性晶体管)构成,逆变器输出频率和幅值可调的三相交流电给交流牵引电动机。这样两台逆变器分别给转向架上左右两台电动机供电以满足在直道和弯道上的要求:在平直轨道上具有自动对中能力,在弯道上具有曲线导向能力。而且当左右轮径不相同,两个逆变器可以方便进行轮径补偿。

[0067] 控制系统如图 7 所示:包括光纤接口电路、通讯电路、检测与保护电路和控制芯片电路。光纤接口电路把 FPGA(现场可编程门阵列)发出的 PWM(脉冲宽度调制)信号转换为光信号隔离后驱动 IGBT。通讯电路通过以太网和 CANopen 的网络形式接受和传送相应的信息数据。通讯电路中还有无线网络装置可以接收和发送行驶路况信息。检测与保护电路接受外部传感器传来的模拟信号、转速信号和数字输入信号,并发送相应的数字输出信号。输入的模拟信号包括图 5 中的电网电压信号 15、直流母线电压信号 16、直流电流信号 17、交流电流信号(18、19、20、21)和图 6 中的制动电流信号 26 等。输入的转速信号包括图 5 中测速装置 27、测速装置 28 和拖车车轮测速装置传来的速度信号。控制芯片电路包括 DSP、FPGA 和存储器。DSP 采用 TI 公司的 32 位高性能数字信号处理器 TMS320F2812,时钟频率 150M;主要作为独立轮控制算法和电机矢量算法的计算。FPGA 主要用于逻辑保护和脉冲封

锁,采用 Ateral 公司的 EP2C8Q208I6 ;存储器采用非易失性 FLASH 存储器,掉电后数据不丢失,与 DSP 进行数据交换,型号为 :K9F5608U0A,它可以存储相应的路况信息和记录装置的运行信息。

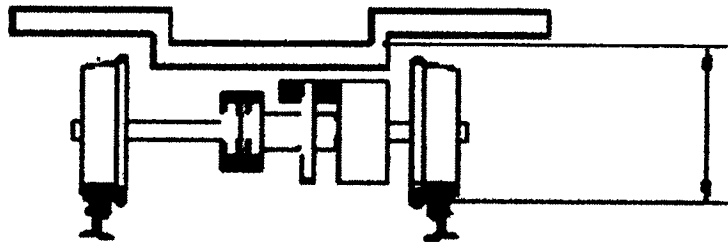
[0068] 本发明的传动系统有两个逆变器驱动两侧的电机,可以按一个逆变器控制一个电机,分为两个独立的矢量控制算法。下面以一个间接矢量控制算法为例,具体的控制原理图如图 8 所示。该间接矢量控制的给定命令为电机参考转速信号 n_{mx}^* ($x = 1,2$) 和参考磁通 Ψ_{rd}^* 信号,测量的反馈信号包括电机 A 相、C 相电流、直流母线电压 V_{DC} 和实际电机转速 n_{mx} 。电机的参考磁通信号和电机的参考 q 轴电流信号 i_{sq}^* 根据公式 (11) 可以计算出转差信号 n_{sl} 。

$$[0069] \quad n_{sl} = \frac{L_m R_r}{\Psi_{rd}^* L_r} i_{sq}^* \quad (11)$$

[0070] 其中 : L_m 为电机励磁电感 ; R_r 为电机转子电阻 ; L_r 为电机转子电抗转差信号 n_{sl} 加上转速信号 n_{mx} 为同步转速信号 n_{syn} ,对同步转速信号积分就可以得到单位矢量信号 $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$ 。该单位矢量信号用于 Park 变换和 Park⁻¹ 变换。转速参考信号 n_{mx}^* 和实际转速比较后经过转速 PI 调节器输出转矩参考电流 i_{sq}^* 。电机电流经过 Clarke 变换和 Park 变换后得出电机电流的转矩分量 i_{sq} 和磁通分量 i_{sd} 。磁通分量经过磁通计算公式 (12) 得到 Ψ_{rd} 。

$$[0071] \quad \frac{L_r}{R_r} \frac{d\Psi_{rd}}{dt} + \Psi_{rd} = L_m i_{sd} \quad (12)$$

[0072] 转矩参考电流 i_{sq}^* 和电机电流的转矩分量 i_{sq} 比较后经过电流 PI 调节器输出电压 q 轴分量 V_{sq} ;参考磁通 Ψ_{rd}^* 和公式 (12) 计算的磁通 Ψ_{rd} 比较后经过电流 PI 调节器输出电压 d 轴分量 V_{sd} 。 V_{sq} 和 V_{sd} 经过 Park 变换后,输出电压的 α 分量 $V_{s\alpha}$ 和 β 分量 $V_{s\beta}$,再经过空间矢量调制后输出脉冲到逆变器中。



1a

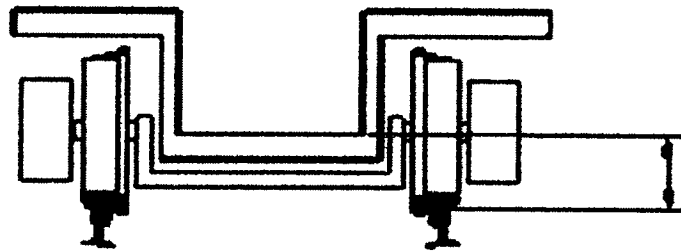


图1b

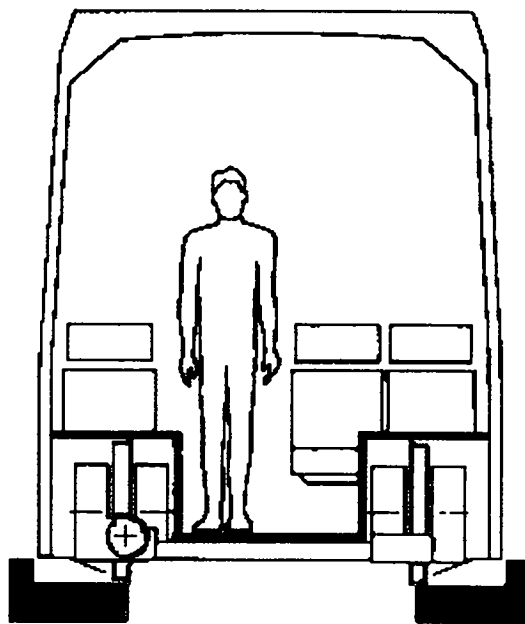


图 2

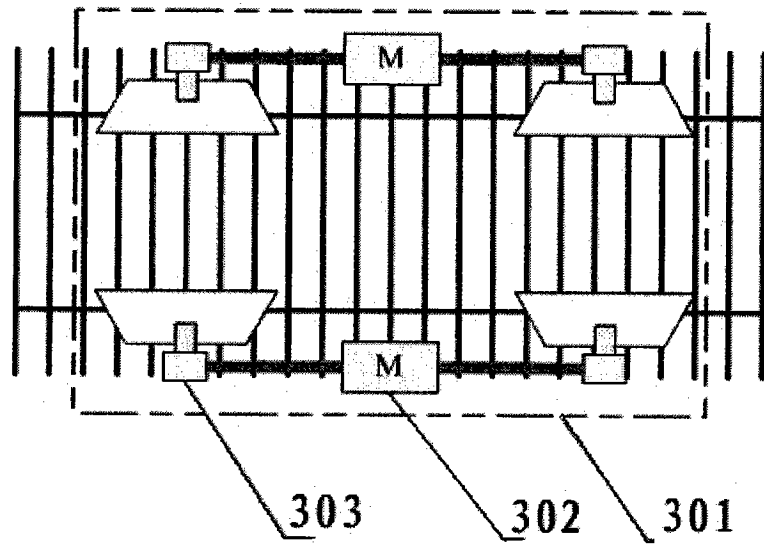


图 3

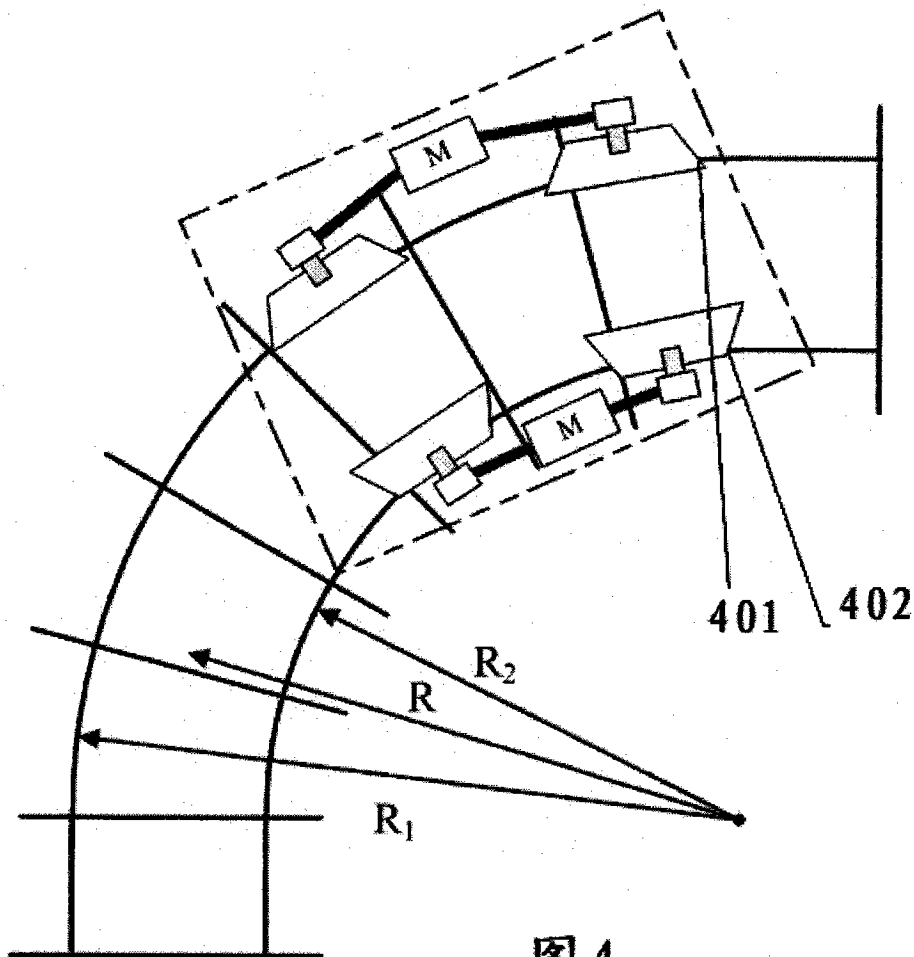


图 4

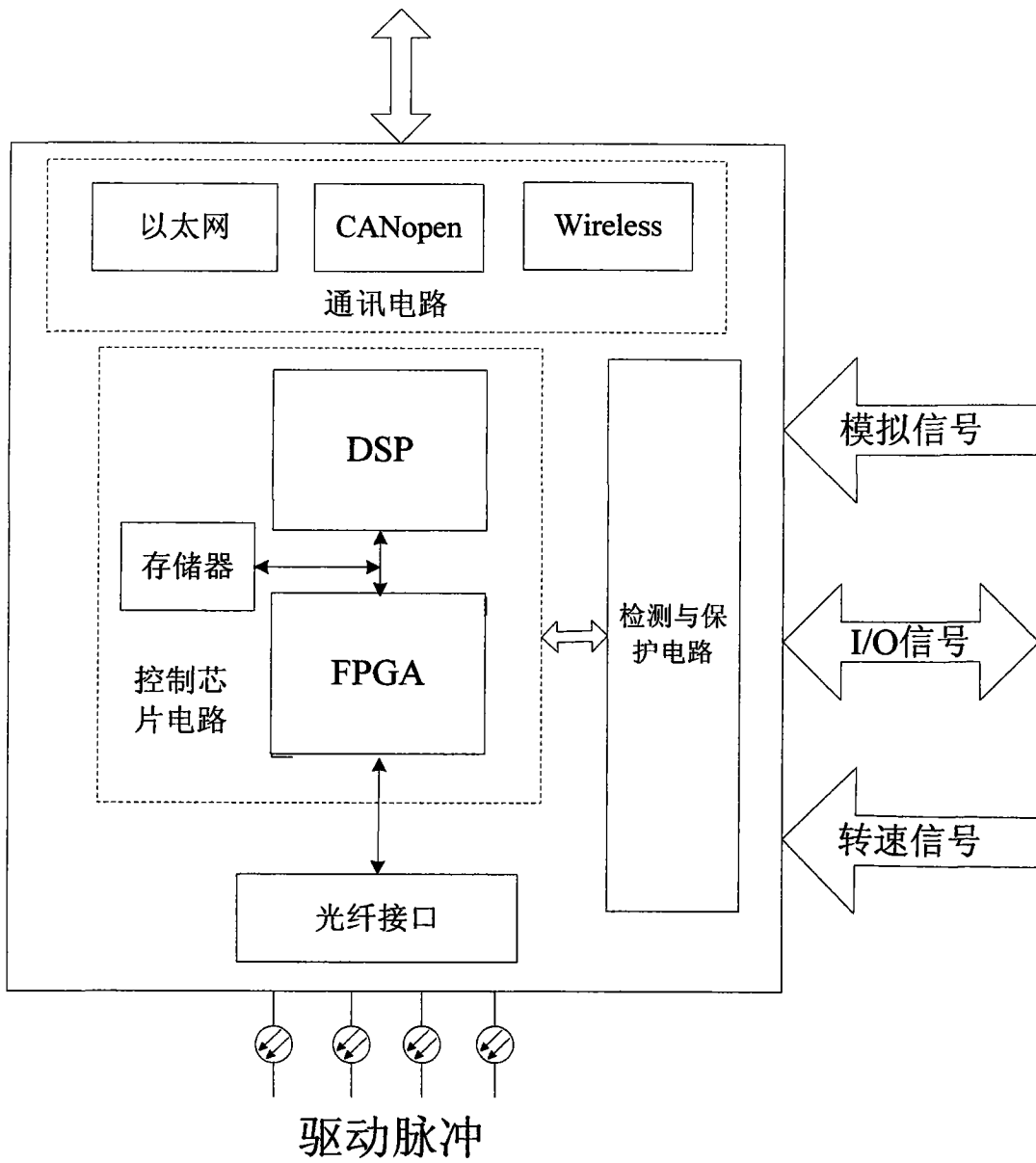


图 7

