

国内城轨车辆电传动系统主要问题分析

吴茂杉

(铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要: 城轨车辆的牵引电机在牵引和电制动工况下短时过载可达 50%, 瞬时过载可达 100%。IGBT 牵引逆变器在电制动时浪涌输出电流尖峰值允许超过器件额定电流 20%。并联工作电机负荷不平衡受轮径差影响极大, 与电机转差率相关。提出了逆变器与牵引电机的配置原则。

关键词: 牵引电机; 牵引逆变器; 负荷不平衡

中图分类号: U263.33

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2007)01-0007-06

Analysis of Primary Problems for Domestic Electric Drive Systems of Urban Vehicles

WUMao-shan

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The short-time overload of traction motors of urban vehicles in traction and electric braking can reach 50% while the transient overload can reach 100%. The peak value of surge output current allows going beyond the rated current of devices 20%. The unbalanced load of parallel motors are large influenced by wheel radius deviation and are relative to motor slip deviation. It is presented the match principle of inverter and traction motor.

Key words: traction motor; traction inverter; unbalanced-load

0 引言

城轨车辆的运行特点是启动、制动频繁; 启动加速度与制动减速度大; 电机短时工作, 没有持续运行工况, 但有短时过载, 特别是在电制动时。对于牵引逆变器, 不仅要注意其额定输出电流, 而且要注意其允许的最大短时峰值输出电流。由于城轨车辆牵引电机都是并联工作的, 因此轮径差所引起的负荷分配不平衡问题较为突出。此外, 逆变器与牵引电机的配置也是一个值得研究的问题。

1 牵引电机工作特点——短时过载

城市轨道交通的特点是站间距短, 列车始终以起动加速—巡航—惰行—制动停车的方式循环运行。牵引加速与电制动减速的控制特性曲线如图 1 所示。

1.1 牵引工况

列车以恒力矩启动(1区), 此时电机电流恒定, 电压以 $U/f=C$ 上升, 至 t_1 点进入恒功区(2区)。电机电压达到最大值并保持恒定, 电机弱磁工作。为保持恒功率运行需要提高转差频率, 以维持电机电流恒定。在恒功区电机功率最大, 且是过载运行。这是本文所关注的。此后进入自然特性(3区)。

以上是典型情况。也有例外, 即电机电压在 t_1 点升到最大值, 但电机先于 t_1 点或后于 t_1 点进入恒功运行。

收稿日期: 2006-11-05

作者简介: 吴茂杉(1937-), 男, 研究员, 长期从事交流技术与交流传动的研究和开发工作。

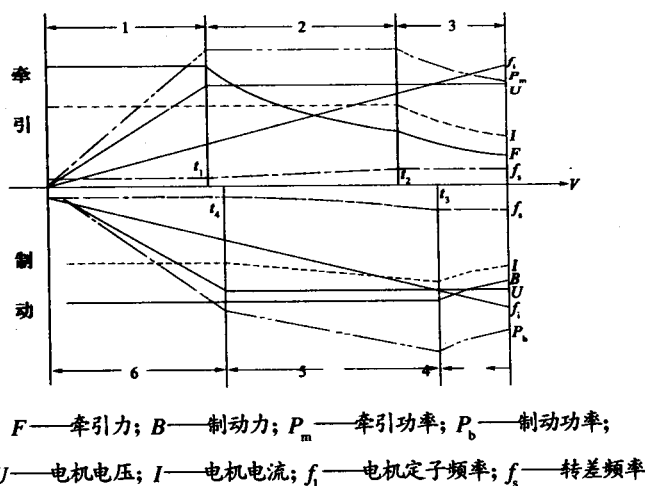


图1 城轨车辆牵引及电制动特性

Fig.1 Characteristics of traction and electric braking of urban vehicles

本文讨论典型情况。

牵引工况下电机输出功率 P_m ：

$$P_m = \frac{F_1 \cdot u_1}{3.6\eta_G} \quad (1)$$

式中： F_1 —— t_1 点的牵引力(kW)；
 u_1 —— t_1 点的列车速度(km/h)；
 η_G ——齿轮传动效率(计算时取0.975)。
 电机过载情况用功率过载系数 k 表示

$$k = P_m / P_n$$

式中： P_n ——牵引电机额定功率(kW)。

根据国内一些城轨车辆的牵引特性曲线，分别计算了牵引电机的功率过载情况(表1)。由表1可见过载情况各异。一般过载50%左右，少数因电机额定功率较大，过载20%左右。过载的持续时间与列车的启动平均加速度、列车从启动到最高运行速度的平均加速度、线路纵断面、以及恒功率运行速度范围等有关。一般最高运行速度为80 km/h的列车，启动平均加速度在0.83 ~ 1.0 m/s²范围内；从0到80 km/h的平均加速度在0.5 ~ 0.6 m/s²范围内。由此计算，过载时间一般在15 s左右，称之为“短时过载”。

表1 国内一些城轨车辆主传动系统牵引工况主要参数

Tab. 1 The main parameters of domestic main drive systems for urban vehicles in traction

城轨车辆	逆变器 与牵引 电机的 配置	逆变器 的功率 电子器 件	最高运 行速度 / km · h ⁻¹	启动平 均加速 度 / m · s ⁻²	牵引电 机额定 功率 / kW	电网电 压计算 值 / V	列车 负载	恒功率 运行速 度范围 / km · h ⁻¹	每轴恒牵引 力(恒功率运 行起始点牵 引力) / kN	恒功率运 行时牵引 电机输出 功率 / kW	恒功率运行 时牵引电机 短时功率过 载系数
北京复八线	1C4M	GTO	80	0.83	180	750	AW ₂	42 ~	23.5	1.56	281
							AW ₃	40 ~	23.5	1.60	288
北京13 [#] 线	1C2M	IGBT	80	0.83	180	750	AW ₂	42 ~	23.1	1.54	276
							AW ₃	38 ~	24.9	1.50	270
北京八通线	1C2M	IGBT	80	0.89	180	750	AW ₂	40 ~ 50	22.8	1.44	260
							AW ₃	40 ~ 50	24.71	1.56	281
上海2 [#] 线	1C4M	GTO	80	0.90	210	1 500	AW ₃	36 ~ 60	23.13	1.13	237
							AW ₃	45 ~ 70	21.3	1.48	273
上海明珠线	1C4M	IGBT	83	0.93	185	1 500	AW ₂	32 ~ 50	25.2	1.10	230
							AW ₂	41 ~ 85	22.15	1.13	259
广州1 [#] 线	1C4M	GTO	80	1.0	210	1 500	AW ₂	37 ~ 70	25.75	1.23	271
							AW ₂	42 ~ 70	22.29	1.33	266
深圳1 [#] 线	1C4M	IGBT	80	1.0	220	1 500	AW ₂	41 ~ 70	23.83	1.39	278
							AW ₂	36 ~ 80	22.94	1.27	235
天津滨海线	1C2M	IGBT	100	0.8	200	1 500	AW ₃	36 ~ 80	22.94	1.27	235
							AW ₂	40 ~ 60	24.75	1.57	282
南京1 [#] 线	1C4M	IGBT	80	1.0	185	1 500	AW ₃	47 ~ 50	22.6	1.60	303
							AW ₂	45 ~ 50	24.3	1.64	312
大连3 [#] 线	1C4M	IGBT	100	0.83	180	1 500	AW ₂				
在建某城轨	1C4M	IPM	80	0.87	190	1 500	AW ₃				

注：上海2[#]线与广州1[#]线牵引电机小时功率为210 kW，持续功率为190 kW。

1.2 电制动工况

列车制动，在速度较高时(在图1的 t_3 点以上)单靠电制动尚不能满足要求，需要空气制动补充，列车处于混合制动状态。从 t_3 点开始直到低速停车前全部使用电制动。然后，在某一低速度(6 ~ 10 km/h)电制动与空气制动交替使用，直至停车。对运营部门来说，要求 t_3 点的速

度尽可能高，这样可以减少使用空气制动，减少闸瓦磨损。这一点的确定，不仅与牵引电机的过载能力有关，也与逆变器中功率电子器件的电流浪涌能力有关。

由图1可见 t_3 点的电机电流 I 最大，电机电压 U 已达最大值。因而这一点电机功率最大。这时电机的过载情况比牵引工况大。 t_3 点以后电机电流随着速度成正比下

降。显然，电制动时电机过载的特点是过载大、时间短。过载情况如图1中Pb曲线所示，称之为“瞬时过载”。

电制动工况电机最大输出功率：

$$P_b = \frac{B_3 \cdot V_3 \cdot \eta_G \cdot \eta_m}{3.6} \quad (2)$$

式中： B_3 —— t_3 点的制动力(kN)；

V_3 —— t_3 点的速度(km/h)；

η_m ——牵引电机效率(为作比较，计算时均取0.93)。

对国内一些城轨车辆的电制动特性曲线进行了计算，结果如表2所示。由表2可见，电制动时过载比牵引时严重，一般过载50%~100%。个别达到120%以上。

表2 国内一些城轨车辆主传动系统电制动工况主要参数

Tab.2 The main parameters of domestic main drive systems for urban vehicles in electric braking

城轨车辆	电网电压 计算值 /V	列车负载	平均制动 减速度 /m·s ⁻²	恒制动力 /kN	恒制动力最高 运行速度 /m·s ⁻²	牵引电机 额定功率 /kW	每轴短 时最大 制动功 率/kW	每电机 短时最 大输出 功率/kW	牵引电 机短时 输出功 率过载 系数
北京复八线	750	AW ₂	20.94	22.8	62	180	393	356	1.98
		AW ₃	0.94	24.5	60	180	408	370	2.06
北京13*线	825	AW ₂	1.0	19.5	62.5	180	339	307	1.71
		AW ₃	1.0	21.0	60	180	350	317	1.76
北京八通线	825	AW ₂	1.0	20.65	50	180	287	260	1.45
上海2*线	1 800	AW ₃	1.0	23.75	80	210	528	479	2.28
上海明珠线	1 800	AW ₃	1.0	23.5	65	185	424	385	2.08
广州1*线	1 800	AW ₂	1.0	24.2	80	210	538	488	2.32
广州3#线	1 800	AW ₂	1.0	21.75	83	230	502	455	1.98
		AW ₃	1.0	24.0	75	230	500	453	1.97
深圳1*线	1 500	AW ₂	1.0	26.4	55	220	403	366	1.66
		AW ₃	1.0	26.4	60	220	440	399	1.81
天津滨海线	1 650	AW ₂	0.9	19.06	80	200	424	384	1.92
南京1*线	1 500	AW ₂	1.0	23.5	58.1	185	380	344	1.86
南京1*线	1 800	AW ₃	1.0	23.5	64.9	185	424	385	2.08
大连3*线	1 500	AW ₂	1.0	18.5	80	180	411	369	2.05
在建某城轨	1 650	AW ₃	1.0	21.0	65	190	379	344	1.81

鉴于上述运行特点，有些牵引电机生产厂家提供的电机特性参数除了标明额定功率外，还特别标明在牵引及电制动工况下电机短时最大输出功率(表3)。

表3 牵引和电制动工况时牵引电机短时最大功率

Tab.3 The short-time maximum power in traction and electric braking

公司	牵引电机额定参数			牵引工况		电制动工况	
	功率/kW	电流/A	电压/V	最大功率/kW	过载系数	最大功率/kW	过载系数
东芝	180	115	1 100	288	1.6	333	1.85
	200	128	1 100	283	1.42	413	2.07
阿尔斯通	185	116	1 100	240	1.30	366	1.98
国产	180	219	550	266	1.48	357	1.98

2 牵引逆变器的工作特点——电流浪涌

城轨车辆牵引电机的过载，必然会造成逆变器的

过流。对于逆变器的设计，不但要考虑它的额定容量、输出电流的有效值，而且还要根据牵引和电制动工况的不同，分别考虑在两种工况下通过IGBT和反并联二极管的尖峰电流。

2.1 牵引工况

图1中在恒力矩区与恒功区逆变器输出电流基波有效值相同，但恒力矩区输出电流波形是PWM调制的，而恒功区输出的是方波。方波的谐波含量比PWM波形大，因此本文仅讨论方波工况逆变器的负载情况。

图2是方波工况逆变器输出电流、电压波形图。电

流的谐波含量取决于电机的漏抗与电流的大小。图中， $t_1 \sim t_3$ 电流通过IGBT，在 t_3 点IGBT换流， $t_3 \sim t_4$ 电流通过对应臂与IGBT反并联的二极管续流。可见牵引工况绝大部分的电流通过IGBT(导通时间取决于电机功率因数)。

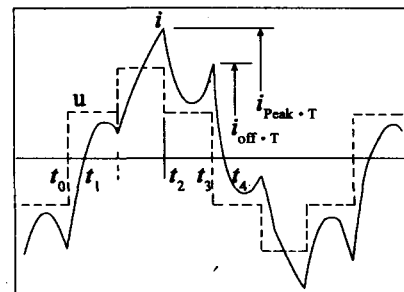


图2 牵引工况逆变器输出电流、电压波形

Fig.2 The output current and voltage waveform of inverter in traction

图2中 t_2 点的电流是IGBT的尖峰电流(I_{peak-T})， t_3 点是IGBT的关断电流

(I_{off-T})。由前面分析可知，电制动工况时逆变器输出功率比牵引工况时大，逆变器能满足电制动要求就必定能满足牵引要求。因此本文着重分析电制动工况。

2.2 电制动工况

图1中的 t_3 点制动功率最大，VVVF逆变器输出电压为方波，其电流、电压波形如图3所示。图中 $t_1 \sim t_2$ 电流通过

IGBT。在 t_2 点IGBT封锁，电流从IGBT换流至对应臂的二极管，该点的电流为IGBT的关断电流(I_{off-T})。 $t_2 \sim t_4$ 电流

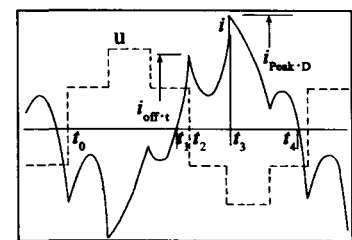


图3 电制动工况逆变器输出电流和电压波形

Fig.3 The output current and voltage waveform of inverter in electric braking

通过二极管。可见电制动时大部份电流通过二极管。
 t_3 点的电流为通过二极管的尖峰电流($I_{peak \cdot D}$)，一般 $I_{off \cdot T} < I_{peak \cdot D}$ 。

$I_{peak \cdot D}$ 是我们应予关注的值。该电流可以衡量电制动时VVVF逆变器短时过载是否合理。逆变器实际容量 Q 可按下式计算：

$$Q = n \cdot P_b / \cos \varphi \quad (3)$$

式中： P_b ——牵引电机输出功率(kW)；
 n ——逆变器供电的并联电机数；

$\cos \varphi$ ——电机功率因数(为作比较，计算时均取0.85)。

$$I_{peak \cdot D} = k \sqrt{2} \cdot \eta_{inv} \cdot Q / 1.73U \quad (4)$$

式中： η_{inv} ——逆变器效率(计算时取0.98)；

U ——电机电压(V)；

k ——谐波系数(取决于电机漏抗，为作比较，参考西门子公司的计算，取 $k=1.15$ 。

对国内一些城轨车辆的牵引特性和电制动特性进行了计算，逆变器主要参数如表4所示。

表4 国内一些城轨车辆主传动系统牵引及电制动工况逆变器主要参数

Tab.4 The main parameters of domestic main drive systems for urban vehicles in traction and electric braking

城轨车辆	逆变器与牵引电机的配置	逆变器的功率电子器件	牵引工况						电制动工况					
			电网电压计算值/V	列车负载	逆变器短时最大输出功率/kW	逆变器短时最大容量/kVA	逆变器短时最大输出电流有效值/A	逆变器短时最大输出电流有效值/A	电网电压计算值/V	列车负载	逆变器短时最大输入功率/kW	逆变器短时最大容量/kVA	逆变器短时最大输出电流有效值/A	逆变器短时最大输出电流有效值/A
北京复八线	1C4M	GTO	750	AW ₂	1 209	1 421	1 404	2 283	750	AW ₂	1 424	1 675	1 622	2 637
				AW ₃	1 238	1 457	1 440	2 342		AW ₃	1 480	1 741	1 685	2 739
北京13号线	1C2M	IGBT	750	AW ₂	594	698	690	1 122	750	AW ₂	614	722	699	1 137
				AW ₃	581	683	675	1 098		AW ₃	634	746	722	1 175
北京八通线	1C2M	IGBT	750	AW ₂	559	658	650	1 057	825	AW ₂	520	612	539	877
				AW ₃	604	711	703	1 143						
上海2号线	1C4M	GTO	1 500	AW ₂	1 019	1 199	592	963		AW ₃	1 916	2 254	909	1 479
上海明珠线	1C4M	IGBT	1 500	AW ₃	1 174	1 831	682	1 109	1 800	AW ₃	1 540	1 812	731	1 189
广州1号线	1C4M	GTO	1 500	AW ₂	989	1 164	575	935	1 800	AW ₂	1 952	2 297	1 112	1 809
广州3号线	1C2M	IGBT	1 500	AW ₃	557	655	323	525	1 500	AW ₂	910	1 070	442	716
										1 800	AW ₃	906	1 065	429
深圳1号线	1C4M	IGBT	1 500	AW ₂	1 166	1 371	677	1 101		AW ₂	1 464	1 722	834	1 356
									70	1 500	AW ₂	1 596	1 878	758
天津滨海线	1C2M	IGBT	1 500	AW ₂	572	673	332	540	1 800	AW ₂	768	904	398	645
				AW ₃	598	703	347	564	1 650					
南京1号线	1C4M	IGBT	1 500	AW ₂	1 010	1 189	587	955		AW ₂	1 376	1 618	783	1 273
			1 800	AW ₂	1 010	1 189	488	794	1 500	AW ₂	1 540	1 812	731	1 189
大连3号线	1C4M	IGBT	1 500	AW ₂	1 212	1 426	705	1 142	1 800	AW ₂	1 476	1 737	841	1 367
在建某城轨	1C4M	IPM	1 500	AW ₂	1 243	1 462	722	1 170	1 500	AW ₃	1 376	1 619	784	1 271
				AW ₃	1 341	1 578	780	1 265	1 650					

由表4可见：

(1) 牵引工况

所有使用IGBT的逆变器，不论是1C4M配置(DC 1 500 V供电)，还是1C2M配置(DC 750 V供电)，通过IGBT的尖峰值电流均未超过它的额定电流1 200 A。上海2号线、广州1号线使用了可关断电流为3 000 A的GTO，它们的逆变器输出电流的有效值都未达到器件的额定值1 200 A，尖峰值远低于3 000 A。北京复八线更特殊，逆变器使用了可关断电流为4 000 A的元件，不论是有效值与尖峰值均大大低于器件的额定值。

(2) 电制动工况

对于使用IGBT的逆变器，凡是1C4M配置的，通过

逆变器中反并联二极管的尖峰电流很大，但均在1 400 A以下。凡是1C2M配置的，上述电流裕量较大。广州1号线，逆变器中与GTO反并联的快速恢复二极管的正向平均电流为720 A，而浪涌电流允许达13 000 A(10 ms)。北京复八线使用2 100 A的二极管。它们均允许通过很大的尖峰电流。

(3) IGBT逆变器电流尖峰允许值

对于3 300 V/1 200 A的IGBT，其反并联二极管的额定电流也是1 200 A。它们还有一个定额是最大脉冲电流 I_{cm} ，均为2 400 A。但允许通过的时间一般为10 ms。在图(1)中 t_3 时，逆变器的基波频率已很高(100 Hz左右)，所谓“瞬时”也得历经数十计周波。因此该峰值不允许

过高。各公司允许取值不同,欧洲某公司取为1 700 A,另一公司仅允许1 400 A。笔者认为不宜超过1 500 A。

3 逆变器与牵引电机的配置

由于逆变器的容量所限,对于最高运行速度为80 km/h的城轨列车,凡使用IGBT的逆变器,不论是DC 1 500 V供电的A型车还是B型车,其配置1C4M能满足要求;而DC 750 V供电的车辆,必须为1C2M配置。例如北京13号线,采用DC 750 V供电。如果采用1C4M配置,则在额定负荷下,IGBT逆变器尖峰电流在牵引工况时达到2 244 A;在电制动工况时达到2 274 A。显然,或者使用电流定额更大的IGBT,或者采用并联IGBT的方法,但这样均会造成散热困难,因此只能采用1C2M配置。但若列车最高运行速度在100 km/h以上,即使是DC 1 500 V供电也是1C2M配置。例如广州3号线与天津滨海线。在这种情况下,由于逆变器容量冗余较大,只要电机功率选配恰当,可以在电制动时达到较大制动功率,使恒制动力最高运行速度(v_b)大为提高。天津滨海线车辆较为突出。列车最高运行速度为100 km/h,电机功率200 kW,1C2M配置, v_b 达到80 km/h,而逆变器尖峰电流仅为元件额定电流的55%,电流裕量很大。

目前国内使用GTO的逆变器只有广州1号线、上海2号线和北京复八线。由于GTO的电流容量大,广州、上海所使用的牵引电机过载能力也大。这两种车辆的 v_b 均达到列车最高运行速度80 km/h。北京复八线是特例,逆变器使用了4 500 V/4 000 A的GTO。因此即使是DC 750 V供电仍可使用1C4M配置。

关于1C2M配置有两种方式。若将一辆车前后转向架中的前后轴分别称作1、2轴及3、4轴。一种方式是两台逆变器分别给1、2轴及3、4轴供电,即“架控”方式。另一种是分别给1、3轴及2、4轴供电。“架控”方式的优点是各转向架独立控制,粘着利用好。对于轮径差造成的电机负荷不平衡的影响,只要严格控制同一转向架两对轮径即可避免。第二种方式虽有改善列车在启/制动时转向架前后轴的减/增载作用,但却失去了“架控”的优点,而且轮径差的影响要按全车来考虑。笔者主张1C2M采用架控方式为宜。

4 轮径差对电机负荷不平衡的影响

由于异步电机硬的力矩特性,轮径的细小差别也会对同一逆变器供电的并联牵引电机负荷分配有极大影响。

牵引工况时若逆变器给定频率为 f_1 ,转子频率为 f_n 。

则转差频率为 $f_s=f_1-f_n$,转差率为 $S=f_s/f_1$ 。列车运行时各动轮轮缘线速度相同,则大轮径所对应的角速度低,即电机转子频率低,因此转差频率及转差率高,电机输出力矩大,反之亦然。而电制动工况时,由于 $f_n>f_1$,转差频率为负值,大轮径所对应的电机力矩小,反之亦然。在同样的电机电压下,负载电流较大的情况下,转子电流比励磁电流大得多,因此电机力矩不平衡程度基本上与电流不平衡相当。

上述情况可用下式说明。设两个动轴的轮径分别为 D_1 、 D_2 。电机转速分别为 n_1 、 n_2 。电机转子频率为 f_{n1} 、 f_{n2} ,则 $f_{n1}/f_{n2}=D_2/D_1$ 。若逆变器供电频率为 f_1 ,则电机转差频率分别为: $f_{s1}=f_1-f_{n1}$; $f_{s2}=f_1-f_{n2}$ 。

两台电机转差频率之差 $\Delta f_s=f_{s1}-f_{s2}=f_{n2}-f_{n1}$

$$\frac{f_{n1}-f_{n2}}{f_{n2}} = \frac{D_1-D_2}{D_2}, \text{即} \Delta f_s = \frac{D_1-D_2}{D_2} f_{n1} \text{ (或) } \Delta f_s = \frac{D_2-D_1}{D_1} f_{n2}$$

列车速度较高时,若 $f_{n1}=100$ Hz,轮径差 $\Delta D=6$ mm, $D_2=805$ mm(半磨耗)

则 $\Delta f_s=0.745$ Hz。可见由 Δf_s 造成的力矩、电流之差是显著的。

力矩不平衡程度与电机特性有关,即与电机的额定转差率 S_N 有关。 S_N 越小,即力矩特性越陡,则影响越大。

力矩不平衡可以用下式表示:

$$\frac{\Delta M}{M} = \left(\frac{1}{S_N} - 1 \right) \frac{\Delta D}{2D} \times 100\%$$

式中: ΔM ——平均力矩偏差;

M ——平均力矩。

现以国内几种有代表性的城轨车辆的牵引电机特性计算 $\Delta M/M$ 与 ΔD 的关系(取 $\Delta D=6$ mm)(表5)。

表5 力矩不平衡与电机转差率的关系

Tab.5 The relation between unbalanced-torque and electric motor slip

城轨车辆	逆变器与牵引电机的配置	供电电压DC/V	电机功率/kW	电机额定转差率/%	$\Delta M/M$ /%
北京复八线	1C4M	750	180	2.4	15.2
天津滨海线	1C2M	1 500	200	1.7	21.6
北京13号线	1C2M	750	180	1.4	26.3
南京1号线	1C4M	1 500	185	1.1	33.5

上表是平均值之差。若以绝对值比较相差更大。

列车运行时轮径差的影响是随速度而变的。因为在牵引加速和制动减速的不同阶段对转差频率的控制不同(表6),而逆变器输出频率即电机定子频率随速度成正比变化。因此不同转速下转差率不同, ΔM 也不同。

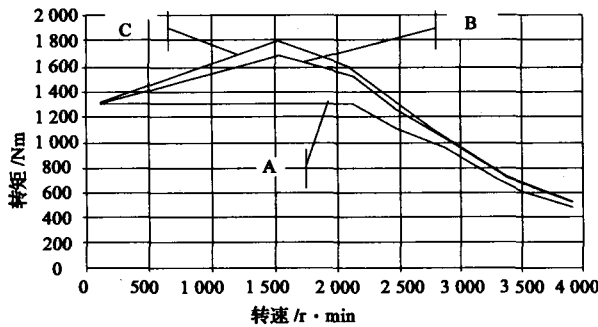
图4是庞巴迪公司提供的在牵引和电制动工况下不同速度、不同轮径差时的力矩不平衡曲线。

表6 牵引与电制动工况不同运行阶段的电机转差频率

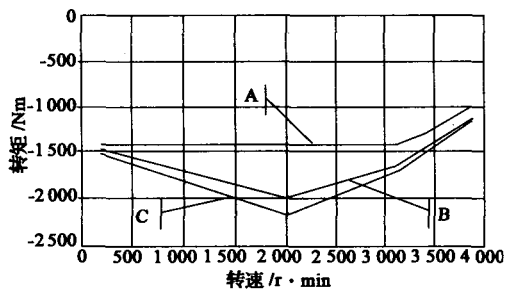
Tab. 6 The electrical motorslipofractionandelectricbraking in the different operation phases

(加速方向↓) 牵引工况	恒力矩区	$f_s=C_1$	(加速方向↓) 牵引工况	恒电压区	$f_s=C_3$
	恒功率区	$f_s \propto f_1$		恒电压	$ f_s \propto f_1^2$
	自然特性区	$f_s=C_2$		恒磁通	$f_s=C_4$
				恒力矩区	

注: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 均为常数



(a) 牵引工况



(b) 电制动工况

计算条件: 轮径805mm, 齿轮传动比7.07, (未标明电机额定转差率)

- A —— 等轮径情况下的电机力矩; B —— 轮径差为6mm情况下的最大负载的电机力矩;
- C —— 轮径差为8mm情况下的最大负载的电机力矩。

图4 牵引与电制动工况力矩不平衡曲线

Fig.4 Unbalanced-curves in traction and electric braking

由图可见, 牵引工况时, 与等轮径时的力矩相比, 力矩不平衡最严重的情况发生在电机转速1500 r/min时(相当于列车运行速度32.2 km/h)。当 $\Delta D=8$ mm时, $\Delta M/M=38\%$; 当 $\Delta D=6$ mm时, $\Delta M/M=26\%$ 。电制动工况时, 最严重的情况是在电机转速2000 r/min时,(相当于列车运行速度42.9 km/h)。当 $\Delta D=8$ mm时, $\Delta M/M=52\%$; 当 $\Delta D=6$ mm时, $\Delta M/M=40\%$ 。

图(5)是东芝公司提供的在牵引工况电机负荷不平衡计算结果。图中牵引力以粘着系数来表示。由图可见, 当 $\Delta D=3$ mm时, 大轮的负荷是小轮的1.34倍。 $\Delta M/M=15\%$ 。

轮径允差的标准各国略有差异, 如对于同一辆车,

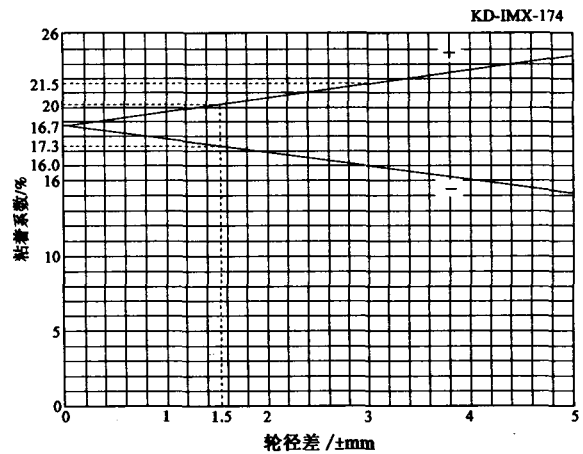


图5 轮径差对电机负荷不平衡的影响

Fig.5 The influence of radius disparity on load unbalance of electric motor

日本采用6 mm; 欧洲采用8 mm或7.5 mm。允差值大有利于用户, 可以延长镲轮的间隔时间。这取决于电机的额定转差率与过负荷能力。笔者认为电机额定转差率取折衷值对各方面均有利(电机效率、易于控制、负荷平衡)、轮径允差宜取欧洲标准。

5 结论与建议

通过对所述城轨车辆的牵引/电制动特性曲线及牵引电机与逆变器特性参数的综合分析, 建议如下:

- (1) 城轨车辆的牵引电机设计要考虑它的过载能力, 牵引工况时应能承受50%的“短时”过载; 电制动工况时应能承受100%的“瞬时”过载。
- (2) 城轨车辆的牵引逆变器设计不但要考虑它的额定容量, 而且要考虑它的输出峰值电流。特别是电制动时, 采用1200 A IGBT的逆变器, 在电制动时尖峰电流不得超过1500 A。
- (3) 当逆变器与牵引电机采用1C2M配置时, 以“架控”方式较为有利。
- (4) 轮径差对负荷不平衡的影响应考虑两方面: 一是选用额定转差率值折衷的电机; 二是轮径允差选用欧洲标准, 这样有利于用户。

参考文献:

- [1] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 李军, 孙三其. 地铁动车组主要参数选择[J]. 机车电传动, 2001, (6): 33 - 36.
- [3] 江采玉, 等. 城市轨道交通车辆异步牵引电机额定参数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2003(3).
- [4] 鲍维千. 地铁及轻轨车辆的运行性能[J]. 电力机车技术, 1999, (4): 9-11.